

离心雾化制备 SAC305 球形粉工艺研究

陇 赞^{1,2}, 白海龙^{1,2}, 陈东东^{1,2}, 段雪霖², 严继康¹, 易健宏¹

(1. 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

(2. 云南锡业锡材有限公司, 云南 昆明 650217)

摘要: 为生产高质量的 SAC305 合金球形粉末, 研究了转速、处理量、雾化器形状、气氛含氧量等工艺参数对旋转离心雾化生产 Sn-3.0Ag-0.5Cu 粉末性能的影响。结果表明, 随着转速 (6000~60 000 r/min) 的提高、进料速度 (30~60 kg h⁻¹) 的降低和雾化器尺寸 (30~50 mm) 的增大, SAC305 粉末平均粒径变小, 计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模拟与实验有一致的趋势, 实验修正因子 n 为 1.65, CFD 模拟修正因子为 2.23。杯形雾化盘相比平面雾化盘生产的粉末平均粒径降低了 8%。SEM 照片显示, 随着雾化室氧含量的降低, 粉末球形度提高, 雾化室中的含氧量低于 400 $\mu\text{L L}^{-1}$ 时, 粉末表面含氧量低于 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ 。SAC305 粉末粒径和球形度主要受工艺控制, 粉体表面质量与冷却效率和收集技术有关。

关键词: 离心雾化; Sn-3.0Ag-0.5Cu; 焊锡粉; CFD

中图分类号: TF123.2⁺⁴

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)09-3313-07

离心雾化方法与传统雾化方法相比, 具有球形度好、粒度分布窄、产量高、生产效率高等优点, 已被广泛应用于化工及材料粉末的生产。该方法已成功用于制备 Cu、Sn、Fe、Zn、Mg、Ni 等多种金属、有机物和无机物粉末^[1-3]。离心雾化制粉由于其优势在 SMT 焊锡粉产业中得到了广泛的应用。在 2006 年, Zhao^[4]提出了一系列雾化器设计涉及方案。同时, 许多关于离心雾化新技术的研究工作也在进行^[5-7], 为了改善传统工艺的性能, 人们开发了新的混合工艺, 超声雾化制粉因高质量的球形粉受到人们的关注, 但由于其生产效率较低, 限制了其发展^[8]。气流雾化氧含量高、粒度分布宽、成品率低、粉体表面形貌差不适用于焊锡粉生产。旋转电极法由于设备复杂、成本高、产量低等不利于工业化大规模生产应用。目前焊锡粉的生产方式主要以离心雾化制粉为主, 粉体应用以 4a (25~38 μm) 粉为主, 逐渐向 5a (15~25 μm) 粉过渡。在电子封装领域焊锡粉产品向低温高强度、高可靠性 6a (5~15 μm) 粉方向发展。

离心雾化系统工作时, 金属熔体送入高速离心雾化器的导流管, 经 1 次或 2 次熔体分配后, 迅速到达高速旋转的雾化盘上, 由于离心力的作用, 使熔体在旋转的雾化盘表面上铺展为薄膜, 并以不断增长的速度向盘的边缘运动, 当离开盘的边缘时, 熔体雾化, 有滴状、丝状及膜状分裂。分裂方式^[9-11]则与雾化系

统的转速、进料量、熔体物化性质及雾化器的形状等有关。理想情况下, 熔体薄膜将在雾化器边缘开始解体, 并形成小熔滴。这些液滴的平均尺寸 (d_{50}) 可以用式 (1) 来预测^[12, 13]:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{6\gamma}{\rho\omega^2 R}} \quad (1)$$

式(1)中, $\gamma(\text{N/m})$ 是熔体的表面张力, $\rho(\text{kg/m}^3)$ 是熔体的密度, $\omega(\text{s}^{-1})$ 是旋转雾化盘的角速度, $R(\text{m})$ 是雾化器半径。Champagne 等^[12]提出了熔膜崩解的 3 种模式:(1)液滴直接形成(DDF);(2)韧带形成(LF);(3)薄膜崩解(FD)。工艺参数与熔体性质决定区域之间的转换。熔体在到达雾化盘边缘之前, 有时可能过早地发生熔体崩解凝固, 这种情况会导致旋转雾化的雾化效率低下^[14]。

由于离心雾化生产过程工艺参数复杂, 并且没有相关的理论直接指导生产, 通常来说只能通过重复试验来确定控制工艺参数。CFD 有限元模拟的成熟降低了试验周期与成本, 通过模拟和仿真可以预测旋转圆盘上熔体流动行为与粉末的粒径^[15]。在射流边界层中, 熔体在雾化器上的铺展过程中, 经常会出现水跃、熔体周边不连续以及旋转圆盘上熔体凝固的现象, Ouyang^[16, 17]等人通过模拟仿真成功地解决了以上问题, 提高了离心雾化生产的效率和粉末质量。张永良^[18]通过 VOF 模型模拟了离心雾化喷嘴参数对离心雾化

