# Au-20Sn 贵金属钎料箔材的制备及性能研究

王春琴<sup>1,2</sup>, 付 全<sup>1</sup>, 张灵严<sup>2</sup>, 张安强<sup>2</sup>, 虞 坤<sup>2</sup>, 宋 薇<sup>1</sup>, 罗靖然<sup>2</sup>, 刘 毅<sup>1,2\*</sup> (1. 云南贵金属实验室有限公司, 昆明 650106; 2. 昆明贵研新材料科技有限公司, 昆明 650106)

摘 要:采用多层复合及扩散合金化工艺制备 Au-20Sn 贵金属钎料箔材,研究箔材的化学成分、熔 化特性、力学性能、物相组成、组织形貌和微区成分,并采用真空钎焊工艺对所制备钎料箔材的钎 焊性能进行研究。结果表明,采用多层复合及扩散合金化工艺制备的 Au-20Sn 钎料箔材脆性明显改 善,能够在室温下冷冲裁加工成特定尺寸的预成型焊片;钎料箔材的化学成分和杂质含量符合设计 要求,显微组织由连续且均匀分布的(AuSn)和(Au<sub>5</sub>Sn)两相组成;钎料熔程仅为 3.1℃,在铜基材上 润湿性和铺展性良好,钎焊铜接头力学性能较好。

关键词: Au-20Sn; 钎料箔材; 多层复合; 性能研究

中图分类号: TG425 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2023)04-0062-07

## Study on preparation and properties of Au-20Sn precious metal soldering foil

WANG Chunqin<sup>1, 2</sup>, FU Quan<sup>1</sup>, ZHANG Lingyan<sup>2</sup>, ZHANG Anqiang<sup>2</sup>, YU Kun<sup>2</sup>, SONG Wei<sup>1</sup>, LUO Jingran<sup>2</sup>, LIU Yi<sup>1, 2\*</sup>

(1. Yunnan Precious Metals Laboratory Co. Ltd., Kunming 650106, China;

2. Kunming Guiyan New Materials Technology Co. Ltd., Kunming 650106, China)

**Abstract:** A multi-layer composite method and subsequent heat treatment process were used to prepare Au-20Sn, a precious metal-based foil for soldering. The chemical composition, melting point, mechanical properties, phase composition, micro-structure and micro-composition were studied by the modern analytical methods while the soldering properties were evaluated by the vacuum soldering process. The results showed that the brittleness of multi-layer Au-20Sn foil prepared by multi-layer composite and diffusion alloying process was significantly improved, and it could be blanked at room temperature into a specific size for preformed soldering. The chemical composition and impurity content met the design requirements, and the microstructure consisted of continuous and uniformly distributed (AuSn) and (Au<sub>5</sub>Sn) phases. The melting range was only 3.1 °C. The multi-layer Au-20Sn foil displayed good wettability and spreadability on the copper substrate. Moreover, the mechanical properties of copper joints soldered by Au-20Sn foil were excellent.

Key words: Au-20Sn; soldering foil; multi-layer method; properities research

金基钎料具有抗蚀性强、蒸气压低、流动性及 润湿性好等特点,适用于钎焊铜、镍、钴、钼、可 伐合金、陶瓷等众多材料,尤其适合航空发动机、 电真空元件、集成电路、电子芯片等高精密零部件 的高可靠、高气密封装,在航空、航天、电子、半 导体等现代工业中具有十分广泛的应用,主要包括Au-Cu、Au-Ni、Au-Pd、Au-Sn、Au-Ge、Au-Ag-Cu等材料体系<sup>[1-3]</sup>。Au-Sn 系低温合金钎料指由 Au 和Sn 组成的二元合金钎料体系,包括 Au-20Sn、Au-27Sn、Au-90Sn 等牌号,其中 Au-20Sn 共晶合金钎

收稿日期: 2023-07-17

基金项目:云南贵金属实验室科技计划项目(YPML-2022050204);云南省重点研发计划项目(202303AA080001)

