

Al-Si 合金弹性模量与 Si 相含量及其形态的相关性研究

王宏宇, 苏宏福, 胡静怡, 高通, 刘相法

(山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要: 为研究 Al-Si 合金弹性模量与合金中 Si 相含量及其形态的相关性, 通过熔体法制备了亚共晶 Al-3Si、Al-5Si、Al-7Si、Al-9Si 合金、近共晶 Al-12.5Si 合金及过共晶 Al-18Si 合金, 并对 Al-9Si、Al-12.5Si 和 Al-18Si 合金分别进行了 P 变质和 Sr 变质处理。通过声速法测量了合金的弹性模量, 利用 ImageJ 软件获得了合金微观组织中 Si 相的面积分数, 并揭示了其与 Si 相体积分数的相关性, 经数据拟合分别得到合金弹性模量与合金中 Si 含量及微观组织中 Si 相面积分数的函数关系。结果表明, 随着 Si 含量的增加, 合金的弹性模量不断提高。经 P 变质和 Sr 变质处理后, Al-9Si、Al-12.5Si 和 Al-18Si 合金的弹性模量均降低, 分析认为, Si 相形态变化导致合金中 Si 相体积分数的降低, 进而引起合金弹性模量的变化。

关键词: Al-Si 合金; 弹性模量; 微观组织; 变质处理

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)04-0362-09

Study of the Relationships between the Elastic Modulus of Al-Si Alloys and the Si Content and Morphology

WANG Hongyu, SU Hongfu, HU Jingyi, GAO Tong, LIU Xiangfa

(Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To study the relationships between the elastic modulus of Al-Si alloys and the content and morphology of the Si phase, hypereutectic Al-3Si, Al-5Si, Al-7Si, Al-9Si, near-eutectic Al-12.5Si and hypoeutectic Al-18Si alloys were prepared via the melting method, and the Al-9Si, Al-12.5Si and Al-18Si alloys were modified with P and Sr, respectively. The elastic modulus of the alloys was detected via the sound velocity method. The area fraction of the Si phase in the microstructures was measured via ImageJ software, and its relationship with the volume fraction of the Si phase was revealed. The functional relationships between the elastic modulus of the Al-Si alloys and the Si content and the area fraction of the Si phase in the microstructures were obtained via data fitting. The results show that with increasing Si content, the elastic modulus of the alloys increases continually. After being modified by P and Sr, the modulus of the selected Al-9Si, Al-12.5Si and Al-18Si alloys decreases. The morphological change in the Si phase leads to a decrease in the volume fraction of the Si phase, which results in a change in the elastic modulus.

Key words: Al-Si alloy; elastic modulus; microstructure; modification treatment

为推进国家双碳战略, 促进经济发展绿色转型, 节能降碳已成为各行业在实际生产中的重要举措。铝合金因其低密度、易回收等特点得到了广泛应用。铸造 Al-Si 系合金在铸造铝合金工件中占比最

大, 具有良好的铸造性、优异的耐磨性和耐热性而被广泛应用于汽车、航空航天、船舶等行业^[1-2]。

Al-Si 系合金主要包括 Al-Si-Mg 系、Al-Si-Cu 系和 Al-Si-Cu-Ni-Mg 系等。其中, Al-Si-Mg 系合金

收稿日期: 2025-02-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52471040); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME005)

作者简介: 王宏宇, 2002 年生, 硕士生. 研究方向为高模量铝合金新材料研发. Email: 202434213@mail.sdu.edu.cn

通信作者: 高通, 1988 年生, 博士, 教授. 研究方向为耐热高强铝/镁合金、铝基复合材料、熔体处理、特种轻合金材料设计.
Email: tgao@sdu.edu.cn

引用格式: 王宏宇, 苏宏福, 胡静怡, 高通, 刘相法. Al-Si 合金弹性模量与 Si 相含量及其形态的相关性研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(4): 362-370.

WANG H Y, SU H F, HU J Y, GAO T, LIU X F. Study of the relationships between the elastic modulus of Al-Si alloys and the Si content and morphology[J]. Foundry Technology, 2025, 46(4): 362-370.

(如 A356) 常被用于制造发动机缸体等部件, Singh 等^[9]发现 A356 合金经多道次搅拌摩擦加工处理后, Si 颗粒细化效果显著且均匀地分布在 Al 基体中, 材料的耐磨性和摩擦系数也达到最佳; Moussa 等^[4]向 A356 合金中加入 1.5%(质量分数, 下同)的 Y_2O_3 后, 发现 Y 元素可有效降低共晶 Si 的长径比, 进而提高合金的延展性; Timelli 等^[5]研究表明, 在低压铸造中, 合理的加压速度也有助于细化 A356 合金中的共晶 Si 尺寸, 进而降低铸造缺陷。可见, 通过改变 Si 相形态可有效改善材料的力学性能^[6-9]。Al-Si-Cu 系合金 (如 A319) 也常被用于制造发动机部件, 比如, 添加了 Mn、Zr 和 V 的 Al-9Si-3.5Cu 合金表现出优异的热稳定性和抗高周疲劳性^[10]; 向 Al-9Si-3Cu 合金中加入 0.8%的 AlZrNiTi 中间合金, 生成的 Al-SiZr 相和 Al(Ni, Cu)相可明显细化共晶 Si, 从而显著提高力学性能^[11]。除上述 Al-Si 合金体系外, 多元 Al-Si-Cu-Ni-Mg 系合金亦常用于制造发动机活塞等动力部件。据 Zhang 等^[12]报道, Al-12Si-3.5Cu-2Ni-0.8Mg合金在 350 °C 下热暴露 200 h 后, 共晶 Si 颗粒出现球化和粗化现象, 有助于提高合金的延展性; 添加 1%的纳米级 TiC 颗粒可将 Al-10Si-3.5Cu-2.5Ni-0.3Mg 合金中的共晶 Si 形态转变为纤维状, 合金的极限抗拉强度可达 349 MPa^[13]。上述多元合金中, 除金属间化合物外, 合金的主要第二相是 Si 相, 包括亚共晶 Al-Si 系合金中的共晶 Si 相和过共晶 Al-Si 系合金中的初晶 Si 相, 而当前最常用于 Si 相形态的调控方法是分别向亚共晶和过共晶 Al-Si 熔体中添加含 Sr 和含 P 变质剂。根据经典的变质理论^[14], 由于 Si 相以呈现孪晶凹角的方式生长, Sr 原子团簇在凹角处的富集可大幅降低 Si 相的择优生长倾向, 进而使板片状共晶 Si 转变为纤维状; P 元素通过形成 AlP 晶体存在于熔体中, 其与 Si 相晶体结构和晶格参数相近, 可作为初晶 Si 的异质形核衬底, 从而使粗大的初晶 Si 相转变为颗粒状。

