

引用格式:董伟,葛凤跃,许富民.脉冲微孔喷射法制备 AuSn20 焊球及组织演变行为[J].材料工程,2026,54(9):91-98.
DONG Wei, GE Fengyue, XU Fumin. Preparation and microstructure evolution of AuSn20 solder ball based on pulsated orifice ejection method[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(9): 91-98.

脉冲微孔喷射法制备 AuSn20 焊球及组织演变行为

董 伟*, 葛凤跃, 许富民

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:在电子封装领域,金锡共晶合金(AuSn20)作为关键焊接材料,其制备工艺直接影响封装性能和可靠性。然而,受限于 AuSn20 合金的脆性,目前 AuSn20 焊球尚无高效的制备方法。本研究采用脉冲微孔喷射技术实现了 AuSn20 焊球的高精度、高一一致性的按需制备。结果表明,在最优工艺条件下制备了多种规格 AuSn20 焊球,最小规格为 50 μm ,目标粒径标准偏差最大为 1.58 μm ,显著提高了制备精度。微观组织分析揭示,焊球主要由 δ -AuSn 相和 ζ' -Au₅Sn 相共晶组织构成,未观察到异常新相生成。回流处理后,焊球内部成分分布趋于均匀。研究发现,由于扩散阻挡层 Ni 原子的协同扩散,在界面接头处形成了 (Au, Ni)Sn 和 (Au, Ni)₃Sn₂ 等金属间化合物。所制备的 AuSn20 焊球不仅实现了粒径精确可控和热历史一致性,且在模拟服役条件下表现出优异的界面稳定性和结构完整性,为金锡合金钎料在先进电子封装领域开辟了新的应用途径。

关键词:脉冲微孔喷射法; AuSn20 合金; 焊球制备; 粒径调控

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000864 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000864

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)09-0091-08

Preparation and microstructure evolution of AuSn20 solder ball based on pulsated orifice ejection method

DONG Wei*, GE Fengyue, XU Fumin

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: In the field of electronic packaging, Au-Sn eutectic alloy (AuSn20) serves as key solder materials, and its preparation process directly affects the packaging performance and reliability. However, due to the brittleness of AuSn20, there is currently no efficient method for the preparation of AuSn20 solder balls. This study uses pulsated orifice ejection method to achieve the high precision and consistency of the on-demand preparation of AuSn20 solder balls. The results show that various specifications of AuSn20 solder balls are prepared under optimal process conditions, with the smallest specification being 50 μm , and the maximum standard deviation of the target particle size being 1.58 μm , significantly improving the preparation accuracy. Microstructural analysis reveals that the solder balls are mainly composed of δ -AuSn and ζ' -Au₅Sn eutectic phases, with no abnormal new phases observed. After reflow treatment, the composition distribution inside the solder ball tends to be uniform. Interface reaction studies show that due to the synergistic diffusion of Ni atoms in the diffusion barrier layer, a complex intermetallic compounds (Au, Ni)Sn and (Au, Ni)₃Sn₂ are formed at the interface joint. The AuSn20 solder balls prepared in this study not only achieve precise control of particle size and consistent thermal history, but also show excellent interface stability and structural integrity under simulated service conditions, opening up new application avenues for Au-Sn alloy brazing materials in advanced electronic packaging.

Key words: pulsated orifice ejection method; AuSn20 alloy; solder ball preparation; particle size control

AuSn20(质量分数/%)共晶合金焊料作为一种无铅钎焊材料具有优异的抗蠕变、抗疲劳性能,以及良好的导电性、导热性和耐蚀性,被广泛应用于微机电系统(MEMS)、光学器件和生物医学器件领域^[1-2]。从Au-Sn二元相图可知,在共晶温度为278℃时,质量分数为80%Au和20%Sn的Au-Sn共晶合金由 ζ' -Au₅Sn相和 δ -AuSn组成^[3]。由于 ζ' -Au₅Sn相属于六方晶系,脆性较大,AuSn20合金更多地以焊膏、预制片的形式使用。在工业焊接过程中,助焊剂的使用是必不可少的。然而,助焊剂在受热后容易挥发,其挥发气体可能会被困在焊点内部,从而导致在焊点界面处孔洞的形成^[4-5]。同时在先进电子封装中,芯片与基板之间的间距会进一步缩小,这给助焊剂的清除带来了极大的困难。金锡预制片在熔化后,受芯片挤压存在明显溢出的问题,也严重影响芯片的长期可靠性^[6]。球栅阵列封装(ball grid array packaging, BGA)焊球作为先进封装使用的关键技术被广泛应用于芯片领域,由于AuSn20合金材质较脆,难以进行批量制备工业级焊球,极大地限制了AuSn20合金的进一步应用,目前AuSn20焊球的高效制备方法未见相关报道。

先进电子封装用焊球应保证其具有圆球度高、尺寸均匀和粒度分布窄等特点。目前封装使用的焊球制备方法有雾化法、切丝重熔法以及均匀液滴喷射法等^[7-11],但现有技术都存在一些局限性,雾化法所需原料较多且需要进行筛分处理,获取目标尺寸的AuSn20焊球转化率较低。切丝重熔法难以对脆性材料的体积进行精确控制,效率较低。均匀液滴喷射法调控小尺寸焊球困难,同时难以承受高温,在高温焊

料制备方面受限。Yoon等^[12]探究了AuSn20合金在ENIG基板上不同温度下的热疲劳行为。Huang等^[13]报道了通过真空熔炼方法在AuSn20合金基体中添加Ag可形成(Au,Ag)₅Sn,降低了堆垛层错能,从而提高塑性。然而,以往关于AuSn20合金焊料的研究主要集中在金属化合物服役过程中的界面反应,制球方法主要为切丝重熔及机械合金化,这很难保证在工业应用过程中AuSn20焊球制备的一致性。为了满足电子产品向更小型化和高度集成化发展的需求,AuSn20焊球需要实现更精细的尺寸控制和更高的制造精确度。

