

低压铸造AlSi7Cu合金组织与性能调控研究 综述

徐 通

陕西铁路工程职业技术学院铁道装备制造学院, 陕西 渭南

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年6月11日; 发布日期: 2026年6月22日

摘 要

AlSi7Cu系铝合金是航空航天与汽车轻量化结构件的关键材料, 低压铸造是其工业化主流成形工艺。本文系统梳理保压压力、冷却速度等核心参数对合金组织、致密度及力学性能的影响规律, 从物理冶金角度分析凝固形核、生长、溶质分配与第二相演变机制, 阐述电磁、振动、变质等复合改性工艺的强化原理, 并整合数值模拟、机器学习、原位同步辐射成像、三维X射线显微镜等前沿技术应用进展。研究表明, 提高保压压力可细化晶粒、球化共晶Si相、降低孔隙率, 显著提升强韧性; 冷却速度可调控组织均匀性, 复合工艺能突破单一工艺局限, 为工艺优化与工程应用提供参考。

关键词

AlSi7Cu合金, 低压铸造, 工艺参数, 微观组织, 力学性能, 数值模拟

Research Review on Microstructure and Properties Regulation of AlSi7Cu Alloy in Low Pressure Casting

Tong Xu

School of Railway Equipment Manufacturing, Shaanxi Railway Institute, Weinan Shaanxi

Received: April 27, 2026; accepted: June 11, 2026; published: June 22, 2026

Abstract

AlSi7Cu aluminum alloy is a key material for lightweight structural components in aerospace and automotive applications, and low-pressure casting is its mainstream industrial forming

process. This paper systematically reviews the effects of key parameters such as holding pressure and cooling rate on the microstructure, density and mechanical properties of the alloy. The mechanisms of solidification nucleation, growth, solute distribution and second-phase evolution are analyzed from the perspective of physical metallurgy. The strengthening principles of composite modification processes including electromagnetic, vibration and modification treatments are discussed, and the application progress of advanced technologies such as numerical simulation, machine learning, *in-situ* synchrotron radiation imaging and three-dimensional X-ray microscopy is summarized. Studies show that increasing holding pressure refines grains, spheroidizes eutectic Si phase, reduces porosity and significantly improves strength and toughness. Cooling rate can regulate microstructure uniformity, and composite processes can break through the limitations of single processes, providing a reference for process optimization and engineering application.

Keywords

AlSi7Cu Alloy, Low Pressure Casting, Process Parameters, Microstructure, Mechanical Properties, Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

AlSi7Cu 铝合金是近共晶 Al-Si-Cu 系铸造合金的典型代表, 铸造与强韧化性能优良, 广泛用于汽车与航空航天轻量化构件。低压铸造因充型平稳、补缩好、致密度高, 成为其工业化主流成形工艺[1]。其凝固行为受多工艺参数耦合作用, 直接决定微观组织与力学性能。当前高压下组织演化、多参数协同机理及高压凝固物理冶金机制仍不系统, 数值模拟与先进表征应用也缺乏体系梳理[2]。

2. 核心工艺参数对 AlSi7Cu 合金组织与性能的调控作用

2.1. 保压压力的影响

保压压力是低压铸造凝固过程中最核心的工艺参数, 其通过改变铸件内部压力梯度, 直接影响熔体补缩能力、形核动力学及晶粒生长行为, 是调控 AlSi7Cu 合金组织与性能的关键因素[3]。根据物理冶金学原理, 压力作用可改变合金凝固熔点, 提升凝固过冷度, 依据经典凝固理论, 过冷度升高会显著提高 α -Al 相形核率, 同时抑制晶粒定向生长, 实现组织细化[4]。

现有研究通过 75 kPa、150 kPa、225 kPa 三组保压压力的对比试验, 明确了保压压力对合金组织的细化规律, 相关数据见表 1。同时, 保压压力升高可实现共晶 Si 相的显著变质, 75 kPa 下共晶 Si 颗粒呈长棒状, 长宽比达 2.29; 225 kPa 下共晶 Si 颗粒完全球化, 长宽比降至 1.24, 平均直径也从 3.31 μm 细化至 2.93 μm 。其核心机理在于, 保压压力提升增大了铸件内部压力梯度, 促进了晶核形成, 同时抑制了晶粒的过度定向生长, 最终实现组织细化。此外, 压力作用可抑制 Si 原子的偏聚, 推动共晶 Si 相从棒状向球状转变。

在致密化调控方面, 保压压力提升显著增强了合金熔体的充填与补缩能力, 有效抑制了气孔、缩松等铸造缺陷[5], 相关试验数据见表 2。这一变化源于高压下熔体可充分填充枝晶间的间隙, 阻碍凝固过程中孔洞的形核与长大, 从根源上减少铸造缺陷。

