

电场对浮法玻璃与可伐合金 4J29 钎焊接头组织与性能的影响

俞伟元, 杨国庆, 孙学敏, 王锋锋, 张 涛

(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: 采用活性液体锡钎料阳极键合(ALTSAB)技术, 选用 SnAg_{3.5}Ti₂ 钎料, 实现了可伐合金 4J29 与浮法玻璃的有效连接。研究了电压、温度对界面微观结构和剪切强度的影响, 并探究了连接形成的机制。结果表明: 随着电压和温度的升高, 玻璃与钎料界面平直无显著变化, 界面形成新的化学键=Si-O-Ti 和=Si-O-Sn, 发生氧化反应生成 TiO₂、SnO; 钎料与合金侧有反应溶解现象, 可伐合金侧生成了 FeSn₂ 相, 钎料中分布着一些细长棒状和针状的 Ni₃Sn₄ 相, 分析认为: 钠离子耗尽层的产生以及 Ti²⁺、Sn²⁺向玻璃基体中的扩散是形成有效连接的关键。接头抗剪切强度随电压和温度的升高而增大, 当电压为 1000 V、温度为 400 °C 时, 最大抗剪切强度为 12.5 MPa。

关键词: ALTSAB; 阳极键合; 钎焊; 浮法玻璃; 可伐合金

中图法分类号: TG453

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)11-4003-07

玻璃具有良好的化学稳定性、抗氧化性、耐腐蚀性, 但塑性差、抗冲击能力差, 难以加工, 这极大地限制了其应用范围。将玻璃与塑性好, 抗冲击能力强的金属连接, 可以发挥两者各自的优势, 扩大应用范围^[1]。传统的玻璃与金属的连接技术主要是热压^[2]与胶结^[3,4], 其连接本质是物理吸附和化学键合, 其中物理吸附所占的比重更大, 与原子层面的永久性连接相比有一定的局限性。活性钎焊技术也可以使得陶瓷(玻璃)和金属之间达到有效连接^[5,6], 刘多^[7]选用 TiZrNiCu 合金钎料, 在真空下实现了 TC4 合金和 SiO₂ 玻璃陶瓷的钎焊连接, 获得最大抗剪切强度为 23 MPa, 但发现钎焊温度会影响接头断裂位置。采用含有活性元素如 Ti、Ag、Al、Zr、V 等的钎料, 可以改善玻璃与钎料的润湿性, 并提高界面反应^[8,9], 但是钎焊温度较高, 并且活性元素的存在会使得钎焊过程中产生脆性的金属间化合物破坏接头的连接强度。Willis 和 Pomerantz 等^[10-12]发表了关于玻璃(功能陶瓷)与金属在静电场下建立连接报道, 并将这种方法称之为“阳极键合”或“场助键合”, 阳极键合作为一种新的连接异质材料的技术, 具有键合温度低、键合过程快、工艺简单等特点^[13-15]。阳极键合的工作温度为 200~500 °C, 低于玻璃的软化点温度, 工作电压为 500~2000 V。Morsy 等^[16]研究了玻璃与可伐合金之间的阳极键合方式, 对离子迁移和钠离子耗尽层的形成机理

进行了深入研究。孟庆森^[17]研究了硼硅酸钠玻璃和单晶硅、铝之间的阳极键合工艺参数, 认为界面处的氧化物转变层的形成是产生键合的主要原因。阳极键合要求被连接工件表面光滑并紧密接触, 以达到原子相互扩散的距离, 当材料表面平整度大于几微米时, 电场辅助阳极连接无效^[18,19]。阳极键合需要被连接材料有相近的热膨胀系数, 一般玻璃的热膨胀系数比金属低, 键合完成后在试样冷却到室温的过程中, 由于热膨胀系数不匹配产生的残余应力会破坏键合试样的机械强度, 并且对被连接材料的表面平整度、紧密接触程度和 2 个界面相适应的要求较高, 限制了其应用领域^[20]。