本工作基于脉冲微孔喷射法(pulsated orifice ejection method, POEM)制备出单分散、尺寸均匀、热历史一致的微米级AuSn20焊球,探究了焊球制备过程中驱动电压、上升沿时间和微孔直径等工艺参数对喷射稳定性和焊球粒径的影响,并分析了不同规格焊球的表面、相组成。以200 μm 规格AuSn20焊球为例,通过回流焊探究了界面组织演变行为。本工作旨在为AuSn20合金在先进电子封装领域的微凸点互连应用提供理论依据和技术支撑。

1 实验材料与方法

AuSn20焊球的制备设备如图1所示,由五个核心部分组成:单分散液滴喷射系统、压电陶瓷驱动系统、温度控制系统、真空控制系统以及收集系统。首先将铸态AuSn20合金置入坩埚中。通过机械泵和分子泵的协同作用,将腔室内的气压降至 10^{-3} Pa,确保腔室

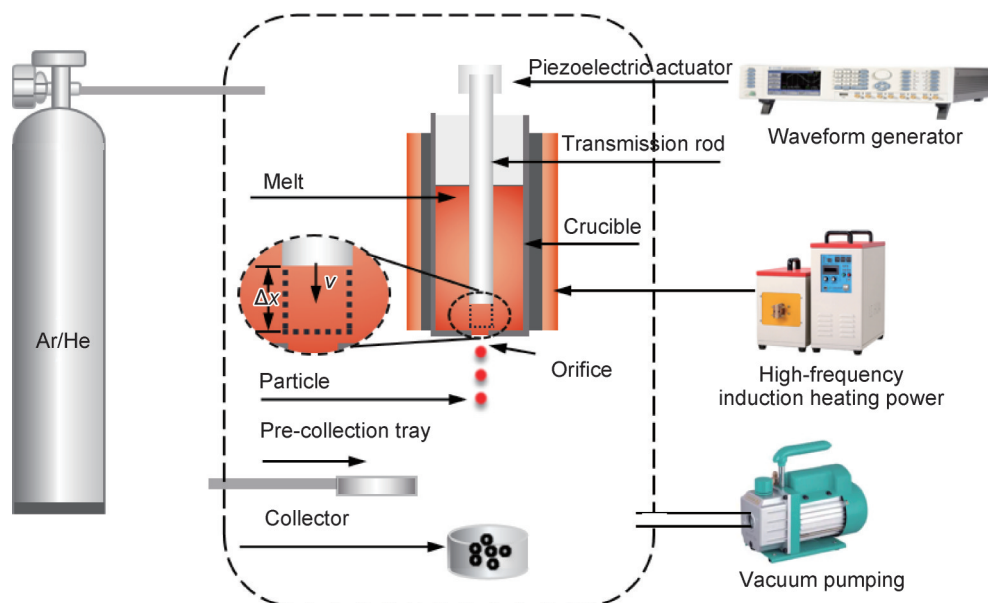


图1 脉冲微孔喷射设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of pulsed orifice ejection equipment

内的氧含量降至最低。根据实验的具体需求,将保护气引入腔室内,直至达到一个标准大气压。接下来,温度控制系统将坩埚内的原料加热至 430 ℃,并保温一定时间以确保 AuSn20 合金完全熔化。

在实验阶段,压电陶瓷驱动系统中使用的波形如图 2 所示,由时间(横坐标)和驱动电压(纵坐标)构成,根据作用时间分为上升沿(t_{up})、保持沿(t_{hold})和下降沿(t_{fall})三个阶段,对应传动杆向下运动、保持静止和恢复到原位置三个运动状态。它们共同决定了传动杆的位移和速度。压电陶瓷驱动系统驱动传动杆,将在熔体中产生有序的局部扰动传递至微孔处,使得

AuSn20 熔体克服微孔局域的表面张力,从而喷出形成微液滴并在下落过程中凝固形成焊球。最终,这些焊球被收集罐收集。具体的实验参数详见表 1。

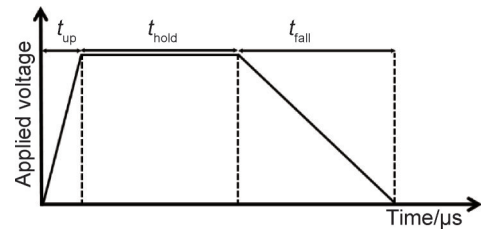


图 2 脉冲波形示意图

Fig.2 Schematic diagram of pulse waveform

表 1 AuSn20 焊球制备的关键工艺参数

Table 1 Key process parameters of AuSn20 solder ball preparation

Parameter	Temperature/℃	Orifice diameter/μm	Frequency/Hz	$t_{up}/\mu s$	$t_{hold}/\mu s$	$t_{fall}/\mu s$	Pressure/kPa	Voltage/V	Rod distance/mm
Value	1200	50/100/200/300	100	50-300	1250	2250	0-0.1	30-75	0.1-2.0

通过光学显微镜(OM, LV100NPOL)拍摄粒子图片,利用 WinRoof 2018 图形分析软件处理分析粒径、圆球度及分布等相关参数。在回流处理中,基板选用 150 μm 焊盘、化学镀镍沉金(ENIG),其中 Ni 作为扩散阻挡层。将制备的 AuSn20 焊球与基板浸入乙醇中超声清洗 60 s。接下来,在最高温度 330 ℃下回流 60 s 后冷却至室温。通过金相处理方法制备样品,使用配备能谱(EDS)的扫描电子显微镜(SEM, SU5000)分析微观结构和组成成分。