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 云南省重大科技专项 (2018ZE004)

作者简介: 陇 赞, 男, 1996 年生, 硕士, 昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093, E-mail: 1219988927@qq.com

的影响，研究了喷嘴内外部流场分布及理论模型，揭示了液膜分解过程。

SAC305 钎料合金是 Sn-Ag-Cu 无铅焊料中的一种，由于其具有优异的强度、更好的延展性、良好的蠕变和抗疲劳性能，已经取代了传统的 Pb-Sn 钎料合金^[19-23]。本研究通过有限元模拟研究了离心雾化液膜破碎机理并预测了粉末粒度趋势，通过实验研究了工艺参数对 SAC305 无铅焊粉生产的影响，为提高 SAC305 粉末生产效率和产品质量提供了参考。确定了转速、雾化器大小和形状以及氧含量对 SAC305 粉末平均粒度的影响，改进了粉末收集工艺和优化雾化盘设计，提高了粉末表面质量，有望加速 5a (15~25 μm) SAC305 粉末的普及应用。

1 实验

本研究使用的商用 SAC305 无铅钎料合金来自云南锡业锡材有限公司，产品化学成分如表 1 所示。该合金在 317 °C 时的密度和表面张力分别为 7050 kg/m³、0.54 N/m^[24]。

离心雾化系统由 4 个主要单元组成：(1) 熔炼炉；(2) 雾化室；(3) 气氛控制单元；(4) 收集单元。熔炼炉安置在雾化室的上方，配备 2 个坩埚，底部安装了一根导流管，将熔体输送到雾化盘上，在熔体导流管末端装配了 0.8、1.0 和 1.2 mm 不同开口尺寸的可更换喷嘴盖，以控制熔体进料速率。雾化区域由高速电机和位于喷嘴下方的旋转雾化盘组成。使用杯状和平盘状的雾化盘，直径分别为 30、40 和 50 mm，研究雾化盘几何形状和直径的影响。大气控制单元由真空泵和氮气供应系统组成。雾化室内氧含量由氧分析仪测量，最后通过超声振动筛分仪进行粒度分级收集，通过激光粒度仪统计分析粉末粒度分布，使用光学显微镜和电子扫描观察粉体形貌。

本研究 CFD 模拟使用的离心雾化模型参考离心雾化系统设计，熔体经导流管后接触离心雾化盘，在离心力的作用下铺展在雾化盘表面成膜，随后在离心雾化盘的边缘处离开，在雾化室中飞行且冷却收缩成球，网格模型如图 1a 所示。

离心雾化区域的计算包括导流管出口、不同尺寸雾化盘以及雾化室圆柱形区域。采用前处理软件 Gambit 建立几何模型，并对其进行六面体结构化网格

划分。雾化盘形状如图 1b 所示。将速度进口设为 Velocity-inlet (蓝色)，出口设置为 Pressure-outlet (红色)，而雾化盘表面可以利用 Interface (黄色) 处理。在基于压力的非稳态计算下采用 VOF 多相流模型和 K-epsilon 湍流模型，给定确切的入口边界，调整第二相体积分数为 0.99，且在求解的时候不断调试。

2 结果与讨论

在离心雾化系统设计前期，发现 SAC305 熔体与雾化器盘表面之间的润湿性较差，因此大多数倾倒在转盘上的熔体都在雾化盘表面滑落，导致雾化效率较低，这种现象可以用雾化过程中圆盘和熔体之间的能量传递来描述，当熔体通过喷嘴流到雾化盘表面时，熔体不断地从中心扩散到圆盘边缘，然后在离心能量的作用下分解成液滴。能量传递关键的因素之一是雾化盘和熔体之间的润湿性，涂覆的圆盘有助于改善润湿性和能量传递，增强更好的附着力。因此，得到了较小的粒径和较高的产率^[25, 26]。在本研究中，雾化器表面涂覆了 SAC305 合金。

2.1 中值粒径和球形度

图 2 为圆柱形雾化盘转速对 SAC305 粉末平均粒度的影响，在进料速度和温度分别为 30 kg/h 和 318 °C 时，雾化盘直径为 50 mm。从图 2 中可以看出，随着转速的增加，SAC305 粉末的粒度逐渐减小。当离心转速超过 60 000 r/min，粉末的实验平均粒径小于 100 μm，这与 Shekhaliev^[27]等人的实验结果相一致。通过有限元模拟能够预测熔体的尺寸，对于 50 mm 圆柱雾化器，在式 (1) 修正基础上，有：

