



## 剪切力对半固态 Sn-Bi 合金的组织演变与塑性的影响

郑辉庭, 胡永俊, 肖小亭, 杨宏欢, 李人杰, 李昔强, 成晓玲, 李 风, 孙晓燕

(广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006)

**摘 要:** 采用机械搅拌半固态铸造技术制备 Sn-62Bi 合金, 通过 XRD、EDS 等测试方法探索了不同固相率下剪切力和作用时间对半固态 Sn-Bi 合金组织和塑性的影响。结果表明: 在半固态温度 145 °C、搅拌速度为 500 r/min 和搅拌时间为 15 min 的工艺条件下, 制备出分布均匀、尺寸约 30 μm 块状铋初生相的半固态 Sn-62Bi 合金, 拉伸试验下的伸长率为 39.9%, 与在 180 °C 下的合金金属熔液直接水冷凝固而成的试样相比, 其伸长率提高了 283.3%。当搅拌温度为 150 °C 时, 随着搅拌时间的延长, 块状初生相 Bi 相相互摩擦和碰撞破碎, 初生相的尺寸减少, 分布较均匀, 所制备的半固态 Sn-62Bi 合金的伸长率得到改善。

**关键词:** 半固态锡铋合金; 机械搅拌; 组织演变; 塑性

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

## Effect of shear force on microstructure evolution and plasticity of semi-solid Sn-Bi alloy

ZHENG Hui-ting, HU Yong-jun, XIAO Xiao-ting, YANG Hon-huan, LI Ren-jie, LI Xi-qiang,  
CHENG Xiao-ling, LI Feng, SUN Xiao-yan

(School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The hypereutectic Sn-62Bi alloy was obtained by semi-solid mechanical stirring casting technology. The influences of shear force and stirring time on the microstructure and plasticity of semi-solid alloy under different solid phase ratios were investigated. The results show that the semi-solid Sn-62Bi alloy with uniform distribution and fine quadrate primary Bi phase is obtained at agitating rate of 500 r/min, the temperature of 145 °C and the stirring time of 15 min. The size of quadrate primary Bi phase is about 30 μm. The elongation of semi-solid Sn-Bi alloy prepared is 39.9%, which is improved by 283.3%, compared to that of Sn-62Bi alloy prepared from the molten alloy at 180 °C and solidified in water. When the agitating temperature is 150 °C, the friction and collision of quadrate primary Bi phase particles increase with increasing the stirring time, the probability of the friction and collision between quadrate primary Bi phase particle increases with increasing the stirring time, which leads to that the particles sizes become smaller and the particles distributions are uniform, and the elongation is improved.

**Key words:** semi-solid Sn-Bi alloy; mechanical stirring; microstructure evolution; plasticity

Sn-Bi 合金广泛应用于低温焊接材料和温度敏感元件热熔断器等无铅元器件。传统铸造加工法生产的 Sn-Bi 合金由于塑性差使其难以达到热熔断体的塑性

要求。为此, 国内外学者开展了相关的研究来改善 Sn-Bi 合金的性能以满足产业需求。陆凤姣等<sup>[1]</sup>研究发现添加硼酸铝晶须可以细化 Sn-58Bi 钎料组织, 抑制

