

引文格式: 杨旭东, 张全鑫, 张晓波. 铝/铜复合材料累积叠轧组织及力学性能研究 [J]. 塑性工程学报, 2025, 32 (6): 248–256. YANG Xudong, ZHANG Quanxin, ZHANG Xiaobo. Study on microstructure and mechanical properties of aluminium/copper composites prepared by accumulated roll bonding [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32 (6): 248–256.

铝/铜复合材料累积叠轧组织及力学性能研究

杨旭东¹, 张全鑫^{1,2}, 张晓波¹

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050;
2. 甘肃稀土新材料股份有限公司, 甘肃 白银 730922)

摘 要: 采用纤维铜网为增强体, 以纯铝板为基体, 通过累积叠轧方法成功制备了铝/铜复合材料。利用扫描电镜、透射电镜和万能拉伸试验机对多层复合材料的显微组织和力学性能进行研究。结果表明: 随着轧制道次的增加, 铜网经多次轧制破碎后均匀分布在铝基体中。铝铜界面线扫描分析结果表明, 扩散层厚度从 4.63 μm 增加到 6.09 μm , 有利于铝/铜复合材料的界面结合强度提高。透射显微组织分析结果表明铝晶粒主要呈长条状结构, 晶粒尺寸从 1.17 μm 细化到 0.64 μm , 表明其主要强化机制为细晶强化。铝/铜复合材料的极限抗拉强度为 171 MPa, 随轧制道次的增加呈相同的趋势。不同轧制道次下的铝/铜复合材料均为韧性断裂。

关键词: 铝/铜复合材料; 累积叠轧; 增强体; 铜网; 力学性能

中图分类号: TG339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2025) 06-0248-09

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2025.06.026

Study on microstructure and mechanical properties of aluminium/copper composites prepared by accumulated roll bonding

YANG Xu-dong¹, ZHANG Quan-xin^{1,2}, ZHANG Xiao-bo¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Reuse of Non-Ferrous Metals, College of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Gansu Rare Earth New Materials Co., Ltd., Baiyin 730922, China)

Abstract: Aluminium/copper composites were successfully prepared by accumulated roll bonding method using fibrous copper mesh as reinforcement and pure aluminium sheet as matrix. The microstructure and tensile properties of the multilayer composites were investigated by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), microhardness tester and universal tensile tester. The results show that with the increase of rolling pass, the copper mesh is uniformly distributed in the aluminium matrix after being broken by multiple rolling passes. The aluminium/copper interface line scanning analysis results show that the thickness of the diffusion layer increases from 4.63 μm to 6.09 μm , which is conducive to improve the aluminium/copper composites interface bonding strength. The transmission microstructure analysis results show that the matrix $\alpha\text{-Al}$ grains have a long strip structure and the size is refined from 1.17 μm to 0.64 μm . Thus, the grain refinement strengthening is the key strengthening mechanism. The ultimate tensile strength of aluminium/copper composites is 171 MPa, which shows the same trend with the increase of rolling pass. Aluminium/copper composites are ductile fracture under different rolling passes.

Key words: aluminium/copper composites; accumulated roll bonding; reinforcement; copper mesh; mechanical properties

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52361029); 甘肃省科技重大专项 (22ZD6GA008; 24ZDGJ001; 25ZDLJ001)

通信作者: 张晓波, 男, 1981 年生, 博士, 副研究员, 主要从事铝基复合材料、金属新材料设计研究, E-mail: zxbvictory@163.com

第一作者: 杨旭东, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事铝基复合材料轧制塑性变形研究, E-mail: 1098333178@qq.com

收稿日期: 2024-08-28; **修订日期:** 2025-04-15

引言

铝合金因其良好的服役性能和加工成形能力,作为重要的轻质结构材料被长期广泛应用,伴随工业发展和科学技术的快速迭代,传统铝合金材料已无法满足日益提升的服役性能指标要求,而铝基复合材料因其优异的强度、硬度、导热性和耐磨性,在工业、军事、航空航天、汽车、医疗和建筑等领域呈现出更加安全可靠的应用价值^[1-2]。当前国内外铝基复合板材多采用铝板与铜、镁、镍、钛及其合金板材及箔材^[3](如 Al/Cu^[4-5]、Al/Ni^[6]、Ti/Al^[7]、Al/Mg^[8]、Cu/Ni^[9]和 Al/Sn^[10]等)组装叠轧制备。所制备的铝基复合材料既兼具基体铝的良好强韧性,又通过增强相极大强化了材料的强度,体现出高比强度、高比刚度、优异的高温性能、更强的抗疲劳性和耐磨性、优异的阻尼性能以及较低的热膨胀系数等综合性能^[11]。JIANG Z D 等^[12]研究发现, Cu/1060Al 双金属复合材料在 350 ℃ 下退火 2 h 表现出最佳的综合性能。铝/铜复合材料具有良好的导热性和耐腐蚀性及低成本等特点^[13]。刘青青等^[14]对 Al-Cu-Mn 材料进行室温多道次累积轧制变形和后续低温时效,通过研究发现位错回复和高密度的纳米析出相是提升塑性的主要因素。铝/铜复合

箔材的制备在替代电解纯铜箔等新产品的开发应用领域具有光明的前景^[15]。

本研究在铝/铜复合材料的制备过程中,强化了材料设计的新颖性,与传统方法选取铜板和铜箔材料不同,而是采用均匀正交分布的铜网作为铜材的引入方式,经过累积叠轧后铜网破碎成铜颗粒,弥散分布在铝基体上,以增强相嵌入铝基体中形成铝铜界面,结合强度增强,体现两个方面的创新及价值:所用增强相铜金属显著减少,极大节约成本;轧制破碎的铜颗粒因其原材料铜网的均匀性,使得复合材料增强相分布均匀性更佳。

