

引用格式:李聪,汪宇泽,李海军,等.铜/铝双金属复合材料制备和性能优化研究进展[J].热加工工艺,2025,54(23):1-8+16.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20232875
<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

铜/铝双金属复合材料制备和性能优化研究进展

李 聪¹, 汪宇泽², 李海军¹, 邹昶方², 曹彬彬¹, 刘 昶², 沙昊然¹, 左立杰²

(1. 中天科技海缆股份有限公司, 江苏 南通 226010; 2. 江苏海洋大学 江苏省海洋资源开发研究院, 江苏 连云港 222005)

摘 要:铜/铝双金属复合材料结合铜的高导电、导热性能及铝的轻质等优点,具有较高的性价比,被广泛应用于新能源、移动通讯、海底电缆和汽车等各领域。在铜/铝双金属复合过程中,关键难题在于铜/铝界面的调控。归纳了铜/铝双金属复合材料的固-固复合、固-液复合和液-液复合等制备工艺,界面处理工艺以及性能优化的研究,给出了铜/铝双金属复合材料的研究方向和热点。

关键词:铜/铝双金属复合材料;制备工艺;界面处理

中图分类号:TB331

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2025)23-0001-08

Progress in Preparation and Performance Optimization of Copper/Aluminum Bimetallic Composite

LI Cong¹, WANG Yuze², LI Haijun¹, ZOU Changfang², CAO Binbin¹, LIU Chang²,
SHA Haoran¹, ZUO Lijie²

(1. Zhongtian Technology Submarine Cables Co., Ltd., Nantong 226010, China; 2. Jiangsu Institute of Marine Resources Development, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: Copper / aluminum bimetal composite combines the advantages of copper in high electrical conductivity, thermal conductivity and lightweight of aluminum, and it has high cost performance, which is widely used in new energy, mobile communication, submarine cables and automobiles and other fields. In the process of copper / aluminum bimetal composite, the key problem lies in the regulation of copper / aluminum interface. The preparation process such as solid-solid, solid-liquid and liquid-liquid composite processes, interface processing process and performance optimization of copper / aluminum bimetal composite materials were summarized, and the research directions and hotspots of copper / aluminum bimetal composites were given.

Key words: Cu/Al bimetallic composite; preparation process; interface treatment

铜/铝复合材料是通过一定的复合工艺将铜和铝基体在界面形成牢固的冶金结合,从而制备一种新型复合材料。与单一的铜或铝基体相比,铜/铝复合材料具备两种金属的优良性能,如高导电性、高导热性、易于焊接、优异的耐腐蚀性和低质量等。随着科学的发展和进步,工业界广泛寻求更轻的结构、更低的成本和更优的性能。铜是重要的国民经济原材料和矿产资源,但存贮少而且生产成本低,随着全球

能源转型,新增大量铜需求。因铝的储量远多于铜,开采起来更加便利,“以铝代铜”逐渐成为热点。在我国新能源发展战略的大背景下,铜/铝复合材料的应用将越来越广泛。例如,在加工费几乎相当的情况下,轿车热交换器用复合钎焊铝箔代替铜箔,其质量可减轻 37%~45%,热交换率可提高 12%,不仅提高燃料的利用效率,还使 CO₂ 排放减少^[1]。位于美国马萨诸塞州的 Engineered Materials Solutions(EMS)公司研制的 SIGMA clad 复合材料解决了锂电池高温发热失稳的问题^[2]。目前,铜/铝复合材料的研究主要围绕制备工艺、界面处的显微结构演变和综合性能分析。众多学者围绕着如何选择最优的工艺方法和参数使得铜/铝复合材料获得最佳性能这一主题开展了一系列研究。刘国平等^[3]评估了铜铝双金

收稿日期:2023-12-02 修回日期:2025-07-12

基金项目:江苏省海洋资源开发研究院开放课题项目(JSIMR202208)

作者简介:李聪,男,高级工程师,主要研究方向:海底复合缆研制;

E-mail:licong@chinaztt.com

通讯作者:左立杰,男,副教授,博士,主要研究方向:高强韧铝合金设计与表征;E-mail:zuoliji@126.com

属复合材料的热性能和耐腐蚀性能。此外,有限元仿真给铜/铝双金属复合提供了直观描述。刘国平^[4]利用 DEFORM-2D 有限元软件模拟铜/铝材料轧制复合过程中的变形行为。Mehdi 等^[5]利用 ABAQUS 有限元软件预测铜/铝焊接过程的热输入,其结果与实验相比相对误差为 4.1%,因而可以有效预测焊缝中缺陷的发生。

铜/铝复合材料还在生物、环境和工程热物理等多个领域得到应用。随着对铜/铝复合材料的性能要求逐渐提高,需要开发相应的新技术和新产品。严浩^[6]提出在热交换领域中,可利用铜/铝复合材料过渡层薄和导热系数高的特点,将其用于大功率 LED 的封装。利用铜/铝复合材料集热效率高和耐腐蚀的特性,可用于制造太阳能热水器的集热原件,不仅可以提高热效率,而且还可提高经济效率。一直以来,关于如何控制铜/铝复合材料过渡区的界面组织以优化性能是铜/铝复合材料研究的关键。目前,大部分研究对铜/铝复合材料复合微观机理缺乏深入全面的理解;且固-液复合和液-液复合制备工艺很难通过经典建模方法建立工艺参数与复合界面的关系模型。夏钊等^[7]利用机器学习算法,建立了铜/铝复合材料连铸复合工艺参数、退火参数与界面厚度、界面结合强度的关系模型,并采用遗传算法获得了优化的连铸复合工艺参数,为铜/铝复合材料的界面智能调控奠定基础。

