

挤压铸造铝合金隔框铸件有限元模拟及组织性能调控

张作伟¹, 杨莉^{1, 2}, 高民强^{1, 2, 3}, 王长峰^{1, 2, 3}, 管仁国^{1, 2, 3}

(1. 大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116028;

2. 大连交通大学, 辽宁省轻质金属材料近净成形重点实验室, 辽宁大连 116028;

3. 大连交通大学, 连续挤压教育部工程研究中心, 辽宁大连 116028)

摘要: 围绕铝合金隔框铸件挤压铸造展开研究, 旨在改善其质量与性能。通过数值模拟分析发现, 卷气主要集中于铸件侧壁上方, 易引发气孔等缺陷; 缩孔多出现于局部厚大位置。X射线检测显示, 熔体补缩能力提升后, 铸件内部无明显缺陷。借助ProCAST软件计算试验合金平衡相组成, 并依据热力学固体扩散模型Scheil预测固相线和液相线温度。此外, 采用SEM、EBSD分析了微观组织。变质处理与适当的热处理工艺协同作用, 提升了变质效果, 促使共晶Si形态从粗大片状与粗短棒状转变为纤维状和弥散的细小球状。挤压铸造工艺条件下, 通过弥散强化机制, 热处理后挤压铸造隔框试样的抗拉强度(UTS)提高25%、屈服强度(YS)提高20%、伸长率(EL)提高26%。

关键词: Al-Si合金; 挤压铸造; 数值模拟; DSC热分析; 微观组织; 变质处理

中图分类号: TG146.2; TG249.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 08-0910-11

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0117

Finite Element Simulation and Microstructure and Property Regulations of Squeeze Cast Al Alloy Bulkhead Casting

ZHANG Zuo-wei¹, YANG Li^{1, 2}, GAO Min-qiang^{1, 2, 3}, WANG Chang-feng^{1, 2, 3}, GUAN Ren-guo^{1, 2, 3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China;

2. Key Laboratory of Near-Net Forming of Light Metals of Liaoning Province, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China; 3. Engineering Research Center of Continuous Extrusion, Ministry of Education, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract: Focusing on the squeeze casting of Al alloy bulkhead castings, a study has been carried out in order to improve their quality and performance. It is found through numerical simulation analysis that the gas entrainment is primarily concentrated above the side walls of the casting, which is prone to generate pore defects. Shrinkage cavity defects often occur in local thick and large-size areas. X-ray inspection reveals that after improving the feeding capacity of the melt, there are no obvious internal defects in the casting. The equilibrium phase composition of the test alloy was calculated using ProCAST software, and the solidus and liquidus temperatures were predicted based on the Scheil thermodynamic solid-diffusion model. In addition, the microstructures were analyzed using SEM and EBSD. The synergistic effect of the modification treatment and the appropriate heat treatment process enhances the modification effect, promoting the transformation of eutectic Si morphology from thick flakes and short, stubby rods into fibrous and finely-dispersed spherical shapes. Under the condition of the squeeze casting process, through the dispersion strengthening mechanism, the ultimate tensile strength (UTS) of the squeeze-cast bulkhead specimens after heat treatment is increased by 25%, the yield strength (YS) is increased by 20%, and the elongation (EL) is increased by 26%.

Key words: Al-Si alloy; squeeze casting; numerical simulation; DSC thermal analysis; microstructure; modification treatment

基金项目: 国家自然科学基金 (U2341253)。

收稿日期: 2026-01-17 收到初稿, 2026-02-10 收到修订稿。

作者简介: 张作伟 (1989-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事铝合金高压铸造、挤压铸造和反重力铸造的数值模拟, 开展亚快速凝固与固态相变一体化调控, 以实现微观组织与性能的科学调控及优化。E-mail: Zhang.Zuowei@outlook.com

通信作者: 高民强, 男, 副教授。E-mail: mqgao@djtu.edu.cn

引用格式: 张作伟, 杨莉, 高民强, 等. 挤压铸造铝合金隔框铸件有限元模拟及组织性能调控 [J]. 铸造, 2026, 75 (8): 910-920.

Zhang Zuowei, Yang Li, Gao Minqiang, et al. Finite element simulation and microstructure and property regulations of squeeze cast Al alloy bulkhead casting [J]. Foundry, 2026, 75 (8): 910-920.

铝合金具有低密度、高强度、良好的耐腐蚀性等优点,在航空航天、汽车制造等领域得到了广泛应用^[1-3]。铸造Al-Si合金是制备铝合金铸件的关键材料^[4-6]。例如,A356.2合金因具有良好的流动性、低的热裂倾向以及较小的收缩率等优点,已成为最常见的铸造铝合金^[7]。挤压铸造是一种短流程近净成形技术,结合了铸造与锻造的优势,在工业生产中广泛应用^[8]。该工艺流程简单,所生产的零件不仅可进行热处理,微观组织还很致密^[9]。挤压铸造主要分为直接挤压铸造和间接挤压铸造。通过对液态金属施加挤压力,能有效减少凝固过程中孔洞的形成,显著提高铸件的致密度,减少铸造缺陷,使铸件具备良好的性能。然而,在实际生产时,挤压铸造涉及金属液的流动、凝固等过程,仍难以完全避免气孔、缩孔等铸造缺陷的出现^[10]。利用ProCAST铸造模拟软件对挤压铸造过程进行数值模拟,能够预测金属液的填充顺序、温度分布以及凝固过程等,为优化铸造工艺提供重要依据^[11-13]。借助该软件可以提前发现铸造过程中可能出现的问题,进而对工艺参数进行调整和优化,有效提高铸件的质量和生产效率^[14-16]。目前,有限元模拟分析优化技术在挤压铸造领域的应用越来越广泛,为解决铸造缺陷问题提供了有效的手段^[17]。

共晶Si的形态和分布显著影响铝合金力学性能。粗大片状或棒状共晶Si会降低合金强度与韧性,而弥散纤维状和细小球状共晶Si可提高力学性能^[18]。Sr是铝合金常用变质剂,其变质共晶Si的机制是改变共晶Si生长方式、抑制生长速度以细化共晶Si。适量添加Sr时,Sr原子吸附在共晶Si生长界面,抑制其生长,使其从粗大针状或片状变为细小纤维状或弥散球状,提升合金力学性能^[19]。但添加过多会出现Sr中毒,变质效果失效,共晶Si形态变差、组织粗大,降低合金力学性能,尤其是塑性和韧性。这是因为过量Sr与合金中其他元素反应形成有害化合物,如与Fe等杂质元素形成粗大金属间化合物,割裂合金基体成为裂纹源^[20-21]。此外,Sr化学性质活泼,加入铝液会与其中水分反应生成氢气,增加铝液中氢气含量。铝合金凝固时,氢气溶解度下降,过多氢气以气泡形式析出,若未及时排出会在铸件中形成气孔缺陷^[22-23]。

