

文章编号:1674-9669(2025)03-0397-09 DOI:10.13264/j.cnki.ysjskx.2025.03.008

引文格式:刘锦平,管礼军,王宇轩,等.累积叠轧铜-石墨复合材料中间退火工艺优化[J].有色金属科学与工程,2025,16(3):397-405.

累积叠轧铜-石墨复合材料中间退火工艺优化

刘锦平*, 管礼军, 王宇轩, 孙科, 孙德文, 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:传统工艺制备的铜-石墨复合材料易出现孔隙、开裂等缺陷。本文通过累积叠轧焊接加工技术,并采用不同次数的中间退火工艺制备铜-石墨复合材料。采用XRD、SEM和EDS等方法表征了复合材料性能并确定了较优中间退火工艺。结果表明,在轧制过程中材料的流动性随着中间退火次数的增加而提升,这有利于填补石墨颗粒与铜基体之间的孔隙。在退火过程中,铜基体发生了再结晶,降低了铜-石墨复合材料变形抗力和硬度,提高了材料的密度和导电率,改善了摩擦磨损性能。当中间退火次数逐步减少时,复合材料的磨损量逐步增加。其中,一步退火制备的铜-石墨复合材料综合性能最优异,其相对密度、电导率及摩擦系数分别达到了97.9%、94.5%IACS和0.215。

关键词:铜-石墨;累积叠轧;中间退火;组织和性能

中图分类号:TG335.85 **文献标志码:**A

Optimization of intermediate annealing process for accumulative roll bonding copper-graphite composites

LIU Jinping*, GUAN Lijun, WANG Yuxuan, SUN Ke, SUN Dewen, XUAN Yu'ang, YE Senliang
(Faculty of Materials Metallurgy and Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Copper-graphite composites prepared by traditional processes are prone to some defects, such as pores and cracks. Copper-graphite composites were prepared using accumulative roll bonding technology and an intermediate annealing process at different times. Their properties were characterized by XRD, SEM, EDS and other methods to determine the best intermediate annealing process. The results show that the fluidity of the material is improved with the increase in the number of intermediate annealing during the rolling process, which is beneficial for filling the pores between graphite particles and the copper matrix. During the annealing process, the recrystallization of the copper matrix occurs, which reduces the deformation resistance and the hardness, increases the relative density and the electrical conductivity, and improves the friction and wear performance. When the number of intermediate annealing decreases gradually, the wear amount of the composites increases gradually. Among them, the copper-graphite composite prepared by one-step annealing has the best comprehensive performance, with its relative density, electrical conductivity and friction coefficient reaching 97.9%, 94.5%IACS and 0.215, respectively.

Keywords: copper-graphite; accumulative roll bonding; intermediate annealing; microstructure and properties

纯铜具有优异的物理性能和塑性加工性能,铜基体引入碳材料可以提高导电性能、力学性能、耐高

温及载流摩擦等性能,在轨道交通、航空航天和电子工业等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。SHAO等^[4]制

收稿日期:2024-04-29;修回日期:2024-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51761013)

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的研究工作。E-mail:liujinping@jxust.edu.cn

备了以 Al_2O_3 、 SiC 和石墨等作为第二相的铜基复合材料,并在强度、硬度、耐磨性、电导率等方面均实现了较为明显的性能提升。由于石墨具有良好的导电性、导热性和自润滑性,合理加入石墨可赋予铜及铜合金基体多功能化特性^[5-9]。铜基复合材料的传统制备方法主要有 2 种,分别为冷压烧结法和熔体搅拌法^[10-11]。冷压烧结法是最早用于制备铜基石墨复合材料的方法。SAITO 等^[12]采用传统冷压烧结法制备了石墨铜基复合材料,发现该方法制备的石墨黄铜孔隙率较高,当石墨粒径为 $74\sim 104\ \mu\text{m}$ 时,孔隙率高达 19.3%。LI 等^[13]研究发现,烧结材料的孔隙可分为单一的隔离孔和 2 个或多个孔隙构成的连通孔。隔离孔易产生各向同性的变形,而连通孔则易引起局部的应变增加,并转变成微裂纹。传统冷压烧结法制备的铜基复合材料存在较多气孔缺陷,其抗拉强度较低,难以满足复合材料的力学性能要求^[14-15]。为减少铜基石墨复合材料的气孔,提高抗拉强度,部分研究者开始采用熔体搅拌法进行铜基石墨复合材料的制备。研究通过半固态搅拌法制备铜基石墨复合材料发现,随着半固态浆料固相率逐步增加,石墨颗粒的上浮偏聚程度逐步减小,当固相含量为 40%(体积分数)时,石墨颗粒的上浮偏聚现象基本消除,但快速搅拌易导致大量的气体卷入,在铸件中易形成气孔,明显降低材料的力学性能^[10,16]。综上可知,传统方法制备的铜基复合材料存在气孔多、力学性能低、第二相分布不均匀和界面结合差等缺陷。累积叠轧焊接工艺(ARB)是近年来制备颗粒增强金属基复合材料的一种新兴加工工艺^[17-18]。通过不断地叠轧焊接,可以使添加的颗粒增强体逐步均匀弥散分