2 结果与分析

2.1 AuSn20 焊球的制备及尺寸调控

在焊球制备过程中,微孔的直径是决定焊球尺寸范围的关键因素。传动杆的最大运动距离 Δx 随着驱

动电压的变化而变化,这一距离由脉冲波形中的驱动电压所控制。在固定电压条件下,即 Δx 保持不变时, t_{up} 越短,意味着传动杆在熔体中的振动速度越快,从而拥有更大的动能,对熔融态的 AuSn20 合金产生更强的压力扰动。相反,当 t_{up} 保持不变,即传动杆速度固定时,驱动电压的增加会导致对熔融态 AuSn20 合金的扰动增强。综上所述, AuSn20 焊球尺寸的主要影响因素包括微孔直径、驱动电压以及上升沿 t_{up} 。

为探究驱动电压对焊球粒径调控的影响,采用 $t_{up}=100 \mu s$, 孔径(orifice diameter, OD)分别选取 100、200、300 μm,在不同驱动电压下探究 AuSn20 焊球的粒径变化。实验结果由图 3(a)可知,随着驱动电压的增大, AuSn20 焊球粒径呈现增大趋势。以 200 μm 孔径为例,随着电压从 40 V 到 70 V,粒径均值也从 183 μm 逐渐增大至 219.6 μm。主要由于电压增大带

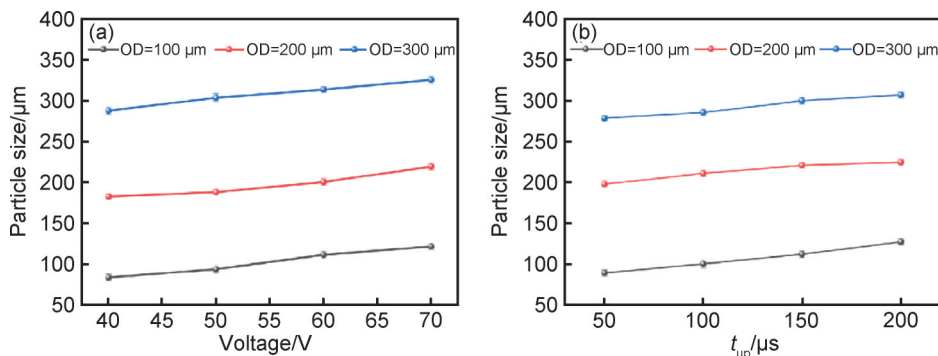


图 3 波形关键参数对粒径的影响

(a) 粒径随驱动电压变化(t_{up} 为 100 μs); (b) 粒径随上升沿 t_{up} 变化(驱动电压为 50 V)

Fig.3 Effect of key waveform parameters on particle size

(a) particle size change with driving voltage (t_{up} : 100 μs); (b) particle size change with t_{up} (driving voltage: 50 V)

动传动杆振动距离 Δx 增大,从而使得熔融态 AuSn20 受到的压力扰动更大,最终通过微孔排出更多体积的 AuSn20 液滴,经快速凝固后形成 AuSn20 焊球。同时在孔径一定时,通过调节驱动电压保证稳定喷射过程中,发现 AuSn20 焊球粒径范围维持在 $39.0\ \mu\text{m}$ 以内。如图 3(b) 所示,上升沿 t_{up} 对粒径的最大调控范围在 $26.6\ \mu\text{m}$ 以内,与上升沿相比,驱动电压具有更大的粒径调控空间,并且调控范围不随孔径变化而改变。

在制备 AuSn20 焊球的过程中,粒径的调控是一个复杂的过程,受到多种因素的影响。图 4 为上升沿和驱动电压对 AuSn20 焊球喷射窗口图。在实验中,选择微孔直径为 $200\ \mu\text{m}$ 。图中红色三角形标记了在特定驱动电压和上升沿条件下设备无法喷射出液滴的临界状态。具体参数为:上升沿 t_{up} 设定为 $250\ \mu\text{s}$,保持沿时间为 $1000\ \mu\text{s}$,下降沿时间为 $1000\ \mu\text{s}$ 。黄色区域表示无法喷射出液滴的区域,而绿色区域则表示可以成功喷射出液滴的区域。从图 4 中可以明显看出,上升沿和驱动电压的相互作用对于控制熔体的喷射至关重要。当驱动电压低于 $3\ \text{V}$ 或上升沿超过 $275\ \mu\text{s}$ 时,液滴将无法喷射出来。这可能是因为电能转化为传动杆往复振动的能量不足,无法克服熔融态金属的表面张力。因此,为了更精确地调控目标粒径,在微孔直径固定的情况下,应首先通过调整驱动电压来

控制粒径范围,然后调整上升沿进一步细化目标粒径。

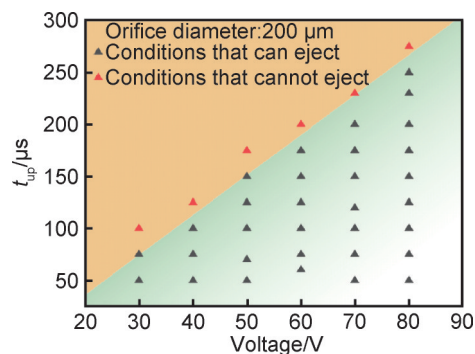


图4 基于上升沿和驱动电压的 AuSn20 焊球稳定制备窗口图
Fig.4 Window diagram of AuSn20 solder ball stable preparation based on rising edge and driving voltage

