

Fe 元素对 Cu/W 间润湿行为和界面特性的影响

杨晓红, 范志康, 梁淑华, 肖 鹏

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048)

摘要: 采用座滴法研究在真空和 Ar 气气氛下, Cu-Fe 合金在 W 基板上的润湿行为和 Fe 元素对 Cu/W 界面结合状态的影响。借助 SEM、EMPA 和 XRD 分析添加 Fe 元素对 Cu/W 界面微观结构和界面结合机制的影响。结果表明: 添加 Fe 有利于降低 Cu/W 间的接触角; 且其润湿角随温度升高而降低。与在真空条件下相比, 在 Ar 气气氛中, 添加 Fe 能较大幅度地减小 Cu/W 间的接触角, 当 Fe 的添加量为 1.2%(质量分数)时, 在 1 300 °C 接触角由 107.5° 下降到 47.5°; Cu/W 界面形成 1~2 μm 的合金过渡层, 平直的 Cu/W 界面变成锯齿状, 且随着升高温度, 界面处 Cu、Fe 和 W 元素间的扩散与溶解程度加强, Fe 原子充分地扩散到界面两侧的 Cu 和 W 中, 界面附近没有新相生成; Cu/W 界面结合机制由最初的机械结合转变为扩散与溶解型的冶金结合。

关键词: 座滴法; 润湿性; 接触角; Fe; Cu/W 界面

中图分类号: TG 113.26; TG 139.8 文献标识码: A

Effects of Fe on wetting behaviors and interfacial characteristics between copper alloy and W substrate

YANG Xiao-hong, FAN Zhi-kang, LIANG Shu-hua, XIAO Peng

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: By the sessile drop technique, the wetting behaviors of Cu-Fe alloys on W matrixes in the vacuum and Ar atmosphere, and the effect of Fe addition on the bonding conditions of Cu/W interface were studied respectively. SEM, EPMA and X-ray diffraction were used to analyze the microstructure and bonding mechanism of the Cu/W interface with the addition of Fe element. The results show that the wetting angle of Cu on W substrates decreases with increasing content of Fe in liquid Cu, and the wetting angle also decreases with increasing wetting temperature. Compared with the experimental results in the vacuum, the wetting angle decreases dramatically with increasing content of Fe in Ar atmosphere, and the contact angle between molten Cu and W substrate decreases from 107.5° to 47.5° while the content of Fe is up to 1.2% (mass fraction) at 1 300 °C. There is an alloying transition layer with a thickness 1~2 μm at the Cu/W interface, and the straight interface of Cu/W system is turned into serrate interface. With increasing wetting temperature, the mutual diffusion and dissolution of Cu, Fe, and W atoms are much more intense, the Fe atoms are diffused and dissolved into the W and Cu matrixes, and there is no new reactive phase on the CuFe/W interface. The bonding mechanism of Cu/W interface is transformed from the initial mechanical bond into the metallurgical bond by means of mutual diffusion and dissolution.

Key words: sessile drop technique; wettability; contact angles; Fe; Cu/W interface

金属熔体与固相间的润湿行为及其界面上所发生
的相互作用是材料制备和加工过程中一种常见的物理

化学现象。研究液/固界面间的润湿性对焊接、治
炼、铸造、粉末冶金等过程的深入研究都具有重要意

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50834003); 教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-05-0873)

收稿日期: 2008-01-16; 修订日期: 2008-11-20

通讯作者: 杨晓红, 博士研究生; 电话: 029-82312185; E-mail: yangxh2000@126.com

义^[1-4]。研究金属基复合材料的界面性质可以为有效地控制和改善其界面结合状态提供理论依据,可以使材料的性能从根本上得到提高。同时,不同相界面间的润湿性和相界面结合特性是制备高性能金属基复合材料过程中所必须首先考虑的问题^[5-6]。

铜钨合金综合了Cu与W的优点,具有良好的抗腐蚀性能、耐电弧烧损性能、抗熔焊性,以及优良的导电性、高的导热性、较小的热膨胀性等性能,因而被广泛地应用于各类高压开关电器中的电触头材料,大功率集成电路中的散热元件,以及火箭、导弹等飞行器上的耐高温部件^[7-10]。铜钨合金中的Cu和W互不相溶,不形成金属间化合物,也不能直接形成冶金结合^[11-13],而且Cu与W两相之间的线膨胀系数和弹性模量有较大差别^[14-15],铜钨合金在服役过程中易产生热应力和残余应力。若Cu与W两相间仅以机械结合为主,相间结合强度不足,则会产生裂纹和W颗粒剥落等现象,从而导致材料失效。因此,改善Cu/W间的润湿性和相界面结合强度对提高CuW复合材料的性能,以及对W与Cu合金的焊接性能都具有重要的现实意义^[13]。

