

工艺参数对压铸 Al-Si-Mg 合金组织和性能影响

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
(中信戴卡股份有限公司)

摘 要 研究了浇注温度、压射时间和化学成分对压铸 Al-Si-Mg 合金显微组织中预结晶组织(ESCs)的数量和形貌以及对铸件本体力学性能的影响。结果表明,显微组织中的 ESCs 是影响铸件本体性能的重要因素。提升熔体浇注温度可以显著减少显微组织中的 ESCs,并促进其形貌由树枝状向球状转变,提升铸件本体的屈服强度和硬度;增加压射等待时间,显微组织中的 ESCs 的面积分数和平均尺寸呈增大趋势,铸件本体的屈服强度和硬度呈下降趋势;Si 含量由 7.0% 提升至 7.5%,可降低液相线温度,显著减少 ESCs,提升力学性能。通过调整浇注温度、压射等待时间和铝液化学成分,可以有效地减少 ESCs 的数量和尺寸,从而明显改善力学性能,特别是屈服强度和硬度。

关键词 浇注温度;压射等待时间;Si 含量;预结晶;力学性能

中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.10.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Process Parameters on Microstructure and Properties of Die Casting Al-Si-Mg Alloy

Ma Chao, Li Zhiguang, Xu Shiwen, Liu Haifeng, Bai Bangwei, Wang Wei, Li Yongfei, Wu Guochun, Zhang Hongren
(CITIC Dicastal Co., Ltd.)

Abstract: The effects of pouring temperature, injection holding time and chemical composition on the quantity and morphology of externally solidified crystals(ESCs) in the microstructure of die casting Al-Si-Mg alloy and on the mechanical properties of the castings were analyzed. The results indicate that ESCs in the microstructure is an important factor affecting the properties of castings. Increase of the pouring temperature can significantly reduce in the microstructure, promote the transformation of morphology from dendritic to spherical, and improve the yield strength and hardness of the die castings. With the increase of injection holding time, area fraction and average diameter of ESCs in the microstructure are increased, while the yield strength and hardness of the castings are decreased. With content of Si increased from 7.0% to 7.5%, the ESCs can be significantly reduced and the mechanical properties can be improved by reducing the liquidus temperature. By adjusting the pouring temperature, injection holding time and chemical composition of molten aluminum, the quantities and size of ESCs can be effectively reduced, thus obviously improving the mechanical properties, especially yield strength and hardness.

Key Words: Pouring Temperature, Injection Holding Time, Si Content, ESCs, Mechanical Properties

汽车轻量化是降低能源消耗、减少污染物排放最有效的措施之一。铝合金由于具有比强度高和性价比高等特点,作为汽车轻量化的首选材料^[1-2],被用于车身、发动机、车轮等结构件和零部件,其用量强度提升^[3]。高压压铸具有产品尺寸精度高、生产效率高和可观的经济效益等特点,适用于各种铝合金复杂铸件的生产^[4]。吴孟武等^[5]基于冷室压铸工艺,提出了压室预结晶(Externally Solidified Crystals, ESCs)理论,认为熔体

在压室中停留,特别是处于慢速压射阶段时,由于接触较冷的压室壁及冲头,熔体的过热度散失较快,已达到初生相的形核及生长条件。LAUKLIH I 等^[6-7]研究认为,压铸件靠近芯部形成的粗大枝晶组织很大一部分来源于压室中的 ESCs,并随着熔体填充型腔,流体作用力最终分布在铸件心部区域。同时研究了镁铝合金及铝合金压铸不同压室尺寸、压室停留时间以及添加细化剂等对铸件中 ESCs 含量及分布形态的影响,发现压室传

收稿日期:2023-01-12;修改稿收到日期:2023-03-12
第一作者简介:马超,男,1985 年出生,高级工程师,河北秦皇岛(066011),E-mail:machao1121@dicastal.com
通信作者:李志广,男,1974 年出生,工程师,河北秦皇岛(066011),E-mail:lizhiguang@dicastal.com
引用格式:马超,李志广,徐世文,等. 工艺参数对压铸 Al-Si-Mg 合金组织和性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 421-1 424.
MA C, LI Z G, XU S W, et al. Effects of process parameters on microstructure and properties of die casting Al-Si-Mg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 421-1 424.

