

# 直流电作用下铜在液态锡里的溶解动力学

孙学敏, 俞伟元, 吴保磊, 杨国庆, 刘 赟

(兰州理工大学 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:** 本工作采用浸入法实验, 通过施加直流电作用, 研究了 513~573 K 温度范围内铜在液态锡中的溶解动力学。对溶解后铜的溶解厚度以及 Sn/Cu 界面金属间化合物 (IMC) 层的厚度进行测量, 对溶解激活能以及有效电荷  $Z^*$  进行计算, 采用 Comsol Multiphysics 软件对电流引起的液态锡中的温度分布和流场分布进行模拟。实验结果表明: 施加直流电对铜在液态锡中的溶解速率常数有显著的影响, 随着电流密度增加, 溶解速率增加, 溶解激活能减小。电流的方向对铜的溶解和界面 IMC 层的生长也有影响, 由于电迁移的作用, 当电子流动的方向与铜的溶解方向一致时, 溶解速率加快, 界面 IMC 层的厚度变薄。在电流密度为 240 A/cm<sup>2</sup> 时, 铜在液态锡中的有效电荷  $Z^*$  随着温度的增加逐渐减小。

**关键词:** 电迁移; 溶解; 激活能; 有效电荷

中图分类号: TG454

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)10-3425-08

随着微电子技术向纳米化和精细化发展, 对电子元器件钎焊接头的可靠性和稳定性提出了更高要求, 电子封装行业也面临着巨大的挑战, 传统钎焊材料和焊接方法都需要进行改进和提高, 以适应行业发展需求。因此新型钎焊材料和钎焊方法的研究成为当前的热点<sup>[1]</sup>。

电场作为材料加工和制备工艺中的一种有效辅助手段, 在粉末烧结、铸造以及焊接等方面都获得了良好的效果。Munir<sup>[2]</sup>研究了电场对自蔓延 (SHS) 合成材料的影响, 发现在外加电场作用下, 合成材料的组分发生明显的变化, 质量和合成速率得到了显著提高。Muccillo 等<sup>[3]</sup>对交流电辅助快速烧结 SnO<sub>2</sub> 进行研究, 结果表明, 电流幅值大小是影响烧结晶粒大小和促进晶粒生长的关键因素, 极限电流越大, 得到的平均晶粒尺寸也越大。Li 等<sup>[4]</sup>研究了铸锭在凝固过程中施加电流脉冲的影响, 实验结果表明, 在凝固初期和末期施加直流脉冲能够促进柱状晶向等轴晶的转变, 同时宏观偏析得到改善。Zi 等<sup>[5]</sup>研究了高密度脉冲电流对铝合金凝固的影响, 发现 2024 铝合金在凝固过程中受到脉冲电流收缩和挤压作用, 晶粒得到细化, 电流密度越大, 晶粒越细小。Conrad<sup>[6]</sup>研究了电流对金属固态相变的影响, 发现施加电流作用促进了固态的相变。傅莉等<sup>[7,8]</sup>研究了电场对异种金属搅拌摩擦焊接头组织及性能的影响, 结果表明, 外加电场作用增强

了焊缝金属的再结晶, 使得焊缝中晶粒分布更加均匀, 同时提高了焊接接头强度。崔建国等<sup>[9]</sup>研究了电场和超声辅助 Sn2.5Ag0.7Cu0.1RE0.05Ni/Cu 钎焊接头的组织与性能, 实验结果表明, 施加电场和超声场作用后, 钎焊接头的抗剪切强度显著提高。Zhao 等<sup>[10,11]</sup>研究了在电场作用下 Ni 在液态 Al 中的溶解, 发现电场作用促进了 Ni 的溶解, 其中电迁移效应起着重要的作用, 当电子流动方向从 Ni 向液态 Al 时, 溶解进一步增加。同时还发现, 电迁移效应在 IMC 层的形成及生长过程中也起着重要的作用。目前电场作用于溶解方面的研究主要集中在钎焊接头失效<sup>[12,13]</sup>, 而关于电场辅助钎焊方面的研究较少, 电场作用于溶解的机理也有待深入的研究。

本实验以铜/锡反应体系为研究对象, 研究了直流电作用下铜在液态锡中的溶解动力学以及对溶解机制做进一步的分析。研究结果对钎焊在电子封装行业的应用具有重要的参考意义。

## 1 实验

实验材料选用纯铜丝 (纯度 99.99%) 和纯锡颗粒 (纯度 99.99%)。铜丝的尺寸为长度 35 mm, 直径 1 mm。实验装置如图 1 所示。图中为溶解体系加载电流的是 0~50 A 的可调直流电源, 电源的两极分别连接铜丝和坩埚。实验前, 为了去除铜丝表面的氧化膜, 先