布于金属基体表面,使得颗粒增强体的强化效果充分体现。但随着叠轧次数的增加,复合材料变形量增大,在颗粒增强体附近易产生不均匀的塑性变形。当施加应力达到阈值时,会导致试样断裂,从而影响后续加工及焊接。JAMAATI 等^[19]引入中间退火工艺,通过中间退火消除因强塑性变形所产生的残余应力,同时促进两金属板及颗粒增强体间原子的相互扩散,进一步增强金属板间的焊合程度,提高颗粒增强体与金属板间的界面结合作用。但目前对不同循环次数累积叠轧铜基石墨复合材料的退火研究未见文献报道。结合先前的实验基础,本文利用氩气气氛和空气气氛来退火,累积叠轧 6 个循环,利用叠轧板材有无夹杂物来确定退火气氛,同时分析不同退火工艺后复合材料的组织和性能,为累积叠轧铜基复合材料提供理论依据。

1 实验部分

将 1 mm 厚的纯铜板材在 $600\ ^\circ\text{C}$ 保护性气氛下退火 2 h,退火后的铜板预先放入 20% H_2SO_4 溶液中腐蚀掉表面氧化皮,然后用砂纸打磨掉剩余的氧化皮。称量复合材料总量 0.3%(体积分数)的石墨均匀涂在其中一块铜板叠轧面上,利用双辊轧机轧制焊合 2 块分离的铜板,轧辊转速为 $0.5\ \text{m/min}$,压下量约为 50%。使用工业剪将退火后的铜板对半剪断,然后进行表面磨刷涂抹、堆叠、轧制焊合、退火处理,再循环往复直至达到目标的轧制次数,如图 1 所示。石墨粉只在第 1 次轧制中添加,循环次数计为 N 次(本文取 6 次循环)。

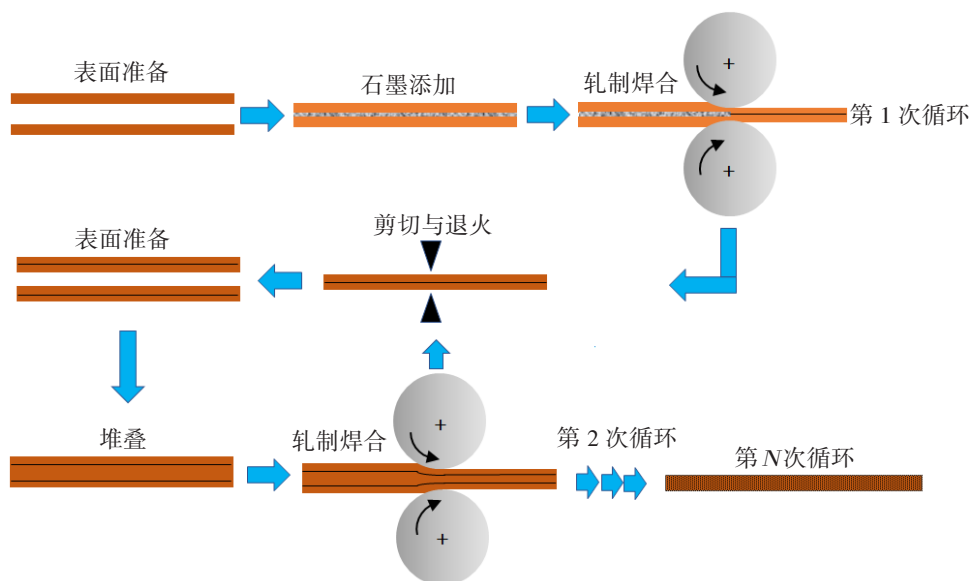


图 1 累积叠轧焊接过程工艺简图

Fig. 1 Schematic diagram of accumulative roll-bonding process

退火工艺方案分为一步退火、两步退火和三步退火。一步退火为每叠轧1次就进行退火,两步退火为连续叠轧2次后进行退火,三步退火为连续叠轧3次后进行退火。分别从4次循环后不同中间退火处理所制备的复合材料中截取3块10 mm×10 mm的试样进行冷镶。用600目(15 μm)砂纸打磨并观察试样有无分层脱落,以评估不同试样焊层之间的结合程度。

2 结果与分析

2.1 累积叠轧退火气氛

图2所示为有无保护性气氛条件下退火的复合材料微观形貌及元素谱图。在非保护性气氛及保护性气氛下退火所得的合金试样,均出现了大块的黑色颗粒。通过能谱分析可以发现,在非保护性气氛下退火产生的黑色颗粒,含碳量较低,含氧量及含铜量较高。这说明在非保护性气氛下退火,炉中的铜板发生了大面积氧化,并且产生的氧化铜杂质对材料的后续加工及性能均会产生不良的影响。而在保护性气氛下退火所得的黑色颗粒为石墨,没有氧元素的掺杂,有效地防止了铜板的氧化。

2.2 铜-石墨复合材料界面结合分析

图3为不同中间退火工艺下所得的轧制面金相

照片。从图3中可以看出,经过相同的叠轧工艺处理后,不同中间退火次数的试样均有良好的焊合性,但一步退火工艺下的试样,其连续的石墨焊合纹路相对较少,在后续的轧制变形中具有更强的塑性变形能力,并且样品表面的新金属基体占比更大,使得2块板表现出更好的焊合性。在轧制过程中,复合材料内部界面温度的变化对焊合质量产生影响,界面温度较高时,焊合质量相对较好^[20]。未经退火处理时,由于塑性变形过程中材料内部产生大量的位错增殖及位错缠结,大量缺陷的产生使得材料的强度、硬度升高,塑性、韧性下降,在后续轧制时所需要的轧制力提升。经过退火处理后的合金试样,不仅能有效减少因塑性变形所产生的大量缺陷,同时在退火过程中,铜基体会持续软化,石墨颗粒更易沿着轧制方向弥散分布于铜基体中,不易形成连续的石墨纹路。

