

机械切屑诱发的局部冷铁效应 与富铁相选择性析出机理

覃皓¹, 李越¹, 唐鹏²

(1. 广西壮族自治区产品质量检验研究院, 广西南宁 530007;

2. 广西大学资源环境与材料学院, 广西南宁 530004)

摘要: 以Al-12Si-Fe合金为基体, 添加不同质量分数(0~3%)的机械切屑, 构建“局部冷铁-异质形核”耦合作用场, 系统研究其对凝固组织与力学性能的影响。结果表明: 切屑过少($\leq 1.5\%$)时, 仅产生局部激冷与溶质偏聚, 共晶/初晶Si粗化; 掺量适量(2.5%)时, 切屑表面氧化膜与杂质团簇可显著提高形核密度, 促进等轴晶形成, 抑制富铁相宏观偏聚, 改善组织均匀性与强韧性; 过量(3.0%)则因界面融合润湿性差成为裂纹源。加入2.5%切屑后, 合金抗拉强度由约181 MPa提升至约213 MPa, 伸长率由约4.5%提高至约6.4%。从临界形核功、二次枝晶臂间距与柱状-等轴转变(CET)条件出发, 建立了“切屑掺量-有效过冷度-等轴晶密度”的定量关系, 提出了最优工艺参数窗口, 为再生Al-Si-Fe合金的组织调控与废铝高值化再生利用提供了新途径。

关键词: 机械切屑; 冷铁效应; 富铁相; 柱-等轴转变(CET); 异质形核

中图分类号: TG244; TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977(2026)08-0877-08

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0113

Mechanisms of Local Chill Effect Induced by Cutting Chips and Selective Precipitation of Fe-Rich Phases

QIN Hao¹, LI Yue¹, TANG Peng²

(1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Testing Institute of Product Quality Inspection, Nanning 530007, Guangxi, China; 2. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: Taking the Al-12Si-Fe alloy as the matrix and charging the cutting chips with different mass fractions (0-3%) to establish a coupled effect field of local chilling-heterogeneous nucleation, the influence of it on solidification microstructure and mechanical properties was systematically investigated. The results show that with insufficient chip feed ($\leq 1.5\%$), only local chilling and solute segregation occur, leading to coarsening of eutectic/primary Si. With an appropriate amount (2.5%), oxide films and impurity clusters on the chip surfaces serve as potential nucleation substrates, significantly increasing nucleation density and promoting equiaxed grain formation, suppressing large-scale segregation of Fe-rich phases, thereby improving microstructural homogeneity and toughness. Whereas excessive charging chips (3.0%) act as crack initiation sites due to poor interfacial wetting and fusion. When the chip addition is 2.5%, the tensile strength of the alloy is increased from approximately 181 MPa to 213 MPa and the elongation is increased from approximately 4.5% to 6.4%. Furthermore, based on critical nucleation work, secondary dendrite arm spacing, and columnar-to-equiaxed transition (CET) conditions, a quantitative relationship between “chip addition-effective undercooling-equiaxed grain density” was established and an optimal process parameter window was proposed, providing a new approach for precise microstructure/property control and high-value utilization of recycled Al-Si-Fe alloys.

Key words: cutting chip; chill effect; Fe-rich phase; columnar-to-equiaxed transition (CET); heterogeneous nucleation

铝-硅系铸造合金因其低密度、良好铸造性能和较高的强度重量比, 被广泛应用于汽车、航空航天和电子封装等领域^[1]。然而, 再生循环过程中铁元素会不可

避免地富集, 进而生成 β -Al₅FeSi等富铁相^[2]。这类物相多以长针状或板片状形态分布在晶界位置, 易造成应力集中并促使裂纹扩展, 大幅降低合金的力学性能

基金项目: 国家自然科学基金(52261024); 广西自然科学基金(2025GXNSFAA069657, 2023GXNSFAA026374)。

收稿日期: 2026-03-19 收到初稿, 2026-05-18 收到修订稿。

作者简介: 覃皓(1981-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为金属材料。E-mail: qinhao202303@163.com

通信作者: 李越, 女, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为机械电气。E-mail: rxgxly@163.com;

唐鹏, 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为铝熔体处理及其凝固组织调控。E-mail: tp@gxu.edu.cn

引用格式: 覃皓, 李越, 唐鹏. 机械切屑诱发的局部冷铁效应与富铁相选择性析出机理[J]. 铸造, 2026, 75(8): 877-884.

Qin Hao, Li Yue, Tang Peng. Mechanisms of local chill effect induced by cutting chips and selective precipitation of Fe-rich phases [J]. Foundry, 2026, 75(8): 877-884.

与使用稳定性。在不添加锰、铬等高价元素，也不采用复杂工艺的条件下，有效遏制富铁相析出与长大，已是再生铝合金研究领域亟待解决的关键科学与工程难题^[3]。

冷铁效应是通过高热导率、低比热容材料在凝固前沿吸热，形成局部高冷却速率区，从而显著提高过冷度与形核速率的过程^[4]。外部冷铁广泛用于砂型或金属型铸造，能够细化晶粒并改善组织，但其作用范围受几何位置限制，难以在大体积铸件内部实现均匀控制。近年来，学者提出通过引入“内置冷铁”颗粒来在熔体内部创造局部快速冷却环境^[5]。例如，钢针、陶瓷颗粒、废铝屑等均被尝试作为冷铁源。与外部冷铁不同，内置冷铁兼具吸热效应与潜在形核底物作用，在合金凝固组织调控中展现出更高的灵活性与效率。已有研究表明，冷铁效应可以显著降低临界形核能垒并促进柱-等轴转变（CET）的发生，从而改善组织均匀性和力学性能^[6]。此外，快速冷却还能够改变Fe相的形貌选择，使 β 相受到抑制，转而形成更稳定的 α 相或细小颗粒状富铁相^[7]。这一过程对提升再生铝合金的韧性具有重要意义。然而，如何精确控制冷铁颗粒的加入量、分布状态与界面润湿行为，仍缺乏系统的理论模型与试验验证。

