

Zn 对压铸 Al-Si 合金共晶 Si 的粗化及粗化后变质处理

韩盼文¹ 袁灵洋¹ Ghulam Asghar¹ 刘保良² 胡志恒³ 付彭怀^{1,2} 彭立明^{1,2}
(1.上海交通大学材料科学与工程学院轻合金精密成型国家工程研究中心;
2.上海轻合金精密成型国家工程研究中心有限公司; 3.上海永茂泰汽车零部件有限公司)

摘要 通过微观组织观察和力学性能测试等手段,研究了 Zn 对压铸 Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn 合金的影响,在此基础上进行 Sr 和 RE 的变质处理,获得了一种综合性能良好的压铸铝合金。结果表明,Zn 的固溶强化使合金的强度提升,但原来细小的共晶 Si 变得粗大,出现长条状和块状的 Si,合金伸长率下降。加入 0.04% 的 Sr 和 0.1% 的 La/Ce 混合稀土使粗化的共晶 Si 重新细化,最终获得合金的屈服强度为 167 MPa、抗拉强度为 324 MPa、伸长率为 10.2%。

关键词 Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn 压铸铝合金; Zn; 变质处理; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG146.21; TG249.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.04.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Coarsening of Eutectic Si in Die-casting Al-Si Alloy by Zn and Modification Treatment after Coarsening

Han Panwen¹, Yuan Lingyang¹, Ghulam Asghar¹, Liu Baoliang²,
Hu Zhiheng³, Fu Penghuai^{1,2}, Peng Liming^{1,2}
(1.National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University; 2.Shanghai Light Alloy Net Forming National Engineering Research Center Co., Ltd.; 3.Shanghai Yongmaotai Auto Parts Co., Ltd.)

Abstract: The effects of Zn on die casting Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn alloy were investiagted by means of microstructure observation and tensile test. On this basis, a kind of die casting aluminum alloy with good comprehensive properties was prepared by adding Sr and RE. The experimental results reveal that the addition of Zn can improve the strength of the alloy with the decrease of elongation, however the fine eutectic Si become coarser, and long strip and massive Si can be observed. The coarsened eutectic silicon can be refined again with 0.04% Sr and 0.1% La/Ce mixed rare earth, where the yield strength, tensile strength and elongation of the alloy reach up to 167 MPa, 324 MPa and 10.2%, respectively.

Key Words: Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn Die-casting Aluminum Alloy, Zn, Modification Treatment, Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2020-10-25;修改稿收到日期:2020-11-28
基金项目:肇庆市科技计划资助项目(2018K006)
第一作者简介:韩盼文,男,1996 年出生,硕士研究生,上海(200240),E-mail:hpw687@outlook.com
通信作者:彭立明,男,1972 年出生,教授,上海(200240),E-mail:plm616@sjtu.edu.cn
引用格式:韩盼文,袁灵洋,Ghulam Asghar,等. Zn 对压铸 Al-Si 合金共晶 Si 的粗化及粗化后变质处理[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(4):483-489.
HAN P W, YUAN L Y, GHULAM A, et al. Coarsening of eutectic Si in die-casting Al-Si alloy by Zn and modification treatment after coarsening[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4):483-489.

[6] 朱艳春,曾卫东,彭雯雯,等.Ti40 合金热压缩变形过程的开裂行为研究[J].稀有金属材料与工程,2013, 42(10): 2 088-2 092.

[7] 张成,杨海成,韩冬,等.钛合金旋压技术在国内航天领域的应用及发展[J].固体火箭技术,2013, 36(1): 127-132.

[8] 王鑫,董洪波,邹忠波,等. AerMet100 钢的热变形显微组织演变及动态再结晶行为[J].特种铸造及有色合金,2016,36(1):121-125.

[9] 倪红明,董显娟,徐勇,等.Ti-48Al-2Nb-2Cr 合金热变形行为及本构关系研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(2): 228-232.

[10] SARKAR A,CHAKRAVARTTY J K, SAMAJDAR I. The avrami kinetics of dynamic recrystallization in cadmium[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2010, A41(10): 2 466-2 470.

[11] JONAS J J, QUELENNEC X, LAN J, et al. The Avrami kinetics of dynamic recrystallization[J]. Acta Materialia, 2009, 57(9): 2 748-2 756.

[12] 刘筱,朱必武,李落星. Laasraoui-Jonas 位错密度模型结合元胞自动机模拟 AZ31 镁合金动态再结晶[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 889-903.

[13] SELLARS C M, WHITEMAN J A. Recrystallization and grain growth in hot rolling[J]. Metal Science, 1979,13(3):187-194.

[14] 郭海龙,孙志超,杨合.挤压态 7075 铝合金再结晶经验模型及应用[J].中国有色金属学报, 2013, 23(6): 1 507-1 515.