图4为不同中间退火处理所制备样品的焊合情况。从图4可以看出,三步退火和不退火的合金试样均出现了不同程度的分层脱落,而一步及两步退火的合金试样则表现得较为平整,未出现明显的分层脱落,表面具有较好的完整性。这也进一步说明了在三步退火和不退火工艺下,合金试样内部的焊合程度较差,存在部分未焊合区(如图4中箭头所示)。

由于在累积叠轧的过程中,铜基体在石墨颗粒处易产生不均匀的塑性变形,产生应力集中,严重阻

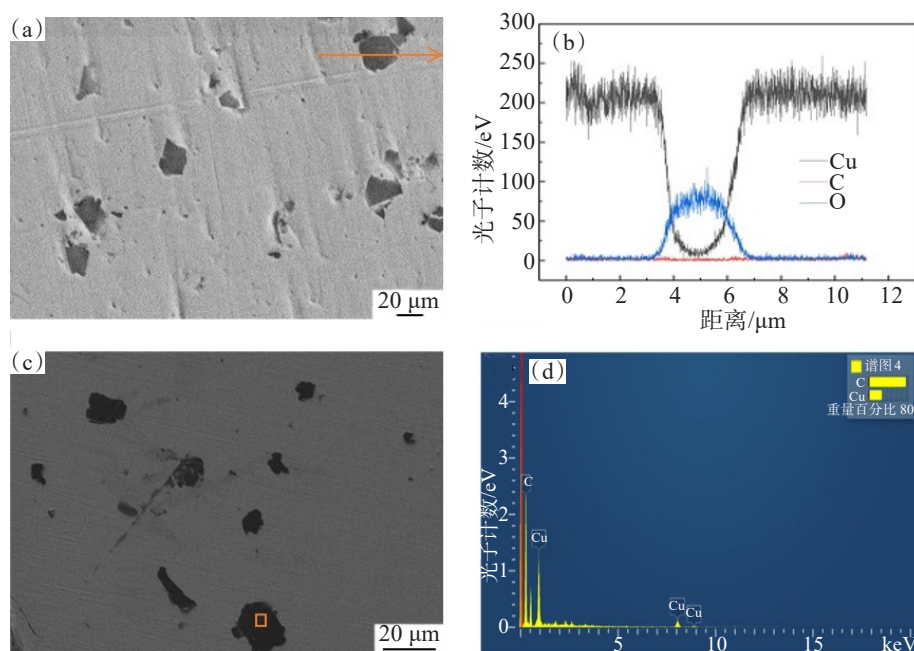


图2 复合材料SEM像及能谱图: (a) 非保护性气氛退火SEM像; (b) 图(a)标识处线扫图; (c) 保护性气氛退火SEM像; (d) 图(c)标识处能谱

Fig.2 Scanning and energy spectrum of composite materials: (a) non-protective atmosphere annealing; (b) figure (a) mark line scan; (c) protective atmosphere annealing; (d) figure (c) energy spectrum diagram at the identification point

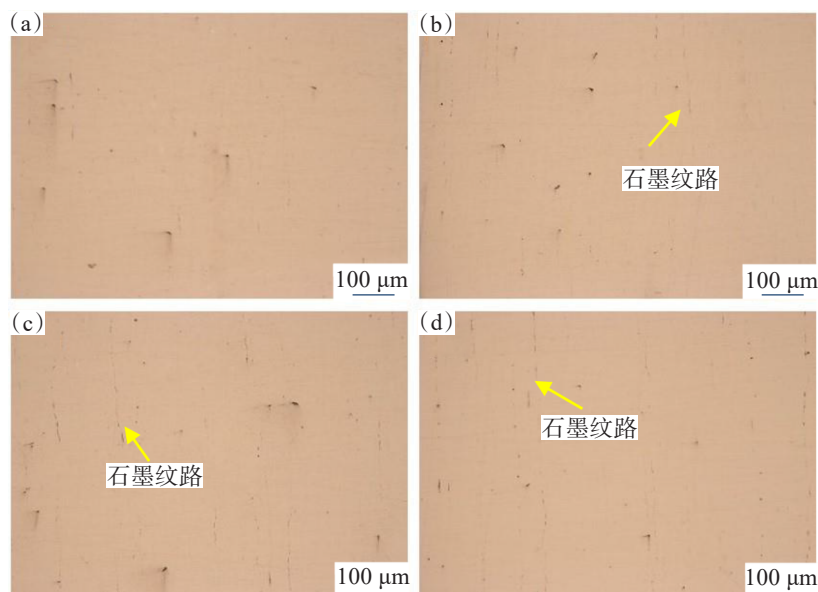


图3 不同中间退火工艺轧制面形貌: (a) 一步退火; (b) 两步退火; (c) 三步退火; (d) 不退火

Fig.3 Rolling surface morphology of different intermediate annealing processes: (a) one-step annealing; (b) two-step annealing; (c) three-step annealing; (d) no annealing

