

特深井钻杆接头耐磨减摩双向防护机制研究

吴迪, 乔铭朝*, 梁晨帆, 孔令镨, 王瑜, 张凯

(中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室, 北京100083)

摘要: 针对深井、超深井、特深井钻井过程中钻杆接头耐磨带-套管摩擦副的严重磨损问题, 建立了钻柱-套管耐磨减摩的双向防护模型, 提出了金刚石复合材料耐磨带与套管的双向防护机制, 并开展了金刚石复合材料耐磨带摩擦学性能实验验证。该研究阐释了金刚石复合材料耐磨带耐磨减摩的机理, 并通过构建包含岩层轴向反力和接触载荷的钻柱-套管的力学模型, 采用自主研发的摩擦磨损试验机进行实验。研究不同工况下钻杆接头的磨损量及磨损形貌特征, 结合拉曼光谱揭示了表面摩擦化学反应机制。结果表明: 金刚石复合材料耐磨带通过硬质相支撑和自润滑协同作用, 可使摩擦系数显著降低, 形成的梯度复合保护层和石墨化转移膜能有效实现钻杆接头与套管表面的双向防护。研究成果为深井钻杆接头耐磨带结构优化提供了理论支撑与实验依据。

关键词: 钻杆接头耐磨带; 套管磨损; 钻柱动力学; 磨损机理; 摩擦实验; 双向防护; 特深井

中图分类号: P634.4; TE921+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)06-0042-10

Research on bidirectional protection mechanism for wear and friction reduction of drill pipe joints in extra-deep wells

WU Di, QIAO Mingzhao*, LIANG Chenfan, KONG Lingrong, WANG Yu, ZHANG Kai

(State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the serious wear problem of the wear band and casing friction pair of drill pipe joint during drilling in deep, ultra-deep and extra-deep wells, the bidirectional protection model of drill string and casing wear and friction reduction was established in this study. The bidirectional protection mechanism of diamond composite wear band and casing was proposed, and the tribological properties of diamond composite wear band materials were verified by experiments. This study systematically explained the wear resistance and friction reduction bidirectional protection mechanism of diamond composite wear band material. By constructing a drillstring-casing mechanical model containing rock axial reaction and contact load, the friction and wear testing machine independently developed was used to conduct experiments, and the friction coefficient, wear amount and wear morphology characteristics were compared and analyzed under different working conditions. Combined with Raman spectroscopy, the mechanism of surface tribochemical reaction was revealed. The results show that through the synergistic effect of the hard phase support and self-lubrication, the friction coefficient of the diamond composite wear zone can be significantly reduced. The formed gradient composite protective layer and graphite transfer film can effectively achieve two-way protection between the drill pipe joint and the casing surface. The research results provide theoretical support and experimental basis for the structural optimization of wear band of drill pipe joints in deep wells.

Key words: drill pipe joint wear band; casing wear; drill string dynamics; wear mechanism; friction experiment; bidirectional protection; extra-deep well

收稿日期: 2025-03-12; 修回日期: 2025-03-23 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.06.005

基金项目: 国家重点研发计划课题“特深井钻探管材服役损伤规律与高效双向防护技术研究”(编号: 2023YFB3711704)

第一作者: 吴迪, 男, 汉族, 2002年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为岩土钻掘工程, 北京市海淀区学院路29号, 2002240067@email.cugb.edu。

通信作者: 乔铭朝, 男, 汉族, 2002年生, 硕士研究生, 机械工程专业, 研究方向为地质装备, 北京市海淀区学院路29号, 2102240014@email.cugb.edu。

引用格式: 吴迪, 乔铭朝, 梁晨帆, 等. 特深井钻杆接头耐磨减摩双向防护机制研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 42-51.

WU Di, QIAO Mingzhao, LIANG Chenfan, et al. Research on bidirectional protection mechanism for wear and friction reduction of drill pipe joints in extra-deep wells[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 42-51.

0 引言

“向地球深部进军”是我国能源安全战略的核心任务之一。随着全球能源需求快速增长,浅层油气资源逐渐枯竭,石油、天然气等资源勘探开发逐渐向深井、超深井甚至特深井延伸发展^[1-2]。然而,地球深部地层的高温、高压、强腐蚀及复杂的岩性条件对钻井装备的可靠性提出了前所未有的挑战^[3-5]。钻柱作为连接钻头与地面设备的核心部件,是深入地球内部的重要工具,钻柱的可靠性直接决定了钻井效率和作业安全。钻杆接头作为钻杆之间的连接单元,长期承受轴向载荷、扭矩、振动及井壁摩擦等复杂的力学作用,是钻柱系统中磨损最严重的部件之一。钻杆柱在套管内旋转钻进过程中,钻杆、钻杆接头会与套管内壁发生连续的滑动摩擦接触以及碰撞冲击、振动冲击等非连续接触,这些破坏性行为会导致钻柱和套管发生磨损,强度降低而失效,严重时将诱发井下事故,耗费人力物力进行修补将造成巨大而经济损失,尤其是在特深井工程中,发生井下事故的经济损失极大^[6-7]。

目前,国内外许多学者研究提出降低套管磨损的主要措施包括对转速、钻压等钻井工艺参数进行优化,采用套管防磨套,使用润滑性好的钻井液或钻井液减摩剂,以及采用钻杆接头耐磨带。其中采用钻杆接头耐磨带的措施具有很好的效果和经济效益。钻杆接头耐磨带是采用堆焊的方式在钻杆接头的外表面形成一个耐磨的环形带,起到隔离钻杆接头和套管的作用,避免钻杆接头与套管直接接触,以降低钻杆接头和套管的磨损。钻杆接头耐磨带在深井、大位移井、大斜度井的钻探工程中得到了广泛应用。为响应“向地球深部进军”战略需求,本文开展钻杆接头耐磨带与套管的耐磨减摩双向防护机制研究,致力于减轻钻杆接头与套管的磨损失效问题。

1 钻柱-套管磨损研究现状

1.1 钻柱-套管的磨损机理及影响因素

在钻进过程中,套管不仅受到地层压力的作用,还受到磨损、腐蚀、钻柱冲击的作用,这些因素相互耦合、协同作用,使套管发生不同形式、不同程度的磨损和变形,显著降低其抗挤毁强度和抗内压强度。由于井下的工况极其复杂,包含许多难以确定的激励作用,国内外已有学者在这方面开展了相

