

引用格式: 张睿华, 杨军, 赵泳林, 等. 稀土元素对铝合金钎料性能影响研究进展[J]. 中国材料进展, 2026, 45(1): 49-57.  
ZHANG R H, YANG J, ZHAO Y L, *et al.* Research Progress on the Effect of Rare Earth Elements on the Properties of Aluminum Alloy Solders[J].  
Materials China, 2026, 45(1): 49-57.

## 稀土元素对铝合金钎料性能影响研究进展

张睿华<sup>1</sup>, 杨军<sup>1</sup>, 赵泳林<sup>2,3</sup>, 李阳<sup>1</sup>, 李函<sup>3,4</sup>, 韩冰源<sup>1,4</sup>

(1. 江苏理工学院汽车与交通工程学院, 江苏 常州 213001)

(2. 湖北汽车工业学院设计学院, 湖北 十堰 442002)

(3. 汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室, 湖北 十堰 442002)

(4. 湖北汽车工业学院汽车工程学院, 湖北 十堰 442002)

**摘要:** 近年来, 钎焊技术的广泛应用带动了钎料的快速发展。Al-Si 系钎料具有良好的流动性和润湿性, 但其熔化温度高、强度偏低、焊接裂纹敏感性高且具有液相腐蚀倾向, 这些缺点制约了 Al-Si 钎料的应用范围的扩展。为了细化 Al-Si 系列钎料的合金组织, 可通过添加稀土元素对其进行变质处理, 使焊缝在钎焊后获得优良的性能。基于此, 综述了 Ce, Y, Er 和 Yb 等多种稀土元素对铝合金钎料显微组织及焊后力学性能的影响, 并对其细化晶粒机理进行分析。结合国内外对铝合金钎料的研究进展, 对目前铝合金钎料在开发过程中组织细化的问题以及未来钎料的发展趋势进行了展望。

**关键词:** 稀土元素; 铝合金钎料; 显微组织; 力学性能; 细化晶粒机理

**中图分类号:** TG425 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2026)01-0049-09

## Research Progress on the Effect of Rare Earth Elements on the Properties of Aluminum Alloy Solders

ZHANG Ruihua<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, ZHAO Yonglin<sup>2,3</sup>, LI Yang<sup>1</sup>,  
LI Han<sup>3,4</sup>, HAN Bingyuan<sup>1,4</sup>

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

(2. School of Design, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

(3. Hubei Provincial Key Laboratory of Automotive Power Transmission and Electronic Control, Shiyan 442002, China)

(4. College of Automotive Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

**Abstract:** In recent years, the wide application of brazing technology has led to the rapid development of brazing solders. Al-Si brazing solders has some advantages such as good fluidity and wettability, at the same time, it also has some disadvantages, such as high melting temperature, low strength, high weld crack sensitivity and liquid phase corrosion tendency, which restrict expansion of the application range of Al-Si brazing solders. In order to refine the alloy structure of Al-Si brazing solders, it can be modified by adding rare earth elements, so that the weld obtained excellent performance after brazing. Based on this, this paper reviews the effects of Ce, Y, Er, Yb and other rare earth elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy solders after brazing, and analyzes the mechanism of grain refinement. Based on the research progress of aluminum alloy solder at home and abroad, the problem of microstructure refinement in the development process of aluminum alloy solder is pointed out, and the future development of solder is prospected.

**Key words:** rare earth elements; aluminum alloy solder; microstructure; mechanical property; grain refinement mechanism

收稿日期: 2024-04-22 修回日期: 2024-07-18

基金项目: 江苏理工学院研究生实践创新计划项目(XSJXC23\_04)

第一作者: 张睿华, 男, 1999年生, 硕士研究生

通讯作者: 韩冰源, 女, 1982年生, 教授, 硕士生导师,

Email: hanbingyuan@huat.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202404030

### 1 前言

铝合金具有比强度高、质量轻、流动性好、耐蚀性好和熔点低等特性, 广泛应用于航空航天、汽车、军事等行业<sup>[1,2]</sup>。钎焊焊接变形小、接头表面光洁, 正逐步

代替熔化焊成为铝合金连接和修复零部件的一种重要手段。钎焊原理是将钎料及母材同时加热至钎料熔化温度后,利用液态钎料的流动性和润湿性填充固态工件的缝隙,实现金属连接的一种焊接方法<sup>[3-5]</sup>。

Al-Si 系钎料以润湿性好、强度高的 Al-12.6Si 共晶成分为基础,但其熔点较高,易导致焊后母材溶蚀、组织晶粒粗大等问题,严重影响焊接接头的质量<sup>[6,7]</sup>。针对熔点较高的问题,可以通过向钎料中添加 Cu, Zn 元素来降低熔点,但过量 Cu 元素会与钎料中的 Al 生成 Al<sub>2</sub>Cu 金属间化合物,导致钎料的脆性增加、耐蚀性降低<sup>[8]</sup>; Zn 元素属于高蒸气压元素,在钎焊时容易挥发,且添加过量的 Zn 元素极易引起母材的溶蚀<sup>[9]</sup>,在接头中形成粗大的块状初晶硅,严重影响钎焊接头的力学性能。

为了平衡 Al-Si 钎料中加入合金元素带来的影响,研究人员利用稀土元素的净化变质作用来细化铝合金钎料组织,改善合金性能。由于稀土元素对不同合金元素起到的变质作用与性能增强效果不同,基于此,本文系统地综述了国内外有关稀土元素铝合金钎料组织细化和性能优化的研究进展,为相关领域的科研人员提供参考。

## 2 稀土元素在铝合金中的作用机制

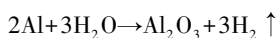
稀土元素的原子结构相对复杂,由于受内壳层电子屏蔽作用的影响,外层电子的排布表现出不规则性,能够与 Al 形成稳定的化合物,实现铝合金微观组织变质、净化溶体及组织强化等作用<sup>[10]</sup>。

### 2.1 变质作用

稀土元素通过晶粒细化、相变调控和晶界稳定化等方式影响铝合金的变质行为,从而改善铝合金微观组织和力学性能<sup>[11]</sup>。在固溶态或过饱和固溶态下,稀土元素可以与 Al 形成稳定的间隙固溶体或析出相,作为晶核或沉淀核诱导晶粒细化;通过调节铝合金的化学成分,稀土元素可以促进或抑制合金中各种相的形成和转变,改善合金微观组织和力学性能;此外,由于稀土的电负性较强,化学活性较高,含稀土固溶体在晶界处大量聚集,可填补铝相表面缺陷,形成表面活性膜,有效抑制柱状晶和二次枝晶的生长,提高晶界稳定性。

### 2.2 净化作用

稀土元素对铝合金的净化作用是指降低铝合金溶体中的含氢量。氢气主要来源于高温下铝合金溶体与水蒸气的反应:



