

## C02.高性能铝合金

分会主席: 熊柏青、张济山、陈江华、范云强、邓运来

### C02-01 (Invited)

#### 汽车用高成形性与高烤漆硬化型铝合金板材的研究进展

张济山, 郭明星, 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、抗自然时效稳定性以及弯边性能等均有待进一步提高。针对这些问题, 我们设计开发了系列新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 系合金材料, 通过系统的成分、热加工和预时效工艺等设计和优化及其对合金组织和性能的影响规律研究, 开发的合金不仅可兼具有优异的成形性能、烤漆硬化能力以及抗自然时效稳定性等特性。具体结论如下: 原生富铁相的合理引入不仅可有效降低车用铝合金板材的生产成本, 而且还可以有效影响合金的组织 and 织构演化过程, 即, 组织细化或呈双模型晶粒尺寸分布特征, 而织构可获得显著弱化, 进而使得合金成形性能和高温热处理稳定性获得大幅提高; 溶质元素 Zn 的添加可大幅促进合金的时效响应速率, 通过精细组织结构表征对其快速时效响应机理进行了深入研究; 最后, 通过微合金化元素和处理工艺优化等研究了其对该系铝合金自然放置稳定性的影响规律, 自然放置稳定性的提高对于维持该系铝合金长期放置后仍具有高烤漆硬化特性意义重大。

关键词: 新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 合金, 热加工, 时效响应, 成形性能, 自然稳定性

### C02-02 (Invited)

#### Electron microscopy for aluminum alloys as light-weight industry materials

J. H. Chen\*, C. L. Wu

Center for High-Resolution Electron Microscopy, College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

Developments of high-strength aluminum alloys have always faced a difficult problem: owing to their small size, the early-stage strengthening precipitates are difficult to characterize in terms of composition, structure and evolution. Here we employ atomic-resolution transmission electron microscopy (TEM) imaging and first-principles energy calculations to address these problems. Recent years, we have investigated tens of typical high strength aluminum alloys, such as 2xxx (AlCu, AlCuMg and AlCuLiMg), 6xxx (AlMgSi and AlMgSiCu) and 7xxx (AlZnMg and AlZnMgCu) alloys, with different compositions and with varying thermal processes for understanding their property-structure-process correlations. Using aberration-corrected high-resolution TEM (HRTEM) and aberration-corrected scanning TEM (STEM), much of our attention has been paid to revisit the strengthening precipitates in these important alloys and to clarify the controversies left in the past about their precipitation behaviors. Our study demonstrates the followings:

(1) Atomic-resolution imaging in STEM can provide straightforward structure models at the atomic-scale, whereas atomic-resolution imaging in HRTEM with rapid quantitative image simulation analysis can provide the refined structures with high precision beyond the resolution limitation of the microscope. The combination of the two techniques can be more powerful in solving difficult structure problems in materials science.

(2) Most of the early-stage precipitates in aluminum alloys are highly dynamic in both composition and structure. Typically, having their characteristic genetic skeletons to guide their evolution, these dynamic precipitates initiate, mature and grow with thermal aging following characteristic evolution paths. The fine precipitation scenarios revealed in our studies are rather different from previous understandings in the textbooks and literatures published thus far.

Key words: Electron microscopy, Aluminum alloys, Precipitates, Phase transformation

### C02-03

#### Cu 含量对 7056 超强铝合金淬透性和组织性能的影响

陈送义<sup>1,3</sup>, 张星临<sup>2,3</sup>, 陈康华<sup>1,2,3</sup>

1.中南大学 轻合金研究院

2.中南大学 粉末冶金国家重点实验室

### 3.中南大学 有色金属先进结构材料与制造协同创新中心

采用末端淬火试验、硬度、电导率、拉伸及剥落腐蚀,并结合金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)等分析测试方法,研究了Cu含量对7056铝合金淬透性和组织性能的影响。结果表明:Cu含量由2.1 wt.%降至1.0 wt.%,合金残余结晶相数量显著降低,合金的淬透深度从40 mm提高到90 mm;与高Cu合金相比,随着末端淬火端距离的增加,低Cu合金的晶界析出相尺寸减小、耐晶间和剥落腐蚀性性能提高,主要原因是低Cu合金抑制了淬火析出相优先在晶内和晶界析出。

关键词: Cu 含量, 7056 铝合金, 淬透性, 组织, 性能

#### C02-04

##### 航空铝合金内部残余应力超声无损评价研究

王晓<sup>1,2</sup>, 史亦韦<sup>1,3</sup>, 梁菁<sup>1,4</sup>

- 1.中国航发北京航空材料研究院
- 2.航空材料检测与评价北京市重点实验室
- 3.材料检测与评价航空科技重点实验室
- 4.中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室

铝合金内部残余应力的检测与评价是其应力控制的基础,而目前缺少一种快速无损的内部残余应力评价方法。基于超声波的声弹性效应,开发了一种定性、定量相结合的铝合金内部残余应力无损评价方法,利用残余应力分布与演化的一般规律和破坏式残余应力检测结果分别对超声应力检测结果进行了间接和直接验证。结果表明,利用超声波评价铝合金内部残余应力,虽然不能给出各点的应力张量,但可以获得样品的残余应力分布和整体残余应力水平,并且具有检测速度快、能够反映全厚度应力、完全无损等特点,特别适合于工程应用。利用该方法,实现了铝合金内部残余应力再平衡的观测,观测到固溶处理时入水方向对残余应力的影响,获得了使残余应力最低的淬火水温和冷压量,为铝合金内部残余应力的检测与评价提供了新的方法。

关键词: 残余应力, 超声无损评价

#### C02-05

##### 通过多尺度结构设计来提高 Al-Mg-Si 合金性能

曾祥浩, 薛鹏, 倪丁瑞, 肖伯律, 马宗义

中国科学院金属研究所

通过搅拌摩擦加工和后续低温时效得到了一系列具有纳米及亚微米结构的低合金元素含量铝合金,并定量分析了纳米沉淀相和超细晶对强度的贡献。结果表明:在200 rpm和水冷条件下,在加工区能获得平均晶粒尺寸为200 nm的超细晶组织,其显微硬度和抗拉强度分别可达147 Hv和506 MPa;同时还研究了超细晶铝合金在后续低温时效过程的组织演变,当在100 °C时效20 min时,超细晶铝合金的显微硬度和抗拉强度可达161 Hv和573 MPa,远远高于母材峰时效态的102 Hv和320 MPa。因此,本研究提供了一种有效制备大块体、低合金元素含量和高强度铝合金的方法。

关键词: 铝合金, 超细晶, 搅拌摩擦加工, 时效, 材料素化

#### C02-06

##### 高合金化 Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc 铝合金在均匀化过程中的显微组织演变

王宇, 熊柏青, 李志辉, 温凯, 黄树晖, 李锡武, 张永安

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

本文采用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、高分辨率透射电子显微镜等表征手段研究了新型高合金化Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc铝合金在双级均匀化过程中的显微组织演变。实验结果表明,双级均匀化的第一级温度显著影响Al<sub>3</sub>(sc,Zr)二次析出相的形貌和尺寸。随着加热温度的升高,Zr元素的扩散能力增强,粒子的形貌由带有明显棱角的方块形向球形转变,同时粒子的平均尺寸随温度升高逐渐增大。然而,保温时间对于粒子的长大过程影响甚微,体现了Al<sub>3</sub>(sc,Zr)粒子较高的热稳定性。在经过第二级474 °C×48 h均匀化热处理后,铸态下存在的粗大金属间化合物回溶充分,且高分辨率透射电子显微镜显示Al<sub>3</sub>(sc,Zr)粒子依然与基体保持良好的共格关系而没有发生异常长大。

关键词: Al-Zn-Mg-Cu 合金, 显微组织, 均匀化, Al<sub>3</sub>(Sc,Zr)颗粒, 金属间化合物

## C02-07 (Invited)

### Quantitative effects of microstructure and texture on short fatigue crack growth in high strength Al alloys

Tongguang Zhai<sup>1,2,\*</sup>, Pei Cai<sup>2</sup>, Lin Yang<sup>2</sup>, 赵巍<sup>1</sup>, 李铸铁<sup>3</sup>

1. 山东南山铝业股份有限公司, 南山科学技术研究院

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

3. 航鑫材料科技有限公司

A physics-based model was established for simulation of the growth behaviors of short fatigue cracks in 3 dimensions by taking into account both driving force and resistance at each point along the crack front in high strength Al alloys (AA2024 T3). The growth behaviors and the life spectra of short fatigue cracks were consequently quantified using the model in a 3-D digital microstructure fabricated from an AA2014 T3 Al alloy with different grain sizes and textures. The crack life calculated was from the initial crack size equivalent to the size of a grain to the final crack of 0.4 mm long on surface. It was found that the life of a short fatigue crack profoundly depended on grain size and texture. The average life of the short crack was increased with decrease in grain size ranging from 50  $\mu\text{m}$  to 5  $\mu\text{m}$ , which was consistent with the experimental results reported previously. The short crack life was also markedly dependent on texture with the longest life in a typical recrystallization texture and the shorter life in a rolling-type texture. There were two characteristic peaks in the life spectra (i.e., bimodal life distribution). The twist angle of the crack plane deflection at the very first grain boundary encountered by a short crack played a critical role in determining the life of the short crack. The crack would contribute to the shorter life peak when the twist angle being within  $5^\circ$  at the first grain boundary, otherwise, it would be more likely to be associated with the longer life peak.

## C02-08 (Invited)

### 二次挤压对 2024 铝合金组织性能的影响

朱庆丰, 楚朝阳, 赵志浩, 王高松, 左玉波, 崔建忠

东北大学

铝合金挤压是通过对铸坯进行一次挤压实现对铝合金最终形状和性能的控制。尽管这种方法可以实现形状的精确控制, 但受到挤压设备能力限制, 单次挤压的变形量有限, 只有通过二次挤压才能获得更大的变形量。但传统正向挤压过程挤压变形不均匀, 二次挤压会造成挤压制品的组织不均匀甚至粗化, 造成性能不稳定, 因此, 通过二次挤压提高铝合金综合性能的相关研究较少。与正向挤压法不同, 反向挤压可以实现挤压过程较均匀的变形, 为铝合金通过二次挤压变形和相应的热处理工艺调控性能提供了可能。本文主要研究了二次反向挤压对 2024 铝合金组织性能的影响, 分别通过一次反向挤压获得了直径 50mm 的挤压棒材, 再经过二次挤压获得了直径 12mm 的棒材。对两次挤压后的棒材 T4、T6 处理, 并研究二次挤压及热处理过程中的组织性能演变规律。研究表明, 经过总挤压比为 144 的二次挤压可以使 2024 铝合金内的残余相有效破碎, 二次挤压后试样内残余相的尺寸明显减小。二次挤压 2024 铝合金试样的延伸率显著提高, T4 态的延伸率由二次加压前的 17.5% 提高 21.4%; T6 态的延伸率由二次加压前的 12.7% 提高到 15.7%。二次挤压后 T4 态的 2024 铝合金的抗拉强度有一定提高; 屈服强度由二次挤压前的 407.5 Mpa 提高到 432.5 Mpa, 抗拉强度二次挤压前的 560.0 Mpa 提高到 610.0 Mpa。而二次挤压对 T6 态 2024 铝合金的屈服强度抗拉强度影响不大。

关键词: 2024 铝合金, 残余相尺寸, 二次挤压, 固溶时效, 抗拉强度

## C02-09

### 微合金 Sc、Zr 对 5083 铝合金组织性能的影响

房洪杰<sup>1,2</sup>, 余琨<sup>2,1</sup>, 罗西尔<sup>1,2</sup>, 刘慧<sup>1,2</sup>, 李笠<sup>2</sup>, 项向春<sup>2</sup>, 李铸铁<sup>3</sup>

1. 烟台南山学院工学院材料系

2. 中南大学材料工程学院

3. 山东南山铝业股份有限公司

5 系铝合金在强度、成形性、耐蚀性、可焊性等几个方面具有良好的均衡性, 因此被应用在交通运输领域, 因其属于防锈铝合金, 在舰船和地效飞行器应用最广泛, 随着舰船的提速及升级, 对 5 系铝合金提出了更高综合性能的要求。在传统 5083 铝合金的基础上添加了微合金元素 Sc、Zr 配备了 5083、5083+0.2Sc、5083+0.2Zr、5083+0.2Sc+0.2Zr 共 4 种合金, 通过金相显微镜、偏光显微镜、显微硬度机、拉伸试验机、电化学工作站、扫描电镜、透射电镜等设备完成了显微组织分析、硬度测试、强度测试、

耐蚀性能测试、微观结构分析等实验项目, 结果表明: 添加微合金元素 Sc、Zr 后, 合金熔炼铸造时能够起到非均匀形核的作用, 明显细化合金晶粒, 其中复合添加 Sc、Zr 的合金细化效果最明显, 单独添加 Sc 的合金比单独添加 Zr 的合金效果好; 添加微合金元素后, 合金力学性能提高明显, 复合添加 Sc、Zr 合金抗拉强度能够提高 80 MPa, 单独添加 Sc 合金抗拉强度能够提高 60 MPa, 单独添加 Zr 合金抗拉强度提高 20 MPa; 因 Al<sub>3</sub>Sc 和 Al<sub>3</sub>(Sc,Zr)能够钉扎晶界, 抑制再结晶, 在 300 °C 保温 1 h 后, 5083 铝合金大部分完成了再结晶, 添加微合金后没有明显出现再结晶现象, 添加 Sc 的合金 450 °C 保温 1 h 后, 仍没有明显再结晶现象; 微合金元素对 Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> 相析出行为产生了影响, 能够使 5083 铝合金耐蚀性提高。