工业应用场景中, 除评价材料的强塑性和硬度外, 弹性模量(或称杨氏模量、模量)亦是重要的参数之一。从能量角度看, 弹性模量仅是原子键合强度的函数, 材料中原子的平均键合强度越大, 材料的弹性模量也越高^[15-17]。因此, 细晶强化、加工硬化、弥散强化等方式尽管可有效提升材料的强度和硬度, 但对弹性模量的影响极为有限。当前, 为提高铝合金的弹性模量, 一种方法是向铝合金中引入合金化元素, 其中最常用的元素为 Li。比如, Meric^[18]采用真空熔炼法制备了 4%Li/2024 铝合金, 其模量为 91.31 GPa, 且发现每添加 1%Li, 可使铝合金弹性模量提高约

6%。另一种方法则是引入增强颗粒, 其中最常用的是 SiC 颗粒, 比如, Song 等^[19]采用选区激光熔化技术制备的 5%SiC/AlSi10Mg 复合材料的弹性模量与 AlSi10Mg 合金相比提高了 23.2%。总体来讲, 相较于强塑性等方面的力学性能, 关于铝合金弹性模量的研究还较为有限。

为研究 Al-Si 合金的弹性模量随合金中 Si 相含量和形态的变化规律, 本文以二元 Al-Si 合金为研究对象, 测试了不同 Si 含量合金的弹性模量, 建立了弹性模量与合金中 Si 含量的相关性。通过常用的 P 元素变质初晶 Si^[20], Sr 元素变质共晶 Si^[21]等手段, 研究了变质前后合金的弹性模量变化规律。

1 实验材料与方法

实验原料有工业纯铝锭(99.8%)、工业纯晶体硅(99.9%)、商用 Al-3P 和 Al-10Sr 中间合金(山东吕美熔体有限公司提供)。图 1 为二元 Al-Si 合金相图, 可以看出, 合金中仅有 α -Al 和 β -Si(简称 Si)2 种固相, 共晶点处 Si 含量(质量分数, 下同)约为 12.6%。因此, 试验制备了系列 Al-Si 合金, 包括 Al-3Si、Al-5Si、Al-7Si、Al-9Si 亚共晶合金、Al-12.5Si 近共晶合金及 Al-18Si 过共晶合金。在此基础上, 利用 Al-3P 和 Al-10Sr 中间合金分别对 Al-9Si、Al-12.5Si 及 Al-18Si 合金进行了变质处理, 其中, Al-3P 加入量为熔体质量的 0.9%, Al-10Sr 加入量为熔体质量的 0.5%。合金制备的具体步骤为: 将盛有不同配比纯铝和纯硅原料的粘土坩埚放入电阻炉中, 设定电阻炉温度为 800 °C; 待原料完全熔化后保温 10 min, 浇注到铸铁模具中, 冷速约为 80 K/s。对于变质处理的熔体, 则待 Al-3P 或 Al-10Sr 中间合金加入后搅拌, 保温 10 min 后采用相同工艺浇铸。

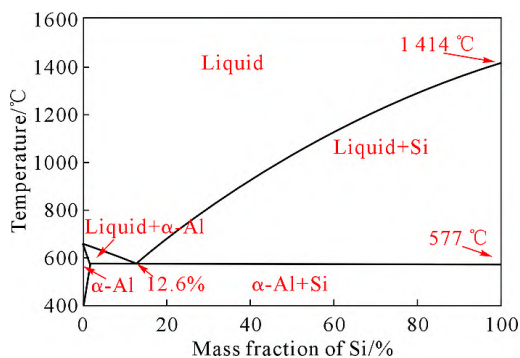


图 1 Al-Si 合金二元相图

Fig.1 Binary phase diagram of the Al-Si alloy

从铸态合金的同一位置取样, 依次利用 220、400、600、1 500 目的 SiC 砂纸对样品进行机械打磨, 随后使用 MgO 悬浊液进行研磨和抛光, 并使用光学显微镜(Leica DM2700M)和场发射扫描电镜(SEM

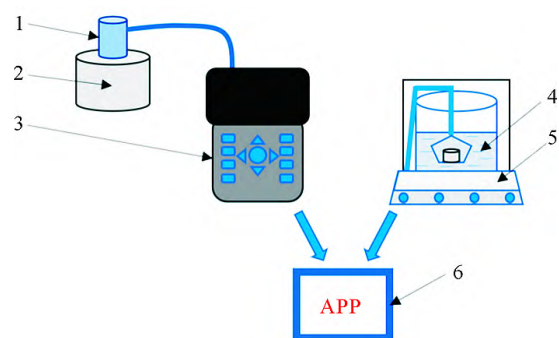
日立 SU-70)进行观察。为更清晰观测 Si 相,用于 SEM 观察的样品抛光后经浓度为 0.4%HF 溶液腐蚀 30 s,吹干。此外,利用 ImageJ 软件测定不同 Al-Si 合金中 Si 相的面积分数。

利用线切割设备(DK7735)在铸态合金的同一水平位置切割出厚度为 13 mm 的圆柱,以上述方法对圆柱样品的 2 个端面进行机械打磨,并确保双面平行且光滑,随后将样品放入无水乙醇中超声处理 1 min,并吹干。采用声速法测量不同样品的弹性模量(IET-01,洛阳卓声检测仪器有限公司),图 2 为测试原理。该方法是利用声速测量仪(45MG-99-MT-C-ZH)测得声波(纵波和横波)在样品中的传播速度(下称“声速”),利用密度仪(XSR205DU/A)测量样品的密度值,随后将所测数据导入计算软件中得到样品的弹性模量值。

