

热处理对铜/钢/铜复合板界面元素扩散及力学性能影响研究

Effect of Heat Treatment on Interfacial Element Diffusion and Mechanical Properties of Copper/Steel/Copper Clad Plates

供稿|郝敏¹, 向多伦², 孟新茹¹, 胡智中¹, 宋文冰¹, 张紫玥¹, 方程¹, 李博新¹, 周克容²/HAO Min¹, XIANG Duolun², MENG Xinru¹, HU Zhizhong¹, SONG Wenbing¹, ZHANG Ziyue¹, FANG Cheng¹, LI Boxin¹, ZHOU Kerong²

内容导读

铜/钢/铜复合板兼具铜的优良导电、导热性能和钢的高强度特性,在能源、军事等领域具有广阔的应用前景。本文对采用轧制复合法制备的铜/钢/铜复合板进行不同温度(600、640、680℃)和不同时间(3、5、7h)的热处理,系统研究了热处理工艺对界面元素扩散行为及复合板力学性能的影响。通过扫描电子显微镜、透射电子显微镜等手段观察界面微观结构,结合硬度测试和拉伸实验评估力学性能。结果表明:随着热处理温度升高或保温时间延长,铜与铁元素在界面的相互扩散区逐渐扩大;但在本实验参数范围内,热处理条件的改变并未显著影响复合板的整体力学性能。综合来看,在600℃保温3h的热处理条件下,复合板的塑性显著提升,强度保持稳定,综合性能最优。

随着我国经济的高速发展,兼具性能优异与良好经济特性的材料受到广泛关注。铜/钢复合板能够节约铜材料,在发挥铜材料减磨特性的同时兼具钢的高强度优势,在军事及能源领域具有广阔的应用前景^[1-3]。

目前,爆炸复合法是制备铜/钢复合板的主流方法^[4-5]。研究者使用该方法制备了铜/高氮钢复合板,结果显示:铜/钢界面呈现典型的波浪形,在波峰和波谷位置形成漩涡;界面存在熔化区域;铜、钢的

爆炸复合是压力、熔化-凝固、扩散作用共同驱动的结果^[6]。其他研究者对铜/钢/铜爆炸复合板的研究结果显示:铜/钢界面存在元素浓度急剧变化区、扩散区、局部熔化区3个典型区域,其中局部熔化区可观察到 $\alpha+\epsilon$ 相混合固溶体及各种尺寸的钢颗粒^[7]。综上所述,铜、钢爆炸复合过程中,由于高温、高压的作用,界面不可避免会形成局部熔化区,该区域相组成复杂且相性能差异较大,在后续的塑性变形过程中会成为微裂纹萌生的源头,从而削弱复合板

作者单位:1. 西安工程大学, 陕西 西安 710048; 2. 重庆长江电工工业集团有限公司, 重庆 401336

整体的力学性能；同时，爆炸复合法生产条件恶劣，所制板材尺寸受限。

轧制复合法是制备复合板的另一种方法^[8]，可生产大尺寸板材，且现有轧机可满足工艺要求。与爆炸复合法相比，轧制复合法能调控加工温度，从而控制铜/钢界面元素扩散行为，最终控制铜/钢复合板的力学性能。轧制态的铜/钢复合板强度较高，塑性较差，导致塑性变形能力差，因此通常需经热处理提升塑性，有利于塑性变形。研究者对铜/钢复合板进行 620 °C、20 h 的热处理，发现其抗拉强度从 336.6 MPa 降至 224.6 MPa，但塑性得到显著增强^[9]，可见热处理后的铜/钢复合板在保留一定强度的同时兼具较好的塑性变形能力。

本文对轧制复合法得到的铜/钢/铜复合板进行不同温度、不同时间的热处理实验，研究热处理工艺参数对复合板界面元素扩散情况及力学性能的影响，以期获得最佳的热处理工艺参数，为实际生产提供理论依据。

实验材料与方法

实验选择铜锌合金（黄铜）及无间隙原子钢作为原材料，铜锌合金化学组成（质量分数）为 Zn 22%，Cu 78%；钢的化学组成见表 1。

表 1 无间隙原子钢化学组成（质量分数） %

C	N	Ti	Fe
0.004	0.004	0.050	其余

采用线切割机将 0.6 mm 厚铜板和 3.8 mm 厚钢板切割成 100 mm×50 mm 的矩形样品，先用砂纸打磨板材待复合表面，然后用无水乙醇冲洗板材并烘干。如图 1 所示，板材按照铜、钢、铜的顺序叠放，并用铜丝在一端捆绑固定。轧制复合在室温条件下进行，轧辊间隙依次设置为 3、2、1 mm。经

