

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2023.01.005

# C/hBN 润滑组元对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响

吴 深, 刘洪坤, 管英杰, 司屈钊, 樊江磊, 刘建秀  
(郑州轻工业大学 机电工程学院, 郑州 450002)

**摘 要:**为改善高温下材料摩擦性能的稳定性和提高润滑组元与铜基体的界面结合效果,采用粉末冶金工艺制备了 C/hBN 作为润滑组元的铜基粉末冶金摩擦材料,研究了 C/hBN 含量和化学镀铜表面改性对摩擦材料显微结构、力学性能和摩擦磨损性能的影响。结果表明:适量添加 hBN 作为润滑组元能提高材料的摩擦系数和热稳定性,当 C/hBN 质量分数比为 6:3 时,材料具有较高的摩擦系数,在 350 km/h 制动速度下其摩擦系数高达 0.472,且磨损量相对较低,具有相对较好的综合性能;C/hBN 表面镀铜后,摩擦材料的致密度提高,硬度略微下降,整体摩擦系数更加稳定,与未镀铜相比其磨损量降低了 28%。C/hBN 颗粒表面镀铜改善了 C/hBN-Cu 的界面结合,制动时摩擦表面的剥落坑数量明显减少。石墨和 hBN 润滑组元的综合运用及表面镀铜处理可有效提高铜基摩擦材料的摩擦磨损性能,有利于制动闸片轻量化设计,为 C/hBN 在铜基摩擦材料中的应用提供工艺理论依据。

**关键词:**铜基摩擦材料;粉末冶金;润滑组元;表面改性

**中图分类号:**TF125.9;U463.5

**文献标志码:**A

**文章编号:**2095-1744(2023)01-0038-10

## Influence of C/hBN Lubricating Components on Properties of Copper-based Powder Metallurgy Friction Materials

WU Shen, LIU Hongkun, GUAN Yingjie, SI Qufan, FAN Jianglei, LIU Jianxiu

(Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to improve the stability of the friction performance of the material at high temperature and increase the interfacial bonding effect of the lubricating component and the copper matrix, the powder metallurgy process was used to prepare the copper-based powder metallurgy friction material with C/hBN as the lubricating component. In this paper, the effects of C/hBN content and surface modification of electroless copper plating on the microstructure, mechanical properties and friction and wear properties of friction materials were investigated. The results show that proper addition of hBN as lubricating component can improve the friction coefficient and thermal stability of the material. When the mass ratio of C/hBN is 6:3, the friction coefficient of the material is as high as 0.472 at the braking speed of 350 km/h, the wear amount is relatively low, and the material shows relatively optimal comprehensive properties. After copper plating on the surface of C/hBN, the density of friction material increases, the hardness decreases slightly, the overall friction coefficient is more stable, and the wear amount decreases by 28% compared with that without copper plating. Copper plating on the surface of C/hBN particles improves the interface bonding of C/hBN-Cu, and the number of peeling pits on the friction surface decreases obviously during braking. The comprehensive application of graphite and hBN lubricating components and surface copper plating treatment can effectively improve the friction and wear performance of copper-based friction materials, which is conducive to the lightweight design of brake pads and provides a theoretical basis for the application of C/hBN in copper-based friction materials.

**Key words:** copper-based friction materials; powder metallurgy; lubricating component; surface modification

收稿日期:2022-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1904175);河南省科技攻关计划项目(222102230056)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(U1904175); Key Science and Technology Research Project of the Henan Province(222102230056)

作者简介:吴 深(1987—),男,博士,副教授,主要从事复合材料的研究。

引用格式:吴深,刘洪坤,管英杰,等. C/hBN 润滑组元对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响[J]. 有色金属工程,2023,13(1):38-47.

WU Shen, LIU Hongkun, GUAN Yingjie, et al. Influence of C/hBN Lubricating Components on Properties of Copper-based Powder Metallurgy Friction Materials[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(1): 38-47.

铜基粉末冶金摩擦材料是利用粉末冶金技术制备的摩擦材料,以铜为基体,添加基体强化组元、润滑组元和摩擦组元烧结而成<sup>[1-3]</sup>。铜基粉末冶金摩擦材料具有良好的摩擦性能、耐磨性和导热性,在干燥、低温等恶劣环境下仍能保持良好的摩擦系数和稳定性,被广泛应用于高速列车制动领域<sup>[4-5]</sup>。随着列车速度的逐渐提升,对制动刹车材料的要求也随之提高。制造出摩擦性能稳定、具有较高的耐磨性能的铜基粉末冶金摩擦材料是推动列车快速发展的迫切需求。

润滑组元作为固体润滑剂在铜基摩擦材料中使用,在制动过程中,润滑组元能切削转移对偶面上的堆积物,提高材料的稳定性和耐磨性能。因此,润滑组元的合理选择对提高摩擦材料的摩擦性能至关重要,常用的润滑组元有石墨、MoS<sub>2</sub>和 hBN 等<sup>[6-7]</sup>。ZHANG 等<sup>[8]</sup>发现适量的 MoS<sub>2</sub>能提高材料的摩擦系数和耐磨性能,胡铮等<sup>[9]</sup>发现提高石墨含量可改善铜基摩擦材料的摩擦学性能,降低材料的磨损量。ZHANG 等<sup>[10]</sup>发现粒状石墨和鳞片石墨均为 5% 时,铜基摩擦材料的摩擦系数最高且稳定,磨损率较低。常用的润滑组元与铜基体的润湿效果不好,导致二者的结合性较差,影响材料的摩擦性能。研究发现表面改性可以有效地改善润滑组元与基体的润湿性,常用的表面改性技术有化学镀、电镀和酚醛树脂改性等<sup>[11]</sup>。张鑫等<sup>[12]</sup>使用化学镀对石墨进行镀铜,发现石墨表面经铜包覆处理后,石墨与铜基体间的界面结合得到明显改善。刘滩等<sup>[13]</sup>对石墨进行酚醛树脂改性,发现树脂的包覆减少了石墨的变形和破裂,从而提高了材料的摩擦性能。

作为常用润滑组元,石墨能稳定材料的摩擦系数,研究发现石墨在 600 ℃ 会轻微氧化,800 ℃ 会完全氧化,而在制动时制动盘摩擦表面瞬态温度可能会达到石墨氧化温度<sup>[14-15]</sup>。hBN 和石墨具有类似的片层结构,当 hBN 受到剪切力作用后,层与层之间易发生滑移现象,生成 hBN 润滑层降低磨损率,而且 hBN 还具备优良的耐高温和耐腐蚀性,具有比石墨与 MoS<sub>2</sub> 更高的热稳定性,即使温度升高到

