

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210824004

石墨烯/铜基复合材料织构表面的摩擦特性*

徐林红 杨皓 康红梅 侯宇程

(中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院 武汉 430074)

摘要: 目前针对石墨烯/铜基复合材料的研究主要集中在复合材料的制备工艺对材料性能的影响上,对石墨烯/铜基复合材料表面摩擦特性影响还缺乏深入探究。采用热压烧结法制备石墨烯/铜基复合材料,并利用激光在复合材料表面完成不同尺寸和形态的微织构加工,探究织构化和石墨烯对复合材料表面摩擦特性的影响。测试结果发现:当石墨烯含量为0.5%时,该复合材料存在一个硬度峰值为140 HV_{0.1},比铜合金基体的硬度提高了近27%。同时具有凹坑织构的复合材料表面摩擦因数及磨痕宽度随表面织构直径的增加而呈现“下降-上升”趋势,其中凹坑直径为200 μm时,各项指标达到最小,摩擦因数为0.377,磨痕宽度为231 μm,可以看出合适的织构形状、尺寸以及适当的石墨烯含量使得石墨烯/铜基复合材料在减磨性和耐磨性方面有所提高。将激光表面织构化技术与粉末冶金技术相结合,为改善零部件表面摩擦磨损性能提供了一种新的工艺。

关键词: 石墨烯/铜基复合材料;热压烧结;凹坑织构;摩擦磨损

中图分类号: TG663

Friction Characteristics of Textured Surface of Graphene / copper Matrix Composites

XU Linhong YANG Hao KANG Hongmei HOU Yucheng

(Faculty of Mechanical & Electrical Information, China University of Geosciences (Wuhan),
Wuhan 430074, China)

Abstract: The current research on graphene / copper matrix composites mainly focuses on the influence of the composite preparation process on the material properties, and there is a lack of in-depth investigation on the influence of surface friction properties of graphene / copper matrix composites. The graphene / copper matrix composites are prepared by hot pressing sintering process, followed by the various size and structure microtextured processing on composites surface using laser. The results show that when the content of graphene is 0.5%, the hardness of graphene / copper matrix composites peaks at 140 HV_{0.1}, nearly 27% higher than that of copper alloy matrix. Besides, the surface friction coefficient and wear scar width of composites with pit texture show a “downward upward” trend with the increase of surface texture diameter. Specifically, the optimal result can be obtained when the pit diameter equals 200 μm where the friction factor and the wear scar width reach their minimum at 0.377 and 231 μm, respectively. Thus, using well-designed textured structure with proper content of graphene can significantly contribute to both antifriction and abrasive resistance of graphene / copper matrix composites. The combination of powder metallurgy and laser structuring technology can provide a new method to improve the friction and wear properties of parts.

Keywords: graphene / copper matrix composites; hot pressing sintering; pit texture; friction and wear

0 前言

随着近现代工业的发展,铜及其合金被制成轴

承、摩擦片等结构功能材料被广泛应用于航空航天、机械设备和铁路运输等领域,但其低强度和较差的耐磨损性能限制了它在工业生产中的更广泛应用^[1]。为了解决这一问题,研究人员通常将软质相(如铅)

* 国家自然科学基金资助项目(22078296)。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (22078296).

20210824 收到初稿, 20220613 收到修改稿

与铜合金进行复合,利用软质相在铜基体内部形成网状结构阻碍位错运动等提高铜基体的强度^[2]。但是游离在铜基体中的铅是一种重金属,对人体和环境有着严重的危害。与此同时,石墨烯具有独特的二维结构以及优异的力学性能和较好的分散性,使得石墨烯铜基新型复合材料的研究成为一个热门话题。CHEN 等^[3]利用化学气相沉积法和热压烧结制备出强度和硬度明显提高的石墨烯/铜基复合材料,且石墨烯与基体之间的界面结合良好。LI 等^[4]利用热压烧结制备石墨烯/铜基复合材料和石墨铜基复合材料,与石墨铜基复合材料相比,石墨烯增强的复合材料具有更高的耐磨性和更低的摩擦因数,而石墨相对于石墨烯则表现出润滑效率有限。尹春强^[5]采用粉末冶金法制备石墨烯/CuSn5 复合材料,结果表明,石墨烯含量为 0.4% 时,摩擦因数最小。

已有这些研究结果表明石墨烯能够降低铜基复合材料的表面摩擦因数,但石墨烯对强化基体的耐磨性作用相对有限,无法满足特定的生产需求。与此同时,作为改善摩擦表面界面性能的有效途径,表面织构现已成为摩擦学领域和表面工程领域的研究热点之一^[6]。侯启敏等^[7]对应用最为广泛的凹坑型和沟槽型织构结合实例分析其摩擦磨损性能,分析表明仿生织构对改善摩擦性能具有重要影响,其中摩擦因数是判断摩擦性能的重要因素。陈秋杰等^[8]采用压制加工法在 CuSn6 试件表面制备出凹坑织构,研究表明凹坑织构具有加工硬化和凹坑储屑功能的效果,使得 CuSn6 试件表现出优异的耐磨特性,有效减少了材料表面的破损等问题。WAKUDA 等^[9]采用激光加工等技术加工出不同面积密度和直径的凹坑,试验发现当凹坑直径为 100 μm ,面积率为 4%~20% 时,其减摩效果最好。ZHANG 等^[10]在巴氏合金表面构建环形和正方形分布的凹坑织构,并研究在不同分布下的织构对材料表面摩擦特性的影响,结果表明间距相等的凹坑织构由于受力均匀,单个凹坑的储屑以及润滑效果一致,使得在其面积率为 8.6% 时,摩擦因数最低且达到稳定后更加平顺,而呈线性分布的凹坑织构由于相邻两个凹坑间距的影响使得摩擦因数波动较大,减摩效果较差。谢永等^[11]为了研究三角微织构对 304 钢的减摩抗磨特性,利用有限元 ANSYS 软件进行表面织构仿真分析,有限元仿真结果表明,三角微织构能使材料表面产生动态油膜,提高其承载压力,从而改善材料的抗磨特性。易开样^[12]利用激光加