稀土元素的加入可以改变氢在凝固界面附近的分布规律。由于稀土元素是表面活性物质,因此在冶炼过程中,熔点较高的稀土氢化物会借助表面张力从铝液中浮

于表面,降低铝合金的含氢量及气孔率<sup>[12]</sup>。

### 2.3 强化作用

稀土元素通过有限固溶强化、晶界强化和细化晶粒等方式对铝合金进行强化<sup>[13]</sup>。稀土元素在铝基体和晶界处形成固溶体和稳定化合物,并作为形核核心弥散分布于晶粒内或晶界中,使晶粒细化,增加铝合金的固溶度,阻碍位错的运动和晶界的滑移,提高铝合金的强度。

## 3 稀土元素对铝基钎料的影响

### 3.1 铈(Ce)对铝基钎料组织和性能的影响

Ce 的变质机理分为两个方面:一方面是在焊接过程中 Ce 吸附在共晶硅相表面,形成大量孪晶,使层片状的共晶硅相变为纤维状或短棒状(孪晶凹谷机制)。另一方面,Ce 与合金中其他元素形成稀土合金相,阻碍  $\alpha$ -Al 相的生长,使焊缝组织细化<sup>[14]</sup>。

钎料的润湿性、流动性、耐腐蚀性和焊后气孔率是影响焊缝成形及焊后接头质量的主要因素。其中,Ce 作为活性元素<sup>[15]</sup>,熔融状态下容易在钎料的界面处产生聚集,降低表面张力,从而改善钎料润湿性。马超力等<sup>[16]</sup>研究发现 0.5%(质量分数,下同)的稀土 Ce 可以最大程度改善钎料的润湿性;当 Ce 含量大于 0.5%时,熔融状态下 Ce 形成的氧化物会抑制钎料的润湿行为使钎料润湿性变差。胡桂云等<sup>[17]</sup>采用熔铸方法制备了 Al-Zn-Mg-Cu-Ce 钎料并对其剥落腐蚀<sup>[18]</sup>、电化学腐蚀<sup>[19]</sup>以及抗应力腐蚀<sup>[20]</sup>性能进行测定后发现,稀土 Ce 能使钎料表面氧化膜在腐蚀环境中表现出更高的电荷转移电阻,提高钎料耐腐蚀性能。张鹏等<sup>[21]</sup>制备了 Al-5Si-0.02Sr-xCe 钎料,并对焊缝气孔率测量后发现,0.05%的 Ce 可以净化溶体,降低焊丝中的含氢量及气孔率。

近年来,研究者发现向 Al-Si 合金中加入 Ce 可以细化晶粒,改善合金力学性能。刘春海等<sup>[22]</sup>向 Al-7Si 合金中加入不同含量的 Ce 观察其组织变化,发现稀土 Ce 含量为 0.1%时,初生  $\alpha$ -Al 晶粒尺寸最细小,较 Al-7Si 降低了 32.4%,纤维状的共晶 Si 分支发达且棱角光滑,钎焊后接头抗拉强度、屈服强度和伸长率显著提高,分别为 344 MPa、311 MPa 和 3.77%。Cengiz 等<sup>[23]</sup>将不同含量的单质 Ce 加入到 Al-12Si 合金中并对合金和存在相的化学成分进行了三维研究后发现,Ce 存在于共晶 Si 和富 Ce 金属间化合物相中,图 1 为稀土 Ce 添加前后共晶 Si 和富 Ce 金属间化合物形态,与 Al-12Si 合金相比,2% Ce 添加使共晶 Si 结构细化,形成精细网络结构,共晶层状组织显著减少,在基体相中出现含有 Al, Si, Ce 的新的针状组织,钎料合金的极限拉伸强度提高了 25%~30%。Li 等<sup>[24]</sup>向过共晶 Al-20Si 合金中加入不同含量的片状 Ce 后发现,随着

稀土 Ce 添加量增加, 初晶 Si 由粗大的多边形明显细化为棱角光滑的细小块状, 共晶 Si 由粗大的片状向细小纤维状转变, 当 Ce 含量增加至 1.0% 时, 钎焊后接头抗拉强度提高了 68.2% (153.9 MPa), 伸长率提高了 53.1% (0.75%)。付原科等<sup>[25]</sup>结合 Mg 可以激发 Ce 对铝基钎料的细化变质作用, 制备出了 Al-12Si-Mg-xCe 钎料, 观察组织后发现, 随着 Ce 含量的增加, 尖针状和尖片状的共晶 Si 逐渐向颗粒状和短棒状转变, 且整体分布均匀, 当 Ce 添加量达到 0.07% 时, 钎焊后接头抗拉强度和伸长率达到 183.2 MPa 和 5.936%。Zhang 等<sup>[26]</sup>在向 Al-Si 钎料中引入 Mg-20Ce 中间合金后发现, 钎焊界面中生成了棒状  $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$  稀土合金相, 抑制了共晶团簇和  $\alpha\text{-Al}$  的形核和生长, 从而细化了焊缝组织, 当 Ce 含量为 1.0% 时, 钎焊后接头抗拉强度提高了 43.18% (53.29 MPa)。Cai 等<sup>[27]</sup>同样证明了稀土合金相  $\text{Al}_4\text{Ce}$  对晶界生长具有阻碍作用。

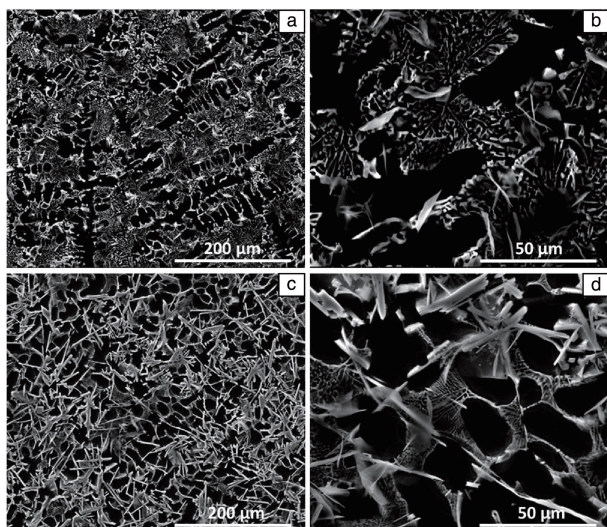


图 1 通过深度蚀刻显示的稀土 Ce 添加前后共晶 Si 和富 Ce 金属间化合物的低倍和高倍 SEM 照片<sup>[23]</sup>: (a, b) Al-12Si, (c, d) Al-12Si-2Ce

Fig. 1 The low and high magnification SEM images of eutectic Si and Ce-rich intermetallic compounds before and after the addition of rare earth Ce shown by deep etching<sup>[23]</sup>: (a, b) Al-12Si, (c, d) Al-12Si-2Ce