本文综述了近几年铜/铝复合材料制备工艺、结合界面的处理方法和综合性能的研究,并在此基础上预测未来铜/铝复合材料的发展方向。

1 铜/铝双金属复合材料的制备工艺

铜/铝复合方式可分为固-固复合、固-液复合、液-液复合以及这 3 种工艺的组合复合 4 大类。在铜/铝复合材料的制备中,铜/铝基体的接触表面与空气中水蒸汽接触,发生电化学反应,在结合界面处形成一层氧化膜,对铜/铝的冶金结合造成不利影响;且复合时界面易形成高硬脆的金属间化合物。在制备工艺中,通过工艺参数设置控制上述两种现象的发生,以获得良好的铜铝复合材料是关键。

1.1 固-固复合

固-固复合制备工艺通过压力将金属材料复合,复合形式通常是机械啮合,其适用于大规模生产复合材料,但材料的变形程度较大,需要配合热处理

工艺进行。主要的固-固复合工艺有轧制^[8]、爆炸复合^[9]、焊接^[10]和挤压^[11]等。在实际生产过程中,轧制复合工艺因为其生产设备和工艺较简单,因而应用最为广泛。Wang 等^[12]在四辊微轧机上进行铜/铝复合带材的微柔性轧制 (micro-flexible rolling, MFR) 试验。如图 1 所示,整个系统由电动执行机构、力传感器、驱动电机、指令控制面板和数据采集器组成。精密位移传感器实时监测轧辊间隙,电动执行机构能够驱动上部工作辊沿纵向运动,得到不同的轧辊间隙,从而进行不同厚度的铜/铝复合材料制备。

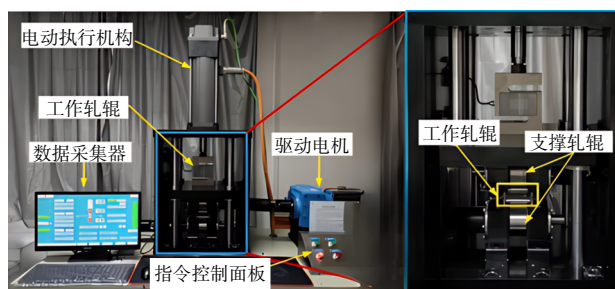


图 1 MFR 系统^[12]
Fig.1 The MFR system^[12]

爆炸复合通过炸药爆炸瞬间产生的巨大能量和压力使金属基材料相连接,伴随着一定的风险,时间极其短暂,需要考虑的工艺参数非常多,复合过程无法通过实验直接观察到。铜/铝双金属材料主要的焊接方式为搅拌摩擦焊,这是一种固相焊接技术,焊接过程中金属处于塑性状态而不熔化,通过搅拌针的搅拌实现结合^[13]。赵啸等^[14]通过搅拌摩擦焊接铜/铝层状复合板,发现在接头的前进侧靠近 Al 板的一侧生成了高硬脆的 AlCu 金属化合物。挤压成形又分为正挤压、等径角挤压和复合挤压等;复合挤压结合了正挤压和等径角挤压的方式,一次成型,提高了加工效率、改善了材料力学性能。Bohluli 等^[15]设计了一种特别的固-固复合方法,即采用先扭转挤压,再正挤压制备铜/铝复合材料,研究了扭转挤压对铜/铝基体的结合强度和力学性能的影响。相比于直接正挤压,采用四道次扭转挤压和一道次正挤压后复合材料屈服强度和剪切强度得到了大幅提升。Pambhar 等^[16]采用单点渐进成形,研究铜铝布置方式、成形速度和钻头转速对成形效果的影响。结果表明:Cu 下 Al 上排列方式的材料所获得的塑性更好。渐进成形的基本原理是根据“分层加工”的思想,将一个复杂的三维实体按等高线原则离散成一系列简单的二维层,通过计算机控制成形工具头对金属板

材实现逐次逐点分层加工,最终依靠各层的累积塑性变形,成形出所需的目标制件^[17-18]。在实验中,以最大成形角表征铜/铝复合材料的力学性能。一般来说,在一定范围内,成形角越大,相邻等效塑性应变增量越小,制件变形越均匀,制件成形质量越好,板材塑性发挥越好^[19]。

1.2 固-液复合

固-液复合制备工艺的工序较简单,受待复合件外形尺寸的影响小,而且对设备要求较低。固-液复合制备工艺主要有铸轧^[20]、复合铸造^[21]和热浸渡^[22]等方式。复合铸造是固-液复合的主要方式,包括重力铸造、离心铸造、低压铸造和高压铸造。在实际的双金属固-液复合过程中,通常有熔合结合和扩散结合两种机理综合作用。对于铜/铝复合材料来说,利用铜、铝两种金属之间较大的熔点差(Cu : $1084\text{ }^{\circ}\text{C}$; Al : $660\text{ }^{\circ}\text{C}$),铝液润湿预制的铜材促进在固液界面形成冶金结合。在固-液制备过程中,铝液温度的控制极为关键。过高的浇注温度导致铜基体发生局部熔化,在过渡区形成新的金属化合物,从而影响结合处的力学性能;浇注温度过低,铝液在和铜基体完全结合之前就已经凝固,无法形成冶金结合。此外,也应关注铜基体和模具的预热温度,这对液态铝和固体铜之间的润湿性和元素扩散有重要影响。液态金属温度越高,固体金属的表层原子活性越好,材料的润湿性也就越好^[23]。

1.3 液-液复合

液-液复合主要有充芯连铸和液-液铸轧两种方式。相比固-固复合和固-液复合对预制金属坯料的端部要求较高且需多次退火处理,液-液复合具有工艺流程短的优势,然而界面组织控制难度较大且易产生缺陷。Wang等^[24]利用液-液复合,通过水平连续铸轧工艺制备了厚度 2 mm 的铜/铝双金属复合板,如图2所示。Xie等^[25]开发的充芯连铸液-液复合用于制备铜包铝复合材料。

1.4 组合复合

为获得更多的金属复合材料种类,得到更高性能的金属复合材料,尝试将上述3种复合方式进行不同形式的组合,如多种固-固复合工艺联合、固-液与固-固复合联合、液-液复合与固-固复合联合。试验证明了组合复合获得的铜/铝双金属材料的性能优于单一工艺制备的。