热系数越大、压室停留时间越长,铸件中 ESCs 含量越高,添加细化剂,铸件中圆整 ESCs 增多。GAO H 等^[8]研究 Mg-Al 合金压铸过程发现,浇注温度越低,压铸件中 ESCs 含量越高;速度越高,压铸件中 ESCs 越圆整细小。传海军等^[9]研究了浇注温度对铝合金显微组织、铸造性能和力学性能的影响,发现较低的浇注温度下金属液流动性差,压射过程中产生涡流、裹气的可能性减小,压铸件内在品质提高,但是压铸件的组织粗化。在冷室高压铸造的实际生产过程中,由于工艺参数之间的相互约束关系,ESCs 不可避免,只能通过优化工艺参数来减少 ESCs 的体积分数并控制其形貌。综上,目前对 ESCs 的研究报道较少,在高压铸造实际生产过程中,针对 Al-Si-Mg 合金,系统研究压铸工艺对微观组织形貌和力学性能影响的相关内容报道较少。

在对采用高压铸造生产铝合金结构铸件进行本体性能测试时发现,当显微组织中存在相当数量的粗大预结晶组织时,会显著降低铸件本体的屈服强度和硬度,无法满足客户标准[屈服强度 ≥ 120 MPa,硬度(HB) ≥ 75]。为了提升铸件本体性能,满足客户标准,研究了浇注温度、压射等待时间和化学成分对显微组织中预结晶组织的体积分数、尺寸和形态,以及对力学性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

采用 Al-Si-Mg 铸造铝合金,其化学成分见表 1。

表 1 Al-Si-Mg 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Al-Si-Mg alloy								%
w_B								
Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Ca	Sr	Al	
6.5~7.5	≤ 0.15	0.50~0.90	0.20~0.30	≤ 0.14	≤ 0.001	0.015~0.025	余量	

选用铝合金横梁(结构铸件)作为试样,采用配备真空系统和铝合金定量浇注炉的 IDRA-1600 压铸机进行试验,通过改变浇注温度、压射等待时间和铝液化学成分等工艺参数(浇注温度为 670、680℃;压射等待时间为 3、4、6 和 8 s;铝液化学成分为 Al-7Si-0.25Mg、Al-7.5Si-0.25Mg),获得不同工艺条件下的试样。在本体上切取试样,并加工为拉伸和硬度试样。金相试样经过粗磨、细磨、抛光后,采用体积分数为 0.5% 的 HF 水溶液进行腐蚀。采用 ZEISSAxio Observer 7m 自动倒置金相显微镜进行显微组织观察。采用 ZWICK Z100 拉伸试验机进行力学性能检测,拉伸速率为 0.08%/s,试样尺寸见图 1。采用 XHB-3000Z 型数显布氏硬度计进行硬度测试,载荷为 62.5 kN,保持 15 s,测试条件为 HB 2.5/62.5。采用 DSC0901 型差热分析仪,分析不同

成分合金的凝固行为,冷却速率分别为 10℃/min 和 30℃/min。

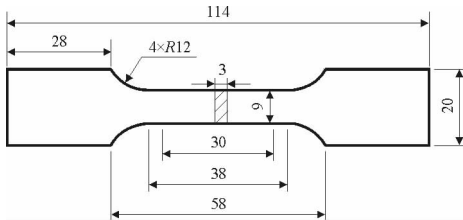


图 1 拉伸试样尺寸
Fig.1 Dimension of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 浇注温度对显微组织和力学性能影响

Al-Si-Mg 合金常规浇注温度在 660~710℃之间,其初生 α -Al(ESCs)通常是树枝晶形貌,但随浇注温度的升高 ESCs 凝固形态也发生变化^[10-11]。图 2 为不同压铸温度下的 Al-7Si-0.25Mg 微观组织。可以看出,随着浇注温度升高,铸件中粗大的预结晶组织呈减少和减小趋势,形貌由树枝状向球状或颗粒状转变。表 2 为 670、680℃条件下 ESCs 面积分数和平均直径的变化,ESCs 的面积分数由 15.8% 减少到 6.3%,平均直径由 122.37 μm 减少到 60.21 μm 。

