

# 铝钢冷金属过渡焊接界面的组织特征及热力学分析

周彦林, 林巧力, 曹睿, 陈剑虹

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**采用冷金属过渡(CMT)技术,以 4043 AlSi5 焊丝为填充材料,分别在 Q235 钢板和镀锌钢板上进行点焊。使用扫描电镜、能谱分析研究了焊接接头的显微组织,并从热力学角度分析了界面结构形成机理。结果表明:无论基板采用镀锌钢还是 Q235 钢,在界面处均会观察到富 Si 层,其形成符合热力学条件;铝-Q235 钢、铝-镀锌钢在较大热输入的情况下两者都可以达到较好的润湿性;其中镀锌钢板中的镀锌层不能起到改善铝-钢润湿性的作用,其主要作用在于蒸发带走热量而相对降低界面上的热输入。

**关键词:**铝-钢异种金属;冷金属过渡;界面结构;热力学分析

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.2015.05.012

中图分类号: TG422.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2015)05-0040-04

## Microstructure and Thermodynamic Analysis of Cold Metal Transfer Welding Interface Between Aluminum and Steel

ZHOU Yanlin, LIN Qiaoli, CAO Rui, CHEN Jianhong

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China.)

**Abstract:** The cold metal transfer spot welding of aluminum and steel was carried out by using 4043 AlSi5 as filler metal. The microstructure characteristics of the welded joints were analyzed by SEM and EDS, and the formation mechanism of interface structure was analyzed by thermodynamic theory. The results show that: Si-rich intermetallic layer is observed whether the used substrate is Q235 steel or galvanized steel, and the formation of Si-rich intermetallic layer should satisfy the thermodynamic condition of such Al-Si/Fe systems. The good wettability is observed in the case of big heat input under CMT condition whether the used substrate is Q235 steel or galvanized steel. The galvanized layer has no effects on the wettability of aluminum-steel, but its main role is to take away heat after evaporation and reduce the heat input on the interface.

**Key words:** aluminum-steel dissimilar metals; cold metal transfer; interface structure; thermodynamic analysis

随着现代工业的发展和科技的进步,以及企业在节能和轻量化等方面的要求,异种材料的连接成为现代工业中不可缺少的一种先进技术<sup>[1]</sup>。铝合金密度低,经济性好。同时钢是当今应用最广的金属,在制造业中始终处于主导地位。基于轻量化、降低成本以及特殊性能的考虑,使铝-钢异种金属连接的混合结构在汽车工业中得到广泛应用。然而,铝与钢热物理性质相差较大,且铝-钢高温连接时界面极易形成脆硬的 Fe-Al 金属间化合物,在表观上表现为铝和钢较差的焊接性。

针对铝-钢连接已经有研究人员做了一些研究,例如:激光焊<sup>[2]</sup>,电子束焊<sup>[3]</sup>,搅拌摩擦焊<sup>[4]</sup>,扩散焊<sup>[5]</sup>等。虽然这些工艺可以实现铝-钢连接,但是易受工件形状和尺寸的限制以及成本较高,很难投入实际生产中。近来,Fronius 公司的冷金属过渡(CMT)是在 MIG/MAG 焊基础上开发的一种革新技术,第一次将送丝与熔滴过渡进行数字化协调,其中独特的焊丝回抽作用有利于熔滴过渡,可有效地减少热输入量,且 CMT 独特的专家系统适用于铝-钢异种金属连接<sup>[6]</sup>。

基于前期铝-镀锌钢在 CMT 条件下润湿行为的研究<sup>[7]</sup>,本文以 4043 AlSi5 焊丝为填充材料,采用 CMT 技术分别在镀锌钢板和 Q235 钢板上进行点焊,对比分析其界面结构微观组织特征并从热力学角度分析界面形成机理。

收稿日期:2014-05-29

作者简介:周彦林(1987-),男,在读硕士研究生,主要从事异种金属润湿性及界面结构的研究;E-mail:739251167@qq.com

通讯作者:林巧力(1983-),男,讲师,主要研究方向:金属高温润湿性、界面化学及连接技术的研究;E-mail:lqllinqiaoli@163.com

## 1 试验材料与方法

试验所用材料为  $\phi 1.2\text{ mm}$  的 4043 AlSi<sub>5</sub> 焊丝、Q235 钢板和规格为 60 g/m<sup>2</sup> 的镀锌钢板 (尺寸为 200 mm×100 mm×1 mm)。镀锌钢板以 Q235 钢板为基底, 通过热浸镀锌的方法在上面镀一层厚度约为 5  $\mu\text{m}$  的镀锌层。

