

Zn 含量对 Al-12Si-2Cu-1Mg-x Zn 合金铸造性能的影响

何建刚^{1,2} 郭睿¹ 曾大新¹ 李峰光¹ 史秋月¹

(1.湖北汽车工业学院材料科学与工程学院; 2.东风锻造有限公司铸造二厂)

摘 要 通过测量不同 Zn 含量 Al-12Si-xZn-2Cu-Mg 合金冷却曲线、热裂敏感性、缩松缩孔体积等,研究了 Zn 含量对 Al-12Si-xZn-2Cu-Mg 合金的热裂及缩松、缩孔等铸造性能的影响。结果表明,Zn 能够细化合金中 Si 相,促进补缩,并固溶于 α -Al 中强化固相骨架,从而降低热裂敏感性。同时,晶粒细化和共晶温度的降低,也降低了缩松、缩孔倾向。

关键词 Al-12Si-2Cu-Mg-xZn 合金;热裂;缩松缩孔;铸造性能

中图分类号 TG27;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Zn Content on Castability of Al-12Si-2Cu-1Mg-xZn Alloy

He Jiangang^{1,2}, Guo Rui¹, Zeng Daxin¹, Li Fengguang¹, Shi Qiuyue¹

(1.College of Materials Engineering, Hubei University of Automotive Technology;
2.No. 2 Foundry Factory, Dongfeng Forging Co., Ltd.)

Abstract: The influence of Zn content on castability of Al-12Si-2Cu-1Mg-xZn alloy, including hot cracking and shrinkage cavities, was investigated by measuring cooling curve, hot cracking sensitivity and volume of shrinkage cavity. The results indicate that Zn can refine the Si phase in the alloy and promote feeding, which is dissolved into α -Al to strengthen the solid framework, thus reducing the hot cracking sensitivity. Meanwhile, the grain refinement and decline of eutectic temperature also reduce the tendency of shrinkage porosity and cavities.

Key Words: Al-12Si-2Cu-Mg-xZn Alloy, Hot Cracking, Shrinkage Porosity and Cavities, Castability

换挡毂是双离合变速器的重要部件,由于其加工精度高,并要求具有较好的耐磨性能,常用铸铁和高强度铸造耐磨铝合金进行制备。为了满足高性能和轻量化需求,高强度铝合金的应用前景更加广阔^[1-3]。Al-Si-Cu-Mg 系合金通过在流动性好的 Al-Si 系合金中添加 Cu、Mg、Zn 等强化元素实现高的比强度、良好的铸造性能和耐磨性,被广泛应用于生产换挡毂、活塞和缸体等铸件^[4]。对于铸造铝合金材料来说,良好的铸造性能是复杂铸件成形的关键,且对产品品质、生产成本与效率均有重要影响。而目前研究者针对 Al-Si-Cu-Mg 系合金的研究主要集中于化学成分、组织性能等方面,对于其铸造工艺性能的研究报道较少^[5-7]。衡量铸造工艺性能的指标主要有流动性、收缩特性和偏析倾向等,共晶成分附近 Al-Si 合金具有良好的流动性,易于获得外形完整、轮廓清晰的铸件,所以收缩和偏析导致缩孔、缩松以及热裂可能是影响铸件品质的主要因素^[8-9]。因此,本研究考察 Zn 含量对 Al-12.5Si-2Cu-1Mg-x Zn 合金热

裂和缩孔缩松倾向的影响,并从微观角度分析其形成机理,以期为高强度耐磨铝合金的生产与应用提供参考。

1 试验过程

首先将 Al-7Si 合金放入坩埚中在 700 ℃ 熔化保温,待合金呈半固态时加入质量分数均为 99.99% 的结晶 Si 和电解 Cu,并将结晶 Si 完全压入铝液保证能够充分熔解,最后将质量分数为 99.99% 的纯 Mg 压入到 Al 液中并缓慢搅动使其熔化。当炉料完全熔化后,升温至 780 ℃ 保温,加入质量分数为 0.4% 的 Cu-9P 变质剂变质处理 30 min;接着降低合金液温度至 750 ℃ 保温,加入 1.2% 的 MnCl₂ 精炼剂进行精炼处理;最后,在铝熔体表面撒扒渣剂,搅拌、静置 10~15 min 后,清除熔渣获得 Al-12.5Si-2Cu-1Mg-(0~4)Zn 合金熔体。按 GB-T 1173-2013 采用金属型浇注试样,浇注温度为(750±5)℃,浇注前在模具内腔均匀喷涂脱模剂,金属型预热温

