

石墨烯含量对铜铁基自润滑摩擦材料 组织结构及摩擦性能的影响

付传起, 耿奥, 丁亚东, 汪滦

(大连大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘要: **目的** 改善石墨烯与铜铁基摩擦材料的结合方式, 探究不同含量的石墨烯对铜铁基摩擦材料组织结构的影响, 研究加入不同含量石墨烯时摩擦材料的摩擦性能和摩擦机理。**方法** 采用粉末冶金冷压法制备铜铁基摩擦材料, 利用 SEM、XRD 等分析方法和手段, 探究不同含量石墨烯对摩擦材料的组织结构、综合力学性能和摩擦性能的影响规律, 确定最佳工艺参数。**结果** 在铜铁基摩擦材料中加入石墨烯时, 其密度和抗压强度随着石墨烯含量的增加呈下降趋势, 硬度呈先上升后降低的趋势。在相同转速下, 随着石墨烯含量的增加, 其摩擦材料的摩擦因数呈下降趋势, 磨损率呈现先下降后上升的趋势。在石墨烯的质量分数为 0.5% 时, 摩擦材料的摩擦率最小, 为 $2.52 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 此时摩擦材料的磨损机理为黏着磨损及少量磨粒磨损。**结论** 在铜铁基摩擦材料中, 石墨烯作为润滑组元, 与基体的结合性能表现优异, 对比石墨烯对铜铁基摩擦材料的影响规律可知, 在石墨烯的质量分数为 0.5% 时, 摩擦材料的性能最佳。

关键词: 铜铁基; 石墨烯; 自润滑摩擦材料; 摩擦性能; 磨损率

中图分类号: TF124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)15-0088-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.15.008

Effect of Graphene Content on Microstructure and Friction Properties of Copper-iron-based Self-lubricating Friction Materials

FU Chuanqi, GENG Ao, DING Yadong, WANG Luan

(School of Mechanical Engineering, Dalian University, Liaoning Dalian 116622, China)

ABSTRACT: Graphene, known for its exceptional mechanical, electrical, and thermal properties, has attracted significant attention as a potential additive to enhance various materials' performance, including friction materials. Copper-iron-based friction materials find wide applications in brakes and clutches. However, optimizing the bonding between graphene and copper-iron-based materials is crucial to improve their overall performance. This study aims to investigate the effect of different graphene contents on the microstructure, friction property, and friction mechanism of copper-iron-based friction materials. Copper-iron-based friction materials were prepared using the powder metallurgy cold pressing method. Different amounts of graphene (0, 0.2%, 0.5%, and 1.0%) were added to the materials, followed by sintering at specific temperature. Scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) were utilized for microstructure analysis. Mechanical property testing, including density, compressive strength, and hardness measurements, were conducted. The friction property testing was

收稿日期: 2023-08-09; 修订日期: 2024-05-23

Received: 2023-08-09; **Revised:** 2024-05-23

引文格式: 付传起, 耿奥, 丁亚东, 等. 石墨烯含量对铜铁基自润滑摩擦材料组织结构及摩擦性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(15): 88-99.

FU Chuanqi, GENG Ao, DING Yadong, et al. Effect of Graphene Content on Microstructure and Friction Properties of Copper-iron-based Self-lubricating Friction Materials[J]. Surface Technology, 2024, 53(15): 88-99.

performed using a tribometer to determine the friction coefficient and wear rate. Microstructure analysis revealed that graphene addition resulted in a more refined and uniform microstructure compared with materials without graphene. SEM images showed well-dispersed graphene sheets within the matrix, while XRD analysis confirmed their presence. As graphene content increased, density and compressive strength decreased due to graphene's low density. However, hardness initially increased due to the reinforcement effect of graphene sheets and then decreased as graphene agglomerated and defects formed. The friction property testing demonstrated a decrease in friction coefficient with the increase of graphene content, attributed to graphene's lubricating effect reducing friction. The wear rate initially decreased, indicating improved wear resistance. However, at higher graphene contents, the wear rate increased, possibly due to graphene agglomeration leading to abrasive wear. In conclusion, the addition of graphene improves the microstructure, friction property, and wear resistance of copper-iron-based friction materials. The optimum performance is observed at a graphene content of 0.5%, exhibiting lower friction coefficient and improved wear resistance. Microstructure analysis reveals a more refined and uniform structure in materials with graphene. Mechanical property testing indicates the influence of graphene content on density, compressive strength, and hardness. Friction property testing demonstrates graphene's effectiveness in reducing friction coefficient and improving wear resistance. These findings contribute to understanding the influence of graphene on copper-iron-based friction materials, providing valuable insights for advanced friction material development.

KEY WORDS: copper-iron-based; graphene; self-lubricating friction materials; friction properties; wear rate

在如今科技高速发展的时代,交通工具的速度持续攀升,对制动技术的要求也愈加严苛。目前,大部分交通工具的制动均靠将动能转化成热能或其他形式能来实现^[1]。例如汽车、火车、动车、高铁等都是通过刹车盘与刹车片的摩擦来将动能转化为热能及其他形式能,从而实现交通工具的制动、减速、停止^[2-3]。在这个过程中,摩擦材料的性能显得尤为重要。在摩擦材料的制备过程中,利用粉末冶金的方式制备摩擦材料是发展时间最久且技术相对较成熟的一项制备方式,我国现阶段在粉末冶金制备摩擦材料方面已经取得了卓越的成果^[4-5]。

目前,常用的粉末冶金摩擦材料主要有铜基和铁基 2 种类型,金属铜具有高延展性、良好的导电性和导热性,在电子和导电等相关行业的应用十分广泛。同时,铜具有耐磨性和耐热性较差,硬度较低,在高温下容易发生塑性形变,成本比其他材料更高等缺点^[6-11]。在高温高负载的条件下,金属铁的摩擦性能优异、力学强度高且价格相对廉价,因此常将金属铁应用于器械制造、工具制造等工业领域。铁在与铸铁或钢等对偶件摩擦时具有亲和性,且铁作为摩擦材料,其摩擦因数的波动较大,容易产生噪音等问题^[12-17]。在制备摩擦材料时,采用金属铜和金属铁作为基体制备出的摩擦材料不仅可以结合铜和铁的力学性能与良好的导热性能,还具有好的摩擦性能和成本优势^[18]。值得关注的是,在提升摩擦材料的性能上,自润摩擦技术的引入极大地推动了性能的提升与技术的进步。自润摩擦材料能够在刹车过程中形成一层自润滑膜,既减少了摩擦界面的磨损,又提升了制动的平稳性和效率。这一技术的应用,不仅优化了交通工具的制动性能,也为提升乘坐体验和保障行车安全作出

了重要贡献。

自润滑摩擦材料具有低摩擦因数、高耐磨性、耐高温性及抗腐蚀性等特点,这些材料能够在无外部润滑油或润滑剂的条件下实现自我润滑,从而维持机械设备的顺畅运行。通常将自润滑摩擦材料用于高负荷、高速或高温等恶劣工作环境中,以减少摩擦损耗,提高设备效率,延长使用寿命。石墨烯作为自润滑组元,具有极低的层间摩擦力,因此在摩擦过程中它能够显著降低材料的磨损量。石墨烯还具有高力学强度,保证了润滑膜的耐久性,使得它在长时间内都能保持良好的润滑效果。此外,石墨烯的优异热学性能有助于散热,防止因摩擦产生的热量导致材料的热失效。

石墨烯(Graphene, GNs)是具有单层原子厚度的二维材料,自身具有很强的力学性能,同时具有优秀的导热导电能力,目前石墨烯是增强金属基摩擦材料的热门材料^[19-20]。石墨烯具有低摩擦因数和高耐磨性,能够有效减少摩擦损失和磨损。同时,石墨烯在高温下较稳定,且具有良好的抗氧化性能,这使得石墨烯摩擦材料在高温环境下具有较好的摩擦性能,适用于高温应用领域。通过将石墨烯与其他材料进行不同程度的复合,可以进一步提高其性能,满足不同领域的需求^[21-25]。

张海平等^[26]利用粉末冶金工艺加入质量分数 0.5% 的石墨烯,可使纯铝材料的拉伸强度提高 42.5%,但电阻率仅增大了 1.4%,可见石墨烯可有效提高纯铝的力学性能,且不明显降低其电阻率等性能。张发厅^[27]研究了以致密石墨、天然石墨等不同种类石墨及碳纤维为润滑材料,在铜基摩擦材料表面形成一层润滑石墨膜,在低速摩擦下可使其摩擦因数提高 8.5%。LlorenteJ 等^[28]研究了干摩擦条件下石墨烯

