

功率超声对 Cu/Sn 体系溶解行为的影响

俞伟元, 雷 震, 孙学敏, 吴保磊, 孙军刚

(兰州理工大学 甘肃省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: 采用浸没法研究了在 523、553 和 573 K 的温度下有无超声作用 Cu/Sn 体系的溶解行为。实验发现超声波作用下 Cu 丝在熔融 Sn 中的溶解速率是无超声作用的 6.796~24.106 倍。结合有限元模拟的方法分别从超声波空化效应、微射流效应和声流效应等角度出发解释这一现象。结果表明, 空化泡坍塌瞬间会在 Cu/Sn 界面的局部产生 1500 K 左右的高温, 不但提高了 Cu 在 Sn 液中的固溶度极限, 而且使“微点”区域 Cu 发生熔化; 微射流效应能减薄金属间化合物(IMC)层厚度和改变其形貌, 增加了原子扩散的通道; 声流效应会产生搅拌作用, 将 Cu/Sn 固液界面前沿的溶质 Cu 原子不断推向 Sn 液内部, 使溶质原子溶度一直低于饱和溶解度。综合以上各方面的因素使得超声波作用下固体 Cu 在 Sn 液中溶解量和溶解速率显著增大。

关键词: 溶解机制; 无铅钎料; 可视化

中图分类号: TG454

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)08-2724-06

固体金属在液态金属中的溶解是许多冶金过程中的基本问题之一, 例如焊接、钎焊、热镀锡、镀锌和液态金属腐蚀等。在这些工艺中固体金属在液态金属中的溶解量及溶解行为对焊接接头、表面浸镀层性能等都能产生显著的影响, 因此国内外学者对于固体金属在液态金属中的溶解行为开展了广泛的研究, 在溶解热力学及动力学方面取得了丰硕的研究成果, 溶解理论初步建立^[1-3]。近年来, 随着外场技术在冶金过程中的应用, 传统的溶解理论不能有效地解决在外场作用下的溶解问题, 因此外场作用下的金属溶解行为再次成为了研究的热点。超声波作为最为常用的外场, 常常被用于金属熔炼、焊接、铸造等工艺, 超声波在液体介质中传播时将引起复杂的声学效应(例如声空化和声流)并且显著影响固/液界面处的物理-化学特性^[4-6], 从而大大地促进了固体金属与液态金属原子之间的相互扩散, 加快固体金属在液态金属中的溶解。Li^[7]等人研究了在超声波的作用下 Al 基板在 Sn 钎料中的溶解行为, 在接头中观察到了花瓣状颗粒, 这被认为是从母材上剥离的 Al 颗粒。然而, Guo^[8]等人认为这些花瓣状颗粒是 Al 溶解后沉淀析出的 α -Al 相, 并不是来自于母材。Liu^[9]等人研究了超声波作用下 Al 丝向液态 Sn 钎料中的溶解行为, 发现超声波效应极大地促进了溶解, 其中最大溶解速率是未经超声波处理的 21~27 倍。Shao^[10]等人超声波辅助下实现了

Ag/Sn/Ag 在大气中的快速瞬时液相(TLP)连接, 研究发现:在 Ag/Sn 界面处形成了细长的扇贝状 Ag₃Sn, 超声波作用会使相邻晶粒之间的晶界变宽, 从而为 Ag 原子的扩散提供稳定的熔融通道, 增大了溶解速率。

上述研究都表明, 超声波振动能促进固体金属在液态金属中的快速溶解, 但其溶解机理还鲜有研究, 已有的研究结果还缺乏实验和理论验证。现有的溶解机制还不能解释超声波作用下的溶解行为, 因此本工作以 Cu/Sn 体系作为研究对象, 通过实验结合有限元模拟的方法, 研究超声波在液体中传播时产生的空化作用和声流效应对母材溶蚀和界面反应的作用, 研究超声波作用下固体金属在液态金属中的溶解机制。