在液态金属中添加合金元素是改善金属基复合材料固/液两相间润湿性和界面结合强度的一种有效方法^[16-17]。如在Cu与W两相界面添加少量既与Cu又与W相溶的一种界面活性元素,在Cu与W两相界面产生微合金化,一方面可以提高相界面的结合强度,另一方面也可以缓解由于两相各物性参数差异所引起的界面应力集中现象。但目前国内外关于Cu/W两相界面方面的研究很少见报道。由于CuW材料的制备及W与Cu合金的连接大多在真空或气氛保护的条件下进行,为此,本文作者将通过添加合金元素Fe来改善Cu/W间的润湿性和相界面结合特性,采用高温座滴法,研究在不同温度和气氛条件下,Fe含量对Cu/W间润湿性的影响。利用接触角分析仪测定不同成分的Cu-Fe合金与W板间的接触角,借助SEM、EMPA和XRD对润湿界面的微观结构进行观察与分析,探讨Fe元素对Cu和W两相间润湿性和界面结合方式的影响机理。

1 实验

按所需质量将一定量的Cu粉(纯度大于99.8%)和Fe粉(纯度大于98.7%)均匀混合,在通用液压机上模压成型,然后在真空气氛下熔炼不同成分的Cu-Fe合

金,Fe的含量分别为0、0.4%、0.8%、1.2%和1.6%(质量分数)。为了保证熔炼合金成分的均匀性,对合金锭进行二次熔炼。从熔炼好的合金锭上切取约0.5 g的合金作为座滴试样,先用砂纸将座滴合金打磨成规则的形状,然后在10%的盐酸溶液中清洗10 min以除去表面氧化膜,再将座滴合金试样放入丙酮中经超声波清洗,烘干后备用。

座滴实验所用的基板为西北有色金属研究院提供的纯W板(厚度为0.5 mm),W板的致密度大于97%。先用线切割将W板加工成15 mm×15 mm的规则形状,W板表面经机械抛光制成镜面,经酸洗以除去其表面的氧化层,然后,将基板放入丙酮中经超声波清洗,烘干后备用。

高温座滴法是研究润湿性的主要手段之一,其原理是根据Young-Dupre方程,通过摄取液滴侧面轮廓图来测量润湿角,表征润湿性。真空下座滴实验在ZRS-18Q真空高温烧结炉中进行,当真空间度达到 5×10^{-3} Pa后,以15 °C/min的加热速度加热至设定温度,保温60 min后随炉冷却至室温。Ar气保护条件下的润湿实验在管式炉内进行,从座滴合金融化到保温结束,用SONY717数码相机拍摄座滴在W基板上铺展的实时照片。采用法国GBX公司生产的接触角分析仪(Digidrop DGD-DS)测量不同成分的座滴合金试样在基板上的接触角。由于该装置采用CCD结合显微影像技术替代直接量角装置,可使测量精度大幅度提高,精度为±0.5°。对每个座滴试样,选取其不同侧面所成的影像进行多次测量,取其算术平均值作为该座滴试样的最终接触角。将制备的冷凝座滴润湿试样用电火花线切割机沿着试样中心垂直于界面切开,并将其剖面制成金相试样。利用扫描电镜(JSM-6700F)对其界面进行微观结构分析,同时配合电子探针显微分析(EPMA)对界面进行线扫描,观察界面处各元素的分布情况,并利用X射线衍射仪(XRD)对界面区域进行物相分析。

2 结果与分析

2.1 Fe含量对真空不同温度条件下Cu/W间润湿性的影响

图1所示为不同温度的真空条件下,Cu-Fe座滴合金在W板上的平衡接触角随Fe含量的变化曲线。从图1可以看出,当润湿温度在1150~1300 °C范围内时,随着Cu-Fe合金中Fe含量的升高,座滴合金与