收稿日期:2022-10-22;修改稿收到日期:2023-01-10

基金项目:工信部国家科技重大专项资助项目(2018ZX04027001);湖北省教育厅科研计划资助项目(Q20211804);湖北汽车工业学院博士启动基金资助项目(BK201607);湖北汽车工业学院“增材制造及表面强化”校级创新团队资助项目(B05)

第一作者简介:何建刚,男,1995 年出生,硕士研究生,湖北十堰(442002),E-mail: 1993975437@qq.com

通信作者:郭睿,男,1989 年出生,讲师,湖北十堰(442002),E-mail: guor@huat.edu.cn

引用格式:何建刚,郭睿,曾大新,等. Zn 含量对 Al-12Si-2Cu-1Mg-x Zn 合金铸造性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(11): 1 545-1 549.
HE J G, GUO R, ZENG D X, et al. Effects of Zn content on castability of Al-12Si-2Cu-1Mg-x Zn alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11): 1 545-1 549.

度为 $(240\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 。采用热分析样杯进行熔炼铝合金冷却曲线的采集(见图 1),使用多通道温度记录仪进行冷却温度的记录。每组试验重复 3 次。

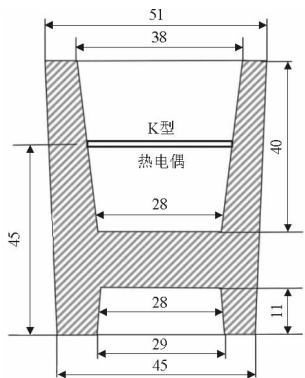


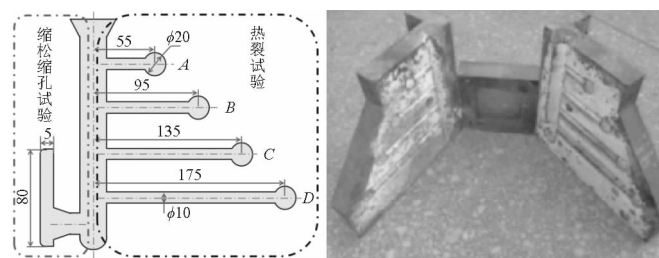
图 1 热分析样杯尺寸及热电偶位置示意图

Fig.1 Dimension diagram of sample cup and position of thermocouple for thermal analysis

合金热裂倾向测试采用 CRC 约束热裂试棒法^[10],见图 2。采用 HTS(Hot Tearing Susceptibility)评定热裂敏感性的指数,其计算公式:

$$H_{\text{TS}} = \sum (f_{\text{length}} \cdot f_{\text{location}} \cdot f_{\text{crack}}) \quad (1)$$

式中, f_{length} 为棒长影响因子,按由短至长,数值分别为 32、16、8 和 4; f_{location} 为位置影响因子,在直浇道与热裂试棒连接处、热裂试棒与末端金属球处、热裂试棒中产生裂纹对应因子大小分别为 1、2、3; f_{crack} 为裂纹尺寸影响因子,热裂试棒无裂纹、裂纹较轻、裂纹较重(裂纹长度小于热裂试棒横截面周长的 1/2)、裂纹严重(裂纹扩展热裂试棒整周)、完全断裂时影响因子分别为 0、1、2、3 和 4。



(a) 试样结构设计

(b) 试验用模具

图 2 铸造性能测试示意图

Fig.2 Schematic diagram of casting performance test

在热裂测试试样左侧采用锥形圆台将直径为 18 mm 横浇道与 5 mm 厚度薄板连接,构建热节结构,使合金产生缩孔、缩松集中在热节处,采用排水法测量缩孔、缩松体积。