SiC 复合材料的摩擦学性能, 石墨烯的加入明显改善了材料的摩擦学性能, 其抗磨减摩性能得到较大程度的提升。

本文通过控制石墨烯在铜铁基自润滑摩擦材料中的含量, 使石墨烯均匀分散, 利用石墨烯独特的力学和润滑性能, 使铜铁基自润滑摩擦材料的性能得到显著提升, 同时避免了强烈的层间相互作用和团聚倾向。通过精确控制石墨烯的含量和分布, 可以优化摩擦材料的性能, 满足各种实际应用的需求。根据现有针对石墨烯的研究, 利用粉末冶金方法制备石墨烯-铜铁基自润滑摩擦材料, 利用 SEM 和 XRD 分析 2 种摩擦材料的组织结构变化, 通过力学性能和摩擦磨损试验, 研究石墨烯含量的变化对 2 种摩擦材料力学性能、摩擦性能的影响规律。综合比较得出石墨烯的最佳添加量, 并通过摩擦磨损试验分析石墨烯-铜铁基自润滑摩擦材料的摩擦机理。

1 实验

以铜铁为基体, 以 Ni、Cr 和 Mn 元素为组元强化基体, 以 SiC 为摩擦组元调整摩擦因数, 分别添加不同含量的润滑组元石墨烯, 通过调节石墨烯的含量来改善材料的摩擦性能。根据预研实验结果, 得到试样的工艺参数, 见表 1。

表 1 工艺参数
Tab.1 Process parameters

Specimen number	Mass fraction/%						
	Ni	GNS	SiC	Cr	Mn	Fe	Cu
1 [#]	1	0.0	1	0.5	0.5	40	Allowance
2 [#]	1	0.1	1	0.5	0.5	40	
3 [#]	1	0.3	1	0.5	0.5	40	
4 [#]	1	0.5	1	0.5	0.5	40	
5 [#]	1	0.7	1	0.5	0.5	40	

摩擦材料的制备工艺流程如图 1 所示。将称量好的各种粉末加入 JF801S 混料机进行 3.5 h 混料, 将混合均匀的粉末加入 YLJ-303 微型压力机 $\phi 10\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 模具中, 在室温下施加压力, 使垫板与冲模在相对方向上对模具内的粉末进行压制, 加压到 60 MPa 后保压 7 min, 随后释放压力, 再次加压至 50 MPa, 再复压 3 min, 然后脱模得到 $\phi 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的圆柱形毛坯。将金属毛坯夹入法兰盘内, 固定好法兰盘, 将法兰盘与金属毛坯一同放入 KRX-14B 型烧结炉中, 设置温度为 1 050 $^{\circ}\text{C}$, 升温时间 60 min, 随后在 1 050 $^{\circ}\text{C}$ 下保温 60 min, 最后随炉冷却至室温。

将烧结后的试样进行抛光、腐蚀, 利用 SU-3500 扫描电镜、GX510lympus 光学显微镜和能谱 (EnergyDispersiveSpectrum, EDS) 分析仪进行显微组织、表面形貌及成分分析。

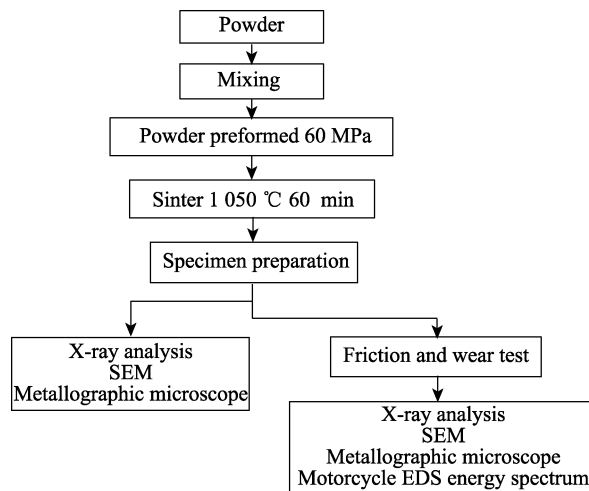


图 1 工艺流程

Fig.1 Process flow chart

2 结果与讨论

2.1 摩擦材料的显微组织结构

2.1.1 石墨烯铜铁基摩擦材料微观组织的影响

不同含量石墨烯-铜铁基摩擦材料的微观组织如图 2 所示, 白色区域为铜基体, 灰色区域为铁基体, 黑色区为石墨烯或孔洞。从图 3a 可以看出, 当铜铁基体中未加入石墨烯时, 摩擦材料中存在极少的空隙, 说明在利用粉末冶金方法制备时材料的致密度较高, 各组元间结合紧密, 由此说明在此工艺下利用粉末冶金方法制备出的摩擦材料较合理。从图 3b~d 可以看出, 当石墨烯的质量分数为 0.1%~0.5% 时, 石墨烯的分布较为均匀且存在较少团聚现象, 材料晶粒细密, 此时石墨烯的加入对基体完整性的影响较小。从图 3e 可以看出, 当石墨烯的质量分数达到 0.7% 时, 石墨烯之间出现团聚现象, 这样大面积的团聚现象导致摩擦材料的孔隙率增大, 从而破坏了基体的完整性, 摩擦材料的力学性能、摩擦性能降低。为了精准验证金相形貌图中不同区域的物质成分, 对质量分数 0.5% 石墨烯-铜铁基摩擦材料的部分区域进行了详细的 EDS 图像分析。图 3b、c、d 分别对应图 3a 中标记的 1、2、3 号区域。在图 3b 所示的 EDS 图像能谱中明显看到 Fe 反射较为显著, 同时 Fe 的质量分数达到 86.914%, 可判断 1 号区域由铁基体组成。在图 3c 中, 2 号区域被特别标记出来, 与 1 号区域相比, 它呈现出较为浅淡的白色色调, 这一差异在图中清晰可见。通过图像能谱可以看出, Cu 的含量较多, 同时还有其他微量金属元素, Cu 的质量分数为 78.346%, Fe 的质量分数为 16.126%, 证明 2 号区域大部分由 Cu 基体组成。如图 3d 所示, C 的含量较多 (占 67.287%), 可见 3 号区域的基本组成为 C, 证明黑色部分为石墨烯或孔洞。

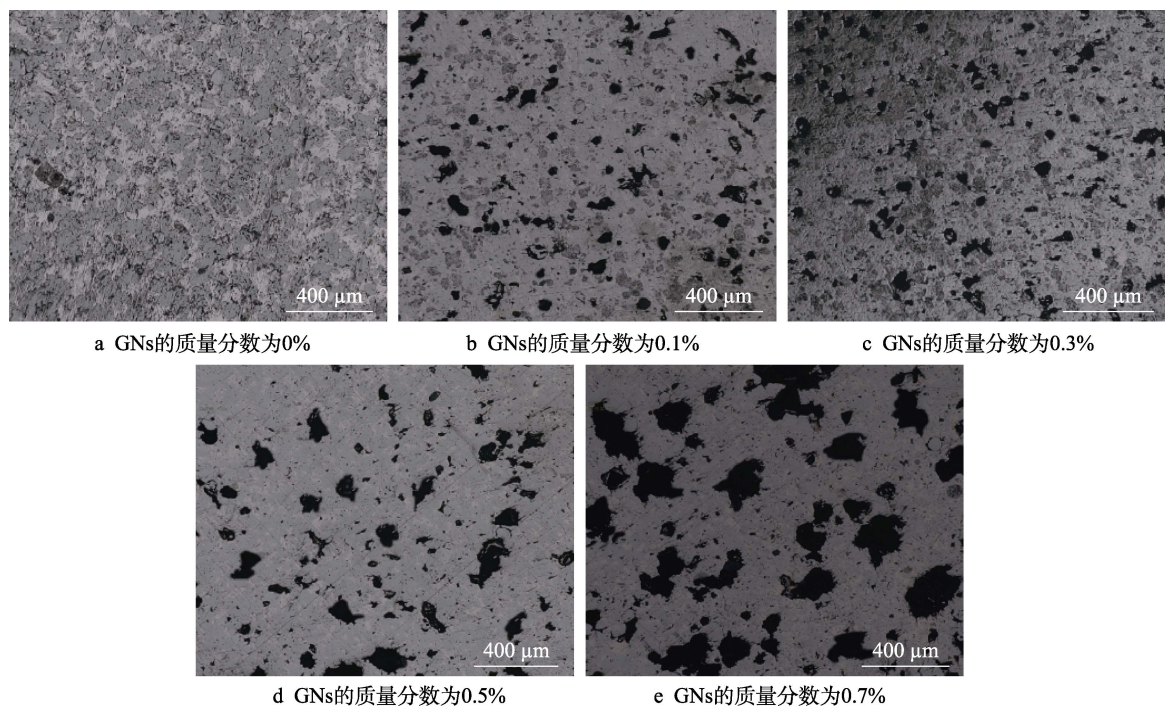


图 2 石墨烯-铜铁基摩擦材料的微观组织形貌

Fig.2 Microstructure of graphene-Cu-Fe-based friction material: a) 0%, GNs; b) 0.1%, GNs; c) 0.3%, GNs; d) 0.5%, GNs; e) 0.7%, GNs