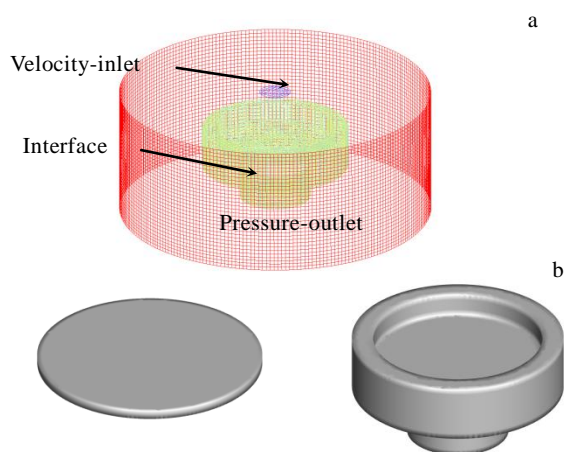


图 1 雾化区域网格模型和雾化盘设计

Fig.1 Mesh model of atomization area (a) and atomization disk design (b)

表 1 SAC305 无铅钎料的化学成分

Table 1 Chemical composition of SAC305 solder (ω/%)

Sn	Ag	Cu	Pb	Sb
96.336	2.9878	0.5039	0.0196	0.0109

$$d_{50} = \sqrt{\frac{6\gamma}{\rho\omega^2 R}} e^n \tag{2}$$

式 (2) 中, n 为修正因子。对于 CFD 模拟, 通过线性拟合计算可得 n 值为 2.23。同理, 对实验结果拟合之后, 可计算得到 n 值为 1.65。

在自身重力的作用下, 熔体离开雾化喷嘴直至撞到离心盘上, 此时轴向速度迅速衰减为 0。在离心力的作用下, 熔体由于粘性力在雾化盘上形成一层流动的液膜。在雾化盘的边缘处, 由于惯性与表面张力的作用, 液膜分裂成熔滴, 熔滴的切向速度远大于径向速度。因此, 认为雾化盘边缘处熔滴的水平速度约等于熔滴的切向速度, 即离心盘边缘的切向速度。因为液膜在盘边缘处分裂形成的熔滴的水平方向速度小于之前的轴向速度, 所以存在较大的速度差。经过离心雾化后形成更细小的熔滴, 随后在环境中做减速运动。在整个过程中, 小直径熔滴速度变化更快, 且在气雾化结束时小直径熔滴的最大速度大于大直径熔滴的最大速度。不同的速度差导致熔体在凝固收缩前发生碰撞, 产生卫星球。

如图 2 所示, 当转速高于 30 000 r/min 时, 相应的平均粒径变化较小。这是由于离心力增大, 熔膜速度加快, 而其动态接触角随着熔体速度的增加而增大。在动态接触角达到临界值的瞬间, 取决于熔体流动的稳定性, 薄膜将在 DDF 或 LF 区破碎。在到达雾化盘边缘之前起飞的液滴比在雾化盘边缘破碎的液滴的速度要慢, 因此它们的离心雾化过程和二次解体性能都会降低。熔体以较小的能量转移分解, 尽管液滴有足够的凝固收缩时间, 但获得的平均颗粒尺寸较大, 粒度分布较宽, 细粉产量较低^[28]。

图 3 为 CFD 模拟旋转离心雾化转速对钎料熔体的影响, 在处理量为 30 kg/h, 雾化盘直径为 50 mm 时, 从图 3a 中可知, 在低转速时, 熔体堆积在雾化盘中心,

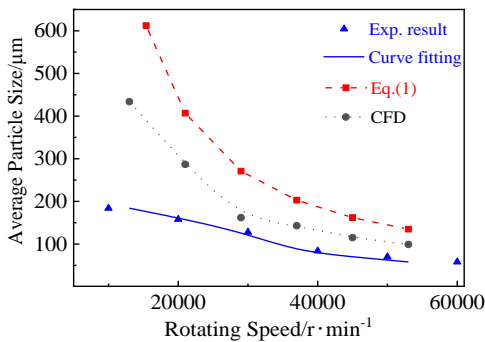


图 2 离心转速对粉末平均粒径的影响

Fig.2 Effect of centrifugal speed on the average particle size of powder

液膜难以铺开, 熔体所受离心力较小。随着转速的提高, 离心力不断增强, 液膜铺展面积扩大, 在 40 000 r/min 时熔体主要堆积在雾化盘外部, 如图 3b 所示, 熔体与杯型雾化盘壁面接触, 此时压力较大。但是随着转速的提高, 如图 3c 所示, 合金熔体铺开由于速度较快, 迅速到达雾化盘边缘, 此时发生二次雾化和熔体破碎熔体, 雾化效率更高, 熔体尺寸越来越小。由图 3d 可知, 在超 60 000 r/min 情况下, 熔体在雾化盘边缘处在离心力的作用下成纤维状分裂, 故压力分布为线形, 有利于获得小而圆的 SAC305 粉末。另一方面, 图 3e 所示是熔体速度流线图与压力分布云图。由图可知, 熔体集中与雾化盘边缘底部, 能够获得更佳的雾化效果, 通过与雾化盘的相互作用, 熔体以更快的速度离开雾化盘, 在飞行状态下冷却凝固。角速度越大, 熔体受到的离心力越大, 熔滴尺寸越小, 雾化后的熔滴越细。飞行速度越大, 熔滴与环境的对流传热越强; 熔滴越小, 熔滴自身的焓越少。因而, 角速度越大, 熔滴的冷却速率越大, 熔体产生卫星球的几率减小, 粉末粒度集中。

