

Ni 含量对 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎焊接头组织与剪切性能的影响

韩晓辉¹, 张志毅¹, 邓建峰², 刘勇¹, 王博², 徐野¹

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛, 266111; 2. 中国机械总院集团宁波智能机床研究院有限公司, 宁波, 315700)

摘要: 研究了 Ni 含量对 Sn-8Sb-4Cu-xNi($x = 0, 0.5, 1$ 和 2 , 质量分数) 钎料熔点和微观组织的影响, 用 Sn-8Sb-4Cu-xNi 钎料对 304 不锈钢进行钎焊连接, 分析了接头的界面组织与剪切性能. 结果表明, 添加不同含量的 Ni 后, Sn-8Sb-4Cu-xNi 均为近共晶钎料, 其熔点约为 $245\text{ }^{\circ}\text{C}$; Sn-8Sb-4Cu 钎料组织由 α 相基体、 $\text{Sb}_2\text{Sn}_3 + \text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Sn}$ 复合相和 $\text{Cu}_6(\text{Sn,Sb})_5$ 相组成. 添加 Ni 元素后, 钎料中块状 $\text{Cu}_6(\text{Sn,Sb})_5$ 转变为细小、均匀分布的 $(\text{Cu,Ni})_6(\text{Sn,Sb})_5$. 当 Ni 含量小于 1% 时, 随 Ni 含量的增加, 钎料中的复合相和 $(\text{Cu,Ni})_6(\text{Sn,Sb})_5$ 相均增加; 当 Ni 含量为 2% 时, 钎料中的复合相和 $(\text{Cu,Ni})_6(\text{Sn,Sb})_5$ 相均减少, 但 $(\text{Cu,Ni})_6(\text{Sn,Sb})_5$ 相中 Ni 含量增加至与 Cu 相当; Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎焊界面均形成了一层厚度约 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 的扩散反应层, EDS 分析显示, 该层为 FeSn_2 化合物. 钎缝中全部为 Cu_6Sn_5 型化合物, 未见 Sn-Sb 型化合物. Ni 元素的添加, 提高了 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎焊接头的抗剪强度, 当 Ni 含量为 0.5% 时, 接头抗剪强度最大, 为 67 MPa , 与不含 Ni 钎料相比提高了 60% . 所有接头的断裂位置均位于钎缝.

创新点: (1) 制备了 Sn-8Sb-4Cu-xNi 近共晶无铅无银钎料, 实现了 304 不锈钢软钎焊.

(2) 从组织演变的角度分析了 Ni 含量对钎料组织的影响规律及钎焊接头剪切性能提高的原因.

关键词: 304 不锈钢; Sn-8Sb-4Cu 钎料; 软钎焊; 剪切性能

中图分类号: TG 454

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20220325008

0 序言

不锈钢具有良好的成形性、耐腐蚀性和耐热性等性能, 广泛应用于航空航天、轨道交通、核电、工业制冷、医疗、厨具等行业领域, 是电子产品连接器的重要接脚材料^[1]. 这些产品往往结构复杂, 焊接位置较多, 钎焊是非常高效的连接方法. 不锈钢硬钎焊常用的钎料有镍基、铜基和银基钎料^[2-6], 熔点较高, 钎焊奥氏体不锈钢易发生敏化现象. 对于工作温度不高、强度要求较小, 但要求密封性好, 外观美观的场合, 不锈钢软钎焊具有突出优势.

当前, 不锈钢软钎焊的研究相对较少, 这与缺乏满足要求的钎料和钎剂有关, 管永星等人^[7]研制了新型 304 不锈钢软钎焊用钎剂, 结果发现, 其铺

展面积比磷酸和氯化锌-氯化铵钎剂提高 2 倍以上. 周许升等人^[8]研究了不锈钢软钎焊的钎料和钎剂, 结果发现, Sn-3.5Ag-0.7Cu 钎料对不锈钢润湿性好、强度高、焊点明亮美观, 然而银为贵金属, 价格昂贵, 限制了其应用.

Sn-Sb-Cu 因其优异的摩擦磨损性能而被广泛应用于轴瓦材料, 通过挂锡浇注、电弧喷涂、激光熔覆等方法在钢基体上制备 Sn-Sb-Cu 涂层, 制成双金属轴瓦^[9]. Yang 等人^[10]采用 Sn-Sb-Cu-Ni 钎料代替 Sn-Ag-Cu 和 Sn-Pb 钎料, 以降低钎料成本和满足无铅化要求. 此外, Ni 元素通过与锡基钎料反应形成针状金属间化合物, 是改善锡基钎料力学性能的常用合金元素^[11-12].