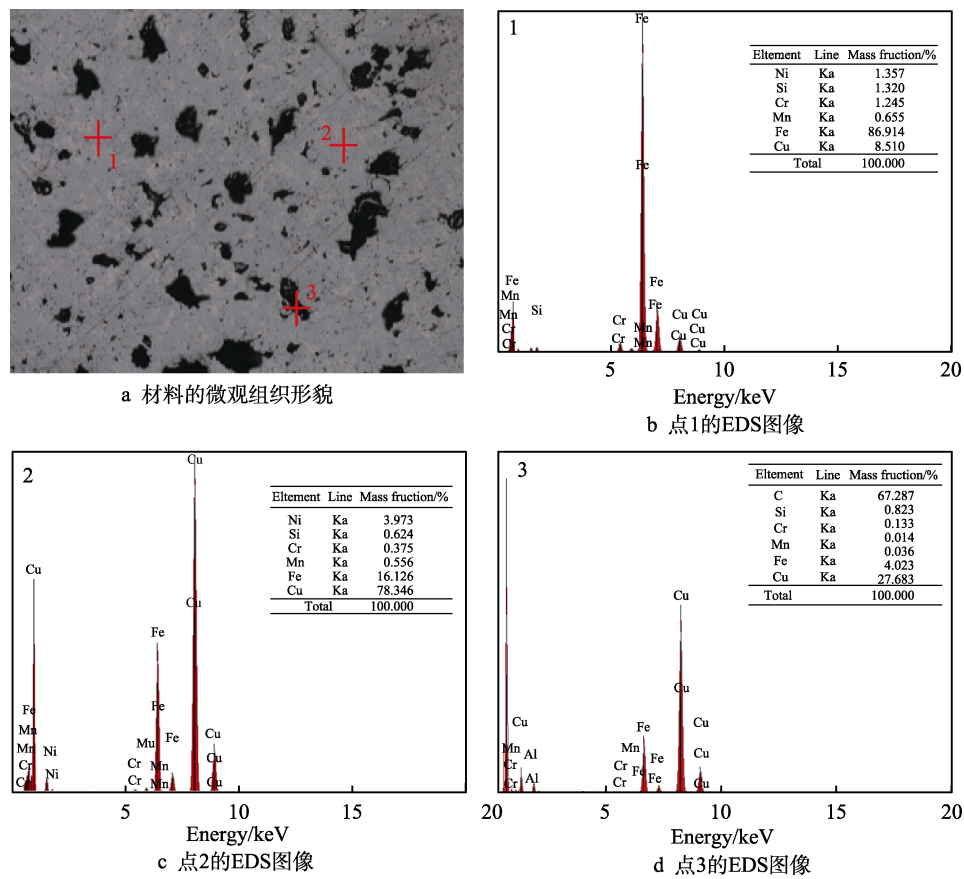


图 3 石墨烯的质量分数为 0.5%时铜铁基摩擦材料微观组织形貌和标识区域 EDS 图像

Fig.3 Microscopic and EDS image of a partial area of copper-iron-based friction material with 0.5% graphene content; a) EDS images of regions of microstructure; b) EDS image at point 1; c) EDS image at point 2; 3) EDS image at point 3

不含石墨烯及石墨烯添加量（均为质量分数）为 0.5%时，铜铁基摩擦材料的 XRD 图如图 4 所示。通

过对不含石墨烯和石墨烯添加量为 0.5%的铜铁基摩擦材料进行 XRD 图谱对比分析，揭示了多种元素和

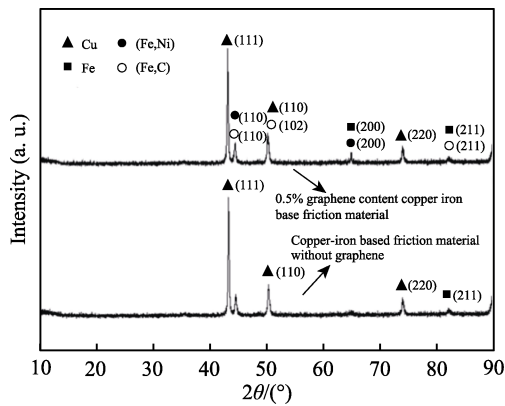


图 4 不含石墨烯及石墨烯的质量分数为 0.5%的铜铁基摩擦材料的 XRD 图

Fig.4 XRD pattern of copper-iron-based friction material without graphene and with 0.5% graphene content

固溶体的存在及其对材料性能的影响。不含石墨烯的铜铁基摩擦材料的 XRD 图谱显示，它主要由 Cu、Fe 元素构成，呈现出基础的晶体结构特征。在引入质量分数为 0.5% 的石墨烯后，材料的 XRD 图谱呈现显著变化。在石墨烯的质量分数为 0.5% 时，铜铁基摩擦材料的 XRD 图检测结果表明存在元素 Cu、Fe、C，以及(Fe, Ni)固溶体和(Fe, C)固溶体。在 2θ 为 44.65° 、 64.98° 处出现了(Fe, Ni)固溶体的晶面(110)、(200)的特征峰，证明存在该固溶体。同时，在 2θ 为 44.37° 、 50.37° 、 82.35° 处观察到(Fe, C)固溶体的晶面(201)、(112)、(312)的特征峰，进一步证实了该固溶体的存在。由此可见，在铜铁基摩擦材料中加入石墨烯，促进了 Fe 与 Ni 元素之间的互溶。在一定的温度和压力条件下，铁原子和镍原子在晶格中相互溶解，进而形成固溶体。同时，石墨烯的添加可能引起铜铁基摩擦材料的晶体结构发生变化，使得(Fe, Ni)固溶体的晶面(110)、(200)与铜铁基体的晶体结构相匹配。这种匹配有利于固溶体的形成和稳定性。

不同石墨烯含量的铜铁基摩擦材料的平均晶粒尺寸分布如图 5 所示，可见含有石墨烯的铜铁基摩擦材料的平均晶粒尺寸多集中于 $76\text{ }\mu\text{m}$ 左右。通过对比分析图 4 中不含石墨烯与含 0.5% 石墨烯的铜铁基摩擦材料的 XRD 图谱，并利用半峰宽化方法得出，不含石墨烯的铜铁基摩擦材料的晶体尺寸为 $(76\pm 3)\text{ }\mu\text{m}$ ，

加入质量分数 0.5% 的石墨烯后，其晶体尺寸显著减小至 $(58\pm 2)\text{ }\mu\text{m}$ ，表明石墨烯的加入对铜铁基摩擦材料基体晶体产生了明显的细化作用，使得晶粒更为细密，有助于提升基体的性能。当石墨烯的质量分数达到 0.7% 时，晶粒的平均尺寸明显增大，说明游离的石墨烯出现了明显的团聚现象。这种团聚现象导致大量石墨烯在基体中形成割裂，使晶粒的尺寸大大增加，进而削弱了材料的性能。

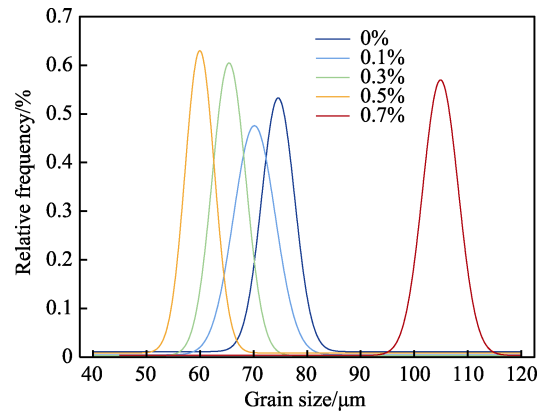


图 5 不同石墨烯含量的铜铁基摩擦材料的平均尺寸分布
Fig.5 Average size distribution of copper-iron-based friction materials with different graphene contents

2.1.2 润滑组元与金属基体的结合情况

石墨烯与金属基体结合边界形貌如图 6 所示。可以看出，石墨烯与金属基体间的结合方式主要为机械互锁，粒径较小的石墨烯与金属基体间的边界呈锯齿状。石墨烯与基体的结合均为结合力较弱的机械结合，边界处的 EDS 能谱显示结合处过渡部分的成分不仅存在 Cu、Fe，还存在 C，表明石墨烯与基体中的 Fe 产生(Fe,C)固溶体，对石墨烯与基体的结合起到了强化作用。由于石墨烯与基体间的结合边界呈锯齿状咬合，结合的边界较长，在摩擦过程中会比圆滑边界更难在剪切力作用下离开基体，所以石墨烯对摩擦材料完整性的破坏程度较轻。

