

Zn 挥发对 Ag-Cu-Zn 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿性的影响

李玉龙^{1,2}, 吴昊樾¹, 雷敏¹

(1. 南昌大学, 江西省机器人与焊接自动化重点实验室, 南昌, 330031; 2. 马里兰大学, 马里兰大学先进生命周期工程中心, 马里兰, 20742, 美国)

摘要: 采用 Ag-Cu-Zn 钎料对 TiC-Ni 金属陶瓷进行润湿. 结果表明, 真空条件下, 以 22.5 °C/min 的速率加热至 810 °C, 保温 10 min, Ag-Cu-Zn/TiC-Ni 金属陶瓷三相线附近界面生成了连续的 (Cu, Ni) 组织. 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿过程先后经历孕育阶段、铺展阶段、钉扎阶段、回缩阶段和平衡阶段, 最终平衡润湿角为 27.3°. 随着加热速率由 10 °C/min 上升到 30 °C/min, Zn 挥发速率加快, 钎料铺展过程持续时间变短, 三相线附近界面 (Cu, Ni) 组织数量减小, 由连续的层状组织转变为断续的块状组织, 且钎料在金属陶瓷表面平衡润湿角不断增大. 相比真空环境, 氩气环境下, Zn 挥发速率降低, 虽然钎料能大量溶解 TiC-Ni 金属陶瓷中的 Ni 基体, 但是三相线附近界面仅有少量 (Cu, Ni) 形成, 使其在金属陶瓷表面的润湿基底直径随时间逐渐增大, 而润湿角逐渐减小, 随后润湿基底直径几乎保持不变, 而润湿角缓慢升高.

创新点: 在真空和氩气保护下, 以不同速率加热 Ag-Cu-Zn 钎料, 研究 Zn 挥发对钎料在 TiC-Ni 表面润湿性的影响.

关键词: Ag-Cu-Zn 钎料; 润湿; TiC-Ni 金属陶瓷; 界面组织; 挥发

中图分类号: TG 454

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20201130001

0 序言

TiC-Ni 金属陶瓷是一种具有高韧性、较高硬度和耐磨性, 以及优异的抗蠕变性能和良好的电磁性能的材料, 在工业中有广泛的应用前景, 可被应用于制造汽车挺柱、刀具和挤压成形模具等^[1-3]. 为了扩大金属陶瓷的应用范围, 往往需要实现金属陶瓷和金属的连接. 目前钎焊是多种连接方法中应用最普遍的一种^[3-4]. TiC-Ni 金属陶瓷中的 TiC 增强相含量较高, 不易被非活性元素润湿, 使得 Ag-Cu 钎料对其润湿性较差^[5-6]. 虽然 Ag-Cu-Ti 钎料是一种常用于陶瓷和金属连接的活性钎料, 然而活性元素 Ti 极易与 TiC-Ni 金属陶瓷中的 Ni 反应生成 Ti-Ni 金属间化合物, 降低钎料的活性, 同时也使接头脆性增加^[7-8]. 这两种钎料都不适用于 TiC-Ni 金属

陶瓷与金属的连接.

Ag-Cu-Zn 钎料由于液相温度低、流动性好及电化学性能好等优点被广泛应用于钎焊、润湿领域^[9-11]. 钎料中的 Zn 元素是一种真空下极易挥发的元素. 前期试验结果表明, 真空下 Ag-Cu-Zn 钎料对 TiC-Ni 金属陶瓷具有良好的润湿性^[5-6], 而且随着钎料中 Zn 含量的升高, 钎料在金属陶瓷表面的平衡润湿角呈现先减小后变大的规律^[6, 12], 而 Zn 挥发完毕, 继续升高温度, 则钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿性不再发生变化^[13]. 这都说明 Ag-Cu-Zn 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的润湿性与钎料中的 Zn 元素密切相关. 真空下加热速率越快, 温度升高越快, Zn 挥发越快; 而相比真空环境, 氩气环境下, Zn 挥发的速率大大降低. 然而目前还未有加热速率和环境气氛对 Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿过程影响的相关报道. 文中采用自制 Ag-Cu-Zn 钎料润湿 TiC-Ni 金属陶瓷, 通过改变加热速率和环境气氛, 研究 Zn 挥发对 Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿性的影响.

