脆性 AgCuSn 带状钎料制备与性能研究

张海龙, 许 昆*, 王春琴, 赵晓然, 刘 毅, 李 伟, 罗锡明 (贵研铂业股份有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明贵金属研究所, 昆明 650106)

摘要:采用破碎制粉的方法,在合金粉末中添加胶粘剂制备出 Ag-22.4Cu-20Sn 带状钎料。用 X 射 线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)、差示扫描量热仪(DSC)及拉伸试验机等手 段对其进行表征分析。结果表明,采用胶粘的方法可将该脆性合金制备成带材,解决其成形问题; 带状钎料在铜母材上形成良好的冶金结合和嵌入结构,提高了钎焊性能;随着钎焊温度的升高和保 温时间的延长,润湿角逐步减小,润湿性变得更好;在 580℃保温 5 min 进行钎焊,接头剪切强度 达到最大。

关键词:金属材料; AgCuSn; 中温带状钎料; 制备; 性能 中图分类号: TG425 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2017)02-0035-07

Preparation and Properties of Brittle AgCuSn Solder Ribbons

ZHANG Hailong, XU Kun^{*}, WANG Chunqin, ZHAO Xiaoran, LIU Yi, LI Wei, LUO Ximing (State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Sino-Platinum Metals Co. Ltd., Kunming Institute of Precious Metals, Kuming 650106, China)

Abstract: Ag-22.4Cu-20Sn solder ribbons were prepared successfully by mixing a moderate adhesive with the broken Ag-22.4Cu-20Sn ingot castings and characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy disperse spectroscopy (EDS), differential scanning calorimetry (DSC) and tensile testing. The results indicated that a brittle alloy could be made into ribbons by adding a moderate adhesive. The brazing property on the copper base was improved, as a result of forming good metallurgical binding and embedded structure. With the increase of brazing temperature and the extension of holding time, the wetting angles become smaller and wetting ability becomes greater. The joint shear strength reached the maximum when the blazing was carried out at 580°C for 5 min.

Key words: metal materials; AgCuSn; mid-temperature solder ribbon; preparation; performance

贵金属中低温钎料几乎均含有大量脆性相,导 致钎料的加工性能很难采用传统工艺(轧制、拉拔等) 加工成所需要的丝材或片材,严重制约其推广应用。 国内外很多专家学者对这类钎料的成分、组织、结 构变化规律进行了研究,采用快速凝固法^[1-3]、热机 械加工法^[4]、包覆热轧/冷轧结合中间退火^[5-6]、叠轧 复合-扩散合金化工艺等方法研究了其成型技术,解 决了部分中低温脆性钎料的成型问题。其中金属叠 轧复合-扩散合金化工艺(D-KH法)是将传统的叠轧 复合工艺与合金化热处理工艺结合起来的一种技术 手段。该方法的基本原理是:将纯金属或合金轧制 成复合带材,在一定的温度、压力和气氛条件下进 行合金化热处理,通过各复层界面间原子的相互扩 散,最终形成均质的钎料合金带材^[7]。该方法的应 用在一定程度上可以解决脆性钎料的成型问题,同 时为脆性材料的加工成型提供了一种新途径。但目

收稿日期: 2016-05-24

基金项目:稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室项目(SKL-SPM-201518)。

第一作者:张海龙,男,硕士研究生,研究方向:贵金属中温钎焊材料。E-mail: 749270917@qq.com

^{*}通讯作者:许 昆,男,教授,研究方向:钎焊材料和工艺。E-mail:xukun@ipm.com.cn

前中低温脆性钎料主要还是以焊膏的形式应用[8-9]。

开展这类钎料成形技术研究可以弥补 400~600℃之间品种较少、可用钎料不足的情况,为多级 钎焊提供新型钎料。本文尝试把 Ag-22.4Cu-20Sn 脆 性中温钎料通过破碎制粉后添加适量胶粘剂,然后 冷轧至一定厚度的方法,将其制备成带材,以期解 决其成形问题。

1 实验部分

1.1 Ag-22.4Cu-20Sn 带状钎料的制备

1.1.1 钎料合金的制备

实验采用银、铜、锡等原材料的纯度(质量分数,下同)均在 99.9%以上,且在称重前都进行了去氧化 膜处理。按照质量百分比 Ag:Cu:Sn=57.6:22.4:20 的 比例分别称量,总量 500 g。

