

Symposium C02

High Performance Aluminum Alloys

高性能铝合金

2017年7月8-12日

分会主席:

熊柏青	北京有色金属研究总院
张济山	北京科技大学
陈江华	湖南大学
邓运来	中南大学
赵丕植	中铝科学院

联系人:

张永安	北京有色金属研究总院
电话: 13801334158	
邮箱: zhangyongan@grinm.com	

刘冬梅	北京有色金属研究总院
电话: 13391672445	
邮箱: liudm@grinm.com	

C02. 高性能铝合金

分会主席：熊柏青、张济山、陈江华、邓运来、赵丕植

C02-01(Keynote)

同步辐射 X 射线小角散射技术在 7000 系铝合金纳米尺度析出相研究中的应用

熊柏青

北京有色金属研究总院，北京 100088

7000 系 (Al-Zn-Mg-Cu 系) 铝合金是所有变形铝合金中强度最高的一类，广泛应用于航空航天、交通运输等领域。新一代飞机的发展对 7000 系铝合金的性能提出了越来越高的要求。除高的比强度外，还要求该系合金具有高的损伤容限和耐腐蚀能力。近些年来，飞机结构件大型化、一体化的发展趋势还对 7000 系铝合金的淬火敏感性提出了要求。作为一种典型的可时效强化型合金，7000 系铝合金的强度等性能主要依赖于合金在时效过程中析出的纳米尺度沉淀析出相。几十年来，为了提高合金强度，同时获得优异的综合性能，国内外材料学家们从不同方向入手，推动了一代又一代 7000 系铝合金材料与热处理技术的发展。其中一个重要方向是调整主合金元素的比例和总含量；另一重要方向是开发新型的时效热处理制度。无论是调整合金成分还是变换热处理制度，最终目的都是为了改变纳米尺度沉淀析出相的几何特征，最终提升合金性能。因此，定量研究合金中纳米析出相的体积分数、数量密度、尺寸分布、形状、质点间距等几何特征参数，对合金综合性能预测、指导合金成分与工艺设计具有重要的作用。利用传统的透射电子显微镜 (TEM) 和三维原子探针技术 (3DAP) 可以对析出相的形状、尺寸和化学组成进行直接研究，但由于视场的局限性，难以获得关于析出相体积分数等的定量信息。相比之下，X 射线小角散射技术，可以同时从 10^{-11} 量级以上数目的析出相进行统计性定量研究，对 TEM 和 3DAP 是一种有效的补充方法。本工作在 TEM 工作基础上，利用同步辐射 X 射线小角散射技术 (SAXS)，对不同成分和时效制度下，7000 系铝合金中纳米析出相的几何特征进行了统计性定量研究；并以此为基础探讨同步辐射 X 射线小角散射技术在 7000 系铝合金纳米尺度析出相定量研究中的应用。

关键词：同步辐射 X 射线小角散射技术；7000 系铝合金；纳米尺度析出相；定量研究

C02-02(Keynote)

装备轻量化铝合金的电子显微学

陈江华

湖南大学材料科学与工程学院高分辨电镜中心，湖南 长沙 410082

高强铝合金中尺寸细小的早期强化相的成分、结构以及演变的表征尚存在难度，这一直以来限制着高强铝合金的发展。我们的研究通过采用原子分辨率的透射电镜 (TEM) 成像技术和第一性原理计算来解决这些问题。近年来，我们研究了大量典型的高强铝合金，例如 2xxx 系 (AlCu, AlCuMg 和 AlCuLiMg)，6xxx 系 (AlMgSi 和 AlMgSiCu) 和 7xxx 系 (AlZnMg 和 AlZnMgCu) 合金，采用了不同的合金成分，并进行了不同的热处理工艺，以便理解“性能-结构-工艺”之间的关系。结合球差校正的高分辨 TEM 和球差校正的扫描 TEM (STEM)，我们的主要关注点在于重新认识在这些重要的合金中出现的强化相以及阐明过去遗留下来的关于它们的析出行为的争议。我们的研究表明：(1) STEM 的原子分辨率成像技术可以在原子尺度提供直观的析出相结构模型，但是 HRTEM 的原子分辨率成像技术具备快速定量的图像模拟分析可能，可以提供超出电镜的分辨率极限精度的精细的析出相结构。这两种技术的结合可以更有效地解决材料科学中的显微结构难题。(2) 铝合金中大多数早期析出相的成分和结构都是高度动态的。随着时效的进行，这些动态析出相的形核，成熟和生长通常遵循特定的演变路径，并且有特征的基因骨架来引导它们各自的演变。我们的研究所揭示的精细的析出规律与目前所发表的教科书和文献中的理解非常不同。

关键词：电子显微镜；铝合金；析出相；相转变

C02-03(Invited)

热力耦合作用对搅拌摩擦铝锂合金微观组织和力学性能的影响

孙建秋, 高崇, 马岳*, 马朝利

北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191

研究 2198 铝锂合金热机械处理条件下, 热力耦合作用对其微观结构和力学性能的影响。采用搅拌摩擦点焊(FSSW)技术对 2198 铝锂合金进行处理, 形成析出相和晶粒度分布不均匀组织。根据 FSSW 的热力学和动力学特性, 搅拌摩擦点焊(FSSW) 2198 铝锂合金微观组织分为三个区域: 热力影响区(TMAZ), 热影响区(HAZ)和基材(BM)。采用 SEM、XRD 和 TEM 等手段分析了其微观组织特征, 研究结果表明: 2198 铝锂合金经过 FSSW 处理后, 热力影响区(TMAZ)及热影响区(HAZ)的晶粒组织显著细化, 约为 $5\ \mu\text{m}$ 。然而, 在 TMAZ 区析出相完全溶解和在影响区(HAZ)析出相有所减少。FSSW 2198 铝锂合金不均匀微观组织的力学性能测试结果表明: 2198 铝锂合金经过 FSSW 处理后, 不均匀组织的抗拉强度有所下降, 其原因可能由于组织中强化相 T1 相的溶解。而对 FSSW 2198 铝锂合金进行 175°C 36 h 时效处理后, 其抗拉强度从 373 MPa 提高到 423MPa, 可能由于 T1 相在失效过程中再析出。

C02-04

汽车用新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 系合金的非等温沉淀行为研究

郭明星, 袁波, 李高洁, 张济山, 庄林忠

北京科技大学, 北京 100083

由于 Al-Mg-Si-Cu 系合金具有优异的高比强度、耐蚀性、成形性能等, 该系合金已被广泛应用于车身外板的制造。但是与汽车用钢相比, 其成形性能和抗凹陷能力仍然有待进一步提高。为此, 本文设计开发了一种全新的具有快速时效响应特性的 Al-Mg-Si-Cu-Zn 系合金, 并采用 DSC、硬度测量以及显微组织表征等对自然时效或预时效态该系合金的非等温沉淀行为进行了研究。研究结果如下: 不同含量 Zn 的添加对于合金非等温热处理过程中的 GP 区和沉淀相形成, 及其对应的激活能均影响显著, Zn 元素添加 0.5wt% 和 3.0wt% 时均可以有效促进沉淀析出动力学, 但是添加 1.5wt% 时会抑制沉淀相的析出。不同 Zn 含量的预时效态合金以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 250°C 时非等温析出的沉淀相仍以 Mg-Si 沉淀相为主(包括 GP 区和 β'' 相等), 无 Mg-Zn 相出现, 后者主要由于 Mg-Zn 相在较高温度下会发生回溶所致。此外, 建立的沉淀析出动力学预测的时效响应结果与人工时效实测值吻合较好, 而且含 3.0wt% Zn 预时效态合金人工时效时出现的双峰现象也是由于不同 Mg-Si 相析出所致, 即 $\text{pre-}\beta''$ 和 β'' 相。最后, 基于组织演化和不同溶质元素间相互作用, 本文提出了 Al-Mg-Si-Cu-Zn 系合金沉淀析出机制。

关键词: Al-Mg-Si-Cu-Zn 系合金; 沉淀动力学; 自然时效; 预时效; 沉淀机制

C02-05

Al-Mg-Si 合金自然时效对后续人工时效的影响

赖玉香, 郑雄

湖南大学材料科学与工程学院高分辨电镜中心, 湖南 长沙 410082

由于自然时效的负面影响是 6xxx 铝合金中最严重的问题之一, 近年来该问题已成为该合金领域的研究热点。但是, 由于自然时效负面影响的复杂性以及研究手段的限制, 对该负面影响的解释仍然存在很大争议。本工作利用硬度测试和透射电镜表征, 致力于研究 Al-Mg-Si 合金中自然时效对后续人工时效影响的机理。对于富镁的 Al-Mg-Si 合金, 当直接进行 180°C 时效时, 合金主要强化相为单斜的 β'' 相, 而当直接进行 250°C 时效时, 合金主要强化相为六角形的 β' 相。我们研究发现人工时效前的自然时效可以逐渐改变并最终反转析出相的析出路径, 也就是说对于经历了长时间自然时效的样品, 在 180°C 时效时 β' 相变为合金主要析出相, 而在 250°C 时效时 β'' 相为主要析出相。这种析出路径反转的现象导致合金在 180°C 时效时自然时效对人工时效有负面影响, 而在 250°C 时效时有正面影响。我们在一种低含量的 Al-Mg-Si 中发现

了另外一个析出路径反转的现象。在该合金中，当直接进行 180 °C 时效时，析出相类型为 β' (B' / U_2) 相，而当人工时效前引入自然时效时，随着自然时效时间的延长，析出路径逐渐被改变，最终析出相类型为 β'' 相。析出路径的反转解释了该合金自然时效的正面影响。我们的结果表明析出相的析出路径与合金成分和自然时效团簇密切相关。

关键词：Al-Mg-Si 合金；自然时效；人工时效；析出；透射电镜

C02-06

汽车用 5754H22 合金板材再结晶行为与冷轧率的关系

刘贞山，赵丕植，赵经纬

中铝材料应用研究院有限公司

随着汽车轻量化的深入开展，5754 合金板材被广泛采用。5754H22 常被用作结构件，其强度、成形性与晶粒大小、织构有着重要的影响关系，但是鲜有报道。本文采用工业生产的 5754 H22 合金板材，采用拉伸、金相、扫描电镜及 EBSD 等分析手段，研究在不同冷轧率、退火温度、退火时间条件下，其再结晶行为的变化规律。研究发现在 50-75% 冷轧率范围内，随冷轧率提高，整体晶粒尺寸变大，但接近表面处（约 0.1t）晶粒变化不大，再结晶立方织构增强，轧制 S/R 织构减低。同时，作者通过建立再结晶率-力学性能模型，考察了 5754 合金板材的晶粒长大动力学。

关键词：再结晶；冷轧率；晶粒长大

C02-07

微量钪添加对中强 Al-Zn-Mg 合金腐蚀行为的影响

李召明^{1,2}，姜海昌¹，戎利建¹

1. 中国科学院金属研究所，沈阳 110016

2. 中国科学院大学，北京 100049

本文通过电化学测试、失重实验、晶间腐蚀和剥落腐蚀实验研究了微量钪（0.06、0.11 wt.%）添加对中强 Al-Zn-Mg 合金腐蚀行为的影响。结果表明：随钪含量增加，挤压板材的再结晶分数和晶粒尺寸降低，从而导致合金的耐均匀腐蚀和耐点蚀性能增加以及腐蚀电流密度降低；钪添加能优化晶界析出相的分布，降低无沉淀析出带（PFZ）宽度，但导致 PFZ 中锌和镁含量增加，进而提高其电化学活性，因此晶界微观结构和微化学的相互作用使合金的耐晶间腐蚀和剥落腐蚀性能呈先增加后降低趋势。

关键词：铝合金；均匀腐蚀；极化曲线；点蚀；晶间腐蚀；剥落腐蚀

C02-08

2060 铝锂合金组织特征及疲劳损伤行为

李国爱，王亮，郝敏

北京航空材料研究院

目的：对目前最为先进的第四代铝锂合金 2060 合金的组织特征及疲劳损伤行为进行研究，掌握微观特征与疲劳性能之间的关系，从而为耐损伤铝锂合金的组织调控提供依据。本文通过带有原位观察设备的疲劳试验机、金相显微镜、EBSD、SEM 以及 TEM 等设备，对 2060 铝锂合金的组织特征、疲劳损伤行为以及疲劳试验过程中微观组织的演变过程进行了系统研究。结果表明：2060 铝锂合金为部分再结晶的块状嵌套组织形貌，织构类型以立方织构和高斯织构为主，晶内析出相主要为 T1 相及 S' 相，尺寸在 50~100nm；轴向加载疲劳时，裂纹沿试样边部与加载方向呈 45° 方向萌生并向晶内扩展，在到达并穿过第一个晶界后发生偏折，变为垂直于加载方向扩展，进一步扩展时，遇到其他晶界，裂纹发生小的偏折，但基本方向不变，直至最终发生瞬断。结论：裂纹萌生和扩展过程中，裂纹尖端出现了较大的塑性变形区，该区域中 T1

以及 S'相被位错切过，降低了尖端的应力集中。合金中较大的晶粒取向差以及小尺寸可被位错切过的析出相是疲劳裂纹呈锯齿状扩展的主要原因。

关键词：2060 铝锂合金；疲劳损伤行为；织构；析出相

C02-09(Invited)

7050 厚板淬火-预拉伸残余应力有限元分析研究

刘成，王军强，牛关梅，杨中玉，曹海龙

中铝材料应用研究院有限公司

7050 厚板在航空航天领域得到广泛应用，然而淬火过程收缩不均产生的残余应力，易造成结构件的后续加工变形及报废，预拉伸是降低铝合金厚板淬火残余应力的有效方法。本文建立了淬火、预拉伸全流程有限元仿真模型，并采用 X 射线法、裂纹柔度法、超声法等验证了模拟结果的可靠性。淬火有限元分析结果表明辊底炉喷水量与热交换系数及残余应力正相关，辊速对残余应力影响不显著，淬火温度 150℃~250℃ 对应力影响显著，从而为生产过程中辊底炉参数选择、辊底炉不同段喷水量提供指导；将淬火残余应力作为初始状态，建立了预拉伸有限元模型，研究表明随着预拉伸量的增加残余应力逐渐降低，预拉伸量小于 1.5%前初始残余应力部分继承，大于 1.5%后残余应力趋于平缓，初始淬火应力对板材应力的影响逐渐减小；低淬火参数下，预拉伸量 1.5%~2.5%时应力不均匀段长度小于 270mm，高淬火参数下，预拉伸量 2.5%~3.0%时应力不均匀段长度小于 310mm（200mm 夹持长度）。基于有限元对淬火、预拉伸过程残余应力的演变规律，可为 7050 厚板的淬火、预拉伸工艺的快速高效优化提供规律指导。

关键词：7050 厚板；航空航天；残余应力；淬火；预拉伸；有限元

C02-10(Invited)

不均匀化处理对车身用 Al-1.01Mg-1.11Si-0.38Cu-0.69Mn 铝合金热轧板显微组织的影响

田妮¹，王光东¹，张泽宇¹，何长树¹，赵刚¹，左良²

1. 东北大学材料科学与工程学院

2. 东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室

车身轻量化已经成为当今汽车优化设计的主要发展方向之一。可热处理强化的 6xxx 系铝合金板材由于具有高的比强度、良好的成形性及烘烤硬化能力、抗蚀易回收等特点成为首选的理想轻质汽车车身板材。近年来，利用短流程生产工艺进一步提高车身用铝板的生产效率，减少能耗和环境污染，降低生产成本低的研究备受关注。本文借助金相显微镜、扫描电镜及 SEM/EDS 测定分析，对比研究了汽车车身板用 DC 铸造 Al-1.01Mg-1.11Si-0.38Cu-0.69Mn 铝合金铸锭经常规均匀化处理后热轧及不经均匀化处理直接热轧后板材的显微组织。结果表明：DC 铸造 Al-1.01Mg-1.11Si-0.38Cu-0.69Mn 铝合金铸锭中主要存在 AlMgSi、AlCuMgSi 和 AlFeMnSi 三类结晶相。经 545℃×24h 常规均匀化处理后，黑色 AlMgSi 相和白亮颗粒状 AlCuMgSi 相回溶入基体消失，灰色 AlFeMnSi 相部分溶解收缩、球化、粗化，同时在枝晶晶干内出现大量细小的弥散相粒子。经常规均匀化处理的铸锭及不经均匀化处理的铸锭热轧后结晶相均沿轧向呈碎链状分布，当热轧变形量达到 93%时，2.5mm 厚热轧板表面及中心层组织大致相同。热轧板再经 545℃×2h 固溶水淬处理后结晶相数量均减少且均发生再结晶，然而与铸锭经均匀化处理后热轧的板材相比，铸锭不经均匀化处理直接热轧的板材中结晶相尺寸更小、数量更多，分布更均匀，板材再结晶不充分。

关键词：Al-Mg-Si-Cu 铝合金；汽车车身板；不均匀化处理；热轧；显微组织

C02-11

Al-Cu-Li 合金生长的共生相的界面结构演变

伍翠兰

湖南大学材料科学与工程学院高分辨电镜中心，湖南 长沙 410082

在低 Li 含量的高性能 Al-Cu-Li 合金中, δ' 相通常会在 GP 区或者 θ' 相的两侧异质形核, 形成 $\delta'/\text{GP}/\delta'$ 共生相或者 $\delta'/\theta'/\delta'$ 共生相。利用原子分辨率的扫描透射电镜和第一性原理计算, 我们研究了这些共生相的界面结构和演变规律, 并将它们与合金性能联系起来。研究表明, 就 Cu-Li 原子相对位置来说, 这些共生相具有相似的界面结构: 界面上的 Li 原子占据了界面 Cu 原子的第二近邻位置。在 $\delta'/\theta'/\delta'$ 共生相中, 两侧的 δ' 相具有同相和反相这两种关系, 并且这种同相/反相关系取决于中间的 θ' 相所包含的 Cu 原子层数。具体来说, 当 θ' 相的 Cu 原子由偶数层变为奇数层时, 反相的 $\delta'/\theta'/\delta'$ 共生相会变成同相的 $\delta'/\theta'/\delta'$ 共生相, 反之亦然。由于这些共生相中的 θ' 相增厚过程为逐层增厚机制控制, 它们的生长涉及界面关系的转换, 这需要通过复杂的结构调整才能实现 (直到两侧的 δ' 相与最终优化的界面结构相适应), 因此 θ' 相的粗化过程受到明显抑制, 这也是该合金中 θ' 相得到细化的原因。第一性原理计算证实了共生相的形成在能量上是有利的。当 θ'/Al 界面被 $\text{Al}/\delta'/\theta'/\delta'/\text{Al}$ 界面取代时, 界面能和系统总能量都能显著降低。
关键词: 铝合金; 析出相; 界面; 电子显微镜; 形成能

C02-12

7055 铝合金淬火态板材残余应力测试方法研究

闫宏伟, 李锡武, 李亚楠, 李志辉, 黄树晖, 闫丽珍, 张永安

北京有色金属研究总院, 北京 100088

从残余应力相关研究开始后, 如何准确地测试残余应力一直是学者争论地问题。本研究中, 利用传统及新型的测试方法对不同 7055 铝合金淬火态板材残余应力进行测试。测试方法包括钻孔法、基于 $\sin^2\Psi$ 法及 $\cos\alpha$ 法的 X 射线衍射法、基于临界折射纵波法的超声波测试法、裂纹柔度法、应变云图法及中子衍射法。同时应用有限元方法模拟淬火态板材残余应力分布, 与测试结果作为对比。研究表明, 在测试条件完全相同的条件下, X 射线衍射法的重复测试误差在可接受范围内; X 射线法测试得到应力绝对值较钻孔法偏大; 在柔度函数选择合理的前提下, 裂纹柔度法对残余应力的测试结果与中子衍射测试较为接近。不同固溶淬火条件下, 不同的测试方法均能表现出淬火冷却速度越大, 残余应力绝对值越大的规律。

关键词: 残余应力; 淬火; 铝合金板材; 测试

C02-13

Al-9.39Zn-1.92Mg-1.98Cu 合金的热变形力学行为及其物理模型

石国辉, 张永安*, 李锡武, 李志辉, 熊柏青, 黄树晖, 闫丽珍, 闫宏伟

北京有色金属研究总院, 北京 100088

本文对 Al-9.39Zn-1.92Mg-1.98Cu 合金做等温热模拟压缩实验, 变形温度为 $300^\circ\text{C}\sim 460^\circ\text{C}$, 应变速率为 $0.001\text{s}^{-1}\sim 10\text{s}^{-1}$, 变形量为 60%。结果表明: 变形时, 合金的流变应力力随着变形温度的降低或应变速率的增大而增大; 考虑热变形时的摩擦因素, 对流变应力曲线进行修正, 结果发现摩擦修正后的应力值低于实验值, 摩擦力对流变应力的影响程度随着温度的降低和应变速率的增大而增大; 基于经典的 Arrhenius 方程, 考虑应变率对材料常数(α , n , Q 和 A)的影响, 构建该合金在热变形时的本构方程, 通过本构方程预测的流变应力值与实测值吻合度较高, 相关度高达 93.5%; 较高的温度和较低的应变速率有益于 Al-9.39Zn-1.92Mg-1.98Cu 的高温热变形行为。

关键词: Al-9.39Zn-1.92Mg-1.98Cu 合金; 热变形; 流变应力曲线; 本构方程物理模型

C02-14

超细晶 Al-Mg-Si 合金薄带的烧结及其腐蚀性能研究

倪释凌, 倪东惠, 欧永亮, 张伟鹏, 李烈军

华南理工大学

用熔体旋淬技术甩出 Al-0.7Mg-0.6Si-0.2Fe-0.2Cu (Al-Mg-Si) 铝合金薄带, 并以放电等离子烧结制备出两种不同密度的 Al-Mg-Si 粉末冶金材料。然后利用电化学和浸泡实验, 在 0.1 M 和 0.6 M NaCl 溶液里对烧结试样进行腐蚀性能研究。用光学显微镜和扫描电镜观察 Al-Mg-Si 薄带和烧结试样在腐蚀试验前、后的显微组织。利用图像分析软件测定经浸泡后试样表面各种腐蚀特征的相对比例。实验结果表明: Al-Mg-Si 铝合金带薄含有大量的超细晶组织, 而经 500°C 放电等离子烧结的试样, 其显微组织则略微长大成粒径为几微米的细晶组织。以低于 500°C 的温度烧结虽然可以抑制晶粒的长大, 但烧结体的密度明显降低。相对于致密的 Al-Mg-Si 板材, 烧结铝合金的抗腐蚀性能较低。电化学实验的结果表明, 孔隙率是影响烧结材料抗腐蚀性能的关键因素, 孔隙率越高抗腐蚀性能越差。

关键词: 细晶 Al-Mg-Si 合金; 粉末冶金; 腐蚀性能; 电化学实验

C02-15(Keynote)

中国铝合金汽车板的应用及研究开发动向

赵丕植

中铝材料应用技术研究院

为了节能减排, 防止地球温暖化, 提高安全性能, 全世界都在使用铝合金板材实现汽车的轻量化。新能源汽车的铝板采用正在加速铝合金板材的应用。中国汽车轻量化的序幕已经拉开, 覆盖件用铝合金板材市场规模 2016 年 7 万吨、2020 年超过 30 万吨。2020 年内饰结构件及商用车板材超过 70 万吨。中国铝业公司已经具备铝合金汽车板的产业化条件, 试制的 AA6016、AA5182 铝合金汽车板材的性能满足汽车公司需求。正在开发更高强度、更优成形性的汽车铝板。

关键词: 汽车轻量化; 新能源汽车; 铝合金汽车板; AA6016; AA5182

C02-16(Keynote)

汽车用新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 合金开发、加工和应用研究

张济山, 郭明星, 庄林忠

北京科技大学, 北京 100083

Al-Mg-Si-Cu 系合金作为可热处理强化型铝合金, 由于其具有众多优点而被广泛应用于车身外板的制造, 但是 Al-Mg-Si-Cu 系合金成形性能、烤漆硬化能力和弯边性能等均有待进一步提高。针对这些问题, 本文设计开发了一种汽车用新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 合金材料, 通过系统研究不同热加工和时效工艺对其组织、织构以及性能的影响规律, 开发的合金板材可兼具有优异的烤漆硬化能力和成形性能, 具体结论如下: 溶质元素 Zn 的添加可促进该合金内 Mg-Si 溶质原子团簇的形成, 若辅以合适预时效工艺调控, 该合金烤漆硬化增量可远高于 120MPa; 不同热加工工艺对该合金热加工过程中的组织演化影响不大, 但是会显著影响固溶淬火态组织, 尤其若在中间退火前采用较大冷轧变形量加工, 会使得合金基体内的粒子得到充分破碎且基体获得较大的应变储能, 中间退火后的沉淀相粒子尺寸和浓度均会增加, 经后续冷精轧以及固溶处理后, 合金基体内的组织和织构可以获得较好搭配, 即晶粒尺寸呈双模型分布特征, 而织构明显获得弱化, 最终使得该新型铝合金板材表现出优异的冲压成形性能 ($r > 0.6$, $\Delta r < 0.1$, $\delta > 28\%$); 此外, 经热加工工艺调控后具有优异成形性能的预时效态合金板材, 如果对其进行一定的预变形, 其在 185°C 时效时的析出速率明显加快, 且峰时效态的屈服强度也可获得大幅提高 ($> 390\text{MPa}$); 最后, 基于上述加工工艺开发的高成形性合金板材可用于冲压成形不同典型汽车零部件, 如顶盖加强梁、前轮罩后板、A 柱内板等。

关键词: 新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 合金; 热加工; 时效响应; 成形性能; 应用

C02-17

Research on porous defects classification and evolution in spray-formed Al-Zn-Mg-Cu alloy

黄树晖, 李志辉, 熊柏青, 张永安, 李锡武, 刘红伟, 闫宏伟, 闫丽珍

北京有色金属研究总院, 北京 100088

The porous defects classification and evolution in spray-formed Al-Zn-Mg-Cu alloy is researched in this paper, during spray forming, hot isostatic pressing (HIP) and homogenization. Metallographic microscope and scanning electron microscope (SEM) are used to research the microstructure and porous defects. The results show that, there are four kinds of porous defects in spray-formed alloy, which are distinguish by the reasons of formation and shape. The first kind, the second kind and the third kind porous defects contain gas, and the forth kind porous defect does not. The forth kind porous defect can be eliminated by HIP, but the others only can be compressed to very small. After homogenization, the porous defects with gas will grow up and be observed easily again, unless some porous defects connected with ingot surface through the other porous defects which can exhaust gas during HIP. The second phase in ingot restores back mostly after 440°C/12h+474°C/48h homogenization, and the grain size is about 10~20 μm .