2 实验结果与分析

2.1 Si 含量对 Al-Si 合金弹性模量的影响

图 3 为不同 Si 含量 Al-Si 合金的微观组织。从



1-Probe; 2-Sample; 3-Sound velocity measuring instrument
4-Ethanol; 5-Density measuring instrument
6-Sound velocity method modulus of elasticity calculation software

图 2 弹性模量测量原理

Fig.2 Schematic diagram of the elastic modulus measurement

图 3a~d 可以看出,亚共晶成分的 Al-Si 合金中分布着大量发达的 α -Al 枝晶,共晶 Si 分布在枝晶间。随着合金中 Si 含量从 3% 逐渐增加至 9%, α -Al 枝晶尺寸逐渐减小;近共晶 Al-12.5Si 合金的微观组织由大量共晶组织和少量 α -Al 枝晶组成(图 3e);过共晶 Al-18Si 合金中则存在初晶 Si 相,其二维形态为不

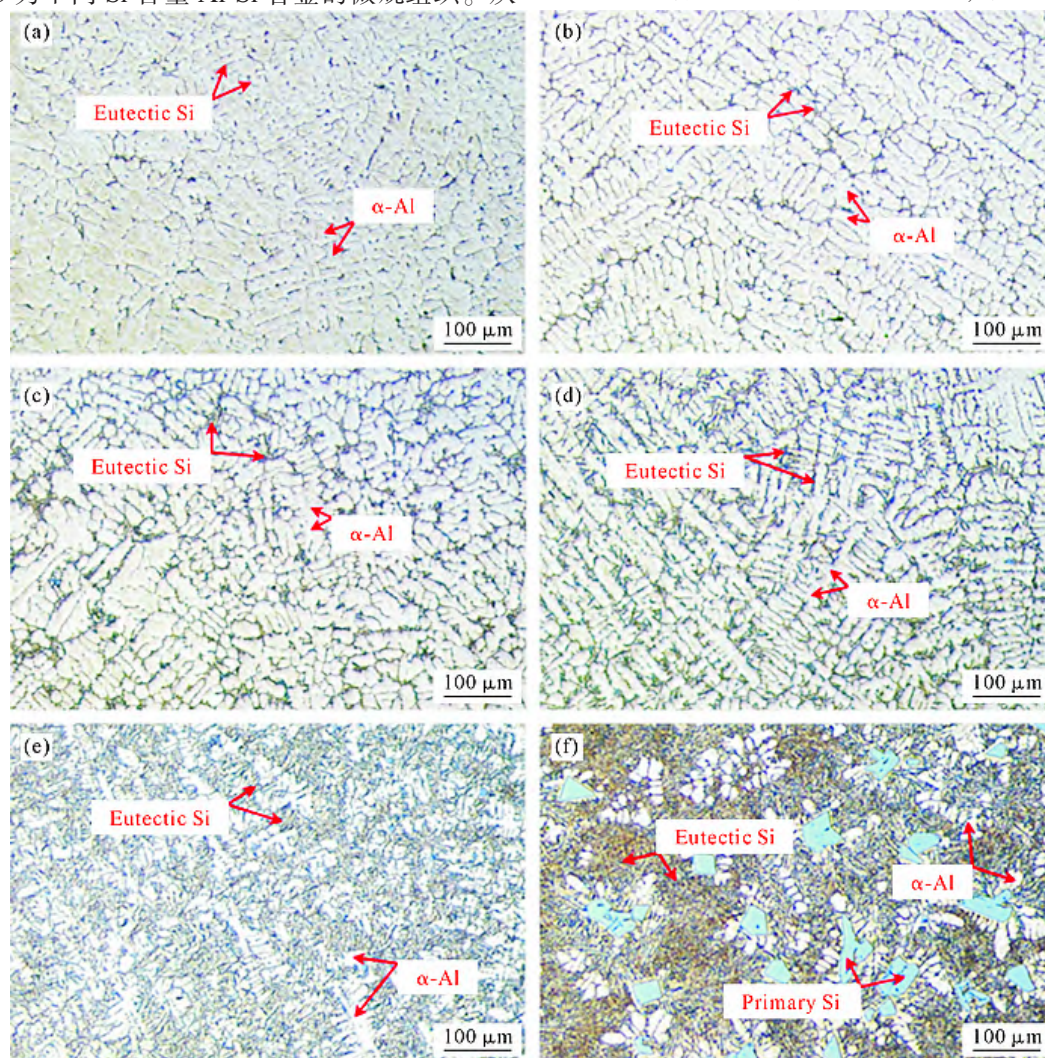


图 3 不同 Si 含量 Al-Si 合金微观组织:(a) Al-3Si;(b) Al-5Si;(c) Al-7Si;(d) Al-9Si;(e) Al-12.5Si;(f) Al-18Si

Fig.3 Microstructures of Al-Si alloys with different Si contents: (a) Al-3Si; (b) Al-5Si; (c) Al-7Si; (d) Al-9Si; (e) Al-12.5Si; (f) Al-18Si

规则多角形块状,且周围分布着 α -Al和共晶Si相(图3f)。

表1为不同Si含量Al-Si合金中的声速测量结果,表2列出了上述合金的密度测量值。由于纯硅的密度(2.33 g/cm^3)低于纯铝的密度(2.70 g/cm^3),因此,随着Si含量的增加,合金密度逐渐下降。基于上述测量数值,合金的弹性模量可通过下式计算得到:

$$E=\rho V_s^2 \frac{3V_L^2-4V_s^2}{V_L^2-V_s^2} \quad (1)$$

式中, E 为合金的弹性模量; ρ 为合金密度; V_s 为横波声速; V_L 为纵波声速。弹性模量值如表3所示,可以看出,不同合金的弹性模量值存在差异。例如,

Al-3Si合金的弹性模量为 69.716 GPa ,而Al-18Si合金则达到 79.542 GPa 。为直观表达合金弹性模量与合金中Si含量的相关性,以Si含量为横坐标,合金弹性模量为纵坐标进行拟合,按整体误差最小原则构造拟合函数。为保证拟合函数与试验数据合理匹配,不同模型的拟合结果如表4所示。由于拟合参数Adjusted R^2 越接近1准确度越高,因此将合金弹性模量与Si含量之间的关系拟定为一元三次方程:

$$y=71.312-1.108x+0.209x^2-0.007x^3 \quad (2)$$

方程中, y 表示Al- x Si合金的弹性模量值; x 表示合金中的Si含量(质量分数)。根据拟合曲线(图4)可知,Al-Si合金弹性模量随Si含量的增加逐步增加。