收稿日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52065043); 中国国家留学基金管理委员会 (201806825086); 江西省自然科学基金青年项目 (20202BAB214020).

1 试验方法

TiC-Ni 金属陶瓷由哈尔滨工业大学复合材料研究所提供, 采用自蔓延高温并结合准等静压方法合成. 此 TiC-Ni 金属陶瓷致密度可达 93.5%, Ni 作为基体相, 体积分数为 27%, 而 TiC 颗粒是增强相, 尺寸分布在几百纳米到 $5\ \mu\text{m}$ 之间. Ag-Cu-Zn 钎料是将 Ag-28Cu 共晶钎料粉末与 Zn 粉末采用机械球磨方式以质量比 3:1 均匀混合后, 采用高频感应方式熔炼制成.

真空润湿设备为德国产 OCA20 真空润湿角测量仪, 主要包括管式加热炉、高速摄像机、分子泵、冷却水箱、加热控制柜、光源系统及电脑处理系统. 设备真空度最高可达 $6 \times 10^{-4}\ \text{Pa}$, 可以 $5 \sim 30\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 的加热速率加热到设定温度, 温度最高可升高至 $1600\ ^\circ\text{C}$. 高速摄像机的最高拍摄速度可达 2 帧/s, 且其拍摄速度可以根据需要进行下调. 钎料形貌及其在母材表面的润湿过程可以通过 OCA 软件进行观察. 此外, 通过 OCA 软件可测量获得钎料液体在

母材表面的润湿角、润湿直径及液滴高度等信息. 试验结束后, 关闭加热系统, 试样以炉冷方式直接冷却至 $300\ ^\circ\text{C}$ 后关闭分子泵, 继续冷却至 $100\ ^\circ\text{C}$ 以下可开炉取件.

试验前采用电火花设备切割 TiC-Ni 金属陶瓷和 Ag-Cu-Zn 钎料合金, 其中 TiC-Ni 金属陶瓷尺寸为 $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$, Ag-Cu-Zn 钎料合金尺寸为 $2.3\ \text{mm} \times 2.3\ \text{mm} \times 2.3\ \text{mm}$. 将试样置入丙酮溶液中超声清洗 15 min. 将 Ag-Cu-Zn 钎料放在 TiC-Ni 金属陶瓷表面, 当炉内真空度达到 $2 \times 10^{-3}\ \text{Pa}$ 时, 以 $10 \sim 30\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 的加热速率加热到 $810\ ^\circ\text{C}$, 保温 10 min 后, 直接关掉加热系统, 试样随炉降温. 为了对比分析, 在氩气保护环境下将试样以 $20\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 的加热速率加热到同等温度进行保温后, 直接关掉加热系统, 试样随炉降温.

2 结果及分析

图 1 为不同加热速率时 Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿角 θ 和正规化处理过的基底直

