

文章编号:1674-9669(2026)03-0410-09 DOI:10.13264/j.cnki.ysjskx.2026.03.010

引文格式:孙德文,刘锦平,王宇轩,等. 累积叠轧 Cu-Fe 复合材料组织与磨损性能研究[J]. 有色金属科学与工程, 2026, 17(3): 410-418.

累积叠轧 Cu-Fe 复合材料组织与磨损性能研究

孙德文, 刘锦平*, 王宇轩, 宣宇昂, 叶森梁

(江西理工大学材料冶金化学学部, 江西 赣州 341000)

摘要:利用累积叠轧焊接技术(ARB)制备了铜-铁颗粒增强复合材料。测定了不同轧制道次复合材料的硬度、导电率和摩擦磨损性能,并重点研究了轧制道次对复合材料的颗粒分散性、界面结合、磨损机制的影响规律。结果表明,随着轧制道次的增加,复合材料的界面结合效果逐步提升,颗粒增强体的分散效果显著增强,在 8 道次后材料界面呈现完全焊接状态,Fe 颗粒弥散分布于板间,此时材料硬度达到最大值 138.49 HV,但导电率和摩擦系数比低循环时有所降低,分别为 81.6%IACS、0.337。复合材料的磨损机制随轧制道次的逐渐增加由疲劳磨损和磨粒磨损为主导逐渐转变为以黏着磨损为主导,当轧制道次增加至 6 次后若继续增加,磨损机制又转变为以疲劳磨损和磨粒磨损为主导。

关键词:铜-铁复合材料;累积叠轧;组织与性能;摩擦磨损

中图分类号:TG335.8⁺⁵ **文献标志码:**A

Investigation on microstructure and wear performance of Cu-Fe composite fabricated by accumulative roll bonding

SUN Dewen, LIU Jinping*, WANG Yuxuan, XUAN Yu'ang, YE Senliang

(Faculty of Materials Metallurgy and Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Cu-Fe particle-reinforced composites were prepared using the Accumulative Roll Bonding (ARB) technology. The hardness, electrical conductivity and friction wear properties of the composites under different cycling conditions were measured, with particular emphasis on the effect of rolling cycles number of the particle dispersion, interfacial bonding and wear mechanism of the composites. The results show that with increasing rolling cycles number, the interfacial bonding in the composites is gradually improved and the dispersion effect of the particle reinforcement is significantly enhanced. The material's interface shows a fully welded state after 8 cycles. The Fe particles are diffusely distributed in the inter-plate, and the hardness of the material reaches the maximum value of 138.49 HV. However, compared with the low-cycle condition, both the electrical conductivity and the friction coefficient decrease, reaching 81.6% IACS and 0.337, respectively. The dominant wear mechanism of the composites gradually changes from fatigue and abrasive wear to adhesive wear as the number of cycles increases. When the number of rolling cycles increases to 6 and then continues to increase, the dominant wear mechanism shifts back to fatigue and abrasive wear.

Keywords: Cu-Fe composites; accumulative roll bonding; microstructure and properties; frictional wear

收稿日期:2025-04-02;修回日期:2025-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52461008)

通信作者:刘锦平(1974—),副教授,主要从事铜基复合材料制备及塑性成形仿真方面的研究。E-mail:liujinping@jxust.edu.cn

铜因具有优异的导电、导热、耐腐蚀性而被广泛应用于社会生产的各个领域^[1-6]。但纯铜的强度和硬度较低,即便是通过加工硬化,强度和硬度仍不能满足人们的使用要求^[7-9]。近年来,铜合金及铜基复合材料因其优异的导电、导热、耐腐蚀、易加工、低成本等优点而得到广泛研究^[10-12],其中 Cu-Fe 复合材料综合了 Cu 和 Fe 相的特性,具有良好的导电、导热性能以及高强度等优点^[13-15]。周斌等^[16]采用熔炼铸造法成功制备出 Cu-5%Fe 合金锭。结合轧制技术,研究发现,铁相以小颗粒的形态出现,并且弥散分布于铜基体中,形成了典型的弥散强化结构。合金中未出现明显的铁偏析现象,也未观察到铜、铁元素的局部富集区域,表明合金组织成分达到了良好的均匀性和稳定性,对材料的导电、导热等性能都有提高。这种均匀的微观组织结构有利于提高合金的力学性能和导电性能^[17-20]。LIU 等^[21]通过铸造方法制备 Cu-Fe 复合材料并研究了其导电性能,发现随着冷变形量的增加,复合材料的电导率逐渐降低;铁含量增加,复合材料的电导率呈非线性下降;其中 Cu-4.3Fe 复合材料的电导率随冷变形应变的增加基本保持不变,约为 40%IACS。帅歌旺等^[22]研究了时效处理对 Cu-Fe 过饱和固溶体性能的调控规律,揭示了固溶及分解过程的微观机制。研究发现,经冷压成形后的材料硬度达到 285 HV,较原始粉末提升约 40%,这种显著的加工硬化效应源于高压变形导致的位错密度激增和晶粒细化,而时效处理后硬度下降至 210 HV。PENG 等^[23]采用粉末冶金法结合轧制技术制备了高强度 Cu-Fe 复合材料,发现冷轧工艺消除了 Fe 的宏观偏析,使得复合材料获得了良好结合效果,制备的 Cu-10Fe 复合材料冷轧后合金的抗拉强度为 564 MPa,电导率为 33%IACS。LEE 等^[24]通过累积叠轧制备纳米 Cu-Fe-P 合金,发现经 8 次循环轧制后,合金在 250 °C 以下仍呈现超细晶组织,但在 300 °C 以上晶粒开始被等轴和粗大晶粒所取代,退火态铜的硬度在温度高于 300 °C 时大幅下降。SUWAS 等^[25]研究了累计叠轧 Cu-Fe 层压板轧制过程中的组织和组织演变,发现变形过程中 Fe 层被分解,而 Cu 层保持其连续性,并且 Cu 层最初承受了大量的应变。但是目前对累积叠轧制备铁颗粒增强铜基复合材料的研究较少。本文采用累积叠轧焊合技术结合中间退火工艺,分析不同轧制次数下 Cu-Fe 复合材料组织性能的变化规律,为累积叠轧制备 Cu-Fe 复合材料提供依据。