表1 不同Si含量Al-Si合金中的声速
Tab.1 Sound velocity in Al-Si alloys with different Si contents

Sample	Al-3Si	Al-5Si	Al-7Si	Al-9Si	Al-12.5Si	Al-18Si
Longitudinal sound velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	6 443	6 386	6 496	6 546	6 661	6 786
Transverse sound velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3 103	3 122	3 176	3 206	3 316	3 382

表2 不同Si含量Al-Si合金密度
Tab.2 Density of Al-Si alloys with different Si contents

Sample	Al-3Si	Al-5Si	Al-7Si	Al-9Si	Al-12.5Si	Al-18Si
Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.68	2.67	2.66	2.64	2.62	2.61

表3 不同Si含量Al-Si合金弹性模量
Tab.3 Elastic modulus of Al-Si alloys with different Si contents

Sample	Al-3Si	Al-5Si	Al-7Si	Al-9Si	Al-12.5Si	Al-18Si
Elastic modulus /GPa	69.716	69.918	71.957	72.904	76.970	79.542

表4 不同函数模型对合金弹性模量与Si含量关系的拟合结果
Tab.4 The fitting results of different function models for the relationship between elastic modulus of Al-Si alloys and Si content

Model	Linear function	Quadratic function	Cubic function	Quartic function	Quintic function
Adjusted R^2	0.965	0.953	0.985	0.971	Overfitted

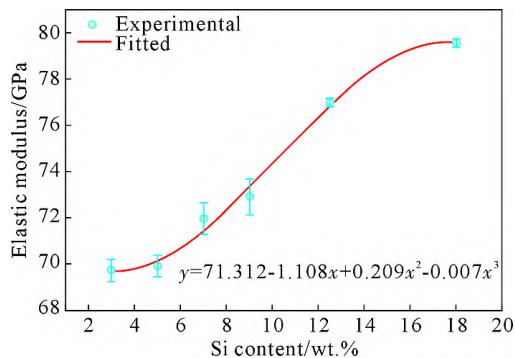


图4 Al-Si合金的弹性模量与合金中Si含量的关系及拟合曲线

Fig.4 Relationships and fitting curves between the elastic modulus of the Al-Si alloys and the Si content in the alloys

理论上,根据纯铝和纯硅密度,Al-3/5/7/9/12.5/18Si合金中Si相的体积分数分别为3.46%、5.75%、8.02%、10.28%、14.20%和20.28%。然而,由于合金是在非平衡条件下凝固,Si相的实际体积分数可能相较于理论含量有所偏差。因此,为直观反映Si相在上述合金中体积分数的差异,利用ImageJ软件对合金微观组织中的 α -Al和Si相进行颜色标定,其中 α -Al标记为绿色,Si相标记为红色,如图5所示。经测量,上述合金中Si相在二维微观组织图片中的面积占比分别为13.45%、24.11%、33.22%、38.24%、46.27%和62.47%。假定Si相和 α -Al相均可等效于球状形态,因面积和体积分别是半径的平方和三次方关系,故根据面积分数可以推算出体积分数。比如,软件测得Al-9Si合金二维图片中Si相和 α -Al相的面积分数分别为38.24%和61.76%,推算得到等效球形Si相的体积分数为67.24%,显然,这与名义体积分数20.28%差距较大。这是由于共晶Si相呈板片状而 α -Al呈枝晶状,依据面积分数并以等效球状或其他设定形态来推算体积分数缺乏合理性。

因此,以所测面积分数为横坐标,以Al-Si合金中Si相体积分数为纵坐标,可得到如图6所示的变化规律。由图可以看出,Si相面积分数越高,对应合金Si相体积分数越高,二者呈正相关。进一步,以所测Si相面积分数为横坐标,以对应合金的弹性模量值为纵坐标,通过拟合后的曲线(如图7)可以看出,其呈现的规律与图4相似。

