

微量 P 对 Sn-0.7Cu 无铅钎料高温抗氧化性能的影响

王青萌, 王怀山, 孟国奇, 罗虎, 甘贵生

(重庆市特种焊接材料与技术高校工程技术研究中心(重庆理工大学), 重庆 400054)

摘要: **目的** 研究了微量 P 元素的添加, 对 Sn-0.7Cu 无铅钎料在高温条件下抗氧化性能的影响。**方法** 制备了 Sn-0.7Cu 和 Sn-0.7Cu-xP 钎料合金, 在 250 ~ 370 °C 温度下, 采用目测观察和表面刮渣法, 研究了熔融钎料在高温下的抗氧化性能。**结果** 微量 P 元素能显著提高熔融 Sn-0.7Cu 钎料低温下的抗氧化性能, 低温下 P 含量为 0.009% 时抗氧化性能最好, 当温度超过 340 °C 时, 抗氧化性能减弱, 超过 370 °C 时完全失去抗氧化效果。**结论** 在 250 °C 时, Sn-0.7Cu 钎料的氧化膜生长系数 $k_{250\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1.59 \times 10^{-6}$, 约为 Sn-0.7Cu-0.009P 的 3 倍, 在 370 °C 时, Sn-0.7Cu 钎料的氧化膜生长系数 $k_{370\text{ }^{\circ}\text{C}} = 3.03 \times 10^{-6}$, 与 Sn-0.7Cu-0.009P 的相差不大。

关键词: 无铅钎料; Sn-0.7Cu; 抗氧化性; 微量 P

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.02.008

中图分类号: TG425

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2015)02-0046-05

Influence of Trace P on the High-temperature Oxidation Resistance of Sn-0.7Cu Lead-free Solder

WANG Qing-meng, WANG Huai-shan, MENG Guo-qi, LUO Hu, GAN Gui-sheng

(Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institutions of Higher Education for Special Welding Materials and Technology (Chongqing University of Technology), Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to investigate the effects of adding trace P elements on the high-temperature oxidation resistance of Sn-0.7Cu lead-free solder. Sn-0.7Cu and Sn-0.7Cu-xP solder alloys were prepared to investigate the influence of trace P on liquid Sn-0.7Cu lead-free solder in the temperature range of 250 ~ 370 °C. The oxidation resistance at high temperature was evaluated by visual observation and surface skimming. The results showed that trace P could significantly improve the oxidation resistance of Sn-0.7Cu at low temperature and the optimal P content was 0.009%. The oxidation resistance was weakened when the temperature was higher than 340 °C and was completely lost when the temperature was over 370 °C. The growth factor of oxide film on the surface of liquid Sn-0.7Cu solder ($k_{250\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1.59 \times 10^{-6}$) was three times as high as that of Sn-0.7Cu-0.009P at 250 °C, while the growth factor of oxide film on the surface of liquid Sn-0.7Cu solder at 370 °C was very similar to that of the Sn-0.7Cu-0.009P solder.

KEY WORDS: lead-free solder; Sn-0.7Cu; oxidation resistance; trace P

收稿日期: 2015-01-16

基金项目: 重庆理工大学研究生创新基金重大项目(YCX2013101; YCX2014215); 重庆理工大学科研启动基金(2012ZD12); 重庆市教委/科技研究一般项目(KJ130813)

作者简介: 王青萌(1990—), 男, 湖北襄阳人, 硕士生, 主要研究方向为微连接材料与技术。

通讯作者: 甘贵生(1982—), 男, 湖北孝感人, 博士, 讲师, 主要研究方向为微连接材料与技术。

电子产品无铅化的进程,极大地推动了无铅钎料及其相关技术的发展。目前,在无铅钎料的研究中,人们认为替代 Sn-Pb 钎料的最佳合金是由 Sn, Ag, Cu 组成的共晶合金^[1-2]。然而,由于 Sn-Ag-Cu 共晶合金含有较多的银,其价格昂贵,会使电子产品的制造成本上升,因而用户难以接受,使得它的推广应用受到了极大限制。相对来说,Sn-Cu 系合金因其价格便宜,原料来源广泛,在电子钎焊中被认为是一种性价比最高的无铅钎料^[3]。