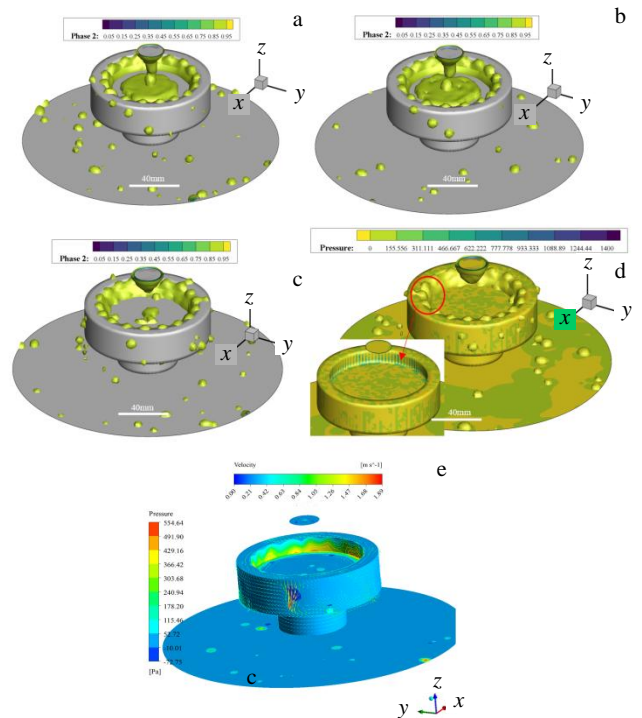


图 3 CFD 模拟不同旋转离心雾化转速的钎料熔体的压力云图及速度云图

Fig.3 Atomizer pressure graphs (a~d) and speed graph (e) by CFD simulation under different centrifugal speeds: (a) 20 000 r/min, (b) 40 000 r/min, and (c, d) 60 000 r/min

进料速度是影响 SAC305 粉末特性的重要操作参数。除此之外熔体进料速度也会影响雾化器上的液膜铺展和过早凝固。图 4 为在转速 40 000 r/min, 熔体温度 318 °C, 雾化盘直径为 50 mm 情况下, 进料速度对 50 mm 雾化器生产粉末平均粒径的影响。由图 4 可知, SAC305 粉末的平均粒径随着进料速度的增加而增大, 在进料速度较多的情况下, 液膜必然较厚, 因此破碎的熔体颗粒粗大。此外, 较高的进料速度会导致更多的熔体滑移, 从而导致液膜移动速度降低。另一方面, 当熔体进料速度较低时, 熔体薄膜较薄, 容易形成过早凝固的熔体, 使其附着在表面上, 此时会产生头骨凝固和熔体跃迁的问题, 泪状等异形粉末占比增加。同样, 当熔体进料较多时, 熔体更倾向于堆积, 需要较大的离心力才能铺展分裂。因此, 熔体进料速度应综合考虑, 以平衡最佳产量与粉末粒径。

图 5 在离心转速 30 000 r/min, 熔体温度 318 °C, 进料速度 60.3 kg/h 时粉末平均粒径和不同形状雾化盘直径的关系。实验结果表明, 杯式雾化盘的雾化效果

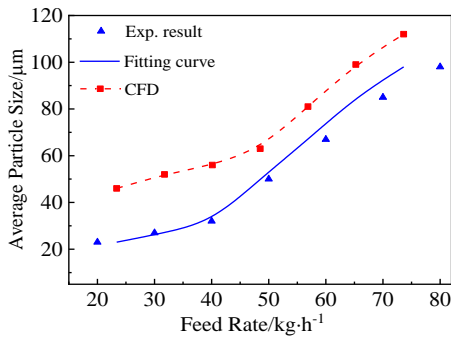


图 4 进料速度对粉末平均粒径的影响

Fig.4 Effect of feed rate on the average particle size of powder

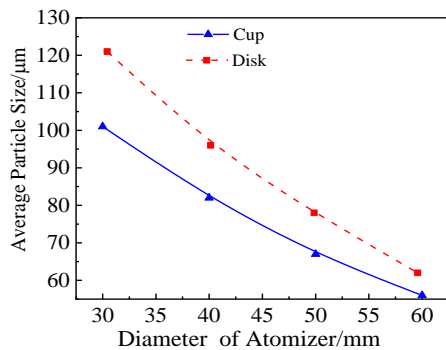


图 5 不同形状雾化盘的直径对粉末平均粒径的影响

Fig.5 Effect of diameter of atomizer with different shapes on average particle size of powder