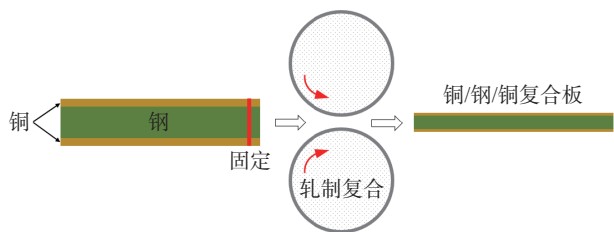


图 1 轧制复合法制备铜/钢/铜复合板示意

3 道次轧制后，得到厚度为 1 mm 的铜/钢/铜复合板（铜层厚 100 μm、钢层厚 800 μm）。

将制得的复合板置于充满氩气的管式炉中，分别进行不同温度（600、640、680 °C）、不同时间（3、5、7 h）的热处理。下文用热处理温度及时间命名不同样品，如 600-3 代表 600 °C 下保温 3 h。

使用 DK-320T 型线切割机（泰州市精工机电制造有限公司）将铜/钢/铜复合板切割成适于表征的小尺寸样品，依次用 180#、400#、800#、1500#、3000# 砂纸打磨样品表面，随后用粒度为 0.25 μm 的金刚石抛光膏进行抛光。采用 JSM-7900F 型扫描电子显微镜（SEM，JEOL）观察样品界面，加速电压为 20 kV，借助配备的能谱仪表征界面元素扩散情况；通过 G4 CX 型聚焦离子束（FIB，Helios）系统，在铜/钢界面切割适合 F20 型透射电子显微镜（TEM，TESCAN）表征的样品薄片，利用 TEM 观察界面的精细结构，加速电压为 200 kV；使用 MH-3 型维氏硬度计（上海研润光机科技有限公司）检测样品铜层和钢层的硬度；采用 5205X 型万能试验机（深圳三思试验设备有限公司）对样品进行拉伸实验，拉伸速率为 2 mm/min。

实验结果与讨论

铜/钢界面元素的扩散

图 2 为不同铜/钢/铜复合板样品的界面背散射图像，图 3 为对应样品界面铜、铁元素的扩散情况。由图 2 可知，样品经不同温度、不同时间热处理后，界面形貌并未发生显著变化；所有样品中，铜、钢结合良好，界面无孔洞等缺陷，形貌平直且未生成化合物层；铜/钢界面主要由固溶体组成，这与已有研究结论一致^[10]。由图 3 可知，随着热处理温度的升高及保温时间的延长，铜、铁元素扩散区尺寸增大，这是由于较高的热处理温度和较长的保温时间均能促进原子的相互扩散^[11]。

图 4 为 600-3 样品的界面透射图像及相应元素分布图。由图 4(a) 可知，铜/钢界面存在纳米级孔洞，这种孔洞被认为是“柯肯达尔”孔洞，是铜、铁原子扩散系数差异所致^[12]。同时，由图 4(d)、4(e) 可知，虽然热处理过程中使用氩气来防止样品氧化，