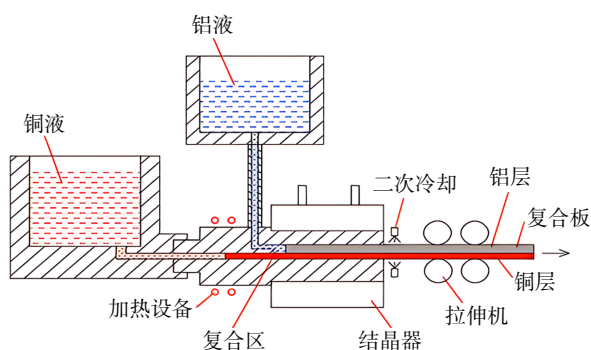


图2 铜/铝复合板的水平连续铸轧工艺示意图^[24]
Fig.2 Schematic of horizontal continuous casting and rolling process of Cu-Al composite plate^[24]

2 铜/铝金属结合界面的组织演变和工艺处理方法

双金属复合材料的界面组织直接影响到复合材料的力学性能。因此,研究结合界面处的组成和微观结构演变是关键问题。目前,主要通过金相组织观察、X射线衍射分析、扫描电子显微镜分析、电子背散射衍射分析和原位拉伸扫描分析这几种方式进行分析。

2.1 界面组成和晶粒演变

界面相是由界面反应扩散形成的。对于采用固-固复合方式制备铜铝复合材料,界面相主要是金属间化合物,包括 AlCu 、 Al_4Cu_9 和 Al_2Cu 等。固-液复合和液-液复合的界面相主要由金属间化合物和铜在铝液中形成的扩散层组成。研究发现铜/铝复合材料中间层包括3个亚层:纯铜侧由 Al_4Cu_9 、 AlCu 和 Al_2Cu 相组成,中间由 $\text{Al}_2\text{Cu}+\alpha\text{-Al}$ 层状共晶组成,纯铝侧由共晶相+树枝状 $\alpha\text{-Al}$ 相组成^[26]。Wu等^[27]研究固-液复合铸造铜/铝复合材料,指出过渡区的相为 $\alpha(\text{Al})+\text{Al}_2\text{Cu}$,显微硬度 $150\sim 200\text{ HV}$ 。

界面相的演变可以通过晶粒的变化反映,而晶粒取向差是其中一个重要指标。晶界取向差的存在导致晶体中晶粒间的应力集中,进而影响晶体的力学性能。晶界取向差越大,晶粒间的应力集中越明显,晶体的强度和韧性就会降低。因此,在材料设计和制备过程中,需要尽可能减小晶界取向差。同时,在研究铜/铝复合材料形成过程中中间相的演化过程,晶界发挥了重要作用。晶粒细化的目的就是阻碍晶粒之间的位错运动,使得材料的强度和塑性提升。

2.1.1 固-固复合的晶粒演变

Tian^[28]和 Wang 等^[29]对不同退火温度下铜 / 铝复合材料中间相的形成机理进行了研究。众多学者从热力学角度分析,认为在 AlCu、Al₂Cu 和 Al₄Cu₉ 这些化合物中,Al₄Cu₉ 具有最大的负形成自由能^[30],因此 Al₄Cu₉ 首先在 Cu/Al 界面处形成。然而, Tian 等^[28]通过实验发现 Al₂Cu 是最先形成的。这是因为在实验温度范围内,Al 和 Cu 相比具有更大的溶解度,因此 Al(Cu)固溶体首先饱和,导致 Al₂Cu 相成核。Wang 等^[24]通过有效成核热模型也解释了 Al₂Cu 成为第一相的原因,并在此基础上研究发现 Al₄Cu₉ 先于 AlCu 成形。这可以用动力学解释,根据经典动力学理论,金属间化合物的生长速率 D 由温度和活化能表征,用 Arrhenius 方程表示:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: D_0 为前因子; Q 为生长活化能; R 为摩尔气体常数; T 为热力学温度。

随着退火温度升高,扩散反应速率有所上升。在铸轧过程中,铜 / 铝结合面产生了滚动摩擦,界面附近的原子在较高温度下获得更多能量,扩散反应更剧烈,所以在靠近 Cu 基体的一侧形成 Al₄Cu₉。

此外, Tian 等^[28]研究了轧制制备 C70250 铜合金 / 8030 铝合金复合界面的固态扩散行为,通过对第二相 Fe-Al 进行标记,阐述了金属间化合物的形成顺序和机理。发现复合界面处 IMC 层的形成顺序为 Al₂Cu、粗晶 AlCu 层、Al₄Cu₉ 层、细晶 AlCu 层和 (Cu,Ni)₃Si 层;复合界面处 IMC 层的空间分布为 Cu 合金层、(Cu,Ni)₃Si 层、Al₄Cu₉ 层、细晶 AlCu 层、粗晶 AlCu 层、Al₂Cu 层和 Al 合金层。推测 Al₂Cu 层和粗晶 AlCu 层由原始复合界面向 Al 合金侧生长, Al₄Cu₉ 层和细晶 AlCu 层由原始复合界面向 Cu 合金侧生长,界面层演化如图 3 所示。

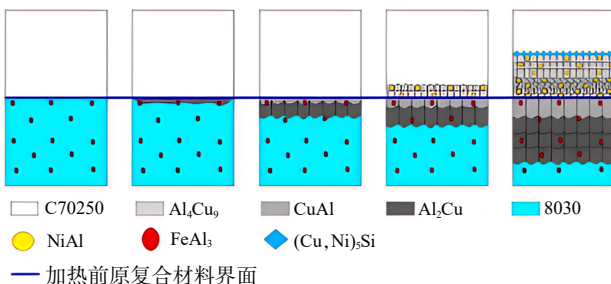


图 3 界面层演化示意图^[28]

Fig.3 Schematic map of the evolution of interface layer^[28]