Sn-Cu 系无铅钎料主要是指 Sn-0.7Cu 共晶合金,其熔化温度为 227 ℃,其钎焊温度一般大于 260 ℃^[4]。由于 Sn-0.7Cu 无铅钎料在高温下使用时对基体金属的润湿性和铺展能力较差,且极容易发生氧化,这不仅会造成大量的浪费,而且还会增加焊点形成缺陷的几率,进而严重影响焊点的可靠性^[5]。目前已有文献对 Sn-Cu 钎料的液态性能进行了研究^[6-9],王瑾^[10]通过在 Sn-0.7Cu 中加入一定量的 Ge,发现在 260 ℃的液态下 Ge 元素会高度富集于合金表面,形成保护性氧化膜,阻止熔融钎料发生进一步的氧化反应。李广东^[11]等人通过实验发现,在 Sn-0.7Cu 中加入微量 Ga 元素会在钎料表面形成阻挡层,抑制了钎料的进一步氧化。赵快乐^[12]等人研究了微量 Ni 对 Sn-0.7Cu 的影响,发现 Ni 会导致基体钎料熔点略微升高,并显著提高基体钎料的铺展性能。黄文超^[13]等人也在 Sn-0.65Cu 钎料中添加了纳米 Ni 颗粒,发现当 Ni 质量分数为 0.1% 时润湿力最大,然后随着 Ni 含量的增加逐渐减弱,且纳米 Ni 颗粒会增强钎料的抗氧化性,当 Ni 质量分数为 0.7% 时抗氧化性最好。这些研究一般都只是集中于 260 ℃左右的低温条件下的使用问题。在实际的生产过程中,企业往往希望同一种无铅钎料能在更宽的温度范围内使用,例如 250 ~ 400 ℃ 范围内使用,因此研究钎料在高温下的抗氧化性能显得尤为重要。针对这一问题,作者研究了添加微量 P 对 Sn-0.7Cu 无铅钎料在高温下的抗氧化性能的影响。

1 试验

按 Sn-0.7Cu 钎料标称化学成分称量纯度为 99.9% 的 Sn 和 Cu,在保护气氛下,采用温控锡炉在 400 ℃ 温度下熔炼 Sn-0.7Cu 钎料合金,然后将 Sn-3P 中间合金按配比加入熔化的 Sn-0.7Cu 钎料合金中,保温 30 min 后,充分搅拌均匀,去除表面氧化渣,出

炉,浇铸,自然冷却后即得 Sn-0.7Cu-xP 钎料。

将制备的各钎料样品分别在 250,310,370 ℃,下保温 30 min,目测观察熔融钎料表面颜色的变化。然后将温度分别设定在 250,280,310,340,370 ℃,刮渣间隔时间(周期)设置为每 1 min 一次,收集 30 次的氧化渣量,称重。然后再将钎料的刮渣周期分别设定为 2,4,6,8 min,研究氧化渣随刮渣周期的变化。

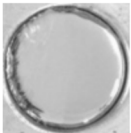
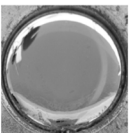
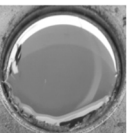
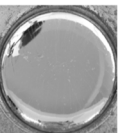
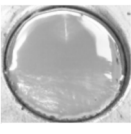
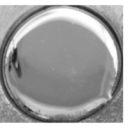
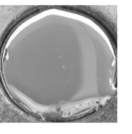
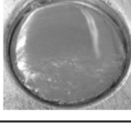
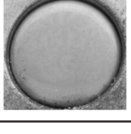
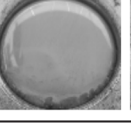
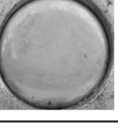
2 结果与讨论