压铸铝合金具有较高的比强度、良好的铸造性能、加工性能、可再生性能以及优良的导电导热性能,被广泛应用于汽车、航空航天和电器工业等领域^[1~3]。Al-Si 压铸合金因结晶温度区间小、Si 相凝固结晶潜热和比热容大、线收缩率小,且具有良好的流动性能、充型性能和较小的热裂、缩松倾向,得到广泛应用^[4~6]。但传统的压铸 Al-Si 合金塑性较差,难以满足汽车行业高速发展的要求^[7,8]。为满足性能要求,目前主要通过引入强化元素来实现性能改善^[9,10],另外通过变质共晶 Si 来提高合金的塑性^[11]。

压铸 Al-Si 合金中常见的强化元素有 Mg、Cu 等, Mg 可与 Si 形成 Mg₂Si,在合金组织中弥散析出起到强化作用,提高合金的屈服强度^[12,13];Cu 可作为合金中的固溶元素,同时可与 Al 形成 Al₂Cu 相,起到固溶强化和析出强化作用,提高合金的屈服强度和抗拉强度^[14,15]。在 Al-Si 合金中 Zn 很少作为强化元素进行研究,张晓丽^[16]探究了 Zn 对 Al-Si-Cu-Mg 合金组织和性能的影响,发现在 1% 范围内 Zn 可促进 Si 相的圆整化,提升合金的硬度、强度,但降低伸长率。杨承洪等^[17]和 YASIN A 等^[18]进一步扩大 Zn 含量,研究了质量分数超过 1% 的 Zn 对近共晶 Al-Si 合金性能的影响,发现当 Zn 含量超过 1%,合金的强度和硬度随着 Zn 含量增加而提升,伸长率下降,合金中共晶 Si 尺寸增加,出现片状和针状。赵浩峰等^[19]的研究也得到类似的结论。Al-Si 合金中,当 Zn 含量超过 1% 会使共晶 Si 尺寸增大。显然,Zn 的引入能够提升合金的强度,但由于粗化共晶 Si,导致伸长率下降。目前的研究主要集中在重力铸造,对于 Zn 粗化共晶 Si 的原因未给出解释,同时也没有给出解决措施。因此,有必要研究在压铸快速冷却条件下 Zn 对 Al-Si 合金组织性能的影响,与此同时引入变质元素,以解决共晶 Si 粗化的问题。

本课题选取 Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn 作为研究对象,采用压铸,加入 2.5% 的 Zn,之后进一步加入 Sr 和 La/Ce 混合稀土对合金进行变质处理,探究不同元素对合金力学性能、组织特征、断裂行为的影响,从而获得一种高强高韧压铸铝合金。

1 试验设备与试验合金

选用 Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn 铝合金(Z1 合金)作为基础合金,依次加入 2.5% (质量分数,下同)的 Zn、0.04% 的 Sr、0.1% 的 La/Ce 混合稀土(RE),获得 Z2、Z3、Z4 合金,以纯 Al、Si、Mg、Zn 和 Al-10Mn、Al-10Sr、Al-10RE 中间合金为原材料。合金的实际成分通过光谱和 ICP 测定,见表 1。图 1 为压铸拉伸试棒尺寸,拉伸试棒尺寸根据 GB/T13822-2017 设计。

表 1 4 种合金实测的化学成分

合金	w _B								
	Si	Zn	Mg	Mn	Fe	Sr	La	Ce	Al
Z1	9.88	<0.01	0.293	0.594	0.140	0.012	—	—	余量
Z2	9.47	2.49	0.297	0.578	0.136	0.010	—	—	余量
Z3	9.88	2.45	0.295	0.569	0.138	0.048	—	—	余量
Z4	9.95	2.44	0.310	0.537	0.141	0.054	0.063	0.027	余量

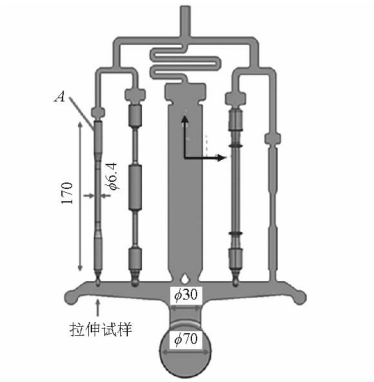


图 1 压铸拉伸试棒尺寸

Fig.1 Die-casting mold and dimension of tensile samples

拉伸设备采用 Zwick/Roell-20kN 万用拉伸机,在室温下进行拉伸,每种合金成分试棒随机选取 5 根,拉伸曲线通过附在拉伸机上的引伸计得到,标距为 50 mm,拉伸速率为 1 mm/min;通过 DaVinci X 射线衍射(XRD)鉴别合金中的相组成,X 射线光源为 Cu 靶;从拉伸试样切取 1~2 mm 进行镶样,经过机械研磨、抛光后,用 HF 溶液(0.5 mL 的 HF、100 mL 的 H₂O)进行腐蚀,利用 Zeiss Axio 光学显微镜进行 OM 观察,Apollo300 扫描电镜进行高倍显微组织、断口观察和能谱分析;通过 Image Pro6.0 进行晶粒尺寸分析并获得 α -Al 面积分数;TEM(transmission electron microscope)观察在 JEM-2100F 上进行。

2 试验结果和讨论

2.1 微观组织分析

图 2 为压铸 Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn 合金的微观组织,拉伸试棒截面可分为 A、B、C 3 个区域,在距离试样表面 1 300~1 500 μ m 处有一圆环,环宽约为 200 μ m (见图 2a 中 B 区域),由于该处缺陷一般较多,称为缺陷环。缺陷环可认为是试样表层组织和心部组织的分界区域^[20]。图 2b~图 2d 是 3 个区域的进一步放大 OM 照片,可以看出,合金表层组织由于冷却速率大, α -Al 晶粒尺寸细小且都呈现蔷薇状,明显小于另外两个区域;心部组织中 α -Al 存在两种形态,一种尺寸小、形态圆整,另一种尺寸明显偏大(见图 2d 中虚线圈内),这些晶粒可能是在料筒中的结晶组织,随后被金属液冲刷

