

CaF₂/hBN 自润滑 Fe 基孕镶金刚石钻头性能研究

李成龙¹, 赵江², 段隆臣¹

(1.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074; 2.广东省珠海工程勘察院,广东珠海 519002)

摘要:针对地矿、油气行业面临的钻探新挑战,将材料科学领域的自润滑技术引入热压烧结孕镶金刚石钻头领域,以期实现钻头在高温井底工作环境中的自润滑功能,从而降低摩擦放热,防止金刚石热损伤,提高钻头使用寿命。本文作为自润滑孕镶金刚石钻头设计的初步尝试,通过对固体润滑添加剂的优选与试验,首先确定了氟化钙(CaF₂)、六方氮化硼(hBN)两种固体润滑添加剂,以 Fe 基胎体为基体,通过热压烧结制备了具有不同浓度的固体润滑添加剂的自润滑孕镶金刚石钻头胎体试样,利用一系列仪器测定了其物理力学性能和摩擦学特性;制备了微型自润滑孕镶金刚石钻头,在微钻实验台上进行了钻进试验。试验结果表明:随着固体润滑剂含量的增加,两组自润滑钻头胎体试样的物理力学性能均有所降低,但幅度不同,CaF₂ 组明显小于 hBN 组;两组胎体试样摩擦系数均显著降低;CaF₂ 组胎体试样的磨损率先增后减,hBN 组试样磨损率大幅增加;钻头进尺 CaF₂ 组有所提高,hBN 组逐渐减小。

关键词:金刚石;钻头;自润滑;CaF₂;hBN

中图分类号:P634.4⁺¹ **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)11-0078-05

Study on the Properties of Fe-based Impregnated Diamond Bits with CaF₂/hBN Self-lubricating Additives/LI Cheng-long¹, ZHAO Jiang², DUAN Long-chen¹ (1.School of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2.Zhuhai Institute of Engineering Survey, Zhuhai Guangdong 519002, China)

Abstract: In order to cope with drilling challenges in mining, oil and gas industries, the self-lubricating technique in material science has been introduced into the design of hot press sintered impregnated diamond bits (IDB). Such attempt aims to endow IDB with the ability to self-lubricate, so as to reduce frictional heat, prevent diamond thermal damage and improve bit service life. This paper describes an initial design where CaF₂ and hBN were selected as solid lubricant additives through optimization and experiments. They were added to Fe-based matrix to prepare two groups of self-lubricating IDB matrix specimens with different lubricant concentrations via hot press sintering. The specimens' mechanical and tribological properties were tested by a series of testing machines, and the miniature IDB were made and bench-tested. The results show that with the increase in lubricant concentrations, both groups of specimens experienced decrease in their mechanical strengths; however, the degree of such decrease differed among two groups, with hBN group dropping more dramatically. The friction coefficients of both groups dropped significantly, and the wear rate of CaF₂ group first rose and then dropped; whereas that of hBN group increased substantially. The drilling footage of CaF₂ group rose slightly while hBN group decreased gradually.

Key words: diamond; bit; self-lubricating; CaF₂; hBN

0 引言

孕镶金刚石钻头是钻进硬岩的常用工具,广泛应用于矿产、石油开采、科学钻探及建筑施工等领域^[1-3]。随着传统资源的开采与消耗,地质、石油钻探逐渐向非传统领域迈进,包括干旱缺水地区钻进、深井—超深井钻进、地热井钻进、高原冻土及海洋天然气水合物储层钻进乃至月球钻进等^[4-9]。在非传统领域钻进,往往遇到井底高温及钻井液无法及时

足量跟进的限制,在一些极端情况下甚至无法使用钻井液。金刚石钻头钻进依靠出露于胎体底层面上的金刚石微粒的压入—微切削作用完成,在上述工况条件下,由于冷却不力,金刚石颗粒极易受到热损伤而失效,造成钻头提前报废,增加了钻探成本。在这样的背景下,提出了自润滑孕镶金刚石钻头的构想^[10]。

收稿日期:2018-08-11

作者简介:李成龙,男,汉族,1993年生,博士研究生在读,地质工程专业,从事金刚石钻进研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,1493882422@qq.com。

