

DOI:10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20220180

不同石墨含量铜基摩擦材料耐热特性及摩擦性能研究

李炎森^{1,2}, 张 坤³, 张国洪⁴, 许成法⁴, 胡 铮⁵, 汪银风⁵

(1. 石家庄铁道大学, 河北省智能材料结构力学重点实验室, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学, 河北省工程力学基础学科研究中心, 河北 石家庄 050043; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 4. 杭州前进齿轮箱集团股份有限公司, 浙江 杭州 311203; 5. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘 要:针对铜基摩擦材料耐热性能不足导致的摩擦片服役寿命受限这一问题,采用粉末冶金方法压烧了3种不同质量分数石墨的摩擦材料试样,主要研究了石墨含量对材料耐热性能及摩擦磨损性能的影响及其作用机制。表面形貌分析表明,随着石墨含量的增加基体连续性先增加后降低;热分析结果表明,石墨含量对热学性能的主要影响在于因石墨过量产生的团聚现象导致的界面传热下降;摩擦磨损试验结果证实,随着石墨含量的增加,试样耐热性能明显提升,材料基体的强度得到增强,但是却导致试样磨损率及动摩擦因数上升。

关键词:铜基摩擦材料;石墨;能量负荷许用值;磨损率;动摩擦因数

文献标志码:A **文章编号:**1006-6543(2023)06-0068-06

Heat resistance and friction properties of copper-based friction materials with different graphite content

LI Yansen^{1,2}, ZHANG Kun³, ZHANG Guohong⁴, XU Chengfa⁴, HU Zheng⁵, WANG Yinfeng⁵

(1. Hebei Key Laboratory of Mechanics of Intelligent Materials and Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Hebei Research Center of the Basic Discipline Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 100190, Beijing, China; 4. Hangzhou Advance Gearbox Group Co., Ltd., Hangzhou 311203, China; 5. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at the problem of limited service life of friction discs caused by insufficient heat resistance of copper-based friction materials, three kinds of friction materials with different mass fractions of graphite were prepared by powder metallurgy, the effects of graphite content on the heat resistance and friction, wear properties were investigated. The surface morphology analysis shows that the continuity of the matrix increases and then decreases with the increase of graphite content. The thermal analysis results show that the main effect of graphite content on the thermal properties lies in the decrease of interfacial heat transfer due to the agglomeration phenomenon generated by the excess of graphite. The results of friction and wear tests confirm that with the increase of graphite content, the heat resistance of the specimen increases significantly and the strength of the material matrix is enhanced, but this leads to an increase in the wear rate and dynamic friction coefficient of the specimen.

基金项目:国家国防科技工业局基础创新项目(237099000000170004);河北省自然科学基金重点项目(基础研究基地项目)(A2023210064)

作者简介:李炎森(1992—),男,博士,讲师,主要研究方向为粉末冶金摩擦材料。

通讯作者:张 坤(1986—),男,博士,副研究员,主要研究方向为粉末冶金材料。

收稿日期:2022-10-13

Key words: copper-based friction materials; graphite; allowable value of energy load; wear rate; dynamic friction coefficient

铜基摩擦材料具有高导热性、良好的耐热性和耐磨特性,与铁基摩擦材料相比在湿式环境下具有更好的耐腐蚀性^[1-5],因此常作为摩擦材料与对偶材料组成摩擦副,被广泛应用于现代航空器、船舶、列车、装甲车辆及工程机械等交通工具与运载工具制动器和离合器部件中^[6-11]。随着设备向高速、重载方向的发展,摩擦材料常常处于高温的工作环境下,摩擦片使用时常出现掉块、耐热性能差等问题,无法满足大功率高转速传动系统的使用要求。因此提升摩擦片性能,尤其是耐热性能,具有重要意义。