第一作者:王春琴,女,硕士,工程师;研究方向:贵金属钎料及钎焊工艺;E-mail:wcq@ipm.com.cn

<sup>\*</sup>通信作者:刘 毅,男,博士,研究员;研究方向:稀贵金属及新材料; E-mail: liuyi@ipm.com.cn

料凭借较低的钎焊温度和良好的浸润性、流动性等性能,是应用最广泛的金基低温合金钎料类型<sup>[4-6]</sup>。

Au-20Sn 是一种典型的低温共晶合金钎料,熔 化温度 280 ℃,具有良好的导热、抗氧化、抗热疲 劳和抗蠕变等特性,在复杂服役条件下表现出良好 的钎焊性能<sup>[7-9]</sup>。根据 Au-20Sn 二元相图(图 1)<sup>[10]</sup>, Au-20Sn 合金熔铸过程中, 当温度降至 280 ℃时, 液态合金发生共晶反应生成不稳定的 ζ(Au<sub>5</sub>Sn)相和 δ(AuSn)相, 当温度下降至 190 ℃时发生共析反应生 成稳定的 ζ'(Au<sub>5</sub>Sn)相, 室温下 Au-20Sn 主要由 δ(AuSn)和 ζ'(Au<sub>5</sub>Sn)组成<sup>[11]</sup>。Au-20Sn 共晶合金钎料 的热导系数很高,比常用的锡基、铅基低温合金钎 料具有更为优良的热导性,但由于室温组织组成相 ζ'(Au<sub>5</sub>Sn)为六方晶格脆性中间相,导致其质地较脆、 机械加工性能较差<sup>[12-13]</sup>。采用多层复合法制备 Au-20Sn 合金钎料箔材,研究所制备钎料箔材的主要性 能,探索含脆性相贵金属低温钎料制备的方法和工 艺,为贵金属脆性钎料的制备提供基础研究数据。



图 1 Au-Sn 二元合金相图

Fig.1 Binary phase diagram of Au-Sn alloy system

# 1 实验

## 1.1 实验材料及设备

1.1.1 材料

采用纯金、纯锡轧制态片材开展多层复合 Au-20Sn 钎料箔材制备,材料的物理性能、化学成分分 别如表 1、表 2 所示。

1.1.2 设备

采用分离式油压千斤顶和 φ170 双辊冷轧机开展 Au-20Sn 钎料箔材的多层复合实验;采用高真空管式炉对多层复合 Au-20Sn 轧制态箔材进行热处理退火;采用真空钎焊炉开展多层复合 Au-20Sn 钎料

#### 表1 实验用金、锡材料的物理性能[14-15]

Tab.1 Physical properties of gold and tin used in the experiment

材料	熔点/℃	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	维氏硬 度 HV	弹性模 量/GPa	抗拉强 度/MPa	延伸 率/%
金	1063.69	19.32	55~60	79	206~221	20~60
锡	231.89	7.28	12~15	44	15~27	40~70

#### 表 2 实验用金、锡材料的化学成分(质量分数)

Tab.2 Chemical composition (mass fraction) of gold and tin used in the experiment /%

		1				
材料	主元素含量			杂质		
	Au	Sn	Bi	Fe	Pb	总量
金	99.990	/	/	< 0.002	< 0.001	< 0.002
锡	/	99.900	< 0.015	< 0.007	< 0.032	< 0.087

箔材的润湿铺展、钎焊搭接实验,升温速率 10 ℃/min,保温时间 3 min,钎焊温度 310 ℃。

#### 1.2 实验程序

多层复合 Au-20Sn 钎料箔材制备实验过程中使 用的金、锡片材尺寸、复合参数如表 3 所示,复层 结构方式为 Au/Sn/Au,预复合压力为 40 MPa。轧 制复合首道次变形量为 45.2%,总变形量为 97.1%, 共计轧制 20 道次,箔材厚度 0.1 mm,制备过程中 保证复层表面的清洁性,避免对样品造成污染而导 致箔材杂质含量增高,轧制态箔材经 270 ℃/30 h 扩 散合金化处理。