机械加工过程中产生的大量铝合金切屑，因其体积小、比表面积大、来源廉价且与基体合金成分相容，成为极具潜力的内置冷铁材料。一方面，切屑在熔体中快速吸热，形成瞬态局部过冷区；另一方面，切屑表面的氧化膜和杂质团簇可作为异质形核底物，降低形核能垒并提高等轴晶密度^[8]。二者耦合作用有望在宏观上细化晶粒、均匀组织，在微观上抑制Fe相粗化，实现强-韧性协同提升。然而，切屑作为内置冷铁存在显著的窗口效应：若加入量过低，冷却与形核作用不足；若过量，则因界面润湿差、未完全熔合及夹杂缺陷而降低材料性能^[9]。因此，明确切屑加入量、几何特征与熔体条件的最优匹配关系，是推动该策略工程化应用的关键。

基于此，本研究提出一种新的思路：利用铝合金机械切屑作为“冷铁”与潜在异质形核核心，在合金熔体凝固过程中调控晶粒生长与富铁相分布，从而改善合金的综合性能。通过试验结果结合热力学与动力学模型，提出“冷铁-形核”耦合作用下的组织演化机制，并构建可检验的无量纲冷铁容量因子模型，以解释最优切屑加入窗口的形成。本研究旨在为再生铝合金的组织与性能精准调控提供理论依据和工艺参考，同时为切屑资源的高值化利用开辟新路径。

1 试验材料与方法

选用工业常用的Al-Si合金作为基体合金。试验原材料包括：纯度 $\geq 99.7\%$ 的铝锭，用作主要基体元素；硅块为工业冶金级，含量 $\geq 99.5\%$ ，用于调节合金硅含量（如无特别说明，文中所述含量均为质量分数）；机械切屑取自同等成分的铝合金加工废料，切屑呈带状或片状，厚度约50~150 μm ，长宽尺寸均为毫米级，属于典型的非连续切屑。表面覆盖有天然氧化膜，其主要成分为致密的非晶态 Al_2O_3 薄膜。为确保试验一致性，切屑在加入前经清洗、干燥和筛分处理，保证尺寸范围相对均一；中间合金：Al-Fe、Al-Mn等合金块，用于补充和调整Fe、Mn等元素含量，使试验合金成分稳定在目标区间。通过化学成分分析确认，合金整体成分符合设计要求，满足研究机械切屑诱发冷铁效应与富铁相选择析出的目的。不同试验组通过改变切屑加入量（0~3%）进行对比，其配比如表1所示。

表1 试验样品编号及材料配比

Tab. 1 Test specimen numbering and material compositions

样品编号	机械碎屑含量/%	工业纯铝含量/%	Al-12Si-Fe合金质量/g
1 [#]	0	6	400
2 [#]	1.0	6	400
3 [#]	1.5	6	400
4 [#]	2.5	6	400
5 [#]	3.0	6	400

在电阻炉中进行熔炼，流程如下：将铝锭置于石墨坩埚中，于750~760 $^{\circ}\text{C}$ 熔化；待铝液完全熔化后，依次加入硅块及中间合金，充分搅拌以确保溶解与成分均匀。随后采用精炼剂进行除气与除渣处理，以降低氢含量和夹杂物含量；在合金成分稳定后，于730~740 $^{\circ}\text{C}$ 将处理后的机械切屑以不同质量分数（0、1.0%、1.5%、2.5%、3.0%）逐批投入铝液中，并缓慢搅拌1~2 min，以促进其均匀分散和与熔体的接触；在720 $^{\circ}\text{C}$ 左右将熔体浇注至金属模中。金属模预热至200 $^{\circ}\text{C}$ ，以保证成形质量并降低热裂风险。

铸锭沿中心截取样品，经磨制、抛光和腐蚀处理（使用0.5% HF水溶液）后进行显微组织观察；力学性能测试方面，采用液压式拉伸试验机，试样尺寸依据ASTM E8M-04标准制备。每组样品进行三次拉伸试验，取算术平均值作为抗拉强度（ σ_b ）和伸长率（ δ ）的最终结果。硬度测试采用显微维氏硬度计（设备标称载荷0.3 kgf，保持15 s），每个样品测试5点并取平均值。金相组织制备过程中，样品经逐级砂纸打磨与抛光后，使用0.5% HF溶液腐蚀。组织观察采用

金相显微镜, 晶粒形貌分析结合扫描电镜 (SEM)。物相组成通过X射线衍射 (XRD) 分析, 测试条件为Cu-K α 辐射, 电流40 mA, 电压40 kV, 扫描角度20°~120°, 扫描速率1.2 (°)/min。微区元素分布通过能谱 (EDS) 分析获得。

2 试验结果

2.1 微观组织的变化规律

不同切屑含量下Al-Si-Fe合金的金相组织演变规律如图1所示。在未加入切屑的样品中, 共晶硅主要以粗大针片状形貌分布, 平均尺寸约20~40 μm , 呈零散状分布于基体中。这类粗大硅相不仅造成组织不均匀, 还容易在其尖角处引发应力集中, 是潜在的裂纹萌生源^[10]。当切屑含量为1.0%时, 冷铁颗粒进入过热熔体后迅速吸热, 产生局部激冷作用。在这种条件下, 熔体中过冷度增加, 促进硅原子长程扩散, 但同时也造成局部硅原子偏聚。由此, 共晶硅出现粗化和不均匀聚集, 显微组织并未得到明显细化, 反而形成粗大团簇。随着切屑含量增加至1.5%, 组织中析出了大量过

