文章编号: 1004-0609(2012)11-3074-07

碳纤维增强 Ag-MoS2 复合材料的摩擦磨损性能

马 超,王新平,张 雷,周科朝

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要:采用 MoS₂、碳纤维(CF)及特种碳纤维(SCF)作为润滑相,制备 3 种固体润滑复合材料(Ag-2.5Cu-8MoS₂、 Ag-2.5Cu-8MoS₂-3CF、Ag-2.5Cu-8MoS₂-3SCF),对所得材料进行系统的摩擦磨损性能测试,重点关注各润滑相对 材料摩擦磨损性能的影响规律。结果表明:独立采用 MoS₂ 作为润滑相时可使材料获得较好的摩擦磨损性能和较 低的摩擦因数,其磨损率为 24×10⁻¹⁴ m³/(N·m),摩擦因数为 0.122;添加碳纤维能提高材料的耐磨性能,其中添加 特种碳纤维所得材料 Ag-2.5Cu-8MoS₂-3SCF 的磨损率最低(4.08×10⁻¹⁴ m³/(N·m)),其耐磨性能比 Ag-2.5Cu-8MoS₂ 的提高了 6 倍,但添加碳纤维显著增加了材料的摩擦因数,测试过程发现加入碳纤维后材料的摩擦因数由 0.122 分别升至 0.154(CF)和 0.167(SCF)。由于特种碳纤维材料较高的硬度(319.369 HV)和较好的耐磨性以及 MoS₂较好 的润滑性能,采用特种碳纤维和 MoS₂对银基材料进行复相润滑可使材料获得较好的综合摩擦磨损性能。 关键词:碳纤维;银基复合材料;自润滑;摩擦磨损

中图分类号: TB331; TH117.3 文献标志码: A

Friction and wear properties of Ag-MoS₂/carbon fibers reinforced composites

MA Chao, WANG Xin-ping, ZHANG Lei, ZHOU Ke-chao

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: MoS₂, carbon fiber (CF) and special carbon fiber (SCF) were used as lubricants, and three kinds of solid lubricating composite materials (Ag-2.5Cu-8MoS₂, Ag-2.5Cu-8MoS₂-3CF, Ag-2.5Cu-8MoS₂-3SCF) were produced by hot press process. The friction and wear properties of these materials were conducted, and the variation of the friction and wear properties with the various lubrication phases was explored. The results show that, the Ag-2.5Cu-8MoS₂ get better friction and wear properties and lower friction coefficient, the wear rate is $24 \times 10^{-14} \text{m}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, the friction coefficient is 0.122; The addition of carbon fiber can improve the wear resistance of material, and the Ag-2.5Cu-8MoS₂-3SCF gains the lowest wear rate($4.08 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$), which increases six times over Ag-2.5Cu-8MoS₂. However, the addition of carbon fiber obviously increases the friction coefficient of materials, the friction coefficient increases from 0.122 to 0.154 (CF) and 0.167 (SCF), respectively. The improving wear strengthening effect is obvious, which is caused by the well wear-resisting property, high hardness (319.369 HV) of the special carbon fiber and the better frictional property of MoS₂. **Key words:** carbon fiber; silver-based composite material; self-lubricating; friction and wear

银基固体润滑复合材料在航空和宇航用仪表系统、自动控制系统以及电机、电器及电路装置部分大量使用,它担负着相对滑动部件的接通、关闭以及电传递的作用,是必不可少的电器元件^[1-3]。因此,要求它必须具备多方面看来相互矛盾的特性:摩擦因数和

磨损量小,不研磨或损伤换向器和集电环;机械强度 大,以避免高速旋转和振动引起的破损;润滑性能好, 与换向器或集电环平滑地接触,以便尽量延长使用寿 命^[4-5]等。采用 MoS₂、碳纤维作为银基固体润滑复合 材料的组成物,选择正确的复合工艺,可以同时提高

基金项目: 湖南省科技计划重点项目(2011GK4004)

收稿日期: 2011-10-24; 修订日期: 2012-03-13

通信作者:张雷,副研究员,博士;电话: 0731-88830464; E-mail: fgmzhang@163.com

银基自润滑复合材料的强度与摩擦磨损性能^[6-8],使得 银基材料的使用寿命大大提高。摩擦因数和磨损量是 固体润滑材料的两个重要动态性能,它们是检验材料 好坏与使用性能的重要标准^[9-10]。这两种摩擦学特性 主要取决于:1)固体润滑剂与基体之间界面的结合强 度与润滑相的减磨效果;2)摩擦过程中固体润滑剂在 对偶面发生转移及在对偶面上形成润滑膜的结构性 能^[11]。