900 ℃ 依然可以保持优异润滑性,这使得 hBN 成为高温摩擦片中的一种重要润滑添加剂<sup>[16]</sup>。但是,hBN 颗粒具有明显的小块分布特点,其稳定性低于连续性的大块石墨润滑层,较易在摩擦时被破坏掉并发生脱落,使基体发生磨损,引起磨损率的显著增大<sup>[17]</sup>。CHEN 等<sup>[18]</sup>发现 hBN 替代石墨能提高材料中润滑组元的耐氧化性,降低对偶材料的磨损。陈百明等<sup>[19]</sup>制备了不同质量分数 BN 和 MoS<sub>2</sub> 的镍基材料,发现 MoS<sub>2</sub> 与基体之间结合良好,含有 10% MoS<sub>2</sub> 的镍基材料具有平稳的摩擦系数和最低的磨损率;而 BN 与基体之间结合松散,含有 10% BN 的镍基材料在较高载荷和滑动速率下具有相对较高的磨损率。目前关于 hBN 增强金属基摩擦材料的研究主要集中在 hBN 的热稳定性方面,而对 C/hBN 润滑组元的混合使用和表面改性的研究相对较少。

本文通过粉末冶金技术制备了 C/hBN 作为润滑组元的铜基摩擦材料,重点研究了 C/hBN 的添加量和化学镀铜对铜基粉末冶金摩擦材料微观结构、力学性能和摩擦磨损性能的影响规律,为摩擦材料的发展提供参考。

## 1 实验

分别采用不同质量分数的天然鳞片石墨(C, 187 μm)、六方氮化硼(hBN, 75 μm)和镀铜处理后的 C/hBN 作为铜基粉末冶金摩擦材料的润滑组元,其他原料包括:Cu 粉(75 μm, 电解铜粉,纯度>99%),Fe 粉(75 μm, 还原铁粉,纯度>99%),Sn 粉(75 μm, 高纯锡粉;纯度>99.5%),Cr-Fe 粉(150 μm, 高碳铬铁粉)。C/hBN 镀前预处理:先粗化粉末表面,再进行敏化活化,过滤烘干后施镀。采用乙醛镀液对 C/hBN 进行表面镀铜,镀液 pH=13,施镀温度 40 ℃,施镀时间 40 min。制备出四种 C/hBN 不同质量分数和 C/hBN 镀铜的试样,其配比如表 1 所示。采用 V 型混料机混料,混料时间为 4 h。然后冷压成型,施加轴向压力,施加压力为 400 MPa,保压时间为 40 s;最后将压坯在真空烧结炉中烧结,烧结温度为

表 1 试样成分

Table 1 Sample composition

/%

| Samples No. | Chemical composition |    |    |       |   |     |        |
|-------------|----------------------|----|----|-------|---|-----|--------|
|             | Cu                   | Fe | Sn | Cr-Fe | C | hBN | Others |
| A1          | 58                   | 12 | 6  | 10    | 9 | 0   | 5      |
| A2          | 58                   | 12 | 6  | 10    | 6 | 3   | 5      |
| A3          | 58                   | 12 | 6  | 10    | 3 | 6   | 5      |
| A4          | 58                   | 12 | 6  | 10    | 0 | 9   | 5      |
| A5          | 58                   | 12 | 6  | 10    | 6 | 3   | 5      |

Note: The lubricating component of A5 sample is copper plated C/hBN.

950 ℃,保温 2 h,保护气氛为氩气。

利用阿基米德排水法测定材料密度,在材料表面涂抹凡士林排除外来因素对数据的干扰;采用 Phenom XL 型扫描电子显微镜(SEM)观察试样的微观组织并进行 EDS 能谱分析;按照国标 GB/T231.1—2009,利用 320HBS-3000 型布氏硬度计测定试样的硬度,载荷为 500 N,每个试样测试 5 次求平均值;用 DK7720 型电火花数控线切割机床切割所需要的试样,其中摩擦试样的尺寸为 10 mm×20 mm 的长方形样块;采用 MM3000 型摩擦磨损试验机测试试样的摩擦性能,对偶盘材料为 30CrSiMoVA,具体实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

| Experimental parameters                     | Numerical value |
|---------------------------------------------|-----------------|
| Initial braking speed/(km·h <sup>-1</sup> ) | 150~350         |
| Sample friction area/mm <sup>2</sup>        | 600             |
| Brake pressure/MPa                          | 0.8             |
| Braking times at all levels of speed        | 10              |