粗大富 Sn 相的生成; 多次重熔过程中, 硼酸铝晶须增强复合钎料中生成空心多边形、空心长条形和六边形空心棱柱的  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  金属间化合物, 分布在晶界抑制晶界迁移晶粒长大。董野峰<sup>[2]</sup>研究了 Bi 的添加对 Sn-5Sb 合金凝固组织影响时, 发现随着 Bi 含量的增加, Bi 的细化作用一定增强。ZU 等<sup>[3]</sup>研究发现, Sn-70Bi 合金熔体结构的转变可以提高 Sn-70Bi 合金熔体的凝固过冷度和形核率, 初生相和共晶组织得到明显细化, 但该工艺需要将合金加热到远高于熔点的温度(650 °C), 能耗较大。陈海燕等<sup>[4]</sup>研究了冷却速度对 Sn-Bi-X 合金微观组织的影响。当前对于 Sn-Bi 合金的研究主要集中在焊料方面, 探索添加化合物或合金元素对 Sn-Bi 合金的组织、焊接和润湿性能的影响, 但对于合金塑性的影响的研究则鲜见报道。同时, 添加化合物或合金元素, 如 In 和 Sb, 会改变 Sn-Bi 合金的熔点等热性能, 难以满足作为热熔断体合金在特定温度下熔断的需求, In 等元素价格昂贵, 增加生产成本。上述研究成果是否实现合金的成分均匀性、成形后其塑性和熔断等性能否满足使用要求等方面尚未展开相关的研究。因此, 探索一种不需要加入化合物或合金元素、成本低、工艺简单可行和能显著提高 Sn-Bi 合金塑性的制备方法, 使其能满足热熔断器合金的性能要求是亟待解决的问题。

半固态成形技术以其高效、节能、近净成形生产以及成形件性能高等诸多优点, 已成为 21 世纪最具发展前景的金属成形工艺之一。在国内外研究学者的努力下, 铝合金、镁合金有色金属和黑色金属及其复合材料的半固态加工技术和成形过程的计算机模拟等基础理论研究方面开展卓有成效的工作<sup>[5-9]</sup>。常用的半固态成形工艺包括机械搅拌、超声波搅拌、电磁搅拌等<sup>[10-13]</sup>。机械搅拌法由于简单易行、经济高效的特点, 广泛应用于半固态加工技术。康永林等<sup>[14]</sup>采用机械搅拌的方法研究了强制对流搅拌对半固态铝合金组织演变的影响。乐启焱等<sup>[15]</sup>研究了 ZK60-2Ca 镁合金半固态搅拌重熔对组织的影响。

本文作者课题组的初步研究结果表明, 采用半固态铸造法制备的 Sn-Bi 合金丝材的塑性可得到明显改善, 但研究尚不系统完善<sup>[16]</sup>。基于前期的研究基础, 本文作者采用机械搅拌的半固态成形方法来改善 Sn-Bi 合金的组织及力学性能, 设计开发了控制精度高、具有真空吸铸功能的半固态合金制备装置, 以 Sn-62Bi 为研究对象, 探索不同温度下机械搅拌剪切力及作用时间对半固态 Sn-Bi 合金组织和塑性的影响, 以期制备出高性能 Sn-Bi 合金提供理论与工艺依据, 促进半固态 Sn-Bi 合金在无铅电子元器件中的应用。

## 1 实验

### 1.1 实验设备

试验设备如图 1 所示, 由加热熔炼装置、机械搅拌装置和真空吸铸系统等组成。熔炼部分由移相触发温控箱和陶瓷加热器组成, 配有温度探测热电偶。移相触发温控箱 518B 采用微电脑精确比例-积分-微分 (PID) 控制技术, 控温精度为  $\pm 0.2$  °C。机械搅拌部分采用伺服电机, 配以微处理器控制转速, 调速平稳, 速度控制精度达到 1 r/min。采用真空度为 80 kPa 的吸铸系统取样获得半固态合金试样。

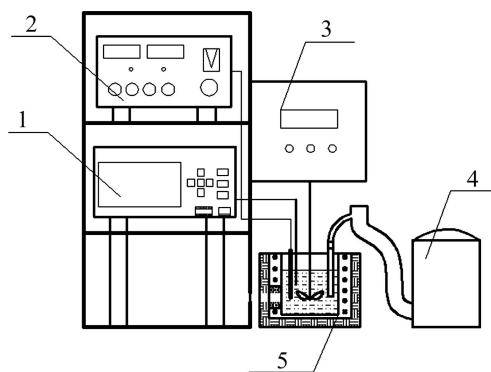


图 1 自行设计的半固态浆料制备装置

Fig. 1 Schematic diagram of self-designed semi-solid slurry preparation device: 1—Temperature logging devices; 2—Temperature control equipment; 3—Mechanical stirring equipment; 4—Vacuum casting equipment; 5—Heating furnace