基于以上方法的优缺点, 国外研究学者 Koebel^[21]和 Hawi^[22]提出了一种新技术活性液体锡钎料阳极键合(activated liquid tin solder anodic bonding, ALTSAB), 将阳极键合与软钎焊相结合, 通过在玻璃与金属之间添加锡基钎料, 在较低的温度和电压下实现玻璃与金属的间接连接。锡基钎料具有介于玻璃和金属之间的热膨胀系数和低的杨氏模量, 解决了连接材料之间热膨胀系数不匹配的问题, 有助于降低接头残余应力^[23], 并且玻璃表面不需要预金属化和预处理, 对被连接材料表面平整度和表面紧密接触程度要求不高, 钎料熔化后对金属与玻璃表面有良好的接触, 进一步扩大了连接材料的应用范围^[24]。Hawi^[22]采用 5 种钎料(Sn、SnAl0.6、SnMg0.6、

收稿日期: 2020-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(52061023)

作者简介: 俞伟元, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050, E-mail: weiyuanyu2018@163.com

SnLi0.02、SnLi0.06) 实现了玻璃与玻璃的连接, SnAl 钎料在键合过程中表现出很好的机械整合, 并在键合过程中有很低的电流密度值, 即使在较低的温度和电压下, SnAl0.6 都会产生很强的阳极键合。Elrefaey^[25]采用阳极键合同时以 SnAl0.6 钎料为中间层, 实现玻璃与钢以及钛合金的直接连接。2 种类型的接头都有 Ni₃Sn₄ 形成, 但其形态和位置不同。玻璃与钛合金的接头平均抗剪切强度高于玻璃与钢接头。Xu^[26]采用 Sn0.6Al 钎料作为中间层, 实现了玻璃和铜的连接, 获得最大抗剪切强度为 11.5 MPa。

玻璃与可伐合金的连接件主要应用于电真空器件中, 如发射管、振荡器、密封插头、磁控管等^[27,28]。Zhong 等^[29]选用 CuNiSnP 合金钎料, 实现了可伐合金和玻璃的真空钎焊, 但是钎焊温度较高(943~973 K), 并在界面处发现生成了 Cu₃P 和 Ni₂P 脆性金属间化合物, 降低了接头强度。有些学者采用阳极键合技术实现了玻璃与可伐合金的连接, 然而该技术对材料表面平整度要求较高, 在键合过程中需要施加压力, 使被连接材料表面紧密接触, 以达到原子相互扩散的距离, 因此, 无法实现玻璃与可伐合金的大面积封接。本研究将活性钎焊与阳极键合相结合, 选用添加微量活性元素的锡基钎料 (SnAg3.5Ti2), 改善了钎料与玻璃的润湿性, 提高界面反应, 并且无需额外施加压力, 就可以在较低的温度和电压下实现可伐合金 4J29 与浮法玻璃的有效连接, 以期获得大面积的封接。通过分析电压、温度对界面微观结构和剪切强度的影响, 进一步研究其连接机理。

1 实验

实验被连接材料分别选用可伐合金 4J29 和浮法玻璃, 这 2 种材料的化学成分分别如表 1、表 2 所示。ALTSAB 连接选用 SnAg3.5Ti2 作为钎料。实验前, 将可伐合金和浮法玻璃加工成尺寸分别为 40 mm×25 mm×3 mm, 25 mm×25 mm×5 mm 的试块, 钎料采用尺寸为 20 mm×10 mm×0.2 mm 的薄片, 可伐合金、浮法玻璃和钎料表面分别用 400#、800#、1000#砂纸进行打磨, 然后放入丙酮中超声清洗 10 min, 用去离子水清洗后吹干。

实验设备示意图如图 1a 所示, 钎料夹在合金与玻璃之间, 在合金表面开槽将钎料放入, 避免钎料熔化后被

表 1 可伐合金 4J29 主要化学成分

C	Si	Mn	Co	Ni	Fe
0.018	0.15	0.28	17.26	29.2	Bal.

表 2 浮法玻璃主要化学成分

Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂
0.12	1.5	18.5	13.5	4.5	Bal.