对比上述研究可知, 稀土 Ce 存在于共晶 Si 和富 Ce 金属间化合物中, 通过向铝基钎料中添加 Ce 元素可以细化共晶 Si 结构, 形成精细网状结构, 共晶层状组织显著减少, Ce 的最佳添加量随着钎料中 Si 含量的增加而增加。同时, Mg 元素可以激发 Ce 对铝合金钎料的细化变质作用, 通过控制钎料中 Ce 的添加量可以进一步提高钎焊接头的力学性能。

### 3.2 钇(Y)对铝基钎料组织和性能的影响

Y 主要从两个方面细化晶粒<sup>[28-30]</sup>: 一方面 Y 原子与 Al 原子的尺寸相差较大, 导致 Al 晶格发生畸变, 含 Y 化合物可在晶界处形成微小的稀土化合物; 另一方面, 由于 Y 的加入, 铝合金晶界处的第二相增多, 晶界迁移的阻力增大, 从而阻碍了晶粒的长大。此外, 在较低的冷却速率下, Y 原子可以促进共晶硅的异质形核, 使复合材料在凝固时表现出过冷倾向, 共晶硅形核中心增多; 在高冷却速率下, Y 通过促进生长过程中孪晶的形成而对共晶硅进行改性<sup>[31]</sup>。

稀土元素 Y 可以与水蒸气反应生成稀土氢氧化物, 降低气体及夹杂物含量, 同时提高合金的力学性能<sup>[32, 33]</sup>。余静喜等<sup>[34]</sup>研究表明, 稀土 Y 对 Al-10Si-Mg-12Cu 钎料的固液相线温度影响不明显, 但稀土 Y 会在液态钎料表面集聚, 使得钎料表面自由能减少, 降低表面张力, 增大铺展面积, 在 Y 含量为 0.5% 时, 钎料的铺展面积达到峰值, 为  $372 \text{ mm}^2$ 。龚留奎等<sup>[35]</sup>在研究不同 Y 含量的 Sn-58Bi 钎料时同样得出, 稀土 Y 对钎料合金的熔点及熔化区间影响较小, 在添加 0.4% Y 时, 合金的硬度较未添加时提升了 8.9%。

稀土 Y 可以促进钎料组织在凝固过程中的相变, 形成均匀细小的组织晶粒, 有效提高钎焊接头的强度。白明辉等<sup>[36]</sup>在 AS-3 钎料中加入不同含量的  $\text{Y}_2\text{O}_3$  稀土氧化物, 并采用炉中钎焊工艺制备了 3A21 铝合金钎焊接头。图 2 为不同 Y 含量的钎缝形貌, 发现稀土 Y 可以改变组织中  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相的形态, 优化其网状结构, 使钎缝由脆性断裂向韧性断裂转变, 同时, 稀土 Y 还对 Al-Si 共晶相起到变质作用, 进一步细化了组织, 使钎缝的力学性能提

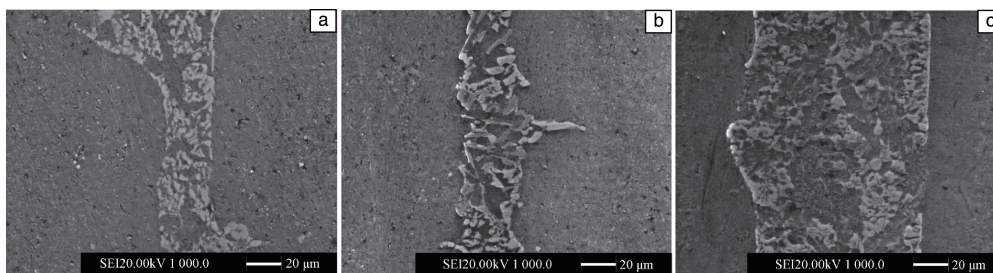


图 2 含不同质量分数 Y 稀土元素的钎缝的 SEM 照片<sup>[36]</sup>: (a) 0%, (b) 0.3%, (c) 1%

Fig. 2 SEM images of brazing seam containing Y rare earth element with different mass fractions<sup>[36]</sup>: (a) 0%, (b) 0.3%, (c) 1%

升。但是当 Y 含量为 1% 时, 合金反而发生了过变质, 钎缝的抗剪强度随着 Y 含量的提升呈现出先升高后降低的趋势 (图 3)。

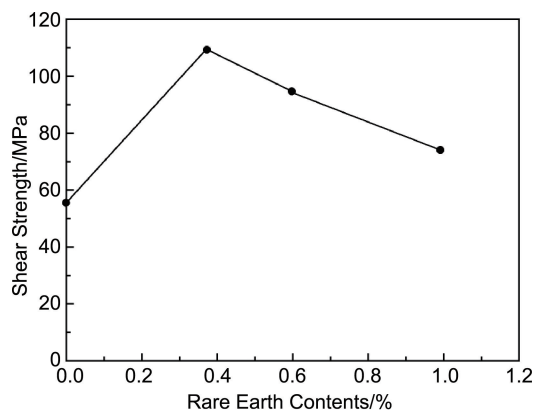


图 3 含不同质量分数 Y 稀土元素的钎缝的抗剪强度<sup>[36]</sup>

Fig. 3 Shear strength of brazing seam containing Y rare earth element with different mass fractions<sup>[36]</sup>

近年来, 研究者将研究重点转向多元 Al-Si 合金, 实现了固有  $\alpha$ -Al 枝晶、共晶 Si 和析出的第二相的晶粒细化和组织调控。Wei 等<sup>[37]</sup> 向 Al-7Si 合金中加入 Al-10Y 中间合金, 制备出 Al-7Si-xY 钎料, 并在观察其显微组织后得出, Y 含量为 0.2% 时, 组织中  $\alpha$ -Al 相细化, 长针状共晶 Si 相转变为条状, 长径比达到最小值, 比未变质前低 86.1%, 抗拉强度、硬度和伸长率为 328.2 MPa、110.4HV<sub>0.2</sub> 和 21.3%, 比未变质前分别提高了 42.01%、37.71% 和 481.91%。Li 等<sup>[38]</sup> 研究发现向 Al-7Si 合金中复合添加 Al-20Si-2.5Fe-2Mn 中间合金和稀土 Y 比单独添加中间合金或 Y 对针状共晶 Si 和粗大  $\alpha$ -Al 枝晶的细化效果更明显, 向 Al-7Si 合金中加入 7% Al-20Si-2.5Fe-2Mn 和 0.2% 的 Y 复合变质后, 钎料合金的抗拉强度较变质前提高了 33.3% (216 MPa), 同时, 钎料合金断裂形式转变为韧性断裂。随后, Li 等<sup>[39]</sup> 又将稀土 Y 以 Al-20Y 中间合金的方式加入到 Al-13Si-3Cu-2Ni-0.5Mg 钎料中进行组织观察及性能测试。研究表明, 当 Y 的含量为 0.8% 时,  $\alpha$ -Al 相的形貌由粗大的枝晶状细化为相对细小的胞状组织和均匀的等轴晶, 初生 Si 转变为细小的纤维状, 共晶 Si 的平均圆度降低了 52% (4.7  $\mu$ m), 纳米级含 Y 化合物吸附在 Si 相生长界面的前端, 抑制了其进一步的生长, 钎料的抗拉强度提高了 52.6% (264 MPa)。