### 1.2 实验材料及方法

试验所用的主要材料为锡(99.9%, 质量分数)和铋(99.9%, 质量分数), 合金成分配比是 Sn-62Bi(质量分数, %), 为过共晶合金。从 Sn-Bi 二元相图<sup>[17]</sup>中可看出, 由于 Sn-62Bi 为过共晶合金, 在凝固结晶时先析出相是块状 Bi。Sn-62Bi 合金的液相线温度为 155 °C, 共晶线温度为 139 °C。在固相线与液相线的温度区间内, 整个熔体处于半固态状态, 在半固态区的温度范围内选取一个近液相线温度 150 °C 和一个近共晶线温度 140 °C 以及处在半固态温度区间中部的 145 °C 进行不同时间的机械搅拌。

试验时, 首先开启加热熔炼装置将已经配好的锡铋合金置于坩埚加热到 300 °C 熔化, 待金属块完全熔化后降温到设定温度, 对半固态合金浆料进行搅拌, 半固态铸造工艺参数如表 1 所列。在加热熔炼和搅拌过程中, 加入以  $\text{B}_2\text{O}_3$  为主要成分的抗氧化剂以防止氧

化。搅拌结束后,使用真空吸铸系统将所制备的半固态合金浆料从坩埚中取出水冷,获得直径为6 mm的棒材。为探索机械搅拌对锡铋合金组织的影响,传统铸造生产试样的工艺:待锡铋合金熔液降温到180 °C再机械搅拌5 min,搅拌结束后静置5 min,再采用真空吸铸造系统将熔液从坩埚中吸出,水冷凝固。切取棒材一部分制备成金相试样,抛光并在XJL-03型金相显微镜上观察金相组织,在Genesis XM系列X射线能谱仪上进行能谱分析。另外,一部分棒材制备成标准拉伸试样,在WDW微控电子万能试验机上进行室温下单向静拉伸试验。

表1 半固态铸造工艺参数

Table 1 Process parameters of semi-solid casting process

Sample No.	Stirring temperature/°C	Stirring time/min	Stirring rate/(r·min <sup>-1</sup> )
1	180	0	0
2	140	15	500
3	145	15	500
4	150	15	500
5	150	25	500

## 2 结果与分析

所得到的试样的XRD谱如图2所示。查阅PCPDF卡片对所得到的波峰进行标记,由图2可知,所得到的5条曲线中的衍射波峰 $2\theta$ 与标准比对卡片上Sn和Bi的衍射峰一致。在实验得到的衍射峰中并没有SnO或者Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的衍射峰出现,由此可知,在制备半固态浆料的过程中并没有产生锡铋的氧化物。在 $2\theta=21.58^\circ$ 时,在180 °C直接水冷铸造的工艺条件下,Bi的棱面立方结构衍射峰较强,随着机械搅拌的施加,这个衍射峰强度开始减弱;在 $2\theta=28.33^\circ$ 时,普通水冷铸造试样存在Bi的棱面立方结构衍射峰,但是施加机械搅拌后,28.33°处的衍射峰强度很弱,说明经过施加机械搅拌后在普通铸造的条件下Bi在(202)晶面上的择优取向已经消失。

图3所示为180 °C的Sn-62Bi合金熔液直接水冷凝固的显微组织。由图3可看出,Sn-62Bi合金为过共晶合金,根据金属凝固原理并结合锡铋二元合金相图可知,在水冷却凝固过程中,从液相中首先结晶出大块状的初生相Bi,凝固后所获得的组织由块状的Bi初生相和共晶组织组成。块的初生相Bi存在较为明显的尖角,由于水冷却凝固速度快,过冷度大,Sn-Bi