利用脉冲微孔喷射技术,通过调整微孔直径、驱动电压和上升沿,成功制备了目标粒径为 50 、 100 、 200 、 $300\ \mu\text{m}$ 的 AuSn20 焊球,图 5(a)~(d) 展示了不同规格焊球的表面形貌,图 5(e)~(h) 分别对应于图 5(a)~(d) 的焊球粒度分布,其中 MD 为平均粒径,PSD 为粒径分布范围,SD 为标准偏差,SPHT 为圆球度。焊球的 MD 分别为 52.7 、 102.8 、 203.0 、 $303.3\ \mu\text{m}$,SD 分别为 0.78 、 1.23 、 1.33 、 $1.58\ \mu\text{m}$ 。通过对影响粒径的因素进行精细调控,能够实现目标粒径焊球的稳定批量制备。

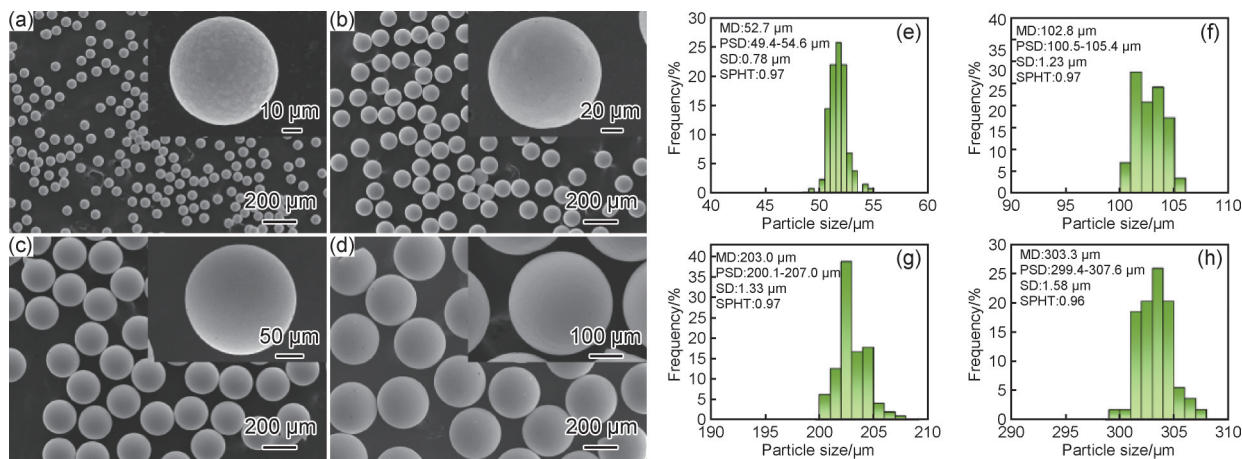


图5 AuSn20焊球的 SEM 图和粒度分布

(a) $52.7\ \mu\text{m}$; (b) $102.8\ \mu\text{m}$; (c) $203.0\ \mu\text{m}$; (d) $303.3\ \mu\text{m}$; (e)~(h) 分别对应于图(a)~(d) 的焊球粒度分布

Fig.5 SEM images and average size distributions of AuSn20 solder ball

(a) $52.7\ \mu\text{m}$; (b) $102.8\ \mu\text{m}$; (c) $203.0\ \mu\text{m}$; (d) $303.3\ \mu\text{m}$; (e)~(h) solder ball size distributions corresponding to Fig.(a)~(d), respectively

对目标粒径为 100 、 200 、 $300\ \mu\text{m}$ 的 AuSn20 焊球进行了 XRD 分析,如图 6 所示,所有样品均由 ζ' -Au₅Sn 相和 δ -AuSn 两相构成,没有其他多余相产生。

2.2 凝固氛围对焊球表面的影响

在焊球下落过程中,凝固气氛的差异可能导致焊

球凝固时间和表面形貌的变化,进而对金锡焊球在光电器件封装中的良率有着直接影响。不同凝固氛围下的导热系数不同,这导致焊球的冷却速率和凝固时间存在差异。因此,通过实验结合理论计算,分析了熔融态金锡在 Ar 和 He 氛围下的凝固过程。

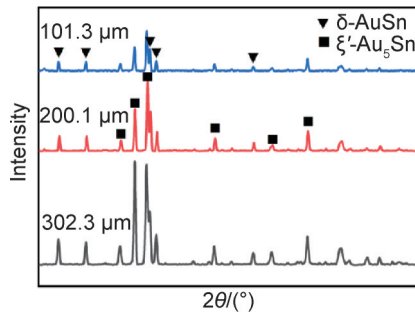


图 6 AuSn20 焊球的 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of AuSn20 solder ball

在实验中,设定了 100 Hz 的频率、200 μm 的孔径、6 V 的驱动电压和 100 μs 的上升沿时间,分别在 Ar 和 He 氛围中制备了 AuSn20 焊球。鉴于焊球的粒径微小,在模拟过程中做出了两个基本假设:一是熔融态金锡内部的温度是均匀的;二是焊球仅通过表面进行热交换。环境温度设定为 25 $^{\circ}\text{C}$,并采用牛顿冷却模型来计算温度变化,具体计算公式如式(1)^[14]所示,详细的计算过程可以参考文献[16-18]。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{6h}{\rho Cd} (T - T_{\text{sur}}) + \frac{6\epsilon\sigma}{\rho Cd} (T^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (1)$$

式中: T 为实际温度; t 为时间; C 为焊料的质量热容; d 为焊球直径; h 为气体对流换热系数; T_{sur} 为环境温度; ϵ 为发射率; σ 为斯蒂芬波尔兹曼常数; ρ 为焊料的密度。所使用的热物性参数详见表 2^[15],其中 λ_g 为热导率, μ_g 为黏度系数, C_g 为比热容。