工技术在基体和石墨烯陶瓷基复合材料表面形成排列规则的织构形貌。这些研究表明了复合材料的平均摩擦因数和磨损率均随表面织构面积的增加而降低。

综合分析,目前针对石墨烯/铜基复合材料的研究主要集中在复合材料的制备工艺对材料性能影响上,但对石墨烯/铜基复合材料与表面织构化相结合的工艺对复合材料表面摩擦特性影响还缺乏深入的探究。在已有研究成果基础上,本文采用热压烧结法制备石墨烯/铜基复合材料,并利用激光加工平台完成石墨烯/铜基复合材料表面的织构化处理,研究织构参数对石墨烯/铜基复合材料表面摩擦特性的影响。

1 复合材料制备及表征

1.1 复合材料的制备

本文采用热压烧结法制备不同含量的石墨烯/铜基复合材料,如表 1 所示。将称量后的石墨烯(GNFs)和铜合金粉末(CuSn10)先后放入盛有一定比例无水乙醇的超声震荡机中,利用超声振动将无水乙醇蒸发直至获得不含无水乙醇的复合粉体。随后将复合粉体放入真空干燥箱中干燥 12 h。将干燥的复合粉体进行机械球磨,球料比为 20:1,球径比为 5:4:3,球磨速度为 200 r/min,时间为 4 h。最后球磨后的复合粉体放入石墨模具中进行热压烧结,烧结工艺参数分别为:烧结温度为 600 $^{\circ}\text{C}$,烧结压力为 30 MPa,烧结时间为 60 min,试样随炉冷却至室温后取出。本文中热压烧结后的试样尺寸为 $\phi 20 \times 8 \text{ mm}$ 。

表 1 复合材料成分

Sample name	Copper alloy content / wt. %	Graphene content / wt. %
0 %GNFs / CuSn10	100	0
0.25%GNFs / CuSn10	99.75	0.25
0.50%GNFs / CuSn10	99.50	0.50
0.75%GNFs / CuSn10	99.25	0.75
1.00%GNFs / CuSn10	99	1

1.2 复合材料表征

采用扫描电镜能谱仪(SEM-EDS)对烧结后的复合材料(石墨烯含量为 0.5%)块体进行物相分析,如图 1 所示。对图 1a 所示的黑色片状物质进行成分分析,如图 1b 所示,黑色部分碳含量较高,铜含量较少,因此推断图 1a 中黑色区域为石墨烯^[13]。