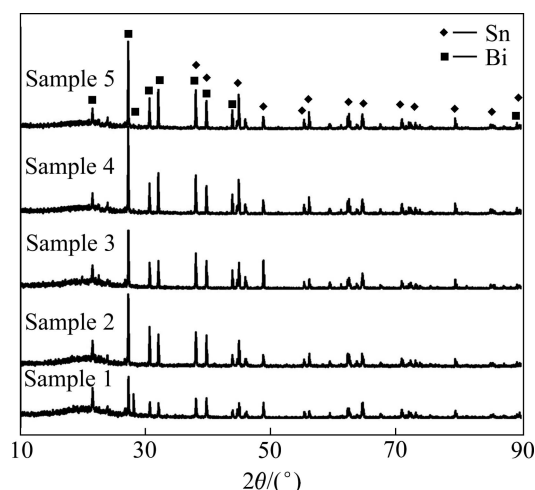


图2 不同工艺条件下Sn-62Bi的XRD谱

Fig. 2 XRD patterns of Sn-62Bi alloy prepared by different process parameters

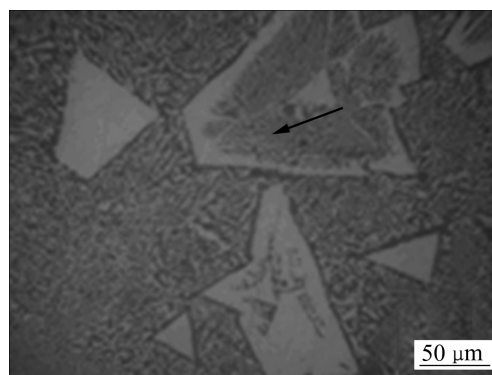


图3 Sn-62Bi在180 °C直接水冷铸造成形的显微组织

Fig. 3 Microstructure of Sn-62Bi quenched at 180 °C without mechanical stirring

合金的共晶组织较为细小。

从图3的金相组织中可以观察到大块的白色Bi相中仍然含有少量的黑色物质,对图3箭头所指区域进行能谱分析可知,方块状组织中Bi的含量为77.46%(摩尔分数),Sn的含量为22.54%,即在凝固过程中白色块状Bi初生相中析出了少量的二次Sn相。

图4所示为Sn-62Bi合金在搅拌速度为500 r/min和搅拌时间为15 min时不同搅拌温度下半固态合金铸态组织。图4(a)所示为搅拌温度140 °C时Sn-62Bi的金相组织,从图4(a)中可以观察到大量尺寸约20 μm的块状Bi初生相弥散分布于共晶基体上,且有少量二次Sn相在块状Bi初生相中形成。由图3和4(a)中初生相形状的变化可知,经过机械搅拌后,先析出的块状Bi尺寸显著变小,在普通水冷铸造工艺下先析出的块状Bi形成的尖锐棱角已经消失。当机械搅拌温度为

145 °C时, 半固态 Sn-Bi 合金浆料的固相率由 140 °C 时的 11%下降到 7%, 如图 4(b)所示, 搅拌后获得的块状 Bi 初生相大小均匀, 尺寸约为 30  $\mu\text{m}$ 。当搅拌温度继续高至 150 °C时, 如图 4(c)所示, 搅拌后获得的块状 Bi 初生相尺寸增大至 50  $\mu\text{m}$  以上, 并呈现出团聚的趋势。可见, 在近液相线温度(150 °C)时, 对半固态 Sn-Bi 合金浆料进行搅拌, 由于固相率低(约为 3%), 搅拌效果不明显, 搅拌后形成了尺寸大于 50  $\mu\text{m}$  且含有尖锐的棱角块状 Bi 初生相, 与 Sn-62Bi 合金熔液直接水冷凝固的普通铸造工艺试样的显微组织相似。