共晶硅, 相形貌呈现粗大的多边形板片状^[11]。此时初晶硅数量明显增多, 且在基体中集中分布。虽然这在一定程度上改变了针状硅的分布, 但粗大的板片状结构反而降低了组织的均匀性。当切屑含量达到2.5%时, 组织演变趋势发生显著变化。冷铁颗粒数量和分布趋于合理, 其表面氧化物与杂质原子作为异质形核核心, 大量促进了硅相的成核过程^[12]。此时初晶硅呈树枝状或鱼骨状分布, 晶粒显著细化^[13], 组织均匀性明显提高。值得注意的是, Fe元素更多地分布在初晶硅周围, 随着枝晶的生长而逐步扩散^[14], 降低了富铁相的集中析出。当切屑进一步增加至3.0%时, 体系中冷铁颗粒数量过多, 其中部分颗粒未能与熔体充分融合, 导致界面结合不良。这些颗粒在组织中表现为缺陷源, 容易成为裂纹萌生点。此时组织均匀性下降, 细化作用不再增强。总体而言, 组织演化呈现出明显的窗口效应: 随切屑加入量增加, 合金组织呈现出由局部溶质偏聚导致的性能衰减, 到全域形核细化带来的组织优化, 再到未融合缺陷引发的性能恶化的非单调演变规律。

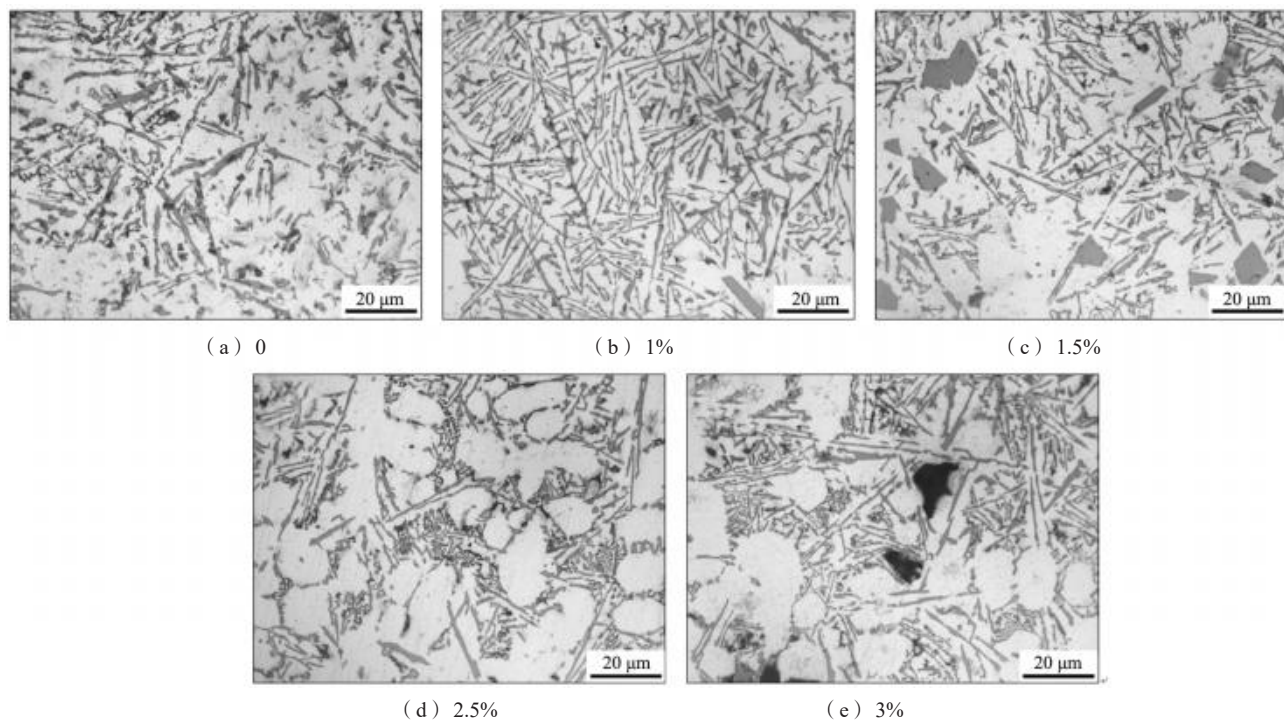


图1 加入不同机械碎屑量试样的金相照片

Fig. 1 Metallographic micrographs of the specimens with varying amounts of added cutting chips

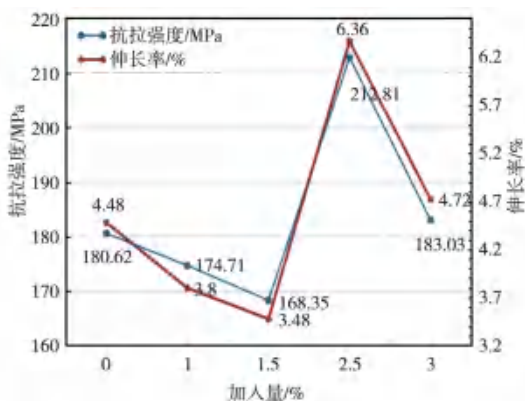
2.2 力学性能的变化趋势

如图2 (a) 所示, 未添加切屑的合金, 其抗拉强度与伸长率分别为180.62 MPa、4.48%。当加入1.0%和1.5%切屑时, 性能均出现下降: 1.5%时抗拉强度降

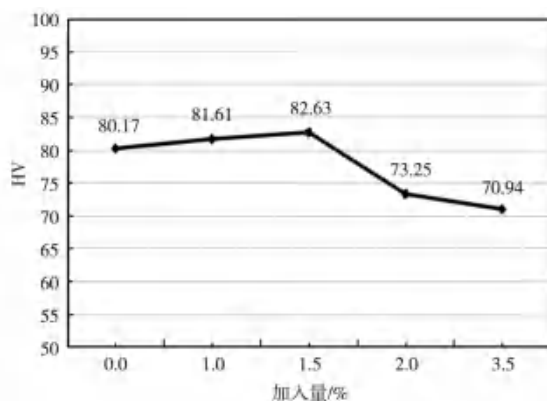
至约174 MPa, 伸长率降至3.2%。这与组织中出现大量粗大的板片状硅相密切相关, 其脆性形貌易导致裂纹早期萌生^[15]。当切屑含量为2.5%时, 力学性能提升最为显著, 抗拉强度和伸长率分别达到212.81 MPa和