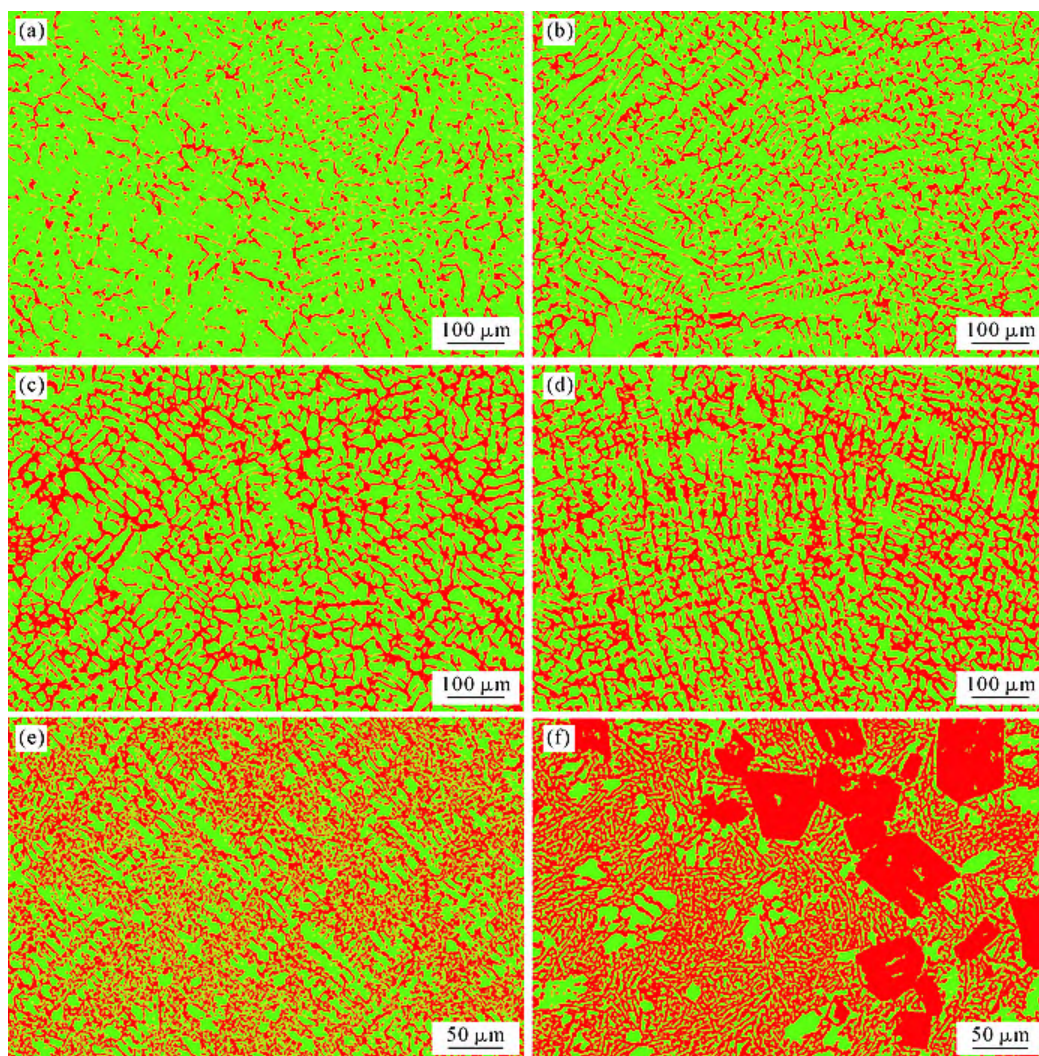


图5 ImageJ 软件对不同 Si 含量 Al-Si 合金微观组织的标定,其中,绿色为 α -Al 相,红色为 Si 相:(a) Al-3Si; (b) Al-5Si; (c) Al-7Si; (d) Al-9Si; (e) Al-12.5Si; (f) Al-18Si

Fig.5 Color calibration of the microstructures of Al-Si alloys with different Si contents via ImageJ, with α -Al green color and Si phase red color: (a) Al-3Si; (b) Al-5Si; (c) Al-7Si; (d) Al-9Si; (e) Al-12.5Si; (f) Al-18Si

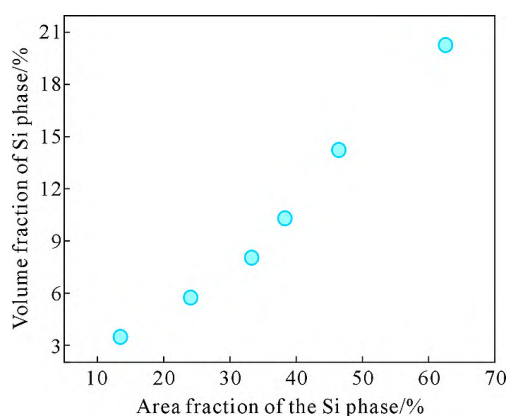


图6 Al-Si 合金中 Si 相体积分数与 ImageJ 测得合金微观组织中 Si 相面积分数的关系

Fig.6 Relationships between the volume fraction of the Si phase in the Al-Si alloys and the area fraction of the Si phase detected via ImageJ

2.2 变质处理对 Al-Si 合金弹性模量的影响

前已述及,Al-Si 合金的力学性能与 Si 相形态存在密切联系,而变质处理是调控 Al-Si 合金中 Si

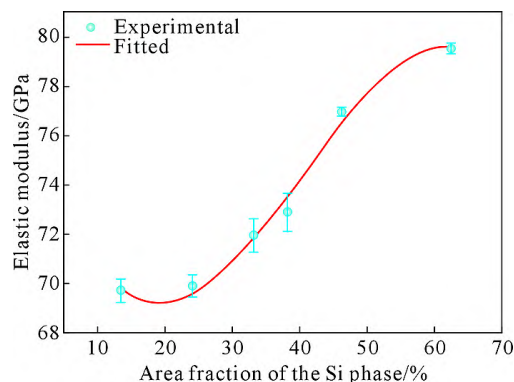


图7 Al-Si 合金的弹性模量与合金中 Si 相面积分数的关系及拟合曲线

Fig.7 Relationships and fitting curves between the elastic modulus of the Al-Si alloys and the area fraction of the Si phase in the alloys

相形态最常用的方法。其中,P 元素多用于对粗大块状初晶 Si 形态的变质^[22],而 Sr 元素则可有效改善细长板片状共晶 Si 的形态^[23]。因此,选取 Al-3P、Al-10Sr 中间合金分别对亚共晶 Al-9Si、近共晶 Al-

12.5Si 和过共晶 Al-18Si 合金进行变质处理(“P 变质”和“Sr 变质”),并研究了变质前后合金弹性模量的变化规律。

图 8 为 Al-12.5Si 及 Al-18Si 合金经 P 变质前后的微观组织。从图中可以看出,P 变质前,Al-12.5Si 合金(图 8a 和 b)中共晶 Si 形貌为细长的板片状,且合金中无初晶 Si;P 变质后,Al-12.5Si 合金中板片状共晶 Si 形态变化不明显,而合金中出现了块状初晶 Si,如图 8c 和 d 所示。众所周知,这是由于向熔体中加入 Al-3P 中间合金后,AlP 颗粒可作为初晶 Si 的异质形核点,进而促进了初晶 Si 相的形成^[24]。图 8e 和 f 分别为 P 变质前后 Al-18Si 合金的微观组织,可知经 P 变质后,初晶 Si 得到了明显细化,尺寸显著减小。利用上述方法,对 P 变质前后 Al-12.5Si 和 Al-18Si 合金的弹性模量进行测量,结果如表 5 所示。对比来看,P 变质后,2 种合金的弹性模量均有所降低。

基于以上结果,为分析共晶 Si 相的形态变化对合金弹性模量的影响,选用亚共晶 Al-9Si 与近共晶

表 5 P 变质前后合金的弹性模量
Tab.5 Elastic modulus of the alloys before and after P modification

Alloys	Elastic modulus/GPa	
	Before	After
Al-12.5Si	76.970	74.501
Al-18Si	79.542	78.951

Al-12.5Si 合金为研究对象,分别进行了 Sr 变质处理。图 9 为 Al-9Si 及 Al-12.5Si 合金经 Sr 变质前后的微观组织。从图中可以看出,Sr 变质后,2 种合金中共晶 Si 的形貌均发生了显著变化,即由细长的板片状转变为珊瑚状。表 6 为 Al-9Si 及 Al-12.5Si 合金经 Sr 变质前后的弹性模量测量结果。对比发现,Sr 变质后,合金的弹性模量亦有所降低,与上述两类合金 P 变质前后表现出的规律相似。