图 5 所示为在搅拌速度为 500 r/min、搅拌温度 150 °C 搅拌不同时间后制备的半固态 Sn-62Bi 合金铸态组织。由图 5 可看出, 在 150 °C 搅拌 15 min 时, 由于固

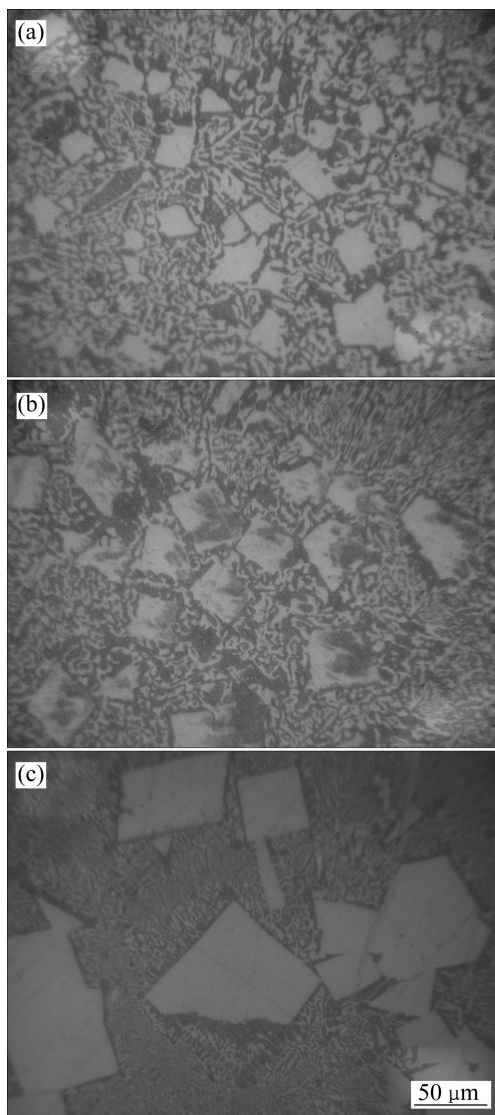


图 4 不同搅拌温度下 Sn-62Bi 合金铸态组织

**Fig. 4** Microstructures of semi-solid Sn-62Bi alloy treated by mechanical stirring for different times: (a) 140 °C; (b) 145 °C; (c) 150 °C

相率较低, 搅拌后获得的组织中大量的先析出相为带有尖锐棱角的块状 Bi 弥散在共晶基体上; 当搅拌时间延长到 25 min 时, 由于带有尖锐棱角的块状初生相在剪切力的作用下互相碰撞摩擦, 或者与坩埚壁碰撞, 导致尖锐棱角被打碎或者重熔, 从而使得带棱角的大块状 Bi 初生相减少, 获得的初生相大部分尺寸为 30  $\mu\text{m}$ (见图 5(b))。

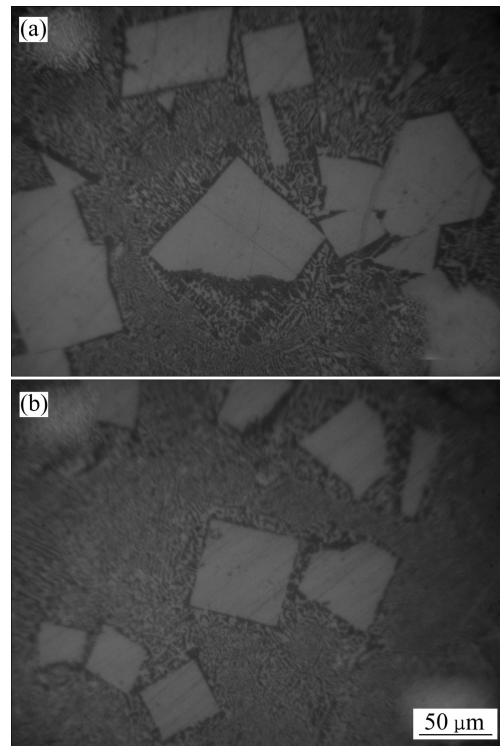


图 5 经 150 °C 下搅拌不同时间后半固态 Sn-62Bi 合金铸态组织

**Fig. 5** Microstructures of semisolid Sn-62Bi alloy treated by mechanical stirring at 150 °C for different times: (a) 15 min; (b) 25 min