1 实验部分

实验原料为 T2 铜板(尺寸:120 mm×30 mm×1 mm,纯度 99.9%,江西铜业集团提供)和铁颗粒(纯度>99.9%,平均粒径为 25 μm,南京先锋纳米材料科技有限公司提供)。铜板在氩气气氛中 600 °C 退火 2 h,随后炉冷。退火后沿中线切割铜板,并在丙酮中超声清洗 10 min,随后用 20%(指质量分数,下同)的盐酸溶液酸洗去除表面油脂和氧化物。轧制前用钢丝刷打磨铜板结合面,称量复合材料总量 0.26% 的铁粉,采用 500 目(孔径 30 μm)金属网筛将称量好的铁粉均匀筛于铜板表面。叠层铜板经辊径 200 mm 的二辊轧机轧制(轧速 0.5 m/min,压下率>50%),轧后去除边角料,在 400 °C 氩气气氛中退火 2 h 并随炉冷却。退火后沿横向(TD)中线切割试样,重复上述过程。每次循环仅在首次引入铁粉,实验流程如图 1 所示。

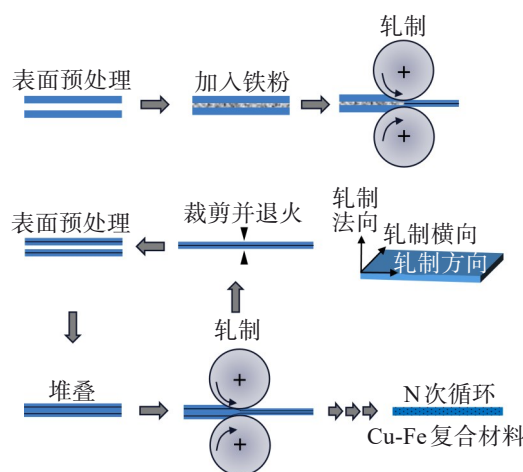


图 1 实验流程示意

Fig. 1 Experimental flow chart

研究复合材料组织与性能随轧制道次增加的变化规律,以及在摩擦磨损过程中的摩擦性能和磨损机理。采用 HVS-30 维氏硬度计测试复合材料硬度,测试载荷为 0.1 kg,保压时间为 10 s,对每个样品测试 5 次,取平均值。采用 Sigma2008-B/C 数字涡流金属电导仪测试复合材料导电率,对每个样品测试 5 次,取平均值。采用 Anton Paar TRB3 往复摩擦磨损试验机对复合材料进行摩擦磨损测试,参数选择 5 Hz 的频率、10 N 的载荷及 5 mm 的进程,时间设置为 20 min。采用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)表征 ARB 制备的铜-铁复合材料。OM 试样经 5 g FeCl₃、10 mL HCl 和 100 mL 去离子水的混合液抛光腐蚀,使用 AxioCam 208 金相显

显微镜观察界面。利用 SEM 观察 RD-ND 平面形貌 (MLA650F, 偏转角为 $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$, 扫描速度为 $10 (^{\circ})/\text{min}$)。

2 结果与讨论

2.1 Cu-Fe 复合材料显微组织

图 2 所示为 RD-TD 面不同轧制道次铁颗粒分散情况。由图 2 可以看出, 轧制 1 道次后, 基体中铁颗粒出现严重的团聚现象; 当轧制 4 道次后, 出现部分区域铁颗粒团聚未能弥散分布, 以及部分区域无

铁颗粒存在的现象。这是由于轧制前在铜板上加入铁颗粒时, 不能使铁颗粒非常均匀地分散在铜板上, 使得在铜基体表面存在铁颗粒团聚或堆积现象, 导致局部区域颗粒浓度高于其他区域。随着轧制道次的增加, 当轧制 7 道次后铁颗粒区域富集现象已消失, 轧制 8 道次后实现均匀分布。这是由于在高轧制道次下, 初始团聚体被反复剪切破碎, 最终实现铁颗粒均匀分布。GHADERI 等^[26]在制备 Cu-SiCP 复合材料过程中发现, 经过 6 道次轧制后, 颗粒增强体在基体中的分布已相对均匀, 轧制 8 道次后分散性更好。

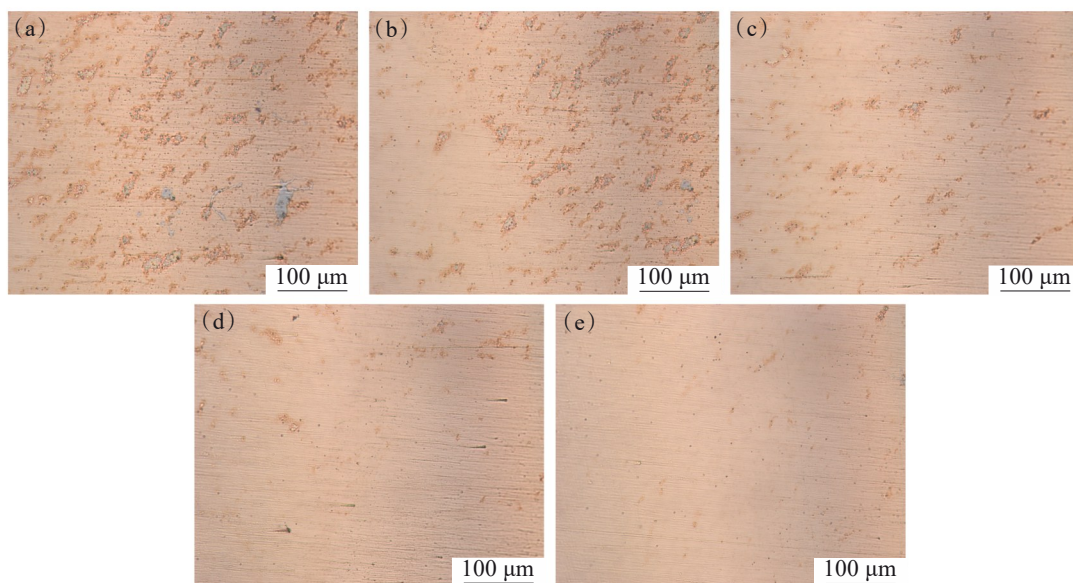


图 2 不同轧制道次下铜-铁复合材料 RD-TD 面铁颗粒分布: (a) 1 道次; (b) 4 道次; (c) 6 道次; (d) 7 道次; (e) 8 道次