在细化组织晶粒方面, Y 可以显著细化 Al-Si 钎料合金的晶粒大小, 形成均匀的分布, 并有效抑制其长大过程, 同时 Y 的加入使晶界处形成脆性相转化, 提高钎料的力学性能; 在元素添加方式方面, 与加入单质元素相比, 在铝合金钎料中加入中间合金, 中间合金具有更稳

定的变质效果<sup>[40]</sup>、更显著地改善合金性能的能力; 在元素复合方面, Y 元素与其他稀土元素的协同作用可以增加形核点的数量, 例如 Fe 元素可以作为异相核心, 在晶界处迅速成核, 有助于晶核形成, Fe 和 Mn 元素与 Y 的协同作用会进一步增强晶粒细化效果。但目前对于 Y 元素与其他元素掺杂对钎焊界面晶粒细化的影响研究较少。

### 3.3 镧 (La) 对铝基钎料组织和性能的影响

La 的变质机理主要有两个方面<sup>[41, 42]</sup>: 一是稀土元素对共晶硅的毒化作用和稀土元素引起的组分过冷; 二是 La 在 Al 中的溶解度极小, 导致 La 富集在固液界面前沿, 无法进入 Al 的晶格, 阻碍初生  $\alpha$ -Al 的生长, 达到细化晶粒的效果。

稀土 La 使合金的结晶温度范围缩小、放热反应剧烈、 $\alpha$ -Al 初生相细化, 从而使合金流动性增加。Li 等<sup>[43]</sup> 采用螺旋流动性试样研究了稀土 La 对 Al-Si-Cu 钎料流动性的影响, 研究发现, 在 La 添加量为 0.6% 时, 流动长度为 321 mm, 较未添加之前增加了 38.91%。Song 等<sup>[44]</sup> 在 Al-Si-Cu-La 基础上加入 Yb 元素组成混合稀土, 探究不同添加量的 (La+Yb) 复合稀土共同作用对 Al-Si-Cu 合金流动性的影响, 当复合稀土含量在 0.6% 时, 合金的流动长度取得最大值 565 mm, 较未添加前增加了 19%。

Song 等<sup>[45]</sup> 研究发现稀土 La 可以细化 Al-Si-Cu 钎料合金的显微组织, 当 La 的添加量为 0.6% 时, 钎料合金的变质效果最好,  $\alpha$ -Al 的晶粒由粗大的柱状晶转变为细小的枝晶、等轴晶和球状晶; 共晶硅由片状转变为细棒状, 提高了钎料的抗热裂能力。Song 等<sup>[46]</sup> 将 Al-10La 和 Al-10Yb 中间合金同时加入 Al-Si-Cu 合金中制备出 Al-12Si-3Cu-x(La+Yb) 钎料, 并成功钎焊了 ADC12 铝合金, 钎焊接头组织中  $\alpha$ -Al 晶粒由柱晶状变为细小的球形和颗粒状, 共晶 Si 由粗大的片状转为纤维状和片状, 钎料的抗拉强度从 280 提高到 313 MPa, 延伸率从 4% 提高至 4.5%, 较未添加前分别提高了 12% 和 12.5%。Chang 等<sup>[47]</sup> 制备出含 (La+Pr, 共 0.1%) 的 Al-8.4Si-20Cu-10Ge 低熔点钎料, 实现了 6061 铝合金与钛合金的真空钎焊。钎焊结果表明, 与不含稀土元素的钎料相比, 钎焊接头强度明显提高, 这是由于 La+Pr 的复合添加降低了固相线与液相线温度, 使钎料熔化区间减小, 促进了母材与钎料的冶金反应。Shuai 等<sup>[48]</sup> 采用 Al-10La 中间合金对 Al-10Si-3Cu 钎料进行变质。研究发现在 La 含量为 0.6% 时, La 可以促进组织中孪晶生成和组分过冷, 共晶 Si 相也由条状转变为短纤维状甚至粒状, 并得到显著细化, 钎料的抗弯强度和伸长率分别为 215.3 MPa 和 5.1%, 与未改性的钎料相比, 分别增加了 22.9% 和 37.8%。

综上所述，稀土元素 La 可以显著提高钎焊材料的力学性能和抗热裂敏感性，同时通过稀土元素的协同作用也可以进一步提高金属材料的综合性能，研究采用实验方法进行，但是对于材料的具体添加方式、添加量和添加时间只进行了初步探讨，并没有针对这些变量得出最佳组合和优化方法，因此会对实验结果产生干扰和偏差。

### 3.4 铒 (Er) 对铝基钎料组织和性能的影响

Er 可以细化晶粒是由于 Er 是一种表面活性剂，并且溶解度非常小<sup>[49]</sup>。Er 原子可以吸附在 Si 固液界面的生长台阶上，改变 Si 晶体的生长模式，导致 Si 晶体的各向同性生长，使硅晶体得到细化。并且 Er 可与熔体中合金元素生成特殊化合物，提供非均质形核的核心<sup>[50]</sup>。

熔融状态下的稀土 Er 在钎料界面处累积，使界面能降低，提高了钎料的润湿性。Shi 等<sup>[51]</sup>在 Al-7Si-20Cu 钎料合金中加入少量稀土 Er 并成功钎焊了 3003 铝合金，发现钎料的润湿性得到了显著改善，Al-20Cu-7Si-0.05Er 钎料的铺展面积为 18.6~225.2 mm<sup>2</sup>，较未添加 Er 前的 (27.2~183.3 mm<sup>2</sup>) 提高了 23%。

Li 等<sup>[52]</sup>创新性地引入 Er 和 Zr 对 Al-10Si-2Ni-6Cu 钎料进行改性，并在 590 °C 下成功钎焊了 Cu/Al 合金，结果表明，微量 Er 和 Zr 元素的复合添加能有效细化焊缝中的 Al<sub>2</sub>Cu 脆性相，提高接头力学性能。图 4 为 Cu/Al 钎焊接头的横截面微观照片，可以看出稀土 Er 添加前后 Al-10Si-2Ni-6Cu 接头中粗大 Al-Cu 金属间化合物的形状从长条状演变为短棒状，晶粒尺寸范围从 0.15~22.07 减小到 0.15~10.88 μm，层厚由 20 减小至 10 μm。