图 6 所示为不同工艺下制备的 Sn-62Bi 合金棒材拉伸试验测试结果。由图 6 可知, 在 145 °C 下搅拌 15 min 所制备的半固态 Sn-62Bi 合金棒材的伸长率为 39.9%, 塑性最好, 与 180 °C 的金属熔液直接水冷凝造成形试样的伸长率相比, 提高了 283.3%。在 150 °C 时, 当搅拌时间从 15 min 延长到 25 min 时, 所制备的半固态 Sn-62Bi 合金试样的伸长率由 13.3% 增加到 17.0%, 伸长率提高了 27.9%。Sn-62Bi 为过共晶合金, Bi 初生相为脆性相, 由以上分析可知, 在 145 °C 下搅拌 15 min 时, 所制备的半固态 Sn-62Bi 合金的 Bi 初生相与 180 °C 的金属熔液直接水冷凝造成形试样比要细小、分布均匀, 因此, 其塑性也显著提高。在 145 °C 下搅拌 15 min 所制备的半固态 Sn-62Bi 合金 Bi 初

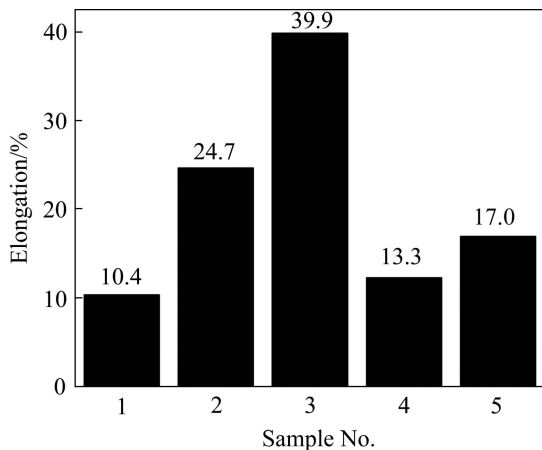


图6 Sn-62Bi不同成形工艺下棒材的伸长率

Fig. 6 Elongation of Sn-62Bi alloy at different process

生相的尺寸约为  $30\ \mu\text{m}$ ，比  $145\ ^\circ\text{C}$  下制备的合金 Bi 初生相要小，但其伸长率并没有随着 Bi 初生相的尺寸降低而提高，这主要是 Bi 初生相大小不一、分布不均匀使其塑性下降。可见，Bi 初生相形状不规则、尺寸过大以及分布不均匀都容易引起应力的集中产生裂纹，恶化材料的塑性。

机械搅拌剪切力对半固态 Sn-62Bi 合金浆料中的块状 Bi 初生相的破碎机理如图 7 所示。

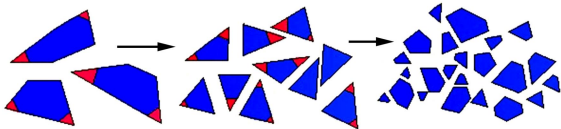


图7 机械搅拌剪切力对块状 Bi 破碎机理图

Fig. 7 Mechanism of mechanical stirring shear force on block Bi

由图 7 可看出，在半固态温度区间进行机械搅拌的作用是使已析出的大小和形状都不规则的块状 Bi 之间以及初生相与坩埚壁互相碰撞、磨擦、剪切以及液体对初生相 Bi 的剧烈冲刷，使脆性的初生相的尖锐部分(图 7 中的红色部分)极易发生机械破碎，把大块状 Bi 的尖锐棱角打碎形成更加细小、具有几何规则的块状初生相 Bi。同时，由于搅拌导致温度场改变，初生相颗粒被卷入高温区后，较大块的初生相 Bi 也容易被热流熔断，形成较为细小的颗粒。强烈的搅拌极大地改变半固态浆料中的传热和传质过程，引起半固态浆料内的热量和物质快速混合，改善半固态浆料温度和成分的均匀性。这种条件下的晶粒长大几乎没有哪