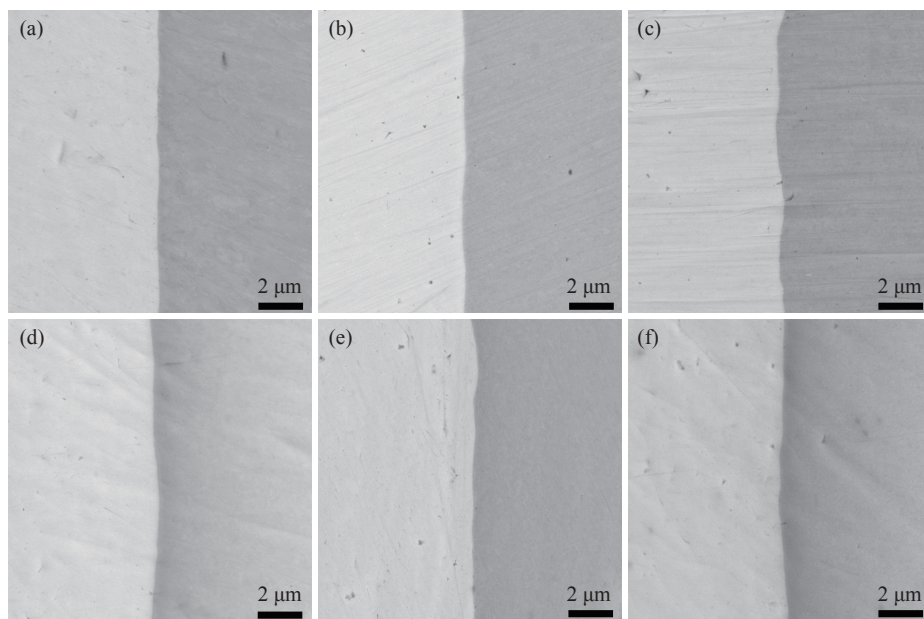


图2 不同铜/钢/铜复合板样品界面背散射图像: (a) 轧制态; (b) 600-3; (c) 640-3; (d) 680-3; (e) 680-5; (f) 680-7

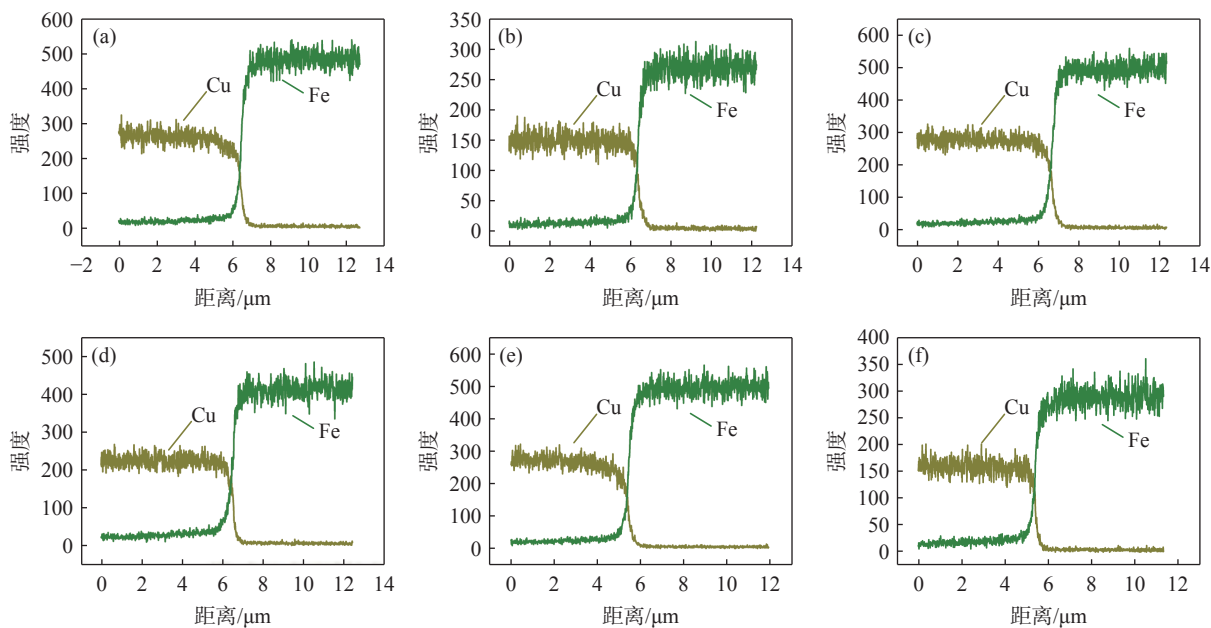


图3 不同铜/钢/铜复合板样品界面铜、铁元素扩散情况: (a) 轧制态; (b) 600-3; (c) 640-3; (d) 680-3; (e) 680-5; (f) 680-7

但仍无法完全避免氧化现象, 样品界面处生成了铁的氧化物。

铜/钢/铜复合板力学性能

图5为不同铜/钢/铜复合板样品的维氏硬度值, 可见在铜层和钢层, 轧制态样品的硬度最高, 随着热处理温度的升高及热处理时间的延长, 铜层和钢层硬度均下降。这是由于热处理消耗了铜、钢晶粒中的位错等晶体缺陷, 铜和钢的加工硬化作用减弱^[13]。

不同热处理样品的铜层和钢层硬度差值较小, 且所有样品中钢层硬度均大于铜层, 其中轧制态样品中硬度差值最大, 随着热处理温度的升高及热处理时间的延长, 硬度差值逐渐减小并趋于一致, 此现象与相关研究结果相符^[14]。

