

共晶 Si 团聚对挤压铸造 Al-Si-Mg 合金性能的影响

周威虎 王 瑞 王东涛 李 俊 张孝足 张 海
(苏州大学沙钢钢铁学院高性能金属结构材料研究院)

摘 要 研究了挤压铸造 Al-Si-Mg 合金中的共晶 Si 团聚现象对其力学性能和耐腐蚀性能的影响。结果表明,挤压铸造 Al-Si-Mg 合金存在共晶 Si 团聚现象,且这种铸态下的团聚现象在固溶处理后仍然存在,其对合金的耐蚀性以及力学性能均存在影响。耐腐蚀性能研究表明,T6 处理后共晶 Si 聚集严重,试样的腐蚀电位为-820 mV,腐蚀电流密度为 1.91×10^{-5} A/cm²,共晶 Si 分布均匀的试样的腐蚀电位为-790 mV,腐蚀电流密度为 1.08×10^{-5} A/cm²。腐蚀沿 Si 相团聚的区域进行,共晶 Si 分布均匀的试样的耐腐蚀性能更优。T6 热处理后共晶 Si 的团聚对合金的伸长率影响较大,Al-Si-Mg 合金中共晶 Si 分布相对均匀时,伸长率最高,达到 14.12%,其抗拉强度达到 332 MPa,屈服强度为 271 MPa;共晶 Si 相团聚多、分布不均匀时,合金经 T6 处理后的伸长率为 10.12%,抗拉强度为 324 MPa,屈服强度为 259 MPa。

关键词 挤压铸造;Al-Si-Mg 合金;共晶 Si;力学性能;耐腐蚀性能

中图分类号 TG249.5;TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Effects of Eutectic Si Agglomeration on Properties of Squeeze Casting Al-Si-Mg Alloy

Zhou Weihu, Wang Rui, Wang Dongtao, Li Jun, Zhang Xiaozu, Zhang Hai
(High-performance Metal Structural Materials Research Institute, School of Iron and Steel,
Soochow University)

Abstract: The effects of eutectic Si agglomeration on mechanical properties and corrosion resistance of squeeze casting Al-Si-Mg alloy were investigated. The results reveal that the squeeze casting Al-Si-Mg alloy presents the eutectic Si agglomeration, which keeps after solid solution treatment and has adverse effects on the mechanical properties and corrosion resistance of the alloy. Corrosion test results reveal that after T6 heat treatment, the sample with eutectic Si aggregation has a corrosion potential of -820 mV and a corrosion current density of 1.91×10^{-5} A/cm², and that with uniform eutectic Si distribution has a corrosion potential of -790 mV and a corrosion current density of 1.08×10^{-5} A/cm². The corrosion cracks can be observed along the region where Si phase is aggregated. The sample with uniform eutectic Si distribution has better corrosion resistance. For mechanical properties, the agglomeration of eutectic Si has an adverse effect on the elongation of the alloy after T6 heat treatment. When the eutectic Si distribution is relatively uniform, the elongation and the tensile strength as well as the yield strength of the alloy reach up to 14.12%, 332 MPa, and 271 MPa, respectively. When the eutectic Si phase is agglomerated and unevenly distributed, the elongation and the tensile strength as well as yield strength of the alloy reach 10.12%, 324 MPa and 259 MPa, respectively.

Key Words: Squeeze Casting, Al-Si-Mg Alloy, Eutectic Si, Mechanical Properties, Corrosion Resistance

Al-Si 合金因其优异的铸造和充型性能^[1~9],成为挤压铸造首选的铝合金体系。然而,挤压铸造 Al-Si 合金存在组织均匀性较差的问题,尤其是共晶 Si 在压力凝固条件下容易出现团聚,对合金性能产生不利影响。欧翔翔等^[10]通过模拟研究了挤压铸造 Al-Si 合金共晶面积分数对铝合金轮毂力学性能的影响,发现共晶 Si

团聚尺寸超过 50 μm 对合金性能有明显损害。王贵等^[11]对低压铸造 A356.2 铝合金中 Si 元素的偏析进行研究,发现共晶 Si 聚集不仅影响产品的外观,还很容易在 Si 相的尖端和棱角处引起应力集中,易发生断裂,恶化合金力学性能。袁崇胜等^[12]提出利用电磁搅拌使 Si 在 Al-Si-Mg 熔体中的分布更加均匀,但是在挤压铸造

收稿日期:2021-09-12;修改稿收到日期:2021-10-26
第一作者简介:周威虎,男,1995 年出生,硕士研究生,江苏苏州(215000),E-mail:406873880@qq.com
通信作者:王东涛,男,1991 年出生,博士研究生,江苏苏州(215000),E-mail:dtwang@suda.edu.cn
引用格式:周威虎,王瑞,王东涛,等. 共晶 Si 团聚对挤压铸造 Al-Si-Mg 合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(7):864-869.
ZHOU W H, WANG R, WANG D T, et al. Effects of eutectic Si agglomeration on properties of squeeze casting Al-Si-Mg Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):864-869.