利用电火花线切割法截取金相试样,依次采用 180 号~2000 号金相砂纸进行打磨,再经 1.5 μm 金刚石喷雾抛光剂进行抛光,冲洗后浸入质量分数为 0.5% 的 HF 溶液中腐蚀 7 s。采用体视显微镜观察试样的缩松

缩孔形貌,腐蚀后采用 Axio Observer Z1m(Zeiss)光学显微镜进行微观组织相貌观察,并采用 JSM-6510LV 场发射扫描电镜分析断口形貌。

2 试验结果分析

2.1 Zn 含量对冷却曲线的影响

图 3 为不同 Zn 含量下 Al-12.5Si-2Cu-Mg- x Zn 合金的冷却曲线。共晶转变是 Al-12.5Si-2Cu-Mg- x Zn 合金凝固的主要转变,转变过程释放大结晶潜热,出现温度回升,即再辉现象。可以看出,随着 Zn 含量的增加,温度回升的最低点逐渐下降,即共晶转变温度逐渐降低,这符合 Al-Si-Zn 多元相图的规律^[11]。

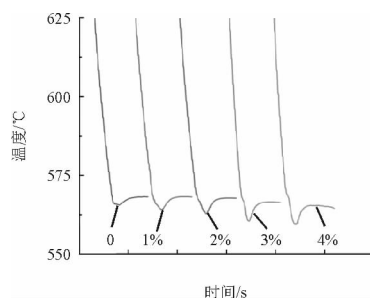


图 3 不同 Zn 含量下 Al-12.5Si-2Cu-1Mg- x Zn 合金的冷却曲线

Fig.3 Cooling curves of Al-12.5Si-2Cu-1Mg- x Zn alloy with different Zn contents

2.2 Zn 含量对热裂的影响

图 4 为不同 Zn 含量合金及对比样(EN AC- AlSi12CuNiMg)热裂试样与直浇道交汇处宏观形貌。可见,试棒长度为 175 mm 时,交汇处均出现了显著裂纹;试棒长度为 55 mm 时,交汇处均未出现裂纹;其他条件下,相同长度的试棒与直浇道交汇处存在不同程度裂纹。由于直浇道较裂纹试棒尺寸大,凝固过程中直浇道冷却慢、温度高,热裂纹试棒冷却快、温度低。试棒凝固收缩受直浇道和末端金属球约束,在直浇道与热裂纹试棒相交位置,合金温度越高,越容易产生热裂纹。故试棒越长温度场越不均匀,试棒越容易产生裂纹。

不同 Zn 含量合金的热裂敏感指数见表 1。对比 HTS 结果可知,Al-12.5Si-2Cu-1Mg- x Zn 合金的热裂敏感指数均小于 EN AC- AlSi12CuNiMg 合金,且随着 Zn 含量的增加呈现先减少后增加的趋势。这表明交汇处产生裂纹程度不仅与试棒长度相关,试棒越长裂纹越严重,还与合金成分有较大的关系。

图 5 为试棒长度为 175 mm 时 Zn 含量为 0 和 4% 的合金拉伸断口 SEM 形貌。由图 5a 和图 5b 可见,添加 Zn 后,断裂形貌变化较小,高倍数下可观察到同时存在固相断裂和液膜断裂两种形貌特征,固相断裂处有明显的“撕裂”塑性变形特征,见图 5c;液膜断裂表面为