关键词: 微合金化, 5 系铝合金, 耐蚀性, 显微组织

## C02-10

### 热处理工艺对 6082 铝合金锻件力学性能和微观组织的影响

王彬, 张瑞杰

北京科技大学

本文通过热处理试验, 研究了不同变形量的 6082 铝合金锻件在不同热处理条件下的力学性能和微观组织, 利用扫描电镜和透射电子显微镜观察时效过程中纳米级析出相并统计析出相的面密度, 从而对析出相的粒度分布给出半定量的描述。结果表明, 6082 铝合金锻件随着时效时间延长, 合金的硬度先升高后下降, 然后趋于平缓, 最大值为 122.76HB; 相同热处理条件下, 锻件的变形量越大, 材料硬度越高; 最佳热处理工艺为, 540°C 固溶 1h, 180°C 时效 1h; 在最佳热处理条件下, 合金的基体上可以观察到纳米级细小而弥散分布的针状析出相, 尺寸为 10~60nm 左右。

关键词: 6082 铝合金; 热处理; 力学性能; 微观组织

## C02-11

### Cu 元素对 Al-Mg-Si 铝合金组织性能的影响

李红祥, 郭胜利, 刘生璞

北京有色金属研究总院

通过金相观察、硬度测试、拉伸性能测试、扫描电镜和透射电镜等实验方法, 研究添加不同含量的 Cu 元素对 Al-Mg-Si 合金组织性能的影响。结果表明: 随着 Cu 含量的增加, 铝合金抗拉强度有所提高, 但导电率随着 Cu 含量增加而下降。当 Cu 元素的含量为 0.3% (质量分数), 合金的力学性能最佳, Al-Mg-Si 的抗拉强度为 336 MPa, 屈服强度为 263 MPa。当加入 0.1% Cu 时, 合金导电率最高, 为 48.6% IACS。

关键词: 铝合金, 铜, 组织性能

## C02-12 (Invited)

### 大规格铝合金材料的设计与制备

邓运来

中南大学材料科学与工程学院

## C02-13 (Invited)

### 民机用铝合金材料国产化面临的机遇和挑战

范云强

中铝-东北轻合金有限责任公司

## C02-14

### 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

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, 织构类型以立方织构和高斯织构为主, 晶内析出相主要为 T<sub>1</sub> 相及 S<sup>ε</sup> 相, 尺寸在 50~100 nm; 轴向加载疲劳试验时, 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裂纹发生偏折, 变为垂直于加载方向扩展, 继续扩展时, 裂纹遇到其他晶界后发生小的偏折, 但基本方向不变, 直至最终发生瞬断。裂纹萌生和扩展过程中, 裂纹

尖端出现了较大范围的塑性变形区，该区域中  $T_1$  以及  $S\epsilon$  析出相被位错切过，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  $T_1$  及  $S\epsilon$  析出相，是疲劳裂纹呈“锯齿”状扩展的主要原因。

## C02-15

### 一种高合金化 Al-Zn-Mg-Cu 合金的热变形行为和热加工性能

石国辉<sup>1,2</sup>, 张永安<sup>1</sup>, 李锡武<sup>1</sup>, 李志辉<sup>1</sup>, 黄树晖<sup>1</sup>, 闫丽珍<sup>1</sup>, 温凯<sup>1</sup>, 熊柏青<sup>1</sup>, 赵刚<sup>2</sup>

1. 有研工程技术研究院有限公司, 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 101407

2. 东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819

对一种高合金化 Al-Zn-Mg-Cu 合金做单道次热压缩模拟实验, 实验设备采用 Gleeble-1500 热力模拟机, 变形温度和变形速率分布设置为 573-723 K 和  $0.001-10\text{ s}^{-1}$ 。基于实验结果, 通过构建应变补偿型本构方程分析该合金的热变形力学行为; 通过构建 3D 热加工图分析该合金的热加工性能。3D 热加工图依据动态材料模型建立, 以期描述功率耗散效率和流变失稳区所对应的变形参数。结合 OM 和 EBSD 组织分析, 预测该合金适宜的热加工参数范围: 变形温度为 673-713K, 变形速率为  $0.01-1\text{ s}^{-1}$ 。3D 热加工图所预测的变形参数区域与组织分析结果相匹配。在此变形参数区间内, 动态回复是主要的软化机制, 同时, 动态再结晶也提供了一定的软化作用。

关键词: 高合金化 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金, 热变形行为, 3D 加工图, 动态软化机制

## C02-16

### Al-Zn-Mg 合金双级双峰时效及其对应力腐蚀敏感性的影响

王昀立<sup>1,2</sup>, 姜海昌<sup>1</sup>, 戎利建<sup>1</sup>

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学

Al-Zn-Mg 合金属于 7000 系铝合金, 具有较高的比强度、优异的挤压及焊接性能, 广泛应用于轨道交通领域。但 Al-Zn-Mg 合金型材在服役过程中, 对应力腐蚀尤其敏感, 这对型材的安全性带来了极大的考验。Al-Zn-Mg 合金是可热处理强化铝合金, 时效处理对于提升合金力学性能及改善耐蚀性有至关重要的意义。通常选用过时效制度, 如 T73, 可降低合金应力腐蚀敏感性, 但相比起峰时效合金将损失~15%的强度。本工作研究发现, 若适当降低一级时效温度, Al-Zn-Mg 合金的二级时效硬化曲线中可出现两个时效硬度峰。高分辨透射电镜及三维原子探针结果显示, G.P.区和  $\eta'$ 相共同作用导致了时效双峰现象。其中, 第一峰时效状态时 G.P.区占主导, 而  $\eta'$ 相在第二峰时效状态时对峰值硬度起主要贡献作用。本工作选取新型双级时效第二峰时效制度对合金进行处理, 相比起常规双级过时效 T73 状态, 合金的强度相对提升~9.6%(~33.2 MPa), 且同时应力腐蚀敏感性相对下降了~38.9%。细小弥散的晶内析出相、粗大不连续的晶界析出相以及相对较窄的晶界无析出带等特征, 是第二峰时效状态下 Al-Zn-Mg 合金具备高强度及高应力腐蚀耐性的主要原因。

关键词: Al-Zn-Mg 合金, 双级双峰时效, 三维原子探针, 应力腐蚀敏感性, 晶界析出相

## C02-17

### 高强度高塑性铝铜共晶合金的激光辅助快速凝固法制备工艺、结构表征、力学性能测试及变形行为研究

雷前<sup>1</sup>, S. Wang<sup>2</sup>, Amit Misra<sup>2</sup>

1. 中南大学

2. 密西根大学

本文利用固体激光辅助对 Al-32.7%Cu 合金铸锭表面进行了重熔和快速凝固出来, 并研究了其组织结构和性能的变化。组织结构上微米尺寸的共晶组织被有效细化到纳米尺度(共晶组织的层间距从 1 微米细化到 30 nm)。通过对重熔和凝固后的组织表征发现, 层间距从表面到底部逐渐增大, 合金的纳米压痕硬度逐渐减小, 通过对纳米压痕处的纵剖面观察发现, 原始的熔铸太压痕底下的 Al<sub>2</sub>Cu 出现了微裂纹, 而激光辅助重熔后的凝固区的压痕下未发现微裂纹, 同时通过对熔铸态和激光辅助重熔后的组织进行冷轧塑性变形发现, 微米尺寸的 Al<sub>2</sub>Cu 组织呈现出脆性行为而纳米尺寸的 Al<sub>2</sub>Cu 组织呈现出协调塑性变形行为, 通过对激光辅助重熔后的组织进行透射电镜和高分辨表征发现其协调塑性变形行为主要上由于纳米尺寸的  $\alpha$ -Al 和  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu 界面的位错滑移的连续性比微米尺寸的要好, 同时本文还讨论了合金的强化机制, 并建立了位错穿过界面的物理模型。

## C02-18 (Invited)

### 高强铝合金的断裂韧性

王国军  
中铝-东北轻合金有限责任公司

## C02-19

### AA2099 铝锂合金退火温度对晶粒形貌与微区结构的影响研究

祝祥辉<sup>1</sup>, 黄伟九<sup>1</sup>, 杨绪盛<sup>1,2</sup>, 柴林江<sup>1</sup>, 张然<sup>1</sup>

- 1.重庆理工大学
- 2.重庆大学

本研究所采用的板材为热挤压态 AA2099 铝锂合金, 对该板材进行 45%冷轧并采用不同退火温度进行 1h 的退火处理, 研究退火温度对其晶粒形貌与微区结构的影响。结果表明, 轧制后的板材具有强烈的<100>/ND 和<111>/ND 结构。较低温度退火时, 变形晶粒内部依旧存有大量大角度晶界。随着退火温度上升, 晶界数量显著减少, 亚晶界比例下降。较高温度退火时, 大量晶粒发生再结晶并细化, Goss 结构组分和<111>/ND 结构组分体积分数上升, <100>/ND 结构组分体积分数下降。少部分未再结晶晶粒呈长条状并平行于原挤压方向分布, 其主要取向为 S 取向。退火温度较低时, 样品硬度由于退火温度上升引起的回复作用增强而导致硬度降低。退火温度较高时, 再结晶导致的晶粒细化和显著的固溶强化作用导致样品硬度随退火温度上升而升高。

关键词: 铝锂合金, 微区结构, 电子背散射衍射

## C02-20

### 基于微结构设计的铝合金力学性能协同提升

鲁强, 李凯, 杨明军, 杜勇

中南大学, 粉末冶金国家重点实验室, 湖南长沙 410083

6XXX 系铝合金是汽车轻量化中的重要材料, 良好的加工性能及时效热处理后较高的强度是该材料两个重要的性能要求, 在节能减排大环境下, 设计具有优良性能的 6XXX 铝合金在汽车节能减排中具有重要意义。本研究主要依靠材料基因工程来简化合金成分设计过程以及铝合金均匀化热处理参数优化过程, 主要工作有: (1) 利用 Thermo-Calc 软件以及现有数据库设计合金成分以及均匀化工艺参数, 避免有害第二相尤其是  $\beta$ -AlFeSi 的形成; (2) 利用光学显微镜、扫描电子显微镜和 EBSD 对合金第二相种类、体积分数以及晶粒度进行分析。利用显微硬度和拉伸实验对合金力学性能进行检测, 同时根据相应结果调整时效工艺; (3) 利用透射电子显微镜观察合金时效态微观组织, 计算析出相体积分数, 分析合金力学性能优良的原因。实验结果表明: (1) Thermo-Calc 计算所得均匀化结构与实验结果基本符合, 该合金中不含有  $\beta$ -AlFeSi 相, 主要第二相 ( $\alpha$ -AlFeSi) 体积分数与计算结果相近; (2) 该合金固溶态强度低、晶粒细小, 延伸率明显高于同类产品, 非常适合加工成复杂形状; (3) 该合金短时烤漆时效强化速率明显高于同类产品, 同等时效工艺下能达到与 6013 合金持平的强度。本研究中的材料基因工程大大减少了材料设计时间, 节约了研发成本。本研究利用该方法所设计的合金综合力学性能优良, 比较适合汽车身板以及手机壳生产。

## C02-21

### 6005A-T6 铝合金 FSW 和 MIG 焊接接头组织与性能研究

刘敬萱, 沈健, 李锡武, 闫丽珍, 闫宏伟, 刘红伟, 李志辉, 张永安, 熊柏青

有研工程技术研究院有限公司, 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 101407

本文采用搅拌摩擦焊 (FSW) 和熔化极气体保护电弧焊 (MIG) 两种焊接方式对 6005A-T6 铝合金进行焊接实验。采用光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM)、显微硬度仪、拉伸试验机和疲劳试验机对两种不同类型的焊接接头的微观组织和力学性能进行研究。结果表明: 采用这两种焊接方法均能获得质量良好的焊接接头。两种接头均包含三个区域, FSW 焊接区为细小的等轴晶, 热影响区受到搅拌针的作用呈现被拉长的晶粒, 热影响区的晶粒受热显著长大; MIG 接头焊缝区晶粒特征为铸态组织中的树枝晶结构, 熔合区是由沿着散热方向形成的粗大柱状晶组成, 热影响区晶粒长大情况较 FSW 更加显著。MIG 和 FSW 焊接接头的抗拉强度分别能达到母材 64%和 81%。MIG 接头硬度最低值位于焊缝区, 而 FSW 接头硬度最低值位于热影响区。当疲劳载荷为 90 MPa 时, FSW 接头的疲劳性能要优于 MIG 接头。

关键词: 铝合金, FSW, MIG, 微观组织, 力学性能

## C02-22 (Invited)

### 航空铝合金材料应用现状及发展趋势

王正安

中铝-西南铝业（集团）有限责任公司

### C02-23 (Invited)

#### 基于析出相结构及其稳定性的铝合金优化设计方法

江勇, 张朝民, 曹富华, 王怡人, 胡涛

中南大学

选择稀 Al-Sc-Zr 合金中的  $L_{12}$  纳米析出相和 Al-Zn-Mg 合金中的  $\eta'$  相为对象, 开展了系统的第一性原理界面热力学研究。通过计算析出相的体相结构和性质、溶质取代、界面结构、能量和相关共格应变, 对  $L_{12}$  相的形核、成分结构和热稳定性、 $\eta'$  相的成分结构、生长形貌、界面偏析等进行了深入分析和评估, 获得了许多新的理解认识, 包括 (1) Al 基体中 Sc 和 Zr 都强烈地倾向于取代  $L_{12}$ - $Al_3X$  中的亚格点位 X 原子, 而  $L_{12}$ - $Al_3Sc$  与  $Al_3Zr$  之间的互溶能力很弱。(2) 所有  $L_{12}$  相的相关界面都是高度共格, 且界面形成能很低,  $Al_3Sc(L_{12})/Al_3Zr(L_{12})$  界面能基本为零。(3) 三元  $L_{12}$ - $Al_3(Sc_xZr_{1-x})$  析出相倾向于形成  $Al_3Sc$  基核和  $Al_3Zr$  基壳结构, 并在粒径  $R > 1 \sim 2 \text{nm}$  的纳米颗粒中占优, 且对一定范围的 Sc/Zr 比和时效温度的变化不敏感。(4) 盘状  $\eta'$  相的形核与长大受界面结构及其能量的直接影响。相较于半共格柱面, 共格盘面的界面能更低, 长大过程中柱面厚度基本不变而盘面宽度逐渐增加。(5) 结合双球差矫正 HADDF-STEM 表征, 计算分析了界面处复杂的原子占位, 揭示了溶质原子 Zn、Mg、Cu 等在  $\eta'$  相及其界面上的偏析行为及效应。以上研究方法和成果, 能够在机理性方面为 Al 合金的优化设计提供重要的认知基础。