W板间的接触角不断下降。对于相同成分的座滴合金, 座滴合金与W板间的润湿角随着温度升高而减小。而且在此温度范围内, 当Fe的添加量小于1.2%时, 润湿角减小程度较大; 而当Fe的含量大于1.2%时, 润湿角减小程度很小。当润湿温度升高到1300℃, Fe的添加量为1.2%时, 接触角减小到约0.7°。实验结果表明, 添加少量Fe元素可以改善Cu与W间的润湿性; 同时, 升高润湿温度也可以在添加少量的Fe元素的情况下使Cu/W间的润湿角有较大程度的降低。

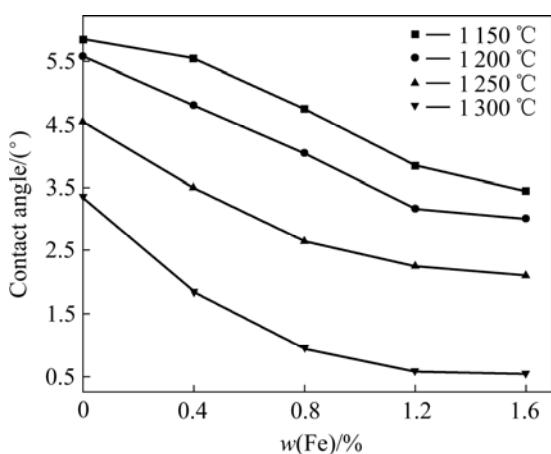


图1 真空不同温度条件下CuFe/W间润湿角变化

Fig.1 Wetting results of Cu-Fe alloys on W substrate at different temperatures in vacuum atmosphere

2.2 Fe含量对Ar气氛下Cu/W间润湿行为的影响

为了满足不同生产环境的需要, 研究在Ar气保护环境下纯铜和不同Fe含量的Cu-Fe合金在W板上润湿情况。图2所示为Ar气中润湿温度为1200℃, 保温10 min后, 纯铜和不同Fe含量的Cu-Fe合金在W板上铺展的宏观照片。通过对图2中各分图的比较可以明显地看出, 纯铜与W板间的接触角 $\theta>90^\circ$, Cu/W间几乎不发生润湿, 但当在Cu中添加少量的Fe元素后, Cu/W间润湿性有了较大程度地改善, 而且随着Fe含量的增加润湿角逐渐减小。图3所示为不同温度下纯铜和Cu-Fe合金在W板上的接触角随Fe含量的变化曲线。可以看出, 在Ar气中, 纯铜与钨板间不润湿, 在温度为1300℃时二者间的润湿角为107.5°。但是, 当向Cu中添加0.4%~1.6%的Fe元素后, Cu/W间的润湿角有较大幅度地减小, 且Fe添加量在0.4%~1.2%范围内时, 随着Fe含量的增加, 润湿角逐渐减小; 当Fe含量在1.2%~1.6%范围内时, 润湿角几乎不再发生变化。同时从图3中还可以看出, 升高润湿温度有利于减小不同座滴合金与W板间的润

湿角, 特别是对于含Fe1.2%的Cu-Fe座滴合金, 在1300℃时其与W板间的润湿角可以降低到47.5°。可见, 升高润湿温度使Fe元素对Cu/W间润湿性的改善作用得到了更大的发挥。与真空条件下不同座滴Cu合金与W间的润湿性相比, 在Ar气保护下, 添加少量的Fe可以较大幅度地改善Cu/W间的润湿性, 使Cu/W间由不润湿转化为润湿。从图3与图1的对比中可以看出, Ar气气氛下Cu/W间的润湿性明显不如真空环境下的润湿性好, 主要原因是在保护气氛中不可避免地残存一部分氧, 而W板在高温下极易氧化, 氧化物的存在使W基板表面形成微观突起, 增加了铺展过程的摩擦阻力, 同时由于氧化物的存在, 阻隔了Cu-Fe合金与W板间的结合, 从而影响熔体对W板的润湿效果。

