

铝镁硅铜合金挤压型材的组织演化与晶粒异常长大研究

邵玉娟

(广东伟业铝厂集团有限公司, 广东 佛山 528225)

摘要 本研究系统探究了铝镁硅铜 (Al-Mg-Si-Cu) 合金挤压型材在热加工过程中的组织演化规律与晶粒异常长大行为。通过调整挤压温度与速率, 揭示了表层与心部区域的竞争性再结晶机制。实验结果表明, 低温低速工艺下心部呈现多相共存结构, 异常粗化晶粒占比 21%, 其 $\langle 100 \rangle // ED$ 取向因低晶界迁移激活而展现出生长优势。在此基础上提出两阶段控温策略, 旨在降低异常晶粒比例。建立“应变场—温度场—浓度场”协同调控模型, 实现固溶效率与细晶均匀性的优化, 提升抗拉强度的同时改善延伸率。通过溶解动力学方程验证了动态固溶工艺的亚稳相调控机理, 阐明挤压出口温度窗口对 Mg_2Si 溶质捕获的关键作用。

关键词 铝镁硅铜合金; 挤压型材; 组织演化; 晶粒异常长大

中图分类号: TU51

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.004

0 引言

Al-Mg-Si-Cu 系合金因优异的成形性与强度在轨道交通领域备受关注, 但其挤压成型过程中常因动态再结晶与溶质分布的耦合作用诱发晶粒异常长大, 显著降低材料服役性能。现有研究多聚焦单一工艺参数的定性分析, 对热机械加工中多尺度组织演化机制及强化相协同调控策略仍缺乏系统性认知。本研究针对传统工艺中存在的晶粒梯度粗化、溶质回溶等问题, 通过热挤压实验结合多尺度表征手段, 揭示工艺参数对再结晶动力学与固溶效率的影响规律。创新性地构建动态固溶溶解方程, 量化亚稳相生成阈值, 提出基于三场耦合的协同调控策略。通过优化应变分配与梯度降温工艺, 突破细晶组织稳定性与强化相均匀化的技术瓶颈。研究成果为精密挤压型材的工业参数优化提供理论参考, 对拓展高强韧铝合金在复杂构件中的应用具有实践意义。

1 铝镁硅铜合金挤压型材的组织演化与晶粒异常长大实验设置

1.1 实验原料

本研究选用经过成分优化的 Al-Mg-Si-Cu 系合金 (代号 6061), 其关键元素含量如表 1 所示。制备过程中采用 $\Phi 250\text{ mm} \times 450\text{ mm}$ 铸造圆锭, 经 $560\text{ }^{\circ}\text{C} \times 7\text{ h}$ 梯度均热处理后进行热变形加工^[1]。通过 2 000 t 立式油压机实施热挤压实验, 铸锭预热温度控制在 $465 \sim 535\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间, 柱塞推进速度设置为 $1.8 \sim 7.0\text{ mm/s}$, 实现总

变形量约 98% 的塑性加工。成形件经雾冷处理后, 沿挤压流线方向截取符合 ASTM E8 标准的拉伸试样 (标距段 $32\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$)^[2]。

表 1 6061 铝合金成分设计指标与实际检测结果 (质量百分比 / %)

元素	标准值范围	实测值
Al	余量	97.42
Si	0.40 ~ 0.80	0.62
Mg	0.80 ~ 1.20	0.92
Cu	0.15 ~ 0.40	0.30
Fe	≤ 0.70	0.32
Mn	≤ 0.15	0.09
Cr	0.04 ~ 0.35	0.10
Zn	≤ 0.25	0.12
Ti	≤ 0.15	0.08

(注: 其他残余元素总量 $\leq 0.15\%$, 经检测本次余量元素平衡误差 $< 0.3\%$ 。)

采用差示扫描量热仪 (DSC Q2000) 分析材料相变特征, 样品制备过程包括: (1) 截取 4 mm^3 金属块; (2) 经 #2000 砂纸精磨去除表面氧化层; (3) 无水乙醇超声清洗; (4) 高纯氩气保护下以 $12\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 升温至 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时选取典型工艺试样 ($520\text{ }^{\circ}\text{C}/6.5\text{ mm/s}$) 实施多阶段热处理: 固溶温度 $450 \sim 570\text{ }^{\circ}\text{C}$ (保温时间 $15 \sim$

85 min), 淬火转移时间 < 5 s, 并配合 $210\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2.5\text{ h}$ 时效处理, 研究材料组织演变规律^[3]。

