

低温低压下石墨对金刚石钻头胎体摩擦性能的影响

段隆臣^{1,2}, 庞 丰^{1,2}, 谢兰兰³, 潘秉锁^{1,2}, 方小红^{1,2}

(1. 中国地质大学 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 武汉 430074; 2. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074;
3. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059)

摘 要: 为了更加科学地设计低温低压无冲洗介质条件下的金刚石钻头胎体, 基于金刚石钻头干钻时出现高温摩擦热的现象, 采用向胎体中添加石墨作为润滑剂的方案, 以减小胎体的摩擦因数, 降低摩擦热. 研究石墨的体积分数、粒度对胎体力学性能和不同环境下对胎体摩擦性能的影响, 结果表明: 随着石墨体积分数的增加, 胎体的硬度, 抗弯强度, 常温常压、低温低压下的摩擦因数逐渐减小, 磨损量先减小后增大, 当石墨体积分数增加到 7.5% 时, 磨损量达最小值. 随着胎体中石墨粒度的减小, 胎体的抗弯强度和常温常压、低温低压下的摩擦因数逐渐减小, 胎体的硬度和磨损量逐渐增大. 摩擦磨损后胎体的形貌分析表明, 加入石墨后, 胎体在不同环境下的磨损均减轻, 可实现对钻头胎体的润滑作用.

关键词: 低温低压; 石墨; 金刚石钻头; 摩擦性能

中图分类号: TE 921; TG 74⁺9

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2015)05-0776-07

doi: 10.11936/bjtxb2014090034

Effect of Graphite on the Friction Performance of the Diamond Bit Matrix Under Low Temperature and Pressure

DUAN Long-chen^{1,2}, PANG Feng^{1,2}, XIE Lan-lan³, PAN Bing-suo^{1,2}, FANG Xiao-hong^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, Wuhan 430074, China;
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
3. Faculty of Environmental and Civil Engineering, Chengdu University of Science and Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: To design diamond bit matrix more scientific without the fluid medium under low temperature and low pressure, based on the high friction heat when diamond bits drill in the dry condition, a new method of adding graphite to the bit matrix is adopted to reduce the matrix's friction coefficient and friction heat. The effect of the content and the particle size of graphite on the matrix mechanical properties and friction performance under different environment is studied. The research results show that with increasing of the graphite content, the hardness, the bending strength and the friction coefficient of the matrix under normal temperature & pressure, and low temperature & pressure decrease gradually, while the abrasion loss decreases firstly, then increases, and from which the minimum abrasion loss is obtained when the graphite content reaches 7.5%. With the decreasing of the graphite particle size, the bending strength and the friction coefficient of the matrix decrease gradually, while the hardness and the

收稿日期: 2014-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50904052)

作者简介: 段隆臣(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事金属基金刚石复合材料及其工具方面的研究, E-mail: duanlongchen@163.com

通信作者: 庞 丰(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事金属基金刚石复合材料及其工具方面的研究, E-mail: pangfeng0221@163.com

abrasion loss of the matrix increases little by little. The feature analysis of the matrix after friction and wear also shows that to add proper graphite in the bit matrix can reduce its wear and help to lubricate the interface between the matrix and the drilled rock.

Key words: low temperature and pressure; graphite; diamond bit; friction performance

为了科学利用地外天体如月球、火星上的资源,太空钻探取样技术一直都是研究热点^[1]. 金刚石钻头在石油和地质勘探、工程勘察、石材切割等行业应用广泛^[2],其经济高效的特点极可能成为太空钻探的首选^[3]. 金刚石钻头高速钻进过程中产生大量的摩擦热,严重依赖冲洗介质的使用,然而太空的温度压力环境限制了冲洗液的使用. 若在较低的功率、转速和钻压下钻进,或间歇钻进,则会大幅降低钻进效率^[4].