2.1.3 摩擦材料的密度及孔隙率

不同含量石墨烯-铜铁基摩擦材料的孔隙率变化

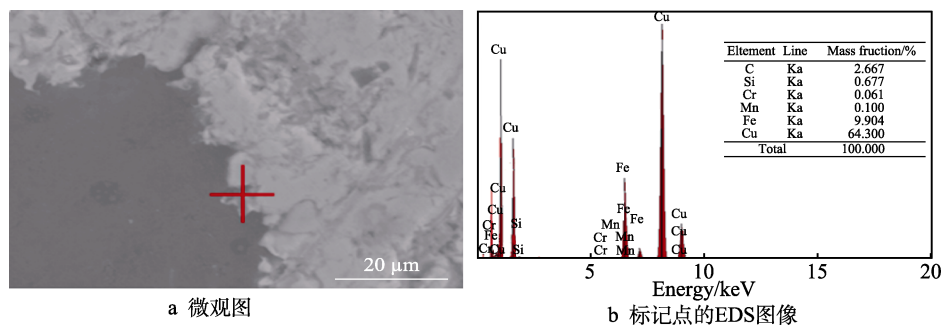


图 6 石墨烯与金属基体的结合边界微观图及 EDS 图像

Fig.6 Microscopic and EDS images of graphene and metal matrix binding boundary: a) microscopic images; b) EDS image of the marked point

情况如图 7 所示。通过测量,当石墨烯的质量分数从 0%增至 0.7%时,摩擦材料的密度由 8.297 g/cm^3 降至 8.082 g/cm^3 。其中,当石墨烯的质量分数低于 0.5%时,密度的下降趋势较为平缓;当石墨烯的质量分数达到 0.7%时,密度显著下降。这一现象归因于石墨烯自身的密度较低,与基体密度存在差异,导致结合性不佳,易产生细缝,从而增大孔隙率。当石墨烯的含量过多时,游离的石墨烯增加,发生了团聚现象,破坏了二维结构,使得孔隙率进一步上升,进而破坏材料的完整性。为了保持摩擦材料密度的平稳降低,应将石墨烯的质量分数控制在 0.1%~0.5%范围内。同时,可以通过式(1)~(2)计算每个试样的理论密度 $\rho_{\text{理论}}$ 和孔隙率 P 。

$$\rho_{\text{理论}} = \frac{1}{\frac{W_1}{\rho_1} + \frac{W_2}{\rho_2} + \dots + \frac{W_i}{\rho_i}} \quad (1)$$

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{\text{实际}}}{\rho_{\text{理论}}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_i 为摩擦材料中第 i 个组元的质量分数,%; ρ_i 为摩擦材料第 i 个组元的理论密度, g/cm^3 。

通过计算得出,各组试样的孔隙率分别为 0.78%、1.06%、1.29%、1.46%、2.10%。

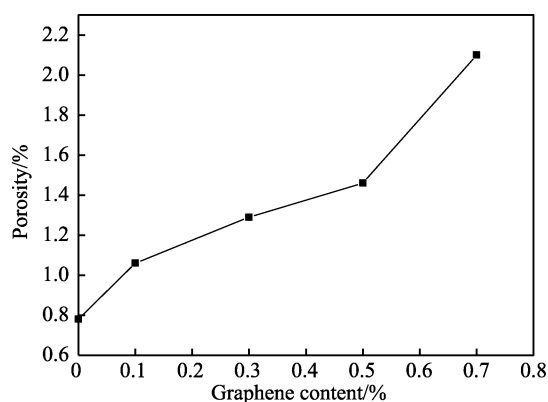


图 7 不同石墨烯添加量下摩擦材料孔隙率的变化

Fig.7 Porosity changes of friction materials under different graphene addition

2.2 摩擦材料的力学性能及物理性能

石墨烯-铜铁基材料硬度的变化如图 8 所示。采用粉末冶金制备摩擦材料时,材料的组织结构会影响其硬度等性能。由图 8 可以看出,当石墨烯的质量分数在 0.5%以下时,摩擦材料的硬度呈上升趋势,摩擦材料的硬度最高为 165.25,相较于未加石墨烯时增加了 12.39%;当石墨烯的质量分数为 0.7%时,摩擦材料的硬度下降到 155.72,原因是石墨烯在烧结温度范围内可以扩散到铁元素中,形成 (Fe,C) 固溶体,起到强化基体的作用。加入石墨烯作为基体的低层错能金属铁和铜,其晶粒间被石墨烯有效隔离。在烧结

过程中,石墨烯阻碍了铜铁基晶粒的长大,形成了亚晶界并堆积,为再结晶提供了条件,产生了钉扎效应,进而实现了细晶强化,显著提高了摩擦材料的硬度^[29-30]。当石墨烯的质量分数超过 0.5%时,石墨烯分散且开始出现不均匀现象,导致游离态石墨烯团聚,割裂基体造成基体的致密度降低,因此摩擦材料硬度下降。

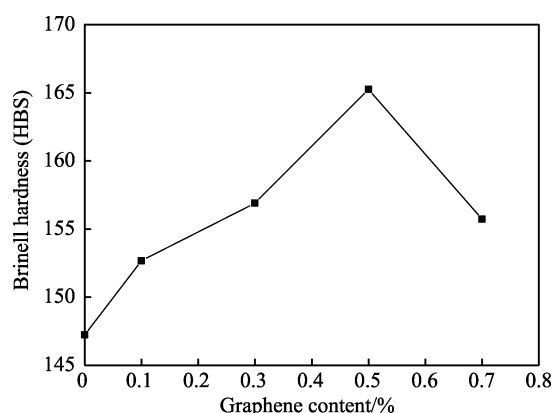


图 8 不同石墨烯添加量下摩擦材料的布氏硬度变化

Fig.8 Brinell hardness changes of friction materials with different graphene additions

不同含量的石墨烯-铜铁基摩擦材料的抗压强度变化如图 9 所示。利用粉末冶金制备金属基摩擦材料时,影响抗压强度的内部因素包括微观组织、结合键等。石墨烯颗粒与金属基体的结合方式主要靠分子间的结合力,这种力远小于化合键等其他键之间的力。由图 9 可以看出,随着石墨烯含量的增加,石墨烯-铜铁基摩擦材料的抗压强度呈下降趋势,下降趋势较为稳定;当石墨烯的质量分数增至 0.7%时,摩擦材料的强度为 347.22 MPa ,相较于未添加石墨烯材料的强度降低了 5.33%,这主要是因将石墨烯添加到基体中可以起到固溶强化和细晶强化的作用。

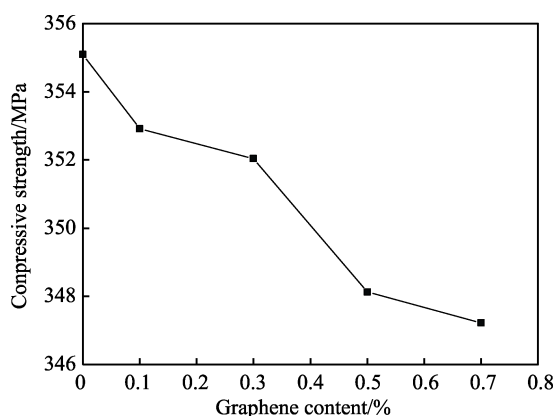


图 9 不同石墨烯添加量下摩擦材料抗压强度的变化

Fig.9 Changes in compressive strength of friction materials under different graphene additions

2.3 摩擦材料的摩擦学性能

在摩擦材料中加入的润滑组元通常包括石墨、石墨烯、二硫化钼等物质,其中石墨烯具有更优秀的物理性能和力学性能。在材料摩擦过程中,石墨烯会被其他晶粒挤至材料表面与对偶件接触,并且结合其他组元,形成保护层,避免对偶件与基体直接摩擦,使得摩擦材料的组织结构保持完整,提高了摩擦材料的稳定性。

当润滑组元的含量提高时,铜铁基摩擦材料的摩擦性能稳定性也会提高,同时铜铁基体的摩擦因数与磨损率会下降。通过设置不同转速的实验,可以全面评估摩擦材料在不同工况下的摩擦因数、磨损率等,不同转速表示摩擦材料在实际应用中可能遇到的不同的工作条件,有助于全面了解材料的摩擦性能。这里主要研究不同转速(600、1 100、1 600 r/min)下,石墨烯含量对材料的摩擦因数稳定性、平均摩擦因数、磨损率及磨损机理的影响规律。