收稿日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51465032)

作者简介: 孙学敏, 男, 1987 年生, 博士, 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2973563, E-mail: sxm2603@126.com

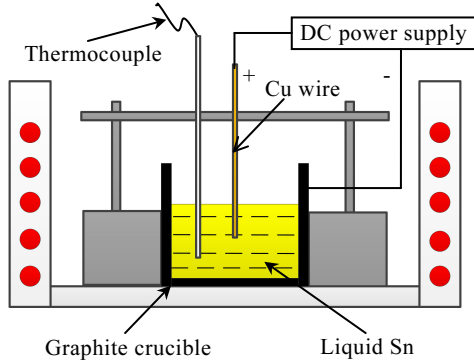


图 1 溶解装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the apparatus used for dissolution experiments with copper wire and tin liquid

将铜丝放入丙酮溶液，超声波清洗 5 min，然后取出吹干，再放入体积分数 20% 的盐酸溶液浸泡 3 min，然后用水冲洗干净后用乙醇擦拭后冷风吹干，装入密封的玻璃管中待用。称取纯锡颗粒 50 g 装入石墨坩埚(直径为 40 mm，高度为 40 mm)。实验开始时，将坩埚放入电阻炉中进行加热，一根 K 型热电偶插入石墨坩埚中，用来检测实验的实时温度，控制实验温度变化在 ±2 °C 范围之内。待锡颗粒熔化并达到设定温度后，将预先准备好的铜丝插入液态锡中，插入深度 4 mm。然后打开电源，开始计时。

实验在不同的温度(513~573 K)，电流密度(0~240 A/cm<sup>2</sup>)，浸入时间(20~80 s) 下进行。为了减小实验误差，每个参数重复做 3 组实验，实验结果取 3 组实验的平均值。每次实验结束后，将冷却后的 Cu 丝用导电环氧树脂镶嵌，然后沿着横截面机械打磨抛光，采用光学显微镜 (Axio Scope A1) 和配备能谱仪 (EDS) 的电子显微镜 (SEM FEG-450) 对横截面的组织形貌进行

观察分析。采用 IMGE PRO 软件计算溶解后铜丝的横截面面积，将测量面积按照下列等式转换为等效直径：

$$d = 2 \left( \frac{S}{\pi} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$\Delta r = \frac{d_0 - d}{2} \quad (2)$$

$\Delta r$  为铜丝溶解厚度， $d_0$  是溶解前铜丝的直径， $d$  是溶解后铜丝的直径。

原理如图 2 所示。

## 2 实验结果

### 2.1 电流密度和温度对溶解量的影响

实验温度为 513, 543, 573 K 时，不同电流密度下铜在液态锡中的溶解量分别如图 3a~3c 所示。图中的数据点为实验测量值，曲线为拟合结果。从图中可以看出，在 3 种实验温度下，溶解量随温度的升高而增大，随电流密度的增加而增大。图 4a~4c 为铜在液态锡中的溶解量随浸入时间平方根的变化。可以发现，

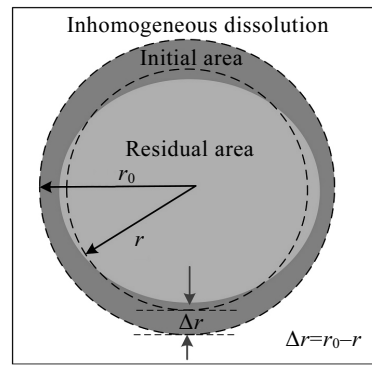


图 2 铜在液态锡中的溶解示意图

Fig.2 Schematic diagram of the measured area for inhomogeneous dissolution of copper wires in tin liquid