本课题具体研究内容包括利用有限元模拟分析挤压铸造过程中金属液的充型和凝固行为,探明卷气和缩孔等缺陷的产生位置和原因,并通过优化工艺参数,提高铸件质量。同时,借助ProCAST软件计算试验合金的平衡相组成,依据热力学固体扩散模型Scheil预测固相线和液相线温度,评价铝合金的铸造性能。此外,采用SEM、EBSD等技术手段,分析Sr元素对共

晶Si的变质作用以及T6热处理对铝合金微观组织和力学性能的影响。本课题的重点在于通过优化工艺参数和变质处理,提高挤压铸造隔框的性能,为实际生产提供理论依据和技术支持。

1 试样制备与方法

试验材料为A356.2铝合金,合金熔炼过程中,在通过旋转喷吹除气、除渣之后,按照每500 kg铝合金加入1.25 kg的Al-10Sr中间合金的配比进行变质处理。然后将铝液转运至定量炉(Westomat W1700S, GER)中。使用电感耦合等离子体-原子发射光谱仪(ICP-OES, PerkinElmer Avio500, USA)检测铝合金的化学成分,检测结果如表1所示。铝液浇注时,用滤网进行过滤,有效过滤掉杂质。试验中选用青岛三维立式挤压机(YS32-YD-1300T, CHN)。熔杯内径为 $\Phi 240$ mm,内浇道设置在铸件中心位置,模具结构及铸件尺寸如图1所示。试验过程中,将一部分铝液浇注至 $\Phi 100$ mm、高度为200 mm的圆柱形重力铸造模具中,沿重力方向取其中间位置的铸态A试样3个。对于挤压铸造隔框,分别在其铸态和T6状态下,按照图1(b)中的取样位置,各取A、B试样各3个。

表1 试验合金的化学成分
Tab. 1 Chemical composition of the experimental alloy
 $w_B/\%$

Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Ti	Zn	Sr	Al
6.87	0.08	0.11	0.01	0.36	0.15	0.02	0.018	余量

使用NX软件,将模型转换成IGS格式,导入ProCAST软件中的Mesh模块。浇道网格划分单元尺寸为2.5 mm,铸件和冲头网格划分单元尺寸为3 mm,渣包和排气道网格划分单元尺寸为5 mm,模具和熔杯网格划分单元尺寸为10 mm,二维面网格总数量为540 552,三维面网格总数量为14 369 547。铝液流动长度及浇注系统网格划分情况,如图2所示。试验合金挤压铸造工艺参数和数值模拟边界条件,如表2所示。

使用X射线数字成像系统(XYD-160, CHN)检测铸件的内部质量。差热分析测试设备为热分析仪(DSC, STA449F3, GER),气氛是氩气,加热速率是10 K/min。物相分析采用了X射线衍射仪(XRD, Empyrean Alpha 1, NL)。对铸件进行T6热处理,为了避免共晶Si过度球化,固溶处理为510 $^{\circ}\text{C}/2$ h,时效处理为160 $^{\circ}\text{C}/10$ h。采用配备X射线能量色散光谱探测器(EDS)和电子背散射衍射探测器(EBSD)的扫描电子显微镜(SEM, VEGA 3 SBH, CZE)观察并分析微观组织和断口形貌特征。用氩离子抛光机(Gatan

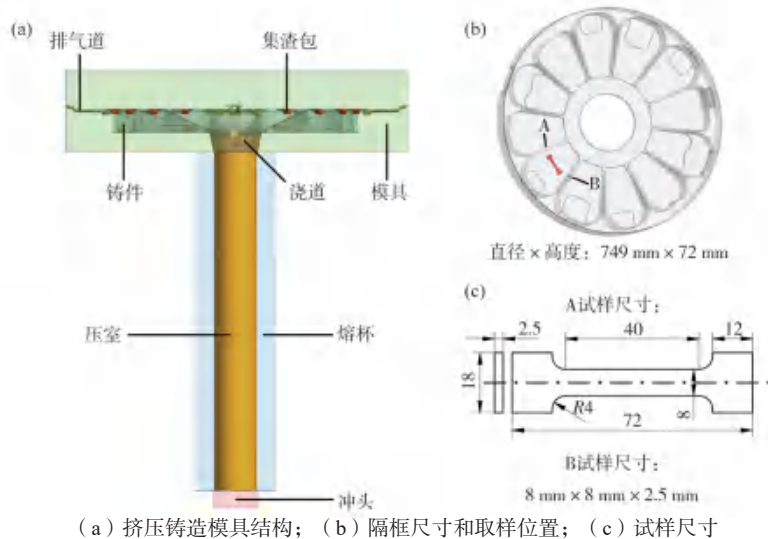


图1 隔框铸件试验用挤压铸造模具结构和取样示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the squeeze casting mold structure and sampling for the bulkhead casting test

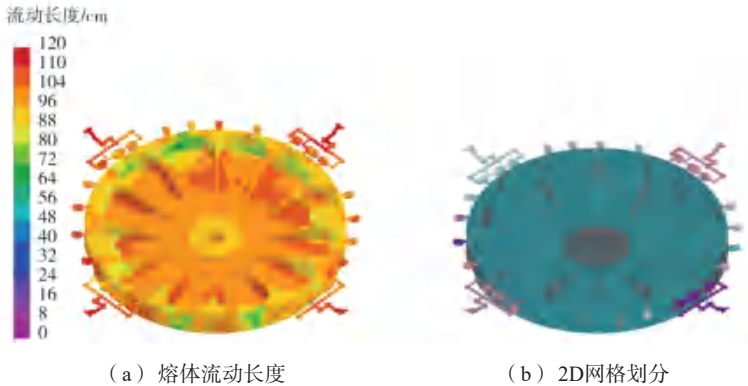


图2 浇注系统熔体流动长度和2D网格划分情况

Fig. 2 Melt flow length field and 2D mesh division case of the gating and casting system

表2 试验合金挤压铸造过程工艺参数和数值模拟边界条件

Tab. 2 Process parameters and numerical simulation boundary conditions of the experimental alloy squeeze casting process

模具 温度/℃	定量 浇注/kg	铝液浇注 温度/℃	冲头 压力/kN	保压 时间/s	模具材料	H13 钢
220	51	680	1 600	30	实体与空气之间的传热系数	空冷
			2 000		模具与冲头之间的传热系数	1 000/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
			2 400		合金与模具之间的传热系数	3 000/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)

697, USA) 进一步抛光EBSD试样(8 mm×8 mm×2.5 mm)。Aztec Crystal软件用于分析EBSD数据。拉伸试验在拉伸试验机(AG-Xplus, JPN)上进行,按照标准GB/T 228.1—2021执行,拉伸速度为0.6 mm/min。