近年来国内外已有一些在润滑相方面的研究, VEST^[12]及FRITSCH和MODLER^[13]等研究了银基固 体润滑复合材料中 MoS2 对其磨损量及摩擦因数的影 响,得出了润滑相尺寸越小润滑性能越好,且含量应 该控制在 7.5%(质量分数)左右。唐谊平等^[14]和 XIA 等[15]对碳纤维增强铜基复合材料的摩擦学性能进行 了研究,发现碳纤维能够增强基体的显微硬度,并在 摩擦表面形成有润滑性能的富碳层,添加一定量碳纤 维之后材料磨损率明显降低。而经过石墨化处理后的 特种碳纤维,其硬度、模量较普通碳纤维都有较大幅 度的提升,而且在润滑性能上与普通碳纤维相比也有 优势,采用石墨化碳纤维作为固体润滑材料的润滑相 具有很好的使用前景。但目国内外文献报道中,采用 石墨化碳纤维作为固体润滑材料的增强相与润滑相的 文献报道较少,且在固体润滑材料润滑相的研究中, 单相润滑研究较多,而添加多种润滑相。对材料进行 复相润滑的研究较少。因此,本文作者选取 MoS₂、碳 纤维(Carbon fiber, CF)、特种碳纤维(Special carbon fiber, SCF)作为银基固体自润滑材料的润滑相,进行单 相与复相润滑,通过研究各润滑相对材料摩擦磨损过 程的影响,特别是润滑相之间硬度差异对复合材料耐 磨性能的影响以及其对基体合金摩擦磨损行为的作用 等因素,以期揭示不同润滑相对银基固体自润滑材料 摩擦磨损性能的作用机理,探索提高自润滑复合材料 摩擦磨损性能的方法。

1 实验

采用昆明贵研铂业生产的纯度为 99.95%以上的 Ag、Cu粉末, MoS₂为上海胶体化工厂生产,碳纤维 分别为市购普通短切碳纤维(CF)、特种碳纤维(SCF, 特种碳纤维为市购短切碳纤维经 2 200 ℃石墨化处理 6 h所得)。本研究所制备的银基固体润滑材料的组分 如下: Ag-2.5Cu-8MoS₂、Ag-2.5Cu-8MoS₂-3Cf、 Ag-2.5Cu-8MoS₂-3SCf(数值均为质量分数)。

试样制备方法为热压烧结,即将配置好的粉料置

于石墨模具中在氩气保护下于 850~880 ℃进行热压 烧结,压制压力为 25 MPa,保压时间为 20~25 min,得到直径为 50 mm,高 3 mm 的圆片,然后将样品切 割成 10 mm×3 mm×3 mm 的测试用试样。

材料的摩擦磨损实验在 SFT-2M 销盘式摩擦磨损 试验机上进行,载荷为 1N,转速为 100 r/min,滑动 速度为 0.27 m/s,滑动距离为 30 km,对偶材料为 Ag-10Cu 合金圆盘,直径 60 mm。磨损率计算公式为