采用价格相对低廉的 Sn-8Sb-4Cu 钎料代替 Sn-3.5Ag-0.7Cu 钎料, 并重点研究添加不同 Ni 含量对 Sn-8Sb-4Cu-xNi 钎料组织及 Sn-Sb-Cu-xNi/304 不锈钢钎焊接头剪切性能的影响, 为不锈钢软钎焊钎料设计和工程应用提供理论基础和数据支撑.

1 试验方法

母材采用尺寸为 50 mm × 40 mm × 2 mm 的 304 不锈钢板材,其化学成分如表 1 所示.采用纯锡、纯铜、纯锑和纯镍为原料制备 Sn-8Sb-4Cu-xNi($x = 0, 0.5, 1$ 和 2 , 质量分数).钎料制备流程如下:首先制备 Sn-5Ni(质量分数)中间合金,将称量好的纯锡和纯镍置于石墨坩埚内,并放入真空炉中加热,温度设置为 650 ℃,保温 3 h;其次,熔炼 Sn-8Sb-4Cu-xNi 钎料,按质量百分比称量好纯锡、纯

铜、纯锑和 Sn-5Ni,熔炼时先将纯锡置于石墨坩埚内,采用感应加热的方式加热到 650 ℃,随后加入纯铜、纯锑和 Sn-5Ni,并搅拌均匀,熔炼过程往液态钎料中加入 ZnCl₂ 和 NH₄Cl 混合物,防止钎料氧化;最后,将熔融合金浇铸成棒状,并挤压成 $\phi 1.9$ mm 的丝材,供后续试验使用.

采用感应钎焊工艺制备 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎焊接头.钎焊前,用酒精擦拭不锈钢母材待焊面,搭接长度为 5 mm,间隙为 0.02 mm,钎料预置方式如图 1 所示.采用的钎剂为 ZnCl₂ + NH₄Cl + HCl 水溶液.

表 1 304 不锈钢的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of 304 stainless steel

Cr	Ni	C	Mn	P	S	Si	Fe
18 ~ 20	8.0 ~ 10.5	0.08	2.00	0.035	0.015	0.75	余量

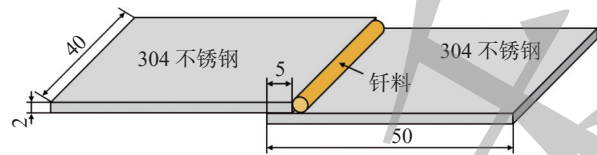


图 1 钎焊接头示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic diagram of the solder joint

在高纯氮气保护下采用 STA449 F3 型同步热分析仪对钎料进行熔点测试,升温速率为 10 ℃/min.借助 Zeiss Axio Vert, A1 型光学显微镜 (optical microscope, OM)、Zeiss EVO 10 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 及其自带的牛津 Ultim Max 型能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 对不同成分的钎料及钎焊接头进行形貌观察和成分分析.采用的腐蚀液为 4% 硝酸酒精溶液.

为得到不同钎料成分的钎焊接头的抗剪强度,采用线切割的方法将钎焊接头切割成 95 mm × 5 mm 的非标准剪切试样,采用 MTS Exceed E44 型电子万能试验机测试接头的剪切力,每种接头测试 5 个试样,取平均值为最终结果.

2 结果与讨论

2.1 钎料 DSC 分析

图 2 为 Sn-8Sb-4Cu-xNi($x = 0, 0.5, 1$ 和 2) 钎料的差示扫描量热法 (differential scanning calorimetry, DSC) 分析结果.所有钎料均只有一个吸热峰,峰值

温度约为 245 ℃.添加质量分数 2% 以内的 Ni 含量对钎料熔点影响较小,制备的 Sn-8Sb-4Cu-xNi 均为近共晶钎料.