2.1 表面氧化膜颜色的变化

根据薄膜色泽的物理原理,当金属氧化膜厚度与入射光波长成一定倍数时,由于入射光与反射光的干涉,氧化膜会呈现特定的色泽,这种色泽会随着氧化膜厚度的变化而有规律地变化。当膜较厚时,金属光泽将消失,光亮镜面将变模糊而呈现不同的颜色。

表 1 为各钎料在 250,310,370 ℃ 加热保温 30 min 后的表面氧化膜颜色的图片。可以看到:在 250 ℃ 保温 30 min 后,Sn-0.7Cu 熔融钎料表面生成了一层金黄色的氧化膜,Sn-0.7Cu-xP 熔融钎料表面仍保持光亮镜面,3 种含 P 元素的 Sn-0.7Cu-xP 无铅钎料表面光亮度一致。在 310 ℃ 保温 30 min 后,Sn-0.7Cu 的表面氧化进一步加剧,表面氧化膜颜色加深变为淡的紫红色,3 种含 P 元素的 Sn-0.7Cu-xP 无铅钎料表面依然保持光亮,其中 P 的质量分数为 0.003% 时的氧化膜颜色略有变化。当温度继续升高,在 370 ℃ 保温 30 min 后,Sn-0.7Cu 的表面氧化膜变为棕黑色,3 种

表 1 大气下熔融钎料表面氧化膜图片
Table 1 Photographs of oxide film on the surface of molten solder in atmosphere

温度 /℃	Sn-0.7Cu	Sn-0.7Cu-0.003P	Sn-0.7Cu-0.009P	Sn-0.7Cu-0.012P
250				
310				
370				

含P的Sn-0.7Cu无铅钎料的表面氧化膜光亮褪去,继而变为灰色且表面弥散分布着一些花粉状物质。

2.2 微量P对Sn-0.7Cu钎料抗氧化性能的影响

图1给出了在大气氛下Sn-0.7Cu-xP和Sn-0.7Cu合金表面氧化渣量随温度的变化关系(刮渣间隔时间(周期)为1 min)。由图1可以看出:4种无铅钎料氧化渣产量均随温度的升高而增加,但低温时Sn-0.7Cu氧化渣量明显比Sn-0.7Cu-xP的大,而高温时Sn-0.7Cu-xP的氧化渣量反而超过了Sn-0.7Cu。250℃时,Sn-0.7Cu的总氧化渣量为0.336 g,约为Sn-0.7Cu-xP的2~3倍;370℃时,Sn-0.7Cu的总氧化渣量为0.64 g,与Sn-0.7Cu-xP相差不大。对比3种含微量P元素的Sn-0.7Cu无铅钎料的渣量曲线可以发现:在低温下,P的质量分数为0.003%和0.006%时的Sn-0.7Cu氧化渣量较多,而P的质量分数为0.009%和0.012%时的Sn-0.7Cu氧化渣量较少且相差不大。在高温下,P的质量分数为0.003%和0.006%时的Sn-0.7Cu氧化渣量较少,而P的质量分数为0.009%和0.012%时的Sn-0.7Cu氧化渣量反而较多。