$W=\Delta m/(\rho PS),$

式中: Δm 为复合材料测试前后的质量损失, g; ρ 为 复合材料密度, g/cm³; P 为载荷, N; S 为测试距离, km。

实验采用 FEI Quanta-200型扫描电子显微镜观察 摩擦表面形貌与磨屑形貌, CSM 公司纳米压痕仪测试 复合材料中各相的硬度。

2 结果与讨论

2.1 材料显微形貌及润滑相分布特征

通常,金属基润滑材料中润滑相的分布状态及其 与金属基体的结合效果对材料性能有着重要的影响。 图1所示为所得材料中各润滑相的形貌及分布特征。 图 1(a)所示为单独采用 MoS₂ 作为润滑相时材料的显 微形貌,图中白色相为银基体,浅灰色相为 MoS₂。由 图 1(a)可知, 以 MoS, 作为润滑剂时, MoS, 分布均匀, 未出现团聚的现象。图 1(b)和(c)所示为添加碳纤维之 后材料的显微形貌。由图 1(b)可知,黑色的短切碳纤 维相呈不规则分布于合金基体之中。由图 1(c)可知, 黑色的特种碳纤维相的分布状态较图 1(b)所示的复 杂,即特种碳纤维相除部分完整的柱状纤维外,还有 部分不规则颗粒存在。这些不规则颗粒为碳纤维经石 墨化后的团聚体在机械破碎过程中的产物,因此添加 特种碳纤维作为润滑相使得材料呈现出较为多样的润 滑相分布特征。同时,由图1可知,所得材料虽然添 加了不同组分的润滑相,但在热压烧结过程中,润滑 相与基体合金间界面结合良好,材料中无显著的孔洞 存在,材料致密较高,从而保证了所得材料具有良好 的力学性能。图 1(b)和(c)中存在许多均匀分布的细小 黑色斑点,这些斑点为制样过程中碳纤维破碎成硬脆 的小颗粒并在抛光过程中嵌入合金基体中所致。

2.2 碳纤维对材料摩擦磨损性能的影响

表1所列为3种材料的摩擦磨损性能。由表1可



图1 复合材料的 SEM 像

Fig. 1 SEM images of composites; (a) Ag-2.5Cu-8MoS₂; (b) Ag-2.5Cu-8MoS₂-3CF; (c) Ag-2.5Cu-8MoS₂-3SCF

表1	材料摩擦磨损测试结果
• •	

Table 1 Results of methon and wear tests of materials	Table 1	Results of friction	and wear tests	of materials
--	---------	---------------------	----------------	--------------

Sample	Average frication coefficient	Wear mass loss/mg	Wear rate/ $(10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$
Ag-2.5Cu-8MoS ₂	0.122	70.4	24.00
Ag-2.5Cu-8MoS ₂ -3CF	0.167	45.2	18.10
Ag-2.5Cu-8MoS ₂ -3SCF	0.154	11.3	4.52

知,采用 MoS,单独作为润滑相时,复合材料的磨损 率为 24×10⁻¹⁴ m³/(N·m), 当采用碳纤维和 MoS2 对材 料进行复相润滑时,材料磨损率均比采用 MoS,单独 作为润滑相时的低,其中添加特种碳纤维和 MoS₂的 样品磨损率最低,为4.52×10⁻¹⁴ m³/(N·m),比只添加 了 MoS₂的样品的耐磨性能提高降低了将近 6 倍, 耐 磨性能提高明显。主要原因是碳纤维在基体中属于硬 质相,使基体局部区域的硬度升高,能够有效地增强 材料的耐磨性能:同时,在摩擦磨损过程中,实际接 触面积很小,接触点具有很高的温度,碳纤维的高温 稳定性能有效阻碍基体的软化,减少因基体软化而产 生的粘着磨损和磨屑。表1还表明,当采用碳纤维与 MoS,对材料进行复相润滑时,复合材料的摩擦因数明 显升高,主要是由于添加碳纤维之后复合材料表面粗 糙度增加,表面微凸体之间啮合的机械作用加大[16], 加上碳纤维本身较高的耐磨性能与硬度,所以材料摩 擦因数升高。图2所示为材料的磨损量随滑动距离变 化的曲线。由图2可知,额外添加了两种不同的碳纤 维之后,两种材料的磨损质量与滑动距离依然表现出 直线关系,而且在摩擦磨损过程中磨损量不随滑动距 离发生变化,表明采用碳纤维与 MoS,对材料进行复 相润滑时,材料的稳定性较好。



图 2 磨损量随滑动距离变化曲线

Fig. 2 Change curves on wear mass loss distance

图 3 所示为 3 种复合材料的摩擦因数随滑动距离 变化的曲线。由图 3 可知,磨损初期,由于摩擦副之 间并无固体润滑膜形成,摩擦表面为金属与金属直接 接触,所以摩擦因数较高;经过一定距离的摩擦之后, 润滑相逐渐涂覆在摩擦面上并形成动态平衡,摩擦因 数随之显著降低,直到进入平稳状态。无论 MoS₂ 作 为润滑相,还是以碳纤维和 MoS₂ 对材料进行复相润 滑,复合材料的摩擦因数在经过一定的磨合期之后, 都能够保持相对稳定,波动范围很小,这对固体润滑