文中以纤维铜网格和纯铝板累积叠轧制备了铝/铜复合材料,通过扫描电镜、透射电镜、室温拉伸研究了铝/铜多层复合材料的微观组织和力学性能。

1 实验材料

实验中使用的基体材料是 1060 纯铝板,规格为 2 mm×50 mm×100 mm。增强体材料采用正交法编织而成的纤维铜网,直径为 $\Phi 35\ \mu\text{m}$,目数为 350 目,不同倍数下铜网格的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)结构如图 1 所示,两种材料的化学成分分别见表 1 和表 2。

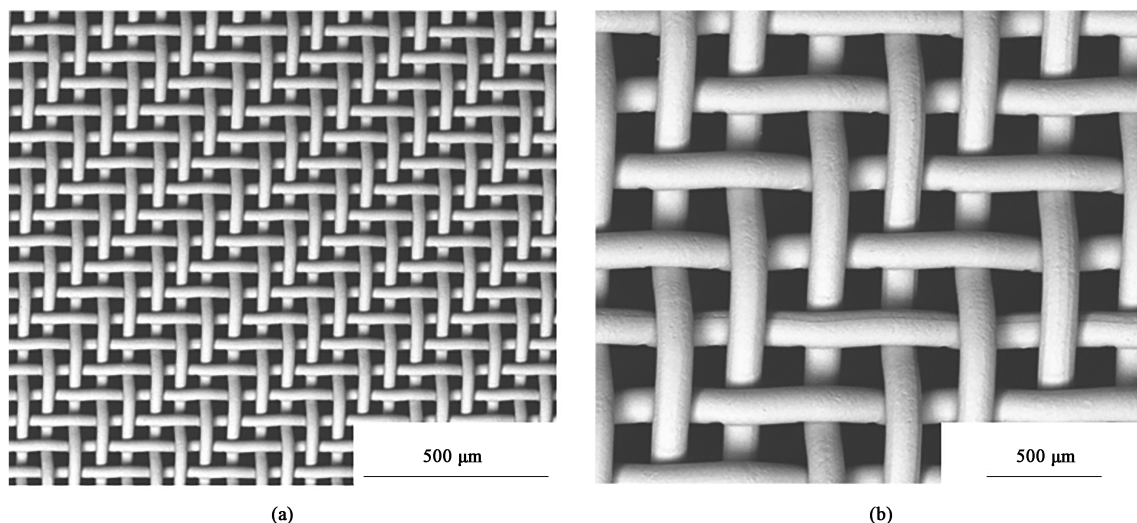


图1 铜网格 SEM 形貌

(a) 100× (b) 300×

Fig. 1 SEM morphologies of copper mesh

将经过 350 ℃×2 h 退火后的纯铝板表面用钢刷处理直至出现金属光泽,铜网表面附着的油污杂质用丙酮清除干净。将处理好的铝板和铜网以间隔交

替的顺序(Al/Cu/Al/Cu/Al)叠合成组坯,将组坯两端采用扎丝固定,由于组坯总体积为 30.4 cm³,铜网占总体的 1.4%。本次实验设定第 1 道次压下率

表 1 1060 纯铝板化学成分 (%, 质量分数)

Tab. 1 Chemical compositions of 1060 pure Al sheet (%, mass fraction)

Elements	Al	Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	V
Content	99.6	0.35	0.25	0.05	0.03	0.03	0.05	0.03	0.05

表 2 T2 铜化学成分 (%, 质量分数)

Tab. 2 Chemical compositions of T2 copper (%, mass fraction)

Elements	Cu	Pb	Fe	N	As	Bi	Ti
Content	99.90	0.005	0.005	0.003	0.002	0.001	0.028

为 63%, 后续采用压下率为 50%, 制得铝/铜复合材料。

2 结果与分析

2.1 冷轧态铝/铜复合材料显微组织

图 2 为铝/铜复合材料不同轧制道次后的 SEM 形貌。RD 为轧制方向, ND 为与轧辊接触面的法线

方向。由于较大的压下率以及轧制道次增加, 且轧制方向保持不变, 导致铜网断裂, 铜颗粒在铝板上的分布越来越均匀。图 2a 为初始道次, 发现沿着 RD 方向铜颗粒呈现圆点和带状。从图 2b~图 2d 可知, 累积轧制过程中, 铝/铜复合材料的层数按比例增加。由于引入了轧制剪切应力, 铝板上分布的带状铜颗粒在塑性变形过程中出现缩颈和断裂现象^[14]。从图 2d 发现, 带状铜颗粒逐渐消失, 出现的圆点状铜颗粒均匀分布在结合界面, 从而提高了铝/铜多层复合材料的结合强度。

图 3 所示为不同轧制道次下铜颗粒尺寸分布图。由图可知, 随着轧制道次由 1 道次增加到 6 道次, 铜颗粒的平均尺寸分别为 207.9、186.1、154.6、112.6、109.7 和 91.3 μm , 铜颗粒尺寸逐渐减小。根据位错理论^[15], 由于位错线在铜颗粒附近发生弯曲, 随着轧制的进行, 最终在铜颗粒周围产生位错环, 在铝板上均匀分布的铜颗粒对提高铝/铜复合材料的力学性能具有显著作用。

