

凝固速率对铸造铝硅合金组织及力学性能的影响规律

蒲博闻, 王根全, 周海涛, 毛郭灵, 王 韬, 许虹雯

(中国北方发动机研究所(天津), 天津 300400)

摘要: 通过使用砂型模、Y形钢模和楔形铜模三种浇注模具, 研究凝固速率对铝硅合金的凝固组织及力学性能的影响规律。结果表明, 随着凝固速率增加, 合金二次枝晶臂间距、共晶硅尺寸和缺陷尺寸均降低, 晶粒形貌逐渐转变为树枝晶或细小蔷薇晶粒。在Y形钢模中合金的凝固速率为2~5 °C/s, 相应的凝固组织较为细密且缺陷较少, 同时有利于形成少量Al₃M初生相。通过建立合金二次枝晶臂间距分别与凝固冷却速率和屈服强度之间的变化关系式, 阐述了凝固速率对合金组织及力学性能的影响规律。

关键词: 铝硅合金; 凝固速率; 组织; 力学性能

铝硅合金具有低线膨胀系数、高气密性且热裂倾向小, 表现出良好的铸造性能, 被广泛应用于发动机气缸盖等形状复杂的车用铸造部件^[1-4]。铝硅合金铸件的组织对其力学性能起到决定性作用, 而铸件的组织通常受到浇注模具、冷铁厚度及位置等外界因素的影响^[5-8]。研究表明, 对冒口和冷铁进行合理设计能提升铸件质量和合格率^[9], 在热节处适当放置冒口和内、外冷铁可以减轻铸件出现缩松、缩孔缺陷^[10]。实际上, 这些外界因素的调整一般是通过控制铸件的凝固速率, 发挥对组织及力学性能的调控作用。然而, 目前关于凝固冷速对铝硅合金铸件组织及力学性能影响的研究尚有不足, 因此本文利用砂型模、Y形钢模和楔形铜模三种铸造模具控制合金凝固速率, 以微合金改性ZL702A铝硅合金为研究对象, 研究了模具及模具位置的不同凝固速率对合金组织及力学性能的影响规律, 拟为复杂结构铸件的设计与制造提供指导。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

研究用铝硅合金在工业级ZL702A合金基础上添加微量Zr、Sc、Sr元素改性得到, 合金的实际成分如表1所示。合金熔炼所用原材料为精铝、Al-12Si、Al-5Ti-B、Al-50Cu、Al-2Sc、Al-2Zr, 按成分要求将配制的料装炉熔化并均匀搅拌, 控温加Mg后精炼, 然后在模具中进行浇注。铸锭的凝固速率通过使用砂型、Y形钢模和楔形铜模三种不同冷却速率的模具进行调控。凝固速率范围分别为0.1~0.5 °C/s、2~5 °C/s和20~30 °C/s, 相应为慢速凝固、中速凝固和快速凝固。合金浇注温度, 即凝固初始温度为705 °C。

1.2 表征测试

利用金相显微镜观察合金的组织, 金相样品根据标准金相制样方法制备。利用Image-Pro Plus (IPP) 图像分析软件对金相组织照片进行处理, 之后通过截距法量取二次枝晶臂间距、硅相、缺陷等组织特征的尺寸并进行统计。合金在拉伸性能测试

作者简介:

蒲博闻(1993-), 男, 博士, 主要研究方向为高强度及轻量化材料制备与应用技术。E-mail: 1159819984@qq.com

中图分类号: TG113;
TG146.2

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2024)
01-0076-05

收稿日期:

2023-03-23 收到初稿,
2023-10-13 收到修订稿。

前进行T6热处理，包括三级固溶：400 °C × 10 h+500 °C × 4 h+525 °C × 10 h；时效工艺为170 °C × 12 h。合金室温拉伸性能根据GB/T 228.1—2021规定，在型号为SANS-CMJ5105的万能力学试验机上进行测试，拉伸速率为2 mm/min，试样尺寸如图1所示。每组试样测试三次，以拉伸强度和屈服强度的平均值作为该组试样的力学性能。