生产工艺中又有很大的局限性。陈振明等^[13]研究了挤压铸造 ADC14 合金出现共晶 Si 团聚的原因,发现压力的大小决定共晶 Si 团聚的程度,但共晶 Si 团聚如何影响挤压铸造 Al-Si-Mg 合金的力学及腐蚀性能的研究报道较少。对此,本课题通过挤压铸造制备了 Al-Si-Mg 合金试棒,研究了共晶 Si 团聚现象对合金力学和耐腐蚀性能的综合影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料与设备

1.1 试验材料

试验原料采用 99.9% (质量分数) 的纯铝锭、Al-20Si 中间合金、99.9% 的纯镁锭作为原料,变质剂选用 Al-10Sr 合金,Sr 加入量为 0.02%,并加入 Al-3B 合金作为细化剂。在 Spectrometer LAB 直读光谱仪上对所制备的合金进行成分分析,结果见表 1。

表 1 挤压铸造 Al-7Si-Mg 合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of squeeze casting Al-Si-Mg alloy %

wt%						
Si	Mg	Fe	Cu	Sr	B	Al
7.16	0.30	0.09	0.001 8	0.018	0.027	余量

1.2 试验过程

Al-7Si-Mg 合金用电阻炉熔化,每炉熔化合金 400 kg,熔炼时先将纯铝锭和 Al-20Si 中间合金投入炉内,并在 760 ℃下加热至完全熔化,随后调温至 740 ℃加入纯镁锭,然后加入 Al-10Sr 中间合金进行变质处理,10 min 后,采用石墨转子吹入高纯氩气除气精炼,转子转速为 250 r/min,气体压力为 0.5 MPa,除气时间为 20 min。除气后静置 30 min,并调温至设定温度开始挤压铸造,其中 1、2 号试样的浇注温度为 670 ℃,3、4 号试样的挤压浇注温度为 710 ℃,每种温度选择两个样品以进行比较。挤压比压均为 100 MPa,模具预热温度为 250 ℃,挤压铸造力学性能试棒尺寸见图 1。

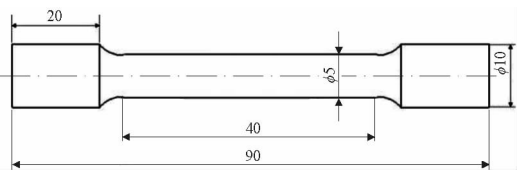


图 1 挤压铸造 Al-Si-Mg 合金拉伸试棒

Fig.1 Schematic diagram of tensile test bar of squeeze casting Al-Si-Mg alloy

采用 Nabertherm 热处理炉进行 T6 热处理,升温速率为 6 ℃/min,试样升温至 540 ℃下保温 4.5 h,水淬,随后在 180 ℃时效 3 h,取出空冷。

1.3 组织与性能分析

对试棒中间平行段用 3000 号 SiC 砂纸打磨。使用

CSS-44100 型电子万能试验机进行力学性能测试,拉伸速率为 1 mm/min。从拉伸试棒中间标距段内取样,在 Olympus G51 倒置式金相显微镜上观察显微组织,对试棒横截面不同位置观察,见图 2。取金相试样进行阳极覆膜,观察晶粒大小,阳极覆膜所用硫酸、磷酸、水的体积比为 38 : 43 : 19。在带有能谱仪 (EDS) 的 Phenom XI 台式扫描电镜 (SEM) 上进行合金组织观察和分析。

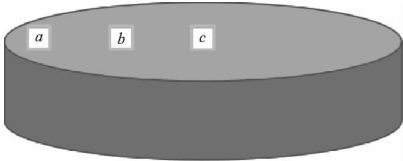


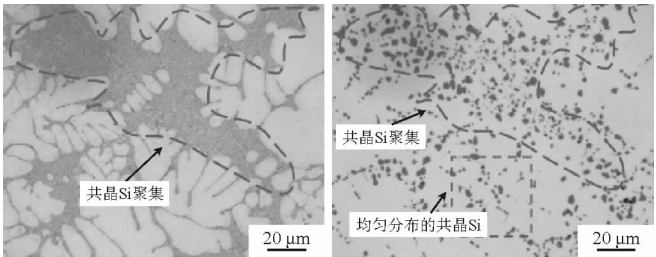
图 2 试棒金相横截面取样位置示意图
Fig.2 Metallographic cross section observation of test rod at different positions

电化学腐蚀研究使用 Princeton Applied Research VersaStat 3 电化学工作站,腐蚀试样用 5000 号 SiC 砂纸研磨,乙醇超声清洗、吹干,以铂 (Pt) 和 Ag/AgCl (饱和 KCl) 分别作为对电极和参比电极。合金的暴露面积为直径 1 mm 的圆形表面,用质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液,浸泡 48 h。以 1 mV/s 的扫描速率,在开路电位 OCP±300 mV 下进行动电位极化研究。采用垂直于腐蚀表面的方向切割试样,按照和金相试样相同的方法制备腐蚀试样进行微观组织分析,利用扫描电镜观察纵向截面腐蚀形貌。