2 试验结果及分析

2.1 熔体填充过程和铸件凝固过程

本分析结果是在冲头压力为2 400 kN的条件下模拟得到的。如图3所示,在熔体填充率从61%增加至69%的过程中,可以观察到,熔体从铸件中间向外径方向

依次填充,加强筋和侧壁的上沿是最后填充区域,这会直接影响熔体中气体卷入的分布情况。在固相率由12%至53%的凝固过程中,多个台阶与铸件底部存在明显的温度差,主要是因为台阶的厚度与铸件底部不一致,薄台阶与模具之间热传导较快。在固相率由74%至100%的凝固过程中,在加强筋与外径交界的R角位置,散热较慢,因此该位置大概率存在缩松、缩孔等缺陷。在整个凝固过程中,铸件中心区域、横浇道与内浇道附近温度始终高于其他区域,因此铸件中心区域、横浇道与内浇道附近内部可能产生缩孔,后续能够通过机加工去除。

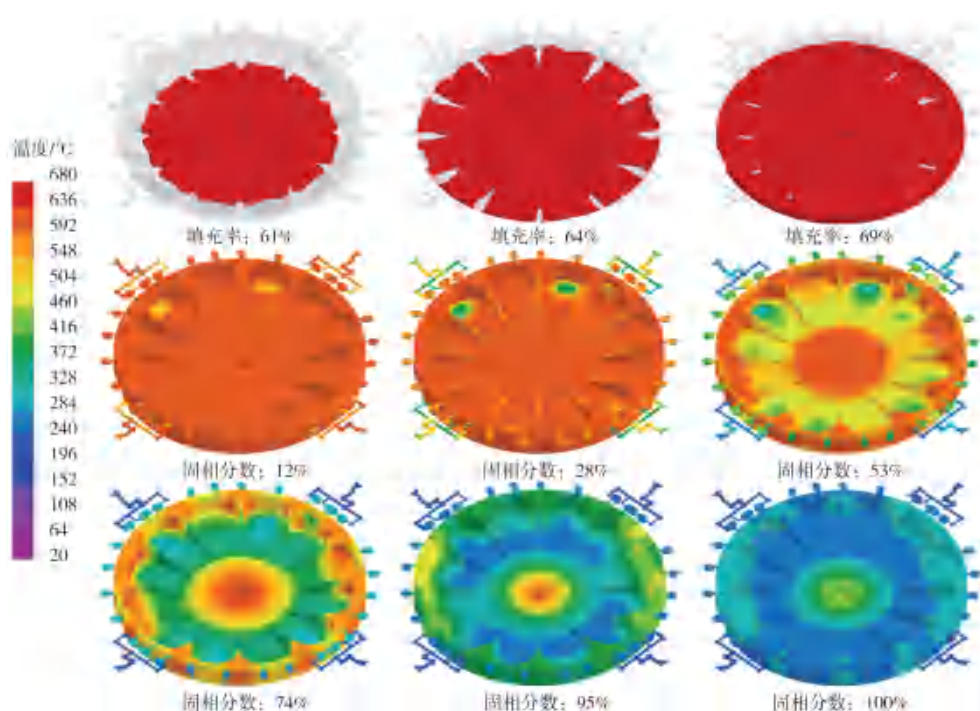


图3 熔体填充和铸件凝固过程中的温度场分布云图

Fig. 3 Distribution cloud diagrams of temperature fields during the melt filling and the casting solidification processes

图4为铸件保压凝固过程中的固液相分布图,可以观察到当固相率达到28%时,铸件的加强筋中间底部区域率先凝固,率先凝固区域将严重阻碍熔体流动。在固相率从53%至74%的转变过程中,加强筋与外径交界的 R 角位置始终处于液相,直至剩余液相断开,成为孤立液相区,这进一步验证了该区域易产生缩松、缩孔缺陷。

2.2 铸件缺陷分布预测及验证

在挤压铸造工艺中,影响孔隙率的两个主要因素是填充卷气和凝固收缩。图5显示了熔体在填充过程中

的卷气分布情况,卷气现象集中在铸件的侧壁上方。在熔体最终填充阶段,熔体中的这种卷气被强制带入型腔从而导致气孔的产生,可以通过调整渣包和排气的位置及大小,减少气孔缺陷。由图6可以看出,铸件缩孔缺陷主要分布在加强筋与外径交界的 R 角区域,这与前文温度场和固液相分布预测缺陷位置的分析结果吻合。熔体填充凝固过程中,由于冷却速度的差异,局部厚大位置体积收缩的补缩能力不足,进而导致了缩孔缩松缺陷。在1 600 kN情况下,缩孔统计结果体现出加强筋与外径交界的 R 角位置是主要缩孔区域;在2 400 kN情况下,缩孔统计结果仍然体现在该区域,但

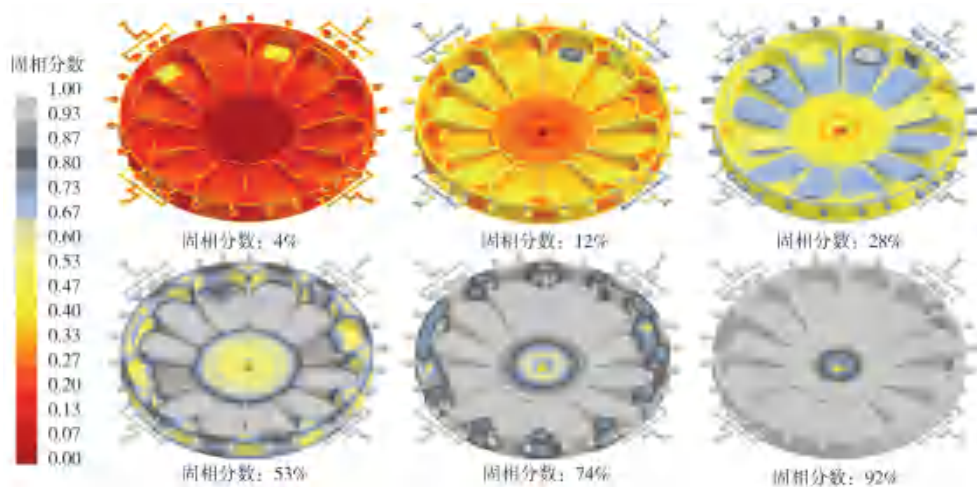


图4 铸件凝固过程中的固相和液相分布图

Fig. 4 Distribution diagrams of solid and liquid phases during the solidification process of casting