## 2 结果与分析

### 2.1 C/hBN 质量比对摩擦材料性能的影响

#### 2.1.1 微观组织分析

图 1 为 A1~A4 四种试样的微观组织形貌和

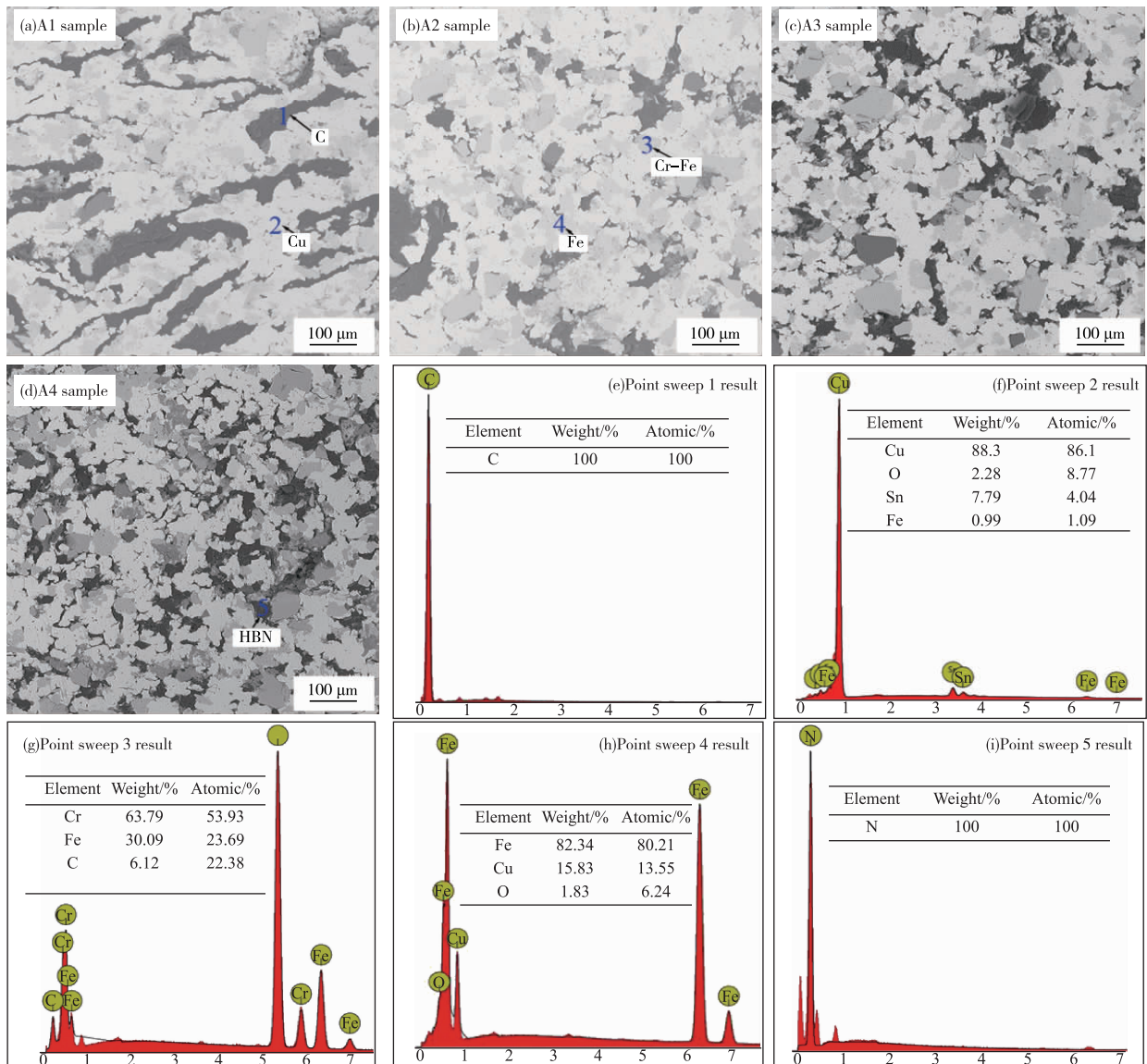


图 1 四种试样的微观组织形貌和 EDS 能谱分析: (a) A1 试样; (b) A2 试样; (c) A3 试样; (d) A4 试样; (e) 点扫 1 结果; (f) 点扫 2 结果; (g) 点扫 3 结果; (h) 点扫 4 结果; (i) 点扫 5 结果

Fig. 1 Microstructure morphology images and EDS analysis of the four samples: (a) A1 sample; (b) A2 sample; (c) A3 sample; (d) A4 sample; (e) Point sweep 1 result; (f) Point sweep 2 result; (g) Point sweep 3 result; (h) Point sweep 4 result; (i) Point sweep 5 result

EDS 能谱分析。图 1(a)~(d)是 A1~A4 四种试样的微观组织形貌,图 1(e)~(i)为 5 个点扫描的 EDS 分析结果。通过试样的 EDS 能谱分析结果,可以确定大面积白色为基体 Cu,光滑浅灰色为 Cr-Fe,表面存在颗粒且不光滑的浅灰色是 Fe 及其氧化物,大面积黑色为天然鳞片石墨,小面积黑色多为 hBN。从图 1(a)中可以看出,天然鳞片石墨分布均匀,但天然鳞片石墨的粒径较大,易割裂铜基体的连续性;从图 1(b)~(d)可以看出,hBN 呈现均匀分布,但随着 hBN 含量的升高,hBN 小部分出现团聚现象。

### 2.1.2 硬度和密度分析

摩擦材料的硬度越高,越容易在摩擦过程中使对偶盘产生磨损,发出噪音,所以应将材料的硬度调节到符合标准的范围<sup>[20]</sup>。图 2 为 A1~A4 四种试样硬度的变化情况。从图 2 中可以看出,随着 hBN 含量的增加,摩擦材料的硬度先升高后降低,可能是因为 C 的粒度较大,不容易与基体结合,而 hBN 的粒度偏小,容易与基体结合,少量的 hBN 能提高材料的硬度,但是 hBN 过多容易团聚,硬度反而下降。C/hBN 质量分数为 6:3 的试样硬度为 25.34 HB,在 4 种材料中硬度最高,A4 试样与 A2 试样相比,硬度降低了 13%。

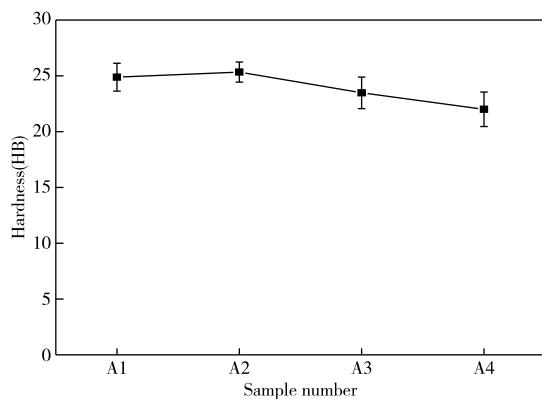


图 2 四种试样的硬度

Fig. 2 Hardness of the four samples

图 3 为 A1~A4 四种试样密度的对比变化情况。从图 3 中可以看出,随着 hBN 含量的增加,摩擦材料的密度呈现下降的趋势,降低了 3%。可能是因为 hBN 含量的增加导致出现团聚现象,不能和基体很好的结合,使材料的孔隙增多,从而降低了材料的密度。

### 2.1.3 摩擦磨损性能分析

图 4 为 A1~A4 四种试样在不同制动初速度时的摩擦系数随制动初速度的变化趋势。由图 4 可见,A1、A2 和 A3 试样的摩擦系数随着制动初速度的提高先升高后降低。在低制动初速度下,A2、A3