表 2 凝固过程中温度计算使用的物性参数^[15]

Table 2 Physical properties used in temperature calculation during solidification^[16]

Atmosphere	$\lambda_g/$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$\rho_g/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\mu_g/$ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	$C_g/$ ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Ar	1.763×10^{-2}	1.624	22.7×10^{-6}	0.522
He	1.527×10^{-1}	0.163	19.93×10^{-6}	5.193

图 7 为不同凝固氛围下 AuSn20 焊球表面温度随着时间的曲线以及分别在 Ar、He 氛围下制备 AuSn20 焊球的表面形貌。可以看出在 Ar 氛围下的 AuSn20 焊球表面光滑,粒径均一,圆球度高,但在 He 氛围下制备的金锡焊球在其表面出现凹陷。由表 2 可知,在相同条件下 He 具有更大热导率,能够使得热量可以更快地从固体内部传递到表面,从而增加与流体的热交换速率,使得对流换热系数更高,冷却速率更高。表 3 为 AuSn20 的物理参数, T_m 为熔点, Q 为融化潜热。通过表 3 数值计算可知,在相同初始温度及实验条件下,He 凝固氛围下的 AuSn20 到达凝固点需要 0.015 s,Ar 氛围下需要 0.03 s,冷却速率相差一倍。熔融态金锡从孔口

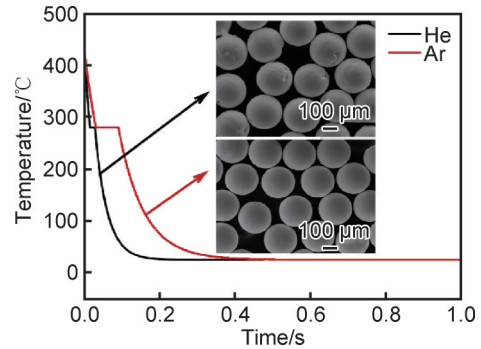


图 7 Ar 及 He 凝固氛围下 AuSn20 焊球的温度变化曲线

Fig.7 Temperature variation curve of AuSn20 solder ball under Ar and He solidification atmosphere

喷出时液滴在颈缩作用后会产生回弹,在 He 氛围下冷却速率过高,由于表面张力及黏度作用,还未形成圆球状就已经完全凝固,进而 AuSn20 焊球的表面产生凹陷。通过模型分析,能够更精确地预测和控制焊球的凝固过程,从而优化光电器件封装的良率和焊球的质量。

表 3 AuSn20 的物性参数

Table 3 Physical property parameters of AuSn20

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	T_m/K	$Q/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
14520	551	20.10

2.3 AuSn20 焊球组织分析

图 8 显示了在 Ar 氛围下调控制备粒径为 203.0 μm 的 AuSn20 焊球及截面显微组织。如图 8(a)所示,焊球圆球度高且表面光滑。由图 8(b)可以看出,焊球截面边缘中出现了由边缘向中间生长的树枝晶,并且中心处没有明显树枝晶存在。根据 Au-Sn 二元合金平衡相图^[3]可知,在平衡凝固条件下 AuSn20 合金的凝固组织由脆性六方晶格 δ -AuSn 相和 ζ' -Au₅Sn 相组成的层片共晶组织。在凝固过程中 AuSn20 液滴表面受到凝固氛围影响,较高的冷却速率使得树枝晶由表面向中心生长。由于在非平衡凝固过程中, δ -AuSn 相和 ζ' -Au₅Sn 相发生相选择,亮白色的 ζ' -Au₅Sn 相作为初生相析出, δ -AuSn 相被抑制,即发生竞争形核与生长。当液滴合金到达共晶温度时,发生共晶反应,形成 δ -AuSn 和 ζ' -Au₅Sn 相缠绕的共晶组织。但初生相 ζ' -Au₅Sn 占整个焊球体积分数较少,对基体的共晶成分影响很小。对图 8(c)中标记处进行 EDS 点分析,初生相 ζ' -Au₅Sn 的组成为 79.91% Au (原子分数,下同)和 20.09% Sn,其中 Sn 的含量高于理论值。由 Aziz 溶质保留模型^[16]可知,晶体生长过程由于仅受晶体-熔体界面上原子的撞击频率的限制,比溶质-溶剂重新分布过程发生得更快,当溶质的生长速度快于试图逃逸

的原子扩散运动时,溶质就会被完全捕获。在非平衡凝固过程中,由于 AuSn20 焊球冷却速率高,凝固速率较高,Sn 原子未能充分扩散就已形成初生相

ζ' -Au₅Sn,最终发生“溶质捕获”现象。经图 6 的 XRD 图谱证实 AuSn20 焊球由 δ -AuSn 相和 ζ' -Au₅Sn 相组成,并无其他新相组成。

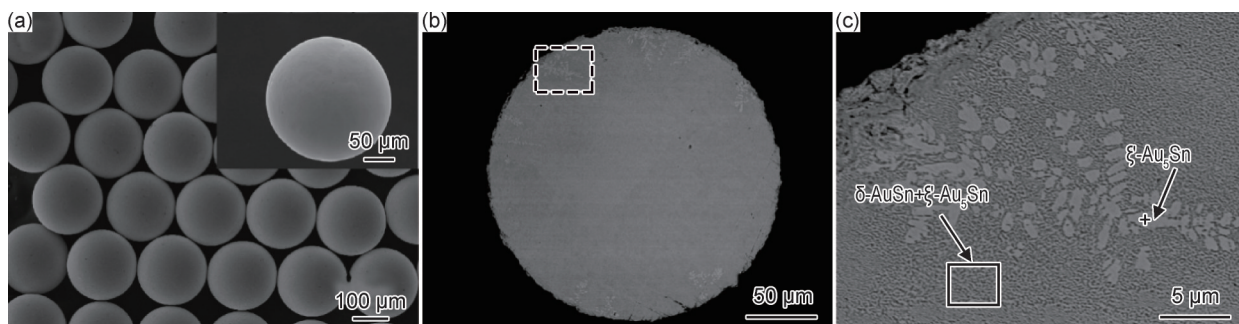


图 8 粒径为 203.0 μm 焊球表面及截面显微组织

(a) AuSn20 焊球的表面形貌; (b) AuSn20 焊球的截面组织; (c) 图(b)标记处放大图

Fig.8 Surface and cross section microstructures of solder ball with diameter of 203.0 μm

