

微量 Sr 对 Al-Si-Mg 合金微观组织及力学性能的影响

邹 斌¹ 梁秋贤² 苏再军^{2,3} 刘胜强² 沈克新² 陈卓夫² 欧 玲⁴

(1. 中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司, 贵阳 550009; 2. 广东辉煌金属制品有限公司, 肇庆 526200;

3. 广州科技贸易职业学院智能制造学院, 广州 511442; 4. 湖南工业大学材料与先进制造学院, 株洲 412007)

摘 要 通过光学显微镜(OM)、X射线衍射分析(XRD)、扫描电镜(SEM)及力学性能测试等方法,研究了微量 Sr(0、0.015%、0.03%,质量分数,下同)对砂型铸造 Al-Si-Mg 合金微观组织及力学性能的影响。结果表明,微量 Sr 的加入能显著细化铸态合金中粗大共晶 Si 及二次枝晶尺寸,但超过 0.015% 后,合金含气量增多。铸造 Al-Si-Mg 合金主要由 Al 相、Si 相及少量的 Mg₂Si 相、Al₃Ti 相、Al-Fe-Si 相组成,加入微量 Sr 没有形成 Al₄Sr 相。随着 Sr 含量增加,合金的抗拉强度逐渐提高,伸长率先升高后降低。Sr 含量为 0.015% 时,合金具有最佳的力学性能,其在铸态、时效态的抗拉强度和伸长率分别为 156 MPa、4.55% 和 349 MPa、3.07%。继续增加 Sr 含量,含气量的增加导致合金伸长率迅速降低。

关键词 Al-Si-Mg 合金; Sr; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240062

Effects of Trace Sr on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Mg Alloy

ZOU Bin¹, LIANG Qiuxian², SU Zaijun^{2,3}, LIU Shengqiang², SHEN Kexin², CHEN Zhuofu², OU Ling⁴

(1. Guizhou Honglin Aerodynamic Control Technology Co., Ltd., Guiyang 550009; 2. Guangdong Huihuang

Metal Products Co., Ltd., Zhaoqing 526200; 3. College of Intelligent Manufacturing, Guangzhou Vocational

College of Technology and Trade, Guangzhou 511442; 4. College of Materials and Advanced Manufacturing,

Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007)

Abstract: The effects of Sr (0, 0.015%, 0.03%, mass fraction) on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy were investigated by means of OM, XRD, SEM and mechanical property test. The results indicate that the addition of trace Sr (0, 0.015%, 0.03%) elements can significantly refine the size of coarse eutectic silicon and secondary dendrites in as-cast alloy, while gas content of the alloy is increased with Sr exceeding 0.015%. The as-cast alloy is mainly composed of Al phase, Si phase and a small amount of Mg₂Si phase, Al₃Ti phase and Al-Fe-Si phase, and absence of new phase is observed with trace Sr addition. With the increase of Sr content, the tensile strength of alloy is increased gradually, and the elongation is firstly increased and then decreased. The optimal mechanical properties are achieved with Sr content of 0.015%, where the tensile strength and elongation of the as-cast and as-aged alloys are 156 MPa, 4.55% and 349 MPa, 3.07%, respectively. The elongation is decreased rapidly with Sr content increasing due to the increase of gas content.

Key Words: Al-Si-Mg Alloy, Sr, Microstructure, Mechanical Properties

近年来,亚共晶 Al-Si-Mg 合金作为一种工程轻量化合金,具有强度高、韧性好、流动性和抗热裂性优异等特点,广泛应用于航空航天及汽车工业等领域^[1-3]。ZL114A 合金为亚共晶 Al-Si-Mg 合金之一,是在 ZL101A 合金基础上提高 Mg 含量而研发的一款高强铸造铝合金^[4]。在 ZL114A 合金中,二次枝晶及共晶 Si 相的形貌、尺寸和分布直接影响到铸造合金的力学性

能^[5-7]。通常使用化学变质工艺,通过杂质诱导孪晶或孪晶凹谷机制促进第二相形核率,降低其生长率,改变第二相生长方向等从而达到改善合金第二相形貌的变质效果^[8-9]。目前主要的变质元素有 Sr、Cr、Ba、Sb 和 RE 等^[10-14]。众多研究表明,Sr 变质具有添加元素含量低、吸收率高,变质有效期长等特点^[15-16]。但由于在保温过程中 Sr 的烧损率高,且易造成合金液吸气严重,变