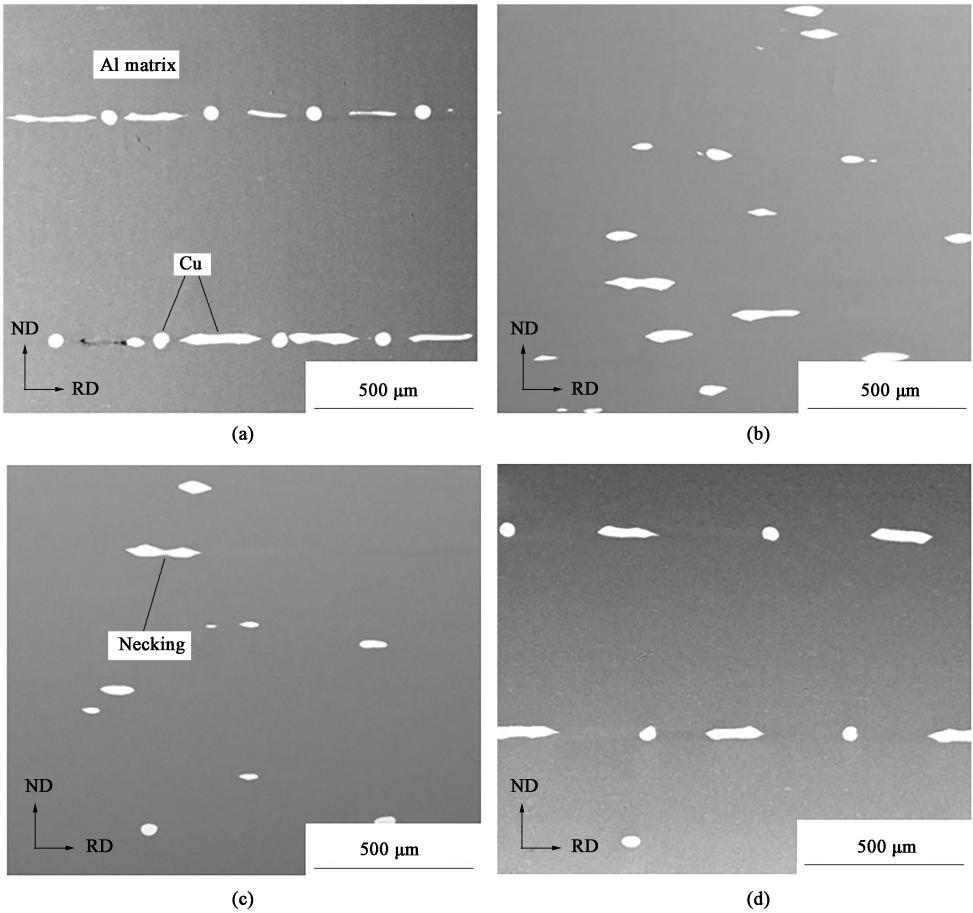


图 2 铝/铜复合材料不同轧制道次 SEM 形貌

(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次 (c) 第 4 道次 (d) 第 6 道次

Fig. 2 SEM morphologies of aluminium/copper composites after different rolling passes