Keywords: Spray-formed; aluminum alloy; porous defects; classification and evolution

C02-18

Zr 对 Al-Zn-Mg 合金局部腐蚀性能的影响

刘胜胆^{1,2,3}, 柴文茹^{1,2,3}, 汪庆^{1,2,3}, 潘清林^{1,2,3}, 李安德⁴

1. 中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083
2. 中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙 410083
3. 中南大学有色金属先进结构材料与制造协同创新中心, 长沙 410083
4. 晟通科技集团有限公司, 长沙 410200

Al-Zn-Mg 合金(7xxx 系)强度较高, 韧性和疲劳性能较好, 且因其热变形优良, 热裂倾向小而具备较好的焊接性能, 特别适合于制造需要焊接的高性能结构, 如高速列车的车厢主承力件等。添加不同微量元素对铝合金进行微合金化, 是现阶段提高高强铝合金性能的重要手段。本文目的是研究微量元素 Zr 对 Al-Zn-Mg 合金局部腐蚀性能的影响, 探究 Zr 的添加影响铝锌镁合金局部腐蚀性能的规律和机理。实验材料为两块 3mm 厚铝合金板材, 合金名义成分为 Zn 4.4%, Mg 2.0%, Cu 0.15%, Zr 分别为 0% (合金 A) 和 0.12% (合金 B), 余量为 Al。通过晶间腐蚀浸泡实验、剥落腐蚀浸泡实验, 极化曲线试验和电化学阻抗谱测试, 研究了 Zr 元素对 Al-Zn-Mg 合金晶间腐蚀和剥落腐蚀敏感性的影响, 并结合金相显微镜 (OM)、电子背散射衍射分析技术 (EBSD) 和扫描透射电镜 (STEM) 等表征手段对影响机理进行分析和讨论。含 Zr 合金的自腐蚀电位更正, 自腐蚀电流密度更大; 无 Zr 合金的晶间腐蚀等级为 3 级, 最大腐蚀深度为 61 μm , 含 Zr 合金的晶间腐蚀等级为 3 级, 最大腐蚀深度为 46 μm ; 无 Zr 合金无明显的剥落腐蚀倾向, 最大腐蚀深度为 264 μm , 含 Zr 合金有明显的剥落腐蚀特征, 剥落腐蚀等级为 EB 级, 最大腐蚀深度为 467 μm 。微量 Zr 的添加细化了晶粒, 阻碍了再结晶, 无 Zr 合金发生了完全再结晶, 晶粒呈近似等轴状, 含 Zr 合金仅发生部分再结晶, 再结晶分数为 30.5%, 晶粒形貌由近似等轴晶变为沿轧制方向拉长的扁平状; 结合晶界 η 相尺寸、间距、成分、晶界无沉淀析出带宽度的变化对影响机制进行了分析。Al-Zn-Mg 合金中添加微量 Zr 后, 出现明显的剥落腐蚀倾向且最大腐蚀深度变大。Zr 的添加细化了晶粒, 强烈抑制了再结晶, 晶粒形貌由近似等轴晶变为沿轧制方向拉长的扁平状。

关键词: Al-Zn-Mg; Zr; 晶间腐蚀; 剥落腐蚀; 显微组织

C02-19(Invited)

铸轧 3003 铝合金箔材制造过程中的微结构演变及其对性能的影响

林林

西南铝业 (集团) 有限责任公司

C02-20(Invited)

固溶处理对 7056 合金板材组织与性能的影响

王国军

东北轻合金有限责任公司

C02-21(Invited)

交叉轧制对汽车车身用 6016 铝合金板材组织的影响

田妮¹, 王光东¹, 何长树¹, 赵刚¹, 左良²

1. 东北大学材料科学与工程学院

2. 东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室

车身铝化是目前汽车节能减排的重要途径。6016 铝合金板材不仅具有良好的比强度、成形性和耐蚀性，还可借助烤漆处理实现烘烤硬化，因而成为汽车车身用铝板的主流。众所周知，织构是决定 6016 铝合金车身板材成形性的关键因素之一，铝合金板材的热轧、退火、冷轧、固溶工艺环节对板材的织构组分有重要影响。针对汽车车身用 6016 铝合金，采用 XRD 织构测定结合 SEM-EBSD 测定分析手段，对比研究了交叉热轧+交叉冷轧（称为交叉轧制）及传统单向顺轧对铝合金冷轧板形变织构和再结晶织构的影响。结果表明，6016 铝合金板材单向顺轧后的变形织构组分主要为 Copper 和 Brass，其体积分数分别为 34.4%和 19.3%；交叉轧制 6016 铝合金板材的变形织构组分主要为 Brass，体积分数为 23.5%，同时还有少量的 Q、P、Gauss、R 和 S 织构，其体积分数均超过 4.95%，但无 Copper 织构。冷轧板经 550℃×15min 固溶处理后均发生完全再结晶，单向顺轧的 6016 铝合金板材的再结晶织构较强，主要包含 Cube、P 和 R 织构，其体积分数均超过 8.2%；交叉轧制 6016 铝合金板材的再结晶织构很弱，主要为 Gauss、Brass、Cube 和 P 织构，其体积分数均小于 5.5%。

关键词：6016 铝合金；汽车车身板；交叉轧制；织构；再结晶

C02-22

析出强化型 Al-5.1Mg-3.0Zn 合金的抗晶间腐蚀行为

张迪, 侯胜利, 张济山, 庄林忠

北京科技大学

在传统 5×××系铝合金中添加适量的 Zn 元素，可以将合金由加工硬化/固溶强化的合金转化为可时效析出的合金，显著提高了合金的强度，同时合金具有优异的可焊接性，但是合金的抗腐蚀性能却下降的非常明显。因此采用适当的热处理工艺，在保持合金强度的同时显著提高合金的抗晶间腐蚀性能显得尤为重要。本研究中我们通过硬度测定，拉伸性能测试和晶间腐蚀浸泡试验，系统研究了高温预析出对时效析出型 Al-5.1Mg-3.0Zn (wt%) 合金力学性能和晶间腐蚀性能的影响，并同时借助透射电镜以及能谱分析对合金晶内和晶界的组织进行分析。研究结果表明：随着预析出温度的降低合金 T6 处理后的晶间腐蚀性能明显改善，但强度显著降低；优化高温预析出工艺，然后再进行 T6 处理，可以在基本不损失合金 T6 态强度和塑性的前提下显著改善合金的抗晶间腐蚀性能；高温预析出后再进行 T6 处理与单独 T6 处理相比，合金晶内组织基本相同，即晶内分布着细小弥散的近似球形的 T'相，晶界组织差异较大，前者晶界析出相更加粗大，离散度更大。在固溶处理后采用适当的高温预析出工艺，随后再进行 T6 处理可以在保持合金强度的同时，显著提高合金的抗晶间腐蚀性能，使合金同时兼具高强度抗腐蚀的优点，具有良好的研究和应用前景。

关键词：铝合金；力学性能；晶间腐蚀；高温预析出

C02-23

高 Zn 含量 Al-9.2Zn-2.0Mg-1.9Cu 合金的单级时效行为和析出相演变

温凯, 熊柏青, 张永安, 李锡武, 李志辉, 黄树晖, 闫丽珍, 闫宏伟, 刘红伟
北京有色金属研究总院, 北京 100088

为了分析高 Zn 含量 Al-9.2Zn-2.0Mg-1.9Cu 合金的单级时效析出行为, 本文采用硬度、电导率、室温拉伸力学性能、透射电镜和高分辨电镜等手段, 研究了合金在不同单级时效处理温度下微观组织和性能的演变。结果表明, 合金在 100℃和 120℃时效时需要较长时间达到硬度峰值, 并且峰值硬度能够保持较长的时间范围, 与 100℃时效时相比, 120℃时效时到达硬度峰值的时间较短且及峰值硬度范围较高。140℃时效时合金的硬度值迅速达到最大值, 然后持续下降。合金的电导率值均随着时效时间的延长而持续增大。合金在 120℃时效处理 6~48h 时, 抗拉强度变化很小, 整体偏差小于 10MPa; 屈服强度在前 24h 内显著增大, 继而保持一个平台, 延伸率有所波动, 整体在 11%以上。合金经过 120℃/24h 的峰时效处理后, 晶内析出相细小弥散, 合金的抗拉强度、屈服强度、延伸率和电导率分别为 697MPa、655MPa、12.9%和 17.3MS·m⁻¹。合金从“欠时效→峰时效→过时效”时, 基体中的主要析出相基本沿着“GPI 区+GPII 区+η'相→GPII 区+η'相→η'相”的路径演变, 析出相的尺寸分布变宽, 平均析出相尺寸增大。

关键词: Al-Zn-Mg-Cu 合金; 时效处理; 析出相; 力学性能

C02-24

Zn 对 Al-Mg-Si 合金时效硬化行为和析出动力学的影响

朱上, 李志辉, 闫丽珍, 李锡武, 黄树晖, 闫宏伟, 刘红伟, 张永安, 熊柏青
北京有色金属研究总院, 北京 100088

相关研究表明, Zn 作为新的合金元素添加到 Al-Mg-Si 合金中能有效提高合金的时效强度, 但 Zn 对 Al-Mg-Si 合金的时效硬化行为和析出动力学影响的相关报导较少, 有必要对 Zn 在其中产生的影响进行研究。本文通过采用显微维氏硬度和透射电子显微镜, 研究了 Zn 对汽车车身板用 Al-Mg-Si 合金时效硬化行为和析出动力学的影响。研究表明: Zn 添加提高了合金的时效硬化速率和峰值硬度, 从而促进了合金的时效硬化响应能力。Zn 添加显著促进了 Mg-Si 相的析出, 使合金形成了细小、密集和均匀弥散分布的 Mg-Si 相。利用 Johnson-Mehl-Avrami 理论对合金的时效析出动力学进行了分析, 发现 Zn 添加能够使时间指数(n)和反应速率(k)增加, 说明 Zn 加快了时效析出速率。Zn 添加通过促进 Al-Mg-Si 合金中的 Mg-Si 相析出, 从而加快了合金的时效析出速率, 增强了合金的时效硬化响应能力。

关键词: Al-Mg-Si 合金; 时效硬化; 动力学

C02-25(Keynote)

内剪切变形轧制对 Al-Zn-Mg-Cu 合金中厚板组织与性能的影响

邓运来, 范世通, 黄心悦
中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083

本文采用龙型轧制(在上下辊速度不同的非对称轧制基础上, 将慢速辊往轧制出料端偏移适当距离的一种轧制方式)与差温轧制(轧制时通过喷淋冷却液主动调控轧件表层温度与芯部温度差)引入穿透轧件厚度的内剪切变形, 研究了轧制时的内剪切变形对 Al-Zn-Mg-Cu 合金中厚板组织、织构与性能的影响。结果表明, 与普通平辊轧制相比, 相同总压下率, 龙型轧制与差温轧制均可增大中厚板芯层的剪切变形程度, 提高板材组织与性能的均匀性。以 370mm 厚 7050 铝合金铸锭轧制 80mm 厚板材为例, 内剪切轧制板材表层与芯层的强韧性性能差异小于 3%, 而正常轧制的大于 5%。因此, 内剪切变形轧制是值得深入研究与发展的高性能中厚板轧制技术方案。

关键词: 铝合金; 厚板; 轧制; 内剪切变形; 均匀性

C02-26(Invited)

Composition Optimization Study on 7N01 Aluminum Alloy Based on Orthogonal Test Design

Qingmei Ma, Xiangjie Wang, Xianpeng Ni, Bo Huang, Longzhe Zhao, Jianzhong Cui
Northeastern University, Shenyang

The effect on structure and mechanical property of 7N01 aluminum was studied, based on the principle of orthogonal test and the reasonable process of heat treatment meanwhile adjusting the content of Mn, Mg, Zn and Zr, The result show that the order of the four elements influencing on mechanical properties of the alloy is $Mg > Mn > Zn > Zr$; With analysis of metallography and energy dispersive spectroscopy, the test result indicated that the content of Mg, Mn and the ratio of Mg/Zn are major factors which influence the mechanical property of 7N01 aluminum; a new alloy with optimum comprehensive properties is found and its composition ratio is Al-1.55Mg-4.6Zn-0.6Mn-0.1Zr-0.15Cr-0.03Ti(wt.%), finally, which tensile strength after aging is 421.26 MPa, and yield strength is 369.21 MPa, and the elongation is 14.15%, exceeding the standards of automotive 7N01 aluminum alloy.

Keywords: orthogonal test; mechanical property; composition ratio; 7N01 aluminum

C02-27(Invited)

含 Er5083 铝合金敏化-稳定化转变过程中 β 相演变规律

高坤元, 丁宇升, 文胜平, 吴晓蓝, 黄晖, 聂祚仁
北京工业大学

采用失重法和 TEM 观察系统地研究了含 Er、Zr 5083 (5E83) 合金在 100-230°C 退火过程中晶间腐蚀性能和对应敏化温度到稳定化温度 β 相的演变规律。不同温度的失重-时间曲线显示, Er、Zr 的加入没有对腐蚀性能造成明显的变化, 合金在 200°C-220°C 退火晶间腐蚀性能发生突变, 由晶间腐蚀敏化温度变为完全耐蚀的稳定化温度, 其间的 210°C 退火呈现先增后降的特殊失重, 与敏化和稳定化温度均不相同。对应的 TEM 观察结果表明, β 相形核位置由低温时的晶界形核转变为稳定化温度的三角晶界形核, 210°C 呈现出晶界和三角晶界共同析出的双模式。通过经典形核理论分析 β 相形核位置的改变, 计算结果表明均匀形核和晶界非均匀形核在 100-230°C 退火过程中均无法发生, 仅当考虑晶界偏聚对形核驱动力的增加时, β 相在随机大角晶界的非均匀形核变的可能。升高温度到 220°C 的过程当中, β 相在晶界形核率下降 4 个数量级, 此时三角晶界形核逐步开始占据优势。其次, 对失重曲线特殊的 210°C 的微观结构的演变进行 TEM 观察, 结果显示晶界 β 相随着退火时间的延长先拉长后球化。采用 β 相周围 Mg 的扩散流分析 210°C 晶界 β 相长大过程, β 相的拉长和球化是晶界扩散和由于吉布斯汤姆森效应产生的界面扩散相互竞争造成的。对 β 相演变过程的分析为设计铝镁合金高强耐蚀的状态提供新的思路。

关键词: 铝镁合金; 晶间腐蚀; 相演变; 晶界形核

C02-28

超高强度纳米结构铝合金的摩擦磨损和耐腐蚀性能研究

王智¹, 张卫文¹, K. Georganakis², K.G. Prashanth³, S. Scudino⁴, J. Eckert^{5,6}, 李元元¹

1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640

2. School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University, MK430AL Cranfield, United Kingdom

3. Department of Manufacturing and Civil Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Teknologivegen 22, 2815, Gjøvik, Norway

4. Solidification Processes and Complex Structures, Institute for Complex Materials, IFW Dresden, Helmholtzstraße 20, D-01069 Dresden, Germany

5. Erich Schmid Institute of Materials Science, Austrian Academy of Sciences, Jahnstraße 12, A-8700, Leoben,

Austria

6. Department Materials Physics, Montanuniversität Leoben, Jahnstraße 12, A-8700 Leoben, Austria

纳米晶和超细晶铝合金由于具有高强度和低密度而得到了广泛关注和研究，然而对其摩擦磨损性能和耐腐蚀性能的认识还十分有限。最近我们通过调控 $\text{Al}_{84}\text{Ni}_7\text{Gd}_6\text{Co}_3$ 合金的微观结构，采用非晶粉末热压方法制备出了在室温下压缩强度接近 1800 MPa，在 523 K 时压缩强度高于 1000 MPa 的纳米结构铝合金。本文基于该高强度 $\text{Al}_{84}\text{Ni}_7\text{Gd}_6\text{Co}_3$ 合金，对其内部热压粉末之间界面区的变形行为、摩擦磨损性能、耐腐蚀性能以及进行了系统性研究。首先，研究表明热压粉末之间界面处产生了位错、层错等塑性变形特征，界面处的面积大小严重影响高强度 $\text{Al}_{84}\text{Ni}_7\text{Gd}_6\text{Co}_3$ 合金的变形行为，随着界面处的面积增加，裂纹的扩展路径由穿过粉末内部扩展向沿粉末界面处扩展转变。其次，耐腐蚀研究发现 $\text{Al}_{84}\text{Ni}_7\text{Gd}_6\text{Co}_3$ 纳米结构铝合金的主要腐蚀机制是点腐蚀和缝隙腐蚀，缝隙腐蚀主要是通过热压粉末之间的铝和孔洞处产生，从而恶化其耐腐蚀性能。最后，研究发现 $\text{Al}_{84}\text{Ni}_7\text{Gd}_6\text{Co}_3$ 纳米结构铝合金具有比纯铝和 Al-12Si 合金更加优异的摩擦磨损性能，主要原因是其超高的硬度和微观结构中含有大量的纳米尺度金属间化合物，并且发现摩擦磨损过程中纳米尺度金属间化合物容易脱落导致三体磨粒磨损。

关键词：高强铝合金；摩擦磨损；耐腐蚀性能；纳米结构

C02-29

The interaction of precipitation and recrystallization of twin roll cast aluminum alloy 3003 after cold rolling and annealing

Jianguo Tang^{1,2}, Pei Liao², Yong Zhang¹, Lingying Ye¹, Fushun Xu¹, Zhiyu Liao³

1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha, China 410083

2. Institute of Light Alloys, Central South University, Changsha, China 410083

3. Alnan aluminum CO., LTD, Nanning, China

The precipitation and recrystallization behavior and corresponding kinematics of the twin roll cast AA3003 sheet after cold rolling and intermediate annealing were characterized by electrical conductivity (EC) and hardness. The results demonstrated that previous cold rolling has influence on not only recrystallization but also precipitation. Heavy cold rolling accelerates the precipitation of equilibrium $\text{Al}_6(\text{Mn}; \text{Fe})$ dispersoids at low annealing temperature. Annealing at high temperature leads to recrystallization before precipitation, and discontinuous recrystallization take place with $\{001\}$ as the dominant texture, develops. But precipitation is slowed down due to low density of crystallographic defects result from recrystallization. Annealing at low temperature leads to precipitation before recrystallization, and recrystallization was inhibit or a mixture of continuous and discontinuous recrystallization occurs, which develops complicated recrystallization textures dominated by $\{001\}$ and $\{011\}$ textures.

Keywords: twin roll cast AA3003; precipitation of dispersoids; recrystallization; crystallographic texture

C02-30

汽车车身板用 Zr 添加 Al-Mg-Si-Zn 合金均匀化处理过程中组织演变

闫丽珍, 张永安, 熊柏青, 李志辉, 李锡武, 刘红伟, 黄树晖, 闫宏伟

北京有色金属研究总院, 北京 100088

Al-Mg-Si 合金一般通过添加微量的 Mn、Cr 和 Zr 等元素来形成弥散粒子抑制再结晶晶粒的异常长大。因此，本文采用差示扫描量热法 (DSC)、光学显微镜 (OM)、带有能谱分析 (EDS) 的扫描电子显微镜 (SEM) 研究了一种 Zr 添加的 Al-0.92Mg-0.78Si-0.60Zn-0.20Cu-0.12Zr 合金在均匀化处理过程中微观组织的演变。研究表明：合金铸态组织呈典型的枝晶形貌，随着均匀化温度的升高，组织中剩余相的数量越来越少，晶粒尺寸也随温度的升高呈增大的趋势。经 550°C/18h 均匀化处理后，组织中存在的相为含

Fe 相和均匀化过程中析出的含 Zr 相，含 Zr 相的尺寸较大。而经双级均匀化处理后，组织中相回溶充分，存在的相仅为含 Fe 相和均匀化过程中析出的含 Zr 相，含 Zr 相的尺寸较单级均匀化的明显减小，且随第二级均匀化处理时间的延长，含 Zr 相无明显变化。因此，该合金理想的均匀化处理制度是 430℃/10h+550℃/18h。

关键词：Al-Mg-Si 合金；均匀化；微观组织演变；含 Zr 相

C02-31

Microstructural evolution and strengthening mechanisms an Al-Cu-Mg alloy processed by single-reversal deformed high-pressure torsion

Ying Chen¹, Nan Hu², Hui Song³, Lingfei Cao³, Nong Gao², Marco Starink²

1. Key Laboratory of Functional Materials and Applications of Fujian Province, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, PR China

2. Engineering Materials, Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, SO17 1BJ, UK

3. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400000, PR China

High-pressure torsion (HPT) process is an advanced technique to produce bulk metals or alloys with ultrafine grains and a very high number of dislocations. Samples are subjected to a compressive force and concurrent torsional straining at the same time. As shear strains are induced, the microstructures of materials became ultrafine and inhomogeneous, leading to nano-scale grain gradient. Samples were rotated clockwise for 5 rotations and turned back a quarter turn, a half turn and one turn. Vickers hardness was carried out of each sample at different positions along the radius. Microstructures of an Al-Cu-Mg alloy were characterized using scanning transmission electron microscopy (STEM) and atom probe tomography (APT). Solute clusters Cu-Mg were segregated to grain boundaries. Cu and Mg were enriched in Mn-rich particles. X-ray diffraction (XRD) was used to measure the dislocation densities in different regions of HPT samples. The dislocation densities showed a reversal trend as well, which was consistent with the microhardness evolution. This phenomenon was explained by multi-mechanistic strengthening model.