挤出。可伐合金与下铜极板相连, 接正极, 玻璃与上铜极板接触, 连接负极, 将键合试样装入夹具中放入真空炉内, 当真空度达到 1×10⁻³ Pa 时, 加热试样, 键合温度分别设定为 300、350 和 400 °C, 达到键合温度后在 2 个铜极板之间分别施加 600、800、1000 V 的电压进行键合连接。实验完成后, 试样以 2 °C/min 的速率降到室温, 缓慢的冷却速度是为了降低由于材料之间热膨胀系数不同而引起的残余应力。

实验完成后, 沿试样横截面切开, 用 400#、800#、1000#、1500#、2000#、3000#砂纸逐级打磨, 并用 0.5 μm 金刚石抛光剂抛光, 然后用乙醇超声清洗吹干。采用配备能谱分析仪(EDS)的 QUANA-FEG450 型场发射扫描电镜(SEM)对试样微观组织形貌进行观察, 确定金属间化合物。利用 AGS-X300KN 电子万能试验机对试样接头进行压剪试验, 剪切实验示意图如图 1b 所示, 剪切速率为 2 mm/s。

2 结果与分析

2.1 界面微观结构

图 2a~2c 为钎焊温度 400 °C、电场电压 1000 V 下的界面组织形貌, 图 2d 为 EDS 元素线扫描结果, 图 3 为玻璃/钎料界面 XRD 分析结果。从图 2 可以看出, 钎焊试样整体连接良好, 钎料与合金侧有反应溶解现象, 结合 EDS 分析结果可知, 可伐合金侧生成的一层形状不规则的金属间化合物是 FeSn₂ 相, 钎料中分布着一些细长棒状和针状的 Ni₃Sn₄ 相。玻璃与钎料界面平直, 结合紧密, 没有孔洞和裂纹产生, 没有观察到反应溶解现象。

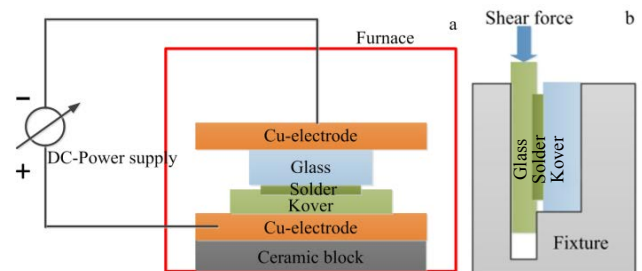


图 1 实验设备和剪切实验示意图

Fig.1 Schematic of the experimental equipment (a) and the shear test (b)

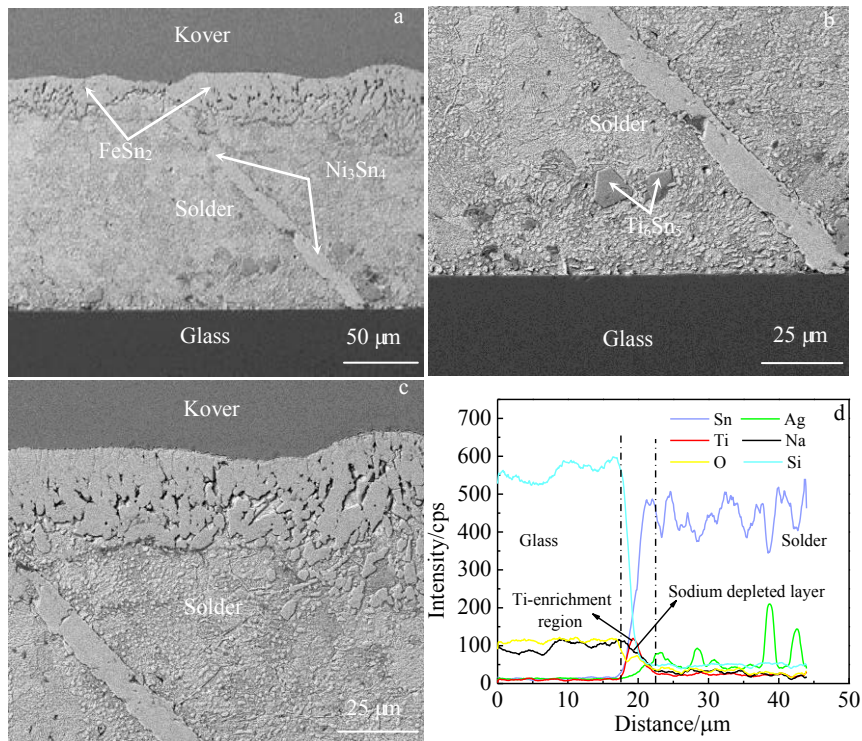


图 2 玻璃/可伐合金接头在 400 °C 和 1000 V 的微观形貌及钎料/玻璃界面 EDS 元素线扫描

Fig.2 Microstructures (a-c) and EDS elements line scanning of the glass/solder interface (d) of glass/Kover joint at 400 °C and 1000 V: (a) interface, (b) solder/alloy interface, and (c) solder/glass interface