固体润滑剂以其降摩减阻的作用添加于钻头胎体中,可降低钻进中的摩擦热. 研究固体润滑剂 MoS₂ 和石墨对 Ni-Cr 基复合材料摩擦学性能的影响表明,MoS₂ 和石墨的添加会同时降低材料的摩擦因数和硬度^[5]. 采用热喷涂法在铝基体上喷涂上聚脂纤维-石墨涂层,其摩擦性能表明,摩擦副间的磨损随着涂层中石墨质量分数的升高而不断降低,摩擦因数也降低^[6]. 采用感应加热烧结的方法制备石墨/铜铁基高温自润滑复合材料,其力学和摩擦磨损性能表明,随着石墨体积分数的升高,材料的力学性能降低,减摩润滑效果增强^[7]. 研究 Cu-石墨复合材料的摩擦性能表明,石墨颗粒的粒径越小,摩擦因数越小^[8]. 研究石墨对青铜-钢背双金属材料的微摩擦特性表明:随着石墨体积分数的增加,材料的硬度逐渐降低,材料的摩擦磨损性能先提高后降低^[9]. 研究 Cr₂O₃-Ag 增强 NiCr 复合材料表明,随着银体积分数的增加和润滑剂颗粒的减小,摩擦因数降低^[10]. 研究高石墨体积分数铜基复合材料的性能表明,随着石墨体积分数的增加,力学性能降低,自润滑效果较好^[11]. 研究含 SiC、石墨和 h-BN 的铜基复合材料的摩擦特性表明,材料的摩擦因数随着石墨体积分数的增加而减小,石墨比六方氮化硼形成的润滑膜更加紧密,有利于提高材料的摩擦性能^[12]. 研究石墨对 C/C 复合材料摩擦磨损性能的影响表明,在摩擦磨损表面会形成具有自润滑作用的摩擦膜,可降低磨损量,保持摩擦因数的稳定^[13]. 研究 BaF₂·CaF₂ 的体积分数对 Cr₃C₂ 增强 NiCr 膜层的摩擦性能的影响表明,当 BaF₂·CaF₂ 的体积分数为 10% 时,摩擦性能最好^[14].

本文采用热压法制备含石墨钻头胎体材料,研

究低温低压下石墨对金刚石钻头胎体摩擦磨损性能的影响,以期为低温低压无冲洗介质的条件下,金刚石钻头胎体的设计提供实验依据.

1 实验

模拟太空的低温低压环境,研制了低温低压摩擦磨损试验机. 通过液压驱动,使用真空泵和制冷系统提供低温低压环境,摩擦副采用立轴销盘式设计,用传感器采集摩擦力矩信号,经单片机实现数据的可视化.

采用热压工艺和铁基胎体配方,制备了含石墨的复合胎体材料. 胎体中石墨的添加量为 0~10%,粒度为 40~100 目. 热压工艺参数为烧结温度 945 °C,压力 15 MPa,保温时间 3 min.

采用 HR-150A 型洛氏硬度计测定胎体材料的硬度,平行测定 5 次,取平均值. 使用三点弯曲法在 WE-30 型液压式万能材料试验机上进行抗弯强度测试,平行测定 3 块胎体,取平均值. 应用自行研制的摩擦磨损试验机对胎体进行摩擦磨损性能研究,平行测定 5 次,取平均值. 常温、常压、低温和低压的实验条件分别为温度 10 °C、真空度 0 kPa,温度 1 °C 和真空度 -95 kPa,常温常压下空气相对湿度为 60%,低压下真空腔室抽真空,空气湿度极小. 采用 Quanta200 型环境扫描电子显微镜观察摩擦磨损后胎体的表面形貌.

2 实验结果与讨论

2.1 低温低压(真空)摩擦磨损试验机的研制

自主研发的低温低压(真空)摩擦磨损试验机如图 1 所示,其中右边为试验机左部真空腔室的内部结构. 试验机由真空腔室、机台总成、控制柜和计算机组成. 该机集成了自动控制技术、现代测试技术和工业计算机技术,可通过计算机进行实验数据的采集、存储、显示、分析和输出,系统人机界面友好,操作简便,该试验机相关技术参数如表 1 所示.

