

# C18150铜/1060铝层状复合材料铸轧工艺优化及组织性能研究

姬佳乐<sup>1</sup>, 柳培<sup>1,2\*</sup>, 王爱琴<sup>1,2</sup>, 毛志平<sup>1,2</sup>, 谢敬佩<sup>1,2</sup>

(1.河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023;

2.有色金属新材料与先进加工技术省部共建协同创新中心, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** **目的** 通过有限元模拟方法探究铸轧过程中铜铝层状复合材料温度场和液相率的演变规律, 确定铸轧过程中的最优走坯速度和浇铸温度, 并制备一种具有高强高导的铜/铝/铜层状复合材料。**方法** 基于 Ansys Workbench 软件中的 Design modeler 模块建立二维模型, 使用 JMatPro 软件模拟 C18150 铜和 1060 铝的热物性参数, 通过 Mesh 模块进行网格划分并利用 Fluent 模块对模型进行求解。通过调整和优化走坯速度和浇铸温度等参数, 研究其对液相率和温度场的影响。制备了高强高导铜/铝/铜层状复合材料, 并通过场发射扫描电镜、电子万能试验机、手持式导电率测试仪和扫描电镜等手段对铜/铝/铜层状复合材料界面的微观组织、抗拉强度、导电率以及拉伸断口进行表征和分析。**结果** 当走坯速度和浇铸温度分别为 1.2 mm/min 和 963 K 时, 铸轧效果最佳, 制备的复合材料界面平整且结合良好, 界面处存在 Al<sub>2</sub>Cu 和 Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> 双界面层。拉伸强度和延伸率分别为 201 MPa 和 16%, 铜侧导电率为 87%IACS, 铜铝断口处均出现了大量韧窝, 表明为韧性断裂。**结论** 通过优化铸轧工艺参数制备的铜/铝/铜层状复合材料具有优异的强度和导电率。

**关键词:** 铜铝复合材料; 铸轧工艺; 数值模拟; 显微组织; 性能

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.10.008

**中图分类号:** TG335 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)10-0067-08

## Cast-rolling Process Optimization, Microstructure and Properties of C18150 Copper/1060 Aluminum Layered Composites

Ji Jia-le<sup>1</sup>, Liu Pei<sup>1,2\*</sup>, Wang Ai-qin<sup>1,2</sup>, Mao Zhi-ping<sup>1,2</sup>, Xie Jing-pei<sup>1,2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Henan Luoyang 471023, China;

2. Provincial and Ministerial Co-construction of Collaborative Innovation Center for Non-ferrous Metal New Materials and Advanced Processing Technology, Henan Luoyang 471023, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the evolution of temperature field and liquid phase rate during the cast-rolling process of copper aluminum layered composites by finite element simulation, determine the optimal billet speed and casting temperature during the cast-rolling process, and prepare copper/aluminum/copper composites with high-strength and high-conductivity. Based on the Design modeler module in Ansys Workbench software, a two-dimensional model was established. JMatPro

收稿日期: 2023-08-12

Received: 2023-08-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB3701300)

Fund: National Key Research and Development Plan (2021YFB3701300)

引文格式: 姬佳乐, 柳培, 王爱琴, 等. C18150铜/1060铝层状复合材料铸轧工艺优化及组织性能研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(10): 67-74.

Ji Jia-le, Liu Pei, Wang Ai-qin, et al. Cast-rolling Process Optimization, Microstructure and Properties of C18150 Copper/1060 Aluminum Layered Composites[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(10): 67-74.

software was used to simulate the thermal physical parameters of C18150 copper and 1060 aluminum. The model was solved by meshing with Mesh module and solving with Fluent module. Its effects on the liquid phase rate and temperature field were investigated by adjusting and optimizing the parameters of walking speed and casting temperature. High-strength and high-conductivity copper/aluminum/copper layered composites were prepared with this cast-rolling process. The microstructures, tensile strength, conductivity and tensile fracture of the copper/aluminum/copper layered composites interfaces were characterized and analyzed by a field emission scanning electron microscopy (FESM), an electronic universal testing machine (EUTM), a hand-held conductivity tester (HECT), and a scanning electron microscopy (SEM). The best cast-rolling results were obtained when the walking speed and casting temperature were about 1.2 mm/min and 963 K, respectively, and the prepared composites had flat and well-bonded interfaces, with  $\text{Al}_2\text{Cu}$  and  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$  double interfacial layers at the interfaces. The tensile strength and elongation were 201 MPa and 16%, respectively, and the average electrical conductivity on the copper side was 87% IACS, and a large number of tough nests appeared at the copper-aluminum fracture, which indicated that it was a toughness fracture. It is concluded that the copper/aluminum/copper layered composites prepared by optimizing the parameters of the casting and rolling process have excellent strength and electrical conductivity.