2.1.2 固-液复合的晶粒演变

固-液复合的铜 / 铝双金属复合材料的晶粒组织与液态铝的浇注温度、固体铜和模具的预热温度密切相关。郑小平等^[26]通过固-液复合铸造制备了 7075/6061 双金属复合材料,研究了坯料预热温度和外熔体温度对界面组织形貌的影响。随着温度的上升,晶粒尺寸增大,且变得愈加圆整;当预热温度升至 400 ℃,铜表层的大晶粒开始吞并小晶粒,晶粒开始粗化,发生了 Ostwald 熟化,且晶粒开始向柱状型发展。同样地,可以用 Arrhenius 公式解释这种熟化现象:

$$\frac{AR_{\max}}{t} = w_0 \exp\left(-\frac{Q_a}{RT_{\max}}\right) \quad (2)$$

式中: $AR_{\max}$ 为相应温度区间下可获得的最大长径比; R 为气体常数,8.314 J/(mol·K); Q_a 为晶粒定向长大的表观激活能,kJ/mol; w_0 为前置因子, $4.16 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$; $T_{\max}$ 为相应的最大热区温度; t 为时间。

随着最大热区温度的升高,最大长径比也增加,晶粒呈柱状形态,这种晶粒形状上的变化也与界面的稳定性息息相关。当晶粒呈等轴生长时,固液界面前沿液相中的温度梯度 G 小于熔体中液相温度变化的梯度,此时液相处于成分过冷状态,存在驱动力促使界面处产生扰动,界面是不稳定的。当晶粒呈柱状生长时,液相线温度梯度与热通量施加的温度梯度的差小于零,此时界面是稳定的^[31]。

2.2 铜/铝结合界面处理工艺

常见的铜 / 铝结合界面处理工艺包括热处理、表面涂层和添加增强颗粒等。热处理是一种常用的处理方法,可以通过控制温度和时间,在界面处形成强化层或固相反应层,提高界面的结合强度和相容性,以改善材料的性能。

涂层技术可以在铜 / 铝双金属复合材料的结合界面上形成一层保护性涂层。涂层可以是有机涂层、无机涂层或金属涂层,用于防止氧化、腐蚀和电化学反应,提高界面的稳定性和耐久性。

增强颗粒在铜 / 铝金属中形成位错源,阻碍位错的移动,有效增加材料的强度和硬度。同时,增强颗粒可以与铜、铝基体结合,形成新的金属相,提供了强化效应,从而提高铜 / 铝双金属复合材料的力学性能。

2.2.1 热处理对中间相的影响

Chang 等^[32]利用电子背散射衍射技术 (EBSD)

对铸轧的铜 / 铝双金属复合材料的结合界面进行观察,研究了在退火温度 300、400 和 450 °C 的晶粒取向。发现随着退火温度的升高,依次出现 Al_2Cu 、 Al_4Cu_9 和 AlCu 这 3 种金属化合物,而且小的晶粒取向差逐渐消失。这归因于退火使得再结晶充分,消除了大量的内应力,大角度晶界内的小角度晶界大幅消失。从图 4 中可以观察到,随着退火温度的升高,晶粒取向趋于一致,因而获得了较好的力学性能。

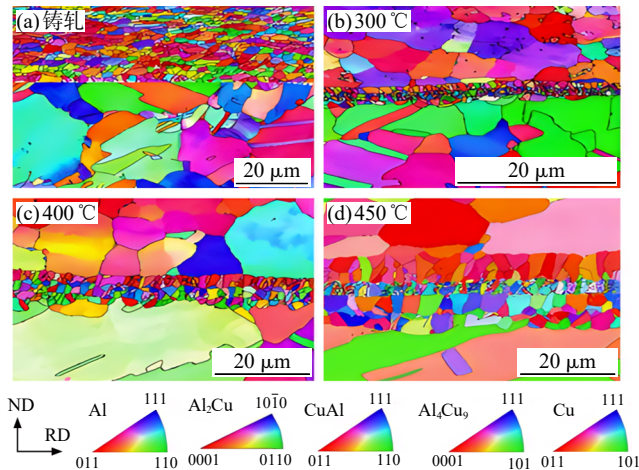


图 4 不同退火温度下铜 / 铝复合板界面区的晶粒取向^[32]
Fig.4 Grain orientation of interface zone of copper-aluminum composite plate at different annealing temperatures^[32]

2.2.2 添加其他颗粒对中间相的影响

Shayanpoor 等^[33]分析了添加不同增强颗粒的铜 / 铝复合棒材界面层的相组织。增强颗粒在界面发生反应形成的常见金属间化合物如表 1 所示。研究表明,当添加增强颗粒为 Cu 和 Al-Cu 时,铜 / 铝结合层的剪切强度最大,分别为 161、68 MPa。相反,添加 Al_2O_3 颗粒后,结合层的强度相比不添加时有所降低。因此,增强颗粒和铜 / 铝基体形成的高硬度新金属相,如 Cu_3Al_2 、 Cu_9Al_4 带来了强化效应。

表 1 Al/Cu 复合棒材界面层的相^[33]

Tab.1 The phases of the interface layer of Al/Cu composite rods^[33]

粉末	A	B	C	D	E
未添加粉末	$\alpha(\text{Al})$	CuAl_3	$\alpha(\text{Cu})$	-	-
Cu 粉末	$\alpha(\text{Al})$	Cu_3Al_2	$\alpha(\text{Cu})$	CuO	$\alpha(\text{Cu})$
Al-Cu 粉末	$\alpha(\text{Al})$	CuAl	CuAl_2	Cu_9Al_4	$\alpha(\text{Cu})$
Al 粉末	$\alpha(\text{Al})$	$\alpha(\text{Al})$	$\alpha(\text{Al})$	Cu_4Al_3	$\alpha(\text{Cu})$
Al_2O_3 粉末	$\alpha(\text{Al})$	Al_2O_3	Al_2O_3	CuAlO_2	$\alpha(\text{Cu})$