图 2 为试验机摩擦扭力曲线输出界面. 通过试验机的输出界面可得到试样在进行摩擦磨损实验时的环境温度、压力和胎体所受到的钻压、转速、扭力

和摩擦温度。

2.2 石墨对胎体材料力学性能的影响

石墨具有化学惰性,在进行钻头烧结时,不会与

空气和胎体成分发生化学反应. 研究了胎体中石墨的体积分数和粒度对胎体材料的洛氏硬度和抗弯强度的影响,结果如图3所示.



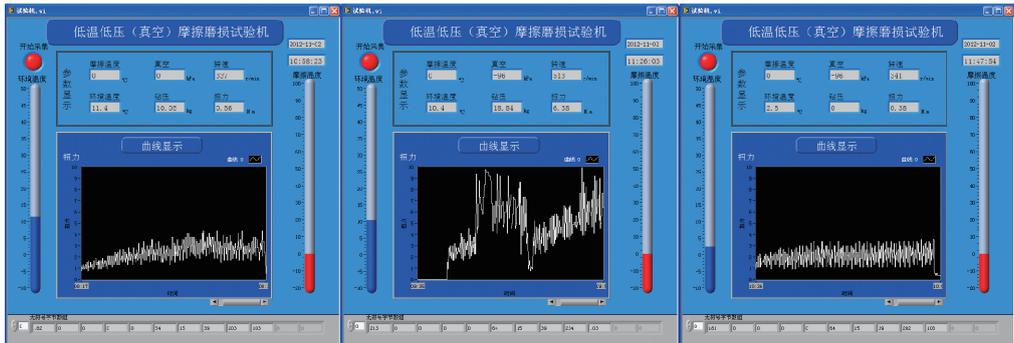
图1 低温低压摩擦磨损试验机实物

Fig.1 Physical picture of low temperature and pressure friction and wear tester

表1 低温低压试验机的主要技术参数

Table 1 Key technical parameter of low temperature and pressure tester

钻进行程/mm	摩擦阻力测量精度/kg	摩擦界面温度/℃	采样周期/s	整机质量/t	
200	0 ~ 100 ± 1.5	0 ~ 800	1	1	
驱动参数		岩石给压参数		环境温度	环境压力
P/kW	旋转速度/(r·min ⁻¹)	P/kW	p/MPa		
1.5	200 ~ 900	1.5	0 ~ 5	温常 ~ -20 ℃	常压 ~ 6 × 10 ⁻² Pa



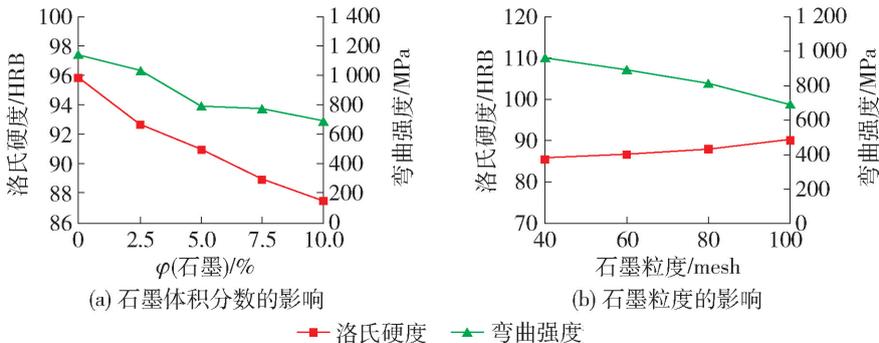
(a) 常温常压

(b) 常温低压

(c) 低温低压

图2 试样在常温常压、常温低压和低温低压下的摩擦扭力曲线

Fig.2 Friction torque curve of sample



(a) 石墨体积分数的影响

(b) 石墨粒度的影响

—■— 洛氏硬度 —▲— 弯曲强度

图3 石墨的体积分数、粒度对胎体洛氏硬度和抗弯强度的影响

Fig.3 Effect of graphite on the matrix mechanical property

由图 3(a)可知,随着胎体中石墨体积分数的增加,钻头胎体的洛氏硬度和抗弯强度逐渐降低,分别降低了 8.7% 和 39.4%,说明石墨的加入会降低胎体的力学性能. 材料的硬度可反映局部抵抗塑性变形的能力,测试洛氏硬度时胎体材料压痕范围内的石墨颗粒越多,压痕越深,即硬度越小. 相对于钻头胎体中的金属成分而言,石墨是作为软质相存在的,本身强度较低,且石墨的表面能远低于胎体金属成分,与胎体材料间的黏结强度也远低于金属间的内聚强度,与金属成分结合不牢,对胎体有产生孔隙和裂纹的作用,增加石墨体积分数相当于增加了这些缺陷的概率,因而力学性能下降,即硬度和抗弯强度下降.