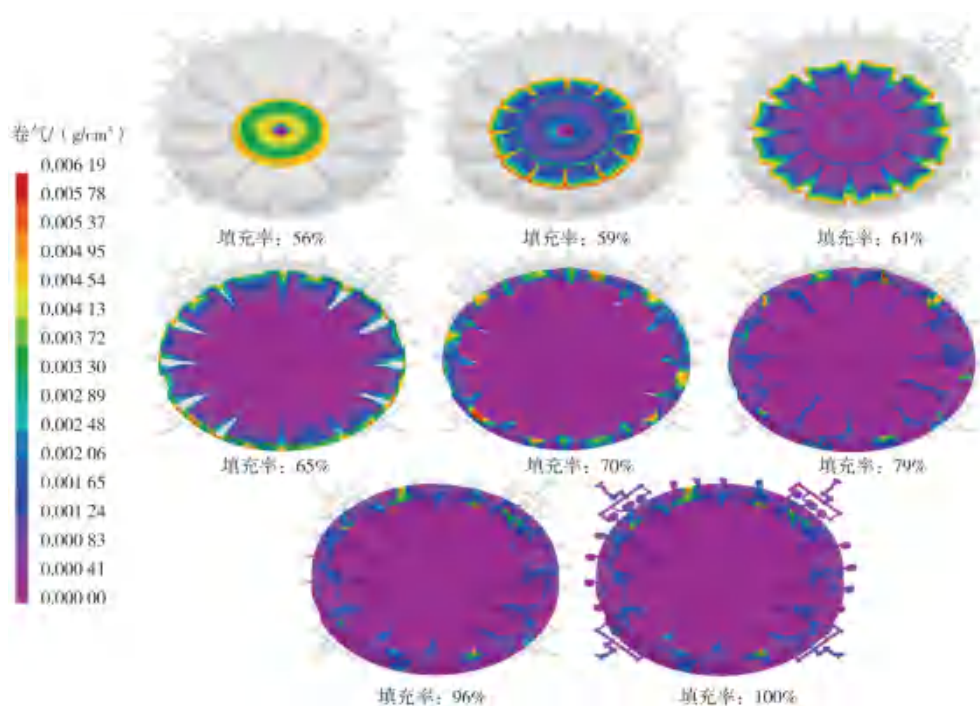


图5 熔体填充过程中的卷气分布图

Fig. 5 Air entrainment distribution diagrams during the melt filling process

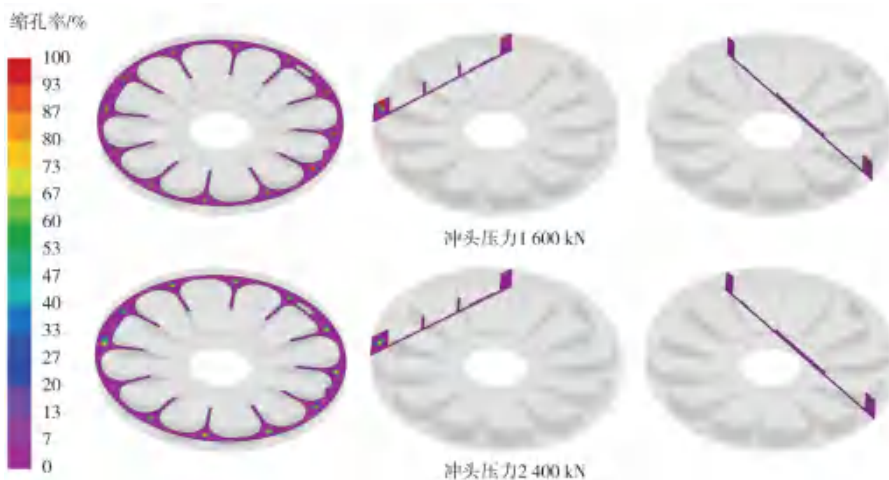


图6 铸件缩孔缺陷区域分布图

Fig. 6 Distribution diagrams of shrinkage cavity defect areas in casting

是能够观察到,随着冲头压力的提高,缩孔缺陷得到明显改善。

图7是冲头压力为2 400 kN时,铸件的X射线探伤结果。可以看出,铸件整体内部质量良好,个别加强筋与外径交界的R角位置仍存在少量的缩孔缺陷,这与前文中充型和凝固分析的缺陷位置预测一致。分析认为,冲头压力的增加,能够显著提高熔体的补缩能力,能够降低薄壁位置率先凝固对熔体流动的阻力。但是,此类多台阶、多筋条以及壁厚差大的大型铸件末端距离冲头较远,压力在传递过程中呈现递减趋势,对铸件末端的补缩能力不及预期。在下一步研究中,将会考虑在末端加入局部加载挤压销和挤压块来

提高末端厚大位置的补缩能力和致密度。

2.3 试验合金物相及熔点

通过ProCAST软件计算得出试验铝合金的平衡相组成,并依据相关热力学固体扩散模型Scheil预测了固相线和液相线温度,如图8(a)所示。预测出固相线温度 T_s 是561℃,同时,液相线温度 T_L 是616℃,在该温度区间,大量具有面心立方(Fcc)结构的 α -Al固溶体相快速析出,并在547℃时析出量达到顶峰94%,之后 α -Al固溶体相的析出逐渐停止。在570℃时,开始大量析出共晶Si相,此时共晶Si相的析出量为0.18%,其在553℃时,析出量达到最高,为0.21%。从560℃

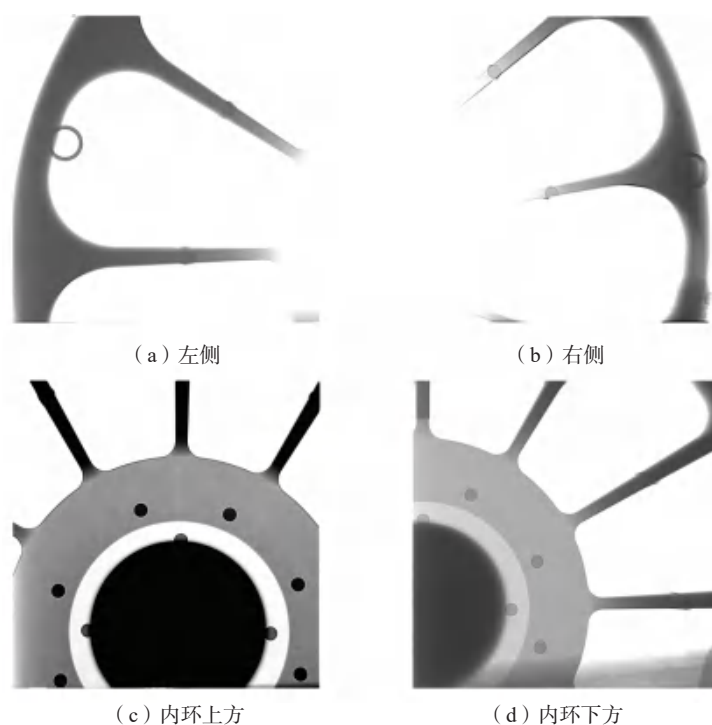


图7 铸件X射线探伤结果 (冲头压力为2 400 kN时)

Fig. 7 X-ray inspection results of casting (when the plunger pressure is 2 400 kN)