通常,粉末冶金制成的摩擦片的性能可以通过调整组分来优化。研究表明,片状游离石墨能在金属表面形成牢固的转移膜,呈现出优良的润滑性,已成为制动材料中不可替代的重要组元^[12-15]。目前,关于石墨作为摩擦材料组元的研究主要集中在摩擦材料摩擦特性及强度方面,如 Sarmadi 等论述了石墨作为固体润滑剂,可以减少金属接触点,影响磨损机制,进而影响复合材料的摩擦性能^[16];许成法等证明了石墨含量超越粒度和 ZrSiO₄ 含量成为了影响摩擦因数的显著因素,而粒度能够显著影响磨损率^[17];石永亮等通过改变摩擦材料内石墨取向,研究了石墨片层的长度方向比垂直片层方向具有更高的硬度和较低的摩擦磨损系数^[18];王晔等分析了石墨与摩擦材料强度特性的关系,其将鳞片石墨与人造石墨混合使用,所制材料强度明显提升^[19]。然而,石墨对摩擦材料耐热特性的影响规律的研究仍然不足。实验通过制备不同石墨含量的摩擦片,研究了石墨含量对摩擦片耐热性能及摩擦磨损特性的影响,为高耐热摩擦材料组元的调配提供理论依据与实验支撑。

1 实验

1.1 原料及制备

通过粉末冶金法压制烧结制备3种不同石墨含量的铜基摩擦材料,成分见表1。压制压力为2~4 MPa,烧结温度为840 °C,保温时间为2 h。

1.2 性能检测

采用扫描电子显微镜观察摩擦片表面显微形貌;采用导热仪(NETZSCH LFA467 HT)分析试样在不同温度下(50、150及250 °C)的导热性能,采用

差式扫描量热仪(TA Discovery DSC 250)研究试样比热容随温度(16~255 °C)的变化规律;采用SAE NO.2实验机(型号M1080)表征摩擦磨损性能及耐热性能,实验参数如表2所示,摩擦片耐热性能采用能量负荷许用值Ca来衡量,其计算方法为在规定的实验条件下,摩擦副失效前,摩擦副的能量密度Ws与最大功率密度Ns的乘积,计算公式为:

$$C_a = N_s \times W_s \quad (1)$$

式中,Ns为最大功率密度,W/cm²,Ws为能量密度J/cm²。

磨损率通过测量磨损实验前后摩擦片的厚度变化来表示,计算公式为:

$$\Delta w = \frac{A \Delta h}{0.5 I n \omega} \quad (2)$$

式中,Δw为磨损率,cm³/J;A为接触面积,mm²;Δh为摩擦片厚度变化,mm;n为制动次数;I为转动惯量,kg·m²;ω为转动的角速度,r/s。

表1 铜基摩擦材料成分

试样	合金元素	SiO ₂	石墨	Cu
S1	16	3	15%	余
S2	16	3	25%	余
S3	16	3	35%	余

表2 实验参数

压力/MPa	油温/°C	惯量/(kg·m ²)	接合次数/次	油流量/(mL·min ⁻¹ ·cm ⁻²)
1.8	70±10	0.35	1600	0.35

2 结果与分析

2.1 微观形貌

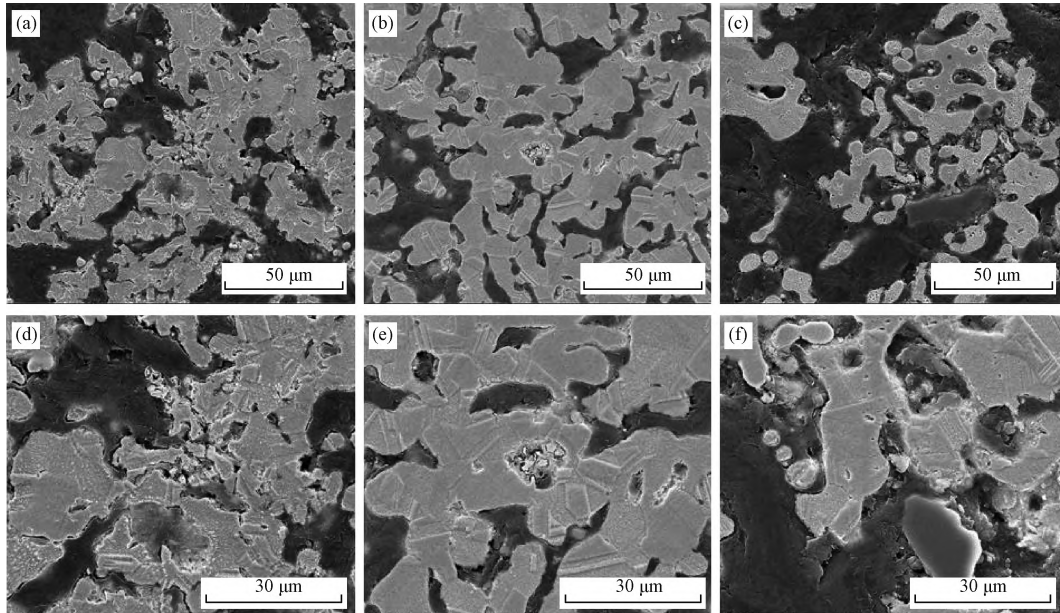
采用扫描电子显微镜表征3种试样的表面微观形貌,结果如图1所示。图中亮白色部分为铜基体,大面积灰黑色部分为石墨。对比图1(a)~(c)可知,随着石墨含量的增加,铜基体的连续性先增加后减少。由于石墨与铜等金属元素不互溶,其存在对烧结时金属元素的扩散起到阻碍作用。S1试样石墨含量较少,试样的微观结构主要受金属元素扩散作用影响,且金属元素易连接成一个区域,造成石墨分散较不均匀;而S3试样由于石墨含量过多导致石墨团聚现象加剧,对金属元素扩散的阻碍作用增