铝合金钎料的力学性能受显微结构的影响显著，一般在钎料中添加的 Er 元素的含量在 0.1%~0.5% 时焊接接头的力学性能上升的幅度最大，添加过量 Er 时钎焊接头的硬度和强度不再增加，但力学性能明显下降。Shi 等<sup>[53]</sup>制备出不同 Er 含量的 Al-20Cu-7Si-xEr 钎料，结果表明，稀土 Er 对钎料合金熔化温度无影响，当 Er 添加量为 0.1% 时，钎料中铝基体、铜、硅的分布均匀并呈现出细小的均匀分布相，随着 Er 含量的增加，组织中 α-Al 相尺寸减小，针状 Si 相转变为块状。Patel 等<sup>[54]</sup>在 Al-6Si-4Cu 钎料中加入 0%~0.9% 不同含量的稀土 Er 并成功钎焊了 319 铝合金，发现添加 Er 可以提高钎料合金的抗拉强度和伸长率。Er 显著降低了组织中初生 α-Al 晶粒尺寸，并使共晶硅由片状转变为过渡片层组织，图 5 为 Al-Si-Cu 合金在不同 Er 含量下的抗拉强度和伸长率<sup>[54]</sup>，可以看出 Er 的添加量在 0%~0.5% 时合金具有较高的抗拉强度和伸长率；在 0.5% 时得到极限抗拉强度 188 MPa，较 Al-Si-Cu 合金提高了 39.2%；进一步增加 Er 添加量会在组织中生成 Al-Si-Cu-Er 四元针状金属间化合物，导致

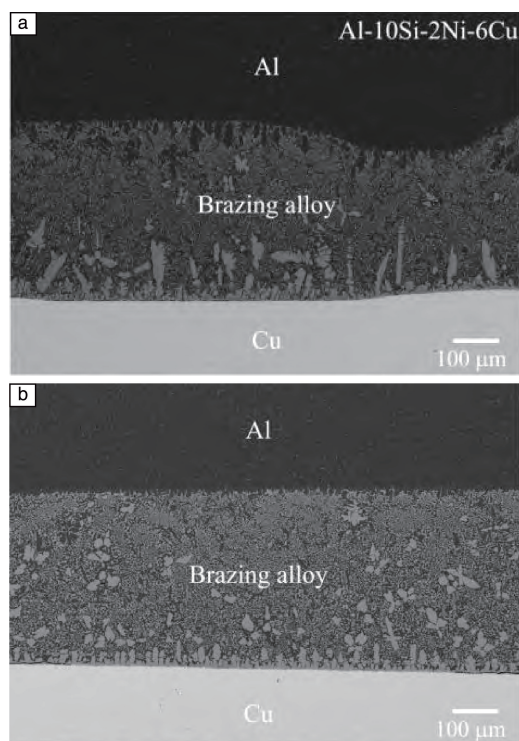


图 4 填充合金钎焊的 Cu/Al 钎焊接头的横截面 SEM 照片<sup>[52]</sup>：(a) Al-10Si-2Ni-6Cu，(b) Al-10Si-2Ni-6Cu-0.2Er-0.2Zr

Fig. 4 SEM images of cross section of Cu/Al joint brazed with filler alloy<sup>[52]</sup>: (a) Al-10Si-2Ni-6Cu, (b) Al-10Si-2Ni-6Cu-0.2Er-0.2Zr

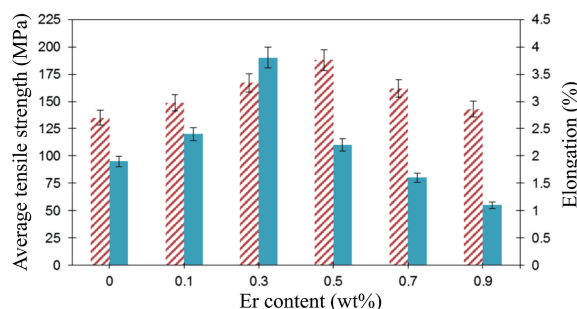


图 5 不同 Er 含量的 Al-Si-Cu 合金的抗拉强度和伸长率<sup>[54]</sup>

Fig. 5 Tensile strength and elongation of Al-Si-Cu alloys with different Er contents<sup>[54]</sup>

合金的抗拉强度和伸长率大幅降低。Li 等<sup>[55, 56]</sup>在钎料 Sn58Bi 中加入稀土 Er 后发现，Er 抑制了 Sn 元素的活性，降低了 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 金属间化合物的生长驱动力，减小了 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 金属间化合物层的厚度，使钎焊接头的剪切性能得到了改善。

上述研究证明，Er 元素可以改善不同钎料的微观组织结构，随添加量的增加，晶粒尺寸呈现先增大、后减小、再增大的变化趋势，不同的添加量在促进材料晶粒细化、均匀分布方面起到不同的作用，同时钎料合金的力学性能也随之改变。

### 3.5 镱 (Yb) 对铝基钎料组织和性能的影响

Yb 的变质机理可归结为孪晶面凹角棱<sup>[57]</sup>机制, 研究表明<sup>[58]</sup>, 吸附元素的原子半径与 Si 的半径之间的理想比率接近 1.646, 因此, Yb 原子可以吸附在生长前沿, 有效毒化生长台阶, 致使孪晶密度增高, 共晶 Si 在凝固过程中各向同性生长, 从而使得共晶 Si 相得以细化。

近年来, 为提升铝合金的耐蚀性并延长其使用年限, 普遍采用表面合金涂层技术, 但这主要改变了材料表面性质, 难以从根本上实现长期防腐蚀。针对这一局限, 研究者转向通过材料改性探索更持久的防腐途径。基于此, Zou<sup>[59]</sup>采用浸泡实验和电化学实验测试了在不同稀土 Yb 含量下 Al-Si 合金钎焊接头的耐蚀性, 结果表明, 稀土 Yb 能有效提高钎焊接头的耐蚀性, 当稀土 Yb 含量为 0.9% 时, 钎焊接头的阻抗值达到最大, 耐蚀性最好, 腐蚀电流密度为  $1.27 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , 比基体降低了 84.7%。Rao 等<sup>[60]</sup>在铝合金钎料中加入稀土 Yb 并且经热处理组合工艺处理后, 合金的吸氢速率和失重率降低, 比未处理之前分别降低了 54.6% 和 52.2%, 腐蚀电流密度降低至  $5.89 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , 较未处理前降低了 81.1%, 同时, 在 0.1 mol/L 盐酸溶液中浸泡 12 h 后, 合金并未发生剧烈的局部腐蚀。Zhang 等<sup>[61]</sup>同样证明了添加 0.9% 的稀土 Yb 和固溶处理会显著提升 Al-11Si-3Cu 合金的耐蚀性。