6.36%，较原始样品分别提高17.8%和42.0%。这说明在适量冷铁作用下，晶粒细化与Fe分布均匀化显著改善了强度与塑性匹配^[16]。然而，当切屑含量进一步增加至3.0%时，力学性能急剧下降，抗拉强度降至约183 MPa，伸长率仅为3.0%。这表明过量切屑在熔体中

产生缺陷，严重割裂基体，从而抵消了组织细化的优势^[17]。如图2(b)所示，硬度随切屑含量呈“先升后降”趋势：未添加样品的硬度为HV80.17，1.5%时略升至HV82.63，而2.5%和3.0%时则分别下降至HV73.25和HV70.94。



(a) 抗拉强度和伸长率



(b) 显微维氏硬度

图2 加入不同机械碎屑量对合金性能的影响

Fig. 2 Effect of varying amounts of added cutting chips on the properties of the alloy

值得注意的是，合金在2.5%切屑添加量下呈现“强度提升而硬度下降”的反常现象。这主要归因于硬脆相形貌的演变：在0和1.5%样品中，粗大针/片状的硬脆相（初晶硅与富铁相）构成了局部硬质“骨架”，提供了较高的压痕阻力（硬度）。而在2.5%样品中，硬脆相被显著细化并弥散分布，连续骨架被打破，导致宏观硬度下降。然而，正是这种细化作用彻

底消除了粗大相尖角引起的严重应力集中，大幅降低了裂纹敏感性，使铝基体能承受更大的全局应力与形变，最终实现了抗拉强度与伸长率的协同跃升。

拉伸断口如图3所示。拉伸过程中合金主要以初晶硅和共晶硅的穿晶断裂表现出来^[18]，其中块状的富铁相也是穿晶断裂，针状共晶硅和多角形板状的初晶硅在尖角处存在很高的应力，是裂纹的主要发源地。从

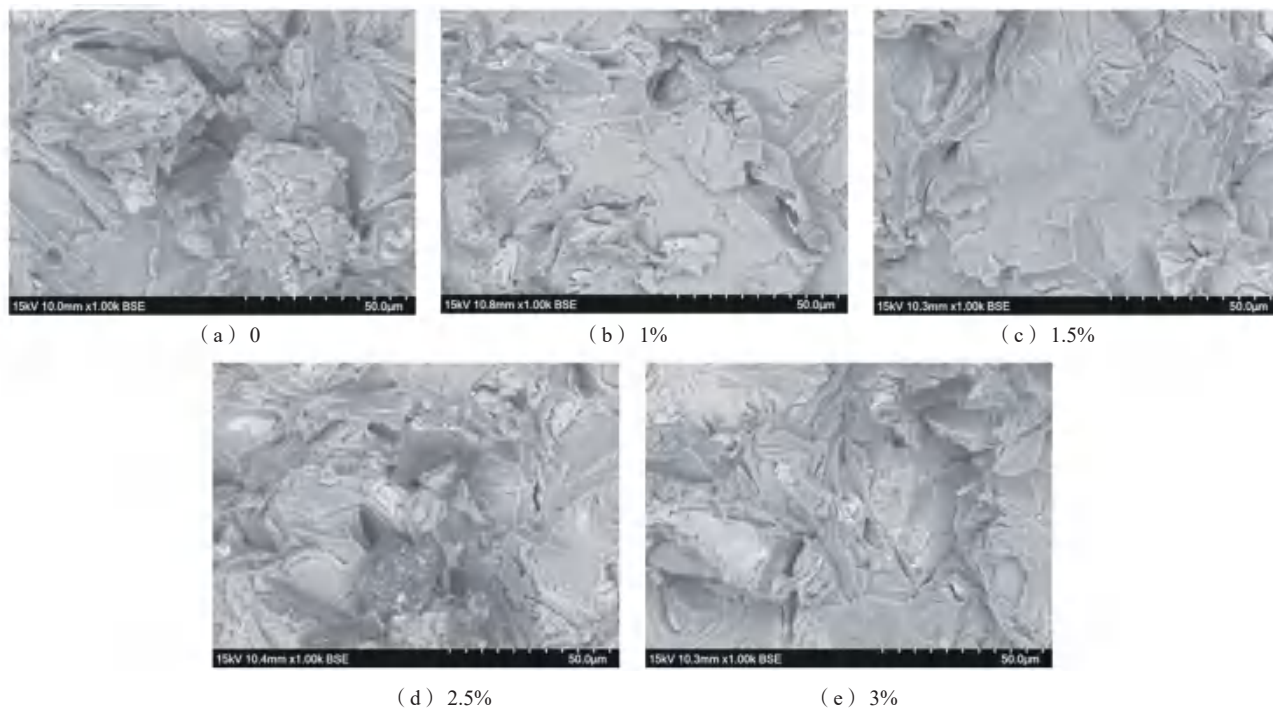


图3 加入不同机械碎屑量试样的断口形貌

Fig. 3 Fracture morphologies of the specimens with varying amounts of added cutting chips