2 试验结果与分析

2.1 微观组织分析

通过比较,发现 4 号试样组织较差。图 3 为 4 号试样拉伸横截面的金相组织。可以看出,合金铸态组织主要由浅色初生 α -Al 基体和深灰色的共晶 Al-Si 相组成。由于 Sr 的变质作用,组织中的共晶 Si 呈细小的纤维状形貌。由于合金凝固过程挤压压力的影响,低熔点的共晶 Si 会出现团聚现象,见图 3a,其共晶 Si 团聚尺寸可达 100 μ m 以上。从图 3b 可以观察到纤维状的共晶 Si。



(a) 铸态 (b) T6 处理

图 3 4 号试样的微观组织

Fig.3 Microstructures of specimen 4

晶 Si 发生了明显的球化,但相较于组织均匀的区域,共晶 Si 的聚集现象仍然存在,说明 T6 热处理无法有效促进铸态下共晶 Si 团聚区域的分散。另外, Si 相团聚区域经 T6 处理后,共晶 Si 球化后的颗粒尺寸明显大于 Si 分布均匀区域的颗粒尺寸。

图 4 和图 5 为 4 号试样从边缘到中心的组织分布图及晶粒组织。可以看出,试样边缘组织细小,共晶 Si 分布相对均匀;随着向试样的中心部分靠近,共晶 Si 逐渐出现团簇,在试样的正中心部位则聚集着较大面积的共晶 Si。这是因为合金在凝固过程中,施加的挤压压力倾向于将含 Si 元素的共晶成分溶质向最后凝固的区

域推移。由于在充型过程中边部先凝固,心部最后凝固,所以 Al-Si 共晶溶质更容易在压力作用下向中心位置聚集,从而发生偏析和团聚现象。对于 Al-Si-Mg 合金,随着凝固进行,固液界面向前推移,溶质 Si 向枝晶间聚集,并通过枝晶间通道扩散到液相区,最终导致后凝固部位的 Si 含量高于先凝固部位,而挤压铸造由于压力的施加,会导致低熔点 Si 溶质在压力作用下在中心部位出现很大区域的聚集。此外,由于离模具壁面越远,冷却速率越低,因此 α -Al 相也会越加粗大,会在靠近中心的区域出现部分较大的晶粒,见图 5a。从图 5b 可以明显观察到试样边部存在晶粒尺寸小于 50 μm 的

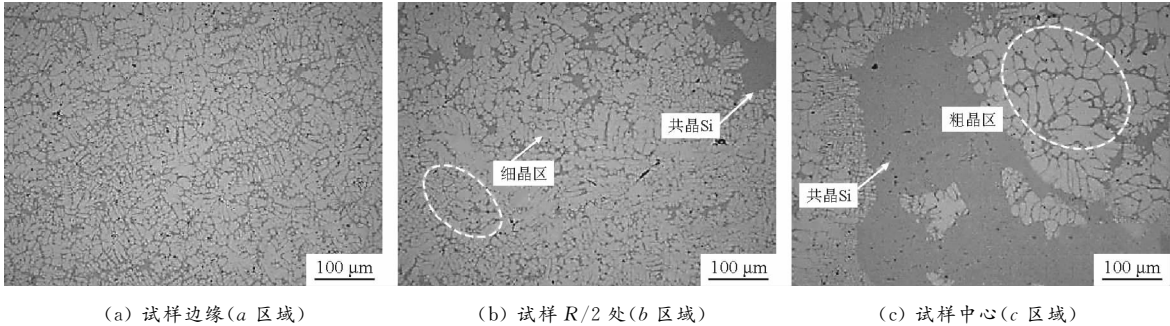


图 4 4 号合金试棒横截面从边缘至中心的微观组织
Fig.4 Cross-section microstructure of alloy 4 test bar from the edge to the center

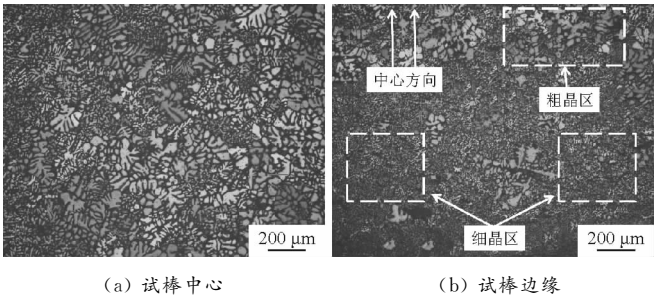


图 5 4 号合金的晶粒组织
Fig.5 Microstructure of alloy 4

细晶区,向试样中心靠近,粗晶区开始出现。

图 6 为 1 号试样和 4 号试样中心区域金相组织及 Si 相尺寸分布。可以发现,当聚集 Si 相尺寸大于 70 μm 时,易出现明显的脆性断裂面,影响合金的韧性,因