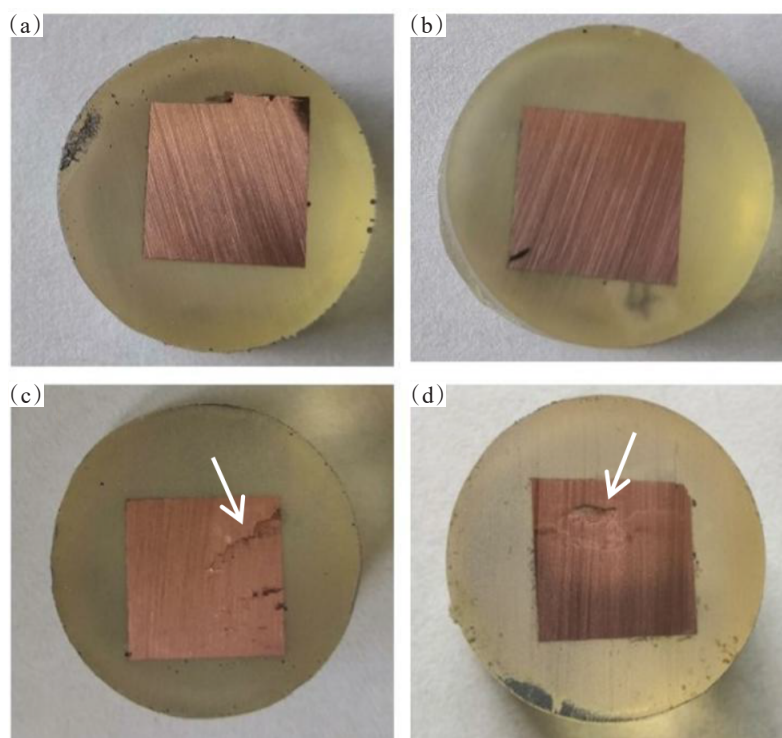


图4 不同中间退火处理所制备样品的焊合情况: (a) 一步退火; (b) 两步退火; (c) 三步退火; (d) 不退火

Fig. 4 Different intermediate annealing process RD-TD surface macro morphology: (a) one-step annealing; (b) two-step annealing; (c) three-step annealing; (d) no annealing

碍了板与板间的紧密焊合,并且在塑性变形过程中,由于加工硬化效果的影响,复合材料的强度硬度上升,塑性韧性下降,不利于材料的进一步轧制变形,阻碍了石墨增强颗粒与铜板间的紧密结合。当应力

在石墨颗粒附近逐渐累积,达到屈服极限时,会引起铜板间的分层脱落,严重影响板与板间的界面焊合。而经过多次的中间退火则能有效减少因塑性变形而产生的残余应力、裂纹和气泡等缺陷,使得板与板、

板与颗粒增强体间的界面结合效果提升,从而有效避免了分层脱落现象。

2.3 复合材料 RD-TD 面的石墨分散性

图 5 为不同中间退火工艺的复合材料内石墨分布状态。由图 5 中石墨分布可以看出,随着中间退火次数的增多,石墨颗粒在铜基体中的弥散程度更好,分布更均匀。从 SEM 像中可以

看出,一步退火工艺下的复合材料中石墨颗粒弥散分布于铜基体中;两步退火工艺下的样品出现了部分石墨颗粒的团聚现象;三步退火及不退火工艺下的样品出现了明显的偏聚现象,形成了明显的富碳区和贫碳区,不退火试样的偏聚现象更为明显,偏聚的石墨团簇主要表现为密集型团簇。

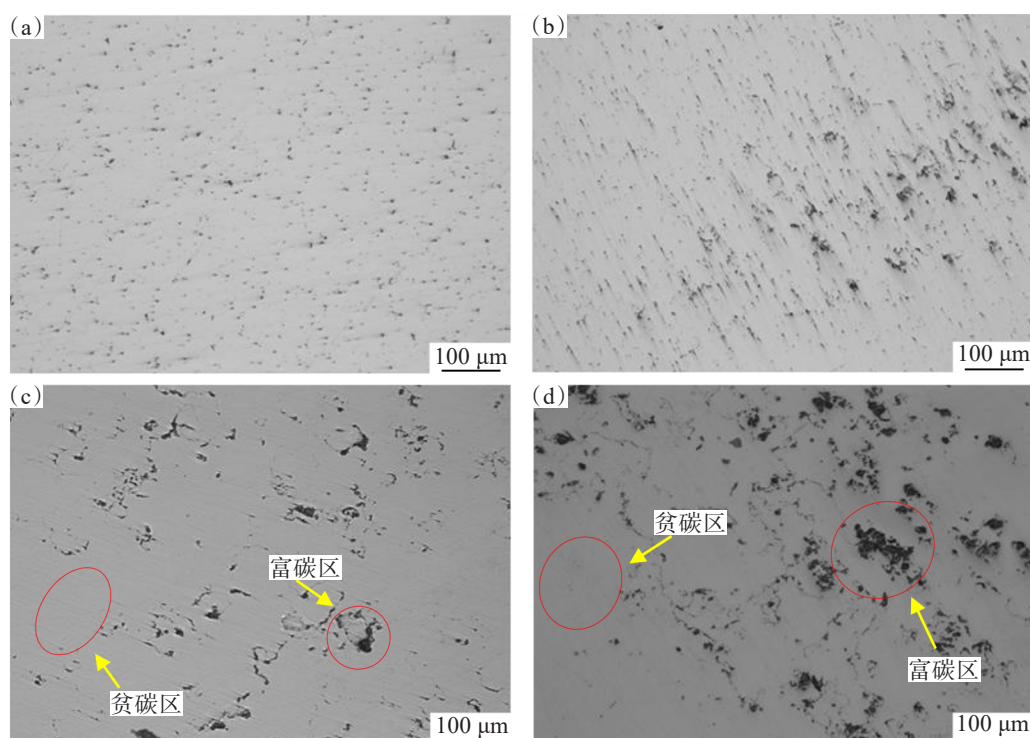


图 5 复合材料 RD-TD 面石墨分布: (a) 一步退火; (b) 两步退火; (c) 三步退火; (d) 不退火

Fig.5 Graphite distribution on RD-TD surface of composites: (a) one-step annealing; (b) two-step annealing; (c) three-step annealing; (d) no annealing