2.3.1 石墨烯含量对摩擦材料摩擦因数的影响

石墨烯含量不同的石墨烯-铜铁基摩擦材料在不同转速下的摩擦因数曲线如图 10 所示。从图 10a 可以看出,在石墨烯的质量分数为 0%、0.1 时,材料的摩擦因数波动较大,且摩擦因数较高,波动在 120 s 后开始变得平稳,这主要是因前期摩擦材料处于跑和阶段,所以摩擦因数波动较大。随着摩擦时间的增加,材料进入稳定摩擦阶段,此后摩擦因数波动较小,趋于稳定。在石墨烯的质量分数 0.3% 时,材料的摩擦因数降低,但是波动幅度仍然较大,此时石墨烯形成的润滑层导致摩擦因数降低,且波动较大。当石墨烯的质量分数增至 0.5%、0.7% 时,材料的摩擦因数波动变得平缓,摩擦因数稳定在 0.4~0.5 之间。从图 10 还可看出,随着摩擦转速的增加,摩擦因数逐渐降低。这是因为转速增加,摩擦过程中产生的热量增加,此时在摩擦热的作用下,摩擦材料的金属物质与空气中的氧气、水分发生反应,形成了一层氧化膜,与润滑

层共同组成摩擦表面来保护基体不被破坏^[31],摩擦因数逐渐趋于稳定。从图 10b 可以看出,随着石墨烯含量的增加,摩擦材料的摩擦因数逐渐降低,但摩擦因数的波动幅度增大。此时,在 1 100 r/min 转速下,摩擦产生的热量较低,金属粒子与空气中氧气和水发生的反应较少,摩擦材料的摩擦膜并不完整,但此时摩擦材料受到的剪切力增加,因此摩擦因数波动幅度增大。如图 10c 所示,当转速增加到 1 600 r/min 时,摩擦因数进一步降低,此时因转速的增加,在摩擦过程中产生的热量增加,参与反应所形成的氧化膜厚度会增加,而且在石墨烯含量较少时,石墨烯很难被挤至摩擦表面起到润滑作用,所以当石墨烯的质量分数小于 0.5% 时(如图 10c 所示),材料的摩擦因数波动幅度仍然较大。当石墨烯的质量分数超过 0.5% 时,石墨烯的润滑作用较大,润滑膜更加完整,所以摩擦因数进一步降低,并趋于稳定值。

结合图 10a~c 来看,虽然在摩擦材料中加入质量分数 0.7% 的石墨烯时,其摩擦因数降到最低,且摩擦因数较稳定,但是作为机器中制动部分的摩擦片,需要摩擦材料保持一定摩擦因数的同时降低摩擦因数的波动幅度。由此来看,石墨烯的质量分数为 0.5% 的铜铁基摩擦材料最适合作为制动器中的刹车片,测得石墨烯-铜铁基摩擦材料的摩擦因数为 0.4~0.5;摩擦材料合理的摩擦因数区间为 0.4~0.6,此时石墨烯-铜铁基摩擦材料的综合性能最佳。

石墨烯-铜铁基摩擦材料的平均摩擦因数如图 11 所示。可以看出,随着转速的增加,材料的摩擦因数均呈下降趋势,从平均摩擦因数的数值变化可以看出,转速越大,则摩擦过程中产生的热量越多,形成的保护膜可以降低摩擦因数,印证了之前图 8、图 9 的实验结果。从图 11 还可以看出,在相同转速和压力下,随着石墨烯含量的增加,摩擦材料的平均摩擦因数逐渐降低,原因是随着石墨烯含量的增加,参与到摩擦过程中起润滑作用的石墨烯也增加,从而降低了平均摩擦因数。

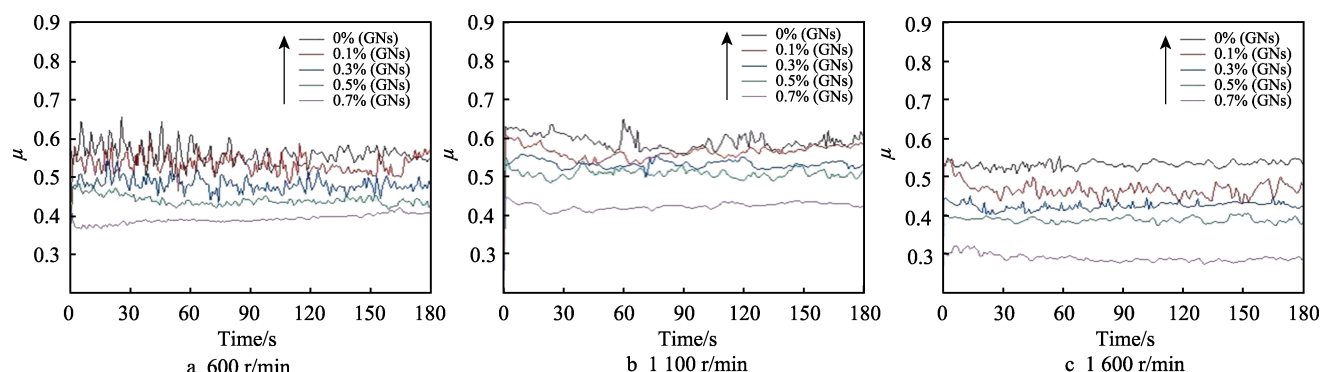


图 10 石墨烯-铜铁基摩擦材料的摩擦因数
Fig.10 Friction coefficient of graphene-copper-iron-based friction material

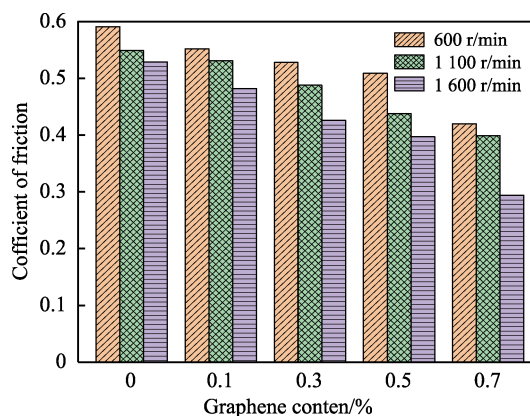


图 11 石墨烯-铜铁基摩擦材料平均摩擦因数

Fig.11 Average friction coefficient of graphene-copper-iron-based friction material

2.3.2 石墨烯含量对摩擦材料磨损率的影响

在转速 600、1100、1600 r/min 下, 测得不同石墨烯添加量时铜铁基摩擦材料的磨损率变化曲线, 如图 12 所示。

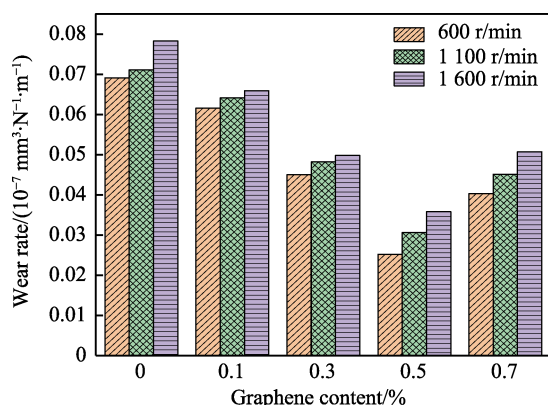


图 12 石墨烯含量对石墨烯-铜铁摩擦材料磨损率的影响

Fig.12 Effect of graphene content on wear rate of graphene-Cu-Fe friction material

利用电子天平记录摩擦磨损前后试样的质量, 通过式 (3) 计算磨损率。

$$\Delta v = \frac{\Delta w}{\rho} (2f \cdot \pi \cdot r \cdot n)^{-1} \quad (3)$$

式中: Δv 为磨损率, 表示单位时间内单位面积的磨损量; Δw 为磨损量, 表示某一时间段内因摩擦或其他因素导致材料损失质量或体积; ρ 为材料的密度; f 为摩擦因数; r 为接触半径, 表示 2 个接触表面的平均半径; n 为转速。

从图 12 可以看出, 在相同转速、石墨烯质量分数为 0.5% 以下时, 摩擦材料的磨损量逐渐降低; 当石墨烯的质量分数增至 0.7% 时, 摩擦材料的磨损率开始增大。