此当 Si 相聚集在一起直径超过 70 μm 时,可以认为是 Si 相团聚。而对于单个 Si 颗粒而言,当 Si 颗粒的尺寸大于 5 μm 时,在拉伸过程中更易断裂。统计显示,1 号试样的 Si 相面积比为 8.4%,4 号试样的 Si 相面积比为 9.1%,在所统计区域,4 号试样中 Si 面积分数高于 1 号试样,而且可以明显观察到 4 号试样中心 Si 相分布均匀性较差, Si 相团聚区域较多,而 1 号试样中心的共晶 Si 分布相对较为均匀,且 Si 相等效直径超过 5 μm 的比例少于 4 号的, Si 相在 0~4 μm 的尺寸区间比例更高。可见,适当降低挤压温度能够改善 Al-Si-Mg 合金在挤压过程 Si 相的聚集,其可能的原因是挤压温度的降低增加了熔体在模具内加压时刻的固相率,此时 α -Al 晶粒数量的增加能够一定程度阻碍 Si 溶质在液相中的迁

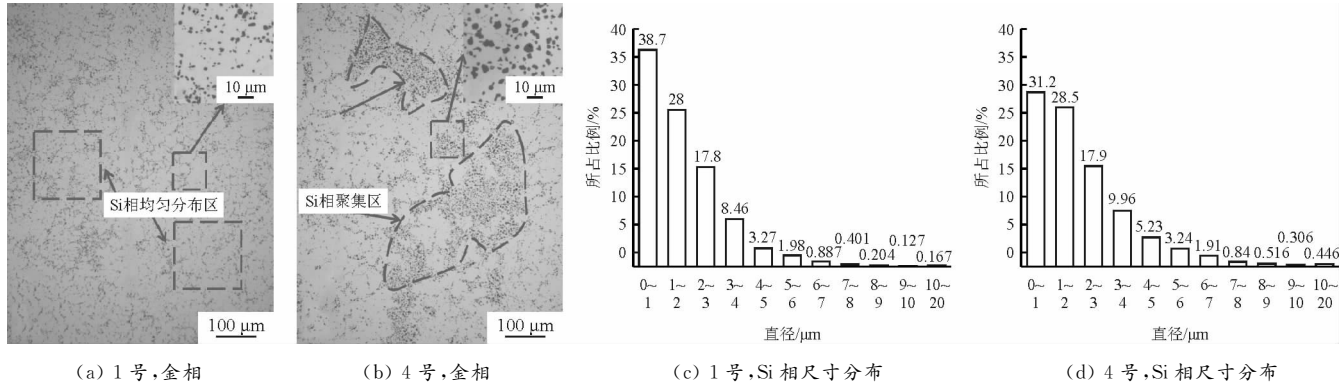


图 6 1 号和 4 号试样经 T6 处理后 OM 图和 Si 相尺寸分布图
Fig.6 OM microstructurue and Si phase size distribution of alloy 1 and 4 after T6 heat treatment

移,从而使其有更均匀的分布。而在拉伸过程中,Si 相的断裂会诱导裂纹产生,尤其是尺寸大的 Si 相。

2.2 耐腐蚀性能分析

图 7 为 1 号和 4 号试样经过 48 h 浸蚀后的动电位极化曲线。对极化曲线进行拟合可得,1 号试样的腐蚀电位为-790 mV,腐蚀电流密度为 $1.08 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$,4 号试样的腐蚀电位为-820 mV,腐蚀电流密度为 $1.91 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。1 号试样的腐蚀电位比 4 号试样的腐蚀电位高 30 mV,可以认为其腐蚀倾向性较小^[14],1 号试样的腐蚀电流密度较小,仅约为 4 号试样的 57%,这说明其电化学腐蚀速率较低,整体表现出更好的耐蚀性。

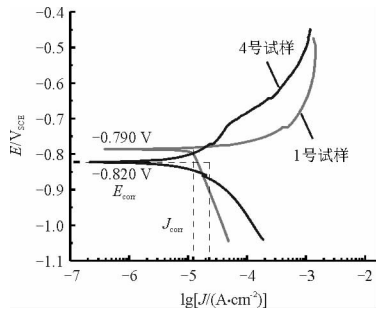
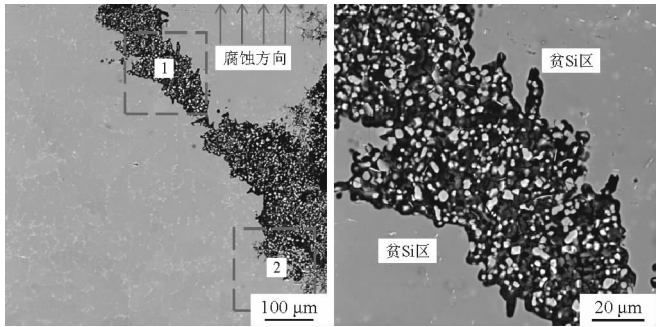