收稿日期:2024-02-26;修订日期:2024-06-04

基金项目:广东省普通高校重点领域专项资助项目(2023ZDZX3076);广州市教育局羊城学者科研资助项目(2024312443)

第一作者简介:邹斌,男,1976 年出生,工程师,E-mail:hlzoubin@sina.cn

通信作者:苏再军,男,1981 年出生,正高级工程师,E-mail:suzjy@hnsyu.edu.cn

引用格式:邹斌,梁秋贤,苏再军,等.微量 Sr 对 Al-Si-Mg 合金微观组织及力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2025,45(5):750-753.

ZOU B, LIANG Q X, SU Z J, et al. Effects of trace Sr on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(5): 750-753.

质效果受冷却速度的变化影响大等,导致在砂型铸造中变质效果不佳,严重影响铸件质量及力学性能。目前,关于Sr变质砂型铸造Al-7Si-0.5Mg-0.1Ti(ZL114A)合金的研究报道较少。因此,本研究以ZL114A合金为对象,研究微量Sr对砂型铸造合金显微组织与力学性能的影响,得出Sr的最佳添加含量,为以后开发更优异性能的砂型ZL114A铝合金提供参考。

1 试验材料及方法

试验合金为不同Sr含量(0, 0.015%, 0.03%, 质量分数,下同)的ZL114A合金,采用砂型重力铸造成形。主要的试验原料为工业纯铝锭(99.95%)、纯Mg锭(99.95%)、Al-10Si、Al-5Ti-1B和Al-10Sr中间合金。采用电阻炉熔炼,合金熔化后在730℃下进行精炼和除气,静置15 min后在720℃下重力浇注至砂型模具中。合金凝固后在535℃固溶12 h,之后对不同Sr含量的合金进行160℃×10 h的时效处理。使用体积分数为0.5%的HF酸水溶液对合金进行腐蚀,在OLYMPUS BX53金相显微镜上观察显微组织;物相分析采用DPMAX 2500 X射线衍射仪;显微组织分析及能谱分析采用Sirion-200型扫描电镜;力学性能测试在CSS-44100 万能电子试验机上进行,拉伸速率为3 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 微量Sr对ZL114A合金微观组织的影响

图1为不同Sr含量的铸态ZL114A合金X射线衍射图谱。可以看出,加入不同含量的Sr后,铸态合金没有形成 Al_4Sr 相,所有合金都是由 α -Al相、Si相及少量的 Mg_2Si 相、 Al_3Ti 相、Al-Fe-Si相组成。

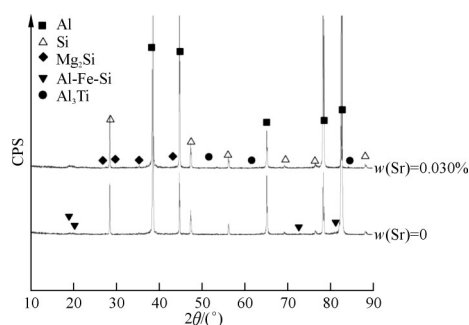


图1 不同Sr含量下铸态ZL114A合金X射线衍射图谱
Fig.1 X-ray diffraction pattern of as-cast ZL114A alloys with different Sr contents

图2为不同Sr含量下铸态ZL114A合金的显微组织。可以看出,在未加入Sr的合金中,共晶Si相基本呈长板条状或层状分布, α -Al枝晶尺寸也比较粗大,二次枝晶臂间距尺寸约为80 μm 。未变质的共晶Si沿着

(111)面的 $\langle 112 \rangle$ 方向同向生长,并先于 α -Al相生长到Al-Si基体中^[17],形成粗大晶界。随着Sr含量增加到0.015%,粗大的花瓣状 α -Al枝晶逐渐细化,共晶Si相形状也逐渐转化为细小的短棒状及颗粒状。继续增加Sr含量到0.030%,颗粒状共晶Si继续细化,二次枝晶臂间距降至约45 μm ,但已出现气孔。Sr化学性质活泼、易与空气中的水发生反应生成 $Sr(OH)_2$ 并放出氢气,提高合金中的氢含量^[18]。由此可见,Sr的加入量为0.030%时,虽然变质效果最好,但此时合金氢含量较高,导致合金铸件性能变差。