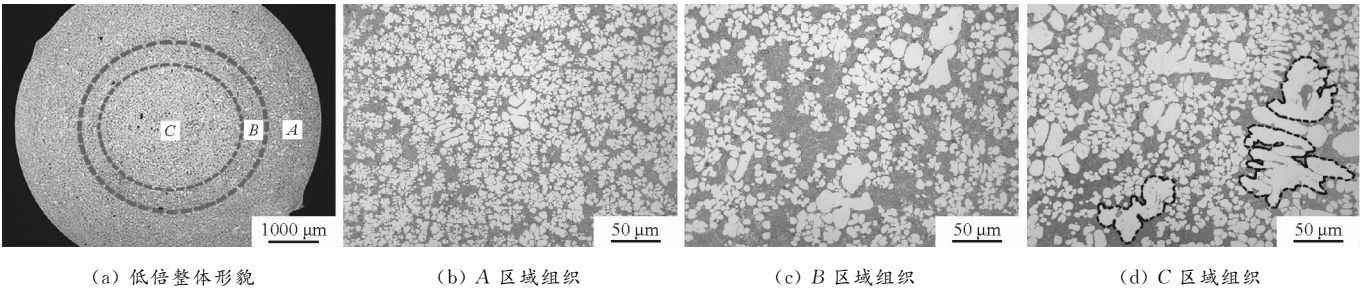


图 2 合金 Z1 典型组织 OM 照片

Fig.2 OM images of typical structure of alloy Z1

至试棒中继续长大所致^[21]。

表 2 为 4 种合金中的初生 α -Al 相平均晶粒尺寸(等效直径,包括预结晶组织在内)和面积分数(初生 α -Al 相总面积/(初生 α -Al 相总面积+共晶区总面积))。3 个区域中,缺陷环上 α -Al 相面积分数低于其他两个区域,即缺陷环上共晶区面积分数更高。从 α -Al 相平均晶粒尺寸看,加入 Zn 后对晶粒尺寸的影响不大,Z1

表 2 4 种合金初生 α -Al 相平均晶粒尺寸和面积分数

Tab.2 Average grain size and area fraction of primary α -Al in the four kinds of alloys

合金	初生 α -Al 面积分数/%			初生 α -Al 平均晶粒尺寸/ μm		
	表层组织	缺陷环	心部组织	表层组织	缺陷环	心部组织
Z1	59.2	48.9	65.3	17.8	24.2	30.7
Z2	52.3	46.8	61.4	17.6	19.5	23.2
Z3	54.2	47.3	63.3	17.7	18.9	25.6
Z4	56.6	46.2	62.2	14.1	16.5	23.2

合金各区域晶粒尺寸均大于另外 3 种合金,在 Z1 合金中可以看到更多预结晶 α -Al。有研究表明,加入 RE 能够细化初生 α -Al^[22,23],在试验中这种变化不明显,无法排除统计误差。

图 3 为 4 种合金的 SEM 照片。可以看出,Z1 合金中共晶 Si 尺寸在 $1\ \mu\text{m}$ 左右,多为圆点状;只有少部分是超过 $1\ \mu\text{m}$ 的长条状,这可以保证合金的伸长率不下降。Z2 合金中共晶 Si 明显粗大,达到 $3\sim 4\ \mu\text{m}$,不仅长度增大,宽度也增大,部分为折线型(见图 5b 中虚线圆圈内);在尺寸粗大的共晶 Si 中间存在少量细小的 Si 相。由于尺寸增大,共晶 Si 间距增大。加入 Sr 元素后,共晶 Si 尺寸得到一定的细化,但和 Z1 合金相比,更多的还是条状的共晶 Si。Z4 合金中共晶 Si 尺寸进一步减小,可以看到很多点状的 Si,尺寸甚至比 Z1 合金

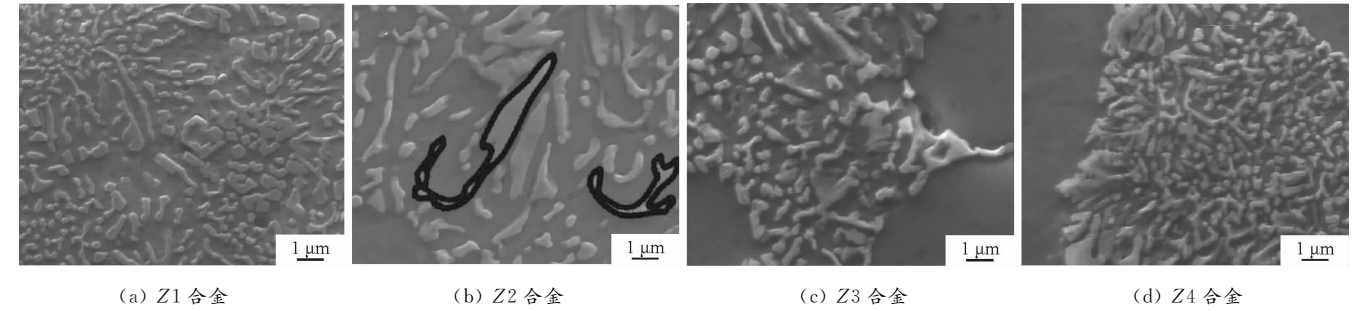


图 3 4 种合金的共晶 Si 相 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphology of eutectic Si phase in the four kinds of alloys