试验所用设备为 CMT 焊机 (CMT 3200, 奥地利)。在试验过程中, 焊炬垂直于母材, 焊枪顶端与母材间的距离为 5 mm (如图 1 所示), 采用高纯氩气保护, 氩气流量为 15 L/min。试验前, 用钢刷打磨母材待焊接表面, 并采用丙酮进行清洗, 然后用夹具将基板固定在试验平台上。CMT 用于焊接试验的程序为一元程序, 即电压和电流随着一个参数 (送丝速度) 的变化而改变, 所选用的送丝速度为 1.2~6.0 m/min, 在不同送丝速度下点焊时点焊时间均为 1 s。

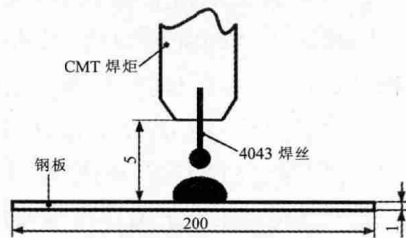


图 1 焊接装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of welding device

点焊后切取样品的横截面, 经打磨和抛光后, 用装配有能谱仪 (EDS) 的扫描电镜 (SEM, FEG 450, 荷兰) 对样品界面结构进行微观分析, 所有样品截面分析均是在背散射模式下进行的。对于样品中所有的金属间化合物均进行点扫描成分分析, 然后取其数据结合相图对不同的相进行确认。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 铝-钢体系的润湿行为

图 2 为 CMT 点焊条件下送丝速度从 1.2 m/min

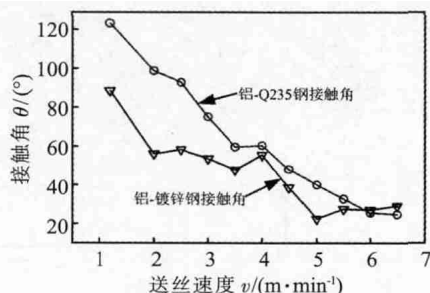
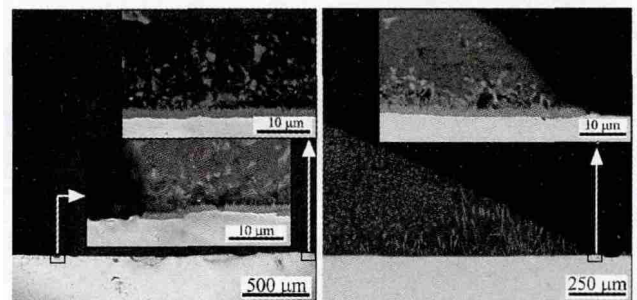


图 2 铝-钢体系在不同送丝速度下的最终接触角  
Fig.2 The final contact angles of Al- steel system under the condition of different wire feeding speeds

到 6.5 m/min, 铝-钢体系在不同送丝速度下的最终接触角。可见, 铝-Q235 钢的最终接触角随送丝速度的增加呈现逐渐减小趋势, 铝-Q235 钢的润湿行为分为润湿和非润湿两种; 同样铝-镀锌钢的最终接触角随送丝速度呈现不稳定的变化, 但是铝-镀锌钢的润湿行为也分为润湿和非润湿两种情况。