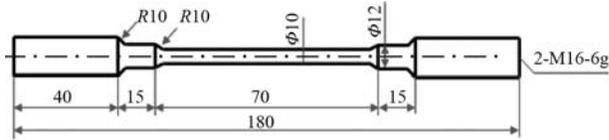


图1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 The size of the tensile specimen

1.3 计算分析

利用相图与性能计算软件JMatPro辅助计算分析

凝固速率对合金组织的影响规律。软件基于功能强大且稳定的热力学模型及数据，保证了计算结果的准确性。本文将对合金凝固过程及相组成进行计算，计算所用合金的化学成分见表1。

表1 合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of alloy $w_B/\%$

Si	Cu	Mg	Fe	Ti	Mn	Zr	Sc	Sr	Al
8.48	1.21	0.35	0.09	0.12	0.15	0.16	0.19	0.02	余量

2 结果与分析

2.1 不同凝固速率下的合金微观组织

图2为不同凝固速率下样品金相显微镜照片，图3为不同凝固速率下合金的二次枝晶臂间距（SDAS）、共晶硅尺寸及缺陷尺寸的统计结果。由图2和图3可

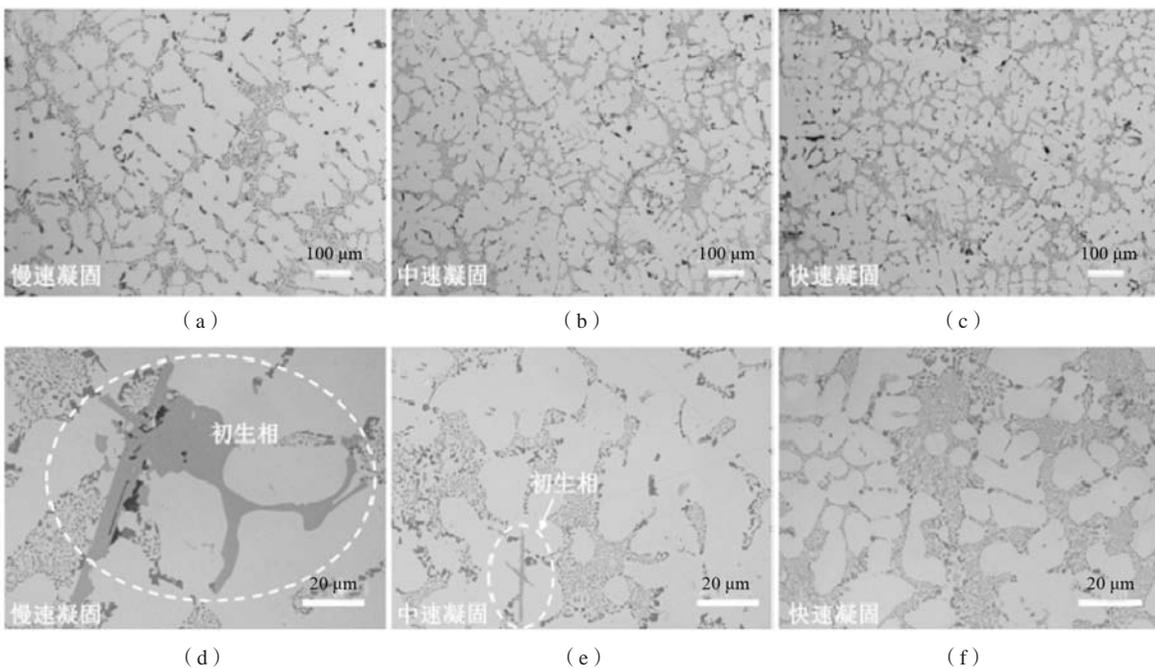


图2 不同凝固速率下样品的金相显微镜照片

Fig. 2 Microstructure of alloys with different solidification rates

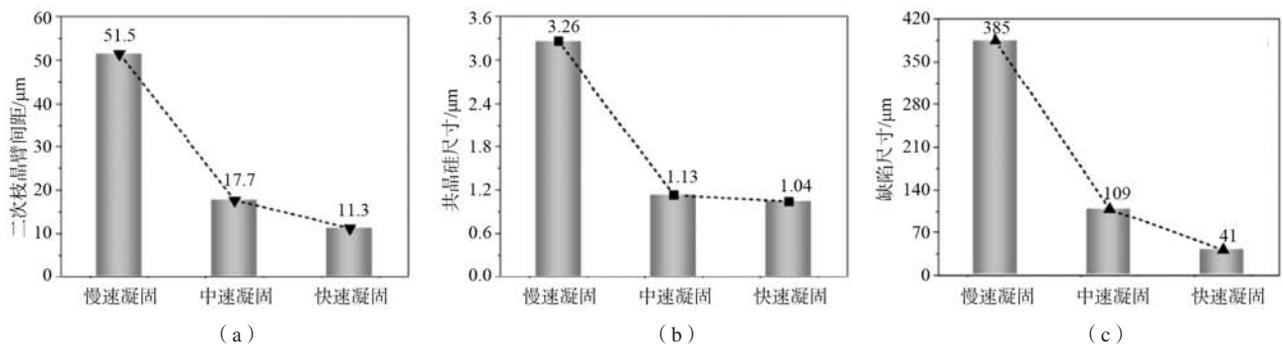


图3 不同凝固速率下合金的组织特征统计结果

Fig. 3 Statistical results of microstructural characteristics of alloys with different solidification rates

知,随着凝固速率加快,SDAS、共晶硅尺寸及缺陷尺寸均呈现降低趋势,这种降低趋势在中速凝固与快速凝固样品之间趋缓。中速凝固样品与快速凝固样品的组织较为细密,为树枝晶或细小蔷薇晶粒,SDAS分别为 $17.7\ \mu\text{m}$ 和 $11.3\ \mu\text{m}$;共晶硅尺寸接近,分别为 $1.13\ \mu\text{m}$ 和 $1.04\ \mu\text{m}$;晶界与枝晶间存在显微疏松缺陷,缺陷尺寸分别为 $109\ \mu\text{m}$ 和 $41\ \mu\text{m}$ 。