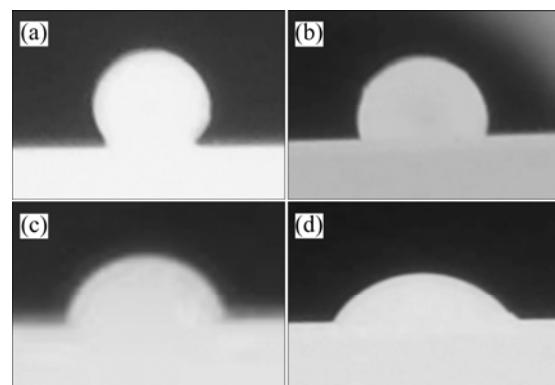


图2 1200℃时Ar气中座滴合金在W板上的润湿照片

Fig.2 Wetting macrographs of different sessile droplets on W substrate after wetting at 1200 °C in Ar atmosphere: (a) Cu; (b) Cu0.4%Fe; (c) Cu0.8%Fe; (d) Cu1.2%Fe

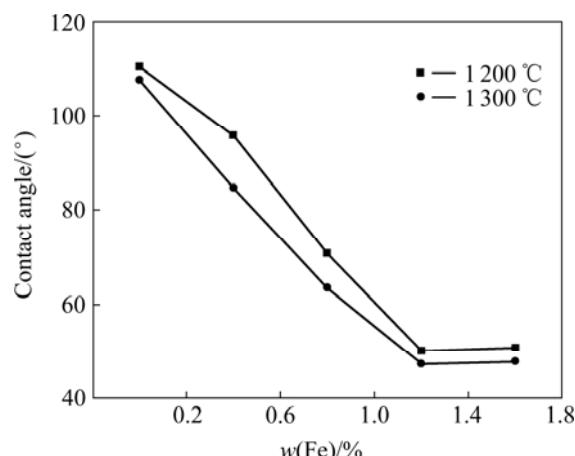


图3 在Ar气保护下不同温度时Cu/W间润湿角随Fe含量的变化

Fig.3 Variation of wetting angles of Cu alloys on W substrate with different Fe contents at different temperatures in Ar atmosphere

2.3 Fe元素对Cu/W界面结合机制的影响

为了进一步研究添加Fe元素对Cu/W界面润湿性和界面结合状态的影响机理,利用SEM和EPMA对几种典型冷凝座滴润湿试样的界面区域进行线扫描分析。图4所示为在1150℃时真空条件下,纯Cu与W板润湿试样的界面形貌和各元素在界面附近的分布情况。其中界面左侧是Cu,右侧是W,横线为线扫描路径,能量曲线的峰值高低反映各元素分布的相对多少。可以看出,Cu/W界面比较平直,在界面处Cu与W元素的浓度分布产生陡直的突变。图5所示为相同温度条件下,Cu1.2%Fe合金与W板润湿试样的界面形貌和各元素在界面附近的分布情况。可以看出,界面呈凹凸不平的锯齿状,且Fe元素在界面处产生富集现象,在结合面处形成一层薄的合金过渡层。图6所示是温度在1300℃时,含0.4%Fe的Cu-Fe合金与W板润湿界面的线扫描图谱和各元素的浓度分布情况。可以看出,随着温度的升高,仅由添加0.4%Fe所引起的Cu/W界面间凹凸不平程度加强;界

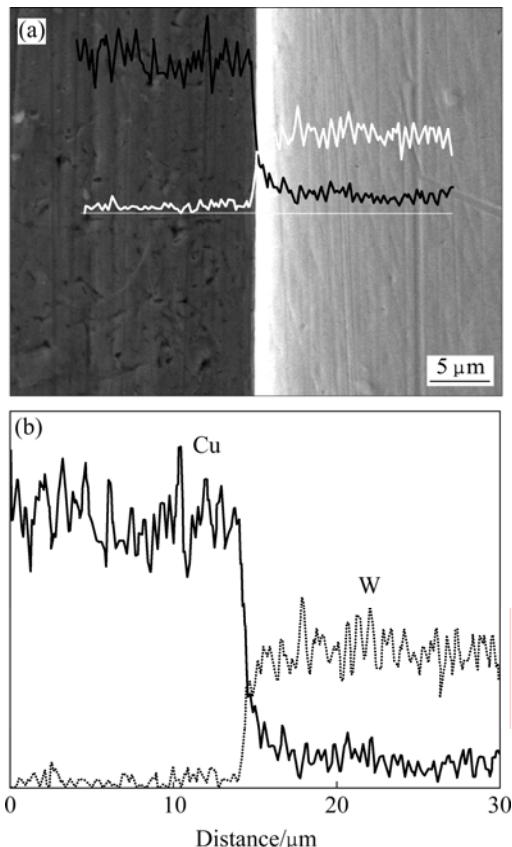


图4 在1150℃时纯Cu与W基板润湿界面区域线扫描图谱

Fig.4 EPMA line scanning analysis of Cu/W interface after wetting at 1150 °C: (a) Secondary electrode image of interface; (b) Elements distribution of W and Cu