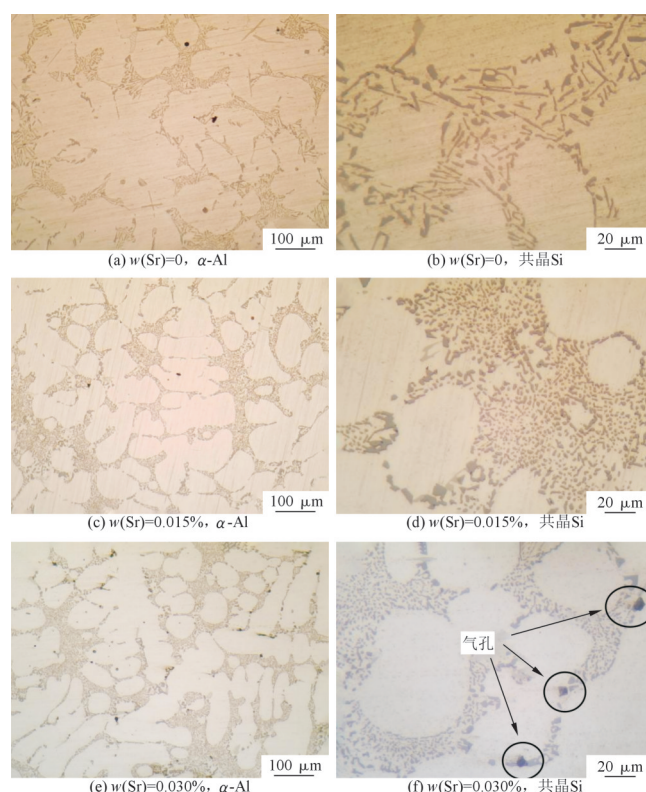


图2 不同Sr含量下铸态ZL114A合金OM图片

Fig.2 OM images of as-cast ZL114A alloys with different Sr contents

图3是Sr加入量为0.030%时铸态ZL114A合金的显微组织。可以看出,合金中有3种不同形貌或颜色的相,分别为颗粒状灰色相(A_1)、多边形块状或汉字状灰白色相(A_2)和长条状白色相(A_3)。对图中标记的相进行EDS能谱分析,结果见表1。由表1可知, A_1 点的共晶组织中含有大量的Al、Si及少量Sr,结合合金的X射

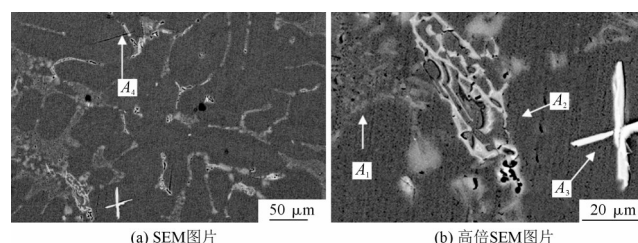


图3 Sr含量为0.030%的铸态ZL114A合金SEM图片

Fig.3 SEM image of as-cast ZL114A alloy with 0.030% Sr

线衍射图谱可以确定其为 Si 相。A₂ 点相中含有大量的 Al、Si、Mg 及少量 Sr、Fe 元素,结合合金的 X 射线衍射图谱可以确定其为 Mg₂Si 相。A₃ 点处 Al、Ti 的摩尔比约为 3,可以确定为 Al₃Ti 相。虽然 Sr 在铝基体中的固溶度较低^[19],但微量 Sr(0.030%) 的加入并没有形成 Al₄Sr 相,而是固溶在 Si 及 Mg₂Si 相中。此外,在合金中还发现少量的长针状黑色相,主要对应 Al、Si 及 Fe 元素,结合 X 射线衍射图谱可以确定为 Al-Fe-Si 相。

表 1 含 0.030% Sr 铸态 ZL114A 合金 EDS 结果

Tab.1 EDS results of as-cast ZL114A alloy with 0.030% Sr %

位置	x_B						
	Al	Si	Mg	Sr	Fe	Mn	Ti
A ₁	76.3	21.3	—	2.4	—	—	—
A ₂	70.0	17.0	9.1	1.1	2.9	—	—
A ₃	40.6	40.3	—	—	0.1	—	19

