

玄武岩纤维在钻探机具中的应用研究与展望

马银龙^{1,2}, 孙志刚^{1,2}, 任杰^{1,2}, 李嘉程¹, 周庆权^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要: 针对铝合金钻杆材料耐磨性差和耐腐蚀性差, 以及坚硬地层钻进难等钻探难题, 本文研究了玄武岩纤维对 7075 铝合金钻杆材料和 WC 基金刚石复合材料的性能影响, 通过粉末冶金和热压烧结制备了铝基复合材料和胎体, 并对其性能进行测试和研究。结果表明, 玄武岩纤维/7075 铝基复合材料的力学性能和耐腐蚀性能得到提升, 玄武岩纤维的加入降低了胎体的磨耗比, 提升了胎体的密实度、导热系数和金刚石把持力。本文还对玄武岩纤维在套管和油管领域的应用研究进行了总结和展望。

关键词: 玄武岩纤维; 钻探机具; 铝合金钻杆; 钻头胎体; 套管

中图分类号: P634; TE921 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0163-06

Research and prospect on the application of basalt fiber in drilling tools

MA Yinlong^{1,2}, SUN Zhigang^{1,2}, REN Jie^{1,2}, LI Jiacheng¹, ZHOU Qingquan^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: In response to the drilling challenges such as poor wear resistance and corrosion resistance of aluminum alloy drill pipes and the difficulty of drilling in hard strata, the effects of basalt fibers on the properties of 7075 aluminum alloy drill pipe materials and WC-based diamond composites were investigated in this paper. The aluminum matrix composites and matrix were prepared by powder metallurgy and hot-pressing sintering, and their properties were tested. The results showed that the mechanical properties and corrosion resistance of basalt fiber/7075 aluminum matrix composites were improved compared with 7075 aluminum alloy. The basalt fibers reduces the wear ratio of the matrix, improves the density and thermal conductivity of the matrix, and increases the force of the matrix holding the diamond. This paper also summarizes and outlooks the research on the application of basalt fibers in the field of casing and oil pipe. The research on the application of basalt fiber in the field of casing and tubing is also summarized and prospected in this paper.

Key words: basalt fiber; drilling tools; aluminum drill pipe; impregnated drill bit matrix; casing

0 引言

玄武岩纤维(Basalt fiber, 以下简称 BF)是玄武岩经高温熔融状态下快速拉丝制成的连续非金属纤维, 强度高, 耐磨损, 耐高温, 化学稳定性好^[1-2]。

如表 1 所示, 与碳纤维等其他纤维相比, BF 成本较低, 性价比高^[3-7]。目前, BF 在世界范围内广泛应用于工业、民用和国防等领域^[8-9]。此外, BF 管材在石油领域同样具有很强的应用优势: 成本低廉, 绿色

收稿日期: 2023-06-16; 修回日期: 2023-08-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.024

基金项目: 国家重点研发项目“精准勘探定向钻进连续取心前沿技术研发”(编号: 2021YFC2900200); 吉林省科技发展计划项目“玄武岩纤维金刚石钻头复合材料设计及制备”(编号: 20230203114SF); 重点支持领域项目“玄武岩纤维增强孕镶金刚石钻头胎体耐磨性研究”(编号: X202210183457)

第一作者: 马银龙, 男, 汉族, 1984 年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 从事钻探机具与材料方面的研究工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号, ylma@jlu.edu.cn。

引用格式: 马银龙, 孙志刚, 任杰, 等. 玄武岩纤维在钻探机具中的应用研究与展望[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 163-168.

MA Yinlong, SUN Zhigang, REN Jie, et al. Research and prospect on the application of basalt fiber in drilling tools[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 163-168.

环保,密度小,耐腐蚀性强,并且具有一定的可挠性,适用于小曲率半径的定向井,与其他材料管材的兼容性较好^[9]。在国外,BF已经被用于制造管材以取代石油等领域现有的钢制套管和油管^[10]。此外,由

于具有优异性能和较低成本,BF常作为聚合物、混凝土和金属基体复合材料加固的重要材料,尤其是作为一种纤维增强相用于制备各种金属基复合材料,得到了众多学者的关注和研究^[11-16]。

表1 常见纤维的基本性能

纤维种类	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	最高使用温度/℃	价格/(万元·t ⁻¹)
玄武岩纤维	2000~4840	80~100	2~3	700	3
碳纤维	3000~6500	230	1.5~2	600	12
氧化铝纤维	1500~3500	200~385	1.5~2.5	1400	1
碳化硅纤维	3450	200	1.4~1.8	1000	12
硼纤维	3200~5200	350~400		1200	600