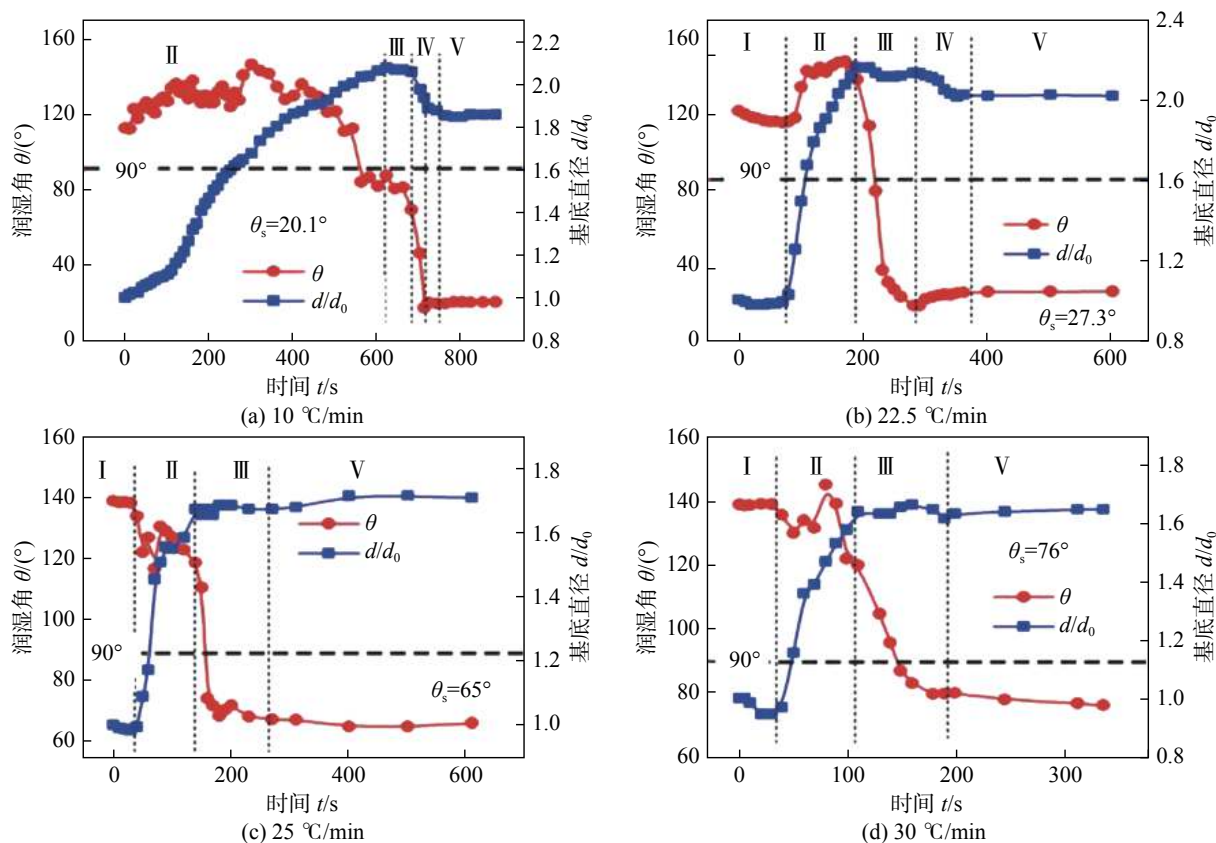


图 1 不同加热速率时 Ag-Cu-Zn 液体钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿角 θ 和基底直径 d/d_0 随时间的变化

Fig. 1 Variations in the contact angle θ and base diameter d/d_0 for Ag-Cu-Zn alloys on TiC-Ni cermet surfaces with different heating rate. (a) $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$; (b) $22.5\ ^\circ\text{C}/\text{min}$; (c) $25\ ^\circ\text{C}/\text{min}$; (d) $30\ ^\circ\text{C}/\text{min}$

径 d/d_0 (d 是不同时刻的基底直径, d_0 是 0 s 时的基底直径) 随时间的变化, 其中 0 s 为 Ag-Cu-Zn 钎料完全熔化的时刻. 可以发现, 真空中 Ag-Cu-Zn 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的润湿过程大致依次分为 5 个阶段: 孕育阶段 (阶段 I)、铺展阶段 (阶段 II)、钉扎阶段 (阶段 III)、回撤阶段 (阶段 IV) 和稳定阶段 (阶段 V). 某些加热速率下, 润湿过程只经历了其中的部分阶段. 当加热速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时, Ag-Cu-Zn 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面先后经历了铺展阶段、钉扎阶段、回撤阶段和稳定阶段. Ag-Cu-Zn 钎料熔化后, 即以较低速度在 TiC-Ni 金属陶瓷表面进行铺展, 并未经历明显的孕育阶段 (图 1a). 随后, 液体钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面快速铺展, 润湿基底直径不断增大, 但润湿角没有明显降低. 在铺展阶段后期, Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿基底直径继续增大, 而润湿角由钝角逐渐降至小于 90° . 当 Ag-Cu-Zn 停止铺展后, 润湿曲线出现了钉扎阶段, 润湿基底直径不变, 而润湿角继续减小. 钉扎阶段后, Ag-Cu-Zn 钎料经历了一个润湿基底直径减小的回撤阶段. 在回撤阶段前期, Zn 继续挥发, 润湿角先减小; 随着 Zn 挥发结束, 回撤阶段后期润湿角又稍有增大. 最终, Ag-Cu-Zn 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的平衡润湿角为 20.1° .