**KEY WORDS:** copper-aluminum composite; cast-rolling process; numerical simulation; microstructure; properties

铜铝层状复合材料作为一种先进的结构功能一体化复合材料,结合了铜强度高、导电导热性能良好以及铝质轻价廉、塑韧高等特点<sup>[1-2]</sup>。通过控制生产工艺使铜铝在界面处实现冶金结合,能够使铜和铝在性能方面产生显著的协同效应,并且大幅降低生产成本,达到“以铝代铜”的目的<sup>[3-6]</sup>。目前,铜铝层状复合材料在航空航天、电力电气、5G通信和交通运输等领域有着广阔的应用前景。

当前铜铝层状复合材料的制备方法主要有轧制复合法、铸轧复合法、爆炸复合法等。铸轧复合法结合了铸造复合的高温 and 轧制复合的高压,具有节能高效、性能优良等特性<sup>[7-10]</sup>。然而,铸轧工艺参数对材料制备影响较大,采用有限元模拟可以有效优化工艺参数,降低生产成本,为工业生产应用提供有效的技术指导。目前,针对铜铝层状复合材料已经开展了大量模拟仿真研究<sup>[11-14]</sup>。叶丽芬<sup>[15]</sup>对稳态热固模型进行了二次开发,建立了热-力变形耦合有限元模型,获取了复合带坯界面处的温度和应力分布情况,并分析了初始温度和压下率对铜铝复合界面接触换热、应力和温度分布的影响。Chang等<sup>[16]</sup>建立了半熔态铸轧铜铝复合板有限元模型,以铸轧速度、浇铸温度、铸轧区长度和铜铝层厚比为变量进行了模拟仿真,并通过铸轧实验验证了仿真结果的可靠性,制备了性能良好的铜铝层状复合板。Chen等<sup>[17]</sup>以卧式铸轧机铸嘴为研究对象,分析了不同铸嘴结构对铝液流动状态和出口速度分布的影响,并通过改变分流块之间的间隙,对铸嘴结构进行了优化,提高了铸嘴流出铝液的均匀性。

以上仅对单层的纯铜纯铝铸轧复合工艺开展了模拟研究,而纯铜和纯铝单层复合材料已经不能完全满足新一代高端装备和5G通信等应用领域的高强度高导电需求<sup>[18]</sup>。相关研究表明,采用高强度高导的C18150铜合金可以有效提高铜铝层状复合材料的强度和导电性,且铜层和铝层的协同变形机制有利于提高铜铝

复合材料的整体塑性,有望满足高端领域对材料强度和导电率的要求<sup>[19-20]</sup>。然而,以往报道主要集中在纯铜纯铝复合材料的工艺及性能研究,关于上述高导电高导铜/铝/铜层状复合材料铸轧工艺优化数值模拟的研究尚未报道<sup>[21-22]</sup>。

基于以上问题,本文通过Fluent建立高导电高导铜-铝-铜复合材料二维稳态层流有限元模型,使用JMatPro软件模拟铜合金和铝合金的热物性参数,通过调整和优化走坯速度和浇注温度等参数,研究其对液相率和温度场的影响,基于模拟结果,确定最佳铸轧工艺参数,并结合实验加以验证,以期对铜铝复合材料的性能优化和工业应用提供指导。

## 1 数值模拟及实验方法

### 1.1 数值模型建立

#### 1.1.1 物理模型

本文主要使用流动模型、凝固和熔化模型以及能量模型,复合材料铸轧过程主要包括能量传递、质量传递和热量传递3种物理传递过程。根据流动状态,可将流体分为湍流、层流和过渡流,通过计算雷诺数可知,本文的流动状态为层流,故选择层流模型,凝固和熔化模型选用“焓-多孔度”模型,根据凝固和熔化模型,能量传递方程如式(1)所示。式(1)左边为输入能量,右边为输出能量。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla(\rho \vec{v}) = \nabla(k \nabla T + S) \quad (1)$$

式中: $H$ 为焓; $\rho$ 为密度; $\vec{v}$ 为铝液的速度; $S$ 为广义源项; $T$ 为温度; $t$ 为时间; $k$ 为热传导系数。

#### 1.1.2 几何模型

复合材料铸轧几何模型的宏观和局部示意图如

图 1 所示。几何模型通过 Ansys Workbench 中的 Design modeler 模块建立, 铸轧几何模型的宏观特征从上至下依次为上轧辊、上铜带、铝液熔池、下铜带和下轧辊, 通过 Mesh 软件进行网格划分。在图 1b 中, 1 和 2 分别为上轧辊和上铜带的接触边界, 3 和 4 分别为铜带和铝液的接触边界, 5 和 6 分别为铝液的进口和出口, 7 和 8 分别为铸嘴和铝液入口的边界。辊套的外径和内径分别为 1 003 mm 和 843 mm, 铜带的厚度为 2 mm, 铝出口处高度为 10 mm。模型的坐标原点在铸轧区出口边界区域, 水平方向和垂直方向分别为  $x$  轴和  $y$  轴。

### 1.1.3 材料参数

采用 C18150 铬铜合金和 1060 铝作为模拟实验材料, 使用的轧辊滚轮材料为 32Cr3Mo1V, 1060 铝的结晶潜热为 393.56 J/g, 其液态下的黏度为  $1.18 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。使用 JMatPro 软件模拟材料的化学成分和热物性参数, 如表 1 所示, 其中  $c_m$  为比热系数,  $\lambda$  为导热系数,  $\mu$  为液体黏度。