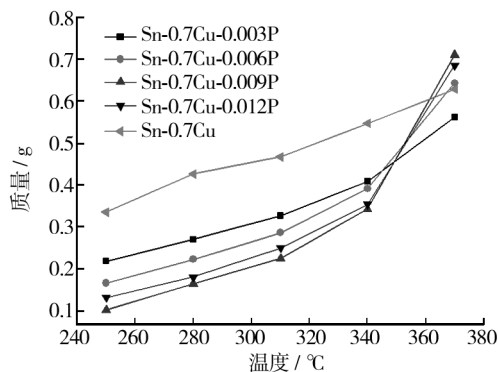


图1 氧化渣产量随温度的变化

Fig. 1 The relationship between the temperature and the dross mass

图2给出了在不同温度下Sn-0.7Cu和Sn-0.7Cu-xP在30 min内的出渣量 m 随撇渣周期 T 的变化关系。可以看出:4种无铅钎料氧化渣的生成速率均随撇渣周期的增大而减少。在250℃下,以相同周期撇渣时,Sn-0.7Cu的氧化渣量显著高于Sn-0.7Cu-xP的渣量,P的质量分数为0.003%时的Sn-0.7Cu的产渣量,比P的质量分数为0.009%和0.012%时的多,而P的质量分数为0.009%和0.012%时的Sn-0.7Cu无铅钎料的氧化渣量相差不大。在370℃,以相同周

期撇渣时,Sn-0.7Cu的氧化渣量与Sn-0.7Cu-0.003P氧化渣量相差不大,而Sn-0.7Cu-0.009P和Sn-0.7Cu-0.012P的氧化渣量反而大于Sn-0.7Cu的氧化渣量,对比3种含P的Sn-0.7Cu无铅钎料可以发现,其氧化渣量随P含量的增加而增加。

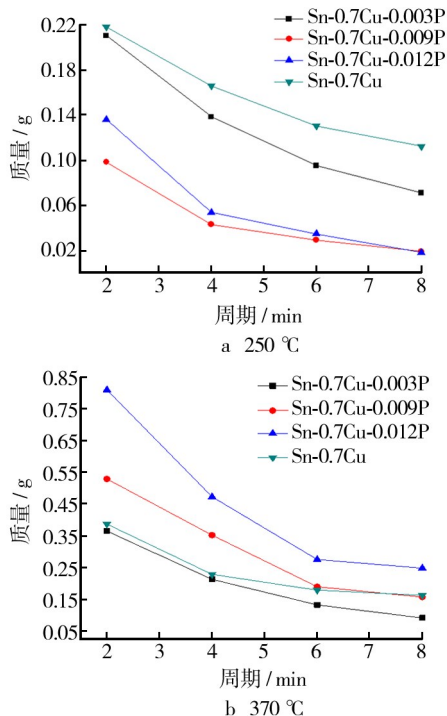


图2 不同温度下各钎料氧化渣产量随刮渣周期的变化

Fig. 2 Variation of oxidation residue of different solder with skimming cycle at different temperature

有文献指出^[14],在一定温度下,一定表面上的氧化渣量随时间的变化均服从抛物线规律。即氧化速度符合以下公式:

$$\Delta m = A k t^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: Δm 为增加的质量; A 为表面积; t 为加热时间; k 为氧化层生长系数,且:

$$k = k_0 \exp(-B/T) \quad (3)$$

式中: T 为加热温度(K); k_0 和 B 均为常数。

根据图2的数据,由以上公式可以计算出250℃时,熔融Sn-0.7Cu无铅钎料的氧化层生长系数($k = 1.59 \times 10^{-6}$)约为Sn-0.7Cu-0.009P氧化层生长系数($k = 0.5 \times 10^{-6}$)的3倍;370℃时,熔融Sn-0.7Cu无铅钎料的氧化层生长系数($k = 3.03 \times 10^{-6}$)与Sn-0.7Cu-0.009P氧化层生长系数($k = 3.3 \times 10^{-6}$)相差不大。

2.3 微量P对Sn-0.7Cu抗氧化影响机理分析

按照热力学原理,氧化物的标准生成自由能的负

值越大,表示该金属越容易被氧化^[15]。表 2 为相关金属氧化物的标准生成自由能。

表 2 无铅钎料中金属氧化物的标准生成自由能
Table 2 The Gibbs Free Energy of metal oxides in lead-free solder^[16]