当加热速率升高到 $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时, Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面先后经历孕育阶段、铺展阶段、钉扎阶段、回撤阶段和平衡阶段 (图 1b).

在孕育阶段中, Ag-Cu-Zn 钎料熔化后, 形成球冠, 润湿角近似在 $123^{\circ} \sim 128^{\circ}$ 之间, 润湿直径几乎不变, 这属于典型的金属在陶瓷表面的非反应润湿. 铺展阶段中 Ag-Cu-Zn 液体剧烈挥发, 钎料形貌由球冠状转变为扁平状, 基底直径连续增加至 $2.16d_0$, 而润湿角在 150° 附近波动. 也即 Ag-Cu-Zn 液体钎料以钝角在 TiC-Ni 金属陶瓷表面进行铺展, 铺展过程中, 润湿角并未明显减小. Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面这种特殊的铺展模式与大量气态 Zn 原子离开液体表面对液体表面产生的反向作用力即蒸气反冲力有关^[6]. 即液体表面 Zn 元素挥发形成的蒸气反冲力推动 Ag-Cu-Zn 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的铺展.

润湿过程到达钉扎阶段, Zn 继续挥发, 液滴直径基本停止增加, 而润湿角逐渐由 153.2° 下降到 19.2° , 液体钎料对母材由不润湿向润湿转变. 在回撤阶段, Zn 微弱挥发, 液体形貌由扁平状变为新月

形, Ag-Cu-Zn 钎料从 TiC-Ni 金属陶瓷表面三相线处回撤, 基底直径减小, 润湿角增大, 最终液滴以 27.3° 的接触角进入稳定阶段. 此时, 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的润湿角保持不变.

当加热速率提高至 25 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时, Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面先后经历了孕育阶段、铺展阶段、钉扎阶段和平衡阶段, 如图 1c, 1d 所示. 铺展阶段, Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的润湿基底直径不断增大, 而润湿角保持在 $120^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 之间. 钉扎阶段, Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿角逐渐下降, 而润湿基底直径保持不变. 加热速率为 25 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时, 液体钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面均无回撤现象发生, 钉扎阶段结束后, 液态钎料在基板表面达到平衡润湿角. 此外, 也发现随着加热速率提高, 铺展阶段持续的时间明显缩短.

图 2 为 Ag-Cu-Zn 液体钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面平衡润湿角随加热速率的变化. 可以发现不同加热速率下, Ag-Cu-Zn 都能润湿 TiC-Ni 金属陶瓷. 在加热速率低于 $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时, Ag-Cu-Zn 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿性良好. 随着加热速率增大, 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面平衡润湿角不断增大; 当加热速率为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时, 钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的平衡润湿角升高到 75° .

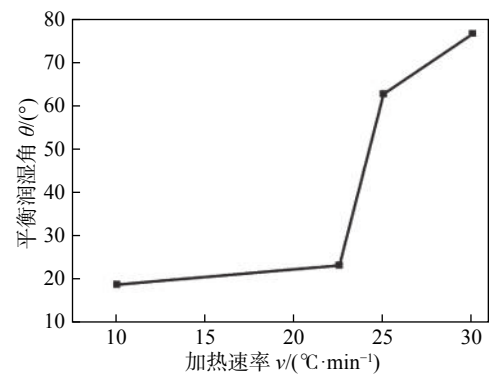


图 2 加热速率对液体钎料平衡润湿角的影响

Fig. 2 Variations in the contact angle with heating rate for Ag-Cu-Zn/TiC-Ni cermet wetting system

在润湿过程中, Zn 元素大量挥发, 因此需要分析 Ag-Cu-Zn 液体中 Zn 元素以何种形式离开液态钎料. 加热过程中, Ag-Cu-Zn 液体钎料中 Zn 元素可在液-气界面上直接由液态转化为气态, 也可在液体钎料中由液态转变为气态, 并在液体钎料中形成蒸气泡. 当液体钎料内部产生蒸气泡时, 蒸气泡所受外力作用示意图如图 3 所示. 液体内部蒸气泡的