以上结果表明,对于选定的二元 Al-Si 合金,经 P 变质和 Sr 变质处理后,合金的弹性模量值均有所降低。为分析合金变质前后微观组织中 Si 相体积分数的变化,利用 ImageJ 软件测量了 Si 相的面积分数,

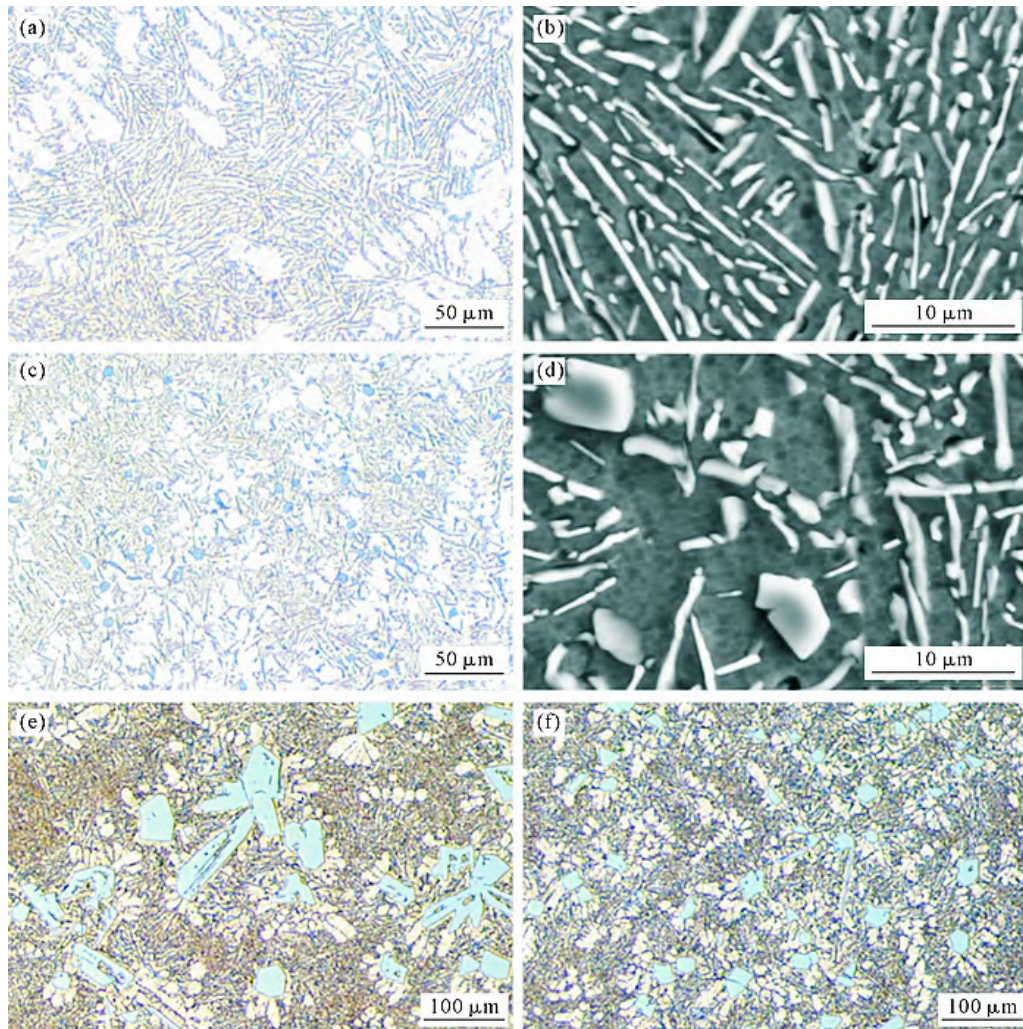


图 8 P 变质前后 Al-12.5Si 及 Al-18Si 合金的微观组织:(a, b) Al-12.5Si; (c, d) 变质后的 Al-12.5Si; (e) Al-18Si; (f) 变质后的 Al-18Si

Fig.8 Microstructures of the Al-12.5Si and Al-18Si alloys before and after P modification: (a, b) Al-12.5Si alloy; (c, d) Al-12.5Si alloy after modification; (e) Al-18Si alloy; (f) Al-18Si alloy after modification