由于合金中添加了Zr、Sc、Ti元素,其凝固组织往往会出 Al_3M ($\text{M}=\text{Sc}, \text{Zr}, \text{Ti}$)初生相^[11-12]。研究合金的初生相形态如图2d-f所示,可以发现随着凝固速率增加,初生相的尺寸和数量明显减少,在快速凝固时几乎很难观察到明显的初生相生成。

2.2 凝固速率对合金微观组织影响规律分析

采用JMatPro软件计算合金在 $705\sim 100\ ^\circ\text{C}$ 降温范围内, $0.1\sim 30\ ^\circ\text{C}/\text{s}$ 不同凝固速率的降温曲线,结果如图4所示。合金凝固过程中的特征形核温度如表2所示。计算结果表明, $\alpha\text{-Al}$ 形核温度约为 $657\ ^\circ\text{C}$,初生相形核温度约为 $602\ ^\circ\text{C}$ 。当凝固速率低于 $3.5\ ^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,降温曲线会在 $574\ ^\circ\text{C}$ 左右出现一个明显的共晶反应形核平台;而快速凝固时,形核平台并不显著。之所以会产生形核平台,是因为合金在凝固过程中吸收的热量与合金

表2 合金凝固过程中的形核温度
Table 2 Nucleation temperatures during solidification of the alloy

形核温度	温度线/ $^\circ\text{C}$
$\alpha\text{-Al}$ 形核温度	657
初生相形核温度	602
共晶温度	574

中硅相通过共晶反应生成释放的热量形成动态平衡,导致温度变化相对趋零。当凝固速率较慢时,共晶硅的形核核心较少,硅相会聚集长大,共晶硅生长释放的潜热难以分散^[12],因此,降温曲线的恒温平台较明显。另外,潜热的集中分布也会使早期形成的枝晶组织不能借助共晶潜热再次熔融,无法完成补缩,造成较大尺寸的铸造缺陷。