在中间退火过程中,铜基体发生一定程度的软化,使得石墨增强颗粒更易嵌入铜基体中,并随着轧制变形,石墨颗粒随着轧制方向流动,从而可以有效减小石墨团簇的尺寸,并使石墨颗粒沿着轧制进行均匀地分散到铜基体中。当退火次数较少时,铜基体的塑性较差,金属流动性较差,限制了这种颗粒分散作用,从而形成了大量的石墨团簇,因此形成了富碳区和贫碳区^[21]。

2.4 铜-石墨复合材料的相对密度、硬度和导电率

图 6 为不同中间退火处理后试样的相对密度值。从柱状图可以看出,随着中间退火次数的减少,铜-石墨复合材料的相对密度降低。其中,一步退火工艺所制备的复合材料相对密度达到 97.9%,相比于同等工艺条件下的不退火试样增加 1.04%。

当中间退火的次数增加时,因塑性变形所导致的位错增殖、位错缠结等缺陷得以减少,同时部分残余应力得以释放,使得铜基体中的位错密度降低,畸变能减小,复合材料的塑性韧性得到提升。同时由于铜基体在退火过程中的软化效果,石墨颗粒能更好地嵌入铜基体中,铜基体与石墨增强颗粒的结合力增加,进而使得材料的相对密度增加。随着退火次数的增加,石墨增强颗粒能更好地沿着轧制变形方向弥散均匀地分布在铜基体表面,使得大块的石墨团簇数量明显减少,从而提高了材料的相对密度。

DIXIT 等^[22]指出,当石墨均匀弥散分布于基体并与基体有良好的界面结合时,复合材料的相对密度会增加;反之,当石墨颗粒的润湿性较差及出现团聚时,则会显著降低复合材料的相对密度。在铜-石墨

复合材料中的石墨团簇主要以密集团簇的形式存在,密集团簇的粒子之间不存在基质材料,不连续性的程度更显著,对相对密度的影响更大。

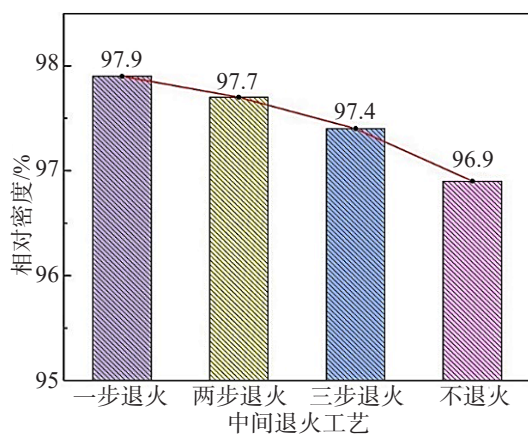


图6 不同中间退火工艺复合材料的相对密度

Fig.6 Relative density of composites with different intermediate annealing processes

图7为不同中间退火工艺复合材料的硬度变化曲线。由硬度变化规律可以看出,经过相同的叠轧工艺后,铜-石墨复合材料的硬度相对于退火纯铜有显著的提高,其中一步退火工艺所制备的合金试样硬度相较于退火纯铜提高了131.1%。当中间退火的次数逐渐减少时,复合材料的硬度逐渐提高,这是由于在叠轧过程中铜基体因轧制变形产生加工硬化效果,使得复合材料中的位错密度显著增加。同时,通过累积叠轧所制备的样品,其晶粒尺寸显著降低,可达到纳米级,产生细晶强化从而提高硬度^[23],最终导致复合材料的硬度显著提升。当进行退火处理时,材料内部的残余应力得以释放,位错等缺陷密度逐渐降低,同时伴随着再结晶及晶粒长大,使得合金材料的硬度下降,塑性韧性提升。

中间退火的次数也会影响石墨颗粒增强体在铜基体表面的分布,从而影响复合材料的硬度。当中间退火次数增加时,石墨增强颗粒更易沿着轧制变形方向均匀弥散地分布于铜基体表面,使得石墨颗粒不易团聚,导致合金材料的相对密度增加,从而增加其硬度^[24]。LIU等^[25]研究发现,随着中间退火次数的增加,细小的石墨颗粒均匀分散在铜基体中,具有较高的表面能,可以有效阻碍位错的运动。同时,弥散的石墨颗粒与铜基体有着良好的界面结合效果,在变形过程中需要更大的驱动力,从而增加复合材料的硬度。

图8为不同中间退火工艺试样的电导率变化规律。从柱状折线图中可以看出,经过相同的叠轧工

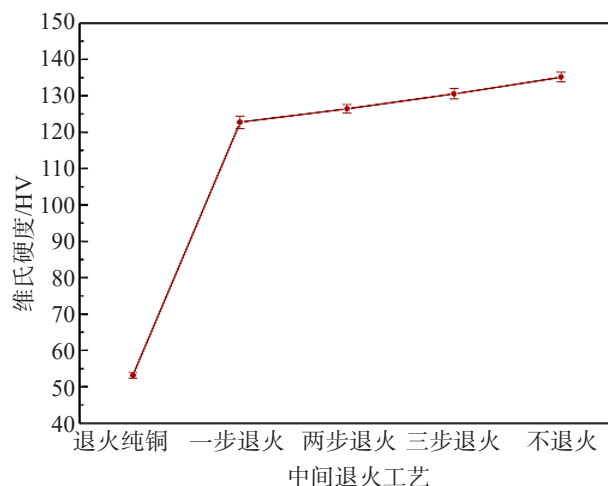


图7 不同中间退火工艺复合材料的硬度

Fig.7 Hardness of composites with different intermediate annealing processes

艺后,铜-石墨复合材料的电导率明显低于退火纯铜,但均保持在89%IACS以上,仍能体现出铜基复合材料优异的导电性能。随着中间退火次数的减少,铜-石墨复合材料的电导率逐渐降低。当进行中间退火时,因轧制变形所产生的畸变能及界面能得以释放,铜基体的晶格畸变减弱,对电子的散射概率减小,复合材料的导电能力提升。