图 7 1 号和 4 号试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中浸泡 48 h 后的动电位极化曲线

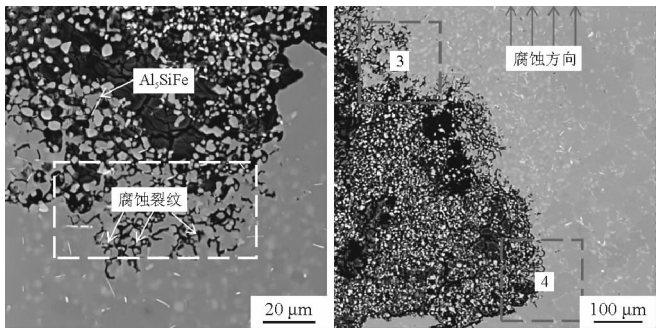
Fig.7 Potentiodynamic polarization curves of sample 1 and 4 immersed in 3.5% NaCl solution for 48 h

图 8 为 4 号试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中浸泡 48 h 后纵截面的 SEM 图。图 9 和图 10 分别为图 8a 中和图 8d 中 EDXA 分析结果。从 EDXA 结果可以看出,腐蚀过程沿着 Si 相的富集区进行。从图 8 可以看出,腐蚀坑区域残留了大量 Si 相,而铝基体完全被腐蚀掉,在腐蚀过程中,由于 Si 相腐蚀电位高于基体,因此作为阴极加速铝基体的腐蚀^[15]。此外,从腐蚀坑内还可以观察到少量短条状的 Al_5FeSi 相残留,可以推测 Al_5FeSi 相在腐蚀过程中也作为阴极加速铝基体的腐蚀,但由于 Al_5SiFe 含量很低且尺寸较小,对铝基体的腐蚀加速效果较小,基本可以忽略。此外,合金中含有的大量纳米 Mg_2Si 相可作为阳极优先腐蚀^[16],对整体腐蚀过程也

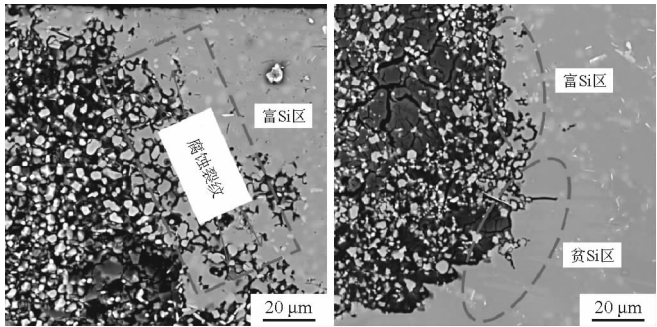
有一定影响,但相比于占主导地位的共晶 Si 相,其不会成为耐蚀性差异的主要来源。从图 8 可以看出区域 2 和 3 的腐蚀坑边缘是 Si 相富集区,在该区域的腐蚀坑边缘存在大量沿着 Si 颗粒分布的裂纹,如果进一步



(a) 区域 1 SEM 图 (b) 1 区高倍图



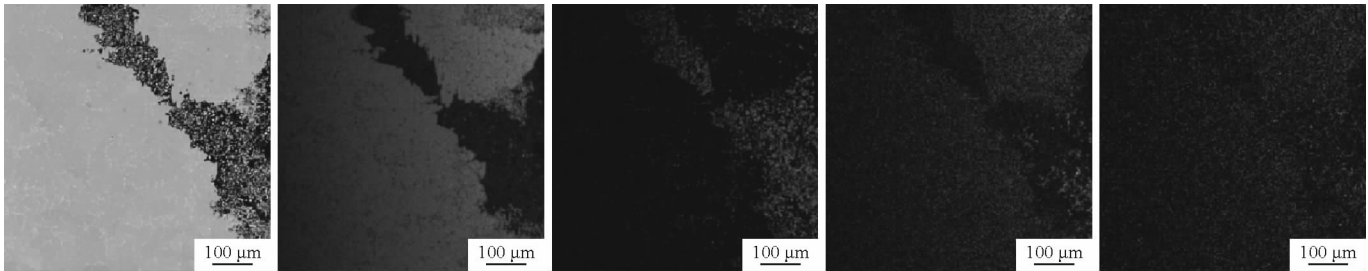
(c) 2 区高倍图 (d) 区域 2 SEM 图



(e) 3 区高倍图 (f) 4 区高倍图

图 8 4 号试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中浸泡 48 h 后纵截面 SEM 图

Fig.8 SEM images of the longitudinal section of samples 4 immersed in 3.5% NaCl solution for 48 h