稀土 Yb 对 Al-Si 共晶合金具有比 La 更强烈的变质作用。Xiong 等<sup>[62]</sup>在 Al-Si 合金中加入微量 Yb 对合金组织进行细化处理, 结果发现, Yb 元素含量为 0.8% 时可以充分细化粗大枝晶状  $\alpha$ -Al 相, 使二次枝晶臂间距减小。共晶硅相形貌由针状转变为短棒状甚至粒状, 钎焊接头抗拉强度和延伸率比未变质前的分别提高了 55.4% 和 121.1%, 断口由脆性断裂转为韧性断裂。He 等<sup>[63]</sup>通过热挤压方式向 ADC12 合金中加入稀土 Yb 后观察其组织发现, 在添加 0.9% Yb 和热挤压条件下, 合金中的 Si 相、富铁相和稀土相都得到进一步细化。Qiu 等<sup>[64]</sup>通过热变形和热处理相结合的方法, 在 Al-Si-Mg-Cu-Cr 钎料合金中加入 (Ce+Yb) 复合稀土, 研究得出热变形产生的剪切应力导致粗大的共晶 Si 以垂直于压缩方向的流线型分布破裂和粒化, 提高了钎料合金的强度和塑性。

Dong 等<sup>[65]</sup>研究了 Sr 和 Yb 单独和复合添加对 Al-7Si 钎料合金的凝固行为和显微组织的影响, 结果表明, Sr 与 Yb 共同作用时提高了共晶 Si 的改性效果。Yb 改性和 (Sr+Yb) 改性钎料合金的共晶凝固形核温度、最低温度和生长温度都低于未改性合金。图 6 为 Al-7Si 中共晶 Si 的三维形态图, 图中 Yb 改性合金的共晶 Si 形貌由粗大的片状结构明显细化为细小的纤维状结构; Sr+Yb 改性合金中, 共晶 Si 的三维显微组织显示出更细小的纤维状

结构, 这是由于  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Yb}$  的形成焓低于 Al-Sr 相,  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Yb}$  相优先形成, 抑制了  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$  金属间化合物的析出<sup>[66]</sup>, 因此使有效 Sr 得以更均匀地分布于合金中, 细化了共晶 Si 组织, 提升了改性效果。

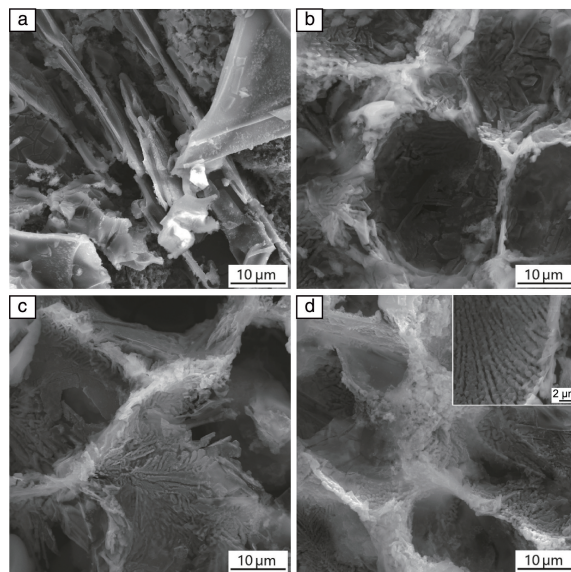


图 6 Al-7Si 中共晶 Si 的高倍放大三维形态<sup>[65]</sup>: (a) 未改性, (b) Yb 改性, (c) Sr 改性, (d) Sr+Yb 改性

Fig. 6 High magnification three-dimensional morphology of eutectic Si in Al-7Si alloys<sup>[65]</sup>: (a) unmodified, (b) Yb modified, (c) Sr modified, (d) Sr+Yb modified

综上所述, 稀土元素 Yb 对铝合金钎料的影响具有综合性。可通过调整稀土元素的添加量以及合金成分来优化钎料合金的耐腐蚀性能、显微组织和力学性能, 从而提高钎料的使用寿命和使用范围。

### 3.6 其他元素对铝基钎料组织和性能的影响

稀土元素作为“工业的维生素”<sup>[67]</sup>, 除了上述几种稀土元素外, Eu, Nd, Sm 等元素对铝合金钎料同样具有良好的变质效果。变质作用主要基于 2 种理论: 成核剂理论和溶质理论, 成核剂理论着重于研究异相成核过程中发生的形核促进机制; 溶质理论主要研究溶质元素如何在成核中限制晶粒的生长<sup>[68, 69]</sup>。

Mao 等<sup>[70]</sup>在 Al-40Zn-6Si 钎料合金中加入不同含量稀土 Eu 观察其组织变化, 发现随着 Eu 含量的增多, 合金中枝状初晶硅逐渐消失, 多边形初晶硅颗粒的尖角变钝, 球状的初生 Si 颗粒开始出现。Eu 的添加量为 0.5% 时, Al-40Zn-6Si 钎料合金获得最佳的拉伸性能, 最终拉伸强度提高了 31%, 抗弯刚度提高了 358%。钎料合金中加入 Nd 的范围一般为 0% ~ 0.8%, 郭永春等<sup>[71]</sup>在 Al-13Si-4Cu-2Ni-Mg 合金中加入微量 Nd 并研究其组织变化, 初生 Si 尺寸以 Nd 的加入量 0.3% 为分界点, 呈现出先减小

后增大的趋势,在0.3%处初生Si的晶粒直径达到最小的18.69  $\mu\text{m}$ ,较未添加Nd时的32.35  $\mu\text{m}$ 减小了42.23%。Qiu等<sup>[72]</sup>在改性试验中发现,Sm可以分解初生 $\alpha\text{-Al}$ 相,使枝晶数量增加,同时对初晶Si和共晶Si进行改性,当Sm添加量为0.6%时,Al-12Si合金中的硅达到最佳细化效果,并形成充分改性、细小纤维状的共晶组织,拉伸性能在Sm的作用下得到了明显增强,抗拉强度为218 MPa,较未改性前提高了24.7%。

## 4 结 语

稀土元素在铝基钎料溶体净化、相变调控及晶界强化等方面的效果显著。通过与溶体中氢气反应生成稀土氢化物降低铝合金的含氢量及气孔率;与铝反应生成析出相诱导晶粒细化并在晶界处形成稳定化合物阻碍位错运动及晶界滑移,使钎缝获得优良的力学性能。但稀土元素种类繁多,目前稀土元素对铝合金的作用机理存在争议,限制了稀土元素在铝合金钎料中的使用。基于此,未来铝合金钎料的研究有望从下述几个方面获得突破。