关研究^[8-12]。这些激励作用将导致钻杆及钻杆接头与套管发生磨损(见图1),由于钻杆接头的外径大于钻杆,因此钻杆接头与套管的接触面积更大,与套管发生的磨损更多。钻柱的动力学行为十分复杂,钻杆、钻杆接头和套管之间的磨损形式多种多样,主要的磨损形式为滑动磨损、冲击磨损以及腐蚀磨损等。不同的磨损形式其磨损机理也各不相同,主要的磨损机理分别为磨粒磨损、黏着磨损以及疲劳磨损。Best^[13]、Williamson等^[14]经过现场磨损的检测结果对比验证表明:在接触应力较小时,占据主导地位的磨损机理是磨粒磨损;在接触应力较大时,占据主导地位的磨损机理是黏着磨损。由于实际钻井工程中工况十分复杂,影响套管磨损的因素有很多,包括:接触力、钻井液、钻压、转速、温度、耐磨带材料、钻杆和套管的材料、润滑剂等,其中占主导地位的磨损因素有:接触力,钻井液,耐磨带性能及套管的钢级。

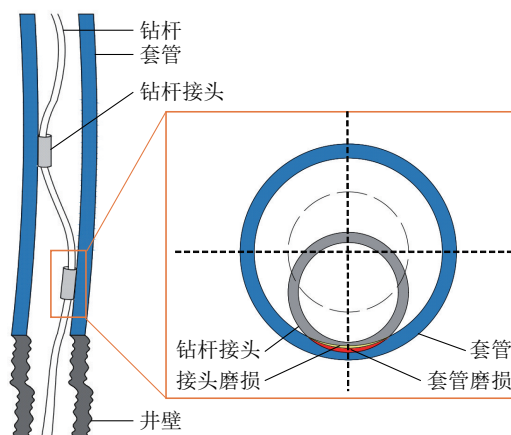


图1 钻杆接头与套管的磨损示意

Fig.1 Wear diagram of joint and casing

1.2 钻杆接头耐磨带材料的研究进展

套管磨损失效是钻柱-套管系统在动态接触工况下相互作用的结果,加焊钻杆接头耐磨带是一个可以有效保护钻杆接头以及套管,降低套管磨损的措施。钻杆接头耐磨带在国内外的技术发展路径比较相似,钻杆接头耐磨带材料的发展过程可划分为2个阶段:第1阶段为硬质合金材料阶段,第2阶段为“套管友好型”材料阶段。耐磨带最初采用的是硬质合金堆焊涂层材料,这种硬质合金材料耐磨带可以提高钻杆接头的表面硬度,降低钻杆接头的磨损,延长钻杆的使用寿命。但由于硬质合金材料

耐磨带的基体材料较软,导致硬质合金颗粒很快出露,造成钻杆接头与套管发生严重的三体磨粒磨损,导致套管的磨损速率提高,进而诱发套管失效。因此国内外研究转为重点关注钻柱与套管的双向防护机理,主要包含耐磨带材料表面改性技术及非旋转防磨装置的结构设计。其中非旋转防磨装置的结构设计是将钻柱-套管的钢-钢的硬接触转化为钻柱-滑套的软接触,降低双向磨损以实现双向防护。耐磨带材料表面改性技术是开发低摩擦系数的摩擦副材料,在提高钻柱耐磨性的同时降低对套管的犁沟式磨损,实现双向防护。研发新的耐磨性好、硬度较高、与套管的磨损率较低的套管友好型材料耐磨带成为了重要研究方向。套管友好型材料耐磨带主要分为非晶态合金材料耐磨带和晶态复合涂层材料耐磨带,非晶态材料的摩擦因数非常低,对套管的磨损很小,但由于非晶态材料耐磨带只有薄薄的一层,耐磨性不足,因此非晶态材料耐磨带不能很好的保护钻杆接头。而晶态材料耐磨带既可以有效保护钻杆,又可以有效降低套管的磨损,目前代表性的产品主要是由美国安科公司研发的 ARNCO 系列碳化铬合金耐磨带,其具有很好的工作性能。

国内耐磨带材料的发展起步较晚,工业化应用仍以传统硬质合金材料耐磨带为主。套管友好型材料耐磨带的研发已经取得了很大的进步,如 Nate 系列耐磨带材料(Fe 基非晶/纳米晶复合涂层)、BoTn 系列耐磨带材料(B₄C-TiN 梯度强化涂层)、PT 系列耐磨带材料(原位自生 Pt/Cr 金属间化合物涂层)、金刚石复合材料耐磨带,部分性能指标(如摩擦系数、套管磨损率)已达到或超越国外同类耐磨带,但大部分仍停留在实验室验证阶段,还未大量投入应用^[15]。本研究聚焦于钻柱-套管的双向防护机理,通过摩擦磨损机理解析金刚石复合材料耐磨带-套管摩擦副系统,揭示其界面损伤规律。

2 钻柱套管双向防护模型

2.1 金刚石复合材料耐磨带耐磨减摩双向防护机理

金刚石复合材料耐磨带作为钻杆接头的关键强化部件,其耐磨性能直接决定了钻柱的使用寿命。金刚石复合材料耐磨带是通过高温高压烧结工艺与 WC 基体复合而成的,是一种金刚石增强

WC 基复合材料的新型耐磨带材料。金刚石复合材料因其独特的结构和摩擦学性能,具有优异的耐磨减摩性能^[16-17]。

金刚石复合材料耐磨带是一种梯度结构的复合材料,其偏磨工况下的动态磨损机制呈现阶段性演化特征,主要分为两个阶段:初始磨损阶段:接触应力主要分布于 WC 基体,通过微切削作用与塑性变形的累积,WC 基体因硬度较低将优先磨损剥离。稳态磨损阶段:随着基体材料持续损耗,金刚石部分逐渐出露并成为主要摩擦界面(如图 2 所示)。由于金刚石的硬度极高^[18],可抵抗大部分磨粒犁削作用,在钻井中能表现出优异的耐磨性能。