(a) The first pass (b) The second pass (c) The fourth pass (d) The sixth pass

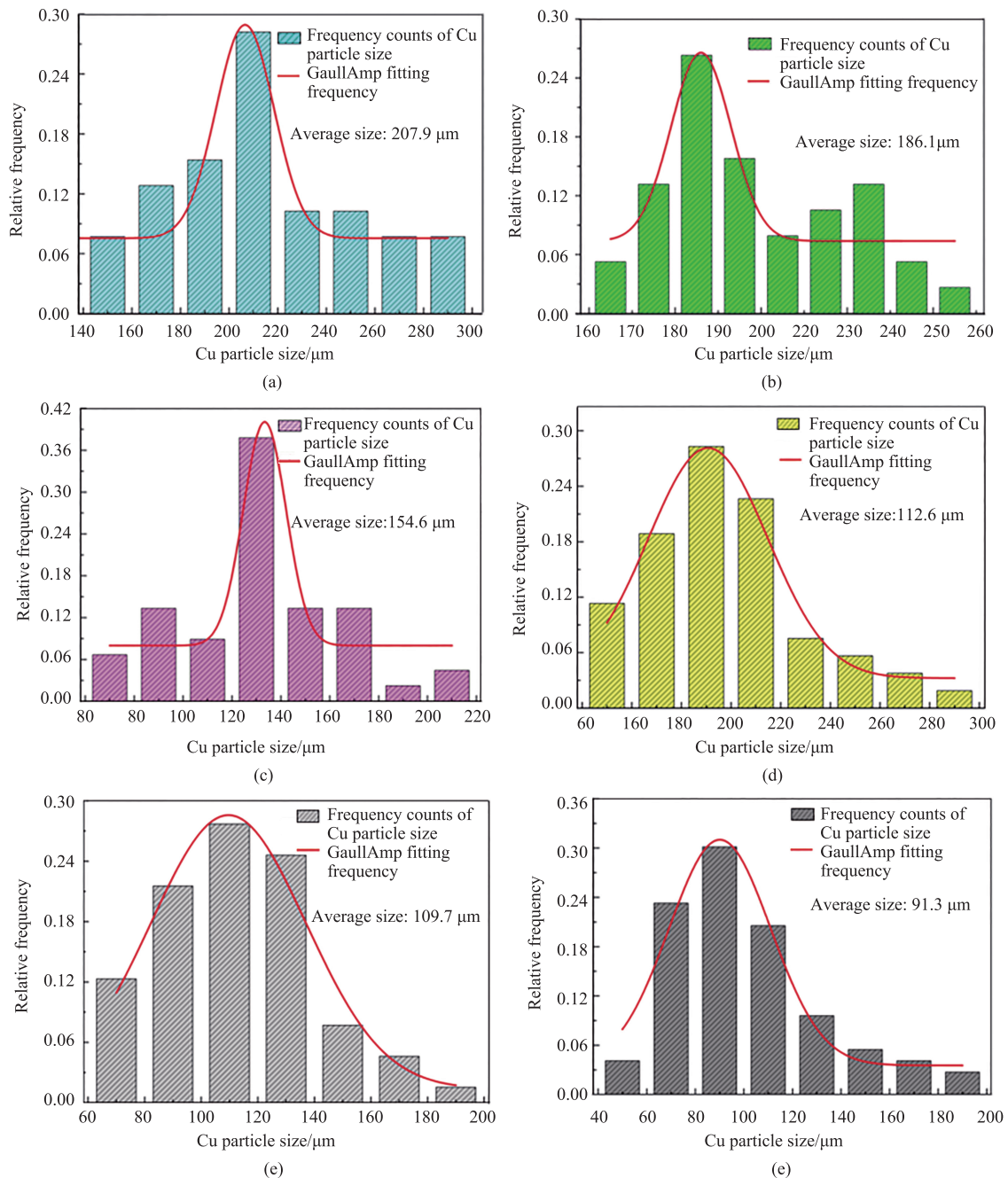


图3 不同轧制道次下铜颗粒尺寸分布

(a) 第1道次 (b) 第2道次 (c) 第3道次 (d) 第4道次 (e) 第5道次 (f) 第6道次

Fig. 3 Size distribution of copper particles after different rolling passes

(a) The first pass (b) The second pass (c) The third pass (d) The fourth pass (e) The fifth pass (f) The sixth pass

图4为不同道次铝/铜复合材料界面线扫描结果。第1道次的扩散层厚度为 $4.63\ \mu\text{m}$ (本试样其他区域的扩散层厚度范围为 $4.52\sim 4.72\ \mu\text{m}$)，由于实验在室温条件下进行，铝铜元素未发生反应，未生成脆硬性金属间化合物^[16]。第4道次和第6道次扩散层厚度分别为 $5.49\ \mu\text{m}$ (本试样其他区域的扩散层厚度范围为 $5.42\sim 5.61\ \mu\text{m}$) 和 $6.09\ \mu\text{m}$ (本试样其他区域的扩

散层厚度范围为 $6.02\sim 6.12\ \mu\text{m}$)，随着扩散层厚度的增加，铝/铜复合材料的界面强度提高。

2.2 冷轧态铝/铜复合材料 SEM 显微组织

图5为铝/铜复合材料第1道次和第6道次轧制后铝层的TEM形貌。从图5a和图5d可以发现，铝晶粒呈长条状，随着轧制道次增加，晶粒尺寸细化程度不断提高，使得位错密度增加。根据 Hall-Petch

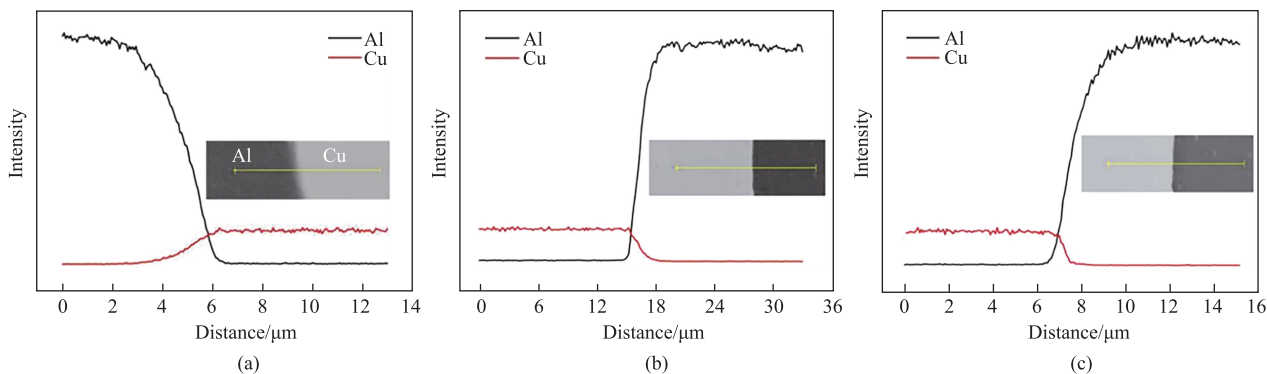


图 4 铝/铜复合材料不同道次界面线扫描结果

(a) 第 1 道次 (b) 第 4 道次 (c) 第 6 道次

Fig. 4 Interfacial line scanning results of aluminium/copper composites with different passes