### 1.1.4 边界条件

在划分网格之后和求解之前, 边界条件的设定会影响仿真的成功与否, 在铜/铝/铜复合材料铸轧过程中, 在强度高导铜带和上下轧辊之间、铝和铜带之间均存在接触传热, 均属于热传导过程, 遵循傅里叶传热定律, 如式 (2) 所示, 其中“-”表示热量从高温向低温传递。

$$q' = -K \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

式中:  $q'$  为热流密度;  $K$  为导热系数;  $T$  为温度;  $x$  为导热面坐标。

上下轧辊的表面和冷却水的换热为自然对流换热, 自然对流换热过程遵循牛顿冷却方程, 如式 (3) 所示。

$$K_1 \frac{dT}{dx} = h_w (T - T_B) \quad (3)$$

式中:  $K_1$  为辊套导热系数;  $h_w$  为对流换热系数;  $T_B$  为循环冷却水温度。  $h_w$  可以通过式 (4) 计算。

$$\frac{h_w D}{k_w} = 0.023 \left( \frac{D v_w}{\eta} \right)^{0.8} \left( \frac{c_w \eta}{k_w} \right)^{0.4} \quad (4)$$

式中:  $D$  为冷却水槽的当量直径;  $k_w$  为冷却水的导热系数;  $v_w$  为冷却水流量;  $c_w$  为冷却水的比热容;  $\eta$  为冷却水黏度。

除了接触传热, 每个边界和区域均存在热辐射, 在本次模拟中, 热辐射的值均较小, 对本次模拟的影响可以忽略不计, 所以不考虑热辐射对模拟的影响。在模拟时将边界接触设置为耦合接触, 铸轧区域和铜带边界接触热阻为  $0 \text{ m}^2/(\text{K} \cdot \text{W})$ , 并将其他壁面均设为绝热壁面, 热交换的系数为  $0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 铜带的初始温度为 300 K, 通过外界边界条件进行设置。

### 1.1.5 仿真的基本假设

铸轧实验是浇铸的铝液和铜带在压力、张力和温度等多种作用下使铜铝复合板冶金结合、凝固和传热的过程, 极为复杂, 因此选择稳态模型。为了减少计算量, 提高模拟的计算速度, 本模拟进行如下假设: 1) 将 1060 铝液视作不可压缩的牛顿流体, 且流体流动状态稳定; 2) 不考虑铜带在铸轧过程中的受力和变形; 3) 将每个计算域之间的接触设置为耦合接触; 4) 忽略铸轧过程中界面层形成的金属间化合物对铸轧过程的影响; 5) 由于铸轧过程中横向的长度远大

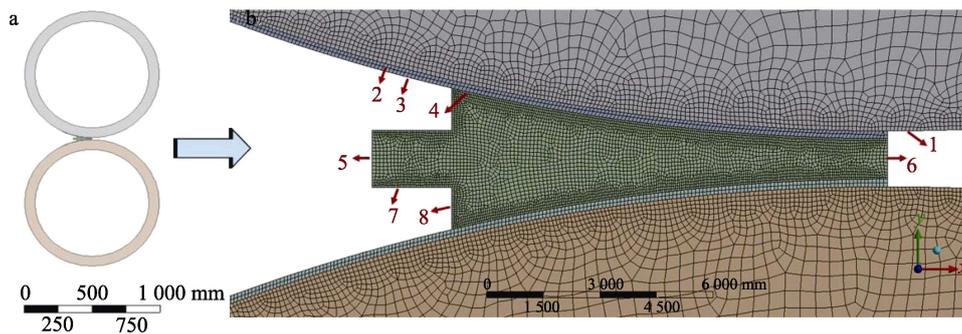


图 1 复合材料铸轧几何模型的宏观 (a) 和局部示意图 (b)  
Fig.1 Macroscopic (a) and local (b) schematic diagrams of cast-rolling geometry model of composites

表 1 材料热物性参数  
Tab.1 Thermophysical parameters of materials

Material	Physicstate	$c_m/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
1060 Al	Liquidus	1 046	2 638	90.7
	Solidus	1 138	2 719	218
Roll sleeve	Solidus	540	7 800	30
C18150 Cu	Solidus	386	8 720	389

于纵向长度,因此不考虑侧封部位的传热,并简化为二维模型。

## 1.2 实验方法

选用 400 mm×200 mm×2.5 mm 的 C18150 铜板和 1060 工业纯铝作为实验材料,采用水平式双辊铸轧实验机进行铸轧实验。制备方法如下:首先对铜板表面进行抛光打磨、清理等预处理;其次将工业纯铝加热至 963 K,铜带预热温度设为 300 K;最后在 1.2 mm/min 的走坯速度下进行铸轧生产。

采用配有能谱仪的场发射扫描电镜 (SEM, JSM-2100) 对复合材料的界面形貌和元素分布进行系统分析,在日本岛津公司生产的电子万能试验机 (ZUAG-I250 KN) 上完成室温拉伸实验。根据 GB/T 228.1—2010 进行拉伸实验,试样尺寸如图 2 所示,拉伸速率为 0.3 mm/min。为了保证实验的准确性,进行重复实验 3 次,然后取平均值作为测试结果。导电率测试设备为手持式导电率测试仪 (Sigma 2008 B1),使触头和经过砂纸打磨的铜两侧表面接触并施加微力,即可获得导电率,在铜侧表面每隔 1 cm 测量一组导电率,共测量 10 组数据。使用扫描电子显