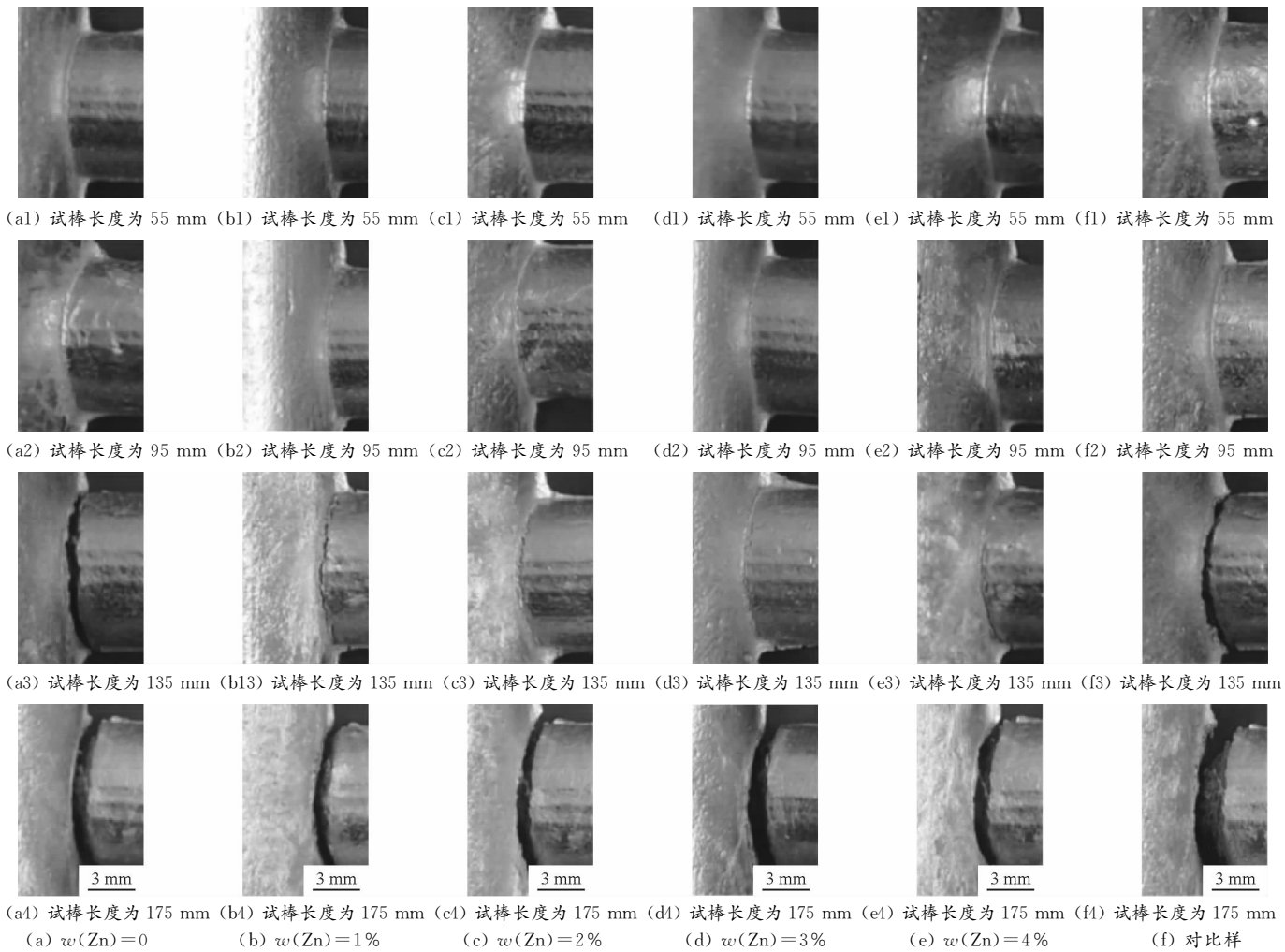


图 4 不同合金成分热裂试棒与直浇道交汇处宏观形貌

Fig.4 Macro morphologies of alloys at the intersection of hot cracking bar and ingate

表 1 Al-12.5Si-2Cu-1Mg-*x*Zn 合金及对比样热裂敏感指数
Tab.1 Hot crack sensitivity index of Al-12.5 Si-2Cu-1Mg-*x*Zn and EN AC-*AlSi12CuNiMg* alloy