(a) The first pass (b) The fourth pass (c) The sixth pass

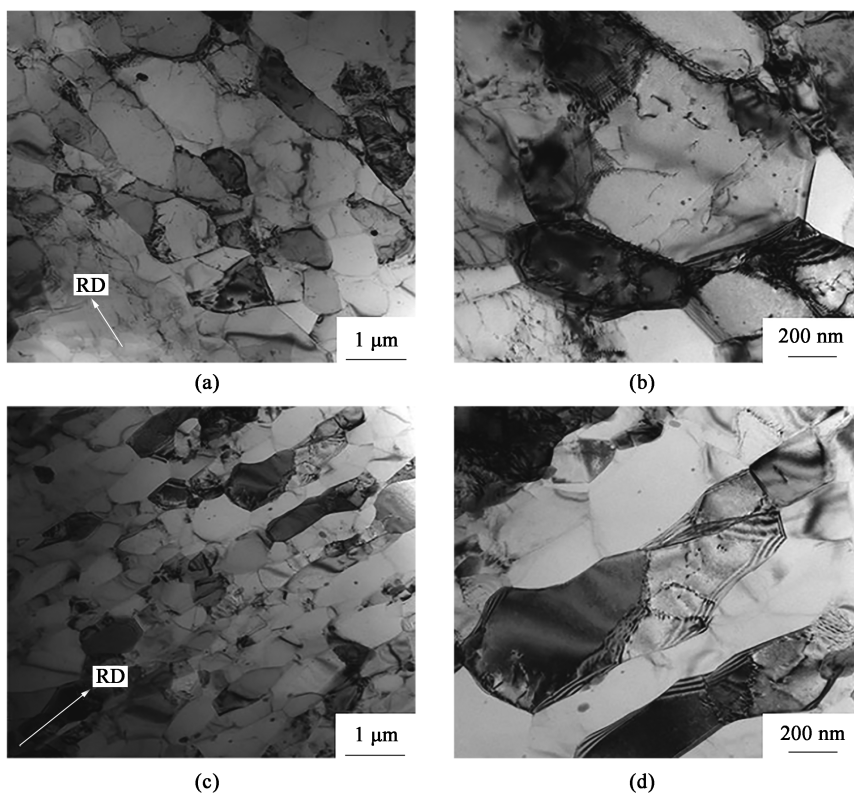


图 5 铝/铜复合材料 TEM 显微组织

(a) 1 道次 (b) HRTEM 1 道次 (c) 6 道次 (d) HRTEM 6 道次

Fig. 5 TEM microstructure of aluminium/copper composites

(a) 1 pass (b) HRTEM 1 pass (c) 6 passes (d) HRTEM 6 passes

理论^[17-18], 经过多道次轧制, 晶粒细化十分显著, 因此界面之间的结合强度得到提高。图 5c 和图 5f 分别为 1 道次和 6 道次复合材 HRTEM 显微组织, 可以发现, 位错之间发生了明显的位错缠结行为^[19]。

2.3 冷轧态铝/铜复合材料力学性能

2.3.1 拉伸实验

图 6 为退火态 1060 铝合金和铝/铜复合材料不

同轧制道次工程应力-工程应变曲线。图 7 为铝/铜复合材料的极限抗拉强度、屈服强度和伸长率的变化曲线。退火态 1060 铝合金的极限抗拉强度为 95.1 MPa, 由于设定了较大的压下率, 第 1 道次铝/铜复合材料的极限抗拉强度为 151.7 MPa。累积叠轧达 6 道次后, 铝/铜复合材料的极限抗拉强度提升到 171 MPa, 退火态纯 1060 铝合金的极限抗拉强度

为 95 MPa, 铝/铜复合材料极限抗拉强度约为 1060 铝合金的 1.8 倍。

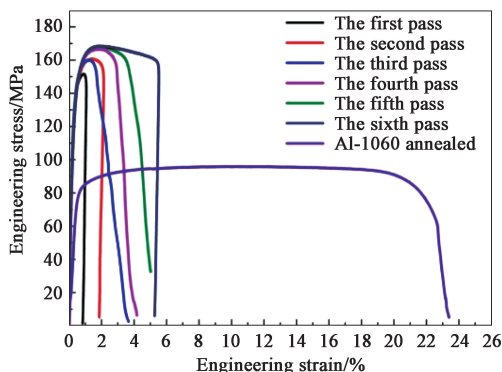


图6 退火态 1060 铝合金和铝/铜复合材料不同轧制道次工程应力-工程应变曲线

Fig. 6 Engineering stress-engineering strain curves of annealed 1060 aluminum alloy and aluminium/copper composites after different rolling passes

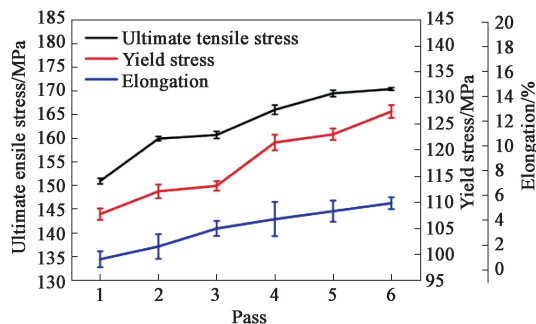


图7 不同轧制道次铝/铜复合材料强度及伸长率变化曲线
Fig. 7 Variation curves of strength and elongation of aluminium/copper composites after different rolling passes

退火态 1060 铝合金的伸长率达到 23.5%, 由于第 1 道次经过较大压下率, 且铜颗粒阻碍了位错运动, 塑性变形后伸长率大幅度下降。由图 7 可以看出随着轧制道次的增加, 铝/铜复合材料的伸长率逐渐提高。由图 6 和图 7 发现随着轧制道次的增加, 铜颗粒均匀分布在铝基体上, 细晶强化^[20]对铝/铜复合材料的强度提高起着重要作用, 其极限抗拉强度和屈服强度呈上升趋势。

2.3.2 硬度实验

图 8 所示为铝层和铜层在不同轧制道次下显微硬度的变化。退火态 1060 铝合金的显微硬度为 36.2 HV, 由于初始压下率较大, 第 1 道次铝层显微硬度提升较大。经过 6 道次轧制后, 铝层的显微硬度达到 51.18 HV。铜层的显微硬度从 151.95 HV 上升到 205.1 HV。整体来看, 随着轧制道次的增加, 铝层和铜层的显微硬度呈上升趋势。

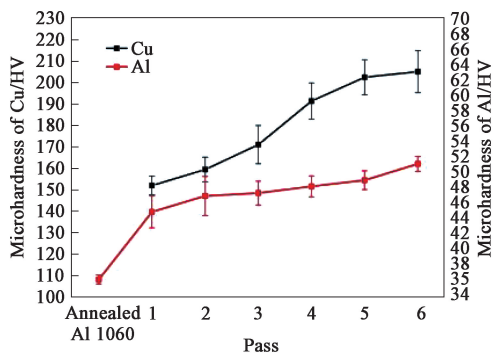


图8 铝/铜复合材料 Al 层与 Cu 层显微硬度变化曲线

Fig. 8 Variation curves of microhardness of Al and Cu layers of aluminium/copper composites