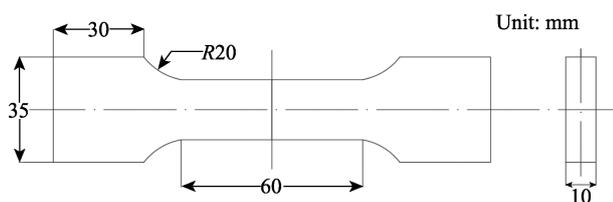


图 2 铜铝铜复合材料拉伸试样  
Fig.2 Tensile specimen of Cu-Al- Cu composite

微镜 (SEM, JSM-IT100) 对试样断口处的形貌进行观察和分析。

## 2 仿真结果分析

### 2.1 走坯速度对铸轧过程的影响

田捍卫等<sup>[23]</sup>通过正交模拟对铸轧工艺的影响因素进行了分析,结果表明,铝液在凝固时受走坯速度的影响较大。故本节首先探究不同走坯速度对铸轧过程的影响。已有研究表明,当走坯速度为 0.8~1.4 mm/min 时,可以获得结合致密且性能优良的铜铝复合材料<sup>[24]</sup>。

在浇铸温度为 943 K 和预热温度为 300 K 条件下,不同走坯速度 (0.8~1.4 mm/min) 的液相率和温度场的模拟结果如图 3 所示。不同走坯速度下液相率的模拟结果如图 3a~d 所示,可以看到,随着走坯速度的增大,完全凝固点向铸轧区后侧移动,且液相区长度增大,更多的铝液进入铸轧区,铸轧区中半固态铝的宽度也随之增大。不同走坯速度下温度场的模拟结果如图 3e~h 所示。可以看到,随着走坯速度的增大,温度场的温度明显升高,当走坯速度从 0.8 mm/min 增大至 1.4 mm/min 时,出口处温度从 622 K 左右升高至 782 K 左右。当走坯速度较快时,会造成熔融的铝从出口流出,产生漏液的现象;当走坯速度较慢时,接触时间较长,铜铝界面换热较多,会引起铜带表面过烧和铜带起泡。当走坯速度为 1.2 mm/min 时,铜铝界面结合处的温度约为 800 K,铝液为半固态,界面铸轧复合效果良好,故本文的最佳走坯速度为 1.2 mm/min。

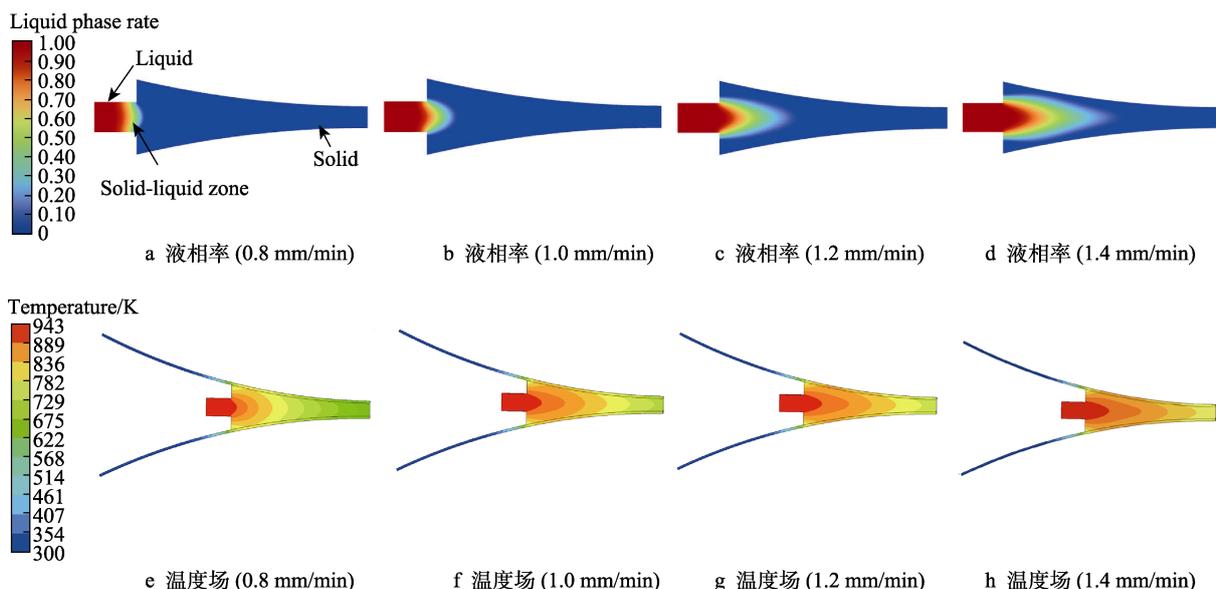


图 3 943 K 时不同走坯速度的液相率和温度场

Fig.3 Liquid phase ratio and temperature field at different billet speeds at 943 K: a) liquid phase rate (0.8 mm/min); b) liquid phase rate (1.0 mm/min); c) liquid phase rate (1.2 mm/min); d) liquid phase rate (1.4 mm/min); e) temperature field (0.8 mm/min); f) temperature field (1.0 mm/min); g) temperature field (1.2 mm/min); h) temperature field (1.4 mm/min)