从图 2d 中可以看出，界面附近的 O、Si、Sn、Ag、Ti 均存在一定程度的扩散，在界面上形成约 5 μm 的过渡区，并且 Ti 元素在界面产生了富集，部分 Ti 扩散进入了玻璃基体中，在玻璃基体中形成了一个约 2 μm 的钠离子耗尽层。图 3 的 XRD 分析结果表明在玻璃/钎料界面生成了 TiO、SnO。

将阳极键合与活性钎焊相结合，当钎料熔化后，阳极金属以液态的形式存在，与玻璃和金属表面有良好的

接触，解决了阳极键合的应用领域受被连接材料之间表面紧密接触或 2 个界面相适应的强烈限制，并且锡基钎料有介于玻璃和金属之间的热膨胀系数和低的杨氏模量，可以降低在连接或完成连接冷却到室温的过程中产生的残余应力。钎料合金的成分直接影响界面反应、润湿和扩散过程，进而影响成键机理、结合质量和强度，在钎料中加入易氧化的活性金属元素，会有更好的结合性能，可能是由于较好的润湿性或者在玻璃和金属界面上形成了更稳定的混合氧化物相。钎料与金属发生界面反应，生成金属间化合物。钠离子耗尽层的形成是阳极键合的特征，钠离子耗尽层形成的原因是：玻璃基体结构为硅氧四面体(SiO₄)，1 个氧为 2 个硅共用(≡Si-O-Si≡)，形成桥接氧，在钎焊温度下，玻璃基体中的碱金属氧化物 Na₂O 在电场作用下会发生电离：Na₂O→2Na⁺+O²⁻，碱金属离子(Na⁺)的存在使得部分硅氧四面体断开，形成非桥氧结构(≡Si-O⁻)。电场作用下，钠离子向阴极表面作定向迁移，形成离子电流，并在靠近阴极侧的玻璃表面析出，在玻璃中形成钠离子耗尽层，留下非桥接的氧负离子 O⁻，负电荷在耗尽层中积累，使玻璃表面极化。形成钠离子耗尽层后，玻璃厚度方向上的电势差主要集中在耗尽层中，非耗尽层中的电势差较小，耗尽层的场强大小^[30]可以表示为：

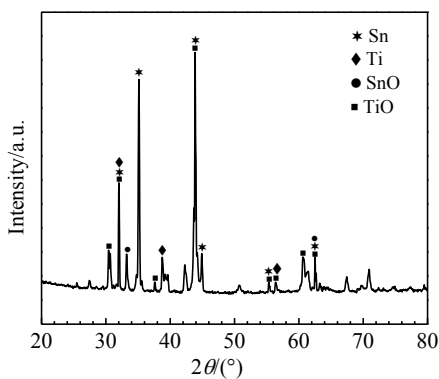


图 3 玻璃/钎料界面 XRD 图谱

Fig.3 XRD pattern of the glass/solder interface

$$E = \frac{\rho_p}{\epsilon_G} (x - X_p) \quad (1)$$

式中, ρ_p 为耗尽层内电荷量, $\rho_p = -ne$, $n = 7.9 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, ϵ_G 为玻璃介电常数, X_p 为耗尽层宽度, x 为离玻璃/钎料界面的距离。由公式可知, 离玻璃/钎料界面越近耗尽层场强越大, 界面处场强最大。熔化的钎料与极化的玻璃表面接触, 在钎料中感应生出正离子 (Ti^{2+} 、 Sn^{2+}), 钎料中感应生出的正离子在电场作用下向玻璃/钎料界面迁移, 并在表面产生富集 (Ti^{2+}), 正负离子在界面产生镜像吸附作用, 其实质是静电库伦引力, 产生的静电引力使钎料与玻璃紧密接触, 耗尽层中的氧负离子在电场作用下向玻璃/钎料界面迁移, 与界面富集的正离子达到电子相互作用范围, 会产生电子型结合, 形成 $\equiv\text{Si-O-Ti}$ 和 $\equiv\text{Si-O-Sn}$ 化学键, 在电场作用下, 玻璃基体中发生下列反应: $2(\equiv\text{Si-O}^-) \rightarrow \equiv\text{Si-O-Si} + \text{O}^{2-}$, $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}^- + \text{e}^-$, $\text{O}^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{e}^-$, 因此, 钠离子耗尽层不仅在玻璃表面提供了一个负电荷层, 还提供了一个富氧环境, 在界面产生氧化反应, XRD 分析结果表明在玻璃/钎料界面生成 TiO 、 SnO , 但是界面反应较弱, 界面反应产物较少, 在 SEM 照片中并没有观察到。施加电场后由于 Na^+ 向阴极迁移, 在阳极侧的玻璃基体中会形成大量的空位和空穴, 界面处的金属阳离子 (Ti^{2+} 、 Sn^{2+}) 会在电场、温度场、化学势梯度的作用下向玻璃基体中进行扩散, 占据空位, 使得玻璃与钎料形成良好键合。