较好, 粉末平均粒径比平盘细 8% 左右, 通过 CFD 模拟可知带角度边缘的雾化盘将促进和改善系统的润湿, 导致在熔体破裂之前在盘表面铺展更远的熔膜。因此, 雾化的液滴将以更高的速度从雾化器中甩出, 并能够在飞行过程中持续解体。当使用较大尺寸的雾化器时, 使用杯式雾化盘和盘式雾化盘时的平均粒径差异变小。但是粉末的表面质量都会降低, 这是由于尺寸较大的雾化盘导致雾化盘的不稳定以及熔体提前脱离雾化盘导致。

图 6a 为当离心转速为 50 000 r/min, 熔体温度为 318 °C 和进料量为 50.3 kg/h 时, 雾化室氧含量对 SAC305 粉末平均粒径的影响。随着雾化室中氧含量的降低, 粉末的中值粒径逐渐减小, 当氧含量降至 0.05% (体积分数) 以下时, 雾化室氧含量对中值粒径影响减小, 此时雾化室氧含量对粉末形状及表面形貌影响较大。理论上, 雾化气氛中的氧气会导致熔融的 SAC305 液滴表面的氧化, 这会阻止所需的持续解体成更小的液滴。但是, 如果氧含量降低到一定的阈值, 二次崩解的能力可能会受到抑制。熔体的表面张力主要对熔体和氧化膜的影响较大, 熔体收缩时并不清楚其相关机理。

图 6b 为雾化室氧含量与粉末表面氧含量之间的关系图, 二者呈正相关关系。目前 SAC305 粉末应用粒径

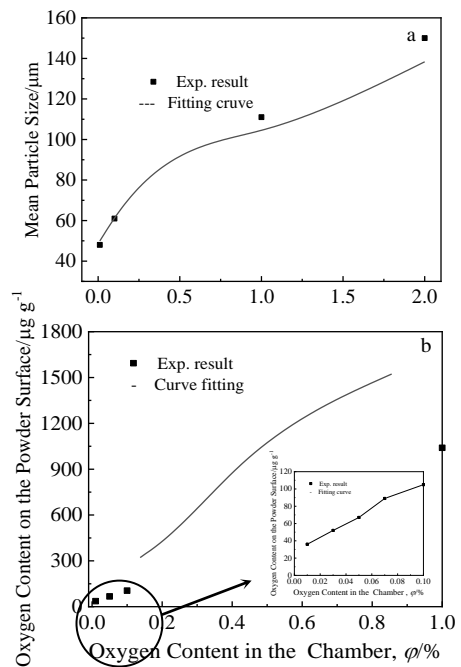


图 6 雾化室氧含量对粉末平均粒径和粉末表面氧含量的影响

Fig.6 Effect of oxygen in atomization chamber content on powder average particle size (a) and oxygen content on the powder surface (b)

大部分小于 100 μm ，当雾化室氧含量降至 0.05% (体积分数)以下时其对平均粒径的影响基本可以忽略，但是对粉体表面氧含量却起决定性因素。SAC305 粉末主要用于电子封装，因此必须认真考虑纯度、清洁度和颗粒形状。在工业应用中，要求 SAC305 金属粉末的氧含量低于 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ 。为了得到粉末表面含氧量小于 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ 的粉末，雾化室中的含氧量必须低于 400 $\mu\text{L L}^{-1}$ 。

2.2 表面形貌

一般来说，金属粉末球形度被气氛中氧含量所控制。SAC305 粉末在自然气氛容器中制造时形成韧带、泪滴、片状等不规则形状。在氮气保护气体中，充入部分氧气，液滴表面会形成氧化膜，并通过作为凝固粒子的硬壳覆盖层来阻止飞行液滴形成球形^[29]。

图 7 为在转速、熔体进料速度和熔体温度分别为 30 000 r/min、32 kg/h 和 318 $^{\circ}\text{C}$ ，采用杯型雾化盘在不同雾化室氧含量制备的 SAC305 粉末形貌。当金属熔体接触雾化盘后会发铺展破碎，熔体液滴要么是韧带状的，要么是椭圆形的，然后由于它们的表面张力而变成球形。随着含氧量的降低，SAC305 颗粒球形度趋于 1，如图 7a 所示，但是当雾化室氧含量低于 100 $\mu\text{L L}^{-1}$ 时，由于金属熔体表面氧化膜不足以与自身表面张力进行竞争，导致细小的熔体之间会发生粘结，产生片状的粉末。如图 7c 所示，当雾化室氧含量较高时，熔体在未凝固之前，自身表面张力并不能让