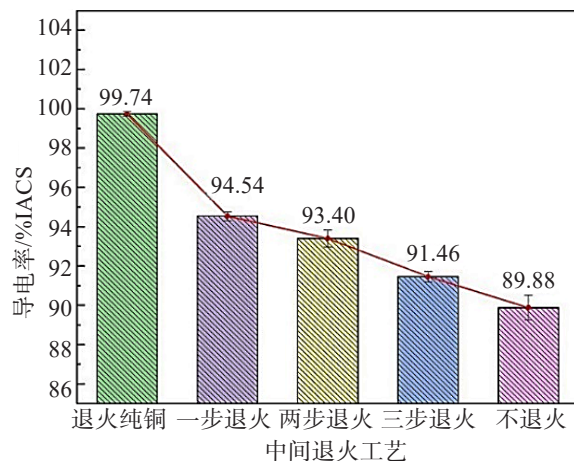


图8 不同中间退火工艺制备复合材料的导电率

Fig. 8 Conductivity of composites prepared by different intermediate annealing processes

AYYAPPADAS等^[26]指出,当石墨颗粒与铜基体相互接触时,颗粒与颗粒之间会相互构建位于材料内部的导电通路,晶界、缺陷、孔隙数量的增加会显著降低导电通路的连续性,使得材料的电导率明显下降。与纯铜相比,铜-石墨复合材料的导电性有所降低,但由于该材料含有自润滑性能较好的石墨颗

粒,这有利于降低该复合材料的摩擦系数和磨损率,从而提高该材料的耐磨性能^[7]。

2.5 摩擦磨损性能分析

图 9 为试样摩擦系数随退火工艺而变化的规律曲线。从变化曲线图可以看出,经过相同的叠轧工艺后,铜-石墨复合材料的摩擦系数明显低于退火纯铜,随着中间退火次数的减少,复合材料的摩擦系数逐步增加,其中一步退火所制备的摩擦系数最低,为 0.215。在本研究中,石墨对摩擦系数的降低起主导作用,由于随中间退火次数的减少,相对密度逐渐降低,石墨分布越来越不均匀,出现石墨团聚现象。当石墨颗粒发生团聚时,铜基体与铜基体之间的接触面随之而增大,作为中间润滑剂的石墨颗粒的润滑效果减弱;同时,团聚的石墨颗粒由于体积较大,在滑动表面的黏着性降低,使得在滑动过程中的石墨颗粒连续性显著降低,导致润滑效果的减弱,最终体现为摩擦系数的增加^[27]。

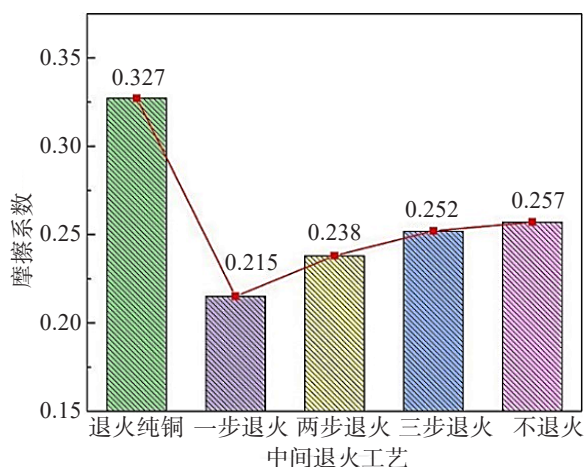


图 9 不同中间退火工艺制备复合材料的摩擦系数

Fig.9 Friction coefficient of composites prepared by different intermediate annealing processes

图 10 所示为不同中间退火工艺制备的试样的二维磨痕形貌。从图 10 中可以明显看出,随着中间退火次数的减少,复合材料的磨痕深度及宽度均出现了明显地减少,铜-石墨复合材料的磨痕深度及宽度相较于退火纯铜明显减小。

图 11 为不同中间退火工艺制备的试样磨损量变化曲线。从图 11 中可以看出,铜-石墨复合材料的耐磨性能及摩擦磨损性能明显优于退火纯铜,石墨颗粒增强体的加入可以起到减摩耐磨的作用从而降低磨损量。其中无中间退火工艺的合金试样磨损量最低,其值为 1.46×10^{-4} g,比一步退火工艺所制备的试样磨损量降低了 24.4%。RAJKUMAR 等^[28]指出,当

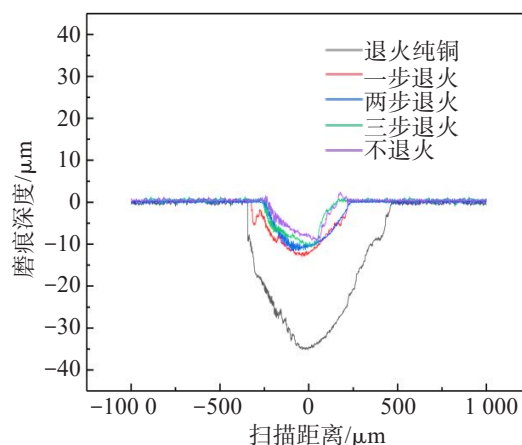


图 10 不同中间退火工艺制备试样的二维磨痕形貌

Fig.10 Two-dimensional wear scar morphology of samples prepared by different intermediate annealing processes