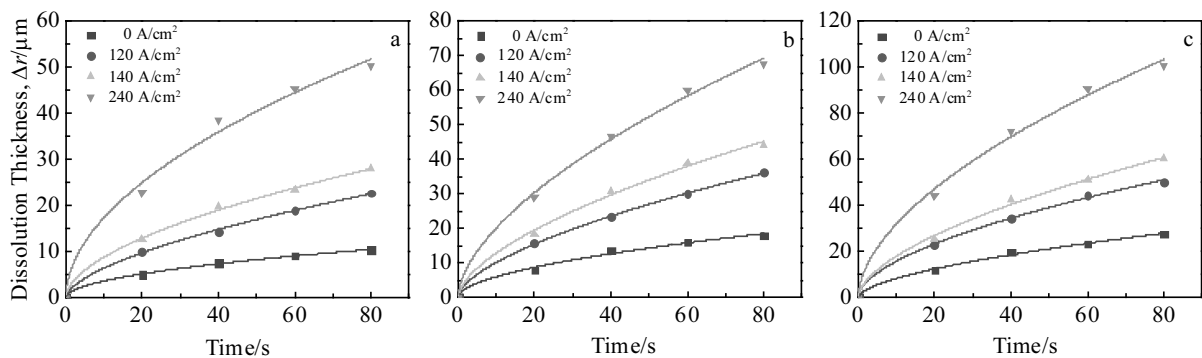


图 3 不同的电流密度和温度下铜在液态锡中的溶解厚度随浸入时间的变化

Fig.3 Thickness of copper dissolved in liquid tin vs time at different current densities and temperatures: (a) 513 K, (b) 543 K, and (c) 573 K

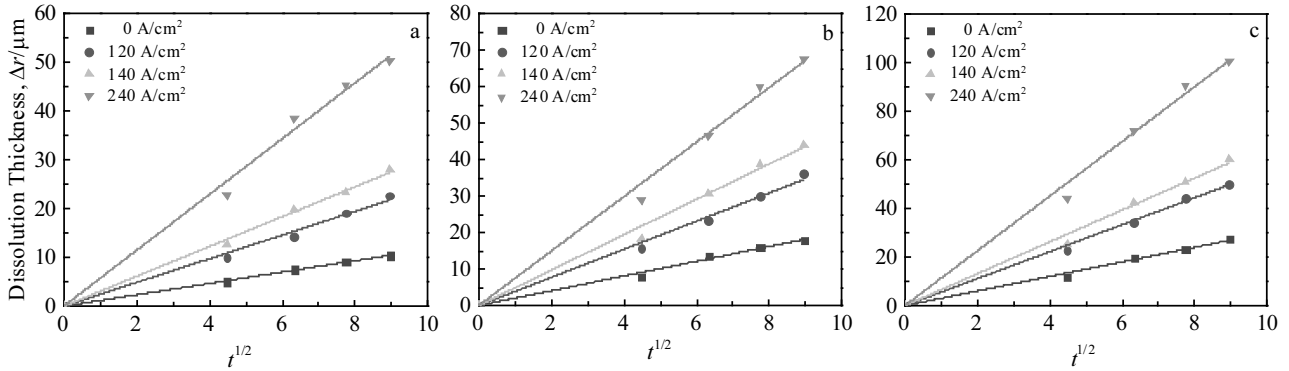


图 4 不同的电流密度和温度下铜在液态锡中的溶解厚度随浸入时间平方根的变化

Fig.4 Thickness of copper dissolved in liquid tin vs  $t^{1/2}$  at various current densities and temperatures: (a) 513 K, (b) 543 K, and (c) 573 K

溶解量与浸入时间的平方根成良好的线性关系。

### 2.2 电流方向对溶解量的影响

图 5 显示了在 3 种实验温度下，电流密度为 240 A/cm<sup>2</sup>，浸入时间为 80 s 时电流方向对铜溶解量的影响。从图 5 可以看出，当电流方向从液态锡到铜时，铜的溶解量大于电流方向从铜到液态锡。

### 2.3 电流作用对 Sn/Cu 界面 IMC 生长的影响

图 6 显示了在 543 K，电流密度为 120 A/cm<sup>2</sup>，电子方向从锡到铜时，不同浸入时间对应的 Sn/Cu 界面微观组织。从图中可以明显地看出，界面组织分为 3 层，底层为铜基体，顶层为锡，中间层为 IMC，经 EDS 分析为 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>。同时可以发现，IMC 层的厚度随着时间的增加逐渐变厚，图 7 显示了 IMC 层的厚度与浸入时间的关系。可以发现，界面 IMC 层的厚度随浸入时间呈抛物线型增长，如图 7a 所示；随浸入时间的平方根呈线性增长，如图 7b 所示。

图 8 显示了在不同温度和电流方向下，溶解后界

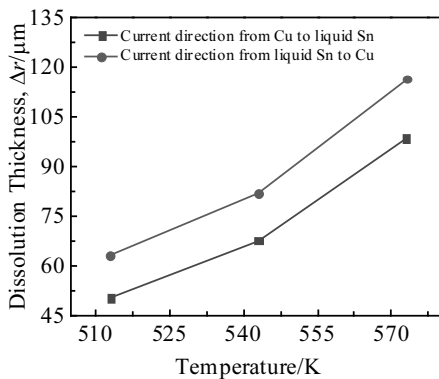


图 5 电流方向对铜在液态锡中的溶解厚度的影响

Fig.5 Effect of current direction on the dissolution thickness of copper in liquid tin