Keywords: High-pressure torsion; scanning transmission electron microscopy; atom probe tomography; strengthening mechanisms

C02-32

时效时间对半固态 A356 铝合金组织性能的影响

亓鹏, 李伯龙, 吕文建, 董莎莎, 王同波, 李宁, 聂祚仁

北京工业大学

以电磁搅拌法制备的半固态 A356 铝合金为研究对象，经 540℃×4h 固溶后，研究合金在 170℃时效温度下进行 0—24h 不同时效时间对合金组织和力学性能的影响。结果表明：相较于铸态组织，合金固溶处理后，粗大针片状共晶硅熔断成短棒状或球状，中国汉字状 π -Fe(AlMgSiFe)相转变为细小均匀分布的 β -Fe(AlFeSi)相，合金延伸率提高；时效处理后合金抗拉强度提高，延伸率下降，时效时间为 4h 时，合金综合力学性能达到最优，合金显微硬度 121HV，抗拉强度 329MPa，延伸率 15%，拉伸断口形貌主要表现为韧窝断口特征；随时效时间延长，合金抗拉强度降低，延伸率下降。

关键词：A356 铝合金；半固态；时效时间；显微组织；力学性能

C02-33(Invited)

汽车外覆盖件用铝合金板材的性能要求及研究进展

马鸣图, 张钧萍, 周佳
中国汽车工程研究院股份有限公司

汽车覆盖件用铝合金板材是铝板的顶级产品, 本文基于汽车外覆盖件的成形性、生产工艺和服役性能要求, 论述了汽车覆盖件用铝板的各种性能要求, 包括抗时效稳定性、成形性、烘烤硬化性、抗凹性、翻边延性、油漆的光鲜性和兼容性等, 介绍了这些性能测试评价方法和表征参量, 以及影响这些性能合理匹配的预处理工艺, 重点介绍了抗凹性试验时的样品制备、评价方法以及和烘烤硬化性的关系, 探讨了预处理工艺对汽车覆盖件用铝合金板材的典型性能的影响, 分析了预处理工艺对汽车板抗时效稳定性、烘烤硬化性影响的机理, 观察了预处理工艺过程中合金原子的析聚和时效过程中第二相的形成和析出, 为生产出质量可控、性能优良的铝合金汽车板提供关键处理工艺参数; 用表面粗糙度仪、EBSD、X-ray 对比分析了不同状态的铝合金板材在变形后的粗糙度、表面形貌和织构分布, 用扫描电镜观察了橘皮的表面形貌和断口特征, 用纳米硬度对橘皮进行了表征, 综合研究了铝合金橘皮的成因及控制方法, 提出铝合金板材生产过程中晶粒控制对后续冲压产品的表面质量影响规律。

关键词: 铝合金汽车板; 预处理工艺; 成形性; 抗凹性; 微观组织; 橘皮

C02-34(Invited)

轨道交通车辆制造业现状及铝合金材料的工程应用

林化强

中国中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111

本文介绍了我国轨道交通车辆制造业现状及发展趋势, 铝合金材料在动车组、地铁与城际列车等轨道交通车体、转向架、控制、传动等系统中的应用情况, 对轨道交通用铝合金材料的基本力学、耐腐蚀、抗疲劳及耐损伤等综合性能要求、检测分析方法进行了分析、总结, 最后展望了轨道交通铝合金材料与制造技术的发展方向。

关键词: 铝合金; 轨道交通; 应用

C02-35

热机械处理提高 Al-Si-Cu-Mg 合金强塑性的研究

Cong Xu¹, Chengyuan Wang¹, Shuji Hanada², Wenlong Xiao¹, Chaoli Ma¹

1. 空天先进材料与服役教育部重点实验室, 材料科学与工程学院, 北京航空航天大学
2. 金属研究所, 东北大学, 仙台 980-8577, 日本

铸造 Al-Si 通常采用添加 Cu 元素的方式来增加强度, 然而, 合金强度的提高常常导致其塑性的降低。为了显著提高 Cu 强化 Al-Si-Mg 合金的拉伸塑性, 两种热机械处理方式应用于 3.0 wt.% Cu 强化的 Al-Si-Mg 合金。一种热机械处理工艺是采用热挤出和随后的热处理方式 (TMP-1); 另一种热机械处理采用热轧和随后的热处理方式 (TMP-2)。本文对这两种热机械处理工艺对合金微观组织和拉伸性能的影响进行了系统的调查。实验结果表明热机械处理工艺可以在不损失强度的条件下, 显著提高 3.0 wt.% Cu 强化的 Al-Si-Mg 合金的拉伸塑性。TMP-1 工艺下合金的抗拉强度、屈服强度和断裂伸长率分别为 453 MPa, 390 MPa 和 of 16.0 %; TMP-2 工艺下合金的抗拉强度、屈服强度和断裂伸长率分别为 461 MPa, 402 MPa 和 of 16.5 %。合金塑性的大幅提升主要归功于共晶硅的细化和均匀分布, 以及铸造缺陷数量的减少。同时, 合金的断裂机制也将会在本文中进行讨论。

关键词: Al-Si-Cu-Mg 合金; 热机械处理; 显微组织; 拉伸塑性; 断裂机制

C02-36

搅拌摩擦焊 2198 铝锂合金拉伸断裂行为的研究

孙建秋¹, 李萌萌¹, 宫学源¹, 高崇², 马岳¹

1. 北京航空航天大学材料科学与工程学院
2. 中铝科学技术研究院

铝锂合金具有质量轻、高比刚度、高比强度特性以及优越的性价比, 是航空航天理想结构材料, 搅拌摩擦焊是铝锂合金广泛应用的固态连接技术, 研究经搅拌摩擦处理的铝锂合金拉伸断裂行为具有重要的工程意义。本文以搅拌摩擦焊 2198 铝锂合金为研究对象, 采用扫描电镜原位拉伸技术, 深入研究搅拌摩擦焊 2198 铝锂合金不同区域(母材区、焊核区、过渡区)的微观组织特征、力学性能和拉伸断裂模式。研究表明: 母材区的晶粒呈粗大的薄饼状, T1 相的体积分数为 4.3%, 大量 T1 相使母材区的抗拉强度和屈服强度最高, 分别为 471MPa、522MPa, 其断裂模式为穿晶分层韧性断裂; 焊核区的晶粒组织为细小等轴晶, T1 相全部回溶, 因此焊核区具有很好的塑性, 延伸率高达 22.8%, 断裂模式为韧性断裂; 过渡区的晶粒组织是细小等轴晶向薄饼状晶粒的过渡, T1 相长大且部分回溶, 体积分数降低至 1.3%, 较大的晶粒尺寸变化梯度和 T1 相的部分回溶导致过渡区的拉伸性能最差, 抗拉强度、屈服强度、延伸率分别仅为 344MPa、243MPa、15.9%, 其断裂模式为准解理断裂, 韧性较差。搅拌摩擦焊 2198 铝锂合金不同区域的力学性能和拉伸断裂模式是由晶粒组织和 T1 相共同决定的。

关键词: 2198 铝锂合金; 搅拌摩擦焊; 微观组织; 拉伸性能; 断裂模式

C02-37

固溶处理对 7050/7N01 铝合金叠层板力学性能和断裂行为的影响

祝国川¹, 黄树晖¹, 李志辉¹, 李锡武¹, 佟有志², 张永安¹, 熊柏青¹

1. 北京有色金属研究总院有色金属材料制备加工国家重点实验室
2. 东北轻合金有限责任公司

本文采用室温拉伸实验和夏比冲击实验测试力学性能, 采用 OM, SEM 和 EBSD 分析平均晶粒尺寸、再结晶比例、析出相形貌和断口形貌等微观组织特征, 通过分析显微组织与断裂行为之间的关系, 研究固溶处理对 7050/7N01 铝合金叠层板力学性能和断裂行为的影响。结果表明: 随着固溶温度的升高, 合金组织中 Al₂CuMg 相回溶速度加快, 而再结晶比例增加, 经 490℃/2h 固溶处理后, 7050 层发生了明显的过烧, 时效态力学性能恶化; 480℃/2h 固溶处理后, 7050/7N01 叠层板达到了较高的强度和较好的塑性, 且此时叠层板具有较高的冲击能量吸收能力。断口分析表明, 7050 层和 7N01 层以韧性断裂位为主, 断口存在着两种韧窝, 一种韧窝是由于 Al₂CuMg 相和富 Fe 相从基体剥离形成的大韧窝, 另一种为显微空穴聚集形成的小韧窝。随着固溶温度的升高, 大尺寸韧窝数量减少, 尺寸缩小, 小尺寸韧窝数量增加, 经 480℃/2h 固溶后, 大小韧窝比例达到最优比例。

关键词: 铝合金叠层板; 固溶处理; 力学性能; 断裂行为

C02-38

压边力对汽车车身板用 6A16 铝合金拉深成形影响的研究

刘钊扬, 熊柏青, 李志辉, 李锡武, 闫丽珍

北京有色金属研究总院, 北京 100088

基于 Abaqus/Explicit 有限元方法, 分析了经过固溶时效处理的 6A16 铝合金汽车板在下不同压边力 (10KN、14KN、18KN、22KN) 下拉深成形过程中不同变形区的应力、应变的分布变化情况, 预测其成形性能, 并通过具体拉深试验进行验证。结果表明: 在试验的范围内, 随着压边力的提高, 在变形过程中其应力和应变都是增加的趋势; 随着压边力的提高, 各变形部位晶粒更为细小, 变形量更大, 在变形量较大的区域更加明显; 随着压边力的提高, 成形件的硬度增高; 同时指出其较为合适的拉深成形压边力。

关键词: 6A16 铝合金; 汽车覆盖件; 拉深成形; 压边力; 应力; 应变

C02-39(Invited)

Quantification of Multi-site Fatigue Crack Initiation and early Growth Using 3-D Microstructure-based Models in High Strength Al Alloys

Tongguang Zhai^{1,2}, Pei Cai², Lin Yang², Yan Jin², Fuxing Yin¹

1. Tianjin Key Laboratory of Materials Laminating Fabrication and Interface Control Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

2. Department of Chemical and Materials Engineering, University of Kentucky, USA

Multi-site fatigue crack initiation occurs in both wrought and cast high strength Al alloys. In this work, the density and strength distribution of crack initiation sites were measured experimentally to be Weibull functions of the applied stress in AA7075, AA2024, and A713 Al alloys. The 3-dimensional effects of second phase particles and pores were studied on fatigue crack initiation in these alloys using SEM/FIB. It was found that the particle thickness and pore position in depth were the key factors controlling the crack initiation behaviors in wrought and cast Al alloys, respectively. The micro-crack in a particle of 0-3 μm in thickness could not even propagate into the matrix, while it was likely to be arrested soon after propagating into the matrix when the particle thickness was 3-5 μm in the AA2024 Al alloy. Only those particles thicker than 5 μm could lead to propagating cracks in the alloy. In order to identify those particles leading to propagating cracks, 3-D microstructure-based models were developed incorporating the driving force and resistance in calculation of the growth behaviors of the micro-cracks in the pre-fractured particles in the wrought Al alloys, while the pore size, position in depth and applied stress were considered in simulating crack initiation at the pores in the cast Al alloys. The simulated density and strength distribution of crack initiation sites were consistent with those experimentally observed. A microstructure-based model was also developed which took into account both the local driving force and resistance in simulation of the growth behaviors of short fatigue cracks in 3-D. These microstructure-based models have paved the way to building up a physics-based model for satisfactory life prediction of an engineering alloy.

Keywords: Multi-site fatigue crack initiation; high strength Al alloys; 3-D simulation of crack initiation; microstructure-based model

C02-40(Invited)

高 Mg 含量的变形 Al-10Mg 合金的微观组织和力学性能

林耀军¹, 孙佳妮¹, 闫志刚²

1. 武汉理工大学材料科学与工程学院

2. 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

作为一类非时效硬化的变形 Al 合金，以 Mg 为主要合金元素的 5XXX 系列 Al-Mg 合金获得了广泛应用。这类合金中，Mg 的固溶强化对合金的强度有着重要的贡献，然而现有的商用 5XXX 系列 Al-Mg 合金中 Mg 含量均在 5 wt.% 以下，文献中报导的变形 Al-Mg 合金中 Mg 含量均在 7 wt.% 以下；尽管铸造 Al-Mg 合金中 Mg 含量最高可达 12 wt.%，然而大量的微米尺度 Al_3Mg_2 相的存在降低了塑性。鉴于当前的现状，我们的目的在于发展高 Mg 含量的（7 wt.% 以上）、可变形 Al-Mg 过饱和固溶体合金，充分发挥 Mg 的固溶强化作用，并利用变形进一步改善合金的强度和塑性。本报告展示了我们在 Al-10Mg(wt.%) 合金中的工作。首先用感应熔炼制备 Al-10Mg 合金铸锭，然后对铸锭进行均匀化和固溶处理，接着对铸锭进行热挤压。另外，也对热挤压材料进行冷轧和再结晶退火。用 X 射线衍射、光学显微镜、带有能谱仪的场发射扫描电镜以及透射电镜对均匀化和固溶处理的铸态材料、热挤压态的材料和冷轧-再结晶的材料进行了表征，并对热挤压态的材料和冷轧-再结晶的材料进行了拉伸测试。X 射线衍射、光学显微镜、扫描电镜、能谱分析结果显示，铸锭经均匀化和固溶处理后获得成分均匀的单相过饱和固溶体合金，但含有大量的凝固缩孔。光

学显微镜、扫描电镜、透射电镜结果显示, 热挤压后凝固孔隙完全焊合, 材料为单相固溶体, 由 5-20mm 的等轴晶组成; 冷轧-再结晶的材料还是单相固溶体, 由 0.5-5mm 的等轴晶组成。拉伸测试结果显示, 热挤压态材料以及冷轧-再结晶材料的屈服强度在 300 MPa 以上、拉伸强度在 400 MPa 以上, 同时均匀延伸率在 20%以上、总延伸率在 25%以上。研究表明变形 Al-10Mg 合金的高强度来源于高浓度 Mg 溶质的固溶强化和细晶强化, 高塑性来源于溶质 Mg 带来的强烈加工硬化和单相固溶体微观结构的均匀性。

关键词: 非时效硬化铝合金; 变形铝合金; Al-Mg 合金; 溶质原子; 强度; 韧性

C02-41

Al-7%Si 过饱和固溶体中纳米硅的形核及生长机制

刘茂文¹, 付辉², 田礼熙¹, 肖文龙¹, 彭秋明², 马朝利¹

1. 北京航空航天大学材料科学与工程学院空天先进材料与服役教育部重点实验室
2. 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

亚共晶铝硅合金中粗大共晶硅的破裂是合金中裂纹萌生的主要原因。本文通过对 Al-7%Si 合金进行高压固溶处理及常压时效处理, 获得了大量均匀弥散分布的纳米硅颗粒, 并采用透射电子显微镜对硅颗粒的析出行为进行了分析。研究表明, 硅原子团首先从铝硅过饱和固溶体中析出, 并为平衡状态的硅相提供异形形核核心。硅相在析出初期表现出球状形貌, 并在生长过程中沿{111}面迅速生长。这是由于其{111}面缺少生长台阶, 从而导致垂直于该方向的生长速率较低, 因而形成平行于{111}面的三角形或具有高长宽比的薄片。本文基于铝硅固-固界面提出了相对自由能与平衡台阶密度的关系式, 用以定量地衡量各界面的平衡台阶密度大小, 从而解释各界面生长速率的差异。

关键词: 铝硅合金; 纳米硅; 析出行为; 台阶生长; 台阶密度

C02-42

Examination of Effect of Sc on Microstructure of Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr Alloy Ingot

Yu Wang, Shuhui Huang, Baiqing Xiong

State Key Laboratory of Nonferrous Metals and Processes General Research Institute for Nonferrous Metals

It has been reported that the element scandium (Sc) is the most effective modifier which can significantly refine the grain size, prohibit recrystallization process and increase the strength. Adding trace of Sc in 7××× aluminum alloys is considered to be a feasible way to modify its microstructure and promote some mechanical properties. In order to study the effect of Sc element on as-cast microstructure of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy, ingots containing different amount of Sc were prepared by ferrous-mold cast. The microstructures were characterized by means of DSC thermodynamic analysis, X-ray diffraction, optical microscope and scanning electrical microscope. The results indicate that when the Sc level exceeds a critical concentration, Al₃(Sc,Zr) primary particles would form in the melt and act as an efficient nucleant, producing very refined grain and an unusual grain structure. This behavior could play very important role in improving the integrated properties of terminal products.

Keywords: aluminum alloy; scandium; microstructure; grain refinement; recrystallization

C02-43

固溶时效处理对 1953 铝合金管材组织与性能的影响

付彦军, 李锡武, 黄树晖, 李志辉, 闫宏伟, 闫丽珍, 刘红伟, 张永安, 熊柏青
北京有色金属研究总院

铝合金钻杆具有质量轻、比强度高、耐腐蚀性强等优点, 在石油钻探中有着巨大的应用潜力。其中 Al-Zn-Mg-Cu 系的俄系 1953 合金是最有前途的石油钻杆用铝合金材料之一。本文以 1953 铝合金为研究对

象, 测试其不同固溶时效处理制度下的硬度、电导率、室温力学性能, 结合扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X 射线衍射等分析固溶时效热处理对该合金力学性能和显微组织结构演变的影响。结果表明: 1953 铝合金挤压态组织由大量弥散分布的 AlZnMgCu 相和尺寸较大的含 Fe、含 Si 相组成, 经固溶处理后组织中的 AlZnMgCu 相充分回溶到合金基体中; 合金的电导率随着单级时效温度的升高和时效时间的延长不断增大, 硬度和强度随着时效的进行迅速升高并达到峰值。

关键词: 1953 铝合金; 固溶处理; 时效处理; 力学性能; 微观组织

C02-44(Invited)

Mn 含量对 Al-12wt.%Si-4wt.%Cu-xMn 耐热合金显微组织和高温强度的影响

廖恒成¹, 李广敬¹, 唐云逸¹, 锁晓静¹, Dixit S. Uday²

1. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏省先进金属材料高技术重点实验室, 南京 211189, 中国

2. Department of Mechanical Engineering, IIT Guwahati, Assam-781039, India

通过光学显微镜、SEM-EDS 和不同温度(25°C, 150°C, 200°C, 250°C and 300°C)下的拉伸实验, 研究了 Mn 含量(x=0.8 wt.%, 1.2 wt.%, 1.6 wt.%, 2.0wt.%)对 Al-12wt.%Si-4wt.%Cu-xMn 耐热合金显微组织和高温强度的影响。结果表明, 随着合金中 Mn 含量的增加, 凝固组织中 Al₁₅Mn₃Si₂ 相的数量不断增多, 与此同时, 该相的形貌由小的块状或不发达的树枝状转变成发达的树枝状可细杆状。在不同拉伸温度下, 随 Mn 量增加, 抗拉强度都呈现先升高再降低趋势。室温下, Mn 含量为 0.8wt.%合金具有最高的强度。当温度升高到 150°C 和 200°C 时, 1.5wt.%Mn 合金具有最高的强度。温度进一步升高到 250°C 和 300°C, 1.2wt.%Mn 合金展现出非常优异的耐热性能, 强度分别为 192MPa 和 125MPa。断口表面及邻近处的 SEM-EDS 结果显示 1.2wt.%Mn 合金中 Al₁₅Mn₃Si₂ 相对耐热性的贡献占主导地位, 在 250°C 以上的高温下裂纹主要是沿着 CuAl₂ 相扩展, 而在 1.5wt.%Mn 和 2.0wt.%Mn 合金中初生 Al₁₅Mn₃Si₂ 相的脆性对基体的危害大, 断裂主要发生在发达的树枝状 Al₁₅Mn₃Si₂ 相上。

关键词: 耐热铝合金; 显微组织; 力学性能; 高温; 锰

C02-45(Invited)

汽车外覆盖件用铝合金析出强化相调控与新合金设计开发

贾志宏^{1,2}, 丁立鹏¹, 刘庆¹

1. 重庆大学材料科学与工程学院

2. 重庆大学电子显微镜中心

汽车车身铝合金轻量化是当前整车轻量化的主要发展趋势。国际上先进汽车制造商已在其多种车型的车身零部件或整车身使用 6000 系铝合金材料, 但所用的铝合金不尽相同, 如北美为 6111 或 6022, 欧洲为 6016, 日本为 6 k21, 最近诺贝丽斯公司开发出 6014 正在积极推广。可见, 针对地域特点和车企实际要求开发相适应的合金可行并重要。通过调整合金成分以及配合相应加工工艺调控合金中析出强化行为、获得所需性能是成功开发这些合金的共性。本工作利用高分辨透射电子显微镜和三维原子探针技术结合第一性原理计算从原子层面对 Al-Mg-Si-Cu 合金中团簇形成、各阶段析出相结构和成分演变进行系统表征, 揭示了 L 相易形成无序结构的原因, 给出新的析出相析出演变解释; 在此基础上, 通过同时改变合金的 Mg/Si 比和含 Cu 量, 设计出一种新型过剩 Mg 高 Cu 合金, 该合金以无序结构的 L 相为主强化相, 使合金具有更快的时效硬化速率。与目前商用的 6022 合金相比, 过剩 Mg 高 Cu 合金不仅具有较低的 T4 态屈服强度, 而且在人工时效过程中具有更高的析出动力学、烘烤硬化性和热稳定性, 且对耐蚀性影响不大, 在汽车车身板的应用上具有巨大潜力。

关键词: 6000 系铝合金; 析出相; 透射电子显微镜; 三维原子探针; 第一性原理计算

C02-46

高 Zn 超强铝合金厚板轧制变形不均匀性的研究

昌江郁¹, 陈送义^{1,2}, 康华^{1,2,3}, 周亮¹

1. 中南大学 轻合金研究院
2. 中南大学 有色金属先进结构材料与制造协同创新中心
3. 中南大学 轻质高强结构材料重点实验室

目的: 研究 7056 铝合金 20mm 厚板厚度方向的组织、织构和性能以及轧制变形规律, 重点揭示了厚度方向 1/4 处轧制变形与织构和性能的关系。方法: 采用金相显微镜、织构分析、力学拉伸以及 DEFORM 有限元技术等分析测试方法。结果: 研究发现, 从厚板表层到芯部再结晶程度逐渐增加; 厚板芯部的轧制织构(Brass{011}, S{123}, Copper{112})体积分数最大, 厚板表层的再结晶织构 Cube{001}体积分数最小, 剪切织构(r-Cube{001}, {112})主要分布在厚板的表层和 1/4 层, 且在 1/4 层的体积分数最大; 板材强度沿厚度方向呈“W”型分布, 在厚度方向 1/4 处最低。结论: 其主要原因是轧制过程中厚板 1/4 层的剪切应力显著大于表层与芯部, 且该层的应变、应变速度和金属流动速度超过表层, 引起轧制变形不均匀。

关键词: 7056 铝合金厚板; 不均匀性; 1/4 层; 数值模拟; 剪切应力; 织构

C02-47

微量 Co 对高 Zn7056 铝合金组织、腐蚀性能及淬透性能的影响

周亮^{1,3}, 陈送义^{1,3}, 彭振凌², 张星临², 范淑敏², 昌江郁^{1,3}, 袁丁玲^{1,3}, 陈康华*^{1,2,3}

1. 中南大学 轻合金研究院, 湖南 长沙 410083
2. 中南大学 轻质高强结构材料重点实验室, 湖南 长沙 410083
3. 中南大学 有色金属先进结构材料与制造协同创新中心, 湖南 长沙 410083

通过力学拉伸、末端淬火实验, 结合金相观察、硬度测试、电导率测试、电化学腐蚀、扫描电镜和透射电镜等测试分析方法, 研究了 Co 元素对高 Zn7056 铝合金组织与性能的影响。研究表明: 与未加 Co 合金相比, 抗拉强度从 601.87MPa 提升到 627.07MPa, 应力腐蚀寿命提高了 22.57%, 应力腐蚀断裂强度从 511MPa 增加到 559MPa, 合金的淬透深度达到 100mm 以上。添加 Co 的 7056 合金, 形成均匀分布在基体上的弥散相, 能够强烈钉扎位错和亚界晶, 使基体保持形变回复组织, 保持小角度晶界, 抑制再结晶, 使得合金力学性能、腐蚀性能、淬透性得到显著提升。

关键词: 7056 铝合金; Co 元素; 末端淬火实验; 再结晶

C02-48

热暴露过程中的 A201, 319s 及 2618 铝合金的组织变化及热稳定研究

郜俊震¹, 朱强¹, 李大全¹, 康永林²

1. 北京有色金属研究总院
2. 北京科技大学

涡轮增压叶轮通常使用 3XX 系铸造铝合金和 2618 锻造铝合金制造, 这些时效硬化铝合金在室温下有较高的比强度。半固态成形 319s 压叶轮的室温力学性能与铣削 2618 合金叶轮相当, 但这些合金的强度在较高温度下会迅速下降, 主要原因是析出强化相在高温下会迅速粗化并转化为平衡相。为了满足更高温度下使用要求, 需要开发耐高温半固态铝合金产品, 比如 A201 合金。本文对比研究了 319s-T61, A201-T71 和 2618-T6 合金的热稳定性。三种合金在 200 °C 下热暴露 100 h, 通过硬度及拉伸测试来研究它们的力学性能变化, 利用 TEM 观察析出相的变化。结果表明三种合金的热稳定性由高到低依次为 A201 合金、2618 合金和 319s 合金。TEM 研究显示, 随着热暴露时间的增加, A201 和 319s 合金中的 θ' 以及 2618 合金中的 S' 都发生了粗化并部分转化为对应的稳定相。而 A201 合金中的主要析出相 Ω 相保持了稳定状态, 并且 A201 合金中的 θ' 相粗化速率小于 319s 合金中的 θ' 相, 这导致了 A201 合金相比 319s 和 2618 合金有更好的热稳定性。

关键词： 铝合金；热稳定性；析出相；力学性能

C02-49

Effect of friction stir processing on the microstructure and mechanical property of as-cast Al-5Mg alloy

1. Yongqiang Qin^{1,2}, Feifei Liu^{1,2}, Shiang Zhou^{1,2}, Zhen Zhang^{1,2}, Yucheng Wu^{1,2}

School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China

2. Laboratory of Nonferrous Metal Materials and Processing Engineering of Anhui province, Hefei, China

Friction stir processing, referred to as FSP, is a new bonding process technology. In this paper, the effect of FSP on the micro-structural evolution, hardness and mechanical properties of as-cast Al-5Mg alloy was investigated systematically. Severe plastic deformation imposed by FSP resulted in a considerable refinement of the coarse dendritic grains into the much smaller equiaxed grains in nugget zone. The average grain size decreased from 265.1 μm to about 11.8 μm . As a result, the hardness, strength and ductility of the alloy increased simultaneously after FSP. The significant increase in the ultimate tensile, yield strength and elongation values after FSP was about 85.4%, 163.8% and 35.1% respectively.