强,导致基体结构连续性明显降低。

为更直观地表征3种试样的致密性,测得了S1、S2、S3试样的体积密度分别为4.15、4.22、4.09 g/cm³,可见体积密度先增大后减小,与图1中呈现的现象相吻合。这是因为在适当的石墨含量下,热压已去除绝大多数的孔隙,铜熔体填补部分孔隙使材料的体积密度略有上升。而S3号试样致密性最差,因为石墨的过度添加导致了团聚现象,铜与石墨界面机械结合产生更多的孔隙。铜的含量相对减少,

铜熔体已经不足以填补孔隙,导致材料的致密性变差^[20]。

目前针对湿式铜基粉末冶金摩擦材料的研究表明,高孔隙率的铜基湿式摩擦材料更能适应极端工况条件。但随着孔隙率的增大,材料的性能也随之改变。并且由于孔隙常出现在结合的界面处,且呈狭长的扁孔,易引起应力集中导致构件破坏。每种材料都有最佳的孔隙度,此时材料的性能一般也能达到最佳值。



(a) ~ (c) S1、S2、S3 试样放大1 000倍图像; (d) ~ (f) S1、S2、S3 试样放大2 000倍图像。

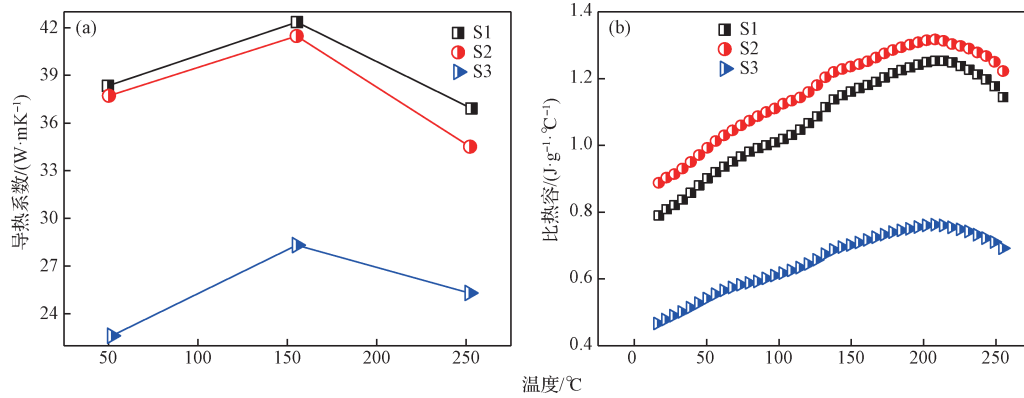
图1 试样的SEM显微形貌

2.2 热学性能分析

分析3种不同石墨含量试样的热学性能,结果如图2所示。图2(a)为3种试样在不同温度下的导热系数,3种试样的导热系数均随温度的升高呈先增大后减小的趋势,在150℃左右达到峰值,并且相同温度下石墨含量越高,试样导热系数越低。S1试样的导热系数在155.4℃时达到峰值42.3 W/mK,略高于S2的41.5 W/mK,表明S1和S2试样都具有较强的散热性能。而S3的散热性最差,在155℃时的最高导热系数也仅为28.3 W/mK。图2(b)为3种试样的比热容随温度变化曲线,3种试样的比热容随温度的升高均出现先增大后减小趋势,并在210℃左右达到峰值,最大值分别为:1.25、1.32、0.76 J/g·℃,并且相同温度下S2号试样比热容最高。