(a) 4 号试样 SEM(图 8a 部分) (b) Al (c) Si (d) Mg (e) Fe

图 9 图 8a 的 EDXA 面扫描

Fig.9 EDXA face scanning of Fig.8a

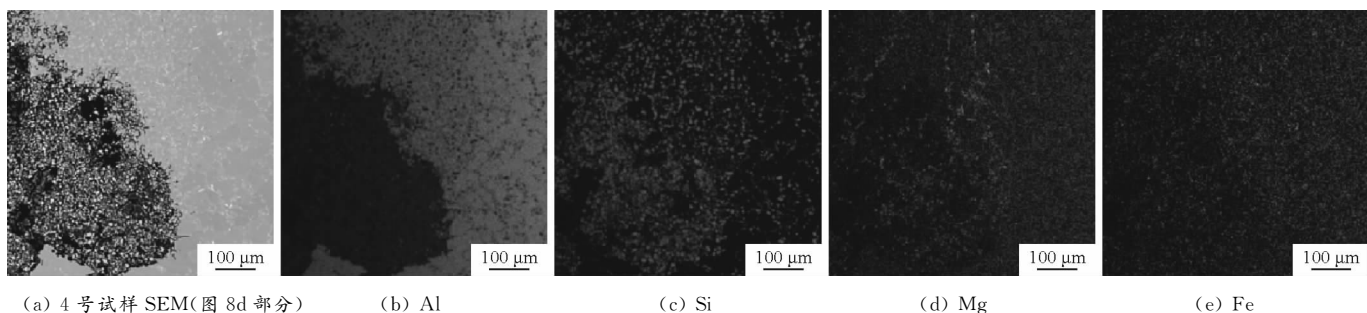


图 10 图 8d 的 EDXA

Fig.10 EDXA face scanning of Fig.8d

延长腐蚀时间,腐蚀区域就会沿着 Si 富集区扩大。而区域 1 和区域 4 腐蚀坑边缘是 Si 相较少的区域,属于贫 Si 区,在这两个区域的腐蚀坑边缘基本没有裂纹出现,进一步腐蚀倾向小。从前述结果可知, Si 相在腐蚀过程中作为阴极,当 Si 相聚集时,腐蚀更倾向于朝着 Si 相聚集的区域扩展。由此可见,共晶 Si 的大面积团聚会明显降低合金整体的耐腐蚀性能。

2.3 力学性能分析

在常温下进行 4 种合金力学性能测试,结果见图 11。可以看出,1~4 号试样的抗拉强度(σ_b)在 324~327 MPa,屈服强度($\sigma_{0.2}$)在 265 MPa 左右,其中 1 号的伸长率最高,达到了 14.12%,2 号的伸长率也在 12% 以上,而 3 号和 4 号伸长率较低,仅为 10%~11%。这说明 670 °C 挤压铸造的合金试棒伸长率均高于 710 °C 的,从典型的 1 号与 4 号试样组织分析可知,1 号中心共晶 Si 分布均匀,而 4 号中心却有明显的共晶 Si 团聚,T6 处理后尺寸较大的 Si 颗粒相比较多,是造成伸长率差距的主要原因。由于 Si 相与基体的硬度、弹性模量差异

较大,团聚的共晶 Si 可能会成为拉伸过程中的应力集中区域,导致合金在拉伸过程的异常断裂。

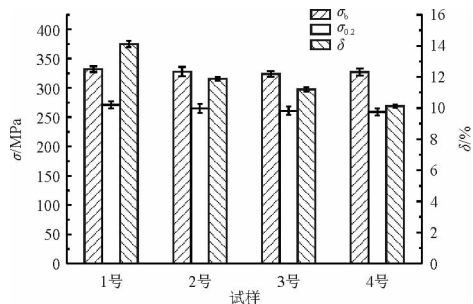


图 11 4 种挤压铸造 Al-7Si-Mg 合金的力学性能

Fig.11 Mechanical properties of squeeze casting Al-7Si-Mg alloys

图 12 为 4 号试样拉伸断口的纵截面的 SEM 图。可以看出,在 Si 相均匀相对分布的区域(见图 12a),纵截面断口呈现小锯齿状分布,说明在此处韧窝分布均匀,有利于提高伸长率,而在 Si 相团聚明显的区域(见图 12b),大尺寸 Si 相分布增加,这可能会诱导大的裂纹产生(箭头所指),可以看出,在受力过程中,裂纹的扩展是沿 Si 相进行的。