图5a为计算的合金中 $\alpha\text{-Al}$ 与共晶硅的相对含量变化曲线,在 $574\ ^\circ\text{C}$ 附近出现相对含量突变,对应铝硅共晶反应过程,在凝固结束后两相稳定含量分别为 91% 和 7.18% 。图5b为计算分析合金中 Al_3M 初生相的元素百分比,结果显示初生相在 $600\ ^\circ\text{C}$ 左右成分趋于稳定,相组成对应为 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr}, \text{Ti})$ 相,其中Sc含量较高,Zr、Ti含量次之。初生相的计算结果与之前研究中的

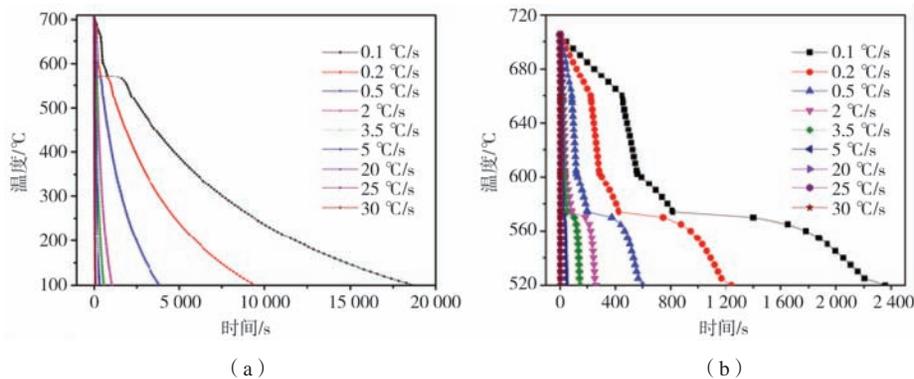
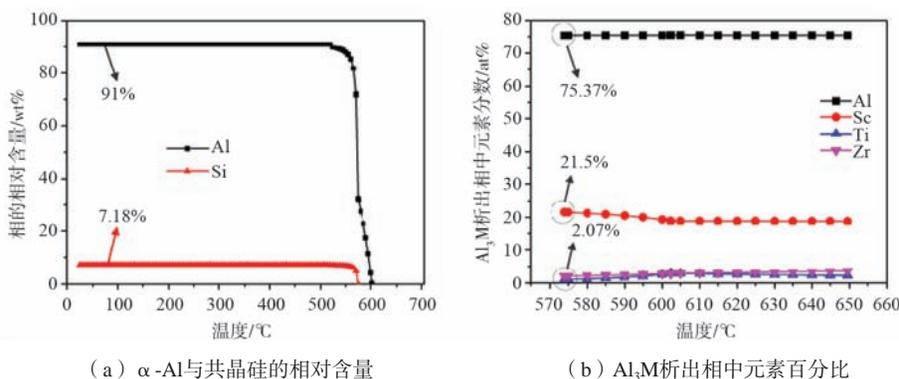


图4 不同凝固速率下合金的热分析曲线

Fig. 4 Cooling curves of alloys at different solidification rates



(a) $\alpha\text{-Al}$ 与共晶硅的相对含量

(b) Al_3M 析出相中元素百分比

图5 合金中各相元素相对含量计算分析

Fig. 5 Calculation and analysis of the relative content of phases in alloy

试验表征结果接近^[13]。综合分析合金凝固降温曲线中初生相形核温度及形核过程,控制合金凝固速率为2~5 °C/s,即中速凝固,更有利于使合金Al₃M初生相在凝固过程中处于理想孕育状态。当中速凝固时,一方面,初生相在 α -Al基体开始凝固前在多个位置孕育形成;另一方面,在一定过冷作用下, α -Al凝固长大可以抑制初生相生长(图2e)。当 α -Al凝固速率过快时,会阻碍初生相颗粒的形核(图2f),而慢速凝固又会造成初生相尺寸过大(图2d)。