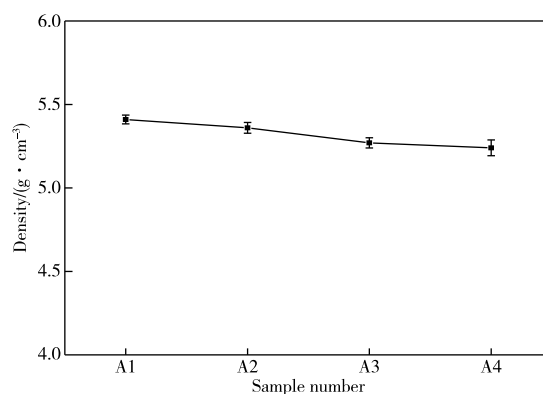


图 3 四种试样的密度

Fig. 3 Densities of the four samples

和 A4 试样摩擦系数均高于 A1 的摩擦系数,表明添加了 hBN 的摩擦材料有更高的摩擦系数;在高制动初速度下,制动速度 350 km/h 相比于 300 km/h, A1、A2、A3 的摩擦系数分别下降了 2.4%、10.8%、18.2%,随着 hBN 含量的升高,摩擦材料的摩擦系数降低幅度越大,这可能是由于在时速 350 km/h 时,材料的摩擦表面瞬时温度较高,摩擦表面石墨会发生轻微氧化,而 hBN 始终保持稳定,使摩擦材料在高温下也有优异的润滑性能<sup>[21]</sup>。综上所述,可以确定 C 在低速下比 hBN 有更好的润滑性,而高速下 hBN 比 C 有更好的热稳定性和润滑性。A4 试样的摩擦系数随着制动速度的提高呈现直线下降的趋势,原因可能是过多的 hBN 易发生团聚,与基体的结合较差,使得硬质颗粒易从结合处发生脱落,降低了硬质颗粒对对偶盘的摩擦作用,摩擦力减小,从而导致摩擦系数直线下降。

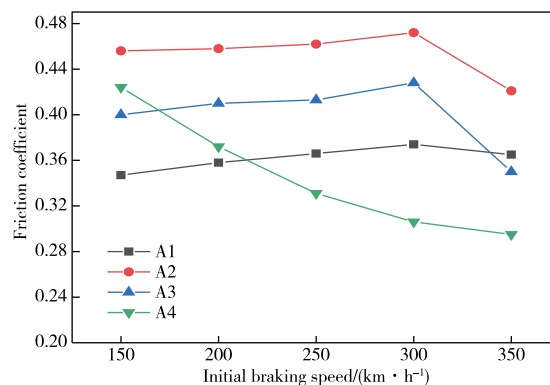


图 4 四种试样的摩擦系数随制动初速度的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of friction coefficient of four samples with initial braking speed

图 5 为 A1~A4 四种试样的磨损量随制动初速度变化的曲线图。由图 5 可知,试样的磨损量均随着制动初速度的升高而增加。这是由于速度的提高,试样表面的温度升高,导致试样抵抗磨损的能力

下降,颗粒易从表面脱落,从而磨损量增加。在低制动初速度下,A1、A2和A3的磨损量基本不变,高制动初速度下,A2和A3试样的磨损量相对较高。A4试样随着制动初速度的提高磨损量迅速增加,在高速制动状态下的磨损量远远大于其他试样。随着hBN含量的增加,材料的磨损量随之增加,当hBN的含量为9%,试样的磨损量最高。这可能是由于hBN的导热性低于C,在制动时试样的温升迅速且上限变高,导致材料发生剧烈的塑性变形,而且过多的hBN易发生团聚,与基体结合不够紧密,制动过程中易从hBN-Cu结合处开始脱落,所以材料的磨损量过大。综合来看,C/hBN质量分数为6:3时,摩擦系数整体较高,磨损量相对较低,具有较好的综合性能。

图6为A1~A4四种试样摩擦后的微观形貌。从图6中可以看出,A1试样的摩擦表面较为平整,存在小部分的裂缝和剥落坑,表面磨损主要以磨粒磨损为主。A2试样的摩擦表面出现了犁沟和颗粒脱落形成剥落坑,脱落的颗粒被反复碾压到摩擦面上,形成新的润滑膜,但剥落坑处有裂缝往外延伸,

破坏了润滑膜的完整性,加大了试样的磨损。A3和A4试样出现大面积的剥落坑,虽然有大量磨屑被碾压在试样表面,但剥落坑过大无法填充,剥落坑的存在使试样的磨损进一步加大。从图中试样摩擦表面的剥落坑可以看出,脱落表面存在大量的C和hBN,这说明C/hBN与铜基体界面强度不高,颗粒

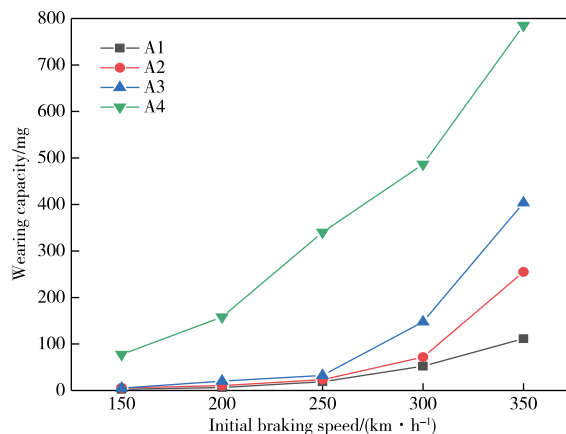


图5 四种试样的磨损量随制动初速度的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of wear amount of four samples with initial braking speed