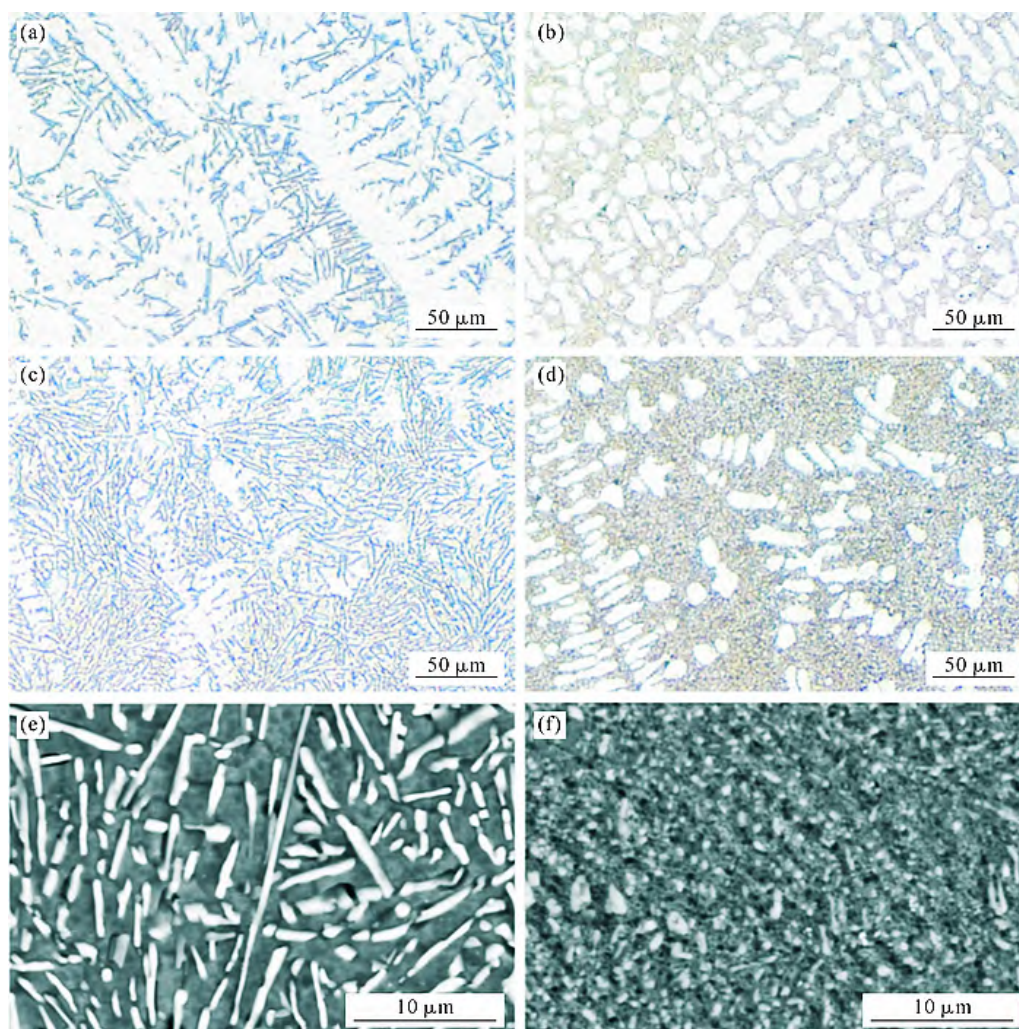


图 9 Sr 变质前后 Al-9Si 及 Al-12.5Si 合金微观组织: (a) Al-9Si; (b) 变质后的 Al-9Si; (c, e) Al-12.5Si; (d, f) 变质后的 Al-12.5Si
Fig.9 Microstructures of the Al-9Si and Al-12.5Si alloys before and after Sr modification: (a) Al-9Si alloy; (b) Al-9Si alloy after modification; (c, e) Al-12.5Si alloy; (d, f) Al-12.5Si alloy after modification

表 6 Sr 变质前后合金的弹性模量
Tab.6 Elastic modulus of the alloys before and after Sr modification

Alloys	Elastic modulus/GPa	
	Before	After
Al-9Si	74.693	68.853
Al-12.5Si	76.970	72.984

由于 Sr 变质后共晶 Si 尺寸较细小, 相对来讲, 软件对 P 变质后合金微观组织的识别度更准确。因此, 将 P 变质后 Al-12.5Si 及 Al-18Si 合金中的 α -Al 和 Si 相进行颜色标定(图 10), 获得的 Si 相面积分数如表 7 所示。可以看出, 相较于 P 变质前的合金, P 变质后的 Al-12.5Si 及 Al-18Si 合金中 Si 相的面积分数分别降低了 5.73% 和 7.89%。根据图 6 所示的 Si 相

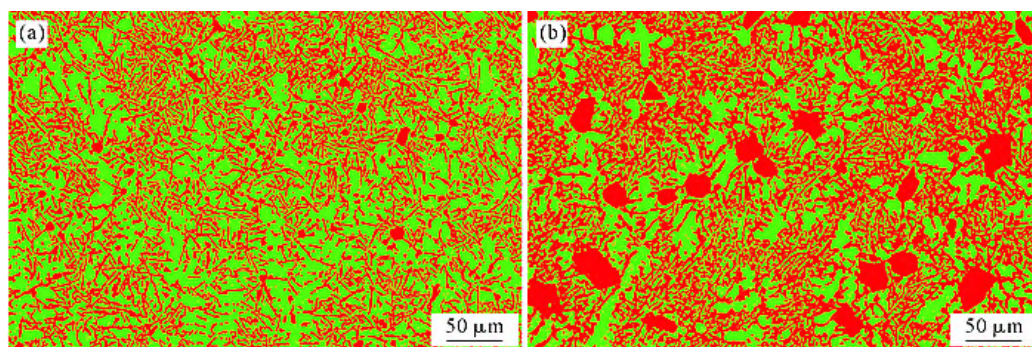


图 10 ImageJ 软件对 Al-12.5Si 与 Al-18Si 合金经 P 变质后微观组织的颜色标定, 其中, 绿色为 α -Al 相, 红色为 Si 相;
(a) Al-12.5Si; (b) Al-18Si

Fig.10 Color calibration of the microstructures of the Al-12.5Si and Al-18Si alloys after P modification via ImageJ, with α -Al green color and Si phase red color: (a) Al-12.5Si alloy; (b) Al-18Si alloy

表 7 经软件测得的 P 变质前后合金中 Si 相面积分数
Tab.7 The area fraction of the Si phase in the alloys before
and after P modification detected by ImageJ

Alloys	Area fraction/%	
	Before	After
Al-12.5Si	46.27	40.54
Al-18Si	62.47	54.59

体积分数与所测 Si 相面积分数的相关性,可推断经变质后合金中 Si 相体积分数有所降低。将变质后测得的 Si 相面积分数与合金弹性模量对应数据的位置关系置于图 7 中,得到如图 11 所示结果。从图中可以看出,合金经变质处理后得到的 2 个数据点与拟合曲线呈现出较好的相符性,这表明,经 P 变质处理后,Si 相形态的变化引起了合金中 Si 相体积分数的变化,进而影响了合金的弹性模量。

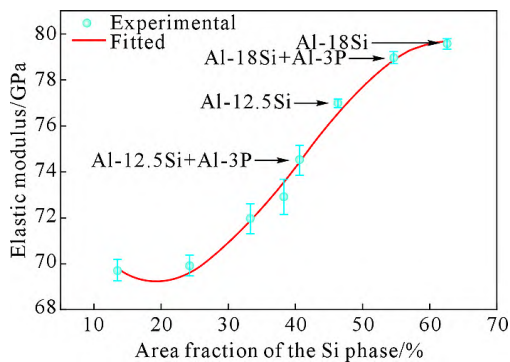


图 11 Al-12.5Si 与 Al-18Si 合金经 P 变质后 Si 相面积分数所
对应合金的弹性模量值与曲线的位置关系

Fig.11 Relationships between the elastic modulus of the
Al-12.5Si and Al-18Si alloys after P modification and the fitting
curves