1 实 验

本研究中选用的固体金属是直径为 1 mm 的纯 Cu (99.99%) 丝, 液态金属是纯 Sn (99.99%) 粒熔化后的熔液。在溶解实验之前, 首先采用 400#、800#、1500#、2000#和 3000#的水砂纸打磨 Cu 丝表面, 充分去除其表面氧化膜; 接着将其放入质量分数 5%的 NaOH 溶液中去掉表面油污; 然后使用 5%HCl 进行浸泡, 再在丙酮中超声波清洗 3 min, 并用去离子水冲洗后吹干。用电子天平量取 70 g 的纯锡, 然后置于氧化铝坩埚(38 mm (高)×35 mm (直径))中, 分别在 523、553 和 573 K 的温度下加热至熔化, 得到深度为

收稿日期: 2019-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(51465032)

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

15 mm 的熔池。超声波发生器的工具头直径为 8 mm, 振动频率为 28 kHz, 功率为 500 W。将工具头垂直插入距离坩埚底部约 4 mm 处, 与 Cu 丝之间的距离为 6 mm。实验装置的示意图如图 1 所示。

实验时, 将 Sn 液加热到相应的温度后将铜丝插入锡液, 在同一温度下分别保温 5、10、15 和 20 min 后从锡液中抽出铜丝, 然后快速插入水中冷却, 得到溶解试样; 为了探究超声波作用下 Cu 丝在熔融 Sn 液中的溶解规律, 在相同的温度下进行了对照实验, 为保证溶解时间相同, 对照实验保温 290、280、270 和 260 s 后施加超声波振动, 超声波振动的时间分别为 10、20、30 和 40 s, 超声波振动结束后, 快速将 Cu 丝取出并在水中淬火, 得到超声作用下的溶解试样。

将 2 组对照试样的 Cu 丝截取发生溶蚀的区段(距离 Cu 丝底部 7 mm)镶嵌在环氧树脂中, 依次用 800#、1500#、2000#和 3000#的水砂纸进行打磨, 并采用粒度为 1 μm 金刚石抛光膏进行抛光, 制成标准金相试样。为了减少实验误差, 每组实验都制备了 3 个试样。分别使用 QUANA-FEG450 型场发射扫描电镜和 MEF-3 光学显微镜观察 IMC 的形貌和 Cu 丝截面, 然后用 Image J 软件测量金相照片中 Cu 丝的残留面积 S , 溶解量计算过程见式 (1) 和式 (2):

$$S = \pi r^2 \quad (1)$$

$$\Delta r = |r - r_0| \quad (2)$$

其中, S 代表溶解后 Cu 丝横截面面积; r 代表溶解后 Cu 丝当量半径; r_0 为溶解前 Cu 丝半径 (这里取 0.5 mm); Δr 代表 Cu 丝的溶解厚度。

2 实验结果

图 2a 和 2b 分别是无超声和超声作用下 Cu 丝在熔融 Sn 钎料超声作用下溶解厚度与浸没时间关系曲线。图中的离散点是在不同实验参数下得到的数据, 经 Origin 9.0 软件拟合得到图中的线型。由图 2a 可知, 无超声作用下 Cu 丝在熔融 Sn 钎料中溶解厚度与浸没

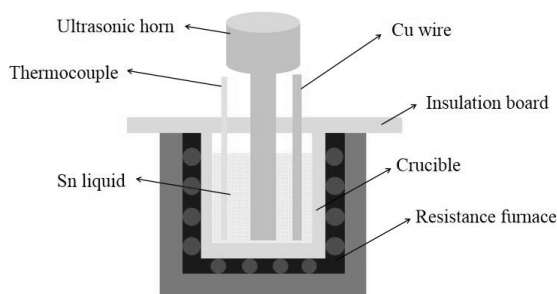


图 1 溶解实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of dissolution experiment