### 2.2 铝-Q235 钢的界面微观结构

在不同的送丝速度情况下, 4043 AlSi<sub>5</sub> 焊丝在 Q235 钢板上点焊后典型的界面结构分为两类: 润湿和非润湿两种, 即最终接触角小于 90° 和大于 90° 的样品。非润湿的界面结构对应小的送丝速度 (1.2~4.0 m/min), 润湿的界面结构对应大的送丝速度 (4~6 m/min)。图 3(a) 为 4043 AlSi<sub>5</sub> 焊丝在钢板上以送丝速度 2 m/min 点焊后典型横截面微观组织形貌, 作为对比图 3(b) 为送丝速度 5 m/min 时横截面微观组织形貌。从图 3(a) 和 (b) 中均可以发现, 界面上形成了连续的界面反应产物层, 即 Al-Fe 金属间化合物层。这种金属间化合物层由液滴中心一直延续到了三相线位置, 即三相线处为反应层的边缘, 表明最终的润湿受限于液-固界面反应。Al-Fe 金属间化合物意味着 Fe 与 Al 间较强的反应性, 并且反应层的厚度在所有样品中有一个典型特征, 就是中心较厚然后从中心向三相线处逐渐变薄, 此现象符合焊接热输入的特征 (中心温度高两侧温度低)。从图 3 中可以观察到, 非润湿和润湿样品中的中间层平均厚度分别为 2 和 13  $\mu\text{m}$ , 并且两类样品的界面结构明显不同, 对于润湿样品, 针状相形成在连续反应层上方, 然而对于非润湿样品连续反应层上方散乱地分布着颗粒状物质。当用送丝速度 5 m/min (即获得润湿样品的参数) 时在焊缝中会形成多种不同的金属间化合物, 其中两种化合物可通过形貌区分 (等轴晶和树枝



(a) 送丝速度 2 m/min (非润湿样品) (b) 送丝速度 5 m/min (润湿样品)

图 3 铝-Q235 钢体系的横截面微观组织结构  
Fig.3 The cross-sectional microstructure of Al-Q235 steel system

晶)。这两种化合物分布在各自的区域内,如图 3(b)中的虚线标记所示,并且等轴晶和树枝晶均分布在连续反应层的上方。

由于润湿样品的界面及液滴内部的结构比不润湿样品的复杂,因此对送丝速度 5 m/min 的样品界面微观结构进行了进一步分析,如图 4 所示。在接头横截面中心区域同样可以明显观察到等轴晶与树枝晶的分界,如图 4(a)中虚线标记所示。图 4(a)中可以明显观察到树枝晶区域中间厚两边薄,此现象符合焊接热输入分布特点。但是在图 3(b)中却发现三相线附近处树枝晶的厚度较厚,此现象可能是由于在冷却过程中此处存在较大的过冷度所导致。液滴内

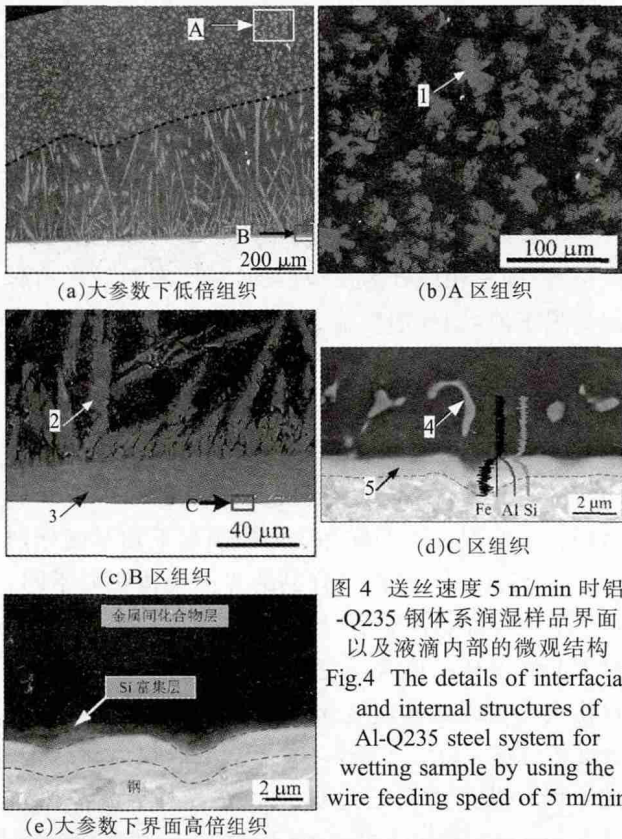


图 4 送丝速度 5 m/min 时铝-Q235 钢体系润湿样品界面以及液滴内部的微观结构  
Fig.4 The details of interfacial and internal structures of Al-Q235 steel system for wetting sample by using the wire feeding speed of 5 m/min

