DOI:10.3969/j.issn.1671-024x.2026.04.003

多孔质气体轴承用石墨烯/青铜复合材料的制备及其性能

乔志军[1],张亮宇[2]
(1.天津工业大学 机械工程学院,天津 300387;2.天津工业大学 航空航天学院,天津 300387)

摘 要: 为了满足气体轴承多孔质及高性能的需求,采用粉末冶金和化学气相沉积相结合的方法,制备了石墨烯/青铜多孔复合材料,并考察其力学性能和耐腐蚀性能。结果表明:镍的加入减少了石墨烯的缺陷,并使石墨烯与青铜基体的界面结合更加紧密,掺杂镍的石墨烯/青铜多孔复合材料的平均维氏硬度和抗拉强度分别达到103 HV和126 MPa,相较于多孔青铜分别提升了34%和70%;石墨烯片层堆叠形成致密阻隔层,镍掺杂促进合金表面形成致密的氧化膜,相较于多孔青铜该复合材料自腐蚀电位由-0.389 V正移至-0.266 V,多孔复合材料的耐腐蚀性能显著提升。

关键词: 化学气相沉积;石墨烯;青铜基复合材料;镍掺杂;多孔材料
中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2026)04-0020-06

Preparation and performance of graphene/bronze composite materials for porous gas bearings

Qiao Zhijun[1], Zhang Liangyu[2]
(1. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Aeronautics and Astronautics, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To meet the requirements of porous structure and high performance for gas bearings, graphene/bronze porous composite materials were fabricated by combining powder metallurgy and chemical vapor deposition (CVD), and their mechanical and corrosion resistance properties were investigated. The results demonstrated that the addition of nickel reduced defects in graphene and achieved tighter interfacial bonding between graphene and the bronze matrix. The nickel-doped graphene/bronze porous composites achieved a hardness of 103 HV and a tensile strength of 126 MPa, representing 34% and 70% improvements compared with pure porous bronze, respectively. Graphene sheets stacked to form a dense barrier layer. Nickel doping facilitated the formation of compact oxide films on the alloy surface. Compared with porous bronze, the corrosion potential positively shifted from -0.389 V to -0.266 V, so the corrosion resistance of the porous composite was significantly enhanced.

Key words: chemical vapor deposition; graphene; bronze matrix composite; nickel doping; porous materials

航空航天、原子能和半导体等尖端技术不断进步,对精密零件的加工精度提出了更高要求,这直接推动了气体轴承技术的快速发展。相较于传统润滑方式,以气体为润滑介质的多孔质气体轴承凭借其运动精度高、摩擦损耗低、使用寿命长及环境友好等显著优势,已在精密测量、超精密加工和航空航天等关键领域获得广泛应用[1-3]。

当前常用的多孔质气体轴承材料主要包括石墨类和金属类两大体系。石墨材料虽具备自润滑性和耐腐蚀性,但其脆性特征导致拉伸强度与切削性能不足[4];金属材料目前常采用多孔青铜,虽加工性能优异,但在制造过程中易出现孔隙堵塞问题,且后期处理成本较高[1,5]。为突破现有材料的性能瓶颈,开发兼具多孔青铜与多孔石墨优势的新型复合多孔材料,已成为提升气体轴承综合性能的重要研究方向。有研究显示,采用碳材料与金属镍协同增强的青铜基复合材

收稿日期: 2025-01-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(52075369)
通信作者: 乔志军(1970—),男,博士,副教授,主要研究方向为铜基复合材料。E-mail:zjqtjpu@163.com

料展现出显著的技术优势[6-9]。

在增强材料选择方面，石墨烯[10-11]因其卓越的力学性能[12]和自润滑特性[13]成为理想候选材料，而金属镍的掺杂则可有效改善基体的力学与电化学性能。天津大学陈亚坤团队[14]以纳米级 Cu 粉为模板，成功制备了石墨烯/Cu 复合材料，研究表明三维石墨烯与基体之间的界面具有良好的键合性能，在变形过程中石墨烯对位错运动起到了有效的阻碍作用；太原理工大学王剑团队[15]研究了石墨烯含量对石墨烯铜基复合材料微观结构、电学、热学、力学和腐蚀性能的影响；昆明理工大学刘朋团队[16]则通过镍掺杂优化了铜与石墨烯的界面结合，显著提升了复合材料的力学与电学性能。