#### 表 3 多层复合制备 Au-20Sn 箔材主要实验参数

Tab.3 Main experimental parameters of multi-layer Au-20Sn foil

材料	片材尺寸/mm	复合层数	材料质量/g	质量分数/%
金	30×50×0.1	11	31.80	79.70
锡	30×50×0.075	10	8.10	20.30

## 1.3 测试表征方法

采用奥林巴斯 BXFM 数码显微镜观察试样的 外观,采用化学分析法参考《GB/T11066.11-2021 金 化学分析方法》测定试样的化学成分。采用 Netzsch STA409 PG/PC 型差示扫描量热仪分析试样的熔化 特性,样品质量为 20 mg, Ar<sub>2</sub>气氛保护,参照物为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,熔化温度范围为室温至 300 ℃。采用 Shimadzu HMV-FA2 型全自动显微硬度计测试试样 的维氏硬度。采用 AG-X100KN 型万能力学试验机 测试试样的抗拉强度。采用 Shimadzu XRD-6000 型 X 射线衍射仪对试样进行物相分析,实验加速电压 为40kV,电流为30mA,使用Cu靶Kα射线,扫 描速率为5°/min,扫描范围为20°~90°。采用日立 SPM-S3400N型扫描电镜观察试样的显微组织,并 使用设备附带的能谱仪进行微区成分分析,采用 AG-X100kN型万能力学实验机测试钎焊搭接接头 的力学性能。

# 2 结果与讨论

## 2.1 外观和化学成分

观察纯金和多层复合 Au-20Sn 轧制态、扩散合 金化箔材外观可知,多层复合后箔材表层仍呈现纯 金的色泽,说明多层复合轧制态箔材基本结构仍由 纯金属复层构成,复合工艺参数的选择能够较好地 保持原始片材的完整性,未发生明显的塑性变形超 限而导致的开裂现象。而多层复合 Au-20Sn 轧制态 和扩散合金化箔材表面光泽存在明显差异,经扩散 合金化处理的多层复合Au-20Sn 箔材表面呈现合金 色泽,表明箔材经特定工艺热处理退火后实现了合 金化扩散。此外,多层复合Au-20Sn 轧制态和扩散 合金化箔材表明平整、光滑,无明显裂纹和孔洞, 边缘整齐无开裂现象, 箔材韧塑性较好, 室温下能 够裁剪加工成预成型焊片而不会发生脆断和开裂。 表 4 为多层复合 Au-20Sn 箔材的化学成分和杂质含 量,测定结果表明,采用多层复合法制备的 Au-20Sn 钎料箔材化学成分和杂质含量均符合设计要求。实 验中,考虑锡表面需要处理,以及锡质地软、延性 好等特性,在多层复合过程中容易被挤出,故在配 料时适当增加锡的含量[16]。

## 表 4 多层复合 Au-20Sn 钎料的化学成分(质量分数)

Tab.4 Chemical composition (mass frction) of the multi-layer

Au-20Sn filler						
样只	主元素含量		杂质元素含量			
1十 日日	Au	Sn	Pb	Zn	Cd	
多层坯料	79.70	20.30	/	/	/	
轧制态箔材	79.89	19.89	< 0.002	< 0.002	< 0.002	
扩散合金化箔材	79.76	20.04	< 0.002	< 0.002	< 0.002	

# 2.2 熔化特性

图 2 为多层复合 Au-20Sn 轧制态和扩散合金化 箔材的 DSC 曲线。由图 2(a)可知,采用多层复合方 法制备的 Au-20Sn 轧制态箔材 DSC 熔化特性曲线 起始点温度为 280 ℃,峰值温度为 283.1 ℃,熔化 温度区间仅为 3.1 ℃,存在一个明显的吸热峰,表 现为典型的共晶转变特点。图 2(b)表明,多层复合 Au-20Sn 扩散合金化箔材 DSC 熔化特性曲线起始 点温度为 278.9 ℃,峰值温度为 282 ℃,熔程为 3.1 ℃,存在一个明显的吸热峰,也表现为典型的共 晶转变<sup>[17]</sup>。与多层复合 Au-20Sn 轧制态箔材 DSC 熔化特性曲线比较,多层复合 Au-20Sn 扩散合金化 箔材的熔化起始点温度和熔化峰值温度均降低了 1.1 ℃,熔化温度区间均为 3.1 ℃,表明扩散合金化 处理导致箔材的熔化温度降低。