Fig. 2 Distribution of iron particles on RD-TD surface of Cu-Fe composites under different rolling passes: (a) 1st pass; (b) 4th pass; (c) 6th pass; (d) 7th pass; (e) 8th pass

图 3 所示为轧制 1、4、6、7、8 道次铜-铁复合材料样品 RD-TD 面的金相组织及粒径分布统计。由图 3 可以看出, 不同轧制道次的晶粒长宽尺寸差别较大, 这是由于在轧制过程中, 晶粒沿轧制方向被拉长。随着轧制道次的增加, 铁颗粒在铜基体中的分散度提高。轧制 6 道次和 7 道次的复合材料出现部分尺寸极小的晶粒, 轧制 8 道次晶粒的尺寸进一步减小且分布更加均匀。从粒径分布统计图中可以看出经过 1 道次轧制后, 复合材料的平均晶粒尺寸为 $84.68\text{ }\mu\text{m}$; 随着轧制道次的增加平均晶粒尺寸逐渐减小, 经过 8 道次轧制后, 复合材料的平均晶粒尺寸达到了 $16.15\text{ }\mu\text{m}$, 粒径减小了 80.93% , 表现出显著的细晶强化效果。由此可以看出, 随着轧制道次的增加, 复合材料内部晶粒尺寸也随之减小, 这是由于多次循环轧制使累积真应变不断提高, 促进位错密度大幅增长; 并且随着轧制道次的不断增

加, 铁颗粒分布越来越均匀, 铁颗粒之间的间距也随之减小, 钉扎点间距的减小使晶粒生长临界尺寸降低, 起到了细化晶粒的效果。马启东等^[13]对 Cu-Fe 合金进行冷轧处理发现, Cu 基体晶粒沿轧制方向呈现板条状, 且晶粒细化效果明显。

图 4 所示为不同轧制道次铜-铁复合材料 RD-ND 面的铜层结合状态。可以观察到轧制 1 道次铜-铁界面处存在明显的铁颗粒层, 焊缝厚度不均匀, 且较为明显; 轧制 4 道次有部分铁颗粒层存在, 部分区域实现界面结合; 轧制 6 道次有少数细小的断续焊缝存在, 轧制 7 和 8 道次界面铁颗粒层已基本消失, 除了少部分断续出现的极其细小的焊缝外, 其他部分已融为一体, 达到了很好的焊合效果。这是由于铁颗粒的加入阻碍了轧制界面处新鲜基体的接触, 降低了其结合质量。随着轧制道次的增加, 铁颗粒的平均尺寸减小, 分布的均匀度提高, 有效改善了界面

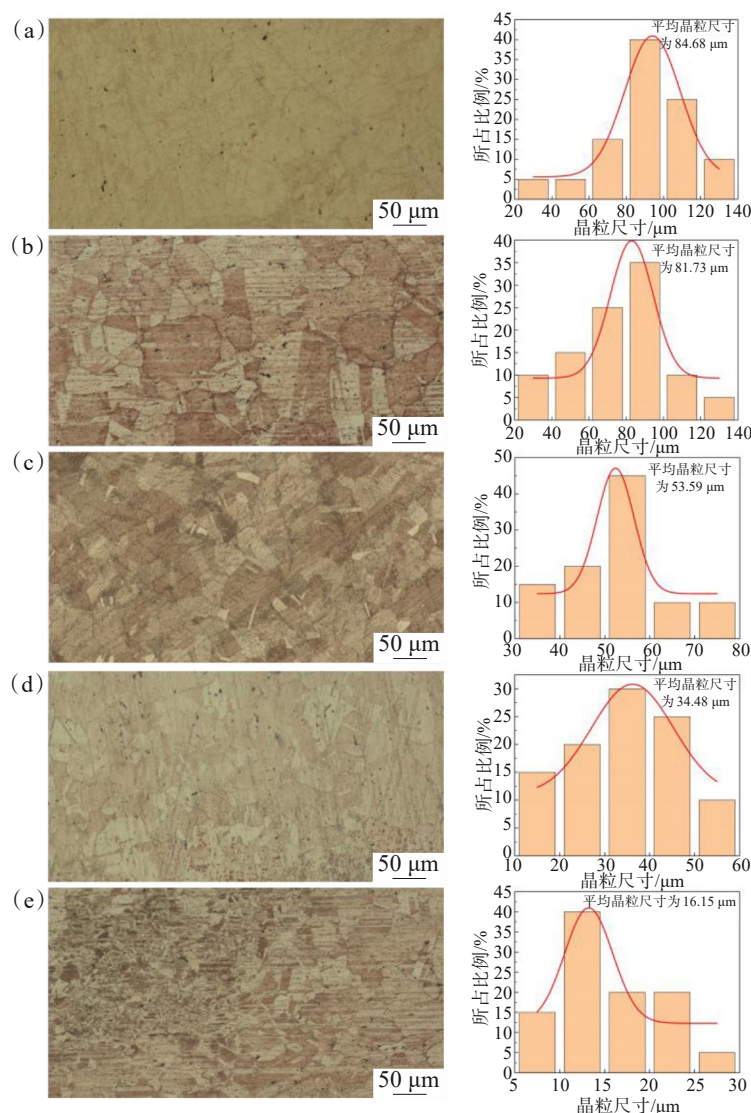


图3 不同轧制道次下铜-铁复合材料 RD-TD 面金相组织及粒径分布统计:(a) 1道次;(b) 4道次;(c) 6道次;(d) 7道次;(e) 8道次

Fig. 3 Microstructure and grain size distribution of the RD-TD plane in Cu-Fe composite under different rolling passes:

(a) 1st pass; (b) 4th pass; (c) 6th pass; (d) 7th pass; (e) 8th pass

结合效果。在轧制8道次后,产生了极大的应变累积,有效提升了界面的结合强度。

图5所示为轧制8道次RD-ND面SEM图和EDS谱图,图5(a)为界面形貌图,图5(b)和图5(c)分别为局部放大区域Cu元素EDS谱图和Fe元素EDS谱图。由图5(a)可以看出大部分区域已实现很好的焊合并融为一体,有一条极其细小的焊缝断续存在,从能谱图中可以看出,铁元素信号集中分布于焊缝处,在基体表面未发现明显的铁颗粒存在。

2.2 Cu-Fe复合材料性能

图6所示为铜-铁复合材料维氏硬度与轧制道次的关系。在轧制循环前期,轧制1道次复合材料硬度达到了117.7 HV,轧制4道次复合材料硬度达到了124.7 HV,随着轧制道次的不断增加,轧制8道次复

合材料的硬度达到最大值138.5 HV,相较轧制1道次其硬度提高了17.6%。主要原因有:首先,每次轧制大于50%压下量的剧烈塑性变形会使复合材料的晶粒细化(图3),起到了细晶强化的效果;其次,由于轧制道次的增加,铁颗粒的分散性越来越好,伴随着轧制力的作用铁颗粒被挤压进入铜基体晶内,作为位错运动钉扎点,显著提升变形抗力;最后,铜、铁界面处的接触面积增加进一步阻碍位错迁移,形成弥散强化与界面强化的协同作用,使得硬度提高。ZOU等^[27]通过对SiO₂颗粒增强复合材料进行累积叠轧发现,随着累积压下量的增加,SiO₂颗粒逐渐细化,分散性增强,同时Cu基体晶粒尺寸明显减小,表现出明显的细晶强化效果,试样整体的强度、硬度随之显著提高,其结果与本文研究一致。

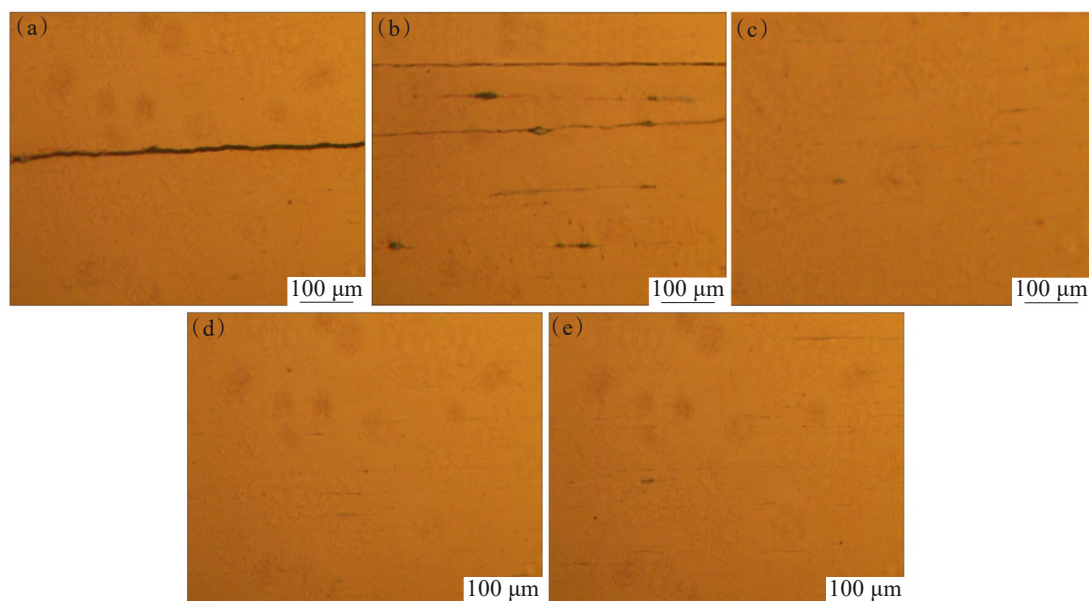


图4 不同轧制道次下复合材料 RD-ND 面铜层结合状态:(a) 1道次;(b) 4道次;(c) 6道次;(d) 7道次;(e) 8道次

Fig. 4 Bonding state of copper layer in the RD-ND plane of composite material under different rolling passes: (a) 1st pass; (b) 4th pass; (c) 6th pass; (d) 7th pass; (e) 8th pass

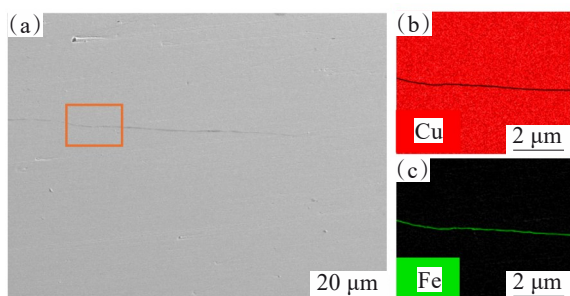


图5 轧制8道次铜铁复合材料 RD-ND 面面扫描图:(a) 形貌;(b) Cu 元素 EDS 图谱;(c) Fe 元素 EDS 图谱

Fig. 5 EDS elemental mapping of the RD-ND plane of Cu-Fe composite after 8 rolling passes: (a) morphology; (b) Cu EDS spectrum; (c) Fe EDS spectrum