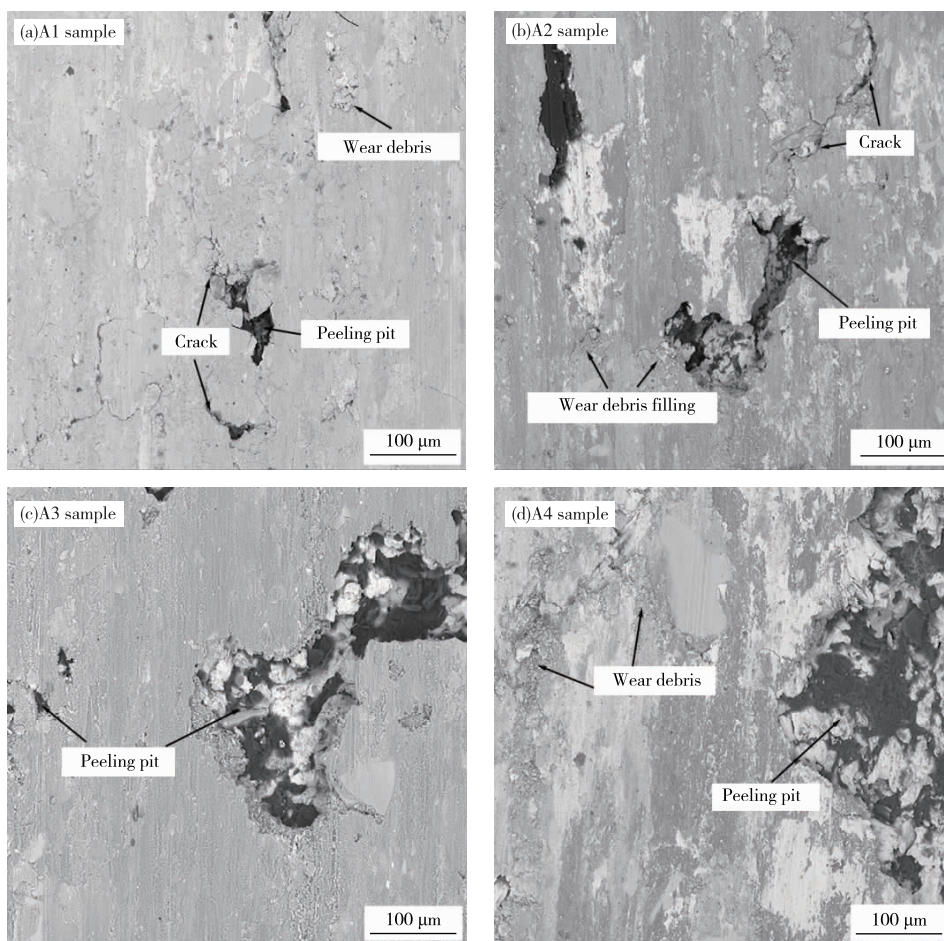


图6 四种试样的摩擦磨损表面形貌

Fig. 6 Friction and wear surface morphologies images of the four samples

易从结合处脱落。

## 2.2 表面镀铜 C/hBN 对摩擦材料性能的影响

关于界面结合问题,研究发现石墨表面改性后在烧结过程中能与铜基体在界面处生成化合物,界面处孔隙明显减少,界面连续性得到增强<sup>[22]</sup>。由于 C/hBN 和基体的界面结合较差,结合处存在明显的

孔隙,而且摩擦表面的剥落坑大多是处于 C/hBN 与基体的结合处。为改善 C/hBN 与铜基体的界面结合效果,利用化学镀对 C/hBN 进行表面镀铜,制备了镀铜 C/hBN 铜基粉末冶金摩擦材料。

### 2.2.1 微观组织分析

图 7 为 C/hBN 镀铜前后的 SEM 形貌和镀铜

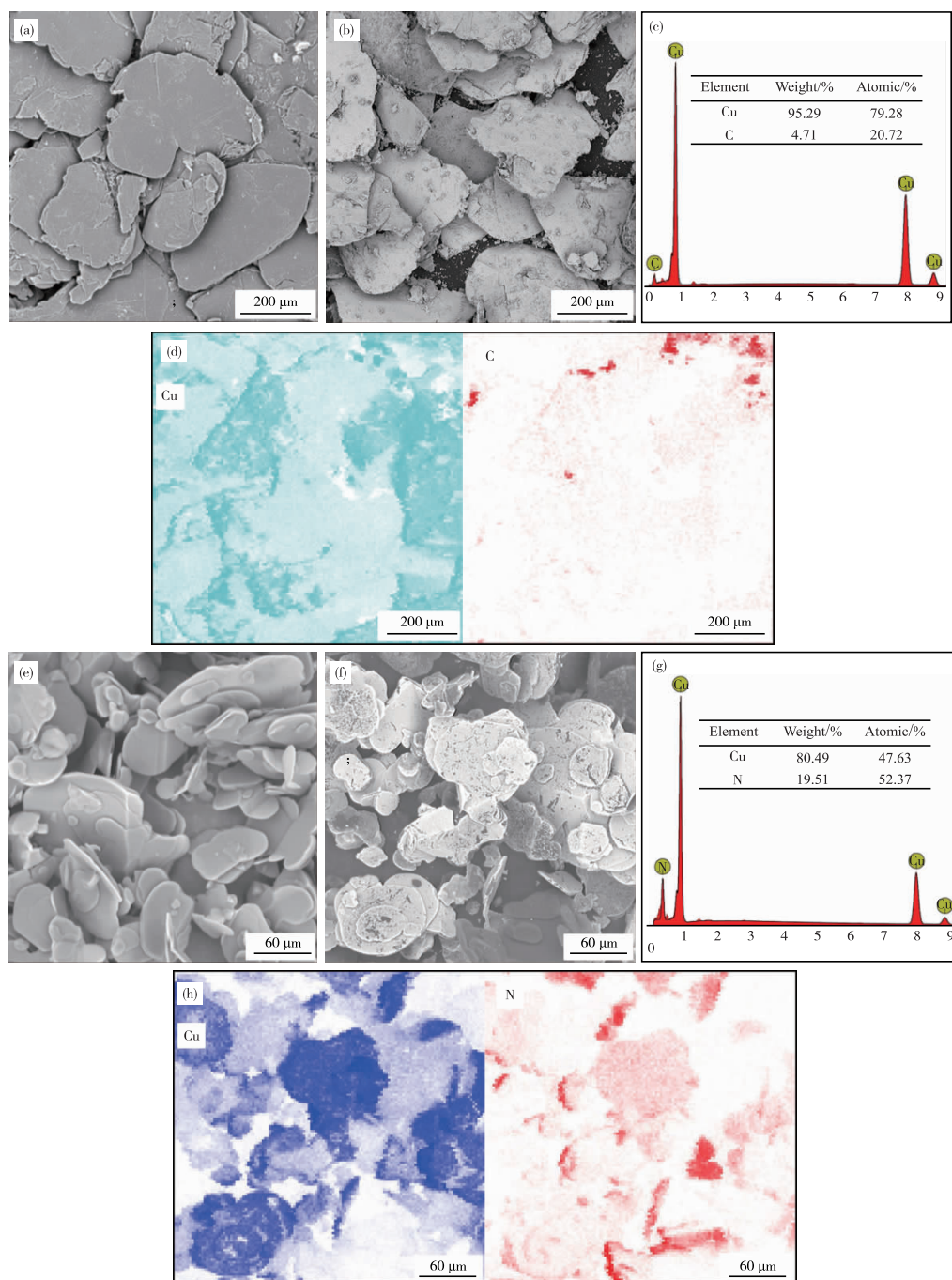


图 7 C/hBN 镀铜前后的 SEM 图像和 EDS 能谱分析:(a)原始 C;(b)镀铜 C;(c)镀铜 C 面扫元素百分比;

(d)镀铜 C 面扫元素图;(e)原始 hBN;(f)镀铜 hBN;(g)镀铜 hBN 面扫元素百分比;(h)镀铜 hBN 面扫元素图

Fig. 7 SEM images and EDS analysis before and after C/hBN copper plating: (a)Original C; (b)Copper plating C; (c)Copper plating C surface swept element percentage; (d)Copper plating C surface swept element figure; (e)Original hBN; (f)Copper-plated hBN; (g)Copper plating hBN surface swept element percentage; (h)Copper plating hBN surface swept element figure