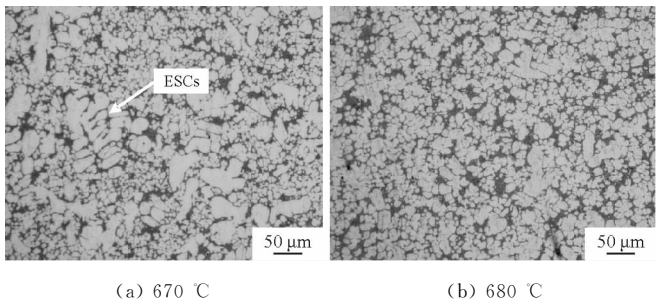


图 2 不同浇注温度下 Al-7Si-0.25Mg 合金的微观组织
Fig.2 Microstructure of Al-7Si-0.25Mg alloy at different pouring temperatures

表 2 不同浇注温度下 ESCs 面积分数、平均直径和铸件本体力学性能

Tab.2 Area fraction, average diameter of ESCs and mechanical properties of casting body at different pouring temperatures						
浇注温度/℃	ESCs 面积分数/%	ESCs 平均直径/ μm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度(HB)
670	15.8	122.37	115	264	14.5	72.2
680	6.3	60.21	118	270	13.3	74.1

从表 2 可以看出,铸件的屈服强度、抗拉强度和布氏硬度随着浇注温度的升高而提高,但伸长率呈下降趋势。因此,为了提高铸件的屈服强度和硬度,应提高浇注温度。但浇注温度在 670~680℃内铸件的屈服强度

和硬度仍未达到客户要求[屈服强度 ≥ 120 MPa, 硬度(HB) ≥ 75]。

2.2 压射等待时间对显微组织和力学性能影响

图 3 为不同压射等待时间下 Al-7Si-0.25Mg 合金的显微组织。可以看出,随着压射等待时间延长,显微

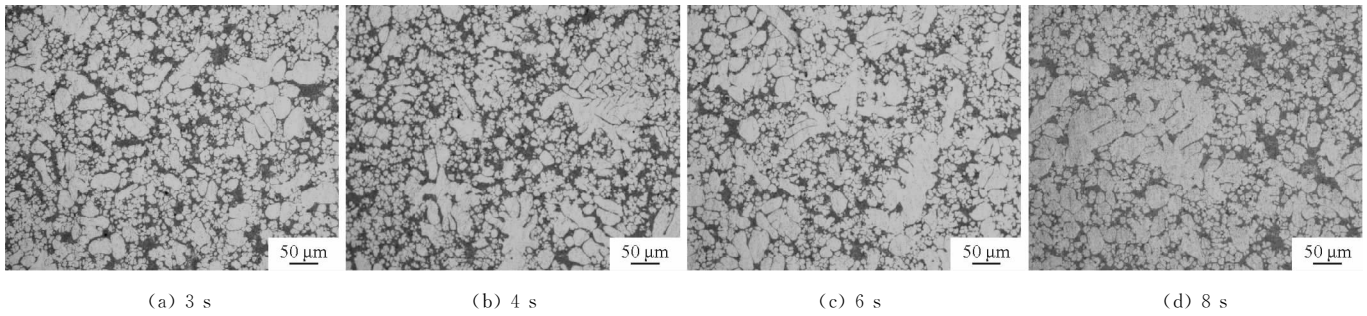


图 3 不同压射等待时间条件下 670 °C 时 Al-7Si-0.25Mg 的微观组织

Fig.3 Microstructure of Al-7Si-0.25Mg alloy at 670 °C under different injection holding time

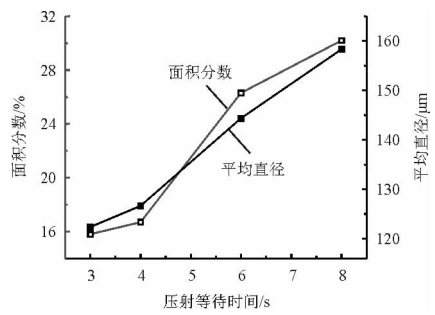


图 4 不同压射等待时间下 Al-7Si-0.25Mg 合金中 ESCs 面积分数和平均直径

Fig.4 Area fraction and average diameter of the ESCs in Al-7Si-0.25Mg alloy at different injection holding time