化学反应 ΔG_θ /(J·mol ⁻¹)	温度/K			
	298	400	600	800
P(s)→P ₂ O ₅ (s)	-3078.1	-3104.98	-3176.93	-3190.17
P(s)→P ₂ O ₃ (s)	-2317.13	-2354.76	-2441.1	-2540.78
Sn(s)→SnO ₂ (s)	-591.33	-596.56	-610.43	-629.61
Sn(s)→SnO(s)	-302.61	-309.06	-325.03	-344.30
Cu(s)→Cu ₂ O(s)	-197.99	-208.50	-234.04	-264.60
Cu(s)→CuO(s)	-168.55	-173.58	-186.83	-203.61

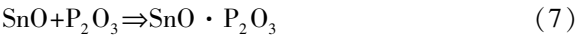
由表 2 可以看出,P₂O₅ 的标准生成自由能最小,其次是 P₂O₃。由热力学分析,金属的氧化反应表达式一般为^[17]:

$$xM+\frac{1}{2}yO_2=M_xO_y \tag{4}$$

其的具体过程为:



M_xO_y 为任意氧化物,M_xO_y 的形成过程在液态金属新鲜表面暴露的瞬间即可完成。由于 P 元素有表面偏析行为^[18],将有更多的 P 在钎料表面发生氧化并与 SnO 形成锡酸盐形式的表面氧化膜:



Pilling 和 Bedworth^[19] 的理论认为,金属氧化过程中形成的氧化膜是否具有保护性首先取决于膜的完整性,其必要条件为:氧化时所生成的金属氧化膜的体积(V_{OX})比生成这些氧化膜所消耗的金属的体积(V_M)要大,即 V_{OX}/V_M 大于 1,此比值称为 P-B 比,用 γ 表示为:

$$\gamma=\frac{V_{OX}}{V_M}=\frac{M\rho_M}{nA\rho_{OX}}=\frac{M\rho_M}{m\rho_{OX}}>1 \tag{8}$$

其中:M 为金属氧化物的相对分子质量;A 为金属的相对分子质量;n 为金属氧化物金属的原子数;m 为形成氧化膜所消耗的金属质量;ρ_M 和 ρ_{OX} 为金属和金属氧化物的密度。

当 γ 小于 1 时,生成的氧化膜不能完整覆盖整个

金属表面,氧化膜酥松多孔,保护性很差。当 γ 过大(如 γ>2),膜的内应力过大,易破裂而失去保护性。而实践证明,保护性较好的氧化膜 P-B 比是稍大于 1。由式(8)可以求得 P₂O₃ 的 γ 值为 1.1,SnO 的 γ 值为 1.28,所以这种锡酸盐氧化膜才是真正致密的,阻碍了液态钎料合金与空气的相互接触,进而提高了钎料的抗氧化性能。所以在低温下,P 的质量分数越高,钎料的抗氧化性能越好;但质量分数过高,造成大量的 P 在表面偏聚,会影响了表面膜的致密性,故 P 的质量分数为 0.009% 时抗氧化性能较好(见图 2)。

由于 P₂O₅ 的熔点为 340 ℃,升华温度为 360 ℃。当温度持续升高,超过 340 ℃ 时钎料的氧化膜发生液化,热对流和分子的热运动加剧,抗氧化性能明显减弱;从图 1 中可以看到 Sn-0.7Cu-xP 产渣量斜率在 340 ℃ 时明显增大。而当温度超过 360 ℃,氧化膜已经失去保护作用,P 含量的增加,只会增加氧化渣的质量;如图 2 所示,Sn-0.7Cu-xP 产渣量都高于 Sn-0.7Cu 的产渣量。