一个方向具有明显生长的优势，故而，晶粒在各个方向上都是均匀长大，在各种因素综合作用下最终变为块状、规则且没有尖锐棱角。

### 3 结论

1) 利用自行设计的搅拌桨转动产生的强烈剪切力作用于 Sn-62Bi 半固态浆料，可消除先析出相 Bi 在 Sn-62Bi 中的偏析现象，打碎在结晶凝固过程中以不规则块状析出的 Bi 初生相形成的尖锐棱角，获得细小、分布均匀的方块状 Bi 初生相。

2) 在半固态温度区间中部  $145\ ^\circ\text{C}$ 、搅拌速度为  $500\ \text{r/min}$  条件下搅拌  $15\ \text{min}$ ，制备出的块状 Bi 初生相的尺寸约  $30\ \mu\text{m}$ ，且均匀弥散分布于共晶基体上的半固态 Sn-62Bi 合金，其室温下的伸长率为  $39.9\%$ ，与在  $180\ ^\circ\text{C}$  时 Sn-62Bi 合金金属熔液直接水冷铸造成形的工艺相比，提高了  $283.3\%$ 。当搅拌温度为  $150\ ^\circ\text{C}$  时，随着机械搅拌剪切力作用时间的增加，块状初生相 Bi 互相之间易发生摩擦和碰撞，或者与坩埚壁碰撞摩擦，导致其尺寸进一步减小，大量的尖锐棱角被打碎，变成细小均匀的块状 Bi 相，使半固态 Sn-62Bi 合金的伸长率得到改善。

### REFERENCES

- [1] 陆凤姣. Sn-58Bi 复合钎料的制备及性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2011: 14-21.  
LU Feng-jiao. Investigation on the preparation method and properties of Sn-58Bi composite solder[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 14-21.
- [2] 董野峰. Sn-Sb 基钎料合金熔体结构状态对凝固和润湿性的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013: 25-39.  
DONG Ye-feng. Structure transition of lead-free Sn-Sb base solder and its effects on solidification and wettability[D]. Hefei: Hefei University of Technology. 2013: 25-39.
- [3] ZU Fang-qiu, ZHOU Bing, LI Xian-fen, YI Xun, CHEN Yi-ping, SUN Qi-qiang. Effect of liquid-liquid structure transition on solidification of Sn-Bi alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(5): 893-897.
- [4] 陈海燕, 林振龙, 揭晓华, 张海燕, 郭黎. 冷却速度对 Sn-Bi-X 合金微观组织的影响[J]. 铸造技术, 2014, 35(1): 1-4.  
CHENG Hai-yan, LIN Zhen-long, JIE Xiao-hua, ZHANG Hai-yan, GUO Li. Effects of cooling rates on microstructure of Sn-Bi-X solders[J]. Foundry Technology, 2014, 35(1): 1-4.
- [5] 林琳, 钟毅, 尹建成, 高鹏. 水平机械搅拌 6061 合金半固态坯料组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(1): 56-59.