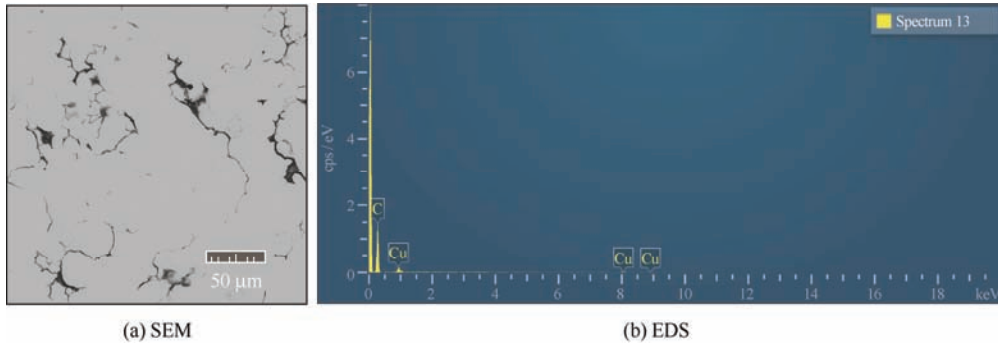


图 1 0.50% GNFs / CuSn10 复合材料 SEM 图和 EDS 图

Fig. 1 SEM and EDS of 0.50% GNFs / CuSn10 matrix composites

采用 MA100N 金相显微镜 (尼康株式会社)、HV-1000A 显微硬度计 (莱州华银仪器有限公司)、阿基米德排水法和 MFT-5000 多功能摩擦磨损试验

机 (美国 Rtec 公司) 对复合材料进行表征测试, 显微组织观察结果以及各相关参数见图 2、表 2。

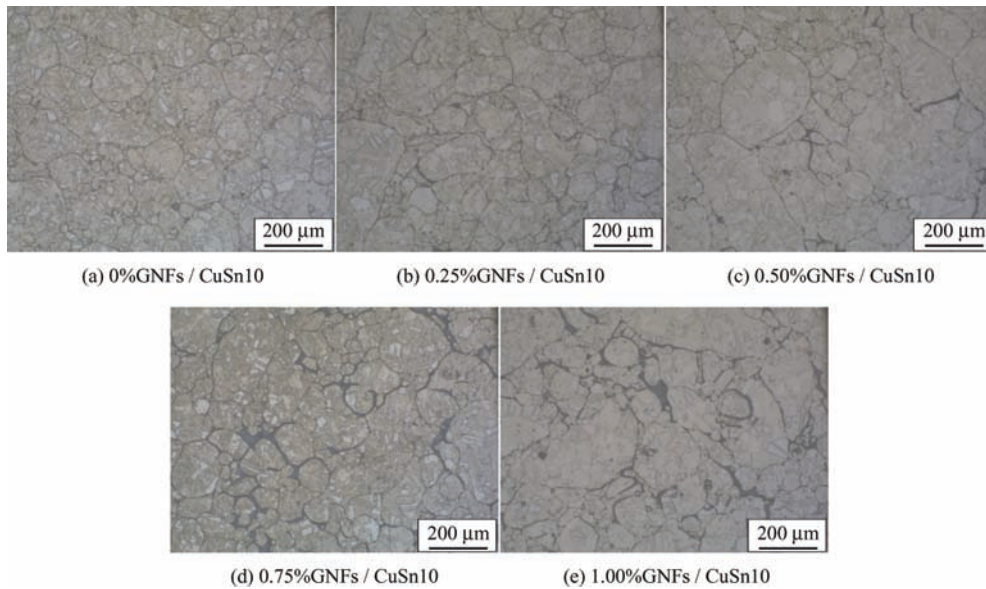


图 2 GNFs / CuSn10 复合材料金相图像

Fig. 2 Metallographic image of GNFs / CuSn10 composite

表 2 复合材料相关参数

Table 2 Related parameters of composite materials

Sample name	Actual density / (g / cm ³)	Theoretical density / (g / cm ³)	Densification / %	Vickers hardness / HV _{0.1}
0%GNFs / CuSn10	8.62	8.76	98.5	113
0.25% GNFs / CuSn10	8.52	8.74	97.4	124
0.50% GNFs / CuSn10	8.40	8.72	96.3	140
0.75% GNFs / CuSn10	8.37	8.70	96.0	123
1.00% GNFs / CuSn10	8.31	8.68	95.0	110

从图 2 中可以清晰地看出, 金相显微镜观察结果与 SEM 图一致, 石墨烯呈黑色并均匀地分布在晶界处, 没有明显的缺陷产生, 随着复合材料中石墨烯含量的增加, 边界处的黑色区域随之增多, 当石

墨烯含量超过 0.5% 时, 黑色区域增加特别明显, 这是因为加入过量的石墨烯导致的团聚现象。

从表 2 中可以看出, 石墨烯 / 铜基复合材料的密度与石墨烯含量呈现负相关, 随着石墨烯含量的

增大, 石墨烯/铜基复合材料的密度不断下降。这是由于石墨烯和基体之间产生的高密度位错区^[14], 致使石墨烯/铜基复合材料的变形抗力大大增加, 在热压烧结成型过程中复合粉体的流动性减弱, 导致烧结成型的试样内部出现孔洞等缺陷。此外, 从表 2 中可知, 随着石墨烯含量的增大, 石墨烯/铜基复合材料的硬度呈现先上升后下降的趋势, 并在石墨烯含量为 0.5% 存在一个硬度峰值为 140 HV_{0.1}, 比铜合金基体的硬度提高了 26.54%。这是由于石墨烯作为增强相钉扎在铜合金晶界处形成了位错交错的高密度位错区, 起到细化晶粒的效果^[15-16]。随着石墨烯含量的增加, 石墨烯的团聚现象更严重, 当石墨烯含量超过一定限度时, 晶粒细化的增强作用明显低于石墨烯/铜基复合材料内部因团聚现象而造成的气孔、裂痕等缺陷, 从而使得石墨烯/铜基复合材料的硬度降低。

摩擦磨损试验采用球一面对磨的形式, 运动方式为往复运动, 往复直线速度范围为 5~10 mm/s, 往复运动频率为 1 Hz, 载荷为 10 N, 单次的滑动路程为 16 mm, 时间为 20 min。从图 3 中可以看出, 加入石墨烯后, 复合材料的摩擦因数呈现明显下降的趋势。这归因于平面二维结构的石墨烯自身具有较低的表面黏着力, 在摩擦过程中, 片层结构的石

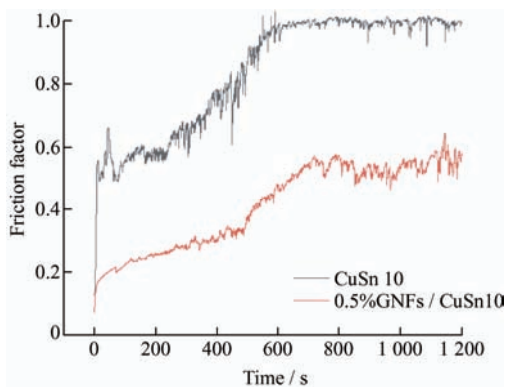


图 3 复合材料摩擦因数曲线图

Fig. 3 Friction factor curve of composite material

墨烯极易在挤压的作用下进入接触面充当润滑剂, 减少摩擦副之间的直接接触, 从而降低了石墨烯/铜基复合材料的摩擦因数。

2 复合材料表面织构加工及测试

2.1 表面织构激光加工

试样采用上述热压烧结法制备的石墨烯/铜基复合材料, 其尺寸为 $\phi 20 \times 8$ mm。加工设备选用锐科 P50Q 脉冲光纤激光器。激光加工工艺参数分别为: 激光功率 30 W, 扫描速度 300 mm/s, 扫描次数 9 次。