本研究采用粉末冶金技术，选用青铜为基底，通过添加微量镍并引入两步化学气相沉积法[17]，成功制备出兼具高强度和优异耐腐蚀性的石墨烯/青铜多孔复合材料，以期为高性能气体轴承的研制提供新的材料解决方案。

1　实验部分

1.1　原料与设备

主要原料：预合金青铜粉（Cu 质量分数 85%、Sn6%、Zn6%、Pb3%，粉末金属总纯度 99.9%），中冶鑫盾合金有限公司；镍粉（Ni，纯度 99.9%），北京研邦新材料科技有限公司；乙炔（C_2H_2，纯度 99.9%），天津环宇气体有限公司；无水乙醇（C_2H_5OH，质量分数 99.9%），天津市科密欧化学试剂有限公司；六水合氯化铁（$FeCl_3 \cdot 6H_2O$，质量分数 99.9%），上海易恩化学技术有限公司；浓盐酸（HCl，质量分数 36.8%），天津风帆化学试剂有限公司。

主要设备：CHI660E 型电化学工作站，上海辰华仪器有限公司；ZK-82A 型真空干燥箱，上海一恒科学仪器有限公司；DK7745 型电火花线切割机，泰州海陵区鹏达机械制造厂；KQ-300E 型超声波清洗机，昆山市超声仪器有限公司；Gemini 500 型热场发射扫描电镜，德国卡尔蔡司公司；DXR3 型拉曼光谱分析仪，美国赛默飞世尔公司；AGS-X-50kND 型万能拉伸试验机，日本岛津公司；DF-230BA 型气体质量流量仪、DP-340B 型数字压力表，日本科斯莫公司；HV-1000Z 型显微硬度仪，上海联尔试验设备有限公司；SXKYYC 型冷等静压机，山西金开源实业有限公司；OTF-1200X 型等离子体增强型化学气相沉积炉，合肥科晶材料技术有限公司。

1.2　材料制备

图 1 为石墨烯/镍青铜基多孔复合材料的制备工艺流程。首先将青铜粉（高纯、粒径约 15 μm）和质量分数为 5%的镍粉（高纯、粒径约 48 μm）置于球磨机中，球磨时间为 2 h。然后将球磨后的粉末进行退火处理，消除氧化以及加工硬化后均匀装填在圆柱形模具中，在冷等静压机中以 200 MPa 压力静压 5 min，得到具有一定渗透率的石墨烯/青铜多孔复合材料的前驱体。以 C_2H_2 作为碳源，通过两步化学气相沉积法在前驱体中获得三维石墨烯。在氢化石墨[18]裂解的同时，青铜粉体之间发生黏结形成晶界，从而获得具有一定强度的石墨烯/青铜多孔复合材料。本实验制备了 3 种试样：多孔青铜（PB）、石墨烯/青铜多孔复合材料（GPB）、掺杂镍的石墨烯/青铜多孔复合材料（Ni-GPB）。

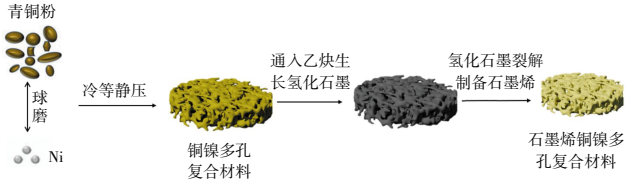


图 1　石墨烯/青铜多孔复合材料制备工艺流程

Fig.1　Fabrication process of graphene/bronze porous composites

1.3　材料表征和性能测试

（1）石墨烯表面形貌观察和生长质量分析：借助 Gemini 500 型热场发射扫描电镜（SEM）观察石墨烯的表面形貌；采用拉曼光谱分析仪确认石墨烯的存在，并分析其生长质量。

（2）力学性能测试：使用 HV-1000Z 型显微硬度计测定试样的维氏硬度值，实验样品的加载载荷设置为 2 N，加载时间定为 10 s，对每个实验样品重复测量 20 次，求取平均值；在 AGS-X-50kND 型万能拉伸试验机上进行拉伸测试，绘制应力应变曲线。

（3）渗透率测试：使用由 DF-230BA 型气体质量流量仪和 DP-340B 型数字压力表构成的渗透率测试装置测量多孔青铜及其复合材料的渗透率参数，测试装置原理如图 2 所示。