用 QHL-550 型高真空钎焊炉熔炼钎料母合金: 将称量好的原材料放入石墨干锅内,盖紧炉门,真 空抽至 10 Pa 以下后,开启感应电源。待所有原材 料熔化后,保温 5 min 以使合金混合均匀,随炉冷 却至室温再取出铸锭。采用自制破碎机,将铸锭破 碎制粉,粒度为 100 目以下备用。

1.1.2 胶粘剂的选择

胶粘剂是一种通过界面的黏附和内聚作用,能 够把同类或不同类的材料紧密结合在一起的物质。 为了将 Ag-22.4Cu-20Sn 合金粉末制备成满意的带 状钎料,必须要有合乎要求的胶粘剂^[10]。

实验选取 5 种不同成分的胶粘剂,在真空下加热比较其挥发情况,结果如表 1 所列。

表1 不同成分胶粘剂的性状

Tab.1 Characters of different ingredient of adhesives

No.	成分(体积比)	带材	真空加热
		柔韧性	挥发情况
1#	1 份丙烯酸甲酯	十步	能完全
	1份邻苯二甲酸二丁酯	入扒	挥发
2#	2份 502 粘合剂	庙 暗	能完全
	1份邻苯二甲酸二丁酯	昄、 加	挥发
3#	1 份丙烯酸甲酯	兰	稍留痕迹
	1 份甲基丙烯酸环氧丙酯	左	
4#	9份601环氧树脂	标杠	稍留碳黑
	1份618环氧树脂	权灯	
5#	1 份丙烯酸树脂	/日 九7.	稍留碳黑
	1份邻苯二甲酸二丁酯	1民女丁	

根据表 1 的结果,5[#]胶粘剂的综合效果较好, 满足本实验所需要求。 1.1.3 带状钎料的胶粘制备

在合金粉末中添加适量的胶粘剂(1份丙烯酸树 脂和1份邻苯二甲酸二丁酯),并充分混合均匀。由 于胶粘剂的作用,原本分散的合金粉末颗粒聚集粘 合在一起,柔韧且具有塑性。此时用轧机将混合钎 料粉末进行多次冷精轧,至0.5~1 mm 系列厚度, 并进行剪边,表面检查等处理,从而获得外观质量 良好的 Ag-22.4Cu-20Sn 带状钎料成品。

1.2 钎料性能测试与表征

1.2.1 钎焊设备及钎焊工艺

钎焊设备为QHL-550型真空钎焊炉。选取电子 工业常用的铜作为母材,实验前需对铜材表面进行 处理,以去除表面的油污和氧化物等会影响试验结 果准确性的因素。具体方法如下:依次采用400[#]、 600[#]、1000[#]砂纸打磨铜材待焊面及其周围区域,保 证其表面光洁、平整,然后把铜材依次浸入丙酮、 去离子水中用超声波清洗各3min,吹干。表面清 洗好的铜材要尽快进行实验,以免铜材再次氧化污 染。装配时铜材搭接长度为2mm,把质量为0.1g 的Ag-22.4Cu-20Sn带状钎料放置在待焊接区域,使 钎料熔化后流入焊缝,这样有利于气体和杂质的排 出,减少钎焊接头的缺陷。

1.2.2 带状钎料润湿性测试

实验所用铜基板的尺寸为 25×25×2 mm, Ag-22.4Cu-20Sn 钎料的质量均为 0.1 g, 钎料在基板 上的放置方式如图 1 所示。用扫描电镜(SEM)做试 样侧面的投影,从基板和钎料外轮廓交点处做钎料 表面的切线,测量切线的倾角(如图 2 所示)。