(a) microstructure of AuSn20 solder ball; (b) cross section structure of AuSn20 solder ball; (c) enlarged image of the mark in Fig.(b)

2.4 AuSn20 焊球/ENIG 界面分析

为探究制备的 AuSn20 焊球与 ENIG 基板的界面反应,选取粒径为 203.0 μm 的 AuSn20 焊球,使用 ENIG 作为基板,在回流焊机中以最高温度 330 $^{\circ}\text{C}$ 进行回流 60 s,然后冷却至室温。回流过程中没有使用助焊剂。图 9 展示了 AuSn20 焊球在 ENIG 基板上经回流处理后的焊球截面形貌及组织分析。与机械合金化制备的 AuSn20 箔材^[17]相比,界面处生成的化合物

更均匀。图 9(b)为焊球内部边缘处的局部放大图,其中 δ -AuSn 相和 ζ' -Au₅Sn 相互相缠绕,形成均匀的共晶组织。AuSn20 焊球与 ENIG 基板接头处的显微组织如图 9(c)所示,在界面处最初基板的 Au 层消失,界面有黑灰色棒状相和薄层新相产生。在回流过程中焊球内部枝晶偏析消失,形成 δ -AuSn 相和 ζ' -Au₅Sn 相组成的共晶组织,同时 ENIG 基板中的 Au 层很快溶解到熔融 AuSn20 焊料中。基板中 Au 层较薄,对焊球

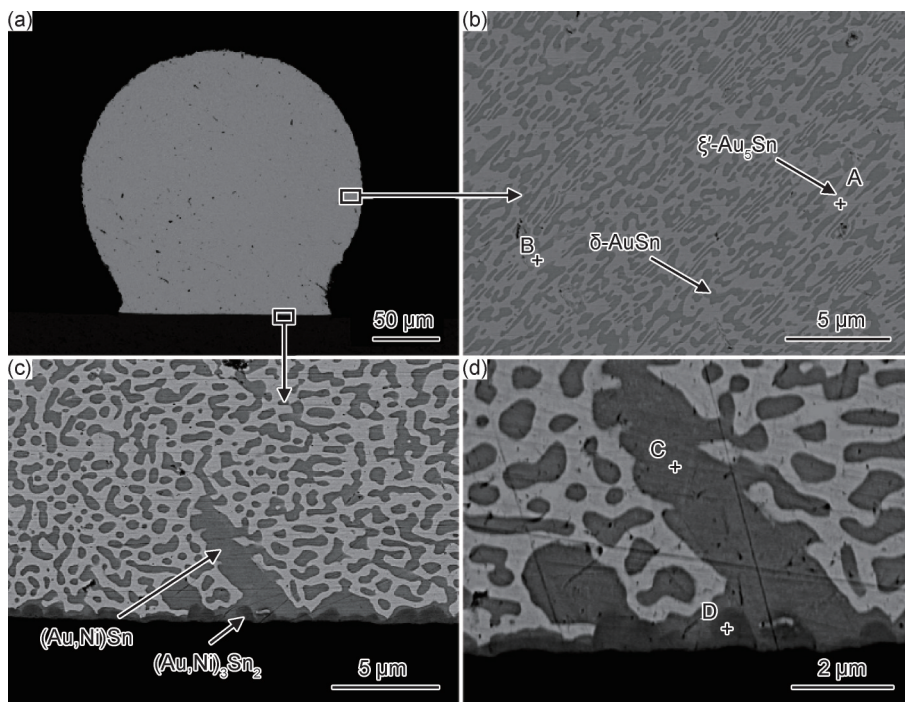


图 9 AuSn20/ENIG 界面的横截面 SEM 图像

(a) 在 330 $^{\circ}\text{C}$ 下回流 60 s 后的凸点形貌; (b) 焊球边缘组织局部放大图; (c) AuSn20-ENIG 界面组织; (d) 图(c)的局部放大图

Fig.9 Cross-sectional SEM images of AuSn20/ENIG interfaces

(a) bumping morphology after 60 s at 330 $^{\circ}\text{C}$ reflow; (b) locally enlarged image of solder ball edge structure;

(c) AuSn20-ENIG interface structure; (d) locally enlarged image of Fig.(c)

整体成分造成的影响可以忽略。与图 8(c)相比,焊球截面中的 ζ' -Au₅Sn 相枝晶偏析消失,焊球在回流过程中发生重熔, ζ' -Au₅Sn 初生相和 δ -AuSn 相重新融化形成共晶组织。

如图 9(c)所示,在 AuSn20-ENIG 界面接头处看到有棒状及薄层状化合物存在,焊球和 ENIG 基板处之间发现两种反应产物。经 EDS 测试,图 9(b),(d)中标记相的化学含量如表 4 所示。棒状反应产物的组成为 5.53%Ni、45.28%Au 和 49.19%Sn,(Au+Ni)与 Sn 的原子分数比为 50.71:49.19,接近 1:1,表明反应产物是(Au,Ni)Sn 金属间化合物(IMC)。