2.2.3 金属涂层对中间相的影响

Wu 等^[27]在研究如何提高海缆铜 / 铝接头的结

合面性能时,采用在铜基体表面镀镍层,研究了镍层厚度对铜 / 铝结合面力学性能的影响。通过改变镀镍时间制备了三种不同的镍层,分别为 1.5、3.8 和 5.9 μm 。结果表明,中间相厚度随镍层的厚度增加先增大后减小。当镍层厚度为 1.5 μm 时,镍在高温下脱离铜基体,导致铜表面被氧化不能与铝液完全形成中间层;当镍层厚度为 5.9 μm 时,过厚的镍层阻碍了铜和铝的冶金结合,导致中间层厚度减小;当镍层厚度为 3.8 μm 时,铜 / 铝复合材料的结合层获得最大的剪切强度。此时镍的厚度能有效防止铜的氧化,同时也不会因为镍层过厚而影响铜、铝的扩散和结合。

3 铜/铝复合材料的综合性能

3.1 力学性能

力学性能包括显微硬度^[34]、抗拉强度^[35]和界面结合强度^[36]等。界面结合性能是衡量双金属复合材料的重要指标,通常采用剥离法、拉伸法和剪切法测量。刘国平^[4]以固-液复合砂型重力铸造和固-液复合金属型重力铸造为例,采用剪切法测量铜铝复合材料的界面结合强度。剪切试验原理如图 5 所示。

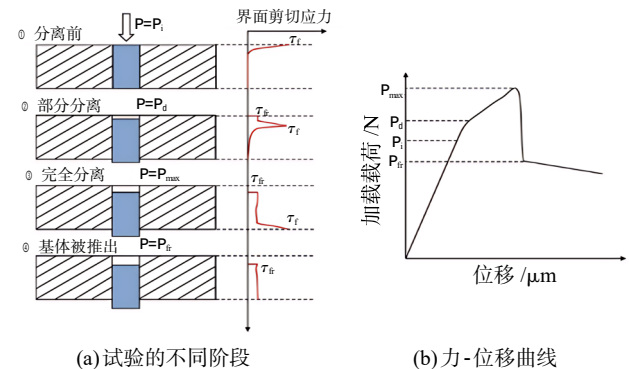


图 5 双金属复合材料剪切试验原理^[37]
Fig.5 Principle of push-out test of bimetallic composites^[37]

抗拉强度评估有室温拉伸和高温拉伸两种方式。通过高温拉伸试验,刘国平^[4]发现在较高温度(200 °C)下 $\text{Cu}/8011/5052$ 多金属复合材料仍有较高的抗拉强度,说明该复合材料具有高温使用的潜力。显微硬度评估有两种方式:全自动硬度计和纳米压痕仪测试,可分别测试基体金属、界面金属间化合物和界面扩散层之间的显微硬度。Keller 等^[38]创新性地研究了堆叠法冷拉制备铜 / 铝复合线材,冷拔下铜 / 铝复合线材与普通热轧和退火相比具有更大的屈服强度。Wang 等^[29]利用轧制方法制备了 Cu/Al 复

合薄带,研究了不同退火温度对铜/铝双金属复合材料性能的影响。当退火温度为 300℃时,由于金属间化合物的硬脆性和分子之间的长程力阻碍了晶界的位错滑移,其抗拉强度只是略有降低。在 300~500℃内,随着退火温度的升高,金属间化合物的厚度增加,复合材料的抗拉强度急剧下降,由于再结晶组织的出现,塑性得到提升。Shayanpoor 等^[33]研究了铜/铝双金属的热轧连接,发现在 500℃进行热轧获得的材料挤压性能较好,选用铜颗粒作为增强粉末时,获得的材料屈服强度和抗压强度最大。Wu 等^[27]利用固-液复合制备了海底电缆的铜/铝导线接头,研究了铜/铝固液体积比对铜/铝接头处的显微组织和力学性能的影响。通过对比固液体积比为 8.86 和 50 的两种制备方法,后者在抗拉强度和显微硬度上都有所提升。Li 等^[39]研究了热暴露后 Al-Si-Cu-Ni-Mg-Fe 合金的极限拉伸强度随时间的变化关系,在 350℃下,0.5~8h 内合金极限抗拉强度急剧下降。

3.2 导电性能

在“以铝代铜”的进程中,由于铝的导电性只有铜的 2/3,导致其导电性成为制约因素。研究认为,采用铜包铝制备的铜/铝双金属复合材料通电时,由于趋肤效应,电流倾向从导电性更强的铜表面通过,因而相比单一的铝线,复合材料的导电性能更强。由于传统的金属强化方式形成的晶界和位错增加了电子散射,导致导电率降低。如何同时提高合金强度和导电性一直是难题。研究人员分别从改变制备工艺和在金属间添加增强材料等方面设法解决这一问题。Tavassoli 等^[40]发现铜/铝复合材料的电阻随金属间化合物厚度的增加而增加,因而导电性降低。Keller 等^[38]通过改变铜包铝的制备工艺,采用冷轧工艺有效降低了金属间化合物的体积分数,使得铜包铝电线具有了更优良的导电性,可在更广泛的频率范围内输送电流。Amiri 等^[41]研究了挤压拉丝制备的新型铜铝复合丝的电阻特性。Luo 等^[42]制备了铜包覆石墨烯增强复合材料,在石墨烯表面镀铜不仅可以避免石墨烯的团聚,而且可以防止退化的 Al_4C_3 相的形成,增加了增强体与基体之间的界面结合和电接触。这种复合材料的强度为 242 MPa,电导率为 34.5 MS/m。Volokitina 等^[43]通过 5 次的等通道转角挤压,再在 200℃下进行退火,得到了强度和导线性同样优良的铜/铝电线,使生产新一代电线成