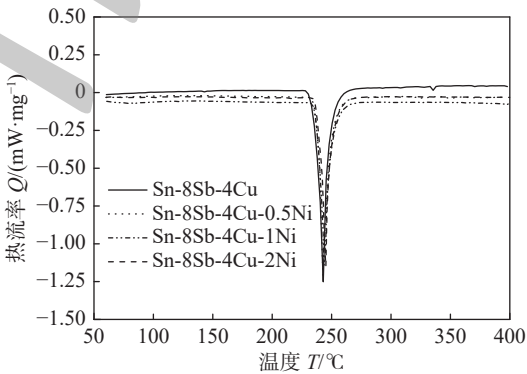


图 2 Sn-8Sb-4Cu-xNi 钎料 DSC 分析结果
Fig. 2 DSC analysis results of Sn-8Sb-4Cu-xNi solders

2.2 钎料微观组织

图 3 为 Sn-8Sb-4Cu-xNi 钎料的微观组织.图 3a 显示 Sn-8Sb-4Cu 钎料的微观组织由 3 种相组成,基体成分为 91.1% Sn, 8.4% Sb, 0.5% Cu(原子分数),为 α 相 (Sb 溶于 Sn 中形成的固溶体);白色颗粒化合物的成分为 77.0% Sn, 19.7% Sb, 3.3% Cu (原子分数),可能为 $\text{Sb}_2\text{Sn}_3 + \text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Sn}$ 复合相^[13];灰色块状化合物的成分为 53.9% Sn, 44.4% Cu, 1.7% Sb(原子分数),即固溶了少量 Sb 的 Cu_6Sn_5 ^[14],由于 Sn 和 Sb 的原子半径相近,且大于 Cu 原子半径,因此 Sb 溶入 Cu_6Sn_5 后倾向于替代 Sn 原子,因

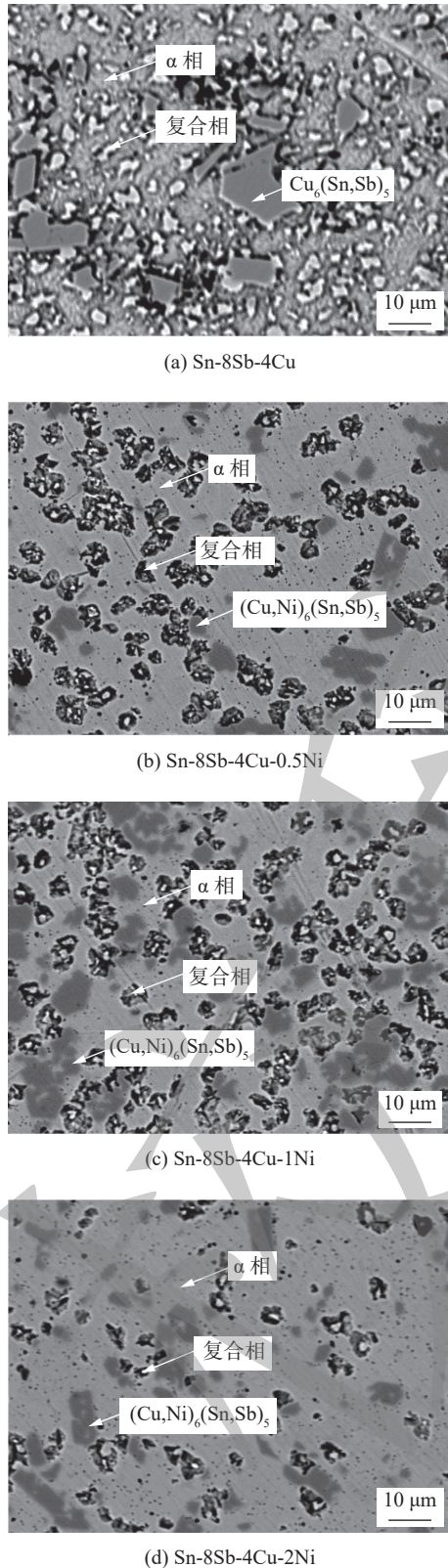


图3 Sn-8Sb-4Cu-xNi 钎料微观组织

Fig. 3 Microstructure of the Sn-8Sb-4Cu-xNi solders. (a) Sn-8Sb-4Cu; (b) Sn-8Sb-4Cu-0.5Ni; (c) Sn-8Sb-4Cu-1Ni; (d) Sn-8Sb-4Cu-2Ni