关键词: Al-Zn-Mg 合金, Al-Sc-Zr 合金,  $L_{12}$  相,  $\eta'$  相, 第一性原理界面热力学

### C02-24

#### 7055 铝合金在双级均匀化过程中的微观组织演变研究

闫宏伟<sup>1</sup>, 李锡武<sup>1</sup>, 李志辉<sup>1</sup>, 黄树晖<sup>1</sup>, 刘红伟<sup>1</sup>, 闫丽珍<sup>1</sup>, 张永安<sup>1</sup>, 熊柏青<sup>2</sup>

1. 有研工程技术研究院有限公司

2. 有研科技集团有限公司

本文对 7055 铝合金在双级均匀化热处理过程中粗大第二相回溶情况以及共晶相的演变过程展开研究。采用光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM)、能谱分析 (EDS) 研究均匀化热处理过程中第二相变化; 采用差示扫描量热仪 (DSC) 分析第二相回溶程度。研究结果表明合金在经过第一级  $400^\circ\text{C}/10 \text{h}$  均匀化热处理, 进入第二级  $470^\circ\text{C}$  处理初期, 铸锭中凝固形成的层状共晶相出现球化趋势, 并观察到部分  $AlZnMgCu$  四元相向 S 相 ( $Al_2CuMg$ ) 转变的现象; 合金经  $400^\circ\text{C}/10\text{h}+470^\circ\text{C}/24\text{h}$  均匀化处理后, 继续延长第二级保温时间对残留相的继续回溶作用不大。

### C02-25

#### $Al_3Er$ 相的反相畴界能的第一性原理计算

高春来, 高坤元, 丁雨生, 吴晓蓝, 黄晖, 文胜平, 聂祚仁

北京工业大学 材料学院

对微合金化铝合金中的具有  $L_{12}$  结构的有效强化相  $Al_3Er$ 、 $Al_3Sc$  的 (111) 反相畴界能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进行了计算, 在此基础上计算了其强化过程中体积分数为 0.18%、0.175% 的对应的有序强化量值。计算得到的  $L_{12}$  结构的  $Al_3Er$ 、 $Al_3Sc$  的 (111) 面的反相畴界能为  $0.58 \text{ J/m}^2$ 、 $0.52 \text{ J/m}^2$ , 与实验拟合值符合, 这揭示出  $Al_3Er$  在 Al-Er 合金强化中具有很重要的作用。对应相同浓度为 0.046 的 Er、Sc 在  $300^\circ\text{C}$  下进行时效时析出相增加的屈服强度分别为 116 MPa、102 MPa。结果分析显示, Al-Er 合金在第二相强化过程中, 其峰值强化效果由  $Al_3Er$  析出相体积分数和反相畴界能决定, 符合实验上测得的峰值硬度。

关键词:  $Al_3Er$ ,  $Al_3Sc$ , 反相畴, 第一性原理计算

### C02-26

#### 5083-H19 铝合金搅拌摩擦焊接头组织及性能研究

王贝贝<sup>1,2</sup>, 王文广<sup>2</sup>, 薛鹏<sup>2</sup>, 刘沿东<sup>1</sup>, 马宗义<sup>2</sup>

1. 东北大学

2. 中国科学院金属研究所

本研究选取 H19 态 5083 铝合金作为研究对象,采用不同的焊接参数与冷却方式对 5083 铝合金进行搅拌摩擦焊接(FSW), 并对接头的微观组织和硬度、拉伸及疲劳等力学性能进行了深入细致的研究。研究表明,随着转速的降低与强制水冷的运用,接头软化现象得到了明显抑制。焊核区均为等轴细晶组织,随着热输入的降低,其平均晶粒尺寸减小到了 0.8  $\mu\text{m}$ ,在 200 rpm 的低转速及强制水冷的低热输入参数下,接头最高强度达到了 403 MPa,为母材强度的 95%。选取母材和不同冷却条件下的 FSW 接头对其疲劳性能进行了对比研究。强制冷却使 FSW 接头疲劳极限提到了 240 MPa,与母材疲劳极限相同。在低转速与强制水冷的条件下,焊核得到充分强化,焊接热循环对接头几乎无软化影响,疲劳断裂位置为母材区域,起裂位置均为表面杂质相界面及尖角处。本工作为提高沉淀强化及加工硬化态的铝合金焊接接头拉伸及疲劳性能提供了一种具有指导作用的有效方法。

关键词: 5083 铝合金, 搅拌摩擦焊接, 微观组织, 拉伸性能, 疲劳性能

## C02-27

### Zn 添加对 Al-Mg-Si-Cu 合金原子团簇行为和烤漆硬化响应的影响

朱上, 李志辉, 闫丽珍, 李锡武, 黄树晖, 闫宏伟, 张永安, 熊柏青

有研工程技术研究院有限公司, 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 101407

相关研究表明,Zn 作为一种新的合金元素添加到 Al-Mg-Si-Cu 合金中能有效提高合金的时效强度,但 Zn 对 Al-Mg-Si-Cu 合金在预时效过程中原子团簇行为以及随后烤漆硬化响应的影响存在争议。本文通过显微硬度、透射电镜和三维原子探针表征测试手段,研究了 Zn 添加对 Al-Mg-Si-Cu 合金原子团簇行为和烤漆硬化响应的影响。结果表明,经 100°C/3h 预时效处理后,含 Zn 和不含 Zn 合金中均形成了 Mg-Si 原子团簇。然而,与不含 Zn 的合金相比,含 Zn 合金中 Mg-Si 原子团簇数量更多,表明 Zn 添加促进了 Mg-Si 原子团簇的形成。经 185°C /25min 烤漆处理后,两个合金在预时效过程中形成的 Mg-Si 原子团簇转变为具有明显增强效果的  $\beta''$ 相,对应的烤漆增量也明显增加。由于预时效后的含 Zn 合金中 Mg-Si 原子团簇数量更多,这为烤漆过程中  $\beta''$ 的形成提供了更多的形核核心。因此,含 Zn 合金  $\beta''$ 相的尺寸更小,分布更致密,相对应的烤漆硬化响应速率也得以增强。

关键词: Zn 添加; Al-Mg-Si-Cu 合金; 预时效; 原子团簇; 烤漆硬化;  $\beta''$ 相

## C02-28 (Invited)

### 高 Mg 含量的变形 Al-10Mg 合金的研究开发

林耀军<sup>1</sup>, 孙佳妮<sup>1</sup>, 闫志刚<sup>2</sup>

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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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。本报告总结了我们的开发变形 Al-10Mg(wt.%)合金中的工作。首先用感应熔炼制备 Al-10Mg 合金铸锭,对铸锭进行成分均匀化和形成单相固溶体合一的预处理,最后对预处理的铸锭进行冷轧以及退火。用 X 射线衍射和透射电镜对冷轧以及冷轧+退火的 Al-10Mg 合金进行了微观组织表征,并对这些材料进行了拉伸测试。透射电镜和 X 射线衍射结果表明,冷轧态材料为层片状组织,Mg 全部固溶;较低温度(低于 150 °C)退火后的组织为部分回复的超细晶和层片状组织的混合物,只有极少量的  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  相析出;较高温度(150-200 °C)退火组织为回复的超细晶,有少量的  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  相析出。拉伸测试结果显示,冷轧态材料的屈服强度和拉伸强度高达 571 MPa 和 642 MPa,均匀延伸率可达 8%;100 °C 退火取得了强度和塑性的良好配合:屈服强度和拉伸强度高达 493 MPa 和 594 MPa,均匀延伸率 11%。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、位错强化,高塑性来源于退火后位错密度的降低和单相固溶体微观结构的均匀性。

## C02-29

### 高压扭转变形在 Al-Cu-Mg 合金切变强化机制

陈莹

厦门理工学院



塑性变形(SPD)使铝合金材料结构微纳米化, 强度达到粗晶铝合金的数倍。高压扭转变形通过剪切应变, 迫使铝合金产生大量位错, 位错塞结、缠绕、堆积, 形成位错墙; 位错墙发生扭转生成大角度晶界。本研究比较了不同扭转变形模式(比如单向扭转 m-HPT, 回转变形 r-HPT 和周期扭转 c-HPT) 剪切应变在 Al-Cu-Mg 强化作用。采用透射电子显微镜(TEM)表征发现微观结构变得超细化和不均匀。X 射线衍射(XRD)峰宽化, 中心位置与边缘位置存在纳米级晶粒梯度; 原子探针(APT)表征金属材料的微观组织发现了溶质原子偏聚现象。通过对切变量的定量分析, 构建了微观组织-强化预测模型。  
关键词: 高压扭转, Al-Cu-Mg 合金

## C02-30

### 搅拌摩擦加工工艺对 7075 铝合金组织和性能的影响研究

秦永强<sup>1,2</sup>, 胡叶明<sup>1</sup>, 刘非非<sup>1</sup>, 周士昂<sup>1,2</sup>, 汪伟<sup>1</sup>, 黄俊<sup>1,2</sup>, 吴玉程<sup>1,2</sup>

1. 合肥工业大学
2. 安徽省有色金属材料与加工工程实验室

7075 铝合金是 Al-Zn-Mg-Cu 系沉淀强化型高强度铝合金, 由于其优良的力学性能, 在航空航天、军工、汽车制造等领域有着重要的应用。搅拌摩擦焊不涉及焊接材料的熔化和凝固过程, 因而可以有效规避熔融焊接过程中出现严重的气孔、热裂纹及热影响区软化等问题, 在铝合金的连接中具有广阔的应用前景。本论文选取 10 mm 的 7075 铝合金板进行单道对接搅拌摩擦焊试验, 研究搅拌针不同的进给速度对 7075 铝合金组织和性能的影响, 即在最高转速都是 950 rpm 的情况下, 分别以 47.5 mm/min, 95 mm/min, 118 mm/min 和 150 mm/min 的进给速度对 7075 铝合金进行搅拌摩擦焊, 将得到的样品和母材对比。主要得到以下结论: 1) 轧制态 7075 铝合金搅拌摩擦加工试验结果表明, 搅拌头旋转速度为 950 rpm 和进给速度为 118 mm/min 时能获得外观成形好、内部无缺陷的搅拌摩擦加工组织。晶粒明显细化, 并且出现织构和第二相, 进而影响材料的抗拉强度和维氏硬度; 2) 由于细晶强化和第二相强化等强化机制的影响, 搅拌摩擦加工工艺可以使轧制态的 7075 铝合金板的强度明显增加, 甚至高于母材; 3) 各个工艺参数的多数层面上, 硬度最高值位于焊核区, 硬度明显要高于母材区, 加工中心线上的硬度从上到下逐渐降低, 焊核区的顶部具有更加细小的等轴再结晶晶粒, 且从底部至顶部晶粒越来越大, 研究表明焊接头转速为 950 rpm 和进给速度为 118 mm/min 时, 搅拌区的硬度明显增加, 甚至大于母材。

关键词: 搅拌摩擦加工, 7075 铝合金, 组织, 性能

## C02-31

### 冷却速度和保温时间对 Al-V 中间合金组织的影响

蒙毅<sup>1\*</sup>, 赵志浩<sup>2</sup>, 崔建忠<sup>2</sup>, 曹雷刚<sup>1</sup>, 杨越<sup>1</sup>

1. 北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144;
2. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110819

V 元素在变形铝合金中的微量添加在细化晶粒、提升强度等方面的作用, 使得 Al-V 中间合金的制备及组织特点越来越受到关注。本文重点考察了 Al-V 中间合金 1200℃ 的熔炼过程中, 冷却速度 (0.1 °C/s~150 °C/s) 和保温时间 (5 min、10 min) 对合金组织中含 V 相种类、数量和尺寸的影响规律。结果表明: 冷却速度的降低, 不仅会造成 Al<sub>3</sub>V 的长大, 而且还增加了 Al<sub>3</sub>V 相向 Al<sub>10</sub>V 相转化的几率。当冷却速度提升 10<sup>3</sup> 倍时, Al<sub>3</sub>V 相的平均尺寸 (面积) 减小了 10 倍。合金制备过程中保温时间的延长, 也能够促进 Al<sub>3</sub>V 相向 Al<sub>10</sub>V 相的转化, 使得即使在冷却速度较高时, 也会形成 Al<sub>10</sub>V 相。在高冷速 (150 °C/s) 条件下, 长时保温 (10 min) 能促进 Al<sub>3</sub>V 相的长大, 其尺寸显著增大约 10 倍; 但在低冷速 (0.1 °C/s) 条件下, 长时保温 (10 min) 不仅会降低 Al<sub>3</sub>V 相的数量, 还会使其平均尺寸显著减小。

## C02-32(Invited)

### 深冷处理对搅拌摩擦焊 2198 铝锂合金微观组织及力学性能的影响

黄江南<sup>1</sup>, 孙建秋<sup>1</sup>, 高崇<sup>2</sup>, 马岳<sup>1,\*</sup>

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重点实验室, 北京 100191
2. 中铝科学技术研究院, 北京 100082

轻质高强的铝锂合金被视为最有潜力的航空航天轻量化结构材料, 而搅拌摩擦焊是铝锂合金常用的固态连接工艺, 但由于焊缝力学性能相较于母材仍有较大差距, 所以需要一定的焊后处理工艺改善焊缝的综合力学性能。本文以搅拌摩擦焊 2198 铝锂合金为研究对象, 采用不同的深冷工艺对合金焊缝进行处理, 通过金相显微镜、透射电镜及拉伸试验等实验手段, 研究了深冷处理工艺对铝锂合金微观组织和力学性能的影响, 并对深冷处理改善合金微观组织及力学性能的机理进行了深入