C/hBN 的 EDS 能谱分析。图 7(a)~(d) 是 C 镀铜前后的 SEM 形貌和 EDS 能谱分析,可以看出原始 C 粉末呈现鳞片状,表面较光滑,粒径为  $187\ \mu\text{m}$  左右,从 EDS 结果可以看出镀铜 C 被铜单质均匀包裹,镀层均匀,表面稍显粗糙,而边角较难镀铜,所以少部分有 C 裸露。图 7(e)~(h) 是 hBN 镀铜前后的 SEM 图像和 EDS 能谱分析,可以看出原始 hBN 粉末也呈现鳞

片状,粒径为  $75\ \mu\text{m}$  左右,从 EDS 结果可以看出镀铜 hBN 表面存在铜,但镀层不够均匀,hBN 局部裸露。

图 8 为 C/hBN 未镀铜和镀铜试样的 SEM 图像。从图 8 可以看出,未镀铜试样 C/hBN 和基体的界面结合处有明显的孔隙,而镀铜试样 C/hBN 和基体结合紧密,界面结合处没有出现孔隙,说明镀铜改善了 C/hBN 和铜基体的结合效果。

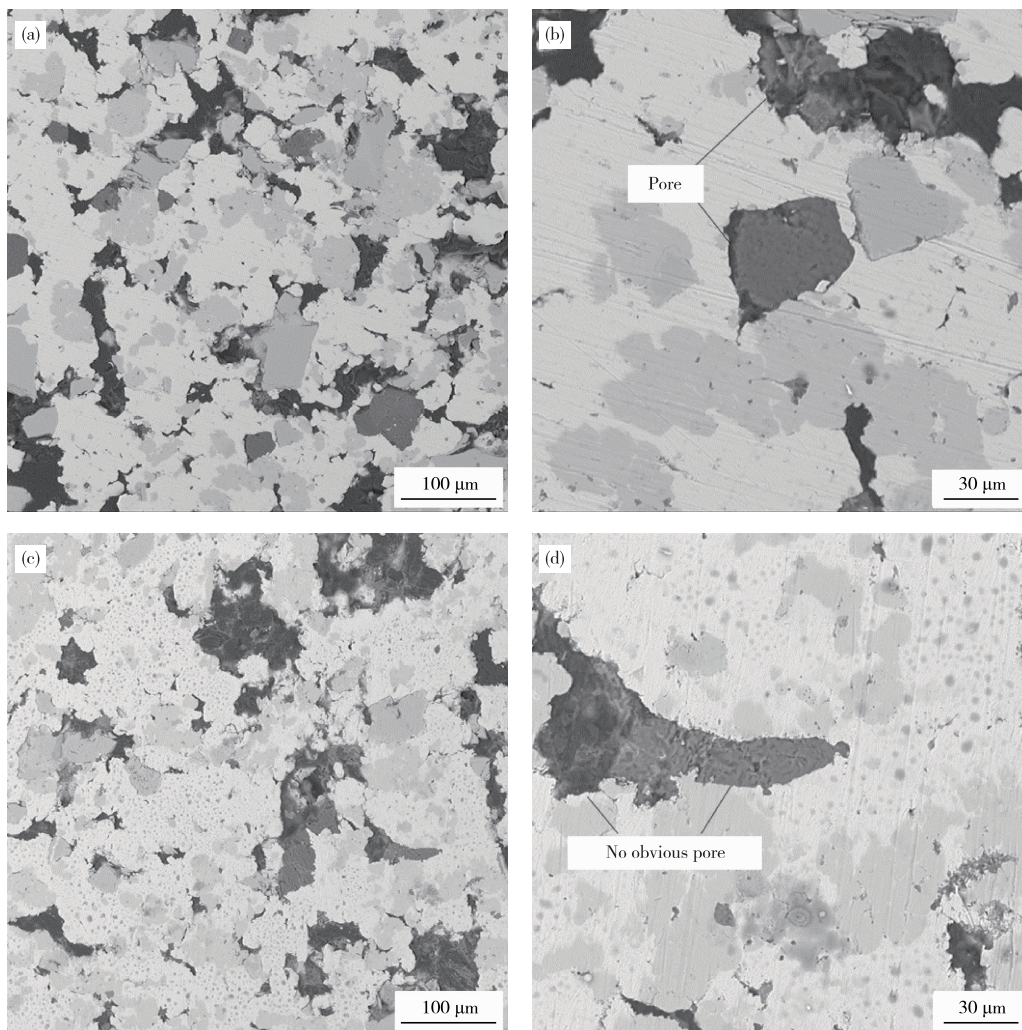


图 8 C/hBN 未镀铜和镀铜试样的 SEM 形貌:(a)未镀铜试样;(b)图 a 局部放大;(c)镀铜试样(d)图 c 局部放大

Fig. 8 SEM images of C/hBN uncoated and Cu-coated samples:(a)Uncopper-plated sample;(b)Figure a partial enlargement;(c)Copper-plated sample;(d)Figure c partial enlargement

### 2.2.2 硬度和密度分析

图 9 为 C/hBN 未镀铜和镀铜试样的硬度和密度的变化情况。从图 9 可以看出,C/hBN 镀铜之后试样硬度减小了 5%,密度增加了 3%,主要原因是 C/hBN 的润湿性差,不能与铜基体很好的结合,在界面结合处会出现大量的孔隙,而镀铜 C/hBN 与铜基体的结合效果良好,在界面结合处没有明显的孔隙。

### 2.2.3 摩擦磨损性能分析

图 10 为 C/hBN 未镀铜和镀铜试样的摩擦系数

随制动初速度的变化曲线。从图 10 中可以看出,在低制动速度下,两种试样的摩擦系数基本一样,差距很小,这是因为制动速度较低时,颗粒不易脱落,C/hBN 未镀铜试样和 C/hBN 镀铜试样都能保持良好的润滑性,使摩擦系数保持稳定,在制动速度为  $300\ \text{km/h}$  时,C/hBN 镀铜试样的摩擦系数比 C/hBN 未镀铜试样下降了 10%,这是因为制动速度较高时,C/hBN 未镀铜试样的颗粒容易脱落,C/hBN 的大量脱落导致试样表面难以保持润滑膜