Fig.1 Schematic diagram of the spreadability test



图 2 润湿角的测量

Fig.2 An illustration of measuring wetting angles of a molten filler metal drop

对每个试样的投影都测量左右两边的接触角, 并按列式(1)计算润湿接触角 θ₁:

$$\theta_1 = (\theta_{\pm} + \theta_{\pm})/2 \tag{1}$$

式中 θ_{z} 和 θ_{z} 分别为左右两边测量的接触角值。 对同一个试样测量 3 个不同方向投影的 θ_{z} 和 θ_{z} 值, 并求其平均值。

润湿性和铺展性实验在 QHL-550 型真空钎焊 炉中进行,每组工艺参数条件下重复 3 次实验。

1.2.3 钎焊接头强度测试

参照 GB/T 11363-2008^[11]的方法,用岛津 AG-X 100 kN 型万能力学实验机对钎焊接头进行接剪切试验,测试钎焊接头的剪切强度。

1.2.4 分析表征

采用 OLYMPUS BX51M 型金相显微镜(奥林巴 斯公司)进行金相观测;用 XRD-6000 型 X 射线衍射 仪(岛津公司)进行 XRD 表征;用 STA409 PG/PC 型 同步热分析仪(Netzsch 公司)进行样品热分析,所用 参照物为 Al₂O₃,氮气气氛保护(流速为 10 mL/min), 升温速率为 10 K/min。

用 SPM-S3400N 型扫描电子显微镜(日立公司) 观察钎焊接头的剪切断口形貌,并用能谱仪(EDS) 分析断口的微区成分。

2 结果与讨论

2.1 钎料合金的显微组织分析

图 3 为 Ag-22.4Cu-20Sn 脆性中温钎料合金基体 的显微组织,结合其 XRD 图谱(图 4 为)可知,钎料 合金由粗大的枝晶组织(Ag)相和层片状的共晶组织 $\epsilon_2(Ag_5Sn) + \delta(Cu_{41}Sn_{11})以及散乱分布的 \gamma(Cu_3Sn)相$ 组成。



图 3 Ag-22.4Cu-20Sn 钎料合金的微观组织

Fig.3 Microstructure of Ag-22.4Cu-20Sn solder alloys



图 4 Ag-22.4Cu-20Sn 钎料合金的 XRD 图谱

Fig.4 XRD pattern of Ag-22.4Cu-20Sn solder alloys

2.2 合金及带状钎料的熔化特性

为研究钎料的温度特性,用热分析仪进行了合金及胶粘所得带状钎料的示差量热扫描(DSC)测定,结果如图5所示。





钎料合金熔程对焊料的焊接性能有极大的影

响,熔程越小,焊料润湿母材的时间越短,进而减

少对母材的熔蚀,更容易形成均一稳定的焊接接头, 更适用于薄壁微小元件的焊接。由图 5(a)可见, Ag-22.4Cu-20Sn 合金在 551.2℃位置出现明显的吸 热峰,熔程仅 12.7℃。胶粘成带状钎料后(图 5(b)), 其熔点、熔程无明显变化,表明胶粘剂的添加未对 合金性能造成影响。

2.3 胶粘剂和带状钎料的热重-差热(TG-DSC)分析

为研究胶粘剂在带状钎料中发生的变化,对 5[#]胶粘剂和制备所得带状钎料进行了热重-差热分 析,结果如图6所示。





图 6 中, TG 曲线显示的是胶粘剂的质量随温 度的升高而发生的变化。DSC 曲线所反映的是胶粘 剂在不同的温度范围内发生的一系列伴随着热现象 的物理或化学变化。从图 6(a)可以看出,胶粘剂的 质量随温度的升高而逐步减小,当温度达到 380℃ 左右时,质量减小最快;温度超过 450℃以后,质 量不再发生变化,最终残留物约占胶粘剂初始质量 的 0.802%。胶粘剂 DSC 曲线在 103.1℃和 398.1℃ 有 2 个比较明显的吸热峰,分别由胶粘剂成分丙烯 酸树脂和邻苯二甲酸二丁酯挥发吸热造成的。

从图 6(b)可看出, Ag-22.4Cu-20Sn 带状钎料的 质量随温度的升高而逐步减小,且在 307.0℃时质量 减小速率最快;当温度达到 440℃以后,质量不再 发生明显变化,对比图 6(a)的变化,可认为此时胶 粘剂基本挥发完毕。最后残留物约为带状钎料初始 质量的 91.857%。带状钎料 DSC 曲线在 402.9℃和 561.2℃出现 2 个比较明显的吸热峰,分别对应胶粘 剂的挥发和钎料的熔化相变。