部等轴晶组织的局部放大图像如图 4(b)所示,经能谱分析此等轴晶组织是由  $FeAl_3$  相组成。但是当送丝速度为 2 m/min(非润湿参数)时样品中的所有金属间化合物均是由  $FeAl_3$  相组成,此现象是由于随着送丝速度的增加热输入会变大,进而界面的化学反应变得剧烈,由于大送丝速度下强烈的界面反应,使得界面结构变得更加复杂。如图 4(c)所示,界面结构分为不同的几层:第一层,针状相层,此层由  $Fe_2Al_5$  相组成;第二层,连续相层,此层主要是由  $FeAl_2$  相组成,但是在此层中夹杂着一些灰色相,对此灰色相做能谱分析发现此灰色相为  $FeAl(\beta_2)$  相(此相为含 Si 的  $FeAl$  固溶体,或者可以写作为  $Fe(Al_{1-x}Si_x)$ ,其中  $x$  在 0.194~0.21 范围内<sup>[8]</sup>);第三层,垂直界面方向进行线扫描成分分析如图 4(d)所示,在  $FeAl_2$  层下方观察到 Si 的富集层(18.8 at.%),此层较薄( $<1 \mu m$ )只有在较大的放大倍数下才能观察到, Si 富集层的形貌如图 4(e)所示,对此层进行能谱分析此层为  $Fe_3Al_3Si_2(\tau_1)$ <sup>[8]</sup>;第四层,在图 4(e)两标记线之间存在一层金属间化合物层,经能谱分析此层是由  $Fe_3(Al_{1-x}Si_x)$  相(此相为含 Si 的固溶体)组成,由于此层成分更接近于钢,因此在采用背散射作为采集信号时,其衬度更接近于钢的衬度。对于铝-Q235 钢体系金属间化合物所做的点扫描成分分析的结果如表 1 所示。

表 1 图 4 中 EDS 点扫描成分分析(at%)  
Tab.1 Results of EDS analysis in Fig.4(at%)

测试点	1	2	3	4	5
Al	75.1	71.8	66.7	48.7	22.0
Fe	24.9	28.2	33.3	41.5	68.7
Si	0	0	0	9.8	9.3

### 2.3 铝-镀锌钢的界面微观结构

铝-镀锌钢的界面微观结构同样可以分为非润湿与润湿的两种类型。图 5 为在镀锌钢板上以 2

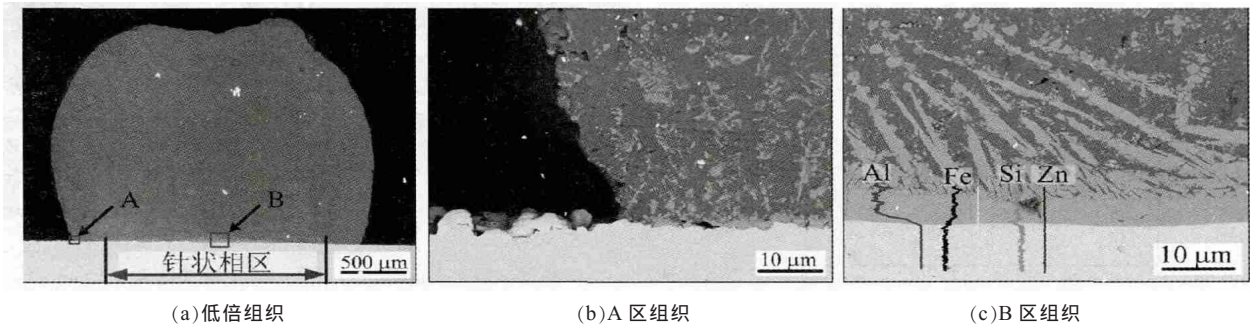


图 5 送丝速度 2 m/min 时铝-镀锌钢体系非润湿样品的横截面微观组织结构  
Fig.5 The cross-sectional microstructure of Al-galvanized steel system for the non-wetting sample by using the wire feeding speed of 2 m/min