图7所示为铜-铁复合材料导电率与轧制道次的关系。由图7可知,轧制1道次复合材料的导电率达到了95.5%IACS,轧制4道次复合材料导电率降低到89.2%IACS,随着轧制道次的不断增加,轧制8道次复合材料的导电率降低至81.6%IACS。轧制道次增加使铜基体的晶粒尺寸不断减小,晶粒得到细化,晶界面积增大,晶界数量增加。首先,晶界作为电子散射中心,使载流子迁移率降低,导致导电率开始下降^[7];其次,受铁颗粒分布演变的影响,轧制道次增加促使铁颗粒尺寸减小,分散度提升,界面密度增加,从而降低了复合材料的导电率。

2.3 摩擦磨损性能及表面形貌分析

图8所示为不同轧制道次铜-铁复合材料的摩擦

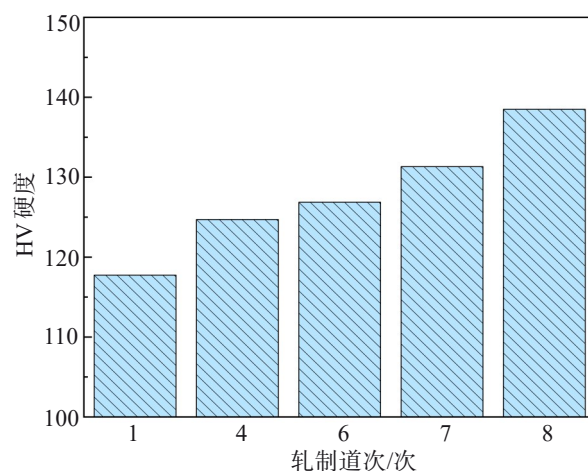


图6 不同轧制道次铜-铁复合材料的维氏硬度

Fig. 6 Vickers hardness of Cu-Fe composites with different rolling passes

系数和磨损量。由图8可以看出,复合材料的摩擦系数和磨损量随轧制道次的演变规律呈现非线性变化趋势,随着轧制道次增加,复合材料的摩擦系数随之降低,磨损量逐渐减小。轧制1道次复合材料的摩擦系数达到了0.483,磨损量为0.132 mm³;轧制4道次的复合材料摩擦系数降低到0.416,磨损量为0.129 mm³;随着轧制道次的不断增加,轧制8道次复合材料的摩擦系数降至0.337,磨损量降至0.052 mm³,摩擦系数相较轧制1道次减少了30.2%。

此规律表明,轧制循环工艺显著优化了复合材料的表面耐磨性能,其机制与材料微观结构的动态演变密切相关。首先是硬度提升与黏着磨损降低,

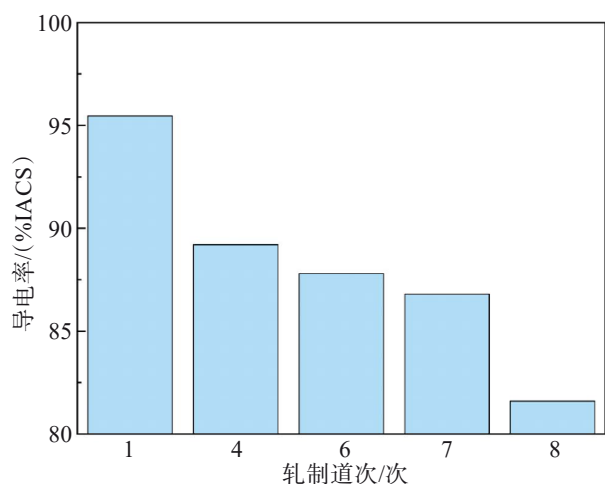


图7 不同轧制道次铜-铁复合材料的导电率

Fig. 7 Electrical conductivity of Cu-Fe composites with different rolling passes

轧制循环通过晶粒细化的途径提高了材料的硬度,且铁颗粒随着轧制道次的增加平均尺寸减小,界面结合强度提升,抑制了界面剥离导致的黏着磨损;其次是在轧制过程中铜、铁界面产生类固体润滑效应^[28],显著降低接触面的黏着倾向,使得复合材料的摩擦系数降低,提高了材料的耐磨性。

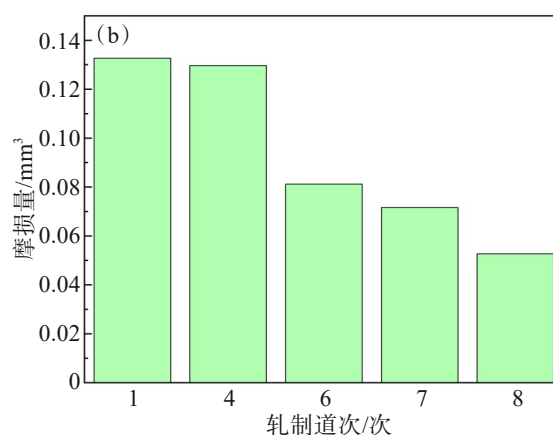
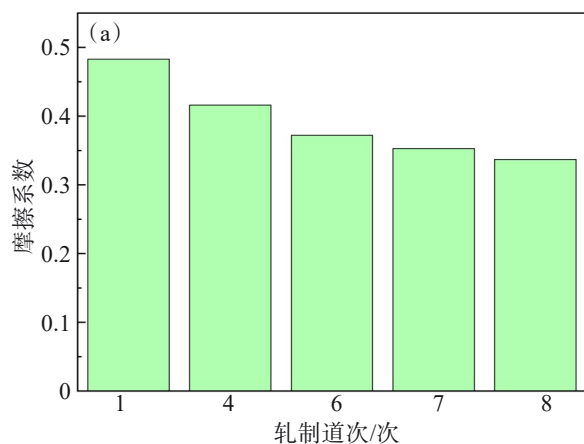