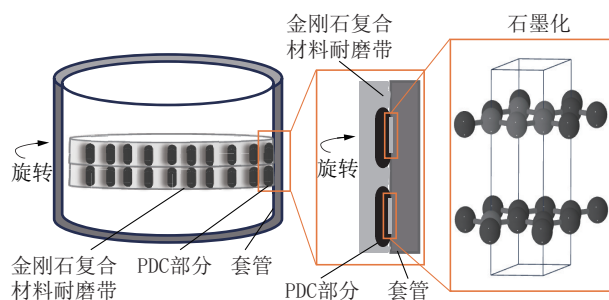


图2 金刚石出露为主要摩擦界面并且发生石墨化示意
Fig.2 Partial exposure of diamond as the main friction interface and graphitising diagram

金刚石因其高硬度可抵挡绝大部分的硬质颗粒犁削作用,可以显著降低三体磨粒磨损,减少套管损伤。同时,由于复合材料的 WC 基体部分比 PDC 磨损得更快,使金刚石部分暴露得更多^[19]。由于金刚石部分和 WC 基体部分之间的高度差越来越大,钻井液很容易吸附在滑动表面上,从而减少 WC 基体和套管之间的接触,这种结构有利于通过摩擦过程在表面形成连续的润滑膜^[20]。根据赫兹接触理论,金刚石部分的高硬度会使接触区域形成应力屏蔽效应,接触应力峰值将从套管内壁转移至金刚石部分,在较高的接触载荷下,摩擦热导致接触面产生高温,在高温条件下,诱发金刚石表层金刚石 $sp^3 \rightarrow sp^2$ 相变,原位生成石墨化润滑膜^[21-22],降低摩擦系数,可以显著减轻套管疲劳损伤。因此,金刚石复合材料耐磨带在钻井中可表现出优异的减摩性能。

石墨的润滑机理是其独特的层状晶体结构与物理特性协同作用的结果。石墨是由通过范德华

力排列成蜂窝状的平面碳原子层叠合而成的,平面碳原子层内C-C键长很短共价键强度高,而石墨层间距离较大,作用力较弱,层间很容易被剪切发生层间滑移。同时由于石墨对气体的吸附作用,使气体分子能够插入到石墨层间,进一步减小石墨的层间作用力,增加石墨层间距离,从而降低石墨层间的剪切性能,降低摩擦系数。因此在摩擦过程中,石墨层可以作为固体润滑剂,降低摩擦和磨损。

2.2 钻柱-套管载荷建模

载荷的大小和频率是影响钻杆接头与套管磨损的关键因素,较大的载荷将导致更高的接触应力,加剧磨损。因此对于钻杆接头与套管之间的载荷的分析是十分必要的。为了分析钻杆接头与套管之间的接触载荷,本文建立了钻柱-套管的载荷模型。钻柱是约束于井眼里的变截面、变刚度的旋转细长杆,钻柱与井壁、套管的间隙因井径、钻具外径的变化而变化。在实际钻进过程中,地面装备驱动钻柱旋转,并根据钻压动态地调整钻柱的轴向力,井眼存在一定的狗腿度,钻柱会发生弯曲,并且不时地与井壁、套管发生碰撞,并且碰撞的位置不停地变化,使得实际的钻柱运动包含了纵向振动、扭转振动、横向振动及涡动。因此,钻柱的动态行为的计算是包含了几何非线性、接触非线性的极其复杂的动力学问题。

钻柱系统的动力学方程一般可以表示为:

$$[M]\{\ddot{U}\}+[C]\{\dot{U}\}+[K]\{U\}=\{Q\} \quad (1)$$

式中:[M]——系统的全局组装质量矩阵,和时间相关,[M]=[M_t]+[M_r]+[M_φ]-2[M_e];[M_t]——平移质量矩阵;[M_r]——旋转惯性质量矩阵;[M_φ]——扭转质量矩阵;[M_e]——扭转横向惯性耦合质量矩阵;[$\ddot{U}$]、[$\dot{U}$]、[U]、[Q]——广义加速度、速度、位移及外力矢量;[C]——阻尼矩阵;[K]——系统的全局组装刚度矩阵,与[M]对称,[K]=[K_a]+[K_b]+[K_φ]+[K_{gs}];[K_a]——轴向刚度矩阵;[K_b]——弯曲刚度矩阵;[K_φ]——扭转刚度矩阵;[K_{gs}]——重力场引起的轴向刚度矩阵,包含了钻柱拉伸场的刚化效应和压缩场的软化效应。

考虑钻柱拉伸场的刚化效应、压缩场的软化效应和钻柱旋转的陀螺仪效应,将钻柱系统的动力学方程转化为拉格朗日方程的变分形式,钻柱的运动方程可写成组装后的一般形式^[23]:

$$[M]\{\ddot{e}\}+[S]\{\dot{e}\}+[K]\{e\}=\{Q\} \quad (2)$$

式中:[$\ddot{e}$]——加速度;[S]——钻柱系统的陀螺矩阵,为斜对称矩阵;[$\dot{e}$]——速度;[e]——变形矢量。

2.2.1 岩层的轴向反力

钻头与岩层的相互作用会导致钻柱动力失稳,并引发钻柱的振动。受不均匀岩层的影响,尤其是坚硬的地层,将在钻柱上产生近似周期变化的轴向力,代表来自岩层的轴向反力一般可以表示为:

$$-P(t)=P_0+P_t\sin\omega_t t \quad (3)$$

式中: P_0 ——钻压的静态分量; P_t 、 ω_t ——由钻头旋转产生的钻压波动分量的幅度和频率,这种波动分量的频率与钻头的类型有关。

2.2.2 套管与钻柱接触力

对钻柱-套管构成的非光滑接触系统的运动进行研究,非光滑系统在准静态平衡状态下钻柱与井壁、套管连续接触时径向以及切向接触力的计算方法。

图3节点参考系 xyz 中,表示钻柱的一根梁横截面与井壁之间的接触,其中 z 为轴向方向, O 和 O' 分别为井中心和梁中性线的中心, Ω 为钻柱的旋转速度, u 、 v 为两个横向平移, r 为径向位移, $r=\sqrt{u^2+v^2}$, j_0 为钻柱与井壁的径向间隙, G 为梁横截面在井眼中的穿透位移, $G=r-j_0$ 。梁在井筒中的横截面穿透力包含了沿法线方向 $\vec{n}$ 的法向接触力 $\vec{F}_{cn}$ 、沿切线方向 $\vec{t}$ 的切向摩擦力 $\vec{F}_{ct}$ 及 z 轴的切向摩擦扭矩 $\vec{T}_{ct}$ 。其中影响接头与套管磨损占主导地位的因素是法向接触力 $\vec{F}_{cn}$ 。