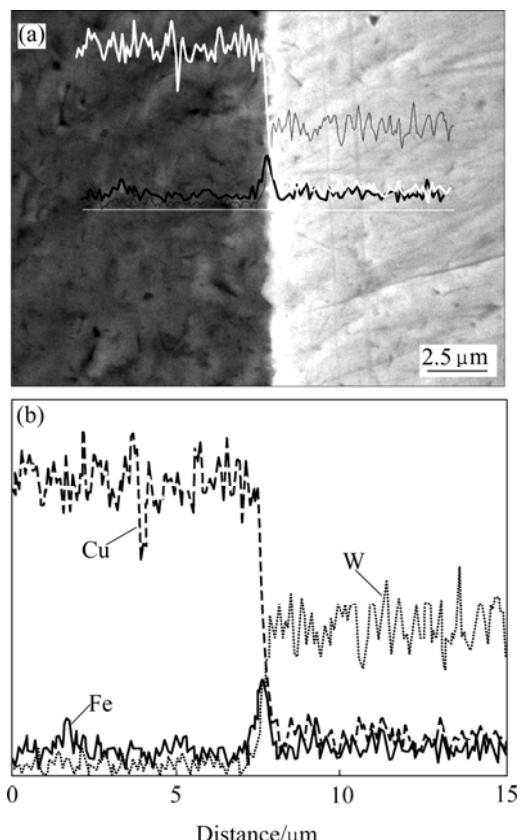


图5 在1150℃时Cu1.2%Fe/W润湿界面区域的线扫描分析

Fig.5 EPMA line scanning analysis of Cu1.2% Fe /W interface after wetting at 1150 °C: (a) Secondary electrode image of interface; (b) Elements distribution of W, Cu and Fe

面处没有出现Fe元素的富集,Fe元素充分地扩散到界面两侧,界面处Cu与W元素的浓度梯度已明显趋于平缓。以上实验结果表明,Cu与W互不相溶,在润湿过程中固液界面能较高,所以,润湿性和界面结合状态较差。在Cu中溶入Fe后,由于液相中Fe元素与W有较强的亲和力^[18],Fe在固液界面两侧浓度不同而产生化学势。在此驱动力下Fe元素按Gibbs公式被W板表面所吸附^[19],Fe在Cu/W界面的富集及其对W所起到的活化作用,为界面两侧各元素间的相互扩散提供高扩散通道。升高温度更有利这种扩散-溶解-扩散过程在界面区域的进行。于是,在Cu/W界面区域形成1~2μm的合金过渡层,Cu/W界面间实现冶金结合。当界面形成合金过渡层后,界面处的能量发生变化,此时,可将Young-Dupre方程改写为^[20~21]:

$$\cos \alpha = \cos \alpha_0 - \Delta \sigma_f / \sigma_{LV} - \Delta G_f / \sigma_{LV} \quad (1)$$