1 自润滑技术及其在金刚石钻头中应用的研究现状

自润滑技术在材料科学领域应用广泛,其可以在传统液体润滑无法施用的环境中,为工件提供稳定、长时间的润滑^[11-12]。这些极端环境包括高低温、高低压、辐射、腐蚀等等,在这些极端工作环境中,液体润滑剂往往会失效,而固体润滑剂则可以正常使用^[13]。通过将固体润滑剂以一定的工艺手段镶嵌在工件材料中,即可在工件消耗的同时,释放出固体润滑剂,从而形成固体润滑膜,起到润滑对摩表面的作用^[14]。

目前对自润滑孕镶金刚石钻头的研究处于初步阶段。潘秉锁等^[10]研究了石墨的添加对孕镶金刚石钻头力学和摩擦学性质的影响;刘志义^[15]研究了低温低压条件下石墨/MoS₂对金刚石钻头胎体磨损性能的影响;谢兰兰等^[16]研究了石墨粒度对自润滑孕镶金刚石钻头性能的影响;段隆臣等^[17]研究了低温低压下石墨对金刚石钻头胎体摩擦性能的影响。

可见,目前对于自润滑钻头的研究还缺乏对更多类型固体润滑添加剂的研究。固体润滑剂的选型研究是自润滑孕镶金刚石钻头制造理论初期研究的重点,这一阶段的总体思路是选取多种固体润滑剂粉末,通过粉末冶金,将其整合到已有 Fe 基、WC 基胎体粉末中,热压烧结形成自润滑钻头胎体试样和微型自润滑孕镶金刚石钻头进行物理力学性能测试、摩擦学测试及微钻试验,从而有助于形成一套完备的自润滑钻头设计理论体系。本文作为该理论体系研究的一部分,经过文献综述与分析,率先选取了氟化钙(CaF₂)和六方氮化硼(hBN)两种固体润滑添加剂,制备了两组自润滑孕镶金刚石钻头胎体试样和微型自润滑孕镶金刚石钻头,进行了相关研究。

固体润滑剂种类繁多,本研究所选取的两种固体润滑剂均为在高温环境下具有化学稳定性,并具有良好润滑性能的材料^[18]。CaF₂为白色无机化合物,难溶于水,自然界中存在于萤石或氟石中^[19]。随着温度的升高,对摩面上的 CaF₂逐渐由脆性破坏变为塑性破坏,从而具有润滑性^[20]。其在润滑方面的显著特性是随着温度的升高,润滑性能逐渐增强^[21]。hBN是氮化硼(BN)的六方形态,其晶体结构与石墨相似,因此呈现出许多与石墨相同的性质,因而 hBN 又称“白石墨”^[22]。其润滑原理与石墨、

二硫化钨(WS₂)、二硫化钼(MoS₂)相同:晶体结构为层状,同一层内,硼原子(B)与氮原子(N)以稳定的共价键相连,不易被破坏,能够承受较大的法向力;层与层之间以相对较弱的范德华力连接,因此在剪切力作用下,容易发生层间滑移,从而具有润滑性^[23]。润滑性能方面,hBN 在很大的温度范围内均能保持稳定而良好的润滑性。两种固体润滑剂的晶体结构图如图 1 所示。

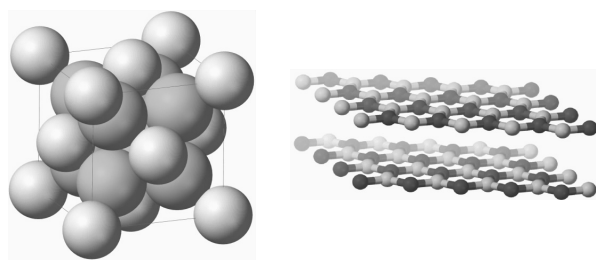


图 1 CaF₂(左)与 hBN(右)晶体结构图^[24-25]