2.2 电压对界面微观结构的影响

图 4 为温度 $350\text{ }^\circ\text{C}$, 电压分别为 600、800、1000 V 界面微观结构。从图中可以看出, 随着电压的升高, 生成的金属间化合物逐渐增多, 玻璃与钎料界面平直, 结合紧密, 没有孔洞和裂纹产生, 没有观察到反应溶解现象, 分析认为: 电压较低时, 玻璃与钎料界面产生的静电吸附力较弱, 使两者之间的表面接触受限, 电场力不足以驱动原子扩散, 在玻璃与钎料界面形成较弱的连接。电压较高时, 离子迁移速率快, 加速钠离子向阴极的迁移, 钠离子耗尽层快速形成, 使界面产生的正负离子增多, 静电引力增大, 钎料与玻璃接触更紧密, 形成的化学键合更多, 从而形成有效键合。电场作用下元素扩散系数可以表示为^[31]:

$$D_e = D_0 \exp\left(-\frac{W}{RT}\right) \quad (2)$$

$$W = Q - Z \frac{\Delta\phi}{2} \quad (3)$$

式中, D_e 为电场作用下元素扩散系数; D_0 为扩散常数, 与材料有关; W 为扩散能量势垒, Q 为不加电场时的扩散激活能, R 为普朗克常数, T 为开尔文温度, Z 为金属离子所带电荷数, $\Delta\phi$ 为耗尽层电势。从公式可知, 提高电压使金属离子的扩散激活能降低, 相应的扩散系数 D_e 增大, 母材中的金属原子更容易向钎料中溶解, 使得金属间化合物增多, 并促进玻璃/钎料侧的原子扩散, 界面处的金属阳离子 (Ti^{2+} 、 Sn^{2+}) 向钠离子耗尽层中迁移, 占据钠离子空位, 在玻璃/钎料侧形成有效连接。

