

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5104

Al-7Si-Mg-Cu 合金压铸工艺优化及其 充型沿程组织与性能演变规律研究

张增硕¹, 姜凯曦¹, 于巍¹, 白玉^{1,2}, 郝海^{1,2}

(1. 大连理工大学材料学院, 辽宁大连 116023; 2. 大连理工大学宁波研究院, 浙江宁波 315016)

摘要:针对现阶段大型复杂压铸件一体化成形所面临的工艺调控困难、产品合格率低与不同区域性能差异大等问题,基于材料基因工程思想,使用集成计算平台研究了压铸工艺中浇注温度和模具温度对铸件组织与性能的影响,利用模拟优化参数进行了实验验证,并进一步研究了不同充型距离对材料组织与性能的影响。结果表明,随着模具温度升高,熔体充型能力得以提高,晶粒尺寸有所增加,而孔隙率呈减小趋势。同时,随浇注温度升高,熔体充型能力、晶粒尺寸与孔隙率均有所增加。当浇注温度为 750 ℃,模具温度为 250 ℃时合金具有良好的充型能力与微观组织。随充型距离的增加,合金中的压室预结晶组织(ESCs)的面积分数呈减小趋势,其形貌由粗大树枝晶转变为破碎枝晶状、条状或球粒状,并且其孔隙率呈现先减小后增加的趋势,力学性能则呈现先增加后减小的趋势。在充型 650 mm 时仍具有较好的力学性能,表明在该工艺参数下 Al-7Si-Mg-Cu 合金的允许最大充型距离达到 650 mm。

关键词: Al-7Si-Mg-Cu; 高压铸造; 集成计算; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)06-0531-10

Optimization of Die-casting Process for Al-7Si-Mg-Cu and Study of the Microstructure and Performance Evolution along the Fluidity Length

ZHANG Zengshuo¹, JIANG Kaixi¹, YU Wei¹, BAI Yu^{1,2}, HAO Hai^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China)

Abstract: To address the current challenges of difficult process control, low product qualification rates, and significant performance disparities among various sections in large complex die-castings, the effects of pouring temperature and mold temperature on the microstructure and properties of die-castings were investigated via an integrated computational platform guided by the concept of material genetic engineering. The experimental preparation was carried out via the parameters used in the simulation, and the effects of different filling distances on the microstructure and properties of the materials were further studied. The results show that with increasing mold temperature, the melt flow ability increases, the grain size increases, and the porosity decreases. Similarly, with increasing pouring temperature, the melt flow ability, grain size and porosity increase. When the pouring temperature is 750 ℃ and the mold temperature is 250 ℃, the alloy has good filling ability and microstructure. The analysis of microstructure and mechanical properties under different filling distances shows that with increasing filling distance, the area fraction of ESCs (externally solidified crystals) decreases, and their morphology changes from coarse dendrites to broken dendrites, strips and spheres. The porosity first decreases but then increases, and the mechanical properties first increase but then decrease. The material still has good mechanical properties at 650 mm, indicating that the maximum allowable filling distance of the Al-7Si-Mg-Cu alloy reaches 650 mm under this process.

Key words: Al-7Si-Mg-Cu; high-pressure die-casting; integrated computing; microstructure; mechanical property

收稿日期: 2025-06-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52171030)

作者简介: 张增硕, 1999 年生, 博士生. 研究方向为高强韧铝合金成型制备与数值模拟. Email: 17772683646@163.com

通信作者: 于巍, 1995 年生, 博士, 助理教授. 研究方向为高强铝合金半固态成型、铝锂合金非平衡凝固及多场耦合仿真模拟等.
Email: yw@dlut.edu.cn

引用格式: 张增硕, 姜凯曦, 于巍, 白玉, 郝海. Al-7Si-Mg-Cu 合金压铸工艺优化及其充型沿程组织与性能演变规律研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(6): 531-540.

ZHANG Z S, JIANG K X, YU W, BAI Y, HAO H. Optimization of die-casting process for Al-7Si-Mg-Cu and study of the microstructure and performance evolution along the fluidity length[J]. Foundry Technology, 2025, 46(6): 531-540.

Al-Si-Mg-Cu 合金具有流动性好、比强度高、延展性好、耐蚀性优异等特点,在汽车、航空航天等领域得到较为广泛的应用^[1-3]。特别是在汽车行业,在汽车轻量化及复杂构件一体化压铸兴起的背景下,Al-Si-Mg-Cu 合金凭借其优异的流动性和力学性能成为了汽车零部件制造的普遍选择^[4-6]。高压压铸作为一种快速近净成形工艺,因其生产效率、尺寸精度高和力学性能优异等特点,被广泛应用于壁厚小、尺寸精度高且结构复杂的汽车零部件生产中^[7-9]。Al-Si-Mg-Cu 合金熔体在填充薄壁结构件过程中,首先在压室中短暂停留,熔体与压室内壁接触部位存在较大过冷度,使得该位置熔体开始形核并长大,形成粗大树枝状的 α -Al,压室预结晶组织(externally solidified crystals, ESCs)。随后熔体在高压作用下快速压入型腔,并在高压的持续作用下充型和凝固。在这一过程中其组织经历一系列转变,影响熔体的充型过程。有研究表明,压铸工艺参数对压铸件的微观组织、充型能力与力学性能有显著影响^[10-12]。但缺少一种对压铸工艺参数快速、准确的选择方法,如浇注温度和模具温度等。目前,主要通过传统的经验试错法对其在某一区间逐步实验或模拟来获取,耗费大量时间与精力^[13]。同时,国内外学者对压铸铝合金的研究大多集中在微合金化^[14-16]、细化剂的开发^[17-19]与陶瓷颗粒相的复合^[20-22],对其压铸过程中的充型距离-组织/缺陷-力学性能的演变规律缺少系统研究。

随着全球数字化与智能化的不断推进,数值模拟技术与材料基因工程思想在材料领域获得了广泛应用,这大幅提升了新材料的研发效率,缩短了研发周期,降低了研发成本^[23-25]。因此,本文通过集成计算平台关联 ProCAST 模拟软件与 MATLAB 分析软件,基于序列二次规划法(sequential quadratic programming, SQP)优化算法,对压铸 Al-7Si-Mg-Cu 合金的工艺参数进行高效快速的寻优计算,并研究其在充型复杂结构件时微观组织与力学性能的演化规律。这对快速、高效获得大型复杂压铸件的工艺参数,确定合金的允许最大充型距离,改善复杂结构铸件综合力学性能有积极意义。