表面织构几何参数及表面织构分布如表 3 和图 4 所示, 不同直径凹坑的表面织构形貌如图 5 所示。其中 D 为织构直径, L 为织构间距, A_r 为织构面积率, H 为织构深度。织构面积率 A_r 的计算方法如式 (1) 所示。

$$A_r = \frac{\pi D^2}{4L^2} \quad (1)$$

表 3 表面织构的几何参数

Table 3 Geometric parameters of surface texture

Serial number	Diameter $D / \mu\text{m}$	Area ratio $A_r / \%$	Depth $H / \mu\text{m}$
1#	100		
2#	200	10	80
3#	300		

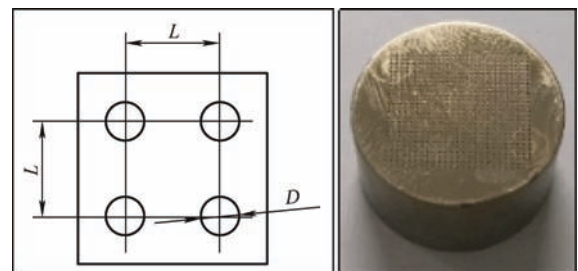


图 4 表面织构分布示意图及试样

Fig. 4 Surface texture distribution diagram and sample

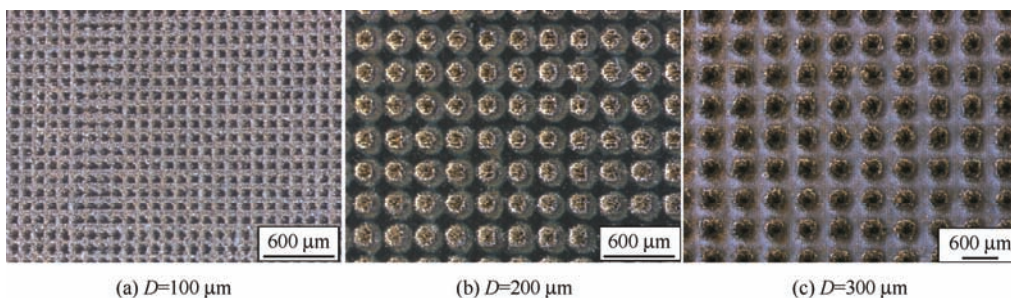


图 5 不同尺寸织构表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of texture with different sizes

2.2 摩擦磨损试验

在摩擦磨损试验前, 先对激光加工后试样用砂纸进行打磨, 再放入超声清洗机中进行超声清洗去除污渍, 随后放入真空干燥箱烘干后备用。摩擦磨损试验采用球一面对磨的形式, 运动方式为往复运动, 如图 6 所示。往复直线速度范围为 5~10 mm/s, 往复运动频率为 1 Hz, 载荷为 10 N, 单次的滑动路程为 16 mm, 时间为 20 min, 为确保试验数据的准确性, 每秒取 10 个数据, 摩擦因数则采用随机取样的方式选择 1 200 个数据取其平均值。磨痕宽度采用此摩擦磨损试验机自带的高倍数字显微镜进行观察测量并结合体视变焦显微镜观察摩擦磨损形貌。

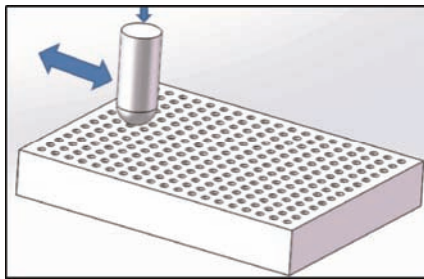


图 6 摩擦方式示意图

Fig. 6 Schematic diagram of friction mode

3 复合材料织构表面测试结果分析

3.1 织构前后表面硬度对比

表面硬度作为衡量材料的耐磨性好坏的重要参数之一, 对提升织构表面的摩擦性能至关重要。本文采用 HV-1000A 显微维氏硬度计, 试验力为 0.98 N, 加压时间为 10 s, 显微观察为 400 倍。如图 7 所示, 利用显微硬度仪分别对试样表面织构化前的表面和试样表面织构化后相邻两个凹坑织构的中间区域 1 以及凹坑织构的边缘区域 2 进行硬度测试。在所测试表面随机选定 5 个位置进行硬度测试

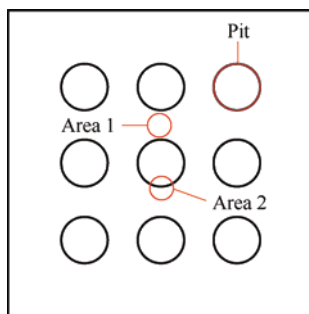


图 7 表面硬度测试区域示意图

Fig. 7 Schematic diagram of surface hardness test area

并取平均值, 得到的显微硬度值分别为 140、180 和 216 HV_{0.1}, 从中可以看出凹坑边缘附近的硬度明显高于其他位置, 其次是相邻两个凹坑织构的中间, 最小的是织构化前表面的显微硬度。

这是因为, 在激光高能作用下铜合金表面发生塑性变形, 从而引起加工硬化^[17], 使得激光加工织构后的复合材料表面的硬度提高, 进而提高石墨烯/铜基复合材料的耐磨性。