#### 2.3 显微组织形貌

图 3 为多层复合 Au-20Sn 轧制态和扩散合金化 箔材的显微组织形貌。由图 3(a)可以看出,多层复 合 Au-20Sn 轧制态箔材层状结构较为完整、均匀, 层状组织连续性较好,说明纯金、锡复层在轧制复 合过程中协同变形较好。由图 3(b)可知,多层复合 Au-20Sn 扩散合金化箔材由两相衬度区域组成,两 相衬度区域呈均匀分布,采用 XRD 和 EDS 确定多 层复合 Au-20Sn 轧制态和扩散合金化箔材的物相。

# 2.4 物相分析

图 4 为多层复合 Au-20Sn 轧制态和扩散合金化 箔材 XRD 衍射图谱和对应物相分析结果,由图 4(a) 可知,多层复合 Au-20Sn 轧制态箔材的物相主要由 Au、Sn 构成,此外还存在金属间化合物(AuSn)、 (AuSn<sub>2</sub>)、(AuSn<sub>4</sub>),未发现(Au<sub>5</sub>Sn)。该结果表明,在 Au-20Sn 多层复合制备过程中,纯金属金、锡复层 发生了相互扩散,形成中间相(AuSn)、(AuSn<sub>2</sub>)和 (AuSn<sub>4</sub>),这些物相在下文的 SEM 扫描电镜照片和 EDS 电子探针能谱分析中得到证实。(AuSn)、 (AuSn<sub>2</sub>)和(AuSn<sub>4</sub>)峰强较弱,说明生成的金属间化 合物较少,但由于这些金属间化合物为脆性相,导 致轧制态箔材仍具有一定脆性。由图 4(b)可知,扩 散合金化处理后 Au-20Sn 箔材的物相主要由(AuSn) 和(Au<sub>5</sub>Sn)构成,经过扩散合金化处理,轧制态箔材 中的(AuSn<sub>2</sub>)、(AuSn<sub>4</sub>)中间相转变为(AuSn)和 (Au<sub>5</sub>Sn), 箔材韧塑性较好, 能够满足室温下的冷冲 裁加工要求[18]。

## 2.5 微区成分

图 5 为多层复合 Au-20Sn 轧制态和扩散合金化 箔材的背散射显微组织形貌。由图 5(a)可知,多层 复合 Au-20Sn 轧制态箔材的显微组织形貌存在由浅 到深的五相衬度区域,浅色衬度区域为单相组织,



图 2 多层复合 Au-20Sn 轧制态和扩散合金化箔材 DSC 熔化特性曲线

Fig.2 DSC curve of the multi-layer rolled-state and annealed-state Au-20Sn foil



(a). 轧制态(Rolled-state); (b). 扩散合金化(Diffusion alloyed-state)

## 图 3 多层复合 Au-20Sn 轧制态和扩散合金化箔材显微组织形貌

Fig.3 The microstructure morphology of multi-layer rolled-state and annealed-state Au-20Sn foil



(a). 轧制态(Rolled-state); (b). 扩散合金化(Diffusion alloyed-state)



Fig.4 XRD pattern of the multi-layer rolled-state and annealed-state Au-20Sn foil



(a). 轧制态(Rolled-state); (b). 扩散合金化(Diffusion alloyed-state)
 图 5 多层复合 Au-20Sn 轧制态和扩散合金化箔材显微组织形貌
 Fig.5 Microstructure of the multi-layer rolled-state and annealed-state Au-20Sn foil