1 数值模拟与实验

1.1 数值模拟

使用 SolidWorks 2020 三维建模软件建立薄壁结构的螺旋状模型,如图 1 所示,每段宽 6 mm,厚 3 mm。将其导出为 *.igs 文件,然后导入 ProCAST 2018 模拟软件中进行非均匀网格划分、初始条件等

基本参数和求解条件的设定。其中,使用 Mesh 模块对模型进行前处理的拓扑关系检查、网格划分等,使用 Cast 模块进行各模拟所需参数设置和运行模拟计算,使用 View 模块进行后处理结果分析,最终得到熔体在薄壁结构件中的充型特征、孔隙大小与分布、晶粒尺寸等模拟结果。数值模拟工艺参数如表 1 所示。

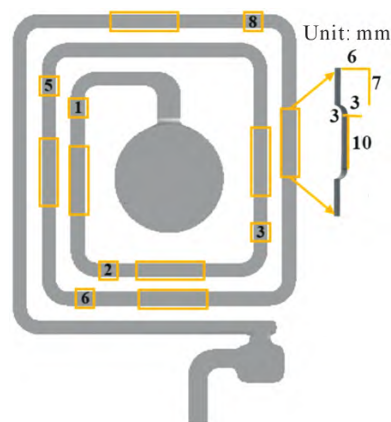


图 1 薄壁结构的螺旋状模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of a spiral model of a thin-walled structure

表 1 模拟工艺参数

Tab.1 Simulated process parameters

Parameter	Value
Grid Type	Tetrahedral mesh
Size of grids/mm	1~5
Total number of grids	790326
Casting material	Al-7Si-0.45Mg-0.3Cu
Mold material	DAC
Pouring temperature/°C	750
Mold temperature/°C	250
Coefficient of heat transfer/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	2 000
Casting pressure/MPa	14
Low-speed die-casting/(m·s ⁻¹)	0.2
High-speed die-casting/(m·s ⁻¹)	6

1.2 集成计算平台的搭建

本研究采用 ProCAST 仿真软件和 MATLAB 数值分析软件,利用集成计算平台执行批量加工脚本,获得最佳浇注温度和模具温度。选取 Al-7Si-Mg-Cu 压铸合金浇注温度和模具温度作为迭代变量,并将浇注温度选在 680~800 °C,模具温度选在 140~300 °C。选取模拟结果的孔隙率和晶粒尺寸作为目标变量。相较于其他序列线性规划(sequential linear programming, SLP)、拟牛顿方法(broyden-fletcher-goldfarb-shanno, BFGS)等优化算法, SQP 算法通过在每个迭代中求解一个二次规划子问题来逐步逼近最优解,具有收敛性好、计算效率高、边界搜索能力强等优点,广泛用于求解非线性优化问题中^[26],其核心思想是利用泰勒展开式将非线性约束问题,如式(1)所

示,在迭代点 X^k 处简化成二次函数,将约束条件简化成线性函数,结果如式(2)所示。因此,采用 SQP 优化算法对迭代变量进行模拟,便于浇注温度和模具温度的快速优化计算。具体操作流程如图 2 所示,首先对铸件进行网格划分,然后创建 ProCAST 材料成分和压铸仿真参数输入脚本,最后将工艺参数(浇注温度和模具预热温度)、ProCAST 和 MATLAB 软件调用脚本、目标变量(孔隙率和晶粒尺寸)依次添加到集成计算平台的界面中,选择 SQP 优化算法进行迭代计算^[26-27]。

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.t. } g_u(x) \leq 0 (u=1, 2, \dots, p) \\ h_v(x) = 0 (v=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \min f(X) &= \frac{1}{2} [X - X^k]^T \nabla^2 f(X^k) [X - X^k] + \nabla f(X^k)^T [X - X^k] \\ \text{s.t. } \nabla g_u(X^k)^T [X - X^k] + g_u(X^k) &\leq 0 (u=1, 2, \dots, p) \\ \nabla h_v(X^k)^T [X - X^k] + h_v(X^k) &= 0 (v=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (2)$$

1.3 实验制备与表征

实验原料为纯铝、Al-20Si、Al-10Mg 和 Al-50Cu 等中间合金,按一定配比放置于电磁感应熔炼炉中加热,并用模温机将模具温度控制在 250 ℃,待温度达到 750 ℃ 时对熔体进行扒渣后开始压铸实验,压铸机型号为 CSV280 立式真空压铸机。