m/min 的送丝速度点焊时所形成的非润湿接头横截面的微观组织形貌。从图 5(a)中观察到仅中间区域存在树枝晶。铝-镀锌钢与铝-Q235 钢界面组织结构明显不同,铝-镀锌钢的连续反应层组织由  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  相组成,以及反应层上方树枝晶组织由  $\text{FeAl}_3$  相组成。图 5(c)为图 5(a)B 区放大界面微观结构图,为了确定元素在界面的分布情况,对界面进行了线扫描成分分析。线扫描的结果表明,在连续的反应层下方仍存在 Si 的富集层,并且也表明 Zn 元素对 Al-Fe 金属间化合物的形成没有影响。图 6 为在镀锌钢板上以 5 m/min 的送丝速度点焊时所形成的润湿接头横截面微观组织形貌。经微观结构分析表明,铝-镀锌钢润湿接头与非润湿接头横截面的微观组织结构相类似,都是连续反应层组织由  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  相组成,树枝晶组织由  $\text{FeAl}_3$  相组成,所不同的就是润湿样品在三相线处会形成富锌三角,如图 6 所示。

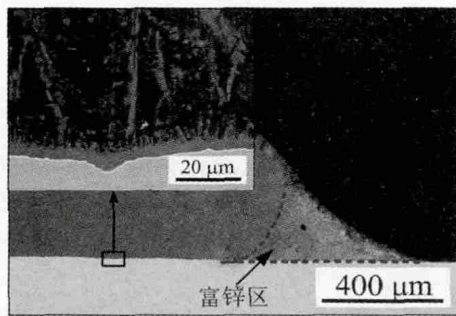


图 6 送丝速度 5 m/min 时铝-镀锌钢体系润湿样品的横截面微观组织结构

Fig.6 The cross-sectional microstructure of Al-galvanized steel system for wetting sample by using the wire feeding speed of 5 m/min

值得注意的是不管铝-Q235 钢还是铝-镀锌钢界面上都会出现 Si 的富集。从热力学角度分析, Si 在界面上的富集符合热力学形成条件。在 Al-Si/Fe 三元体系中 Si 在 Al-Fe 界面上的富集,可以由吸附能表征,其中吸附能的数值越负表明此元素越倾向富集于固-液界面。Eustathopoulos 等人<sup>[9]</sup>指出,对于 B-M/A 三元金属体系 (B 为溶剂、M 为溶质以及 A 为基板元素)中溶质 M 在 B/A 界面(即固-液界面)上的吸附能为  $E_{M(B)}^{\infty SL} = m_1(\lambda_{AM} - \lambda_{BM} - \lambda_{AB})$ , 式中  $E_{M(B)}^{\infty SL}$  为吸附能,  $m_1$  为界面结构常数 (正值),  $\lambda_{i-j}$  为两种金属之间的相互作用系数。假设硅-铝二元溶液为无限稀释的正规溶液<sup>[9]</sup>, 那么这两种金属的相互作用系数可以由两者的混合焓进行估算, 即  $\lambda_{ij} = (\overline{\Delta H}_{i(j)}^{\infty} + \overline{\Delta H}_{j(i)}^{\infty})$

$/2$ ,  $\overline{\Delta H}_{i(j)}^{\infty}$  和  $\overline{\Delta H}_{j(i)}^{\infty}$  分别为  $i$  在  $j$  中和  $j$  在  $i$  中的混合焓, 可参考文献[9]得到。经计算得:  $\lambda_{\text{Fe-Si}} = -116.23$  kJ/mol,  $\lambda_{\text{Si-Al}} = -9.00$  kJ/mol,  $\lambda_{\text{Fe-Al}} = -87.39$  kJ/mol。事实上相互作用系数  $\lambda$  反映了两种金属的亲合力, 越负则两种金属的亲合力就越强。代入上述参数可以计算得到 Si 在界面上吸附能为:  $E_{\text{Si(Al)}}^{\infty SL} / m_1 = -19.83$  kJ/mol, 表明了 Si 在界面上富集符合其形成的热力学条件。同时对于 Al-Zn/Fe 三元体系中 Zn 在 Al/Fe 界面上的吸附能运用同样方式可以计算得到,  $E_{\text{Zn(Al)}}^{\infty SL} / m_1 = 43.07$  kJ/mol, 其中  $\lambda_{\text{Fe-Zn}} = -13.66$  kJ/mol,  $\lambda_{\text{Al-Zn}} = 30.66$  kJ/mol,  $\lambda_{\text{Al-Fe}} = -87.39$  kJ/mol。计算结果表明 Zn 不会富集于固-液界面, 与实际界面上并没有 Zn 元素的存在相吻合, 4043 AlSi<sub>5</sub> 焊丝在镀锌钢板上点焊时 Zn 将被驱赶于三相线附近形成富 Zn 区。由图 3(b)和图 6 对比可知, 当 4043 AlSi<sub>5</sub> 焊丝分别在 Q235 钢板和镀锌钢板上进行点焊时, 在较大热输入的情况下铝-Q235 钢、铝-镀锌钢都可以达到较好的润湿性。由于 Zn 的沸点(908 °C)较低, 在铝-镀锌钢点焊时 Zn 极易蒸发带走热量从而起到减少热输入的作用, 减小金属间化合物层的厚度, 进而在一定程度上会提高铝-钢异种金属焊接力学性能。