Keywords: micro-structural; FSP; hardness; yield strength

C02-50(Invited)

Li 含量对铝锂合金微观结构及力学性能的影响

张政权¹, 王玉玲¹, Digby D. Macondald²

1. 西南科技大学

2. University of California Berkeley

铝锂合金是一种低密度、高弹性模量、高比强度和高比刚度的铝合金，已成为航空航天工业备受青睐的新型结构材料，是当代航空航天结构的重要候选材料之一。铝锂合金 2029、铝锂合金 2060 和铝锂合金 2098 是第三代新型典型代表，以各种形式广泛应用于民航客机和军用战机等部位。通过力学性能、光学显微镜、扫描电镜，分析研究了 Li 含量对三种不同铝锂合金组织结构与性能的影响。结果表明：铝锂合金 2060 的综合力学性能明显优于铝锂合金 2029 和 2098 铝锂合金；铝锂合金 2060 弥散相的数量多、分布均匀、尺寸细小；铝锂合金 2029 晶界弥散相粗大、数量少，析出相间距较大，分布不均；铝锂合金 2098 弥散相的数量少、分布均匀、尺寸细小。因而，Li 含量不仅影响铝锂合金的弥散相，影响铝锂合金的组织结构，还影响材料的综合力学性能。通过调节铝锂合金中 Li 含量，可以有效控制铝锂合金的组织结构、物相分布和晶粒大小，进而改善铝锂合金的综合性能。

关键词：铝锂合金；微观结构；2029；2060；2098

C02-51

预时效和自然时效对 Al-Mg-Si 合金人工时效析出行为的影响

倪释凌, 倪东惠, 王安迪, 欧永亮, 李烈军

华南理工大学

用铝合金板代替钢板是降低车身重量的一种经济有效途径。但在生产过程中难以避免的自然时效不利于铝合金的时效析出强化。本文研究了预时效，自然时效和人工时效等几种热处理方案对 Al-0.7Mg-0.6Si-0.2Fe-0.2Cu (Al-Mg-Si) 合金时效析出行为的影响。采用差示扫描量热法、透射电镜和显微硬度等分析手段，研究了不同热处理方案对 Al-Mg-Si 合金力学性能及其强化相析出过程的影响。结果表明：自然时效会推高 β'' 强化相的析出温度，并弱化人工时效的强化效果，但经过 7 天自然时效后，其负面效应明显减弱。固溶淬火后在人工时效前先进行预时效能提高人工时效的峰值硬度并缩短达到峰值度的时

间。铝合金经过预时效处理后能降低 β'' 相的析出温度，在提高硬化效果的同时，消除了自然时效的不利影响。

关键词：Al-Mg-Si 合金；自然时效；预时效；析出强化

C02-52

铝合金时效特性的研究

吴晓东，廖斌，邹衍，王一唱，邓燕君，曹玲飞

重庆大学材料科学与工程学院

沉淀强化是铝合金最主要的强化机制，深入认识合金在不同处理状态下的组织结构特性，对于理解其相变机理具有重要的意义。本文以航空航天商用铝合金为基础，采用三维原子探针、透射电镜等表征手段，结合硬度、电阻率和拉伸性能测量，对合金的时效析出行为进行表征分析，重点讨论包括原子团簇、GP区在内的各阶段析出产物的演变规律，及其与合金性能之间的相互关系。

关键词：铝合金；时效；析出；三维原子探针

C02-53

自然时效和预处理对 Al-1.0Mg-0.65Si-0.24Cu 合金人工时效硬化效果和沉淀析出行为的影响

金硕勋，倪东惠，李烈军，廖结莹，倪释凌

华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心

用铝合金板代替钢板作为结构件是降低车身重量的一个经济有效途径。但在工业生产过程中难以避免的自然时效不利于铝合金的析出强化。本文研究了一种 5%预变形+高温预时效（170℃、190℃、210℃）的新型预处理方法。采用显微维氏硬度、差示扫描量热法（DSC）、透射电子显微镜（TEM）、高分辨透射电子显微镜（HRTEM）等分析手段，研究了不同预处理工艺对 Al-1.0Mg-0.65Si-0.24Cu 合金人工时效硬化性能及其强化相析出过程的影响。结果表明：自然时效使得在接下来的人工时效过程中 β'' 强化相的密度及尺寸降低，从而降低峰值硬度；固溶淬火后在人工时效前先进行上述预处理能显著提高峰值硬度（高于T6峰值硬度）并极大缩短达到峰值硬度的时间（缩短 50%）。铝合金经过预变形及预时效处理能降低 β'' 相的析出温度，在人工时效过程中更快地转变为 β'' 强化相，在提高硬化效果的同时，消除了自然时效的不利影响，适合大规模工业化生产；预处理产生的两种无序沉淀相在接下来的人工时效过程中长大，在时效硬化过程中扮演重要的角色。

关键词：Al-Mg-Si-Cu 铝合金；预处理；沉淀强化；透射电子显微镜

C02-54

5A02 铝合金薄壁管材扩口裂纹产生的原因分析

王川，李德富，胡捷，郭胜利，柴国强，刘生璞

北京有色金属研究总院

目的：本文经过实验分析，找到经过多道次轧制退火的 5A02 铝合金薄壁管材扩口裂纹产生的原因，为生产中解决扩口裂纹问题提供依据。方法：利用宏观检验、光学显微镜、X 射线能谱仪、扫描电镜及硬度测试仪等对 5A02 铝合金薄壁管材在多道次轧制过程中存在的硬度积累，与在扩口成形时裂纹的出现进行分析。结果：扩口裂纹管的硬度值高，晶粒较小，晶粒之间的尺寸差别较大，有较多的退火孪晶；在轧制过程中，随管径的逐渐变小，其硬度值呈线性增长；轧制成形的不同口径薄壁管材，在相同的变形量和退火条件下，口径越小的管材产生的加工硬化越大；在轧制变形中，管壁表层存在划痕等缺陷，加之管体退火后存在的残余应力与扩口应力叠加致使裂纹在缺陷处形成并进行扩展。结论：退火软化的效果不好，造成残余应力较多，较高硬度的管壁易产生扩口裂纹。成品管径越小，轧制道次越多，管材的硬度越高，

扩口成形不合格率越大。管壁划痕等缺陷越多，扩口裂纹易出现。单道次轧制延伸系数不能过大，选择合适的退火温度和保温时间。

关键词：5A02 铝合金；薄壁管材；轧制；扩口；裂纹

C02-55

7N01 铝合金表面 MFI 沸石膜涂层制备及其耐腐蚀性能

唐祁楠¹，顾阳¹，孙琳²，陈明安¹

1. 中南大学
2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司

为了提高高铁铝合金 7N01 的耐腐蚀性能，本文采用了一次水热合成的方法在其表面制备一层 MFI 沸石膜耐腐蚀涂层。使用 XRD、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)等仪器对 MFI 涂层样品的表面结构、形貌、成分、致密程度、连续性进行表征，用电化学工作站进行极化曲线和交流阻抗测试以及盐水浸泡实验来分析其涂层的耐腐蚀性能和失效机制。结果表明：在 3.5Wt%氯化钠溶液中，制备了 MFI 沸石膜的样品的自腐蚀电流密度在 2.160×10^{-9} ，相比较于基体本身的自腐蚀电流密度降低了 4 到 5 个数量级；交流阻抗的测试结果表明，制备了 MFI 涂层样品的高频阻抗和低频阻抗分别在 10^7 和 10^3 ($\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$)，分别比基体本身的高频阻抗和低频阻抗要高 3 和 2 个数量级。在盐水浸泡实验的结果中，浸泡 720h 后发现 MFI 沸石膜的自腐蚀电流密度只下降了一个数量级，而其高频阻抗和低频阻抗几乎没有发生变化。表明 MFI 沸石膜涂层能大幅度提高基体的耐腐蚀性能。另外通过 SEM 结果可以表明，MFI 涂层的致密程度和连续性以及在很大程度上影响了其耐腐蚀性能。

关键词：0N1 铝合金；MFI 沸石膜；耐腐蚀性能

C02-56

7N01 铝合金表面硅烷/铈复合薄膜的制备与耐蚀性能

彭纱¹，顾阳¹，孙琳²，陈明安¹

1. 中南大学
2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司

本文采用浸涂法利用 Si-69 硅烷偶联剂和硝酸铈盐的混合溶液对 7N01 铝合金进行表面处理，在其表面制备一层掺杂有铈盐的硅烷膜。首先使用单变量法获得最佳的硅烷水解和成膜参数，其中包括硅烷浓度，固化温度和铈盐掺杂量。然后通过傅立叶变换红外光谱研究了混合膜的化学结构，通过扫描电子显微镜研究了涂层的结构特征，涂层的耐腐蚀性能通过电化学阻抗谱和动电位极化试验进行估算。最后浸泡试验用于评估涂层的耐腐蚀性。通过实验发现成膜的最佳条件为：硅烷体积分数为 5%，固化温度为 100℃，铈盐掺杂量为 $5 \times 10^{-3} \text{mol/L}$ 。此外，实验结果还表明，通过 Si-69 硅烷偶联剂结合硝酸铈盐的表面处理大大提高了铝合金的耐腐蚀性能，单纯的硅烷处理后腐蚀电流降低 2-3 个数量级，掺杂铈盐之后腐蚀电流降低了 3-4 个数量级并分析了涂层的时效机制。

关键词：7N01 铝合金；Si-69；铈盐；腐蚀防护

C02-57

罐盖用 AA5182 合金板材在烘烤时的析出现象

杨阳，赵丕植，邹立颖，范荣辉

中铝科学技术研究院有限公司

本文采用了金相观察 (OM)，扫描电子显微观察 (SEM)，X 射线衍射分析 (XRD) 和高分辨透射电子显微观察 (HRTEM) 等手段研究了罐盖用 AA5182-H19 板材在 205℃ 和 249℃ 温度的烘烤软化行为，得到了烘烤软化曲线。发现在两种烘烤温度下，板材均发生了回复，位错密度下降，硬度降低，但 205℃

烘烤较 249℃烘烤，早脱离回复动力学趋势，而且在相同的位错密度下具有更高的硬度。通过进一步观察可知，在 205℃烘烤的板材中出现了沿剪切带分布的析出相。该相经 HRTEM 观察其为在位错区域析出的针状相，长度 5-15nm，厚度 5-10 个原子层，推测为含 Mg 析出相，而且具有较高的密度，是造成 205℃烘烤板材硬度高的主要原因。

关键词：罐盖；AA5182 板材；烘烤软化；析出强化；高分辨透射电子显微观察

C02-58

铝合金冲压零部件的回弹预测

黄鸣东，傅垒，李利，刘成

中铝材料应用研究院有限公司

与同等强度的钢板比较，铝合金板冲压后的回弹要大很多。目前国内冲压厂还没有掌握准确预测铝合金冲压件回弹的技术，这是制约铝合金板广泛用于汽车冲压件的原因之一。为找到一个准确预测铝合金冲压件回弹的方法，本研究采用 PAMSTAMP^{2G} 的有模法和无模法，预测了简单 U/V 形铝合金件的回弹量，并与实验数值进行比较，有模法与实验吻合较好。然后将有模法用于预测某款车型 A 柱的回弹量，并对该 A 柱进行冲压实验，采用 3D 扫描技术获得冲压后零件的数据，与有限元计算结果采用最小拟合的方法进行比对，结果表明，有模法可以准确预测 A 柱的回弹，为消除或减小回弹提供了理论数据。

关键词：冲压成形；回弹；有模法；U/V 形截面

C02-59

铜含量对 Al-9.2Zn-2.4Mg-xCu-Zr 超强铝合金组织与性能的影响

董朋轩，陈康华，周亮，廖行知，张星临

中南大学 粉末冶金研究院

采用铸锭冶金法制备了不同 Cu 含量的 Al-9.2Zn-2.4Mg-xCu-Zr 合金，通过金相和扫描电镜对合金相组成和演化进行研究，并对不同 Cu 含量的合金硬度、拉伸、断裂韧性及晶间腐蚀、剥落腐蚀与应力腐蚀等分析测试，研究了 Cu 含量 (2.2wt%-0.8wt%) 对 Al-9.2Zn-2.4Mg-xCu-Zr 合金组织和性能的影响。结果表明：在 Cu 含量较高时，合金铸锭经过热变形-固溶后仍然含有大量的残余结晶 S 相，Cu 降低到 1.5% 时，残余结晶相接本消失。随着 Cu 含量的降低，合金时效态力学性能提高，抗腐蚀性能先升高；但是，当 Cu 从 1.3% 低至 0.8% 时，腐蚀性能急剧降低。当 Cu 含量为 1.5wt%~1.3wt 时，Al-8.5Zn-2.4Mg-xCu-Zr 合金的综合性能最佳，抗拉强度、屈服强度和延伸率可达 753MPa，725MPa 和 8.3%。

关键词：Al-Zn-Mg-Cu 合金；铜含量；微观组织；力学性能；腐蚀性能

C02-60

中间退火温度和时效对 Al-0.2Mg-0.35Si-0.3Ce 合金丝材力学性能和电导率的影响

吴玉娜

河海大学

本文研究了四种中间退火温度 (150℃、200℃、250℃、300℃) 对 Al-0.2Mg-0.35Si-0.3Ce 合金导电丝材 (经过挤压 (E)、冷拔 (D)、退火 (A)，再冷拔，即 EDAD) 显微组织、力学性能和电导率的影响，并与未发生中间退火的样品进行了比较研究。采用金相显微镜 (OLYMPUS BX-60M) 和偏光镜观察了合金样品的显微组织变化，在 CMT5105 电子万能试验机上测试了样品的拉伸性能，采用 QJ36 单双臂两用电桥来测量样品的电阻值。显微组织观察结果表明：在 150℃ 和 200℃ 退火时，丝材没有发生再结晶；当中间退火温度升高到 250℃ 时，丝材发生了再结晶。拉伸试验结果表明：当中间退火温度升高到 150℃ 时，EDAD 状态样品的抗拉强度首先增大到了一个最大值 218MPa，随着退火温度的继续升高，抗拉强度急剧下降；然而伸长率和电导率却表现出了恰恰相反的变化趋势。当退火温度达到 300℃ 时，此时的电导率可

以达到 57.1%IACS, 比未进行中间退火的丝材提高了 3.3%IACS, 提高幅度很大。此外, 还研究了时效(190℃ 下 20h) 对 EDAD 状态样品力学性能和电导率的影响。结果表明, EDAD 后时效的样品, 其抗拉强度、伸长率和电导率与未进行时效的样品的变化趋势一致; 时效后, 抗拉强度降低, 伸长率和电导率都升高。上述结果表明, 中间退火处理对最终丝材的强度和电导率会产生很大的影响。较高的中间退火温度 ($\geq 250^{\circ}\text{C}$) 会获得电导率较高、抗拉强度较低的丝材, 而较低的中间退火温度 ($\leq 150^{\circ}\text{C}$) 则不会对丝材的抗拉强度和电导率产生明显的影响。

关键词: Al-Mg-Si 合金; 退火温度; 力学性能; 电导率

C02-61

基于元胞自动机模拟 7085 铝合金在热变形过程中的组织演变

张杰, 李志辉, 黄树晖, 李锡武, 张永安, 熊柏青, 闫丽珍, 闫宏伟, 温凯

北京有色金属研究总院 北京 100088

7085 铝合金的微观组织是决定其性能的主要因素, 在材料成分一定的条件下, 影响组织演变的主要因素是温度、变形速率和变形程度。因此, 通过控制热变形过程中的温度、变形程度和变形速率, 来改善微观组织, 对于控制产品最终性能有着重要意义。本文以 7085 铝合金为研究对象, 根据经典的应力-位错关系和动态再结晶动力学方程, 将宏观变形过程和微观组织演变相联系, 建立了晶粒正常长大和动态再结晶的元胞自动机模型, 实现了 7085 铝合金热变形过程中微观组织的模拟和预测。研究表明, 本文所建立的模型能较准确地模拟出 7085 铝合金在热变形过程中的组织演变过程, CA 模拟输出的晶粒尺寸及形态与 EBSD 实验结果接近一致, 可以实现对 7085 铝合金热变形过程中组织演变的预测。

关键词: 元胞自动机; 动态再结晶; 热变形; 组织演变

C02-62

形变时效工艺对 Al-Mg-Si-Cu 合金抗腐蚀性能和微观结构的影响研究

刘力梅, 陈江华

湖南大学

制备良好综合性能的 Al-Mg-Si-Cu 合金是目前研究的热门。提高材料的抗局部腐蚀性能而不降低材料的强度和保持良好的延伸率是一个很重要的课题。本文采用的研究手段主要包括: 显微硬度测试, 拉伸测试, 扫描电镜和透射电镜观察。与传统的固溶处理完立即进行水淬后, 直接进行人工时效的加工工艺得到的结果相比较发现: 通过优化形变时效工艺参数可以制备具有良好的延伸率, 高的强度以及抗腐蚀性能很好的 Al-Mg-Si-Cu 合金。通过 TEM 表征可知, 优良的综合性能的获得主要是因为析出强化相的尺寸和分布以及变形结构的改变。耐腐蚀性能很好主要因为晶界上富铜的析出相数量的减少。

关键词: Al-Mg-Si-Cu 合金, 形变时效, 腐蚀, 强度

墙展

C02-P01

Al₃Er 相稳定性的第一性原理计算及实验研究

高春来, 高坤元, 田东辉, 李浩楠, 丁宇升, 文胜平, 吴晓蓝, 黄晖, 聂祚仁

北京工业大学材料科学与工程学院

对 Er 微合金化铝合金中的有效强化相的 Al₃Er 的相稳定性利用基于密度泛函理论框架下的第一性原理平面波赝势结合广义梯度近似, 且将 Er 原子的 4f 电子视为价电子的情况下对五种结构 (cP4、hP8、hP16、

hR12、hR20) 的 Al_3Er 的生成能进行了计算。对 Al-Er 液相进行不同速率降温后生成的 Al_3Er 相的形貌和结构利用扫描电镜 (SEM) 和 X 射线衍射 (XRD) 进行了测试。结果显示, cP4、hP8、hP16、hR12、hR20 结构的 Al_3Er 生成能(eV/atom)分别为-0.411、-0.399、-0.397、-0.389、-0.412。虽然六方结构的 hR20 含有 60 个原子, 但是其生成能最低, 为热力学稳定态。包含 cP4 在内的其它四种结构的生成能同 hR20 对比, 对称性最高、包含 4 个原子 cP4 结构的生成能差只有 1meV/atom, 为能量次低的亚稳结构, 其它三个结构的生成能差范围为 11~23meV/atom, 均小于室温热涨落 26meV/atom, 因此生成能判据很难准确判断稳定态和亚稳态的差别, 进一步近平衡冷却条件下的实验验证, 即 Al-30Er 合金液化后缓慢降温, 发现降温速度为 60°C/h 时, XRD 结果显示主要为 cP4 结构的 Al_3Er , 仅在共晶区包含少量的 hR20 结构相, 对应的 SEM 照片显示先析出相为边缘平整的块状。当降温速度降为 5°C/h 时, XRD 结果显示析出相主要为 hR20, SEM 照片显示的大块先析出相的边缘不再平整, 与 cP4 结构的 Al_3Er 相貌显然不同。实验结果显示在很慢的最接近平衡态的降温过程中生成的 Al_3Er 是结构复杂但能量最低的 hR20 结构, 与第一性原理计算得到的稳定态结果一致。当降温速度稍微提高时生成的 Al_3Er 已经主要是结构简单同时生成能仅高 1meV/atom 的 cP4 结构, 证实这一亚稳结构的极高稳定性, 这可能也是在含铝铝合金中 cP4 结构 Al_3Er 高度相稳定性的原因。

关键词: Al_3Er 相; 第一性原理; 稳定性

C02-P02

粗晶层对 Al-Zn-Mg 合金抗应力腐蚀性能的影响

姚学彬, 叶凌英, 刘胜胆

中南大学材料学院

目的: Al-Zn-Mg 合金广泛应用于高速列车车体结构, 型材表面的粗晶层组织对合金抗应力腐蚀性能具有重要影响。本文以具有不同厚度粗晶层的 Al-Zn-Mg 合金为研究对象, 量化表征粗晶层组织, 并研究其对合金拉伸性能和抗应力腐蚀性能的影响, 为合金应用提供理论依据。方法: 通过室温拉伸测试、四点弯曲抗应力腐蚀性能测试、慢应变速率拉伸试验、金相显微镜、扫描电镜、电子背散射衍射以及透射电镜对 3 种不同粗晶层厚度的 A7N01 铝合金型材的拉伸性能、抗应力腐蚀性能和微观组织进行研究, 并讨论影响性能的合金化学成分与微观组织作用机制。结果: 通过金相组织观察, 发现 3 种型材的粗晶层厚度分别约为 $200\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ 和 $950\mu\text{m}$, 性能测试表明对应的抗拉强度分别为 399.10 MPa、377.20 MPa 和 357.35 MPa; 四点弯曲抗应力腐蚀试验对应型材的断裂时间分别为 20h、12h、6h, 探讨分析了合金抗应力腐蚀性能与组织的关联机理。结论: Al-Zn-Mg 系铝合金型材的强度和抗应力腐蚀性能受表面粗晶层的影响, 其强度和抗应力腐蚀性能均随着粗晶层厚度的提高而降低。

关键词: Al-Zn-Mg 合金; 粗晶层; 强度; 抗应力腐蚀性能

C02-P03

Al-Zn-Mg 合金型材 MIG 焊接接头组织表征与抗腐蚀性能研究

杨汶卿, 叶凌英, 刘胜胆

中南大学材料科学与工程学院

目的: Al-Zn-Mg 合金具有密度小、强度高、抗腐蚀性能好、可加工性高等优点, 然而在焊接过程中, 易受焊接热循环影响, 使其力学性能、抗腐蚀性能降低, 组织结构发生较大改变。本文致力于对 Al-Zn-Mg 合金型材 MIG 焊接接头进行组织表征并研究焊接接头不同区域抗腐蚀性能的差异。方法: 本文采用金相、扫描电镜、电子背散射衍射、能谱、透射电镜等方法对 Al-Zn-Mg 合金型材 MIG 焊接接头的组织成分进行表征, 并对焊接接头不同区域进行了剥落腐蚀、晶间腐蚀、慢应变速率拉伸应力腐蚀等试验以研究焊接接头不同区域抗腐蚀性能的差异。结果: 焊缝区多为粗大等轴晶, 融合区靠近焊缝区一侧为细长柱状晶, 靠近热影响区分布着细小等轴晶, 热影响区组织与母材区类似, 为纤维状组织, 但晶粒发生明显长大。焊缝

区晶粒几乎无第二相存在，融合区存在细密分布的弥散相，热影响区受焊接热循环影响，导致晶内细小弥散相溶解，生成了少量粗大强化相，且热影响区晶体结构再结晶度较母材区更高。由晶间腐蚀结果可知，热影响区晶间腐蚀等级与母材区相比较高，抗腐蚀性能相对较差；由剥落腐蚀结果可知，焊缝区腐蚀后与腐蚀前无明显变化，母材区发生轻微点蚀，热影响区出现明显腐蚀坑。由慢应变速率拉伸应力腐蚀结果可知，焊接接头慢应变速率拉伸应力腐蚀断口基本位于焊缝处，在惰性介质（硅油）中断裂断口与在腐蚀介质（3.5%NaCl 溶液）中形貌明显不同，焊接接头 I_{SSRT} 与母材相比相对较小。结论：受焊接热循环影响，焊接接头热影响区晶粒组织、第二相均发生明显变化，其晶间腐蚀性能、剥落腐蚀性能也显著下降；焊接接头整体应力腐蚀敏感指数比母材更低，但焊缝区因其粗大晶粒组织成为应力腐蚀过程中的薄弱区。

关键词：Al-Zn-Mg 合金；MIG 焊；组织表征；晶间腐蚀，剥落腐蚀，慢应变速率拉伸应力腐蚀

C02-P04

Research on microstructures of iron-intermetallics in Al-17Si alloys controlled by Al-Mn-Ti quasicrystal master alloys

Han Yan

School of Metallurgical and Materials Engineering, Jiangsu University of Science and Technology(Zhangjiagang)

In this study, we focus on the Al-Mn-Ti quasicrystal master alloy as a modifier to improve iron-intermetallics in Al-17Si alloys. Effects of different mass ratios of Al-Mn-Ti quasicrystal master alloys on microstructures of iron-intermetallics in Al-17Si alloy was investigated. The microstructures were characterized by optical microscope, scanning electron microscope and energy diffraction spectrometer. By comparing different $w(\text{Mn})/w(\text{Fe})$ ratios from 0.56 to 0.94, the main results we have found are as follows: With the increase of the ratio, Iron-intermetallics morphology translated from needle-like beta phases into bone-like and trifoliate alpha phases, which suggest the improvement of the negative effects of iron-intermetallics on mechanical properties in Al-17Si alloys; Elements included were Al, Si, Fe and Mn, therefore, Fe-enrichment phases could be considered as quaternary Al-Si-Fe-Mn phases.