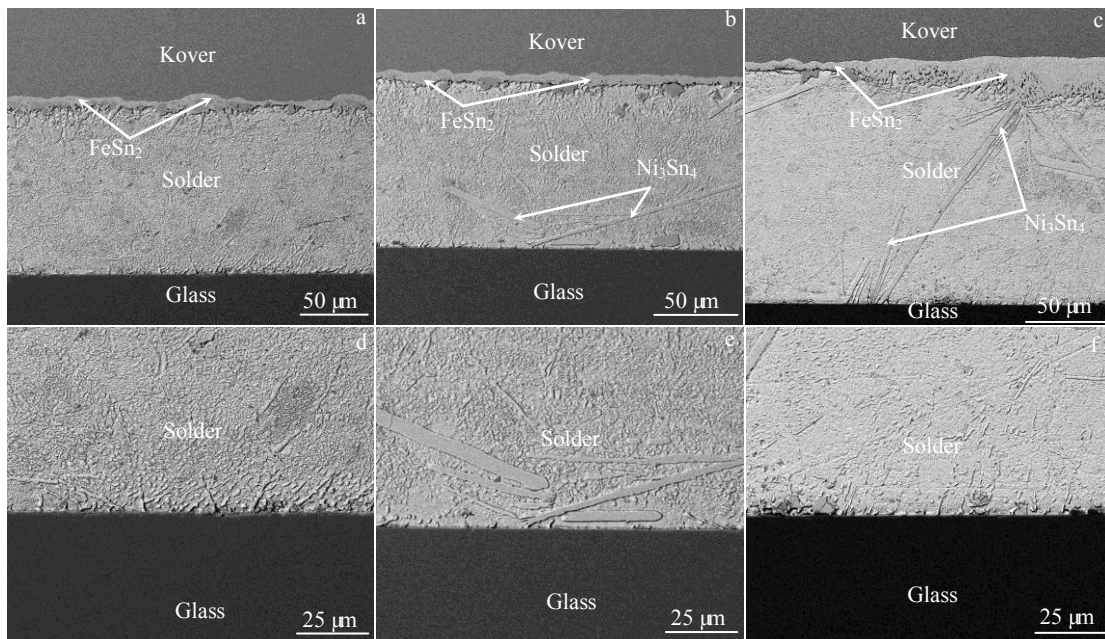


图 4 在 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 和不同电压下界面微观结构

Fig.4 SEM images of interface brazed at temperature of $350\text{ }^\circ\text{C}$ and different voltages: (a, d) 600 V, (b, e) 800 V, and (c, f) 1000 V

2.3 温度对界面微观结构的影响

图 5 为电压 1000 V，温度分别为 300、350、400 °C 界面微观结构。从图中可以看出，随着温度的增加，金属间化合物逐渐增多，各个温度下玻璃/钎料界面连接良好，没有明显差别。温度主要影响材料中离子的扩散系数，材料中离子的扩散能力可以用 Arrhenius 公式表示为：

$$\delta = \delta_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

式中， δ 为扩散系数， δ_0 为扩散常数， Q 为离子扩散激活能， R 为气体常数。由公式可知，随着温度的提升，扩

散系数增大，离子定向迁移能力增加，在耗尽层中形成更多的空位，空位浓度梯度增大，促进金属离子 (Ti^{2+} 、 Sn^{2+}) 向耗尽层中的迁移，进而与耗尽层中的阳离子发生氧化反应形成键合。

2.4 电压、温度对抗剪切强度的影响

在室温下进行了剪切试验，以确定不同的玻璃/钎料/合金接头的抗剪切强度，图 6a 为温度 400 °C，不同电压下的抗剪切强度，图 6b 为电压 600 V 时，不同温度下的抗剪切强度。抗剪切强度随着电压和温度的提高均呈现上升趋势，这一现象与图 4、图 5 界面微观结构的演

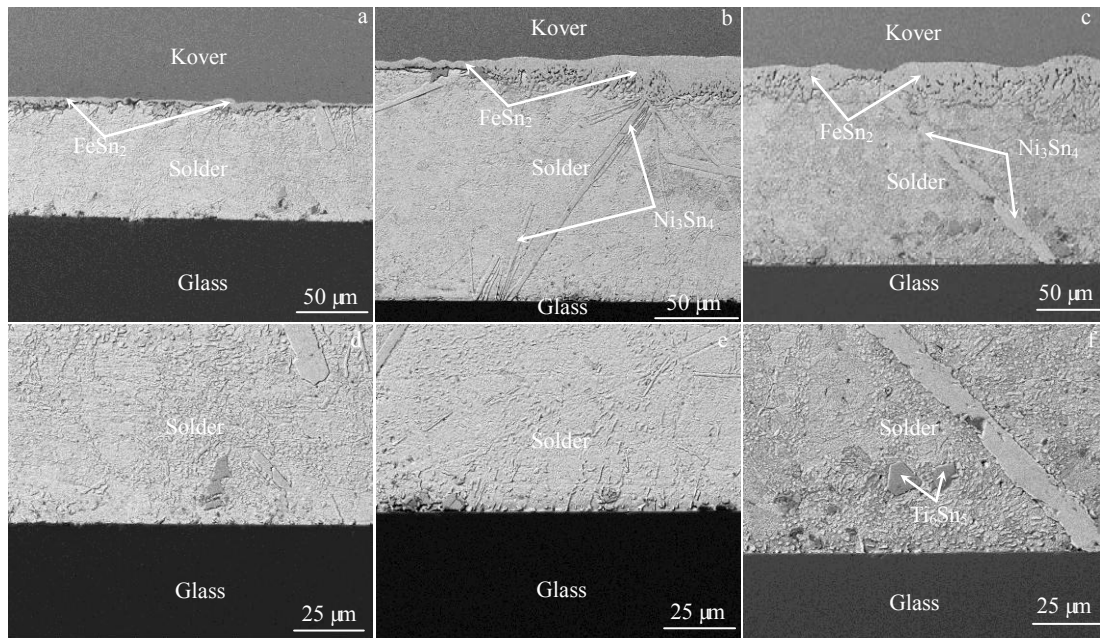


图 5 在 1000 V 和不同温度下界面微观结构

Fig.5 SEM images of interface brazed at voltage of 1000 V and different temperatures: (a, d) 300 °C, (b, e) 350 °C, and (c, f) 400 °C