探讨。研究表明：深冷处理后，与原始态相比，合金的晶粒形貌及析出相 $\delta'$ (Al<sub>3</sub>Li)变化不大，但基体中位错密度由 $0.42 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 提高到 $1.13 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ，并在晶界附近出现位错堆积。合金的屈服强度由268 MPa增加到273 MPa，而延伸率略微下降为19.9%；经过传统时效热处理(AT, 180 °C/20h)，与原始态相比，屈服强度仅提高了69 MPa，但延伸率下降了8.3%。而经过深冷+时效处理(DAT, -196 °C/12h+180 °C/20h)后，屈服强度提高了84 MPa，延伸率仅下降5.5%，此外，与AT态相比，DAT处理后晶粒尺寸减小了2.7  $\mu\text{m}$ ，无沉淀析出带宽度减少了24.7 nm。分析其原因：经过深冷处理，搅拌摩擦焊2198铝锂合金的残余应力在一定程度上得到缓解，从而减小时效过程中晶粒长大的驱动力，同时深冷处理产生的大量位错，可在后续时效过程中作为T1相的形核位置，从而促进其T1相在铝基体中的弥散分布，缩小晶界无沉淀析出带。综上，DAT处理可以有效改善搅拌摩擦焊2198合金的综合力学性能。

关键词：深冷处理，2198 铝锂合金，微观组织，拉伸性能

### C02-33 (Invited)

#### Al-Si-Cu-Mn 系耐热合金研究进展

廖恒成

东南大学

为满足高功率密度铝质柴油发动机对耐热铝合金更严格的要求，基于合金应具有优异铸造性能以保证构件具有高的组织致密度前提，在近共晶 Al-12Si-4Cu 合金中引入了高量的 Mn 开发出新型的 Al-Si-Cu-Mn 系耐热铝合金。研究发现，新形成的初晶和共晶 Al<sub>15</sub>Mn<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 相具有优异的热稳定性，可作为主要的耐热相。随着合金中 Mn 量增多，合金的高温强度提高。同时发现该系合金在固溶过程中弥散析出大量的 Al<sub>15</sub>Mn<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 和 Al<sub>20</sub>Cu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub> 纳米粒子，对高温强度的提高起着重要的作用。Ni 合金化形成富 Ni 耐热相，少量加入可提高合金 350°C 下的强度但过量加入会导致强度降低。Cr 合金化不会形成新相，主要进入 Al<sub>15</sub>(Mn,Cr)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 中，不仅增加了初生富 Mn 相的数量，更重要的是显著改变了初生富 Mn 相形态并使之显著细化，因而显著提高了合金 350 °C 下强度，高达 110 MPa。研究发现，该系合金在凝固过程中先后形成两种完全不同的初生富 Mn 相，先形成的是 2D 板片状 Al<sub>13</sub>Mn<sub>4</sub>Si<sub>8</sub>，具有简单四方结构，后形成的是高度发达的 3D 树枝状 Al<sub>15</sub>Mn<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>，具有简单立方结构，二者之间存在密切关系。液淬实验和不同凝固速度实验的组织观察与表征证实 3D 树枝状 Al<sub>15</sub>Mn<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 是通过包晶反应由 2D 板片状 Al<sub>13</sub>Mn<sub>4</sub>Si<sub>8</sub> 转变而来，这为该系合金初生富 Mn 相组织调控奠定了基础。E2EM 模型预测 LaB6 相可作为 Al<sub>13</sub>Mn<sub>4</sub>Si<sub>8</sub> 相的有效形核基底，Al-La-B 中间合金加入可使粗大的初生富 Mn 相转变成细小的颗粒状或短杆状 Al<sub>13</sub>Mn<sub>4</sub>Si<sub>8</sub> 相。

关键词：Al-Si-Cu-Mn 系耐热铝合金；高温强度；组织调控；合金化

### C02-34

#### 预时效后停放效应对汽车车身板用 6A16 铝合金拉深成形的影响

刘钊扬，熊柏青，张永安，李志辉，李锡武，闫丽珍，刘红伟，黄树晖，温凯

有研工程技术研究院有限公司，有色金属材料制备加工国家重点实验室，北京 101407

基于 ABAQUS/Explicit 有限元方法，模拟了不同压边力和摩擦系数下 6A16 铝合金板材预时效后室温放置 7 天、15 天、30 天、60 天和 90 天的拉深成形性能，研究了应力、应变和成形力的变化趋势，确定了室温放置不同时间后 6A16 铝合金板材的合理的拉深成形参数范围，并进行了试验验证。对成形件不同区域的微观组织和力学性能进行了研究，研究表明：在本试验研究范围内，随室温停放时间的延长，成形件变形过程中变形区的应力和应变均呈增加的趋势；随室温停放时间的延长同一变形区的变形量显著增加且晶粒尺寸明显减小；不同变形区内 Mg<sub>2</sub>Si 的数量不同，其中圆角区的 Mg<sub>2</sub>Si 数量最多体积最大；室温停放时间的延长提高了成形件的屈服强度和抗拉强度。结合模拟结果、拉深成形后的表面质量、微观组织和力学性能分析，确定了预时效后室温停放不同时间下的最佳拉深成形参数范围。

关键词：ABAQUS，6A16 铝合金，拉深成形，室温停放效应

### C02-35

#### Al-5.1Mg-0.15Cu-xZn 合金的析出硬化行为和组织结构演变

侯胜利，张迪，张济山，庄林忠

北京科技大学

通过硬度、差热分析、透射电镜和三维原子探针等技术手段研究了 Zn 含量对 Al-5.1Mg-0.15Cu (wt%) 合金的时效硬化行为和析出组织的影响。结果表明，随着 Zn 含量的增加，经 90 °C/24h 预时效后的合金在第二级 140 °C 时效条件下的时效响应显著加快和硬化能力明显增强。各合金经双级时效处理后 (90 °C/24h+140 °C/25h)，0Zn 合金晶内为细小稀疏的

S-Al<sub>2</sub>CuMg 相, 晶界为  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> 相; 1Zn 合金晶内为细小稀疏 S-Al<sub>2</sub>CuMg 相和低密度粗大 T-Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> 相, 晶界为 T-Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> 相,  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> 相消失; 2Zn 和 3Zn 合金晶内析出高密度细小 T-Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> 相。相比于 2Zn 合金, 3Zn 合金中 T-Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> 相较小的尺寸、较大的个数密度和体积分数使其具有较高硬度。在含 Zn 的 Al-5.1Mg-0.15Cu 合金中, S-Al<sub>2</sub>CuMg 相存在的临界值为 Zn 含量介于 1.0Zn 和 2.0Zn (wt%) 之间。尽管含 Zn 合金中均析出 T-Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> 相, 但具有不同的成分演变规律。随着 T-Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> 相长大, 1Zn 合金中 Mg/(Al+Zn+Cu) 逐渐降低, 而 2Zn 和 3Zn 合金逐渐增加, 当 T-Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> 相长大到一定尺寸, Mg/(Al+Zn+Cu) 趋于定值 0.44; 随着 Zn 含量的增加, 各合金中相同尺寸 T-Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> 相中 Zn/(Al+Mg+Cu) 逐渐增加, 而随着 T-Mg<sub>32</sub>(AlZn)<sub>49</sub> 相长大, Zn/(Al+Mg+Cu) 逐渐降低。

关键词: 铝合金, Zn 添加, 时效析出, 硬度测试, 透射电镜, 三维原子探针

## C02-36

### 毫米级第二相的制备及力学性能检测

兰新月, 李凯

中南大学

本文通过基于 CALPHAD 成分设计的定向凝固实验, 得到了等效直径在 500  $\mu\text{m}$  以上的  $\alpha$ -AlFeSi,  $\beta$ -AlFeSi 和 Mg<sub>2</sub>Si 颗粒。通过对这些大的第二相颗粒的纳米压痕及显微硬度检测, 三者的弹性模量 ( $\alpha$ -AlFeSi: 183.81 GPa,  $\beta$ -AlFeSi: 174.13 GPa, Mg<sub>2</sub>Si: 116.38 GPa), 纳米压痕硬度 ( $\alpha$ -AlFeSi: 11.48 GPa,  $\beta$ -AlFeSi: 10.39 GPa, Mg<sub>2</sub>Si: 6.27 GPa), 维氏硬度值 ( $\alpha$ -AlFeSi: 883,  $\beta$ -AlFeSi: 765, Mg<sub>2</sub>Si: 475) 被检测出来。对于长针片状的贝塔而言, 有关其力学性能的实验数据是首次得到。本文探究了第二相颗粒在载荷作用下对基体的侵蚀深度与颗粒大小之间的关系, 及侵蚀作用对载荷位移曲线的影响, 证明了等效直径小于 100  $\mu\text{m}$  颗粒粗化的必要性。本文不仅检测得到了  $\alpha$ -AlFeSi,  $\beta$ -AlFeSi 和 Mg<sub>2</sub>Si 相的力学性能参数, 而且 本文为合金中的较小的第二相颗粒的力学性能检测提供了一种有效的解决办法。对于第二相的研究及与第二相相关的力学模型的建立是有推动作用。  $\beta$ -AlFeSi 沿着热传导方向生长现象, 以及面心立方八面体间隙被 Mg 原子占据的 Mg<sub>2</sub>Si 在压痕下的表现出超常的塑性变形能力在本工作中被发现并讨论。

关键词: 第二相颗粒粗化,  $\alpha$ -AlFeSi,  $\beta$ -AlFeSi, Mg<sub>2</sub>Si, CALPHAD, 定向凝固, 纳米压痕

## C02-37(Invited)

### 超重力场与钠盐变质对 Al-12wt.%Si 合金共晶硅形态和尺寸的影响

甘章华<sup>1,2</sup>, 蒋攀辉<sup>1</sup>, 吴传栋<sup>1,2</sup>, 刘静<sup>1</sup>

1. 武汉科技大学 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室

2. 武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室

Al-Si 合金由于具有优异的耐磨性能、良好的力学性能以及较低的热膨胀系数, 广泛应用于汽车轮毂、汽缸和发动机活塞等领域, Al-Si 合金中共晶硅的形态和尺寸对材料的综合力学性能具有显著影响, 本文在超重力场作用下实现了 Al-12wt.%Si 合金的凝固, 重点考察超重力场和钠盐变质对 Al-12wt.%Si 合金中共晶硅形态与尺寸的影响。实验结果表明, 普通重力场下共晶硅呈长针状, 随着超重力场增大, 超重力场下 Al-12wt.%Si 合金凝固铸锭心部共晶硅形态和尺寸发生明显改变, 共晶硅颗粒化和细化程度提高, 当重力场达到 2000 g ( $1g=9.8 \text{ m/s}^2$ ) 时, 心部共晶硅组织以短棒状和颗粒状为主 ( $\sim 0.7 \mu\text{m}$ ), 进一步增大重力场, 心部共晶硅的尺寸没有明显变化, 但其颗粒化程度显著提高。值得关注的是经过钠盐变质的合金在超重力场下凝固时, 心部共晶硅细化和颗粒化程度更高, 当超重力场达到 3000g 时, 变质处理的 Al-12wt.%Si 合金中心部共晶硅的尺寸为  $\sim 0.3 \mu\text{m}$ , 本文深入探讨了超重力场和钠盐变质的协同作用对 Al-12wt.%Si 合金中共晶硅的晶粒细化机理。

关键词: Al-Si 合金, 超重力场, 钠盐变质

## C02-38(Invited)

### 摩擦搅拌加工铝板的强剪切变形织构与性能效应

袁鸽成, 丁灿培, 郭海斌, 杜红, 杨安宸

广东工业大学

在不同搅拌头倾角条件下, 对厚度为 5 mm 的 6082-T4 铝合金板材分别进行摩擦搅拌加工处理, 随后切取微观结构及宏观性能测试样品, 采用 Bruker D8 Discover 型 XRD 及带有 EDAX 探头的 FEI-Sirion 200 场发射 SEM 分别进行宏观织构测试及微区 EBSD 信息采集, 利用万能力学性能试验机分别测试板材沿着与轧向成 0°、45°和 90°方向的力学性能, 借助 OM、TEM、织构分析软件、平均塑性应变比  $r$  及平面各项异性指数 IPA 计算模型, 研究了不同倾角下摩擦搅拌加工铝合金板材微

结构及成形性能效应。结果表明, 板材在摩擦搅拌加工过程主要发生了强剪切形变以及连续动态再结晶, 相对 6082-T4 初始态板材, 经不同倾角摩擦搅拌加工后, 板材 Brass{011}<211>、r-Cube {001}<110>、Cube {001}<100>、P{011}<112>、Goss{011}<100>、Q{013}<231>等形变及再结晶组织均不同程度地发生弱化; 在轴肩前进方向摩擦应力及旋转周向剪切应力的协同作用下, 晶粒发生转动并形成以 E{111}<110>和 F{111}<112>取向为主的剪切组织; 倾角较小时板材获得的剪切组织强度较高, 第二相粒子尺寸较小; 随之而来的成形性能亦较高, 其塑性应变比  $r$  值高达 1.15, 屈强比及平面各向异性指数 IPA 分别低至 50.9%及 0.88。

关键词: 摩擦搅拌加工, 铝合金, 强剪切形变, 组织, 性能

## C02-39

### 新型高强耐热活塞铝合金研究

田璐莎, 李建平, 郭永春

西安工业大学

材料的组织稳定性与疲劳性能是保证材料高温服役可靠性的基础。为了提高新型铸造铝基合金的热稳定性和疲劳特性, 本文主要针对 Al-Si-Cu-Mg-Ni 活塞合金热处理工艺进行改性研究, 利用透射电子显微镜观察到合金中产生大量纳米相, 此相的产生使其在 400℃抗拉强度以及疲劳性能完全优于 350℃性能。本文综合采用再时效、显微组织分析、力学性能和疲劳曲线测试手段研究了 Al-132Si-4Cu-1.0Mg-2.6Ni 合金经过固溶时效热处理后, 在 350℃和 400℃再时效不同时间(0h~1000 h)的显微组织、室温与 350℃高温力学性能和室温疲劳性能。结果表明: 随着再时效时间的延长, 合金的抗拉强度明显下降, 而延伸率明显提高, 但强度迅速降低与延伸率迅速提高所对应的再时效时间并不一致。再时效 10 h 内, 强度迅速降低; 超过 10 h 后, 强度趋于稳定; 再时效 10 h~100 h 间, 合金的延伸率迅速提高; 再时效 100 h 时, 合金的室温和高温延伸率由 0.5%和 2.5%提高至 2.8%和 8.9%, 并趋于稳定。400℃再时效该合金的剩余强度比 350℃再时效的高 15 MPa 左右。随着再时效时间延长合金组织中的初生硅长大, 共晶硅基本没有变化, 对合金的剩余强度影响不大; 合金中的 Q 相逐渐聚集长大, 对合金剩余强度影响较大; 合金中富铜相经过  $\theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta$  的转变, 同时通过透射电镜观察到合金中产生大量弥散分布的纳米小颗粒, 使合金相结构发生了变化, 是合金强度变化的最主要原因。