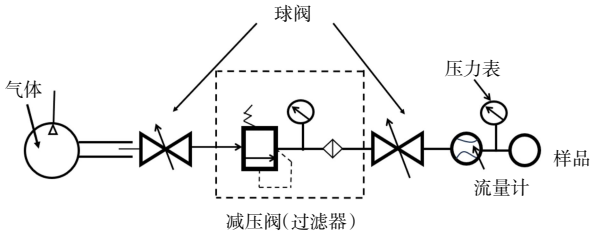


图 2　渗透率测试装置原理

Fig.2　Principle of permeability testing device

（4）耐腐蚀性能测试：采用 CHI660E 型电化学工作站进行电化学实验，结合电化学阻抗谱所得的 Nyquist 图、Bode 模图和 Bode 相图，分析界面阻抗特性与表面防护性能，通过比较腐蚀电位和腐蚀电流的大小评估试样的耐腐蚀能力。采用饱和甘汞电极（saturated calomel electrode，SCE）作为参比电极、铂电极作为辅助电极、多孔青铜及其复合材料作为电化学三电极体系的工作电极[19]。

2　结果与讨论

2.1　多孔青铜复合材料的微观形貌和渗透率分析

将线切割后的复合材料试样浸泡于腐蚀溶液中（$FeCl_3 + HCl + H_2O$），经 24 h 腐蚀掉青铜基体后获得石墨烯，并测试石墨烯的拉曼光谱[8]，如图 3 所示。由图 3 可以看出，在 1 330、1 587 和 2 665 cm^{-1} 处含有明显的特征峰，分别对应于石墨烯的 D 峰、G 峰和 2D 峰，且 $I_D/I_G = 0.72$，$I_{2D}/I_G = 0.50$，表明该石墨烯的缺陷相对较少、结构完整，且为多层石墨烯[20]。

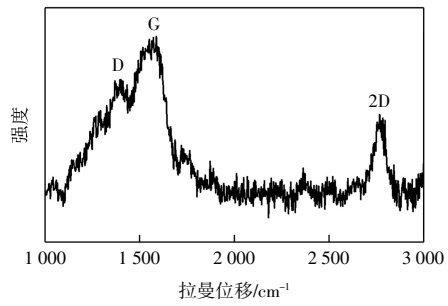
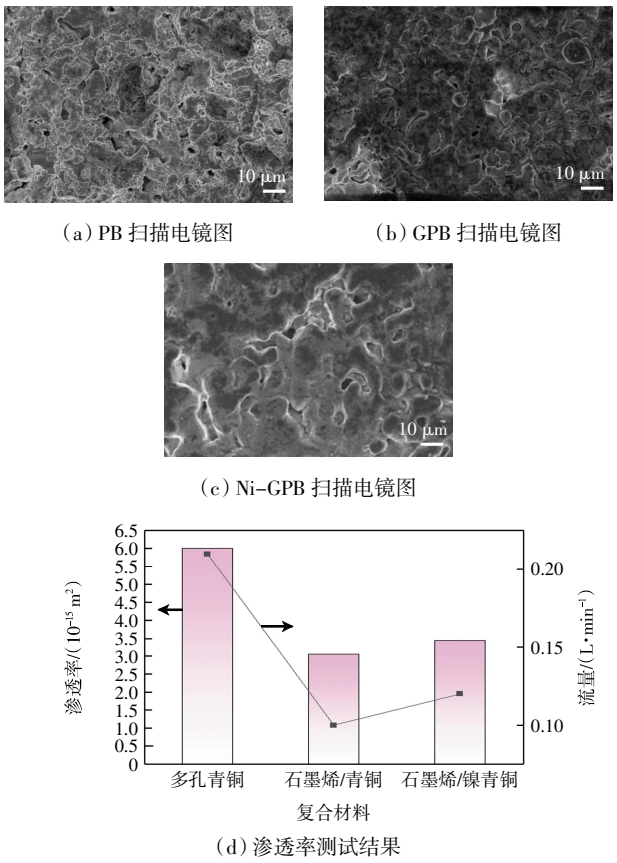