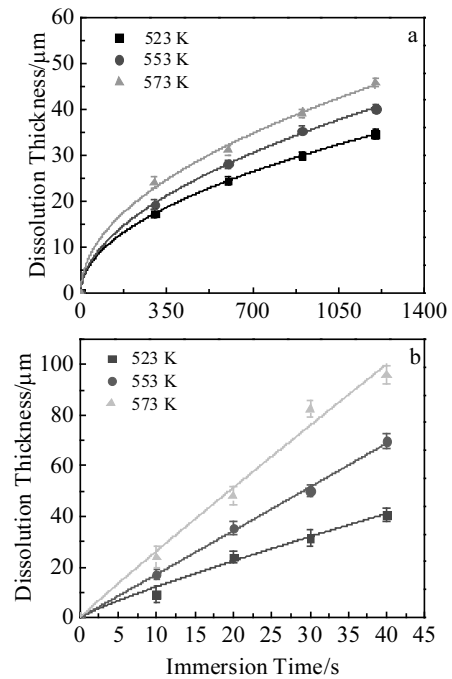


图 2 无超声和超声作用下 Cu 丝在熔融 Sn 钎料中溶解厚度
Fig.2 Dissolution thickness of Cu wire in molten Sn solder without ultrasonic (a) and with ultrasonic (b)

时间遵循类抛物线关系, 在不同的温度下, 随着浸没时间的增加, Cu 丝的溶解厚度逐渐增加; 相同时间内, 温度越高, 溶解厚度越大。然而在图 2b 中 Cu 的溶解厚度与时间呈直线关系, 当温度一定时, 随着超声时间的延长, Cu 的溶解量线性增加; 当超声时间一定时, 温度越高, Cu 的溶解量越大。

为了探究不同温度下 Cu 丝在熔融 Sn 钎料中的溶解规律, 我们建立了 Cu 在熔融 Sn 液中的溶解动力学方程^[11]:

$$X = X_0 + kt^n \quad (3)$$

其中, X 为溶解后 Cu 丝的半径, 其中 X_0 为 Cu 丝初始半径, k 为溶解速率常数, n 为时间常数。查阅资料可知^[12], 时间常数 n 反映的是溶解机制的种类。拟合结果显示, $n=0.5$, 所以可以推断出无超声作用时 Cu 丝在 Sn 钎料中的溶解是扩散机制控制的。而超声作用下对应的时间常数 $n=1$, 则该机制为反应控制机制。

为了得到每一时刻的溶解速率, 对式(3)进行求导得到式(4):

$$\frac{dX(T, t)}{dt} = nkt^{n-1} \quad (4)$$

其中, T 为溶解温度; t 为溶解时间。经计算, 得到了 523、553 和 573 K 时有无超声波作用下 Cu 丝在 Sn 液中的溶解速率, 如表 1 所示。

表 1 有无超声作用时溶解速率的关系
Table 1 Relationship between dissolution rate with or without ultrasound

T/K	Time/s	Dissolution rate without ultrasound, $V_b/\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Dissolution rate with ultrasound, $V_c/\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	V_c/V_b
523	10	0.152	1.033	6.796
	20	0.111		9.306
	30	0.092		11.228
	40	0.078		13.244
553	10	0.164	1.728	10.537
	20	0.122		14.164
	30	0.102		16.941
	40	0.088		19.636
573	10	0.207	2.507	12.111
	20	0.149		16.826
	30	0.122		20.549
	40	0.104		24.106

从表 1 可知, 在相同温度下, 无超声波作用时, 随着浸没时间的延长, 溶解速率逐渐减小, 但是, 在超声作用时, 溶解速率为一定值, 不随时间的延长而发生变化。在相同的溶解时间内, 不论是否施加超声波, 随着溶解温度的升高, 溶解速率增大。从实验结果可以看出, 施加超声波振动和升高溶解温度都能增大 Cu 丝在液态 Sn 中的溶解量。无超声作用时, 在 573 K 保温 10 s 的溶解速率是 523 K 时的 1.36 倍, 但超声波作用后, 同样条件, V_c/V_b 的最小倍数关系就已经接近 5 ($1.033/0.207=4.99$) 倍, 显然超声波对于溶解的影响更加显著, 它是增大 Cu 溶解速率的主要因素。

3 分析与讨论

超声波作用显著增加 Cu 丝在熔融 Sn 中的溶解, 其机理许多学者也做了研究, 普遍认为是超声波的空化作用造成的, 但空化作用如何促使固体金属在液态金属中加速溶解, 目前由于空化泡溃灭时间极短, 很难用实验观察, 因此还没有得到证实和详细研究^[6,13,14]。本研究结合数值模拟从超声波的热效应、微射流效应以及声流效应等 3 个方面进行了分析。