通过对钻柱部件进行建模,由于弯曲偏转,将

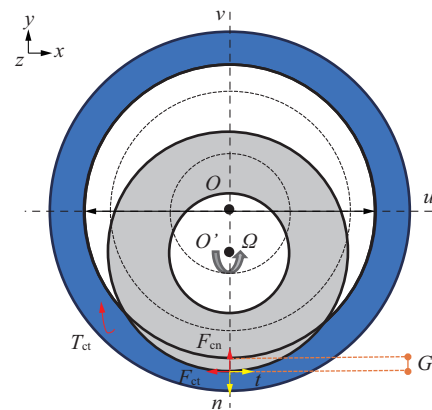


图3 受力分析

Fig.3 Force analysis

导致钻柱与套管接触产生一些冲击和摩擦效应。法向接触力在钻柱横截面中可以定义为^[24]:

$$\vec{F}_{cn} = -(K_c G + C_c \dot{G}) \vec{n} \quad (4)$$

式中: $\vec{n} = \frac{u}{r} \vec{x} + \frac{v}{r} \vec{y}$; $\dot{G}$ ——穿透速度, $\dot{G} = (\dot{u}u + \dot{v}v)/r$; K_c 、 C_c ——标称接触刚度和阻尼, 其中第1项用来描述弹性变形, 第2项表示接触过程中损失的能量。

依据旋转钻柱的动能和势能, 由赫兹接触定律可以推导出钻柱与套管直接之间的冲击力 F :

$$F = \begin{cases} -\text{sign}(r) K_h (r - j_0)^{\frac{3}{2}} & (|r| \geq j_0) \\ 0 & (|r| < j_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_h ——赫兹刚度, 可以从材料属性和接触几何形状获得。

假设钻杆接头与套管/井壁之间的接触为弹性接触, 采用赫兹接触理论计算接触区域的应力分布。赫兹接触理论假设接触区域为椭圆形, 接触应力分布为抛物线形。接触应力可以表示为:

$$\sigma = 3(F_{cn} + F)/(2\pi ab) \quad (6)$$

式中: a 、 b ——接触椭圆的长半轴和短半轴。

根据上述接触模型计算可以得出钻杆接头法向接触应力, 见图4。

3 钻杆接头与套管的摩擦实验

3.1 实验方案

基于金刚石复合材料耐磨带耐磨减摩机理及建立的钻柱-套管载荷模型, 通过摩擦实验, 定量评估金刚石复合材料耐磨带在模拟钻井工况下的摩擦磨损行为, 验证理论模型的可靠性, 并揭示金刚石复合材料与套管摩擦界面损伤的微观机制。

3.1.1 实验所选材料

实验采用钻井工程中两种常用的材料构建销-盘摩擦体系。试样盘采用 38CrMoAl 钢代表套管材料, 试样销选用的聚晶金刚石复合材料具有超高的

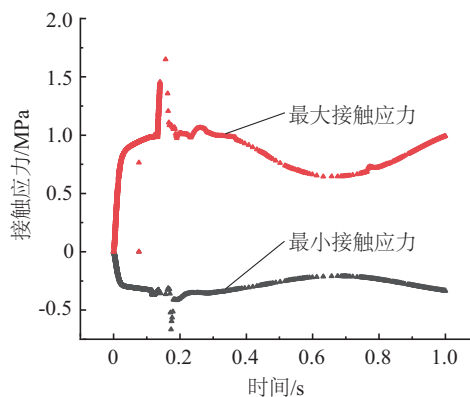


图4 钻杆接头法向接触力时程曲线

Fig.4 Normal contact force time history curve of drill pipe joint

硬度和优异的抗冲击、耐磨和抗疲劳特性。摩擦过程如图5所示。

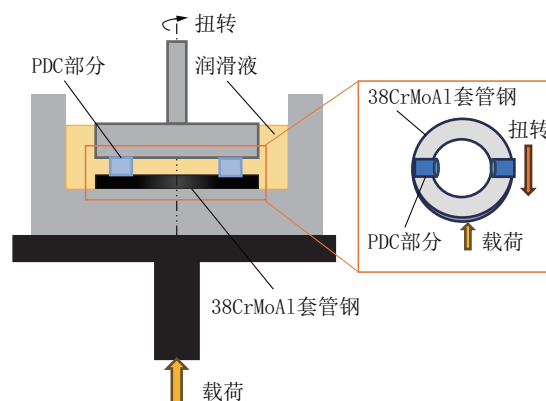


图5 38CrMoAl套管钢和金刚石复合材料耐磨带摩擦示意

Fig.5 Schematic diagram of friction between 38CrMoAl casing steel and diamond composite material wear-resistant band

实验所用试样均采用标准生产工艺制备, 试样盘与试样销的几何参数分别为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 和 $\varnothing 16 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ 。实验材料的名义化学成分见表1。

表1 实验所用材料的名义化学成分

Table 1 Nominal chemical composition of materials used in the experiment

材 料	C	Si	Mn	S	Cr	Al	Mo	P	Ni	Cu	WC	Co
38CrMoAl	0.35~0.42	0.20~0.45	0.30~0.60	≤ 0.035	1.35~1.65	0.70~1.10	0.15~0.25	≤ 0.035	≤ 0.030	≤ 0.030		
PDC	50~70				0.90~1.20				≤ 0.030	≤ 0.030	8~40	3~10

为了较为准确地模拟井下环境,配备了接近于钻井液化学成分的实验用钻井液,表2为实验用钻井液配方。其中0.5 wt%降滤液羧基羟基烯烃共聚物(Redul)的中的羟基添加可能催化金刚石石墨化,并吸附在摩擦界面形成润滑膜,使摩擦系数降低。需特别说明的是,本实验配置的钻井液未引入任何腐蚀性成分,以确保磨损机制研究的可控性^[25]。