## C02-40

### 含 3.0%Li 的 Al-Mg-Si 合金均匀化过程中显微组织演变

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

有研工程技术研究院有限公司, 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 101407

利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)、X 衍射(XRD)、差示扫描热分析法(DSC)等研究手段详细研究了含有 3.0%Li 元素的 Al-1.5Mg-0.6Si 合金铸态样品在均匀化过程中显微组织演变及元素分布情况。实验结果表明: 合金铸态组织中存在较严重的枝晶偏析。Mg 和 Si 元素在晶界处偏聚形成  $Mg_2Si$  相, 而晶界附近和晶内还存在有较多  $T(Al_2MgLi)$ 相和少量  $\delta(AlLi)$ 相。经过均匀化处理后, 这些含 Li 的第二相全部溶入到基体中, 枝晶偏析基本消除。继续延长均匀化时间, 晶界处的  $Mg_2Si$  相大幅度降低, 但随着均匀化程度的逐渐增加, 由于 Li 元素和 Si 元素结合能力较强, 使得  $Mg_2Si$  相溶解的同时  $AlLiSi$  三元相析出, 并且  $AlLiSi$  相的数量逐渐增多。合金的均匀化过程可以用一指数方程进行描述, 并与实验结果基本吻合。

关键词: Al-Li 合金, Al-Mg-Si 合金, 均匀化, 显微组织演变,  $AlLiSi$

## 墙展

### C02-P01

#### Ag 对 Al-Mg-Cu-Si 合金组织和性能的影响

苏美华, 文胜平, 王为, 李伯龙, 聂祚仁

北京工业大学材料科学与工程学院

本文以 Al-Mg-Cu-Si、Al-Mg-Cu-Si-Ag 两种合金为研究对象, 通过对合金的维氏硬度测试, 晶间腐蚀实验, 结合 OM、SEM 等微观组织测试方法, 研究 Ag 对 Al-Mg-Cu-Si 合金组织和性能的影响。研究表明, 与 Al-Mg-Cu-Si 合金相比, 含微量 Ag 的合金的自然时效硬化反应时间提前, 人工时效合金的硬化水平提高, 达到峰值硬度所需的时间变短; Al-Mg-Cu-Si 合

金的抗晶间腐蚀能力较好,时效前期晶间腐蚀不敏感,时效 96 h 后进入介敏感区。含有微量 Ag 的合金的晶间腐蚀性能相对变差,固态时处于不敏感区,随着时效时间的延长从不敏感区进入介敏感区,时效后期进入了敏感区;OM 观察其金相发现,Al-Mg-Cu-Si 合金铸态组织晶粒粗大,添加微量 Ag 其铸态组织枝晶发达;SEM 观察其观察其铸态组织,Al-Mg-Cu-Si 合金均匀分布,添加微量 Ag 的合金沿着晶界存在偏析,经均匀化退火后组织变得均匀。

关键词: Al-Mg-Cu-Si 合金,力学性能,腐蚀性能,显微组织

## C02-P02

### 固溶处理对喷射沉积含 Er7055 铝合金组织及性能的影响

赵紫娟, 黄晖, 文胜平, 高坤元, 吴晓蓝

北京市朝阳区北京工业大学

通过 OM、SEM、硬度以及拉伸测试,研究 410 °C~530 °C 以及不同时间的固溶处理对喷射沉积含 Er7055 铝合金组织和力学性能的影响,确定最佳固溶工艺。通过组织观察,合金固溶处理温度越高,时间越长,粗大第二相溶解的越多,残余相体积分数也越小,晶粒逐渐呈等轴化;同时,合金组织逐渐出现粗化以及再结晶。因此,根据固溶温度选取原则,得出结论,本合金适合的固溶工艺是 470 °C/2h;随后经过 120 °C/24h 的时效热处理后,测得硬度为 212.5 HV,抗拉强度和屈服强度得到显著提高,延伸率略有下降。

## C02-P03

### 5E83 铝合金热轧板稳定化工艺研究

吴瑕, 黄晖, 文胜平, 高坤元, 吴晓蓝

北京工业大学

利用 OM、TEM、EBSD 等分析测试手段对合金典型状态的腐蚀性能和微观结构进行了研究。通过对 5E83 铝合金板材热轧初始态及 220 °C~240 °C/1~24 h 退火态力学性能和腐蚀性能的研究,并结合相应状态的微观组织分析,优化 5E83 合金热轧板的稳定化工艺,探索其性能和组织随退火制度的变化规律。研究表明,5E83 合金热轧板在 220 °C 的退火温度下硝酸失重曲线快速从介敏区进入敏感区,在 230 °C 的退火温度下随着退火时间的延长由介敏区进入不敏感区,在 240 °C 退火不同时间合金都耐晶间腐蚀。根据以上实验结果,最终确定 230 °C×(4~12 h) 以及 240 °C 退火 1 h 以上为 5E83 合金热轧板适宜的稳定化工艺,此状态下合金的晶间腐蚀性能良好。

## C02-P04

### 热力耦合作用下时效成形 Al-Cu-Li-Mg-Zr 合金析出相演化规律研究

郝敏, 陈军洲, 雷越, 李国爱, 何维维

中国航发北京航空材料研究院

通过 TEM 和 HAADF-STEM 研究时效成形 Al-2.8%Cu-1.35%Li-0.3%Mn -0.11%Zr 合金在人工时效和蠕变时效状态下的微观组织。结果表明,相比无应力条件,160 MPa 应力条件在 160 °C 时效 2 h、4 h、6 h 和 12 h 后,合金中析出相数量明显增多。通过进一步统计分析发现, T<sub>1</sub> 相平均直径减小了 5~15 nm 左右。通过对比合金在有无应力作用下的微观组织发现应力能促进该合金中析出相的形核析出,且在应力作用下 T<sub>1</sub> 相更加细小。这主要是因为外加应力增加了合金中的位错密度并促进位错的运动。T<sub>1</sub> 相和 θ' 相在时效析出过程中并未受外加应力的影响而沿着某个方向择优析出,没有出现明显的应力位向效应。

## C02-P05

### 金属间化合物 Al<sub>3</sub>Yb 的硬度及弹性模量研究

李浩楠, 高坤元

北京工业大学

Al<sub>3</sub>Yb 作为一种密度较低的金属间化合物,具有与 Ni<sub>3</sub>Al 等高温材料相同的 L1<sub>2</sub> 长程有序结构,高熔点等特点。本次论文通过纳米压痕方法和 EBSD 对不同取向的毫米级金属间化合物 Al<sub>3</sub>Yb 的硬度、弹性模量进行了研究。结果表明,Al<sub>3</sub>Yb 相六个不同取向(013)、(112)、(023)、(318)、(213)、(122)所对应的弹性模量分别为 153±4、153±4、151±3、148±4、148±3、147±5 Gpa。硬度分别为 5.6±0.1、5.8±0.2、5.6±0.2、5.7±0.2、5.5±0.2、5.3±0.2 Gpa。对上述不同取向的单晶 Al<sub>3</sub>Yb 的弹性模量及硬度取平均,得到多晶 Al<sub>3</sub>Yb 弹性模量及硬度为 151±2 Gpa 和 5.6±0.2 Gpa。通过实验所得到的 Al<sub>3</sub>Yb 弹性模量值 151±2 Gpa 比第

一性原理计算值 145.39 Gpa 高出 4%左右。由于  $\text{Al}_3\text{Yb}$  具有高硬度、高弹性模量、质量轻及熔点高等特点，意味着其未来可能成为一种潜在的高温应用材料。

## C02-P06

### 不同工艺变量对 Al-5Ti-1B 细化纯铝的影响

樊斌斌

北京航空航天大学材料科学与工程学院

用 Al-5Ti-1B 中间合金细化工业纯铝，通过分析在不同添加量、浇铸温度、保温细化时间以及轧制压下量下的晶粒细化效果，研究了这四个变量对 Al-5Ti-1B 细化晶粒行为的影响机制。结果表明，不同添加量下，添加 0.02wt.% 的 Al-5Ti-1B，纯铝晶粒由粗大的柱状晶向等轴晶转变，晶粒尺寸被细化至 150  $\mu\text{m}$ ，随着添加量增至 3%，纯铝晶粒尺寸进一步逐渐降低直至稳定至 60  $\mu\text{m}$  左右。不同浇铸温度下，680  $^{\circ}\text{C}$  时 TiAl<sub>3</sub> 粒子溶解较少不能完全发挥形核粒子作用；随着浇铸温度的升高至 720  $^{\circ}\text{C}$ ，TiAl<sub>3</sub> 粒子溶解较多且过冷度较大，TiAl<sub>3</sub> 包裹 TiB<sub>2</sub> 复相形核粒子充分形核使得纯铝晶粒尺寸最小；进一步升温，TiB<sub>2</sub> 表面尺寸较小的 TiAl<sub>3</sub> 粒子逐渐溶解，小尺寸的异质形核数量减少，使得纯铝晶粒尺寸逐渐增大。不同保温时间下，随着时间延长，30 min 内纯铝晶粒尺寸变化较稳定，但再延长保温时间，TiB<sub>2</sub> 粒子逐渐聚集沉降，导致 Al-5Ti-1B 细化能力逐渐衰退。80%压下量下，随着 TiAl<sub>3</sub> 粒子逐渐被破碎，TiAl<sub>3</sub> 形核粒子尺寸减小，数量增多，纯铝的晶粒尺寸也进一步降低。

关键词：Al-5Ti-1B，TiAl<sub>3</sub>，TiB<sub>2</sub>，不同变量，晶粒细化

## C02-P07

### 高镁铝合金冷轧-稳定化工艺优化研究

梁岳莹，聂祚仁，黄晖，高坤元，文胜平

北京工业大学

研究在不同稳定化退火工艺下，5E61 合金冷轧板的力学性能和腐蚀性能。通过运用金相(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)对合金稳定化退火后相应的微观组织进行观察分析并进一步优化 5E61 合金冷轧板稳定化工艺。结果表明：5E61 合金在 235  $^{\circ}\text{C}$ /(8-24 h)、250  $^{\circ}\text{C}$ /(4-24h)、270  $^{\circ}\text{C}$ /(4-10 h)、285  $^{\circ}\text{C}$ /(2-10 h)不同稳定化退火工艺下均具有良好的耐腐蚀性能。因此，在较高的稳定化退火温度区间在短时间内可以获得高强耐蚀的合金性能；而较低稳定化退火温度区间处理后的性能结合敏化后的腐蚀深度金相观察，结果显示长时间退火条件下具有良好的耐腐蚀性能且获得较高的力学性能，从而优化 5E61 合金冷轧板的稳定化工艺。

关键词：5E61 合金，冷轧，稳定化工艺

## C02-P08

### 二级时效工艺对 7050 铝合金锻件组织及性能的影响

何维维，郝敏

中国航发北京航空材料研究院

研究了二级时效工艺对 7050 铝合金锻件室温拉伸性能、断裂韧度及电导率的影响，并采用透射电镜(TEM)、扫描电镜(SEM)分析强韧化机理。结果表明：7050 铝合金锻件在第一级时效工艺相同的条件下，随着二级时效时间的延长，合金强度先快速升高达到峰值，随后强度降低，断裂韧度随二级时效时间的延长缓慢升高逐渐趋于稳定；组织观察发现，合金中沉淀相的尺寸和间距随时效时间的延长而增加，沉淀无析出带宽化，断裂方式由沿晶断裂及第二相颗粒断裂向微孔诱导穿晶断裂为主转变。在 120  $^{\circ}\text{C}$ /4 h+177  $^{\circ}\text{C}$ /6~8 h 双级时效工艺下 7050 铝合金锻件具有高强高韧的综合性能。

## C02-P09

### 均匀化处理对 Al-Mg-Si-Cu-Zn-Er-Zr 合金组织与性能的影响

赵婷，黄晖，文胜平，高坤元，吴晓蓝

北京工业大学

采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、X射线衍射(XRD)、硬度及电导率等分析手段，研究了均匀化工艺对铸态 Al-Mg-Si-Cu-Zn-Er-Zr 铝合金组织和性能的影响。结果表明，合金的铸态组织为典型的枝晶结构，枝晶之间存在非平衡共晶组织。经 535-565  $^{\circ}\text{C}$  四个温度分别保温 2-48 h 进行均匀化处理，随温度升高，合金