Table 1. Microstructural characteristic parameters of AlSi7Cu alloy under different holding pressures**表 1.** 不同保压压力下 AlSi7Cu 合金的微观组织特征参数

微观组织参数	75 kPa	150 kPa	225 kPa
初生 α -Al 晶粒直径/ μm	231	182	134
二次枝晶臂间距/ μm	43.4	35.9	28.6
共晶硅颗粒长宽比	2.29	1.72	1.24
共晶硅颗粒平均直径/ μm	3.31	3.02	2.93

Table 2. Density and porosity of AlSi7Cu alloy under various holding pressures**表 2.** 不同保压压力下 AlSi7Cu 合金的密度与孔隙率

性能参数	75 kPa	150 kPa	225 kPa
合金密度/(g/cm^3)	2.638	2.651	2.670
孔隙率/%	0.973	0.807	0.406

微观组织的细化与致密化程度的提升,直接推动了合金力学性能的显著改善。随着保压压力从 75 kPa 升至 225 kPa,合金的抗拉强度从 247.67 MPa 提升至 265.38 MPa,增幅 7.15%;屈服强度从 195.68 MPa 提升至 199.31 MPa,增幅 1.86%;延伸率从 4.13%增至 7.44%,增幅高达 80.1%。

从断裂机制来看,低保压压力下,合金中的气孔缺陷成为裂纹源,断裂形式以脆性断裂为主;高保压压力下,缺陷减少,裂纹沿初生 α -Al 晶界与共晶颗粒处扩展,断裂形式转变为韧性断裂,这也是合金塑性大幅提升的核心原因。

2.2. 冷却速度的影响

冷却速度是决定 AlSi7Cu 合金凝固过程中晶粒形核率与生长速率的另一核心因素,主要通过模具涂料厚度、铸型材质、冷却水道设计等方式调控,直接影响合金的二次枝晶臂间距与组织均匀性[6]。从物理冶金学原理分析,冷却速度决定合金凝固过冷度与溶质分配系数,冷却速度越快,过冷度越大,溶质截留效应越显著, α -Al 相形核率远高于生长速率,进而细化晶粒、缩小二次枝晶臂间距。

Table 3. Secondary dendrite arm spacing of castings at various mold coating thicknesses**表 3.** 不同模具涂料厚度下铸件的二次枝晶臂间距

模具涂料厚度/ μm	边部二次枝晶臂间距/ μm	心部二次枝晶臂间距/ μm
0	14.5	17.4
300~350	21.2	28.9

Table 4. Secondary dendrite arm spacing of castings produced in different sand mold materials**表 4.** 不同砂型材质铸件的二次枝晶臂间距

砂型材质	边部二次枝晶臂间距/ μm	心部二次枝晶臂间距/ μm
有机砂型	52.9	80.4
无机砂型	45.9	65.7

研究表明,冷却速度与二次枝晶臂间距呈显著负相关。在金属型铸造中,随着涂料厚度增加,铸件热阻增大,冷却速度显著降低,铸件边部和心部的二次枝晶臂间距则均增加,见表 3、表 4。在砂型铸造

中,无机砂型的传热效率远高于有机砂型,其铸件各位置的二次枝晶臂间距均显著小于有机砂型铸件,验证了冷却速度提升对枝晶组织的细化作用。

从凝固机理来看,冷却速度提升增大了合金凝固过程中的过冷度,从而显著细化 α -Al 晶粒及共晶 Si 相。冷却速度的调控需与保压压力协同匹配:过快的冷却速度会导致熔体补缩时间不足,易产生疏松缺陷;过慢的冷却速度则会造成晶粒粗大,降低合金力学性能[7]。热分析及金相观察结果表明,快速冷却条件下,共晶 Si 相来不及粗化,保持细小弥散分布,而慢速冷却下共晶 Si 相易发生聚集长大,呈粗大针片状,严重降低合金塑性[8]。因此,当前工业生产中,常通过模具冷却水道设计、涂料厚度分区调控等方式,实现铸件不同部位的均匀冷却,兼顾组织细化与补缩效果。

2.3. 浇注温度、充型工艺与保压时间的协同调控

浇注温度、充型压力与速率、保压时间等参数与保压压力、冷却速度耦合作用,共同决定 AlSi7Cu 合金的成形质量与组织性能,单一参数优化无法实现综合性能提升。

浇注温度通过影响熔体流动性、凝固时间与吸气倾向调控组织性能:浇注温度过高会导致合金凝固时间延长,晶粒粗大,同时密度降低,增加熔体吸气与氧化倾向,形成氧化夹杂缺陷;浇注温度过低则会降低熔体流动性,易产生浇不足、冷隔等缺陷[9]。