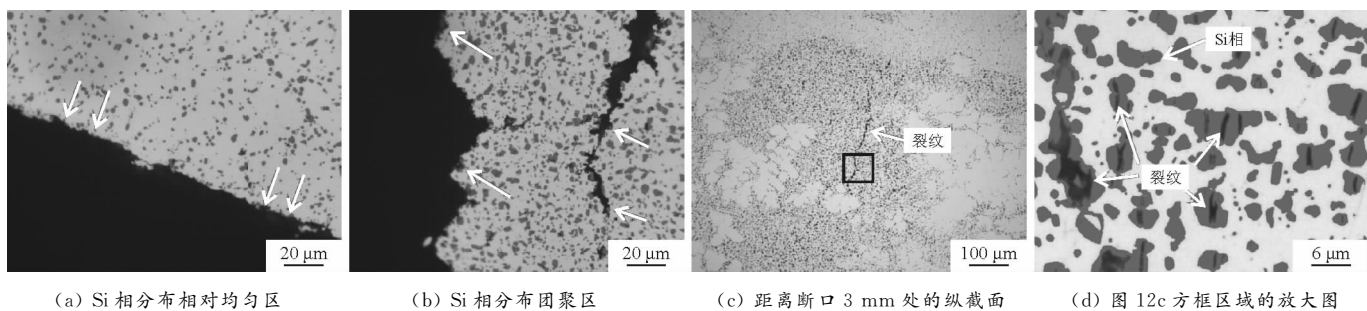


图 12 4 号合金断口纵截面 SEM 形貌

Fig.12 SEM images of longitudinal section fracture of alloy 4

为进一步研究 Si 相在拉伸过程中所起作用,在距断口纵向距离约 3 mm 处取 Si 相集中区域进行观察(见图 12c),可见该区域由于靠近断口,有裂纹产生,而在 Si 相分布少的区域未出现裂纹,这进一步证实了团聚的 Si 相会诱导裂纹的产生。对方框内区域放大(见图 12d),发现许多还未完全断裂的 Si 相,而且这些存在小裂纹的 Si 相的尺寸都相对较大,因此,当更多大颗粒的 Si 相聚集在一起时,更容易形成连续的小裂纹,最终

导致形成大裂纹。

图 13 为 1、2、4 号试样的典型拉伸断口形貌,由于 3 号试样断口形貌和 4 号类似,所以没有呈现。可见 1 号试样韧窝分布较为均匀,断裂的 Si 相分布在韧窝的中心,该合金强度和伸长率最高;2 号试样大部分呈现韧性断裂,但在断口处发现了气孔和较小的解理面,其伸长率低于 1 号的;而在 4 号试样断口中发现了很大区域 Si 相聚集区域,该区域呈现明显的解理断裂,对伸

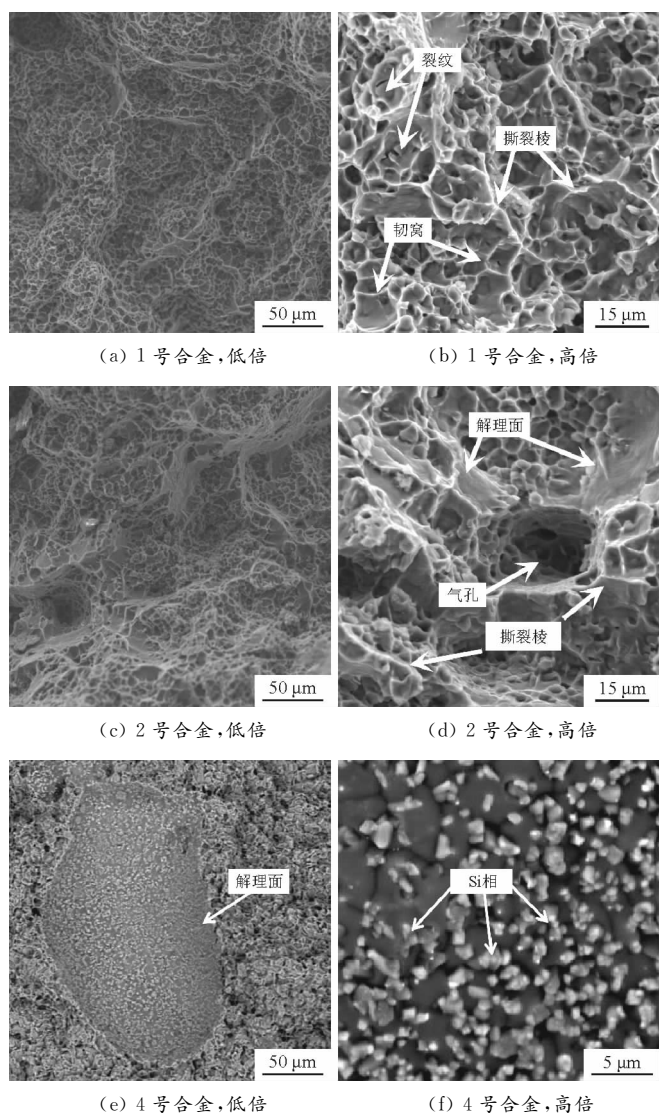


图 13 1 号、2 号和 4 号试样断口 SEM 形貌

Fig.13 SEM images of fracture morphologies of specimens 1, 2 and 4

长率有着较为明显的影响,导致伸长率相对较低。

3 结 论

(1)挤压温度对挤压铸造 Al-Si-Mg 合金中共晶 Si 的团聚现象和晶粒大小能够产生一定的影响;相对较低的挤压温度有助于合金中共晶 Si 相的均匀分布。

(2)挤压铸造 Al-Si-Mg 合金经 T6 处理后,纤维状的共晶 Si 球化变成颗粒状,但共晶 Si 团聚区域经 T6 处理后无法形成较好的分散, Si 颗粒尺寸较大。