面 BSE 像。图 9 显示了在电流密度为 240 A/cm<sup>2</sup>，浸入时间为 40 s 时，不同温度和电流方向下溶解后界面 IMC 层的厚度。为了描述方便，规定当电流从铜流向 Sn 锡为正，当电流从锡流向 Cu 为负。根据图 9 可以发现，不管电流为正还是负，随着温度的升高，IMC 层的厚度均逐渐增加。但当电流为正时的 IMC 层的厚度大于电流为负时的 IMC 层厚度。

## 3 分析与讨论

实验结果表明，电流对铜在液态锡的溶解过程有较大的影响。溶解速率随着电流密度的增大而增大。在不施加电流时，铜在液态锡中溶解动力学过程受扩散控制<sup>[14]</sup>，溶解厚度随浸入时间的变化曲线如图 3a~3c 和 4a~4c 所示。从图中可以看出，不管是否施加电流，铜的溶解厚度与浸入时间均成抛物线关系，与浸入时间的平方根均成线性关系。这表明施加电流后铜在液态锡中的溶解过程仍受扩散控制。当铜丝插入锡液时，一方面铜原子直接溶解进入锡液，另一方面在铜基体表面形成了一层 IMC 层，因此铜丝的溶解量是铜的溶解和界面金属间化合物厚度生长竞争的结果。溶解开始阶段所形成的 IMC 层厚度较薄，原子扩散相对容易，溶解速率较大，IMC 层生长速率也较快。但是随着溶解时间的增加，IMC 层厚度变厚，阻碍了铜原子和锡原子的扩散，溶解速率减慢。当电流方向从锡到铜时（电子流向从铜到锡），铜的扩散方向和电子流方向一致，由于电迁移作用，加速了溶解铜原子的扩散，因此在界面处形成的 IMC 层相对较薄，相应的铜原子通过 IMC 层的扩散更加容易，铜的溶解速率也相对较大。

采用热激活抛物线模型,对不同温度下铜在液态锡中的溶解速率常数进行计算<sup>[15]</sup>:

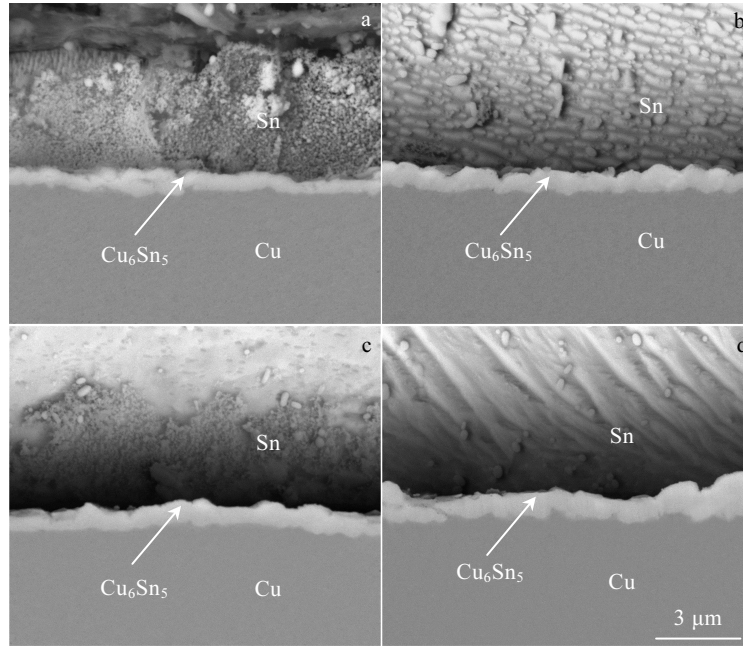


图 6 不同浸入时间下溶解后 Sn/Cu 界面的 BSE 图

Fig.6 BSE micrographs of intermetallic layers between copper and the solidified tin after dissolution at 543 K for different time: (a) 20 s, (b) 40 s, (c) 60 s, and (d) 80 s