## 2.2 浇铸温度对铸轧过程的影响

由裴清华<sup>[24]</sup>的研究结果可知, 当浇铸温度为 923~983 K 时, 铸轧效果良好。在走坯速度为 1.2 mm/min 和预热温度为 300 K 条件下, 不同浇铸温度 (923~983 K) 下的液相率和温度场模拟结果如图 4 所示。由图 4a~d 可知, 随着浇铸温度的升高, 在长度方向上半固态区域有细微的扩大, 但变化不明显, 而在宽度方向上有明显的扩宽。这是由于在一定的走坯速度下, 上下轧辊带动铝液移动的速度不变, 而较高温度的铝液向轧辊方向传热, 导致半固态区域宽度方向扩宽。由图 4e~h 可知, 与走坯速度产生的影响相比, 随着浇铸温度的升高, 温度场的温度变化不明显。当浇铸温度为 923 K 和 943 K 时, 铝液

会在铸嘴处凝固, 对铸嘴的寿命造成损害, 并且需要更大的轧制力, 使轧制区变形不均匀。当浇铸温度达到 983 K 时, 虽然提高了铜铝原子的扩散程度, 但过冷度降低, 也会造成晶粒粗大和力学性能降低。基于上述模拟结果, 本文确定最佳浇铸温度为 963 K 左右。

## 3 组织及性能分析

### 3.1 微观组织

基于以上模拟确定的最佳工艺参数, 制备了铜/铝/铜层状复合材料。铸轧复合材料的组织形貌如图 5 所示。可以看出, 铸轧制备的复合材料界面平整, 且

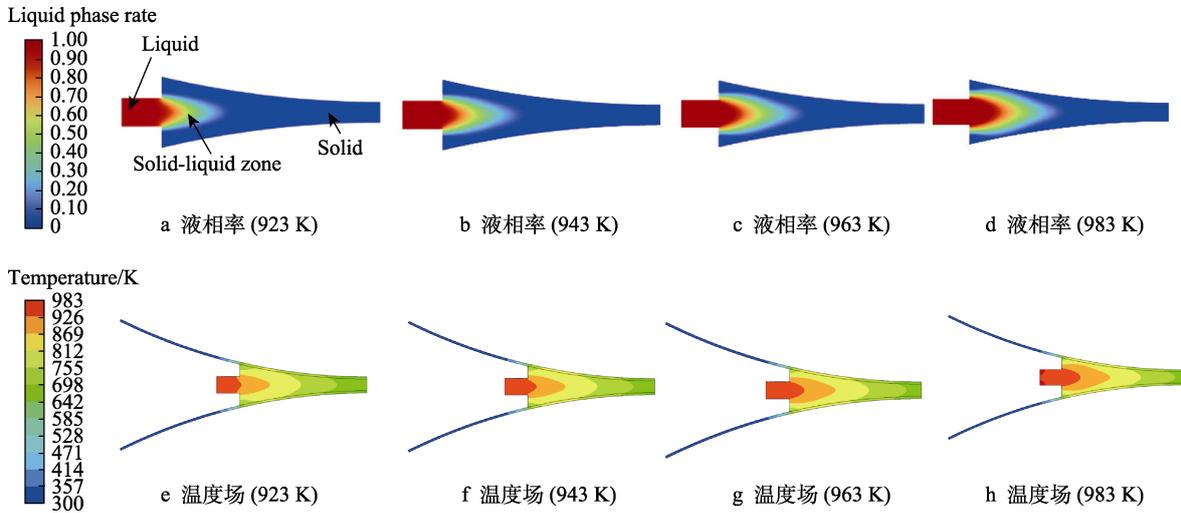


图 4 1.2 mm/min 时不同浇铸温度的液相率和温度场

Fig.4 Liquid phase ratio and temperature field at different casting temperatures at 1.2 mm/min: a) liquid phase rate (923 K); b) liquid phase rate (943 K); c) liquid phase rate (963 K); d) liquid phase rate (983 K); e) temperature field (923 K); f) temperature field (943 K); g) temperature field (963 K); h) temperature field (983 K)