由图 3(b)可知,随着胎体材料中石墨粒度的减小,钻头胎体的硬度逐渐增大,抗弯强度逐渐减小,硬度增大了 5%,抗弯强度减小了近 30%,在胎体材料中加入石墨作为固体润滑剂时,可选择中等粒径的石墨. 石墨的粒度越小,在进行热压烧结时,越易进行紧密堆砌,胎体越易压制厚实,结果硬度越大. 实验中发现压痕范围是深度的 10 倍,压痕范围内石

墨颗粒越小,则压头与金属硬质相接触的概率越大,结果测得胎体硬度越大. 当石墨体积分数一定时,其粒度越小则数量越大,产生裂纹和孔隙的概率越大,越易发生应力集中,减小试样承受外力的有效面积,即试样中硬质相金属成分承受载荷的面积变小,抗弯强度减小.

通过上述分析可知,胎体中石墨的体积分数越高,力学性能下降幅度越大,当石墨体积分数一定时,随石墨粒度的减小,硬度增大,抗弯强度降低.

2.3 不同环境条件下石墨对胎体材料摩擦性能的影响

在摩擦磨损过程中,环境条件发挥着重要的作用,环境温度和空气的稀薄度均会影响摩擦磨损过程中热量的散失. 进行摩擦磨损实验时,通过试验机可直接读取实验过程中的摩擦力和载荷,通过计算即可得出摩擦磨损过程中的摩擦因数,考察胎体材料的摩擦性能. 在自行研制的摩擦磨损试验机上分别进行了常温常压和低温低压环境条件下的摩擦磨损实验研究,结果如图 4、5 所示.

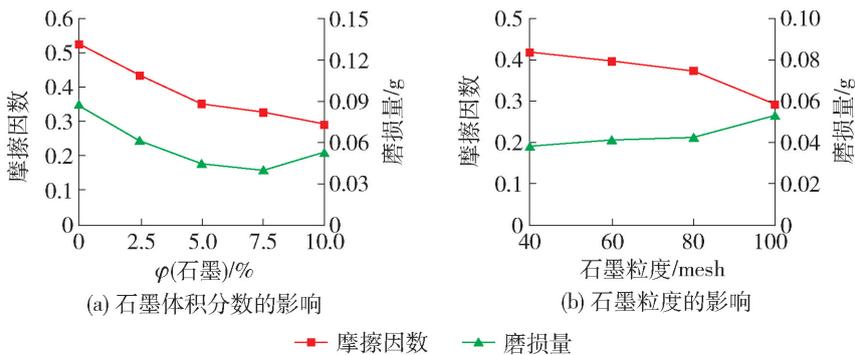


图 4 常温常压下石墨体积分数、粒度对胎体摩擦因数和磨损量的影响

Fig. 4 Effect of graphite on the matrix friction performance under normal temperature and pressure

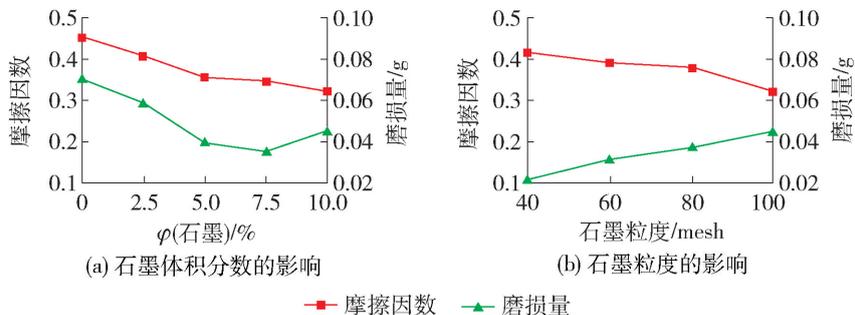


图 5 低温低压下石墨体积分数、粒度对胎体摩擦因数和磨损量的影响

Fig. 5 Effect of graphite on the matrix friction performance under low temperature and pressure