<i>x</i>	组号	裂纹尺寸影响因子 f_{crack}				热裂敏感指数 H_{TS}	
		棒 A	棒 B	棒 C	棒 D	计算值	平均值
0	1	0	1	3	4	56	53
	2	0	1	3	4	56	
	3	0	1	2	4	48	
1	1	0	1	2	4	48	52
	2	0	1	4	3	60	
	3	0	1	2	4	48	
2	1	0	0	2	4	32	43
	2	0	1	2	4	48	
	3	0	1	2	4	48	
3	1	0	1	2	3	44	47
	2	0	1	2	4	48	
	3	0	1	2	4	48	
4	1	0	1	2	4	48	48
	2	0	1	2	4	48	
	3	0	1	2	4	48	
对比样	1	0	1	3	4	56	67
	2	0	2	3	4	72	
	3	0	2	3	4	72	

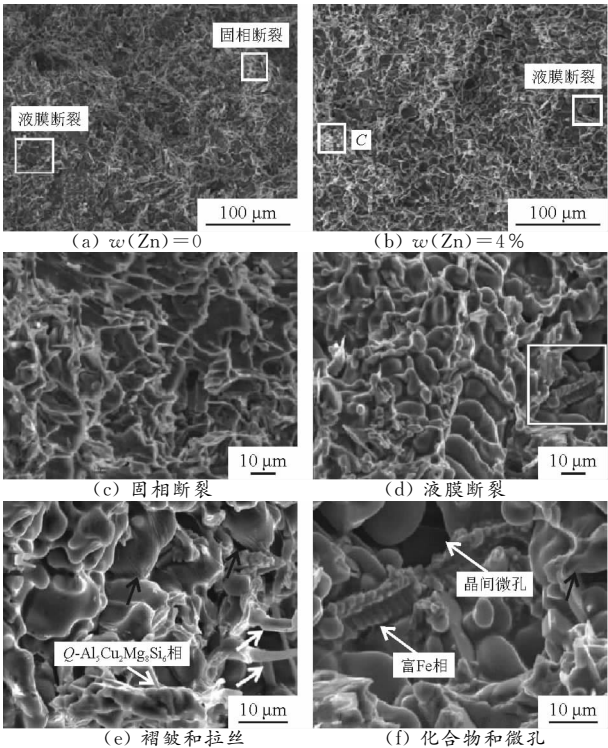


图 5 合金热裂断口 SEM 形貌

Fig.5 SEM morphologies of hot cracking fracture

包覆在晶粒上的液膜凝固形成的,表面光滑,见图 5d;同时可观测到液膜凝固收缩时形成的褶皱(黑色箭头),以及断裂过程中液膜被拉成丝(白色箭头),见图 5e;液膜断裂面上还有化合物相和晶间微孔,见图 5f 箭头处。此外,通过 EDS 分析可确定图 5e 和图 5f 中存在凝固早期即形成的尺寸较大的富 Fe 相和尺寸较小的 $\text{Q-Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 相。

2.3 Zn 含量对缩松缩孔的影响

图 6 为 $\text{Al-12.5Si-2Cu-1Mg-}x\text{Zn}$ 和 EN AC-AlSi12CuNiMg 合金缩孔缩松试样垂直中心剖面宏观形貌。可以看出,缩孔、缩松主要出现在试样梯台形内浇口与平板形成的热节处,而且主要以集中缩孔形式出现。随着 Zn 含量增加,合金的缩孔、缩松倾向逐渐降低。