3 结论

(1)二元 Al-Si 合金中,当 Si 含量从 3%依次增加至 5%、7%、9%、12.5%和 18%时,合金的弹性模量分别从 69.716 GPa 增加至 69.918、71.957、72.904、76.970 和 79.542 GPa,两者呈现正相关。

(2)经 ImageJ 软件统计,随着上述 Al-Si 合金中 Si 含量的增加,Si 相面积分数分别从 13.45%增加至 24.11%、33.22%、38.24%、46.27%和 62.47%,且面积分数与 Si 相体积分数亦呈现正相关。

(3)经 P 变质后,Al-12.5Si 和 Al-18Si 合金的弹性模量均有所降低;经 Sr 变质后,Al-9Si 和 Al-12.5Si 合金的弹性模量亦呈现降低的规律。分析认为,经变质处理后,合金中 Si 相形态的变化引起了 Si 相体积分数的降低,进而导致了合金弹性模量的变化。

参考文献:

[1] BAI Z H, WANG Y Q, XU X, MA H Y, ZHOU D S, WANG J.

- Tensile fracture behavior and friction and wear properties of TiB₂ particle reinforced Al-Si matrix composites[J]. Ceramics International, 2025, 51(1): 991-1001.
- [2] LI S S, YUE X, LI Q Y, PENG H L, DONG B X, LIU T S, YANG H Y, FAN J, SHU S L, QIU F, JIANG Q C. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 944-983.
- [3] SINGH S K, IMMANUE R J, BABU S, PANIGRAHI S K, RAM G D J. Influence of multi-pass friction stir processing on wear behaviour and machinability of an Al-Si hypoeutectic A356 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 236: 252-262.
- [4] MOUSSA M E, EL-HADAD S, KHALIFA W. Influence of chemical modification by Y₂O₃ on eutectic Si characteristics and tensile properties of A356 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(7): 1365-1374.
- [5] TIMELLI G, CALIARI D, RAKHMONOV J. Influence of process parameters and Sr addition on the microstructure and casting defects of LPDC A356 alloy for engine blocks[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(6): 515-523.
- [6] SAMUEL A M, DOTY H W, VALTIERRA S, SAMUEL F H. Effect of grain refining and Sr-modification interactions on the impact toughness of Al-Si-Mg cast alloys [J]. Materials & Design, 2014, 56: 264-273.
- [7] WEI Z F, LEI Y S, YAN H, XU X H, HE J J. Microstructure and mechanical properties of A356 alloy with yttrium addition processed by hot extrusion[J]. Journal of Rare Earths, 2019, 37(6): 659-667.
- [8] BEROUAL S, BOUMERZOUZ Z, PAILLARD P, BORJON-PIRON Y. Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and Mg on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784: 1026-1035.
- [9] FANG L, HU A, SHEN W, HU H. Effect of Ni and Sr on the microstructure and tensile properties of the squeeze cast Al-Si-Cu alloy at elevated temperatures[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2024, 55(5): 665-673.
- [10] HU P, PAN L, CHEN X G. Elevated-temperature performances of Al-Si-Cu casting alloys for cylinder head applications[J]. Materials Characterization, 2024, 218: 114484.
- [11] ZHANG J, LI Q L, LIU G G, ZHANG X Y, WANG K L, HU P T. A new synergy to overcome the strength-ductility dilemma in Al-Si-Cu alloy by adding AlZrNiTi master alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 915: 147213.
- [12] ZHANG J Y, ZUO L J, FENG J, YE B, KONG X Y, JIANG H Y, DING W J. Effect of thermal exposure on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Ni-Mg alloy produced by different casting technologies[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(7): 1717-1730.
- [13] XIAO S H, XIAO Z B, GAO X B, ZHAO D H, DAI Z J. Synergistic effects of TiC_p on microstructure refinement and mechanical enhancement in Al-Si-Cu-Ni-Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1006: 176226.
- [14] LI J H, ZARIF M Z, ALBU M, MCKAY B J, HOFER F, SCHUMACHER P. Nucleation kinetics of entrained eutectic Si in Al-5Si alloys[J]. Acta Materialia, 2014, 72: 80-98.

- [15] XUE C P, WANG Y, WANG J S. Designing elastic modulus of Al_3X precipitates in Al alloys by identifying effective atomic bonds and stabilizing coherent structures[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 896: 162619.
- [16] LEE Y H, KAYANI S H, LEE J M, LEE S I, KIM S J, JANG J, CHO Y H. Microstructural refinement in a high elastic modulus Al-18Si-8Ni casting alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1008: 176580.
- [17] WANG S, XUE C P, YANG X H, TIAN G Y, SU H, ZHANG Y X, WANG J S. Solute clustering governed elastic properties in aluminum[J]. *Calphad*, 2022, 79: 102494.
- [18] MERIC C. An investigation on the elastic modulus and density of vacuum casted aluminum alloy 2024 containing lithium additions [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2000, 9: 266-271.
- [19] SONG X Y, SHU S L, ZHANG S, YANG H Y, QIU F, JIANG Q C. Microstructure, solidification defects and mechanical properties of high-modulus and high-strength $\text{SiC}/\text{AlSi10Mg}$ composites fabricated by selective laser melting[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(15): 26607-26623.
- [20] ZHU X Z, WANG S H, DONG X X, LIU X F, JI S X. Morphologically templated nucleation of primary Si on AlP in hypereutectic Al-Si alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 100: 36-45.
- [21] LIU X R, ZHANG Y D, BEAUSIR B, LIU F, ESLING C, YU F, ZHAO X, ZUO L. 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.
- [22] SUN J F, ZHANG L, WU G H, LIU W C, HU Z H, CHEN A T. Refinement of primary Si in Al-20%Si alloy by MRB through phosphorus additions [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 485-491.
- [23] ZENG L Y, JIN Y C, GAO J B, YI W, CHEN L, ZHANG L J. Achieving simultaneous improvement in strength and ductility in Al-Si-Mg-Ce alloy through synergistic morphology modification of eutectic(Si) and $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Ce}$ phases by Sr addition[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 975-981.
- [24] WANG S, FU M, LI X Z, WANG J H, SU X P. Microstructure and mechanical properties of Al-Si eutectic alloy modified with Al-3P master alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 105-109.

(责任编辑:李亚敏)