铜-石墨复合材料的细小石墨颗粒弥散分布于铜基体时,材料具有较低的孔隙率和更精细的微观组织结构,这会降低复合材料的磨损量。

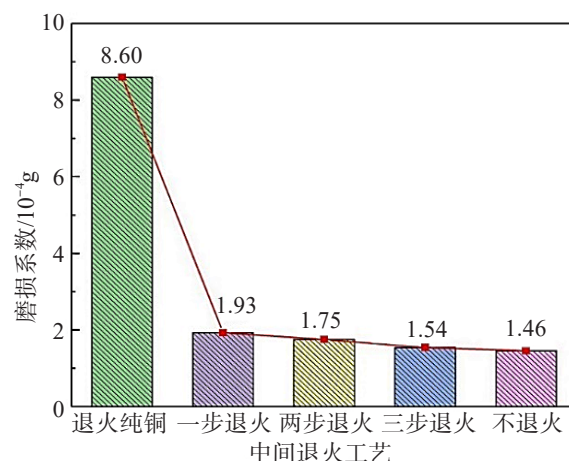


图 11 不同中间退火工艺制备试样的磨损量

Fig.11 Wear loss of samples prepared by different intermediate annealing processes

当中间退火的次数增加时,为铜基体中的晶粒长大提供足够的驱动力,使得晶粒长大,发生再结晶现象,致使铜基体内部的缺陷显著减少,复合材料的强度硬度显著下降,塑性变形能力提升,导致其在摩擦磨损过程中的磨损量增加。

图 12 为不同中间退火工艺制备的试样的磨损表面形貌。从图 12 中可以看出,退火纯铜磨损表面出现了明显的黏着坑、犁沟、塑性变形区,其磨损表面有明显的缺陷;随着中间退火次数的不断增加,铜-石墨复合材料的试样表面逐渐光滑,缺陷也随着中间退火次数的增加而减少。而且,随着中间退火次数的增加,复合材料的摩擦磨损性能越发优异,中间退火次

数的增加有利于石墨颗粒随着轧制变形方向,弥散均匀地分布于铜基体表面,使其充分发挥了良好的润滑作用。同时,在中间退火过程中,复合材料因塑性变形所积累的残余应力及大量的位错将得以回复,

有效地改善了铜基体因变形而导致的塑性韧性恶化,同时提高了复合材料的相对密度,使其在摩擦过程中不易产生裂纹,从而优化了材料的抗摩擦磨损性能。

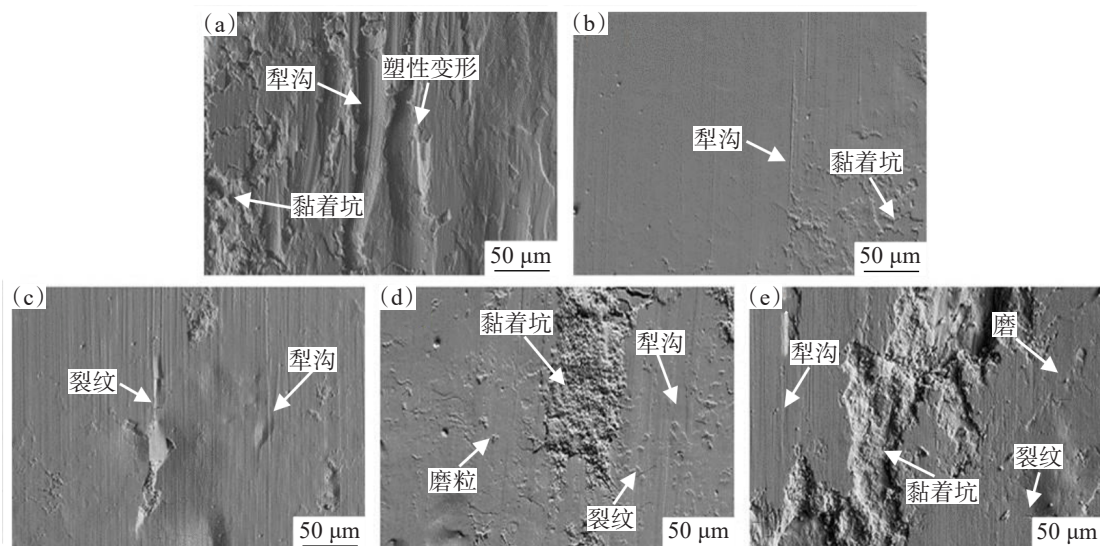


图 12 不同中间退火工艺制备试样的磨损表面形貌:(a) 退火纯铜;(b) 一步退火;(c) 两步退火;(d) 三步退火;(e) 不退火

Fig.12 Wear surface morphology of samples prepared by different intermediate annealing processes: (a) annealed pure copper; (b) one-step annealing; (c) two-step annealing; (d) three-step annealing; (e) no annealing

3 结 论

1)采用氩气气氛退火有效减少铜-石墨复合材料在退火过程中因产生氧化物夹杂而导致的应力膨胀,改善了基体与颗粒增强体之间的界面结合,更利于复合材料的叠轧焊合。

2)随着中间退火次数的减少,复合材料的相对密度与硬度不断下降,而导电率不断上升。采用一步退火工艺制备的复合材料,其导电率和硬度分别为94.5% IACS、122 HV。

3)随着中间退火次数的增加,复合材料摩擦系数不断减小,这可以提高铜-石墨复合材料的摩擦磨损性能。采用一步退火法制备的复合材料表现出较低的摩擦系数,数值为0.215。

4)一步退火法所制备的铜-石墨复合材料综合性能最好,为最佳退火工艺。

参考文献:

[1] YANG Z H, SONG Y J, JIAO J L, et al. Optimization of current-carrying friction and wear properties of copper-carbon composite materials based on damage[J]. Tribology

International, 2024, 191: 109074.