2 试验

试验首先通过热压烧结生产了一批含 0~10% (体积含量,下同)固体润滑剂的 Fe 基孕镶金刚石钻头胎体试样(分为两组,一组添加 CaF₂,另一组添加 hBN),以研究固体润滑剂的添加对孕镶金刚石钻头胎体力学和摩擦学性能的影响。所涉及的力学性能指标包括洛氏硬度、抗弯强度和冲击韧性 3 个方面,摩擦学性能指标包括摩擦系数和磨损率(本文中为单位时间内胎体试样的磨损量)。随后按照上述浓度梯度制备了两组(CaF₂组和 hBN 组)微型孕镶金刚石钻头,在微钻实验台上进行钻进试验,研究自润滑孕镶金刚石钻头的进尺,以反映固体润滑剂的添加对孕镶金刚石钻头产生的综合效果。

2.1 试验材料与配方

制备胎体试样及微型钻头的材料为市面上常见的金属粉末、预合金粉末、固体润滑剂粉末及金刚石。所选用的 Fe 基胎体配方见表 1。CaF₂和 hBN 粉末粒径在 20~30 μm,其微观形貌图如图 2 所示。自润滑胎体试样和微型自润滑钻头采用两种尺寸的金金刚石颗粒混合制备,所使用的金刚石目数分别为

表 1 钻头胎体配方

金属粉末	质量含量/%	金属粉末	质量含量/%
Fe	38	Ni	10
WC	10	Mn	4
663Cu	35	Co	3

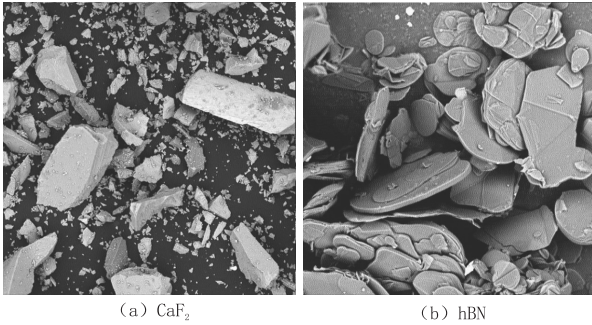


图2 固体润滑剂粉末微观形貌图

40/50目和50/60目。

2.2 试验仪器与参数

力学性能测试方面,硬度测试采用山东掖县材料试验机厂生产的洛氏硬度仪(图3),抗弯强度测试采用上海协强仪器科技有限公司制造的CTM2500型微机控制电子万能材料试验机(图4),冲击韧性测试采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的PTM2450型摆锤式冲击试验机(图5)。摩擦学测试在MG-2000型高速高温摩擦磨损试验机上进行。钻进试验在微钻试验台上进行。硬度测试



图3 洛氏硬度计



图4 CTM2500型微机控制电子万能材料试验机

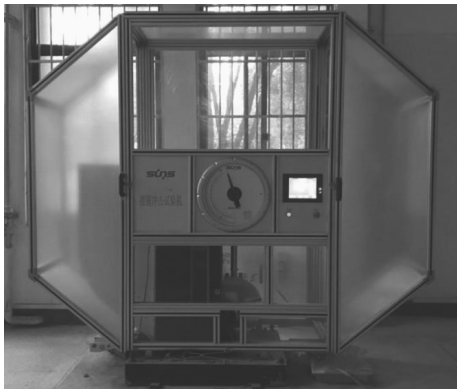


图5 PTM2450型摆锤式冲击试验机

各组各浓度测试2个试样,取平均值;每个试样上下表面各取3个点作为测试点,共6个数据取平均值,作为该试样的硬度值。抗弯强度、冲击韧性、摩擦学测试各组各浓度取3个试样进行测试,取平均值。

3 结果与讨论

3.1 力学性能测试

两组自润滑胎体试样力学性能测试结果见表2。

表2 自润滑胎体试样力学性能测试结果

固体润滑剂 含量/%	硬度/HRB		抗弯强度/MPa		冲击韧性/J	
	CaF ₂	hBN	CaF ₂	hBN	CaF ₂	hBN
0	78.97	77.06	495.64	493.76	7.87	8.04
2	79.76	73.34	490.98	385.09	6.69	7.62
4	79.97	72.86	458.05	391.45	7.79	6.75
6	82.34	71.56	460.87	322.95	7.56	5.49
8	80.11	65.23	452.63	275.14	6.11	3.51
10	81.76	55.64	414.67	198.67	5.56	1.55