为可能。此外,电流对材料本身的结构产生影响,影响材料的性能。研究人员也想利用这点,通过电流的作用优化材料。Huang 等^[44]通过电流辅助拉伸铜/铝复合棒,发现试样的 Cu 基体和界面区位错线沿电子运动方向重排,促进了金属间化合物层裂纹尖端的愈合。同时发现由于电流带来的焦耳热,局部电阻升高。

3.3 导热性能

铜/铝复合材料的导热性能通常用热导率 λ 来表示:

$$\lambda = \alpha \rho c \quad (3)$$

式中: α 为热扩散系数; ρ 为密度; c 为比热容。

密度和比热容是材料自身固有的属性,而热扩散系数与热传递速率、接触温度等都有关系,是反映温度不均匀的物体中温度均匀化速率的物理量。热导率与铜/铝复合材料连接后的力学性能息息相关。Sharma 等^[45]讨论了不同工艺参数下的搅拌摩擦焊对铜/铝双金属复合材料的性能影响,使用热电偶、钳表和万用表对焊接温度进行监测,通过过渡区的温度变化分析界面处热导率的变化,以了解复合材料的导热性能。Li 等^[39]发现:在高温下 Al-Si-Cu-Ni-Mg-Fe 合金的力学性能随铁含量的增加而提高。目前,关于铜/铝复合材料的研究中机械强度和热导率的平衡是难点。因为溶质原子和相界引起晶格畸变处的强烈电子/声子散射导致铜/铝复合材料的导热率相比单一的铜、铝基体有所下降,因此必须从原子层面研究原子的扩散对铜/铝复合材料热性能的影响。通过记录原子运动轨迹,采用均方位移 (MSD) 表示铜/铝扩散程度,如下:

$$MSD = \langle \vec{r}^2(t) \rangle = \langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\vec{r}_i(t) - \vec{r}_i(0)]^2 \rangle \quad (4)$$

再根据爱因斯坦扩散定律,进一步计算热扩散系数,如下:

$$D = \frac{1}{6} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d_{MSD}}{dt} \quad (5)$$

通过实验和公式推算可以得出结论:热扩散系数随温度的升高而变大。

Li 等^[46]发现在 600 K 以上,声子散射对铜/铝复合材料热导率的影响起主导作用,此时热扩散系数和温度呈负相关。因此,对于导热性能要求高的场合,必须控制热处理温度不超过此临界值。

受到铜包铝结构和具有增强性能的 Mg-NiTi

复合材料的互穿结构的启发,陈孝凌等^[47]设计了一种具有穿透结构的铜/铝复合材料,先通过增材制造出一种中间镂空的铜支架,再将熔融的铝液倒入孔中,最后采用挤压铸造成形,如图6所示。根据热导率公式,得出该复合材料的导热系数为 $200\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,仅比纯Al的导热系数略低,其在沿穿透方向同时获得了高强度和高热导率。同时如何加速铝液冷却速率来控制过渡层的厚度,以减少其对导热率的不利影响是今后研究的一个热点。

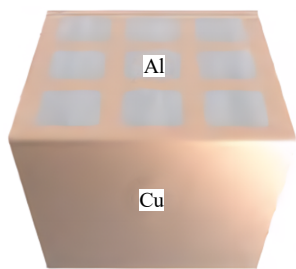


图6 具有贯穿结构的铜/铝复合材料样品^[47]
Fig.6 Cu/Al composite sample with penetration structure^[47]

4 结语

目前,关于铜/铝双金属复合材料的制备工艺、中间相分析和性能优化取得了一定的进步。由于铜/铝复合材料的可回收性、轻量化、耐腐蚀性和高强度,对环境保护有着积极作用,铜/铝复合材料必然得到更广泛应用。但关于铜/铝双金属复合材料的研究现状还有一些待解决的问题。

(1) 目前研究的铜/铝双金属复合形式都是基于简单的板盘状和圆管状,制约了其在特定行业如通信和航空航天上的应用。面对复杂零部件的强大需求,如5G基站散热器和发动机推力室散热器,如果铜/铝复合材料能得到应用,将对这些领域产生极大推动,因此仍需创新铜/铝复合材料的结合工艺。

(2) 由于铝的导电性能一般,制约了铜/铝复合材料在电气行业的广泛应用。目前,研究人员正努力提升铝的导电性,如果通过改变金属的结构,引入合适的添加物改变金属的导电性,生成超导性的铝,将为电子设备和电网行业带来变化。

(3) 针对铜/铝双金属复合材料的制备工艺和结合面处理工艺,如何选择合适的工艺参数尤为重要。目前,大部分研究都是在相对合理的参数范围内选择有限组参数进行实验,无法确定在这些范围内是否存在更为合理的优化参数。而且实验通常采

用控制单一变量法,无法统筹其他工艺参数。若想兼顾导电性、导热性和力学性能,必须建立多目标参数优化的函数模型,将各工艺参数联系起来,在合理参数范围内找到最优解。

(4) 目前,材料的自修复性能受到科学界的广泛关注。但大多数此类研究对象为非金属材料,对于金属材料自修复性的研究还不深入。如果可以通过添加无机材料实现铜/铝材料的自我修复,将对延长铜/铝双金属复合材料的寿命起到积极作用。

参考文献:

- [1] 王宁. 汽车热交换器用复合钎焊铝箔轧制复合实验研究[D]. 沈阳:东北大学,2005.
- [2] Haynes M, Hardy M. Clad metals for use as connectors for lithium ion batteries [M]. Wickeder Group,2018.
- [3] 刘国平,王渠东,蒋海燕. 铜/铝双金属复合材料研究新进展[J]. 材料导报,2020,34(7):7115-7122.
- [4] 刘国平. 铜/铝双(多)金属复合材料制备及组织性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
- [5] Mehdi F N, Majid E, Hamed J A, et al. Theoretical and experimental studies on fabrication of two-layer aluminum copper pipe by friction stir additive manufacturing [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2021,31(12):3643-3658.
- [6] 严浩. 铜/铝复合材料研究与应用进展[J]. 世界有色金属,2022(6):171-173.
- [7] 夏钊,赵帆,刘新华,等. 机器学习辅助预测铜铝复合材料界面结构与性能[J]. 中国有色金属学报,2023,33(1):88-99.
- [8] Li X B, Zu G Y, Wang P. High strain rate tensile performance and microstructural evolution of Al/Cu laminated composite under dynamic loading [J]. Materials Science and Engineering A,2014,612:89-95.
- [9] Hoseini A M M, Tolaminejad B. Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding [J]. Materials and Design,2015,86:516-525.
- [10] Liu J A, Shi S Q, Zheng Z B, et al. Characterization and compressive properties of Ni/Mg hybrid foams [J]. Materials Science and Engineering A,2017,708:329-335.
- [11] Alomayri T, Shaikh F U A, Low I M, et al. Effect of fabric orientation on mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites [J]. Materials and Design,2014,57:360-365.
- [12] Wang C, Ma X G, Ma L N, et al. A study on the microstructural evolution of copper/aluminum composite strips fabricated by micro flexible rolling [J]. Materials Characterization, 2023,205:113315.

- [13] 李冠甲,史鸿威,陈延辉,等. 铜铝搅拌摩擦焊接研究[J]. 黑龙江科技信息,2014(27):114-115.
- [14] 赵啸,高恩志,徐荣正. 铜/铝异质金属层状复合板搅拌摩擦焊接技术研究[J]. 稀有金属材料与工程,2022,51(5):1752-1758.
- [15] Bohluli H, Khalili K, Seyedkashi S M H. An investigation on twist extrusion followed by forward extrusion in production of aluminum-copper bimetallic bar [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,2021,33:52-62.
- [16] Pambhar A C, Valaki J B. Experimental studies of formability in single point incremental forming of Cu-Al bimetallic sheets [J]. Materials Today:Proceedings,2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.158>.
- [17] Matsubara S. A computer numerically controlled dieless incremental forming of a sheet metal [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part B:Journal of Engineering Manufacture,2001,215(7):959-966.
- [18] 松原茂夫. 板材の逐次张出し・绞り成形[C]//平成7年度塑性加工春季讲演会论文集. 东京:日本塑性加工学会,1995:209-210.
- [19] 蔡改贫,周小磊,熊洋. 成形角对多点复合渐进成形过程影响的有限元分析[J]. 热加工工艺,2016,45(7):126-134.
- [20] Liu G P, Wang Q D, Zhang L, et al. Effects of melt-to-solid volume ratio and pouring temperature on microstructures and mechanical properties of Cu/Al bimetallics in compound casting process [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019,50(1):401-414.
- [21] Arturo B P, Miguel H, Alba Covelo, et al. Corrosion resistance of hot dip aluminized copper alloys [J]. Advanced Materials Research,2014,976:8-13.
- [22] Chang Q, Xie J, Mao A, et al. Study on interface structure of Cu/Al clad plates by roll casting[J]. Metals,2018,8(10):770.
- [23] 杨金鹏,吴孟武,陆文兴,等. 固液双金属复合铸造工艺及机理研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2020,40(9):964-970.
- [24] Wang J, Zhao F, Xie G, et al. Rolling deformation behaviour and interface evaluation of Cu-Al bimetallic composite plates fabricated by horizontal continuous composite casting [J]. Journal of Materials Processing Tech,2021,298:117296.
- [25] Xie J X, Wu C J, Liu X F, et al. A novel forming process of copper cladding aluminum composite materials with core-filling continuous casting [J]. Materials Science Forum,2007,6:539-543.
- [26] 郑小平,姜龙,李春晓,等. 固/液复合“半固态显微组织/枝晶组织”界面的组织与性能 [J]. 材料科学与工程学报,2020,38(4):585-589.
- [27] Wu Z, Zuo L, Zhang H, et al. Effect of Liquid-solid volume ratio and surface treatment on microstructure and properties of Cu/Al bimetallic composite[J]. Crystals,2023,13(5):794.
- [28] Tian S, Zhao F, Liu Xinhua. Clarification of the solid-state diffusion behavior of a copper alloy/aluminum alloy composite interface assisted by position marking of the second phases[J]. Materials Characterization,2022,192:112173.
- [29] Wang C, Ma L, Ma X, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and tensile properties of copper/ aluminum composite thin strip [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2023,33:701-713.
- [30] Murray J L. The aluminium-copper system [J]. International Materials Reviews,1985,30(1):211-233.
- [31] Kurz W, Fisher D J. 凝固原理[M]. 4版. 李建国,胡侨丹,译. 北京:高等教育出版社,2010.
- [32] Chang Q, Zhang J, Gao P, et al. Study on the phase structure of the interface zone of Cu-Al composite plate in cast-rolling state and different heat treatment temperatures based on EBSD [J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,24:1056-1069.
- [33] Shayanpoor A A, Rezaei Ashtiani H R. Microstructural and mechanical investigations of powder reinforced interface layer of hot extruded Al/Cu bimetallic composite rods[J]. Journal of Manufacturing Processes,2022,77:313-328.
- [34] Mehr V Y, Toroghinejad M R, Rezaeian A. The effects of oxide film and annealing treatment on the bond strength of Al-Cu strips in cold roll bonding process [J]. Materials and Design,2014,53:174-181.
- [35] Kim W N, Hong S I. Interactive deformation and enhanced ductility of tri-layered Cu/Al/Cu clad composite[J]. Materials Science and Engineering A,2016,651:976-986.
- [36] Lee T H, Lee Y J, Park K T, et al. Controlling Al/Cu composite diffusion layer during hydrostatic extrusion by using colloidal Ag [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013,213(3):487.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Li J, Chen F, Wang Y, et al. Effect of Fe and thermal exposure on mechanical properties of Al-Si-Cu-Ni-Mg-Fe alloy [J]. Crystals,2023,13(7):993.
- [40] Tavassoli S, Abbasi M, Tahavvori R. Controlling of IMCs layers formation sequence,bond strength and electrical resistance in Al-Cu bimetal compound casting process [J]. Materials & Design,2016,108:343-353.
- [41] Amiri F S, Hosseinipour S J, Aval H J, et al. Fabrication of a novel high-strength and high-conductivity copper-clad aluminum composite wire[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,2023,41:144-159.