相同温度下,刮渣周期(刮渣间隔)越短,由于钎料表面的氧化膜不断被刮去,新鲜表面越容易暴露在空气中,氧化越严重,单位时间内产渣量越大(见图 2)。

3 结论

- 1) 微量 P 元素能显著提高熔融 Sn-0.7Cu 钎料低温下的抗氧化性能,当温度超过 340 ℃ 时抗氧化性能减弱,超过 370 ℃ 时完全失去抗氧化的效果。
- 2) 低温下,P 的质量分数越高,钎料的抗氧化性能越好,但质量分数过高,造成大量的 P 在表面偏聚,影响了表面膜的致密性,故 P 的质量分数为 0.009% 时抗氧化性能最好。
- 3) 在 250 ℃ 时,Sn-0.7Cu 钎料的氧化膜生长系数(k_{250 ℃} = 1.59×10⁻⁶) 约为 Sn-0.7Cu-0.009P 的 3 倍,在 370 ℃ 时,Sn-0.7Cu 钎料的氧化膜生长系数(k_{370 ℃} = 3.03×10⁻⁶) 与 Sn-0.7Cu-0.009P 的相差不大。

参考文献:

[1] 甘贵生,杜长华,甘树德. 电子微连接高温无铅钎料的研究进展[J]. 功能材料,2013,S1:28—35.
GAN Gui-sheng, DU Chang-hua, GAN Shu-de. Advances of High Temperature Lead-free Solder in Electronic Micro Connection[J]. Journal of Functional Materials, 2013, S1: 28—35.