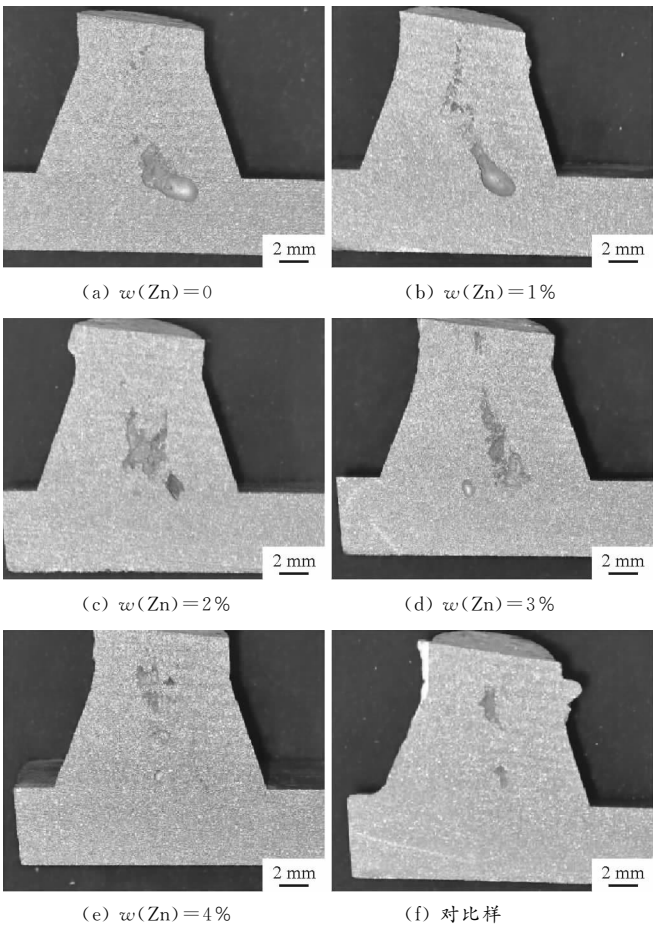


图 6 $\text{Al-12.5Si-2Cu-1Mg-}x\text{Zn}$ 和对比样合金缩孔、缩松试样断面照片

Fig.6 Fracture images of shrinkage porosity and cavity of EN AC-AlSi12CuNiMg and $\text{Al-12.5Si-}x\text{Zn-2Cu-1Mg}$ alloys

图 7 为采用排水法测量的 $\text{Al-12.5Si-2Cu-1Mg-}x\text{Zn}$ 和 EN AC-AlSi12CuNiMg 合金缩孔、缩松体积。可以看出,随 Zn 含量增加,合金缩孔、缩松体积由 150 mm^3 降低到 80 mm^3 ,且含 Zn 的合金缩孔、缩松体积均比 EN AC-AlSi12CuNiMg 合金中的小。

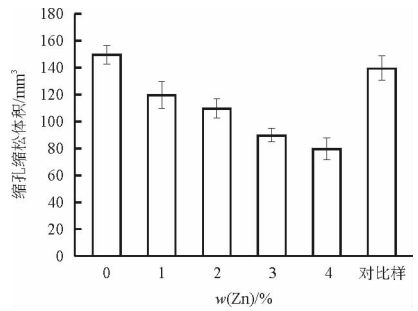


图 7 $\text{Al-12.5Si-2Cu-1Mg-}x\text{Zn}$ 和 EN AC-AlSi12CuNiMg 合金缩孔、缩松体积

Fig.7 Volume of shrinkage porosity and cavity in EN AC-AlSi12CuNiMg alloy and $\text{Al-12.5Si-2Cu-1Mg-}x\text{Zn}$ alloy

3 分析与讨论

$\text{Al-12.5Si-2Cu-1Mg-}x\text{Zn}$ 合金组织主要由 $\alpha\text{-Al}$ 、共晶 Si 和初晶 Si 相构成^[12]。图 8 为不含 Zn 和 Zn 含量为 4% 的合金的金相组织,主要为 $\alpha\text{-Al}$ 、细小块状初晶 Si 相以及短片状共晶 Si 相。可见,随着 Zn 含量增加,组织中共晶 Si 相尺寸略有减小,其余差异不明显。

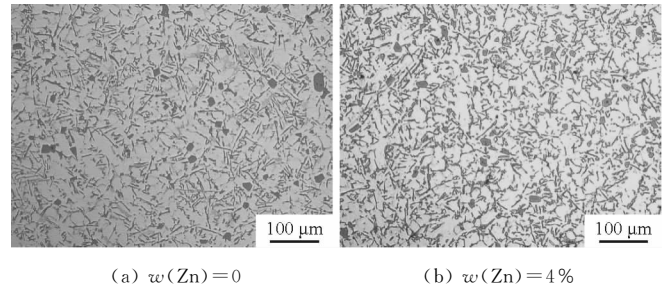


图 8 不同 Zn 含量的 $\text{Al-12.5Si-2Cu-1Mg-}x\text{Zn}$ 合金铸态金相组织

Fig.8 As-cast microstructure of $\text{Al-12.5Si-2Cu-1Mg-}x\text{Zn}$ alloy with different Zn content