3.1 空化的热效应

声能引起的空化效应可导致 Sn 液中大部分微泡的生长, 振荡和坍塌。当超声波在液体中传播时, 其交替地压缩和拉伸熔融 Sn 液, 在“拉伸”阶段(稀疏)期间, 能提供足够的负压以克服原子间作用力, 可以使流体介质破裂并产生气泡(微泡)。在接下来的循环中, 随着这些空化泡的生长, 然后猛烈地坍塌释放出很高的温度, 这个温度会对溶解产生至关重要的影响。但是空化是一个瞬间的过程, 无法进行实测, 为了得到空化瞬间的温度, 采用 COMSOL Multiphysics 5.4

有限元软件进行模拟。首先模拟出熔融 Sn 钎料中声压分布, 得到 Cu/Sn 固液界面处的声压, 再用此处的声压去计算 Cu/Sn 界面空化气泡坍塌时的温度。

由 Rayleigh-Plesset 方程^[15]可以确定气泡壁的运动:

$$R\ddot{R} + \left(\frac{3}{2}\right)\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[\left(P_h + \frac{2\sigma}{R_c} - P_v \right) \left(\frac{R_c}{R} \right)^{3\kappa} - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} - (P_h - P_a) \right] \quad (5)$$

其中, $\dot{R}$ 为气泡壁速度; $\ddot{R}$ 为气泡壁加速度; R_c 为平衡条件下的气泡半径; ρ 为液体密度; R 为气泡半径; σ 为液体表面张力; μ 为液体粘度; P_v 为液体蒸气压; P_h 为大气压强; P_a 为声压; κ 为气体绝热指数。该微分方程可以在数值上求解, 将 Cu/Sn 界面处的声压代入公式(5)可以求出气泡坍塌时的半径 R 。

假设微泡的膨胀和压缩是绝热过程, 气泡坍塌时的温度由公式(6)^[15]表示:

$$T_{g(R)} = \frac{T_0 R_0^{3(\gamma-1)}}{R^3 - a^{3(\gamma-1)}} \quad (6)$$

其中, a 是范德瓦耳斯半径; R_0 为气泡初始半径; T_0 为 Sn 液的初始温度; R 为空化泡坍塌时的半径; γ 是气体比热率。

利用公式(7)和(8)计算气泡坍塌后 Cu 丝表面吸收的有效温度 T :

$$T = \Delta T + T_0 = \frac{Q}{C_p \rho \left(4\pi \frac{\lambda}{C_p \rho} t \right)^{\frac{3}{2}}} \exp \left(-\frac{d^2}{4 \frac{\lambda}{C_p \rho} t_1} \right) + T_0 \quad (7)$$

$$Q = \frac{4(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_v)\pi R_0^3}{3RT_0} C_a (T_{g(R)} - T_0) \quad (8)$$

其中, Q 为空化泡坍塌释放的能量; ΔT 为温度差; C_p 和 C_a 分别是液体和空气的摩尔热容; λ 是液体热导率; d 为距气泡中心的距离; p_0 为大气压强; t_1 为坍塌时间, R 是通用气体常数。

在该数值模拟中, 使用 2D 几何声波传播的控制方程如下:

$$\nabla \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right) - \frac{\omega^2}{\rho c^2} P = 0 \quad (9)$$

其中, $\omega=2\pi f$, f 为超声波的频率; c 为液体中的声速; ρ 为液体密度; P 为声压。

图 3a 显示了熔融 Sn 钎料中声压的分布规律。Sn 液中声压是不均匀分布的, 浅绿色代表声压接近 0 Pa; 红色代表声压的最大(正)值; 蓝色代表声压的最小