### 3 结论

- (1) 在铝-钢体系 CMT 条件下的润湿性研究中, 铝-Q235 钢、铝-镀锌钢在较大热输入的情况下两者都可以达到较好的润湿性。
- (2) 无论基板采用镀锌钢还是 Q235 钢, 在界面处均会观察到 Si 的富集层, 其形成符合热力学形成条件。
- (3) 镀锌层不能起到改善铝-钢润湿性的作用, 其主要作用在于蒸发带走热量而相对降低界面上的热输入, 进而使界面上的 Al-Fe 金属间化合物变薄而改善接头的力学性能。

### 参考文献:

- [1] 李亚江, 王娟, 刘鹏. 异种难焊材料的焊接及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 201-204.
- [2] 赵旭东, 肖荣诗. 铝/钢光纤激光填充粉末熔焊接头界面组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2013, 34(05): 41-44.
- [3] 张秉刚, 何景山, 曾如川, 等. LF2 铝合金与 Q235 钢加入中间 Cu 层电子束焊接接头组织及形成机理 [J]. 焊接学报, 2007, 28(6): 37-41.

(下转第 46 页)

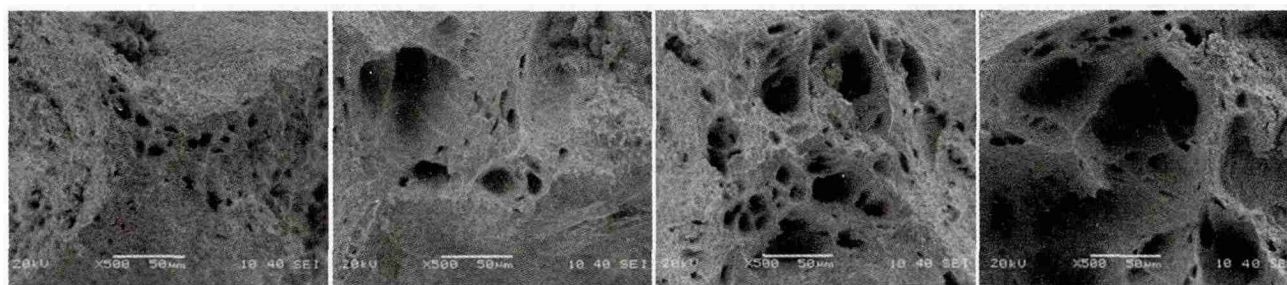
减少,使得应力集中区域减少,因此 Sn-40Pb 钎料合金强度逐渐提高的原因可能是:由于富 Pb 相形态变化而引起的应力集中区域减少所导致的强度提高幅度大于由于组织粗化导致的强度降低幅度。因而,本研究中的 Sn-40Pb 钎料合金的抗拉强度随着冷却速度的减小而逐渐提高。

