

Zn 中间层下铜 / 铝双金属 固 - 液复合工艺研究

马涛¹, 王力¹, 张强², 刘政楠², 张达³

(1. 国能中卫热电有限公司, 宁夏中卫 755099;

2. 哈尔滨汽轮机厂有限责任公司, 哈尔滨 150090;

3. 佳木斯大学 材料科学与工程学院, 黑龙江佳木斯 154000)

摘要: 采用固-液复合法制备铜/铝复合材料, 预先在铜基体表面进行镀锌预处理, 利用自主设计浇注系统使得铝液与铜基体产生充分的强化换热作用。利用SEM、XRD和EDS检测分析了铜/铝扩散层成分与组织变化规律, 用万能力学试验机测量其结合强度, 用显微硬度分析扩散层的硬度分布。试验表明: 浇注温度680 °C时, Zn中间层30 s扩散层的硬度梯度逐渐下降, 随着Zn中间层厚度增加, 结合强度逐渐上升, 扩散层区孔洞呈减少趋势。铜基体表面镀锌处理可有效改善铝液在铜基体表面的润湿性, 促进铜原子在铝液中的扩散作用, 扩散层由Cu-Al金属间化合物组成。

关键词: 铜/铝复合; 强化换热; 镀锌; 扩散层

作者简介:

马涛(1977-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电厂热能与动力。

E-mail: 12070975@ceic.com

通信作者:

张达, 男, 硕士, 讲师。E-mail: 1790323529@qq.com

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)12-1573-08

基金项目:

黑龙江省省属高等学校基本科研业务费项目(2022-KYYWF-0584)。

收稿日期:

2025-07-24 收到初稿,

2025-08-24 收到修订稿。

铜是稀缺资源, 价格逐年递增, 我国每年都会进口大量铜材。随着现代工业对铜的需求量逐渐增大, 铜的产量却有限。相比于铜, 铝是优质的金属材料, 具有质量轻、生产成本低、且储量丰富等优势。一方面为了节约成本、寻求更好的材料代替, 摆脱我国高性能铜金属严重依赖进口的现象, 另一方面随着科学技术的进步和工业生产的快速发展, 单一材料很难满足现代工业生产对于材料综合性能的要求。铜/铝复合材料能综合各基体金属的优异性能, 弥补单一金属的不足, 兼具铜的导电性、导热性及铝的质轻、散热性和经济等特点。广泛应用于电力、热传输、汽车等领域, 研究表明, 铜/铝复合材料可以分别减轻40%和30%的质量和成本^[1]。受到国内外研究人员的广泛关注。

根据待复合铜、铝金属的状态, 可将铜/铝双金属复合材料制备工艺主要分为固-固复合、液-液复合、固-液复合工艺。固-固复合主要工艺包括: 轧制、焊接、挤压等, 固-固复合工艺虽生产效率高, 易生产大规模横截面尺寸复合材料, 但对设备要求较高, 难以制备结构复杂的异形件, 且固-固复合后的铜/铝双金属复合材料界面结合强度通常较低, 扩散层存在较大的加工硬化作用, 往往需要进行热处理退火, 这也是限制其生产效率的主要瓶颈。液-液复合法是将两种液态金属按一定顺序注射到模具模腔中, 通过调节液态金属的温度、两种液态金属的喷射间隔等条件, 实现液态两种金属之间的冶金连接。复合浇注工艺的关键是掌握好两种液态金属的浇注温度, 选择恰当的间隔时间, 两种金属浇注间隔时间如控制不好将出现金属互相混杂或复合不良现象, 工艺过程相对复杂且难以控制, 在实际应用上也有其局限性^[2-3]。

固-液复合铸造技术制备双金属复合材料成本廉价、操作简单, 能够结合两种金属的优点提高复合材料的性能, 在制备铜/铝复合材料领域发展潜力巨大。许多学者对铜/铝固-液复合过程的机理和界面控制进行了广泛的研究。Chang等利用Fluent软件建立了Cu/Al复合板的固-液复合模型, 研究了固-液复合方法, 结果表明, 当Cu带材未预热、进料速度为1 m/min、浇注温度为993 K时, 冶金结合效果较好; 此外, 制

备的Cu/Al复合板界面厚度约为0.3 μm ，仅生成一种具有四方相结构的金属间化合物CuAl^[4]。Li H等采用固-液复合铸造（SLCC）技术制备了铜/铝基层状复合材料^[5]。结果表明：采用SLCC技术在700 $^{\circ}\text{C}$ 的氩气气氛下对Cu-Al复合材料进行了充分烧结，Cu-Al界面键合均匀，具有明确的过渡和间扩散区域。Gre β T等研究复合铸造技术，用于生产由铜和铝组成的旋转对称双层棒材，冶金结合半成品的界面由四种金属间化合物和一个异常的Al共晶区Al₂Cu（ θ -AlCu）、Al固溶体（ α -Al）和其他金属间化合物沉淀物组成^[6]。ZHANG Jian等研究了Ni层对Mo/Cu^[7]、SS/Ti^[8]和Mg/Al^[9]组织和性能的影响，结果表明：Ni层有助于改善不同双金属的力学性能。