为研究不同充型距离下微观组织与力学性能演变规律,在铸件的各段位置分别选择一个区域(图 1),制备成金相试块与拉伸片试样,并将其命名为 1~8

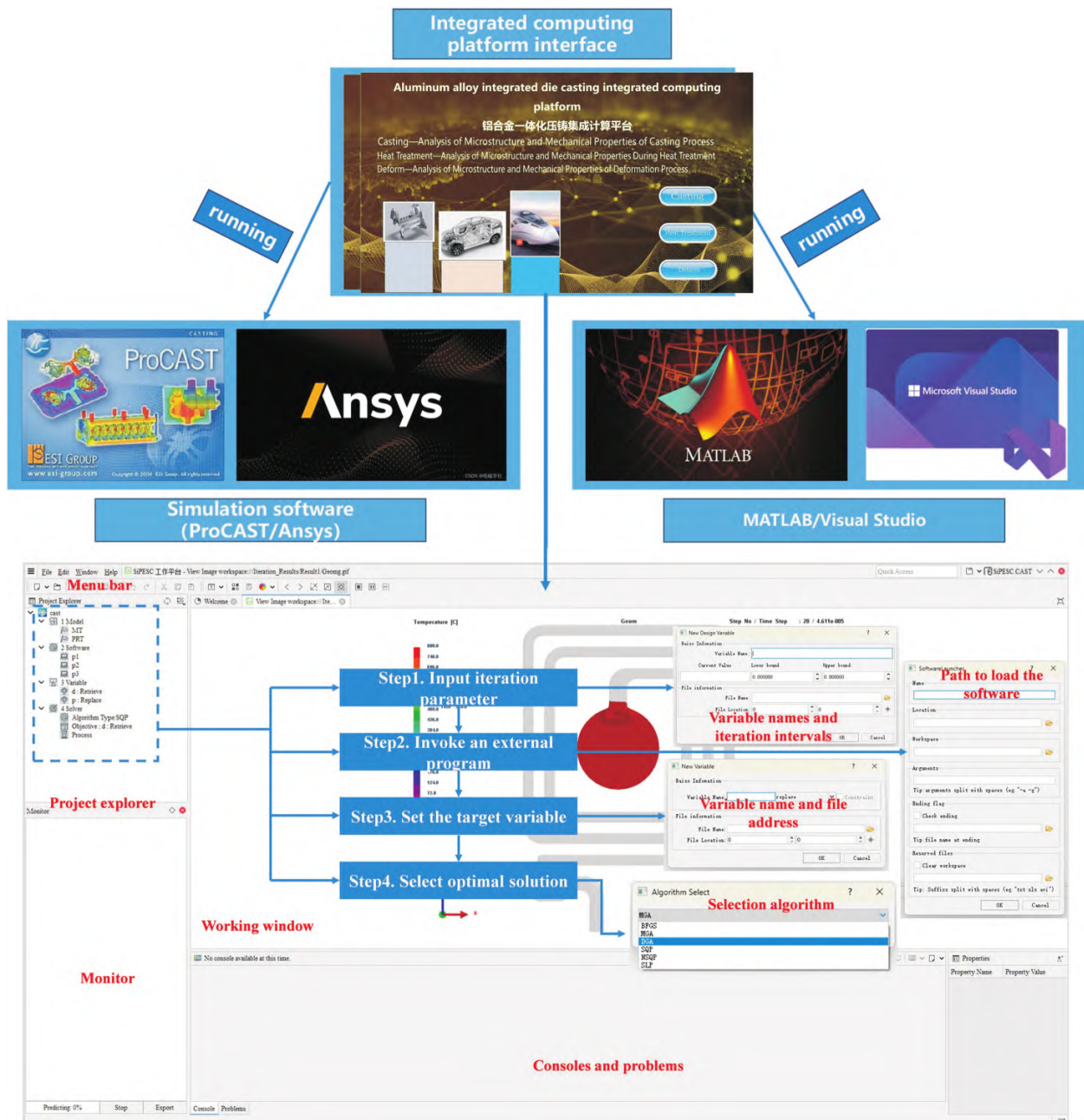


图 2 集成计算平台的压铸工艺参数迭代流程

Fig.2 Iterative flowchart of the die-casting process parameters of the integrated computing platform

号。然后,将金相试块研磨抛光,表面呈镜面后使用凯勒试剂对其腐蚀 15~20 s,在 DMi8 (2019A152)金相显微镜下进行金相组织的观察和采集,在配有EDS和EBSD的场发射扫描电子显微镜(SEM, ZEISS)下对金相试块的微观组织和第二相分布进行观察和采集。使用 X 射线荧光光谱分析(XRF-1800)和 X 射线衍射(SmartLab 9Kw)检测金相试块的化学成分和相组成,其中 X 射线衍射扫描速度为 4 (°)/min,扫描角度为 10°~90°。使用万能试验机(DNS300)对拉伸片进行室温拉伸测试,其中拉伸片的标距长为 10 mm、宽 3 mm、厚 3 mm,拉伸速率为 1 mm/min。同样的,对拉伸断裂后的断口形貌,使用场发射扫描电子显微镜进行观察和采集。

2 实验结果及讨论

2.1 集成计算平台迭代结果与分析

大量研究表明,铸造温度和模具预热温度对合金的性能有显著影响。过高或过低的浇注温度和模具温度都会造成铸件缺陷^[28-29]。因此,将浇注温度和模具温度控制在要求范围内是获得高质量压铸件的关键。通过集成计算平台,调用仿真软件ProCAST和数学分析软件 MATLAB,在 SQP 优化算法下对浇注温度与模具温度进行自动迭代计算,在每次迭代结果与前一次已迭代计算完成的结果对比后调整迭代变量区间的迭代方向与步长后继续迭代,最终逐步逼近最优结果。在迭代 32 次后迭代结束并将每次模拟结果与模拟源文件导入到对应迭代次数文件中进行储存。各组浇铸温度和模具温度对应的充型距离、晶粒尺寸、孔隙率结果如表 2 所示。当浇注温度为 750 °C,模具温度为 218~250 °C 时,由表 2 中第 18、26、32 组的模拟结果可知,随着模具温度的升高,充型距离和晶粒尺寸有增大趋势,而孔隙率呈减小趋势。当模具温度为 250 °C,浇注温度为 701~755 °C 时,由第 11、29、30 组的模拟结果可知,充型距离、孔隙率和晶粒尺寸均随着浇注温度的升高而增大。筛选填充结果为 100%的所有数据,得到 1、6、8、14、30、32 组模拟结果。通过对比可知,在充型完全的前提下,浇注温度为 750 °C,模具温度为 250 °C 时,晶粒尺寸和孔隙率最优。

选取浇注温度为 750 °C 和模具温度为 250 °C 的模拟结果进行分析,如图 3 所示,并以该参数作为样品制备的实验参数。图 3a1 和 a2 为合金的充型过程仿真模拟结果,可知,在压力作用下熔体首先沿着模具外壁进行充型,如图中蓝色长框所示,易在充型过程中产生气体残留而在后续凝固过程中

表2 浇注温度和模具预热温度的迭代结果
Tab.2 Iterative results of pouring temperature and mold preheating temperature

Iterations	Pouring Temperature /°C	Mold Temperature /°C	Filling distance /%	Grain size /μm	Shrinkage porosity/%
1	800	300	100	32.9	1.7
2	667	279	83.7	23.5	0.97
3	681	141	77.1	26.9	1.18
4	697	254	88.1	36.2	1.3
5	730	260	94.5	32.9	1.5
6	800	267	100	34.9	1.8
7	756	228	95.6	28.5	2.1
8	760	240	100	29.5	3.0
9	689	221	83.7	24.9	1.0
10	782	172	93.1	26.2	2.0
11	701	250	88.1	25.9	1.2
12	792	158	93.5	29.5	2.8
13	719	188	86.8	34.2	1.7
14	791	276	100	36.5	1.9
15	725	144	84.6	30.5	1.7
16	719	286	94.8	25.5	1.6
17	723	244	91.9	32.5	1.7
18	750	235	97.3	27.2	2.0
19	672	221	80.3	22.5	1.2
20	691	157	79.8	25.9	1.4
21	729	210	93.0	35.5	2.4
22	795	187	95.0	24.9	2.0
23	695	275	89.9	30.5	1.6
24	715	211	91.4	30.9	1.5
25	680	263	85.1	23.9	1.2
26	750	218	96.4	25.5	2.6
27	740	153	91.3	24.9	1.9
28	700	180	82.8	26.2	1.4
29	740	250	95.0	27.9	1.5
30	755	250	100	28.7	2.2
31	720	270	93.5	27.5	1.6
32	750	250	100	28.5	1.8

表3 Al-7Si-Mg-Cu合金化学成分
Tab.3 Chemical composition of the Al-7Si-0.45Mg-0.3Cu alloy

(mass fraction/%)				
Alloy	Si	Mg	Cu	Al
Al-7Si-Mg-Cu	6.79	0.41	0.34	Bal.