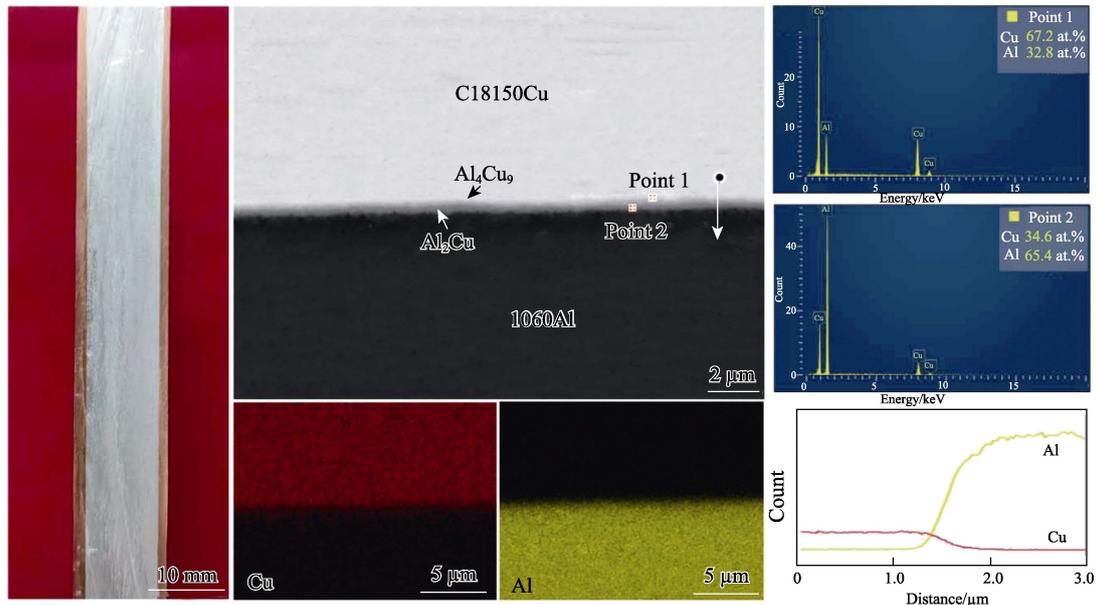


图 5 铜铝复合材料的组织形貌和能谱图

Fig.5 Microstructure and energy spectrum of copper-aluminum composite

结合良好。观察复合材料的 SEM 形貌可知, 界面处没有明显的孔洞和杂质缺陷, 扩散产生的科肯达尔效应较弱, 并产生了约  $0.8\ \mu\text{m}$  的界面层, 铜铝两侧的界面线光滑, 冶金状态较好, 有利于后期加工和热处理。为确定界面层的成分, 对复合材料进行能谱分析。由面扫描分析结果可知, 上侧均为铜侧, 而下侧均为铝侧, 在铜层和铝层之间存在铜铝共存的区域, 为铜铝界面层。由元素点扫描分析结果可以看出, 点 1 和点 2 处铝原子和铜原子的原子比分别接近 4:9 和 2:1。元素线扫描图显示, 从铜侧至铝层, 铜元素含量逐渐减少而铝元素与之相反。基于以上分析, 可以确定界面分为 2 层, 靠近铜的界面层为  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ , 靠近铝的界面层为  $\text{Al}_2\text{Cu}$ 。

### 3.2 拉伸及导电性能

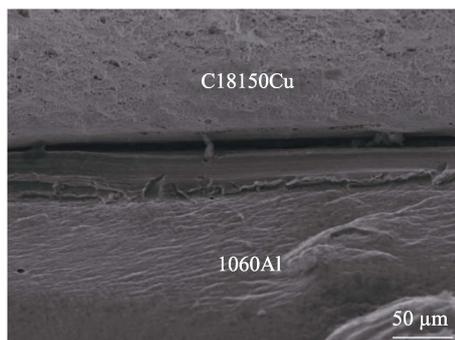
对制备的铸轧态铜/铝/铜复合材料、C18150 铜和 1060 铝进行拉伸性能测试, 结果如图 6 所示。可以看出, 铜/铝/铜复合材料的抗拉强度为 201 MPa, 延伸率为 16.2%。单层 C18150 铜的抗拉强度和延伸率分别为 385 MPa 和 14.9%, 1060 铝的抗拉强度和延伸率分别为 90 MPa 和 31%。此外, 理论复合材料强度可以通过复合材料混合定律 (ROM) 计算, 如式 (5) 所示。

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (5)$$

式中:  $\sigma_1$  为复合板抗拉强度;  $\sigma_f$  为增强板抗拉强度;  $V_f$  为增强板体积分数;  $\sigma_m$  为基板抗拉强度。

在铜铝复合材料中, 铜的体积分数约为 34.5%, 铝的体积分数约为 65.5%。通过计算可知, 理论复合材料强度为 194 MPa, 低于复合材料抗拉强度, 表明铜铝之间存在界面协同强化作用, 提高了铜铝复合材料的强度。

铸轧态铜/铝/铜复合材料中铜侧的导电性能如图 7 所示。由于导体具有“集肤效应”, 在导体中的交变电流分布不均匀, 且越靠近导体表面, 电流密度越大, 所以电流主要从铜的表面经过, 因此将铜侧导电率视为复合板的导电率。从图 7 可以看出, 复合材料铜侧导电率约为 87% IACS, 满足对铜铝复合材料高导电率的要求。



a 断口宏观形貌

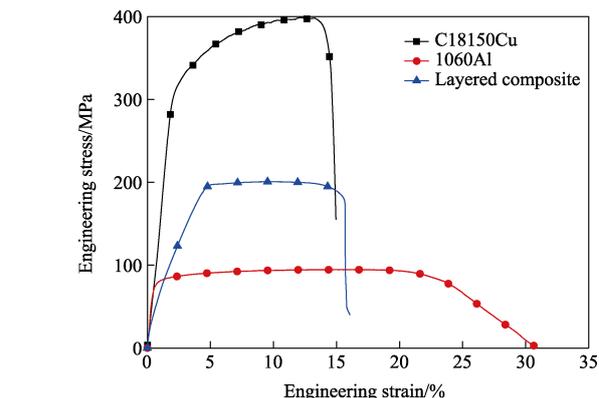


图 6 铜铝复合材料的应力-应变曲线

Fig.6 Stress and strain curves of copper-aluminum composites

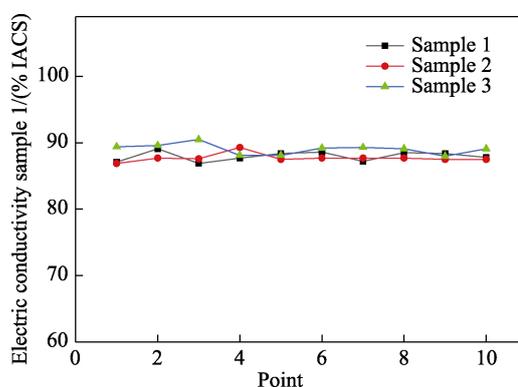
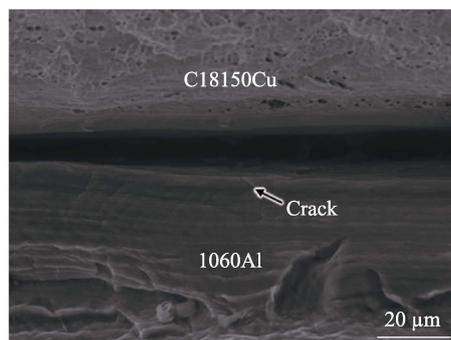