形成和长大需要克服蒸汽泡外部的压力^[14], 即需满足式 (1) 所示的关系, 即

$$P_v \geq P_r + 2\sigma/r + \rho gh + P_l \quad (1)$$

式中: P_v 为 Zn 的蒸汽压力 (Pa); P_r 为 Zn 由液体表面挥发时在液体表面产生的蒸气反冲力 (Pa); ρgh 为蒸汽泡所在位置流体静力 (Pa), 其中 ρ 为液滴比重; g 为液滴的重力加速度; h 为气泡与液滴上方之间的距离; P_l 为液体上方气体压力 (Pa); $2\sigma/r$ 为气泡表面张力产生的附加压力 (Pa). 式 (1) 说明, 只有当蒸汽泡中的压力足够大, 才可能克服施加在蒸汽泡表面的外力作用, 使蒸汽泡在液态钎料中形成并长大.

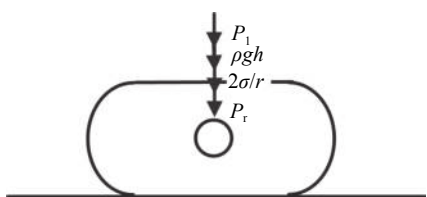


图 3 Ag-Cu-Zn 液滴内部蒸汽泡所受外力作用示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the vapor bubble in the Ag-Cu-Zn liquid alloy

液-气界面元素挥发不需要克服流体静力和气泡表面张力的附加压力. 这表明, Zn 元素更易在液-气界面由液态转化为气态. 此外, 润湿试验中, 液滴的加热方式为环向辐射加热, 此时液滴表面温度比内部温度高, Zn 元素更易在液-气界面挥发, 从而有利于在液-气界面形成蒸气反冲力.

比较 Ag-Cu-Zn 在不同加热速率的润湿曲线, 可以发现 Ag-Cu-Zn 从铺展阶段开始到结束所需要的时间逐渐变短. 这是由于加热速率越大, 单位加热时间内, 液体的温度越高, Zn 挥发速率越大, Ag-Cu-Zn 中 Zn 完全挥发所需要的时间就越短. 当加热速率过快时, 液体温度急剧升高, 此时 Ag-Cu-Zn 表面和内部同时发生强烈的挥发.

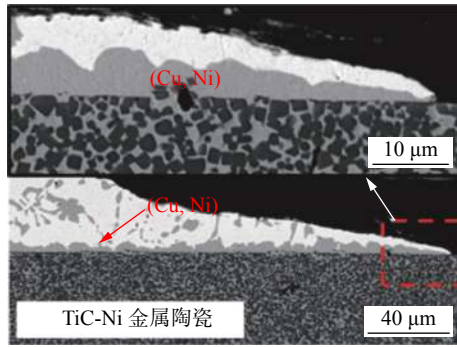
Zn 从 Ag-Cu-Zn 表面挥发, 会带走液体的一部分热量, 从而使液体表面温度降低而对内部温度影响较小. 液体表面温度的降低导致液体表面挥发速率下降, 从而导致液体表面的蒸气反冲力值下降. 而另一方面, 液体内部仍能保持较高温度, 使得液体内部具有较高的蒸气压. 据此, 结合式 (1) 可知, 液体内部和表面的温差增大有利于液体内部蒸汽泡的形成. 即加热速率越快, 单位时间内液滴温度越高, 液体挥发越剧烈, 从而导致液体表面和内部的温差越大, 液体内部蒸汽泡越易形成. 而液体内部蒸汽泡的形成会减小液体表面 Zn 的挥发量, 从

而使液滴表面的有效蒸气反冲力大大减小, 且液滴表面蒸气反冲力作用的时间变短, 不利于促进液体在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的铺展.