中非平衡共晶相的数量减少，冷却过程中有大量平衡第二相析出，硬度和电导率分别升高和降低。565°C/24 h 是适宜的均匀化热处理工艺。

## C02-P10

### 不同 Mg/Si 比对含铒 AlMgSi 合金时效微观组织的影响

李宁，李伯龙，王同波，董莎莎，亓鹏，乔旭，聂祚仁  
北京工业大学

随着汽车数量的不断增加，环境污染日益严峻，因此具有减轻车身重量的铝合金引起了人们的广泛关注。本文通过设计三种具有不同 Mg/Si(0.86,1.73,2.57)的 Er,Zr 复合微合金化 Al-Mg-Si 合金以及一种未含 Er,Zr 的对比合金(Mg/Si=1.73)，利用显微硬度测试、金相显微镜(OM)以及透射电镜(TEM)等表征手段，阐述了 Mg/Si 对 Er,Zr 复合微合金化合金时效硬化行为的影响。与此同时，在 Mg/Si 为 1.73 的基础上，与未添加 Er,Zr 的合金相比，探究合金在峰时效状态下 Er,Zr 的作用及存在形式。研究表明：三种具有不同 Mg/Si 的 Er,Zr 复合微合金化合金均存在迅速硬化阶段，缓慢增至峰值阶段，硬度波动阶段以及缓慢下降等四个阶段，且 Mg/Si 为 1.73 时合金的硬度曲线始终高于另外两种合金；三种 Er,Zr 复合微合金化合金峰时效态析出相主要为针状的  $\beta$ "相，且  $\beta$ "相的“端面”密度随着 Mg/Si 的增加，先增加后减少，当 Mg/Si=1.73 时密度最高，为 0.51%；Mg/Si 为 1.73 时，添加 Er,Zr 后的合金峰时效态硬度值得到了提高，这主要与形成了具有强化作用的球状  $Al_3Zr$  相有关，而 Er 在合金中则以长大约 200nm 的长棒状 Al,Zr,Er 相存在。

关键词：Mg/Si Er,Zr 复合微合金化；时效硬化行为；针状  $\beta$ "相

## 仅发表论文

### C02-PO-01

#### 先进孔隙泡沫铝单元 (APM) 的制备和压缩性能

王艳丽

- 1.中北大学
- 2.太原科技大学

本文采用粉末压实发泡法 (PCF) 来制备先进孔隙泡沫铝单元 (APM)，采用工业用铝粉 (300 目)、硅粉 (300 目) 和  $ZrH_2$  或  $TiH_2$  粉末 (300 目) 为原材料，按照质量比为 89.2:10:0.8 进行球磨，冷压和热压制成圆柱形条状预制体，然后切割成预制体颗粒，选择合适的模具进行半约束式发泡，最终获得公称直径约为 15 mm,平均孔径为 3 mm,孔隙率最高可达 82% 的近球形泡沫铝小球。在 APM 泡沫铝单元小球制备中讨论了其成型过程中的三个主要阶段：预制体熔化阶段、泡沫体形成阶段（三因素：发泡剂，加热速度，发泡时间）以及冷却凝固阶段。实验结果表明，（1）在预制体熔化过程中，Al-Si 相互扩散，其合金化效果与发泡温度相关，发泡温度越高合金化进程越快；（2）采用  $TiH_2$  或  $ZrH_2$  作为发泡剂对样本的发泡特征值具有一定的影响。在相同温度下， $ZrH_2$  发泡较  $TiH_2$  滞后， $ZrH_2$  的平台区要更长，约多出 10-20 s；最大膨胀点温度提高约 20 °C 左右，最大膨胀高度高出 1 cm 左右；升温速率过快或过慢均不利于孔结构优化，经实验分析，当升温速率为 2.6 °C/s，预设炉温为 780 °C 时进行发泡效果最好；发泡时间直接影响熔体的实时粘度，对孔结构的形成和保持具有重要影响，经实验分析，发泡时间控制在 3 s 左右可获得较高的孔隙率和圆形度；（3）最终冷却方式选择对样本外形的均匀性以及内部孔隙结构的稳定具有重要影响。选择雾化冷却方式不仅不会破坏样本表皮形貌，还可以防止过分排液现象引起的泡孔合并破裂等孔结构的恶化。在型号为 CMT5105 的 SANS 微机控制电子万能实验机上进行准静态压缩试验，加载速度为常数 3 mm/min。实验结果表明压缩初期随着变形量及载荷的增加，小球靠近工作台接触面的两端发生变形，变得扁平，与工作台由点接触变为面接触，小球试样外形逐渐接近扁平，此时载荷增加显著，直至压为薄饼。APM 小球的应力-载荷曲线，与传统泡沫铝的压缩曲线类似，分为三个阶段：弹性阶段，屈服阶段，致密化阶段；但 APM 泡沫铝小球弹性阶段较短且不明显，变形以塑性变形为主。

关键词：泡沫金属，泡沫铝，功能材料，先进孔隙泡沫铝单元 (APM)

### C02-PO-02

#### 基于相图计算的高强低淬火敏感性铝合金合金化分析

聂宝华<sup>1</sup>，陈东初<sup>1</sup>，周铁涛<sup>2</sup>，孙海波<sup>1</sup>，凡头文<sup>1</sup>

1.佛山科学技术学院

2.北京航空航天大学

随着飞机结构的大型化和整体化制造的发展,高强度低淬火敏感性 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金受到国内外研究者的关注。本文总结了新型高强度低淬火敏感性 7085、7081 和 7037 铝合金成分特点和力学性能,采用 Thermo-Calc 软件进行了相图计算,从热力学的角度探讨了合金成分、平衡相与强度及淬火敏感性的关系,提出新型高强度低淬火敏感性 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金成分设计规律。从合金强度与淬火敏感性设计的角度,对 7085 铝合金进行了合金成分优化分析。

关键词: Al-Zn-Mg-Cu 系合金, 淬火敏感性, 合金成分, 相图计算

## C02-PO-03

### 焊后热处理对 Al-Mg-Zn 合金焊丝焊接 7075 铝合金焊接接头组织性能的影响

熊斯, 唐鑫, 胡清华, 黄启波, 何柔月, 孔敏

桂林理工大学

采用 Al-5.5Mg-1.0Zn 和 Al-5.5Mg-1.0Zn-0.4Sc-0.2Zr 合金焊丝为填充材料,对 AA7075-T651 板材进行非熔化极惰性气体保护焊接(Tungsten Inert Gas Welding, TIGW),基材规格为 150 mm\*75 mm\*4 mm,焊接方向垂直于基材轧制方向,焊接电流为 200 A,焊接电压为 25 V,焊接速度为 2.5 mm/s,氩气流量为 15 L/min,脉冲频率为 10 Hz,坡口为 60°对焊接接头进行焊后热处理(Post Weld Heat Treatments, PWHT),工艺为固溶处理(470 °C/1 h)+水淬+人工时效(120 °C/24 h),并对焊接接头的显微组织和力学性能进行研究,结果表明,焊丝中添加微量 Sc 和 Zr 后,焊缝区晶粒细化,晶界变细,弥散分布的 Al<sub>3</sub>(Sc, Zr)粒子强烈钉扎位错及晶界,改善了焊缝区组织,提高了焊接接头的力学性能,焊缝区平均硬度从 77HV 提高到 80 HV,抗拉强度从 305 MPa 提高到 334 MPa,焊接系数从 0.55 提高到 0.60,断裂位置为焊缝区,焊态下焊缝区为焊接接头最薄弱区域。经焊后热处理的焊缝区的富 Zn、Mg、Cu 非平衡相已基本回溶入铝基体中,基体为过饱和固溶体,基体中弥散分布大量的纳米级 Al<sub>3</sub>(Sc, Zr)粒子,该粒子具有异常热稳定性,在焊接过程中仍能保持高的弥散度,与基体共格,从而抑制了晶粒的长大,在位错附近聚集的 Al<sub>3</sub>(Sc, Zr)粒子具有强烈地钉扎位错及晶界的作用,阻碍位错移动及晶界迁移。共格弥散的 Al<sub>3</sub>(Sc, Zr)粒子致使焊缝区组织经焊后热处理后仍能保持亚晶结构,Sc 和 Zr 的添加有效抑制再结晶的发生,焊后热处理并不影响 Al<sub>3</sub>(Sc, Zr)粒子的弥散分布,并析出 MgZn<sub>2</sub>亚稳定强化相,极大地改善了焊缝区组织,焊接接头断裂位置由焊缝区转移到熔合线附近。焊后热处理后,焊接接头焊缝区平均硬度从 80 HV 提高到 151 HV,抗拉强度从 334 MPa 提高到 520 MPa,焊接系数从 0.60 提高到 0.94。

关键词: 焊后热处理, 微合金化, 7075 合金, 显微组织, 力学性能

## C02-PO-04

### 喷射成形制备超高强铝合金热加工后的组织和性能

黄树晖

北京有色金属研究总院工程技术研究院

喷射成形是一种快速凝固技术,以此来制备超高强铝合金可以实现合金化元素超过 15 wt%,所制备铝合金的抗拉强度可达 750~800 MPa。在本文中,采用喷射成形制备了 Al-10.5Zn-2.8Mg-1.9Cu-0.2Zr 合金,并采用热等静压、均匀化、热挤压、以及固溶时效等一些列热加工手段处理该合金。采用金相分析、扫描电子显微镜分析和力学性能测试等手段研究了合金在热加工过程中的组织和性能演变。因为喷射成形过程中,合金的过冷度可达到 1000 K/s,可以制得平均晶粒度约为 20 μm 的合金锭坯,但是喷射成形制备的合金锭坯中难免存在疏松和孔洞。通过热等静压和热挤压之后,合金的致密度可以由 87~90% 几乎升至 99~100%,但是在固溶处理后,合金的致密度会再次降至 98%,这表明一些孔洞缺陷不可能完全被消除。孔洞缺陷的存在削弱了合金的力学性能。与铸造相比,喷射成形铝合金的原始晶粒更加细小,不适合与大变形的塑性加工。因为原始组织细小的合金在较大变形量的热变形中更易发生再结晶,这将导致力学性能的恶化。本文的研究结果表明,采用 9 和 16 的挤压比制得的合金型材,抗拉强度、屈服强度和延伸率分别可超过 780 MPa, 750 MPa 和 6%。

关键词: 喷射成形, 超高强铝合金, 热加工, 热等静压, 微观组织和缺陷, 力学性能

## C02-PO-05

### 高品质 Al-5Ti-1B 合金杆的显微组织与晶粒细化性能

康跃华, 王顺成, 周楠, 宋东福

广东省材料与加工研究所



采用等离子体发射光谱仪、光学显微镜和扫描电镜,研究了高品质 Al-5Ti-1B 合金杆的化学成分、显微组织和晶粒细化性能。结果表明:高品质 Al-5Ti-1B 合金杆的主合金元素 Ti、B 的含量稳定,杂质元素 Fe、Si、V、K 的含量低。合金杆中 TiAl<sub>3</sub>相和 TiB<sub>2</sub>粒子尺寸细小,分布均匀,TiAl<sub>3</sub>相平均尺寸为 16.7 μm,TiB<sub>2</sub>粒子平均尺寸为 0.73 μm,TiB<sub>2</sub>粒子团聚块尺寸小于 5μm,无氧化、夹杂物。添加 0.2%的高品质 Al-5Ti-1B 合金杆可使纯铝铸态晶粒细化到 75.7 μm,晶粒细化响应时间块,抗衰退能力强,适应铝熔体温度范围宽。研究结果可为 Al-5Ti-1B 合金杆生产和使用企业提供参考。

关键词:晶粒细化剂,Al-Ti-1B 合金,晶粒细化性能

## C02-PO-06

### 铸造工艺参数对半连续铸造 Al-Mg-Si-Cu 合金 组织与性能的影响

郝建飞<sup>1,2</sup>,李润霞<sup>1</sup>,王顺成<sup>2</sup>

1.沈阳工业大学

2.广东省材料与加工研究所

采用低频电磁半连续铸造工艺制备 Φ110 mm 的 Al-1.1Mg-0.75Si-0.36Cu 合金铸锭,研究了铸造速度、铸造温度和冷却水强度对 Al-1.1Mg-0.75Si-0.36Cu 铝合金铸锭组织性能的影响。结果表明:铸造速度在 180 mm/min、铸造温度在 720 °C,冷却水压在 2500 L/h 时,铸锭横截面的显微组织均匀细小,呈现近球形,边部和中间部位的晶粒大小差别较小,平均晶粒尺寸达到 97 μm;在该工艺参数条件下,Al-1.1Mg-0.75Si-0.36Cu 合金铸锭的抗拉强度为 237.95 MPa,延伸率为 19.10%,硬度值为 82.71 HV,与常规半连续铸造工艺相比,此时 Al-1.1Mg-0.75Si-0.36Cu 合金铸锭的抗拉强度提高了 21.13%、延伸率提高了 17.2%、硬度值提高了 18.2%;提高铸造速度,降低浇注温度,弯液面曲率半径及熔体与结晶器接触高度减小、初凝壳形成位置点降低、液穴深度也随之相应减小,有利于铸锭成形,同时提高铸锭表面质量。

关键词:低频电磁铸造,工艺参数,组织与性能,液穴深度

## C02-PO-07

### 连铸连轧对耐热铝合金显微组织、力学性能和电导率的影响

周楠<sup>1</sup>,王顺成<sup>1</sup>,翟元辉<sup>2</sup>,张志敏<sup>2</sup>

1.广东省材料与加工研究所

2.广东新亚光电缆实业有限公司

Al-Zr 系铝合金是目前制造耐热铝合金导线的主要材料,现有 Al-Zr 系耐热铝合金导线的抗拉强度普遍低于 220 MPa,电导率小于 55%IACS,难以满足我国超高压大容量输电工程的建设要求。为此,课题组开发了 Al-0.15Zr-0.55Fe 新型耐热铝合金,具有强度、导电率高,耐热性能好的优点,是制造超高压大容量输电导线的理想材料。连铸连轧是目前工业上生产电工铝合金杆的主要方法,具有低成本、短流程、高效节能等优点。为优化 Al-0.15Zr-0.55Fe 耐热铝合金杆的连铸连轧生产工艺,本文采用连铸连轧生产 Al-0.15Zr-0.55Fe 耐热铝合金杆,并采用金相显微镜、涡流导电仪、拉伸试验机和扫描电镜等手段,研究了连铸连轧对 Al-0.15Zr-0.55Fe 耐热铝合金显微组织、电导率和力学性能的影响。研究表明:随着轧制道次的增加,铝合金的晶粒逐渐细化,抗拉强度逐渐提高,电导率和伸长率逐渐降低。经过 15 道次连续轧制后,铝合金杆的抗拉强度为 248.8 MPa,伸长率为 10.2%,电导率为 58.4% IACS,与未轧制的铝合金连铸坯相比,连铸连轧铝合金杆的抗拉强度提高了 12.8%,伸长率和电导率分别下降了 7.9%和 2.6%。