2.4 冷轧态铝/铜复合材料拉伸断口形貌

图 9 为铝/铜复合材料不同轧制道次断口形貌。由图 9a 可知, 界面没有明显的分层, 铜网断裂分布均匀。从图 9b 和图 9d 可以发现, 随着轧制道次的增加, Al-Al 界面产生了明显的分层现象, 由于铜颗粒与铝基体紧密结合, Al-Cu 界面基本没有分层。图 9c 表明铜颗粒在铝基体中分布均匀, 铝铜原子相互扩散, 铝/铜复合材料的结合强度明显提高^[21]。

图 10 为铝/铜复合材料不同轧制道次高倍断口形貌。图 10a 为退火态 1060 铝合金的断口形貌, 存在大量小型韧窝。图 10c 为随着铜颗粒的断裂, 导致铝铜界面分层。从图 10b~图 10d 可以发现, 随着轧制道次的增加, 铜颗粒的粒径逐渐减小, 韧窝尺寸增大。同时存在大量大小不一的韧窝, 说明其为韧性断裂^[22], 提高了铝铜界面的结合强度。

3 结论

(1) 纤维铜网经不同道次轧制破碎后呈圆形和带状, 铜颗粒均匀分布在铝基体中, 铝铜界面结合良好。

(2) 铝铜界面扩散层厚度从 4.63 μm 增加到 6.09 μm , 其界面强度提高。经过多道次轧制, 铝晶粒主要呈长条状结构, 晶粒尺寸从 1.17 μm 细化到 0.64 μm , 表明其主要强化机制为细晶强化。

(3) 随着轧制道次的增加, 铝层和铜层的显微硬度呈相同的趋势。铝/铜复合材料的极限抗拉强度为 171 MPa, 退火态 1060 铝合金的极限抗拉强度为 95 MPa, 铝/铜复合材料极限抗拉强度约为退火态 1060 铝合金的 1.8 倍。

(4) 根据不同轧制道次的断口形貌, 发现铝/铜复合材料的断口存在大量大小不一的韧窝, 说明

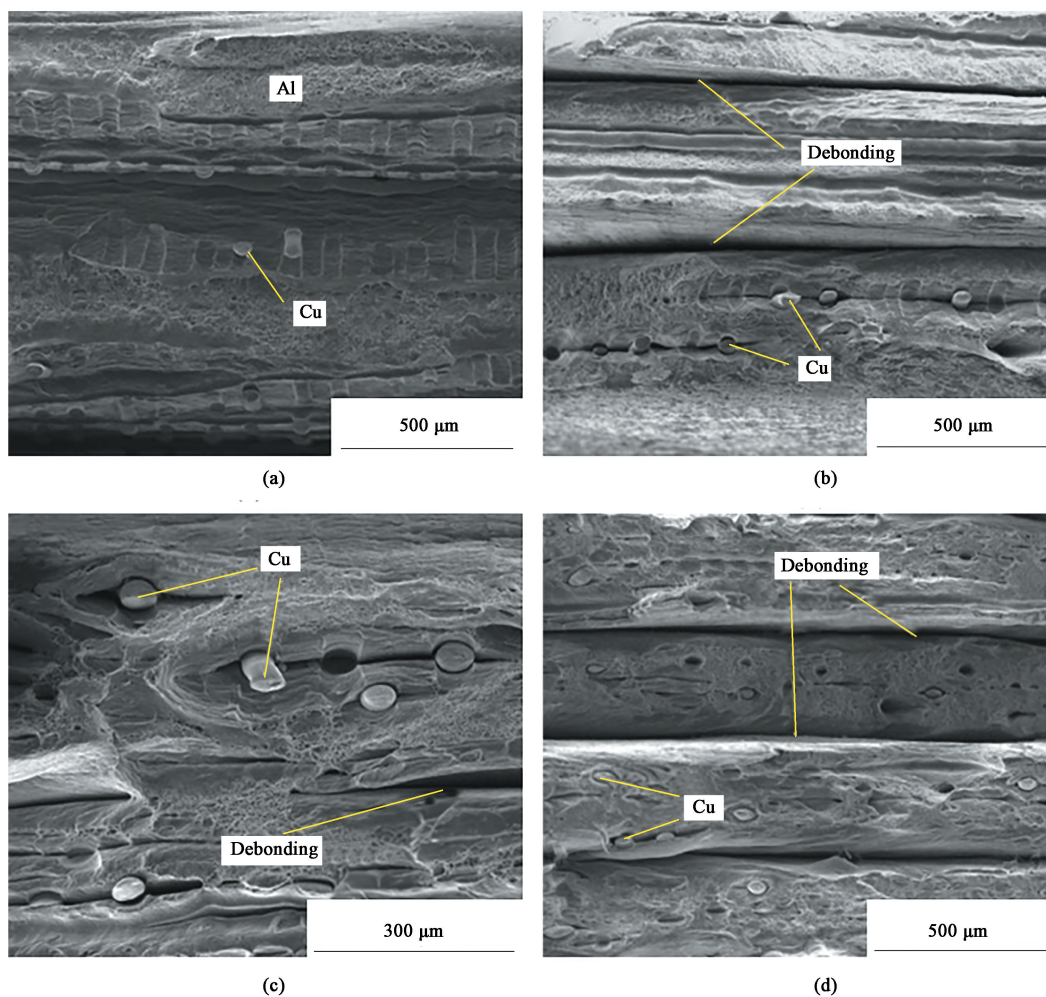


图 9 不同轧制道次下铝/铜复合材料的断口形貌

(a) 第 1 道次 (b) 第 3 道次 (c) 第 5 道次 (d) 第 6 道次

Fig. 9 Fracture morphologies of aluminium/copper composites under different rolling passes

(a) The first pass (b) The third pass (c) The fifth pass (d) The sixth pass

为韧性断裂。

参考文献:

- [1] 武高辉, 匡泽洋. 装备升级换代背景下金属基复合材料的发展机遇和挑战 [J]. 中国工程科学, 2020, 22 (2): 79-90.
WU Gaohui, KUANG Zeyang. Opportunities and challenges for metal matrix composites in the context of equipment upgrading [J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2020, 22 (2), 79-90.
- [2] 吴远兵, 辜诚, 彭韦力, 等. 钛/镁双金属复合材料界面强化方法研究现状与展望 [J]. 复合材料学报, 2023, 40 (11): 5989-6009.
WU Yuanbing, GU Cheng, PENG Weili, et al. Research and prospect on interface strengthening methods for Ti/Mg bimetallic composites [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2023, 40 (11): 5989-6009.
- [3] 蔡志勇, 文璟, 王日初, 等. 增强体表面改性在高导热金属基复合材料中的应用 [J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15 (2): 237-255.
CAI Zhiyong, WEN Jing, WANG Richu, et al. Application of surface modification of reinforcing phase in metal matrix composites with high thermal conductivity [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2024, 15 (2): 237-255.
- [4] 李慧, 龙萍, 牛永胜, 等. Al/Cu 复合材料制备中理论与工艺研究进展 [J]. 材料导报, 2016, 30 (7): 148-153.
LI Hui, LONG Ping, NIU Yongsheng, et al. Fabrication of Al/Cu composite: Theoretical and technological progresse [J]. Materials Reports, 2016, 30 (7): 148-153.
- [5] 关杰仁, 王秋平. Al/Cu 复合材料制备工艺及界面组织演变研究现状 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32 (9): 2510-2520.
GUAN Jieren, WANG Qiuping. Research progress of preparation technique and interface microstructure evolution of Al/Cu composite materials [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32 (9): 2510-2520.

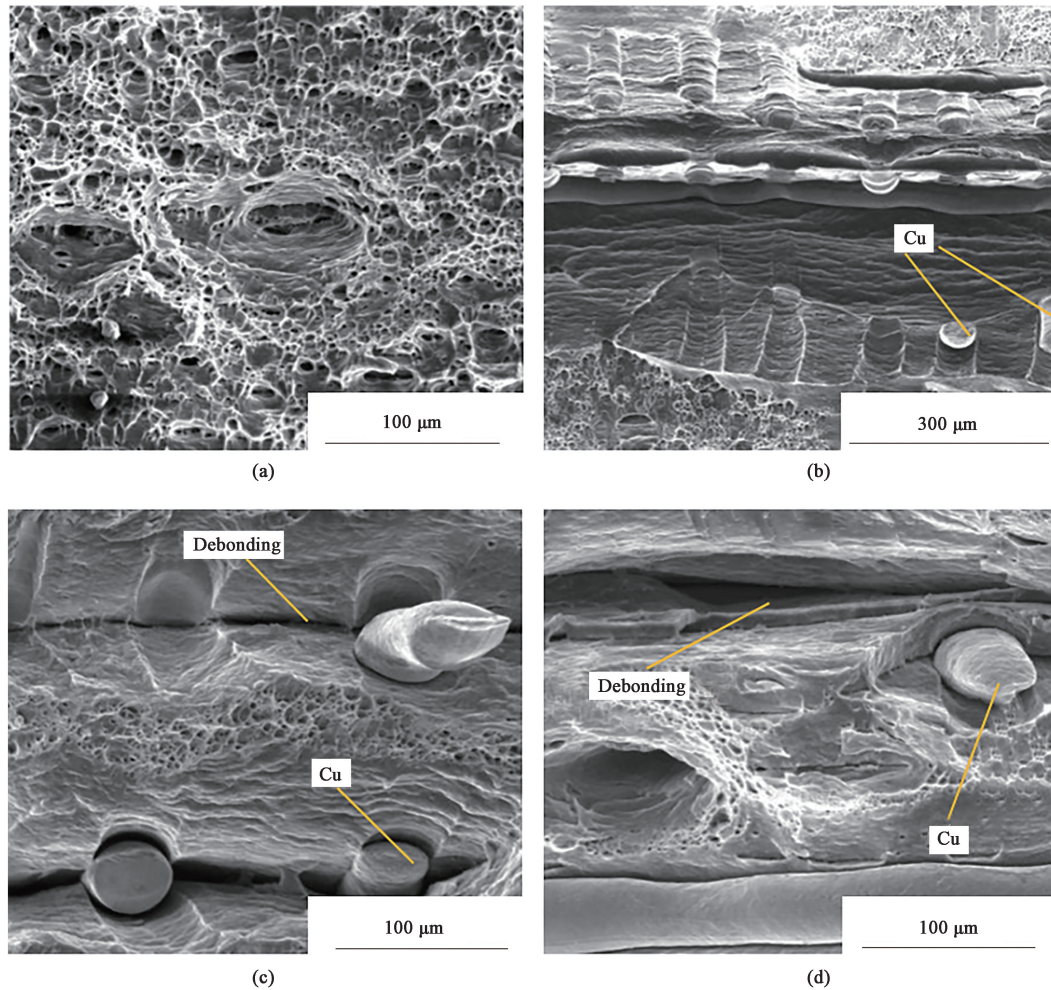


图10 铝/铜复合材料不同轧制道次高倍断面形貌

(a) 退火态 1060 铝合金 (b) 第1道次 (c) 第3道次 (d) 第6道次

Fig. 10 High-magnification fracture morphologies of aluminium/copper composites under different rolling passes

(a) Annealed 1060 aluminum alloy (b) The first pass (c) The third pass (d) The sixth pass

- [6] 廖沙. Ni/Al 层状含能结构材料的复合法制备及性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

LIAO Sha. Preparation and properties of Ni/Al layered energetic structural materials by composite method [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

- [7] 崔圣强, 吴倩, 范敏郁, 等. 热压复合制备钛/铝层状复合材料界面组织演变研究 [J]. 机械制造与自动化, 2017, 46 (5): 20-23, 58.