式中 α 为形成合金过渡层后的润湿角; α_0 为无界面

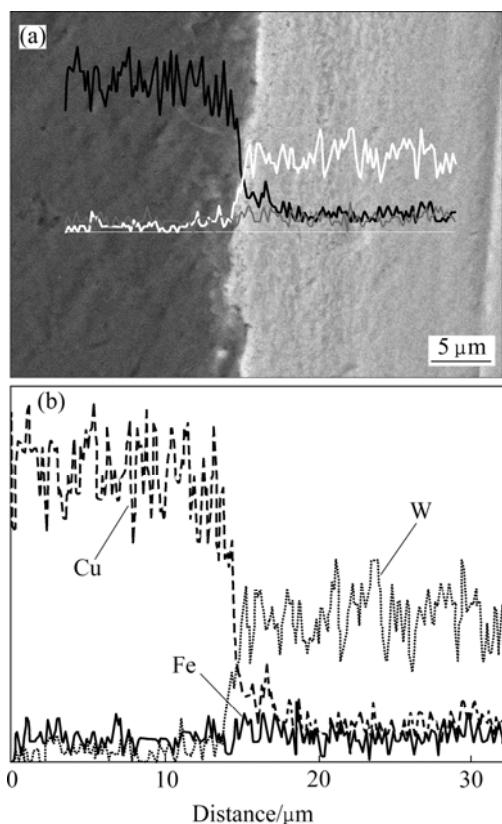


图6 在1300 °C时Cu0.4%Fe/W润湿界面区域的线扫描分析

Fig.6 EPMA line scanning analysis of Cu0.4%Fe/W interface after wetting at 1300 °C: (a) Secondary electrode image of interface; (b) Elements distribution of W, Cu and Fe

合金层的润湿角; $\Delta\sigma_r$ 是新的界面结构的形成所导致的界面能变化,即固/液单层界面变为双层界面时界面张力的变化; ΔG_r 是界面发生溶解与扩散及合金化所引起 Gibbs 自由能的变化。在润湿过程中, Cu-Fe 合金熔体与形成的合金过渡层间界面能小于单层的 Cu/W 间的界面能,即 $\Delta\sigma_r < 0$ 。同时,在 Cu 中添加 Fe 后,在界面处发生的 Cu(Fe)与 W 间的扩散与固溶均为吸热过程会消耗掉一部分固-液界面能,所以, $\Delta G_r < 0$ 。从式(1)所反映的两部分界面能的降低可以看出,活性元素 Fe 在 Cu/W 界面的存在,通过改善界面微观结构,从热力学层次上减小了 Cu/W 间的界面能,从而可以使液态 Cu 更好地与 W 板结合。另一方面,由于合金元素在界面的吸附和富集会降低座滴合金的表面张力^[19, 22],根据 Young-Dupre 方程中固-液-气三相接触点的平衡润湿角关系:

$$\cos\alpha = \frac{\sigma_{SV} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LV}} \quad (2)$$

可以看出,添加 Fe 元素所引起 σ_{LV} 与 σ_{SL} 的减小将有利于改善 Cu/W 间的润湿性。

为了进一步探讨合金元素 Fe 对 Cu/W 界面微观结合状态的影响机制,对不同座滴合金与 W 板所形成的界面区域进行 XRD 分析,结果如图 7 和图 8 所示。可以看出,添加 1.2% 的 Fe 元素后,界面处只有 Cu, W 两相存在,Cu/W 界面没有新相生成。对比图 7 和图 8 可以发现,在图 8 中 W 和 Cu 的衍射峰均有降低,衍射峰略有宽化。这是由于 Cu 与 Fe, W 与 Fe 之间有一定的溶解度^[18], Cu-Fe 合金座滴在 W 板上铺展的过程中,Fe 元素在 Cu/W 界面两侧的浓度不同,在这种化学势的驱动下 Fe 与 W 原子间发生扩散和溶解,使得一部分 Fe 原子溶入 W 晶格内,另一部分 Fe 原子