由图2可知,导热系数与比热容均出现随温

度的升高先增加后减少的趋势,原因是根据Debye模型,在温度较低时,温度对材料导热的影响主要反映在温度升高晶格振动加快。比热容随温度的升高而升高并在低温区主导传热;在温度较高时,自由程成为主导导热系数的主要因素。温度越高自由程越小,致使导热系数降低,因此3种试样比热容及导热系数均呈现出随温度升高而先增加后减少的演化规律。而3种试样导热系数及比热容变化规律存在明显差异,是由于随着石墨含量的增加,温度升高时,铜基体与石墨之间较大的热膨胀系数差导致界面热阻对热交换的不良影响更加凸显^[21],从而造成S1、S2及S3试样导热系数依次降低。而S2试样由于石墨含量相对最优,样品致密性最好,单位质量所能存储的热量最多,从而比热容最大。



(a) 试样在不同温度下的导热系数; (b) 试样比热容随温度的变化曲线。

图2 3种试样热学性能

2.3 耐热性能分析

耐热性是评价摩擦片性能的重要指标之一。在实际工况中,摩擦片由于反复接触、分离,材料不同部位生热和散热条件存在差异,表面各处温度也不尽相同。若产生的热量不能及时交换出去,摩擦片传递转矩的能力将大大下降,也会导致对偶片的翘曲、烧损或者表面剥离,从而严重影响组成构件的性能和使用寿命,甚至会造成安全事故。其次,温度的变化势必会引起摩擦因数的改变,从而导致异常抖动的产生。因此,提升摩擦片的耐热性能具有重要意义^[22-23]。

对3种石墨含量试样分别进行耐热性能测试,测得其能量负荷许用值如图3所示。

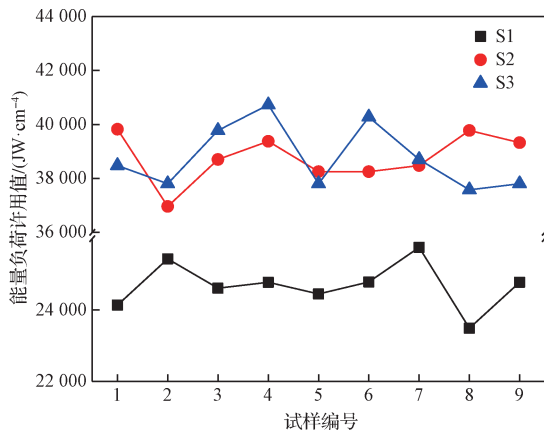


图3 3种试样能量负荷许用值

当石墨含量由15%提升至35%时,试样的能量负荷许用值大幅度提升,平均值由 $24\ 690\ JW/cm^2$ 上升至 $38\ 770\ JW/cm^2$,随后趋于稳定。S2与S3试样能量负荷许用值的平均值相同,但S3试样的离散略大,稳定性相对较差。由结果可知,石墨的加入有效地提高了材料的能量负荷许用值,并且合适的石