[2] 李广东,史耀武,夏志东,等. 微量元素改性 Sn-0.7Cu 系

- 无铅钎料的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2009(2): 70—73.
- LI Guang-dong, SHI Yao-wu, XIA Zhi-dong, et al. Research Progress of Sn-0.7Cu System Lead-free Solder Modified by Microelements[J]. Electronic Components and Materials, 2009(2): 70—73.
- [3] JOHN H L, PANG B S, XIONG T H. Low Cycle Fatigue Study of Lead-free 99.3Sn-0.7Cu Solder Alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 268: .
- [4] 林鹏, 杨思佳. 电子器件钎料无铅化的研究现状及展望[J]. 理化检验(物理分册), 2013(11): 752—755.
- LIN Peng, YANG Si-jia. Research Status and Prospects of Lead-free Solder in Electronic Device[J]. Physical and Chemical Test (Physical Volume), 2013(11): 752—755.
- [5] 任晓雪, 李明, 毛大立. 合金元素对 Sn-Zn 基无铅钎料高温抗氧化性的影响[J]. 电子元件与材料, 2004, 23(11): 40—44.
- REN Xiao-xue, LI Ming, MAO Da-li. Effect of Alloying Elements on the High-temperature Oxidation Resistance of Sn-Zn Based Lead-free Solder[J]. Electronic Components and Materials, 2004, 23(11): 40—44.
- [6] 赵宁, 潘学民, 马海涛, 等. Sn-Cu 钎料液态结构的研究[J]. 金属学报, 2008(4): 467—472.
- ZHAO Ning, PAN Xue-min, MA Hai-tao, WANG Lai. Study of the Liquid Structure of Sn-Cu Solders[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 04: 467—472.
- [7] 甘树德, 甘贵生, 王涛, 等. Sb, Bi 元素对 Sn-22Sb 高温钎料合金组织的影响[J]. 精密成形工程, 2014, 6(3): 50—53.
- GAN Shu-de, GAN Gui-sheng, WANG Tao, et al. Effects of Sn and Bi on the Microstructure of Sn-22Pb Solder Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(3): 50—53.
- [8] 甘贵生, 杜长华, 陈方, 等. 液态锡焊料常见元素氧化的热力学分析[J]. 重庆工学院学报, 2006(8): 60—62.
- GAN Gui-sheng, DU Chang-hua, CHEN Fang, et al. Thermodynamic Analysis on the Oxidation Reaction of Familiar Elements in Melting Tin Solder Alloy[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2006(8): 60—62.
- [9] 王涛, 甘贵生, 赵海健, 等. 活性剂对 Sn-0.65Cu 无铅钎料的 IMC 影响[J]. 精密成形工程, 2013, 5(1): 33—36.
- WANG Tao, GAN Gui-sheng, ZHAO Hai-jian, et al. Effect of Activators on Intermetallic Compounds in Sn-0.65Cu Lead-free Solder[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(1): 33—36.
- [10] 王瑾. 微量 Ni, Ge 元素改善 Sn-0.7Cu 无铅合金焊料性能的机理研究[J]. 印制电路信息, 2009, S1: 324—329.
- WANG Jin. The Mechanism Study of Sn-0.7Cu Lead-free Solders Properties Modified by Ni, Ge Microelements[J]. Printed Circuit Information, 2009, S1: 324—329.
- [11] 李广东, 郝虎, 史耀武, 等. 微量元素对 Sn-0.7Cu 无铅钎料抗氧化性能的影响[J]. 电子元件与材料, 2007(11): 49—52.
- LI Guang-dong, HAO Hu, SHI Yao-wu, et al. Effect of the Microelements on the Oxidation-resistance of Sn-0.7Cu Lead-free Solder[J]. Electronic Components and Materials, 2007(11): 49—52.
- [12] 赵快乐, 闫焉服, 唐坤, 等. 微量 Ni 对 Sn0.7Cu 钎料物理性能及钎焊工艺性能影响[J]. 焊接技术, 2011(8): 40—43.
- ZHAO Kuai-le, YAN Yan-fu, TANG Kun, et al. The Influence of Trace Ni on Physical Properties and the Brazing Process Performance of Sn-0.7Cu Solder[J]. Welding Technique, 2011(8): 40—43.
- [13] 黄文超, 甘贵生, 唐明, 等. 纳米 Ni 颗粒对 Sn-0.65Cu 亚共晶钎料润湿性和抗氧化性的影响[J]. 精密成形工程, 2013, 5(1): 16—19.
- HUANG Wen-chao, GAN Gui-sheng, TANG Ming, et al. The Effect of Nano-Ni Particles on the Wettability and Oxidation Resistance of Sn0.65Cu Hypoeutectic Solder[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(1): 16—19.
- [14] 陈方, 杜长华, 杜云飞, 等. 液态 Sn-Cu 合金的恒温热氧化性研究[J]. 电子元件与材料, 2006(1): 49—51.
- CHEN Fang, DU Chang-hua, DU Yun-fei, et al. Thermooxidation Capability of Liquid Sn-Cu Solder on Constant Temperature[J]. Electronic Components and Materials, 2006(1): 49—51.
- [15] 李建新, 赵国平, 程晓农. Bi 对 Sn-0.7Cu 无铅焊料微观组织和性能的影响[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2009(1): 489—491.
- LI Jian-xin, ZHAO Guo-ping, CHENG Xiao-nong. Effect of Bi on Microstructures and Properties of Sn-0.7Cu Lead-free Solder[J]. Material Review, 2009(1): 489—491.
- [16] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学数据手册[K]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
- LIANG Ying-jiao, CHE Yin-chang. Inorganic Thermodynamic Data Manual[K]. Shenyang: Northeastern University Press, 1993.
- [17] 吴申庆, 邵力为, 刘洁美, 等. 用俄歇电子谱法研究锡铅焊料的抗氧化机理[J]. 东南大学学报, 1989(4): 74—79.
- WU Shen-qing, SHAO Li-wei, LIU Jie-mei, et al. With Auger Electron Spectroscopy Study the Oxidation Mechanism of Tin-lead Solder[J]. Journal of Southeast University, 1989(4): 74—79.