可以看出,随着固体润滑剂含量的增加,两组胎体试样的硬度呈现出不同的趋势:CaF₂组试样的硬度略有波动,但整体呈略微增加趋势;hBN组试样则呈现出明显的下降趋势,其下降幅度在8%以后明显增大。

该结果的产生与压入硬度的测定方式和固体润滑剂的赋存方式有关。洛氏硬度的测量原理是以硬质点压入试样表面,以卸荷回弹后与原表面高度的差值反映材料硬度。CaF₂在胎体中的分散程度远小于hBN,其对胎体结构的破坏程度较小,因而材料对硬质点的压入具有较强的抵抗能力,且CaF₂为块状,具有一定的抗压和回弹能力,因而所得的硬度值较纯胎体材料改变不大,甚至有所提升。hBN为片状,其在胎体中分散程度较大,导致胎体材料之间粘结性降低,连通性增强,从而形成许多微小的腔室结构,在硬质点压入时易于崩塌。且hBN为片状,易被压碎剥离,难以回弹,因而随着hBN含量的增多,胎体硬度值急剧减小。

这一结果凸显出固体润滑剂与胎体材料之间匹配性的重要性:对于特定的胎体材料,适当的固体润滑添加剂能够增强其某方面的力学性能,而另一些固体润滑添加剂则会大幅削弱胎体材料的力学性能。因此,找到合适的固体润滑添加剂,尽可能在提供良好润滑性能的同时,降低对材料力学强度的负面影响,甚至对其产生增强作用,是自润滑孕镶金刚

石钻头设计理论研究初期的重点内容。

抗弯强度方面,由表 2 可知,固体润滑剂的加入,使 2 组胎体试样的抗弯强度均出现了降低,但降低幅度有所不同:CaF₂ 组试样的下降程度明显小于 hBN 组。同样的趋势表现在冲击韧性测试中,以试样在受冲击断裂中吸收的功表征试样的冲击韧性,由表 2 中数据可知,与抗弯强度类似,随着固体润滑剂含量的增多,两组试样的冲击韧性均有所降低,但 CaF₂ 组的下降幅度较小,而 hBN 组的下降幅度较为明显。

这一现象同样与两种固体润滑剂的微观结构及在胎体材料中的分布模式有关。CaF₂ 呈块状,在混料过程中不易发生破碎而均匀分布于胎体粉末中,烧结后赋存于胎体结构的空隙里,只有部分夹杂在胎体结构的联结部位,因此对胎体的结构强度破坏较小;hBN 呈片状,易剥落,在混料过程中破碎成细小的单独片状单元,分散于胎体结构中,大大降低了胎体材料的连结程度,增强了胎体内孔隙的连通性,因而造成胎体结构强度降低。胎体结构强度降低,微观上是同一截面上胎体材料连结面积减小(被固体润滑剂隔断),因此在相同的外界拉(压)力作用下,该横截面上的拉(压)应力增加,宏观上表现为材料更易拉断、开裂。

3.2 摩擦学测试

对两组自润滑胎体试样在摩擦磨损试验机上进行了摩擦学试验,对磨件为刚玉砂轮。主要测定摩擦过程中的平均摩擦系数及磨损率,所得结果如表 3 所示。

表 3 自润滑胎体试样摩擦学性能测试结果

固体润滑剂 含量/%	摩擦系数		磨损率/(g·min ⁻¹)	
	CaF ₂	hBN	CaF ₂	hBN
0	1.99	1.73	3.79	3.76
2	1.33	1.42	4.54	4.73
4	1.19	1.14	4.53	4.89
6	1.06	1.15	4.30	5.22
8	1.12	0.93	4.01	5.45
10	0.99	0.79	3.74	5.79

由表中数据可知,随着固体润滑剂含量的增多,两组胎体试样对摩表面的摩擦系数均有所降低,这表明固体润滑剂的添加使胎体试样具有了自润滑性能,并且随着固体润滑剂含量的增多,对摩面润滑条件得到更大的改善。然而,两组试样在磨损率方面表现出了不同。CaF₂ 组试样磨损率随着固体润滑