表 4 图 9 中标记相的化学成分

Table 4 Chemical composition of phase marked in Fig.9

Point	Atom fraction/%			Phase
	Au	Ni	Sn	
A	82.73		17.27	Au ₅ Su
B	52.77		47.23	AuSu
C	45.28	5.53	49.19	(Au,Ni)Sn
D	27.73	28.30	43.98	(Au,Ni) ₃ Sn ₂

由图 10 中室温下 Au-Ni-Sn 三元体系的等温截面^[17]所示,由于 Au 和 Ni 具有相似的物理和化学性质,Ni 原子可以进入 AuSn 晶格并取代 Au 原子形成(Au,Ni)Sn IMC。经 EDS 测试接头处层状反应产物组成

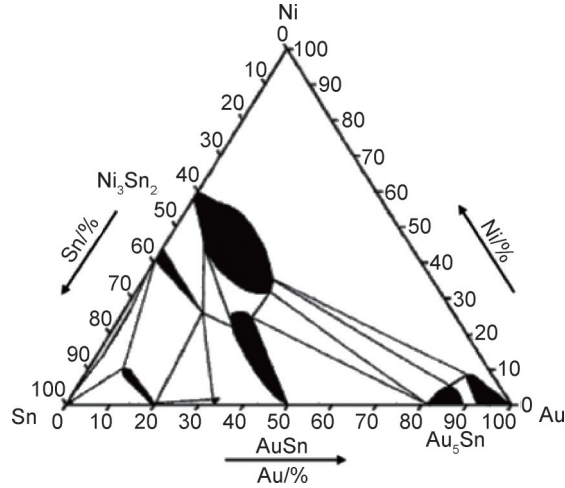


图 10 室温下的 Au-Ni-Sn 三元等温截面^[17]

Fig.10 Ternary isothermal section of Au-Ni-Sn at room temperature^[17]

为 28.30%Ni、27.73%Au 和 43.98%Sn,其中(Au+Ni)与 Sn 的原子分数比为 56.02:43.98,接近 3:2,表明反应产物是(Au,Ni)₃Sn₂ IMC。主要由于在回流过程中 Ni 原子不断从基板向焊料中扩散,当局部 Ni 原子饱和后,进一步形成(Au,Ni)₃Sn₂相。与其他研究相比^[13],POEM 制备的 AuSn20 焊球在模拟服役的条件下形成了均匀的(Au,Ni)Sn 和(Au,Ni)₃Sn₂相,具有较好的结构完整性。

图 11 展示了 AuSn20 焊球经回流焊处理后的

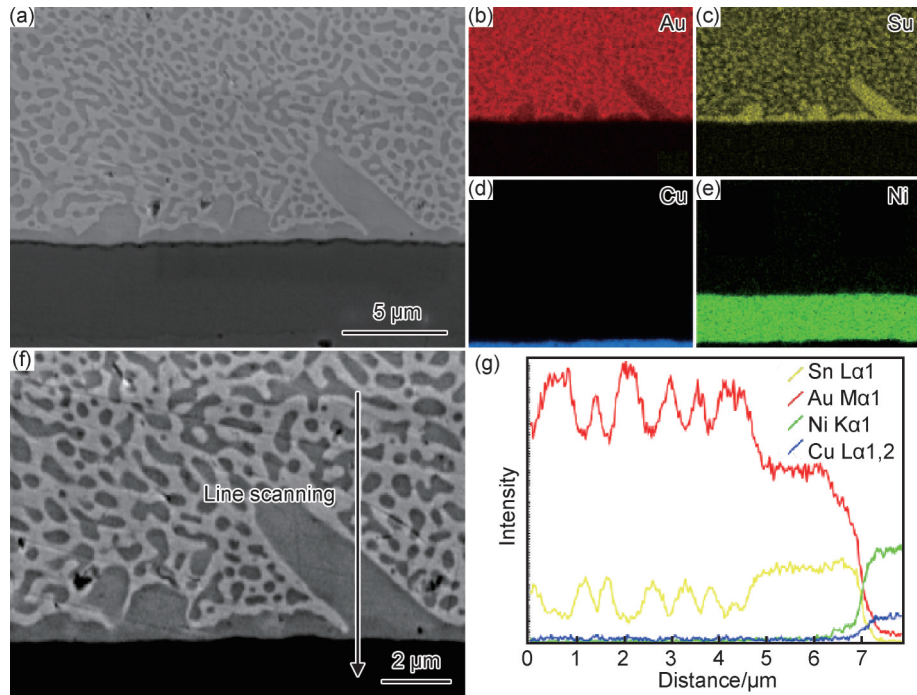


图 11 AuSn20/ENIG 界面的 SEM 图像和 EDS 分析

(a)界面 SEM 图;(b)Au 元素面扫描;(c)Sn 元素面扫描;(d)Cu 元素面扫描;(e)Ni 元素面扫描;(f)界面放大图;(g)图(f)中箭头区域线扫描

Fig.11 SEM images and EDS analysis of the AuSn20/ENIG interfaces

(a)cross-sectional SEM image of the interface;(b)Au elemental mapping;(c)Sn elemental mapping;(d)Cu elemental mapping;

(e)Ni elemental mapping;(f)enlarged view of the interface;(g)EDS line-scan analysis across the region indicated by the arrows in Fig.(f)