图3 摩擦因数随滑动距离变化曲线



复合材料的实际使用是非常有利的。

由图 3 可知,采用碳纤维和 MoS₂ 对材料进行复 相滑时摩擦因数显著升高,由 0.122 升分别高到了 0.154 和 0.167,升高幅度达到 30%。添加两种碳纤维 之后,复合材料摩擦因数升高的原因在于碳纤维的硬 度较高,且润滑性能比 MoS₂差。添加特种碳纤维的 材料摩擦因数升高幅度较添加普通碳纤维的小,原因 在于特种碳纤维在石墨化之后,纤维内部碳原子间的 乱层结构发生重排,呈现出层状的有序石墨微晶结 构^[17],石墨原子在摩擦力作用下容易在摩擦副之间滑 移形成石墨润滑层,使材料的摩擦因数能保持在相对 较低的数值。

表2所列为复合材料中基体与润滑相的压痕硬度 测试结果。硬度是衡量材料耐磨性能好坏的重要指标 表,金属基固体润滑材料中往往含有多种成分组合,

不同相区域的硬度直接影响到材料的硬度,从而影响 材料的耐磨性能。由表 2 可知,3 种材料中银基体硬 度都在 125 HV 左右,没有发生明显变化,说明不同 润滑相组合并不会对金属基体的硬度产生影响;采用 MoS₂对材料进行单相润滑时,由于 MoS₂压痕硬度较 低(45 HV 左右),而银基体的硬度比其高近 3 倍,所 以 MoS₂ 作为自润滑相时,大大降低了复合材料的整 体硬度,从一定程度上影响了材料的耐磨性能;当采 用普通市够碳纤维与 MoS₂ 对材料进行复相润滑时, 虽然碳纤维的硬度依然低于银基体硬度,但由于碳纤

维本身有较好的耐磨性能,复合材料的耐磨性能依然 有所提升。从表 2 中两种碳纤维的横向与纵向压痕硬 度值可以看出,普通碳纤维和特种碳纤维的压痕硬度 均大于 MoS₂ 的压痕硬度,其中特种碳纤维两个方向 上的压痕硬度分别为 132.895 HV 和 319.369 HV,明 显高于银基体压痕硬度,可以看出石墨化之后碳纤维 硬度值的提升非常明显,尤其是以端面露头的特种碳 纤维,压痕硬度高出银基体 2.5 倍之多,极大地提升 了材料的微区硬度。高硬度、高模量碳纤维的存在不 仅增大了摩擦时材料的塑性变形阻力,有效阻止了基 体被破坏,碳纤维自身的磨损还需要消耗大量的能量, 所以添加特种碳纤维之后,材料整体的摩擦磨损性能 得到了明显改善。

表2 材料基体与润滑相的纳米压痕硬度测试结果

 Table 2 Result of nanometer indentation hardness of matrix and lubrication phase

Samula	Hardness of MoS ₂ , HV	Hardness of CF and SCF, HV		Matrix
Sample		Lateral hardness	Vertical hardness	HV
Ag-2.5Cu- 8MoS ₂	45.765	_	_	124.573
Ag-2.5Cu- 8MoS ₂ -3CF	43.312	56.107	83.241	124.254
Ag-2.5Cu- 8MoS ₂ -3SCF	48.693	132.895	319.369	129.432

2.3 材料磨损表面与磨屑形貌

图 4 所示为含不同润滑相的复合材料摩擦表面和 磨屑 SEM 形貌。由图 4(a)和(b)可知,以 MoS2 作为润 滑相时,复合材料摩擦表面较为平整,摩擦表面犁沟 状划痕较深,出现了沿摩擦方向上的塑性变形,体现 出亚表面塑性变形的特征。这是由于 MoS, 与基体结 合强度较低,仅仅是以机械咬合的形式存在,界面结 合区域是裂纹与变形较易形成的区域, 磨屑形貌基本 为细小颗粒状,呈现出磨粒磨损的迹象。由图 4(c)和 (f)可知,当采用碳纤维和 MoS2 对材料进行复相润滑 时,复合材料摩擦表面变得不平整,存在较多的凹坑 与裂纹,复合材料的磨屑形貌呈现出片状,且尺寸较 MoS2单独作为润滑相时的要大,由原来不到10 µm, 增加到了 50 μm 左右。结合摩擦表面形貌与磨屑形貌 分析可是,添加了碳纤维之后,复合材料出现类似剥 层磨损^[18]的形貌。凹坑与裂纹较多的原因主要可能 是,在摩擦过程中摩擦表面露头碳纤维被碾碎,形成 许多细小的石墨(碳)颗粒,并且逐渐被应力挤出并向 摩擦面转移, 使原石墨(碳)颗粒位置空缺形成缺陷, 且这些缺陷位置容易形成裂纹并且扩展。由于碳纤维 加入后复合材料脆性较大,摩擦表面在循环应力作用 下,在表层产生剪切塑性变形并不断累积,出现周期 性位错,进而导致更多的裂纹或者空穴; 当裂纹在一