关键词:耐热铝合金,连铸连轧,轧制道次,电导率

## C02-PO-08

### 基于选择性激光熔化技术 7075 铝合金组织性能与裂纹的研究

万达远,李小强,傅道健

华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心

选择性激光熔化技术(Selective Laser Melting, SLM)是近十几年发展的一种利用高能激光束熔化金属粉末,堆叠成型的先进快速成形技术。目前,国内外对铝合金 SLM 成形的研究主要集中在 Al-Si 系粉末,对于 7 系超硬高强度铝合金粉末 SLM 成形的研究还处于起步阶段。研究使用 7075 铝合金粉末对 SLM 成形工艺做了一系列试验,利用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)等仪器分析了 7075 铝合金选择性激光熔化成形试样的组织性能和裂纹。结果表明:试样中的裂纹是由成分偏析所造成的;并且随着激光能量密度的增加,试样中的柱状晶长度、熔池深度、裂纹平均长度、试样抗拉强度都随之增大,而裂纹数量随之减少;试样的抗拉强度主要受试样中裂纹数量的影响,当激光能量密度达到 118.5 J/mm<sup>3</sup>时,裂纹数量

为 22，抗拉强度达到最大 331 MPa，延伸率 1.7%。

关键词：选择性激光熔化技术，7075 铝合金，力学性能，增材制造，裂纹

## C02-PO-09

### 稀土掺杂对 1470 铝合金的微观组织和腐蚀性能的影响

王康，王冉，夏昌鹏，冷金凤\*

济南大学材料科学与工程学院，南辛庄西路336号，济南 250022

铝锂合金具有低密度、高弹性模量，高强度等优良的性能而受到广泛的关注。被认为是 21 世纪的理想航天工业材料。本文以 1470 铝锂合金为研究对象，系统的研究了稀土元素 Ce 对 1470 铝合金在时效过程中微观组织和强化析出相的演变规律及腐蚀性能的影响。研究表明：在 485℃ 出现了合金的过烧，在三叉晶界处发现富铕球和晶界的不同程度的粗化。且添加 0.5%Ce 的 1470 铝锂合金中，Ce 以及与铝基体产生的稀土化合物聚集在固液界面前沿并且不会随着固液界面的推移而推移，进而细化了晶粒。时效硬化曲线表明，1470 铝锂合金的时效析出是双峰时效，添加 0.5%Ce 的第一个硬度极值为 114HB，与未添加的相比，提高了 14%，随着时效时间的延长，第二个硬度极值为 99.4HB，与未添加的相比，提高了 8%。第一次峰时效由于晶界处出现亚稳相，随着时效时间的延长，亚稳相变为稳定相。合金硬度下降。对比峰时效状态下，由于第二相长大并且相互接触，导致了与铝基体电位差的增大，降低了其耐点蚀性，腐蚀电位由 -1.213v 下降到 -1.226v，腐蚀电流由 -2.084A 下降到 -2.392A。

关键词：1470；稀土元素；时效硬化；腐蚀性能

## C02-PO-10

### Al-Er-Zr 中间合金热处理对晶粒细化效果影响

于海跃，黄晖

北京工业大学

利用显微硬度、SEM、X 射线衍射 (XRD)、TEM 等测试方法，研究了 Al-0.5Er-0.2Zr 及 Al-1Er-0.25Zr(wt.%)合金经 450 °C 等温时效制备方法后加入高纯铝对晶粒的细化效果。本实验结果表明，Al-0.5Er-0.2Zr 合金在时效 5 小时后，由于 Al<sub>3</sub>Er 的密集析出，达到峰值硬度 (约为 41.3 Hv)，而 Al-1Er-0.25Zr 合金中 Er 含量远远大于在铝中的固溶度，一次相在基体中密集分布，等温时效 15 小时后硬度达到峰值 (约为 45.2 Hv)。将在峰值时间点热处理的合金加入高纯铝液，加入量为 Er 含量占基体的 0.1%，并与铸态下无二次析出相且一次相均为微米级别的中间合金，作细化效果的比较。得到两种状态的平均颗粒尺寸均小于 1mm，同时在文中初步分析 Er 与 Zr 元素相互作用使 Al-Er-Zr 中间合金产生细化效果的原因。

关键词：中间合金，晶粒细化

## C02-PO-11

### 旋转速度对 7003-T4/6060-T4 异种搅拌摩擦焊接头组织和性能影响

董家亮，张大童

华南理工大学

在本实验中，固定焊接速度为 40mm/min，研究了 5 组旋转速度，800、1000、1200、1400、1600 r/min，对 7003-T4/6060-T4 铝合金异种搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响。通过金相 (OM)，SEM，TEM 等研究了接头的组织演变，显微硬度，拉伸实验等研究接头的力学性能。结果表明：7003-T4/6060-T4 异种搅拌摩擦焊接头形成性比较好，5 组旋转速度下都能获得完整无缺陷的接头。在 1000-40 的参数下，接头抗拉强度最高，159.2MPa，占母材 6060 的 78.2%。显微硬度分布成台阶型，在 6060 侧热影响区形成明显的低硬度区域。在热影响区，析出相发生溶解和粗化。热-机影响区，拉长的晶粒和细小的等轴晶共存，发生不完全再结晶，同时析出相未完全溶解。在搅拌区发生完全动态再结晶，形成细小的等轴晶。析出相发生溶解和再析出。

关键词：异种搅拌摩擦焊，动态再结晶，旋转速度，组织演变

## C02-PO-12

### 2A97-T3 铝锂合金原位拉伸断裂行为研究

王亮

北京航空材料研究院

采用 OM、SEM、TEM、拉伸试验机等测试分析手段对 2A97-T3 铝锂合金的组织特征及拉伸性能进行研究,同时通过原位观察试验方法对拉伸过程中的组织演变规律进行了研究。组织分析表明 2A97-T3 合金主要强化相是弥散细小的  $\delta'$ 相,不存在晶间析出带;原位拉伸过程中,晶内出现大量滑移带,随拉伸应变的增大,滑移带越来越粗大,并出现交叉滑移,裂纹在粗大第二相及滑移带交叉位置萌生并沿滑移带扩展;拉伸断口 SEM 观察发现,2A97-T3 合金断口平坦,主要为滑移剪切穿晶断裂形貌,存在少量细小韧窝;采用 TEM 方法对比拉伸前后的组织发现,2A97-T3 合金中  $\delta'$ 相与基体共格,拉伸过程中易被位错切过,对位错阻碍作用较弱,导致晶内强度较低,因此晶内易形成大量滑移带,使合金穿晶断裂。

关键词: 铝锂合金, 原位拉伸, 滑移带, 穿晶断裂

## C02-PO-13

### 反复弯曲平直轧制 6061 铝合金板材过程有限元模拟

马劲红, 张荣华

华北理工大学冶金与能源学院

6061 铝合金作为一种具备优良综合性能的合金材料,在当今时代不断追求轻质、高性能的汽车行业中有着广阔的发展前景。目前国内的关于 6061 研究方向主要集中在热处理、锻压、织构等方向,对于轧制备高性能细晶 6061 铝合金板材的研究还不够深入。反复弯曲平直轧制作为制备细晶板材的强变形工艺,是细化晶粒、提高材料强度的有效手段,然而现阶段用这种工艺用来制备 6061 铝合金板材的相关研究还不够深入。因此,开展使用反复弯曲平直轧制生产 6061 铝合金的相关研究,对于铝合金制备技术的发展有着重要的意义。反复弯曲平直轧制使用的轧辊与一般轧辊的不同之处就在于将在圆形的辊面上添加了周期性变化的凹凸不平的辊型。为了验证本实验中应用齿形辊的可行性,对轧制过程中应力应变场进行分析,优化弯曲变形中的工艺参数,本文采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对 6061 铝合金反复弯曲变形过程进行有限元模拟,分析反复弯曲变形过程中材料的咬入过程、涉及的剪切应力和剪切应变、压下量对板型和变形量的影响。

## C02-PO-14

### Al-Er-Zr/Hf 合金组织稳定性研究

徐静, 文胜平

北京工业大学

本文通过将峰时效态经冷轧变形的 Al-Er-Zr/Hf 合金进行再结晶退火处理,以探讨 Al-Er-Zr/Hf 合金组织稳定性。经再结晶退火处理的四种 Al-Er-Zr/Hf 合金中,Al-0.04Er-0.08Zr-0.1Hf 合金的抗再结晶性能最好。通过 TEM 观察,Al-Er-Zr/Hf 合金在退火过程中,基体中析出大量细小的析出相使亚晶界、位错等难以移动,使变形组织在较高退火温度下仍保持稳定。当退火温度超过再结晶退火温度时,沿位错分布的析出相明显粗化,弱化析出相对变形组织的稳定作用。

关键词: Al-Er-Zr/Hf 合金, 再结晶退火, 组织稳定性, 析出相

## C02-PO-15

### 喷射成形 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 耐热铝合金致密化工艺及其组织性能的研究

张荣华<sup>1</sup>, 张永安<sup>2</sup>, 朱宝宏<sup>2</sup>

1.华北理工大学

2.有研科技集团有限公司

采用喷射成形和挤压工艺制备了 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 耐热铝合金,选用“自由锻造”、“包套锻造”和“闷车+包套锻造”三种致密化工艺对其进行致密化,通过金相显微镜、透射电镜和力学性能测试等试验,对锻压件的组织和性能进行了分析。结果表明:“闷车+包套锻造”工艺对喷射成形 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 合金坯件的致密化效果好于用自由锻造和包套锻造致密化的合金,采用该工艺可获得高性能的合金材料。“闷车+包套锻造”锻件在室温下的抗拉强度( $\sigma_b$ )达到 407 MPa,屈服强度( $\sigma_{0.2}$ )达到 344 MPa,延伸率( $\delta_5$ )为 7.6%;在 315 °C,锻件的  $\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\delta_5$  分别为 222 MPa、216 MPa、7.2%。采用“闷车+包套锻造”工艺致密化喷射成形 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 耐热铝合金可以制备出综合性能良好的材料。

关键词: 喷射成形, 耐热铝合金, 锻造, 组织

## C02-PO-16

### 预时效工艺对 6111 铝合金组织和性能的影响研究

刘红伟

北京有色金属研究总院

6000 系铝合金是理想的汽车轻量化材料，因为其具有高强度、良好的成形性能、耐蚀性能和焊接性能。本文采用透射电子显微镜、拉伸实验和杯凸实验研究了预时效工艺对 6111 铝合金组织和性能的影响。结果表明，6111 铝合金在固溶处理后的 30 min 之内进行 140 °C/10min 的预时效（T4P）可以得到更好的力学性能。6111-T4 合金的  $n$ ,  $r$ , IE 和屈服强度分别 0.31, 0.62, 8.06 mm 和 149 MPa; 6111-T4P 合金的  $n$ ,  $r$ , IE 和屈服强度分别 0.33, 0.76, 8.45 mm 和 133 MPa。经过 170 °C/30min 烤漆之后，6111-T4 合金和 6111-T4P 合金的屈服强度分别增加到 154 MPa and 212 MPa。相比与 T4 处理，预时效工艺降低了合金中  $\beta'$  相的析出温度，促进了强化相在模拟烤漆工艺中的析出。预时效处理不仅降低了 6111 铝合金在冲压加工中的成形难度，还提升了合金在烤漆之后的强度。

关键词：6111 铝合金，汽车车身用板材，预时效工艺，组织和性能

## C02-PO-17

### 不同模锻工艺对 7050 模锻件组织性能及残余应力的影响

李惠曲，王亮，伊琳娜

中国航发北京航空材料研究院

研究了等温模锻和普通模锻两种工艺对模锻件组织、性能的影响规律，并采用透射电镜（TEM）、扫描电镜（SEM）等分析其影响机理；同时采用超声法研究分析对等温模锻和普通模锻两种工艺对模锻件残余应力分布特征的影响规律。结果表明：等温模锻提高 7050 铝合金流动性，充型完好，锻件变形均匀；等温模锻较普通模锻工艺改善室温拉伸性能及断裂韧度的各向异性，由于等温模锻件发生动态回复，等温模锻件室温拉伸强度较普通模锻件有所降低；等温模锻件的残余应力分布较普通模锻件更加均匀。由组织观察可见，等温模锻件较普通模锻件晶粒尺寸增大，不同位置更加均匀，再结晶程度降低；模锻件不同厚度组织观察发现，等温模锻工艺提高锻件组织均匀性；等温模锻件织构类型以变形织构和少量再结晶织构为主，普通模锻件织构取向散漫，织构强度降低。

## C02-PO-18

### Sc 变质和制浆工艺对 A356 铝合金半固态组织的影响

张予昕，廖恒斌，章争荣，董勇，陈安伏，付小玲

广东工业大学

本文以 A356 铝合金为研究对象，采用传统搅拌方式，探究连续降温过程中搅拌制浆工艺参数以及 Sc 变质对半固态浆料的影响。实验结果表明，随着剪切速率的增加，获得破碎枝晶越多，致使半固态浆料晶粒当量直径越小、形状因子（圆整度）越高，其中在本次试验中剪切速率为  $70S^{-1}$  效果最佳。对于初始搅拌温度参数，在 630 °C 开始搅拌直至 595 获得的浆料制浆最佳。温降速度参数对于浆料质量影响效果显著。温降速度越慢（ $1.94\text{ °C/min}$  效果最佳），剪切时间越充分，树枝晶析出长大越慢，致使刚结晶析出的树枝晶未来得及长大就已经被剪切破碎，生成的近球形晶粒（晶核）数量越多，因而浆料晶粒当量直径越小、形状因子越大。对比分析 A356 及含 Sc 元素 A356 合金半固态浆料，发现添加 Sc 元素 A356 半固态浆料晶粒尺寸更小，圆整度更高。