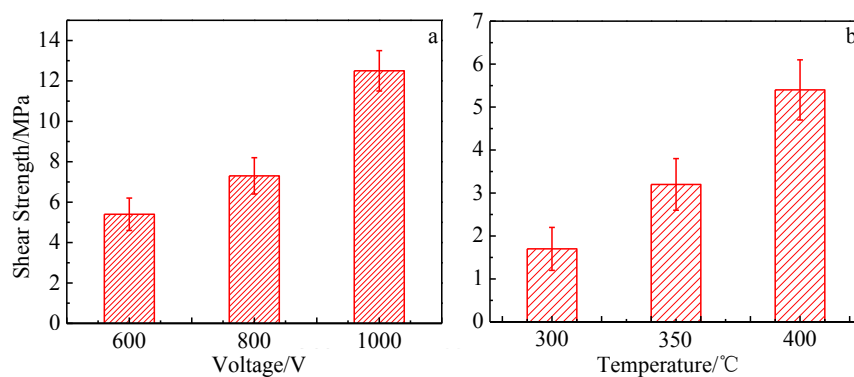


图 6 不同电压及不同温度下的接头抗剪切强度

Fig.6 Joint shear strength at different voltages (a) and different temperatures (b)

变有关。当电压较低时(600 V), 抗剪切强度仅为 5.4 MPa, 这是由于电压较低时, 产生的静电引力不足以使玻璃与金属紧密接触, 原子扩散较慢, 无法产生有效的原子键合。当电压升高到 1000 V 时, 玻璃/钎料界面上没有观察到裂缝, 抗剪切强度达到最大值 12.5 MPa。从图中可以看出, 温度对抗剪切强度的影响与电压类似, 随着温度的提高, 抗剪切强度逐渐提高, 最大抗剪切强度为 5.4 MPa。当温度从 300 °C 升高到 400 °C 时, 玻璃与钎料连接良好, 没有明显的裂缝和空洞产生(图 5), 温度的升高主要影响材料中离子的定向迁移能力, 使正负离子的迁移速率和迁移量提高, 在耗尽层中形成更多的空位, 空位浓度梯度增加, 进一步促进金属离子向空位中的迁移扩散, 使接头形成有效连接。

3 结 论

1) 钎焊试样整体连接良好, 可伐合金侧生成了 FeSn₂ 相, 钎料中分布着一些细长棒状和针状的 Ni₃Sn₄ 相, 玻璃与钎料界面平直, 没有观察到反应溶解现象。

2) 钠离子耗尽层的产生、玻璃基体中钠离子的迁移以及 Ti²⁺、Sn²⁺向玻璃基体中的扩散是形成有效连接的关键, 玻璃界面形成新的化学键≡Si-O-Ti 和≡Si-O-Sn, 发生氧化反应生成 TiO、SnO。