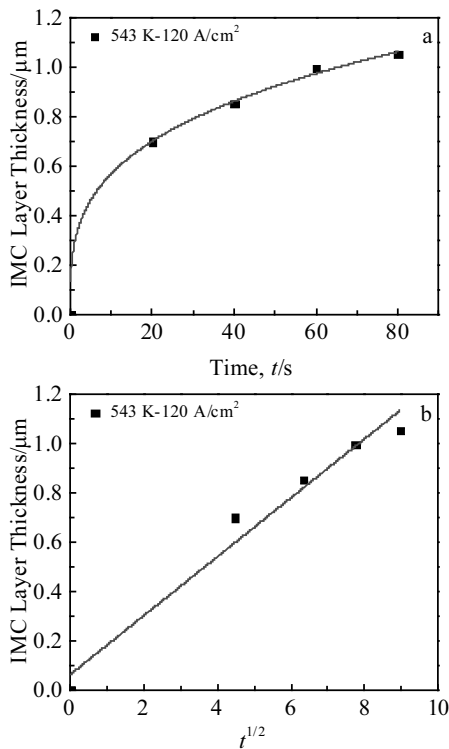


图 7 IMC 层厚度随浸入时间和浸入时间的平方根的变化曲线  
Fig.7 IMC layer thickness as a function of the immersion time (a) and the square root of time (b)

$$X(T,t)=Kt^{1/2} \quad (3)$$

式中,  $X$  为铜丝的溶解厚度,  $T$  为液态锡的温度,  $t$  为溶解时间,  $k$  为溶解速率常数。计算结果如表 1 所示。对于任意给定的温度, 速率常数的值随电流密度的增加而增加。电流密度为  $240 \text{ A/cm}^2$  时的溶解速率是不施加电流的 4~5 倍。但是, 这种增长与温度成函数关系。速率常数  $k$  与温度的关系可以通过阿伦尼乌斯方程来表示:

$$k=k_0e^{\frac{-Q}{RT}} \quad (4)$$

其中,  $k_0$  是指前因子,  $T$  是绝对温度,  $R$  是气体常数。

图 10 显示了不同电流密度下铜的溶解率常数的阿伦尼乌斯曲线。从图中可以得出, 随着电流密度的增加, 直线的斜率发生了显著的变化。通过 (4) 式可以计算铜在液态锡中溶解的有效活化能  $Q$ , 不同电流密度下的有效活化能计算结果如表 2 所示。可以看出, 铜在液态锡中的溶解活化能由电流密度为  $0 \text{ A/cm}^2$  时的  $39.74 \text{ kJ/mol}$  减小到电流密度为  $240 \text{ A/cm}^2$  时的  $28.17 \text{ kJ/mol}$ 。综上所述, 施加直流电作用明显降低了铜在液态锡中的溶解活化能。

当电场作用于液/固反应偶时, 所引起的效应主要包括电迁移, 珀耳帖效应以及液相对流作用。针对本研究中 Sn/Cu 反应偶来说, 电流作用明显促进了铜在

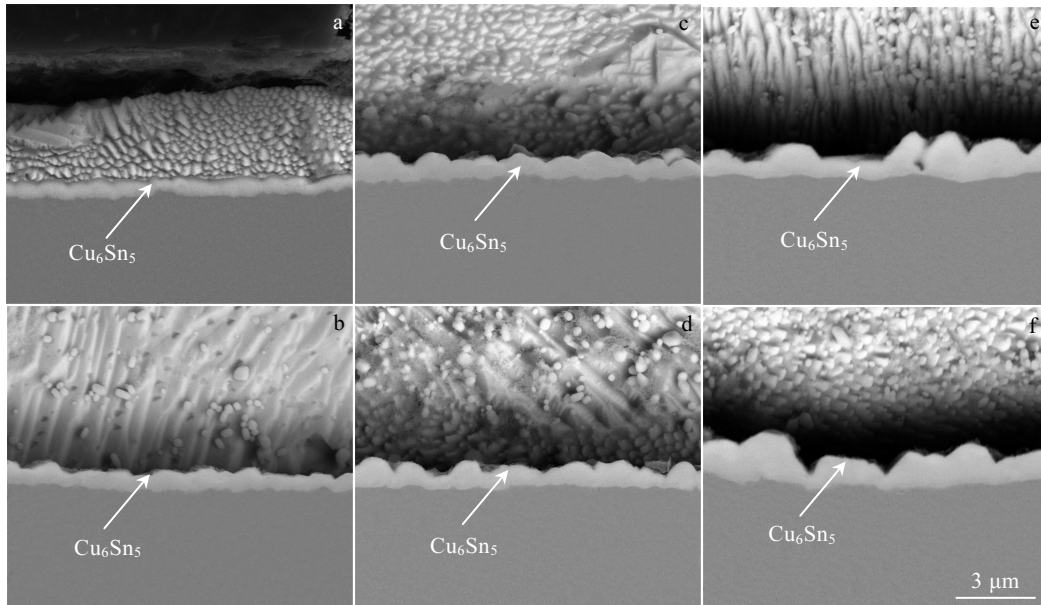


图 8 不同温度和电流方向作用下，溶解后界面的 BSE 像

Fig.8 BSE micrographs of IMC layers between copper and the solidified tin after dissolution at different temperatures and directions of current: (a) 513 K, negative; (b) 513 K, positive; (c) 543 K, negative; (d) 543 K, positive; (e) 573 K, negative; (f) 573 K, positive