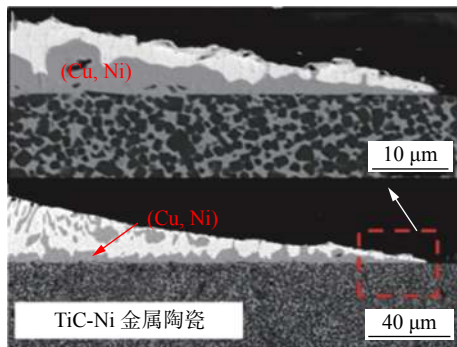
由于液体在固体母材表面的润湿与固体母材三相线附近的状态密切相关, 因此有必要结合三相线附近的界面组织研究 Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的润湿机制. 图 4 为 Ag-Cu-Zn/TiC-Ni 金属陶瓷靠近三相线处界面结构. 结果表明, 加热速率为 10 和 22.5 °C/min 时, 三相线附近界面上都生成了连续的 (Cu, Ni) 层状组织, 而正是这层 (Cu, Ni) 的形成是 Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿性改变的最终原因^[6]. 钎料和固溶体层中都只检测到了极少量的 Zn, 这主要是由于润湿过程中 Zn 在真空中的剧烈挥发. 随着加热速率提高, 三相线附近界面上的 (Cu, Ni) 生成量减少, 由连续的层状组织逐渐变为断续的块状组织; 且加热速率越快, 三相线附近界面的 (Cu, Ni) 生成量越小. 这主要是由于加热速率越快, 液体温度升高更快, Zn 挥发的速率越快, 相同加热时间下, Ag-Cu-Zn 中 Zn 的剩余含量越少; 而 Ag-Cu-Zn 中 Zn 越少, 越不利于钎料对 TiC-Ni 金属陶瓷中 Ni 的溶解^[6]. 因此, 随着加热速率的升高, Ag-Cu-Zn 与 TiC-Ni 金属陶瓷界面上生成的 (Cu, Ni) 变少, 由连续的层状分布变为断续的块状分布. 三相线附近 Ag-Cu-Zn 与 TiC-Ni 金属陶瓷界面上生成的 (Cu, Ni) 越少, 越不利于钎料润湿性的提高.

由于 Ag-Cu-Zn 中 Zn 的挥发与系统气氛密切相关, 因此有必要研究环境气氛对 Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿的影响. 图 5 为氩气环境中 Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿角和润湿基底直径随时间的变化曲线. 图 6 为氩气环境中 Ag-Cu-Zn 与 TiC-Ni 金属陶瓷三相线附近界面组织.

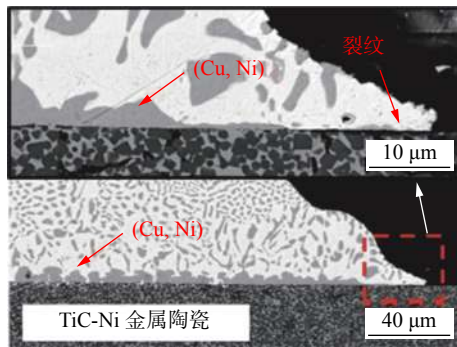
氩气环境中, 相比真空环境, Zn 挥发速率大大降低. 在此条件下, 界面处 Ni 基体虽然向钎料中大量溶解, 但是由于 Ag-Cu-Zn 中 Zn 挥发受到抑制, 不利于润湿过程中 (Cu, Ni) 的析出, 使得三相线附近界面处仅有少量 (Cu, Ni) 形成 (图 6). 此外由于 Zn 挥发受到抑制, 液体表面蒸气反冲力很小, 不足以促进钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的铺展. 因此氩气环境中, Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的铺展与真空下明显不同. 液滴基底直径先以接近线性规律由 d_0 逐渐增大至 $1.28d_0$, 而润湿角以接近



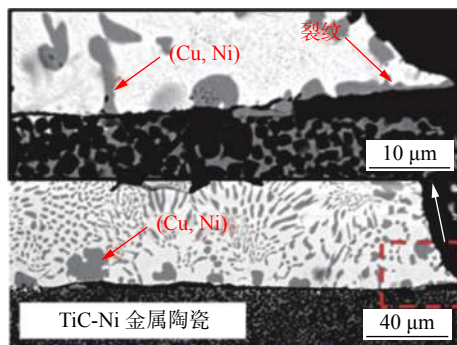
(a) 10 °C/min



(b) 22.5 °C/min



(c) 25 °C/min



(d) 30 °C/min

图 4 不同加热速率时 Ag-Cu-Zn 钎料与 TiC-Ni 金属陶瓷靠近三相线处界面结构

Fig. 4 Microstructures of the TiC-Ni cermet and Ag-Cu-Zn alloy interface with different heating rates. (a) 10 °C/min; (b) 22.5 °C/min; (c) 25 °C/min; (d) 30 °C/min