此,将上述灰色物质记为 $\text{Cu}_6(\text{Sn,Sb})_5$ [12]。

添加 0.5% Ni 后,钎料由基体 α 相、数量较多的颗粒状黑色相和少量灰色相组成,相的分布更为

均匀,如图 3b 所示。EDS 分析显示,钎料中黑色相为固溶了少量 Ni 的 $\text{Sb}_2\text{Sn}_3 + \text{Cu}_6\text{Sn}_5 + \text{Sn}$ 复合相;灰色相为固溶了少量 Ni 的 $\text{Cu}_6(\text{Sn,Sb})_5$,由于 Ni 和 Cu 的原子半径相近, Ni 倾向于替换 Cu,因此,钎料中黑色和灰色相分别为 $\text{Sb}_2\text{Sn}_3 + (\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5 + \text{Sn}$ 复合相和 $(\text{Cu,Ni})_6(\text{Sn,Sb})_5$ 。添加 1% Ni 后,钎料的相组成未发生改变,基体成分为 94.9% Sn, 4.8% Sb, 0.3% Ni(原子分数), α 相中 Sb 含量降低。钎料中 $\text{Sb}_2\text{Sn}_3 + (\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5 + \text{Sn}$ 复合相分布更为细小均匀, $(\text{Cu,Ni})_6(\text{Sn,Sb})_5$ 相明显增加。Ni 含量增加到 2% 后,基体成分为 95.0% Sn, 4.6% Sb, 0.4% Cu(原子分数), α 相中 Sb 含量略有降低。钎料中 $\text{Sb}_2\text{Sn}_3 + (\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5 + \text{Sn}$ 复合相和 $(\text{Cu,Ni})_6(\text{Sn,Sb})_5$ 相均显著减少,EDS 分析显示,此时 $(\text{Cu,Ni})_6(\text{Sn,Sb})_5$ 相的成分为 42.2% Sn, 3.9% Sb, 29.9% Cu, 24.0% Ni(原子分数), $(\text{Cu,Ni})_6(\text{Sn,Sb})_5$ 相中 Ni 含量增加,接近于 Cu 的含量。

2.3 钎缝宏观形貌

图 4 为 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎缝宏观形貌。钎料填满整个缝隙,钎缝成形良好,正面、背面均呈内凹圆弧状,这是钎焊接头的典型形貌。

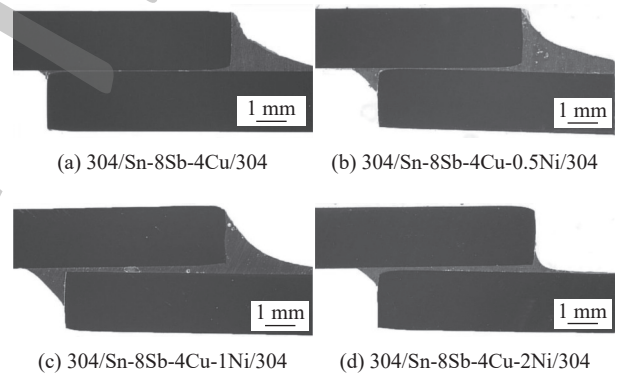
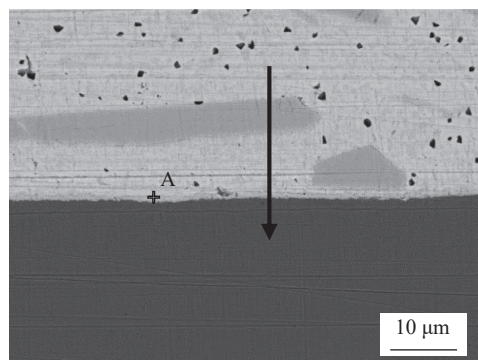


图4 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎缝宏观形貌

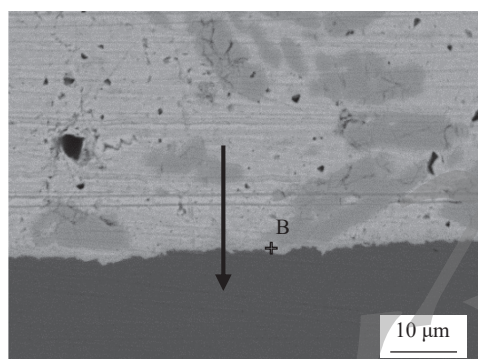
Fig. 4 Macro morphology of 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 solder joints. (a) 304/Sn-8Sb-4Cu/304; (b) 304/Sn-8Sb-4Cu-0.5Ni/304; (c) 304/Sn-8Sb-4Cu-1Ni/304; (d) 304/Sn-8Sb-4Cu-2Ni/304