(下转第 16 页)

- [41] Javaherdashti R. Impact of sulphate-reducing bacteria on the performance of engineering materials[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 91(6): 1507-1517.
- [42] Sherar B W A, Power I M, Keech P G, et al. Characterizing the effect of carbon steel exposure in sulfide containing solutions to microbially induced corrosion [J]. Corrosion Science, 2011, 53(3): 955-960.
- [43] Colmer A R, Hinkle M E. The role of microorganisms in acid mine drainage; a preliminary report [J]. Science, 1947, 106(2751): 253-256.
- [44] 胡岳华, 康自珍. 氧化亚铁硫杆菌的细菌学描述 [J]. 湿法冶金, 1996(4): 36-40.
- [45] Nemati M, Harrison S T L, Hansford G S, et al. Biological oxidation of ferrous sulphate by Thiobacillus ferrooxidans; a review on the kinetic aspects [J]. Biochemical Engineering Journal, 1998, 1(3): 171-190.
- [46] Li Y, Ning C. Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling[J]. Bioactive Materials, 2019, 4: 189-195.
- [47] 李松梅, 刘建华, 武海燕, 等. 一种控制腐蚀微生物的新方法——电化学杀菌 [J]. 腐蚀与防护, 2004, 25(6): 256-259.
- [48] 刘靖, 郑家荣, 许立铭. 电场和杀菌剂对杀灭生物膜下硫酸盐还原菌的协同作用 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(1): 23-26.
- [49] 刘丽佳, 余龙江, 何峰, 等. 油田回注水管道微生物杀灭装置及杀菌试验 [J]. 材料保护, 2006, 39(1): 62-64.
- [50] Qi Y, Li J, Liang R, et al. Chemical additives affect sulfate reducing bacteria biofilm properties adsorbed on stainless steel 316L surface in circulating cooling water system[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, 11(2): 1-14.
- [51] 张帆, 刘宏伟, 陈碧, 等. CO₂ 和 SRB 共存产出水中咪唑啉衍生物的环境行为及缓蚀长效性研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(2): 156-162.
- [52] Wang J, Xiong F, Liu H, et al. Study of the corrosion behavior of Aspergillus niger on 7075-T6 aluminum alloy in a high salinity environment [J]. Bioelectrochemistry, 2019, 129: 10-17.
- [53] Xu D, Li Y, Gu T. d-Methionine as a biofilm dispersal signaling molecule enhanced tetrakis hydroxymethyl phosphonium sulfate mitigation of Desulfovibrio vulgaris biofilm and biocorrosion pitting[J]. Materials and Corrosion, 2014, 65(8): 837-845.
- [54] 胥聪敏, 张璇, 冯杰, 等. D- 酪氨酸对 Q235B 钢在硫酸盐还原菌培养基中的杀菌作用及其增强机理 [J]. 材料保护, 2018(11): 6-11.
- [55] 尹路, 徐大可, 杨春光, 等. 银, 铜复合添加对 2205 双相不锈钢耐硫酸盐还原菌腐蚀行为的影响 [J]. 表面技术, 2019, 48(7): 316-323.
- [56] Shi X, Yan W, Xu D, et al. Microbial corrosion resistance of a novel Cu-bearing pipeline steel [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(12): 2480-2491.
- [57] 杨柯, 史显波, 严伟, 等. 新型含 Cu 管线钢——提高管线耐微生物腐蚀性能的新途径 [J]. 金属学报, 2019, 56(4): 385-399.
- [58] Pérez M C. Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies [J]. JOM, 2009(5): 554-571.
- [59] Omae I. General aspects of tin-free antifouling paints [J]. Chemical Reviews, 2003, 103(9): 3431-3448.
- [60] Xie Q, Pan J, Ma C, et al. Dynamic surface antifouling: mechanism and systems[J]. Soft Matter, 2019, 15(6): 1087-1107.
- [61] 孙士美, 王鹏, 张盾. 仿生超滑表面对 Al 基体微生物腐蚀防护性能与机制研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(1): 1-8.
- [62] Yuan G, Lu M, Fei J, et al. Morphologically controllable synthesis of core-shell structured Au·Cu₂O with enhanced photocatalytic activity [J]. RSC Advances, 2015, 88: 71559-71564.
- [63] Zhang X, Wu Y, Wang J, et al. Microstructure, formation mechanism and antifouling property of multi-layered Cu-incorporated Al₂O₃ coating fabricated through plasma electrolytic oxidation[J]. Ceramics International, 2020, 46(3): 2901-2909. 

(上接第 8 页)

- [42] Luo Y, Huang Y, Liu J, et al. Copper coated graphene reinforced aluminum composites with enhanced mechanical strength and conductivity[J]. Vacuum, 2023, 218: 112610.
- [43] Volokitina I, Sapargaliyeva B, Agabekova A, et al. Study of changes in microstructure and metal interface Cu/Al during bimetallic construction wire straining [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e02162.
- [44] Huang T, Xing B, Song K, et al. Thermal and non-thermal effects of Cu/Al laminated composite during electrically assisted tension [J]. Materials Science & Engineering A, 2023, 878: 145237.
- [45] Sharma U, Ahamad N, Ali S, et al. Performing a comparative study of mechanical properties of Al-Cu composite reinforced with or without bimetallic SiC micro-particle [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 52: 1739-1743.
- [46] Li J, Chu F, Feng Y. Effect of atomic diffusion on interfacial heat transfer and tensile property of copper/aluminum composites [J]. Materials Today Communications, 2023, 36: 106757.
- [47] 陈孝凌, 陈志青, 胡波, 等. 具有贯穿结构的铜 / 铝复合材料强化及导热行为 (英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(1): 236-245. 