研究结果一致。

图 5 为铸件在不同压射等待时间下铸件本体力学性能,可以看出铸件的屈服强度、抗拉强度和布氏硬度随着压射等待时间的增加而降低,伸长率则呈上升趋势。因此,为了提高铸件的屈服强度和硬度,应减少压射等待时间。但压射等待时间在 3~8 s 区间内,铸件的屈服强度和硬度仍不能满足要求。

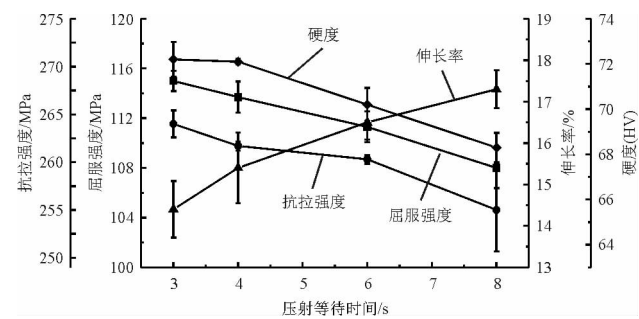


图 5 不同压射等待时间 Al-7Si-0.25Mg 铸件本体力学性能

Fig.5 Mechanical properties of Al-7Si-0.25Mg castings at different injection holding time

组织中预结晶组织逐步粗大,且枝晶充分长大。

图 4 为不同压射等待时间下,Al-7Si-0.25Mg 合金的 ESCs 面积分数和平均直径的变化。可以看出, ESCs 的面积分数由 15.8% 增加到 30.2%,平均直径由 122.37 μm 增加到 158.32 μm 。这与 WU M W 等^[12]的

2.3 化学成分对显微组织和力学性能影响

在调整浇注温度和压射等待时间的基础上,进一步分析化学成分对铸件本体性能的影响。将合金中 Si 含量由 7.0% 调整为 7.5%。首先采用 DSC 测试了 Al-7Si-0.25Mg 和 Al-7.5Si-0.25Mg 两种合金在不同冷却速度条件下的凝固行为。图 6 是冷却速度为 10 °C/min 和 30 °C/min 条件下, Al-7Si-0.25Mg 和 Al-7.5Si-0.25Mg 合金的 DSC 曲线。可以看出,在 10 °C/min 的凝固条件下,两种合金的液相线温度相差 8 °C 左右,随冷却速度提升至 30 °C/min,两种合金的液相线温度相差 13 °C 左右。结果表明,在保持原有浇注温度不变的情况下,提升 Si 含量降低了液相线温度,从而有效抑制了 ESCs 的析出,可减少显微组织中的预结晶组织体积分数。

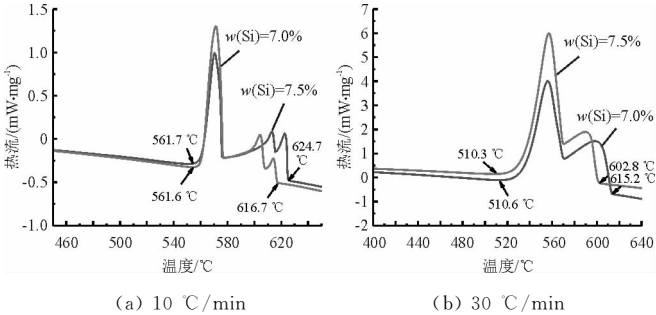


图 6 不同凝固速度下 Al-7Si-0.25Mg 和 Al-7.5Si-0.25Mg 合金的 DSC 曲线

Fig.6 DSC curves of Al-7Si-0.25Mg and Al-7.5Si-0.25Mg alloys at different solidification rates

基于 DSC 的试验结果,在浇注温度为 670 °C,压射等待时间为 3 s 下进行试样制备。铸件的显微组织见图 7。可见在 Si 含量为 7.5% 的情况下,显微组织中几乎不存在预结晶组织,晶粒更加细小,显微组织得到明

显改善,见图 7b。表 3 是 Si 含量为 7.0% 和 7.5% 条件下, ESCs 面积分数和平均直径的变化以及力学性能。可见, Si 含量增加至 7.5%, ESCs 的面积分数由 15.8% 减少为 2.1%, ESCs 的平均直径由 122.37 μm 减小到 40.23 μm 。另外, Si 含量的提升可以显著增加铸件本体的屈服强度和硬度。因此,为了提高铸件的屈服强度和硬度,应将压铸铝液中 Si 含量控制在 7.5% 以上。