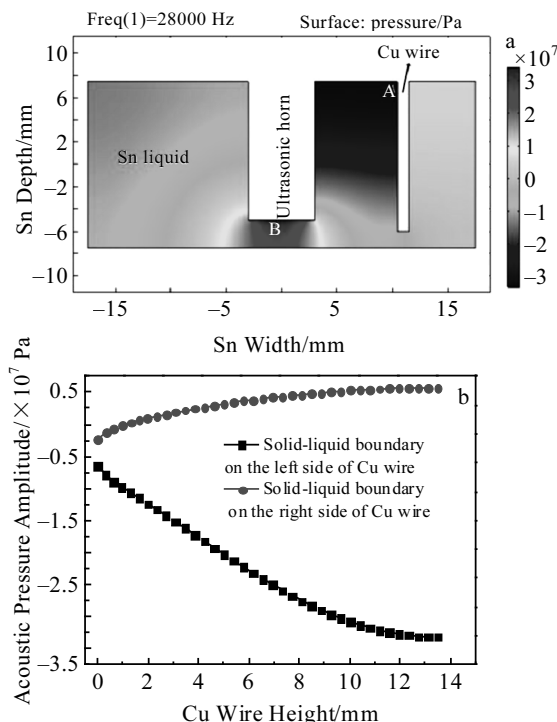


图3 523 K 时 Sn 中的声压分布和 Cu/Sn 固液界面声压幅值
Fig.3 Sound pressure distribution in Sn (a) and sound pressure amplitude of Cu/Sn solid-liquid interface (b) at 523 K

(负)值。A 点表示 Sn 液中声压的最小(负)值,其值大小为 -3.32×10^7 Pa; B 点表示最大(正)值,大小为 1.77×10^7 Pa。由于液态 Sn 钎料的空化阈值为 $0.3 \times 10^5 \sim 0.6 \times 10^5$ Pa^[16],由图 3b 可知;Cu/Sn 界面上的声压值的范围大于 Sn 钎料的空化阈值,其最小负压足以发生空化,故发生空化的几率很大。将空化泡坍塌时的半径 R 代入公式(6)就可以得到空化泡坍塌时的温度,并联立公式(7)、(8)计算气泡坍塌瞬间 Cu/Sn 界面局部“微点”的温度为 1500 K 左右。

熔融金属中固体金属的溶解速率^[17]通常表示如下:

$$\frac{dC}{dt} = k \left(\frac{A}{V} \right) (C_s - C) \quad (10)$$

其中, k 为溶解速率常数; A 为固/液界面的面积; t 为反应时间; C 为 t 时刻的溶质浓度; V 为液体体积; C_s 为溶质的饱和浓度。

在本研究中, A 和 V 可以认为是常数,浓度差 $(C_s - C)$ 是溶解的驱动力。若 $(C_s - C)$ 越大,则溶解速率越大。因为气泡坍塌瞬间 Cu/Sn 界面局部“微点”的温度大约为 1500 K,由相图可知,随着温度的升高 Cu 在 Sn 中的饱和溶解度 C_s 增大,由公式(10)可知溶解速率增大。另外此温度也高于 Cu 的熔点(1357 K),即空化位置的 Cu 由固态变为了液态,这意味着 Cu 由

溶解机制,变成了融化机制。因为液/液反应的速率是远大于固/液反应的,所以超声波的“热效应”可以增加 Cu 在液态 Sn 中的溶解速率。

由于空化效应、微射流效应的强弱与超声功率、超声频率和反应体系温度等有关。在本研究中其他变量均为定值,只有反应体系的温度在改变。结合模拟结果可知,随着反应体系温度的升高,Sn 中的声压变大,以至于 Cu/Sn 固液界面声压幅值也变大。因为 Cu/Sn 界面声压幅值增大会使得空化泡坍塌时的半径 R 变小,根据公式(6)、(11)可知 Cu/Sn 界面处空化温度 $T_{g(R)}$ 、微射流压力 $P_{collapse}$ 会随着 R 的减小而增大。因为 523 K 时 Cu/Sn 界面处有效的温度和压力分别为 1500 K 和 85 MPa 左右,此温度远高于 Cu 的熔点(1357 K),压力远高于界面 IMC 的剪切强度(52 MPa),所以当温度上升到 553、573 K 时, Cu/Sn 界面处有效的温度和压力会更高,所以温度越高使得 Cu 丝溶解越快。