原始样到3#样, 由于初晶硅和共晶硅的偏聚和过共晶铝硅相的析出, 合金的拉伸性能逐步降低, 发生明显的脆性断裂, 解理面和解理台阶变大变多^[19]。在4#样品中, Si和Fe的成分都变得更加均匀, 初晶硅以鱼骨状的形貌生长, 随着初晶硅的生长由于Fe依附在其上, Fe的成分也随之产生均匀化, 富铁相的裂纹主要沿着一次枝晶轴生长^[20], 相应的拉伸力学性能也表现最好。当加入的冷铁颗粒达到3%时, 过量的冷铁颗粒不能与合金形成有效的熔合, 因此过剩的冷铁颗粒周围就会形成裂纹源, 解理面和解理台阶增加, 相应的拉伸力学性能减小^[21]。由此可见, 性能优良样(2.5%)的断口呈现出相对更多的微观塑性变形特征; 性能差样则以解理面与大尺度断口台阶为主, 裂纹多由尖角硅相或未熔合颗粒处萌生。

1#、4#试验样品的XRD衍射图如图4所示, 经过对衍射峰与jade中的标准物相卡片进行比对分析, 发现合金以 α -Al相为基体, 各个主要成分也主要以单质相的形式存在。XRD分析在各组样品中均以 α -Al基体为主, 未检测到新的主族金属相; 但结合SEM-EDS分析, 发现不同样品中Fe的分布特征差异明显: 在未加切屑与低含量组, Fe更易在枝晶间隙与共晶区富集, 促进针状/板片状富铁相(如 β - Al_3FeSi)生长, 表现为长尺度偏聚。在2.5%组, Fe元素更多分布于初晶Si的周围并沿枝晶轴方向细分散, 富铁相以更细小、分散的颗粒或块状相出现, 整体降低了硬脆长针状相的比例。这说明冷铁—异质形核耦合既改变了形核场, 也间接影响了凝固过程中Fe的偏析与相态选择。

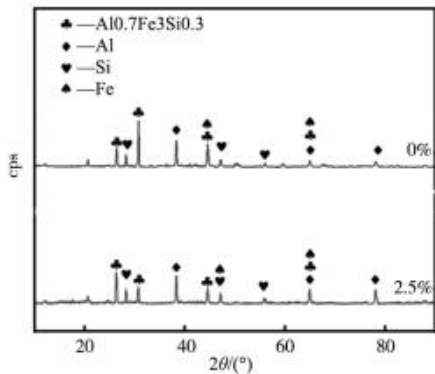


图4 加入不同机械碎屑量试样的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of the specimens with varying amounts of added cutting chips

关于富铁相, 除了存在单质的Fe相外, 还存在一定含量的 $\text{Al}_{0.7}\text{Fe}_3\text{Si}_{0.3}$ 固溶体相, 文献[22]指出, $\text{Al}_{0.7}\text{Fe}_3\text{Si}_{0.3}$ 相在形貌上为块状, 相中Fe的含量高达60%左右, 其质量分数达到基体中 α -Al相的2倍左右, 该相硬度高且脆性强, 对铝基体有严重的割裂作用, 显著降低了铝合金的力学性能^[23]。

3 冷铁效应与富铁相选择性析出机理讨论

本节从热力学与动力学两方面深入讨论“机械切屑—冷铁—异质形核”耦合作用, 力求将定性观察转化为可检验的物理化学机制。

3.1 冷铁效应的热力学与动力学基础

3.1.1 过冷与形核能垒

凝固形核的关键是临界形核自由能, 对于均匀形核有经典表达式(1):

$$\Delta G_{\text{hom}}^* = \frac{16\pi\gamma_{\text{sl}}^3}{3(\Delta G_v)^2} \quad (1)$$

式中: ΔG_{hom}^* 为均匀形核的临界吉布斯自由能变化; γ_{sl} 为固液界面能, ΔG_v 为体相自由能差。

公式(2)是材料凝固热力学中的核心公式, 描述了单位体积的液-固相变自由能差与过冷度的关系。可见, 体相自由能差近似与过冷度 ΔT 成正比:

$$\Delta G_v = \Delta H_f \frac{\Delta T}{T_m} \quad (2)$$

式中: ΔG_v 是单位体积液-固相变的吉布斯自由能差; ΔH_f 是单位体积的熔化潜热; T_m 是平衡凝固温度; ΔT 是过冷度。因此, 过冷度 ΔT 增大能够显著降低临界形核自由能 ΔG^* , 因而指数性地提高形核速率 I (经典形核速率近似为 $I \propto \exp(-\Delta G^*/k_B T)$)。

根据非均匀形核(异质形核)的临界形核功公式(3), 对于异质形核, 存在幂函数因子 $f(\theta)$ 将 ΔG_{hom}^* 减小:

$$\Delta G_{\text{het}}^* = f(\theta) \Delta G_{\text{hom}}^*, f(\theta) = \frac{(2+\cos\theta)(1-\cos\theta)^2}{4} \quad (3)$$

式中: ΔG_{het}^* 为非均匀形核的临界吉布斯自由能变化; ΔG_{hom}^* 为均匀形核的临界吉布斯自由能变化; $f(\theta)$ 为接触角因子; θ 为晶核与基底之间的接触角。因此, 切屑表面氧化膜/杂质提供的低接触角(良好润湿/匹配)能显著降低形核能垒, 进而在微尺度上形成高密度等轴晶核^[24]。

3.1.2 切屑的热学角色: 瞬态吸热与有效过冷度场

切屑投入高温熔体后表现为短时热容性“冷源”。其在局部吸热导致瞬态温度梯度增大, 形成局部更高的有效过冷度 ΔT_{eff} 。可用近似能量守恒估量其尺度: 若单位熔体质量的比热容为 C_m , 切屑总质量为 m_p (熔体质量 m_m), 切屑的等效吸热能力可用无量纲参数表示:

$$\psi = \frac{m_p C_p}{m_m C_m} \cdot \frac{S_v}{S_0} \quad (4)$$

式中： C_p 、 C_m 分别为切屑和熔体的比热容， S_v 为切屑比表面积， S_0 为参考面积尺度。式（4）的物理意义为“冷铁容量因子”：当 ψ 过小，诱发的 ΔT_{eff} 不足以显著降低 ΔG^* ；当 ψ 过大，切屑无法充分熔合并产生缺陷。该无量纲化描述可解释试验中存在的最优窗口（约2.5%）。