图6为不同铜/钢/铜复合板样品的应力-应变曲线。受加工硬化作用影响, 轧制态样品的抗拉强度最高, 达到459.0 MPa, 但其应变值最低, 仅为

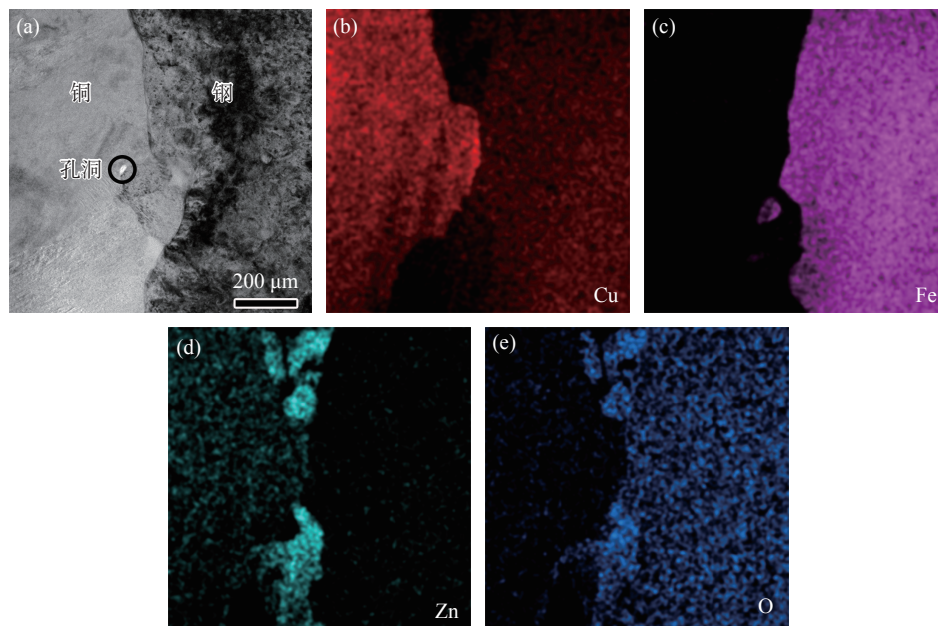


图4 (a) 600-3样品的界面透射图像; (b) 铜元素分布图; (c) 铁元素分布图; (d) 锌元素分布图; (e) 氧元素分布图

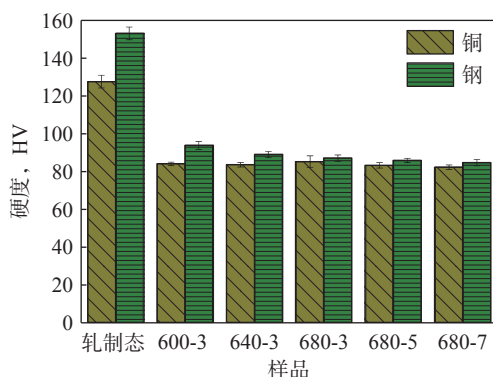


图5 不同铜/钢/铜复合板样品铜、钢层硬度值

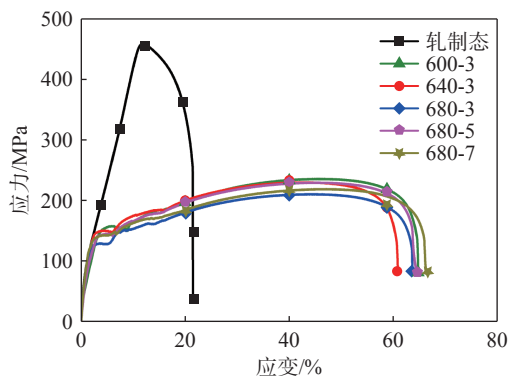


图6 不同铜/钢/铜复合板样品应力-应变曲线

0.22。经热处理后,样品应力-应变曲线中可观察到较为明显的屈服平台,这是由于本实验设定的热处理温度范围可实现铜和钢的同步再结晶^[15-16],具有再结晶组织的复合板强度显著下降,塑性明显提升。

此外,铜/钢界面存在的纳米孔洞及氧化物在拉伸过程中成为微裂纹的萌生源,从而降低复合板的强度^[17]。各热处理样品的力学性能差异较小,屈服强度维持在150 MPa左右,抗拉强度稳定在200 MPa左右,应变值约为0.65。