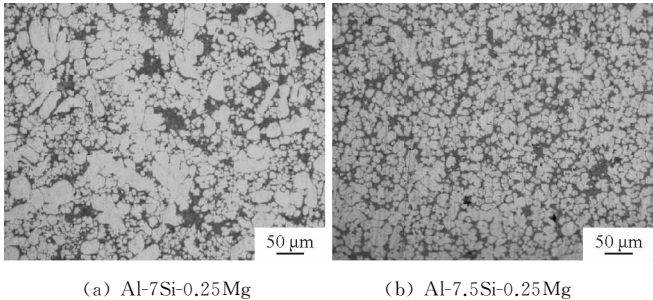


图 7 不同 Si 含量下合金的微观组织

Fig.7 Microstructure of the alloys with different Si contents

表 3 不同 Si 含量条件下 ESCs 面积分数、平均直径和铸件本体力学性能

Tab.3 Area fraction, average diameter of the ESCs and mechanical properties of casting body with different Si contents						
$w(\text{Si})/\%$	ESCs 面积分数/%	ESCs 平均直径/ μm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度(HB)
7.0	15.8	122.37	115	264	14.5	72.2
7.5	2.1	40.23	123	286	12.5	76.9

3 结 论

- (1)显微组织中存在的预结晶组织是降低 Al-7Si-0.25Mg 铸件的屈服强度和硬度的主要原因。
- (2)提升浇注温度可以显著减少 Al-7Si-0.25Mg 合金显微组织中的 ESCs,并促进其形貌由树枝状向球状转变,提升铸件本体性能。
- (3)增加压射等待时间, Al-7Si-0.25Mg 合金显微组织中 ESCs 的面积分数和平均尺寸呈增大趋势,屈服强度和硬度呈下降趋势。
- (4)提升 Si 含量,在适当冷速条件下,可明显降低合金液相线温度,从而抑制预结晶组织(ESCs)的析出,显著提升铸件本体力学性能。

参 考 文 献

[1] 郭玉琴,朱新峰,杨艳,等. 汽车轻量化材料及制造工艺研究现状[J]. 锻压技术, 2015, 40(3): 1-6.

[2] 付彭怀,彭立明,丁文江. 汽车轻量化技术:铝 / 镁合金及其成型技术发展动态[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 84-90.

[3] 褚东宁,冯美斌,王勇. 未来汽车业的发展与材料技术[J]. 汽车工艺与材料, 2011(2): 39-44.

[4] 熊守美,姜永正,卢宏远,等. 铸造技术路线图:高压铸造[J]. 铸造, 2017, 66(6): 529-534.

[5] 吴孟武,李晓波,郭志鹏,等. 镁合金冷室压铸组织中压室预结晶组

织的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(3): 243-246.

[6] LAUKLIH I, GOURLAYC M, DAHLEA K. Migration of crystals during the filling of semi-solid castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions, A36(3): 805-818.

[7] LAUKLIH I, ARNBERGL, LOHNE O. Effects of grain refiner additions on the grain structures in HPDC A356 castings[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2005, 18(2): 65-72.

[8] GAO H, WESSON M. Effect of microstructure on mechanical properties of as-cast Mg-Al alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, A35(1): 309-319.

[9] 传海军,黄晓峰,毛祖莉,等. 压铸工艺对铝合金组织性能影响的研究进展[J]. 新技术新工艺, 2007(10): 21-24.

[10] 纪连清,纪培英,熊守美,等. 浇注温度对 ADC12 合金超低速压铸件组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(7): 529-532.

[11] 毛卫民,杨继莲,赵爱民,等. 浇注温度对 Al-Si-Mg 合金显微组织的影响[J]. 北京科技大学学报, 2001, 23(1): 38-41.

[12] WU M W, LI X B, GUO Z P. Effects of process parameters on morphology and distribution of externally solidified crystals in microstructure of magnesium alloy die castings[J]. China Foundry, 2018, 15(2): 139-144.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如需快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