图 3　复合材料腐蚀青铜基底后的拉曼光谱

Fig.3　Raman spectrum of composite material after corrosion of bronze substrate

图 4 为多孔青铜及其复合材料的微观形貌与渗透率结果。图 4(a)显示出典型的烧结末期特征：孔洞分布密集且形态多呈椭圆形，这符合烧结理论中物质迁移趋于平衡、孔隙结构稳定化的阶段特征。在烧结过程中，青铜粉末颗粒间的黏结作用主导了孔隙的形成机制，表面因颗粒间颈部生长不完全而保留了高孔隙率结构。当在多孔青铜基体表面通过化学气相沉积法生长石墨烯后（图 4(b)、图 4(c)），多孔材料表面光滑、青铜基体晶粒大小及孔径更加均匀，表现出显著的微观结构优化。石墨烯均匀包覆在青铜颗粒表面，石墨烯的物理阻隔作用抑制了晶界迁移和颗粒表面原子的扩散路径，阻碍了晶粒长大。图 4(d)为渗透率测试结果，可以看出，在未生长石墨烯时，前驱体在 200 kPa 的压力差下，测得气流量为 0.21 L/min，计算得出渗透率为 $6.002\,5 \times 10^{-15}$ m^2。生长石墨烯后，Ni–GPB 在 200 kPa 压力差下，测得气流量为 0.12 L/min，计算得出渗透率为 3.43×10^{-15} m^2。经多次反复测量 Ni–GPB 复合材料的渗透压趋于稳定，其气体渗透性满足多孔质气体轴承运行稳定的要求[21]。



（a）PB 扫描电镜图　（b）GPB 扫描电镜图

（c）Ni–GPB 扫描电镜图

（d）渗透率测试结果

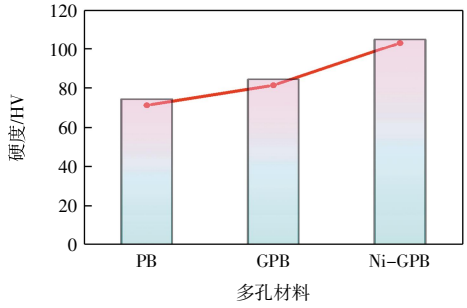
图 4　复合材料微观形貌与渗透结果

Fig.4　Micromorphology and permeability results of composite materials

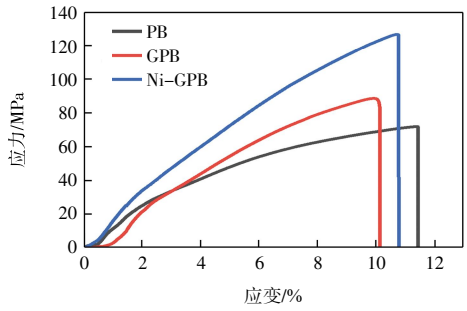
2.2　多孔青铜及其多孔复合材料的力学性能

图 5 为 PB、GPB 和 Ni–GPB 3 种多孔材料的硬度及应力–应变曲线。由图 5(a)可知，PB 的平均维氏硬度为 77.0 HV，GPB 的平均维氏硬度为 81.5 HV，而Ni–GPB 的平均维氏硬度达到了 103.1 HV。相较于 PB 和 GPB，Ni–GPB 的硬度分别提高约 34%和 27%。由图 5(b)可知，PB 和 GPB 的抗拉强度分别为 71.9 MPa、88.5 MPa，而 Ni–GPB 的抗拉强度达到 126.6 MPa。相较于 PB 和 GPB，Ni–GPB 的抗拉强度大幅提高，分别约 76%和 43%。金属镍（Ni）与铜（Cu）在青铜合金体系中形成 Cu–Ni 固溶体，当引入石墨烯作为增强相时，镍元素在界面结合中发挥了关键作用。有研究表明，石墨烯与镍的界面结合能（9.133 meV/nm^2）显著高于与铜的结合能（2.481 meV/nm^2）[22]，这种能量差异源于镍的 3d 轨道电子与石墨烯 sp^2 杂化碳原子间更强的

轨道杂化作用。因此，镍作为“界面桥梁”可有效降低石墨烯/铜复合体系的三相接触角，通过吸附效应改善润湿性，并减少界面缺陷导致的能量势垒。本文采用化学气相沉积（CVD）原位生长技术制备石墨烯，镍元素的存在减少了石墨烯的缺陷，并使石墨烯与青铜基体的界面结合更加紧密。由于镍的固溶强化和高强石墨烯的共同作用，使掺杂镍的多孔复合材料硬度和强度都明显提高。