更小,只是在 α -Al 晶界处存在少量尺寸大的 Si。

对 4 种合金进行 XRD 分析,结果见图 4,可见加入 Zn 后组织中未出现新的相,均由 α -Al、Si 以及 $\text{Al}(\text{Fe}/\text{Mn})\text{Si}$ 相组成。图 5 为 Z2、Z4 合金元素面扫描结果及成分分析。可见合金 Z2(图 5a~图 5d)中 Zn 没有明显的偏聚,分布比较均匀,Sr 分布与 Si 分布基本一致,说明 Sr 对共晶 Si 起到变质作用。加入 Sr 和 RE 后(见图 5e~图 5j),面扫描结果和合金 Z2 一样,Si、Sr、Zn 分布情况保持不变,圆圈区域 RE 含量较高,选取 A 点进行分析(见图 5k),可以看出,该处主要由 Al、Si、Zn、La、Ce 组成,即部分 RE 和 Al、Si、Zn 形成新相,由于含量低,XRD 分析未检测出。

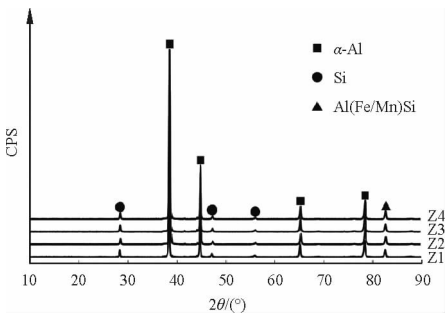


图 4 XRD 分析结果

Fig.4 XRD analysis results

图 6 和图 7 是 Z2 和 Z4 合金的 TEM 图片及面扫描、线扫描结果。可以看出,Zn 的分布和 Al 的分布基

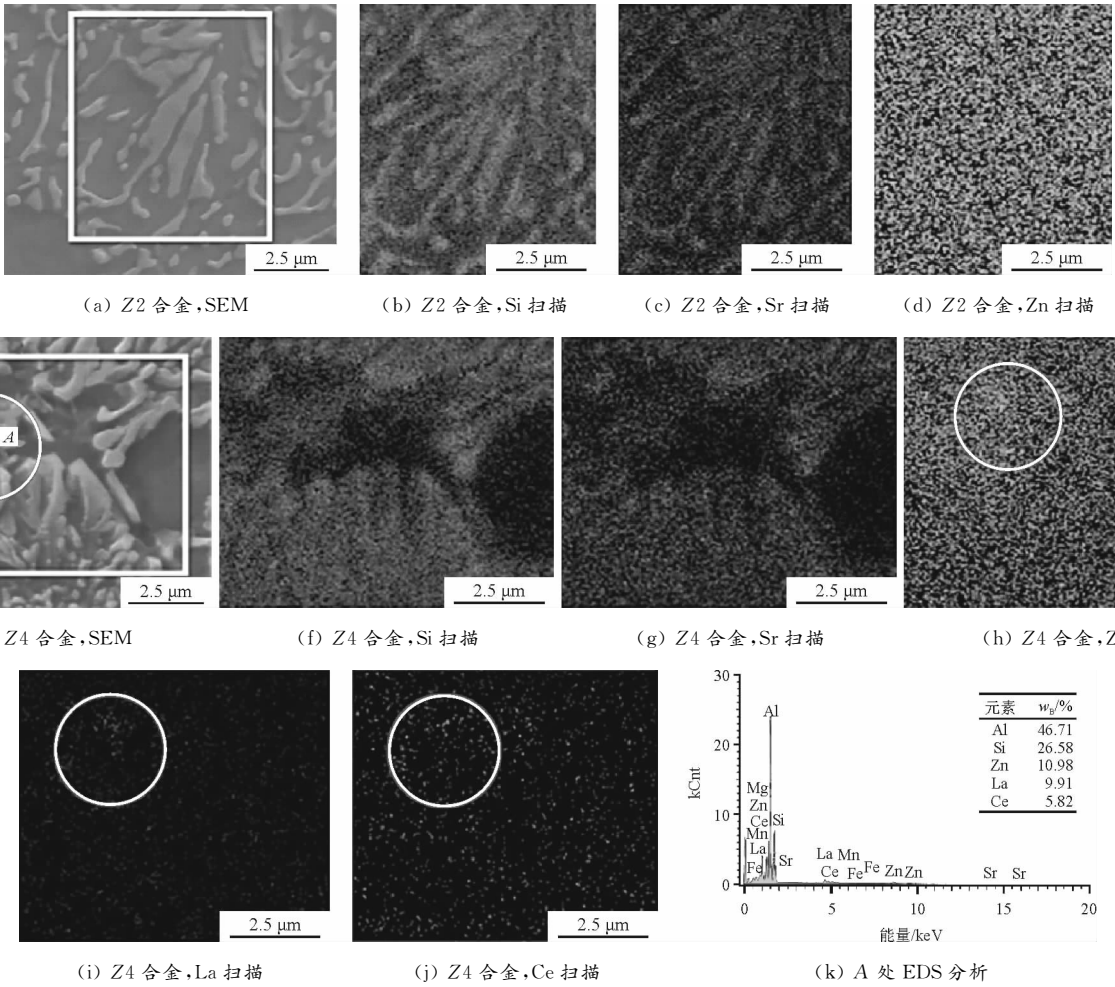


图 5 Z2、Z4 合金元素分析面扫描结果及成分分析
Fig.5 Elemental face scanning analysis of alloy Z2 and Z4 as well as EDS analysis result at point A