3.2 摩擦因数分析

图 8 为不同织构直径复合材料的摩擦因数曲线。由图可知, 摩擦时间为 0~600 s 时, 磨合处于未稳定阶段, 三种织构表面摩擦因数处于稳定上升阶段, 并且直径为 100 μm 的凹坑织构摩擦因数明显高于另外两个尺寸的织构。而在磨合进入 600~1 000 s 稳定阶段后, 直径为 200 μm 的试样表面摩擦因数最低, 并且相比较其他两个尺寸摩擦因数较为平稳, 随后在 1 000 s 以后由磨损加重导致三种织构的摩擦因数波动幅度较大。其原因在于, 随着凹坑直径的增大, 凹坑作为摩擦副表面的储屑能力也随着增强。另外, 织构进一步减小了摩擦副的接触面积, 提高了摩擦因数的稳定性。

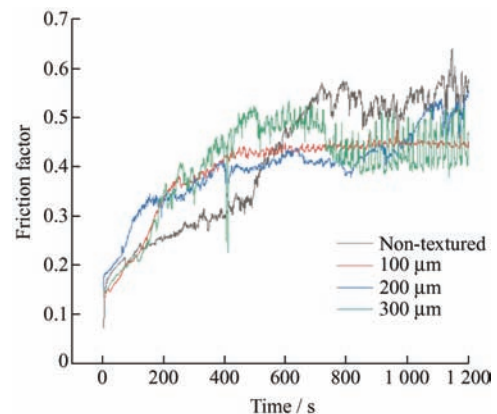


图 8 不同织构直径的摩擦因数

Fig. 8 Friction factor of different texture diameters

图 9 为 0.5% 石墨烯/铜基复合材料, 凹坑直径 200 μm 的磨痕 SEM 图和 EDS 图。由图可知, 图 9a 的区域 a 的 EDS 分析如图 9b 所示, 碳含量最高, 因此可推断出磨痕中存在石墨烯, 在长时间的摩擦工况下, 石墨烯在磨球的作用下产生剥层, 相比于没有织构的试样, 表面织构的存在能够保护和锁定石墨烯, 防止石墨烯被破坏及流失, 最大化的发挥石墨烯润滑效果^[18-19], 进一步减少摩擦因数, 避免石墨烯/铜基复合材料表面的磨损。

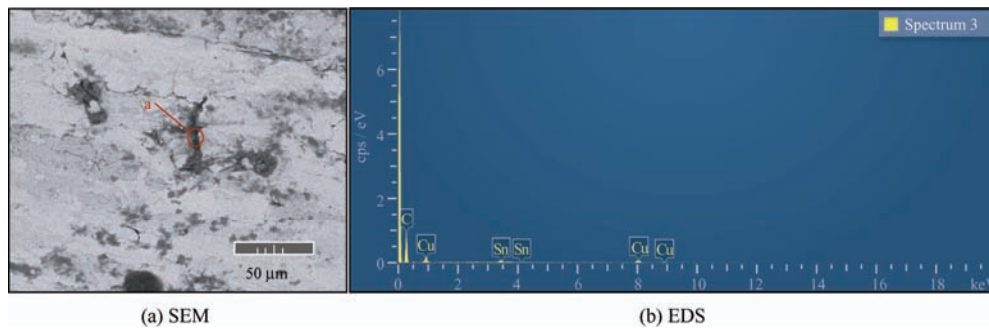
图9 凹坑直径 200 μm 的磨痕 SEM 图和 EDS 图Fig. 9 SEM and EDS of wear marks with pit diameter of 200 μm

图 10 给出了表面结构化摩擦后的平均摩擦因数随结构直径的变化规律。由图可知,随着结构直径的增大,摩擦因数都呈现先下降后上升的趋势,并且在结构直径为 200 μm 时,摩擦因数达到最低,

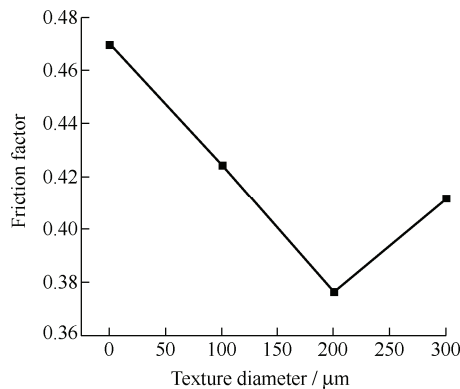


图 10 摩擦因数随结构直径的变化规律

Fig. 10 Law of friction factor with the diameter of texture

约为无结构表面的 19.7%。这是由于凹坑结构储存磨屑的能力和对材料表面的润滑能力随着结构直径的增大而增强,从而优化了摩擦因数。但是凹坑结构优化摩擦因数的能力存在一个阈值。随着凹坑直径的增大,单位面积内磨损的区域增大,所产生的铜渣也随着增多,进而增大了材料表面的粗糙度。

3.3 磨痕宽度分析

由摩擦磨损试验得到磨痕形貌如图 11 所示,对比无结构(图 11a)与不同直径的结构表面磨痕宽度。结果表明,无结构的材料表面磨痕处出现较多的划痕以及磨屑,无结构的磨痕较深,能明显看到铜基体。而结构化的材料表面由于凹坑的存在可以存储磨屑,且在激光加工硬化的作用下,磨损程度较轻,其中 $D=200 \mu\text{m}$ 磨痕宽度最小为 231 μm ,明显低于无结构的磨痕宽度 510 μm 。