图8 不同轧制道次铜-铁复合材料:(a)摩擦系数;(b)磨损量

Fig. 8 Cu-Fe composites with different rolling passes: (a) friction coefficient; (b) wear volume

由图10可以看出,在轧制1道次后,磨损表面出现了裂纹、磨屑和犁沟,钢球的不断摩擦,使得裂纹在表面产生,裂纹附近金属基体因循环应力发生片状剥落,形成疲劳磨损碎片。黏附于钢球的磨屑在滑动过程中在铜基体上形成平行于滑动方向的犁沟形貌。此时复合材料晶粒较为粗大,且界面结合较弱,裂纹易沿晶界或铜-铁界面扩展,加剧疲劳磨损现象。因此在初始阶段即轧制1道次时,磨损机理以

图9展示了不同轧制道次铜-铁复合材料的二维磨痕形貌演变规律。由图9可知,随着轧制道次的增加,磨痕深度和宽度均随之降低。其中,轧制1道次磨痕深度为32.43 μm ,磨痕宽度为0.98 mm;轧制4道次磨痕深度为29.31 μm ,磨痕宽度为0.97 mm;随着轧制道次不断增加,轧制8道次其磨痕深度降低至13.91 μm ,磨痕宽度降低至0.67 mm。该趋势与铜层厚度变化直接相关,轧制1道次摩擦磨损过程只能接触到铜层,轧制4道次时磨痕深度约为29.31 μm 小于其层厚62.5 μm ,所以此时钢球还未磨穿铜层,其接触表面仅为纯铜。轧制6道次磨痕深度为22.69 μm ,此时复合材料铜层层厚约为15.625 μm ,这表明在摩擦磨损过程中钢球已磨穿铜层,接触到所加入的铁颗粒。轧制7和8道次之后,复合材料铜层层厚进一步降低,铁颗粒在铜基体中呈均匀弥散分布,复合材料硬度显著提升,有效抑制磨粒压入深度。这与石磊等^[29]研究中提出的高轧制道次促进铁颗粒细化至亚微米级、强化界面结合的机制一致。

图10展示了铜-铁复合材料在不同轧制道次下的磨痕形貌及其磨损机理的演化过程。通过对比分析轧制1、4、6、7、8道次后的磨损特征,揭示复合材料摩擦学性能与微观结构演变的关联性。

疲劳磨损与磨粒磨损为主导。轧制4道次后,出现边缘翻转及分层现象,轧制循环导致铜层间界面累积残余应力,在摩擦热与法向压力的协同作用下,钢球运动诱发界面分层^[30]。铁颗粒的进一步分散,增强了界面结合强度,但局部高温软化基体,导致钢球与复合材料间发生材料转移,形成边缘翘起的黏着结块(见图10(b)),表明主要的磨损机理为黏着磨损。轧制6道次后,磨损表面出现严重的裂纹及剥落坑,

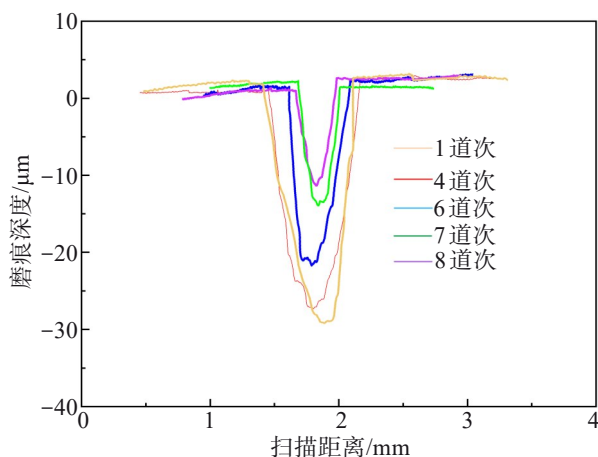


图9 不同轧制道次铜-铁复合材料的二维磨痕形貌

Fig. 9 Two-dimensional wear scar morphology of Cu-Fe composites with different rolling passes

表现为典型的疲劳磨损特征。经过6次轧制循环,材料已实现了较为明显的加工硬化效果,导致位错密度显著增加,并产生位错塞积;同时,添加的铁颗粒增强体仍存在部分团聚现象,未表现出明显的均匀分散性(见图2(c)),在摩擦磨损试验过程中,破坏了

基体的连续性,导致易出现表面的局部应力集中现象,出现初始裂纹。由于晶粒细化后材料对循环载荷敏感性增强,当钢球往复摩擦时裂纹将继续扩展,当多处裂纹逐渐延伸并相互交织时,产生脆断并形成剥落坑^[31]。轧制7、8道次后,此时添加的铁颗粒增强体已经实现了明显的弥散分布,没有大范围的颗粒团聚现象,且颗粒尺寸也随着轧制循环的增加变得更加细小(见图2(d)、图2(e)),进一步的轧制再次提升了铜板与铜板之间、铜板与铁颗粒增强体之间的界面结合效果,一定程度上减小了摩擦磨损试验过程中的局部应力集中。由于加工硬化效果进一步提升,复合材料的强度、硬度再次增加,材料表面硬度的增加使得表面更难剥离^[32];复合材料的临界剪切应力的增大,使得钢球在往复摩擦过程中出现的初始裂纹明显减少,减缓了裂纹扩展及剥落坑的形成,从而表现为较优的耐磨性^[33]。