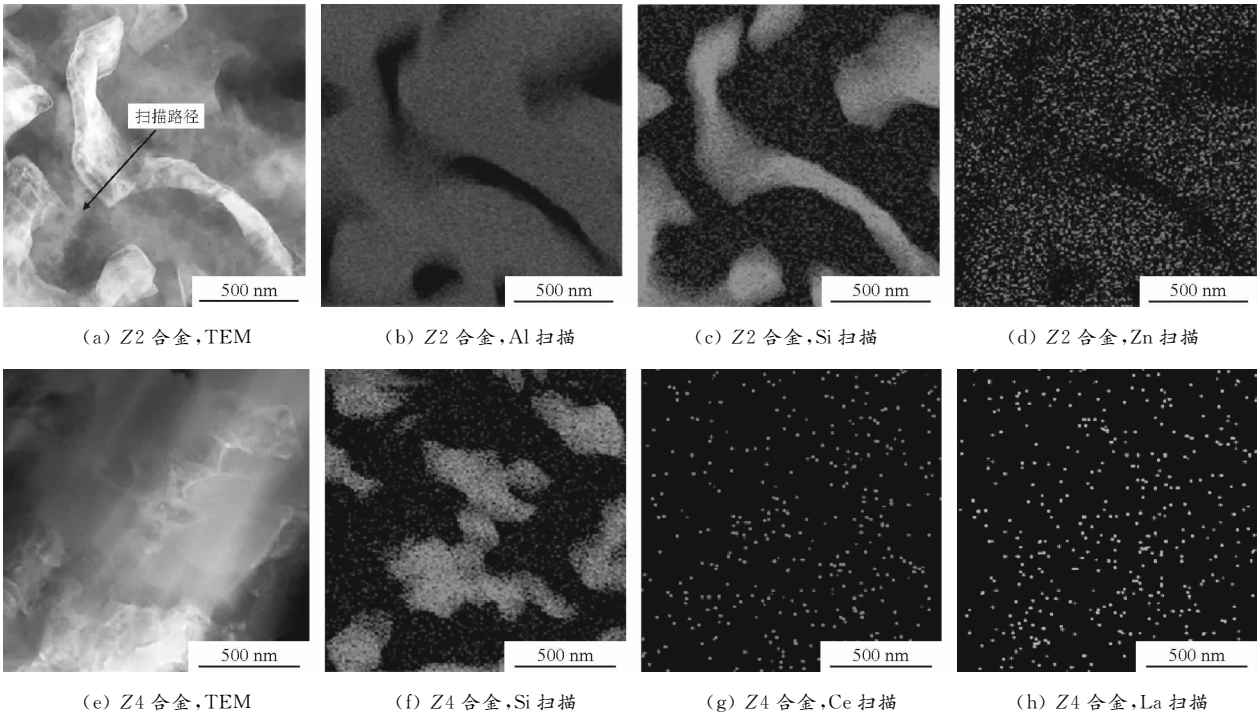


图 6 不同合金 TEM 分析结果
Fig.6 TEM analysis results of the Z2, Z4 alloy

本一致,图 7 中线扫描结果进一步证明在共晶 Si 区域 Zn 含量很低,说明 Zn 元素主要固溶在 α -Al 相中。进一步对 α -Al 相进行 EDS 分析,结果见表 3。Sr 和 RE 的加入没有改变 Zn 在 α -Al 相中的固溶量,Z2、Z3、Z4 合金的初生 α -Al 相中 Zn 含量在 1.5% 左右,共晶区 α -Al 相中含量达到 2.5% 左右,即共晶区内 Zn 在 α -Al 相中固溶量更高,这也与凝固过程一致。凝固开始时先形成初生 α -Al 相,溶质含量低,使剩余金属液中溶质含量提高,后续共晶反应生成的 α -Al 相中 Zn 的固溶量高于初生 α -Al 相。随后在共晶凝固时,由于 Zn 主要在 Al 相固液前沿富集,阻碍 Al 相的生长^[24],使得 Si 相的生长速率相对得到提升, Si 相获得更大的生长空间,从而使 Si 相变得粗大,见图 8。Sr 作为 Al-Si 合金中常用的变质剂,主要是通过元素 Sr 吸附在 Al-Si 合金的硅相组织表面影响共晶 Si 的生长,从而达到细化晶粒的效果^[25]。目前普遍接受的理论有杂质诱导孪生理论^[26]和双平凹角机制^[27]。由图 5 可知, Sr 分布与 Si 分布一致,因此在 Z3 合金中, Sr 含量的提升使得更多的 Sr 富集在共晶 Si 的两端,在共晶 Si 生长前沿形成了 Al-Si-Sr 薄层,对 Si 相的生长起到限制作用,使共晶 Si 得到一定程度的细化^[28],见图 8。而在 Z4 合金中,元素分布情况见图 5e 和图 7,加入 La/Ce 后, Sr 的分布和 Si 保持一致。合金中 La/Ce 的分布比较均匀,但在共晶 Si 附近含量相对更高,由此可以推断在 Si 的生长前沿形成了 Al-Si-Sr-RE 薄层,对 Si 相生长的阻碍作用进一