此外，冷铁容量因子的变化直接决定了微区溶质扩散与异质形核的竞争关系。对于近共晶的Al-12Si合金，当切屑添加量偏低（如1.5%）时，离散的冷源造成极大的局部温度梯度，驱动Si原子向冷铁周边发生长程扩散与严重偏聚。局部Si浓度的急剧升高打破了共晶平衡，导致粗大多边形板片状的过共晶硅析出。而当添加量达到最优值（2.5%）时，密集分布的切屑使得局部过冷场相互交叠，温度梯度趋于平缓；同时，大量激活的异质形核点促使Si相在全域多点同时成核。高密度的竞争生长有效消耗了局部的Si溶质，抑制了长程偏析，从而彻底消除了粗大的过共晶硅相，实现了共晶/初晶组织的显著细化与均匀化。

3.2 切屑表面氧化膜与杂质团簇作为异质形核核心

为进一步寻找表面氧化物作为初晶硅异质形核核心的证据，进行扫描电镜和能谱的分析，如图5所示。图5（a）中铝硅合金熔体在凝固时首先析出的 β 相被称作初晶硅，当温度降到共晶点温度时，由（ $\alpha + \beta$ ）相析出的 β 相被称作共晶硅，共晶硅对合金高温下的

流动性和收缩性能有利，但会降低合金的机械加工性能和力学性能。图5（b）中过共晶是由初晶硅 β 相和共晶硅（ $\alpha + \beta$ ）组成的，由于加入冷铁后冷铁周围形成过冷度环境，内部熔体存在温度的极大不均匀性，使得硅原子出现大量偏聚现象，由于细小碎屑的加入，使得形核数目增多，偏聚的初晶硅原子形成形核核心，促进晶体的生长，最终使得大量的过共晶硅相出现。图5（c）中富铁相均匀分布在骨骼状的初晶硅上，由于加入的冷铁属于同质合金，没有晶格常数的差别，因此其与熔体之间的界面能很低^[25]。使得冷铁颗粒存在大量的形核质点，冷铁颗粒周围存在其他氧化物和杂质原子大量富集现象，这些原子吸附在初晶硅前沿的生长界面上，有效地对初晶硅的孪晶面凹槽的生长形成抑制，使得初晶硅的形貌从片状变成树枝状，晶粒组织得到了细化。由于初晶硅的表面能和固液界面能的影响，富铁相跟随着初晶硅的生长，初晶硅的生长过程有效地对富铁相形貌进行改善。图5（d）中冷铁颗粒出现Al、O、Na、K和Cl等元素。冷铁颗粒的比表面积大拥有更大的表面活性，在铣床加工过程中极易氧化，造成试验样品中氧化物、夹杂物的数量增多，最终使性能降低。由于冷铁组织固液相界面能和温度梯度的存在，大量的外来颗粒、夹杂偏聚分布在其未完全熔化的表面上，其中Na、K、Cl元素主要来自覆盖剂。从这部分来说，当加入的冷铁颗粒太少时，冷铁组织可能会对合金抗拉强度、塑形等力