表2 钻井液配方

Table 2 Chemical composition of drilling fluid

成分	质量分数/%
膨润土	4
降滤液羧基羟基烯烃共聚物(还原剂)	0.5
降滤液两性离子聚合物(HT-301)	0.5
氯化钾	1
I型磺化酚醛树脂	3
复合石墨润滑剂(RH-2)	2

3.1.2 实验所用试验机

摩擦实验在MMW-1型摩擦磨损试验机(见图6)上进行,实验机为济南欧拓测试设备有限公司独立研发。实验机自上而下依次由摩擦磨损装置、加载单元、压力传感器、弹簧、偏心盘等装置组成。实验机的负载由液压系统提供,销盘之间的圆周运动由伺服电机驱动,试样销被夹持于上夹持装置,实验过程中不断旋转运动,试样盘被夹持于下夹持装置,实验过程中静止。

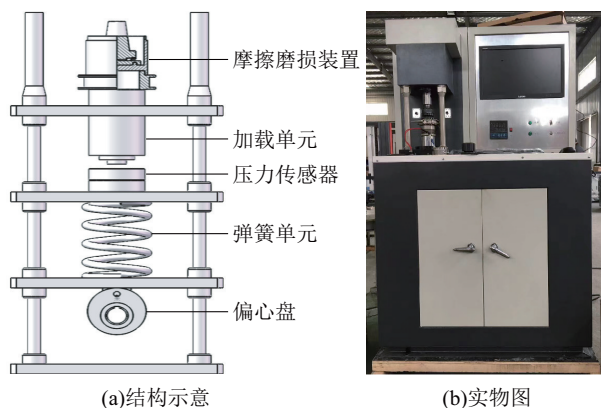


图6 试验机

Fig.6 Testing machine

钻井液作为润滑介质储存于试样销与试样盘的耦合摩擦面之间,以实现润滑功能。弹簧与偏心机构产生振动,产生的振动载荷通过加载单元传递

至试样盘表面,从而对旋转销施加振动冲击^[25]。

3.1.3 实验参数

依据前述岩层轴向反力与钻井接触力的预测范围设定阶梯加载模式;实验采用滑动磨损测试系统,模拟钻杆耐磨带与套管在实际钻井作业中的摩擦磨损行为。由于钻杆-套管相对尺寸差异较小(径向间隙31.7 mm),其接触力学行为可简化为平面-平面接触。鉴于实验室复现全尺寸接触工况存在技术难点,本实验参照在钻具摩擦磨损试验中的等效模拟方法,采用销-盘摩擦副构建接触体系。实验参数设置为:载荷150 N,转速200 r/min,实验时间30 min^[26]。该参数设计基于实际钻井工况中钻杆与套管的接触压力和相对运动速度,能够有效模拟井下冲击滑动磨损环境^[25,27]。实验中,钻杆试样与套管试样在润滑条件下进行对磨,润滑介质采用模拟钻井液,以还原井下真实工况。通过该实验,可系统研究钻杆耐磨带材料和套管的磨损行为,为揭示磨损机理及优化设计提供实验依据。

3.1.4 实验过程

实验过程包含以下流程:首先采用JP-020型超声波清洗仪对销和盘进行清洗处理,随后在DHG-9145A型恒温干燥箱中进行干燥处理,之后对其进行称量,使用ESJ50-5型精密电子天平将每组试样在实验前后均重复称量三次,该天平的数据精度为0.1 mg^[27]。进行完上述处理之后将试样安装在MMW-1型微机控制摩擦试验机的夹具上开展相应工况下的摩擦磨损实验。

实验结束后采用扫描电镜(SEM)对摩擦界面进行形貌表征,以分析磨损形貌特征与磨损机制。

3.2 摩擦系数和磨损量

由于摩擦副材料密度差异较大,为了直观地反映磨损的大小,选择磨损体积来定义每次测试中的磨损,可以表示为^[25]:

$$V = M / 1000\rho \quad (7)$$

式中: V ——样品的磨损体积,mm³; M ——三次测试的平均磨损质量,g; ρ ——样品的密度,g/cm³。

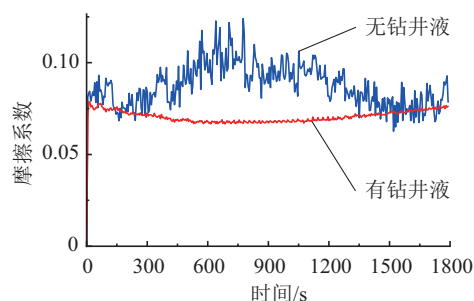
磨损率 k 根据以下公式计算:

$$k = V / NL \quad (8)$$

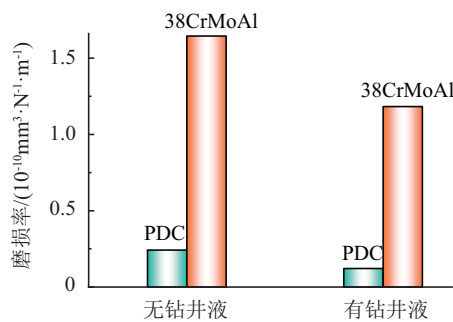
式中: N ——负载,N; L ——总滑动距离,m。

由图7可以观察到,钻井液的润滑对摩擦的改善有着较为显著的作用。从摩擦系数曲线来看,未

加入钻井液前,摩擦系数的波动比较大,在前600 s内摩擦系数呈现递增的趋势,之后逐渐平稳,摩擦系数在1200 s之后稳定在0.075左右。加入钻井液之后,在其它实验条件完全相同的情况下,销盘摩擦对之间的摩擦系数波动明显平缓,始终在0.075左右。由于钻井液的润滑和密封作用,在加入钻井液之后PDC和钢盘的磨损率都有一定的下降。