2.4 界面微观组织

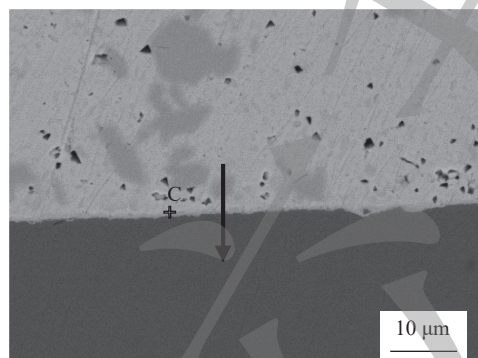
图 5 为 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎焊接头界面形貌,上侧为钎料,下侧为不锈钢母材。图 6 为钎焊接头沿着图 5 箭头所示的线扫描结果。Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎焊界面形成了一层厚度约 1.5 μm 的扩散反应层,EDS 分析结果如表 2 所示,界面扩散层的主要成分为 Sn 和 Fe, A, B 和 D 位置的 Sn 与 Fe 的原子分数近似于 2:1,该扩散反应层为 FeSn_2 。C 点的 Sn 含量偏高,这可能是由于界面层



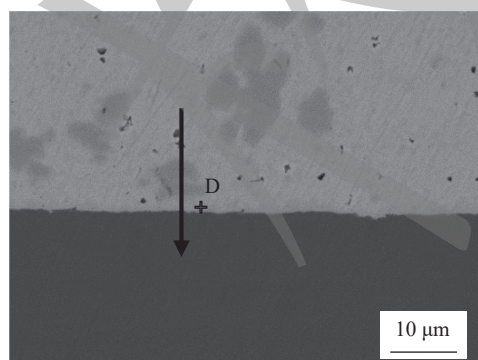
(a) Sn-8Sb-4Cu/304



(b) Sn-8Sb-4Cu-0.5Ni/304



(c) Sn-8Sb-4Cu-1Ni/304

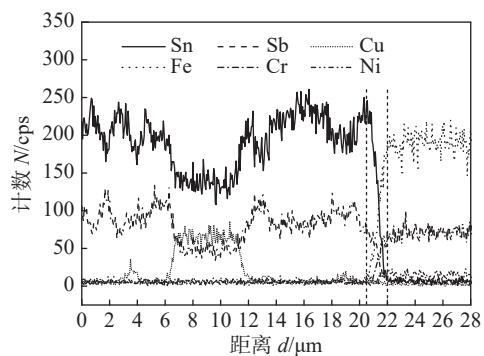


(d) Sn-8Sb-4Cu-2Ni/304

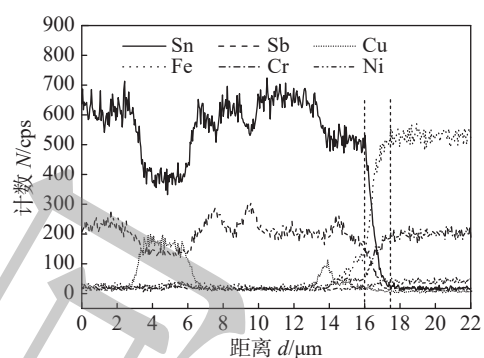
图 5 Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 界面组织

Fig. 5 Interfacial microstructure of Sn-8Sb-4Cu-xNi/304. (a) Sn-8Sb-4Cu/304; (b) Sn-8Sb-4Cu-0.5Ni/304; (c) Sn-8Sb-4Cu-1Ni/304; (d) Sn-8Sb-4Cu-2Ni/304

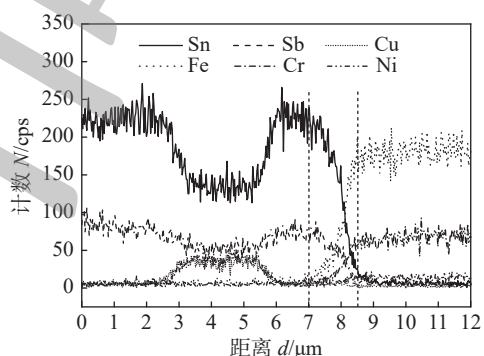
较薄,测试点向钎料一侧发生了偏移。界面组织分析表明,钎料中 Ni 元素的添加并未显著影响 Sn-