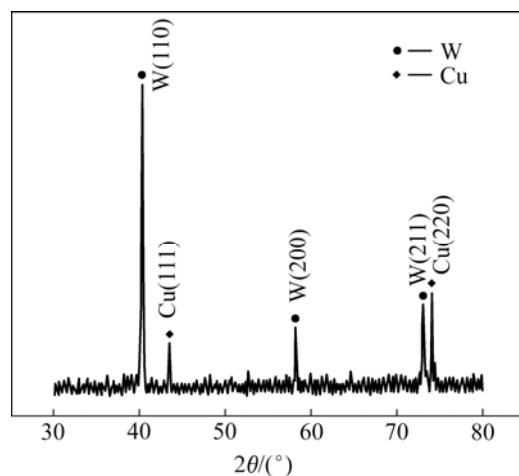


图7 在1200 °C时Cu/W界面的XRD谱

Fig.7 XRD pattern of interface between Cu and W substrate at 1200 °C

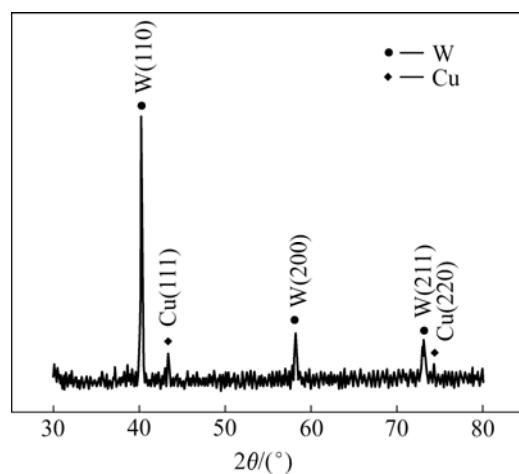


图8 在1200 °C时Cu1.2%Fe/W界面的XRD谱

Fig.8 XRD pattern of interface between Cu1.2%Fe alloy and W substrate at 1200 °C

溶入 Cu 晶格内。由于 Fe 原子的半径为 0.126 nm, 小于 W 原子的半径(0.137 nm), 同时也略小于 Cu 原子的半径(0.128 nm), 所以, Fe 原子的溶入将会引起 W 与 Cu 的晶格收缩, 最后在界面处分别形成 FeW 和 CuFe 置换固溶体。这一点可根据 XRD 测试的界面处 W 和 Cu 两相各个晶面间距数据, 计算出不同晶面的晶格常数的变化得到证实, 界面处 W 与 Cu 不同晶面的点阵常数均有减小。以上实验结果表明, 在本实验的添加范围内, 添加合金元素 Fe, 在 Cu/W 界面的合金过渡层中 Cu、Fe 和 W 均以固溶体的方式存在, Fe 与 W 不形成任何形式的金属间化合物, 所以避免 Cu/W 界面因生成脆性的金属间化合物而带来的不利影响, 从而有利于提高 Cu 与 W 两相间的结合强度。

3 结论

1) 在真空不同温度条件下, 向 Cu 中添加 Fe 可以降低 Cu 液与 W 板间的润湿角; 升高温度也可以降低 Cu-Fe 合金与 W 板间的润湿角; 特别是在 1 300 °C 时, 当 Fe 含量为 1.2% 时, 接触角较快地减小到约 0.7°, 而后继续增加 Fe 含量, 润湿角减小甚微。

2) 在 Ar 气气氛下, Cu/W 间的润湿性明显不如真空环境下的润湿性好。但 Fe 元素对 Cu/W 间的润湿性的改善作用更为显著, 在 1 300 °C 添加 1.2%Fe 元素, 可以使 Cu/W 间的接触角由 107.5° 减小到 47.5°。在熔化温度附近, Cu1.2%Fe 合金在 W 板上具有较小的接触角和较快的铺展速率。

3) 添加元素 Fe 促进了 Cu/W 界面附近各元素间的相互扩散, 在 CuFe/W 的界面形成合金扩散层。合金扩散层的存在降低了固-液界面能, 从而改善了 Cu/W 界面润湿性, 使 Cu/W 界面由原来的机械结合变为由 Fe 元素的扩散和溶解所引起的冶金结合, 有利于提高 Cu/W 界面间的结合强度。