根据摩擦学原理可知, 摩擦时材料的磨损量受到施加载荷、对偶件转速和材料自身成分等因素的影响。此次摩擦实验的变量为转速和石墨烯含量。从图

12 可以看出, 在石墨烯含量相同的情况下, 转速越快, 则材料的磨损率越大, 在增大转速时对偶件给摩擦材料的剪切力越大。在剪切力的作用下, 材料的保护膜被撕裂并剥离基体, 在摩擦材料与对偶件中形成磨粒磨损, 导致摩擦材料的损伤增大。从图 12 还可以看出, 在相同转速下, 石墨烯的质量分数在 0.1%~0.5% 之间时, 摩擦材料的磨损率呈下降趋势, 这是因为随着石墨烯含量的增加, 材料在摩擦过程中会有更多的石墨烯被挤至摩擦材料表面, 形成一层保护膜, 将基体与对偶件隔开^[32]。同时, 在石墨烯的质量分数为 0.1%~0.5% 时, 摩擦材料的硬度呈上升趋势。在石墨烯的质量分数超过 0.5% 时, 石墨烯出现团聚现象, 与金属基体的润湿性较差。综合这些原因, 在石墨烯过多时会起到割裂基体的作用, 降低摩擦材料的完整性, 导致摩擦材料的强度、硬度降低, 造成磨损率升高。在石墨烯的质量分数为 0.5% 时, 材料的磨损率最低, 在 600、1100、1600 r/min 转速下其磨损率分别为 2.52×10^{-9} 、 3.06×10^{-9} 、 $3.58 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

综合考虑石墨烯-铜铁基摩擦材料的力学性能和摩擦性能可知, 石墨烯的质量分数为 0.5% 时石墨烯-铜铁基摩擦材料的综合性能最佳。

2.3.3 石墨烯对摩擦材料摩擦机理的影响

在石墨烯的质量分数为 0、0.1%、0.3%、0.5%、0.7% 时, 铜铁基摩擦材料在 600 r/min 转速下磨损后的表面形貌如图 13 所示, 图 13f 为图 13d 中的裂缝在扫描电镜下放大 1000 倍时的形貌。

从图 13a 可以看出, 当铜铁基摩擦材料不添加任何润滑组分时, 其磨损形貌存在较深的裂缝、犁沟、麻坑等缺陷, 这是因为在 600 r/min 转速下, 摩擦磨损实验中的对偶件对摩擦材料的剪切力较大, 摩擦材料在产生塑性形变的同时, 其摩擦组元会被剥离摩擦材料表面, 在摩擦材料与对偶件之间形成第三方凸起接触点时, 这些摩擦组元会划伤摩擦材料, 从而产生犁沟、麻坑, 破坏基体的完整性, 此时摩擦材料的磨损机理包括磨粒磨损、剥层磨损和黏着磨损^[33]。从图 13b~d 可以看出, 在铜铁基摩擦材料中加入质量分数 0.1% 的石墨烯后, 摩擦材料的润滑层形成不完全, 呈片状分布, 犁沟较深且存在裂缝; 当石墨烯的质量分数为 0.3% 时, 润滑层的分布较均匀, 未出现润滑层成片脱落的现象, 犁沟变浅, 说明此时石墨烯起到了润滑作用, 从而保护基体^[34]; 当石墨烯的质量分数增至 0.5% 时, 出现的裂缝减少, 犁沟进一步变浅, 此时润滑层充分起到保护基体的作用, 此时摩擦材料的磨损量最小, 摩擦机理主要为黏着磨损和少量磨粒磨损; 当石墨烯的质量分数增至 0.7% 时, 出现了面积较大的裂缝, 摩擦材料的保护膜成片脱落, 犁沟的深度开始增加。这是因为游离石墨烯含量过多则出现团聚现象, 此时石墨烯作为润滑组元虽然提升了润滑作用, 但石墨烯的团聚破坏了基体的完整性, 导致其

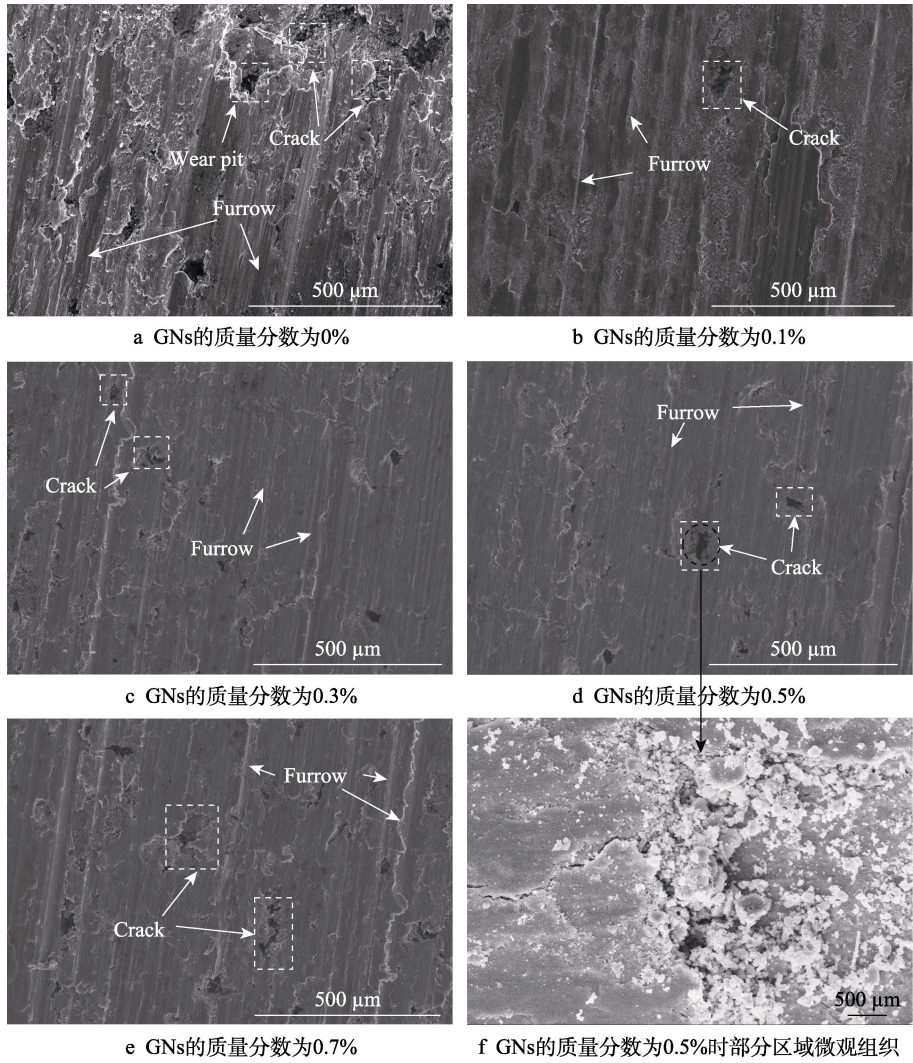


图 13 石墨烯对铜铁基摩擦材料在 600 r/min 转速下磨损形貌的影响

Fig.13 Effect of graphene on wear morphology of copper-iron-based friction materials at 600 r/min:

a) 0%, GNs; b) 0.1%, GNs; c) 0.3%, GNs; d) 0.5%, GNs; e) 0.7%, GNs; f) regional microstructure at 0.5%, GNs

摩擦性能不稳定，磨损机理为磨粒磨损和少量剥层磨损。

从图 13f 可以看到，当摩擦材料的保护膜被破坏时，硬质粒子剥离摩擦材料表面时会在摩擦材料表面产生裂缝。当摩擦过程中的裂缝数量过多时，产生的裂纹就会汇聚在一起，破坏摩擦材料的完整性，造成材料剥落，形成麻坑。

在石墨烯的质量分数为 0.5% 时，材料的磨损表面 XRD 图如图 14 所示。由于转速较高，导致摩擦表面的温度升高，接触面磨屑的活性增大，因此极易与空气中的氧元素发生反应，形成氧化物。在 2θ 为 31.56° 、 58.69° 、 82.06° 时，出现晶面为 (110)、(111)、(200) Cu_2O 的特征峰。由此可知，在高速摩擦下，摩擦材料基体中的铜受到高温的影响，与空气中的氧气发生反应，生成了 Cu_2O 。 Cu_2O 与石墨烯及摩擦材料中的硬质粒子共同形成摩擦层，从而保护摩擦材料基体的完整性。

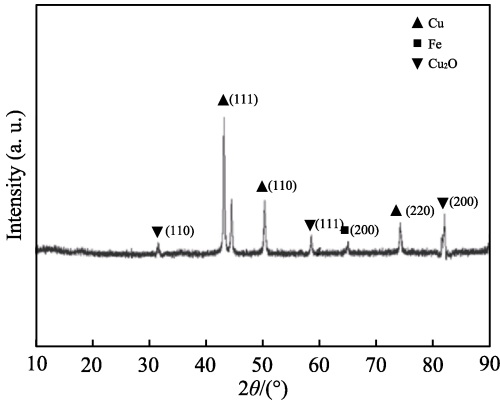


图 14 在石墨烯的质量分数为 0.5% 时摩擦材料的磨损表面 XRD 图

Fig.14 Post-wear XRD pattern of of 0.5% graphene-Cu-Fe-based friction material

在石墨烯的质量分数为 0.5% 时，摩擦材料磨损后部分区域的 EDS 图像如图 15 所示。图 15b、c、d 分别表示图 15a 中标记的 1、2、3 号区域。从图 15b