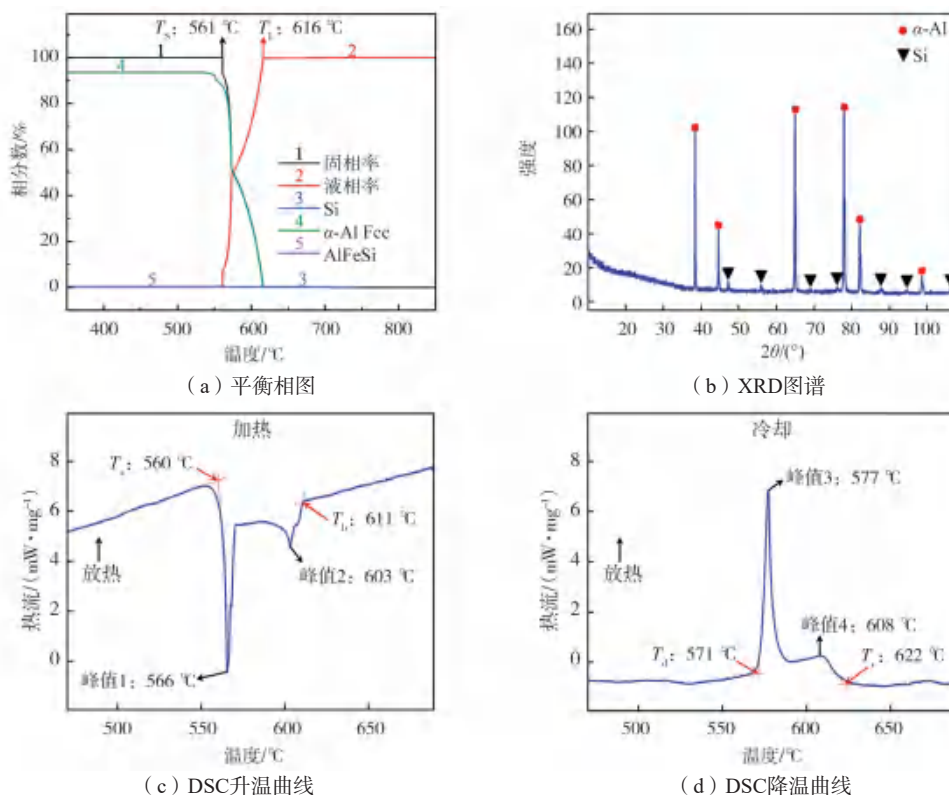


图8 试验合金的平衡相图、XRD图谱和DSC曲线

Fig. 8 Equilibrium phase diagram, XRD pattern and DSC curves of the experimental alloy

开始析出AlFeSi相,析出量为0.13%,其在550℃时,析出量达到最高,为0.36%。如图8(b)所示,从铸态挤压铸造试样的XRD图谱中,只检测到 α -Al和共晶Si

相,而富铁相由于其体积分数不到0.2%而很难区分。图8(c)-(d)呈现的是试验合金的DSC曲线,为消除合金在熔化过程中产生的过热度以及冷却凝固时出现

的过冷度的影响,分别运用公式(1)和公式(2)来计算合金的熔点 T_{mp} 以及凝固温度区间 ΔT ^[24]:

$$T_{mp} = \frac{1}{2} (T_b + T_c) \quad (1)$$

$$\Delta T = \frac{1}{2} (T_b + T_c - T_a - T_d) \quad (2)$$

式中: T_a 和 T_b 是通过斜率法测得的试验合金加热熔化开始温度和结束温度; T_c 和 T_d 是试验合金冷却时的凝固开始温度和结束温度^[25]。根据实际测得的DSC曲线,通过计算得到合金的熔点 T_{mp} 是616.5℃,合金的凝固温度区间 ΔT 是51℃。这与通过计算预测得到的液相线和固相线差值区间基本相符。相较于变形铝合金中的2系铝合金,本次试验合金的固液区间较窄,这表明该试验合金具备良好的铸造性能。

2.4 合金的微观组织分析

取铸件的加强筋B处的试样,进行铸态与T6热处理状态下的SEM微观组织表征。如图9(a)-(c)所示,初生 α -Al可归为两类:一类是尺寸较大的球形或近球形颗粒,将其标记为 α_1 -Al相;另一类是尺寸相对较小的球形或近球形颗粒,标记为 α_2 -Al相^[26]。此外,观察到 α -Al呈现出“大脑袋,细脖子”的形态,这是枝晶生长过程中出现的枝晶颈缩或枝晶熔断、分离现象。铸态下, α_1 -Al较多且分布均匀,并存在大量枝晶颈缩现象, α_2 -Al相对较少且尺寸较小,共晶Si呈现纤维状与球状,同时发现了少量的针状AlFeSi相。当加入Sr对铝合金进行变质处理时,Sr原子会吸附在共晶Si的生长界面上,抑制其沿某些方向的生长,改变共晶Si的生长

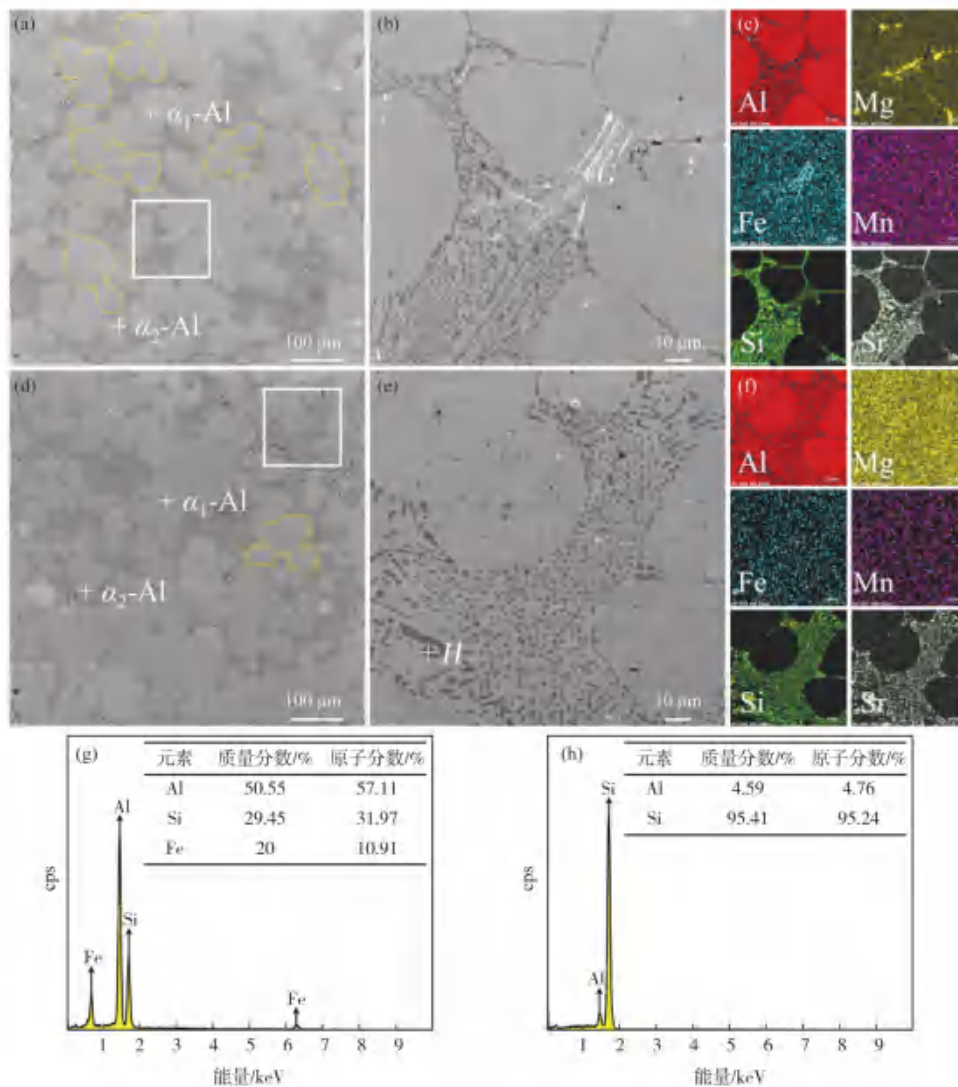


图9 挤压铸造试样铸态与T6热处理状态下的组织形貌特征及能谱统计

Fig. 9 Microstructure characteristics and EDS statistics of squeeze-cast samples in as-cast and T6 heat-treated states