线性规律由 123° 逐渐减小至 91°。随后液滴基底直径几乎保持不变, 而润湿角缓慢升高。氩气保护环

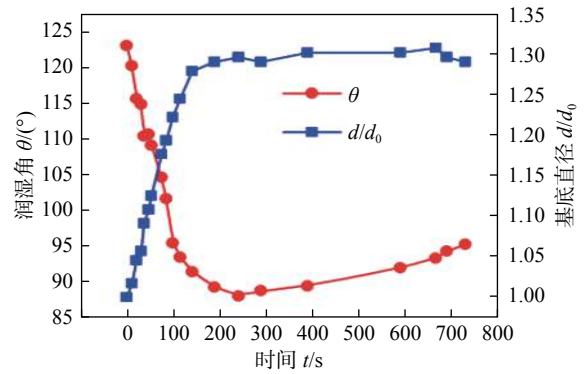


图 5 氩气环境中 Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿时间润湿角和润湿基底直径随时间的变化曲线

Fig. 5 Variations in the contact angle and base diameter with time for Ag-Cu-Zn alloy on TiC-Ni cermet in Ar

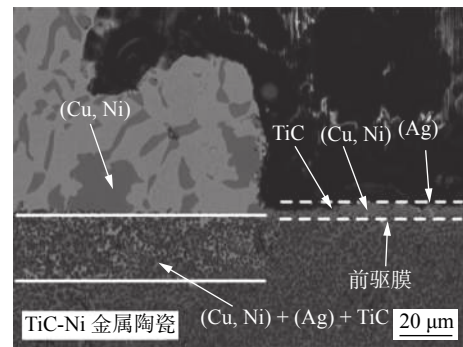


图 6 氩气环境下 Ag-Cu-Zn/TiC-Ni 金属陶瓷靠近三相线处界面结构

Fig. 6 Microstructure adjacent to the triple line at the Ag-Cu-Zn/TiC-Ni cermet interface in Ar

境下采用挥发的 Mg 液滴润湿 MgO 时也发现了这种基底直径几乎保持不变, 而润湿角缓慢升高的现象^[15]。

与真空环境明显不同的是, 氩气环境下, 在三相线外 TiC-Ni 金属陶瓷表面还形成了一层由 (Cu, Ni) 和极少量的 (Ag) 构成的前驱膜, 并且有少量 TiC 颗粒弥散分布在其中. Ahn 等人^[16]在流动 H₂ 条件下将 Zn 与 Cu 竖直接触, 发现 Zn 熔化后在 Cu 表面形成了分界明显的前驱膜. 紧邻 Zn 液体, 前驱膜的成分为纯 Zn, 而离 Zn 液体的距离不同, 其形成产物不同. 其认为此前驱膜的形成机制与 Zn 的挥发-冷凝机制有关. 因此推测氩气条件下, 在 Ag-Cu-Zn/TiC-Ni 润湿体系中, Ag-Cu-Zn 中 Zn 从液体中挥发, 并冷凝到三相线附近的 TiC-Ni 金属陶瓷表面, 形成一层吸附膜. 随后 Ag-Cu-Zn 液体钎料在此吸附膜上漫流, 同时 TiC-Ni 金属陶瓷中的 Ni 基体向前驱膜处钎料内溶解. 由于 Ag-Cu-Zn 对 Ni 基体的剧烈溶解, TiC-Ni 金属陶瓷中少量

的 TiC 颗粒漂向 Ag-Cu-Zn 钎料中. 即氩气条件下, 正是由于 Zn 的挥发-冷凝效应, 导致三相线前端形成了由大量 (Cu, Ni) 和少量 (Ag) 组成的前驱膜.

3 结论

(1) 真空中 Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 上的铺展出现孕育、铺展、钉扎、回撤和稳定 5 个阶段. 其中回撤阶段只有在较低的加热速率下才会出现.

(2) 随着加热速率的上升, Zn 的挥发明显变快, 导致铺展过程持续的时间变短. Ag-Cu-Zn 液体钎料在 TiC-Ni 金属陶瓷表面润湿性下降.

(3) 在氩气环境中, Zn 挥发速率大大降低, Ag-Cu-Zn 在 TiC-Ni 金属陶瓷表面的润湿基底直径逐渐增大, 润湿基底直径基本不变, 润湿角缓慢升高.