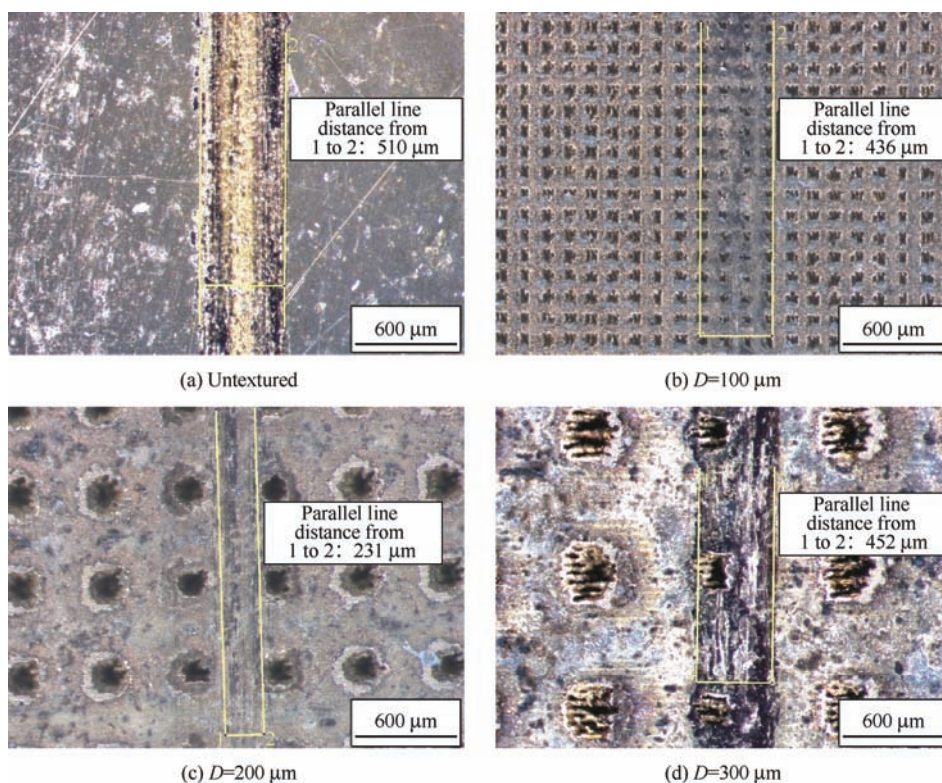


图 11 不同凹坑直径复合材料的表面磨痕宽度对比

Fig. 11 Comparison of surface wear mark widths of composites with different pit diameters

图 12 为复合材料表面凹坑直径与磨痕宽度的关系, 从图中可看出, 磨痕宽度随着织构尺寸的增大呈现先减小后增大的趋势。这是因为当凹坑直径为 $100\ \mu\text{m}$ 时, 大量磨屑还停留在摩擦副之间, 凹坑内腔容量较小, 无法储存较多磨屑, 导致磨屑在材料表面来回运动产生较多划痕, 从而加剧了磨损程度。而当凹坑直径为 $200\ \mu\text{m}$ 时, 凹坑的储屑能力随着内部体积的增大而增强, 大大降低了材料表面的磨损, 并且凹坑边缘形貌较为完整, 进而可以与摩擦副形成封闭空间, 避免磨屑的泄露。而当凹坑直径增大到 $300\ \mu\text{m}$ 时, 材料表面在激光加工作用下随着表面粗糙度的增加, 必然导致摩擦副表面的石墨烯脱落, 石墨烯润滑失效, 增大了颗粒磨损程度, 磨痕宽度增大。

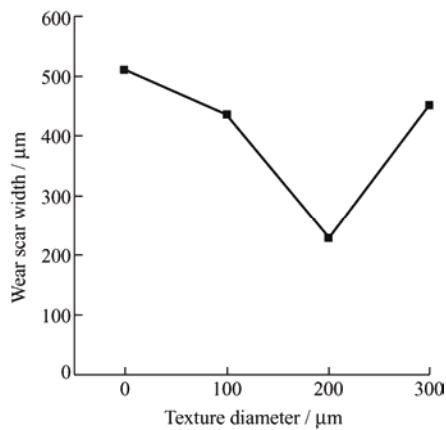


图 12 凹坑直径与磨痕宽度的关系

Fig. 12 Relationship between pit diameter and wear mark width

3.4 摩擦磨损机理分析

图 13 为 40 倍下不同织构直径复合材料的表面磨损形貌图, 从图 13a 中可看出, 无织构试样表面出现较多较深的划痕, 可看见明显的铜基体, 这是由于无织构试样在摩擦磨损过程中不断产生磨屑, 且无法及时排出, 在外力作用下磨屑重新黏结成块, 加剧了磨粒磨损和黏着磨损。从图 13b、13c、13d 可看出, 图 13b 试样由于凹坑尺寸过小, 极易被磨屑填充, 凹坑储屑能力较弱, 且由于凹坑尺寸较小, 激光加工硬化区域更多, 凹坑边缘在磨球作用下出现明显的脆性破坏, 图 13c、13d 试样随着凹坑直径的增大, 凹坑储屑能力增强, 且加工硬化区域减少, 凹坑之间韧性更高, 能够吸收更多的冲击力^[20], 因此磨损情况明显优于图 13a、13b 所示试样。

图 14 为材料在不同表面形貌情况下的磨损机制示意图, 通过之前的试样硬度测试可知, 越靠近凹坑硬度越高。凹坑边缘的硬度为 $216\ \text{HV}_{0.1}$, 而远离凹坑的硬度为 $180\ \text{HV}_{0.1}$, 比无织构的硬度提升了 50% 以上, 这是因为在激光加工过程中材料表面温度急剧升高又快速冷却, 引起材料表面强化, 织构化后的试样硬度更高。在摩擦磨损过程中产生的磨屑经过挤压之后会形成硬度更高的磨粒, 与摩擦副表面形成三体磨损^[21], 从而加剧了磨损现象, 而对于织构化后的试样, 表面凹坑织构能够有效收集磨屑, 减少了接触面间的磨粒磨损, 因此织构化后的试样具有更优的抗磨粒磨损性能。