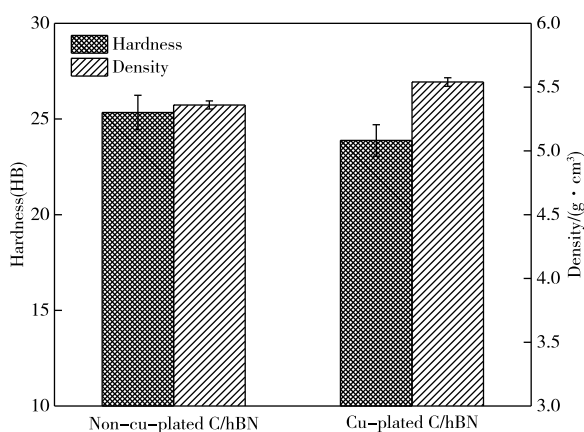


图9 C/hBN 未镀铜和镀铜试样的硬度和密度

Fig. 9 Hardness and densities of C/hBN uncoated and Cu-coated samples

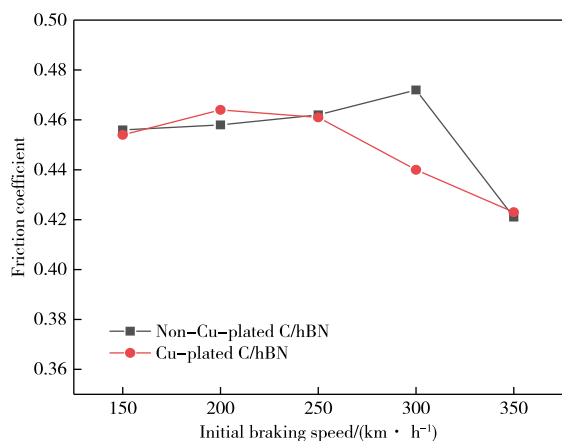


图10 C/hBN 未镀铜和镀铜试样的摩擦系数随制动初速度的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of friction coefficient of C/hBN uncoated and Cu-coated samples with initial braking speed

的完整性,表面较为粗糙;而 C/hBN 镀铜试样的 C/hBN 不易脱落,在制动过程中能持续提供 C/hBN,使试样表面的润滑膜保持完整。

图 11 为 C/hBN 未镀铜和镀铜试样的磨损量随制动初速度的变化曲线。从图 11 可以看出,在低制动速度时,两种试样的磨损量基本相同;在高制动速度时,C/hBN 镀铜试样的磨损量比 C/hBN 未镀铜试样下降了 28%。这是因为 C/hBN 与基体的结合较差,在高速摩擦时,易发生脱落,而 C/hBN 镀铜后和基体的结合紧密,不易发生脱落,从而有更小的磨损。综合来看,C/hBN 镀铜试样的摩擦系数整体更加稳定,抗磨性能相对较好,综合性能最佳。

图 12 为 C/hBN 未镀铜和镀铜试样的摩擦磨损表面形貌。从图 12 可以看出,C/hBN 未镀铜试样的摩擦表面存在裂纹和较大的剥落坑,而 C/hBN 镀

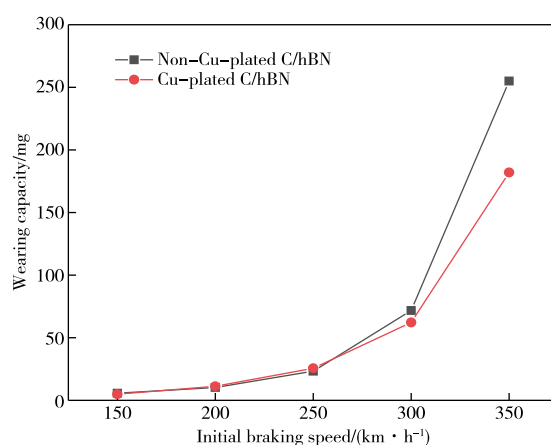


图11 C/hBN 未镀铜和镀铜试样的磨损量随制动初速度的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of wear amount of C/hBN uncoated and copper-coated samples with initial braking speed

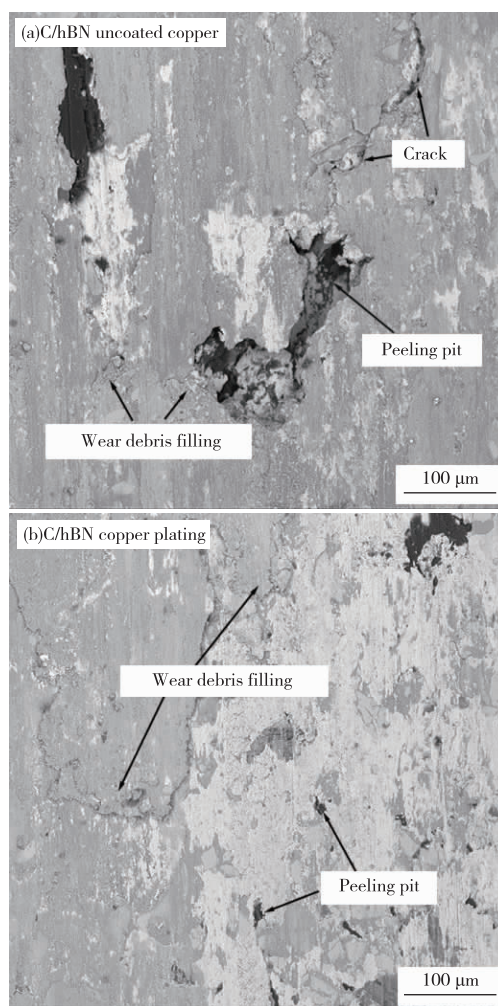


图12 C/hBN 未镀铜和镀铜试样的摩擦磨损表面形貌:

(a)C/hBN 未镀铜;(b)C/hBN 镀铜

Fig. 12 Friction and wear surface morphologies of C/hBN uncoated and Cu-coated samples: (a)C/hBN Uncoated Copper; (b)C/hBN copper plating

铜试样的表面比较平整,只有小面积的剥落坑的产生,较少的犁沟也被磨屑填充平整。这说明C/hBN镀铜后与铜基体结合良好,使颗粒不易从界面结合处脱落,对摩擦表面的金属氧化膜和hBN膜破坏较小,因此摩擦面的润滑膜较为完整。从C/hBN镀铜试样的摩擦形貌可以看出颗粒表面镀铜改善了C/hBN的润湿性,提高了C/hBN与铜基体的结合强度,使铜基粉末冶金摩擦材料有更加优异的摩擦磨损性能。

### 3 结论

1)随着hBN含量的增加,密度逐渐减小,硬度先增大后减小。添加适量的hBN能提高摩擦系数的大小和热稳定性,过量添加hBN会降低材料的摩擦系数和耐磨性能。C/hBN质量分数为6:3时,摩擦系数整体较高,最高达到0.472,磨损量相对较低,具有较好的综合性能。