3.2 微射流效应

空化气泡坍塌时会产生高速喷的微射流,这将对固体表面产生侵蚀作用,造成表面创伤,增加传质接触面积,易碎的固体会变成小颗粒,强化固液接触^[18]。

公式(11)表示空化泡溃灭时的压力:

$$P_{collapse} = \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \cdot \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \left(\frac{dR}{dt} \right) \quad (11)$$

联立公式(5)和(11)可以得到空化泡溃灭瞬间在 Cu/Sn 界面上产生的压力。经计算微射流在 Cu/Sn 界面“微点”处的有效压力为 85 MPa 左右。此压力大于界面处 IMC 的剪切强度(52 MPa)^[10]。所以在微射流强烈的冲击作用下,IMC 层可能会产生微裂纹甚至剥落。

图 4a~4d 分别为 523 K 加热 5 min、523 K 加热 20 min、553 K 加热 5 min 和 523 K 加热 1180 s 超声 20 s 时 IMC 的厚度和形貌。在图 4a~4c 中:IMC 层厚度随着温度的升高和浸没时间的延长而不断增加,由于 IMC 相当于一层致密的保护膜,它会包覆在 Cu 表面,从而减缓 Cu 和 Sn 的反应。而后续 Cu/Sn 的反应只能依靠 IMC 的晶界提供原子扩散的通道,故其溶解速率降低。在施加超声波之后,图 4d 中 IMC 层的厚度相比于图 4b 明显变薄也更加疏松多孔,此过程不但打开了 Cu 和 Sn 原子的扩散通道,而且微射流的强烈的冲击作用会使新鲜的 Cu 暴露在 Sn 液当中,从而使溶解速率增大。

3.3 声流效应

声流是超声波在液体中传播时产生的非线性效应。当超声波传播进入液态纯 Sn 钎料时会因存在声压梯度而导致液体流动。声流搅拌能够加速液态合金内部原子的扩散速度,进而加快固体在液体中的溶解。

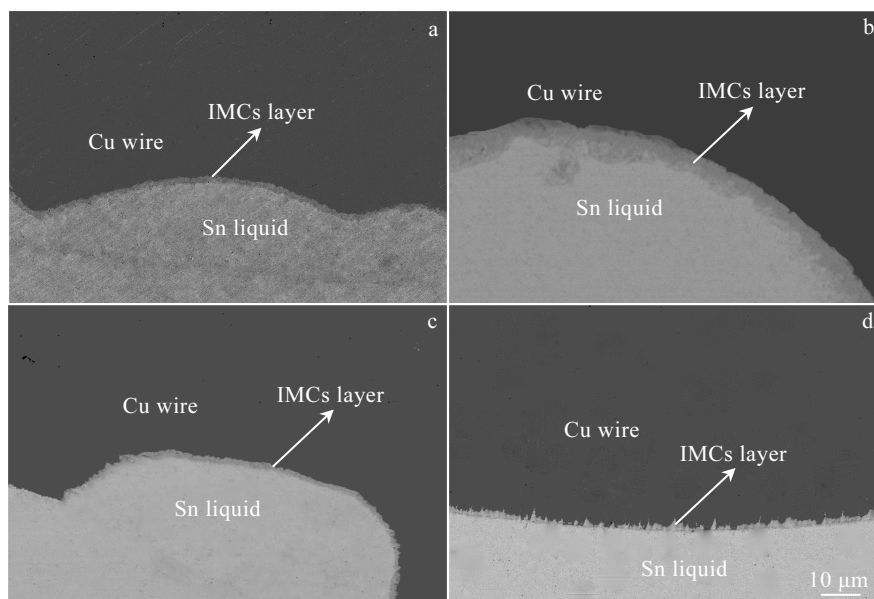


图 4 不同加热工艺及有无超声作用下 IMC 的厚度和形貌

Fig.4 Thicknesses and morphologies of IMC without (a-c) or with (d) ultrasound under different heat treatments: (a) 523 K/5 min, (b) 523 K/20 min, (c) 553 K/5 min, and (d) 523 K/1180 s