图 4 为加入不同含量 Sr 时效态 ZL114A 合金光学显微组织(热处理工艺为 535 ℃×12 h+160 ℃×10 h)。可以看出,所有时效态合金中的共晶 Si 形貌发生了明显变化,共晶 Si 逐渐溶入基体,相比铸态合金的共晶 Si 相更加圆整。在未加 Sr 的合金中,大部分共晶 Si 从长板条状或层状变为较大颗粒状或短棒状。随着 Sr 含量增加,共晶 Si 的尺寸逐渐变小,颗粒状 Si 相比例逐渐增加。

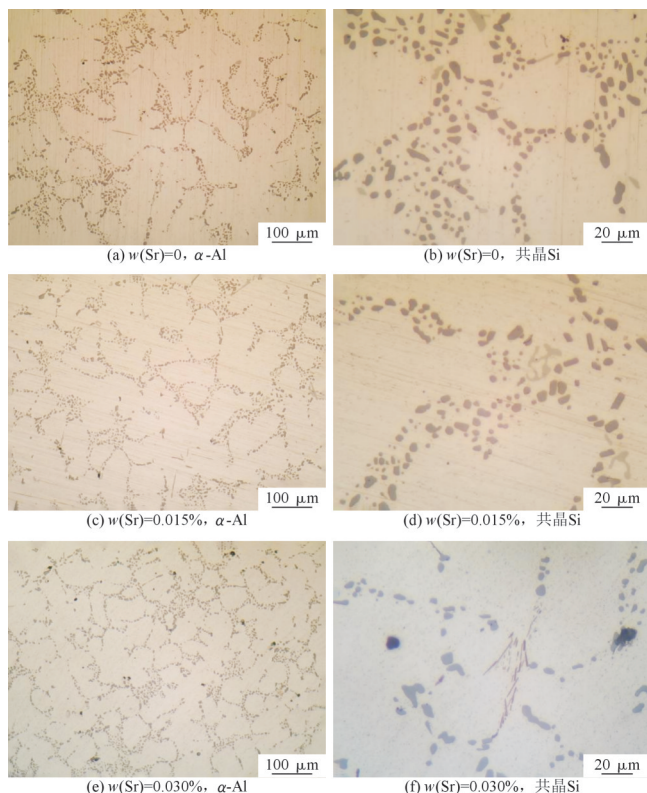


图 4 不同 Sr 含量下时效态 ZL114A 合金 OM 图片

Fig.4 OM images of as-aged ZL114A alloys with different Sr contents

2.2 微量 Sr 对 ZL114A 合金力学性能的影响

图 5 为加入不同 Sr 含量的 ZL114A 合金铸态及时效态的力学性能。可以看出,未加入 Sr 时铸态合金的抗拉强度和伸长率分别为 149 MPa、3.34%。加入 0.015% 的 Sr 后,由于合金中的单质 Si 相由粗大长板条状或层状转化为分布较均匀的短棒状及颗粒状,提高了第二相在基体中的连续性,降低了应力集中的程度。其次,凝固过程中,游离的 Sr 原子易富集在固-液界面前沿中,使界面前沿液相中的原子浓度梯度增加,抑制共晶 Si 相的生长,增大局部过冷度,从而导致合金二次枝晶臂间距尺寸减小。此外,由图 3 及表 1 可以看出, Sr 固溶在 Si 相及 Mg₂Si 相中,可以抑制其生长速度。以上因素共同促进了 Si 含量为 0.015% 铸态合金抗拉强度及伸长率的提高,此时合金抗拉强度和伸长率分别为 156 MPa、4.55%。加入 0.030% 的 Sr 后,虽然共晶 Si 相尺寸及二次枝晶臂间距进一步减小,但合金中含气量的增多导致伸长率降至 4.03%。

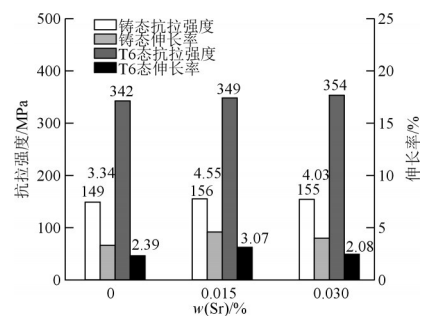


图 5 不同 Sr 含量下铸态及时效态 ZL114A 合金的力学性能

Fig.5 Mechanical properties of as-cast and as-aged ZL114A alloys with different Sr contents