不同 Zn 含量下合金中 Si 相平均尺寸和共晶温度见图 9。可以看出,合金中共晶 Si 相平均尺寸由不含 Zn 时的 $37.5\text{ }\mu\text{m}$ 下降至 Zn 含量为 2% 的 $29.5\text{ }\mu\text{m}$ 。分析认为变质剂中的 P 与 Al 形成的 AIP 晶型与 Si 的晶型相同,可作为非自发形核核心从而促进初晶 Si 相的

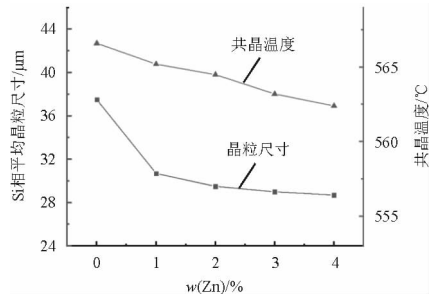


图 9 不同 Zn 含量 $\text{Al-12.5Si-2Cu-1Mg-}x\text{Zn}$ 合金 Si 相平均晶粒尺寸及共晶温度

Fig.9 Average grain size and eutectic temperature of Si phase in $\text{Al-12.5Si-2Cu-1Mg-}x\text{Zn}$ alloy with different Zn contents

形核^[13]。同时,Zn 的添加限制了共晶 Si 相在{111}面上的生长,迫使共晶 Si 改变堆积顺序,从而阻碍了共晶 Si 的长大^[14]。而细化后的共晶团,由于晶粒尺寸减小,一方面能够增加合金的流动性,大幅提升共晶团之间的液态金属补缩能力^[15],既能够降低热裂敏感性,还能够降低缩孔缩松形成倾向;另一方面还能够增加单位面积内晶粒的表面积使得枝晶间液膜厚度变小,根据表面张力对凝固热裂的影响作用可知,液膜厚度的减小,拉断液膜的临界应力呈数量级增长,裂纹更难形成^[16]。

此外,断口形貌中的液膜褶皱和断裂拉丝形貌是典型的液膜断裂和晶间搭桥特征^[17],而 Al-Si 合金凝固末期枝晶间存在的液膜和晶间搭桥是晶间热裂纹产生的重要原因之一。同时,富 Fe 相等枝晶的存在表明 Al-12.5Si-2Cu-1Mg- x Zn 合金热裂时,已有固相骨架形成,固相骨架对热裂的萌生和扩展亦有很大的阻碍作用,而 Zn 能够固溶于 α -Al 起到固溶强化作用,从而提高固相骨架的强度,降低热裂敏感性。因此,Zn 降低合金的热裂敏感性可能是 Zn 细化晶粒和固溶强化共同作用的结果。

由图 9 可知,共晶转变温度随着 Zn 含量的增加由 566.6 °C 降低至 562.4 °C,而共晶温度的降低以及初生 Si 相的析出释放大量的结晶潜热,使得合金液维持液态时间延长,同时细化的晶粒组织促进了液态金属的流动性和补缩能力,从而降低了缩松、缩孔倾向。

4 结 论

(1) Al-12.5Si-2Cu-1Mg- x Zn 合金热裂倾向随合金中 Zn 含量的增加先减小后增大,Zn 含量为 2% 的合金热裂倾向最低,且含 Zn 合金热裂倾向明显低于 EN AC-AlSi12CuNiMg 合金的热裂倾向。

(2) Al-12.5Si-2Cu-1Mg- x Zn 合金热裂断口存在固相断裂和液膜断裂两种形貌,说明断裂时已有固相骨架形成,固相骨架对热裂的萌生和扩展有很大的阻碍,合金热裂敏感性小可能是 Zn 细化晶粒和固溶强化共同作用的结果。

(3) Al-12.5Si-2Cu-1Mg- x Zn 合金产生缩孔、缩松倾向随 Zn 含量的增加而减少;Zn 含量为 1%~4% 的合金缩孔、缩松倾向均低于 EN AC-AlSi12CuNiMg 合金。

参 考 文 献

- [1] 李耀刚,刘畅,龙海洋,等. 汽车自动变速器研究现状及发展趋势[J]. 现代制造工程, 2020(1): 155-161.
- [2] FERNANDE G R, REQUENA G C. The effect of spheroidisation-heat treatment on the creep resistance of a cast AlSi12CuMgNi piston alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A598(26): 147-153.