(a)摩擦系数曲线



(b)磨损率

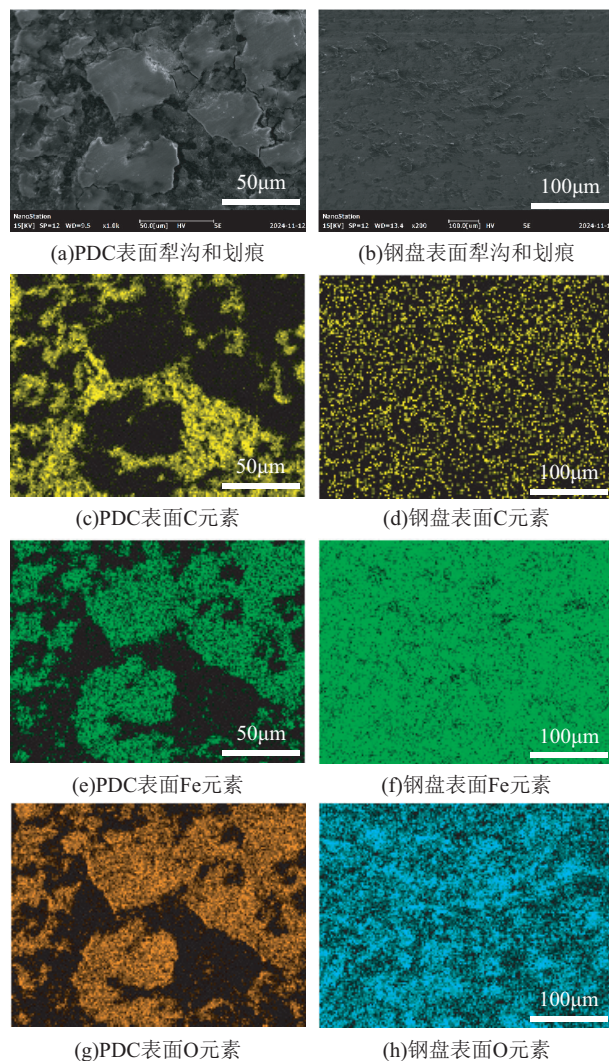
图7 摩擦系数曲线和磨损率

Fig.7 Friction coefficient curve and wear rate

3.3 磨损形貌

使用扫描电镜(SEM)对无钻井液条件下进行摩擦实验后的销和盘的磨损形貌进行观察(见图8),以了解其磨损机理。PDC表面有一些轻微的犁沟和划痕,并且在PDC表面黏着了大量的氧化铁薄膜,可能因局部温度升高,钢盘表面发生了氧化反应。

观察钢盘表面的SEM图可知,钢盘表面黏着了大量的C层和一部分氧化铁薄膜,伴随有轻微的划痕。金刚石在高温下会发生石墨化,在摩擦磨损实验中,随着局部温度的升高,在SEM图中发现钢盘中黏着了大量的C元素,但这不足以证明金刚石发生了石墨化,所以要对钢盘上的扫描部分进行拉曼光谱检测,以确定金刚石是否发生了石墨化并且转移到了钢盘表面。



(g)PDC表面O元素

(h)钢盘表面O元素

图8 无钻井液条件下的表面形貌

Fig.8 The surface morphology under no drilling fluid condition

同时观察在其它实验条件完全相同时有无钻井液条件下销和盘的磨损形貌(见图9),通过SEM图发现PDC表面存在少量铁元素附着,表面相对清洁且氧化程度较低。钢盘表面持续划擦形成犁沟,因钻井液隔绝氧气并起到冷却的作用,抑制了氧化反应,所以钢盘表面并未发现大量的氧化铁薄膜,而存在少量从PDC上脱落的磨粒。

3.4 拉曼分析

为了确定钢盘表面的C层是否为金刚石石墨化后转移到钢盘表面,对钢盘表面测试其拉曼谱图(见图10)。曲线中均可见代表金刚石的D峰和代表石墨存在的碳原子 sp^2 杂化参与成键的G峰,由此可以确定钢盘表面的C为PDC在高温发生石

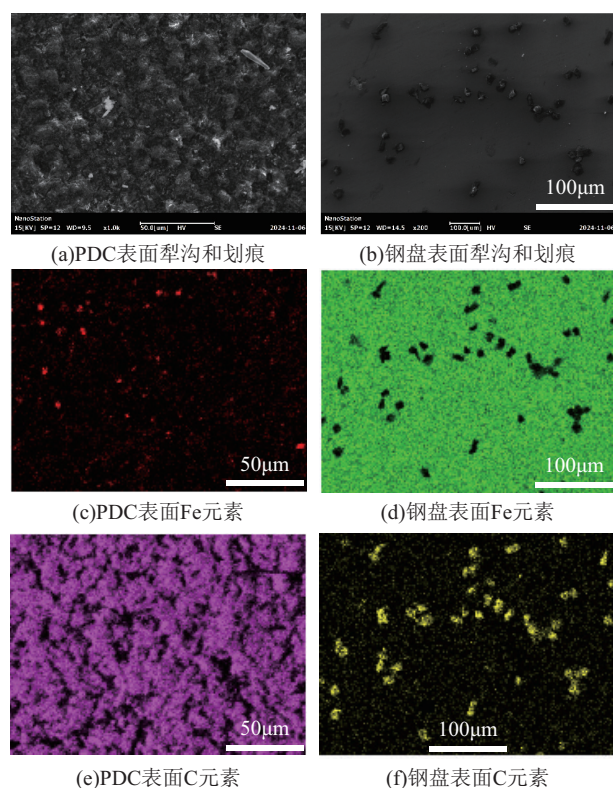


图9 有钻井液条件下的表面形貌

Fig.9 The surface morphology under drilling fluid

墨化后转移到钢盘表面的。

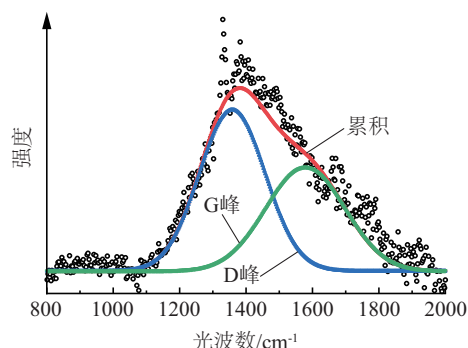


图10 钢盘表面某位置的拉曼谱图

Fig.10 Raman spectra of a certain position on the surface of the steel plate

3.5 磨损机理

石墨具有一定的润滑作用^[28-31],可以进一步优化摩擦性能,降低摩擦系数,减少黏着磨损,并且可以作为润滑膜阻隔PDC与钢盘直接接触。说明金刚石石墨化对摩擦磨损的双向防护作用是存在的。