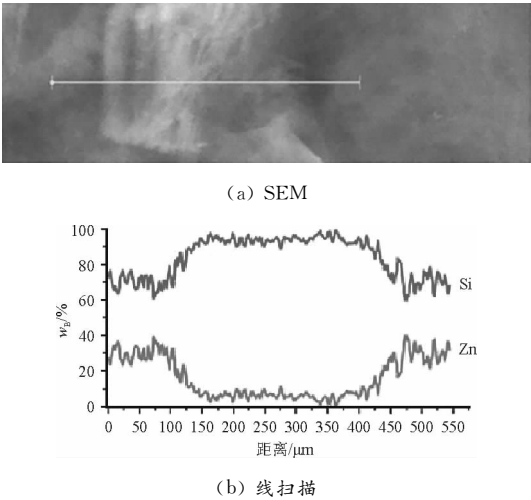


图 7 图 6a 的线扫描
Fig.7 Line sanning of Fig.6a

合金	w(Zn)	
	初生 α -Al 相	共晶区 α -Al 相
Z2	1.49	2.65
Z3	1.31	2.68
Z4	1.79	2.53

步增强^[29],提升了变质效果, Si 相得到进一步的细化,见图 8。

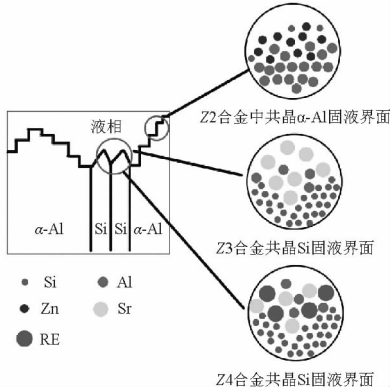
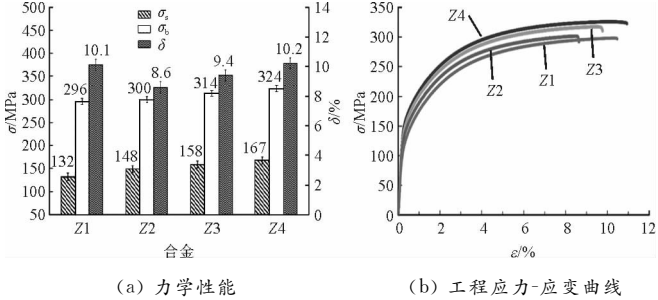


图 8 凝固过程共晶区域固液界面示意图
Fig.8 Schematic diagram of solid-liquid interface in the eutectic zone during solidification process

2.2 力学性能

图 9 是 4 种合金的力学性能和应力-应变曲线。可以看出, Z1 合金的屈服强度为 132 MPa、抗拉强度为 296 MPa、伸长率为 10.1%;加入 2.5% 的 Zn 之后,合金屈服强度为 148 MPa、抗拉强度为 300 MPa、伸长率为 8.6%;与 Z1 合金相比, Z2 合金的屈服强度、抗拉强度分别提升了 12.1%、1.3%,而伸长率下降了 14.9%。Z3 合金的屈服强度为 158 MPa、抗拉强度为 314 MPa、伸长率为 9.4%,和 Z2 合金相比,伸长率得到提升,但仍低于 Z1 合金。Z4 合金的屈服强度为 167 MPa、抗拉强度为 324 MPa、伸长率为 10.2%;与 Z1 合金相比, Z4 合金的屈服强度、抗拉强度、伸长率分别提升 26.5%、9.5%、1.0%,即在提升强度的同时保证伸长率不降低。



(a) 力学性能 (b) 工程应力-应变曲线

图 9 4 种合金的应力-应变曲线和室温力学性能
Fig.9 Room temperature mechanical properties as well as stress-strain curve of the alloys with different compositions

从微观组织看, Z1 合金共晶组织中 Si 形态细小, 分布均匀, 因此表现出很好的伸长率。加入 2.5% 的 Zn 后, Zn 主要固溶在 α -Al 相中, 对合金起到固溶强化作用, 所以与 Z1 合金相比屈服强度得到提升; 另一方面, Zn 的加入使共晶 Si 尺寸增大, 这些尺寸变大的共晶 Si 存在一些尖锐的折角, 会发生应力集中, 会降低合金的

伸长率。当提升 Sr 的含量, Z3 合金中的共晶 Si 与 Z2 合金相比有一定程度的细化, 第二相的细化一方面对强度有提升, 同时细化的 Si 也能提升合金的伸长率。但也可以发现, Si 的尺寸仍然较为粗大, 且形状复杂, 与 Z1 合金相比伸长率仍低。加入 RE 元素后, Z4 合金中共晶 Si 的尺寸进一步得到细化, Z4 合金的伸长率和 Z1 合金相比基本保持不变, 因此 Z4 合金具有最好的综合性能, 在保证固溶强化的同时, 很好地改善了 Zn 对共晶 Si 的不利影响。