研究表明，铜/铝复合材料界面演化规律及控制界面反应程度是形成良好扩散层的关键^[10-13]。然而，铜/铝固-液复合过程中的主要难点包括：①铜、铝两种材料均易氧化，且形成的氧化膜难以去除；②界面

易形成硬脆的金属间化合物，危害铜/铝双金属复合材料的性能。针对铜、铝原子的扩散活化、溶解、反应和金属间化合物形成的研究较少，缺乏系统和科学的认识，需要进一步的探索和研究。因此，本研究自主设计一种新型的固-液复合装置，保证双金属较强扩散状态，通过选择合适的浇注温度，同时加入了Zn中间层，研究在不同厚度Zn中间层下，对铜/铝复合材料的扩散层演化进行了观察，对铜、铝原子相互扩散生成化合物进行分析，并对复合材料的力学性能及热导率进行评价。

1 试验材料与方法

基体材料为T2紫铜，尺寸为100 mm \times 150 mm \times 8 mm，具有良好的耐腐蚀能力和可加工能力，导电性和导热性也非常优越，并且其本身的杂质含量较少，表1为T2紫铜化学成分；浇注金属为纯铝，其化学成分见表2。

表1 基体T2紫铜化学成分
Tab. 1 Chemical composition of T2 copper

	Cu	Bi	Sb	As	Fe	Pb	$w_B / \%$
	≥ 99.95	≤ 0.001	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.005	≤ 0.005	

表2 纯铝化学成分
Tab. 2 Chemical composition of pure aluminum

	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	V	Fe	Al	$w_B / \%$
	≤ 0.25	≤ 0.05	≤ 0.03	≤ 0.05	≤ 0.03	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.4	余量	

图1将铝液经过装置冲击浇注到铜基体表面，在高温的作用下，使得铝液与铜基体发生冶金反应。在铜/铝固-液复合过程中，浇注系统将产生压力冲头并且蓄一定量铝液使得液流保持一定速率和冲击力，同时可保证液流更加平稳的经过处理的槽出口形成一定宽度

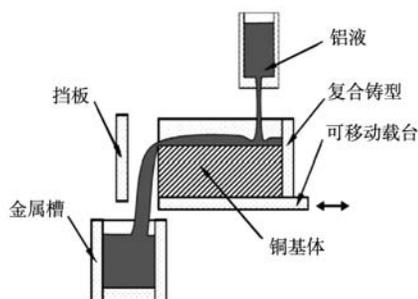


图1 铜/铝双金属固-液复合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the copper/aluminum bimetallic solid-liquid composite

液流。复合铸型中设置固定铜基体凹槽，并且还可以根据需要设置一定高度挡板，铝液凝固之后形成所需厚度的包覆层，在浇注系统最下方设置回收槽，用于浇注结束后回收多余铝液。

镀锌步骤：依次用80~2 000目砂纸对试验用的T2紫铜进行机械打磨并抛光，使用超声波清洗机将铜块清洗后，使用清洗剂进行去油污处理，再用蒸馏水漂洗，进行防锈烘干处理密封待用。同时将氯化钾放入烧杯中，使用玻璃棒搅拌至充分溶解后，再取硼酸放入烧杯中，充分搅拌待其完全溶解后放入水浴锅保温。最后将配置好的氯化锌溶液倒入烧杯中搅拌混合，搅匀镀液并将铜基体立刻放入镀液中，配方如表3所示。

表4为制备1#~4#复合试样的主要参数，利用线切割将试样尺寸加工为20 mm \times 13 mm \times 10 mm，试样依次在240目、400目、800目、1 200目的砂纸上进行打磨。随后使用金刚石研磨膏对样品进行抛光，得到在

表3 电镀锌溶液配方
Tab. 3 Electroplating solution formulation

成分及工艺条件	ZnCl ₂ / (g·L ⁻¹)	KCl/ (g·L ⁻¹)	H ₃ BO ₃ / (g·L ⁻¹)	温度/°C	pH	阴极电流密度/ (A·dm ⁻²)
配方	60	180	25	35	5.5	1.5