参考文献

- [1] Lemboub S, Boudebane S, Gotor F J, *et al.* Core-rim structure formation in TiC-Ni based cermets fabricated by a combined thermal explosion/hot-pressing process[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, 70: 84 – 92.
- [2] Fu Z Z, Kong J H, Gajjala S M, *et al.* Sintering, mechanical, and oxidation properties of TiC-Ni-Mo cermets obtained from ultra-fine TiC powders[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 751: 316 – 323.
- [3] Lei M, Li Y Y, Zhang H. Interfacial microstructure and mechanical properties of the TiC-Ni cermet/Ag-Cu-Zn/ Invar joint[J]. Vacuum, 2019(168): 108830.
- [4] Laansoo A, Kübarsepp J, Suržhenkov A, *et al.* Induction brazing of cermets to steel and eddy current testing of joint quality[J]. Welding in the World, 2020, 64: 563 – 571.
- [5] 雷敏, 张丽霞, 李宏伟, 等. 添加 Zn 对 AgCu 钎料在 TiC 金属陶瓷表面润湿性的影响 [J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 19 – 22.
Lei Min, Zhang Lixia, Li Hongwei, *et al.* Influence of Zn addition on wettability of AgCu brazing alloy on TiC cermet[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(6): 19 – 22.
- [6] Lei M, Feng J C, Tian X Y, *et al.* Reactive wetting of TiC-Ni cermet by Ag-Cu-Zn alloy during evaporation[J]. Vacuum, 2017, 138: 22 – 29.
- [7] Zaharinie T, Moshwan R, Yusof F, *et al.* Vacuum brazing of sapphire with inconel 600 using Cu/Ni porous composite interlayer for gas pressure sensor application[J]. Materials & Design, 2014, 54: 375 – 381.
- [8] Liu X, Huang X, Ma H, *et al.* Microstructure and properties of the joints of ZrO₂ ceramic/stainless steel brazed in vacuum with AgCuTi active filler metal[J]. China Welding, 2018, 27(2): 52 – 56.
- [9] Xue P, Zou Y, He P, *et al.* Development of low silver AgCuZnSn filler metal for Cu/steel dissimilar metal joining[J]. Metals, 2019, 9(2): 198.
- [10] Beura V K, Xavier V, Venkateswaran T, *et al.* Interdiffusion and microstructure evolution during brazing of austenitic martensitic stainless steel and aluminum-bronze with Ag-Cu-Zn based brazing filler material[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 852 – 862.
- [11] Xue S, Qian Y, Hu X, *et al.* Behavior and influence of Pb and Bi in Ag-Cu-Zn brazing alloy[J]. China Welding, 2000, 9(1): 44 – 49.
- [12] 雷敏, 张丽霞, 李宏伟, 等. Zn 元素含量对 AgCuZn 钎料在 TiC 金属陶瓷表面润湿性的影响 [J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 41 – 44.
Lei Min, Zhang Lixia, Li Hongwei, *et al.* Influence of Zn content on wettability of TiC cermet by AgCuZn alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 41 – 44.
- [13] Lei M, Li Y L, Zhang H, *et al.* Microstructure evolution and wettability of AgCuZn alloy on TiC-Ni cermet[J]. Vacuum, 2019, 159: 500 – 506.
- [14] 张华伟, 李言祥. 金属熔体中气泡形核的理论分析 [J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4864 – 4871.
Zhang Huawei, Li Yanxiang. Study on bubble nucleation in liquid metal[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4864 – 4871.
- [15] Shen P, Zhang D, Lin Q L, *et al.* Wetting of polycrystalline MgO by molten Mg under evaporation[J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 122(1): 290 – 294.
- [16] Ahn J H, Terao N, Berghezan A. Experimental observations on wetting and infiltration fronts in metals[J]. Scripta Metallurgica, 1988, 22(6): 793 – 796.

第一作者: 李玉龙, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要从事钎焊、特种焊接及光纤传感等方向的研究; Email: liyulong@ncu.edu.cn.

通信作者: 雷敏, 博士, 讲师; Email: leimin@ncu.edu.cn.

(编辑: 杨婉春)