深色衬度区域由扩散形貌的层状区域构成。由 该图还可以看出,多层复合 Au-20Sn 轧制态箔材显 微组织主要由纯金属复层金层构成,金属间化合物 层较窄,且未形成中间相(AusSn),说明在轧制复合 过程中发生的扩散并不充分,需要通过扩散合金化 处理使复层物相组织均匀化。由图 5(b)可知,多层 复合 Au-20Sn 扩散合金化箔材由两相衬度区组成, 两种衬度区域呈均匀分布,两相界面完整、连续。

采用 EDS 电子探针对图 5(a)和 5(b)所示多层复 合 Au-20Sn 轧制态、扩散合金化箔材不同衬度位置 进行微区成分分析,结果如表 5 所列。根据微区成 分分析结果,对于轧制态箔材(Fig.5(a)),位置 1 所 示最浅色区域为 Au,深色衬度区域位置 2、3、4 对 应的物相分别为(AuSn)、(AuSn<sub>2</sub>)、(AuSn<sub>4</sub>),位置 5 对应深色区域为未扩散的 Sn。EDS 能谱分析结果与 XRD 衍射图谱分析结果一致,证实在轧制复合过程 中形成了金属间化合物(AuSn)、(AuSn<sub>2</sub>)和(AuSn<sub>4</sub>)。

表 5 多层复合 Au-20Sn 箔材 EDS 能谱分析结果

Tab.5 EDS results of the multi-layer Au-20Si	ı foil	
--	--------	--

统材	位置	原子百分	物相	
沿口小	Au			
	1	90.40	9.60	Au
	2	45.32	54.68	(AuSn)
判刑忿 (□:5(-))	3	31.54	68.46	(AuSn <sub>2</sub> )
(F1g.3(a))	4	17.19	82.81	(AuSn4)
	5	8.16	91.84	Sn
扩散合金化	1	82.13	17.87	(Au <sub>5</sub> Sn)
(Fig.5(b))	2	49.36	50.64	(AuSn)

对于扩散合金化箔材(Fig.5(b)),位置1所示浅 色区域为(Au<sub>5</sub>Sn),位置2所示深色区域为(AuSn)。 EDS能谱分析结果与XRD衍射图谱分析结果一致, 证实经扩散合金化处理后多层复合Au-20Sn箔材的 由均匀分布的(AuSn)和(Au<sub>5</sub>Sn)两相组成<sup>[19-20]</sup>。

## 2.6 力学性能

表 6 为多层复合 Au-20Sn 轧制态和扩散合金化 箔材的硬度、抗拉强度和延伸率。从该表可知,多 层复合 Au-20Sn 轧制态箔材硬度接近纯金复层, 抗 拉强度介于纯金、纯锡的抗拉强度之间,而延伸率 较纯金属复层显著降低,这是由于大变形量轧制复 合导致 Au-20Sn 箔材复层中的晶粒沿轧制方向呈纤 维状拉长,但层状结构中仍存在纯金复层,此外还 产生了(AuSn)、(AuSn<sub>2</sub>)、(AuSn<sub>4</sub>)三种中间化合物, 导致箔材保持较好的硬度和抗拉强度,但延伸率有 所下降。多层复合 Au-20Sn 扩散合金化箔材的维氏 硬度和抗拉强度较轧制态箔材明显升高,延伸率降 低,这是由于经过一定时间的扩散合金化退火处理, 多层复合Au-20Sn 箔材层状结构已经转变为由均匀 分布的(AuSn)和(Au<sub>5</sub>Sn)构成,导致硬度和抗拉强度 升高,而扩散合金化处理使轧制态箔材中的纯金复 层完全扩散消失,导致箔材延伸性能变差。

#### 表 6 多层复合 Au-20Sn 扩散合金化箔材的硬度和拉伸性能

Tab.6 Vickers hardness and tensile property of the multi-layer annealed-state Au-20Sn foil