（a）硬度



（b）应力应变曲线

图 5　PB、GPB、Ni–GPB 的力学性能

Fig.5　Mechanical properties of PB, GPB, and Ni–GPB

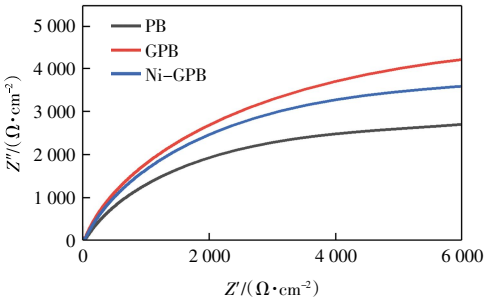
2.3　多孔青铜及其多孔复合材料的耐腐蚀性能

图 6 所示为 PB、GPB 和 Ni–GPB 多孔材料的电化学测试结果。

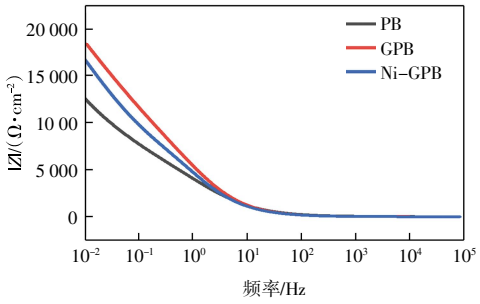
图 6(a)为 PB、GPB 和 Ni–GPB 多孔材料通过电化学测量获得的 Nyquist 图。高频区圆弧半径与电解液/电极的电荷转移速率有关[19]。由图 6(a)可知，高频区 GPB 和 Ni–GPB 的阻抗弧半径大于 PB。

图 6(b)为 Bode 模图，其 X 轴的低频率区域代表电荷转移电阻 Rp 值，而高频率区域代表溶液电阻 Rs 值。电化学测量时所配电解液都是相同的且温度恒定。由图 6(b)中 Rs 值和 Rp 值可知，Ni–GPB 的阻抗值高于 PB 的阻抗值。高阻抗表明电极表面电化学反应具有较高的电阻。电极表面受腐蚀情况越浅，材料的耐腐蚀性越大，材料在低频率下的钝化效果越好[23]。

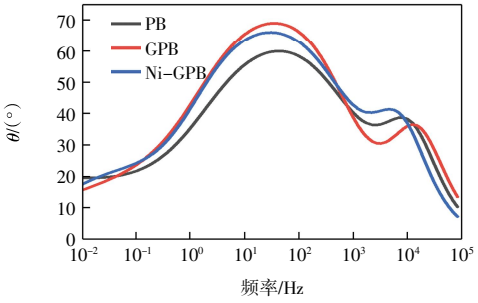
图 6(c)为 Bode 相位角图，结合图 6(a)中阻抗弧可知：在低频区 Ni–GPB 的阻抗值最大，耐腐蚀性能最



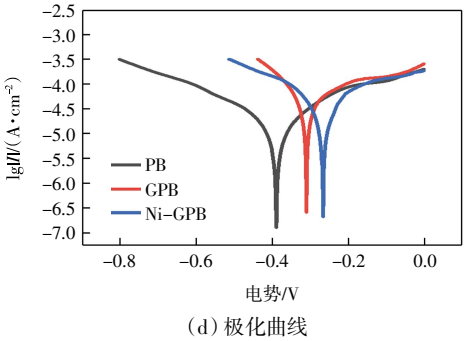
（a）Nyquist 图



（b）Bode 模图



（c）Bode 相图



（d）极化曲线

图 6　PB、GPB、Ni–GPB 电化学测试结果

Fig.6　Electrochemical test results of PB, GPB, and Ni–GPB

好；在中高频区 3 条曲线接近重合，说明电阻行为相似。电化学时间常数和特征频率成反比，3 条曲线的转折频率在 1~10 Hz 之间，表明时间常数处于同一数量级，近似相同。

由图 6(d)极化曲线可知，与 PB 相比，复合材料的极化曲线整体向正方向移动。通过外推法可得到腐蚀电位和腐蚀电流，通过比较腐蚀电位和腐蚀电流的大小是评估材料耐腐蚀能力的重要依据[24–25]。其中 PB 的