充型压力与速率对 AlSi7Cu 合金的微观结构及力学性能具有显著调控作用。徐通等研究发现,较高的保压压力条件下,AlSi7Cu 合金展现了更为紧密的微观结构和更圆润的共晶 Si 颗粒,合金充填性能增强、气孔缺陷显著降低[3]。

保压时间需与铸件凝固时间匹配,过短会导致补缩不充分,铸件心部易出现疏松;过长则会降低生产效率,增加模具损耗。且保压时间过长或过短均会增加合金的热裂倾向,适当缩短保压时间有利于降低热裂风险,从而改善力学性能[10]。

3. 低压铸造复合改性工艺的强化效应

单一工艺参数优化对 AlSi7Cu 合金性能的提升存在瓶颈,近年来,电磁辅助、振动处理、变质处理等复合改性工艺与低压铸造的结合,成为该领域的研究热点,通过多场耦合实现组织与性能的进一步优化[11]。

3.1. 电磁辅助低压铸造

电磁低压铸造将电磁泵驱动充型与低压铸造相结合,通过电磁场对熔体的搅拌作用,实现充型精准控制与组织细化[12]。从物理冶金机理来看,电磁场产生的洛伦兹力可驱动熔体强制对流,打碎粗大枝晶,增加形核核心,实现晶粒细化;同时,电磁泵充型过程平稳可控,可避免熔体湍流与吸气,减少氧化夹杂与气孔缺陷,促进熔体中气体逸出,进一步提升铸件致密度。对比试验表明,电磁低压铸造下 AlSi7Cu2Mg 合金的平均抗拉强度较重力铸造提升 4.89%,平均伸长率增幅高达 23.94%。见表 5。

Table 5. Comparison of mechanical properties of AlSi7Cu2Mg alloy under different casting processes

表 5. 不同铸造工艺下 AlSi7Cu2Mg 合金的力学性能对比

铸造工艺	平均抗拉强度/MPa	平均伸长率/%
重力铸造	311	3.72
电磁低压铸造	322	4.66

3.2. 振动辅助与变质处理协同工艺

超声与机械振动辅助低压铸造,通过振动场在熔体中产生的空化效应与声流效应,可显著提升 α -Al

相的形核率，打碎粗大枝晶与共晶 Si 颗粒，实现组织细化[13]；空化效应产生的微射流可破碎枝晶臂，增加晶核数量；声流效应促进溶质均匀分布，抑制成分偏析[14]。现有研究表明，机械振动可使 AlSi7 系合金的初生相平均尺寸细化，抗拉强度与伸长率提升[15]，见表 6。

Table 6. Effect of mechanical vibration on the microstructure and properties of AlSi7 alloys

表 6. 机械振动对 AlSi7 系合金组织与性能的影响

处理状态	初生相平均尺寸/ μm	抗拉强度增幅	伸长率增幅
未振动	48.99	/	/
机械振动处理	28.67	17.9%	118.2%

变质处理与低压铸造的协同调控，可实现组织细化与压力补缩的耦合强化。如 Sr 变质使共晶 Si 相由片状转变为颗粒状并在 $\alpha\text{-Al}$ 基体中均匀分布，显著改善了基体连续性；同时在低压铸造条件下，压力补缩有效消除了凝固收缩产生的缩松缺陷，进一步提升了组织致密性。二者耦合后，变质处理赋予的细小共晶 Si 相在压力作用下不易粗化，压力补缩则为变质合金提供了更致密的凝固环境[16]。

4. 前沿研究手段在工艺优化中的应用

4.1. 计算机数值模拟技术

ProCAST、FLOW-3D 等数值模拟软件可实现 AlSi7Cu 合金低压铸造充型、凝固及应力场的多物理场耦合分析，用于预测缩松、卷气、裂纹等缺陷并优化工艺参数。其中，ProCAST 可模拟保压压力、冷却速度对温度场及固相率分布的影响，建立工艺参数与微观组织的定量关联[2]；FLOW-3D 则侧重于充型过程模拟，通过分析速度场与压力变化优化充型速率，避免湍流引发的卷气缺陷[17]。此外，结合元胞自动机等算法的多尺度模拟技术，能够从宏观温度场延伸至微观晶粒演化，为低压铸造工艺的精准调控提供数据支撑[18]。

4.2. 机器学习与智能优化

机器学习技术可基于大量工艺 - 性能数据，构建工艺参数与力学性能、微观组织的预测模型。如在铝合金低压铸造中，以浇注温度、模具温度、铸造压力等为输入参数，以抗拉强度、硬度等为输出参数构建 BP 神经网络模型，相对预测误差仅为 2.87%~4.31%，可有效缩短工艺调试周期[19]。