方式,最终使共晶Si以纤维状和球状形态均匀分布在铝合金基体中,避免了粗大片状或棒状共晶Si的生成。如图9(d)-(f)所示,T6热处理后,部分 α_1 -Al长大,枝晶颈缩现象有所减少,析出了大量的 α_2 -Al,并且多数 α_2 -Al尺寸较大更接近球形,共晶Si呈现更加细小、弥散的球状。为了进一步确定针状AlFeSi相和共晶Si相的具体成分,如图9(g)-(h)所示,分别对这两种相进行了EDS点扫,进一步确定了相组成成分^[27]。诸多研究显示,变质处理与适当的热处理工艺协同作用,能够提升变质效果。在热处理过程中,共晶Si并不会溶解于基体内再析出,而是经历熔断和粒化阶段,最终聚集球化。其中,熔断发生在共晶Si分枝、凹陷等畸变能较高的部位,粒化则是共晶Si逐渐圆钝化^[28-29]。正是这种热处理过程促使共晶Si形成更加细小、弥散的球状形态,这种细小弥散分布的共晶Si颗粒能够阻碍位错的运动,增加位错运动的阻力,从而产生弥散强化效果,通过弥散强化机制显著提高了隔框铸件的性能。

取铸件加强筋B处的试样,进行EBSD微观组织分析。图10(a)是挤压铸造试样铸态EBSD反极图(Inverse Pole Figures, IPF),图中不同颜色表示不同取向的晶粒。图10(b)是相应的EBSD晶界图(Grain Boundary, GB),图中红色线表示小角度晶界(Low-angle Grain Boundaries, LAGBs),黑色线表示大角度

晶界(High-angle Grain Boundaries, HAGBs)。图10(c)是挤压铸造试样经过T6热处理后的IPF图,图10(d)是相应的GB图。图11(a)、(b)为挤压铸造试样铸态的晶粒尺寸统计、取向差角分布,薄壁位置的平均晶粒尺寸为37.75 μm ,最大晶粒尺寸为189.69 μm ,LAGBs占比为36.4%。相比之下,挤压铸造试样在T6热处理状态下薄壁位置的平均晶粒尺寸为37.97 μm ,最大晶粒尺寸为184.35 μm ,LAGBs占比为24%,如图11(c)、(d)所示。热处理后薄壁位置的平均晶粒尺寸与铸态相比略有增大,这是由于热处理过程中的原子扩散导致晶粒生长,最大晶粒尺寸却明显下降,这是因为热处理后 α_1 -Al长大,析出了大量的 α_2 -Al,这与SEM微观组织表征结果一致。热处理后LAGBs占比明显低于铸态,这表明热处理有效减少了材料中的位错和晶格畸变,使材料的晶体结构更加稳定。T6热处理后HAGBs的比例从63.6%增加到76%。这表明试验合金在T6热处理过程中发生了LAGBs向HAGBs的转变,这可能与晶界附近原子的重排有关。结果表明,T6热处理能有效地提高挤压铸造隔框试验合金中的HAGBs比例,并保持晶粒度的稳定^[29]。

2.5 拉伸性能及断口

图12(a)给出了不同工艺条件下试验合金的拉伸曲线。重力铸造下合金的抗拉强度(UTS)、屈

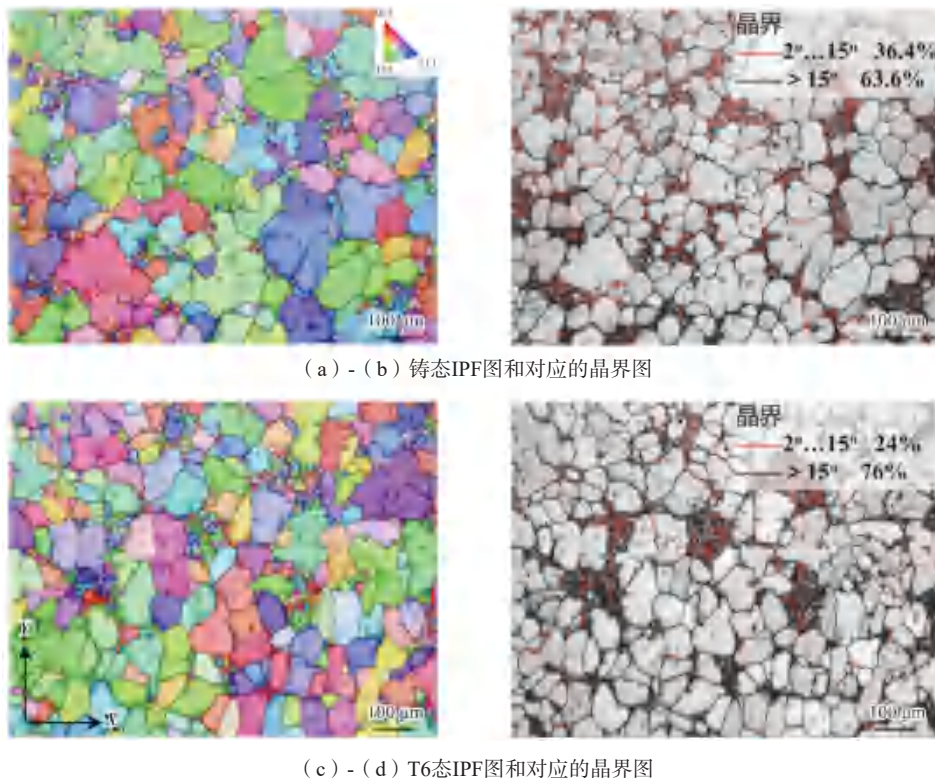


图10 挤压铸造试样铸态与T6热处理状态下的EBSD图

Fig. 10 EBSD images of squeeze-cast samples in as-cast and T6 heat-treated states