产生气孔等缺陷,如图 3a2 中蓝色圆框所示。在充型结束后熔体开始凝固,如图 3a3 和 a4 所示,其凝固顺序为由外到内,且每段拐角与中心位置先凝固,如图蓝色方框位置所示。图 3b 为孔隙率模拟结果,也为迭代结果中的孔隙率,图 3c 为不同充型距离下的晶粒尺寸模拟结果,该图的平均晶粒尺寸即为迭代结果中的晶粒尺寸结果。图 4a 为 EBSD 测试得到的

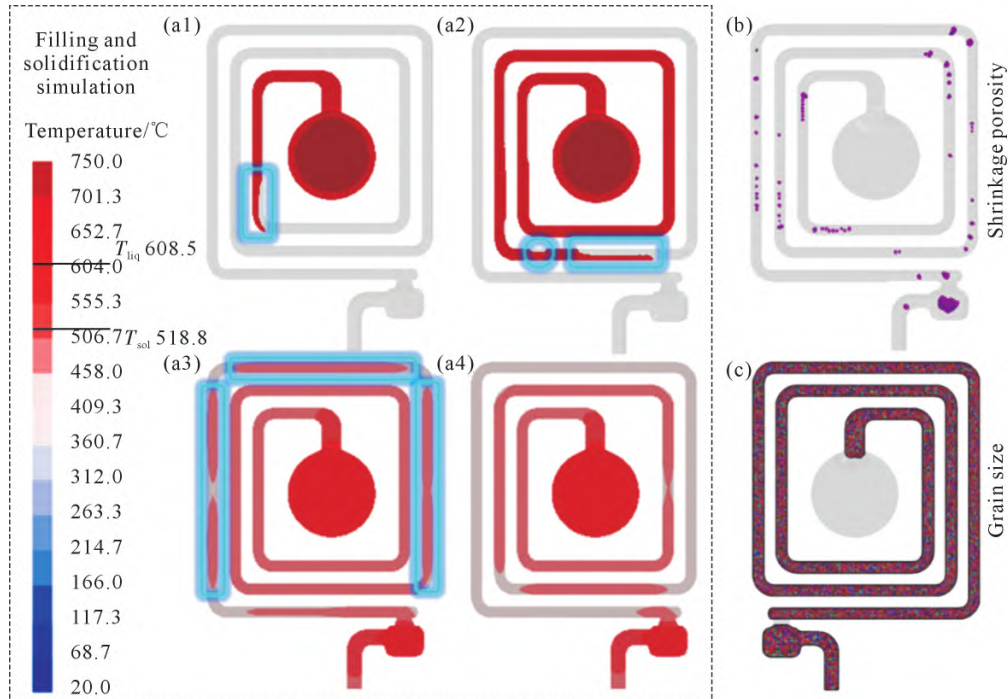


图3 最优工艺参数下模拟结果:(a1~a4) 充型与凝固过程;(b) 孔隙率模拟结果;(c) 不同充型距离下晶粒尺寸模拟结果
Fig.3 Simulation results under the optimal process parameters: (a1~a4) filling and solidification simulation; (b) simulation result of shrinkage porosity; (c) simulation result of grain size under different filling distances

晶粒重建图,统计得到平均晶粒尺寸为 $22.4\ \mu\text{m}$,图4b 为相应位置的晶粒尺寸模拟结果图,该模拟得到的平均晶粒尺寸为 $21.2\ \mu\text{m}$,证明了模拟所得结果

具有一定的准确性。

2.2 实验结果与分析

压铸 Al-7Si-Mg-Cu 合金的化学成分如表 3 所

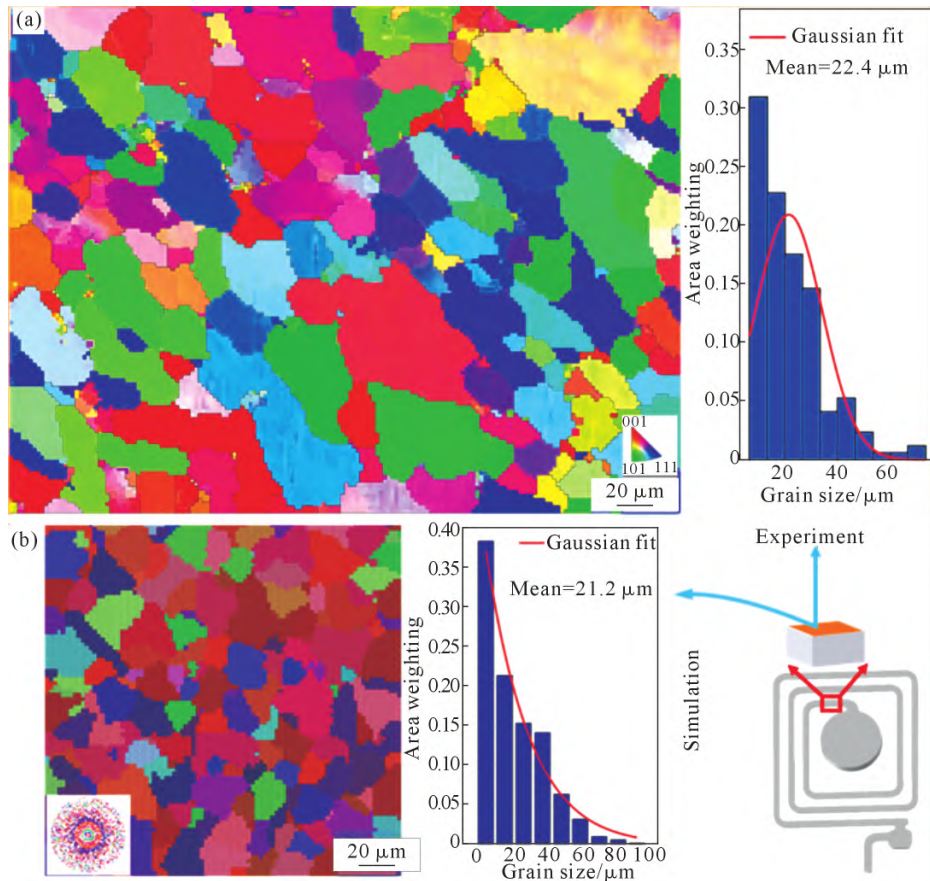


图4 Al-7Si-Mg-Cu 合金的晶粒重建与晶粒模拟结果:(a) 实验所测晶粒重建;(b) 晶粒模拟结果
Fig.4 Grain reconstruction diagrams and grain simulation result diagrams of the Al-7Si-Mg-Cu alloy: (a) reconstructed grain diagram measured in the experiment; (b) simulation result of the grains