表4 铜/铝复合试验主要参数
Tab. 4 Main parameters of copper/aluminum composite experiments

试样编号	表面处理	镀层厚度/μm	浇注温度/°C
1 [#]	抛光		
2 [#]		5	680
3 [#]	镀锌	7	
4 [#]		10	

低倍显微镜下无划痕的试样。在此基础上使用凯乐试剂进行表面腐蚀，腐蚀时间为25~30 s，使用场发射冷场扫描电镜JSM-7800F搭载的能谱仪(EDS)观察和分析样品复合界面，使用ESCALAB250 X射线衍射仪对复合样品的物相种类进行测试分析。图2为铜/铝复合试样剪切过程，图2(a)为试样尺寸，图2(b)为试样剪切力测试。具体测试方法为：利用自制的夹具将试样较厚的一端固定，本试验铜基体厚度均为4 mm，铜基体朝外，同时确保固-液复合过渡区超出夹具。然后将夹具固定台钳上，后放置在测试设备工作台中，随

后控制压头自上向下靠近铜侧增压，直至断裂发生。根据式(1)其断裂时最大压力 F_{max} 除以样品断口面积即为此样品剪切强度 τ ：

$$\tau = F_{max}/S \quad (1)$$

式中： F_{max} 为断裂时最大压力， S 为铜/铝试样断口面积。

2 试验及结果分析

2.1 铜基体表面镀锌

图3(a)、(b)和(c)分别为铜基体表面镀锌

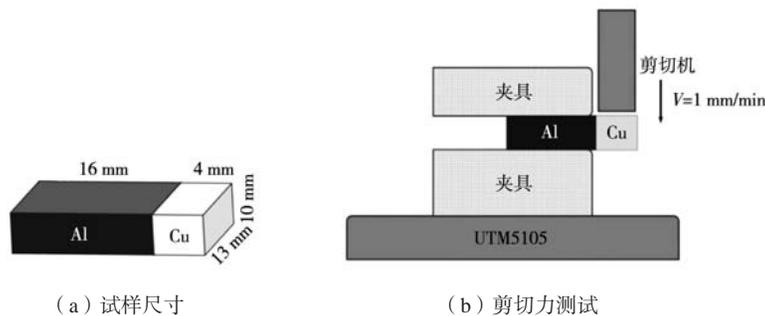


图2 铜/铝复合试样剪切示意图

Fig. 2 Shear diagram of copper/aluminum composite specimen

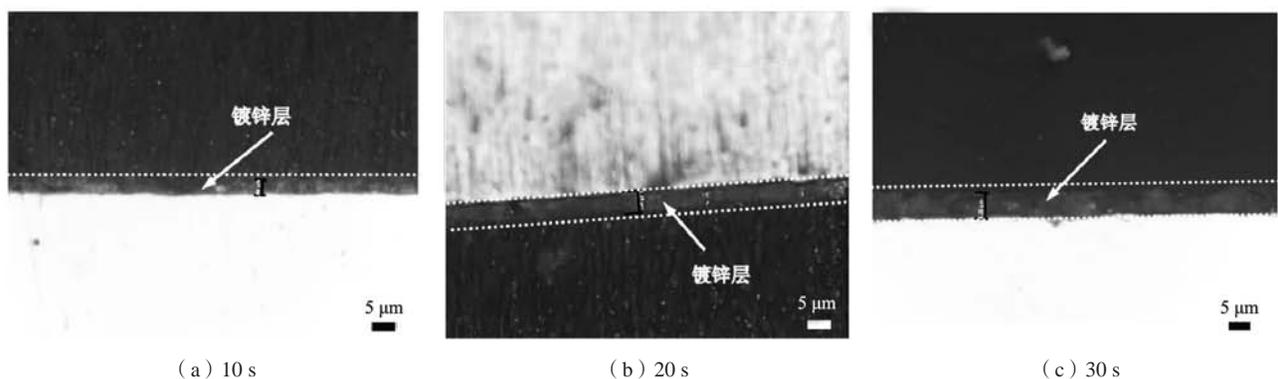


图3 铜基体电镀锌金相观察和施镀时间

Fig. 3 Metallographic observation of electrolytic zinc plating on the copper substrate and plating time

时间10 s、20 s、30 s的镀层厚度,电镀时间是影响电镀锌镀层厚度的主要因素。不同镀锌时间下镀层厚度分别约为3.45 μm 、6.04 μm 和8.52 μm ,镀锌层较致密且厚度均匀,施镀效果较好,镀层整体完整满足实验要求。