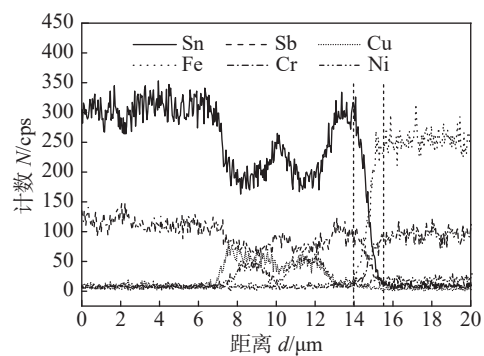
(a) Sn-8Sb-4Cu/304



(b) Sn-8Sb-4Cu-0.5Ni/304



(c) Sn-8Sb-4Cu-1Ni/304



(d) Sn-8Sb-4Cu-2Ni/304

图 6 沿图 5 箭头方向的界面线扫描图

Fig. 6 Line scanning diagram of the interface along the arrow in Fig. 5. (a) Sn-8Sb-4Cu/304; (b) Sn-8Sb-4Cu-0.5Ni/304; (c) Sn-8Sb-4Cu-1Ni/304; (d) Sn-8Sb-4Cu-2Ni/304

8Sb-4Cu-xNi/304 界面反应。

此外,钎料基体内部形成了大量金属间化合物

表 2 Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 界面化学成分 (原子分数, %)
Table 2 Chemical compositions of the Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 interface

位置	Sn	Sb	Cu	Fe	Cr	Ni	扩散层化合物
A	58.6	1.5	1.6	31.8	5.4	1.1	FeSn ₂
B	56.4	2.8	2.2	28.7	7.9	2.0	FeSn ₂
C	75.5	2.5	1.2	15.0	4.2	1.6	FeSn ₂ + Sn
D	54.1	3.0	3.5	28.9	8.3	2.2	FeSn ₂

(intermetallic compounds, IMCs), 线扫描分析结果显示, 未加 Ni 时, 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎缝 IMCs 为 Cu₆Sn₅; 当 Ni 含量为 0.5% 时, 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎缝 IMCs 为 (Cu,Ni)₆Sn₅, 且 Ni 含量很少. 当 Ni 含量为 1% 和 2% 时, 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎缝中 IMCs 仍为 (Cu,Ni)₆Sn₅, 但其中 Ni 含量很高, 与 Cu 接近. 钎焊后, 钎缝中全部为 Cu₆Sn₅ 型 IMCs, 而无 Sn-Sb 型 IMCs 形成.

2.5 钎缝抗剪强度

图 7 为不同成分钎料钎焊 304 不锈钢的钎焊接头抗剪强度. Sn-8Sb-4Cu 钎焊后钎缝平均抗剪强度为 42 MPa, 添加 Ni 元素后, 抗剪强度显著提高. 当 Ni 含量为 0.5% 时, 钎焊接头抗剪强度最大, 达到 67 MPa, 较不添加 Ni 时提高了 60%. 从钎缝组织可以看出, Sn-8Sb-4Cu 钎料中 Cu₆(Sn,Sb)₅ 化合物呈大块状且分布不均匀, 对基体产生割裂作用, 抗剪强度较低. 添加 0.5% Ni 后, 钎料中析出了更多细小、均匀的 (Cu,Ni)₆(Sn,Sb)₅ 化合物, 因而抗剪强度显著提高; 而当 Ni 含量大于 1% 时, 析出了 Ni 含量更高的 (Cu,Ni)₆(Sn,Sb)₅, 但 (Cu,Ni)₆(Sn,Sb)₅ 相更少, 抗剪强度有所降低. 图 8 为钎焊接头的断

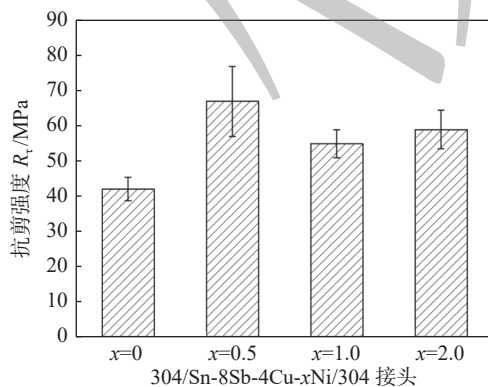


图 7 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎焊接头抗剪强度
Fig. 7 Shear strength of the 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 solder joints