示。图5为压铸Al-7Si-Mg-Cu合金的XRD结果。在XRD图谱中可以明显观察到 α -Al和Si的衍射峰,未观察到 Mg_2Si 、 Al_2Cu 等第二相的衍射峰,这主要是因为Mg、Cu等元素含量较少,导致其衍射峰较弱。

ESC的形貌主要为球粒状、长条状、树枝晶状与破碎的枝晶状^[30-33],图6为Al-7Si-Mg-Cu合金不同充型距离的金相图。通过观察各充型距离下的金相图,发现ESC更多在中心区域偏聚,并且随着充型距离的增加,ESC组织的面积分数整体有所减小,而且在充型末端的金相图中观察到ESC的形貌多为破碎枝晶状、球粒和条状。这是因为在充型

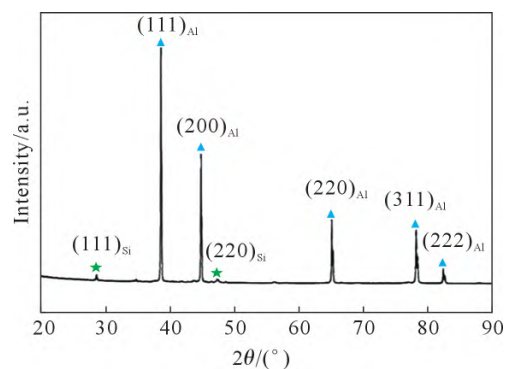


图5 压铸Al-7Si-Mg-Cu合金XRD谱
Fig.5 XRD pattern of die-cast Al-7Si-Mg-Cu alloy

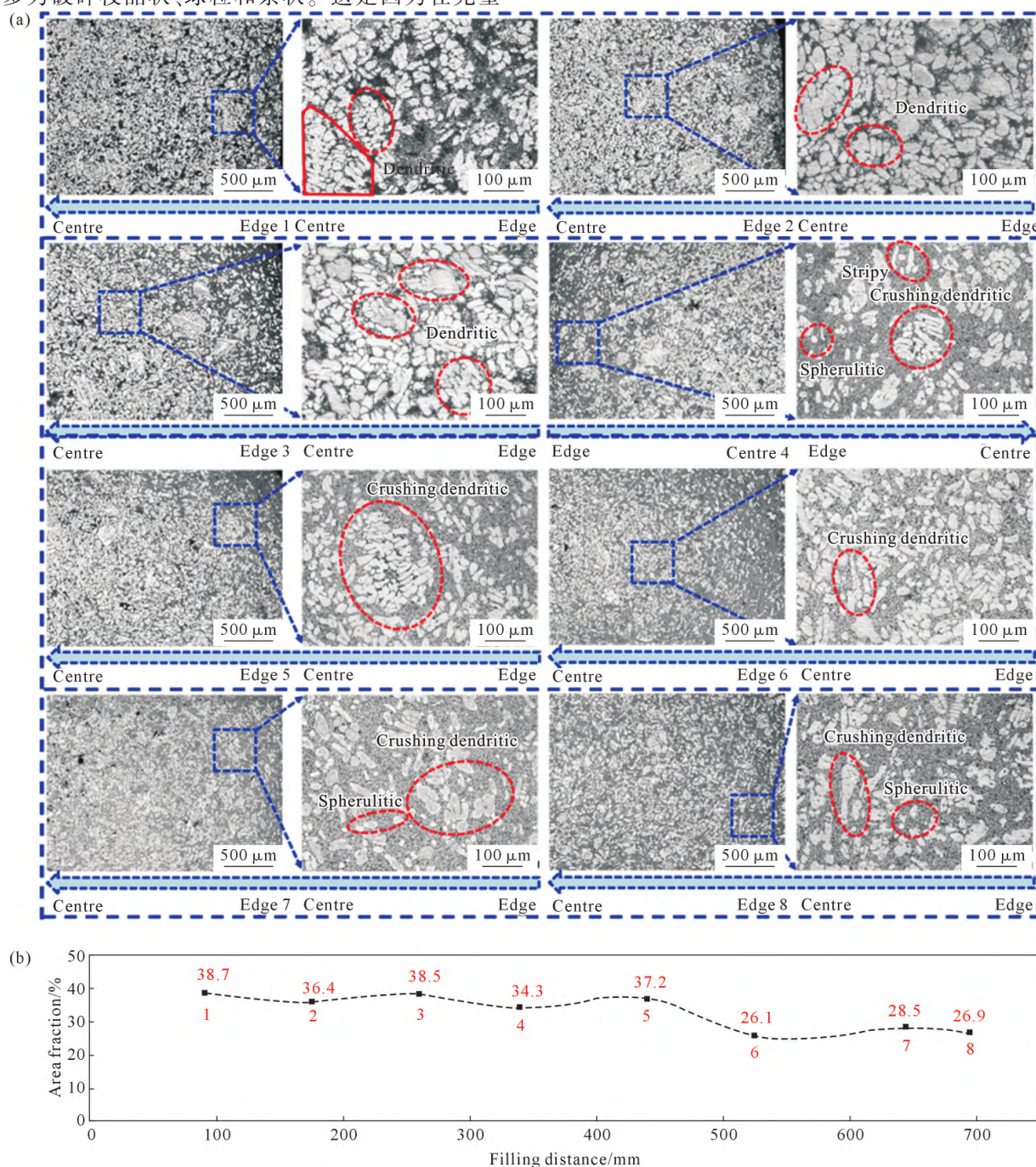


图6 不同充型距离下Al-7Si-Mg-Cu合金金相组织及ESC的面积分数统计结果:(a)金相组织;(b)ESC的面积分数统计结果
Fig.6 Metallographic structure of the Al-7Si-Mg-Cu alloy at different filling distances and statistical results of the ESC area fraction:
(a) metallographic structure; (b) statistical results of the ESC area fraction

过程中,前端熔体在充型过程中与型腔壁发生碰撞,使压室中形成的树枝晶 ESCs 组织破碎而形成残碎的枝晶,在充型过程中尺寸小的条状残晶受阻力较小,受增压压力作用随着熔体运动而进入型腔继续形核长大,最终在充型一定距离下形成细小的枝晶并在中心聚集。且结合图 7 充型结束时,不同充型距离的熔体温度的模拟结果可知,随着充型距离的增加,充型结束时熔体的温度逐渐减小,这表明在充型末端的熔体过热度较小,在模具的快速冷却下熔体开始析出大量(α -Al)_{II},使得残破枝晶生长较慢,而充型前端的熔体仍保持较高的温度,具有较大的过热度,在凝固过程中残破枝晶也开始形核长大。因此,在充型前端的金相图中可以观察到较多