图 5a 显示了熔融 Sn 钎料中速度场的分布规律。Sn 中的速度场是不均匀的,深蓝色代表了声流接近 0 m/s,红色部分代表该区域声流比较大。A 点表示 Sn 液中声流最小位置,其大小为 1.85×10^{-6} m/s,接近 0 m/s; B 点表示声流的最大值为 1.30 m/s 左右,其中黑色的曲线是声流的等值线,它的疏密程度代表了速度场梯度的变化。图 5b 表示 Cu/Sn 界面的声流大小,声流范围在 0~0.4 m/s 且 Cu 丝左右边界的声流值不同,该速度的存在能使 Cu/Sn 界面出原子浓度处在一个较低水平。

溶解速率常数公式为:

$$k = \frac{D}{\delta} \quad (12)$$

其中, k 为溶解速率常数, D 为扩散系数, δ 为扩散层厚度。声流作用对 Cu/Sn 界面有一定的冲刷作用,会减小 δ , 使得 k 增大, 结合公式(10)可知, 此过程能增大溶解速率。

Shoji 等^[19]在 673 K 的温度下给 Sn 液施加 1.9~75.4 cm/s 的旋转速度, 发现 Cu 丝在 Sn-Pb 钎料中的溶解速率增大了 2~3 倍。但是仍小于超声波效应对于溶解速率的影响, 可见声流搅拌强于机械搅拌作用。由于声流会将 Cu/Sn 界面上累积的 Cu、Sn 原子推到熔体中心, 以至于在界面处的原子浓度一直较小且远低于饱和浓度, 所以在表 1 中显示超声作用下溶解速率呈一定值。在保温时, 随着时间的增加, 界面上溶解的 Cu 原子会逐渐累积, 从而使溶解速率减小, 但

是声流作用下的 C 值会减小, 由公式(10)可知超声波作用会增加 Cu 在熔融 Sn 液中的溶解速率。

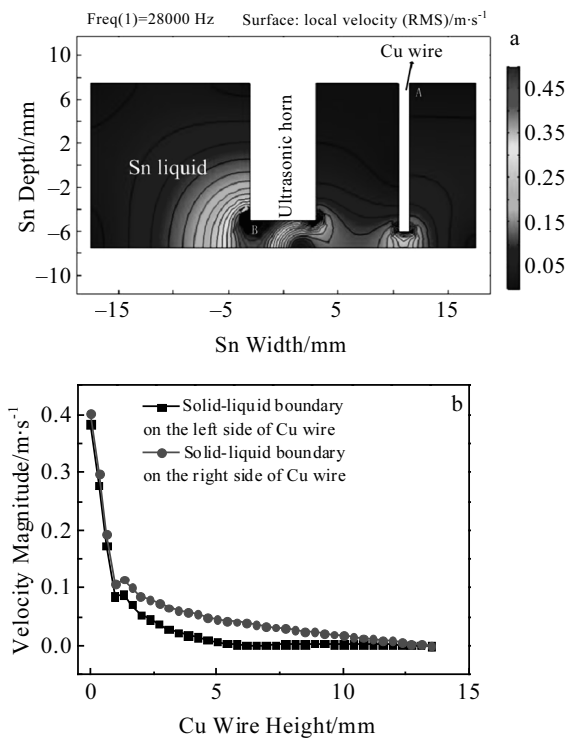


图 5 523 K 时 Sn 液中的声流分布和 Cu/Sn 界面上的流体速度

Fig.5 Acoustic streaming distribution in the Sn liquid (a) and fluid velocity on the Cu/Sn solid-liquid interface (b) at 523 K

4 结 论

1) 无超声波作用时 Cu 在 Sn 的溶解为扩散控制机制; 而在超声波作用下是反应控制机制。

2) 超声波可以加速固体金属在液态金属中的溶解量, 同时溶解速率也远高于未施加超声波的体系, 随溶解温度的升高溶解速率增大。

3) 超声波在 Sn 中发生空化时产生“热效应”, 使得界面微区温度高达 1500 K, 不仅极大地提高了 Cu 在 Sn 中的溶解度, 而且使 Cu 丝熔化, 在“微射流效应”的作用下, IMC 层被减薄, 增大了 Cu 原子溶解, Sn 原子扩散的通道被打开, 在“声流效应”作用下, 在 Cu/Sn 界面堆积的原子被推向远处, 使界面处原子浓度较低, 故而溶解速率变大。