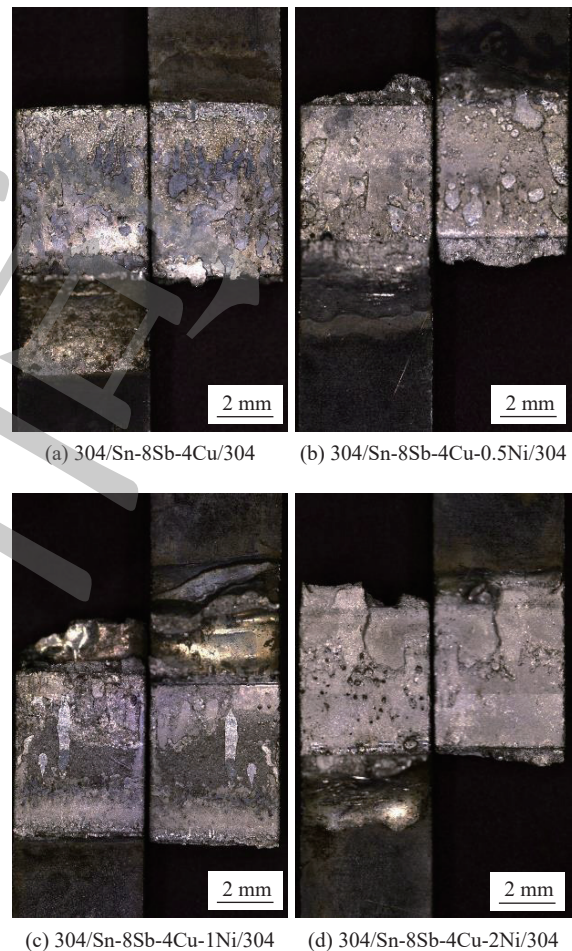


图 8 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎焊接头断口形貌
Fig. 8 Fracture morphology of the 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 solder joints. (a) 304/Sn-8Sb-4Cu/304; (b) 304/Sn-8Sb-4Cu-0.5Ni/304; (c) 304/Sn-8Sb-4Cu-1Ni/304; (d) 304/Sn-8Sb-4Cu-2Ni/304

口形貌, 两侧均有钎料残留, 表明所有钎焊接头均断裂于钎缝.

3 结论

(1) Sn-8Sb-4Cu 钎料组织由 α 相、Sb₂Sn₃ + Cu₆Sn₅ + Sn 复合相和 Cu₆Sn₅ 相组成, 添加不同含

量 Ni 后, α 相中 Sb 含量下降, 且固溶了少量 Ni 或 Cu; 钎料中析出 $\text{Sb}_2\text{Sn}_3 + (\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5 + \text{Sn}$ 复合相和 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6(\text{Sn}, \text{Sb})_5$ 相。当 Ni 含量小于 1% 时, 钎料中 $\text{Sb}_2\text{Sn}_3 + (\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5 + \text{Sn}$ 复合相和 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6(\text{Sn}, \text{Sb})_5$ 相均增加, 且分布更为均匀; 当 Ni 含量为 2% 时, 钎料中 $\text{Sb}_2\text{Sn}_3 + (\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5 + \text{Sn}$ 复合相和 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6(\text{Sn}, \text{Sb})_5$ 相均减少, 但 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6(\text{Sn}, \text{Sb})_5$ 相中的 Ni 含量明显增加, 与 Cu 含量接近。

(2) Sn-8Sb-4Cu-xNi 与 304 不锈钢钎焊的界面均形成了一层厚度约 1.5 μm 的扩散反应层, EDS 分析显示, 该反应层为 FeSn_2 化合物。钎缝中全部为 Cu_6Sn_5 型 IMCs, 而无 Sn-Sb 型 IMCs 形成。

(3) Ni 的添加不会改变 Sn-8Sb-4Cu-xNi 钎料的熔点, 但提高了 304/Sn-8Sb-4Cu-xNi/304 钎焊接头的抗剪强度, 当 Ni 含量为 0.5% 时, 接头的抗剪强度达到最大值 67 MPa, 与不加 Ni 相比提高了 60%。所有接头均断裂于钎缝。