2)C/hBN颗粒镀铜使铜基粉末冶金摩擦材料的硬度降低了5%,密度提高了3%,摩擦系数整体更加稳定,磨损量降低了28%,抗磨损性能更好。

3)随着hBN含量的增加,制动时摩擦表面的剥落坑数量增多、面积变大,且剥落处多是C/hBN;C/hBN颗粒镀铜改善了C/hBN-Cu的界面结合,摩擦表面的剥落坑数量减少、面积变小。

### 参考文献:

- [1] WANG G T, LIU X Y, HUA J J. Investigation on the fabrication and properties of the Cu base friction composites[J]. Materials Science Forum, 2020, 5993: 125-130.
- [2] 栗文浩, 吴少鹏, 蔡晓兰, 等. 铜基复合材料中增强相结构设计性能研究进展[J]. 有色金属工程, 2022, 12(7): 39-49.  
LI Wenhao, WU Shaopeng, CAI Xiaolan, et al. Research progress on structural design and properties of reinforced phase in copper matrix composites[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(7): 39-49.
- [3] ZHENG C S, MA Z W, YU L, et al. Effect of silicon carbide nanoparticles on the friction-wear properties of copper-based friction discs[J]. Materials, 2022, 15(2): 587. DOI:10.3390/MA15020587.
- [4] FAN J L, ZHANG C, WU S, et al. Effect of Cr-Fe on friction and wear properties of Cu-based friction material[J]. Materials Science and Technology, 2018, 34(7): 869-875.
- [5] XIAO Y L, CHENG Y, ZHOU H B, et al. Evolution of

- contact surface characteristics and tribological properties of a copper-based sintered material during high-energy braking[J]. Wear, 2022, 488-489: 150-160.
- [6] 邱天旭, 张继峰, 孙露, 等. 粉末冶金 Fe-5(Cu-10Sn)-石墨-P-MoS<sub>2</sub>含油材料的摩擦性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(5): 459-466.  
QIU Tianxu, ZHANG Jifeng, SUN Lu, et al. Tribological properties of Fe-5(Cu-10Sn)-graphite-P-MoS<sub>2</sub> oil-containing materials[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2019, 24(5): 459-466.
- [7] 房玉鑫, 王优强, 张平, 等. 不同热处理下 SiC<sub>p</sub>/2024Al 复合材料摩擦磨损性能及机理[J]. 有色金属工程, 2022, 12(5): 30-37.  
FANG Yuxin, WANG Youqiang, ZHANG Ping, et al. Friction wear performance and mechanism of SiC<sub>p</sub>/2024Al composites under different heat treatments [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(5): 30-37.
- [8] ZHANG P, ZHANG L, WEI D B, et al. Adjusting function of MoS<sub>2</sub> on the high-speed emergency braking properties of copper-based brake pad and the analysis of relevant tribo-film of eddy structure[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 185: 107779. DOI:10.1016/j.compositesb.2020.107779.
- [9] 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 Zheng, ZHAN Nan, ZHANG Wanhao, 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.
- [10] ZHANG P, ZHANG L, WEI D B, et al. Effect of graphite type on the contact plateaus and friction properties of copper-based friction material for high-speed railway train[J]. Wear, 2019, 432: 202927. DOI: 10.1016/j.wear.2019.202927.
- [11] JIANG X, FANG H C, XIAO P, et al. Influence of carbon coating with phenolic resin in natural graphite on the microstructures and properties of graphite/copper composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 744: 165-173.
- [12] 张鑫, 郭丹, 刘军锋, 等. 石墨表面金属包覆处理对 Cu 基粉末冶金摩擦材料制动摩擦学行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(2): 396-407.  
ZHANG Xin, GUO Dan, LIU Junfeng, et al. Influences of metal coating on graphite surface on braking tribological behavior of copper-based powder metallurgical friction material [J]. Tribology, 2022, 42(2): 396-407.
- [13] 刘滩, 肖鹏, 方华婵, 等. 石墨表面改性对铜基摩擦材料

- 组织与性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(2):195-204.
- LIU Tan, XIAO Peng, FANG Huachan, et al. Effect of graphite surface modification on microstructure and properties of Cu-based friction materials[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2019, 24(2):195-204.
- [14] ZHANG P, ZHANG L, WEI D B, et al. A high-performance copper-based brake pad for high-speed railway trains and its surface substance evolution and wear mechanism at high temperature[J]. Wear, 2020, 444:203182. DOI:10.1016/j.wear.2019.203182.
- [15] CHO M H, JU J, KIM S J, et al. Tribological properties of solid lubricants (graphite,  $Sb_2S_3$ ,  $MoS_2$ ) for automotive brake friction materials[J]. Wear, 2005, 260(7):855-860.
- [16] HAN X M, YANG J Y, NONG W H, et al. Tribological behavior of copper and graphite of layered friction materials[J]. Tribology Transactions, 2020, 63(5):906-912.
- [17] MA Z Y, HUANG R X, KOSTYANTYN G, et al. Tribology properties of titanium-based metals reinforced by BN nanosheets[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(8): 2001351. DOI: 10.1002/ADEM.202001351.
- [18] CHEN F, LI Z, ZOU L F, et al. Tribological behavior and mechanism of h-BN modified copper metal matrix composites paired with C/C-SiC [J]. Tribology International, 2021, 153: 106561. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106561.
- [19] 陈百明, 张俊喜, 郭小汝, 等. BN 和  $MoS_2$  对镍基材料摩擦磨损性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2019(4): 273-278.
- CHEN Baiming, ZHANG Junxi, GUO Xiaoru, et al. Effects of BN and  $MoS_2$  on friction and wear properties of nickel-based materials [J]. Powder Metallurgy Technology, 2019(4):273-278.
- [20] 范宝中, 何美凤. 钨含量对铜基摩擦材料性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2021, 42(2):19-25.
- FAN Baozhong, HE Meifeng. Effect of tungsten content on the properties of copper-based friction materials [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2021, 42(2):19-25.
- [21] YANAR H, PURCEK G, DEMIRTAS M, et al. Effect of hexagonal boron nitride (h-BN) addition on friction behavior of low-steel composite brake pad material for railway applications[J]. Tribology International, 2022, 165: 107274. DOI: 10.1016/J.TRIBOINT.2021.107274.
- [22] ZHAO J H, LI P, TANG Q, et al. Influence of metal-coated graphite powders on microstructure and properties of the bronze-matrix/graphite composites[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(2):792-801.
- (编辑 崔 颖)