Keywords: iron-intermetallic; quasicrystal; hypereutectic Al-Si alloy

C02-P05

3003 铝合金翅片料再结晶过程及晶粒尺寸变化的研究

张月，高坤元，丁宇升，聂祚仁，文胜平，黄晖，吴晓蓝

北京工业大学 材料学院

3003 铝合金是散热器翅片料的主要应用材料，其再结晶过程以及晶粒尺寸对散热器性能有着至关重要的影响。本文通过硬度法与金相法结合对 81.67%、96.5%冷轧变形量的 3003 退火 1h、2h 的再结晶过程进行了研究，金相法所得到的心部完成再结晶的温度均要滞后硬度法得到的再结晶完成温度 $8^{\circ}\text{C}-10^{\circ}\text{C}$ ，这主要源于 3003 表面和心部变形量的差异导致不同的形变储能。之后对两种变形量的 3003 样品，在确定的再结晶完成温度，即 $345^{\circ}\text{C}-550^{\circ}\text{C}$ 退火 1h、2h，并对其 RD 方向上晶粒尺寸进行了统计。81.67%冷轧变形量的 3003 在 $345^{\circ}\text{C}-550^{\circ}\text{C}$ 退火 1h，平均晶粒尺寸由 $340.90\mu\text{m}$ 减小到 $141.38\mu\text{m}$ ，退火 2h，平均晶粒尺寸由 $370.13\mu\text{m}$ 降低到 $154.25\mu\text{m}$ ；而 96.5%冷轧变形量的 3003 在 $345^{\circ}\text{C}-550^{\circ}\text{C}$ 退火 1h，平均晶粒尺寸由 $534.76\mu\text{m}$ 变化为 $136.91\mu\text{m}$ ，退火 2h，平均晶粒尺寸由 $594.43\mu\text{m}$ 变化为 $190.82\mu\text{m}$ 。随着变形量的增加，晶粒尺寸显著增大；而随着退火温度的升高，晶粒尺寸则呈现较大的减小趋势；随着保温时间的延长，晶粒尺寸仅略有增长。对于这种变化规律从再结晶过程中的形核速率，第二相的析出、尺寸、分布以及稳定性等方面进行了讨论。

关键词：3003 铝合金；再结晶；晶粒尺寸；形核速率；第二相

C02-P06

退火过程对高纯铝腐蚀性能的研究

王兴, 高坤元, 丁宇升, 文胜平, 吴晓兰, 黄晖, 聂祚仁

北京工业大学材料科学与工程学院

本文采用显微硬度法, 金相偏光法和动电位循环极化曲线法对冷轧 90% 的高纯铝经过 75°C-600°C 退火的回复及再结晶过程的力学性能和电化学腐蚀性能进行测试。结果表明, 随着退火温度的升高, 平均钝化电流密度 (I_p) 从冷轧态的 $2.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 下降到 100-200°C 时回复阶段的 $0.8-0.9\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。当退火温度升高到 275°C 的再结晶刚完成阶段, 此时得到细小等轴晶粒的平均尺寸约为 $26.4\mu\text{m}$, 其对应的 I_p 仅为 $0.7\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。随着退火温度继续升高, 再结晶晶粒尺寸逐渐增加, 温度达到 600°C 时, 平均晶粒尺寸可达 $1924.3\mu\text{m}$, 对应 I_p 上升到 $3.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。在高纯铝的再结晶过程中, 晶粒尺寸逐渐增加, 晶界密度减少, 一种观点认为这可能降低表面的活性、降低氧化膜的生成速率, 从而导致腐蚀电流下降。但这种观点无法解释冷轧态的高密度缺陷态以及低温退火的亚晶回复态的腐蚀电流变化, 可能此时基体的其他特征会导致表面钝化膜的性质改变, 从而引起耐蚀性能的改变。

关键词: 高纯铝; 晶粒尺寸; 电化学腐蚀性能

C02-P07

Er 的添加对 Al-Li 合金时效强化的影响

刘琦兵

北京工业大学 材料学院

通过维氏显微硬度和透射电镜对 Al-6.3Li, Al-0.025Er 以及 Al-6.2Li-0.025Er (at.%) 合金的时效强化行为进行了研究。结果表明, Al-Li 合金在 175°C-350°C 的等温时效过程中, 其峰时效硬度值随温度的升高逐渐降低, 由 175°C 对应的 105HV 降低到 250°C 对应的 48HV, 温度再升高时进入 Al-Li 的固溶区, Li 无法析出, 其硬度为 43HV, 与固溶态一致。而在 Al-Li 合金中添加了 Er 之后, 在 175°C-350°C 温度范围内, Al-Er-Li 合金的峰时效硬度均高于 Al-Li 合金。在温度为 175°C-220°C 时, Al-Er-Li 合金的峰时效硬度均高于 Al-Li 合金 10HV 以上, 此时 Al-Er-Li 合金的强化效果大于 Al-Li 合金和 Al-Er 合金的简单叠加。而当温度达到 250°C 以后, Al-Er-Li 合金的峰时效硬度值高于 Al-Li 合金 20HV 左右, 此时 Al-Er-Li 合金的峰时效硬度已经明显超过了 Al-Li 和 Al-Er 合金的叠加效果。在 200°C 的时候, Er 的添加不仅将 Al-Li 合金的峰时效硬度 88HV 提升到 104HV, 而且加快了 Al-Li 合金的析出过程。Al-Er-Li 合金相对 Al-Li 合金的峰时效硬度值的提升来源于 Er 的添加对 Al-Li 合金析出行为的影响, 其演变过程特征通过透射电镜进行分析。

关键词: Er; Al-Li 合金; 时效强化

C02-P08

固溶工艺对 7050 铝合金厚板显微组织与疲劳性能的影响

肖翔¹, 李伟¹, 赵健², 刘成¹

1. 中铝材料应用研究院有限公司

2. 苏州有色金属研究院有限公司

飞机设计的首要要求是安全, 而疲劳断裂一般不发生明显的塑性变形, 难以检测和预防, 是飞机服役中的重大安全隐患。本文系统研究了固溶工艺对 7050 合金的微观组织、拉伸性能、断裂韧性和疲劳裂纹扩展速率的影响。结果表明, 单级固溶工艺下, 固溶温度从 460°C 升高到 483°C, 显微组织中残留相面积分数降低, 再结晶晶粒面积分数升高, 合金拉伸强度和断裂韧性增加, 疲劳裂纹扩展速率变低。双级固溶工艺 470°C/2h+ 477°C/3.5h 能有效降低残留相的含量和再结晶晶粒面积分数, 合金拉伸强度、断裂韧性和疲劳裂纹扩展性能均优于单级固溶工艺。降低残留相含量和再结晶分数能有效提高 7050 合金的断裂韧性和疲劳裂纹扩展抗力。双级固溶处理相对于单级固溶工艺能使 7050 合金具有良好的综合力学性能。

关键词：7050 合金；固溶处理；显微组织；疲劳性能

C02-P09

Al-6Mg-0.4Mn-0.15Zr-xSc (x=0.04-0.10wt.%) 合金的再结晶行为的研究

丁宇升, 高坤元, 郭珊珊, 文胜平, 黄晖, 吴晓蓝, 聂祚仁

北京工业大学 材料学院

本文采用显微硬度法, 偏光显微镜和透射电镜 (TEM) 对不同 Sc 含量的 Al-6Mg-0.4Mn-0.15Zr-xSc (x=0.04, 0.07, 0.10) wt.%合金的再结晶行为进行研究。不同 Sc 含量的微合金化合金在 100-550°C退火 1h 的显微硬度测量显示硬度随温度的升高匀速下降, 区别于传统 Al-6Mg-0.4Mn 合金在 250-350°C快速下降随后保持平稳, 对应再结晶起始和终了温度分别为 250°C和 350°C。这表明 Sc、Zr 的添加改变了再结晶行为, 不能通过显微硬度法直接获得再结晶起始和终了温度, 但可以通过偏光金相加以区别。对应 250-550°C退火 1h 样品的偏光照片显示, 所有含 Sc、Zr 合金在 275-350°C小部分区域开始发生再结晶形核, 但是随着温度升高, 这些再结晶核心的长大受到抑制, 其中含 Sc 量为 0.10 wt.%的合金到了 550°C的高温退火时也没有明显长大。这表明 Sc、Zr 可以小幅提高合金的再结晶的起始温度 25-100°C, 同时大幅提高再结晶终了温度 200°C以上。对回复状态 300°C/1h 退火的 Al-6Mg-0.4Mn-0.1Sc-0.15Zr 合金的 TEM 观察显示, 该状态的组织是部分位错胞型态, 部分拉长的亚晶组织, 回复不完全。组织内部包含细小球形弥散的 $Al_3(Sc, Zr)$ 相, 半径为 5-20nm。这种粒子分布不均匀, 析出相富集区和贫瘠区呈条带状分布, 宽度约为 2-3 μ m。这种组织在变形过程中相贫瘠区合金更易产生形变, 具有更高的位错密度, 同时少量析出相对晶界的阻碍也较小, 因此在该区域再结晶更易形核。但是当再结晶晶粒长大到析出相富集区时, 受到大量析出相钉扎, 最终导致再结晶晶粒难以长大。

关键词：Sc、Zr 微合金化；Al-Mg 合金；再结晶；第二相

C02-P10

不同 Mg/Si 比对 AA6014 合金微观组织和力学性能的影响

李振国¹, 赵丕植^{1,2,3}, 贾志宏¹, 吴星星²

1. 重庆大学材料科学与工程学院
2. 中铝科学技术研究院
3. 中铝材料应用技术研究院

采用三维原子探针 (3DAP)、透射电子显微镜 (TEM)、扫描电子显微镜 (SEM) 和电子背向散射衍射 (EBSD) 结合硬度测试以及拉伸试验, 研究了不同 Mg/Si 比对 AA6014 合金板材 T4P 态及烘烤态的微观组织和力学性能的影响。实验结果表明: 当 Mg/Si 比大于 0.86 时, 合金材料经过 75°C×8h 的预时效处理过程中生成的团簇中 Mg/Si 接近 0.86, 随着合金中 Si 含量的提高, 生成的 Mg-Si 团簇的数量随之增加, 力学性能测试结果显示材料在 T4P 状态下的强度和延伸率也随之升高。在随后 180°C×30min 烘烤处理后, 合金强度也得到提高, TEM 结果显示形成了更高密度的 β'' 强化相, 这是由于预处理阶段形成的团簇在后续烘烤处理过程中易转化成为 β'' 强化相。

关键词：AA6014 合金；Mg/Si 比；微观组织；力学性能

C02-P11

固溶处理对 7050 铝合金厚板微观组织的影响

谢志强¹, 贾志宏¹, 邢远¹, 林林², 林顺岩¹

1. 重庆大学材料科学与工程学院
2. 西南铝业集团有限责任公司

利用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)和透射电镜(TEM)等研究了不同固溶温度对 7050 铝合金厚板微观组织的影响,以及板材不同厚度位置的组织特点。结果表明,厚板分别在 475℃, 485℃ 和 500℃ 固溶 3h 后淬火出现裂纹,沿晶界分布,开裂位置在厚板的边部,且随温度升高,裂纹数量增多。经 485℃ 和 500℃ 固溶后,沿板材厚度方向,组织内部的晶界处均出现不同程度的 Al, Zn, Mg, Cu 四种溶质原子偏聚,厚板四分之一处偏聚最多,边缘处只有少量偏聚。经 500℃ 固溶后,发现溶入 S(Al₂CuMg) 相中的 Zn 含量大幅度增加,用第一性原理计算表明 Zn 原子最容易取代 S 相中的 Al 原子。

关键词: 7050 铝合金; 固溶; 微观组织; 偏聚

C02-P12

热处理工艺对 5E61 铝合金板材力学性能及耐腐蚀性能影响的研究

谷鹏, 黄晖, 高坤元, 文胜平, 聂祚仁

北京工业大学

本文针对含 0.2 Wt%Er 的中高镁含量铝合金 5E61 测定了热轧态、350℃/1h 退火态以及在 300℃ 下退火不同时间的冷轧板的拉伸性能和耐腐蚀性能。利用硝酸失重及拉伸测试,研究热处理对其长期耐蚀性及力学性能的影响规律,运用金相显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)及能谱分析仪(EDS),对合金不同状态下的腐蚀形貌以及微观组织进行了表征,同时结合透射电子显微镜(TEM)及能谱分析等方法对合金的微观结构进行了分析。结果表明热轧态及退火态的合金的耐腐蚀性能均良好,300℃ 下退火 35min 的冷轧板力学性能良好,且经敏化处理后仍保持较好的耐腐蚀性能。Er 含量对合金的耐腐蚀性能无明显影响,主合金元素 Mg 的含量和存在形式仍为主要影响因素,热处理工艺也是影响合金耐腐蚀性能的因素之一。

关键词: Al-Mg 合金; Er; 耐腐蚀性; 力学性能; 稳定性

C02-P13

高体积分数 SiC 颗粒增强铝合金技术的发展及应用

王荣, 朱秀荣, 吴岳壹, 徐永东, 郭红燕, 刘辰

中国兵器科学研究院宁波分院

高体积分数 SiC 颗粒增强铝合金,可以提高合金弹性模量,降低合金热膨胀系数,增强合金耐磨性,改善合金导热性和高温性能。该技术上世纪八十年代首先应用于微电子和光电电子封装的金属基复合材料,开始时每件的成本在几百美元至上千美元,现在经过技术改进制造成本已大幅度下降。结合压力铸造技术的良好成形性的净尺寸低成本铸造成形工艺可以解决现有的 Al/SiC 热管理材料制造成本居高不下问题。为了更好的为相关研究工作,对高体积分数 SiC 颗粒增强铝合金研究进展情况做了一个回顾和梳理。

关键词: SiC 颗粒; 增强; 压力铸造; 热管理材料

C02-P14

新型 2219 铝合金不同变形方向显微组织与力学性能研究

简宁宁, 柴丽华, 陈子勇, 金头男, 史国栋

北京工业大学

2219 铝合金可作为运载火箭贮箱锻环结构主要材料,特点是强度高,焊接性能好,耐腐蚀性能好,但是对于 2219 铝合金大型锻件,其力学性能偏差,需进一步提高。本文通过研究 2219 铝合金大型锻件的组织与性能的对立关系,为进一步优化 2219 铝合金大型锻件的制备工艺提供数据支撑。通过 OM、EDS 和 XRD 分析,对 2219 铝合金锻件的切向、径向和轴向的显微组织进行了观察,通过硬度实验、拉伸实验对 2219 铝合金锻件不同变形方向的硬度及拉伸性能进行了分析。显微组织进行观察结果表明 2219 铝合金锻件为沿轧制方向分布的板条状组织,其中沿晶界和晶内分布着细小颗粒状的第二相 Al₂Cu。硬度结果表明

垂直于轴向面的硬度最高, 平均值达到 153.7HV, 拉伸实母材沿着切向的拉伸性能最好, 屈服强度达到 321MPa, 通过观察断口的微观组织, 切向的韧窝最深最小。2219 铝合金组织为 Al 基体, 夹杂的第二相为 Al_2Cu 。锻件沿切向方向变形最多, 而且切向拉伸性能最好, 垂直于切向的面硬度最高。

关键词: 2219 铝合金; 力学性能; 微观组织; 变形

C02-P15

RRA 处理对含铈 7E75 铝合金综合性能及微观组织的影响

王霄飞, 黄晖, 张祥, 聂祚仁

北京工业大学

本文采用硬度、电导率、力学性能、腐蚀性能测试和扫描电镜、透射电镜微观组织观察的方法, 研究 RRA 热处理制度对新型含铈 7E75 铝合金力学性能和腐蚀性能的影响, 探讨回归温度、回归时间与合金综合性能的关系。结果表明: 合金经过预时效 120°C/24h, 回归 180°C/(40~60) min 和 190°C/(60~80) min, 再时效 120°C/24h 综合性能最优。合金经过 120°C/24h+180°C/60min+120°C/24h 时效后, 合金硬度、电导率、抗拉强度、屈服强度、延伸率和剥落腐蚀等级分别为: 207.6HV、33.53%IACS、579.5MPa、550MPa、12%、PC 级。此时 TEM 观察发现: 晶内析出相 η' 相细小弥散, 类似于峰时效晶内组织; 晶界析出相断续粗大, 与过时效晶界组织相似。

关键词: 7E75 铝合金; RRA 热处理; 力学性能; 腐蚀性能; 微观组织

C02-P16

喷射沉积 Al-Zn-Mg-Cu 合金包套变形工艺及其组织性能研究

李海超¹, 曹福洋¹, 郭舒¹, 宁志良¹, 贾延东², 刘祖岩¹, 孙剑飞¹

1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001

2. 上海大学材料学院, 上海 200444

本研究将包套变形技术应用于难变形喷射沉积高锌含量 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 成功制备出双向力学性能优异的盘饼构件。结果表明: 在无包套自由墩粗过程中, 坯料外径边缘在二次拉应力作用下严重开裂, 而包套变形可以显著减小内部坯料所受的拉应力, 有效抑制了裂纹的产生。显微组织分析显示包套预制坯相比自由墩粗预制坯具有更高的织构系数以及更多数量的亚晶组织。预制坯经过闭式模锻以及 T6 热处理后, 最终包套构件的极限抗拉强度、屈服强度分别为: 径向 727MPa、690MPa; 切向 735MPa、693MPa, 相比于自由墩粗构件, 其屈服强度提高约 45MPa。强化机制可归结为由包套变形工艺所引入的亚结构强化。

关键词: Al-Zn-Mg-Cu 合金; 包套变形; 织构; 力学性能

C02-P17

Al-Mg-Si-Mn-Er-Zr 合金均匀化的优化

张祥, 黄晖, 王霄飞, 聂祚仁

北京工业大学

铝合金凝固过程中形成的大颗粒破坏了其强度和热加工性。因此, 均匀化过程的研究主要问题是这些相的转变, 本文采用光学显微镜、扫描电镜、能谱分析、X 射线衍射和透射电子显微镜研究了 Al-Mg-Si-Mn-Er-Zr 合金铸态组织的相组成以及均匀化过程中的组织演变, 铸态组织中主要为枝晶状的 $Al_{0.5}Fe_3Si_{0.5}$ 、 $Al_{0.7}Fe_3Si_{0.3}$ 、 $Al_3Mn_{12}Si_7$ 等中间相, 均匀化后这些板条状的中间相转变为弥散分布的中间相, 与此同时, 在 565°C 下, 随着均匀化时间的延长, 中间相中的 Fe 逐渐被 Mn 所替代。考虑到 Al_3Er 颗粒的析出, 我们选用双级均匀化处理制度 300°C/10h+565°C/6h, 在此条件下, 能形成与基体共格的 Al_3Er 颗粒。

关键词: Al-Mg-Si-Mn-Zr-Er; 均匀化; 显微组织转变

C02-P18

稀土 Er-Zr 复合变质对 Al-7Si-0.3Mg 铝合金显微组织和力学性能的影响

季连涛, 黄晖, 王为, 李鑫, 聂祚仁

北京工业大学

研究了稀土 Er、Zr 复合添加和 T6 热处理对 A356 (Al-7Si-0.3Mg) 铝合金显微组织和力学性能的影响, 通过金相显微镜 (OM), 扫描电镜 (SEM) 及能谱 (EDS), X-射线衍射 (XRD), 差热分析 (DSC) 和拉伸试验, 结果表明: Er、Zr 的添加细化了铸态的 α -Al 晶粒和变质共晶硅相, 共晶硅由粗大片状和针状结构变成了具有分枝增加、尺寸缩短了的细小颗粒或纤维状的 Si 相, 均匀分布在基体当中, 当 Er、Zr 添加量为 0.3wt.% 时, 变质效果最好, 同时合金的拉伸性能达到最高。含 Fe 的 Al_3 (Er, Zr) 相被引入, 通过 T6 热处理, 共晶硅相进一步球化; 较大的 Al_3 (Er, Zr) 相和 β - Al_3FeSi 相变成细小颗粒和短棒状; 合金性能进一步提高。通过合金的拉伸断口形貌分析了合金的断裂机制, 主要是以韧窝断裂机制为主的韧性断裂。

关键词: A356 铝合金; 稀土 Er、Zr; 共晶硅; 微观组织; 力学性能

C02-P19

5E83 铝合金热轧工艺及力学性能研究

李鑫, 黄晖, 王为, 季连涛, 聂祚仁

北京工业大学

制备了 Al-4.5Mg-0.7Mn-0.2Zr-0.2Er 合金在不同轧制温度变形量均为 50% 的板材, 测试了不同温度热轧板材的显微硬度, 拉伸性能和冲击韧性。用金相显微镜、透射电镜对冲击和拉伸前的合金进行了原始组织分析, 并用扫描电镜分析了冲击断口形貌。结果表明, 随着轧制温度的升高, 抗拉强度和屈服强度逐渐降低, 延伸率和冲击韧性值逐渐增加, 在 350°C 时达到最好的强度与韧性的匹配。随着轧制温度的升高合金内部发生动态回复和动态再结晶。合金中复合添加 Er 和 Zr 形成细小弥散的 Al_3 (Er, Zr) 质点, 与基体共格, 可钉扎位错, 稳定亚结构, 阻碍亚晶长大及晶界的迁移, 从而抑制合金的再结晶, 提高合金的热稳定性。

关键词: 热轧; 力学性能; 动态回复; 亚晶;

C02-P20

Effect of percentage pass reduction on the second phase and corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu-Zr plate

Yuhao Liu¹, Liangming Yan¹, Jian Shen²

1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology

2. General Research Institute for Non-ferrous

The same size of 7055 aluminium alloy plates were rolled by different rolling process with different percentage pass reduction, and effect of percentage pass reduction on the second phase and corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu-Zr plate were investigated. The mechanisms were analyzed and discussed by optical microscope (OM), transmission electron microscope (TEM) and electron back-scattered diffraction (EBSD). Large percentage pass reduction can improve the corrosion resistance and the dissolution of the coarse second phase in plate center. For the plate rolled by the process with small percentage pass reduction, GP zone is the main precipitate and semi-continuous grain boundary precipitate appeared. While in the plate rolled by process with large reduction rate in pass, the main precipitations are the GP zone and η' are, and the grain boundary precipitation is discontinuous.

Keywords: 7055 aluminium alloy; percentage pass reduction; grain boundary precipitate; corrosion resistance

仅发表论文

C02-PO01

Research on microstructures and properties of spray-formed Si-30Al alloy used for electronic packaging

Hongwei liu

北京有色金属研究总院, 北京 100088

The microstructures and properties of spray-formed Si-30Al alloy is researched in this paper, which is used for electronic packaging. Hot isostatic pressing is used to compact the ingot, and then electroplating and brazing is carried out. Metallographic microscope and scanning electron microscope (SEM) are used to research the microstructure. The results show that, 1) the Si-30Al alloy comprises α -Al phase, pseudo eutectic phase and primary silicon phase; 2) the flow deformation of α -Al phase and pseudo eutectic phase fills pore defect making the alloy compacting by HIP; 3) the alloy can be electroplated and brazed easily, and no pore defect is observed in electroplated coating and weld through microstructure observation.

Keywords: Spray-formed Si-30Al alloy; electronic packaging; microstructure; properties

C02-PO02

2297 铝锂合金均匀化处理与动力学分析

杨胜利¹, 沈健², 蒋鹏¹, 李培跃¹, 郁炎¹, 宋德军¹, 陶欢¹, 郭伟¹, 付文¹

1. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所

2. 北京有色金属研究总院

对 2297 铸态铝锂合金进行单级和双级均匀化处理, 通过光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、能谱分析 (EDS)、X 衍射 (XRD) 和差热分析 (DSC) 研究合金元素分布和微观组织演变, 结果表明: 合金铸态组织存在严重的枝晶偏析, 其中 Cu、Fe 和 Mn 元素在晶界处存在明显偏析, 富集程度由晶界到晶内逐渐减弱, 晶界处主要为 Al_2Cu 相和含 Fe 含 Mn 相, 适宜的单级均匀化处理制度为 $525^\circ\text{C}\times 24\text{h}$ 。适宜的双级均匀化制度为 $460^\circ\text{C}\times 20\text{h}+525^\circ\text{C}\times 24\text{h}$, 经双级均匀化处理后, 合金晶界非平衡共晶相回溶充分, 枝晶偏析消除, Al_3Zr 粒子尺寸大小均匀, 分布弥散, 但晶界处仍存在未回溶的含 Fe 含 Mn 相, 该双级均匀化处理制度与动力学分析结果一致。

关键词: 2297 铝锂合金; 枝晶偏析; 均匀化处理; 动力学分析

C02-PO03

Effects of water casting on microstructure and microhardness of aluminum A356 alloy

Jianhua Wu

山东省科学院新材料研究所

The present investigation focused on the effects of a novel casting method of water casting and heat treatment on the microstructure and the mechanical properties of aluminum silicon A356 alloy. By the water casting, the coarse primary dendrite α Al grains with metal mould casting were transformed to fine globular-like. The morphology of eutectic silicon changed from coarse plate-like to coral-shaped. The results show that the mechanical properties and fracture toughness of the A356 alloy have been obviously improved by the water casting. The microhardness of the A356 alloy with water casting was significantly enhanced by 50% compared with metal mould casting.