熔体收缩球形，粉体表面氧化膜即形成，一方面使得表面氧含量较高，另一方面使得熔体直接在韧状、泪状下凝固，并最终成型。

研究发现，随着氧含量的降低，雾化粉末的圆形形状因子趋于 1^[30]。熔滴的球形取决于表面张力本身。它是由具有足够抗压强度的氧化膜防止的，以对抗表面张力。氧化膜会降低熔体的表面张力，不利于球形。相反，如果降低雾化室中的氧含量，则会减少氧化膜的形成。熔体的表面张力不会降低，因此较高的表面张力将有利于熔滴的球形。综上所述，欲得到高球形度和表面质量较好的 SAC305 粉末，雾化室氧含量应该控制在 100~300 $\mu\text{L L}^{-1}$ 。

图 8 是不同雾化室温度在转速 45 000 r/min，熔体温度 318 $^{\circ}\text{C}$ 和进料速度 60.3 kg/h 粉末在不同雾化室温度的 SEM 照片。随着雾化室温度的升高，粉末球形度因子趋于 1，这是因为熔体和雾化室的过热度逐渐降低，熔体凝固前有足够的时间收缩成球。较低的雾化室温度会导致较小的熔体迅速凝固形成微细粉体，在飞行过程中接触未凝固的较大球体，使得粉末表面产生大量的凸起，如图 8a 所示，粉末中有大量的卫星球。较高的雾化室温度又会导致熔体接触雾化室壁面时没有完全凝固硬化，撞击后产生平面，结果如图 8d 所示。因此，雾化室应该综合考虑合金的物理性质和雾化室大小设置合适温度。

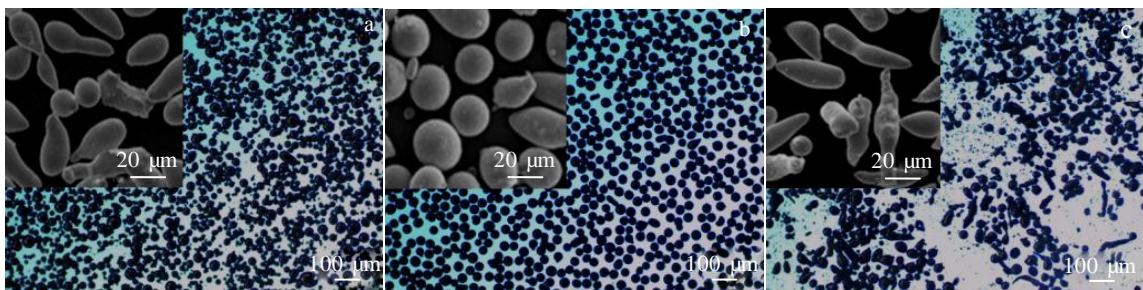


图 7 不同雾化室氧含量下 SAC305 粉末的形貌

Fig.7 Micrographs of SAC305 powder atomized with different oxygen contents in the atomizer chamber: (a) 100 $\mu\text{L L}^{-1}$, (b) 300 $\mu\text{L L}^{-1}$, and (c) 2000 $\mu\text{L L}^{-1}$

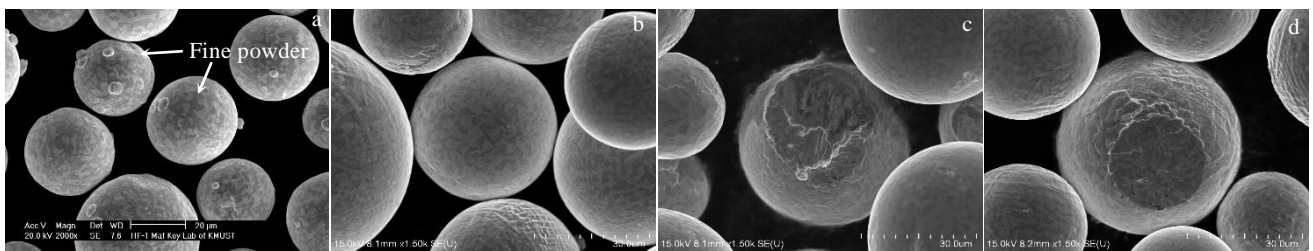


图 8 不同雾化室温度的粉体表面 SEM 照片

Fig.8 SEM images of powder on surface at different spray chamber temperatures: (a) 40 $^{\circ}\text{C}$, (b) 80 $^{\circ}\text{C}$, (c) 95 $^{\circ}\text{C}$, and (d) 110 $^{\circ}\text{C}$