CUI Shengqiang, WU Qian, FAN Minyu, et al. Microstructure evolution at interface of Ti/Al laminated composites fabricated by Hot-press bounding [J]. Machine Building & Automation, 2017, 46 (5): 20-23, 58.

- [8] 刘琛, 朱永长, 叶丹, 等. Mg/Al 复合材料制备工艺的研究与展望 [J]. 广东化工, 2023, 50 (18): 75-76, 204.

LIU Chen, ZHU Yongchang, YE Dan, et al. Research and prospect of preparation process of Mg/Al composites [J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50 (18): 75-76, 204.

- [9] 宗意勋, 李树丰, 刘磊, 等. GNP-Ni/Cu 复合材料的界面调

控和强化机理 [J]. 材料研究学报, 2022, 36 (10): 777-785.

ZONG Yixun, LI Shufeng, LIU Lei, et al. Interface regulation and strengthening mechanism of GNP-Ni/Cu composites [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2022, 36 (10): 777-785.

- [10] 刘建新, 肖飞. Al-Sn 复合材料的制备及其水反应产氢效率 [J]. 石油化工, 2024, 53 (2): 161-166.

LIU Jianxin, XIAO Fei. Preparation of Al-Sn compositematerials and their hydrogen production efficiency in reaction with water [J]. Petrochemical Technology, 2024, 53 (2): 161-166.

- [11] 张全鑫. 纤维铜 (T2) 网格增强铝基复合材料制备及其组织性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.

ZHANG Quanxin. Study on preparation and microstructure & properties of aluminum matrix composite reinforced by fiber copper (T2) mesh [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.

- [12] JIANG Z D, ZHU H W, SUN J W, et al. Microstructure and mechanical properties of high-temperature free-oxygen rolled Cu/

- 1060Al bimetallic composite materials [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 1262–1277.
- [13] 张海礁, 吴迪. Cu-Al 复合材料热性能实验研究 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33 (2): 180–185.
ZHANG Haijiao, WU Di. Experimental study on thermal properties of Cu-Al laminated composites [J]. *Journal of Heilongjiang University of Science*, 2023, 33 (2): 180–185.
- [14] 刘青青, 胡德玲, 杨明, 等. Al-Cu-Mn 合金复合纳米结构构筑及强塑性机制研究 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (7): 959–966.
LIU Qingqing, HU Deling, YANG Ming, et al. Mechanical Properties of Al-Cu-Mn alloy with composite nanostructures [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2023, 47 (7): 959–966.
- [15] 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.
LIU Guoping, WANG Qudong, JIANG Haiyan. New research progress on copper/aluminum bimetallic composites [J]. *Materials Reports*, 2020, 34 (7): 7115–7122.
- [16] 贾哲, 穆磊, 臧勇. 金属塑性成形中的韧性断裂微观机理及预测模型的研究进展 [J]. 工程科学学报, 2018, 40 (12): 1454–1467.
JIA Zhe, MU Lei, ZANG Yong. Research progress on the micro-mechanism and prediction models of ductile fracture in metal forming [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40 (12): 1454–1467.
- [17] 葛业豹, 张春雨, 缙瑞宾, 等. 应变速率对 T2 紫铜热变形行为的影响 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (11): 106–115.
GE Yebao, ZHANG Chunyu, GOU Ruibin, et al. Influence of strain rate on thermal deformation behavior of T2 pure copper [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, 30 (11): 106–115.
- [18] 伏伍, 孙鹏, 张国朋, 等. 316L 不锈钢金属纤维相变析出特征及对性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2024, 53 (18): 47–51.
FU Wu, SUN Peng, ZHANG Guopeng, et al. Dissolve characteristics and effect on properties of 316L stainless steel fiber after phase transformation [J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53 (18): 47–51.
- [19] 季芸, 李德江, 曾小勤, 等. 晶粒位向对 AZ31 挤压板材 Hall-Petch 关系的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36 (1): 15–20, 34.
JI Yun, LI Dejiang, ZENG Xiaoqin, et al. Influence of grain orientation on Hall-Petch relationships for extruded AZ31 plate [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2018, 36 (1): 15–20, 34.
- [20] 任睿. 纯镁 Hall-Petch 关系与室温变形机制研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
REN Rui. Study on Hall-Petch relationship and deformation mechanism of pure Mg at room temperature [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [21] 高玉魁, 陶雪菲. 高速冲击表面处理对金属材料力学性能和组织结构的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2021, 41 (4): 4–29.
GAO Yukui, TAO Xuefei. A review on the influences of high speed impact surface treatments on mechanical properties and microstructures of metallic materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41 (4): 4–29.
- [22] 范晓曼, 徐流杰. 金属材料强化机理与模型综述 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (12): 2796–2798.
FAN Xiaoman, XU Liujie. Review on strengthening mechanisms and models of metal materials [J]. *Foundry Technology*, 2017, 38 (12): 2796–2798.
- [23] 包仲南, 徐泂, 李代明, 等. 金属冷轧层状复合工艺发展趋势 [J]. 金属世界, 2024, (2): 73–76.
BAO Zhongnan, XU Long, LI Daiming, et al. Development tendency of cold-rolling bonding process for metal composite [J]. *Metal World*, 2024, (2): 73–76.
- [24] 刘国怀, 李天瑞, 徐莽, 等. 累积叠轧 TC4 钛合金的组织演化与力学性能 [J]. 金属学报, 2017, 53 (9): 1038–1046.
LIU Guohuai, LI Tianrui, XU Mang, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of TC4 titanium alloy during accumulative roll bonding process [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53 (9): 1038–1046.