Keywords: A356; water casting; microstructure; microhardness

C02-PO04

新型 Al-6Y-2P 中间合金及其对 Mg₂Si/Al 复合材料内 Mg₂Si 相细化处理

潘璐瑶, 于华倩, 姜珊, 王璐瑶, 左敏
济南大学 250022

本文利用高倍视频显微镜 (HSVM)、X 射线衍射仪 (XRD) 及场发射扫描电子显微镜 (FESEM) 等测试手段对新型 Al-6Y-2P 中间合金内 YP 化合物进行了研究, 采用该中间合金对 Mg₂Si/Al 复合材料进行熔体处理, 分析其对该合金微观组织的影响及作用机理。研究发现, Al-6Y-2P 合金内 YP 相呈立方体状, 其平均晶粒尺寸在 21.0 μm 。将其加入 Mg₂Si/Al 合金熔体, 保温 30 分钟后, 其粗大的初生 Mg₂Si 相从 118.6 μm 细化至 21.2 μm 。继续延长保温时间至 120 分钟, 初生 Mg₂Si 颗粒平均尺寸也仅为 20.3 μm 。与此同时, 共晶 Mg₂Si 相由片状转变为纤维状形态。分析 Al-6Y-2P 中间合金具有良好细化效果的原因, 就在于熔体内 YP 发生结构转变, 其在逐步扩散过程中释放出 P 原子。而释放出 P 原子会与铝熔体反应, 在凝固过程中重新键合从而以 AlP 的形式析出, 进而为 Mg₂Si 相提供了异质形核核心, 促进其细化。与此同时, 该中间合金中的钇元素则对共晶硅进行变质处理, 使其形貌发生改善。综上所述, 新型 Al-6Y-2P 中间合金可同步实现对 Mg₂Si/Al 合金的双重变质。

关键词: Mg₂Si/Al 复合材料; YP 相; 细化; 结构演变; 双重变质

C02-PO05

微量 Si 元素对 7056 铝合金组织与性能的影响

张星临¹, 陈送义^{1,2}, 周亮¹, 范淑敏^{1,2}, 袁丁玲¹, 昌江郁¹, 陈康华^{1,2}

1. 中南大学轻质高强结构材料重点实验室, 湖南长沙, 410083
2. 中南大学粉末冶金研究院, 湖南长沙, 410083

7056 铝合金是法国铝业于 2004 年研制出的一种适应新型环境的高性能铝合金, 与美铝研制的 7150, 7055 相比, 在提升 Zn 含量的同时, 降低 Mg、Cu 含量, 并进一步改善工艺, 纯化合金, 降低杂质元素含量, 使其在保证高比强度, 高断裂韧性, 耐蚀性下, 提升其淬透性等特点。目前, 对这种先进 7xxx 铝合金的研究刚起步, 主合金元素配比已有相关研究在进行, 但对于杂质 Fe、Si 等元素含量, 工厂因成本问题无法将其控制在极低水平。有相关文献报道 Si 元素含量对材料腐蚀性能的影响呈峰值变化, 在 0.005-0.1 之间有提升腐蚀性能的有利影响, 但 Al-Zn-Mg-Cu 合金体系中并未做更全面细致的研究。本文采用金相、扫描电镜 (SEM) 观察组织、力学拉伸试验、剥落腐蚀实验、晶间腐蚀实验、C 环慢拉伸腐蚀实验等分析测试方法研究微量 Si 对 7056 铝合金组织与性能的影响。研究发现: 微量杂质 Si 提升合金的强度, 随着 Si 含量从 0 增加至 0.06% (质量分数), 合金的抗拉强度, 伸长率有少量提升; 微量杂质 Si 使得合金耐腐蚀性能得到部分提升, 耐腐蚀性能由大到小的顺序为: 0.04%Si、0.02%和 0.06%Si、0%Si。其原因为, 加入微量 Si 元素, 促使了 Al₃Zr 弥散相的析出, 使晶粒细化, 并有效的钉扎位错、亚结构, 阻碍亚晶界迁移, 抑制其长大, 提升抗再结晶能力, 使合金强度等性能得到提升。同时因亚晶数量多且细小, 相比大角度晶界, 更能有效的防止材料遭受腐蚀, 抗腐蚀能力得到提升。

关键词: Si; 7xxx 铝合金; 晶粒细化

C02-PO06

时效工艺对 7003 铝合金显微组织与力学性能的影响

王顺成, 周楠, 韩星, 农登

广东省材料与加工研究所 510651

采用维氏硬度仪、透射电镜、拉伸试验机和电导率测量仪, 研究了时效温度和时间对 7003 铝合金组织演变及性能变化规律。结果表明, 随着时效时间的增加, 从 7003 铝合金基体中先后沉淀出的 GP 区、 η' 相 (亚稳定相 MgZn₂) 和 η 相 (MgZn₂), 其中 GP 区和 η' 相都能阻碍位错运动, 对合金起到很好的强化作用。在 GP 区数量最多时, 强度和硬度达到第一个峰值, 之后 GP 区向过度相 η' (亚稳定相 MgZn₂) 生

成, 强度和硬度达到第二峰, 由 η' (亚稳定相 $MgZn_2$) 生成 η ($MgZn_2$) 后强度和硬度开始下降; 随着时效温度的提高, 到达两个峰的时间缩短, 并且两个峰之间的时间间隔缩短, 说明析出的速度随着温度的升高而加快, 但时效过程中沉淀相析出的顺序没有改变; 在 120°C 时, 第二峰强度和硬度高于第一峰, 高于 120°C 后, 第二峰强度和硬度低于第一峰。

关键词: 铝合金; Al-Zn-Mg 合金; 时效

C02-PO07

Al-Mg-Er 合金高温压缩热变形行为研究

刘冉^{1,2}, 黄晖², 刘亚², 荣莉²

1. 北方工业大学
2. 北京工业大学

高镁铝合金合金化程度较高, 在凝固过程中由于快速冷却以及非平衡结晶的作用, 常会形成严重的枝晶偏析, 并在铸锭内部形成很大的内应力, 对后续的热加工过程会造成不利的影 响, 在热加工以前铸锭必须要经过适宜的均匀化处理。较高的温度, 较大的挤压比能使合金的粗大组织破碎细化成为较为均匀的变形组织, 从而能够提高合金的强度。而较高的温度也能够保证合金能够顺利挤出而不产生开裂。但温度较高也会导致变形组织细化程度不够而使得合金的强度得不到提高。温度越低, 在相同挤压比的情况下, 对挤压力的要求就更高, 因此, 选择合适的挤压及轧制温度及变形速率非常重要, 既能使得合金在挤压或轧制后保证较高的强度和腐蚀性能而又不致于在加工时发生开裂。基于此背景, 本研究针对添加 0.2%Er 元素的合金, 表征其初始组织, 分析不同加工工艺获得的该合金的电导率、硬度、强度及耐蚀性能, 在此基础上对合金进行热模拟分析, 绘制其加工窗口, 从而为开发出更多具有优异性能的新型铝合金提供加工的区间。得到如下结论: (1) 5E61 合金晶粒内部存在大量的位错, 析出相呈短棒状, 具有明显的 Al₆Mn 的特征, 对位错起到了钉扎的作用, 使得合金具有较高的强度, 失重腐蚀性能结果优于目前广泛使用的 1561 型合金, 剥落腐蚀性能达到 PC 级以上。(2) 加工图上出现两个发生完全动态回复区域: (1) $350\text{-}450^\circ\text{C}$ 和 $0.001\text{-}0.03\text{ s}^{-1}$ (2) 450°C 以上和 $0.01\text{-}1\text{ s}^{-1}$; 应变速率高于 10 s^{-1} 时出现流变失稳, 在低温变形时呈现带状局部变形, 高温变形呈现动态回复和局部动态再结晶的混合组织。(3) 基于加工图对合金生产工艺进行初步设计, 在低速率完全动态回复区 I 适合采用水压机加工大型盘类件; 在高温完全动态回复区 II 适合选择热轧开坯、挤压和锤锻; 在温度区间 $350\text{-}450^\circ\text{C}$ 、速率区间 $0.1\text{-}3\text{ s}^{-1}$ 内进行挤压轧制变形, 可获得较高的强度。

关键词: Al-Mg-Er 合金; 高温压缩; 加工图

C02-PO08

不同 Zn 含量对 Al-Mg-Si-Cu 合金时效析出行为的影响

袁波, 郭明星, 张济山, 庄林忠

北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083

Al-Mg-Si-Cu 系合金已成为汽车轻量化的关键材料, 但是其成形性能和烤漆硬化性能仍然有待进一步提高。本文拟在该系合金基础上进一步引入溶质元素 Zn, 以期使该系合金的烤漆硬化增量获得大幅提高。通过 DSC、OM、SEM、TEM、观察及拉伸测试等手段对 Al-Mg-Si-Cu-(Zn)合金的时效析出行为进行了系统深入研究。具体得出如下结论: 含 Zn 合金 DSC 曲线中的 β'' 相析出峰明显向低温区移动, 而且 Zn 元素的添加对合金 GP 区形成、溶解以及 β'' 相析出激活能影响显著, 建立的析出动力学可以比较好的对合金沉淀析出行为进行预测; 含 Zn 合金经 $185^\circ\text{C}/20\text{min}$ 时效即可快速升高到 127.6HV , 而不含 Zn 合金仅达到 119.8HV ; 此外, 含 Zn 合金进一步时效到 2h 可达到峰值硬度 142.2HV , 而不含 Zn 合金需 3h 才能达到峰值硬度 134.2HV , 而且含 Zn 合金对应的峰时效态屈服强度可达 370MPa , 远高于本文不含 Zn 合金以及其它 Al-Mg-Si-Cu 系合金的峰时效态屈服强度, 不过其拉伸断口仍以塑形断裂为主。两种合金 185°C 时效时

仍以 Mg-Si 相的析出为主, 不过含 Zn 合金沉淀相密度较高。最后, 根据合金时效过程的组织演化规律, 提出了两种合金沉淀相形核和析出模型示意图。

关键词: Al-Mg-Si-Cu 合金; 沉淀行为; 激活能; 动力学; 组织

C02-PO09

6009 铝合金激光-Mig 复合焊接头成形机理研究

张德芬, 韩金理, 陈孝文, 杨阳, 唐喻

西南石油大学 610500

对 6mm 厚 6009 铝合金板材进行光纤激光-MIG 电弧复合焊, 在焊接过程中改变激光与电弧的相对位置, 研究其对接头组织与性能的影响, 以探究铝合金激光电弧复合焊接头的成形机理。结果表明: 激光在前时, 激光与电弧的耦合作用更明显, 激光在前的焊缝成形性好于电弧在前的焊缝; 激光的搅拌作用使复合焊缝中心上部晶粒尺寸小于焊缝下部; 复合焊接头均存在软化区, 激光在前电弧在后时, 电弧热源的回火作用使焊缝上部的硬度略小于焊缝下部; 而电弧在前激光在后时, 激光热源导致凝固金属二次重熔造成焊缝上部硬度略大于焊缝下部; 接头热影响区中第二相都发生了不同程度的粗化, 拉伸试样均在 HAZ 发生断裂; 复合焊接头的拉伸断口都是典型的韧窝状态, 其韧窝的形成与第二相颗粒有关; 焊前开坡口有利于提高接头的力学性能。

关键词: 铝合金; 光纤激光-Mig 复合焊; 成形机理

C02-PO10

7085 铝合金自由锻件淬火-冷压残余应力演变规律研究

牛关梅, 王军强, 杨中玉, 曹海龙, 刘成

中铝材料应用研究院有限公司 102209

7085 铝合金是新一代高强、高韧、低淬火敏感性航空结构材料, 主要应用于飞机大型主承力结构件的制造。自由锻造铝合金超厚板淬火残余应力过大问题显著, 淬火残余应力过大极易导致厚板后续加工变形导致尺寸精度达不到要求而报废, 传统冷压的方法可以显著减小厚板的淬火残余应力。本文采用实验的方法获得了准确的淬火残余应力有限元材料模型, 采用 ABAQUS 建立了淬火-冷压有限元模型, 研究了不同冷压量对削减淬火残余应力的效果。淬火有限元分析结果表明淬火过程中锻件各个部位冷却强度不同, 形成了明显的温度梯度, 最大温差可达 298℃, 其中芯部温度降到 350℃ 以下需要 60s。淬火残余应力呈心部受拉表层受压, 拉应力最大值为 248MPa, 压应力最大值为 -221MPa。鉴于工厂设备能力约束, 采用分段冷压的方式削减淬火残余应力, 随着冷压量的增加淬火残余应力逐渐减小, 心部拉应力逐渐过渡为压应力, 表层拉应力逐渐过渡为压应力, 综合分析不同方向的应力的削减效果发现冷压量在 1%-2% 范围内, 锻件整体应力均匀区范围可降到 -50MPa~+50MPa。分段冷压的工艺缺陷导致冷压后表层有规律性的应力集中区, 最大可达 +110MPa, 支撑面的应力明显低于冷压面。单面分段式冷压和双面分段式冷压两种方式下, 双面冷压后淬火残余应力的分布均匀性优于单面冷压。建立准确的淬火-冷压有限元模型, 可以为优化冷压工艺削减淬火残余应力提供指导, 减小现场试模试验次数与成本。

关键词: 7085 铝合金; 自由锻件; 淬火残余应力; 冷压; ABAQUS 有限元

C02-PO11

喷淋淬火表面冷却强度差异对 7050 厚板残余应力分布的影响

王军强, 牛关梅, 杨中玉, 曹海龙, 刘成

中铝材料应用研究院有限公司 102209

7050 铝合金具有高强度、低密度等特点, 常用来制造航空航天等大型主撑力结构件, 由于残余应力的存在, 7050 厚板在后续机加工过程中易产生变形, 进而导致结构尺寸精度无法达到设计要求。辊底炉喷淋

淬火过程上下表面喷水量的差异,引起上下表面冷却强度产生差异,导致残余应力在板厚上的非对称分布。本研究基于辊底炉喷淋淬火过程中上下表面不均匀喷水量引起的淬火强度差异,建立了板材上下表面冷却强度存在差异的淬火有限元模型,对淬火过程上下表面温度、应力的变化过程开展了分析对比,获得了淬火强度差异对残余应力的影响规律。有限元分析结果表明,淬火应力整体呈现表面受压心部受拉的分布趋势,上表面辊底炉喷水量 $350\text{m}^3/\text{h}$ 时残余应力约为 -174MPa ,下表面喷水量 $300\text{m}^3/\text{h}$ 时残余应力约为 -194MPa 。基于有限元分析可知,淬火强度较大的表面,残余压应力反而较小,因此通过测试淬火表面残余应力的差异,可推测上下表面冷却强度的差异,从而为辊底炉上下喷水量的调节提供指导,降低 7050 厚板淬火残余应力分布不均匀性。

关键词: 7050 铝合金; 喷淋淬火; 冷却强度; 残余应力; 有限元分析

C02-PO12

微量元素和退火温度对 2524 铝合金微观组织的影响

李伟, 金滨辉, 肖翔, 刘成

中铝材料应用研究院有限公司 102209

2524 铝合金是新一代高强、高韧、高损伤容限的航空结构材料,主要应用于飞机蒙皮和耐损伤性结构件,为了满足飞机长寿命和安全可靠的设计要求,提高合金的疲劳裂纹扩展速率性能变得尤为重要,合金的晶粒组织是主要的影响因素。因此,本文研究 2524 铝合金的微量元素和退火工艺对其微观组织的影响。本文采用 2524 铝合金的 Zr、Er 和 Cr 元素微合金化和不同退火工艺,通过金相光学显微镜、高分辨扫描电镜和拉伸性能测试等测试分析方法,研究微量元素对合金的弥散相和晶粒组织影响,以及不同退火工艺下合金晶粒的演变规律。实验结果表明,Zr、Er 和 Cr 元素增加了 2524 合金铸态的偏析程度,Er 元素在晶间析出形成富 Er 相,促进了大块 Al_2Cu 相析出,富 Er 相在热处理过程无法回溶,增加了 2524 合金 T3 态的粗大第二相含量,而 Zr 和 Cr 未增加 2524 合金 T3 态的粗大相含量;Zr、Er、Cr 元素在 2524 合金均匀化过程中析出纳米弥散相,Cr 细化 2524 合金 T3 态的晶粒尺寸和提高其拉伸性能;随着退火温度的提高,2524 合金晶粒形貌从纤维状变形组织向长条再结晶组织演变;Cr 降低 2525 合金的再结晶温度,Zr 和 Er 对再结晶温度影响不明显。

关键词: 2524 铝合金; 微量元素; 退火温度; 晶粒组织

C02-PO13

不同组织状态下 Al-4.4Mg-0.7Mn-0.4Er-0.1Zr 合金薄板性能研究

樊振中

中国航发北京航空材料研究院 100095

Al-Mg 系合金因其优异的塑性、耐蚀性与焊接性能而广泛应用于航空、航天等军工装备领域。本文采用拉伸性能测试、疲劳性能测试、盐雾试验、化学铣削与 TR-100 表面粗糙度仪研究了两种不同规格与状态 Al-4.4Mg-0.7Mn-0.4Er-0.1Zr 合金材料的室温性能、高温性能、轴向疲劳性能、耐蚀性能与化铣性能。1.5mm 与 4.0mm 薄板室温 LT 方向力学性能均高于 L 方向,加工硬化态下 1.5mm 薄板 LT 方向平均抗拉强度、屈服强度与延伸率分别为 498MPa、440MPa 与 8.9%。薄板抗拉强度与屈服强度随试验测试温度的增加连续降低,延伸率随之不断提高,150℃高温下 1.5mm 与 4.0mm 薄板 LT 方向抗拉强度与屈服强度均高于 350MPa 与 250MPa,延伸率均大于 10%。与 150℃退火 1h 相比,经 50%轧制和 225℃退火 1h 后,薄板的疲劳裂纹扩展速率得到明显改善。 $R=0.1$ 且 $Kt=3$ 时 1.5mm 薄板轴向疲劳极限为 105MPa,4.0mm 薄板轴向疲劳极限为 98MPa; $R=0.1$ 且 $Kt=1$ 时 1.5mm 薄板疲轴轴向劳极限为 261MPa,4.0mm 薄板轴向疲劳极限为 247MPa。35℃下薄板在 30g/L NaCl 与 10ml/L HCl 溶液浸泡 24h 后均无明显的晶间腐蚀倾向,剥落腐蚀等级为 P 级;3%NaCl 与 0.5% H_2O_2 溶液腐蚀下 1.5mm 与 4.0mm 薄板抗应力腐蚀持续时间均大于 25 天。经

化学铣削处理，薄板表面平均粗糙度为 54.5RMS，且随着铣切深度的增加，浸蚀比连续降低，平均浸蚀速率约为 $0.04\text{mm}/(22500\text{mm}^2)/\text{min}$ 。

关键词：Al-Mg 合金；力学性能；耐蚀性能；疲劳极限

C02-PO14

105mm 厚 5083 铝合金热轧板组织和性能的关系

余欣未¹，蒋显全^{1,2}

1. 重庆市科学技术研究院
2. 西南大学

本文主要以 105mm 厚 5083 铝合金热轧板为对象，通过研究板材厚度方向，特别是中心区附近组织和性能的关系，提出了一种全新的组织和性能之间的强化机理。沿横向从 5083 铝合金热轧板一端依次向中心取样，记为 A、B、C、D 样品；将四块样品沿厚度方向等分切割成 10 片拉伸毛坯，并按从上到下的顺序依次编号，记作 1-10#，最后依照 GB/T228-2002 标准加工成板条状拉伸试样。在室温下进行拉伸试验，测定拉伸试样的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率；切取 1-5#试样端头制备金相样品，观察晶粒结构；切取拉伸试样断口，在扫描电镜下观察断口微观形貌；在 4#和 5#试样断口变形区切取薄片，在透射电镜下观察第二相分布及位错排布。沿板材厚度方向，组织和拉伸性能具有不均匀性，从板材表面到中心，强度呈反“N”型变化，伸长率整体呈“U”型变化，反常地是中心区强度与表面硬化层相当；板材近中心区和中心区存在一些亚微米级第二相，经分析为 AlMg(Mn, Cr)，前者分布密集，局部呈有序排列，钉扎位错呈 Taylor 晶格分布，后者相对稀疏，局部呈错落排列，位错分布呈胞状组织特征；热轧过程中，动态再结晶促使中心区的位错分布状态由断续胞状组织转变为连续胞状组织，并形成了一种特殊的“内陷”结构；这种“内陷结构”由亚微米级粒子和内陷位错团组成，外围粒子能够削弱再结晶对位错团的消散作用。105mm 厚 5083 铝合金热轧板力学性能在厚度方向上具有不均匀性，板材近中心区强度最高，中心区强度与表面硬化层相当，但塑性较差。近中心区强度最高，得益于亚微米级第二相对位错的“钉扎”作用，中心区强度异常的原因是存在一种特殊的“内陷”结构，它削弱了第二相强化。再结晶促使中心区的位错分布状态由断续胞状组织转变为连续胞状组织，“内陷”结构作为连续胞状组织的一种特有产物，是由粒子和内陷位错团组成，能够刺激再结晶，同时协调组织变形。

关键词：5083 铝合金；组织；性能；“内陷”结构

C02-PO15

晶粒大小及预应变对 AA2050 蠕变时效的影响

罗智辉^{1,2}，叶凌英¹，张勇¹，孙泉¹，张新明¹

1. 中南大学材料科学与工程学院
2. 湖南工程学院

为进一步提高 AA2050 的蠕变时效成形性能，对不同晶粒尺寸的该合金，在不同恒应力不同温度条件下进行了 24h 的蠕变时效拉伸试验。并对时效后的试样，利用 TEM 和 SEM 进行了组织和析出物的分析，利用万能拉伸机进行了室温力学性能测试。研究表明，2050 合金原始晶粒尺寸小的比尺寸大的具有更好的抗蠕变性能；在 440K 温度下合金的蠕变应变小于 450K 温度下的应变；经预轧制处理的试样比经预拉伸处理的试样同等蠕变条件下的蠕变应变更小，蠕变后的屈服强度更高。对相应的蠕变机理也进行了分析。

关键词：蠕变时效；AA2050；蠕变时效成形；预变形；晶粒尺寸

C02-PO16

多级时效热处理对新型铝合金组织及腐蚀性能的影响

范淑敏，陈康华

中南大学 410000

目的: 探索多级时效热处理对高 Zn/Mg、高淬透性的新一代超强铝合金晶内晶界析出相尺寸和分布状况的影响, 优化合金的力学和抗应力腐蚀等综合性能。方法: 通过透射电子显微镜 (TEM) 观察, 硬度、电导率测试、室温拉伸实验以及 tafel 循环极化曲线、慢拉伸应力腐蚀 (SSRT)、剥落腐蚀等手段研究了不同时效热处理制度对铝合金显微组织形貌和力学、腐蚀性能的影响。结果: 过时效再时效工艺能够在传统过时效的基础上, 进一步提高强度和腐蚀性能, 与峰时效和回归再时效相比, 合金硬度损失 4.4% 和 4.3%, 而电导率提高了 18% 和 7.3%, 应力腐蚀断裂时间延长, 剥落腐蚀改善。结论: 120°C/6h+155°C/10h(wq)+120°C/24h 的三级热处理工艺能够获得晶内细小弥散和晶界粗大断续的分布状态, 有利于获得更优异的综合性能。

关键词: 新型铝合金; 多级时效热处理; 抗腐蚀性能

C02-PO17

Al-7.5Zn-1.5Mg-0.2Cu-0.2Zr 合金的热压缩变形行为及其组织演变

何建良, 张文, 邱诚, 张大童

华南理工大学 国家金属材料近净成型工程技术研究中心 510641

研究变形条件对合金热压缩变形行为的影响, 对合金的高温塑性变形能力进行评价和分析。构建合金的热加工图, 为合金塑性成形的工艺优化提供指导。采用 Gleeble-3500 型热模拟试验机对 Al-7.5Zn-1.5Mg-0.2Cu-0.2Zr 合金进行变形温度为 350~550°C、应变速率为 0.001~10s⁻¹ 的热压缩试验, 基于动态材料模型 (DMM) 构建了合金的热加工图, 采用电子背散射衍射 (EBSD) 分析变形过程中合金的组织特征。随应变速率的降低或变形温度的提高, 流变应力峰值和稳态平衡值都呈减小趋势。合金热加工图中有一个高功率耗散率区域和一个流变失稳区域, 随着应变量的增大, 失稳区域面积增加, 并且失稳区域均对应高应变速率条件。在失稳变形条件下, 一些晶粒内部出现了与压缩方向呈 45° 的剪切变形带, 同时出现局部流变。合金的适宜加工温度为 450~500°C, 应变速率为 0.003~0.1 s⁻¹, 可以获得 34~39% 的功率耗散率。

关键词: Al-7.5Zn-1.5Mg-0.2Cu-0.2Zr 合金; 热变形; 加工图; 组织

C02-PO18

Mg-Al-Ca-Mn 合金中第二相颗粒晶体学特征的研究

刘玉^{1,2}, 马百常^{1,2}, 王娜娜^{1,2}, 周吉学^{1,2,3}, 赵东清^{1,3}

1. 山东省科学院新材料研究所
2. 山东省轻质高强金属材料省级重点实验室
3. 山东省汽车轻量化镁合金材料工程技术研究中心

本文制备了不同 Al/Ca 比的 Mg-xAl-yCa-0.5wt.%Mn 合金并对合金的微观组织进行表征。采用扫描电子显微镜观察合金微观组织的演变, 分析不同 Al/Ca 比对微观组织的影响; 采用透射电子显微术并结合晶体学知识, 进一步研究第二相颗粒的晶体学特征, 特别是颗粒的取向。在时效后的 Mg-5.0wt.%Al-3.0wt.%Ca-0.5wt.%Mn 合金中观察到 Al₂Ca 相, 该相以 180° 旋转孪晶的形式出现; 此外在该合金中观察到 Al₈Mn₄Ca 相, 并确定该相与基体间的取向关系为 [011]_p//[01-11]_a, (420)_p//(10-12)_a。

关键词: Mg-Al-Ca-Mn 合金; 析出相颗粒; 晶体学取向

C02-PO19

应力时效对 AA6101 铝合金导线组织及性能的影响

徐雪璇, 杨昭, 邓运来, 路建宁

中南大学, 湖南 长沙 410083

通过金相 (OM) 观察、扫描电镜 (SEM) 观察、透射电镜 (TEM) 观察、电子探针 (EPMA) 分析、XRD 物相分析、电阻率测试和力学性能测试等方法研究了应力时效对 AA6101 铝合金 (Al-0.58Mg-0.49Si) 导线组织及性能的影响。结果表明: 应力时效合金中存在两种主要强化相, β'' 相和 β' 相, 应力时效降低了 Si 元素在基体中的固溶度, 加速 Si 原子的析出, 促进 β'' 相向 β' 相转变, 使析出强化作用减弱。同时 Si 原子析出后与弥散 Fe 原子结合形成 Al_2FeSi 粗大第二相, 在晶界处富集, 对力学性能产生不利影响。时效过程中外应力促使基体中溶质 Si 原子减少, β'' 相向 β' 相转变导致基体晶格畸变程度下降, 导电率上升并提前达到峰值, 同时, 外应力引入大量位错, 位错滑移并在晶界处堆积, 增大了基体晶格畸变程度, 抑制导电率上升。