通过观察销和盘的SEM图可以发现,在无钻井液

的条件下,氧化物剥落后转移至PDC表面,在PDC表面形成黏着的氧化铁薄膜。且高温下PDC表面发生金刚石石墨化。在有钻井液的情况下,氧化作用被抑制,PDC和钢盘表面存在一定量的磨粒。表明在无钻井液的工况下磨损机制为黏着磨损、氧化磨损两种磨损并存,而在有钻井液的工况下主要的磨损机制为轻微的磨粒磨损。磨损机理如图11所示。

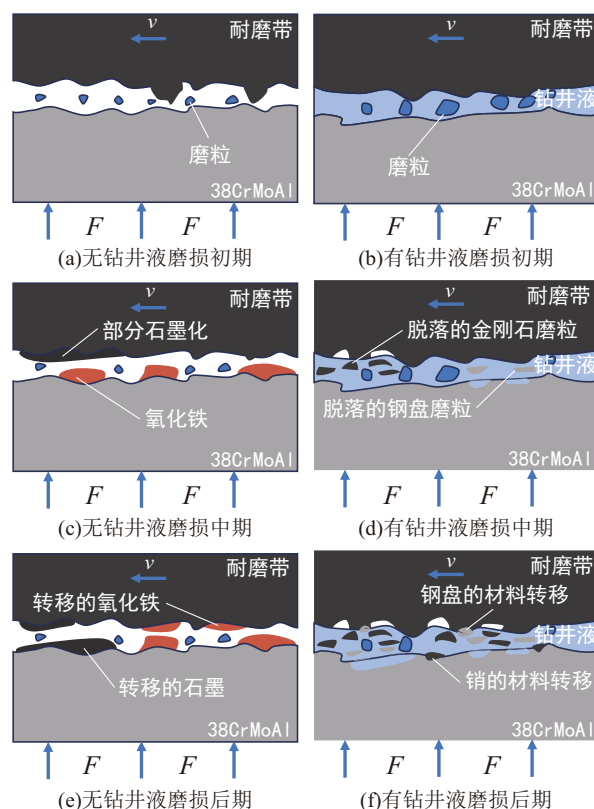


图11 磨损机理示意

Fig.11 Schematic diagram of wear mechanism

4 结论

金刚石复合材料耐磨带是我国自主研发的新型钻杆接头防护材料,通过实验室自主研发的钻井管材摩擦磨损试验机进行了实验,验证了金刚石复合材料耐磨带能够实现耐磨减摩的双向防护。揭示了其摩擦界面损伤的微观机制,为深井钻杆接头耐磨带结构优化提供了理论支撑与实验依据。后续研究工作建议开展金刚石复合材料耐磨带石墨化的影响因素及石墨化程度对摩擦热力学行为的影响规律,建立石墨化进程与耐磨性能的关联模型,确定临界石墨化阈值,保障金刚石复合材料耐磨带的稳定性。

(1)通过建立钻柱-套管双向防护模型与实验验证,证实了金刚石复合材料耐磨带基于“梯度抗磨-界面自润滑”的协同机制能够实现钻杆-套管系统耐磨与减摩的双向防护。

(2)摩擦实验结果表明,金刚石硬度高,能够有效抑制磨粒磨损,摩擦过程中生成的石墨化转移膜具有较好的润滑作用,形成“梯度抗磨-界面自润滑”的双向防护机制。

(3)金刚石复合材料耐磨带的本征脆性导致其冲击韧性不足,在井下复杂交变载荷作用下易发生脆性断裂,金刚石与基体材料的黏结强度随着磨损的发生而显著降低,界面处应力集中引发微裂纹扩展将导致金刚石剥落失效。未来仍需通过金刚石复合材料耐磨带梯度结构优化设计及黏结界面强化以突破工作性能瓶颈,实现“高耐磨-抗冲击-长寿命”的联合提升,支撑特深井等极端工况的防护需求。

参考文献(References):