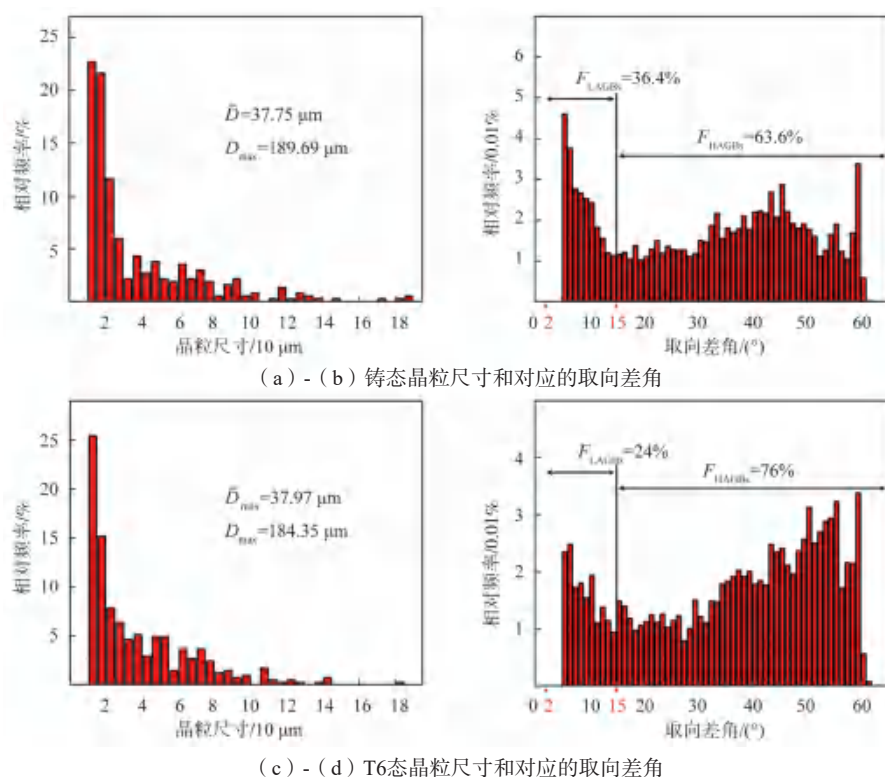


图11 挤压铸造试样铸态与T6热处理状态下的EBSD数据统计

Fig. 11 EBSD data statistics of squeeze-cast samples in as-cast and T6 heat-treated states

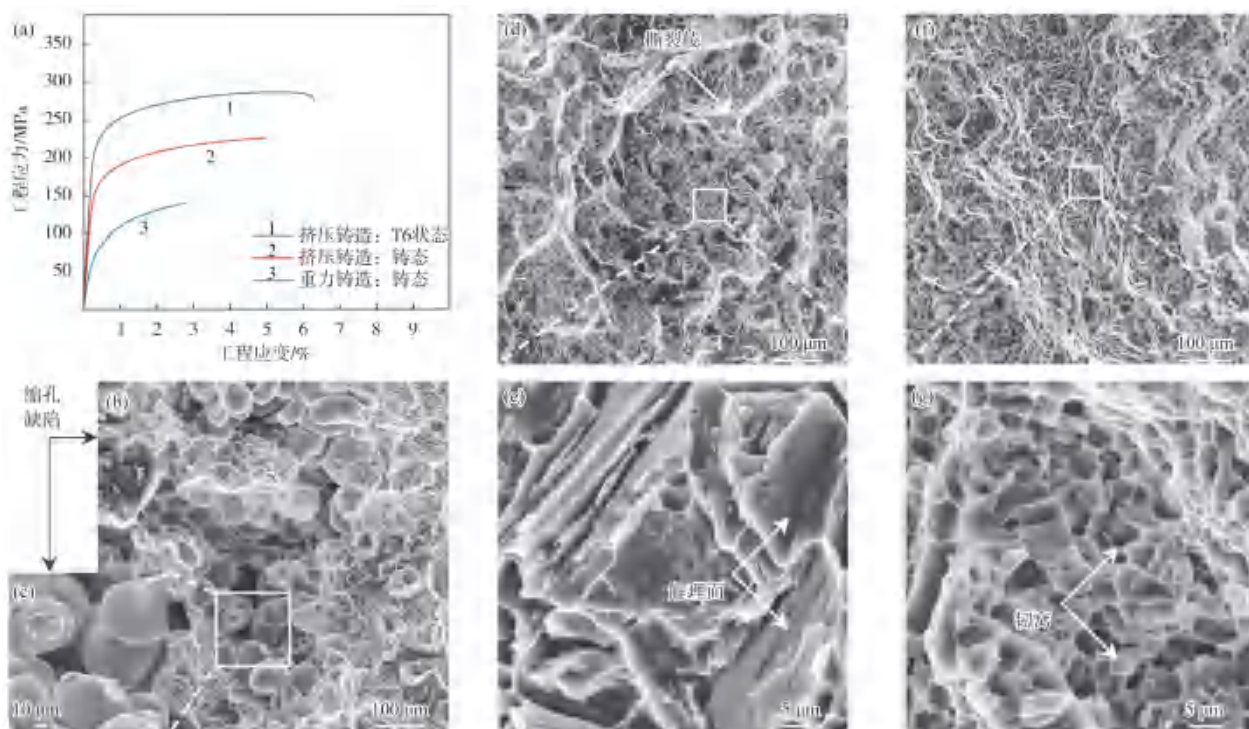


图12 取自重力铸造铸态、挤压铸造铸态和挤压铸造T6热处理状态的试样工程应力应变曲线和断口形貌

Fig. 12 Engineering stress-strain curves and fracture morphologies of samples taken from as-cast gravity castings, as-cast squeeze castings, and squeeze castings after T6 heat treatment

服强度 (YS) 和伸长率 (EL) 分别为140 MPa、85 MPa和2.8%。挤压铸造无热处理态的UTS是229 MPa, YS是170 MPa, EL是5%。挤压铸造后进行T6热处理的UTS是287 MPa, YS是204 MPa, EL是6.3%。如图12 (b)、(c) 所示, 重力铸造铸态试样的断口, 能够观察到典型的缩孔缺陷形貌, 缺陷的形态特征是光滑、致密的球形结构, 并且表面呈现深灰色^[30]。如图12 (d)、(e) 所示, 挤压铸造无热处理态的断口存在大量浅小的韧窝, 同时观察到更多的解理面, 这对试样的断裂伸长率是不利的。如图12 (f)、(g) 所示, 挤压铸造后进行T6热处理的断裂方式是韧性断裂, 断口表面能够观察到大量均匀分布的深等轴韧窝, 说明其塑性较好, 这与拉伸试验的性能结果相符。

3 结论

(1) 卷气主要集中在铸件侧壁上方, 这种卷气现象会导致铸件侧壁产生气孔等缺陷, 影响铸件的力学

性能。缩孔主要出现在加强筋与外侧厚壁交界R角处。当冲头挤压力从1 600 kN增加到2 400 kN时, 可有效提高熔体补缩能力, 明显改善铸件内部质量。目前, 受到设备能力的限制, 在后续研究中, 将进一步考虑加入局部加载挤压销和挤压块, 以进一步提高铸件厚大位置的致密度。