统林	维氏硬度 Hv		抗拉强	延伸率/%		
阳小	Max	Ave	Max	Ave	Max	Ave
轧制态	62.00	60.27	124.10	101.97	0.68	0.42
扩散合金化	135.00	133.00	141.25	105.00	0.28	0.23

## 2.7 钎焊性能

采用纯铜基材开展所制备多层复合 Au-20Sn 合金钎料箔材的润湿铺展实验,所用铜基材的尺寸为 30×30×0.2 mm,其上放置质量为 0.1 g 的多层复合 Au-20Sn 合金钎料,实验前对铜基材表面进行打磨、 清洗、烘干处理。结果表明多层复合 Au-20Sn 合金 钎料箔材在铜基材上的润湿性和铺展性较好,铺展 界面处存在明显的反应层,测定其润湿铺展平均面 积为 113.04 mm<sup>2</sup>。用纯铜基材对多层复合 Au-20Sn 合金钎料箔材进行钎焊搭接实验,并测试钎焊接头 的力学性能,结果表明所制备的多层复合 Au-20Sn 合金钎料箔材钎焊纯铜基材的接头最大荷载为 485.96 N,最大抗拉强度为 36.48 MPa,所得钎焊接 头力学性能较好。

# 3 结论

1) 采用多层复合及扩散合金化处理工艺制备的 Au-20Sn 钎料箔材表面质量和韧塑性较好,在室 温下裁剪不会发生脆断和开裂,DSC 熔化特性熔程 仅为 3.1 ℃,表现为典型的共晶转变,化学成分和 杂质含量符合设计要求。

2) 多层复合 Au-20Sn 轧制态箔材的物相主要 由 Au、Sn 以及金属间化合物(AuSn)、(AuSn<sub>2</sub>)、 (AuSn<sub>4</sub>)组成,扩散合金化处理后 Au-20Sn 箔材的物 相主要由均匀分布的(AuSn)和(Au<sub>5</sub>Sn)构成,后者硬 度、抗拉强度较前者显著升高,延伸率降低。

3) 采用纯铜基材开展多层复合 Au-20Sn 合金 钎料箔材的润湿铺展和钎焊搭接实验,表明钎料对 纯铜的润湿性较好,铺展界面处存在明显的反应层, 所得钎焊接头力学性能较好。

# 参考文献:

[1] 胡昌义, 刘时杰. 贵金属新材料[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015: 337.

HU C Y, LIU S J. New materials of precious metals[M]. Changsha: Central South University Press, 2015: 337.

- [2] 何华敏. 采用 Au 基高温钎料钎焊 SiC 陶瓷的连接工艺 与机理研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2020: 33-44.
  HE H M. Research on brazing parameters and bonding mechanism of the SiC/SiC joints with Au-based high-temperature filler alloy[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020: 33-44.
- [3] 王岩松. Au-Ni 基钎料分步连接 TA15 与 K4648 的工艺 及机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2022: 10-11.
  WANG Y S. Research on step by step brazing process and bonding mechanism in TA15 and K4648 superalloy with Au-Ni based filler[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022: 10-11.
- [4] 刘晗, 薛松柏, 王刘珏, 等. 金基中低温钎料的研究现状与展望[J]. 材料导报, 2019, 33(19): 3189-3195.
  LIU H, XUE S B, WANG L J, et al. Research status and prospect of Au-based medium-low temperature filler metals[J]. Materials Reports, 2019, 33(19): 3189-3195.