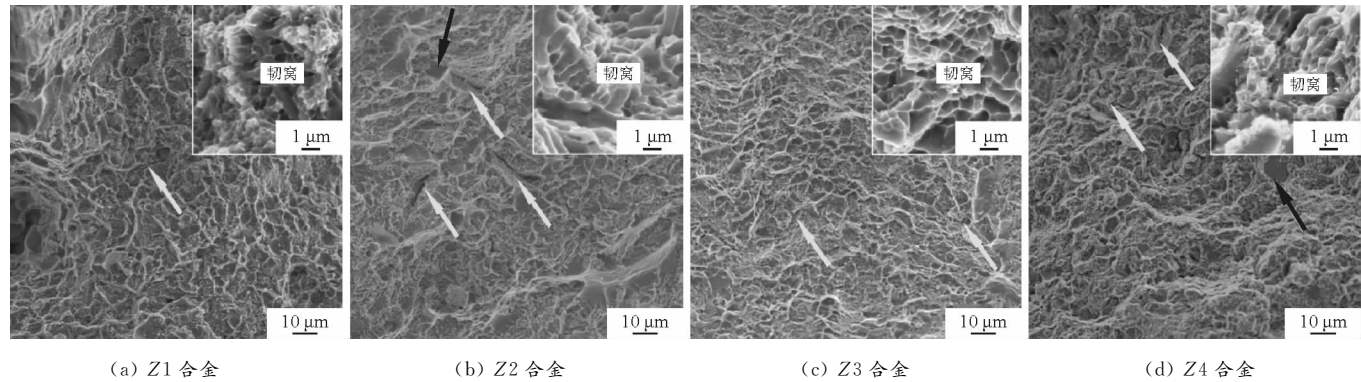


图 10 4 种合金的断口形貌

μm); Z3 合金断口(见图 10c)上韧窝结合了 Z2、Z4 合金的特点, 存在一些尺寸小的深韧窝, 也有尺寸大的浅韧窝。

为了观察试样断裂后裂纹的分布情况, 断口附近部位纵向的扫描电镜显微组织见图 11。Z1 合金(见图 11a)断口处可以明显看到除了沿 α-Al 晶界处断裂(深色箭头处)外, 有部分 α-Al 相发生变形断裂(浅色箭头处)。与共晶 Si 相比, α-Al 相属于较软的相, 发生变形

2.3 断口观察

图 10 为 4 种合金的拉伸断口形貌。可以看出, 在 4 种合金的断口处均有共晶 Si、Al(Fe、Mn)Si 相(黑色箭头处), 另外存在一些裂纹(白色箭头处), 由于 3 种合金伸长率都超过 8%, 相对于常见压铸铝合金, 伸长率较高, 因此也可观察到韧窝的存在。Z1、Z4 合金断口形貌(见图 10a、图 10d)中韧窝数量多, 韧窝细小且深, 断口上的裂纹尺寸小(长度 < 10 μm); Z2 合金断口(见图 10b)上韧窝数量少且浅, 裂纹尺寸大(长度为 10~20

断裂说明合金的伸长率好。在断口附近部位, 裂纹主要在晶界和块状 Al(Fe、Mn)Si 相处产生。Z2 合金(见图 11b)断口主要是晶界处断裂, 在断口附近区域裂纹尺寸较大而且数量明显多于 Z1 合金, 还可以观察到一些针状的共晶 Si 发生了断裂(箭头处), 说明在这些尺寸较大的共晶 Si 处易产生应力集中, 成为裂纹萌生点, 因此裂纹除了分布在晶界和块状 Al(Fe、Mn)Si 相周围, 在共晶区内也能看到一些裂纹分布, 这不利于合金的塑

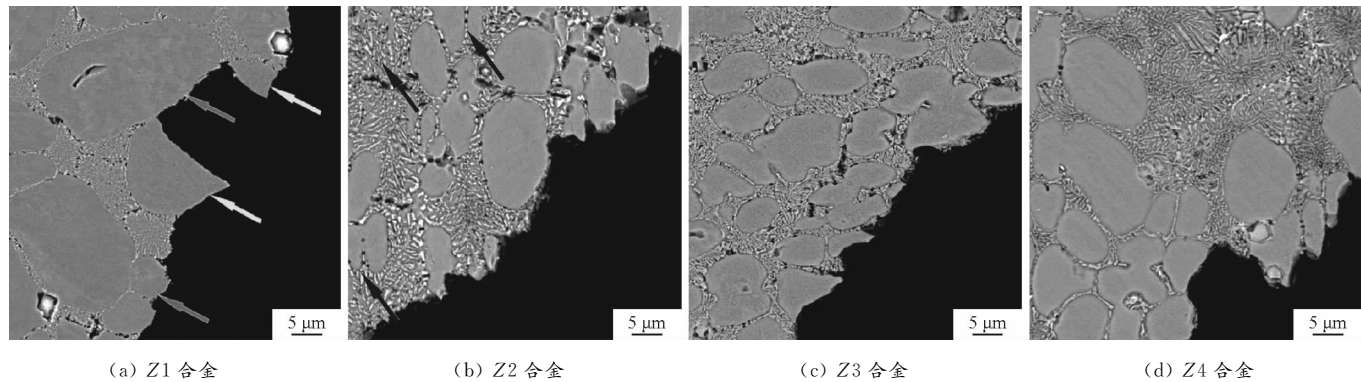


图 11 不同合金的断口纵向 SEM 照片

Fig.11 SEM photos of longitudinal fracture of the alloys

性改善。合金 Z3(见图 11c)相比于 Z2 合金, 裂纹的尺寸减小, 但仍大于 Z1 合金, 在共晶区内也可以观察到一些裂纹。Z4 合金(见图 10d)与 Z1 合金的裂纹分布比较接近, 裂纹尺寸很小, 主要位于晶界和 Al(Fe、Mn)Si 相处。

3 结 论

(1) 在 Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn 合金中加入 2.5% 的 Zn 会使共晶 Si 尺寸增大, 再添加 Sr 和 La/Ce 混合稀土, 共晶 Si 尺寸又重新细化。

(2) Zn 的加入,可以提升 Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn 合金的强度,而其伸长率下降;再添加 Sr 和 La/Ce 之后,合金的强度和伸长率均得到提升,与 Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn 合金相比,强度提升而伸长率不降低。

(3) 在 Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn、Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn-2.5Zn、Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn-2.5Zn-0.48Sr、Al-10Si-0.3Mg-0.6Mn-2.5Zn-0.1La(Ce) 四种合金断口上都可观察到韧窝,但加入 Zn 后,断口处韧窝数量减少,断口纵向观察可以看到一些断裂的针状共晶 Si;当共晶 Si 重新细化后,韧窝数量增多。