(3)挤压铸造 Al-7Si-Mg 合金经 T6 处理后共晶 Si 聚集严重的试样腐蚀电位为 -820 mV,腐蚀电流密度为 1.91×10^{-5} A/cm²,共晶 Si 分布均匀的试样的腐蚀电位为 -790 mV,腐蚀电流密度为 1.08×10^{-5} A/cm²,腐蚀沿 Si 相团聚的区域进行,共晶 Si 分布均匀的试样耐腐蚀性能更好。

(4)挤压铸造 Al-7Si-Mg 合金经 T6 处理后,屈服

强度在 270 MPa 左右,抗拉强度在 330 MPa 左右,其中挤压温度为 670 ℃ 时组织分布均匀,伸长率较高,为 14.12%;挤压温度为 710 ℃,伸长率仅为 10.12%,Si 颗粒的聚集以及较大的尺寸降低了合金的塑性。

参 考 文 献

- [1] KAPRANOS P, KIRKWOOD D. Thixoforming of an automotive part in A390 hypereutectic Al-Si alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2-3): 271-277.
- [2] CECHEL S, FERRARIO D, PANVINI A, et al. Lightweight of a cross beam for commercial vehicles: Development, testing and validation[J]. Mater. Des., 2018, 149: 122-134.
- [3] SHAHA S K, CZERWINSKI F, KASPRZAK W, et al. Aging characteristics and high-temperature tensile properties of Al-Si-Cu-Mg alloys with micro-additions of Cr, Ti, V and Zr[J]. Materials Science & Engineering, 2016, A652(15): 353-364.
- [4] 唐全波,姜巨福. 压铸、压铸 ADC12 铝合金连杆端盖的组织 and 性能比较[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(9): 830-832.
- [5] FUKUNAGA H. Processing aspects of squeeze casting for short particulates and particles reinforced metal matrix composites[J]. Materials and Manufacturing Processes, 1988, 3(4): 669-686.
- [6] NATRAYAN L, SENTHIL KUMAR M. Optimization of wear behaviour on AA6061/Al₂O₃/SiC metal matrix composite using squeeze casting technique-Statistical analysis[J]. Mater. Today Proc., 2020, 27: 306-310.
- [7] ROSSO M, PETER I, BIVOL C, et al. Development of industrial components by advanced squeeze casting[J]. Int. J. Mater. Form., 2010, 3(1): 787-790.
- [8] CHOMSAENG N, HARUTA M, CHAIRUANGSRI T, et al. HRTEM and ADF-STEM of precipitates at peak-aging in cast A356 aluminium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 496(1-2): 478-487.
- [9] BASAVAKUMAR G, MUKUNDAP G, CHAKRABORTY M. Influence of grain refinement and modification on microstructure and mechanical properties of Al-7Si and Al-7Si-2.5Cu cast alloys[J]. Mater. Charact., 2008, 59(3): 283-289.
- [10] 欧翅翔,汪樟峰,刘锋睿,等. A356 铝合金轮毂 Si 偏析现象及力学性能[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(1): 60-66.
- [11] 王贵,薛喜伟. A356.2 低压铸造铝合金车轮中 Si 偏析对产品质量的影响[J]. 铝加工, 2017(2): 20-24.
- [12] 袁崇胜,杨钢,刘惠军,等. 降低 Al-Si-Mg 铸造铝合金 Si 偏析的措施[J]. 有色金属(冶炼部分), 2006(2): 45-47.
- [13] 陈振明,赵海东,陈学文,等. ADC14 挤压铸造件 Si 偏析的原因分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(8): 743-745.
- [14] QI M F, XU Y Z, LI J Y, et al. Microstructure refinement and corrosion resistance improvement mechanisms of a novel Al-Si-Fe-Mg-Cu-Zn alloy prepared by ultrasonic vibration-assisted rheological die-casting process[J]. Corrosion Science, 2021, 180: 109-180.
- [15] BIRBILIS N, BUCHHEIT R G. Electrochemical characteristics of intermetallic phases in aluminum alloys: An experimental survey and discussion[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2005, 152(4): 140-145.
- [16] ARTHANARI S, JANG J C, SHIN K S. Corrosion performance of high pressure die-cast Al-Si-Mg-Zn alloys in 3.5% NaCl solution[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 783: 494-502.

(编辑:张正贺)