SAC305 粉末生产雾化室的冷却采用循环水夹套冷却方式, 存在水温不稳定及难以控温的问题, 制粉工艺的关键在于雾化区域的温控进而控制金属液滴的结晶形核凝固速度, 从而改变分体表面的晶粒组织情况, 对于无铅锡粉, 需要的是较快的冷却速度就可达到表面组织的均匀分布。采用高效热交换系统直接在雾化区域控温, 其主要作用是对雾化区域气氛进行冷却。因为直接安装在雾化区域, 空气热传导及热对流的距离较短, 同时采用高效的制冷剂, 能够实现雾化区域的精确控温降低雾化室内的温度梯度, 雾化区域温差控制在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 熔滴温度高, 金属液表面张力小, 这可能是雾化后熔滴直径变小的一个原因。熔滴温度高, 熔滴冷却到金属熔点所需时间长, 熔滴飞行速度就小, 因而对流散热少。缩短 SAC305 熔体结晶形核凝固时间, 实现了熔体的快速凝固, 可以避免卫星球的产生。改进雾化冷却方式后的粉末形貌如图 9 所示, 表面组织均匀分布, 晶粒大小一致, 表面微细粉粘连改善。

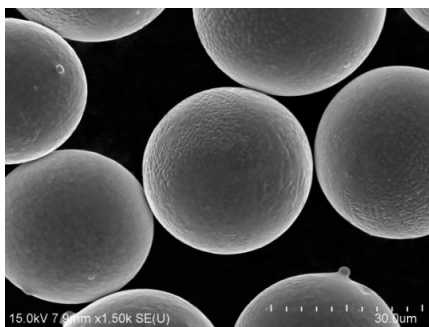


图 9 高效热交换系统粉末的表面形貌

Fig.9 Surface morphology of powder by high-efficiency heat exchange system

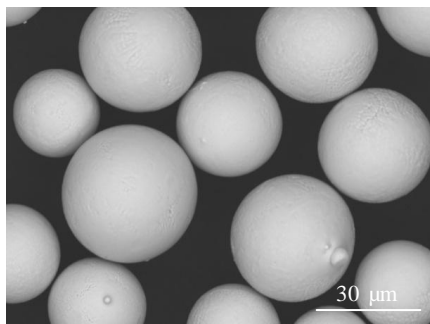


图 10 新工艺后粉末表面质量

Fig.10 Surface quality of powder after new process

2.3 工艺改进

SAC305 粉末生产工艺流程当经离心雾化后, 需分选不同粒径级别的产品。虽然在分级前离心雾化通过转盘型号的设计及雾化区域氧含量的控制可以减少微细粉的比例, 但是微细粉依旧会存在, 通过气流分级与流化分选都是分级去除大部分的微细粉 (粒径 $<10\text{ }\mu\text{m}$), 筛分出微细粉, 避免锡珠问题的发生。按照 $80\text{ }000\text{ r/min}$ 高速电机、新型钨钢弧面转盘、雾化区域热交换系统的离心雾化工艺配置离心雾化-流化分选-超声振筛的竖直布置。工艺改进后的粉体形貌如图 10 所示。4a ($20\sim 38\text{ }\mu\text{m}$) 粉末产品比例可以达到 60% 以上, 5a ($15\sim 25\text{ }\mu\text{m}$) 粉产品比例超过 25%, SAC305 球形粉末表面光滑, 组织均匀, 晶粒完整, 粉末质量得到明显的提高。

3 结 论

1) SAC305 粉末的平均粒径随转速的提高、熔体进料速率的降低和雾化器尺寸的增大而减小。在相同的工艺条件下, 杯形雾化器雾化的 SAC305 粉末比平盘型雾化器雾化的 SAC305 粉末粒度降低了约 8%, 对于 50 mm 圆柱雾化器 CFD 模拟修正因子为 2.23, 实验修正因子为 1.65。

2) 根据雾化室中氧含量的不同, 雾化后的 SAC305 粉末形成不同的形状。当燃烧室含氧量降至 0.05% (体积分数) 时, 制得的粉末形状呈球形。欲得到高球形度和表面质量较好的 SAC305 粉末, 雾化室氧含量应该控制在 $100\sim 300\text{ }\mu\text{L L}^{-1}$ 。

3) 粉末粒径和球形度主要受合金物化性质、雾化盘和氧含量的影响, 粉末表面质量主要是受过热度和收集系统的控制。改进雾化盘设计, 优化工艺参数, 升级冷却和分级工艺可以提高 SAC305 粉末产率和质量, 得到更加优良的 5a 粉末。

参考文献 References

- [1] Liu Yunzhong, Minagawa K, Kakisawa H *et al.* *Transactions Nonferrous Metals Society of China*[J], 2007, 17: 1276
- [2] Kharitonov A V, Sheikhaliev S M. *Soviet Powder Metallurgy & Metal Ceramics*[J], 1985, 24(12): 883
- [3] Li Rongde(李荣德), Liu Jingmin(刘金民), Xiang Qingchun(向青春) *et al.* *Mechanical Design & Manufacture(机械设计与制造)*[J], 2003(6): 98
- [4] Zhao Y Y. *Materials & Design*[J], 2006, 27(9): 745
- [5] Minagawa K, Liu Y Z, Kakisawa H *et al.* *Ence & Technology of Advanced Materials*[J], 2008, 6(4): 325
- [6] Minagawa K, Kakisawa H, Osawa Y *et al.* *Science &*