2.2 扩散层组织结构分析

图4为1[#]试样表面抛光处理铜/铝扩散层金相微观形貌,扩散层出现明显的裂纹、气孔等缺陷,铜/铝之间并未形成有效冶金结合,只是简单的机械结合,所形成的扩散层分布杂乱,严重影响了铝/铜复合金属的性能。分析可知铜、铝金属熔点及热膨胀系数等物理化学性能差异过大,界面润湿性较差,使二者在浇注过程中难以形成冶金结合,直接影响扩散层质量的好坏,同时界面上由于凝固冷却形成应力,因而容易出现开裂等缺陷。

铜在空气环境易于氧化,尤其是高温条件下铜表面的氧化膜会阻碍与铝液冶金结合。而Zn熔点较低,在多种金属中具有较高的固溶度,研究发现^[14-16]由于Cu

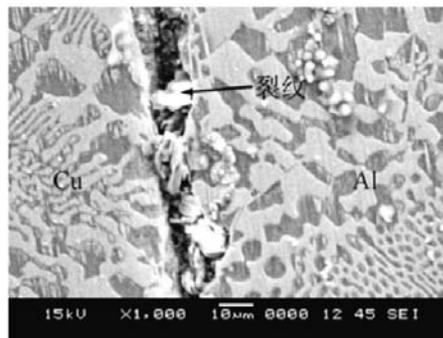
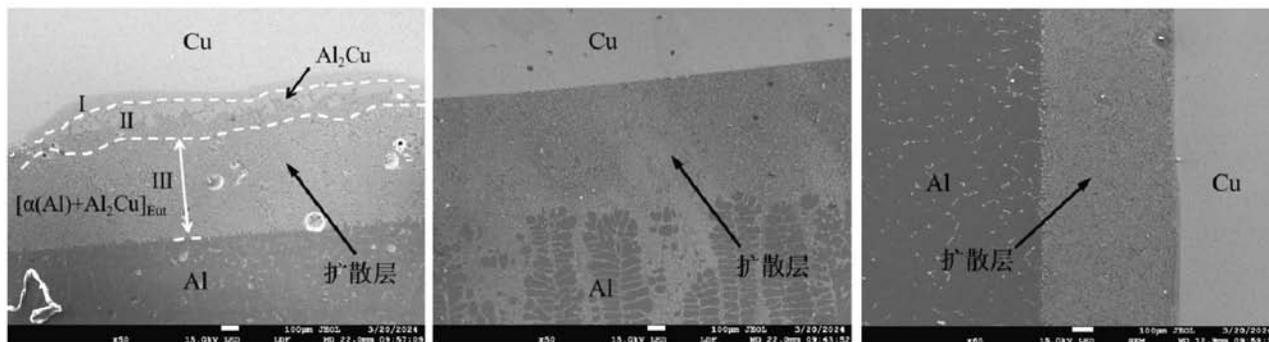


图4 1[#]试样SEM形貌

Fig. 4 SEM morphology of the 1[#] sample

和Zn之间具有较好化学亲和力,Zn层的引入有利于三元 $\text{Al}_{4.2}\text{Cu}_{3.2}\text{Zn}_{0.7}$ 相的形成,其可以有效防止Cu/Al界面脆性相 Al_4Cu_9 生成。

图5中2[#]、3[#]和4[#]试样与1[#]试样对比可知,2[#]、3[#]和4[#]试样扩散层明显改善,铜/铝之间形成良好的冶金结合,并形成一定厚度过渡层。可见铜基体表面镀锌有效改善铝液对铜金属表面的润湿性,增强了Cu和Al原



(a) 2[#]试样

(b) 3[#]试样

(c) 4[#]试样

图5 铜/铝复合试样SEM形貌

Fig. 5 SEM morphology of copper/aluminum composite sample

子相互扩散作用。观察图5 (a)是扩散区三个区域组织,分别是扩散区近铝侧、扩散区中间处和扩散区近铜侧。2[#]样品铜表面存在不均匀溶解,分析可知与其镀层厚度均匀和完整程度有关,I层主要是铜界面处金属间化合物,依据后续图6 XRD和EDS分析,主要由 Al_4Cu_9 和 AlCu 组成;II层主要由 Al_2Cu 相组成;III层由 $[\alpha(\text{Al})+\text{Al}_2\text{Cu}]$ 共晶组织组成。三组镀Zn样品III层的界面组织为Cu-Al过共晶组织 $\text{Al}_2\text{Cu}+[\alpha(\text{Al})+\text{Al}_2\text{Cu}]$ 。而 $[\alpha(\text{Al})+\text{Al}_2\text{Cu}]$ 共晶组织形貌主要以层片状和不定形状并像网在界面生长^[17-19]。全部样品的过渡层厚度相差不大,但通过测量观察得出随着镀层增加,扩散层厚度有逐渐减小趋势。4[#]试样镀层为10 μm 左右时,III层组织几乎全为金属间化合物和 $[\alpha(\text{Al})+\text{Al}_2\text{Cu}]$