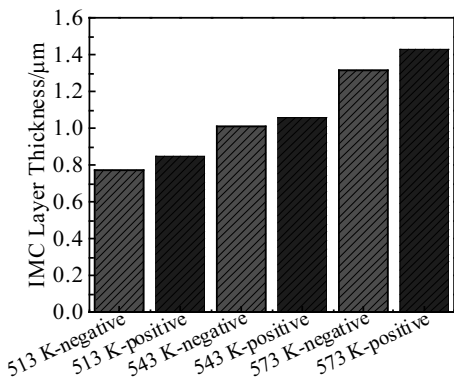


图 9 IMC 层的平均厚度

Fig.9 Average thickness of IMC layer

液态锡中溶解，因此，对促进溶解的机理做以下讨论。

对于金属反应偶来说，珀耳帖效应作用影响较小，这是因为珀耳帖系数在金属反应偶中非常小<sup>[16]</sup>。在本研究大多数情况下（铜丝接正极，锡液接负极），电子从锡侧流向铜侧，由于铜的有效电荷为正，所以电迁移作用不会促进铜的溶解。因此，在电流作用下(电子从锡流向铜)，观察到的溶解速率的加强可能是由于电流的作用增加了液态锡对流的结果。在溶解过程中，由于溶解的铜原子来不及扩散，在固/液界面集聚，导致在固/液界面处的浓度较高，而远离界面的位置浓度

表 1 不同电流密度和温度下铜在液态锡中的溶解速率常数  
Table 1 Calculated rate constants for dissolution of copper in liquid tin under varying current densities and different temperatures

Temperature/K	Current density/ A·cm <sup>-2</sup>	Dissolution rate constant/ μm·s <sup>-1</sup>
513	0	1.16
	120	2.43
	140	3.06
	240	5.73
543	0	2.02
	120	3.86
	140	4.86
	240	7.47
573	0	3.01
	120	5.56
	140	6.57
	240	11.27

较低，这样就在液态锡中产生了浓度梯度。同时，施加电流作用后，电流引起的焦耳热不同，所以在液态锡中产生温度梯度。如前所述，浓度梯度和温度梯度的耦合作用可能导致液态锡中的对流作用的增强。从而促进了铜的溶解。对温度为 573 K，浸入时间为 80 s，电流密度为 140 和 240 A/cm<sup>2</sup> 时液态锡中温度分布和由温度梯度引起的流场分布进行 Comsol Multiphysics 模拟。结果如图 11 和图 12 所示。可以看出，随着电流密度的增加，液态锡中的温度梯度增加，最大温度梯

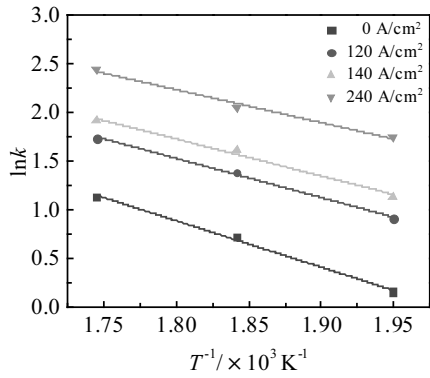


图 10 不同电流密度下铜在液态锡中溶解速率常数随温度的变化曲线

Fig.10 Temperature dependence of dissolution rate constant for copper in liquid tin at different current densities

表 2 不同电流密度下铜在液态锡中溶解激活能

Table 2 Activation energy for the dissolution of copper in liquid tin at various current densities

Current density/A·cm <sup>-2</sup>	Apparent activation energy/kJ·mol <sup>-1</sup>
0	39.74
120	33.52
140	31.65
240	28.17

度由电流密度为 140 A/cm<sup>2</sup> 时的 2.9966 K/m 增加到电流密度为 240 A/cm<sup>2</sup> 时的 8.8061 K/m。温度梯度越高，流速越快。

本实验还进行了电流方向对铜溶解影响的研究，在 3 种实验温度下，改变电流的方向（液态锡接正极，铜接负极），使得电子流向和铜的溶解方向一致。如图 5 所示，在 3 种温度下，铜的溶解速率均明显增大。由