的 EDS 图像能谱可见, 1 号区域中 Cu 的质量分数为 93.319%、Fe 的质量分数为 5.966%, 还有少量石墨及其他元素, 证明该区域的主要成分由基体构成。相对而言, 在 2 号区域的 EDS 能谱中可见, C 的含量显著增加, 表明石墨烯在这一特定区域内发生了轻微的团聚现象。这种团聚现象是由摩擦过程中产生的高温所引发, 这种高温条件使得石墨烯能够获得较高的表面能, 进而诱导邻近的石墨烯发生团聚。在 3 号区域的 EDS 能谱中可见, 铜铁基摩擦材料 (0.5%) 经摩

擦后, EDS 能谱显示氧元素的浓度呈上升趋势。这一现象进一步说明, 材料在摩擦过程中其表面与环境中的氧气发生了氧化反应, 生成了氧化物润滑层, 从而对基体起到了保护作用。石墨烯的加入, 不仅加速了氧化反应的发生, 还促进了氧化物润滑层的生成。这层润滑层有效地保护了基体, 防止润滑层大片脱落, 确保了摩擦过程的稳定和持久。这层润滑层由氧化物组成, 能够减小摩擦和磨损, 从而提高材料的摩擦学性能。

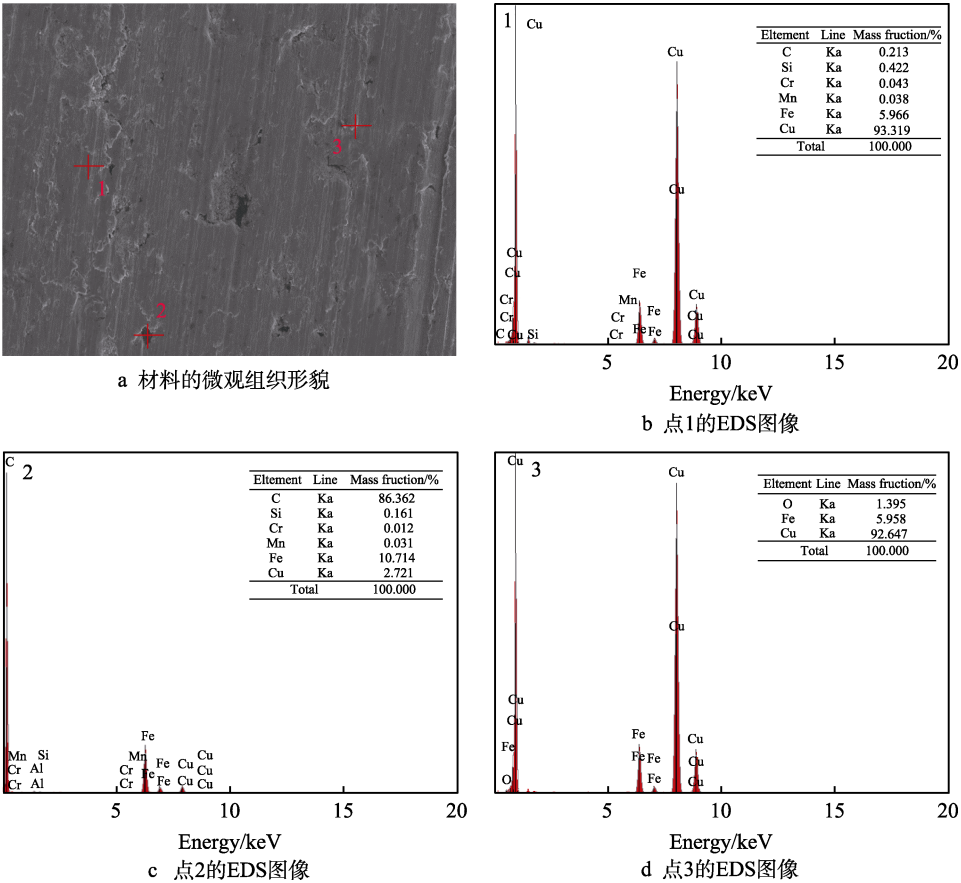


图 15 石墨烯-铜铁基摩擦材料 (0.5%) 磨损后部分区域的微观形貌和 EDS 图像
Fig.15 Microscopic and EDS image of 0.5% graphene-copper-iron-based friction material after wear: a) EDS images of regions of Microstructure; b) EDS image at point 1; c) EDS image at point 2; 3) EDS image at point 3

3 结论

探究石墨烯含量不同时摩擦材料的密度、硬度、强度、摩擦因数、磨损量, 以及磨损机理的变化规律, 得出以下结论。

1) 通过粉末冶金方式制备了石墨烯与铜铁基摩擦材料, 通过观察其微观组织发现, 石墨烯在铜铁基体中分布较均匀。当石墨烯的质量分数增至 0.7% 时, 石墨烯之间出现了较多连结现象, 导致石墨烯团聚, 破坏了石墨烯自身的二维结构。在石墨烯的质量分数为 12%、0.7% 时均出现了较严重的团聚现象。

2) 随着石墨烯含量的增加, 摩擦材料的密度、强度降低, 硬度呈先增加后降低趋势; 石墨烯-铜铁

基摩擦材料的密度由 8.297 g/cm³ 降至 8.082 g/cm³; 石墨烯-铜铁基摩擦材料的强度由 355.34 MPa 降至 347.22 MPa。石墨烯的质量分数在 0%~0.5% 区间内增加时, 石墨烯-铜铁基摩擦材料的硬度逐渐升高。当石墨烯的质量分数增至 0.7% 时, 摩擦材料的硬度下降。石墨烯-铜铁基摩擦材料 (0.5%) 的硬度比未添加石墨烯的材料增大了 12.39%。

3) 在摩擦材料中加入石墨烯后, 其摩擦性能明显提高。在相同转速和压力下, 随着石墨烯含量的增加, 摩擦材料的摩擦因数逐渐趋于平稳, 且平均摩擦因数降低。磨损率由摩擦材料的摩擦性能和力学性能共同决定, 在石墨烯的质量分数为 0.5% 时, 摩擦材料的磨损率最低为 2.52×10⁻⁹ mm³/(N·m); 当石墨烯的

质量分数为 9%时, 摩擦材料的磨损率最低为 $4.35 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

4) 当摩擦材料中未加入石墨烯时, 其摩擦机理为磨粒磨损、黏着磨损和剥层磨损。当石墨烯的质量分数为 0.1%~0.5%时, 其摩擦机理主要为黏着磨损和少量磨粒磨损。当石墨烯的质量分数增至 0.7%时, 其摩擦机理主要为磨粒磨损, 并出现了少量剥层磨损。

参考文献:

- [1] 付传金. 高速列车铜基粉末冶金摩擦材料成分配比与摩擦磨损性能研究[D]. 南昌大学, 2022.
FU C J. Composition Ratio and Friction and Wear Properties of Cu-Matrix Powder Metallurgy Friction Materials for High-Speed Trains[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [2] 王立全, 张向军, 王素焕, 等. 高速列车用铜基粉末冶金摩擦材料摩擦性能的研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(16): 1-4.
WANG L Q, ZHANG X J, WANG S H, et al. Research Progress of Friction Properties of Copper-Based Powder Metallurgy Friction Material Used for High Speed Train[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(16): 1-4.
- [3] 黎小辉, 万霞, 甘春雷. 汽车制动材料研究现状与发展趋势[J]. 材料研究与应用, 2020, 14(3): 240-245.
LI X H, WAN X, GAN C L. Research Status and Development of Automotive Brake Materials[J]. Materials Research and Application, 2020, 14(3): 240-245.
- [4] 付传起. 铜包铁(Fe-20Cu)基摩擦材料的组织及性能研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012: 170.
FU C Q. Research on Microstructure and Properties of Wrap of Copper on Ferric(Fe-20Cu) Matrix Friction Materials[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012: 170.
- [5] 张楠, 徐岩, 韩明, 等. 铁基粉末冶金摩擦材料高能制动损伤机制[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41(3): 275-281.
ZHANG N, XU Y, HAN M, et al. Damage Mechanism of Fe-Based Powder Metallurgy Friction Materials in High Energy Braking[J]. Powder Metallurgy Technology, 2023, 41(3): 275-281.
- [6] 李杰, 顾佳玲. Cu 基粉末冶金摩擦材料激光熔覆及摩擦特性研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(2): 140-144.
LI J, GU J L. Research on Laser Cladding and Friction Characteristics of Copper-Based Powder Metallurgy Friction Materials[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(2): 140-144.
- [7] 肖金坤, 李天天, 鲍霆峰, 等. 高速列车铜基摩擦材料的氧化行为(英文)[J/OL]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China: 1-25[2024-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1239.tg.20230728.1540.006.html>.
XIAO J K, LI T T, BAO T F, et al. Oxidation Behavior of Copper-based Friction Materials for High-speed Trains [J/OL]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China: 1-25[2024-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1239.tg.20230728.1540.006.html>.
- [8] 杨胜明, 何美凤. 烧结温度对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2022, 43(4): 1-6.
YANG S M, HE M F. Effect of Sintering Temperature on Properties of Cu-Based Powder Metallurgy Friction Materials[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2022, 43(4): 1-6.
- [9] 王晓阳. 烧结压力对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响[J]. 科学技术创新, 2021(24): 148-149.
WANG X Y. Effect of Sintering Pressure on Properties of Copper-Based Powder Metallurgy Friction Materials[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(24): 148-149.
- [10] 韩晓明, 王长峰, 杨俊英, 等. 制动条件下石墨对铜基摩擦材料瞬时摩擦性能的影响[J]. 润滑与密封, 2021, 46(1): 27-30.
HAN X M, WANG C F, YANG J Y, et al. Effect of Graphite on the Instantaneous Friction Properties of Copper-Based Materials under Braking Conditions[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(1): 27-30.
- [11] 石永亮, 黄伟青, 陈存广, 等. 铜基-碳纤维刹车片摩擦材料的制备及性能[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30(6): 50-54.
SHI Y L, HUANG W Q, CHEN C G, et al. Preparation and Properties of Copper-Based Carbon Fiber Brake Pads Friction Materials[J]. Powder Metallurgy Industry, 2020, 30(6): 50-54.
- [12] LAN H, HUI Y, HAN M, et al. The Influence of Copper Content on the Braking Performance of Iron-Based Powder Metallurgy Friction Materials[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1885(3): 032068.
- [13] 徐峰, 冯小明, 王永善. 铁基粉末冶金摩擦材料的研制[J]. 热加工工艺, 2017, 46(14): 110-111.
XU F, FENG X M, WANG Y S. Research on Iron Based Powder Metallurgy Frictional Materials[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(14): 110-111.
- [14] 任志俊. 铁基粉末冶金制动摩擦材料耐磨性能的显微分析[J]. 江南大学学报, 2006(5): 569-572.
REN Z J. Microanalysis and Wear Behavior of Sintered Iron[J]. Journal of Southern Yangtze University, 2006(5): 569-572.
- [15] 陈洁, 熊翔, 姚萍屏, 等. 摩擦面温度对铁基摩擦材料摩擦磨损性能影响机理的研究[J]. 粉末冶金技术, 2004, 22(4): 223-227.
CHEN J, XIONG X, YAO P P, et al. Effect of Rubbed Surface Temperature on Frictional Behaviour of Iron Based P/M Friction Materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2004, 22(4): 223-227.
- [16] 陈洁, 熊翔, 姚萍屏. MoS₂ 对铁基摩擦材料烧结过程的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2003, 8(3): 247-251.
CHEN J, XIONG X, YAO P P. Effect of MoS₂ on Sintering of Iron Based P/M Friction Materials[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2003, 8(3): 247-251.
- [17] 黄尚文, 谭明福. 润滑组元对铁基摩擦材料摩擦性能

- 的影响[J]. 中南矿冶学院学报, 1993, 24(5): 622-626.
- HUANG S W, TAN M F. Influence of Some Lubricant Components on the Frictional Properties of Fe-Based Friction Material[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 1993, 24(5): 622-626.
- [18] 付传起, 王宙. 石墨/铜铁基自润滑复合材料的摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2010, 39(4): 11-14.
- FU C Q, WANG Z. Study on Tribological Properties of Graphite/Cu-Fe Matrix Self-Lubricating Composites[J]. Surface Technology, 2010, 39(4): 11-14.
- [19] 伊春强. 3D 石墨烯对铜基粉末冶金材料性能影响的研究[D]. 南宁: 广西民族大学, 2019.
- YI C Q. Study on Influence of 3D Graphene on the Properties of Copper-Based Powder Metallurgy Materials[D]. Nanning: Guangxi University for Nationalities, 2019.
- [20] 邱劫峥. Cu/Fe 基新型刹车片力学性能分子动力学模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- QIU J Z. Mechanical Properties of New Brake Pads Based on Cu/Fe Molecular Dynamics Simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [21] 文国富, 何锐, 王秀飞, 等. 基体强化元素对铜基粉末冶金摩擦材料显微结构及性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30(5): 45-50.
- WEN G F, HE R, WANG X F, et al. Effect of Matrix Strengthening Elements on Microstructure and Properties of Cumatrix Powder Metallurgy Friction Materials[J]. Powder Metallurgy Industry, 2020, 30(5): 45-50.
- [22] 肖业成. NiAl/石墨烯自润滑复合材料的摩擦特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016: 69.
- XIAO Y C. Study on Tribological Performance of NiAl Matrix Self-Lubricating Composite with Addition of Graphene[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016: 69.
- [23] ZHANG Y Z, KORANTENG K, YI Y B. Characterization of Graphene Reinforced 3C-SiC Composite as a Metal-Free Friction Material Using Molecular Dynamics Simulation[J]. Computational Materials Science, 2023, 218: 111973.
- [24] CHEN S T, LIU Y F, FENG K Q. Effects of Graphene Additions on Iron-Based Friction Material Prepared from Vanadium-Bearing Titanomagnetite Concentrates Directly[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(5): 3334-3343.
- [25] GAUR A, NANDA S, DUCHANIYA R K. Tribological Effects of Graphene Oxide on Brake Friction Materials[J]. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2020, 9(5): 414-416.
- [26] 张海平, 孙庆泽, 李炯利, 等. 石墨烯对纯铝力学、电学和耐腐蚀性能影响[J/OL]. 材料科学与工艺, 2023: 1-7[2024-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1345.TB.20230920.1349.004.html>.
- ZHANG H P, SUN Q Z, LI J L, WANG X D, et al. Study on The Impact of Graphene on Pure Aluminum Mechanical Property, Electrical Conductivity and Corrosion Resistance[J/OL]. Materials Science and Technology, 2023: 1-7[2024-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1345.TB.20230920.1349.004.html>.
- [27] 张发厅. 不同种类石墨及碳纤维对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(5): 41-45.
- ZHANG F T. Effects of Different Kinds of Graphite and Carbon Fiber on the Properties of Copper-Based Powder Metallurgy Friction Materials[J]. Powder Metallurgy Industry, 2018, 28(5): 41-45.
- [28] LLORENTE J, ROMÁN-MANSO B, MIRANZO P, et al. Tribological Performance under Dry Sliding Conditions of Graphene/Silicon Carbide Composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(3): 429-435.
- [29] 张一凡, 梁宇, 刘永琪, 等. 石墨烯增强铜基复合材料显微组织和性能的研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(1): 88-93.
- ZHANG Y F, LIANG Y, LIU Y Q, et al. Microstructure and Properties of Graphene Reinforced Copper Matrix Composites[J]. Foundry Technology, 2024, 45(1): 88-93.
- [30] 王军, 李林聪, 王天顺, 等. 石墨烯增强铜基复合材料强度及机理研究[J]. 河北科技大学学报, 2023, 44(1): 58-66.
- WANG J, LI L C, WANG T S, et al. Study on Strength and Mechanism of Graphene-Reinforced Copper Matrix Composites[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2023, 44(1): 58-66.
- [31] 燕松山, 肖正力, 毛娅, 等. MoSe₂/石墨烯-不锈钢自润滑材料减摩机理研究[J/OL]. 中国机械工程, 2023: 1-6[2024-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20231120.1607.012.html>.
- YAN S S, XIAO Z L, MAO Y, et al. Research on The Friction Reduction Mechanism of Mose₂/Graphene-Stainless Steel Self-Lubricating Materials[J/OL]. China Mechanical Engineering, 2023: 1-6[2024-11-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20231120.1607.012.html>.
- [32] 王红. 中间相碳合金的结构表征及高温摩擦学性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006: 85.
- WANG H. Study of Microstructures and High Temperature Tribological Performances of Mesophase Carbon Alloys[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006: 85.
- [33] 胡铮, 张楠, 张万昊, 等. 石墨含量对铜基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2020, 38(6): 409-413.
- HU Z, ZHANG N, ZHANG W H, et al. Effect of Graphite Content on Friction and Wear Properties of Copper-Based Friction Materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2020, 38(6): 409-413.
- [34] 朱庆帅. 含石墨烯 Ni₃Al 基自润滑材料的摩擦学性能与摩擦层研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016: 70.
- ZHU Q S. Research on Tribology Performance and Friction Layer of Ni₃Al Matrix Self-Lubricating Composites with Graphene[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016: 70.