结束语

(1) 随着热处理温度的升高及保温时间的延长,铜、铁元素相互扩散区尺寸增大。

(2) 在本实验参数范围内,较高的热处理温度及较长的热处理时间并不会对铜/钢/铜复合板的力学性能产生较大影响。

(3) 相比轧制态样品,600℃保温3h的样品塑性变形能力大幅提升,且较高的热处理温度和较长的保温时间并未对样品强度和塑性变形能力产生较大影响;综合考虑确定,最优的热处理工艺为600℃保温3h。

参考文献

- [1] 刘越, 张太正, 孙爱新, 等. 铜/钢双金属复合制备工艺技术研究现状. 材料导报, 2015, 29(15): 10
- [2] 包仲南, 徐浣, 李代明, 等. 金属冷轧层状复合工艺发展趋势. 金属世界, 2024(2): 73
- [3] 陈汉文. 铜-钢复合带材在深冲压领域的应用. 有色金属加工, 2014, 43(6): 9

- [4] Zhu L, Zhou Q, Song C B, et al. Microstructure and mechanical properties of T2 copper/316L stainless steel explosive welding composite with small size wavy interface. *J Mater Res Technol*, 2024, 28: 668
 - [5] 卞超, 王凤英, 杨晓波, 等. 铜-高氮钢复合板的爆炸焊接可行性探究. *热加工工艺*, 2016, 45(5): 222
 - [6] 周杰, 史和生, 杨文芬, 等. 金属复合板加工技术的研究现状及发展趋势. *金属世界*, 2022(5): 24
 - [7] Gladkovsky S V, Kuienova S V, Sergeev S N. Microstructure and mechanical properties of sandwich copper/steel composites produced by explosive welding. *Mater Charact*, 2019, 154: 294
 - [8] Niu X M, Ding Q S, Zhang H R, et al. Research on fabricating Cu/stainless steel composite thin strips by two-pass cold roll-bonding with intermediate annealing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2024, 130(7): 3323
 - [9] 朱磊, 刘林杰, 王虎年. 热处理对铜/钢爆炸复合材料的影响. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(4): 206
 - [10] Guo Y Y, Wu X W, Ren G X, et al. Microstructure and properties of copper-steel bimetallic sheets prepared by friction stir additive manufacturing. *J Manuf Process*, 2022, 82: 689
 - [11] 朱磊, 魏艺斌. 退火温度对爆炸焊接银/钢复合板中银层组织与力学性能的影响. *金属热处理*, 2023, 48(8): 154
 - [12] Kundu S, Chatterjee S. Diffusion bonding between commercially pure titanium and micro-duplex stainless steel. *Mater Sci Eng: A*, 2008, 480(1/2): 316
 - [13] 王世宏, 罗小兵, 苏航, 等. 热处理温度对铝钢复合板界面组织和性能的影响. *钢铁研究学报*, 2019, 31(10): 937
 - [14] 范祎欣, 吴志生, 李岩, 等. 退火温度对爆炸焊铜/钢复合板界面与组织的影响. *热加工工艺*, 2018, 47(4): 134
 - [15] 孟祥兆, 袁晓云, 杨鹏凯. 无间隙原子钢在退火过程中的再结晶行为及其对耐腐蚀性能的影响. *机械工程材料*, 2023, 47(9): 1
 - [16] 姜英, 王友林, 代虎波. 黄铜 H68 轧制后在不同温度退火样品的晶界特征分布. *材料热处理学报*, 2012, 33(7): 111
 - [17] Wang M K, Luo Z A, Li D, et al. Investigation on the interfacial microstructure and mechanical properties of Ti alloy/HSLA steel clad plates fabricated by vacuum roll-cladding. *Mater Sci Eng A*, 2022, 853: 143774
- 基金项目:** 陕西省大学生创新创业训练计划资助项目 (S202410709148); 西安工程大学博士科研启动金资助项目 (107020535); 陕西省教育厅科研计划资助项目 (24JK0471)。
- 作者简介:** 郝敏 (2002—), 女, 陕西省商洛人, 西安工程大学材料工程学院在读本科生。主要研究方向: 金属材料塑性变形机制。通信地址: 陕西省西安市碑林区金花南路 19 号; E-mail: min.hao@stu.xpu.edu.cn。
- 通信作者:** 李博新 (1990—), 男, 河北省滦州人, 西安工程大学材料工程学院教师, 2019 年毕业于重庆大学材料科学与工程专业。主要研究方向: 金属材料塑性变形机制。通信地址: 陕西省西安市碑林区金花南路 19 号; E-mail: boxin-li@xpu.edu.cn。