2.3 凝固速率对合金力学性能的影响规律

对使用Y形钢模以中速凝固的合金样品进行力学性能测试,Y形钢模不同位置的合金样品凝固速率不同,其上部、中部、底部的凝固速率分别为2 °C/s、3.5 °C/s和5 °C/s,结果如表3所示。随着凝固速率的增加,合金的强度明显提高。Y形钢模底部凝固速率最高,合金的抗拉强度达到381 MPa,屈服强度达到296 MPa。

表3 不同凝固速率下合金室温力学性能结果
Table 3 Mechanical properties of alloys at different solidification rates

位置	凝固速率/(°C·s ⁻¹)	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
Y形钢模上部	2	363	295
Y形钢模中部	3.5	369	294
Y形钢模底部	5	381	296

M. Okayasu等^[14]研究发现,凝固速率 δ 与SDAS之间存在 $\delta=2 \times 10^4 SDAS^{-2.67}$ 的关系式。合金在Y形钢模上部、中部、底部凝固组织中的SDAS分别为25.4 μ m, 20.7 μ m和18.4 μ m,SDAS随凝固冷却速率的变化趋势与关系式 $\delta=2 \times 10^4 (1.2 \times SDAS)^{-2.67}$ 一致,如图6a所示。一些研究表明,与屈服强度($\sigma_{0.2}$)通常存在线性关系^[15],二者的关系式可经试验值拟合得到: $\sigma_{0.2}=56/\sqrt{SDAS}+283$,如图6b所示。因此,通过SDAS可间接建立起凝固速率与合金力学性能之间的规律关系。

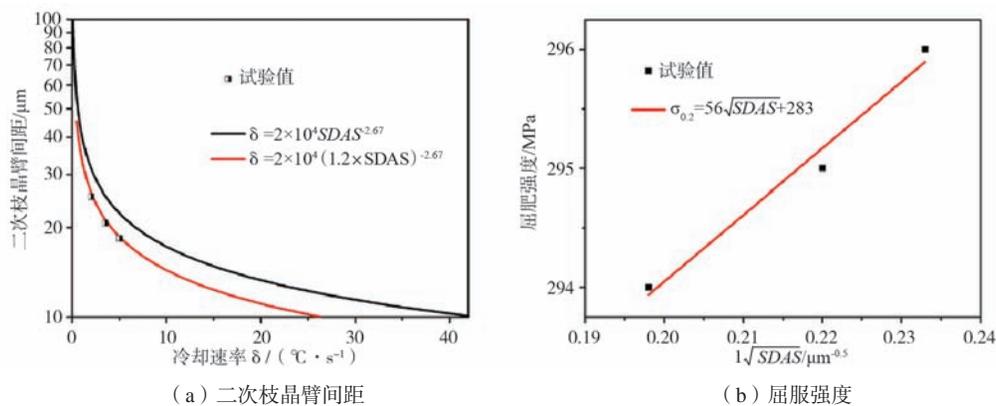


图6 不同凝固速率对合金二次枝晶臂间距及屈服强度的影响规律
Fig. 6 Effect of different solidification rates on SDAS and yield strength of alloys

3 结论

(1) 利用不同铸造模具及模具不同位置可以控制铝硅合金获得不同的凝固速率,随着凝固速率加快,SDAS、共晶硅尺寸和缺陷尺寸均减小,晶粒形貌由发达树枝晶向树枝晶及细小蔷薇晶粒转变。

(2) 合金在Y形钢模中以2~5 °C/s冷却速率凝固,

能获得较细密的晶粒组织及较少缺陷,更有利于孕育形成少量Al₃M初生析出相。

(3) 合金SDAS与凝固冷却速率之间、SDAS与屈服强度之间的变化规律关系式分别描述为 $\sigma=2 \times 10^4 (1.2 \times SDAS)^{-2.67}$ 和 $\sigma_{0.2}=56/\sqrt{SDAS}+283$,可为调控凝固速率实现合金的组织性能设计提供间接性参考。