(1)无论是二元Al-Si、Al-Cu钎料,还是三元的Al-Si-Cu、Al-Si-Mg等钎料,甚至是四元钎料,都可以合理使用2种及2种以上稀土元素或Na、Sr和Sb等合金元素对钎料进行复合变质,研究铝合金钎料的变质机理以及对钎料及钎焊接头组织和力学性能带来的影响。

(2)稀土元素的添加方式(中间合金或单质等)和添加量对钎料的性能有着显著的影响,在未来的研究中,可通过优化稀土元素的添加方式和添加量,来提高钎料的性能和实现对钎焊接头微观组织结构形态更加精准的控制。

(3)在严苛环境(如高温、腐蚀)或极限载荷(如抗拉、抗扭)条件下对钎焊焊缝进行性能检测,可以更加准确地捕捉到焊缝的服役工况。

(4)在稀土元素细化铝合金钎料组织的前提下,更多的研究可以向异种合金钎焊进行转变,例如Al/Cu、Al/Mg合金等,扩大钎料的使用范围,来探索稀土元素对异种合金焊接接头组织的影响。

(5)深入研究稀土元素与其他元素之间的相互作用,以探究稀土元素对铝合金钎料的变质机理。稀土与其他元素之间的相互作用对钎料的合金化程度和钎料的组织结构具有重要影响。

## 参考文献 References

- [1] EVANGELIA G, MICHAELA G S G K. *Engineering Structures*[J], 2021, 227(11): 1372-1388.
- [2] YOU X H, XING Z Q, JIANG S W, *et al.* *Developments in the Built Environment*[J], 2024, 17(10): 319-334.
- [3] BARTANEN J. *Automotive Body Repair Network*[J], 2017, 56(9): 1-13.
- [4] LIU Y Q, CHENG Z, LIU S H, *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 26(8): 8192-8196.
- [5] CHEEPU M, SRINIVAS B, ABHISHEK N, *et al.* *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*[J], 2018, 330(1): 52-63.
- [6] 左衡, 李先芬, 华鹏, 等. *有色金属加工*[J], 2016, 45(4): 12-17.  
ZUO H, LI X F, HUA P, *et al.* *Nonferrous Metals Processing*[J], 2016, 45(4): 12-17.
- [7] 周航泽, 龙飞, 徐瑞, 等. *稀有金属材料与工程*[J], 2025, 54(2): 453-462.  
ZHOU H Z, LONG F, XU R, *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2025, 54(2): 453-462.
- [8] PENG C, ZHU D, LI K, *et al.* *Applied Sciences*[J], 2021, 11(9): 4296-4310.
- [9] OZAKI H, KUTSUNA M. *Welding International*[J], 2009, 23(5): 345-352.
- [10] 甘培原, 韦德仕, 韦世强, 等. *稀有金属与硬质合金*[J], 2023, 51(5): 50-56.  
GAN P Y, WEI D S, WEI S Q, *et al.* *Rare Metals and Cemented Carbides*[J], 2023, 51(5): 50-56.
- [11] 冯艳飞, 孙巍, 杨路, 等. *热处理技术与装备*[J], 2020, 41(2): 68-71.  
FENG Y F, SUN W, YANG L, *et al.* *Heat Treatment Technology and Equipment*[J], 2020, 41(2): 68-71.
- [12] 王大伟, 傅宇东, 李婷, 等. *轻合金加工技术*[J], 2020, 48(12): 19-24.  
WANG D W, FU Y D, LI T, *et al.* *Light Alloy Fabrication Technology*[J], 2020, 48(12): 19-24.
- [13] 杨治刚, 李凯丽, 绳天庆, 等. *中国稀土学报*[J], 2024, 42(3): 451-467.  
YANG Z G, LI K L, SHENG T Q, *et al.* *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*[J], 2024, 42(3): 451-467.
- [14] 余聪, 陈乐平, 周全. *特种铸造及有色合金*[J], 2021, 41(2): 241-246.  
YU C, CHEN L P, ZHOU Q. *Special Casting & Nonferrous Alloys*[J], 2021, 41(2): 241-246.
- [15] YE K F, CAI X L, SUN B, *et al.* *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*[J], 2023, 8(4): 634-642.
- [16] 马超力, 薛松柏, 王博, 等. *稀有金属材料与工程*[J], 2019, 48(1): 91-96.  
MA C L, XUE S B, WANG B, *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(1): 91-96.
- [17] 胡桂云, 陈送义, 姜慧丽, 等. *中国有色金属学报*[J], 2016, 26(7): 1372-1382.  
HU G Y, CHEN S Y, JIANG H L, *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*[J], 2016, 26(7): 1372-1382.
- [18] ZHANG Y, CHEN Y, ZHANG Y, *et al.* *Chinese Journal of Aeronau-*