图 7 铜铝复合材料的导电性能

Fig.7 Electrical conductivity of copper-aluminum composites

### 3.3 断口形貌分析

对制备的铸轧态复合材料断口进行分析, 其断口形貌如图 8 所示。从图 8a 可以看出, 复合材料在结合处发生断裂, 上侧为 C18150Cu, 下侧为 1060Al。从图 8b 可以看到, 在 Al 侧萌生了大量裂纹, 并且裂纹向界面层处扩展, 当扩展到界面层时即停止扩展。从图 8c 可以看到大量韧窝, 韧窝尺寸相对较小, 且韧窝分布不均匀, 说明 C18150 铜具有较高的强度和塑性, 且断裂方式为韧性断裂。从图 8d 可以明显看到, 在铝侧断口处存在大而深的韧窝, 且 Al 侧的韧窝尺寸明显大于铜侧的, 表明铸态 1060 铝比 C18150 铜的塑性更强, 在层状复合材料中, Al 的存在可以在极大程度上提高复合材料的塑性。



b 断口处附近细节形貌

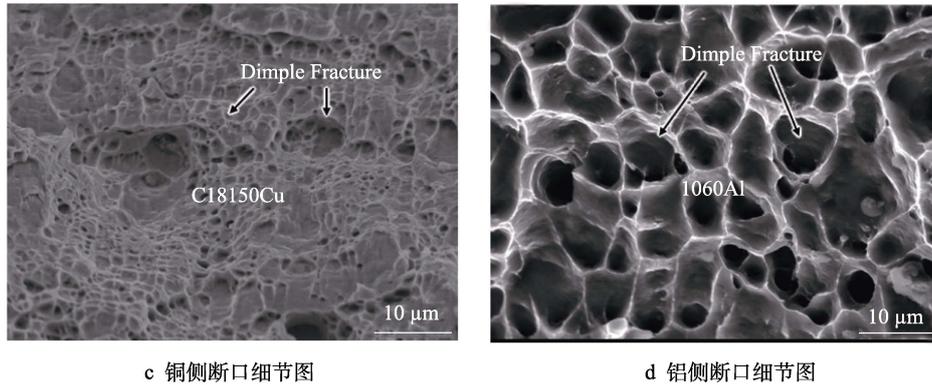


图 8 铜铝复合材料的拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphology of copper-aluminum composites: a) macroscopic feature; b) detail feature near the fracture; c) detail of copper side fracture; d) detail of aluminum side fracture;

## 4 结论

1) 当走坯速度较快时,会产生熔融的铝漏液的现象;当走坯速度较慢时,铸轧接触时间较长,会引起铜带表面过烧和起泡,最佳铸轧走坯速度为 1.2 mm/min。

2) 当浇铸温度较低时,铝液会在铸嘴处凝固,对铸嘴的寿命造成损害并产生轧制区变形不均匀等缺陷。当浇铸温度较高时,过冷度降低,造成晶粒粗大和力学性能下降。因此,确定最佳浇注温度为 963 K。

3) 基于模拟结果,采用铸轧工艺制备的铜/铝/铜层状复合材料的界面结合良好,具有  $Al_2Cu$  和  $Al_4Cu_9$  的双界面层。

4) 制备的复合材料具有优异的抗拉强度和延伸率,其分别达到 201 MPa 和 16%,并具有良好的导电性能,铜侧的导电率约为 87%IACS,能够满足铜铝复合材料高强高导的需求。

5) 铜和铝在拉伸过程中均发生了韧性断裂,且断口处均存在大量韧窝,在铝的断口处产生了更大的韧窝,说明铝的韧性好于铜的,铝对提高复合材料韧性起到了重要作用。

### 参考文献:

[1] 王宇,王艳坤,李金龙,等.热扩散制备高导电性铜/铝双金属复层材料及界面组织性能调控研究[J].精密成形工程,2022,14(5):68-74.  
WANG Yu, WANG Yan-kun, LI Jin-long, et al. Preparation of High Conductivity Cu/Al Bimetallic Composite by Thermal Diffusion and Regulation of Interfacial Microstructure and Properties[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(5): 68-74.

[2] BIAN X Q, WANG A Q, XIE J P, et al. Atomic-scale Deformation Mechanisms of Nano-polycrystalline Cu/Al Layered Composites: A Molecular Dynamics Simula-

tion[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 1177-1189.

[3] JIANG W M, GUAN F, LI G Y, et al. Processing of Al/Cu Bimetal via a Novel Compound Casting Method[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(9): 1016-1025.