参考文献:

- [1] 潘连明,朱正锋,张国荣,等. Al-Si系铸造铝合金材料的研究[J]. 机车车辆工艺, 2007(1): 5-7.
- [2] 张炳荣,王斯勇,王一民. 重力铸造铝合金发动机缸盖的二次枝晶间距研究[J]. 铸造技术, 2008, 29(11): 1546-1549.
- [3] AGUILERA-LUNA I, CASTRO-ROMÁN M J, ESCOBEDO-BOCARDI J C, et al. Effect of cooling rate and Mg content on the Al-Si eutectic for Al-Si-Cu-Mg alloys[J]. Materials Characterization, 2014, 95: 211-218.
- [4] KAYGLSLZ Y, MARASLL N. Microstructure, mechanical and electrical characterization of direction ally solidified Al-Si-M geutectic alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 618: 197-203.

- [5] 刘梦鸽, 马志军, 刘建国, 等. 稳定化处理对铝硅合金力学及热膨胀性能的影响 [J]. 西安工业大学学报, 2021 (1): 67-73.
- [6] 张怀敏, 杨东明. 铸铁件冷铁冒口的研究和应用 [J]. 金属加工 (热加工), 2013 (3): 80-81.
- [7] 凌云飞, 胡昌军. 内冷铁在厚大铸钢件上的应用 [J]. 中国铸造装备与技术, 2010 (2): 36-37.
- [8] 李永谊. 内冷铁在熔模精密铸造中的运用 [J]. 铸造技术, 2011, 32 (1): 130-131.
- [9] 刘小华, 李凤春. 大型厚壁铝合金筒体铸件铸造工艺设计 [J]. 铸造技术, 2012, 33 (9): 1107-1109.
- [10] 李巨文, 袁伟波, 李德成, 等. 大型铝合金曲面铸件的铸造工艺设计 [J]. 铸造, 1998 (12): 36-38.
- [11] 周古昕, 毛华, 杜秀征, 等. Al-Sc-Zr合金热力学凝固行为的计算分析 [J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43 (1): 109-112.
- [12] RUI C, SHI Y, XU Q, et al. Effect of cooling rate on solidification parameters and microstructure of Al-7Si-0.3Mg-0.15Fe alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (6): 1645-1652.
- [13] MAO G, TONG G, GAO W, et al. The poisoning effect of Sc or Zr in grain refinement of Al-Si-Mg alloy with Al-Ti-B [J]. Materials Letters, 2021, 302: 130428.
- [14] OKAYASU M, OHKURA Y, TAKEUCHI S, et al. A study of the mechanical properties of an Al-Si-Cu alloy (ADC12) produced by various casting processes [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 543: 185-192.
- [15] OSORIO W R, GOULART P R, GARCIA A, et al. Effect of dendritic arm spacing on mechanical properties and corrosion resistance of Al9WtPctSi and Zn27WtPctAl alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37 (8): 2525-2538.

Effects of Solidification Rates on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si Alloy

PU Bo-wen, WANG Gen-quan, ZHOU Hai-tao, MAO Guo-ling, WANG Tao, XU Hong-wen
(China North Engine Research Institute (Tianjin), Tianjin 300400, China)

Abstract:

The effects of solidification rates on microstructure and mechanical properties of Al-Si alloys were studied by using sand mold, Y-shaped steel mold and wedge-shaped copper mold. The results show that with the increase of solidification rate, secondary dendrite arm spacing (SDAS), eutectic silicon size and defect size all decrease, and the grain morphology gradually changes to dendritic or fine rose grain. The solidification rate of the alloy in the Y-shaped steel mold is 2-5 °C /s, and the corresponding solidification microstructure shows fine size with few defects, which is conducive to the formation of a small amount of Al₃M primary precipitated phase. The effects of solidification rates on microstructure and mechanical properties of alloy were explained by establishing the relationship between SDAS and solidification rate/yield strength.

Key words:

Al-Si alloy; solidification rates; microstructure; mechanical properties