图 4 材料摩擦表面(左)与磨屑(右)的 SEM 像

Fig. 4 SEM images of worn surface(left) and debris (right) of composites: (a), (b) Ag-2.5Cu-8MoS₂; (c), (d) Ag-2.5Cu-8MoS₂-3CF; (e), (f) Ag-2.5Cu-8MoS₂-3SCF

定深度形成之后,平行于表面的正应力阻止裂纹向深 度方向扩展,所以裂纹在一定深度沿平行表面的方向 延伸;当裂纹扩展到临界长度之后,在裂纹与表面之 间,就以片状磨屑的形式剥落下来^[18-19]。

2.4 碳纤维对固体润滑膜成膜特性的影响

图 5 所示为 Ag-2.5Cu-8MoS₂ 样品摩擦对偶盘表 面形貌及 EDS 分析。图 5 中深灰色区域即为 MoS₂ 润 滑膜所覆盖的区域。由 EDS 分析可知,这些深灰色区 域并不是由纯粹的 MoS₂ 固体润滑膜所组成,而是由 细小的金属颗粒与 MoS₂ 颗粒组成。由于从复合材料 基体表面剥落的磨屑并不是直接形成润滑层,而是在 循环应力作用下多次被碾压、破碎,被碾碎的 MoS₂ 与金属颗粒一起在摩擦表面聚集,在载荷的作用下, 摩擦副之间的相对运动将摩擦表面上聚集的含有金属 磨屑,MoS₂颗粒的混合粉末慢慢压平,并与对偶盘基 体逐渐结合起来,阻止了摩擦副之间的直接接触,起 到了固体润滑的效果。 图 6 所示为添加碳纤维的两种样品对偶盘表面形 貌和碳元素面扫描分析。从图 6 可以看到,两种材料 的对偶盘表面有许多细小的黑色颗粒镶嵌在内,这些 颗粒是从基体上剥落下来的碳(石墨)颗粒。在摩擦力 作用下,细小的碳(石墨)颗粒被均匀涂覆在对偶面上, 能够对固体润滑膜的平衡起到补充作用,使润滑膜保 持完整。在图 6 所示碳元素面扫描结果中,有斑点分 布的区域即为碳元素存在的区域。由图 6 可知,添加 不同碳纤维的材料在摩擦测试之后,碳元素均密集地 分布在对偶面上,证明润滑膜中含有大量的碳(石墨) 存在,这对复合材料润滑膜的完整性起到了很大的促 进作用。由于润滑膜分布的连续性与均匀性对于摩擦 性能的提高至关重要,所以碳膜的形成在一定程度上 改善了复合材料的耐磨性能。对比图 5 和 6 可发现, 只添加了 MoS₂ 作为润滑相的 Ag-2.5Cu-8MoS₂ 复合材 料在润滑膜成膜时是由细小金属颗粒与 MoS₂ 颗粒组 成,而添加了碳纤维之后,润滑膜的形成是由碳纤维 被碾碎形成的碳膜与 MoS₂ 润滑膜、细小金属颗粒一



图 5 Ag-2.5Cu-8MoS₂样品对偶盘表面形貌及 EDS 分析结果

Fig. 5 SEM image of counterpart (a) and result of EDS analysis (b) of Ag-2.5Cu-8MoS₂ sample



图6 摩擦对偶面形貌以及碳元素面扫描结果

Fig. 6 SEM images of counterpart(left) and surface scan of carbon element on counterpart(right): (a), (b) Ag-2.5Cu-8MoS₂-3CF; (c), (d) Ag-2.5Cu-8MoS₂-3SCF

起共同形成复合润滑层,润滑层中各润滑相的结合能 力较好,使复合材料耐磨性能获得显著提升。

3 结论

 1) 以碳纤维和 MoS₂对材料进行复相滑可以显著 提高银基固体润滑材料的耐磨性能,添加特种碳纤维 时,材料的磨损率由 24×10⁻¹⁴ m³/(N·m)(Ag-2.5Cu-8MoS₂)降至 4.52×10⁻¹⁴ m³/(N·m)(Ag-2.5Cu-8MoS₂-3SCF),耐磨性能提升近6倍。