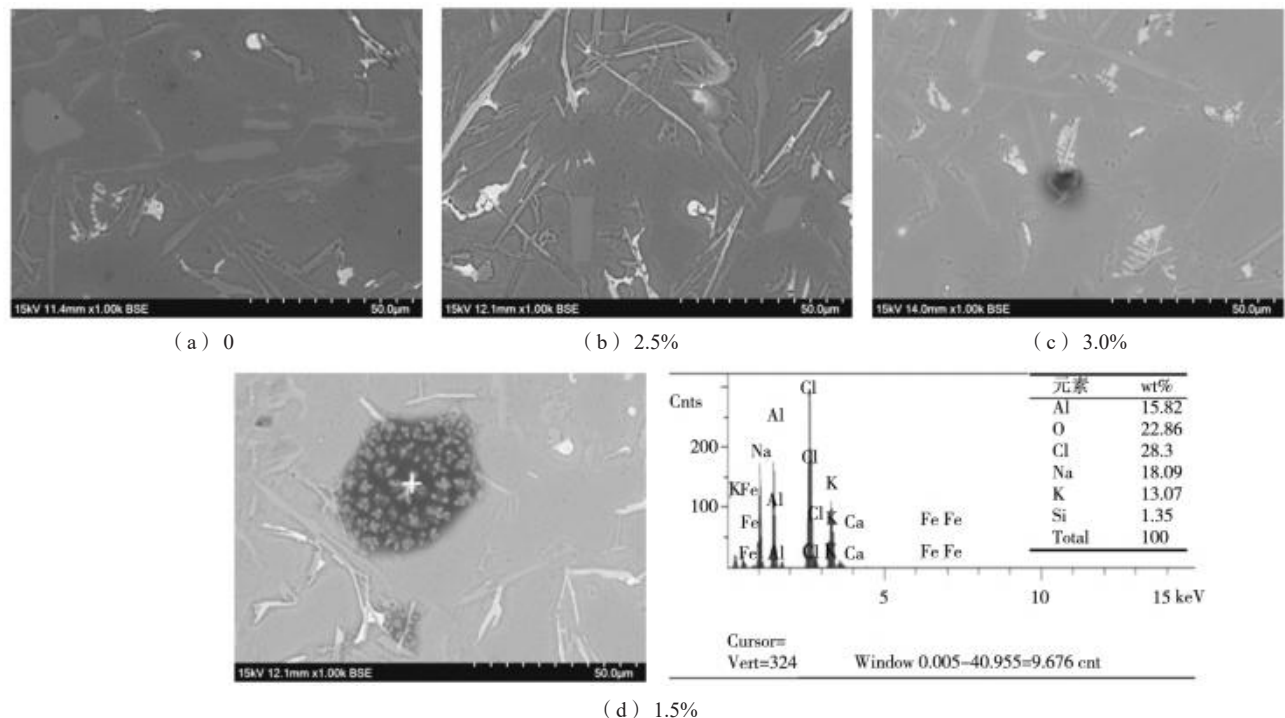


图5 加入不同机械碎屑量试样的扫描电镜图

Fig. 5 SEM images of the specimens with varying amounts of added cutting chips

学性能起到有害作用。

由此可知,切屑投入高温熔体后,除了作为短时热容性“冷源”外,其表面的天然薄氧化膜(主要为 γ - Al_2O_3)与附着杂质团簇在改变形核动力学方面发挥了关键作用。尽管在常规铸造宏观工艺条件下,直接观察纳米级的微观形核核心存在表征难度,但结合经典形核理论与现有文献,可对其异质形核机制进行合理推演。根据Bramfitt二维点阵错配度理论,异质形核的有效性高度依赖于底物与析出相之间的晶格匹配关系。已有研究表明, γ - Al_2O_3 颗粒与 α -Al基体及初晶Si之间具有较低的界面错配度^[26]。当切屑进入过热熔体并在搅拌作用下,其表面氧化膜发生局部破碎,形成大量悬浮于熔体中的微纳级 γ - Al_2O_3 质点。

这些具备良好晶格匹配关系的质点及杂质团簇具备两重核心作用:①降低接触角与形核能垒:悬浮的氧化物颗粒能与液相发生部分润湿,显著降低固-液界面能,减小接触角 θ ,从而据公式(3)中的接触角因子显著降低异质形核临界形核功 ΔG_{het}^* ^[27];②提供化学/结构锚定效应:氧化物界面可吸附并固定早期成核的Si或Al原子簇,促进稳定晶核的形成与长大^[28]。

因此,切屑不仅是热学冷源,更是被激活的潜在微尺度形核剂。本研究提出“冷铁吸热提供局部高过冷度+氧化膜碎块提供低能垒形核位点”的协同机制,这很好地解释了在适量(2.5%)切屑添加下观察到的等轴晶激增与组织细化现象。然而,正如组织观察所得,当切屑过量(3.0%)或熔体热量不足以促使氧化膜有效破碎时,未破碎的连续氧化膜反而会阻碍界面的润湿与热交换,产生未熔合夹杂,形成力学缺陷源。

3.3 柱-等轴转变(CET)与枝晶次级臂距

冷铁的作用直接影响到等轴成核密度 N_{eq} 与局部生长速率 v_g 。当 N_{eq} 足够大,使得生长的等轴晶在到达柱晶前沿前就能相互阻挡时,柱-等轴转变发生^[29]。定量上可用等轴晶生长半径 $r(t) = v_g t$ 与单位面积上的核数 N_{eq} 构造阻挡条件:

$$N_{\text{eq}} \pi [v_g t_c]^2 \geq 1 \quad (5)$$

式中: N_{eq} 为有效等轴晶核密度, v_g 为等轴晶的局部生长速率, t_c 为局部凝固时间。式(5)成立时,即可形成完整的等轴晶遮蔽区,从而触发CET。切屑通过提高 N_{eq} 与局部 ΔT_{eff} ,使 t_c 缩短,促进CET的发生,从而在宏观上表现为等轴/细化组织占优。

此外,枝晶二次臂距 λ_2 与冷却速率 T 的关系可近似表示为:

$$\lambda_2 = \frac{1}{a} T^{-n}, n \approx 0.3 \sim 0.4 \quad (6)$$

式中: λ_2 是枝晶二次臂距; T 是冷却速率。因此冷却速率的局部增强会使明显减小,进而改善力学性能(细小 λ_2 有利于裂纹偏转和塑性耗散)。

3.4 富铁相的选择性析出机理

Fe在Al-Si合金中容易形成多种互化物,形貌(针/板/块)与体系的扩散时间、局部成分和界面能密切相关^[30]。结合本试验观察,提出如下机制框架:

局部高冷却速率降低了凝固期间的有效扩散长度与时间,抑制了Fe原子向形成长针状 β 相所需的远程偏析过程,即扩散时间窗口缩短;高形核密度使得更多的 α -Al或Si早期成核并占据空间,改变了局部微观化学势,促使Fe优先以细小、分散的Al-Fe-Si块状或颗粒相析出,而非长针状相。简言之,形核控制优先于粗化生长控制,从而实现富铁相的形貌转变,合金相发生了竞争性相选择;切屑表面及其产生的氧化物/杂质团簇可吸附Fe或改变局部化学活度,作为富铁相的“锚定位点”,引导其以更为分散的形式析出,合金相在界面发生吸附/捕获效应。

以上的三个机理综合解释了为何在2.5%条件下Fe的长尺度偏聚减弱而力学性能改善。

4 结论

本研究探索了机械切屑在Al-12Si-Fe合金熔体中诱发的局部冷铁效应,及其对富铁相选择性析出的调控机制。通过组织观察、相组成分析、力学性能测试与断口形貌分析,结合热力学-动力学机理探究,得出如下主要结论:

(1) 机械切屑在Al-12Si-Fe合金熔体中可同时产生瞬态冷铁效应与异质形核作用,二者协同作用能够大幅降低形核能垒,推动柱状晶向等轴晶转变,实现晶粒组织细化与均匀化。

(2) 切屑添加量为最优值2.5%时,可有效抑制针状 β - Al_3FeSi 相生成,促使富铁相以细小弥散的块状、颗粒状形态析出,进而提升基体韧性,增强组织结构稳定性。

(3) 最优工艺条件下合金综合力学性能同步提升,抗拉强度增幅约18%,伸长率增幅约42%,断口呈现细密韧窝形貌;切屑添加过量会产生未熔合夹杂,同时界面润湿性变差,造成力学性能衰减。