钎料合金的延伸长度随着冷却速度的减小而逐渐减小,即随着富 Pb 相的增大而逐渐减小,这是因

为,组织较为粗大时,合金难以发生均匀的塑性变形,这使得合金“颈缩”程度较小,拉伸试样延伸长度减小。

### 2.3 冷却速度对钎料合金拉伸断口的影响

图 5 为不同冷却速度下钎料合金拉伸试样的断口形貌。从图中可以看出,试样的断口形貌均为韧窝,断裂形式均为韧性断裂,其中韧窝的大小随着冷却速度的减小而逐渐增大,这是因为,冷却速度较低



(a)在 25 °C 重油中冷却

(b)在 50 °C 重油中冷却

(c)在 100 °C 重油中冷却

(d)在 150 °C 重油中冷却

图 5 不同冷却速度下 Sn-40Pb 钎料合金的拉伸断口形貌

Fig.5 Tensile fracture morphology of Sn-40Pb alloy with different cooling rate

时,富 Pb 相尺寸较大,合金难以发生均匀的塑性变形,这使得拉伸试样的断面收缩率较小,断裂区域的韧窝未被压缩,因而韧窝尺寸较大。

## 3 结论

(1) 冷却速度越低 Sn-Pb 钎料合金的组织越大,当钎料合金在 25 °C 重油中冷却时,钎料合金富 Pb 相的大小为 8.7 µm,而当钎料合金在 150 °C 重油中冷却时,钎料合金富 Pb 相的大小为 22.2 µm。

(2) 冷却速度越小钎料合金的力学性能越好,当钎料合金在 25 °C 重油中冷却时,钎料合金的抗拉强度为 26.36 MPa,延伸长度为 3.39 mm,而当钎料合金在 150 °C 重油中冷却时钎料合金的抗拉强度为 31.84 MPa,延伸长度为 2.12 mm。

(3) 钎料合金拉伸断口均表现为韧窝结构,韧窝大小随着冷却速度的减小而逐渐增大。

### 参考文献:

- [1] Seo S, Kang S, Shih D, et al. An Investigation of microstructure and microhardness of Sn-Cu and Sn-Ag solders as functions of alloy composition and cooling rate [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38(2): 257-265.
- [2] Wang X, Liu Y C, Wei C, et al. Effects of composition and cooling rate on the microstructure of Sn-3.7Ag-0.9Zn-Bi solders[J]. *Applied Physics A*, 2009, 96(4): 969-973.
- [3] Mahmudi R, Pourmajidian M, Geranmayeh A R, et al. Indentation creep of lead-free Sn-3.5Ag solder alloy: effects of cooling rate and Zn/Sb addition [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 565: 236-242.
- [4] Prabhu K N, Deshapande P, Satyanaraya N. Effect of cooling rate during solidification of Sn-9Zn lead-free solder alloy on its microstructure, tensile strength and ductile-brittle transition temperature [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 533: 64-70.
- [5] 沈骏,高后秀,刘永长,等. 冷却速度对 Sn-Ag 无铅焊料微观组织和机械性能的影响[J]. *功能材料*, 2005, (1): 47-49.
- [6] 陈海燕,林振龙,揭晓华,等. 冷却速度对 Sn-Bi-X 合金微观组织的影响[J]. *铸造技术*, 2014, (1): 1-4. □

(上接第 43 页)

- [4] 王希靖,申志康,张忠科. 铝和镀锌钢板的搅拌摩擦焊搭接分析[J]. *焊接学报*, 2011, 32(12): 97-100.
- [5] Xin S H, Feng Q R, Min T Y, et al. Study on the joining characteristics of diffusion welding lap joint with various temperatures between aluminum alloy and stainless steel [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 1335(291): 1003-1006.
- [6] Cao R, Yu G, Chen J H, et al. Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(10): 1753-1763.
- [7] Zhou Y L, Lin Q L. Wetting of galvanized steel by Al 4043 alloys

in the first cycle of CMT process [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 589(0): 307-313.

- [8] Gupta S P. Intermetallic compound formation in Fe-Al-Si ternary system: Part I. *Materials Characterization*, 49(2003): 269-291.
- [9] Eustathopoulos N, Nicholas M G, Drevet B. *Wettability at high temperatures*[M]. Oxford: Elsevier, 1999.
- [10] Zhang R F, Sheng S H, Lin B X. Predicting the formation enthalpies of binary intermetallic compounds [J]. *Chemical Physics Letters*, 2007, 4412(4-6): 511-514. □