于两种情况下，电流密度均相同，电流作用引起的焦耳热也相同，所以电流产生的对流影响也大致相同，而两种电流方向下溶解速率的不同归因于电迁移的作用。

电迁移作用下金属原子在金属熔体中的传质通量可通过以下公式来表示<sup>[17,18]</sup>：

$$\frac{J}{I} = \frac{CD}{RT} e \rho Z^* \quad (5)$$

式中， $J$  为原子通量， $C$  为锡液中铜的浓度， $D$  为扩散系数， $R$  为气体常数， $T$  为溶解温度， $\rho$  为液态锡的电阻率， $e$  为电子电荷， $I$  为电流密度， $Z^*$  为有效电荷数。

原子扩散的有效电迁移力  $F_{wd}$  可以表示为：

$$F_{wd} = e Z^* \rho I \quad (6)$$

其中， $e$  为电子电荷， $Z^*$  为电迁移的有效电荷数目， $\rho$  表示液态锡的电阻率。

在一定条件下，有效电荷数和电迁移力的大小可以表示原子通量的大小。原子通量  $J$  的值取 2 个电流方向溶解量的差值。 $C$  取极限浓度。根据 Cu-Sn 二元相图可得，在实验温度为 513, 543 和 573 K 时， $C$  的值分别为 1.11%，1.56% 和 2.56%。用于计算有效电荷  $Z^*$  的物理常数如表 3 所示。

铜在液态锡中溶解的有效电荷和电迁移力的计算结果如表 4 所示。可以看出， $Z^*$  值与温度有关，随着温度的增加， $Z^*$  的值逐渐减小，这一结果符合电子与离子之间的散射规律，即温度越高，金属离子的运动能力越强，电子与离子的动量交换率越小。叶群星<sup>[21]</sup>研究了电流作用下 Sn/Cu 界面的传质行为，计算了 510~560 K 时铜在液态锡中的有效电荷  $Z^*$  的范围为 0.51~1.53。铜在液态锡中的有效电荷数小于铜在固态锡中的有效电荷<sup>[22]</sup>，这是因为在固体状态下，温度较低，离子运动较缓慢，电子与离子之间的动量交换也就越大。而液/固体系温度较高，离子的运动更加剧烈，其



图 11 不同电流密度作用下液态锡中的温度场分布

Fig.11 Simulated temperature distribution in liquid tin at different current densities: (a) 140 A/cm<sup>2</sup> and (b) 240 A/cm<sup>2</sup>

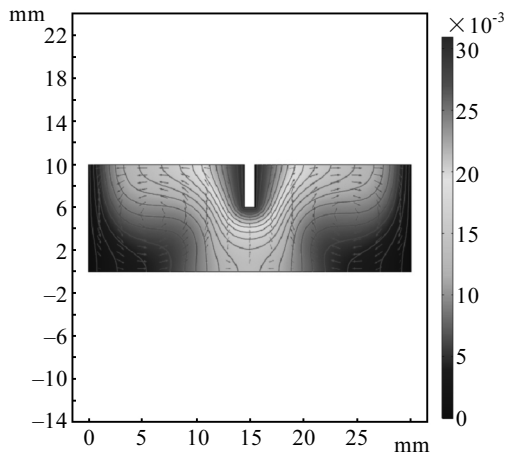


图 12 温度梯度引起液态锡中的流场分布  
Fig.12 Flow field distribution in liquid tin caused by temperature gradient

表 3 用于计算有效电荷的物理常数

Table 3 Physical constants used to calculate the effective charge  $Z^*$  on Cu

Symbol	Value and units
$\rho$	$(46.3+0.023(T-T_m))\times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^{[19]}$
$D$	$1.8 \times 10^{-3} e^{-17570/RT} \text{ cm}^2/\text{s}^{[20]}$
$e$	$9.648 \times 10^4 \text{ C/mol}$
$R$	$8.3143 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

表 4 铜在液态锡中溶解的有效电荷和电迁移力

Table 4 Effective charge  $Z^*$  and electromigration force on copper in liquid tin

Temperature/K	$Z^*$	$F_{wd}/\times 10^{-21} \text{ N}$
513	1.48	2.65
543	1.03	1.87
573	0.69	1.27

电子流的散射作用更强，电子流向的动量转换率较低。所以有效电荷的数目随着温度的升高而减小。同样可以看出，随着温度的升高，电迁移力也逐渐减小。与铜在固体锡中相比较，在液态锡中铜原子扩散没有晶格束缚，自由度较大，因此电迁移阻力较小，虽然有效电荷数相对较小，但是电迁移力仍然能够驱动铜原子在液态锡中扩散。