2) 固体润滑剂本身的硬度对复合材料的耐磨性 能有较大影响,当固体自润滑剂的润滑性能接近时, 固体润滑剂硬度越高,复合材料耐磨性能越好。

3) 摩擦过程中固体润滑转移膜的形成均伴随着 金属基体磨屑在压应力作用下缓慢碾压、破碎、嵌入 对偶材料表面的过程,直至摩擦副之间形成一种较为 稳定的由固体润滑剂、软金属碎屑组成的混合润滑膜。

REFERENCES

- HE Da-hai, MANORY R. A novel electrical contact material with improved self-lubricating for railway current collectors[J].Wear, 2001, 249: 626–636.
- [2] 曹同坤, 邓建新. 自润滑材料及其摩擦特性的影响因素[J]. 材料导报, 2004, 18(12): 80-82.
 CAO Tong-kun, DENG Jian-xin. Self-lubrication material and relative influencing factors of its tribological characteristics[J].
 Materials Review, 2004, 18(12): 80-82.
- [3] JOSE S M, SONIA L E, CARLOS P. The challenge of ceramic/metal microcomposites and nanocomposites[J]. Progress in Materials Science, 2007, 52: 1017–1090.
- [4] 杨威锋.固体自润滑材料及其研究趋势[J]. 润滑与密封, 2007, 32(12): 118-122.
 YANG Wei-feng. Solid self-lubricating materials and research trends[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(12): 118-122.
- [5] JOHN S, PRZYBYSZEWSKI. A review of sliding and rolling-element electrical contacts in vacuum[R]. Cleveland: NASA, 1967: 2–5.
- [6] LIN Wei, XI Xiang-rong, YU Chao-sheng. Research of silver plating nano-graphite filled conductive adhesive[J]. Synthetic Metals, 2009, 159: 619–624.

- [7] MOUSTAF S F, EI-BADRY S A, SANAD A M. KIEBACK B. Friction and wear of copper-graphite composites made with Cu-coated and uncoated graphite powders[J]. Wear, 2002, 253: 699–710.
- [8] HIROTAKA K, MASAHIRO T, YOSHIRO I, KAZUO W, YOSHINORI S. Wear and mechanical properties of sintered copper-tin composites containing graphite or molybdenum disulfide[J]. Wear, 2003, 255: 573–578.
- [9] VUONG T T, MEEHAN P A. Wear transitions in a wear coefficient model[J]. Wear, 2009, 266: 898-906.
- [10] FENG Yi, ZHANG Min, XU Yi. Effect of the electric current on the friction and wear properties of the CNT-Ag-G composites[J]. Carbon, 2005, 43(13): 2685–2692.
- [11] MARKOV D, KELLY D. Mechanisms of adhesion-initiated catastrophic wear: Pure sliding[J]. Wear, 2000, 239(2): 189–197.
- [12] VEST C E. Adaptation of an MoS₂ in situ process for lubricating spacecraft mechanical components[R]. Atlanta: NASA, 2009: 6–8.
- [13] FRITSCH C, MONDIER J B. Silver-based brush electric contacts performances[J]. Space Mechanisms and Tribology, 1999, 438: 37–42.
- [14] 唐谊平,刘 磊,赵海军,朱建华,胡文彬. 短碳纤维增强铜 基复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. 材料工程, 2007(4): 53-60.

TANG Yi-ping, LIU Lei, ZHAO Hai-jun, ZHU Jian-hua, HU Wen-bin. Study of friction and wear properties of Cu/Short carbon fibers composites[J]. Materials Engineering, 2007(4): 53–60.

- [15] XIA Long, JIA Bin-bin, ZENG Jun. Wear and mechanical properties of carbon fiber reinforced copper alloy composites[J]. Mater Charact, 2009, 60: 363–371
- [16] MA Wen-lin, LU Jin-jun. Effect of surface texture on transfer layer formation and tribological behaviour of copper-graphite composite[J]. Wear, 2011, 270: 218–229.
- [17] 黄启忠. 高性能炭/炭复合材料的制备, 结构与应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010: 370-372.
 HUANG Qi-zhong. Fabrication, structure and application of high-performance carbon/carbon composites[M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 370-372.
- [18] SUH N P. The delamination theory of wear[J]. Wear, 1973, 25(1): 111–124.
- [19] 温诗铸,黄 平. 摩擦学原理[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版 社, 2008: 282-283.
 WEN Shi -zhu, HUANG Ping. Tribological principle[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 282-283.

(编辑 何学锋)