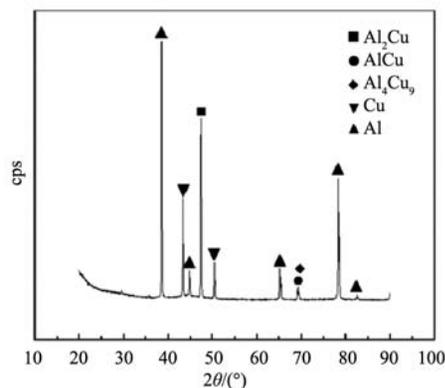


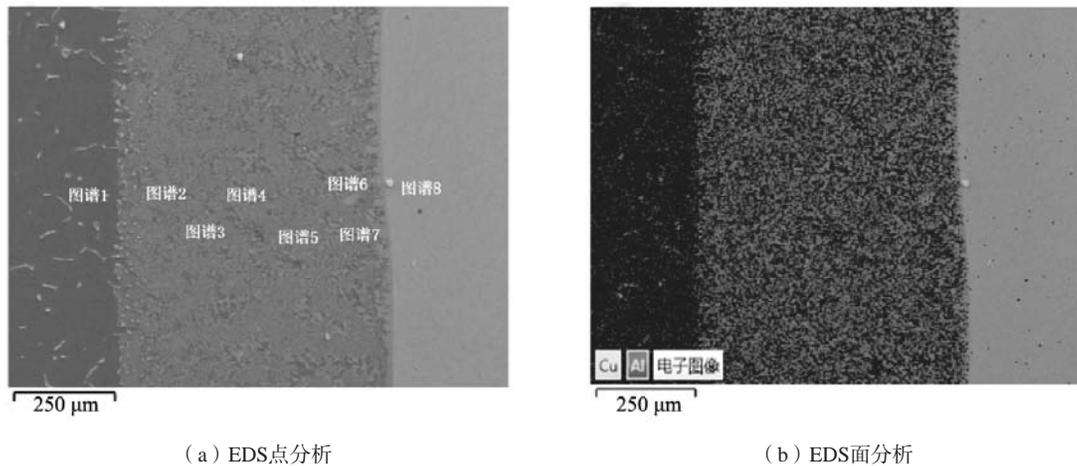
图6 2[#]试样扩散层处X射线衍射分析

Fig. 6 X-ray diffraction analysis at the diffusion layer of the specimen

共晶组织。 Al_2Cu 相厚度较薄且更加均匀。因此镀层厚度的增加也会降低Cu、Al原子相互反应的剧烈程度。

为了探明扩散层金属间化合物的具体成分,图7对4[#]试样进行EDS能谱分析,结合表5分析结果,图谱1为铝基体,图谱2点和3点Cu-Al元素含量比例及Cu-Al二元合金相图分析可知主要是由 $[\alpha(\text{Al})+\text{Al}_2\text{Cu}]$ 共晶组织组成,图谱4点Cu-Al元素含量比例接近2:1,

符合此原子比例的金属间化合物为 $\text{Al}_2\text{Cu}(\theta)$,图谱5点Cu/Al元素含量比例接近1:1,此处的物相应属于 $\text{AlCu}(\eta_2)$ 。图谱6点和7点的Cu/Al元素含量比例分别为0.94和0.84,与铝铜二元合金相图中的物相进行比对后可以得出:金属间化合物分别为 $\text{AlCu}(\eta_2)$ 和 $\text{Al}_4\text{Cu}_9(\gamma_1)$ 。图谱8为铜基体,至此,4[#]试样扩散界面处金属间化合物数量及种类已被全部探明,结论与前期的X射线衍射测试结果基本吻合。



(a) EDS点分析

(b) EDS面分析

图7 4[#]铜/铝复合试样EDS分析Fig. 7 EDS analysis of copper/aluminum composite sample 4[#]

表5 4[#]号试验样品EDS能谱分析结果
Tab. 5 EDS spectrum analysis results of experimental sample 4[#]

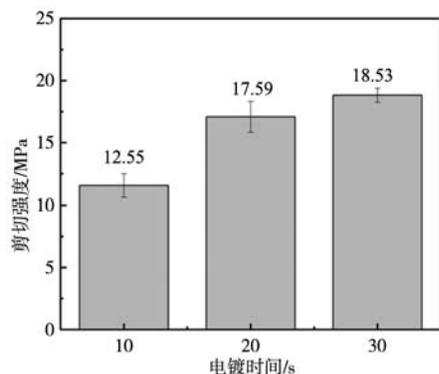
测试点序号	Al	Cu	元素含量比例 (Al:Cu)	$w_B/\%$
1	99.4	0.6	/	
2	81.6	18.4	4.43	
3	72.0	28.0	2.57	
4	65.1	34.9	1.86	
5	52.9	47.1	1.12	
6	48.5	51.5	0.94	
7	45.7	54.3	0.84	
8	0.5	99.5	/	