由图 4(a)可知,在常温常压下,随着胎体中石墨体积分数的增加,胎体与岩样发生摩擦磨损时的

摩擦因数逐渐减小,减小了 44.4%,而磨损量先减小后增大. 石墨在摩擦磨损过程中受到热应力和机

械应力的双重作用,使得胎体中的石墨脱落后涂覆在摩擦副间形成润滑膜,由于石墨的层状结构,摩擦时可发生滑移,产生润滑效应,降低摩擦副的摩擦因数. 这层具有润滑作用的薄膜在金属胎体与岩样间反复研磨,工作一定时间后发生疲劳破坏,而后岩石继续磨损胎体,新的石墨又在摩擦副表面形成新的润滑膜,如此往复. 随着胎体中石墨体积分数的增加,形成的润滑膜更加完整,再生速度快,因而摩擦因数降低. 当石墨体积分数增加到7.5%时,磨损量反而增加,因为石墨是胎体中的软质相,增加石墨的同时也降低了胎体的强度,当石墨体积分数增加到一定程度时,石墨的增加导致胎体磨损的作用超过了石墨的润滑作用,因而磨损量增加.

由图4(b)可知,随着胎体中石墨粒度的减小,胎体与岩样间的摩擦因数逐渐减小,磨损量逐渐增加. 石墨的粒度直接影响与胎体粉末的混合情况,粒度越小与金属粉末的混合越均匀. 随着石墨粒度的减小,与岩石摩擦磨损时越有利于形成完整的润滑薄膜,降低摩擦因数. 石墨先于金属胎体脱落,在胎体表面可形成众多均匀分布的孔隙,胎体表面凹凸不平,在摩擦磨损过程中承受更大的压力,摩擦磨损增强,磨损量增加,因此在石墨粒度降低的情况

下,摩擦因数减小而磨损量增加.

低温低压下胎体的摩擦磨损情况如图5所示,对比图5与图4可发现,低温低压下胎体的摩擦磨损行为与石墨的关系与常温常压下的相似,二者石墨的体积分数、粒度对胎体的摩擦因数和磨损量的影响趋势基本一致. 2种环境条件反应的均是随着胎体中石墨体积分数的增加,摩擦因数减小,磨损量先减小后增大,随着石墨粒度的减小,摩擦因数减小,磨损量增大. 说明常温常压下胎体的摩擦磨损机理以及磨损和石墨的关系的理论分析也适用于低温低压下,添加石墨可减弱胎体的摩擦磨损,降低摩擦副间的摩擦因数. 因此,在低温低压环境下,石墨可作为钻头胎体的润滑剂,减小摩擦因数,降低摩擦热.

试样摩擦磨损过程中产生大量的摩擦热,需要通过空气介质对外进行传递,环境温度越低越有利于热量的扩散,空气越稠密越有利于热量传递. 因为常温较低温环境温度高,低压较常压环境空气稀薄,不利于摩擦热的扩散和传递,因此向钻头胎体中添加石墨作为润滑剂的研究具有重要意义.

2.4 摩擦磨损后胎体材料表面形貌分析

图6为摩擦磨损后试样的扫描电镜形貌.