- LIN Lin, ZHONG Yi, YIN Jan-cheng, GAO Peng. Microstructure and properties of 6061 semi-solid alloy billet by level mechanical stirring[J]. *Hot Working Technology*, 2012, 41(1): 56–59.
- [6] 陈洪波. 机械搅拌工艺对 Al-25 %Si 合金半固态组织演变的影响[J]. *铸造技术*, 2011, 32(5): 646–649.
- CHEN Hong-bo. Effect of mechanical stirring on the microstructure of hypereutectic Al-25%Si alloy[J]. *Foundry Technology*, 2011, 32(5): 646–649.
- [7] 甘贵生, 杜长华, 许惠斌, 杨 滨, 李镇康, 王 涛, 黄文超. 纳米 Ni 颗粒增强无铅 Sn-Cu-Ag 复合钎料搅拌辅助低温钎焊技术[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(10): 2875–2881.
- GAN Gui-sheng, DU Chang-hua, XU Hui-bin, YANG Bin, LI Zheng-kang, WANG Tao, HUANG Wen-chao. Low temperature soldering with stirring for nano-Ni partial reinforced lead free Sn-Cu-Ag composite solders[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(10): 2875–2881.
- [8] 刘 政, 毛卫民, 赵振铎. 新工艺制备半固态 A356 铝合金浆料[J]. *金属学报*, 2009, 45(4): 507–512.
- LIU Zhen, MAO Wei-min, ZHAO Zhen-duo. Semi-solid A356 alloy slurry prepared by a new method[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(4): 507–512.
- [9] 李元东, 文 靖, 陈体军, 杨 建, 马 颖, 姜向东. 添加 SiC 对不同尺寸 AZ91D 镁合金坯料半固态组织的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(3): 407–414.
- LI Yuan-dong, WEN Jing, CHEN Ti-jun, YANG Jian, MA Ying, JIANG Xiang-dong. Effects of SiC addition on microstructure of AZ91D alloy initial billet with various size during semisolid isothermal treatment[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(3): 407–414.
- [10] ALVANI S M J, AASHURI H, KOKABI A, BEYGI R. Semisolid joining of aluminum A356 alloy by partial remelting and mechanical stirring[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(3): 1792–1798.
- [11] LÜ Shu-lin, WU Shu-sen, ZHU Ze-ming, AN Ping, MAO You-wu. Effect of semi-solid processing on microstructure and mechanical properties of 5052 aluminum alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(3): 758–752.
- [12] ZHANG Xiao-li, LI Ting-ju, TENG Hai-tao, XIE Shui-sheng, JIN Jun-ze. Semisolid processing AZ91 magnesium alloy by electromagnetic stirring after near-liquidus isothermal heat treatment[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 475: 194–201.
- [13] BECKERA E, FAVIERB V, BIGOTA R, CEZARDC P, LANGLOISA L. Impact of experimental conditions on material response during forming of steel in semi-solid state[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(11): 1482–1492.
- [14] 周 冰, 康永林, 郜俊震, 祁明凡, 张欢欢. 强制对流搅拌制备铝合金半固态浆料及其组织演变[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(1): 61–68.
- ZHOU Bing, KANG Yong-lin, GAO Jun-zhen, QI Ming-fan, ZHANG Huan-huan. Preparation of semisolid aluminum alloy slurry by forced convection mixing and its microstructure evolution[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(1): 61–68.
- [15] 曹 婧, 乐启焱, 张志强, 宝 磊, 崔建忠. ZK60-2Ca 镁合金半固态坯料的部分重熔[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(1): 1–7.
- CAO Jing, LE Qi-chi, ZHANG Zhi-qiang, BAO Lei, CUI Jian-zhong. Partial remelting of semi-solid metal ingots of AK60-2Ca magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(1): 1–7.
- [16] 刘 尧, 李 风. 半固态成形工艺对 Sn-Bi 合金性能的影响[J]. *广东工业大学学报*, 2008, 25(4): 24–27.
- LIU Yao, LI Feng. The effect of semi-solid processing technology on the performance of Sn-Bi alloy[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2008, 25(4): 24–27.
- [17] MASSALSKI T. Binary alloy phase diagrams[M]. Ohio: ASM International Press, 1990.

(编辑 李艳红)