图7(b)是电镀Zn 30 s时间下铜/铝双金属复合材料界面Al和Cu元素面扫描分布。观察发现铜原子扩散作用深入铝基体中,由于铜在铝中的扩散系数大于铝在铜中的扩散系数,因此,实际中Cu和Al原子的相互扩散为非对称扩散,扩散层形成主要以铜原子向铝侧扩散为主要趋势。在界面上没有Zn元素的聚合,可知Zn元素完全扩散至扩散层中。

2.3 力学性能测试

图8是铜/铝复合试样力学性能分析。结果表明:电镀Zn时间分别为10 s、20 s和30 s时,对应的过渡层剪切强度为12.55 MPa、17.59 MPa和18.53 MPa。通过界面剪切强度与金属间化合物厚度之间的关系发现, I层($\text{Al}_4\text{Cu}_9+\text{AlCu}$)金属间化合物厚度与界面剪切强度值呈反比例关系,与其他研究结果一致^[20-25]。

图9是4[#]试样界面显微硬度分布观察,以铜表面为原点,结果发现,扩散层处 I层($\text{Al}_4\text{Cu}_9+\text{AlCu}$)硬度超过HV900, II层的 $[\alpha(\text{Al})+\text{Al}_2\text{Cu}]$ 共晶组织和基体组织为HV400~650, III层 $[\alpha(\text{Al})+\text{Al}_2\text{Cu}]$ 共晶组织的显微硬度约为HV150~200。这是因为扩散层显微硬度值变化取决于扩散层中硬度比较大的金属间化合物的种类,随着镀层时间的增加,扩散层脆硬金属间化合物 $\text{Al}_4\text{Cu}_9+\text{AlCu}$ 的厚度占比呈下降趋势,镀锌层的引入可能会影响扩散过程中的Cu和Al金属间化合物生长,使得扩散区域的晶粒尺寸更加均匀,锌夹层可以改善Cu和Al扩散区的硬度分布均匀性。



(a) 平均剪切强度

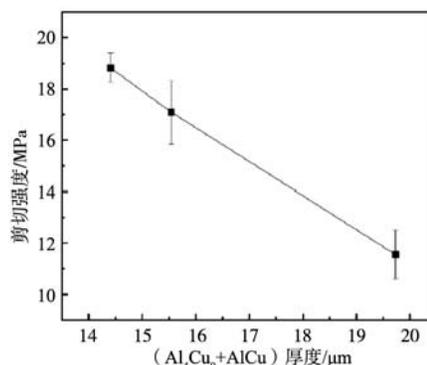
(b) 界面剪切强度与 I 层 (Al₄Cu₉+AlCu) 厚度趋势图

图8 铜/铝复合试样力学性能分析

Fig. 8 Mechanical performance analysis of copper/aluminum composite specimens

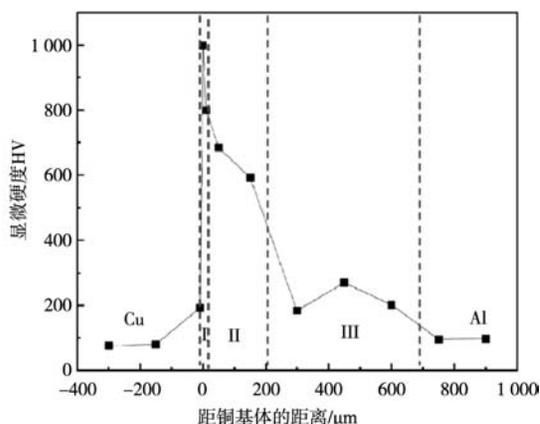


图9 铜/铝双金属复合材料 (30 s) 界面处显微硬度分布

Fig. 9 Microhardness distribution at the interface of copper/aluminum bimetallic composites (30 s)