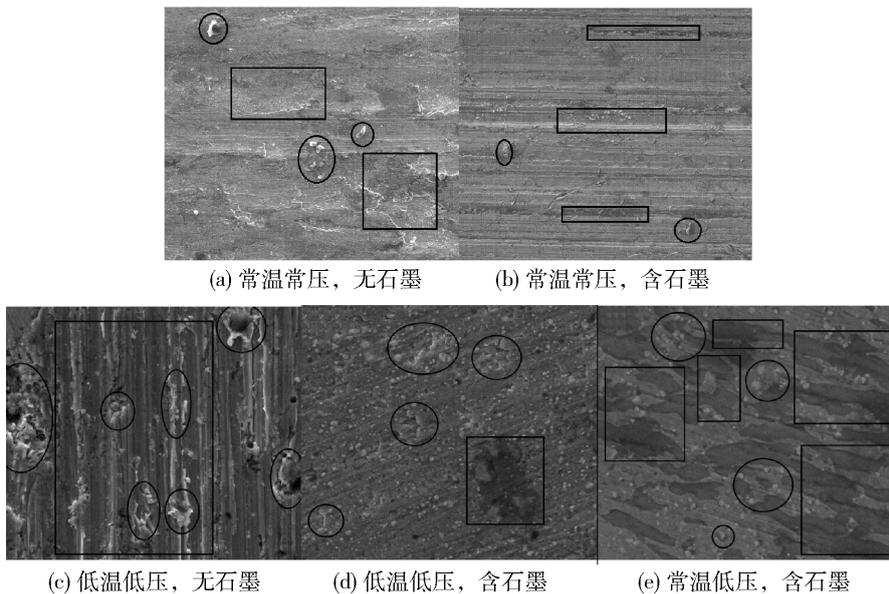


图6 试样的扫描电镜形貌

Fig. 6 SEM figure of the sample

图6(a)中常温常压下未添加石墨的胎体表面不平整,有较少的小块和点状突起(图6(a)中椭圆形所示),有块状结构相互叠加和整块脱落坑的现象(图6(a)中矩形所示). 图6(b)中常温常压下添

加石墨的胎体表面有少量小块突起(图6(b)中椭圆形所示)和因岩样中硬质点对胎体刻划作用形成的沟槽(图6(b)中矩形所示),表面整体光滑平整. 图6(c)中低温低压下未添加石墨的胎体表面凹凸

不平,坑洼较多,有大量的沟痕、长槽(图6(c)中矩形所示)和大量的突起、凹陷(图6(c)中椭圆形所示)。图6(d)中低温低压下添加石墨的胎体表面分布较多的小块和突起(图6(d)中椭圆形所示),有片区的凹坑(图6(d)中矩形所示),整体较为平整。图6(e)中常温低压下添加石墨的胎体表面粗糙,有大片的凹坑(图6(e)中矩形所示)和零散分布的小块突起(图6(e)中椭圆形所示),表面坑洼,凹凸不平。

对比图6(a)与(b)和(c)与(d)可知,在常温常压下和低温低压下,未添加石墨的胎体较添加石墨的胎体磨损严重,后者表面较为平整光滑,石墨在胎体中作为一种软质相存在,摩擦磨损时容易脱落,脱落下来的石墨在摩擦副界面形成一层薄膜,发挥其润滑作用。对比图6(a)与(c)和(b)与(d)可知,当胎体中未添加石墨时,低温低压下的胎体磨损情况较常温常压下胎体的磨损情况严重,后者较前者表面并排有较深的犁沟,低温低压较常温常压下,环境空气介质稀薄,不利于摩擦热的传递,胎体磨损加重。添加石墨后,因其固有的润滑性能使得图6(b)和(d)较(b)和(d)磨损减轻。对比图6(b)(d)和(e)可知,常温低压下的胎体磨损最为严重,该环境下温度较低温环境高,不利于摩擦热的扩散,而低压较常压环境空气介质稀薄,缺乏热量传递的介质,因而磨损加剧。