图11和图12所示分别为轧制7、8道次复合材料磨痕形貌及磨痕能谱图。结合形貌特征与成分分析,可深入揭示高轧制道次下材料磨损机理的独特性及其性能优化的结构根源。

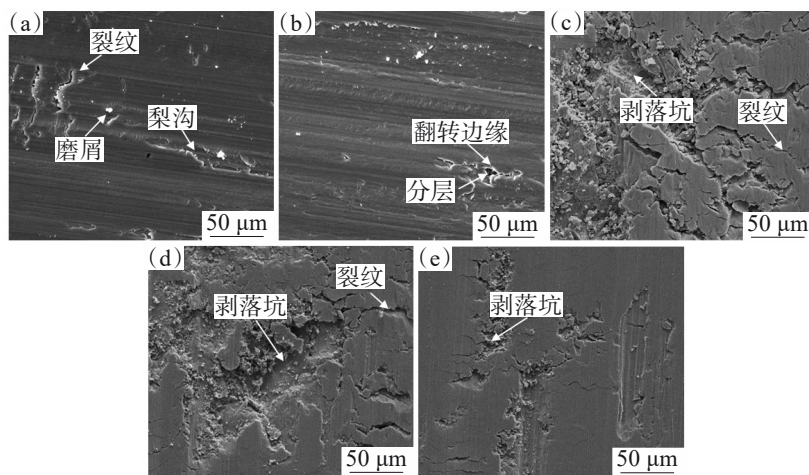


图10 不同轧制道次铜-铁复合材料的磨痕形貌:(a) 1道次;(b) 4道次;(c) 6道次;(d) 7道次;(e) 8道次

Fig. 10 Abrasion morphology of Cu-Fe composites with different number of rolling passes: (a) 1st pass; (b) 4th pass; (c) 6th pass; (d) 7th pass; (e) 8th pass

由磨痕形貌分析得出轧制7、8道次的磨损机理是以疲劳磨损为主导,尽管磨损机理回归疲劳机制,但磨损量较轧制1道次磨损量更少,其原因是细晶强化与铁颗粒弥散分布提高抗塑性变形能力,抑制了犁沟深度。由图11(c)和图11(d)以及图12(c)和图12(d)可以看出,磨屑中铜与铁元素共存,Fe元素弥散分布。表面仅存浅层剥落坑,无连续深沟,说明细晶强化显著提升了材料抗塑性变形能力,阻碍了磨粒对基体的切削作用。铁元素能谱信号呈连续弥散状,

无局部团聚现象,表明多次轧制循环使铁颗粒得到细化并均匀嵌入铜基体中,与铜基体协同承受摩擦载荷。

3 结论

1) 轧制道次的增加显著优化了材料的微观结构,轧制8道次后铁颗粒呈现弥散分布,界面结合效果提升,同时晶粒细化效果显著。

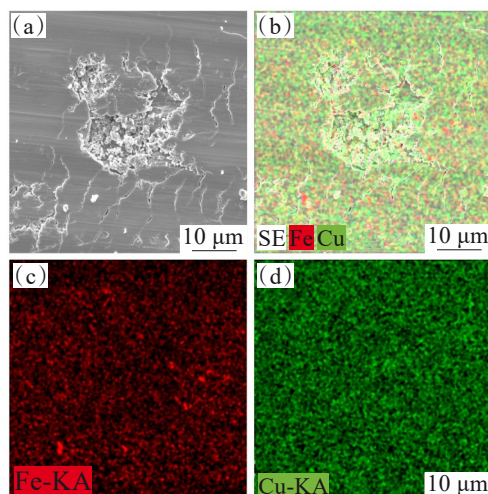


图 11 轧制 7 道次复合材料的形貌特征及 EDS 面扫结果:(a)磨痕处形貌特征;
(b)面扫元素重叠结果;(c)Fe 元素分布;(d)Cu 元素分布

Fig. 11 Morphology and EDS mapping of the composite after 7 rolling passes:(a) morphology of wear mark;
(b) elemental overlay;(c) Fe distribution;(d) Cu distribution

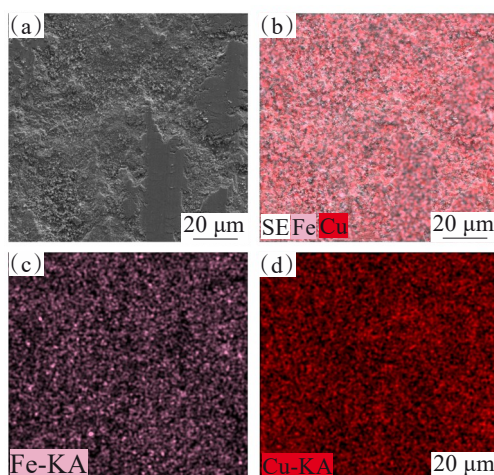


图 12 轧制 8 道次复合材料的形貌特征及 EDS 面扫结果:(a)磨痕处形貌特征;(b)面扫元素重叠结果;(c)Fe 元素分布;(d)Cu 元素分布

Fig. 11 Morphology and EDS mapping of the composite after 8 rolling passes:(a) morphology of wear mark;
(b) elemental overlay;(c) Fe distribution;(d) Cu distribution

2)复合材料维氏硬度随轧制道次增加持续增强,轧制 8 道次后硬度达到 138.49 HV,较轧制 1 道次的 117.74 HV 提升了 17.6%;导电率呈反向变化趋势,轧制 8 道次后为 81.6%IACS。

3)复合材料的磨痕深度与宽度随轧制道次增加逐渐减小。轧制 8 道次后摩擦系数为 0.337,较轧制 1 道次降低了 30.2%,磨损量减少了 60.6%,耐磨性显著提升。

4)轧制道次增加,磨损机制随之发生转变,由初始的疲劳-磨粒复合磨损经黏着磨损过渡,最终形成以疲劳磨损为主、磨粒磨损为辅的磨损机制。轧制 8 道次后磨痕区域 Fe 元素呈现弥散分布。

参考文献:

- [1] ZHOU Y, LI S L, MAO P L, et al. Effect of copper addition on precipitation behaviors and mechanical properties of Mg-Zn-Cu alloys with respect to high zinc[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024, 12(12): 5194-5204.
- [2] JUNG M J, LEE J I, KIM J M, et al. Mechanical properties of Sn58Bi-Cu composite solder filled with copper particles[J]. Materials Transactions, 2024, 65(12): 1616-1619.
- [3] 柳春林,唐延川,张庆祝,等. 层间硬度比对 Cu-Be/Cu 层状异构复合材料强韧性的影响 [J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(1): 67-79.
- [4] 唐培新,吴战芳,吕周晋,等. 铜-钢双金属复合材料固相连接技术的研究进展[J]. 江西冶金, 2026, 46(1): 23-35.
- [5] 张晓青,姜庆伟,张守健,等. 高强高导石墨烯增强铜基复