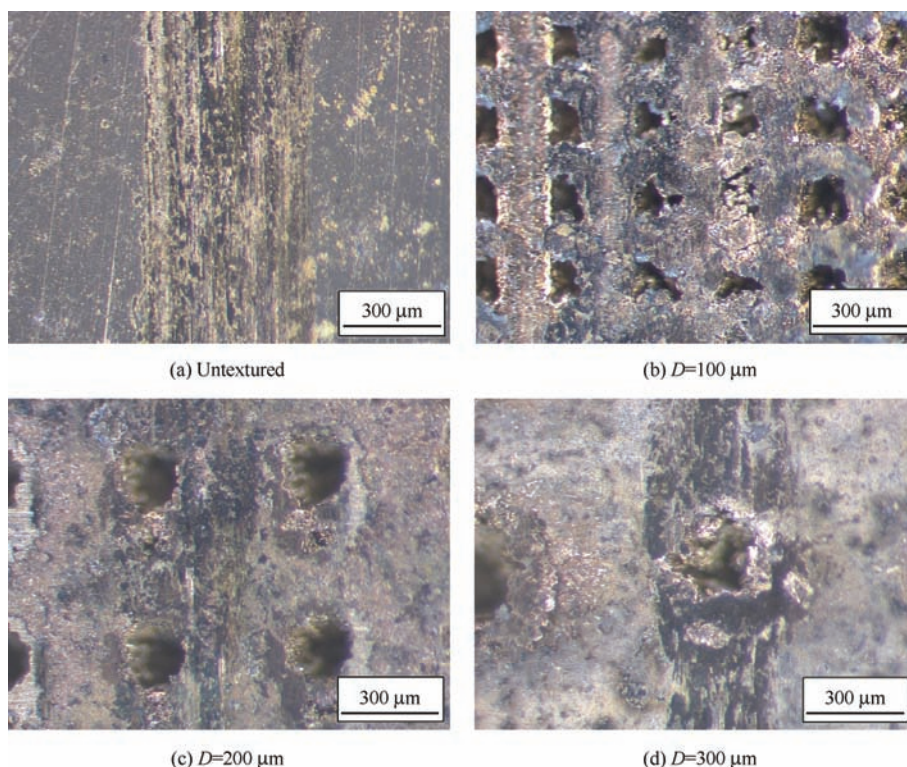


图 13 不同凹坑直径复合材料的表面磨损形貌 ($\times 40$)

Fig. 13 Surface wear morphology of composites with different pit diameters ($\times 40$)

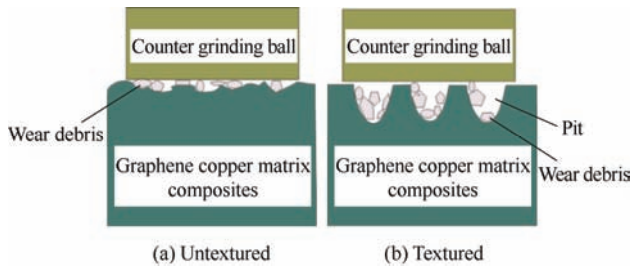


图 14 不同表面形貌的磨损机制

Fig. 14 Wear mechanism of different surface morphology

4 结论

(1) 石墨烯的存在能够明显提高铜基复合材料的硬度, 在摩擦过程中片层结构的石墨烯极易在挤压的作用下进入接触面充当润滑剂, 降低铜基复合材料的摩擦因数。

(2) 石墨烯/铜基复合材料与激光织构化处理工艺相结合能改善材料表面的摩擦性能, 在面积率相同情况下, 凹坑织构化的表面摩擦因数以及磨痕宽度随着织构直径的增加而呈现“下降-上升”趋势, 表面织构化处理能够进一步减小铜基复合材料表面的摩擦因数, 提高铜基复合材料耐磨性。

(3) 凹坑织构的储屑能力与加工硬化相辅相成, 凹坑既能储存大量的磨屑, 减轻磨粒磨损, 又能在加工硬化的基础上改善黏着磨损, 提高织构化石墨烯/铜基复合材料的摩擦性能。