[4] FU Y, ZHANG Y B, JIE J C, et al. Interfacial Phase Formation of Al-Cu Bimetal by Solid-liquid Casting Method[J]. China Foundry, 2017, 14: 194-198.

[5] 张楠. 新能源产业发展背景下我国铜资源供需现状与趋势[J]. 中国矿业, 2023, 32(6): 2-9.  
ZHANG Nan. Analysis of Supply and Demand Status and Trend of Copper Resources in China under Development Back Ground of New Energy Industry[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(6): 2-9.

[6] LIU G P, WANG Q D, ZHANG L, et al. Effect of Cooling Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of Cu/Al Bimetal Fabricated by Compound Casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2018, 49(2): 661-672.

[7] HANIF M W, WASIM A M, SAJIA, et al. Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Squeeze Overcast Al7075-Cu Composite Joints[J]. China Foundry, 2023, 20: 29-39.

[8] 吕世敬, 谢敬佩, 王爱琴, 等. 铜铝复合材料研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(8): 844-849.  
LYU Shi-jing, XIE Jing-pei, WANG Ai-qin, et al. Research Progress of Copper/aluminum Composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(8): 844-849.

[9] CHANG Q H, ZHANG J Y, GAO P K, 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.

[10] WANG J, ZHAO F, XIE G L, 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.
- [11] MAO Z P, XIE J P, WANG A Q, et al. Effects of Annealing Temperature on the Interfacial Microstructure and Bonding Strength of Cu/Al Clad Sheets Produced by Twin-roll Casting and Rolling[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2020, 285: 116804.
- [12] 刘新华, 付华栋, 何兴群, 等. Cu-Al 复合材料连铸直接成形数值模拟研究[J]. 金属学报, 2018, 54(3): 470-484.
- LIU Xin-hua, FU Hua-dong, HE Xing-qun, et al. Numerical Simulation Analysis of Continuous Casting Cladding Forming for Cu-Al Composites[J]. Acta Metallica Sinica, 2018, 54(3): 470-484.
- [13] ZHANG J H, WANG A Q, LIANG T T, et al. The Prediction of Al<sub>2</sub>Cu/Cu Interfacial Structure and Properties: A First-Principles Study[J]. Physica B: Condensed Matter, 2023, 661: 414931.
- [14] 谢文芳, 谢敬佩, 王爱琴, 等. 铜铝铸轧复合板复合过程数值模拟及机理研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1294-1297.
- XIE Wen-fang, XIE Jing-pei, WANG Ai-qin, et al. Numerical Simulation and Mechanism of the Casting-rolling Copper-aluminum Clad Plate[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(12): 1294-1297.
- [15] 叶丽芬. Cu/Al 复合板单机双流铸轧复合界面多尺度模拟与实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015: 12-17.
- YE Li-fen. Multi-scale Simulation and Experimental Study of Cu/Al Composite Plate Single-Machine Double-flow Cast-rolling Composite Interface[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015: 12-17.
- [16] CHANG Q H, GAO P K, ZHANG J Y, et al. Numerical Simulation of Copper-Aluminum Composite Plate Casting and Rolling Process and Composite Mechanism[J]. Materials, 2022, 15: 8139.
- [17] CHEN Y, WANG A Q, TIAN H W, et al. Study on Optimization of Nozzle for Copper-aluminium Clad Plate Twin-roll Cast-Rolling[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 1075-1085.
- [18] 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.
- YAN Hao. Research and Application Progress of Copper/Aluminum Composites[J]. World Nonferrous Metals, 2022(6): 171-173.
- [19] 代雪琴, 贾淑果, 范俊玲, 等. 高强高导铜合金的强化机理与研究热点[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(10): 18-26.
- DAI Xue-qin, JIA Shu-guo, FAN Jun-ling, et al. Strengthening Mechanism and Research Hotspot of High Strength and High Conductivity Copper Alloys[J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2021, 42(10): 18-26.
- [20] KIM W N, HONG S I. Interactive Deformation and Enhanced Ductility of Tri-layered Cu/Al/Cu Clad Composite[J]. Materials Science & Engineering: A, 2016, 651: 976-986.
- [21] 毛志平. 铜铝铸轧复合板界面结构演变及结合性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019: 35-39.
- MAO Zhi-ping. Study on Interfacial Structure Evolution and Bonding Property of Copper/Aluminum Clad Sheet Produced by Twin-Roll Casting[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019: 35-39.
- [22] LI J, GAO H T, KONG C, et al. Insight into the Bonding Mechanism in Cu/Al/Cu Clad Sheets via Introduction of Thin SUS304 Interlayer[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 4619-4635.
- [23] 田捍卫, 王爱琴, 谢敬佩, 等. 铜铝复合板铸轧工艺优化及实验分析[J]. 材料导报, 2019, 33(10): 1706-1711.
- TIAN Han-wei, WANG Ai-qin, XIE Jing-pei, et al. Optimization of Cast-Rolling Process of Copper Aluminum Composite Plate and Experimental Analysis[J]. Materials Reports, 2019, 33(10): 1706-1711.
- [24] 袁清华. 铜铝半熔态铸轧复合板组织演变与强韧化机制[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022: 33-38.
- CHANG Qing-hua. Microstructure Evolution and Strengthening and Toughening Mechanism of Cu-Al Semi-molten Cast-rolled Composite Plate[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022: 33-38.

责任编辑: 蒋红晨