2.4 钎焊工艺对钎焊性能的影响

2.4.1 钎焊温度对钎料润湿性的影响

设定保温时间 5 min,当钎焊温度为 570、580 和 590℃时,测定得到带状钎料在铜母材上的润湿 角分别为 13.6°、10.1°和 9.2°。由此可见,随着钎焊 温度的升高,Ag-22.4Cu-20Sn 带状钎料在铜基体上 的润湿角逐渐减小,说明其润湿性随着钎焊温度的 升高而逐渐变好。其原因在于,随着钎焊温度升高, 液态金属原子的迁移能力大大增强,熔融钎料的粘 度减小,液体表面张力和液固界面张力均减小,从 而使熔融钎料更易在母材上润湿铺展,导致润湿角 减小,钎料合金在母材上的润湿性能提高。

2.4.2 保温时间对带状钎料润湿性的影响

设定钎焊温度为 580℃,当保温时间为 3、5 和 8 min 时,测定得到带状钎料在铜母材上的润湿 角分别为 13.1°、10.1°和 8.4°。由此可见,随着保温 时间的延长,带状钎料在铜基体上的润湿角逐渐减 小,并且润湿角减小的趋势逐渐平缓。这是因为在 一定温度下,熔融钎料与基体间的润湿反应达到平 衡状态需要一定的时间。Ag-22.4Cu-20Sn 钎料和铜 基体的润湿过程主要受反应润湿控制,刚开始原子 浓度差较大,原子扩散速率很快,熔融钎料与母材 迅速反应。经过一段时间后,原子浓度差减小,原 子扩散速率放缓,钎料与母材反应也相应放缓。因 此,润湿角和铺展面积刚开始变化速率很快,然后 变化放缓,最后达到平衡状态。

2.4.3 润湿界面组织分析

图 7 为 Ag-22.4Cu-20Sn 带状钎料在铜母材上润 湿后的界面组织形貌。

熔融钎料与母材反应生成固溶体或化合物是形成良好的润湿的关键,也是钎焊过程中实现有效连接的基础。从图7可以看出,铜与钎料之间形成了良好的冶金结合,界面处的过渡层较为明显,结合能谱(EDS)分析可以判定为铜基固溶体相。实验中采用多晶轧制态的铜,而且铜沿散热的反方向呈柱状或胞状向钎料内部生长,不同取向晶粒的反应势垒不同,原子密度较大的晶面的势垒较低,润湿过程中更容易溶解,从而在这些晶粒位置的更容易有新相生成,造成界面形貌凹凸不平。从能谱分析结果可知,铜母材更倾向于与钎料中的锡元素优先反



图 7 钎料合金在铜母材上润湿后的界面组织形貌 Fig.7 Microstructure of the solder alloy on Cu after wetting

应,这与元素的反应焓是一致的。相关文献^[12]指出, 液态钎料中锡与铜母材的溶解焓为-6 kJ/mol,比锡 与银的更低,故而锡率先与铜基板反应打破界面平 衡导致反应润湿。

图 8 为钎料与铜基体在 580℃保温 5 min 形成 的典型钎焊接头界面微观组织图像。



图 8 钎焊界面背散射电子像



从图 8 可以看出 Ag-22.4Cu-20Sn/Cu 钎焊接头 明显分为 3 个区域:铜基体、焊缝两侧扩散区(DZ) 和残留钎料焊缝区(WZ)。焊缝的微观组织表明钎料 合金与铜母材发生了良好的冶金反应,形成了冶金 结合。由于不同区域中的相种类很多,因此对选定 区域(图 9)进行能谱扫描,结果列于表 2。



图 9 EDS 选区 Fig.9 Selected areas of EDS

表 2 选定区域的 EDS 分析结果(摩尔分数,%)

Tab.2 EDS analysis results of selected areas (mole fraction, %)

Spot No.	Ag	Cu	Sn	Possible phase
А	0	100	0	Cu
В	4.85	86.01	9.14	(Cu)
С	2.59	76.09	21.32	Cu ₃ Sn
D	0.59	18.50	10.90	(Ag)+Ag ₃ Sn
Е	3.05	83.66	13.29	Cu ₁₃ Sn ₃

结合表 2 结果可见, 在钎料与铜母材之间形成 了明显的扩散层, 主要由铜和锡及少量的银组成, 该区(DZ 区-B)主要为富铜的固溶体相。从图 9 可以 看出, 在扩散层(DZ 区)与残留焊料(WZ 区)界面处 扩散层前段呈"扇贝状"嵌入残留钎料内部。此外, 白色的富银相在焊缝的中心位置形成一条明显的分 界线。