关键词: AA6101 铝合金; 应力时效; 析出相; 力学性能; 导电率

C02-PO20

Ge 元素对 Al-Zn-Mg 合金板材剥落腐蚀性能的影响

刘胜胆^{1,2,3}, 汪庆^{1,2,3}, 柴文茹^{1,2,3}, 邓运来^{1,2,3}

1. 中南大学材料科学与工程学院
2. 中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室
3. 中南大学有色金属先进结构材料与制造协同创新中心

Al-Zn-Mg 合金具有密度低、高比强度、易加工等特点, 其作为一种重要的结构材料, 近年来在交通运输、航空航天等领域得到了广泛的应用, 在长期使用过程中, Al-Zn-Mg 合金的剥落腐蚀敏感性会不断增加, 这给合金的强度、韧性等综合性能造成很大的损害, 给材料的安全性带来巨大隐患。如果能在保证 Al-Zn-Mg 合金具有较高强度的同时, 还拥有较好的耐剥落腐蚀性能, 将对 Al-Zn-Mg 合金的应用具有重大的意义。本文旨在研究 Ge 元素对 Al-Zn-Mg 合金板材剥落腐蚀性能的影响。本文实验材料为两块 3mm 厚轧制板材, 1 号合金板材名义化学成分为 (质量分数, %): Al-4.4Zn-1.2Mg-0.15Cu-0.3Mn-0.2Cr-0.12Zr, 2 号合金板材在 1 号合金板材的基础上加入 0.1%Ge 元素。本文采用的试验方法包括剥落腐蚀浸泡试验、电化学极化曲线以及交流阻抗谱测试, 金相显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM) 和扫描透射电镜 (STEM) 等。添加 Ge 元素后, Al-Zn-Mg 合金板材的剥落腐蚀等级由 EB 级变为 PC 级, 对应的最大腐蚀深度由 590 μ m 变为 338 μ m, 极化曲线自腐蚀电位由 -0.887V 变为 -0.831V, 阻抗谱容抗弧半径增大, 合金板材再结晶分数由 52.6%变为 36.6%, 晶界析出相平均尺寸由 48.5nm 增大到 62.9nm, 平均间距由 47.2nm 增大到 71.1nm。结果表明, Ge 元素显著地改善了 Al-Zn-Mg 合金板材的剥落腐蚀性能。加入 Ge 元素后, 合金板材再结晶分数下降, 晶界处大尺寸 η 相数量增多, 间距增大, 阻碍了腐蚀沿晶扩展速率, 这是提高合金剥落腐蚀性能的主要原因。

关键词: Al-Zn-Mg 合金; Ge 元素; 剥落腐蚀

C02-PO21

冷变形及退火对薄板 5083 铝合金微观组织与力学性能的影响

吴建新¹, 高崇², 黄瑞银¹, 赵丕植²

1. 中铝瑞闽股份有限公司
2. 中铝科学技术研究院

薄板 5083 铝合金具有中等强度、良好的导热性能和成型性能是轿车上壳体结构的理想材料。冷轧工艺对薄板 5083 铝合金的微观组织和力学性能的影响显著, 一直备受关注。本文研究了冷轧过程中不同的冷变形及成品退火工艺对薄板 5083 铝合金晶粒组织、拉伸性能与各向异性影响。研究表明, 当退火温度在 300 $^{\circ}$ C 时, 5083 合金中发生不完全再结晶。随着冷变形量的增加, 拉伸强度先增加后降低, 延伸率逐渐增加; 当退火温度在 320 $^{\circ}$ C~380 $^{\circ}$ C 时, 5083 合金中发生完全再结晶, 变形量为 30% 的试样晶粒发生异常长大形成粗大晶粒; 而变形量 > 50% 的试样晶粒发生完全再结晶形成细小等轴晶。随着冷变形量的增加,

拉伸强度略有增加，屈强比逐渐增大，延伸率变化较小。另外，随着退火温度的增加，合金各向异性性能降低。

关键词：5083 铝合金；冷变形；退火工艺；微观组织；力学性能

C02-PO22

Mn 对 Al-1.0Mg-0.6Si 铝合金组织和硬度的影响

丁幸宇，程永奇，张鹏，董勇

广东工业大学 510006

从微合金化入手研究铝合金微观元素的细微变化对其组织细化作用的影响，提高铝合金的综合性能。在 Al-1.0Mg-0.6Si 铝合金基础上逐步增加 Mn 含量（初始 Mn 含量为 0.25%，以 0.1%递增，共四组实验作对比），通过扫描电镜/能谱仪、X 射线衍射以及金相分析和硬度测试，研究了 Mn 含量对铸态组织、均匀化组织中的结晶相以及固溶时效硬度的影响。结果表明：合金铸态中结晶相主要是以微量颗粒状的 $Al_{19}CuMg_{4.1}Si_{3.3}$ 、不规则的条块状 $Al_8(FeMn)_2Si$ 、以及具有明显共晶形态的鱼骨状 $Al_5(FeMn)Si$ 和少量 Mg_2Si 的形式存在；随着 Mn 含量的增多，合金中 AlFeMnSi 型结晶相增多，且有粗大化的倾向；均匀化处理后，AlFeMnSi 型结晶相有明显的细化，且鱼骨状的 $Al_5(FeMn)Si$ 随着 Mn 含量的增多逐渐向条块状的 $Al_8(FeMn)_2Si$ 转变；对比合金铸态硬度和固溶时效后的硬度，发现 Mn 含量为 0.25%时，铸态硬度和固溶时效硬度均为最高，分别达到 67HBW 和 105HBW，而随着 Mn 含量增加，出现硬度先降低后增加的情形，但是都不及初始 Mn 含量合金的硬度。结论：Mn 含量为 0.25%时，合金硬度达到最大，由于硬度和强度有正相关性，间接说明了 Mn 含量为 0.25%时，合金强度最大。

关键词：Al-Mg-Si 合金；结晶相；硬度；Mn

C02-PO23

6063 铝合金高温流变本构方程及组织演变

余珠华，张大童，张文，邱诚

华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心 510641

目的：为了考察 6063 铝合金在较高应变速率下的变形行为。方法：采用 Gleeble-3500 热模拟实验机，通过高温等温压缩实验，对 6063 铝合金在变形温度为 390-510℃，应变速率为 $1-20s^{-1}$ 条件下的热变形行为进行试验研究。建立热变形本构方程，通过金相组织，分析了热变形过程组织演变规律。结果及结论：6063 铝合金的软化机制以动态回复为主；考虑应变补偿的本构方程可较好的预测该合金热变形时的流变行为。观察合金微观组织，在加工失稳区域（低温高应变速率）发现剪切带的存在，而稳态变形区域的合金组织较均匀。

关键词：6063 铝合金；热压缩；本构方程；流变应力

C02-PO24

Al-Zn-Mg-(Mn, Zr)合金中弥散相析出及对再结晶的影响

刘胜胆^{1,2,3} 陈景超^{1,2,3}，柴文茹^{1,2,3}，林化强^{1,4}，孙琳⁴，邓运来^{1,2,3}

1. 中南大学材料科学与工程学院
2. 中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室
3. 中南大学有色金属先进结构材料与制造协同创新中心
4. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司

在 Al-Zn-Mg 合金中加入 Mn 和 Zr 元素能够形成细小弥散的第二相，这些含 Mn 和 Zr 的弥散相能够有效地抑制再结晶。由于溶质分配系数 K 不同，Zr 和 Mn 元素在铸造时的偏析模式相反，含 Mn 和 Zr 弥散相的析出行为存在差异，本文旨在探究 Al-Zn-Mg-(Mn, Zr)合金中含 Mn 和 Zr 弥散相的析出规律及其对再

结晶的影响。实验所用材料有 4 种, 分别为 Al-4.4Zn-1.2Mg、Al-4.4Zn-1.2Mg-0.3Mn、Al-4.4Zn-1.2Mg-0.1Zr 和 Al-4.4Zn-1.2Mg-0.3Mn-0.1Zr, 采用了电导率测试、金相显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、能谱分析、透射电镜 (TEM) 和扫描透射电镜 (STEM) 等检测方法。结果表明, Al-4.4Zn-1.2Mg-0.1Zr 合金中 Zr 元素在晶内偏聚, 含 Zr 弥散相主要在晶内析出, 晶界附近析出数量很少; Al-4.4Zn-1.2Mg-0.3Mn 合金中 Mn 元素在晶界附近偏聚, 含 Mn 弥散相主要在晶界附近析出, 晶内析出数量较少; 在 Al-4.4Zn-1.2Mg-0.3Mn-0.1Zr 合金中, 由于含 Mn 弥散相溶解了部分 Zr 元素, 降低了 Zr 在基体中的过饱和度, 含 Zr 弥散相尺寸增加, 数量减少。Al-4.4Zn-1.2Mg-0.1Zr 合金板材固溶后的再结晶分数仅为 26.3%, Al-4.4Zn-1.2Mg-0.3Mn 合金板材固溶后的再结晶分数为 95.4%, Al-4.4Zn-1.2Mg-0.3Mn-0.1Zr 合金板材固溶后的再结晶分数达到了 74.0%。结论: 含 Zr 弥散相能够有效地抑制再结晶, 而含 Mn 弥散相抑制再结晶效果较差, Al-4.4Zn-1.2Mg-0.3Mn 合金板材固溶后几乎完全再结晶。在 Al-4.4Zn-1.2Mg-0.1Zr 合金中加入 Mn 元素后, 含 Zr 弥散相尺寸增加、数量减少, 削弱了含 Zr 弥散相抑制再结晶的能力。

关键词: Al-Zn-Mg 合金; Mn, Zr; 弥散相; 再结晶

C02-PO25

6005A-T5 铝合金薄壁型材搅拌摩擦焊接头显微组织、力学性能与应力腐蚀性能分析

林森¹, 邓运来¹, 林化强^{1,2}, 张臻¹, 叶凌英¹

1. 中南大学
2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司

采用搅拌摩擦焊 (FSW) 对厚度为 4mm 的 6005A-T5 铝合金薄壁型材进行焊接, 获取成形良好的焊接接头。采用金相显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、电子背散射 (EBSD)、透射电镜 (TEM) 等测试手段研究接头的显微组织, 对接头进行室温拉伸和室温弯曲性能分析, 并采用慢应变拉伸与恒载荷加载的方式研究接头的应力腐蚀行为。结果表明: 焊核区 (WNZ) 发生动态再结晶, 形成细小等轴晶; 热机影响区 (TMAZ) 晶粒发生严重弯曲变形, 发生部分动态再结晶; 热影响区 (HAZ)、母材区 (BM) 的晶粒为粗大等轴晶。焊接接头抗拉强度为 221.72MPa, 焊接系数为 84.42%; 焊接接头的正弯和背弯均未发现裂纹。在 25℃ 和 50℃ 3.5wt.% NaCl 溶液的应力腐蚀条件下, 焊接接头的应力腐蚀敏感指数 (I_{SSRT}) 分别为 3.46% 和 3.56%, 断口呈现明显的沿晶开裂特征。

关键词: 6005A-T5 铝合金; 搅拌摩擦焊; 微区取向分析; 力学性能; 应力腐蚀

C02-PO26

Zn 含量对超高强 Al-xZn-3.3Mg-2.2Cu 合金挤压棒材力学性能与腐蚀性能的影响

刘胜胆^{1,2,3}, 杨臻坤^{1,2,3}, 郑鹏程^{1,2,3}, 林化强^{1,4}, 孙琳⁴, 邓运来^{1,2,3}

1. 中南大学材料科学与工程学院
2. 中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室
3. 中南大学有色金属先进结构材料与制造协同创新中心
4. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司

超高强 Al-Zn-Mg-Cu 系合金是航空航天等领域的关键结构材料, Zn 元素作为最主要的添加元素, 其含量与合金实际性能密切相关。本文旨在探究 Zn 元素的改变对超高强 Al-Zn-Mg-Cu 系合金力学性能与腐蚀性能的影响。实验所用材料为 2 种, 分别为 Al-7.9Zn-3.3Mg-2.2Cu-0.14Zr、Al-9.9Zn-3.3Mg-2.2Cu-0.14Zr。采用硬度与电导率测试、室温拉伸力学性能测试、晶间腐蚀与剥落腐蚀浸泡实验、电化学极化曲线测试等检测方法, 并结合金相显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、扫描透射电镜 (STEM) 对第二相形态、弥散析出相的数量与尺寸、元素含量及晶界无沉淀析出带 (PFZ) 的分析, 研究了 Zn 含量对超高强 Al-xZn-3.3Mg-2.2Cu 合金挤压棒材力学性能与腐蚀性能的影响。结果表明: 随 Zn 含量由 7.9% 增至 9.9%, 经 470℃/1h 固溶及 120℃/24h 时效, 合金硬度由 208.2HV 增至 220.8HV, 电导率由 27.4%IACS 降至

26.8%IACS, 合金强度提升而延伸率稍有下降, 屈服强度由 721.2MPa 增至 755.5MPa, 延伸率由 6.0%降至 5.4%; 经 460°C/1h 固溶及 120°C/24h 时效后, 合金晶间腐蚀与剥落腐蚀性能变差, 晶间腐蚀最大深度由 126 μ m 增至 174 μ m, 剥落腐蚀等级由 EB 级增至 ED 级, 腐蚀电流密度增加约 144%, 腐蚀电位降低约 1.5%。结论: 当 Zn 含量由 7.9%增至 9.9%, 经 470°C/1h 固溶及 120°C/24h 时效, 合金强度、硬度提升, 延伸率、电导率下降, 析出相更加弥散密集; 经 460°C/1h 固溶及 120°C/24h 时效, 合金晶间腐蚀与剥落腐蚀性能均变差, 同时腐蚀电流密度也有较大增加, 扫描透射电镜 (STEM) 所反映的析出相、元素含量及晶界无沉淀析出带 (PFZ) 特征也佐证了腐蚀性能的变化。

关键词: 超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金; Zn 含量; 力学性能; 腐蚀性能

C02-PO27

淬火速率对 7020 铝合金轧制板材耐剥落腐蚀性能的影响

刘胜胆^{1,2,3}, 郭琛^{1,2,3}, 杨臻坤^{1,2,3}, 林化强^{1,4}, 孙琳⁴, 邓运来^{1,2,3}

1. 中南大学材料科学与工程学院
2. 中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室
3. 中南大学有色金属先进结构材料与制造协同创新中心
4. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司

Al-Zn-Mg 系合金由于其具有较高的强度、优良的焊接性能和良好的挤压工艺性能, 被广泛应用于轨道交通焊接构件中。然而在服役过程中剥落腐蚀会导致合金的强度、塑性及疲劳性能大幅度下降。作为热处理可强化 7xxx 系铝合金, 淬火速率是决定其时效后能否获得良好性能的关键因素之一, 淬火速率的降低改变合金的微观组织以及晶界析出行为, 而这些因素的改变都与合金的耐剥落腐蚀性能密切相关。本文以 7020 铝合金轧制板材为对象, 研究淬火速率对其微观组织的影响, 进而探究微观组织与剥落腐蚀的关系。实验材料为 12mm 厚的 7020 铝合金轧制板材, 其成分 (质量分数, %) 为: Al-4.65Zn-1.13Mg-0.15Cu-0.18Cr-0.14Zr-0.36Mn-0.41Fe。将试样在 470°C 下固溶 1 小时, 分别通过室温水、沸水、空气三种淬火介质淬火后, 进行 90°C \times 12h+169°C \times 11h 的时效处理, 随后按 GB/T22639-2008, 对时效后试样进行剥落腐蚀浸泡实验, 并结合金相显微镜、扫描电镜以及透射电镜等手段对试样显微组织进行分析。淬火速率下降, 晶界析出相尺寸和数量随着增加; 无沉淀析出变宽, 晶界析出相中的 Zn, Mg 含量随之减少, 而 Cu 元素含量在室温水淬火和空气淬火情况下基本不变, 却在沸水淬火情况下含量最高; 无沉淀析出带中 Zn、Mg 元素的含量几乎不受淬火速率的影响, Cu 元素含量沸水淬火试样中最高, 室温水淬火次之, 空气淬火最低; 合金的耐剥落腐蚀性能随之下降, 室温水淬火、沸水淬火、空气淬火的腐蚀等级依次为 PC、EA、EC, 最大腐蚀深度依次为 388 μ m、524 μ m、570 μ m。结论: 随着淬火速率的降低, 淬火过程中析出平衡相 η 的尺寸和数量增加, 无沉淀析出带宽化, 不仅改变了合金的微观组织形貌, 也改变了晶界析出相以及无沉淀析出带的化学成分, 这些因素的共同作用导致合金耐剥落腐蚀性能的降低。

关键词: 7020 铝合金; 淬火速率; 剥落腐蚀; 显微组织

C02-PO28

微量 Al-Ti-C-Ce 对 Al-Cu-Mn 合金凝固组织转变及断裂性能的影响

郭廷彪^{1,2}, 王晨¹, 李琦¹, 张锋¹

1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050
2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050

为改善 Al-Cu-Mn 合金综合性能。通过改变 Al-Cu-Mn 合金中细化剂 Al-Ti-C-Ce 的含量。添加 0.1% 的 Al-Ti-C-Ce 后 Al-Cu-Mn 合金铸态组织明显被细化, θ 相以点状或条状均匀分布; 随着添加量的增加, 局部晶粒发生粗化, 当添加量为 0.3% 时, 合金组织被细化的效果进一步降低, 晶间析出相 TiC 和 Al₃Ti 数量增加, 合金以韧性断裂为主要失效方式。T6 热处理之后, 合金晶粒尺寸变化不大, θ 相及 TiC 和 Al₃Ti 数量

减少,由网状向点状或针状或条状结构转变,合金韧性断裂的比例增加。添加 Al-Ti-C-Ce 对于改善 Al-Cu-Mn 合金组织和断裂性能具有积极的作用。

关键词: Al-Cu-Mn 合金; Al-Ti-C-Ce; T6 热处理; 微观组织; 断裂性能

C02-PO29

预变形对预时效态高 Zn 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金组织和性能的影响

王楠, 郭明星, 张济山, 庄林忠

北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083

实验目的: 利用预变形行为模拟材料的变形过程, 探索在不同变形量的条件下高 Zn 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金性能变化, 摸索一条高 Zn 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金在汽车结构件中应用的方式。实验方法: 通过采用硬度、OM、SEM、TEM 研究了三种不同预变形量对 470°C×0.5 h+120°C×0.5 h 预时效态 Al-9.94Zn-1.98Mg-1.77Cu 铝合金轧制板材微观组织和性能的影响。实验结果: 预时效态合金的屈服强度为 460 MPa, 但对合金分别施加 0%、5%、10%和 15%的预变形后再进行 T6 时效, 合金的屈服强度分别为 573.2 MPa、630.4 MPa, 659.3 MPa, 550.3 MPa, 延伸率分别为 13.8%, 13.5%, 9.9%, 8.5%。终时效合金的屈服强度随着预变形量的增加呈现先升高后降低的变化趋势, 延伸率呈现先逐渐降低的变化趋势。实验结论: TEM 显示, 预时效态合金晶内析出相非常弥散细小且密度较小, 引入变形后, 在合金内部产生大量位错, 并且随位错密度增加, 终时效合金晶内沉淀相的数量和尺寸都大大增加, 其中经过 5%预变形的合金中位错密度最小, 析出相主要为 η' 相; 经过 10%预变形的合金中位错密度居中, 析出相主要为 η' 相和在位错上析出的 η 相, 并且析出相的尺寸较大, 位错强化和沉淀强化共同作用使经过 10%预变形的合金有最高的屈服强度; 经过 15%预变形的合金中位错密度最大, 析出相的数量减小并且基本转变为大尺寸平衡相 η 相, 这是导致其屈服强度降低的主要原因。晶界析出相的分布也由连续链状变为粗大断续分布, 晶间无析出带的宽度明显增大。依据以上实验结果, 在汽车结构件的变形过程, 可结合结构件的形状, 适当调整不同位置的变形量, 控制在 5%-10%可得到性能增强的组织。

关键词: 高 Zn 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金; 预变形; 机械性能; 组织结构; 汽车结构件

C02-PO30

热加工过程中 2207 铝锂合金中氧化膜形成及分布规律研究

刘闪光

北京航空材料研究院 100090

研究 2297 铝锂合金在热加工过程中氧化膜的形成原因及分布规律, 为优化 2297 铝锂合金的热加工工艺提供指导。利用扫描电镜对试样断口进行表征, 利用能谱对氧化膜的成分进行分析。结果表明, 断口上氧化膜的数量及尺寸随热加工变形量增大而增多; 同样热加工工艺下, 固溶时效处理后, 断口氧化膜数量显著增加, 绝大部分氧化膜的成分与基体相同。气体在晶界的偏聚是氧化膜形成的主要原因。

关键词: 2297 铝锂合金; 氧化膜; 固溶时效处理; 断口分析

C02-PO31

等通道转角挤压(ECAP)对 ZL205A 合金组织及性能的影响

郭廷彪^{1,2}, 李琦¹, 王晨¹, 张锋¹, 丁雨田^{1,2}, 贾智^{1,2}

1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室

2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室

ZL205A 合金具有较高的强度、硬度和良好的腐蚀性能, 为了减少铸造缺陷、进一步强化材料性能, 使其在高性能航空零件中得到广泛应用。对 ZL205A 合金在室温下进行 A 路径等通道转角挤压(ECAP), 所用模具内角 $\Phi=105^\circ$, 外角 $\Psi=30^\circ$ 。采用 OM、SEM、EDS 和 XRD 研究了 ECAP 后合金的微观组织演变规

律, 并测试了不同应变下铸态及热处理态合金的硬度变化。结果表明: 铸态合金经 1 道次 ECAP 后, 晶粒被明显细化, 沿晶界分布的粗大 q 相被挤碎, 以颗粒状流线型弥散分布, 2 道次变形后, θ 相分布均匀性增加; 热处理态合金 ECAP 后, 晶粒细化效果明显, 并且沿轴向被拉长, 呈流线型分布。ECAP 可大幅度提高材料硬度, 2 道次变形后铸态合金硬度从 65HV 增加到 132HV, 热处理态合金硬度从 112HV 增加到 198HV; 随着挤压道次增加, 韧窝数量逐渐增加并均匀分布, 且深浅基本趋于一致, 韧窝底部的析出相弥散分布于基体中。

关键词: ZL205A; 等通道转角挤压; 组织演变; 细晶强化; 位错交割

C02-PO32

汽车用 6016 铝合金板材的固溶及预时效处理工艺研究

安小雪, 李勇, 王昭东, 邸洪双

东北大学, 沈阳 110819

6000 系铝合金具有成形性好、强度高、耐高温等一系列优点, 是汽车轻量化的重要材料, 但目前优质汽车铝板的关键热处理技术仍然被国外垄断, 严重阻碍了其广泛应用。本研究以汽车用 6016 铝合金板材为研究对象, 旨在开发出能够同时显著改善其冲压成形性和烤漆硬化性的最终热处理工艺技术, 为实际工业生产提供一定的理论指导。采用杯突、硬度、拉伸力学性能测试、XRD、DSC 和电子显微组织分析方法, 主要研究了不同固溶及预时效处理工艺制度对 6016 铝合金冷轧板材组织与性能的影响。结果表明: 6016 铝合金冷轧薄板中存在 $Al_{1.9}CuMg_{4.1}Si_{3.3}$, $Al_{0.56}Mg_{0.44}$, Mg_2Si 及 Al_2Fe_3Si 等合金相, 在固溶处理过程中, $Al_{1.9}CuMg_{4.1}Si_{3.3}$, $Al_{0.56}Mg_{0.44}$, Mg_2Si 等合金相逐渐溶解直至消失, 而 Al_2Fe_3Si 相并无明显变化。随着固溶时间的延长, 6016 时效态合金的强度、硬度先上升后趋于稳定, 杯突值先下降后趋于稳定, 延伸率和 n 、 r 值无显著变化。固溶处理后经预时效处理的 6016 铝合金板材, 冲压成形性及烤漆硬化性得到明显改善。在相同预时效温度下, 随预时效时间增加, 从 5min 开始板材的烤漆后硬度、强度都会明显上升。而在预时效温度为 160℃时, 随预时效时间的延长, 板材烤漆后的强化效果逐渐趋于平缓, 成形性能开始下降。汽车用 6016 铝合金板材合宜的固溶及预时效处理工艺制度为 550℃/5min 固溶水淬后 160℃×10min 预时效, 在此工艺条件下, 板材可以同时获得良好的冲压成形性和烤漆硬化性, 烤漆后屈服强度和抗拉强度分别提高约 85MPa 和 138MPa, 延伸率为 26%, 杯突值为 8.12 mm。

关键词: 6016 铝合金板材; 固溶处理; 预时效处理; 成形性; 烤漆硬化性

C02-PO33

Y 合金化和固溶处理提高 ADC12 铝合金的冲击韧性

黄正华¹, 张银帅^{1,2}, 戚文军¹, 徐春杰², 周永欣², 李扬德³, 李卫荣³

1. 广东省材料与加工研究所 广东省金属强韧化技术与应用重点实验室, 广东 广州 510650

2. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048

3. 东莞宜安科技股份有限公司, 广东 东莞 523662

具有较高比强度和良好抗腐蚀、导电导热、铸造等性能的压铸铝合金已广泛应用于汽车、通讯电子和航空航天等领域。特别是随着世界各国汽车工业的快速发展, 对铝合金汽车压铸部件的力学性能等要求越来越高。目前, 世界各国常用 ADC12 合金进行压铸, 但该合金存在强度较低和韧性较差等问题, 因此国内外研究人员常通过添加稀土 RE 来改善组织和提高性能。为此, 本文首先在 ADC12 合金中添加 0.85%Y, 再经 520℃固溶 8 h。利用光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 分析其组织和相组成, 并测试其冲击韧性, 并建立组织与冲击韧性之间的内在联系, 提出获得高韧性铝合金的有效途径, 以扩大其应用范围。结果表明, ADC12 合金中添加 0.85%Y 后, 铸态组织显著细化, 粗大初生 $\alpha-Al$ 树枝晶转变为细小胞状晶和等轴晶, 长针状或板条富 Si 相转变为细小纤维状或颗粒状, 同时生成少量针状 Al_3Y 新相。经固溶处理后, 两合金相组成未发生改变, 长针状或板条富 Si 相完全消失, 部分第二相固溶