的粗大树枝晶(图 6 中 1~3 金相图),而在充型末端的金相图中 ESCs 多为破碎枝晶、球粒和条状,使得 ESCs 面积分数充型距离的增加有所减小(图 6 中 6~8 金相图)。

图 8 为不同充型距离下 Al-7Si-Mg-Cu 合金的力学性能测试结果,可以看出,随着充型距离的增加,合金屈服强度、抗拉强度与伸长率均呈现先增加后减小的趋势。研究发现当显微组织中存在相当数量的粗大 ESCs 时,会显著降低铸件的屈服强度和硬度^[32]。此外,在压铸过程中,铝合金熔体在高压作用下迅速填充模具型腔,使得充型过程中发生强烈的紊流和喷射效应,导致部分空气无法及时排出,从而被卷入金属液内部,并随熔体运动一同填

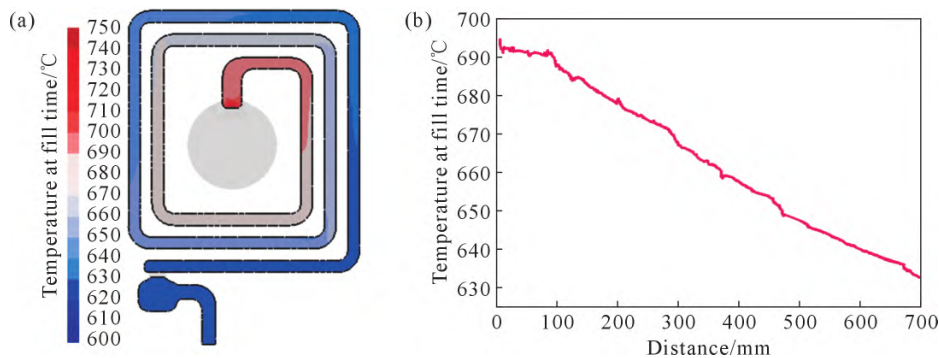


图 7 充型结束时不同充型距离下 Al-7Si-Mg-Cu 合金熔体温度:(a) 模拟结果;(b) 温度曲线

Fig.7 Melt temperature of the Al-7Si-Mg-Cu alloy at different filling distances at the end of filling: (a) simulation result; (b) temperature curve

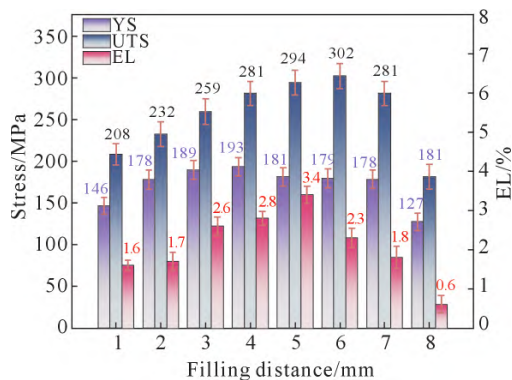


图 8 不同充型距离下 Al-7Si-Mg-Cu 合金力学性能

Fig.8 The mechanical properties of the Al-7Si-Mg-Cu alloy at different filling distances

充整个型腔。在随后的凝固阶段中,这些残存气体在保压压力的作用下发生压缩和变形,最终保留在铸件内部形成气孔或缩松等缺陷,导致材料强度和塑性性能明显降低^[33-34]。通过图 9 中不同充型距离下的断口微观形貌分析可知,试样内部孔隙的大小和数量呈现先减小后增加的趋势。这是因为在充型初始阶段,靠近浇口处的熔体首先流入型腔,此时大量气体尚未排出,在高速流动的熔体带动下,气体以弥散形式分布在铸件中。随着充型距离的逐渐

增加,熔体温度逐步下降,流动阻力增大,流速减缓,有利于气体的排出,因此弥散气孔的数量和尺寸也随之减少。然而,当充型距离进一步增加时,熔体温度进一步降低,固相率增加,流动性变差,同时前端熔体长时间暴露在空气中,易形成氧化夹杂及卷气等缺陷^[33],其机制如图 10 所示。综上所述,在图 6 与 9 不同充型距离下 ESCs 组织与孔隙演变的协同作用下,Al-7Si-Mg-Cu 合金的力学性能呈现先增加后减小的趋势,并且在充型 650 mm 时仍具有较好的力学性能,而充型至 700 mm 时力学性能大幅下降。因此在该压铸工艺下 Al-7Si-Mg-Cu 合金允许最大充型距离不宜超过 650 mm。

3 结论

(1)使用集成计算平台迭代 32 次后得到在充型完整的前提下最优的浇注温度和模具温度分别为 750 和 250 °C。模具温度升高可提高熔体充型能力,使合金晶粒尺寸增大且孔隙率下降,但过高温度会降低模具使用寿命。同样的,提高浇注温度也可改善熔体充型能力,合金晶粒尺寸与孔隙率均增加。通过该集成计算平台可节省人工工艺寻优的时间,