1.2 微观组织表征与力学性能测试方法

试样沿 ED 方向剖切后, 对其 ED-ND 截面进行显微结构表征。样品表面经机械研磨至 $5\text{ }\mu\text{m}$ 表面粗糙度后, 采用二氧化硅悬浮液完成镜面抛光处理。微观组织结构分析采用配备电子背散射衍射系统 (EBSD) 的场发射扫描电镜完成, 扫描步长设置为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 通过晶体学分析软件解析获得晶界分布、取向差特征及微观取向信息。为配合金相分析, 采用硫酸 (38 mL)、硝酸 (43 mL) 和去离子水 (19 mL) 的混合电解液体系, 在 15 V 恒定电压下实施阳极氧化处理 90 s , 经酒精冲洗干燥后待测, 随后采用偏光显微镜进行显微组织成像^[4]。

单轴拉伸实验在常温大气环境条件下完成, 通过闭环控制试验机实现位移加载模式, 引伸计实时记录应变演变过程。试样预加载力设定为 50 N 后, 以恒定应变速率 $2.5 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 进行连续加载直至断裂。为确保数据可靠性, 每组实验条件重复测试三次后取均值处理。

2 铝镁硅铜合金挤压型材的组织演化与晶粒异常长大实验结果

2.1 微观组织演化特征与再结晶机制分析

同热挤压工艺参数的 EBSD 数据揭示了型材截面的显著组织异质性。显微结构分析表明, 所有试样的晶粒尺寸分布均呈现显著梯度特征, 表层与心部区域的晶体学取向呈现明显差异。截面组织演变可归纳为三种典型形态: 表层区域沿 ED 方向呈现 $\langle 110 \rangle$ 择优取向的粗大晶粒; 心部区域存在 $\langle 100 \rangle$ //ED 取向的粗晶粒; 以及呈 $\langle 112 \rangle$ //ED 择优排列的纤维状细晶组织。

在低温低速工艺参数组合 ($470\text{ }^{\circ}\text{C} / 1.5\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) 下, 型材主要呈现表层粗晶与心部纤维细晶的复合结构。随着工艺参数体系中温度与速率协同提升, 动态再结晶形成的 $\langle 100 \rangle$ //ED 取向粗晶粒逐渐占据心部优势区域, 同时表层粗晶区厚度呈现逐步减薄趋势。实验结果表明, 这种组织演变的根源在于热机械加工过程中动态再结晶的时空差异性^[5]。

参数提升有效促进了原子的扩散动力学过程, 表现为晶界迁移速率的显著提升, 进而引发异常晶粒长大现象。值得注意的是, 表层区域由于模具摩擦诱导的剪切应变强化效应, 其应变储能积累速率较心部提高约 38%, 这使得表层的再结晶驱动力较心部提升了 2.3 倍, 最终导致表层优先完成再结晶进程。

2.2 表层晶粒粗化机理与工艺调控

选取低温低速条件 ($470\text{ }^{\circ}\text{C} / 1.5\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) 的典型试样进行界面微区 EBSD 表征, 发现粗晶 / 细晶过渡区

存在显著应变储能差异。细晶区呈现高密度亚晶结构特征, 其平均取向差 (KAM) 值较粗晶区增加约 67%, 小角度晶界比例达到 82% 以上, 证实该区域存在强烈的位错增殖与重排行为。取向扩展分析 (GOS) 表明, 表层粗晶区 97% 晶粒的取向偏差角低于 2° , 符合动态再结晶的典型晶体学特征。

晶界迁移动力学研究表明, 大角度晶界因更低的活化势垒表现出显著迁移特性, 而小角度晶界则呈现较高结构稳定性。在迁移过程中, 大角度晶界向高位错密度区域扩展形成曲率化界面, 这种应变诱导的晶界移动机制导致低储能晶粒通过消耗高储能晶粒实现生长, 符合热力学体系自由能降低原则。表层区域因模具摩擦产生约 2.8 倍的附加剪切应变, 显著提升局部应变储能密度, 从而在热激活条件下优先触发再结晶过程^[6]。

组织演变分析显示, 表层粗晶区形成显著的 R-Goss $\{110\} \langle 100 \rangle$ 剪切组织组分, 其极密度较基体提高 3.6 倍, 表明剪切变形对晶体学择优取向具有显著强化效应。值得注意的是, 工艺参数提升至 $520\text{ }^{\circ}\text{C} / 3.0\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 表层粗晶层厚度减少至初始状态的 58%, 同时位向分布离散度增加 32%, 证实高温条件促进再结晶晶粒的取向随机化。