于 α -Al 基体中, 分布更均匀。添加 0.85%Y 后, 合金的铸态冲击韧性值由 ADC12 合金的 3.8 J/cm² 提高至 10.8 J/cm², 经固溶处理进一步提高至 21.9 J/cm², 较 ADC12 合金铸态值提高幅度达 476%。

关键词: ADC12 合金; Y 变质; 组织; 冲击韧性

C02-PO34

初生相分布形态对 7020 铝合金型材焊接接头力学性能的影响

单朝军

中南大学材料科学与工程学院 410083

高速列车底架上重要的承力部件主要使用 7020 铝合金材料采用 MIG 焊接方法生产, 焊接后接头由于力学性能较低而常常过早失效, 严重影响了高铁的安全使用。采用光学金相、扫描电镜、能谱分析、透射电镜、电子探针和直读光谱成分检测等方法, 研究了不同初生相分布形态的 7020 铝合金型材焊接接头, 产生力学性能差异的影响机理。结果表明, 初生相分布均匀细小密集的母材, 焊接后自然时效三个月抗拉强度可达 311MPa, 焊接系数达 84.3%, 延伸率为 11.1%。而初生相分布不均匀、大小尺寸范围宽的母材焊接后接头抗拉强度只有 268 MPa, 焊接系数只有 72.0%, 延伸率为 5.3%。母材初生相分布特征对焊缝区晶粒尺寸、焊接凝固初生相尺寸及分布形态、焊缝区合金元素含量等有较大影响。小于 2 μ m 主要含 Fe、Mn 元素的初生相对焊接接头凝固时非均匀形核有较大促进作用, 细化凝固晶粒组织, 提高焊接接头的力学性能。

关键词: 7020 铝合金; MIG 焊接; 焊接系数; 初生相

C02-PO35

回归再时效对 Al-Zn-Mg 合金组织与疲劳性能的影响

王勇

中南大学轻合金研究院 410083

本文研究了室温大气环境下过时效态和两种回归再时效态 Al-Zn-Mg 合金的高周疲劳和疲劳裂纹扩展行为, 并分别采用透射电镜和扫描电镜对合金的显微组织及疲劳断口进行了分析。结果表明: 相比于过时效态, 回归再时效态的合金具有较细小密集的晶内析出相, 晶界析出相和无析出带也显著减小。回归再时效处理可以显著提高合金的疲劳强度极限, 这主要是由于其较小的晶界析出相和较窄的无析出带, 减小了晶界开裂的可能, 从而使得疲劳裂纹萌生困难。但其疲劳裂纹扩展速率却高于过时效态合金, 主要是由于晶内密集的不可切割相阻碍了位错的可逆滑移, 从而提高了裂纹扩展速率。

关键词: Al-Zn-Mg 合金; 回归再时效; 疲劳裂纹扩展; 疲劳断口

C02-PO36

有限元模拟技术在铝型材挤压成型过程中的作用

牛关梅, 李伟, 田宇兴, 刘成

中铝材料应用研究院有限公司 102209

挤压模的设计、挤压工艺参数的制定基本凭借设计人员的丰富经验和工程类比, 需经过多次试模、修模和参数修改, 成本高且周期长。采用有限元模拟技术可以对新的模具结构和材料流动提供快速的分析, 大大缩短了实际生产前模具设计、试模、修模时间, 降低了成本缩短了周期。本文采用 gleeble3500 测试了 6082 铝合金不同温度不同应变速度的真应力-应变曲线, 建立材料模型。采用商业有限元软件 Q-form 建立了铝合金型材挤压成型有限元模型, 分析了挤压温度、挤压速度和工作带的长度对型材出口温度和金属流速的影响, 确定了一组工艺参数进行实际生产, 其中坯料温度 500 $^{\circ}$ C, 模具和挤压筒温度均为 450 $^{\circ}$ C, 挤压速度 1mm/s, 结果显示实际料头形状与模拟结果相一致, 模拟结果可靠。模拟结果可得挤压速度越大, 金属流速越快, 型材截面流速越不均匀, 型材出口温度也越高, 截面温度均匀性越差。挤压温度不能太高,

太高易发生过烧，型材性能达不到，也不能过低，挤压温度太低金属流动太慢。同时模拟结果得出新旧材料接头长度约为 2563.8mm，合理截取废料长度。

关键词：有限元模拟；铝型材；挤压成型

C02-PO37

机械振动对 2124 铝合金双曲率蠕变时效成形的影响

王宇^{1,2}

1. 中南大学材料科学与工程学院
2. 中南大学轻合金研究院

本文将机械振动引入 2124 铝合金蠕变时效成形过程中，分别采用三维光栅扫描、透射电镜显微分析及拉伸试验分别研究了机械振动的引入对 2124 铝合金蠕变时效成形的形变、时效析出行为及力学性能的影响。结果表明，机械振动的引入，使 2124 铝合金轧制方向和横向蠕变成形回弹量分别降低 24%、17%；析出相分布更致密均匀，其体积分数得到提高；屈服强度提高约 12%，且屈服强度的各向异性降低约 8%。

关键词：机械振动；2124 铝合金；蠕变时效成形

C02-PO38

Al-Zn-Mg 合金板材的晶间腐蚀动力学研究

邓运来^{1,2,3}，张臻^{1,3}，叶凌英^{2,3}，林森^{2,3}

1. 中南大学轻合金研究院
2. 中南大学材料科学与工程学院
3. 中南大学有色金属先进结构材料与制造协同创新中心

Al-Zn-Mg 合金在复杂环境服役过程中易发生晶间腐蚀，同一材料在不同取向上存在一定的差异。本文采用光学金相显微镜、扫描电镜研究了 40mm 厚的 Al-Zn-Mg 合金板材不同取向试样的组织分布、晶间腐蚀行为。结果表明：晶粒沿板材轧制方向呈扁平状，晶界处呈链状分布的第二相；晶间腐蚀开始于晶界的第二相处，L（纵向）-T（横向）面的晶界腐蚀后容易呈片状脱落，晶间腐蚀最大深度值最小，为 3 级晶间腐蚀；T-S（短横向）面和 L-S 面存在较多晶界，腐蚀容易向深度方向发展，T-S 面的晶间腐蚀最大深度最大，为 4 级晶间腐蚀；腐蚀失重表明，T-S 面的腐蚀失重最大，有较多的腐蚀产物脱落。此外，得到了不同取向试样的腐蚀失重和最大腐蚀深度随时间变化规律，并拟合得到了晶间腐蚀动力学方程。

关键词：Al-Zn-Mg 合金；晶间腐蚀；轧制方向；动力学

C02-PO39

回归再时效对 7020 铝合金组织与疲劳性能的影响

王勇^{1,4}，邓运来^{1,3,4}，刘胜胆^{2,3,4}，单朝军^{2,3}，唐建国^{1,3,4}

1. 中南大学轻合金研究院
2. 中南大学材料科学与工程学院
3. 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室
4. 有色金属先进结构材料与制造协同创新中心

本文旨在通过采用回归再时效处理来提高 7020 铝合金的综合疲劳性能，研究了室温大气环境下过时效态和两种回归再时效态 7020 铝合金的高周疲劳和疲劳裂纹扩展性能。过时效（OA）制度为 90°C/12h+169°C/15h，两种回归再时效制度分别为（RRA1）90°C/24h+185°C/105min+120°C/24h 和（RRA2）90°C/24h+185°C/105min+150°C/12h。测试了不同时效处理的 7020 铝合金的疲劳强度极限和疲劳裂纹扩展速率，采用透射电镜和扫描电镜对合金的显微组织及疲劳断口进行了分析，采用 EBSD 对合金的疲劳裂纹扩展路径进行了研究。结果表明：相比于过时效态，回归再时效态的合金具有较细小密集的晶内析出相，

晶界析出相和 PFZ 也显著减小, RRA2 的晶内和晶界析出相及晶界 PFZ 略大于 RRA1。RRA1 的疲劳强度极限最大, 过时效态最小。相反, RRA1 的疲劳裂纹扩展速率最高, 过时效态最低。结论: 回归再时效处理可以显著提高合金的疲劳强度极限, 这主要是由于其较小的晶界析出相和较窄的无析出带, 减小了晶界开裂的可能, 从而使得疲劳裂纹萌生困难。但其疲劳裂纹扩展速率却高于过时效态合金, 主要是由于晶内密集的不可切割相阻碍了位错的可逆滑移, 导致裂纹扩展速率较高, 适当提高再时效温度可以改善其疲劳裂纹扩展性能。

关键词: 7020 铝合金; 回归再时效; 疲劳裂纹扩展; 疲劳断口

C02-PO40

5083 铝合金静态再结晶晶粒度演变模型研究

戴青松¹, 邓运来¹, 刘栩², 赵卫华²

1. 中南大学材料科学与工程学院
2. 广西柳州银海铝业股份有限公司

通过等温热压缩、热处理、硬度、金相、透射等试验研究了不同热变形条件(应变速率为 $0.01\sim 10\text{ s}^{-1}$ 、变形温度为 $300\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、真应变为 $0.36\sim 1.2$)及不同热处理条件(退火温度为 $350\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、退火时间为 $10\text{ min}\sim 2\text{ h}$)对 5083 铝合金静态再结晶晶粒度的影响。结果表明: 随着热变形过程中 Zener-Hollomon 参数的增大或变形量的增大, 热压缩试样经退火后的再结晶晶粒尺寸减小; 在热变形条件一致的情况下, 随着退火温度的升高, 试样再结晶晶粒尺寸有所增大, 但增量较小。根据实验数据建立了 5083 铝合金静态再结晶晶粒尺寸模型与静态再结晶晶粒长大模型, 模型预测值与实测值间的平均相对误差小于 5%, 证明晶粒度演变模型可靠性较高。

关键词: 5083 铝合金; 静态再结晶; 晶粒度演变模型

C02-PO41

淬火介质对 7075 铝合金腐蚀性能的影响

刘胜胆^{1,2,3}, 向美超^{1,2,3}, 张臻^{1,2,3}, 邓运来¹

1. 中南大学材料科学与工程学院
2. 中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室
3. 中南大学有色金属先进结构材料与制造协同创新中心

淬火是 7 系铝合金析出强化的一个重要步骤, 而淬火介质是影响淬火的一个主要因素, 它对材料的强度、耐腐蚀等性能有较大影响, 因此本文旨在研究不同淬火介质对 7075 铝合金腐蚀性能的影响。实验所用材料为国产 7075 铝合金, 采用电导率检测、电化学实验、剥落腐蚀实验、金相显微镜(OR)、能谱分析、扫描电镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)、透射电镜(TEM)、等检查方法。在相同的实验条件下, 水淬和油淬后, 7075 铝合金剥落腐蚀的评级相同; 高温油淬+室温水淬后, 7075 铝合金的硬度与油淬、水淬相差不大, 但是腐蚀电流最小; 而空淬的硬度最低, 比水淬的低 50%左右, 腐蚀电流最大。通过高温油淬+室温水淬的双级淬火方式, 有利于第二相在晶界的优先析出, 提高铝合金的抗腐蚀性能; 淬火速率的提升导致了晶界无沉淀析出带的增加, 从而增强了 7075 铝合金的耐腐蚀性能。

关键词: 淬火介质; 7075 铝合金; 腐蚀性能; 无沉淀析出带

C02-PO42

热处理对亚共晶 Al-Ce 合金的力学性能以及析出相演变机制的研究

王朦朦, 高海燕, 王俊

上海交通大学 201100

含稀土的耐热铝合金是目前高性能铝合金领域的重要研究方向。目前,广泛研究的稀土铝合金中,稀土元素都是以微量元素的形式添加到铝合金中的。微量的稀土(Ce, La, Y, Zr, Sc 等)添加到铝合金中可以起到细化晶粒,提高再结晶温度以及改变析出相的析出行为等作用。然而,此类铝合金的强度较低,特别是含有 Sc, Zr 的耐热铝,其价格较为昂贵。因此,有必要开发出一种价格低廉,而且具有良好的耐热性能的新型稀土铝合金。Ce 是稀土矿中含量最为丰富,价格低廉的稀土元素。本工作利用熔铸的方法制备了含有大量稀土 Ce 的亚共晶 Al-9.263wt.%Ce 合金。利用涡流电导率测试仪,扫描电镜(SEM),高分辨透射电子显微镜(HRTEM),X 射线衍射仪(XRD),维氏显微硬度计,研究了等时时效过程中铝合金的显微硬度的变化,以及析出相的演变机制。结果表明,该亚共晶合金组织由初生的 α -Al 与 α -Al/Al₁₁Ce₃ 共晶体组成。且 Al₁₁Ce₃ 与 Al 基体间存在一定的晶体学位向关系。共晶体的维氏硬度值在 300°C 时存在峰值,比未经热处理的提高了 10Hv。HRTEM 发现,在热处理过程中,首先形成 GP 区(2~5nm),且 GP 区是沿着晶体中位错形核,然后形核质点沿着 GP 区形成。金相定量分析表明,新型铝合金在等时时效过程中表现出较好的组织热稳定性。

关键词:耐热铝合金;热处理;GP 区

C02-PO43

均匀化工艺对 7020 铝合金组织与疲劳性能的影响

单朝军^{1,2,3}, 刘胜胆^{1,2,3}, 叶凌英^{1,2,3}, 王勇³, 邓运来^{1,2,3}, 张新明^{1,2,3}, 林化强^{1,4}

1. 中南大学材料科学与工程学院
2. 中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室
3. 中南大学有色金属先进结构材料与制造协同创新中心
4. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司

7020 铝合金材料作为高速列车极为重要的承载部件使用材料之一,需要长期承受反复的冲击载荷,疲劳失效将严重影响高速列车的运行安全,因此提高 7020 铝合金材料疲劳性能及研究影响其疲劳性能的微观组织机理具有非常重要的意义。本论文采用光学金相、扫描电镜、能谱分析、透射电镜、电子探针及疲劳寿命测试等方法,研究了单级、双级和三级均匀化工艺对 7020 铝合金型材疲劳性能的影响及产生疲劳性能差异的微观组织机理。结果表明,在应力比 $R=-1$ 、应力集中系数 $K_t=1$ 的条件下,多级均匀化型材疲劳寿命明显优于单级均匀化型材,单级均匀化型材的疲劳极限强度约为 109.4MPa,双级均匀化型材约为 115.3MPa,三级均匀化型材约为 117.8MPa。多级均匀化型材疲劳极限强度比单级均匀化型材疲劳极限强度高,主要原因在于 7020 铝合金经三级均匀化后 Al₃Zr 粒子分布弥散均匀,PFZ 区更窄,均匀化效果更好,材料挤压成型后再结晶发生更少,并有效的保证了材料的强度,从而使合金的疲劳性能得到提高。此外三级均匀化时效态型材中微米级中等尺度的第二相数目更多、分布均匀而细小,可以有效的降低疲劳过程中应力集中,抑制微裂纹的产生。

关键词:7020 铝合金;均匀化工艺;疲劳极限寿命;微观组织

C02-PO44

晶粒结构对中高强 Al-Zn-Mg 合金板材抗剥落腐蚀性能的影响

邓运来^{1,2,3}, 唐鸿远¹, 张臻², 钱鹏伟², 赵龙¹

1. 中南大学材料科学与工程学院
2. 中南大学轻合金研究院
3. 有色金属先进结构材料与制造协同创新中心

为了研究 Al-Zn-Mg 合金板材晶粒结构对其抗剥落腐蚀性能的影响,对三种不同厚度的 Al-Zn-Mg 合金板材进行了剥落腐蚀实验,利用金相、TEM、SEM 和 EDS 等实验方法研究了 Al-Zn-Mg 合金板材的微观结构,并与剥落腐蚀试验结果进行比较。试验结果表明,位错密度越大,晶粒内就会存在更多的位错缠结

形成的大角度亚晶，第二相粒子倾向于在晶界及亚晶界处偏聚，与基体之间产生电位差，导致腐蚀更易于发生。EDS 结果表明，主要合金元素 Mg 和 Zn 大部分以 $MgZn_2$ 的形式弥散分布在基体中，而偏聚的粗大第二相粒子则含有较多的 Fe 和 Mn 等杂质元素。研究表明，Al-Zn-Mg 合金的抗剥落腐蚀性能与位错密度呈负相关，且杂质合金元素的含量升高也会对抗腐蚀性能产生不良影响。

关键词：Al-Zn-Mg 合金；剥落腐蚀；晶粒结构

C02-PO45

Effect of retrogression cooling rate on mechanical properties of aluminum alloy 7055 plate

Yunlai Deng^{1,2}, Shitong Fan¹, Yan Zhang³, Li Wan¹

1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2. State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China

3. Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China

Retrogression and re-aging treatment is always applied to aeronautical aluminium alloy for the combination of strength and stress corrosion resistance. Here, the influence of variation retrogression cooling rate on the tensile strength of retrogression and re-aging treated aluminium alloy 7055 thick-plate was aimed to study by tensile properties testing, differential scanning calorimetry testing and transmission electron microscopy. Results show that, in retrogression cooling step, coarse η would precipitate in the matrix, leading to worse mechanical properties. With increasing cooling rate, the quantities and size of η precipitate decrease, leading to finer and more dispersive η' phases after re-aging, and resulting to better tensile properties. There is a considerable increase in tensile properties when the cooling rate increases to $10^\circ\text{C}/\text{min}$, and less increase when over $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Retrogression and re-aging treatment $105^\circ\text{C}/16\text{h}+190^\circ\text{C}/30\text{min}+120^\circ\text{C}/23\text{h}$ with fast retrogression cooling rate can satisfy the strength needs of 7055 aluminium alloy.

Keywords: Retrogression and re-aging; 7055 aluminium alloy; Microstructure; Properties; Cooling rate

C02-PO46

纯金属 Al 箔辅助 1420 铝锂合金扩散连接

吴凡^{1,2}, 周文龙¹, 侯红亮²

1. 大连理工大学材料学院

2. 中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所

采用纯铝箔作中间层辅助 1420 铝锂合金扩散连接，研究了连接温度对扩散连接接头界面组织与力学性能的影响，采用扫描电镜、能谱等手段对接头界面组织、元素扩散及断口进行分析，同时采用显微硬度和剪切测试对接头力学性能进行了评价。结果表明，在连接温度 520°C 、压力 9MPa 和保温时间 60min 情况下，采用 $20\mu\text{m}$ 铝箔中间层，接头剪切强度为 168.5MPa ，断裂发生在界面过渡区域，界面结合质量明显优于没有中间层的扩散连接试样。说明铝箔中间层与 1420 铝锂合金基体之间存在的活性金属元素（镁和锂）浓度梯度有效提高了活性金属元素的扩散，通过活性金属元素与氧化膜的反应，将稳定连续的界面氧化物转化为亚稳定不连续的氧化物，消除了扩散界面的阻碍，提高了扩散连接的质量，本文中还对界面附近元素扩散行为进行了研究。

关键词：扩散连接；铝锂合金；活性元素；扩散行为

C02-PO47

微量元素对 Al-Zn-Mg 合金组织与性能的影响

孙琳，张书，邓运来

中国中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111

本文采用金相、扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM) 等微观组织观测技术以及拉伸、冲击韧性、电化学、应力腐蚀性能测试等试验, 研究了微量元素 (Cr、Mn、Ti、Zr、Cu) 含量存在明显差异的两块 7B05-T4 铝合金板材的微观组织与强度、韧性与耐腐蚀性能差异。结果表明, 微量元素总量较高的 7B05 合金板材的抗应力腐蚀性能有所提升, 但自腐蚀电位升高, 腐蚀电流密度减小, 粗大第二相密度较大, 抗剥落腐蚀性能下降; 在 3.5%NaCl 室温腐蚀时, 更容易形成点蚀, 强韧性下降幅度相对较大, 耐蚀性相对较差; 在 60℃、100℃ 的 6%NaCl 溶液环境中腐蚀时, Cl⁻离子浓度更高, 并伴有强化相析出, 但强度、韧性下降幅度更大, 耐蚀性更差。

关键词: 铝合金; 7B05; 微量元素; 力学性能; 耐腐蚀性能

C02-PO48

AA6351 铝合金铸锭均匀化处理研究

万里

中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙市 410083

本文采用金相、涡流电导率、硬度与拉伸等组织与性能表征方法研究了 6351 铝合金铸锭均匀化处理对铸锭中结晶第二相溶解和挤压加热温度、挤压速度, 以及挤压材组织与性能的影响。结果表明, AA6351 铝合金铸锭经 560℃/6h 处理后, 仍然存在少量残余结晶相; 如果铸锭挤压前经过较长时间的加热保温处理, 均匀化冷却速率对挤压速度及挤压材组织与性能几乎没有影响。均匀化处理后的铸锭只需加热到 500℃ 就能实现高速挤压。

关键词: 铝合金; AA6351; 均匀化; 挤压

C02-PO49

自然时效对 Al-Zn-Mg 合金型材材料腐蚀性能的影响

邓运来^{1,2,3}, 钱鹏伟^{1,3}, 张臻^{1,3}, 赵龙^{2,3}, 唐鸿远^{2,3}

1. 中南大学轻合金研究院, 长沙 410083

2. 中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083

3. 中南大学有色金属先进结构材料与制造协同创新中心, 长沙 410083

采用点蚀、晶间腐蚀、剥落腐蚀及电化学试验研究自然时效对 Al-Zn-Mg 合金型材材料腐蚀性能的影响。结合电导率测试结果, 运用 SEM、TEM 等微观分析揭示其腐蚀性能变化的机理。其结果表明: Al-Zn-Mg 合金型材材料的腐蚀性能随自然时效时间延长呈现下降趋势。在自然时效过程中, Al-Zn-Mg 合金型材析出相以 GP 区为主, 型材的电导率呈下降趋势, 停放至 30d 左右基本达到稳定状态。自然时效后再进行人工时效 (120℃/8h+170℃/11h), Al-Zn-Mg 合金型材材料的腐蚀性能随自然时效时间的延长呈上升趋势, 但合金的强度有所下降; 经自然时效后人工时效的型材内晶界无沉淀析出带 (PFZ) 变宽, 晶界析出相尺寸与间距变大。

C02-PO50

高强 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金铸锭偏析及均匀化退火组织演变

Micro-segregation and microstructure evolution during homogenization of high strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy

韦莉莉¹, 黄宏锋¹, 江鸿杰¹, 唐鑫^{1,2}, 罗鲲¹

1. 桂林理工大学 材料科学与工程学院, 桂林 541004

2. 桂林理工大学 有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室, 桂林 541004

采用 X 射线衍射、光学显微镜、扫描电镜、EDS 能谱分析和透射电镜等方法研究了 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金铸锭的微观偏析组织和其在均匀化退火过程中的微结构演变。结果表明，铸态合金晶内分布大量微米级 MgZn₂ 相，晶界存在由 Al₂CuMg、AlZnMgCu 和 Al₇Cu₂Fe 相组成的非平衡共晶化合物，元素偏聚程度为 Cu>Mg>Zn。经过均匀化处理后，晶内 MgZn₂ 相溶入基体，晶界 AlZnMgCu 相向 Al₂CuMg 相转变并发生溶解，基体中析出纳米级 Al₃Zr 粒子。在 455-485°C 范围随均匀化温度升高，残留相数量递减，偏析的 Cu、Mg、Zn 元素分布趋于均匀。X 射线衍射物相分析和计算结果表明，均匀化温度高于 475°C 后，η 型第二相已基本溶入基体，Al₂CuMg 相减少的速率减缓。合金适宜的均匀化工艺为 475°C /24h。

关键词：高强铝合金；均匀化；偏析；微观组织

C02-PO51

Al-Zn-Mg 合金型材点状腐蚀行为的研究

叶凌英^{1,3}，赵龙^{1,3}，张臻^{2,3}，邓运来^{1,2,3}，邓舒浩^{1,3}

1. 中南大学材料科学与工程学院，长沙 410083
2. 中南大学轻合金研究院，长沙 410083
3. 中南大学有色金属先进结构材料与制造协同创新中心，长沙 410083

采用极化曲线和电化学交流阻抗谱研究不同浓度下 NaCl 溶液中 T5 态 Al-Zn-Mg 合金型材材料的点状腐蚀行为，通过扫描电子显微镜和能谱仪观察和分析 Al-Zn-Mg 合金型材材料的点状腐蚀特征以及第二相粒子的化学组分。其结果表明，Al-Zn-Mg 合金型材材料的腐蚀速率随 NaCl 溶液浓度的增加而升高；耐点状腐蚀性能随温度的升高而下降；点蚀对 Al-Zn-Mg 合金型材材料的诱发腐蚀为局部的点蚀。扫描电镜和能谱分析结果表明，在 Al-Zn-Mg 合金型材材料中，点状腐蚀行为的发生主要是由阳极相 MgZn₂ 引起的。