参 考 文 献

- [1] 文浩,罗斌,谢达明.压铸铝合金在汽车上的应用及发展[J].世界有色金属,2017(14): 269-271.
- [2] 黄正华,张银帅,宋东福,等.压铸铝合金的应用及研究进展[J].材料研究与应用,2017,11(1): 1-5,29.
- [3] 梁涛.压铸铝合金中合金元素的作用及应用[J].硅谷,2012(2): 150-170.
- [4] 樊振中,袁文全,王端志,等.压铸铝合金研究现状与未来发展趋势[J].铸造,2020,69(2): 159-166.
- [5] 倪红军,陈科,张福豹,等.压铸铝合金研究现状及展望[J].轻金属,2019(3): 51-55.
- [6] YU H Z. An overview of the development of Al-Si alloy based material for engine applications[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 12: 288-297.
- [7] JI S, WATSON D, FAN Z, et al. Development of a super ductile diecast Al-Mg-Si alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2012, A556: 824-833.
- [8] 张俊超,钟鼓,邹纯,等.高真空压铸铝合金的研究进展[J].材料导报,2018,32(S2): 375-378.
- [9] WANG E R, HUI X D, WANG S S, et al. Improved mechanical properties in cast Al-Si alloys by combined alloying of Fe and Cu [J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527 (29-30): 7 878-7 884.
- [10] TAVITAS M F J, GRUZLESKI J E, SAMUEL F H, et al. Effect of Mg and Sr-modification on the mechanical properties of 319-type aluminum cast alloys subjected to artificial aging[J]. Materials Science and Engineering, 2008, A480(1-2): 356-364.
- [11] HEGDE S, PRABHU K N. Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43: 3 009-3 027.
- [12] 黄晓锋,冯凯,谢锐.Mg 及 Mn 元素对 Al-Si 合金显微组织和力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2012,22(8): 2 196-2 204.
- [13] ZHANG J W, STARINK M J, GAO N, et al. Effect of Mg addition on strengthening of aluminum alloys subjected to different strain paths in high pressure torsion[J].Materials Science and Engineering, 2011, A528(4-5): 2 093-2 099.
- [14] WANG G Q, BIAN X F, WANG W M, et al. Influence of Cu and minor elements on solution treatment of Al-Si-Cu-Mg cast alloys [J].Materials Letters, 2003, 57(24/25): 4 083-4 087.
- [15] 杨承志,龙思远,王朋,等.Cu 含量对压铸铝硅合金组织和性能的影响[J].金属热处理,2016,41(11): 57-61.
- [16] 张晓丽. Zn 对铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金组织及力学性能的影响[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2008.
- [17] 杨承洪,夏琳燕,张倩. Zn 含量对近共晶铝硅合金性能影响[J].轻工科技,2018,34(2): 38-41.
- [18] YASIN A, MURAT B. Microstructural, mechanical and tribological properties of Al-7Si-(0~5) Zn alloys[J]. Materials and Design, 2014, 63: 159-167.
- [19] 赵浩峰,王玲,刘旭东.锌对铝硅合金组织和性能的影响研究[J].特种铸造及有色合金,1994(2): 5-7.
- [20] GOURLAY C M, DAHLE A K. Dilatant shear bands in solidifying metals[J]. Nature, 2007, 445(7123): 70-73.
- [21] ZHANG P, LI Z M, LIU B L, et al. Tensile properties and deformation behaviors of a new aluminum alloy for high pressure die casting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33 (4): 367-378.
- [22] JIANG W M, FAN Z T, DAI Y C, et al. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2014, A597: 237-244.
- [23] ZHENG Q J, ZHANG L L. Effect mechanisms of micro-alloying element La on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 47: 142-151.
- [24] 胡汉起.金属凝固原理[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [25] 江峻,刘煜,吴鹏,等.铝硅合金变质剂的研究现状及发展趋势[J].轻工科技,2014,30(3): 15-16.
- [26] LU S Z, HELLAWELL A. The mechanism of silicon modification in aluminum silicon alloys: impurity induced twinning[J].Metall. Trans., 1987, A18: 1 721-1 733.
- [27] SAMUEL E, SAMUEL A M, DOTY H W, et al. Intermetallic phases in Al-Si based cast alloys: new perspective[J]. Int. J. Cast Met. Res., 2014, 27: 107-114.
- [28] BARRIRERO J, ENGSTLER M, GHAFOR N, et al. Comparison of segregations formed in unmodified and Sr-modified Al-Si alloys studied by atom probe tomography and transmission electron microscopy[J].Journal of Alloys and Compounds, 2014, 6(11): 410-421.
- [29] QIU C R, MIAO S N. Synergistic effect of Sr and La on the microstructure and mechanical properties of A356.2 alloy[J].Materials and Design, 2017, 114: 563-571.

(编辑:张正贺)

嘉瑞压铸业务 2020 年收入超 6.41 亿港元

嘉瑞国际控股有限公司 2020 年实现收入 14.69 亿港元,同比降 5.5%;股东应占溢利 1.24 亿港元,同比增 39.8%。其中,镁合金压铸业务收入 4.17 亿港元,同比下降 15.9%,占集团整体收入的 28.4%;铝合金压铸业务收入 1.13 亿港元,较 2019 年度减少 19.8%,占集团总收入的 7.7%;锌合金压铸业务收入 1.11 亿港元,较 2019 年度减少 29.8%,占集团总收入 7.6%。

公告称,溢利增长主要是由于集团持续资源整合和数据系统优化降低制造费用,从而提高了运营效率及毛利率;持续改善工艺流程和产品组合减低集团营运成本,导致销售成本下降;集团 2020 年度因公共卫生事件于中国内地及中国香港获得的一次性公用事业和政府补贴,加上集团在获得有关机关许可后恢复营运的进度理想。

(摘自压铸周刊)