3) 电压和温度的升高使得金属离子的扩散激活能降低, 材料中离子的扩散能力增加, 生成的金属间化合物逐渐增多, 玻璃与钎料界面结合紧密, 形成有效连接。

4) 接头抗剪切强度随着电压和温度的升高而增大, 电压为 1000 V、温度为 400 °C 时, 最大抗剪切强度为 12.5 MPa。

参考文献 References

- [1] Mckelvy E C, Taylor C S. *J Am Chem Soc*[J], 2002, 42(7): 1364
- [2] Sato N, Ishii H, Shigematsu S *et al. Japanese Journal of Applied Physics*[J], 2003, 42(4B): 2462
- [3] Abbott P J, Scace B. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films*[J], 2010, 28(4): 573
- [4] Burenin V V. *Chemical & Petroleum Engineering*[J], 2002, 38(11-12): 657
- [5] Partridge J H. *Glass-to-Metal Seals*[M]. Sheffield, UK: The Society of Glass Technology, 1949
- [6] Wang Ying(王颖), Xia Yonghong(夏永红), Yang Zhenwen(杨振文) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(9): 3041
- [7] Liu Duo(刘多), Zhang Lixia(张丽霞), Feng Jicai(冯吉才) *et al. Journal of Central South University of Technology* (中南工业大学学报)[J], 2009, 16(5): 713
- [8] Zhang L X, Wu L Z, Liu D *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2008, 496(1-2): 393
- [9] Xin C, Yan J, Li N *et al. Ceramics International*[J], 2016, 42 (11): 12 586
- [10] Wallis G, Pomerantz D I. *Journal of Applied Physics*[J], 1969, 40(10): 3946
- [11] Rogers T, Kowal J. *Sensors & Actuators A Physical*[J], 1995, 46(1): 113
- [12] Xu J, Wang D, Yuan Y *et al. Cellulose*[J], 2015, 22(2): 1355
- [13] Schjølberg-Henriksen K, Jensen G U, Hanneborg A *et al. Sensors & Actuators: A Physical*[J], 2003, 114(2): 332
- [14] Shih W P, Hui C Y. *Journal of Applied Physics*[J], 2004, 95(5): 2800
- [15] Chen Mingxiang(陈明祥), Yi Xinjian(易新建), Gan Zhiyin(甘志银) *et al. Journal of Functional Materials*(功能材料与器件学报)[J], 2005(3): 381
- [16] Morsy M A, Ishizaki K, Ikeuchi K *et al. Quarterly Journal of the Japan Welding Society*[J], 2009, 16(2): 157
- [17] Meng Qingsen(孟庆森), Xue Jin(薛锦), Yu Ping(俞萍) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2001, 22(4): 63
- [18] Chen Zheng(陈铮), Dong Shirun(董师润). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2001, 36(2): 139
- [19] Chen Zhen(陈铮). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2001, 22(4): 21
- [20] Robin Joyce, Kulwant Singh, Soney Varghese *et al. Materials Science in Semiconductor Processing*[J], 2015, 31: 84
- [21] Koebel M M, Hawi N E, Lu J *et al. Solar Energy Materials & Solar Cells*[J], 2011, 95(11): 3001
- [22] Hawi N E, Gerussi F, Koebel M M. *ECS Journal of Solid State Science & Technology*[J], 2013, 2(9): Q165
- [23] Hu L, Xue Y, Wang H. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 789: 558
- [24] Malfait W J, Klemenčiča R, Lang B *et al. Journal of Materials Processing Tech*[J], 2016, 236: 176
- [25] Elrefaey A, Janczak-Rusch J, Koebel M M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(11): 2716
- [26] Feng G, Li Z, Xu X *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 254: 108
- [27] Mustafa Mert Torunbalci, Said Emre Alper, Tayfun Akin *et al. Sensors and Actuators, A Physical*[J], 2015, 224: 169
- [28] Ma R Q, Hewitt R, Rajan K *et al. Journal of the Society for Information Display*[J], 2008, 16(1): 169
- [29] Zhong Z, Zhou J, Shen X *et al. Welding Journal*[J], 2012, 91(9): 237s

- [30] Liu Cuirong(刘翠荣). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008
- [31] Wang Fuming(王福明). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012

Effect of Electric Field on the Microstructure and Properties of Brazed Joints of Float Glass and Kovar 4J29

Yu Weiyuan, Yang Guoqing, Sun Xuemin, Wang Fengfeng, Zhang Tao

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

Abstract: Effective connection between Kovar alloy 4J29 and float glass was realized using ALTSAB technology and SnAg3.5Ti2 solder. The effects of voltage and temperature on the interface microstructure and shear strength were studied, and the mechanism of bonding formation was explored. The results show that with the increase of voltage and temperature, the interface between glass and solder has no significant change, new chemical bonds $\equiv\text{Si-O-Ti}$ and $\equiv\text{Si-O-Sn}$ are formed at the interface, and TiO and SnO are formed by oxidation reaction. There is reaction dissolution phenomenon between solder and alloy side, and FeSn_2 phase is formed at the Kovar alloy side. There are some slender rod-shaped and needle-like Ni_3Sn_4 phases in the solder. It is considered that the formation of sodium ion depletion layer and the diffusion of Ti^{2+} and Sn^{2+} into the glass matrix are the key to the formation of effective bonding. The maximum shear strength is 12.5 MPa when the voltage is 1000 V and the temperature is 400 °C.

Key words: ALTSAB; anodic bonding; soldering; float glass; Kovar

Corresponding author: Yu Weiyuan, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, E-mail: weiyuan2018@163.com