剂含量的增加,先出现了小幅度上升,随后开始下降,其下降趋势在本文设置的最大固体润滑剂添加量处已出现放缓迹象,但不一定是理论上的最低值。hBN 组试样磨损率则表现为单调递增。

两组试样摩擦系数所表现出的单调递减,是镶嵌在胎体骨架中的固体润滑剂成分在由于材料热膨胀系数不同造成的热应力作用下析出,并涂覆在对摩表面之间的结果。固体润滑剂的存在使原本的对摩表面分隔开来,使对摩表面之间的摩擦变成了固体润滑剂材料内部的摩擦,因此摩擦系数减小。磨损率是摩擦系数与材料结构强度共同作用的结果。固体润滑剂的加入,一方面起到了润滑作用,另一方面削弱了材料的结构强度。由力学性能测试数据可知,CaF₂ 的添加对材料的力学性能破坏明显小于 hBN,由摩擦测试数据可知,CaF₂ 降低摩擦系数的幅度与 hBN 基本相同,因此,作为两方面综合体现的磨损率而言,CaF₂ 组出现了小幅上涨随后持续的下降,hBN 组则出现了单调递增,表明 hBN 对材料的结构强度破坏程度较大。

3.3 微钻试验

使用热压烧结炉烧制了微型自润滑孕镶金刚石钻头,在微钻实验台上进行微钻试验,钻进对象为砂岩岩样,钻头进尺如图 6 所示。

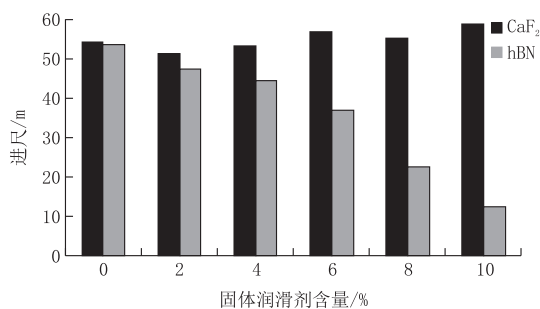


图 6 钻头进尺随固体润滑剂含量变化

由图 6 可知,随着 CaF₂ 含量的增加,钻头进尺略有提高;而 hBN 含量的增加使钻头进尺大幅降低。结合之前试验分析可知,hBN 钻头的力学强度弱于 CaF₂ 钻头,因此在钻进过程中,虽然 hBN 钻头也能产生自润滑效果,但其胎体很容易被破坏,造成金刚石的过早剥落。相比之下,CaF₂ 钻头胎体的力学性能降低不大,随着 CaF₂ 含量的增多,自润滑效果增强,降低了对摩表面的摩擦热,从而降低了金刚石热损伤,延长金刚石使用寿命,使钻头进尺得以提高。

4 结论与展望

本文试验表明,固体润滑剂 CaF_2 与 hBN 的添加使孕镶金刚石钻头胎体具备了自润滑功能,使钻头在钻进过程中底唇面与对磨件之间的摩擦系数显著降低,随着固体润滑剂添加量的增加,摩擦系数降低幅度增大。同时,固体润滑剂的加入降低了胎体材料的力学强度, CaF_2 对胎体力学强度的负面影响较小,甚至能提高胎体的硬度,而 hBN 对胎体力学性能的削弱程度较大。由于这一原因,随着固体润滑剂含量的增多, CaF_2 组胎体磨损率先略微增加,后逐渐降低,其理论最低值可能出现在 CaF_2 含量大于 10% 处,需要进一步试验研究;而 hBN 组磨损率则随着 hBN 含量呈单调递增。微钻试验表明,随着 CaF_2 添加量的增多,钻头进尺小幅增加,而随着 hBN 含量的增多,钻头的进尺大幅减少。综上所述,就制造自润滑孕镶金刚石钻头而言, CaF_2 比 hBN 更适合作为 Fe 基孕镶金刚石钻头胎体添加剂,能够起到提高钻头进尺的作用。