参考文献

- [1] 颜怡文, 刘为开. 封装中无铅焊锡与不锈钢及铁镍的界面反应[J]. 电子与封装, 2010, 10(6): 1-5.
Yan Yiwen, Liu Weikai. Interfacial reactions in lead-free solders with Au/Ni/SUS 304 and alloy 42 in microelectronic packaging[J]. Electronics & Packaging, 2010, 10(6): 1-5.
- [2] 裴冲, 吴欣, 程耀永, 等. 采用 BNi82CrSiB 钎料钎焊 1Cr12Ni3MoVN 不锈钢的接头组织及性能[J]. 电焊机, 2020, 50(9): 268-272.
Pei Chong, Wu Xin, Cheng Yaoyong, et al. Microstructures and mechanical properties of brazing 1Cr12Ni3MoVN stainless steel joints with BNi82CrSiB filler metal[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(9): 268-272.
- [3] 范东宇, 汪一卉, 黄继华, 等. C_f/SiC 复合材料与 304 不锈钢钎焊接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(12): 31-34.
Fan Dongyu, Wang Yihui, Huang Jihua, et al. Brazing C_f/SiC composite materials with 304 stainless steel using Ti-Zr-Be filler metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(12): 31-34.
- [4] 张青科, 裴黄崑, 龙伟民. 奥氏体不锈钢钎焊界面裂纹形成机制研究[J]. 金属学报, 2013, 49(10): 1177-1184.
Zhang Qingke, Pei Yinyin, Long Weimin. Investigations on formation mechanisms of brazing cracks at the austenitic stainless steel/filler metal brazing joint interfaces[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(10): 1177-1184.
- [5] 王星星, 李帅, 彭进, 等. 基于镀锡银钎料钎焊 304 不锈钢接头的腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2018, 39(4): 63-66.
Wang Xingxing, Li Shuai, Peng Jin, et al. Corrosion behaviors of 304 stainless steel joints brazed with Sn-electroplated Ag brazing alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(4): 63-66.
- [6] Liu Xu, Huang Xiaomeng, Ma Huibin, et al. Microstructure and properties of the joints of ZrO_2 ceramic/stainless steel brazed in vacuum with AgCuTi active filler metal[J]. China Welding, 2018, 27(2): 52-56.
- [7] 管永星, 薛松柏, 韩若男, 等. 新型 304 不锈钢软钎焊用钎剂的研制[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 101-104.
Guan Yongxing, Xue Songbai, Han Ruonan, et al. Development of flux for soldering of 304 stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 101-104.
- [8] 周许升, 龙伟民, 裴黄崑, 等. 不锈钢软钎焊用钎料和钎剂的研究[J]. 焊接, 2014(1): 26-29.
Zhou Xusheng, Long Weimin, Pei Yinyin, et al. Study on solder and flux for soldering stainless steel[J]. Welding & Joining, 2014(1): 26-29.
- [9] 郝云波, 赵凯, 杨萍, 等. 激光熔覆锡基巴氏合金微观组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(10): 2016-2023.
Hao Yunbo, Zhao Kai, Yang Ping, et al. Microstructure and mechanical properties of tin-based babbitt alloy made by laser cladding deposition[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(10): 2016-2023.
- [10] Yang L, Jie X H, Guo L. Low-temperature property of new type lead-free solder Sn-X-Cu-Ni[J]. Advanced Materials Research, 2011, 154-155: 371-375.
- [11] Ventura T, Terzi S, Rappaz M, et al. Effects of Ni additions, trace elements and solidification kinetics on microstructure formation in Sn-0.7 Cu solder[J]. Acta Materialia, 2011, 59(10): 4197-4206.
- [12] Tao Q B, Benabou L, Vivet L, et al. Effect of Ni and Sb additions and testing conditions on the mechanical properties and microstructures of lead-free solder joints[J]. Materials & Science Engineering: A, 2016, 669(4): 403-416.
- [13] Lee C, Lin Y W, Yen Y W. The 260 $^{\circ}\text{C}$ phase equilibria of the Sn-Sb-Cu ternary system and interfacial reactions at the Sn-Sb/Cu joints[J]. Intermetallics, 2007, 15(8): 1027-1037.
- [14] 郭亚希, 谢敬佩, 王文焱, 等. 铸造方法对巴氏合金组织及性能的影响[J]. 河南科技大学学报, 2009, 30(4): 8-11, 116.
Guo Yaxi, Xie Jingpei, Wang Wenyan, et al. Effect of casting method on microstructure and property of babbitt alloy[J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Nature Science), 2009, 30(4): 8-11, 116.

第一作者: 韩晓辉, 硕士, 教授级高级工程师, 博士研究生导师; 主要从事轨道客车焊接工艺设计、技术研发及体系建设工作; Email: 13793237339@139.com.

通信作者: 王博, 博士, 高级工程师; Email: wangbo4175@126.com.

(编辑: 张芷晴)