墨含量带来更为连贯完整的基体,可以快速稳定地传导摩擦产生的热量,降低摩擦片表面温升,最终实现材料耐热性的提升。

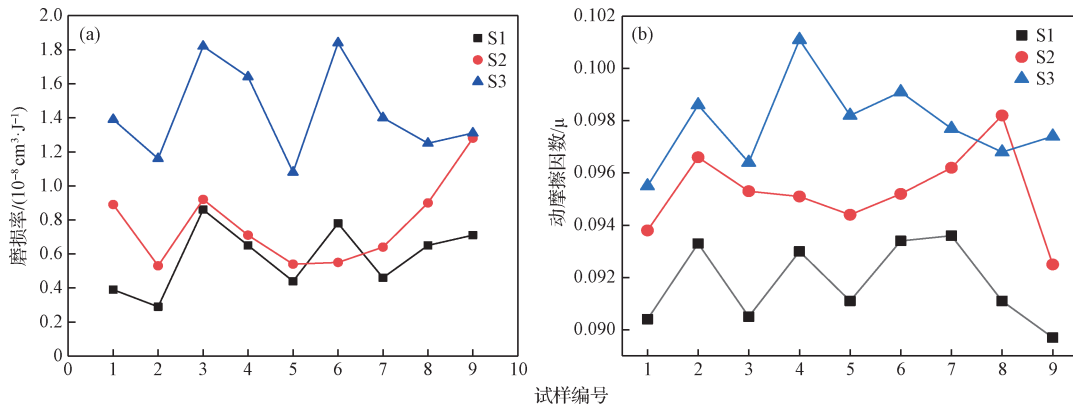
2.4 摩擦磨损性能分析

3种试样摩擦磨损特性如图4所示。图4(a)为不同石墨含量试样的磨损率变化图,由图可知,随着石墨含量的增加,磨损率呈上升趋势。S1、S2和S3试样的平均磨损率分别为 0.58×10^{-8} 、 0.77×10^{-8} 、 $1.43 \times 10^{-8}\ cm^3/J$ 。S2与S1磨损率相近,S3相较S1、S2磨损率明显增加。图4(b)为3种试样的动摩擦因数,易知S1试样的动摩擦因数最小,均值为0.092;当石墨含量增加,试样的动摩擦因数随之增加,S2、S3试样的动摩擦因数平均值分别为:0.095、0.098,相对S1试样小幅度提升。此外,实验中还发现S1试样在实验次数达到100次后性能开始失稳,试样出现损坏失效,其余两种试样循环则达到160次,表明石墨含量增加提高了摩擦材料的强度。

为进一步表征石墨对摩擦因数的影响,研究了不同石墨含量试样的动摩擦因数随转速增加的变化情况,结果如图5所示。首先,随着转速提升,3种试样摩擦因数均随转速增加而减小。因为当制动转速较低时,摩擦材料表面的石墨润滑膜尚未完整形成,且实验时剪力需要克服表面的硬质颗粒,使摩擦因数变高。随着速度的上升,润滑膜形成与试样的塑性应变使得表面趋于平整,接触面积变大,摩擦因数降低。其次可见,相同的转速下,石墨含量越小动摩擦因数越小,S2试样的动摩擦因数总体变化波动较小。静/动摩擦因数比(S/D)与动静转化过程的平稳性有关,静动比越小制动过程交接越平稳,产生的震颤与噪声越少。3种试样的S/D值分别为:1.59、1.54、1.53。相比S1试样而言,S2、S3试样能动比明

显下降,并趋于稳定。可见适宜的石墨含量有稳定

摩擦因数并实现动静过程的平稳的转化作用。



(a) 磨损率; (b) 动摩擦因数。

图4 3种试样摩擦磨损性能

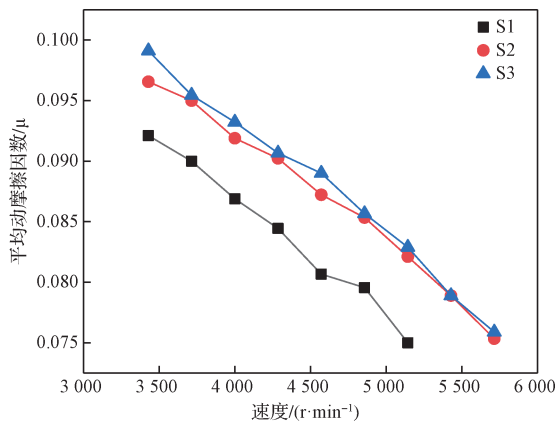


图5 动摩擦因数随制动速度变化

材料的摩擦磨损性能受组分、制动速度、表面状态、温度等因素的综合影响。石墨的加入有效增强了材料本身的强度,使S2、S3试样可以承受更高次数的实验。而S3试样摩擦磨损性能较差的原因是石墨含量过多产生的团聚现象会导致试样表面的不连贯,较差的界面结合会导致材料导热性能降低,材料表面存在温度梯度,散热不及时温度过高,不仅加重了磨损也导致了摩擦因数的上升^[24];其次随着石墨含量增高,材料的磨损形式从粘着磨损向疲劳剥层过渡,磨屑多为母体剥落^[25]。这会导致试样表面在实验过程中产生部分剥落坑,使得接触面润滑能力下降,提高基体的不连续性,加剧磨损程度^[26]。而较高的磨损率也表明磨屑较多,脱落的磨屑会破坏石墨润滑膜,导致摩擦因数上升。