SEM图和线扫描的元素分布图。图11(b)~(e)分别为Au、Sn、Cu、Ni的元素分布图,由图可知,Au、Sn原子分别均匀地分布在基板上方,界面处由于形成 δ -AuSn和 ζ' -Au₅Sn相,Sn原子聚集,Au原子由于Ni的晶格替代,导致Au浓度减小。图11(f),(g)为界面处的线扫描图,经回流后内部 δ -AuSn相和 ζ' -Au₅Sn相中Au原子含量规律变化,到达约4.5 μm 处由于Ni原子的扩散形成(Au,Ni)Sn相,导致Au相含量降低。随着距离基板越近,基板中的Ni不断向内部扩散形成(Au,Ni)₃Sn₂,相对应的Ni在晶格中占据更多Au原子,导致Au含量也逐渐降低。到达7 μm 左右时,Au、Sn原子含量发生骤降,正好到达ENIG基板交界处,Ni原子含量上升。

3 结论

(1)利用脉冲微孔喷射技术,成功稳定地制备了多种粒径规格的AuSn20焊球,包括50、100、200、300 μm ,目标粒径的标准偏差最大值为1.58 μm 。

(2)焊球的粒径随着驱动电压和上升沿的增加而增大。在固定孔径的条件下,通过调整驱动电压,发现AuSn20焊球的粒径可以在39.0 μm 的范围内调节,而上升沿的调节则可以将粒径控制在26.6 μm 的最大范围内。与He氛围相比,Ar氛围下制备的焊球展现出更高的圆球度和更光滑的表面。

(3)在脉冲微孔喷射制备的AuSn20焊球中,出现少量偏析的初生相 ζ' -Au₅Sn。经过回流处理后,基板中的Au层迅速溶解于熔融焊料中, δ -AuSn和 ζ' -Au₅Sn相发生重熔并重新形成了均匀的共晶组织。

参考文献

- [1] Tan C W, Chan Y C, Leung B, et al. Effects of soft beam energy on the microstructure of Pb₃₇Sn, Au₂₀Sn, and Sn_{3.5}Ag_{0.5}Cu solder joints in lensed-SM-fiber to laser-diode-affixing application[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(1): 75-82.
- [2] Zhao J, Li L, Wang W M, et al. High-power and low-divergence 980-nm InGaAs-GaAsP-AlGaAs strain-compensated quantum-well diode laser grown by MOCVD[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(11): 1507-1509.
- [3] Ciulik J, Notis M R. The Au-Sn phase diagram[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 1993, 191(1): 71-78.
- [4] Zhang G S, Jing H Y, Xu L Y, et al. Creep behavior of eutectic 80Au/20Sn solder alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 476(1/2): 138-141.
- [5] Kim J, Lee C C. Fluxless wafer bonding with Sn-rich Sn-Au dual-layer structure[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 417(1/2): 143-148.
- [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 B, Martin O, et al. An introduction to eutectic Au/Sn solder alloy and its preforms in microelectronics/optoelectronic packaging applications[J]. *Electronics & Packaging*, 2005, 5(8): 5-8.
- [7] 朱盼星, 石生荷, 杨剑, 等. 气体雾化技术制备金属粉末研究综述[J]. *粉末冶金工业*, 2021, 31(4): 82-87.
- Zhu P X, Shi S H, Yang J, et al. Research progress on the gas atomization for producing metal powders[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2021, 31(4): 82-87.
- [8] 刘海霞, 雷永平, 夏志东, 等. 切丝重熔法制备的BGA焊球及其表面形貌[J]. *电子元件与材料*, 2005, 24(5): 21-23.
- Liu H X, Lei Y P, Xia Z D, et al. Fabrication of solder balls by fine-wire cutting-remelting and its surface appearance[J]. *Electronic Components & Materials*, 2005, 24(5): 21-23.
- [9] Reini S. Diode lasers used in plastic welding and selective laser soldering-applications and products[C]//proceedings of the 7th International WLT Conference on Lasers in Manufacturing (LiM). Amsterdam: Elsevier Science, 2013.
- [10] Nishikawa H, Iwata N. Formation and growth of intermetallic compound layers at the interface during laser soldering using Sn-AgCu solder on a Cu Pad[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215: 6-11.
- [11] Hu Z J, Li S J, Yang F, et al. Formation and elimination of satellite droplets during monodisperse droplet generation by using piezoelectric method[J]. *Micromachines*, 2021, 12(8): 921.
- [12] Yoon J W, Chun H S, Jung S B. Liquid-state and solid-state interfacial reactions of fluxless-bonded Au-20Sn/ENIG solder joint[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 469(1/2): 108-115.
- [13] Huang Y F, Liu W S, Ma Y Z, et al. Effect of added Ag on plasticity enhancement of Au80Sn20 eutectic alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 842: 155849.
- [14] Dong W, Jia Z R, Wang X D, et al. Size-on-demand preparation of SAC305 solder balls based on pulsated orifice ejection method[J]. *Vacuum*, 2023, 217: 112522.
- [15] 瞿玉海. 金锡合金快速凝固与金镍合金深过冷凝固行为研究[D]. 昆明: 云南大学, 2015.
- Qu Y H. Study on rapid solidification of gold-tin alloy and deep subcooling solidification behavior of gold-nickel alloy[D]. Kunming: Yunnan University, 2015.
- [16] Aziz M J. Model for solute redistribution during rapid solidification[J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53(2): 1158-1168.
- [17] 韦小凤, 王日初, 彭超群, 等. AuSn20/Ni焊点的界面反应及剪切强度[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(7): 1907-1913.
- Wei X F, Wang R C, Peng C Q, et al. Interfacial reaction and shear strength of AuSn20/Ni solder joints[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(7): 1907-1913.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51571052)

收稿日期: 2024-12-25; 录用日期: 2025-01-24

通讯作者: 董伟(1965—), 男, 副教授, 博士, 主要从事单分散粉末制备及相关研究, 联系地址: 辽宁省大连市甘井子区凌工路2号大连理工大学新三束实验室220(116024), E-mail: w-dong@dlut.edu.cn

(本文责编: 齐书涵)