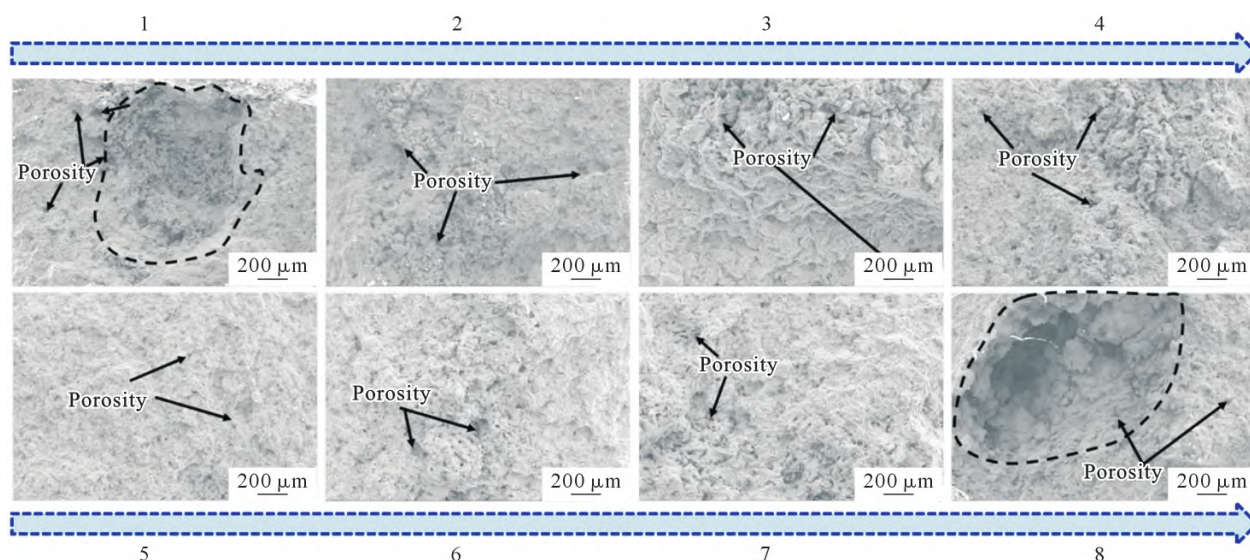


图9 不同充型距离下 Al-7Si-Mg-Cu 合金断口微观组织

Fig.9 Fracture microstructures of Al-7Si-Mg-Cu alloys with different filling distances

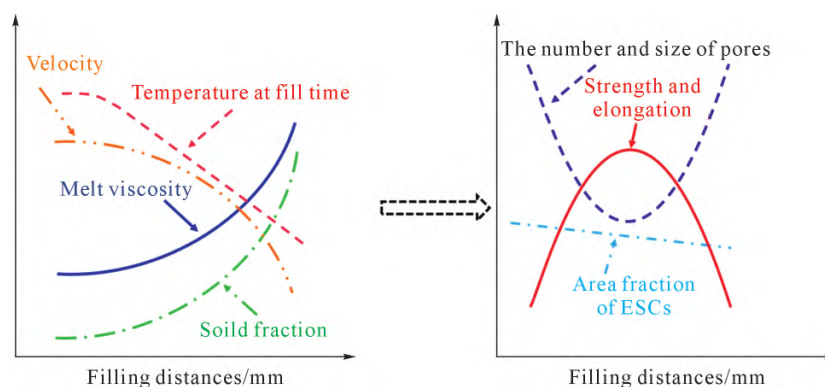


图10 不同充型距离下 Al-7Si-Mg-Cu 合金的力学性能变化机理示意图

Fig.10 Schematic diagram of the mechanism of the mechanical property changes in the Al-7Si-Mg-Cu alloy with different filling distances

提高效率,为企业快速探寻压铸新结构-新材料-新工艺提供了思路。

(2)随充型距离增加,合金中 ESCs 的面积分数减小且微观形貌发生变化,表现为粗大树枝晶状 ESCs 减少,破碎枝晶、条状及球粒状 ESCs 增多。

(3)随充型距离增加,熔体温度下降、黏度升高,充型速度减小、固相率增加。在多因素协同作用下,孔隙大小与数量随充型距离增加呈先减小后增大趋势。

(4)在 ESCs 显微形貌与孔隙变化的双重作用下,合金屈服强度、抗拉强度与伸长率均随充型距离增加呈先增加后减小趋势,且在充型 650 mm 时仍具有较好的力学性能。

参考文献:

- [1] 全泳琪,程汉明,王鹤睿,赵耀,林高用. 热处理对压铸 AlSi10MnMg 合金组织和力学性能的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13 (2): 98-106.
- QUAN Y Q, CHENG H M, WANG H R, ZHAO Y, LIN G Y. Effects of heat treatment on the microstructure and mechanical prop-

erties of die casting AlSi10MnMg alloy[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2022, 13(2): 98-106.

- [2] 魏娟娟,米国发,许磊,王有超. 激光增材制造铝合金及其复合材料研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 27-31.
- WEI J J, MI G F, XU L, WANG Y C. Research progress on laser additive manufacturing of aluminum alloy and its composite[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(8): 27-31.
- [3] KACZYŃSKI P, SKWARSKI M, JAŚKIEWICZ K. Development of the technology for press-forming of energy-absorbing elements made of 7075 aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 676-683.
- [4] 张鑫,高洪雷,李伟,国志鹏,徐成林. 一体压铸用免热处理铝合金自主研发及应用[J]. 汽车工艺与材料, 2025(1): 23-29.
- ZHANG X, GAO H L, LI W, GUO Z P, XU C L. Development and application of heat-treatment free aluminum alloy for integrated die-casting[J]. Automobile Technology & Material, 2025(1): 23-29.
- [5] BURGGRAF P, BERGWELER G, KEHRER S, KRAWCZYK T, FIEDLER F. Mega-casting in the automotive production system: Expert interview-based impact analysis of large-format aluminium high-pressure die-casting (HPDC) on the vehicle production[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 124: 918-935.