4.3. 先进表征技术

原位同步辐射 X 射线成像可实时观测铝合金凝固过程中晶粒形核、枝晶生长及孔隙形成等动态行为，揭示缺陷演化机理[20]；三维 X 射线计算机断层扫描技术可实现铸件内部微米尺度缺陷的高分辨率三维可视化，并对孔隙体积、表面积、圆整度及扁平度等特征参数进行定量表征，为铸件致密化调控提供直观依据[21]。这些先进表征手段突破了传统二维截面观察的局限性，推动了凝固机理研究从定性描述向定量分析转变。

5. 结论

本文系统梳理了低压铸造核心工艺参数与复合改性工艺对 AlSi7Cu 合金组织与性能的调控规律。保压压力提升可细化 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒、球化共晶 Si 相并降低孔隙率，显著改善强塑性；冷却速度与二次枝晶臂间距呈负相关，需与保压压力协同匹配以实现组织均匀化与补缩充分性。电磁辅助、振动处理及变质处理等复合工艺可突破单一工艺性能瓶颈。数值模拟、机器学习与先进表征技术为工艺精准优化提供支撑。

整体表明,多参数协同与多场耦合是提升该合金铸件质量的关键,可为工业化工艺设计与高性能化应用提供参考。

参考文献

- [1] 陈正周,宋朝辉,王菊清.薄壁多筋铝合金腔体低压铸造工艺[J].铸造,2019,68(6):613-617.
- [2] 谭云骧,马聚怀,许庆彦.铝合金低压铸造过程数值模拟[J].铸造,2024,73(3):270-281.
- [3] 徐通,李勇,王超,薛旭东.保压压力对低压铸造 AlSi7Cu 合金组织和力学性能的影响[J].模具技术,2025(4):62-67.
- [4] 胡中潮,高忠玉,陈湖演,等.铝合金液态模锻发展现状及未来展望[J].金属世界,2021(6):27-31.
- [5] 蒋文明,樊自田.铝/镁合金特种精密铸造技术的研究进展及发展趋势[J].金属加工(热加工),2023(2):1-9.
- [6] 吕欣蕊,李莎莎,王磊,于丽丽.低压铸造冷却速度对汽车用 AlSi7Cu 合金组织的影响[J].热加工工艺,2023,52(15):80-82,85.
- [7] 蒲博闻,王根全,周海涛,等.凝固速率对铸造铝硅合金组织及力学性能的影响规律[J].铸造,2024,73(1):76-80.
- [8] 吴建华,周吉学,唐守秋,等.冷却速率对铸态 A356 铝合金微观组织和拉伸性能的影响[J].功能材料,2016,47(S2):63-66.
- [9] 孙喜梅,王治民.挤压铸造浇注温度对 Al-Si-Cu-Mg 合金组织及性能的影响[J].热加工工艺,2025,54(10):145-147.
- [10] 付田田,陈利文,侯华,赵宇宏.挤压铸造工艺参数对 ZL101 铝合金性能影响显著性分析[J].铸造技术,2018,39(3):565-568.
- [11] 刘政,毛卫民.复合工艺制备半固态 A356 铝合金浆料的研究[J].铸造,2011,60(7):623-628.
- [12] 蒋晓英,黄正军.电磁低压铸造对 AlSi7Cu2Mg 合金性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2010,30(4):334-335,288.
- [13] 严青松,芦刚,李成,等.超声功率-凝固压力协同作用对真空差压铸造铝合金二次枝晶间距的影响[J].中国有色金属学报,2017,27(1):51-56.
- [14] 陈鼎欣,李晓谦,黎正华,等.超声铸造 7050 铝合金的微观组织和宏观偏析规律[J].北京科技大学学报,2012,34(6):666-670.
- [15] 郁雯霞,雷玉成.机械振动对 AlSi7Mg 合金组织和力学性能的影响[J].铸造,2023,72(8):1015-1019.
- [16] 马小军,李连驰,刘海滨,等.静置时间对 AlSi7Mg0.3 合金变质效果及微观组织与力学性能的影响[J].铸造,2025,74(6):745-750.
- [17] 吴明琦,杨慕尧,杨军,等.耐压铝合金套筒低压铸造数值模拟分析与工艺设计[J].铸造,2025,74(12):1597-1605.
- [18] 吴琪琪,苏小平,杨闯,等.基于正交试验的铝合金减速机壳体低压铸造工艺优化[J].热加工工艺,2024,53(3):119-123.
- [19] 于文涛,张思祥.基于神经网络的铝合金汽车轮毂低压铸造工艺优化[J].热加工工艺,2020,49(3):89-91,95.
- [20] 魏秋云,刘欢,甘佰辉,等.基于原位同步辐射 X 射线的铝合金凝固组织与变形机制研究进展[J].材料研究与应用,2025,19(3):385-410.
- [21] 喻程,吴圣川,胡雅楠,等.铝合金熔焊微气孔的三维同步辐射 X 射线成像[J].金属学报,2015,51(2):159-168.