## 4 结 论

1) 电流作用对于铜的溶解速率有显著的影响，随着电流密度的增加，溶解速率增大，电流密度为  $240 \text{ A/cm}^2$  时的溶解速率是不施加电流的 4~5 倍。同时，施加电流作用降低了铜在液态 Sn 中溶解的激活能。

2) 当电流方向从铜到锡时，溶解速率加快主要是

因为温度梯度和浓度梯度引起的对流作用。当电流方向从锡到铜时，电迁移作用促进了溶解速率。

3) 随着浸入时间的增加，IMC 层厚度呈抛物线增长；同时，电流极性对界面 IMC 层的厚度也有一定影响，当电流方向从铜到锡时 IMC 层的厚度大于电流方向从锡到铜。

4) 通过计算电流密度为  $240 \text{ A/cm}^2$  时不同温度下的有效电荷，发现随着温度的增加，有效电荷数逐渐减小。

## 参考文献 References

[1] Xu Z, Ma L, Yan J et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*[J], 2012, 43(3): 407

[2] Munir Z A. *Materials Science & Engineering A*[J], 2000, 287(2): 125

[3] Muccillo R, Muccillo E N S. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2014, 34(4): 915

[4] Li J, Ma J, Song C et al. *Journal of Iron and Steel Research International*[J], 2009, 16(6): 7

[5] Zi B T, Yao K F, Liu W J et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2003, 32(1): 9

[6] Conrad H. *Materials Science & Engineering A*[J], 2000, 287(2): 227

[7] Fu L, Du S G. *Journal of Materials Science*[J], 2006, 41(13): 4137

[8] Fu Li(傅莉), Du Suigeng(杜随更), Bai Jianhong(白建红). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2007, 17(2): 54

[9] Cui Jianguo(崔建国), Zhang Keke(张柯柯), Zhao Di(赵迪) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(9): 198

[10] Zhao J F, Unuvar C. *Acta Materialia*[J], 2007, 55(16): 5592

[11] Zhao J, Unuvar C, Anselmi-Tamburini U et al. *Acta Materialia* [J], 2008, 56(8): 1840

[12] Garay J E, Glade S C, Anselmi-Tamburini U et al. *Applied Physics Letters*[J], 2004, 85(4): 573

[13] Jiang Y, Li H, Chen G et al. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2019, 30(6): 6224

[14] Izuta G, Tanabe T, Sukanuma K. *Soldering & Surface Mount Technology*[J], 2007, 19(2): 4

[15] Di Maio D, Hunt C P. *Soldering & Surface Mount Technology* [J], 2009, 21(4): 24

[16] Lide D R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*[M]. New York: CRC Press, 2004

[17] Zeng K, Tu K N. *Mater Sci Eng R*[J], 2002, 38(2): 55

- [18] Ho P S, Kwok T. *Reports on Progress in Physics*[J], 1999, 52(3): 301
- [19] Takeuchi S, Endo H. *Transactions of the Japan Institute of Metals*[J], 1962, 3(1): 30
- [20] Cahoon J R. *Metall Mater Trans A*[J], 1997, 28(3): 583
- [21] Ye Qunxing(叶群星). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Changchun: Jilin University, 2017
- [22] Liao C N, Chung C P. *J Mater Res*[J], 2005, 20(12): 3425
- [23] Lin E J, Hsu Y C, Chuang Y C *et al.* *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2017, 28(20): 15 149

## Kinetics of Copper Dissolution in Liquid Tin by Direct Current

Sun Xuemin, Yu Weiyuan, Wu Baolei, Yang Guoqing, Liu Yun

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

**Abstract:** The dissolution kinetics of copper in liquid tin in the temperature range of 513~573 K were investigated under the influence of a DC current by immersion method. After dissolution, the dissolution thickness and the thickness of IMC layer at Sn/Cu interface were measured and the dissolution activation energy and effective charge  $Z^*$  were calculated. The temperature distribution and flow field of the liquid tin caused by the current were simulated by Comsol Multiphysics. It is found that the current has a marked effect on the dissolution rate constant. Correspondingly, the application of the current significantly decreases the activation energy of dissolution. Similarly, the direction of the DC current has an effect on dissolution of copper and the growth of IMC. When the electronic flow is in the direction of dissolution, a further increase in dissolution and a decrease in growth of IMC layer are observed which are attributed to electromigration. When the current density is 240 A/cm<sup>2</sup>, the effective charge  $Z^*$  decreases with the increase of temperature.

**Key words:** electromigration; dissolution; activation energy; effective charge

---

Corresponding author: Yu Weiyuan, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling on Non-Ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2973563, E-mail: weiyuanyu2018@163.com