(4) 本研究阐明了机械切屑充当内置冷铁的作用机理与应用价值,为铝合金回收再利用及绿色冶金领域提供了切实可行的组织调控新思路。

参考文献:

- [1] 袁蔚景, 涂杰松, 李银华, 等. 回收工艺对再生铝合金性能影响述评 [J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12 (5): 18-29.
- [2] 葛维燕, 疏达, 高建卫, 等. 再生铝合金除铁述评 [J]. 铸造, 2008 (3): 207-210.
- [3] 臧永兴, 苗赛男, 李鑫赫, 等. 再生铝合金的净化处理与应用研究 [J]. 铸造, 2026, 75 (3): 293-299.
- [4] 常秀文, 杨军. 钢锭模铸件铸造工艺设计及优化研究 [J]. 铸造工程, 2025, 49 (6): 58-62.
- [5] Zhang Z, Peng X, Li J, et al. Enhancing properties of Fe-based soft magnetic composites via Al-Si alloy interfacial diffusion annealing [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 38: 6148-6159.
- [6] 杨宁源, 周慧慧, 张志豪. Fe含量对Al-1.04wt.%Mg-0.64wt.%Si-0.23wt.%Cu合金析出相、力学性能和腐蚀性能的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2021, 29 (3): 64-74.
- [7] Zhang L, Gao J, Damoah L N W, et al. Removal of iron from aluminum: a review [J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review, 2012, 33 (2): 99-157.
- [8] 周玉立, 张俊超, 林师朋, 等. Fe含量对铸造铝合金导热和力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (4): 416-419.
- [9] Taylor J A. Iron-containing intermetallic phases in Al-Si based casting alloys [J]. Procedia Materials Science, 2012, 1: 19-33.
- [10] Tian S, Zang X, Guo F, et al. Parameter optimization of horizontal direct chill casting process for 6082 aluminum alloy based on finite element simulation: materials processing [J]. Materials Transactions, 2025, 66 (9): 1246-1257.
- [11] Zhang Z L, Xu R X, Zhang R Y, et al. Effects of SiO₂ and MgO on the thermophysical and mechanical properties of Al/Al₂O₃ composites and their compatibility with Al-Si alloys [J]. Journal of Thermal Science, 2025, 34 (3): 996-1007.
- [12] Choi H, Li X. Refinement of primary Si and modification of eutectic Si for enhanced ductility of hypereutectic Al-20Si-4.5Cu alloy with addition of Al₂O₃ nanoparticles [J]. Journal of Materials Science, 2012, 47 (7): 3096-3102.
- [13] Lan S, Feng G, Wang Y, et al. Effect of iron content and heat treatment on microstructure and mechanical properties of a recycled Al-Si-Mg aluminum alloy [J]. China Foundry, 2025, 22 (2): 205-214.
- [14] Moodispaw P M, Miao J, Cinkilic E, et al. The beneficial effect of Ce additions to high Fe-containing secondary Al-Si-Mg cast alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1009: 176864.
- [15] 毛丰, 欧黎明, 乔永枫, 等. Eu和P复合变质对过共晶Al-Si合金微观组织和耐磨性能的影响 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (4): 393-400.
- [16] 李青春, 陈淑英, 岳旭东, 等. 一种过共晶铝硅变质用铝磷合金的制备方法: CN109280823B [P]. 2021-04-09.
- [17] Knuutinen A, Nogita K, McDonald S D, et al. Modification of Al-Si alloys with Ba, Ca, Y and Yb [J]. Journal of Light Metals, 2001, 4 (1): 229-240.
- [18] Daneesha K, Yi S, Xingchen F, et al. Parametric design of multi-cell thin-walled structures for improved crashworthiness with stable progressive buckling mode [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131: 76-87.
- [19] 何磊东, 仲召军, 李鹏鹏. 高硅铝合金变质处理的研究现状及发展趋势 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (1): 65-68.
- [20] 杨永福, 闫亮明. 铸造铝硅合金及其热处理工艺的研究与进展 [J]. 铸造工程, 2022, 46 (3): 43-48.
- [21] He H, Zou J, Zhang H, et al. Effect of Mn and Mo on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg-0.6Fe alloy [J]. China Foundry, 2023, 20 (6): 511-518.
- [22] Pouyafar V, Malihi F, Meshkabad R. Conjoint influence of equal channel angular pressing and annealing on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy 7075 [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2024, 55 (11): 1590-1600.
- [23] 李才巨, 李宁宇, 易健宏, 等. 一种过共晶铝硅合金复合变质剂及其制备方法: CN109778019A [P]. 2019-05-21.
- [24] Li J M, Wang Y, Jiang S W, et al. Correction of the constitutive model and analysis of chip formation in cryogenic machining of TA15 titanium alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 310: 1-12.
- [25] 朱运茂, 王奎, 蒋海燕, 等. 过共晶铝硅合金硅相复合变质的研究进展 [J]. 上海金属, 2019, 41 (5): 97-104.
- [26] Choi H, Konishi H, Li X. Al₂O₃ nanoparticles induced simultaneous refinement and modification of primary and eutectic Si particles in hypereutectic Al-20Si alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 541: 159-165.
- [27] 田源. 过共晶Al-14wt%Si合金裂纹扩展行为研究 [D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2021.
- [28] Gao C, Zhang B, Li Y, et al. Synergistic effect of Zr and Mo on precipitation and high-temperature properties of Al-Si-Cu-Mg alloys [J]. China Foundry, 2024, 21 (1): 71-81.
- [29] Hunt J D. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic [J]. Materials Science and Engineering, 1984, 65 (1): 75-83.
- [30] Dinnis C M, Taylor J A, Dahle A K. As-cast morphology of iron-intermetallics in Al-Si foundry alloys [J]. Scripta Materialia, 2005, 53 (8): 955-958.