REFERENCES

- [1] 原日彬, 吴殿军, 王伟民, 王 震. 金属液/固相润湿性研究进展[J]. 中国铸造装备与技术, 1999(4): 11-14.
YUAN Ri-bin, WU Dian-jun, WANG Wei-min, WANG Zhen. Progress in research of wetting between liquid & solid phase of metal[J]. China Foundry Machinery & Technology, 1999(4): 11-14.
- [2] 徐前刚, 张海峰, 胡壮麒. Fe78B13Si9 熔体与铁的润湿行为[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(10): 1660-1664.
XU Qian-gang, ZHANG Hai-feng, HU Zhuang-qi. Wetting behavior of Fe78B13Si9 melt on iron[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(10): 1660-1664.
- [3] 马广才, 李 文, 李 宏, 张海峰, 胡壮麒. In-Sn 合金熔体在非晶和晶态 Cu₄₆Zr₄₅A₁₇Gd₂ 合金上的润湿性及界面特性[J]. 中国有色金属学报, 2006, 42(2): 201-204.
MA Guang-cai, LI Wen, LI Hong, ZHANG Hai-feng, HU Zhuang-qi. Wetting behavior and interfacial characteristics of In-Sn alloy on amorphous and crystalline Cu₄₆Zr₄₅A₁₇Gd₂ substrates[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(2): 201-204.
- [4] 崔大田, 王志法, 莫文剑, 姜国圣. AuAgSi 系钎料合金与 Ni 的润湿性[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(1): 36-40.
CUI Da-tian, WANG Zhi-fa, MO Wen-jian, JIANG Guo-sheng. Wettability of Au-Ag-Si brazing filler metal series with Ni[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(1): 36-40.
- [5] MORTENSEN A. Interfacial phenomena in the solidification processing of metal matrix composites[J]. Mater Sci Eng A, 1991, 135: 1-11.
- [6] 梅 志, 顾明元, 吴人洁. 金属基复合材料界面表征及其进展[J]. 材料科学与工程, 1996, 14(3): 1-5.
MEI Zhi, GU Ming-yuan, WU Ren-jie. Characterization of metal matrix composite interface and its advances[J]. Materials Science and Engineering, 1996, 14(3): 1-5.
- [7] KIM Y D, OH N L, OH S T, MOON I H. Thermal conductivity of W-Cu composites at various temperatures[J]. Materials Letters, 2001, 51: 420-424.
- [8] LI L, WONG Y S, FUH J Y H, LU L. Effect of TiC in copper-tungsten electrodes on EDM performance[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1/3): 563-567.
- [9] 陈 伟, 邝用庚, 周武平. 中国高温用钨铜复合材料的研究现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(1): 11-14.
CHEN Wei, KUANG Yong-geng, ZHOU Wu-ping. Current research status of W-Cu composites for high temperature in China[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(1): 11-14.
- [10] da ALVES F C, da PEREIRA A G S, GOMES U U. The influence of the dispersion technique on the characteristics of the W-Cu powders and on the sintering behavior[J]. Powder Technology, 2003, 134(1/2): 123-132.
- [11] KIM D G, OH S T, JEON H, LEE C H, KIMA Y D. Hydrogen-reduction behavior and microstructural characteristics of WO₃-CuO powder mixtures with various milling time[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 354(1/2): 239-242.
- [12] DORÉ F, MARTIN C L, ALLIBERT C H. Apparent viscosity of W-Cu powder compacts during sintering[J]. Mater Sci Eng A, 2004, 383(2): 390-398.
- [13] GAUTHIER V, ROBAUT F, UPADHYAYA A, ALLIBERT C H.

- [14] MEROLA M, AKIBA M, BARABASH V, MAZUL I. Overview on fabrication and joining of plasma facing and high heatflux materials for ITER[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 307/311(2): 1524–1532.
- [15] CHAPA J, REIMANIS I. Modeling of thermal stresses in a graded Cu/W joint[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 303(2/3): 131–136.
- [16] LI Qing-kui, GUAN Shao-kang, ZHONG Hui, LI Jian, ZHONG Hai-yun. A binder phase of TiO based cermets[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(4): 396–399.
- [17] NAKASHIMA K, MATSUMOTO H, MORI K. Effect of additional elements Ni and Cr on wetting characteristics of liquid Cu on zirconia ceramics[J]. Acta Mater, 2000, 48: 4677–4681.
- [18] NAGENDER N S V, SRIRAMAMURTHY A M, RAMA R P, AWARTZENDMDER L J. Phase diagrams of binary iron alloys[C]//OKAMTO H. ASM International, 1993: 131–137, 444–453.
- [19] 盛尊友, 杨晓红, 肖鹏, 梁淑华, 范志康. Cu-Mn合金熔体在金属W板上的润湿性[J]. 粉末冶金技术, 2007, 25(6): 403–411.
- [20] 陈康华, 包崇玺, 刘红卫. 金属/陶瓷润湿性[J]. 材料科学与工程, 1997, 15(3): 7–11.
- [21] CHEN Kang-hua, BAO Chong-xi, LIU Hong-wei. The wettability of metal-ceramic[J]. Materials Science and Engineering, 1997, 15(3): 7–11.
- [22] KALOGEROPOULOU S, BAUD L, EUSTATHOPOULOS N. Relationship between wettability and reactivity in Fe/SiC system[J]. Acta Metall Mater, 1995, 43(3): 907–912.
- [23] YOON S W, CHOI W K, LEE H M. Calculation of surface tension and wetting properties of Sn-based solder alloys[J]. Scripta Materialia, 1999, 40(3): 297–302.

(编辑 杨华)