(2) 采用ProCAST软件计算试验铝合金平衡相组成, 并依据相关热力学固体扩散模型Scheil预测了固相线和液相线温度。XRD图谱检测结果验证了合金挤压铸造试样的主要构成是 α -Al和共晶Si相。DSC曲线计算的熔点和凝固温度区间与预测一致, 固液区间相对较窄, 表明该铝合金具有良好的铸造性能。

(3) 变质处理与适当的热处理工艺协同作用, 使得共晶Si形成更加细小、弥散的球状形态, 提高变质效果。这种弥散强化机制, 是T6热处理使挤压铸造隔框铸件力学性能提高的主要原因。热处理后挤压铸造试样的UTS提高了25%, YS提高了20%, EL提高了26%。

参考文献:

- [1] 李萌, 相志磊, 李雷哲, 等. Mn 元素对 Al-Si-Cu-Mg 合金富铁相形貌及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2025, 74 (4): 479-486.
- [2] Hou Q H, Wu X L, Li Z Y, et al. Artificial intelligence enabled microstructure prediction in Al alloy castings [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2026, 241: 21-34.
- [3] Lei Y Q, Zhao H D, Bai W H, et al. Microstructure, mechanical properties and residual stress of high vacuum die casting AlSi10MgMn alloys with different spray quenching [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 325: 118284.
- [4] Lui W N, Zhang W, Wang P Y, et al. Effect of slow shot speed on externally solidified crystal, porosity and tensile property in a newly developed high-pressure die-cast Al-Si alloy [J]. China Foundry, 2024, 21 (1): 11-19.
- [5] Dong X X, Liu Q, Han W J, et al. Intelligent development of high strength and ductile heat treatment-free Al-Si-Mg alloys for integrated die casting through the machine learning of experimental big data [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1021: 179769.
- [6] Dalai B, Jonsson S, Silva M, et al. Evaluation of detrimental effect on the ductility caused by the inhomogeneous skin and casting defects in a high pressure die cast recycled secondary alloy [J]. Materials Characterization, 2025, 221: 114775.
- [7] 曾根华, 冯俊鹏, 马腾飞, 等. Al-5Ti-1B 对铸造 A356.2 铝合金组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2025, 74 (10): 1358-1365.
- [8] Jiang J F, Yan J, Liu Y Z, et al. Microstructure and properties of 35 kg large aluminum alloy flywheel housing components formed by squeeze casting with local pressure compensation [J]. China Foundry, 2024, 21 (5): 563-576.
- [9] Liu W Q, Zhang R J, Wu X Y, et al. Multi-scale simulation of grain evolution during indirect squeeze casting with considering solute suppressed nucleation and externally solidified crystals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 342: 118944.
- [10] Su Z W, Xiao Z Y, Zeng Z R, et al. Microstructure and mechanical properties of squeeze-cast Al-5.0Cu-1Mn-based alloys with different Ni content [J]. Materials & Design, 2023, 229: 111901.
- [11] Lang Z H, Wang F, Du X D, et al. Synergetic optimization of mechanical-thermal matching properties of vacuum die-cast Al-6Si-0.6Mg alloy: via slow shot speed regulation coupled with heat treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2026, 1050: 185472.
- [12] Han J, Dong G J, Li S D, et al. Uneven distribution of cooling rate, microstructure and mechanical properties for A356-T6 wheels fabricated by low pressure die casting [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 127: 196-210.
- [13] Akhtar S, Liu Y X, Wang P Z, et al. Understanding the formation mechanism of defect bands through ESCs evolution in non-heat-treated high-pressure die-cast AlSi9MnVZr alloy: role of shot speeds and intensification pressure [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 341: 118915.
- [14] Qin G L, Lin J, Liu X, et al. Effect of pouring temperature on distribution characteristics and formation mechanism of eutectic-rich band in vacuum-assisted high pressure die casting AlSi9MnMg alloy [J]. Journal of Materials Processing

- Technology, 2025, 345: 119066.
- [15] Fu J J, Zheng H T, Guo L M, et al. Microstructure, eutectic Si distribution, and mechanical properties of Al-6Si-Mg high pressure die castings with long mold filling distance [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 150: 391–406.
- [16] Deng W, Song Z M, Lei J L, et al. Multi-objective optimization of A356 engine block casting process parameters based on response surface method and NSGA-II genetic algorithm [J]. International Journal of Metalcasting, 2025, 19: 3566–3584.
- [17] 胡立军, 朱宇骁, 张海潮. A356.0铝合金半固态制浆技术在重力铸造中的应用研究 [J]. 铸造, 2025, 74 (4): 515–521.
- [18] 李雪科, 田战峰, 汪建余, 等. Si含量及模具温度对压铸Al-Si合金流动性的影响 [J]. 铸造, 2025, 74 (9): 1256–1262.
- [19] Liu L, Yang W X, Zhao K, et al. The effects of TiB₂ on segregation bands, porosities and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys by high pressure die-casting [J]. Materials Characterization, 2025, 221: 114741.
- [20] Dong J, Jiang J F, Wang Y, et al. Effect of Er, Zr, V, Ti microalloying and multi-field coupling melt deep purification on the microstructure and mechanical properties of Al-12Si-4.5Cu-2Ni alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2025, 923: 147706.
- [21] 孙震兆, 李兴华, 刘春伟, 等. 两种细化剂复合应用对A356铝合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2025, 74 (6): 759–766.
- [22] 陈诚诚, 秦泽斌, 尚辉良, 等. 微量元素对铸造Al-Si合金中Sr变质行为的毒化效应 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (12): 1307–1311.
- [23] 陶修坤, 方伟, 刘露露, 等. A356.2合金Sb变质特点及其组织演变 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (5): 743–749.
- [24] 杨钱峰, 朱翔鹰, 刘亚, 等. 铝锰压铸铝合金铸造性能的正交试验研究 [J]. 热加工工艺, 2024, 53 (19): 93–97.
- [25] Liu H B, Su H G, Fu D F, et al. Phase evolution in AlSi20/8009 aluminum alloy during high temperature heating near melting point and cooling processes [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30 (5): 1157–1168.
- [26] 汪鹏程, 柳飞洪, 闫赛飞, 等. 低过热度倾斜板流变压铸对ADC12组织及力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (5): 540–545.
- [27] Mohammed W, Chen X R, Ponge D, et al. Thermodynamics-guided design of sustainable secondary Al-Si alloys for enhanced Fe-impurity tolerance and optimized Mn doping [J]. Acta Materialia, 2025, 289: 120932.
- [28] 姜巨福, 王迎, 肖冠菲, 等. 变质细化和热处理对挤压铸造成形A356铝合金构件性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2020, 34 (12): 881–891.
- [29] Peng J F, Yuan S J, Wang W L, et al. Effect of short solution and artificial aging on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg-La-Ce alloy formed by high pressure die casting [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1020: 179436.
- [30] Zhang Z W, Gao M Q, Ning Y H, et al. Improving the defects and mechanical properties via secondary loading in a squeeze casting heat-treated Al-Cu alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 2971–2976.