参考文献 References

- [1] Schaefer M, Laub W, Sabee J M *et al. Journal of Electronic Materials*[J], 1996, 25: 992
- [2] Yeh P Y, Song J M, Lin K L. *Journal of Electronic Materials*[J], 2006, 35: 978
- [3] Takemoto T, Takemoto M. *Soldering & Surface Mount Technology*[J], 2006, 18(3): 24
- [4] Li M Y, Li Z L, Xiao Y *et al. Applied Physics Letters*[J], 2013, 102(112): 094 104
- [5] Chen X G, Yan J C, Gao F *et al. Ultrasonics Sonochemistry*[J], 2013, 20(1): 144
- [6] Virot M, Chave T, Nikitenko S *et al. The Journal of Physical Chemistry C*[J], 2010, 114(30): 13 083
- [7] Li Y X, Leng X S, Cheng S *et al. Materials & Design*[J], 2012, 40: 427
- [8] Guo W B, Leng X S, Yan J C *et al. Welding Journal*[J], 2015, 94(6): 189
- [9] Liu Y, Yu W Y, Liu Y Z. *Ultrasonics Sonochemistry*[J], 2019, 50: 67
- [10] Shao H K, Wu A P, Bao Y D *et al. Ultrasonics Sonochemistry*[J], 2017, 37: 561
- [11] Faizan M. *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2015, 30(2): 169
- [12] Takenaka T, Kano S, Kajihara M *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 396(1): 115
- [13] Dong F, Li X Q, Zhang L H *et al. Ultrasonics Sonochemistry* [J], 2016, 31: 150
- [14] Cogné C, Labouret S, Peczalski R *et al. Ultrasonics Sonochemistry*[J], 2016, 29: 447
- [15] Niazi S, Hashemabadi S H, Razi M M. *Chemical Engineering Research and Design*[J], 2014, 92(1): 166
- [16] Eskin G I. *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*[M]. London: CRC Press, 1998
- [17] Takemoto T, Uetani T, Yamazaki M. *Soldering & Surface Mount Technology*[J], 2004, 16(3): 9
- [18] Lais H, Lowe P S, Gan T H *et al. Ultrasonics Sonochemistry* [J], 2018, 45: 7
- [19] Shoji Y, Uchida S, Ariga T. *Metallurgical Transactions B*[J], 1982, 13: 439

Effect of Power Ultrasound on Dissolution Behavior of Cu/Sn System

Yu Weiyuan, Lei Zhen, Sun Xuemin, Wu Baolei, Sun Jungang

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

Abstract: The dissolution behavior of Cu/Sn system with or without ultrasound at 523, 553 and 573 K was studied by an immersion method. It is experimentally found that the dissolution rate of Cu wire in molten Sn under ultrasonic action is 6.796~24.106 times more than that without ultrasonic effect. Combined with the method of finite element simulation, the phenomenon was explained from the perspectives of ultrasonic cavitation effect, micro jet effect and acoustic streaming. The results show that the cavitation bubble collapse will produce a high temperature of about 1500 K at the Cu/Sn interface, which not only increases the solid solubility limit of Cu in the Sn liquid, but also melts the Cu in the “micro-point” region. The micro jet effect can reduce the thickness of the intermetallic compound (IMC) layer and change its morphology, and increase the channel of atomic diffusion. The acoustic streaming will produce a stirring effect, and the solute Cu atom at the front of the Cu/Sn solid-liquid interface is continuously pushed to the Sn liquid. Internally, the solute atom solubility is always lower than the saturated solubility. Therefore, combined with the above factors, the dissolved amount and dissolution rate of solid Cu in the Sn solution are significantly increased under the action of ultrasonic waves.

Key words: dissolution mechanism; lead-free solder; visualization

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, E-mail: weiyuanyu2018@163.com