腐蚀电位为–0.389 V,GPB 的腐蚀电位为–0.310 V,而 Ni–GPB 复合材料的腐蚀电位为–0.266 V。Ni–GPB 的腐蚀电位最大，耐腐蚀性能最好。这可能是由于在 GPB 和 Ni–GPB 中,石墨烯片层堆叠,形成致密的隔绝层,使小分子腐蚀介质难以通过,起到物理隔绝作用,有效减少与水接触的表面积，减小了电子波散射,进而起到有效的强化作用。镍的加入促进合金表面形成致密的氧化膜,尤其在含氯离子的环境中(如海水),显著提高抗点蚀和应力腐蚀能力。

3 结　论

本文采用粉末冶金和两步化学气相沉积法在多孔青铜前驱体上原位生长石墨烯,制备出具有优异性能的石墨烯/青铜多孔复合材料。研究结果如下。

(1) 相较于多孔青铜，本文制备的掺杂镍的石墨烯/青铜多孔复合材料其显微硬度和抗压强度分别提升了 34%和 70%,这得益于镍元素的固溶强化效应以及石墨烯与基体间的界面协同增强作用。

(2) 掺杂镍的石墨烯/青铜多孔复合材料的 Nyquist 图呈现更大的容抗弧半径,极化曲线显示自腐蚀电位正向偏移,证实其耐腐蚀性能显著提升。

参考文献:

[1] 田富竟, 尹自强, 王建敏, 等. 多孔质节流空气静压轴承静态性能实验研究[J]. 航空精密制造技术, 2011, 47(5): 5–8.
Tian Fujing, Yin Ziqiang, Wang Jianmin, et al. Experimental research and analysis of aerostatic bearing[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2011, 47(5): 5–8(in Chinese).

[2] 杜金名, 卢泽生, 孙雅洲. 空气静压轴承各种节流形式的比较[J]. 航空精密制造技术, 2003, 39(6): 4–7, 17.
Du Jinming, Lu Zesheng, Sun Yazhou. Comparison of all types of restriction for aerostatic bearings[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2003, 39(6): 4–7, 17(in Chinese).

[3] 董耀远, 乔志军, 张亮宇, 等. 用于多孔质气体轴承的石墨烯/青铜复合材料的原位制备[J]. 材料导报, 2023, 37(S2): 135–138.
Dong Yaoyuan, Qiao Zhijun, Zhang Liangyu, et al. Fabrication of graphene/bronze composites by in situ CVD for porous air bearing[J]. Materials Reports, 2023, 37(S2): 135–138(in Chinese).

[4] 吴定柱. 多孔质气体静压止推轴承关键技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010.
Wu Dingzhu. Research on key technology of porous gas hydrostatic thrust bearing[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010(in Chinese).

[5] 顾延东, Bhle Martin, Schimpf Artur, 等. 多孔质气体静压轴承研究现状及发展趋势[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(8): 818–825.
Gu Yandong, Bhle Martin, Schimpf Artur, et al. Aerostatic bearing with porous restrictor: Research status and future perspectives[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(8): 818–825(in Chinese).

[6] Qiao Z J, Zhou T, Kang J L, et al. Three–dimensional interpenetrating network graphene/copper composites with simultaneously enhanced strength, ductility and conductivity[J]. Materials Letters, 2018, 224: 37–41.

[7] 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.
Zhao Naiqin, Guo Siyuan, Zhang Xiang, et al. Progress on graphene/copper composites focusing on reinforcement configuration design: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(9): 1087–1106(in Chinese).

[8] 管振宏, 于镇洋, 乔志军, 等. 化学气相沉积法制备原位生长三维石墨烯/铜基复合材料[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(4): 575–579.
Guan Zhenhong, Yu Zhenyang, Qiao Zhijun, et al. Preparation of in situ growth three–dimensional Cu@Graphene composite by chemical vapor deposition[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(4): 575–579(in Chinese).

[9] 吕玉廷, 王立强, 毛建伟, 等. 镍铝青铜合金(NAB)的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(3): 815–820.
Lü Yuting, Wang Liqiang, Mao Jianwei, et al. Recent advances of nickel–aluminum bronze (NAB)[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(3): 815–820(in Chinese)

[10] Geim A K. Graphene: Status and prospects[J]. Science, 2009, 324(5934): 1530–1534.

[11] 屠海令, 赵鸿滨, 魏峰, 等. 二维原子晶体材料及其范德华异质结构研究进展[J]. 稀有金属, 2017, 41(5): 449–465.
Tu Hailing, Zhao Hongbin, Wei Feng, et al. Research progress in two–dimensional atomic crystal materials and van der Waals heterostructures[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(5): 449–465(in Chinese).