- Plasticity Engineering, 2007, 14(3): 49—53.
- [6] 孙凌燕. 内筋参数对薄壁复杂构件旋压材料流动的影响[J]. 制造业自动化, 2012(12): 50—51.
- SUN Ling-yan. Effect of Parameters of Inner Rib on Material of Low in Spinning of Complicated Thin-walled Parts[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012(12): 50—51.
- [7] 王宏伟, 张宝红, 力泽勇, 等. 变壁厚筒形件辊挤成形数值模拟分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(9): 102—105.
- WANG Hong-wei, ZHANG Bao-hong, LI Ze-yong, et al. Variable wall Thickness of Cylindrical Pieces Rolls Extrusion Forming Simulation Analysis[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(9): 102—105.
- [8] 杨光, 毕大森. 旋轮转速对变截面钢车轮旋压成形影响分析[J]. 特种成形, 2011(2): 74—77.
- YANG Guang, BI Da-sen. Spin the Wheel Speed on the Variable Steel Wheels Spinning Impact Analysis[J]. Special Forming, 2011(2): 74—77.
- [9] 杨合, 孙志超. 局部加载控制不均匀变形与精确塑性成形研究进展[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 6—14.
- YANG He, SUN Zhi-chao. Partial Load Control Inhomogeneous Deformation and Precision Plastic Forming Progress[J]. Plasticity Engineering, 2008, 15(2): 6—14.
- [10] 张利鹏, 刘智冲. 筒形件强力旋压工艺参数选取方式分析[J]. 锻压技术, 2006(1): 43—45.
- ZHANG Li-peng, LIU Zhi-chong. Analysis of Power Spinning Parameter Selection Mode for Cylinders[J]. Agricultural Mechanization Research, 2006(1): 43—45.
- [11] BARTNICKI J. The Distributions of Wall-thickness of Hollowed Parts in Rolling Extrusion Process[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2009(2): 104—107.
- [12] KLEINER M, GEIGER M, KLAUS A. Manufacturing of Light weight Components by Metal Forming[J]. Annals of the CIRP, 2003, 52(2): 521—542.
- [13] 刘全坤. 材料成形基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- LIU Quan-kun. Material Forming the Basic Principles[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010.
- [14] 曾向东. 钛合金零件的强力旋压加工[J]. 精密成形工程, 2014, 6(2): 24—31.
- ZENG Xiang-dong. Spinning Processing of Niobium Alloy Parts[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(2): 24—31.
- [15] 吴统超, 詹梅, 蒋华兵, 等. 旋压间隙对大型复杂薄壁壳体多道次旋压中第二道次成形质量的影响[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(1): 74—81.
- WU Tong-chao, ZHAN Mei, JIANG Hua-bing, et al. Multi-pass Spinning Gap Large Complicated Shell in the Second Pass, Such as the Impact on the Forming Quality[J]. Northwestern Poly Technical University, 2011, 29(1): 74—81.
- [16] 孙丽丽, 薛克敏. 汽车轮毂旋压成形过程的有限元数值模拟[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2008, 31(4): 552—555.
- SUN Li-li, XUE Ke-min. Finite Element Simulation Car Wheels Spinning Process[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2008, 31(4): 552—555.
- [17] 王宾, 秦建平. 不锈钢管冷旋压热力耦合有限元模拟[J]. 精密成形工程, 2011, 3(5): 31—34.
- WANG Bin, QIN Jian-ping. FEM Coupled Thermal mechanical Simulation of Cold Spinning of Stainless Steel Pipe[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(5): 31—34.

(上接第 50 页)

- [18] 董文兴, 史耀武, 夏志东, 等. Ni/P/Ce 对 SnAgCu 抗氧化性能和结晶裂纹的影响[J]. 焊接学报, 2009(3): 77—80.
- DONG Wen-xing, SHI Yao-wu, XIA Zhi-dong, et al. Effects of Ni/P/Ce on the Oxidation Resistance and Solidification Cracking of SnAgCu Lead-free Solder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009(3): 77—80.
- [19] ZHANG Sha-sha, ZHANG Yi-jie, WANG Hao-wei. Effect of Oxide Thickness of Solder Powders on the Coalescence of SnAgCu Lead-free Solder Pastes[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487(1): 682—686.