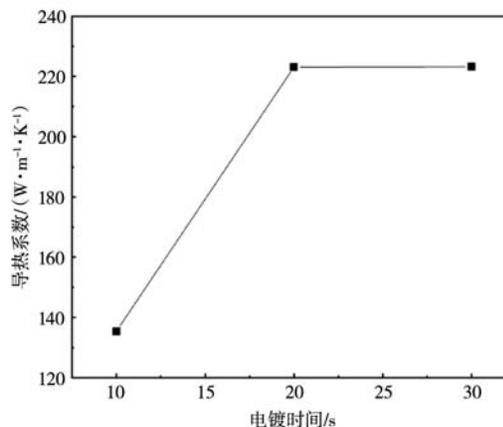


图10 铝/铜复合试样导热系数

Fig. 10 Thermal conductivities of the aluminum/copper composite specimens

2.4 导热性能测试

图10为2[#]~4[#]试样导热系数, 3[#]试样导热系数为223.13 W/(m·K), 4[#]试样导热系数223.21 W/(m·K)。与3[#]试样相比几乎无变化, 导热性较好, 2[#]试样的导热系数为135.41 W/(m·K)。相比3[#]和4[#]试样明显降低, 分析可知, 一方面Cu/Al固-液复合过程中金属间化合物晶体结构相较于纯铜或纯铝更为复杂, 原子排列的规律性和对称性降低, 2[#]试样扩散层较厚且过渡层中间出现宏观气孔等缺陷, 导致电子在其中的运动受到更多阻碍; 热传导主要依靠电子运动, 电子运动受阻使得导热性能下降, 因此导热性较低。另一方面化学键作用强, Cu和Al金属间化合物中, 铜原子和铝原子之间形成的化学键具有较强的方向性和共价性。这使得原子振动和电子的自由移动受限, 不利于热量的快速传递, 进而导致导热性降低。

3 结论

(1) 采用固-液复合铸造法, 在铝液温度680 ℃时, 液态铝和固态铜之间形成了冶金结合, 形成的过渡区主要由三个不同组织形貌的分层组成。通过XRD以及能谱分析, 发现 I 层主要为Al₄Cu₉、AlCu; II 层为粗大的不同厚度和形貌的Al₂Cu相, 离铜基体最近的 III 层主要由[α (Al)+Al₂Cu]共晶组织组成, 此外, 通过对金属间化合物的形成分析, 认为其主要由铝、铜间的扩散反应形成, 且过厚的金属间化合物层将对铝、铜复合接头的综合性能存在不利影响, 需要通过工艺参数的调整对脆性金属间化合物层的厚度进行控制。

(2) 铜基体表面镀锌处理, 有效改善铝液在铜基体表面的润湿性, 促进了铜原子在铝液中的扩散作用, 同时, Zn层一方面防止Cu氧化, 另一方面由于

Cu和Zn之间的化学亲和力, Zn层的引入有利于三元 $Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7}$ 相的形成, 一定程度上抑制Cu/Al界面扩散

层增长。随着Zn镀层厚度增加, 铜/铝双金属复合材料剪切强度有增大趋势。

参考文献:

- [1] KELLER C, MOISY F, NGUYEN N, et al. Microstructure and mechanical properties characterization of architected copper aluminum composites manufactured by cold-drawing [J]. *Materials Characterization*, 2021, 172: 110824.
- [2] IBRAHIM M M, EL-HADAD S, MOUEAD M. Effect of liquid-solid volume ratios on the interfacial microstructure and mechanical properties of high chromium cast iron and low carbon steel bimetal [J]. *Materials Research Express*, 2020, 6 (12) : 1265c2.
- [3] 杨鹏辉, 王蓉, 荣守范, 等. 双液双金属技术研究及应用现状 [J]. *铸造技术*, 2023, 44 (4) : 332-337
- [4] CHANG QH, XIE JP, TIAN HW, et al. Numerical Simulation and Research on the Interface Structure of Wide Cu/Al Composite Plate Prepared by Solid-Liquid Composite Method [J]. *Science of Advanced Materials*, 2018, 10 (7) : 1010-1017.
- [5] LI H, CHEN W, DONG L, et al. Interfacial bonding mechanism and annealing effect on Cu-Al joint produced by solid-liquid compound casting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252: 795-803.
- [6] GREß T, NARDI V G, SCHMID S, et al. Vertical continuous compound casting of copper aluminum bilayer rods [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 288: 116854.
- [7] ZHANG Jian, XIAO Yuan, LUO Guo qiang, et al. Effect of Ni interlayer on strength and microstructure of diffusion-bonded Mo/Cu joints [J]. *Materials Letters*, 2012, 66 (1) : 113-116.
- [8] KUNDU S, CHATTERJEE S. Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer [J]. *Materials Characterization*, 2008, 59 (5) : 631-637.
- [9] ZHANG Jian, LUO Guoqiang, WANG Yi yu, et al. Effect of Al thin film and Ni foil interlayer on diffusion bonded Mg-Al dissimilar joints [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 556 (15) : 139-142.
- [10] Chen Y, Xie J, Wang A, et al. In-situ observation and analysis of the evolution of copper aluminum composite interface [J]. *Metals*, 2023, 13 (9) : 103390.
- [11] CHEN G, LI J, YU H, et al. Investigation on bonding strength of steel/aluminum clad sheet processed by horizontal twin-roll casting, annealing and cold rolling [J]. *Materials & Design*, 2016, 112, 263-274.
- [12] LEE S, SON I, LEE J, et al. Effect of aging treatment on bonding interface properties of hot-pressed Cu/Al clad material [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16 (3) : 525-530.
- [13] SHENG L, YANG F, XI T, et al. Influence of heat treatment on interface of Cu/Al bimetal composite fabricated by cold rolling [J]. *Composites Part B*, 2011, 42 (6) : 1468-1473.
- [14] BOUCHERIT A, AVETTAND-FÈNOËL M, TAILLARD R. Effect of a Zn interlayer on dissimilar FSSW of Al and Cu [J]. *Materials & Design*, 2017, 124: 87-99.
- [15] ZHANG J, SHEN Y, YAO X, et al. Investigation on dissimilar underwater friction stir lap welding of 6061-T6aluminum alloy to pure copper [J]. *Materials and Design*, 2014, 64: 74-80.
- [16] BOUCHERIT A, AVETTAND-FÈNOËL MN, TAILLARD R. Effect of a Zn interlayer on dissimilar FSSW of Al and Cu [J]. *Materials and Design*, 2017, 124: 87-99.
- [17] WANG L, LIU J, KONG C, et al. Sandwich-like Cu/Al/Cu composites fabricated by cryorolling [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2020, 22 (10) : 101002.
- [18] GAO H T, LI J, LEI G, et al. High strength and thermal stability of multilayered Cu/Al composites fabricated through accumulative roll bonding and cryorolling [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2022, 53 (4) : 1176-1187.
- [19] GUI H H, PENG J Z, CE J. Heat transfer analysis and experimental study of unequal diameter twin-roll casting process for fabricating Cu/Al clad strips [J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29 (4) : 1133-1146.
- [20] DURRANT G, GALLERNEAULT M, CANTOR B. Squeeze cast aluminium reinforced with mild steel inserts [J]. *Journal of Materials Science*, 1995, 31 (3) : 589-602.
- [21] ANANTH C R, CHANDRA N. Evaluation of interfacial shear properties of metal matrix composites from fibre push-out tests [J]. *Mechanics of Composite Materials & Structures*, 1995, 2 (4) : 309-328.
- [22] CHANDRA N, GHONEM H. Interfacial mechanics of push-out tests: theory and experiments [J]. *Composites Part A: Applied Science and*

Manufacturing, 2001, 32 (3) : 575-584.

- [23] MADA AH H, KOKABI A. Cold roll bonding of 5754-aluminum strips [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 335 (1) : 186-190.
- [24] ZHANG J, LIANG W, LIU Y, et al. A novel testing approach for interfacial normal bond strength of thin laminated metallic composite plates [J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 590: 314-317.
- [25] ZHAO K N, LIU J C, NIE X Y, et al. Interface formation in magnesium-magnesium bimetal composites fabricated by insert molding method [J]. Materials & Design, 2016, 91: 122-131.

Study on Solid-Liquid Composite Process of Copper/Aluminum Bimetal with Zn Intermediate Layer

MA Tao¹, WANG Li¹, ZHANG Qiang², LIU Zheng-nan², ZHANG Da³

(1. Guoneng Zhongwei Thermal Power Co., Ltd., Zhongwei 755099, Ningxia, China; 2. Harbin Turbine Co., Ltd., Harbin 150090, Heilongjiang, China, 3. School of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154000, Heilongjiang, China)

Abstract:

The copper/aluminum composite materials were prepared by solid-liquid composite method, and the surface of the copper matrix was pretreated with galvanization in advance, and the self-designed casting system was employed to significantly enhance the heat exchange between the molten aluminum and the copper matrix. The variation rules of composition and microstructure of the copper/aluminum diffusion layer were analyzed via SEM, XRD and EDS, the binding strength was measured by a universal testing machine, and the hardness distribution of the diffusion layer was analyzed by microhardness. The test results show that when the pouring temperature is 680 °C, the hardness gradient of the 30 s diffusion layer of the Zn intermediate layer decreases gradually, and the binding strength gradually increases with the increase of the thickness of the Zn intermediate layer, and the porosity in the diffusion layer decreases. The galvanizing treatment on the surface of the copper matrix effectively improves the wettability of the molten aluminum on the surface of the copper matrix, and promotes the diffusion of copper atoms in the molten aluminum, and the diffusion layer is composed of Cu-Al intermetallic compounds.

Key words:

copper/aluminum composite; enhanced heat exchange; galvanize; diffusion layer