- Technology of Advanced Materials*[J], 2005 (6): 325
- [7] Minagawa K, Kakisawa H, Osawa Y *et al. Science and Technology of Advanced Materials*[J], 2005, 6(3-4): 325
- [8] Yang Fubao(杨福宝), Xu Jun(徐 骏), Shi Likai(石力开) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2005, 29(5): 785
- [9] Ztrk S, Arslan F. *Powder Metallurgy*[J], 2001, 44(2): 171
- [10] Wang Chonglin(王崇琳) *et al. Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2010, 28(6): 420
- [11] Zhang Ying, Tao Yu, Zhang Yiwen *et al. Journal of Iron and Steel Research*[J], 2003, 15: 537
- [12] Champagne B, Angers R. *International Journal of Powder Metallurgy*[J], 1984, 16(3): 125
- [13] Zduji M, Uskokovi D. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*[J], 1990, 29(9): 673
- [14] Zhao Y Y. *Modelling & Simulation in Materials Science & Engineering*[J], 2004, 12: 973
- [15] Leshev I, Peev G. *Chemical Engineering & Processing Process Intensification*[J], 2003, 42(11): 925
- [16] Ho K H, Zhao Y Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 365(1-2): 336
- [17] Ouyang H. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*[J], 2005, 53(5): 1000
- [18] Zhang Yongliang(张永良). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2013
- [19] Bieler T R, Zhou B, Blair L *et al. Journal of Electronic Materials*[J], 2012, 41(2): 283
- [20] George E, Das D, Osterman M *et al. IEEE Transactions on Device & Materials Reliability*[J], 2011, 11(2): 328
- [21] Gan Guisheng(甘贵生), Liu Yun(刘 歆), Chen Dong(陈 东) *et al. Journal of Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2019, 29(2): 44
- [22] Yu Hongjiao(于红娇), Zhang Gong(张 弓), Ma Jusheng(马莒生) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(10): 2383
- [23] Zeng Ming(曾 明), Chen Zhengzhou(陈正周), Chen Baoluo(沉保罗) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(8): 1353
- [24] Przemysaw F. *International Journal of Materials Research*[J], 2012, 103(12) : 1455
- [25] Xie J W, Zhao Y Y, Dunkley J J *et al. Powder Metallurgy*[J], 2007, 47(2): 168
- [26] Ztürk S, Ztürk B, Usta G *et al. Powder Metallurgy*[J], 2011, 54(5) : 577
- [27] Sheikhaliev S M, Sheikhalieva Z I, Dunkley J J *et al. Metal Powder Report*[J], 2008, 63(2): 28
- [28] Denmud N, Plookphol T. *Key Engineering Materials*[J], 2018, 777: 322
- [29] Eslamian M, Rak J, Ashgriz N *et al. Powder Technology*[J], 2008, 184(1): 11
- [30] Plookphol T, Wisutmethangoon S, Gonsrang S *et al. Powder Technology*[J], 2011, 214(3): 506

Study on the Preparation of SAC305 Spherical Powder by Centrifugal Atomization

Long Zan^{1,2}, Bai Hailong^{1,2}, Chen Dongdong^{1,2}, Duan Xuelin², Yan Jikang¹, Yi Jianhong¹

(1. Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

(2. Yunnan Tin Industry Tin Material Co., Ltd, Kunming 650217, China)

Abstract: In order to produce high-quality SAC305 alloy spherical powder, the effects of process parameters such as rotating speed, melt feed rate, shape and size of atomizer, and oxygen content in the atomizer chamber on the performance of Sn-3.0Ag-0.5Cu powder were studied by rotary centrifugal atomization. The results show that the median size of the atomized powders becomes smaller with the increase of the rotating speed (6000~60 000 r/min), the decrease of the melt feed rate (30~60 kg/h), and the increase of the atomizer size (30~50 mm). The experiment value of n is 1.65, and the CFD value of n is 2.23. The average particle size of the powder produced by the cup-shaped atomization disk is reduced by 8% compared with the flat atomization disk. SEM results reveal that with the decrease of the oxygen content in the atomization chamber, the sphericity of the powder increases. When the oxygen content in the atomization chamber is less than 400 $\mu\text{L L}^{-1}$, the oxygen content on the powder surface is less than 100 $\mu\text{g g}^{-1}$. The particle size and sphericity of the SAC305 powder are controlled by the process, and surface quality of the powder is related to the cooling efficiency and collection technology.

Key words: centrifugal atomization; Sn-3.0Ag-0.5Cu; solder powder; computational fluid dynamics

Corresponding author: Yan Jikang, Ph. D., Professor, Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China, E-mail: scyjk@kust.edu.cn