关键词：A356 铝合金，半固态，Sc 变质，微观组织，制浆工艺参数

## C02-PO-19

### 铝合金在新能源动力电池上的应用及展望

黄瑞银<sup>1,2</sup>，阙石生<sup>1</sup>

1.中铝瑞闽股份有限公司

2.中铝中央研究院东南分院

随着新能源汽车的快速发展，铝合金因为密度小、耐腐蚀、成型性优良等优势，成为新能源汽车动力电池工业中首选的轻量化材料，被广泛应用于动力电池外壳、盖板、极柱、防爆阀、正极集流体、软包铝塑膜、电池包等部件。铝合金在动力电池材料上应用的发展趋势，一是不断减薄，以降低电池重量，提高能量密度，降低成本，这对材料的性能和材料研究提出了更高的要求；其次，由于电池安全性的要求，对材料的质量稳定性和一致性提出了越来越严苛的要求，这对材料的制造工艺和企业质量管理水平提出了越来越高的要求。我国目前在电池外壳、盖板、正极集流体等方面实现了材料的自主化，但是在防爆片、一体化盖板、软包铝塑膜等关键材料方面还需要进口，需要国内进一步攻关。

关键词：铝合金，新能源动力电池，应用与发展

## C02-PO-20

### 汽车用 6016 铝合金的成形性与织构研究

张迪, 米振莉  
北京科技大学

采用 XRD, EBSD、拉伸实验等分析测试手段, 研究了不同热处理条件下 6016 铝合金板材的织构演变及成形性变化, 研究表明: 预时效处理 (T4P) 可显著改善板材的各向异性, 同时使  $n$  值增大, 进而提高成形性。结合宏观微观取向分析研究, T4P 态下的织构类型主要为平行于 R 的丝织构  $\langle 110 \rangle$  和  $\langle 111 \rangle$ , 另有少量的铜型和黄铜织构出现。

## C02-PO-21

### 回归温度和升温速率对 7000 系铝合金中析出相几何特征演变的影响

刘冬梅, 熊柏青, 张永安, 李志辉, 李锡武, 刘红伟  
有色金属材料制备加工国家重点实验室

本文通过同步辐射 X 射线小角散射原位实验技术, 研究了 7085 铝合金在回归过程中, 回归温度和升温速率对合金中析出相几何特征的影响规律。研究发现: 从 160 °C 到 170 °C, 回归温度越高, 初始升温过程中析出相体积分数降低越大, 表明析出相回溶越充分, 回归结束时, 析出相最终体积分数越大。同时, 回归温度越高, 析出相平均尺寸长大得越快; 数量密度降低得越快。另一方面, 升温速率越快, 在初始升温阶段, 析出相回溶得越快; 在相同回归时间时, 析出相尺寸也越大。回归速率过低或过高, 对初期析出相回溶均不利, 对后期析出相重新析出也不利。对比结果可见, 1.6 °C/min 的升温速率是一个比较合理的选择。

关键词: 同步辐射 X 射线小角散射原位实验技术, 7000 系铝合金, 析出相几何特征

## C02-PO-22

### 微结构对 3003 铝合金铸轧-冷轧带各向异性的影响

丁灿培, 袁鸽成, 郭海斌, 袁潜, 杜红  
广东工业大学材料与能源学院

采用光学显微镜 (OM), 透射电子显微镜 (TEM), 电子背散射衍射 (EBSD) 和单轴拉伸测试等分析方法, 研究了织构、晶界及第二相等微结构对 3003 铝合金铸轧-冷轧带力学性能各向异性的影响。结果表明, 铸轧-冷轧带轧向 (RD)、45° 方向 (AD)、横向 (TD) 的屈服强度分别为 154.83、139.48、166.45 MPa, 各向异性指数 (IPA) 达 11.59; 铸轧-冷轧带主要含  $S\{123\}\langle 634 \rangle$ 、 $Copper\{112\}\langle 111 \rangle$  等织构, 经 Schmid 因子加权计算法估算的该织构组态应引起 RD 强度最高, AD 次之, TD 最小; 沿轧向的带状晶粒导致 RD 晶界密度高于 AD 及 TD 晶界密度而引起 RD 晶界强化效果最大, AD 次之, TD 最小; 棒状第二相及其沿 RD 分布是引起 TD 强度最高的原因。织构、晶界及第二相的共同作用导致了该铸轧-冷轧带的力学各向异性特征。

关键词: 铸轧-冷轧带, 各向异性, 织构, 晶界, 第二相

## C02-PO-23

### 界面合金元素梯度对铝合金扩散连接界面组织及连接强度的影响

吴凡<sup>1,2</sup>, 周文龙<sup>1</sup>, 韩玉杰<sup>2</sup>, 侯红亮<sup>2</sup>

1. 大连理工大学  
2. 中国航空制造技术研究院

通过对开展相同参数下同种或异种铝合金之间的扩散连接实验, 研究界面合金元素梯度对铝合金扩散连接界面组织和连接强度的影响。实验在温度 460-520 °C 之间, 6 MPa 压力下保温 60 min 的真空环境下进行, 实验完成后, 利用扫描电镜结合能谱对接头区域的界面组织和合金元素分布进行研究, 采用拉伸-剪切强度测试方法和绝对强度来评价界面的结合强度。结果表明: 无论是否存在界面合金元素梯度, 接头组织完整性和连接强度都随温度升高发生了明显的改善。与 1420-1420 和 7B04-7B04 扩散偶相比, 在相同的扩散连接条件下, 1420-7B04 扩散偶获得了更好的界面完整性和更高的连接强度, 在 520 °C/6 MPa/60 min 扩散条件下, 得到了最高的剪切强度, 剪切强度值为 188 MPa, 绝对强度达到 1420 母材的 90%。实验结果表明, 界面合金元素梯度是通过增加通过界面的合金元素扩散通量来提高扩散连接的接头质量, 同时, 合金元素扩散过程中在界面区域形成了一层具有一定厚度的扩散影响区, 在 520 °C/6 MPa/60 min 下, 扩散影响区的厚度可达 220  $\mu\text{m}$ 。合金

元素扩散及其对界面组织和性能的影响在本文中进行了详细的研究。

关键词：铝合金，扩散连接，界面组织，连接强度，合金元素扩散

#### **C02-PO-24**

##### **Effect of Ni addition on microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Si-Cu-Zn Alloy with a high Mg/Si ratio**

Gaojie Li<sup>a</sup>, Mingxing Guo<sup>a\*</sup>, Yu Wang<sup>a</sup>, Caihui Zheng<sup>a</sup>, Jishan Zhang<sup>a</sup>, Linzhong Zhuang<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, PR China

<sup>b</sup>Tata Steel, 1970 CA IJmuiden, The Netherlands.

Effect of Ni addition (0.03 wt.%) on the as-cast microstructure, phase transformation of iron-rich phases and mechanical properties of the Al-Mg-Si-Cu-Zn alloys was systematically studied by a combination of SEM and EDS analysis as well as tensile tests. It reveals that that Ni addition could give a significant effect on the as-cast microstructure and phase transformation of iron-rich phases during homogenization treatment. The number of spherical iron-rich phase particles within grain increases by adding Zn, accompanied with the formation of Q precipitates around spherical iron-rich phases. Additionally, Ni addition is beneficial to reduce the grain size in the as-cast condition. During the following homogenization process, Q phase could be completely dissolved, and the grain size basically keeps the same as that in the as-cast condition. However, it is worth noting that compared to the Ni-free alloy, the iron-rich phase in the Ni-containing alloy is more likely to occur the phase transformation and further form much more spherical particles during homogenization treatment. After thermomechanical processing, the distribution of iron-rich phases in the Ni-containing alloy was further greatly improved and directly results in the higher formability (i.e.,  $r=0.633$ ,  $\Delta r=-0.1295$ ) compared to that (i.e.,  $r=0.627$ ,  $\Delta r=-0.04$ ) of Ni-free alloy. Accordingly, a reasonable Ni addition gives a positive effect on the microstructure and formability of Al-Mg-Si-Cu-Zn alloys.

Key words: Al-Mg-Si-Cu-Zn Alloy, Ni addition; Iron-rich, Phase transformation, Formability

#### **C02-PO-25**

##### **Influence of Ni contents on the iron-rich phases evolution and formability of Al-Mg-Si-Cu-Fe-Mn alloys**

Bo Yuan<sup>a</sup>, Mingxing Guo<sup>a\*</sup>, Yu Wang<sup>a</sup>, Jishan Zhang<sup>a</sup>, Linzhong Zhuang<sup>a,b\*</sup>

<sup>a</sup>State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, PR China

<sup>b</sup>Tata Steel, 1970 CA IJmuiden, The Netherlands.

Although Al-Mg-Si-Cu alloys have been widely used in automotive fields, their formability and final strengths still need to be further improved compared to steels, which are the major obstacles to wide-scale application. In this study, the influence of Ni contents on the microstructure evolution and formability of Al-Mg-Si-Cu-Fe-Mn alloys was systematically studied using microstructure characterization and mechanical property testing. The results reveal that with increasing Ni contents, the number density of spheroidized iron-rich phases of the alloys in the homogenization condition is increased due to the improved phase transformation kinetics of iron-rich phases. After thermomechanical processing, the homogenous distribution level of iron-rich phases in the final cold rolled Ni-containing alloys is also much higher than that of Ni-free alloy, which is an important microstructure characteristic for the alloys with a high formability. If the alloys are solution treated and followed by pre-aging at a low temperature, the tensile fracture behaviors of the pre-aged alloys is greatly dependent on the morphology and distribution of iron-rich phases, even ductile fracture is still the main fracture mode for all alloys, the size and depth of dimples change with the change of Ni contents due to the different distribution of iron-rich phases. Finally, the average plastic strain ratio  $r$  of Ni containing alloys in the pre-aging state can exceed 0.7, and an appropriate Ni addition also give a positive effect on the bendability of the Al-Mg-Si-Cu-Fe-Mn alloys.

Key words: Al-Mg-Si-Cu-Fe-Mn alloys, Ni addition, Microstructure, Fracture behavior, Formability

#### **C02-PO-26**

##### **Influence of Si contents on the microstructural evolution and mechanical properties of Al-Mg-Si-Cu-Zn alloys**

Liang Zhu<sup>1</sup>, Mingxing Guo<sup>1,\*</sup>, Jishan Zhang<sup>1,\*</sup>, Gaojie Li<sup>1</sup>, Yu Wang<sup>1</sup>, Linzhong Zhuang<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 10083, PR China
2. Tata steel, 1970 CA Ijmuiden, The Netherlands

The effect of different Si contents on the microstructural evolution and mechanical properties of Al-Mg-Si-Cu-Zn alloys was systematic investigated using tensile testing, optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray energy dispersive spectrometers (EDS). The results show that with increasing Si content, the grain size of as-cast alloys is gradually reduced due to the formation of much more iron-rich phases and precipitates during the casting process. During homogenization treatment, the platelike  $\beta$ -AlFeSi intermetallic phase in the alloy with a higher Si content easily transform to a spheroidised  $\alpha$ -Al(FeMn)Si phase which is more favorable for improving formability. The microstructure evolution of the alloys during thermomechanical processing is also greatly dependent on the Si contents, both the number density and homogeneous distribution level of precipitates in the final cold rolled alloys increase with increasing Si content, which further gives a positive effect on the formation of fine recrystallization grains during the following solution treatment. As a result, the yield strength, ultimate tensile strength and elongation of the pre-aged alloys in the direction of  $45^\circ$  with respect to the rolling direction are all increased with increasing Si content.

Key words: Al-Mg-Si-Cu-Zn alloy; Mg/Si ratio; Microstructure evolution; Mechanical property

### C02-PO-27

#### La、Ce 混合稀土对 6201 铝合金的微观组织和性能研究

夏昌鹏, 冷金凤\*, 王康, 王冉

济南大学材料科学与工程学院, 南辛庄西路336号, 济南 250022

6201 铝镁硅合金具有良好的电学性能和力学性能, 是导电线材的优良载体材。同时, 6201 电工铝合金的性能也存在欠缺, 例如铸件中存在铸坯开裂和轧制断杆等较为严重的问题。本文立足于当前电力架空铝导线的发展趋势, 研究了 La、Ce 1:1 混合稀土对 6201 铝合金中的力学性能和导电性能的影响。结果表明 La、Ce 稀土元素能够细化合金晶粒, 当 Ce 的添加量为 0.3% 时, 细化效果最明显。添加稀土元素后的 6201 复合材料晶界处的析出物增多, 通过 X 射线衍射对物相进行分析, 证实析出物为 CeSi、CeFe<sub>2</sub> 等强化相, 起到了净化杂质的作用。时效硬化曲线可以看出, 随着时效时间的延长, 复合材料的硬度先升高后降低, 并且温度越高, 到达峰时效的时间缩短, 添加量为 0.3% Ce 的 6201 铝基复合材料的时效最佳温度在 180 °C/8 h, 硬度为 95.78 HB, 较铸态铝合金提高了 47.9%。相对于无稀土添加的 6201 合金, 稀土添加量为 0.5% 的试样塑性提高最多, 伸长率提高了 21.7%, 断面收缩率达到了 37.2%, 相对于无稀土添加的 6201 铝合金 24.3% 的断面收缩率提高了 53.1%。

关键词: Al-Mg-Si 系铝合金, 混合稀土, 挤压制造, 力学性能, 导电性能

### C02-PO-28

#### ZL102 新能源汽车电池包箱体的显微组织与力学性能分析

徐文治, 程永奇

广东工业大学 (大学城校区)

对以 ZL102 为材料, 采用低压铸造工艺生产的新能源汽车铝合金电池包箱体进行显微组织与力学性能分析。在金相实验与 XRD 物相分析结果中观察到存在较大的块状初晶硅与片状或针状共晶相, 严重割裂基体; 在冲击实验与拉伸实验测试中, 测得力学性能数据与显微组织观测结果相印证。初步结果表明: ZL102 箱体的显微组织存在粗大的初晶 Si 相与共晶  $\langle\alpha$  (Al) + Si $\rangle$  相、对力学性能有不利影响。后续进行不同温度条件下 T6 处理, 对比前后实验结果发现, 经过 T6 处理的 ZL102 箱体, 显微组织得到一定改善, 力学性能有小幅提升。

关键词: 电池包箱体, ZL102, 低压铸造, 显微组织, 力学性能