参 考 文 献

- [1] 张德宇. 基于小分子碳源碳化的原位合成石墨烯——铜复合材料研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021. ZHANG Deyu. In-situ synthesis of graphene-copper composites based on carbonization of small molecular carbon sources[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [2] 解念锁, 李春月, 艾桃桃, 等. SiC_p 尺寸对铜基复合材料抗氧化性及磨损性的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(8): 74-77. XIE Niansuo, LI Chunyue, AI Taotao, et al. Influence of SiC_p size on oxidation resistance and wear characterization of SiC_p/Cu composites[J]. Hot Working Process, 2010, 39 (8): 74-77. (in Chinese)
- [3] CHEN Y K, ZHANG X, LIU E Z, et al. Fabrication of three-dimensional graphene/Cu composite by in-situ CVD and its strengthening mechanism[J]. Journal of Materials Science and Solid-state Chemistry and Physics, 2016, 688: 69-76.
- [4] LI J F, ZHANG L, XIAO J K, et al. Sliding wear behavior of copper-based composites reinforced with graphene nanosheets and graphite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(10): 3354-3362.
- [5] 伊春强, 尹彩流, 刘春轩, 等. 粉末冶金法制备三维(3D)石墨烯增强铜基复合材料的性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(5): 478-484. YI Chunqiang, YIN Cailiu, LIU Chunxuan, et al. Properties of three-dimensional(3D) graphene-reinforced copper matrix composites by powder metallurgy method[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2019, 24(5): 478-484. (in Chinese)
- [6] 李强, 刘清磊, 杜玉晶, 等. 织构化表面优化设计及应用的研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6): 59-73. LI Qiang, LIU Qinglei, DU Yujing, et al. Advances in optimization design and application of textured surfaces[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(6): 59-73. (in Chinese)
- [7] 侯启敏, 杨学锋, 王守仁, 等. 仿生织构类型及其对表面摩擦性能影响[J]. 中国表面工程, 2020, 33(3): 18-32. HOU Qimin, YANG Xefeng, WANG Shouren, et al. Bionic texture types and their influence on surface friction properties[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(3): 18-32. (in Chinese)
- [8] 陈秋洁, 于爱兵, 吴毛朝, 等. 铜合金压制凹坑织构表面的磨损性能[J]. 材料保护, 2019, 52(5): 23-26. CHEN Qiujie, YU Aibing, WU Maochao, et al. Tribological properties of bronze surface with dimple textures fabricated by indentation method[J]. Material Protection, 2019, 52(5): 23-26. (in Chinese)
- [9] WAKUDA M, YAMAUCHI Y, KANZAKI S, et al. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact[J]. Wear, 2003, 254(3-4): 356-363.
- [10] ZHANG H, ZHANG D Y, HUA M, et al. A study on the tribological behavior of surface texturing on babbitt alloy under mixed or starved lubrication[J]. Tribology Letters, 2014, 56(2): 305-315.
- [11] 谢永, 宋文涛, 陈文刚, 等. 三角表面微织构对 304 钢摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 225-234. XIE Yong, SONG Wentao, CHEN Wengang, et al. Effect of triangular surface micro-texture on tribological properties of 304 steel[J]. Surface Technology, 2021, 50(4): 225-234. (in Chinese)
- [12] 易开样. RGO/TZ3Y20A 复合材料表面织构构筑及对摩擦学性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

- YI Kaiyang. Preparation of surface texture and its effect on tribological properties of RGO/TZ3Y20A composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] 王少鹏, 魏坤霞, 贾飞龙, 等. 石墨烯含量对铜基复合材料硬度与导电率的影响[J]. 粉末冶金工业, 2021, 31(4): 29-34.
- WANG Shaopeng, WEI Kunxia, JIA Feilong, et al. Effect of graphene content on hardness and conductivity of copper matrix composites[J]. Powder Metallurgy Industry, 2021, 31(4): 29-34. (in Chinese)
- [14] 李秀辉, 燕绍九, 洪起虎, 等. 石墨烯添加量对铜基复合材料性能的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(1): 11-17.
- LI Xiuhui, YAN Shaojiu, HONG Qihu, et al. Influence of graphene content on properties of Cu matrix composites[J]. Materials Engineering, 2019, 47 (1): 11-17. (in Chinese)
- [15] 易善伟, 许磊, 王有超, 等. 石墨烯铝基复合材料的制备及性能分析[J]. 材料导报, 2017, 31(S2): 363-366, 379.
- YI Shanwei, XU Lei, WANG Youchao, et al. Preparation and performance of graphene reinforced Al matrix composites[J]. Material Guide, 2017, 31(S2): 363-366, 379. (in Chinese)
- [16] 邹高鹏, 贺显聪, 孙滨洲, 等. 微纳石墨烯片增强铝合金的力学性能及其机理[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(11): 2228-2235.
- ZOU Gaopeng, HE Xiancong, SUN Binzhou, et al. Mechanics performances and mechanism of aluminum alloy reinforced by graphene nanosheets[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(11): 2228-2235. (in Chinese)
- [17] 聂祥樊, 龙霓东, 刘海雷, 等. 激光冲击强化对 TC17 表面硬度的影响[J]. 机械设计与制造, 2012(1): 198-200.
- NIE Xiangfan, LONG Nidong, LIU Hailei, et al. Effect of laser shock peening on surface hardness of TC17 titanium alloy[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2012(1): 198-200. (in Chinese)
- [18] 冯泽城. 少层石墨烯增强 Cu 基复合材料的制备及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- FENG Zecheng. Study on preparation and properties of few-layer graphene reinforced copper matrix composites[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 曾亚维. H13 激光微织构下的类石墨烯固体润滑机理研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- ZENG Yawei. Research on solid lubrication mechanism of graphene by H13 laser micro texturing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- [20] 陈莉, 周宏, 赵宇, 等. 不同形态和间隔非光滑表面模具钢的磨损性能[J]. 机械工程学报, 2008(3): 173-176.
- CHEN Li, ZHOU Hong, ZHAO Yu, et al. Wear behavior of die steel with non-smooth surface in different shape and distance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(3): 173-176. (in Chinese)
- [21] 胡可, 谢焕文, 刘辛, 等. 铸造碳化钨颗粒增强 PDC 钻头胎体的三体磨损行为[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(2): 364-371.
- HU Ke, XIE Huanwen, LIU Xin, et al. Three-body wear behavior of cast tungsten carbide particle-reinforced PDC drill bit carcasses[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30 (2): 364-371. (in Chinese).

作者简介: 徐林红, 女, 1970 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为材料表面强化技术和特种加工工艺。

E-mail: xulinhong@cug.edu.cn