自润滑孕镶金刚石钻头理论体系的研究正处于初期阶段,当前的主要任务是固体润滑添加剂的选型。固体润滑剂的合理选择,或不同种固体润滑剂之间的合理匹配,有望实现孕镶金刚石钻头力学强度和摩擦学性能的共同提升,从而在特殊工作条件下更好地保护金刚石颗粒,延长钻头使用寿命,提高钻头进尺。

参考文献:

- [1] 陈宝良.提高薄壁钻头性能的技术途径[J].工程技术:引文版:00016-00016.
- [2] 张所邦,周玉龙.金刚石薄壁钻技术的发展与展望[J].探矿工程,2003,(S1):187-189.
- [3] 刘广志.科学钻探推动地球科学发展[J].西部探矿工程,2000,22(4):1-6.
- [4] 刘志明,孙友宏.干旱缺水地区深水井泡沫钻进技术研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2000,30(3):299-302.
- [5] 汪栋.在缺水干旱地区施工水井采用常规空气钻进工艺研究[J].西部探矿工程,2012,24(12):49-51.
- [6] 刘广志.超深孔钻探概况[J].探矿工程,1979,(3):11-13.
- [7] 顾新鲁,李清海,刘庆章,等.空气泡沫钻进在干旱地区水井钻探方面的应用[J].西部探矿工程,2005,17(8):113-114.
- [8] 艾贵成,王卫国,张宝峰,等.深井高温高密度钻井液润滑性控制技术[J].西部探矿工程,2009,21(6):42-44.
- [9] 李希勇.月球钻探螺旋钻具排粉机理的研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- [10] 潘秉锁,方小红,杨凯华.自润滑孕镶金刚石钻头胎体材料初步研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(1):76-78.
- [11] 孔晓丽,刘勇兵,陆有,等.粉末冶金高温金属基固体自润滑材料[J].粉末冶金技术,2001,19(2):86-92.
- [12] 王常川,王日初,彭超群,等.金属基固体自润滑复合材料的研究进展[J].中国有色金属学报,2012,22(7):1945-1955.
- [13] 黄文轩,张英华.固体润滑剂添加剂综述[J].润滑油,1999,(5):5-11.
- [14] 薛群基,吕晋军.高温固体润滑研究的现状及发展趋势[J].摩擦学学报,1999,19(1):91-96.
- [15] 刘志义.低温低压条件下石墨/ MoS_2 对金刚石钻头胎体磨损性能影响的试验研究[D].湖北武汉:中国地质大学,2013.
- [16] 谢兰兰,潘秉锁,段隆臣.石墨粒度对自润滑孕镶金刚石钻头性能的影响[J].地质科技情报,2014,33(3):181-184.
- [17] 段隆臣,庞丰,谢兰兰,等.低温低压下石墨对金刚石钻头胎体摩擦性能的影响[J].北京工业大学学报,2015,(5):776-782.
- [18] Sliney H E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures—A Review[J]. Tribology International, 1982, 15(5): 303-315.
- [19] Fedorchenko I M, Zozulya V D, Shevchuk Y F. Lubricating properties of calcium fluoride[J]. Soviet Powder Metallurgy & Metal Ceramics, 1970, 9(10): 818-820.
- [20] Deadmore D L, Sliney H E. Hardness of CaF_2 and BaF_2 solid lubricants at 25 to 670 deg C [DB/OL]. [https://ntrs.nasa.gov/search.jsp? R=19870009237](https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19870009237).
- [21] Sliney H, Strom T, Allen G. Fluoride Solid Lubricants for Extreme Temperatures and Corrosive Environments[J]. A S L E Transactions, 1965, 8(4): 307-322.
- [22] Rowe G W. Some observations on the frictional behaviour of boron nitride and of graphite[J]. Wear, 1960, 3(4): 274-285.
- [23] 谢凤,朱江.固体润滑剂概述[J].合成润滑材料,2007,34(1): 31-33.
- [24] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Fluorite-unit-cell-3D-ionic.png> [DB/OL].
- [25] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Boron-nitride-%28hexagonal%29-side-3D-balls.png> [DB/OL].