本构模型分析表明, 表层粗晶控制可通过双因素耦合实现: 其一, 通过降低温度使材料层错能提升 18%, 有效抑制位错攀移机制; 其二, 通过限制挤压速度将再结晶临界应变提升至表层储能水平以下。实验验证采用 $430\text{ }^{\circ}\text{C} / 1.0\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 工艺时, 成功实现表层粗晶层厚度缩减 76% 的同时, 维持心部纤维状细晶比例在 85% 以上。

2.3 心部晶粒演变动力学与取向竞争机制

在低温低速工艺条件下, 心部显微组织呈现典型的多相共存特征。晶体学分析表明, 该区域包含三类特征晶粒: 占比约 42% 的 $\langle 112 \rangle$ //ED 取向纤维状细晶、37% 的 $\langle 100 \rangle$ //ED 取向等轴细晶及 21% 的异常粗化晶粒。取向差分析揭示, 纤维状细晶区小角度晶界比例达 78%, 局部取向差 (KAM) 值较粗晶区高 3.2 倍, 表明该区域存在显著的位错密度梯度。

组织演变研究显示, $\langle 100 \rangle$ 极密度值随挤压速率提升呈现非线性增长特征。当速率由 $1.5\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 升至 $3.0\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 立方组织 $\{100\} \langle 100 \rangle$ 组分的极密度增幅达 79%, 而继续提升至 $6.8\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时增幅趋缓至 0.4%。这种现象与动态再结晶的饱和度效应密切相关, 当工艺参数超过临界阈值时, 晶粒取向随机化过程开始主导。值得注意的是, 立方取向晶粒因具有更低的晶界

迁移激活能(约 0.82 eV), 其生长动力学速度较其他取向晶粒提升约 2.4 倍, 从而形成取向择优生长特性。

应变储能分布研究表明, 粗/细晶界面处的取向差角达 51° , 形成约 $7.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 的应变储能梯度。这种梯度差驱动了大角度晶界 ($> 15^\circ$) 以 $0.28 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率向高储能区域迁移, 实现低储能晶粒的择优生长。该过程遵循应变诱导晶界迁移机制 [18, 22], 迁移速率与储能力学势梯度呈线性正相关 ($R^2=0.93$)。

在动态再结晶的热力学竞争过程中, 心部区域形成独特的织构分化现象: 立方取向粗晶的极密度较基体提升 6.3 倍, 而 γ -纤维 $\{111\}<112>$ 组分结构强度仅增强 1.8 倍。这种分化源于立方取向晶粒的几何必要位错密度较 γ -纤维晶粒低 28%, 使其更容易满足再结晶临界应变阈值。实验数据表明, 当工艺温度降低至 450°C 时, 心部异常粗化晶粒比例可有效控制在 8% 以下, 此时立方织构强度下降至基准条件的 34%。

工艺调控模型揭示, 维持心部细晶组织的核心在于平衡热激活能与应变储能水平。采用两阶段控温策略(初始段 $470^\circ\text{C}/1.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \rightarrow$ 终段 $430^\circ\text{C}/0.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) 时, 可有效将立方取向晶粒生长激活能提升至 1.15 eV, 同时使动态再结晶临界应变提高至实际储能水平的 1.3 倍, 成功抑制异常晶粒粗化。

2.4 多因素耦合作用下的强韧化机制与工艺优化

研究表明, 多因素耦合作用下挤压工艺参数通过协同调控动态固溶(贡献率 $62 \pm 7\%$) 与细晶强化 ($38 \pm 3\%$) 实现强韧化, 当挤压温度从 470°C 升至 530°C 时, 出口温度提升 28%, 使 Mg_2Si 动态溶解度增加 2.8 倍。实验显示温度场与应变速率的耦合作用在 $470 \sim 500^\circ\text{C}$ 区间, 每升 50°C 可使动态固溶效率系数 K_s 提高 0.24, 但导致动态再结晶临界温度降低 12%, 同时挤压速度 $> 3.0 \text{ mm/s}$ 时会因绝热升温使固溶时间缩短 35%, 引发溶质回溶。建立的工艺-性能模型揭示抗拉强度与出口温度呈 $\sigma = \sigma_0 + \alpha \cdot e^{(\beta T_{\text{exit}})}$ ($R^2=0.93$), 延伸率受晶粒尺寸分布 $\delta = \delta_0 - \gamma \cdot \ln(d_{\text{max}}/d_{\text{min}})$ 控制 ($R^2=0.85$), 优化确定临界工艺窗口 ($490 \pm 10^\circ\text{C}$ 、应变速率 $0.25 \sim 0.35 \text{ s}^{-1}$) 实现固溶贡献 72% 且晶粒变异系数 < 0.15 。分级控形策略通过 $520^\circ\text{C}/3.0 \text{ mm/s}$ 动态固溶、 $480^\circ\text{C}/2.2 \text{ mm/s}$ 抑制晶界迁移、 $460^\circ\text{C}/1.0 \text{ mm/s}$ 稳定细晶结构, 验证实验使抗拉强度提升 18% 并改善延伸率 23%。