[12] Liu Y L, Xie B, Zhang Z, et al. Mechanical properties of graphene papers[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2012, 60(4): 591–605.

[13] Sree Manu K M, Ajay Raag L, Rajan T P D, et al. Self–lubricating bidirectional carbon fiber reinforced smart aluminum

composites by squeeze infiltration process[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(11): 2559–2569.

[14] 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 Alloys and Compounds, 2016, 688: 69–76.

[15] 王剑, 郭丽娜, 林万明, 等. 石墨烯含量对铜基复合材料的导电、导热、耐腐蚀和力学性能的影响[J]. 新型炭材料, 2019, 34(2): 161–169.
Wang Jian, Guo Lina, Lin Wanming, et al. The effects of graphene content on the corrosion resistance, and electrical, thermal and mechanical properties of graphene/copper composites[J]. New Carbon Materials, 2019, 34(2): 161–169(in Chinese).

[16] 刘朋, 朱恩福, 闫翠霞, 等. 镍含量对铜基石墨烯复合材料力电性能的影响[J]. 稀有金属, 2018, 42(7): 735–742.
Liu Peng, Zhu Enfu, Yan Cuixia, et al. Strength and electrical properties of graphene reinforced copper matrix composites with different nickel contents[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2018, 42(7): 735–742(in Chinese).

[17] 徐祥, 宋玲玲, 官雨柔, 等. 石墨烯增强金属基复合材料制备方法的研究进展[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(5): 143–149.
Xu Xiang, Song Lingling, Guan Yurou, et al. Research progress in preparation of graphene reinforced metal matrix composites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(5): 143–149(in Chinese).

[18] Li Haipeng, Fan Jiawei, Kang Jianjian, et al. In situ homogeneous synthesis of carbon nanotubes on aluminum matrix and properties of its composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014,24(7):2331–2336.

[19] 李佳慧. 新型自润滑轴承材料的摩擦磨损性能与耐腐蚀性能研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
Li Jiahui. Study on friction and wear properties and corrosion resistance of new self–lubricating bearing materials[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023(in Chinese).

[20] 肖俏, 易晓鸥, 姜波, 等. 石墨烯–铜基复合材料的原位合成制备、组织及性能研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(6): 121–124, 130.
Xiao Qiao, Yi Xiaoou, Jiang Bo, et al. Preparation, microstructure and properties of in situ synthesized graphene–copper composite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(6): 121–124, 130(in Chinese).

[21] 张晓峰, 路阳, 侯玮杰, 等. 微低重力试验多孔青铜气浮转台研制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(1): 82–88.
Zhang Xiaofeng, Lu Yang, Hou Weijie, et al. Development of aerostatic rotary table for micro–gravity test based on porous bronze[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(1): 82–88(in Chinese).

[22] Xu Z P, Buehler M J. Interface structure and mechanics between graphene and metal substrates: A first–principles study[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2010, 22(48): 485301.

[23] 杨欢, 乔志军, 张志佳, 等. 自支撑三维多孔 Cu@SnO_2 膜电极的制备及储锂性能[J]. 材料工程, 2020, 48(12): 53–59.
Yang Huan, Qiao Zhijun, Zhang Zhijia, et al. Preparation and lithium storage properties of free–standing and three–dimensional porous Cu@SnO_2 membrane electrode[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(12): 53–59(in Chinese).

[24] 王兴. 纳米碳增强 B_4C/Al 层状复合材料力学性能与腐蚀性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
Wang Xing. Study on mechanical properties and corrosion properties of nano–carbon reinforced B_4C/Al layered composites[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023(in Chinese).

[25] Prasai D, Tuberquia J C, Harl R R, et al. Graphene: Corrosion–inhibiting coating[J]. ACS Nano, 2012, 6(2): 1102–1108.

本文引文格式：

乔志军, 张亮宇. 多孔质气体轴承用石墨烯/青铜复合材料的制备及其性能[J]. 天津工业大学学报, 2026, 45(4): 20–25.

Qiao Zhijun, Zhang Liangyu. Preparation and performance of graphene/bronze composite materials for porous gas bearings[J]. Journal of Tiangong University, 2026, 45(4): 20–25(in Chinese).

（责任编辑：程晓英）