- [1] 窦立荣,李大伟,温志新,等.全球油气资源评价历程及展望[J].石油学报,2022,43(8):1035-1048.
Dou Lirong, Li Dawei, Wen Zhixin, et al. History and outlook of global oil and gas resources evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(8):1035-1048.
- [2] 邹才能,潘松圻,赵群.论中国“能源独立”战略的内涵、挑战及意义[J].石油勘探与开发,2020,47(2):416-426.
ZOU Caineng, PAN Songqi, ZHAO Qun. On the connotation, challenge and significance of China's "energy independence" strategy[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 416-426.
- [3] 覃泳杰,王瑜,张凯,等.深井钻杆接头耐磨防护技术研究综述与展望[J].钻探工程,2024,51(4):54-63.
QIN Yongjie, WANG Yu, ZHANG Kai, et al. Review and prospect of anti-wear and protection technology of drill pipe joint for deep well[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4):54-63.
- [4] 周永宽,康嘉杰,岳文,等.超音速火焰喷涂金属陶瓷复合涂层的耐磨性能研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):72-79.
ZHOU Yongkuan, KANG Jiajie, YUE Wen, et al. Study on wear resistance of HVOF metal ceramic composite coating[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4):72-79.
- [5] 李润杰,章昕怡,康嘉杰,等.不同温度真空热处理对Fe-CrMoCBY非晶合金涂层组织结构与摩擦学性能的影响研究[J].钻探工程,2021,48(S1):61-69.
LI Runjie, ZHANG Xinyi, KANG Jiajie, et al. Effect of vacuum heat treatment on microstructure and tribological properties of FeCrMoCby amorphous alloy coatings at different temperatures[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1):61-69.
- [6] 尹浩,梁健,李宽,等.万米科学钻探关键机具优化措施研究[J].钻探工程,2023,50(4):16-24.
YIN Hao, LIANG Jian, LI Kuan, et al. Research on optimization measures of key instrument for myriametric scientific drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4):16-24.
- [7] 王维旭,曹晓宇,马继光,等.12000m特深井自动化钻机研制与应用[J].钻探工程,2024,51(4):7-13.
WANG Weixu, CAO Xiaoyu, MA Jiguang, et al. Development and application of automatic drilling rig for 12000m extra-deep wells[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4):7-13.
- [8] Cai M J, Mao L J, Xing X S, et al. Analysis on the nonlinear lateral vibration of drillstring in curved wells with beam finite element[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2022, 104:106065.
- [9] Nguyen K L, Tran Q T, Andrianoely M A, et al. Nonlinear rotordynamics of a drillstring in curved wells: models and numerical techniques[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 166:105225.
- [10] 胡以宝.基于实际井眼轨迹的钻柱动力学特性有限元分析[D].上海:上海大学,2011.
HU Yibao. Finite element analysis of dynamic characteristics of drillstring based on actual well path[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011.
- [11] Skaugen E. The effects of quasi-random drill bit vibrations upon drillstring dynamic behavior [C]//Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas, 1987:SPE-16660-MS.
- [12] Clayer F, Vandiver J K, Lee H Y. The effect of surface and downhole boundary conditions on the vibration of drillstrings [C]//Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana, 1990: SPE-20447-MS.
- [13] Best B. Casing wear caused by tooljoint hardfacing [J]. SPE drilling engineering, 1986, 1(1):62-70.
- [14] Williamson, Steve J. Casing wear: The effect of contact pressure [J]. Journal of Petroleum Technology, 1981, 33 (12): 2382-2388.
- [15] 王镇全,张凯,王德国,等.钻杆接头耐磨带材料研究进展[J].石油矿场机械,2016,45(2):94-98.
WANG Zhenquan, ZHANG Kai, WANG Deguo, et al. Research progress of wear-resistant belt material in drill joint[J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(2):94-98.
- [16] 张凯,王镇全,王德国,等.聚晶金刚石复合材料在钻杆接头表面应用的可行性分析[J].石油矿场机械,2015(6):51-54.
ZHANG Kai, WANG Zhenquan, WANG Deguo, et al. Feasibility analysis of polycrystalline diamond composite material applied on drill pipe joint [J]. Oil Field Equipment, 2015 (6): 51-54.
- [17] 秦建,龙伟民,路全彬,等.金刚石/NiCrBSi钎涂接头组织与耐磨性能分析[J].材料导报,2020,34(S2):457-461.
QIN Jian, LONG Weimin, LU Quanbin, et al. Microstructure and wear properties of diamond/NiCrBSi composite brazing coating[J]. Materials Review, 2020, 34(S2):457-461.
- [18] 邹芹,向刚强,王瑶,等.聚晶金刚石的研究进展与展望[J].金刚石与磨料磨具工程,2021,41(3):23-32.

- ZOU Qin, XIANG Gangqiang, WANG Yao, et al. Research progress and prospect of polycrystalline diamond[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2021, 41(3):23-32.
- [19] Zhang K, Wang Z Q, Wang D G, et al. Dry sliding friction and casing wear behavior of PCD reinforced WC matrix composites[J]. *Tribology International*, 2015, 90:84-95.
- [20] Zhang K, Wang Z Q, Wang D G, et al. Tribological behavior of TSP reinforced WC matrix composites sliding against N80 casing steel lubricated by water-based drilling fluid[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 79:171-176.
- [21] 郭晓光,刘涛,翟昌恒,等.过渡金属作用下的金刚石石墨化机理研究[J].*机械工程学报*, 2016, 52(20):23-29.
- GUO Xiaoguang, LIU Tao, ZHAI Changheng, et al. Study on the mechanism of diamond graphite with the action of transition metals[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(20):23-29.
- [22] 邓福铭.超高压高温烧结中金刚石表面石墨化过程再研究[J].*高压物理学报*, 2001, 15(3):235-240.
- DENG Fuming. Graphitization process of diamond surfaces during the sintering of diamond-cobalt system under high pressure and temperature[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(3):235-240.
- [23] Khulief Y A, Al-Naser H. Finite element dynamic analysis of drillstrings[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005, 41(13):1270-1288.
- [24] Lubinski A. A study of the buckling of rotary drilling strings[J]. *Drilling and Production Practice*, 1950, 6:178-214.
- [25] Liang C F, Wang Y, Peng Z J. Effect of impact force on the Impact-Sliding wear of Titanium alloy drill pipes against steel casings[J]. *Tribology Transactions*, 2024, 67(3):587-601.
- [26] Liang C F, Wang Y, Zhang K, et al. Dry sliding behavior of Qbe-2 Beryllium bronze against 38CrMoAlA steel in pneumatic downhole motor under different loads[J]. *Metals*, 2021, 11(3):459.
- [27] Liang C F, Zhou J, Wang Y, et al. Reduced friction and excellent anti-wear performance of QBe2 Beryllium bronze against 38CrMoAlA steel in pneumatic downhole motor under grease lubrication[J]. *Metals*, 2023, 13(2):266.
- [28] 张俊龙,陈亚军,李晨,等.石墨含量对铜基石墨自润滑复合材料摩擦过程中石墨润滑膜的影响[J].*轴承*, 2022(2):31-34, 38.
- ZHANG Junlong, CHEN Yajun, LI Chen, et al. Effect of graphite contents on graphite lubricating film during friction of copper matrix graphite self-lubricating composites[J]. *Bearing*, 2022(2):31-34, 38.
- [29] Qian J, Pantea C, Voronin G, et al. Partial graphitization of diamond crystals under high-pressure and high-temperature conditions[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(3):1632-1637.
- [30] 吕亚非,马玉宁,韩翎,等.石墨在半金属摩擦材料中的作用及其对摩擦性能的影响[J].*北京化工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(5):58-61.
- LÜ Yafei, MA Yuning, HAN Ling, et al. Role of graphite in semi-metallic friction materials and its effects on friction performance[J]. *Journal-Beijing University of Chemical Technology Natural Science Edition*, 2006, 33(5):58-61.
- [31] 尹延国,刘君武,郑治祥,等.石墨对铜基自润滑材料高温摩擦磨损性能的影响[J].*摩擦学学报*, 2005, 25(3):216-220.
- YIN Yanguo, LIU Junwu, ZHENG Zhixiang, et al. Effect of graphite on the friction and wear properties of Cu alloy-matrix self-lubricating composites at elevated temperature[J]. *Tribology*, 2005, 25(3):216-220.

(编辑 王跃伟)