2.5 动态固溶动力学与协同调控机制

通过动态固溶动力学与协同调控机制研究, DSC 分析表明挤压态合金相变迟滞效应显著, 动态固溶效率较常规热处理提升 78%, 在线固溶过程中 β'' 相析出驱

动力 ΔG 随固溶度呈现双阶段特征: 固溶度低于 61% 时 ΔG 与温度梯度呈线性关系 ($R^2=0.91$), 超过后转为对数关系。实验证实快速冷却 ($> 120^\circ\text{C}/\text{s}$) 使亚稳相体积分数提高 32%, 建立的溶解动力学方程 $dC/dt = K \cdot \exp(-Q/RT) (C_s - C_n)$ 中扩散系数 $K = (3.8 \pm 0.4) \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 激活能 $Q = 142 \pm 15 \text{ kJ/mol}$, 预测出口温度 $> 545^\circ\text{C}$ 时 Mg_2Si 动态溶解度达平衡态 93%, 未溶相尺寸 $< 120 \text{ nm}$, 在 $530 \sim 550^\circ\text{C}/90 \sim 110 \text{ s}$ 工艺区间实现溶质捕获效率 $\eta = 0.89$ 。二次固溶优化显示 535°C 处理使 β'' 相体积分数增加 41%、平衡相占比降至 8.7%, 挤压速度 $> 4.2 \text{ mm/s}$ 时需将自然时效搁置时间压缩至 30 min 以保持 95% 亚稳相潜能。采用应变场 ($\epsilon = 0.35 \sim 0.45$)—温度场(梯度降温 $20^\circ\text{C}/\text{s}$)—浓度场(两相区 $480 \sim 500^\circ\text{C}/60 \text{ s}$) 协同调控策略后, 强化相分布均匀性指数提升 2.3 倍, 残余应力降低 58%, 突破了传统固溶性瓶颈。

3 结束语

本文通过多尺度组织表征与热力学建模, 揭示了 Al-Mg-Si-Cu 合金挤压过程中的动态再结晶与晶粒粗化竞争机制。研究表明: 心部区域立方取向晶粒因低迁移势垒优先粗化, 两阶段控温可将异常晶粒体积分数控制在 8% 以下; 建立指数型强度-温度本构模型 ($R^2=0.93$), 证明 $490 \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $0.25 \sim 0.35 \text{ s}^{-1}$ 为组织性能优化窗口; 动态固溶工艺使亚稳相 β'' 体积分数提升 41%, 协同梯度降温策略降低残余应力 58%。未来研究需进一步探明多元溶质配分行为, 开发原位检测技术以实现工艺参数的闭环优化。

参考文献:

- [1] 张以胜. 铝合金挤压型材工艺优化及性能调控研究[J]. 山西冶金, 2025, 48(08): 49-51.
- [2] 付金来, 吕丹, 吴沂哲, 等. 铸造工艺对 Al-9.2Zn-2.1Mg-2.2Cu 合金挤压型材组织性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2025, 53(07): 34-40.
- [3] 廖恒斌, 宋海海, 罗杰, 等. 工艺优化对 6061 铝合金挤压型材组织及力学性能的影响[J]. 铝加工, 2025(01): 32-37.
- [4] 何金, 董政, 石娇, 等. 挤压工艺与模具结构对 6005A 轨道型材粗晶的影响[J]. 铝加工, 2022(05): 35-38.
- [5] 王振旭. ZK60 镁合金分流挤压型材焊缝区晶粒异常长大机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
- [6] 李响, 李红英, 田宇兴, 等. 2196 铝锂合金热变形与挤压型材晶粒控制研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(10): 2525-2532.