- [6] KALLAS M K. Multi-directional unibody casting machine for a vehicle frame and associated methods: US020190217380A1 [P]. 2019-07-18.
- [7] 郑敬明,潘帅,王玉,贾东洲,付莹. 免热处理铝合金大型结构件一体压铸研究进展[J/OL]. 中国有色金属学报, 2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20250331.1806.008.html>
ZHENG J M, PAN S, WANG Y, JIA D Z, FU Y. Research progress of integrated die casting of large structural parts of non-heat treated aluminum alloy[J/OL]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20250331.1806.008.html>
- [8] JIAO X Y, WANG P Y, LIU W N, WAN A X, SHI L J, WANG C G, XIONG S M. Effect of shot speeds on the microstructural framework and abnormal eutectic bands in a high pressure die casting hypoeutectic AlSi10MnMg alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 326: 118312.
- [9] 罗婷瑞,樊振中,胡惠翔,王俊田,田艳中. 新能源汽车用一体化压铸铝合金研究现状与发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(11): 1472-1478.
LUO T R, FAN Z Z, HU H X, WANG J H, TIAN Y Z. Research status and development trend of integrated die-casting aluminum alloy for new energy vehicles[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11): 1472-1478.
- [10] ZHENG H T, JIANG Y H, LIU F, ZHAO H D. Microstructure heterogeneity optimization of HPDC Al-Si-Mg-Cu alloys by modifying the characteristic of externally solidified crystals[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 976: 173167.
- [11] LIU G Y, KARIM M, WANG S H, ESKIN D, MCKAY B. Processing of SiC nano-reinforced AlSi9Cu3 composites by stir mixing, ultrasonication and high pressure die casting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 2384-2398.
- [12] JIAO X Y, ZHANG Y F, WANG J, HAROOD N, LIU Y X, LIU W N, CHEN H X, XIONG S M. Characterization of externally solidified crystals in a high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy and their effect on porosities and mechanical properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 298: 117299.
- [13] XU H, LIU W L, WANG Y P, MA S Z, YUAN C, JIA H L, CHENG X M, WANG R. Control and optimization of defects in die casting of complicated right crankcase cover[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 2831-2840.
- [14] GURSOY O, COLAK M, TUR K, DISPINAR D. Characterization of properties of vanadium, boron and strontium addition on HPDC of A360 alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 271: 124931.
- [15] DEMIRTAŞ H, KARAKULAK E, BABU N H. Understanding the effect of Ni content on microstructure and mechanical properties of A384 HPDC alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 896: 163111.
- [16] YANG C Y, LEE S L, LEE C K, LIN J C. Effects of Sr and Sb modifiers on the sliding wear behavior of A357 alloy under varying pressure and speed conditions[J]. Wear, 2006, 261(11-12): 1348-1358.
- [17] LIU W Q, ZHANG R J, WU X Y, SUN C X, ZHAO R J, LI J, JIANG H T. Microstructure and mechanical properties of non-heat-treated Al-8Si-0.2Mg-0.5Mn alloy inoculated by Al-Nb-B refiner[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 31: 1054-1066.
- [18] 赵少坤,魏作山,谭乐平,丁海民. 变质剂和不同细化剂对免热处理压铸铝合金变质及细化的影响研究[J]. 机电工程技术, 2025, 54(2): 33-37.
ZHAO S K, WEI Z S, TAN L P, DING H M. Influence of modifier and different refiners on the modification and refinement of aluminum alloy without heat treatment[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54(2): 33-37.
- [19] 蒋嗣本,安维,陆可馨. AlTi3BC 细化剂对 Al-9.5Si-4Zn-2.5Cu 高强压铸铝合金组织性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2023, 51(11): 1-5.
JIANG S B, AN W, LU K X. Effect of AlTi3BC on the microstructure and mechanical properties of die-casting aluminum alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2023, 51(11): 1-5.
- [20] HU C Y, ZHU H Y, WANG Y H, XIA C J, GENG J W, CHEN D, ZHANG H W, WANG M L, WANG H W. Microstructure features and mechanical properties of non-heat treated HPDC Al9Si0.6Mn-TiB₂ alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 2117-2131.
- [21] LIU L, YANG W X, ZHAO K, ZHANG T, JIANG B, ZHANG Z R, GUO E Y, KANG H J, CHEN Z N, PAN L L, WANG T M. 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.
- [22] 张卓,彭国胜,汪焱鑫,付秀洋,赵鹏宇,顾亦诚. 压铸成形 TiB₂/ADC12 铝合金材料组织与力学性能研究[J/OL]. 特种铸造及有色合金, 2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1148.TG.20250307.1200.003.html>.
ZHANG Z, PENG G S, WANG Y B, FU X Y, ZHAO P Y, GU Y C. Microstructure and mechanical properties of die casting TiB₂/ADC12 aluminum alloys[J/OL]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1148.TG.20250307.1200.003.html>.
- [23] 宿彦京,付华栋,白洋,姜雪,谢建新. 中国材料基因工程研究进展[J]. 金属学报, 2020, 56(10): 1313-1323.
SU Y J, FU H D, BAI Y, JIANG X, XIE J X. Progress in materials genome engineering in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(10): 1313-1323.
- [24] WANG G J, PENG L Y, LI K Q, ZHU L G, ZHOU J, MIAO N H, SUN Z M. ALKEMIE: An intelligent computational platform for accelerating materials discovery and design[J]. Computational Materials Science, 2021, 186: 110064.
- [25] GAN Y, MIAO N H, LAN P H, ZHOU J, ELLIOTT S, SUN Z M. Robust design of high-performance optoelectronic chalcogenide crystals from high-throughput computation[J]. Journal of the American Chemical Society, 2022, 144(13): 5878-5886.
- [26] 张增硕,何生平,詹磊,王新璋,王贤年,王依山,单长智,郝海. 基于集成计算平台的高强韧铝合金半连续铸造工艺优化[J]. 铸造技术, 2024, 45(5): 479-486.
ZHANG Z S, HE S P, ZHAN L, WANG X Z, WANG X N, WANG Y S, SHAN C Z, HAO H. Optimization of a high-strength and toughness aluminium alloy semi-continuous casting process based

- on an integrated computing platform[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 479-486.
- [27] ZHANG Z S, REN P F, FAN W X, ZHANG Z, YU W, HAO H, BAI Y, MENG X M. Effects of Fe and Zn additions on microstructure and mechanical properties of Al-10Si-Mg alloy [J]. Metals, 2025, 15(1): 33.
- [28] LI M, LI Y D, ZHOU H W. Effects of pouring temperature on microstructure and mechanical properties of the A356 aluminum alloy diecastings[J]. Materials Research, 2020, 23(1): e20190676.
- [29] LI P F, SUI Y D, JIANG Y H, YUAN Y R, YANG H P, YANG J H. Optimizing hot tearing susceptibility of Al-5.5Zn-2.4 Mg-1.3Cu alloys by grain refinement, increasing mold and casting temperature[J]. Materials & Design, 2024, 246: 113325.
- [30] HAN Q, ZHANG J. Fluidity of alloys under high-pressure die casting conditions: Flow-choking mechanisms [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51: 1795-1804.
- [31] WANG B S, XIONG S M. Effects of shot speed and biscuit thickness on externally solidified crystals of high-pressure die cast AM60B magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(4): 767-772.
- [32] TROMETER N, ZHANG J Y, WANG Q G, WANG L, LUO A A. Mechanisms of externally solidified crystal formation in aluminum high-pressure die casting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 137: 4825-4837.
- [33] 朱必武, 李落星, 刘筱, 王水平, 张立强. 薄壁铝合金压铸充型沿程的组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(8): 2163-2173.
- ZHU B W, LI L X, LIU X, WANG S P, ZHANG L Q. Microstructure and mechanical properties along fluidity length of thin-wall aluminum alloy under high pressure die casting conditions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(8): 2163-2173.
- [34] 马超, 李志广, 徐世文, 刘海峰, 白帮伟, 王巍, 李永飞, 武国春, 张宏仁. 工艺参数对压铸 Al-Si-Mg 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(10): 1421-1424.
- MA C, LI Z G, XU S W, LIU H F, BAI B W, WANG W, LI Y F, WU G C, ZHANG H R. Effects of process parameters on microstructure and properties of die casting Al-Si-Mg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10): 1421-1424.

(责任编辑:杨浩雪)