- [5] 张利广,许昆,赵明,等. 电子工业用贵金属中低温脆 性钎料研究进展[J]. 贵金属,2014,35(3):71-78.
  ZHANG L G, XU K, ZHAO M, et al. Research progress on precious metals medium-low temperature brittle filler metals for electronic industry[J]. Precious Metals, 2014, 35(3):71-78.
- [6] 李金龙,谈侃侃,张志红,等. AuSn 合金在电子封装中的应用及研究进展[J]. 微电子学, 2012, 42(4): 539-546.
  LI J L, TAN K K, ZHANG Z H, et al. Application of AuSn alloy in electronic packaging and its research progress[J]. Microelectronics, 2012, 42(4): 539-546.
- [7] 王刘珏, 薛松柏, 刘晗, 等. 电子封装用 Au-20Sn 钎料研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(15): 2483-2489.
  WANG L J, XUE S B, LIU H, et al. Research of Au-20Sn solder for electronic packaging[J]. Materials Reports, 2019, 33(15): 2483-2489.
- [8] 张国尚, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 80Au-20Sn 钎料焊点可靠 性研究现状与展望[J]. 机械工程材料, 2009, 33(11): 1-4. ZHANG G S, JING H Y, XU L Y, et al. Research status and prospect for 80Au-20Sn solder joint reliability[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33(11): 1-4.
- [9] 付明洋, 孙凤莲, 刘洋. Au20Sn/Au 微焊点抗时效性能的研究[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(12): 36-41.
  FU M Y, SUN F L, LIU Y. Anti-aging preformance of Au20Sn/Au micro solder joint[J]. Electronic Components & Materials, 2017, 36(12): 36-41.
- [10] CIULIK J, NOTIS M R. The Au/Sn phase diagram[J]. Journal of Alloys & Compounds, 1993, 191(1): 71-78.
- [11] CHROMIK R R, WANG D N, SHUGAR A, et al. Mechanical properties of intermetallic compounds in the Au-Sn system[J]. Journal of Materials Research, 2005, 20(8): 2161-2172.
- [12] NISHIYAMA T, OGAWA T, SAKAMOTO H. Evaluation of mechanical properties and nano-structure analysis of Au20Sn and Au12Ge solders[J]. Journal of the Society of Materials Science Japan, 2007, 56(10): 913-919.
- [13] 郭德燕, 宋佳佳, 蔡亮, 等. 高低温熔体混合对 Au-20Sn 共晶合金凝固组织的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(11): 1387-1393.

GUO D Y, SONG J J, CAI L, et al. Effect of melt mixing with high and low temperature melts on solidification microstructures of Au-20Sn eutectic alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(11): 1387-1393.

[14] 赵怀志, 宁远涛. 金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003:
 84-100.
 ZHAO H Z NING X T Augum[M]. Changsha: Central

ZHAO H Z, NING Y T. Aurum[M]. Changsha: Central South University Press, 2003: 84-100.

- [15] 李成栋,赵梅,刘光启,等.金属材料速查手册[M].北 京:化学工业出版社,2018:23-31.
- [16] 王小京,朱宇杰,周慧玲,等. 纯锡的速率相关性变形 行为[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(12): 37-40.
  WANG X J, ZHU Y J, ZHOU H L, et al. Rate dependent deformation behavior of pure tin[J]. Electronic Components and Materials, 2014, 33(12): 37-40.
- [17] 刘锐, 王日初, 韦小凤, 等. 双辊甩带制备 Au-20%Sn 焊料及其均匀化退火工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4201-4207.
  LIU R, WANG R C, WEI X F, et al. Au-20%Sn solder prepared by twin-roll method and its homogenized annealing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 4201-4207.
- [18] ZHANG W, MAO Y, SONG J J, et al. Hot compression deformation behaviors and microstructure evolution for brittle Au-20Sn eutectic alloy[J]. Materials Science Forum, 2014, 789: 409-414.
- [19] 韦小凤, 王日初, 彭超群, 等. 退火工艺对 Au-20Sn 钎 料组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(6): 105-109.

WEI X F, WANG R C, PENG C Q, et al. Effect of annealing process on the microstructure of Au-20Sn solder[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(6): 105-109.

[20] 朱绍珍, 陈昊, 赵涛. 热轧和退火对 Au-20Sn 合金箔材 组织和性能的影响[J]. 贵金属, 2021, 42(4): 9-14.
ZHU S Z, CHEN H, ZHAO T. Effect of hot rolling and annealing treatment on microstructure and properties of Au-20Sn alloy foil[J]. Precious Metals, 2021, 42(4): 9-14.