相比铸态合金,经固溶时效处理后,合金的抗拉强度有较大幅度的提升,但伸长率急剧降低。未加入 Sr 时合金时效态的抗拉强度和伸长率分别为 342 MPa 和 2.39%。随着 Sr 含量增加,由于共晶 Si 相形状逐渐细小圆整化,时效态合金的抗拉强度逐渐提高, Sr 含量为 0.015% 的合金具有最高的伸长率,为 3.07%。Sr 含量增加到 0.030% 时,合金具有最高的抗拉强度(354 MPa),但含气量的升高导致伸长率较低。

图 6 为不同 Sr 含量下 ZL114A 合金铸态及时效态的断口形貌。可以看出,未加入 Sr 变质的铸态合金断口形貌由大量长条状解理台阶面组成,表现为典型的解理断裂。加入 0.015% 的 Sr 后,合金断口处出现大量细小较浅的韧窝及少量撕裂棱,解理台阶面尺寸迅速变小,这说明 Sr 的加入使共晶 Si 相及 α-Al 晶粒细化,伸长率提高,断裂模式转变为解理断裂与韧性断裂的混合断裂。加入 0.03% 的 Sr 后,合金断口的解理台阶面更加均匀,但出现了外壁光滑圆整的气孔缺陷,导致合金力学性能,尤其是伸长率的降低。

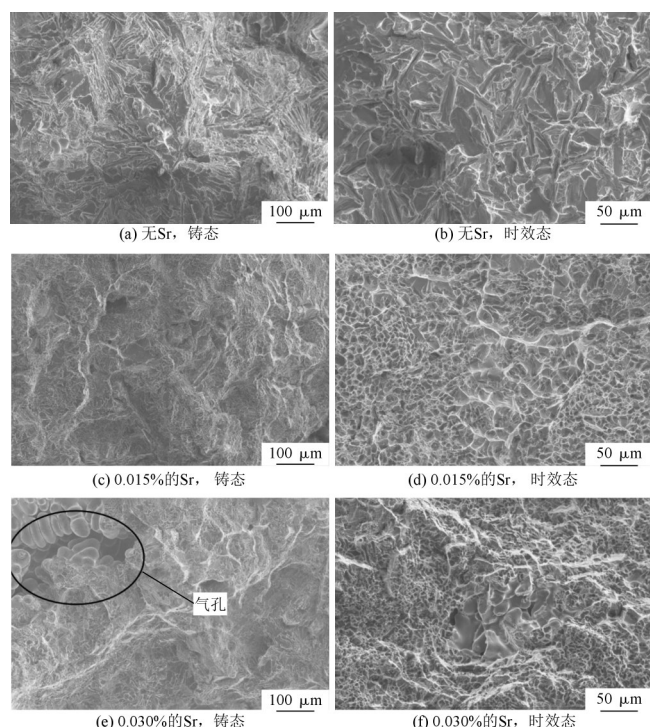


图6 不同Sr含量下铸态及时效态ZL114合金断面SEM形貌

Fig.6 SEM fracture morphologies of as-cast and as-aged ZL114A alloy with different Sr contents

与铸态合金相比,经固溶时效处理后的所有合金断面解理台阶面尺寸明显增大,表明塑性低于铸态合金的。未加入Sr变质的时效态合金断面形貌由较多的解理台阶及少量韧窝组成,解理台阶较光滑。加入0.015%的Sr后,撕裂棱数量增多,解理台阶面尺寸也迅速变小,且出现了大量韧窝。加入0.030%的Sr后,虽然解理台阶面及韧窝更加细小均匀,但由于气孔缺陷的出现,合金力学性能降低。研究表明^[1,17,20],共晶或亚共晶含Si合金金属型铸造中,变质元素Sr在合金熔体中的质量分数为0.020%~0.040%时,可获得良好的变质效果。但在砂型铸造中,加入0.030%的Sr,合金中仍出现较多的气孔,这是因为砂型铸造与金属型铸造相比冷却速率更低,在凝固过程中易出现气孔及缩孔。