通过以上分析可知,环境温度和压力会影响胎体的磨损程度,低温低压下胎体的磨损加重,添加石墨后的胎体摩擦磨损减轻,可实现石墨对钻头胎体的润滑作用。

2.5 讨论

固体的表面状态即表面物理、几何形态和化学状态等均是影响其摩擦学性能的主要因素^[15]。

胎体进行干摩擦时,伴随高频低幅的振动现象,这与跃动效应有关,因为摩擦运动并非连续平稳的滑动,而是摩擦副间断的滑动,跃动现象的程度可区别润滑摩擦和干摩擦,加入石墨后的胎体跃动现象减弱。表观上摩擦后的岩石和胎体表面较为平整,然而在显微镜下可见其凹凸不平,由连续的粗糙峰构成,因此,滑动摩擦可认为是能量在摩擦副表面间的粗糙峰相互啮合、碰撞和弹塑变形上的损耗。加入石墨后,作为软质相的石墨先于胎体基体材料脱落,脱落后被转移到摩擦副界面且优先填补于粗糙峰间,使得粗糙峰现象和啮合效应减弱,缓和摩擦磨损。机械啮合作用使得表面实际接触面积远小于

表观接触面积,因此粗糙峰承受很大的应力,当应力达到屈服极限时,发生塑性变形,表面材料处于塑性接触状态后应力不再变化,此时接触点面积增大以承受更大的载荷,加入石墨后,有利于增大摩擦副间的接触面积。接触点的应力值为摩擦副中软材料石墨的屈服强度,当载荷一定时,屈服强度反比于摩擦副间的接触面积,材料越软,压入越深,摩擦磨损越严重。

摩擦副表层分子的活性和分子力的作用使得接触表面黏附在一起产生黏着效应。干摩擦时,胎体表面的粗糙峰在法向载荷的作用下嵌入岩石表层,产生2种形式的接触:一种是摩擦副表面的黏着接触,即面的接触,摩擦时发生剪切作用;另一种是胎体粗糙峰压入岩石材料,产生犁沟效应。当摩擦副间发生黏着摩擦时,摩擦力是黏着效应和犁沟效应产生阻力的总和。加入石墨后,由于石墨附着在摩擦副表面,使得胎体压入岩石表面的作用大大减弱,即犁沟效应减弱,且石墨改变了原来金属胎体与岩石的黏着作用,当石墨与岩石发生剪切滑移时,其层状结构使得摩擦副间面与面接触时的滑动阻力减小。当胎体中加入金刚石后,犁沟效应更加明显,坚硬的金刚石在载荷的作用下推挤入岩石中,转动时表层岩样发生塑性流动并犁出一条沟槽,摩擦磨损严重。

微观上,摩擦的本质是摩擦副间分子或原子碰撞时的能量耗散。当胎体中的金属原子同时撞击石墨分子和岩样中的化合物分子(SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 等,质量分数越高撞击概率越大)时,由于 SiO_2 等分子晶体间作用力远大于石墨分子晶体间作用力,层状结构的石墨首先发生滑移——润滑作用。胎体中的石墨连续从胎体中脱落,这层石墨润滑膜可再生,保证润滑减摩效果。通常金属表面原子处于不平衡状态,因此胎体金属易与岩样表面分子形成较强的原子结合力或离子结合力,由于石墨在摩擦副表面附着,摩擦副间原有的结合力被较弱的范德华力代替,降低了表面分子作用力,减弱摩擦磨损。摩擦过程中周围介质易与胎体表面金属原子作用形成表面膜,真空环境下由于介质稀薄而不易形成。

3 结论

1) 随着胎体中石墨体积分数的增加,胎体的硬度、抗弯强度和常温常压、低温低压下胎体的摩擦因数逐渐减小,磨损量先减小后增大,当石墨体积分数增加到7.5%时,磨损量达最小值。

2) 随着胎体中石墨粒度的减小,胎体的抗弯强度和常温常压、低温低压下的摩擦因数逐渐减小,胎体的硬度和常温常压、低温低压下的磨损量逐渐增大。

3) 环境的温度和压力会影响胎体的磨损程度,低温低压下胎体的磨损加重,添加石墨后的胎体摩擦磨损减轻,可实现石墨对钻头胎体的润滑作用。

参考文献:

- [1] 王文轩. 人类未来将开发的太空资源[J]. 生态经济, 2012(2): 18-23.
WANG Wen-xuan. Space resources exploited by human[J]. Ecological Economy, 2012(2): 18-23. (in Chinese)
- [2] 谭松成, 段隆臣, 苟晓东, 等. 热压孕镶金刚石钻头偏磨的影响因素分析[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18(4): 609-614.
TAN Song-cheng, DUAN Long-chen, GOU Xiao-dong, et al. Influential factor analysis for lopsided wear of hot-pressed impregnated diamond bit [J]. Materials Science and Engineering of Power Metallurgy, 2013, 18(4): 609-614. (in Chinese)
- [3] ZACNY K A, COOPER G A. Investigation of the performance of a coring bit in frozen mud under Martian conditions of low temperature and pressure [J]. Journal of Geophysical Research-Planets, 2005, 110(4): E04003.
- [4] ZACNY K A, COOPER G A. Methods for cuttings removal from holes drilled on Mars [J]. International Journal of Mars Science and Exploration, 2007, 3: 42-56.
- [5] 王爱芳, 张定军, 吴有智. MoS₂ 和石墨对 Ni-Cr 基复合材料摩擦学性能的影响[J]. 材料研究报, 2010, 24(5): 464-470.
WANG Ai-fang, ZHANG Ding-jun, WU You-zhi, et al. Effects of adding MoS₂ and graphite on tribological properties of Ni-Cr based self-lubricating composites[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2010, 24(5): 464-470. (in Chinese)
- [6] ZOUARI M, KHARRAT M, DAMMAK M. Wear and friction analysis of polyester coatings with solid lubricant [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(16/17): 2593-2599.
- [7] 付传起, 孙俊才, 王宙, 等. 感应烧结石墨/铜铁基高温自润滑复合材料摩擦学性能研究[J]. 功能材料, 2010, 41(10): 1757-1760, 1764.
FU Chuan-qi, SUN Jun-cai, WANG Zhou, et al. Study of tribological properties of graphite/copper-ferrum matrix self-lubricating composites prepared by induction sintering at elevated temperature [J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(10): 1757-1760, 1764. (in Chinese)
- [8] YIN Y G, LIU J W, ZHENG Z X. Effect of graphite on the friction and wear properties of Cu alloy-matrix self-lubricating composite at elevated temperature [J]. Tribology, 2005, 25(3): 216-230.
- [9] 刘如铁, 熊翔, 陈福胜, 等. 含石墨的青铜-钢背双金属材料微摩擦学特征[J]. 粉末冶金技术, 2010, 28(5): 331-335.
LIU Ru-tie, XIONG Xiang, CHEN Fu-sheng, et al. Micro-tribological characteristics of bronze-steel bimetal containing graphite [J]. Powder Metallurgy Technology, 2010, 28(5): 331-335. (in Chinese)
- [10] EUNYOUNG K, GILYOUNG K, CHANGHEE L. Effects of solid lubricant content and size on the tribology of NiCr-Cr₂O₃-Ag composites [J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2005, 6(2): 95-100.
- [11] 陈岁元, 刘义杰, 梁京, 等. 高石墨铜基复合自润滑材料的组织结构与性能[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2010, 31(9): 1283-1286, 1291.
CHEN Sui-yuan, LIU Yi-jie, LIANG Jing, et al. Structure and properties of Cu-based self-lubricating composite with high graphite content [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2010, 31(9): 1283-1286, 1291. (in Chinese)
- [12] CHEN Bai-ming, BI Qin-ling, YANG Jun. Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN) for Cu-based P/M friction composites [J]. Tribology International, 2008, 41(12): 1145-1152.
- [13] 潘祖金, 黄向东, 陈金发, 等. 添加石墨对热压法制备 C/C 复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2008, 26(4): 609-612, 635.
PAN Zu-jin, HUANG Xiang-dong, CHEN Jin-fa, et al. Effects of graphites content on friction and wear performances of C/C composites fabricated by hot-pressing process[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2008, 26(4): 609-612, 635. (in Chinese)
- [14] HUANG C, DU L, ZHANG W. Effects of solid lubricant content on the microstructure and properties of NiCr/Cr₃C₂-BaF₂·CaF₂ composite coatings [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 479(1/2): 777-784.
- [15] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2012: 211-243.

(责任编辑 吕小红)