当钎料升温至液态过程中,母材铜向液相溶解, 随着温度的升高,溶解速度加快,致使铜在靠近界 面处的局部浓度很大,并在液相中形成浓度梯度。 当加热完成液相冷却过程中,靠近铜母材部分液相 由于过冷度较大该部分液相率先在母材基体上形核 生长形成铜基固溶体,并向液相中心区域扩展。由 于液相中存在的溶质偏析导致焊缝不同部位铜基固 溶体的生长动力学差异,进而形成在过渡层与液相 界面形成"扇贝"状凸起嵌入残余焊料中,这种嵌 入式结构有利于提高焊缝的力学性能^[13]。当温度进 一步降低,液相中富银相在固液界面边界析出,并 向焊缝中心区域生长,当从两边界面处长大的富银 相在焊缝中心区域相遇时即停止生长,形成一条明 显的分界线。此时焊缝凝固完成,形成质量优良的 焊接接头。

2.5 钎焊工艺对钎焊接头强度的影响

2.5.1 温度和时间对钎焊接头剪切强度的影响

固定保温时间为 5 min,当钎焊温度为 570、580 和 590℃时,测得 Ag-22.4Cu-20Sn/Cu 带状钎焊接 头平均剪切强度分别为 116.5、147.0 和 130.7 MPa。 钎焊温度为580℃时,钎焊接头的剪切强度最高。

固定钎焊温度为 580℃,当钎焊保温时间 3、5 和 8 min 时,测得带状钎料和铜基体形成的钎焊接 头平均剪切强度分别为 125.2、147.0 和 136.1 MPa。 表现出随保温时间延长先升高再降低的趋势,当保 温时间为 5 min 时,钎焊接头的剪切强度最高。 2.5.2 钎焊接头断裂失效机制分析

图 10、11 分别为 570℃、580℃保温 5 min 所 得 Ag-22.4Cu-20Sn/Cu 钎焊接头的断口形貌扫描电 镜图像。



图 10 钎焊接头的断口形貌(570℃, 5 min) Fig.10 Fracture morphology of the brazed joint (570℃, 5 min)

从图 10 可以看出, 钎焊接头断口比较平整, 河 流花样发达, 呈现出明显的脆性解理断裂特征。解 理断裂是金属在应力作用下,由于原子结合键的破 坏而造成的沿解理平面的断裂。解理面一般是表面 能量最小的晶面,这样就造成了有台阶的断裂面。 台阶表面上各个平面被解理台阶分开,而台阶是由 连接解理裂纹片的薄带断裂后形成的。解理断裂是 脆性断裂的一种,表现为穿晶断裂,在裂纹萌生后 扩展阶段倾向于汇集成为较大的的裂纹, 从而减少 裂纹扩展阶段所需消耗的能量,导致钎焊接头表现 出较低的剪切强度。



图 11 钎焊接头的断口形貌(580℃, 5 min) Fig.11 Fracture morphology of the brazed joint (580℃, 5 min)

焊接温度提高到 580℃,将图 11 与图 10 对比, 断口中出现了大量剪切韧窝,部分区域塑性变形痕 迹非常明显,可以认为属于脆性-韧性混合断裂。这 是因为焊缝中为粗大的(Ag)相与细小的等轴晶粒混 合组织,新生增强相呈颗粒状弥散分布在焊缝中, 晶界上聚集的增强相数量显著减少,没有使得晶界 弱化,剪切过程中位错在颗粒处大量塞积形成位错 环,位错环越来越多,最后撕裂形成韧窝。韧窝形 成使焊缝的塑性提高从而表现出较高的剪切强度。

3 结论

 Ag-22.4Cu-20Sn 脆性中温钎料合金基体的 显微组织主要由粗大的枝晶(Ag)相和层片状的共晶 组织 ε2(Ag₅Sn)+δ(Cu₄₁Sn₁₁)相以及散乱分布的 γ(Cu₃Sn)相组成。

 2) 以丙烯酸树脂-邻苯二甲酸二丁酯(体积比 1:1)作为的胶粘剂,在450℃以上基本挥发完全。将 其用于胶粘 Ag-22.4Cu-20Sn 合金粉末为带状钎料, 对合金的熔点、熔程无明显影响。