- [3] 王金钢,张金虎,徐哲,等. 双离合变速器换挡毂关键工艺技术研究[J]. 轻工科技, 2018, 34(12): 42-43,45.
- [4] ERVINA M N, KONG H J, KOK C K. Review: Effect of alloying element on Al-Si alloys[J]. Advanced Materials Research, 2013, 845(45): 355-359.
- [5] YE H. An Overview of the development of Al-Si-alloy based material for engine applications[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2003, 12(3): 288-297.
- [6] 孙继鸿. 高性能过共晶 Al-Si-Cu-Mg 合金组织与性能的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2017.
- [7] 徐莎. 稀土强化活塞用铸造铝合金组织性能研究[D]. 辽宁大连:大连理工大学, 2020.
- [8] 余凌智,李建平,杨通,等. Cu 对 Al-7Si- x Cu-0.3Mg 合金铸造性能的影响[J]. 铸造, 2011, 60(4): 345-348.
- [9] 于文慧,石磊,张勇,等. Al-10Si-2Fe 中间合金对 Al-10Si-2Cu 合金共晶团细化及热裂敏感性的影响[J]. 铸造, 2019, 68(9): 988-991.
- [10] CAO G, KOU S. Hot cracking of binary Mg-Al alloy castings[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A417(1-2): 230-238.
- [11] RAGHAVAN V. Al-Si-Zn (Aluminum-Silicon-Zinc)[J]. Journal of Phase Equilibria & Diffusion, 2007, 28(2): 197.
- [12] DONG X, AMIRKHANLOU S, JI S. Formation of strength platform in cast Al-Si-Mg-Cu alloys[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-11.
- [13] 孔凡校. 过共晶铝硅活塞合金的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [14] ZHANG L K, ZHANG B R. Effects of Zn on microstructure modification and mechanical properties improvement of Al-Si-Cu-Mg alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2020, A51(8): 4 158-4 167.
- [15] 毛文龙,赵禹凯,王顺成,等. 晶粒细化对铸造 Al-3.2Si-0.8Mg 合金流动性、力学性能和导热系数的影响[J]. 材料导报, 2016, 30(11): 88-91, 105.
- [16] 宁勤恒,李永刚,左秀荣,等. 热裂形成机理及判据的研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 7-12, 17.
- [17] 许荣福. 亚共晶 Al-Si 合金热裂形成过程的研究[D]. 济南:山东大学, 2014.

(编辑:栗万仲)

160 000 kN 超大型压铸 单元发布

近日,“轻”势所向,“绿”动未来——力劲 160 000 kN 超大型压铸单元发布会在力劲集团深汕特别合作区智能装备制造基地举行。据介绍,力劲 160 000 kN 超大型压铸单元拥有先进的铸造工艺和更强的模板结构,占地面积更小,生产效率更高,能源用量更少,除尘净化系统运行效果更优异。其采用了全新锁模结构和更智能的控制系统,配备先进的打料系统、高效的快速换模系统,LK-NET 云压铸网络管理系统支持 OPC-UA、Profinet、Modbus TCP/IP 等联网接入,将在更大尺寸的汽车一体化压铸结构件制造领域获得更广泛的应用。

力劲 160 000 kN 压铸单元不是简单的放大,从材料、结构、铸造工艺各方面优化,实现了 160 000 kN 大板的一次性浇注,行业首创新型直压式结构,减少 2/3 的润滑点位,润滑油用量减少 70% 以上。

(摘自压铸周刊)