- tics[J], 2022, 35(1): 277-289.
- [19] 孙擎擎, 董朋轩, 孙睿吉, 等. 中国有色金属学报[J], 2015, 25(4): 866-874.  
SUN Q Q, DONG P X, SUN R J, *et al.* The Chinese Journal of Non-ferrous Metals[J], 2015, 25(4): 866-874.
- [20] YU Y Y, SONG T J, LU Z W. Materials Science Forum[J], 2021, 61(81): 207-212.
- [21] 张鹏, 薛松柏, 费文潘, 等. 材料导报[J], 2020, 34(2): 2100-2104.  
ZHANG P, XUE S B, FEI W P, *et al.* Materials Reports[J], 2020, 34(2): 2100-2104.
- [22] 刘春海, 李天, 吴大勇, 等. 铸造[J], 2019, 68(2): 152-157.  
LIU C H, LI T, WU D Y, *et al.* China Foundry[J], 2019, 68(2): 152-157.
- [23] CENGIZ S, ABOULFADL H, THUVANDER M. Materials Today Communications[J], 2023, 34(10): 5518-5529.
- [24] LI Q L, XIA T D, LAN Y F, *et al.* Journal of Alloys & Compounds[J], 2013, 562(1): 25-32.
- [25] 付原科, 杜义涵, 段红阳, 等. 哈尔滨理工大学学报[J], 2021, 26(4): 14-19.  
FU Y K, DU Y H, DUAN H Y, *et al.* Journal of Harbin University of Science and Technology[J], 2021, 26(4): 14-19.
- [26] ZHANG Z, JIANG W M, GUAN F, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2022, 854(27): 143830-143845.
- [27] CAI H S, WANG Z Z, LIU L, *et al.* International Journal of Metalcasting[J], 2023, 152(1): 1-11.
- [28] GM A, SL B, ZHEN W B, *et al.* Materials Letters[J], 2020, 271(12): 7795-7799.
- [29] JIN Y, SONG Y, LIU Y, *et al.* Journal of Physics: Conference Series[J], 2021, 2101(1): 673-678.
- [30] 李斌强. 稀土钇变质 Al-Si 合金微观组织演变及其机制研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.  
LI B Q. The Investigation of Microstructure Evolution and Mechanism of Al-Si Alloys Modified by Rare Earth Yttrium [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [31] MAO G L, YAN H, ZHU C C, *et al.* Journal of Alloys & Compounds[J], 2019, 806(1): 909-916.
- [32] KOTENKOV P V, GILEV I O, POPOVA E A, *et al.* Modification of Al-Si Alloys with Small Titanium and Yttrium Additions [C]//AIP Conference Proceedings. Melville: AIP Publishing, 2022.
- [33] LI Q L, ZHANG Y, ZHANG X Y, *et al.* International Journal of Metalcasting[J], 2021, 16(4): 1-13.
- [34] 余静喜, 伍玉娇, 龙琼, 等. 上海金属[J], 2018, 40(5): 40-45.  
YU J X, WU Y J, LONG Q, *et al.* Shanghai Metals[J], 2018, 40(5): 40-45.
- [35] 龚留奎, 廖金发, 袁继慧, 等. 航空材料学报[J], 2018, 38(4): 101-108.  
QUAN L K, LIAO J F, YUAN J H, *et al.* Journal of Aeronautical Materials[J], 2018, 38(4): 101-108.
- [36] 白明辉, 韩海舰, 朱艳. 焊接技术[J], 2020, 49(8): 70-75.  
BAI M H, HAN H J, ZHU Y. Welding Technology[J], 2020, 49(8): 70-75.
- [37] WEI Z, LEI Y, YAN H, *et al.* Journal of Rare Earths[J], 2019, 37(6): 659-667.
- [38] LI Q, ZHU Y, ZHAO S, *et al.* Intermetallics[J], 2020, 120(10): 6768-6777.
- [39] LI Q, ZHAO S, LI B, *et al.* Materials Research Express[J], 2019, 6(10): 106525-106534.
- [40] 马涛, 陈邵龙, 赵卫涛, 等. 冶金丛刊[J], 2014(1): 17-22.  
MA T, CHEN S L, ZHAO W T, *et al.* Metallurgical Collections[J], 2014(1): 17-22.
- [41] LI Q, LIU F, HOU B, *et al.* Effect of Welding Temperature on Microstructure and Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlSiMgLa/1A95 Aluminum Alloy Direct Brazing Joint [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2021.
- [42] LIU S, ZHANG D, CHU B. Journal of Materials Science: Materials in Electronics[J], 2018, 29(20): 17137-17143.
- [43] LI Z H, YAN H, HU Z, *et al.* Rare Metals[J], 2021, 40(5): 1-7.
- [44] SONG X C, YAN H, WU Q J, *et al.* International Journal of Cast Metals Research[J], 2019, 32(2): 59-66.
- [45] SONG X, YAN H, CHEN F. Journal of Wuhan University of Technology[J], 2018, 33(1): 193-197.
- [46] SONG X C, YAN H. International Journal of Cast Metals Research[J], 2020, 33(2): 80-88.
- [47] CHANG S Y, TSAO L C, LEI Y H, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2012, 212(1): 8-14.
- [48] SHUAI L, ZOU X, RAO Y, *et al.* Materials[J], 2022, 15(20): 7283-7296.
- [49] LI Q, XIA T, LAN Y, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2013, 588(1): 97-102.
- [50] GUO Y, WEI W, HUANG H, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2023, 22(1): 1625-1637.
- [51] SHI Y, YU Y, XIA Z, *et al.* Frontiers of Materials Science in China[J], 2008, 2(4): 351-356.
- [52] LI H, FENG Y, SHEN W, *et al.* Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J], 2022, 32(11): 3623-3634.
- [53] SHI Y, YU Y, LI Y, *et al.* Journal of Materials Engineering and Performance[J], 2009, 18(3): 278-281.
- [54] PATEL D N, SUTARIA M P. International Journal of Metalcasting[J], 2022, 16(4): 1-11.
- [55] LI Q, XIONG M, LIU F, *et al.* Effect of Er Content on the Interfacial Microstructure, Shear Properties and Creep Properties of Sn58Bi Joints [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol: IOP Publishing, 2021.
- [56] LI Q, WU H, XIONG M, *et al.* Effect of Er on Microstructure and Mechanical Properties of Sn58Bi Based Lead-Free Solder [C]//2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA). Berlin: IEEE, 2020.

- [57] FANG L, ZHANG Z, FANG H C, *et al.* *Materials Characterization* [J], 2019, 15(2): 130-133.
- [58] LI Q, ZHU Y, LI J, *et al.* *Chemicals & Chemistry* [J], 2020, 152(1): 130-133.
- [59] ZOU B. *Intermetallics* [J], 2019, 110(10): 6487-6499.
- [60] RAO Y, YAN H, HU Z, *et al.* *International Journal of Metalcasting* [J], 2022, 16(4): 2210-2220.
- [61] ZHANG S, HE J, LU X, *et al.* *International Journal of Metalcasting* [J], 2022, 17(1): 1845-1858.
- [62] XIONG J, YAN H, ZHONG S, *et al.* *Metals-Open Access Metallurgy Journal* [J], 2019, 9(1): 108-120.
- [63] HE J J, YAN H, ZOU Y C, *et al.* *Journal of Central South University* [J], 2020, 27(6): 1654-1665.
- [64] QIU M, DU X, ZHANG Z, *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance* [J], 2022, 32(8): 3577-3589.
- [65] DONG Z, HU Z, YAN H, *et al.* *Advances in Materials Science and Engineering* [J], 2019, 20(19): 1-10.
- [66] GAN J, HUANG Y, CHENG W E N, *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2020, 30(11): 2879-2890.
- [67] MAO F, QIAO Y, ZHANG P, *et al.* *International Journal of Metalcasting* [J], 2022, 16(2): 634-645.
- [68] JIANG B, JIANG B, YANG W T, *et al.* *Materials Letters* [J], 2024, 361(13): 6071-6075.
- [69] SHUAI L, ZOU X, RAO Y, *et al.* *Materials* [J], 2022, 15(20): 7283-7296.
- [70] MAO F, WEI S, CHEN C, *et al.* *Materials & Design* [J], 2020, 186(10): 8268-8281.
- [71] 郭永春, 郭松松, 李建平. *稀有金属* [J], 2017, 41(10): 1069-1076.
- GUO Y C, GUO S S, LI J P. *Chinese Journal of Rare Metals* [J], 2017, 41(10): 1069-1076.
- [72] QIU H, YAN H, HU Z. *Journal of Materials Research* [J], 2014, 29(11): 1270-1277.