3)带状钎料在铜母材上的润湿角随着钎焊温度的升高、保温时间的延长而减小,润湿性变得更好。钎料在铜母材上形成了良好的冶金结合,扩散区与残留焊料界面处扩散层前段呈"扇贝状"嵌入残留钎料内部,有利于提高焊缝的力学性能。

4) 随着钎焊温度的升高和保温时间的延长, Ag-22.4Cu-20Sn/Cu 钎焊接头剪切强度呈现先增大 后减小的趋势。钎焊温度为 580℃,保温时间 5 min 时,钎焊接头的剪切强度达到最大(147.0 MPa)。

参考文献:

- 邹家生, 许志荣, 初雅杰, 等. 非晶态焊接材料的特性 及其应用[J]. 材料导报, 2004, 18(4): 17-26.
 ZOU J S, XU Z R, CHU Y J, et al. Characteristics and application of amorphous welding materials[J]. Materials review, 2004, 18(4): 17-26.
- [2] KIMJO YOSHIO. Manufacture of Au-Sn alloy foils by electroplating for brazing: JP200026989[P]. 1998-07-10.
- [3] HOSKING F M, STEPHENS J J, REJENT J A. Intermediate temperature joining of dissimilar metals[J].
 Welding journal, 1999, 78(4): 127.
- [4] 莫文剑, 王志法, 崔大田. Au-Ag-Si 钎料薄带加工工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2005, 34(1): 19.
 MO W J, WANG Z F, CUI D T. Study on processing of the Au-Ag-Si solder ribbon[J]. Hot working technology, 2005, 34(1): 19.
- [5] OPPERMANN H, HUTTER M, KLEIN M, et al. Flip

chip reliability of GaAs on Si thin film substrates using AuSn solder bumps[J]. Materials, technology and reliability of advanced interconnects, 2005, 863: 327-338.

[6] 周涛,汤姆·鲍勃,马丁·奥德,等.金锡焊料及其在电子器件封装领域中的应用[J].电子与封装,2005,5(8):
5-8.

ZHOU T, TOM BOBAL, MARTIN OUD, et al. An introduction to eutectic Au/Sn solder alloy and its performs in microelectronic/optoelectronic packaging applications[J]. Electronics & packaging, 2005, 5(8):5-8.

- [7] 赵明, 许昆, 张海龙, 等. D-KH 法及其在贵金属钎料 制备中的应用[J]. 贵金属, 2015, 36(4): 81-87.
 ZHAO M, XU K, ZHANG H L, et al. D-KH method and its application in preparation of precious metal-based brittle solder alloys[J]. Precious metals, 2015, 36(4): 81-87.
- [8] 叶建军, 涂传政, 谭澄宇, 等. Ag-Cu-Ge-Sn 新型中温 焊膏的研制与应用[J]. 新技术新工艺, 2007(5): 42-44. YE J J, TU C Z, TAN C Y, et al. The preparation and application of new Ag-Cu-Ge-Sn middle temperature alloy solder paste[J]. New technology & new process, 2007(5): 42-44.
- [9] 李伟, 许昆, 陈登权, 等. 金锡合金钎料焊膏与箔材钎 焊性能对比研究[J]. 贵金属, 2013, 34(1): 25-28.
 LI W, XU K, CHEN D Q, et al. Performance comparison between Au-Sn alloy solder paste and solder foil[J].
 Precious metals, 2013, 34(1): 25-28.
- [10] 张文尚. 镍基高温粘带钎料[J]. 材料工程, 1993(1): 8.
 ZHANG W S. Nickel-base high-temperature binding brazing ribbon[J]. Journal of materials engineering, 1993(1): 8.
- [11] 全国焊接标准化技术委员会. 钎焊接头强度试验方法 GB/T 11363-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
 SAC/TC 55. Test method of the strength for brazed and soldered joint: GB/T 11363-2008[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008.
- [12] EUSTATHOPOULOS N, NICHOLAS M G, DREVET B. et al. Wettability at high temperature[M]. Elsevier, 1999: 416.
- [13] 劳邦盛,高苏. 固-液金属界面上金属间化合物的非平衡生长[J]. 物理化学学报,2001,17(5):453-456.
 LAO B S, GAO S. Nonequilibrium growth of intermetallics at the interface of liquid-solid metal[J]. Acta physico-chimica sinica, 2001, 17(5): 453-456.