3 结 论

(1)微量Sr的加入能显著细化砂型铸造ZL114A合金中共晶Si及二次枝晶尺寸,但Sr含量超过0.015%后,合金含气量增多。

(2)加入Sr的ZL114A合金主要由Al相、Si相及少量的Mg₂Si相、Al₃Ti相及Al-Fe-Si相组成,没有Al₄Sr相形成。

(3)含0.015%的Sr砂型铸造ZL114A合金具有理想的力学性能,在铸态及时效态时抗拉强度和伸长率分别为156 MPa、4.55%和347 MPa、3.07%。继续增

加Sr含量,含气量的增加导致合金伸长率迅速降低。

参 考 文 献

- [1] SUN S C, YUAN B, LIU M P. Effects of moulding sands and wall thickness on microstructure and mechanical properties of Sr-modified A356 aluminum casting alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(8): 1 884-1 890.
- [2] HE Y, XI H H, MING W Q, et al. Thermal stability and precipitate microstructures of Al-Si-Mg-Er alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(1): 1-10.
- [3] 周鹏飞, 王东涛, 张海. 铸造Al-Si-Mg-Cu合金综合性能调控研究现状[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(12): 1 607-1 612.
- [4] 胡惠翔, 樊振中, 罗婷瑞, 等. Al-Si-Mg系铸造合金应用现状与高强韧制备研究进展[J]. 铸造, 2023, 72(10): 1 227-1 234.
- [5] WANG Z J, ZHANG Q B Y, ZHANG M, et al. Effect of refinement and modification on microstructure, properties and eutectic silicon growth mechanism of cast A356 aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(8): 2 665-2 673.
- [6] 赵宇光, 杨雪慧, 徐晓峰, 等. Al-10Sr变质剂状态、变质温度及变质时间对ZL114A合金组织的影响[J]. 吉林大学学报, 2018, 48(1): 212-220.
- [7] 高文理, 毛郭灵, 刘东洋, 等. Y元素对ZL114A合金微观气孔的影响[J]. 湖南大学学报, 2021, 48(6): 52-57.
- [8] 李晓燕, 卢雅琳, 王健, 等. 稀土Er对A356铝合金微观组织和力学性能的影响[J]. 材料工程, 2018, 46(1): 67-73.
- [9] CHANG L, DING Y M, GUO B X, et al. Modification mechanism and tensile property of Al-9Si-0.4Mg-0.1Cu alloy[J]. Materials Characterization, 2022, 184: 111 693.
- [10] GAN J Q, HUANG Y J, WEN C, et al. Effect of Sr modification on microstructure and thermal conductivity of hypoeutectic AlSi alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(11): 2 879-2 890.
- [11] ARANDA V A, FIGUEROA I A, GONZALEZ G, et al. Study of the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Fe with additions of chromium by suction casting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 853(1): 157 155.
- [12] GHANDVAR H, JABBAR K A J, IDRIS M H, et al. Influence of Barium addition on the formation of primary Mg₂Si crystals from Al-Mg-Si melts[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 448-465.
- [13] LI C, WANG C, MA P K, et al. Effect of Sb modification on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-11Mg-2Si alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A782: 139 247.
- [14] LUO Q, LI X, LI Q, et al. Achieving grain refinement of α -Al and Si modification simultaneously by La-B-Sr addition in Al-10Si alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 135(4): 97-110.
- [15] 董光明, 孙国雄, 廖恒成, 等. 铝硅合金中共晶Si的变质机理: 杂质诱发共生成对孪晶[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(1): 34-37.
- [16] ZHANG L L, JI Z W, ZHAO J Z, et al. Factors affecting eutectic Si modification in Al-Si hypoeutectic alloy with the addition of Na, Sr, Eu and Yb[J]. Materials Letters, 2022, 308: 131 206.
- [17] LIU X R, ZHANG Y D, BEAUSIR B, et al. Twin-controlled growth of eutectic Si in unmodified and Sr-modified Al-12.7%Si alloys investigated by SEM/EBSD[J]. Acta Materialia, 2015, 97: 338-347.
- [18] 王正军, 张秋阳, 张满, 等. 细化变质处理对铸造A356铝合金组织性能及共晶Si生长机制的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(1): 20-26.
- [19] 刘楚明, 蒋树农, 陈志永, 等. 铝合金相图集[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014.
- [20] 姜峰, 索忠源, 王德禹, 等. 不同Sr含量变质对A356合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造, 2018, 67(11): 1 012-1 015.

(编辑: 栗万仲)