- 合材料的研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(5): 641-650.
- [6] 叶安梁, 姜雁斌, 彭超群, 等. 增材制造铜及铜合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(4): 1071-1090.
- [7] TIAN Y Z, YANG Y, PENG S Y, et al. Managing mechanical and electrical properties of nanostructured Cu-Fe composite by aging treatment[J]. *Materials Characterization*, 2023, 196: 112600.
- [8] TIAN Y Z, PENG S Y, YANG Y, et al. Attaining exceptional electrical conductivity in Cu-Fe composite by powder rolling strategy[J]. *Scripta Materialia*, 2023, 227: 115302.
- [9] XIN G A, ZHOU M, JING K, et al. Heat treatment effects on microstructure and properties of Cu-Ti-Fe alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 892: 146068.
- [10] 雷前, 杨一海, 肖柱, 等. 高强高导高耐热铜合金的研究进展与展望[J]. 材料导报, 2021, 35(15): 15153-15161.
- [11] CHATTERJEE A, SPRAGUE E, MAZUMDER J, et al. Hierarchical microstructures and deformation behavior of laser direct-metal-deposited Cu-Fe alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 802: 140659.
- [12] MOON H J, YEO T M, LEE S H, et al. Effect of Zr addition on metastable liquid-liquid phase separation of Cu-Fe alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2021, 205: 114218.
- [13] 马启东, 张宇博, 岳世鹏, 等. 深冷轧制及时效处理过程中Cu-Fe合金的组织性能演变[J]. 金属热处理, 2024, 49(4): 48-54.
- [14] ZHANG C Z, CHEN C G, HUANG L N, et al. Microstructure and properties of Cu-Fe alloys fabricated via powder metallurgy and rolling[J]. *Powder Metallurgy*, 2021, 64(4): 308-320.
- [15] ZHANG P, YUAN X B, ZENG Z M, et al. Influence of Fe content on microstructure and performance of powder metallurgy Cu-Fe alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2024, 34(5): 1571-1587.
- [16] 周斌, 郭创立, 孙君鹏, 等. Cu-5%Fe合金薄板带的研制与应用[J]. 电工材料, 2021(4): 19-22.
- [17] LI J Q, ZHANG H T, SUN J T, et al. Design of low-alloying and high-performance solid solution-strengthened copper alloys with element substitution for sustainable development[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2024, 31(5): 826-832.
- [18] POKHAREL R, NIU T J, RICCI S, et al. Alloying effects on deformation induced microstructure evolution in copper[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 23915.
- [19] WANG M, JIANG Y B, LI Z, et al. Microstructure evolution and deformation behaviour of Cu-10 wt% Fe alloy during cold rolling[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 801: 140379.
- [20] 毛敏聪, 甘雪萍, 周科朝, 等. 烧结温度与时效工艺对Cu@Fe复合粉末制备Cu-Fe合金组织与性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2021, 26(4): 363-371.
- [21] LIU K M, SHENG X C, HE G Y, et al. Microstructure and electrical resistivity of in situ Cu-Fe microcomposites[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(5): 3896-3901.
- [22] 帅歌旺, 方平, 郭正华, 等. 机械合金化制备Cu-Fe过饱和固溶体及其时效分解[J]. 材料工程, 2008, 36(12): 51-54.
- [23] PENG S Y, TIAN Y Z, YANG Y, et al. Achieving homogeneous Fe distribution and high strength in Cu-Fe composite consolidated by powder rolling[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 884: 145563.
- [24] LEE S H, LEE C H, YOON S J, et al. Annealing characteristics of nanostructured Cu-Fe-P alloy processed by accumulative roll-bonding[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2007, 7(11): 3872-3875.
- [25] SUWAS S, SURESH K S, ROLLETT A D. Texture and microstructure evolution during cold rolling of Cu-Fe laminates prepared by accumulative roll bonding[J]. *Materials Science Forum*, 2012, 715/716: 170.
- [26] GHADERI O, TOROGHINEJAD M R, NAJAFIZADEH A. Investigation of microstructure and mechanical properties of Cu-SiCP composite produced by continual annealing and roll-bonding process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 565: 243-249.
- [27] ZOU H H, RAN X, ZHU W W, et al. Tribological behavior of copper-graphite composites reinforced with Cu-coated or uncoated SiO₂ particles[J]. *Materials*, 2018, 11(12): 2414.
- [28] 丁晓龙, 杨兆方, 郑合静. 磷酸锆对铜铋-钢背双层金属复合材料性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2024, 42(2): 128-134.
- [29] 石磊, 赵齐, 罗成, 等. Cu含量和烧结温度对Fe-Cu基粉末冶金复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 材料研究学报, 2020, 34(2): 137-150.
- [30] 孙科, 刘锦平, 王靖. 放电等离子烧结制备镍掺杂石墨-铜复合材料组织性能研究[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(3): 65-72.
- [31] MANU S, RADHIKA N. Wear and friction study of centrifugally cast functionally graded Cu-Ni-Si alloy and composite[J]. *Tribology in Industry*, 2020, 42(2): 268-277.
- [32] GOPI V, SELLAMUTHU R, ARUL S. Measurement of hardness, wear rate and coefficient of friction of surface refined Al-Cu alloy[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 97: 1355-1360.
- [33] RAM PRABHU T, VARMA V K, VEDANTAM S. Tribological and mechanical behavior of multilayer Cu/SiC+Gr hybrid composites for brake friction material applications[J]. *Wear*, 2014, 317(1/2): 201-212.