- [2] 陈春姣, 包宏伟, 李燕, 等. 石墨烯增强铜基复合材料研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1248-1262.
- [3] 赵乃勤, 郭斯源, 张翔, 等. 基于增强相构型设计的石墨烯/Cu 复合材料研究进展[J]. 金属学报, 2021, 57(9): 1087-1106.
- [4] SHAO Z Y, PAN H K, SHU R, et al. Microstructures and interfacial interactions of Al_2O_3 whiskers and graphene nanoplatelets co-reinforced copper matrix composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(9): 2935-2947.
- [5] GÜLER O, VAROL T, ALVER Ü, et al. Microstructure and wear characterization of Al_2O_3 reinforced silver coated copper matrix composites by electroless plating and hot pressing methods[J]. Materials Today Communications, 2021, 27: 102205.
- [6] KAPPAGANTULA K S, SMITH J A, NITTALA A K, et al. Macro copper-graphene composites with enhanced electrical conductivity[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 894: 162477.
- [7] 孙科. 累积叠轧焊合工艺(ARB)制备铜-石墨复合材料组织性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- [8] 陈佳, 张嘉艺, 赵鸿金. 氧化石墨烯对超薄电解铜箔力学性能及微观组织的影响[J]. 江西冶金, 2025, 45(3): 192-199.
- [9] 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.
- [10] EIVANI A R, SHOJAEI A, SALEHI M T, et al. On the evolution of microstructure and fracture behavior of multilayered copper sheet fabricated by accumulative roll bonding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 291-305.
- [11] SEIFOLLAHZADEH P, ALIZADEH M, ABBASI M R. Strength prediction of multi-layered copper-based composites fabricated by accumulative roll bonding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(6): 1729-1739.
- [12] SAITO Y, UTSUNOMIYA H, TSUJI N, et al. Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process[J]. Acta Materialia, 1999, 47(2): 579-583.
- [13] LI T J, WANG Y Q, YANG M, et al. High strength and conductivity copper matrix composites reinforced by in-situ graphene through severe plastic deformation processes [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 851: 156703.
- [14] 刘宇宁, 甘春雷, 王顺成, 等. 烧结温度对石墨烯增强铜基复合材料组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(2): 113-118.
- [15] 葛月鑫, 杨正海, 孙乐民, 等. 烧结温度对铜-石墨复合材料性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(2): 8-14.
- [16] WANG M, SHENG J, WANG L D, et al. Hot rolling behavior of graphene/Cu composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 816: 153204.
- [17] 侯健, 王军丽, 张清龙, 等. 累积叠轧焊合法制备颗粒增强金属基复合材料的研究现状与展望[J]. 材料导报, 2016, 30(3): 37-43.
- [18] 魏琳俊, 杨寿智, 夏伟军, 等. 镁合金板材特殊轧制技术的研究进展[J]. 机械工程材料, 2012, 36(11): 14-18, 40.
- [19] JAMAATI R, TOROGHINEJAD M R. Manufacturing of high-strength aluminum/alumina composite by accumulative roll bonding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(16/17): 4146-4151.
- [20] YANG D K, XIONG J Y, HODGSON P, et al. Influence of deformation-induced heating on the bond strength of rolled metal multilayers[J]. Materials Letters, 2009, 63(27): 2300-2302.
- [21] 赖春明, 秦南, 贾亚娟, 等. 退火工艺对 AA3003 铝合金累积叠轧板材组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(10): 81-87.
- [22] DIXIT M, SRIVASTAVA R. The effect of copper granules on interfacial bonding and properties of the copper-graphite composite prepared by flake powder metallurgy[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(12): 3067-3078.
- [23] ALIZADEH M, SALAHINEJAD E. A comparative study on metal-matrix composites fabricated by conventional and cross accumulative roll-bonding processes[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 620: 180-184.
- [24] YAO G C, MEI Q S, LI J Y, et al. Cu/C composites with a good combination of hardness and electrical conductivity fabricated from Cu and graphite by accumulative roll-bonding[J]. Materials & Design, 2016, 110: 124-129.
- [25] LIU J P, SUN K, ZENG L F, et al. Microstructure and Properties of copper-graphite composites fabricated by spark plasma sintering based on two-step mixing[J]. Metals, 2020, 10(11): 1-13.
- [26] AYYAPPADAS C, MUTHUCHAMY A, AGRAWAL D K, et al. An investigation on the effect of sintering mode on various properties of copper-graphene metal matrix composite[J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(7): 1760-1768.
- [27] SARMADI H, KOKABI A H, REIHANI S M, et al. Friction and wear performance of copper-graphite surface composites fabricated by friction stir processing[J]. Wear, 2013, 304: 1-12.
- [28] RAJKUMAR K, ARAVINDAN S. Tribological behavior of microwave processed copper-nanographite composites[J]. Tribology International, 2013, 57: 282-296.

(责任编辑:赵中波)