上述3种试样的摩擦磨损状态表明,过量的石墨不仅不会加强减磨效果,反而因为影响了材料本身的表面状态,导致摩擦学性能降低。因此S3试样由于石墨含量过多,摩擦磨损性能相对S1、S2较差,

磨损率较高;对比3种试样的导热系数与比热容,可见石墨含量对热学性能的主要影响为含量过高时的负面影响。实验结果表现为S1与S2试样热学性能较为接近,但S3试样由于石墨含量过高,铜基体与石墨之间的孔隙较多,石墨团聚导致结合界面啮合较差,使得导热系数与比热容均明显低于其他二者;又测得了试样的能量负荷许用值,S1试样的能量负荷许用值仅为 $24\ 690 \text{ J} \cdot \text{W} / \text{cm}^4$,石墨含量的增加将试样的能量负荷许用值提升至 $38\ 770 \text{ J} \cdot \text{W} / \text{cm}^4$,可见石墨的加入显著提升了材料的耐热性能。然而,虽然S1试样的热学性能、摩擦磨损性能较好,但该试样不仅能量负荷许用值较低并且在实验次数超100次后,性能开始失稳,试样出现损坏失效。摩擦材料需要有良好的机械强度和力学性能,S1试样难以达到常规要求。因此石墨含量25%的S2试样是3种试样中的综合最优。

3 结论

(1)热学性能测试表明,S1、S2试样导热性能相似,导热系数最大值均大于 $40 \text{ W} / \text{mK}$,但S3试样导热性能相对较差,导热系数最大值仅为 $28.3 \text{ W} / \text{mK}$ 。因此石墨含量对热学性能的主要影响在于因石墨过量产生的团聚现象导致的界面传热下降等的负面影响。

(2)当石墨含量从15%增加到25%时,能量负荷许用值分布从 $24\ 690 \text{ J} / \text{cm}^2$ 提升至 $38\ 770 \text{ J} / \text{cm}^2$,可知连续均匀的基体可以更加迅速的扩散因摩擦产生的热量,使其耐热性能得到显著提升。但S3试样能量负荷许用值的离散性较大,表明石墨含量过多导致

的团聚现象会影响材料能量负荷许用值的稳定性。

(3)对磨损率而言,随着石墨含量的增加,磨损率呈上升趋势。然而S1试样摩擦磨损实验时仅承受100次循环便破坏,S2、S3试样却可以承受160次以上循环实验。这是由于合适的石墨含量时,石墨可以均匀弥散地分布到基体中,使试样金属基体连续性增加,试样表面更加均匀致密,有效地强化了材料的机械强度。

参考文献:

- [1] 周永欣,徐飞,吕振林,等.SiC和石墨颗粒混杂增强铜基复合材料的摩擦磨损性能[J].机械工程材料,2015,39(2):90.
- [2] 方小亮,郑合静.铜基粉末冶金摩擦材料的应用及展望[J].粉末冶金技术,2020,38(04):313.
- [3] 周海滨,姚萍屏,肖叶龙,等.铜基粉末冶金摩擦材料特征摩擦组元与基体的界面形成及磨损机制[J].中国有色金属学报,2016,26(2):328.
- [4] 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(02):396.
- [5] 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,2020,3(5):45.
- [6] 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(06):409.
- [7] 郭申申,凤仪,赵浩,等.石墨烯增强铜基复合材料的制备及其微观组织与性能研究[J].金属功能材料,2019,26(4):16.
- [8] 吕波,王三全,林浩盛,等.高能量高功率密度湿式铜基摩擦材料的研制[J].粉末冶金工业,2022,32(5):24.
- [9] 肖叶龙,陈盛,沈明学,等.干湿态下制动载荷对粉末冶金闸片材料摩擦学性能的影响[J].粉末冶金工业,2023,33(2):17.
- [10] 孙海影,高文婧,陈华,等.铜基刹车摩擦片的制备及性能研究[J].粉末冶金工业,2023,33(4):49.
- [11] 许雄飞,尹彩流,王秀飞,等.氧化铜含量对地铁集电靴用铜基粉末冶金材料性能的影响[J].粉末冶金工业,2023,33(5):31.
- [12] 刘建秀,程晓阳,樊江磊,等.石墨在铜基粉末冶金摩擦材料中的发展和应用[J].特种铸造及有色合金,2020,40(06):623.
- [13] ZHANG X, ZHANG Y, DU S, et al. Study on the tribological performance of copper-based powder metallurgical friction materials with Cu-coated or uncoated graphite particles as lubricants[J]. Materials, 2018, 11(10): 2016.
- [14] RAJKUMAR K, ARAVINDAN S. Tribological behavior of microwave processed copper-nanographite composites[J]. Tribology International. 2013,57:282.
- [15] 徐群峰,高鹏,江南.石墨/铜复合材料的显微组织与热力学性能[J].热加工工艺,2016,45(16):95.
- [16] SARMADI H, KOKABI A H, REIHANI S M S. Friction and wear performance of copper-graphite surface composites fabricated by friction stir processing (FSP)[J]. Wear, 2013, 304(1): 1.
- [17] 许成法,韩建国.铜基干式摩擦材料配方优化[J].粉末冶金技术,2013,31(06):451.
- [18] 石永亮,赵晓萍,陈存广.石墨取向化铜基摩擦材料的性能研究[J].粉末冶金工业,2020,30(4):32.
- [19] 王晔,燕青芝,张肖路,等.石墨对铜基粉末冶金闸片材料性能的影响[J].粉末冶金技术,2012,30(06):432.
- [20] 许尧.高导热石墨/铜复合材料的制备及性能研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [21] 李通,李金权,王文广,等.影响碳/金属复合材料导热性能的主要因素探讨[J].材料导报,2018,32(15):2640.
- [22] 郭瑞宾.摩擦片耐热性对多片湿式离合器工作过程的影响研究[D].吉林:吉林大学,2014.
- [23] 费杰,李贺军,付业伟,等.碳纤维增强纸基摩擦材料磨损机制研究[J].摩擦学学报,2011,31(06):540.
- [24] 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.
- [25] 浩宏奇,丁华东,李雅文,等.石墨含量对铜基材料摩擦磨损性能的影响[J].中国有色金属学报,1997,03:123.
- [26] 黎凯强,向雄志,白晓军,等.不同粒度和石墨含量对铜-镀铜石墨复合材料性能的影响[J].金属功能材料,2016,23(01):47.

(上接第67页)

- [19] 石永亮,郭志猛,李秀敏,等.3D打印-凝胶注模制备蜂窝状Ti-6Al-4V多孔钛骨骼的研究[J].粉末冶金工业,2018,28(3):34.
- [20] 赵朝勇,张雪峰,张磊,等.多孔Ti-5Ag合金的制备及力学性能研究[J].钢铁钒钛,2018,38(2):49.
- [21] XU J, ZHANG J, BAO L, et al. Preparation and bioactive surface modification of the microwave sintered porous Ti-15Mo alloys for biomedical application[J]. Science China Materials, 2018, 61(4): 545.
- [22] 张喜燕,赵永庆,白晨光.钛合金及应用[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [23] 袁广银,张佳,丁文江.可降解医用镁基生物材料的研究进展[J].中国材料进展,2011,30(2):44.
- [24] WEN C E, Yamada Y, Shimojima K, et al. Processing and mechanical properties of autogenous titanium implant materials[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2002, 13(4): 397.
- [25] Alvarez K, Nakajima H. Metallic scaffolds for bone regeneration[J]. Materials, 2009, 2(3): 790.
- [26] XU W, LU X, ZHANG B, et al. Effects of porosity on mechanical properties and corrosion resistances of PM-fabricated porous Ti-10Mo alloy[J]. Metals, 2018, 8: 188.
- [27] LI Y H, CHEN N, CUI H T, et al. Fabrication and characterization of porous Ti-10Cu alloy for biomedical application[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017,723: 967.
- [28] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [29] Krishna B V, Bose S, Bandyopadhyay A. Low stiffness porous Ti structures for load-bearing implants[J]. Acta Biomaterialia, 2007, 3(6): 997.