钻井工程面临着高地温、高地应力、坚硬地层和强腐蚀环境等复杂的工况,钻孔深度和钻进难度的提高导致对钻具性能的要求也越来越高^[17-19]。目前,钻具性能的提升方法主要包括优化钻具结构、优选高性能材料和优选钻探工艺等^[20-23]。铝合金钻杆由于质量轻、比强度高,在超深井和水平井具有巨大的应用潜力^[24-25],但其耐磨性和耐腐蚀性差,严重影响了其在应用中的安全性和可靠性^[26-28]。随着材料领域的发展,金属基复合材料的优异性能得到关注,为提高铝合金材料的机械性能和耐腐蚀性能,通常会引入增强相来制备铝基复合材料^[29-32]。Pan等^[30,32-33]对纳米增强金属基复合材料进行了广泛的研究,所使用的增强相包括TiC、TiB₂、CrB/CrB₂等。BF具有良好的机械性能、耐磨性能和耐腐蚀性能,同时,相较于各种纳米材料或碳纤维等具有明显的价格优势,在铝基复合材料中已经得到研究和应用,Adole等^[34]通过搅拌铸造技术制备了BF/A356铝基复合材料,其抗拉强度和耐磨性均得到提高。

此外,一些特殊地层的钻进难题一直受到研究者的关注,如“打滑”地层,即坚硬致密弱研磨性地层,利用孕镶金刚石钻头钻进“打滑”地层时,由于地层研磨性弱,胎体中的金刚石难以出露,钻头唇面被抛光而无法有效进尺,钻进效率急剧降低,钻头提前失效。对此,已有大量的学者进行了各方面的研究,包括胎体性能调控、钻头结构设计等方面^[35-36]。其中,通过弱化胎体耐磨性来帮助金刚石出刃是重要的研究方向之一^[37]。董书山等^[38]研究发现,添加质量分数2%的Sn粉可以提高预合金胎体的脆性磨损能力,促进金刚石的快速出刃。金鑫等^[39]提出用

Fe替代传统WC基胎体中的一部分WC,从而提高孕镶金刚石钻头在“打滑”地层中的钻进效果,同时,更便宜的Fe粉能够降低钻头的成本。王佳亮等^[40]在胎体中添加适当浓度的弱化颗粒,在保证钻头寿命的前提下提高了钻头的钻进效率,平均钻速与常规钻头相比提高了64%。

目前,作者所在研究团队已经将取之于岩浆岩的BF用于地下岩层钻进的轻质铝合金复合钻杆材料^[22,41-42]、孕镶金刚石钻头胎体的制备^[43-44],以解决铝合金钻杆材料耐磨性差和耐蚀性不足,以及坚硬地层钻进难等钻探难题,力争实现“取之于岩,用之于岩”。以BF作为增强相,采用粉末冶金制备了BF增强7075铝合金复合材料,结果表明复合材料的力学性能和耐腐蚀性能也得到了显著提升^[22]。基于BF在各种金属基复合材料中良好的使用效果,笔者也尝试采用BF来调控孕镶金刚石钻头的胎体性能,并取得了一些初步效果^[43-44]。本文还基于BF在国内外的石油相关领域的应用和研究现状,对BF在油管和套管领域的应用研究进行了总结和展望,以期证明BF在钻探钻具领域具有广泛的应用前景。

1 BF对7075铝合金钻杆性能的影响

1.1 铝基复合材料的制备

选择商用7075铝合金粉制备基体材料,选用单丝直径为13 μm的BF无捻粗纱制备增强相,通过短切、球磨和筛分得到长度约为60 μm的短纤维,铝粉和纤维的成分如表2所示。通过真空热压烧结(580℃,30 MPa,15 min)和热挤压(470℃,挤压比

12:1)制备了纤维含量为1 wt.%的BF增强7075铝基复合材料,并对其进行T6热处理,包括470 °C、2 h

固溶处理和120 °C、24 h人工时效处理。

表2 7075铝粉和BF的成分表(wt. %)

7075 铝粉	Cu	Mg	Zn	Mn	Fe	Si	Al	
	1.53	2.32	5.72	0.01	0.15	0.28	余量	
BF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
	51.22	16.92	9.03	9.77	7.2	1.85	2.04	1.75

1.2 性能测试和结果

对复合材料的硬度、抗拉强度、延伸率、耐磨性能和耐腐蚀性能等衡量钻杆性能的重要指标进行测试,其中:硬度采用显微硬度计进行测试,载荷为100 g,保压15 s;抗拉强度和延伸率采用DDL100型电子万能试验机进行测试,样品在测试前利用砂纸打磨2000目,并利用无水乙醇超声清洗,拉伸速率设置为0.5 mm/min;耐磨性能采用美国CETR公司生产的UMT-2型摩擦磨损试验机进行圆周式磨损测试,样品在测试前利用砂纸打磨2000目,并利用无水酒精超声清洗,载荷设定15 N,摩擦速率为200 r/min,圆周式磨损直径为2 mm,测试时间20 min;耐腐蚀性能通过浸泡腐蚀实验进行评价,向去离子水中加入2 wt.%的膨润土、0.5 wt.%的Na-CMC和3 wt.%的NaCl,用NaOH将pH值调节至10.0,将样品在其中浸泡7 d,记录腐蚀后的质量损失。

测试结果如表3所示。结果表明,复合材料的硬度、延伸率、耐摩擦性、耐腐蚀性均得到提升,仅有抗拉强度出现略微的下降,下降幅度仅为2.7%,在整体上,BF增强了7075铝基复合材料的综合性能,包括机械性能和耐腐蚀性能,与7075铝合金相比得到了明显的提升。

表3 BF/7075Al复合材料的性能测试结果

材料	显微硬度/HV	抗拉强度/MPa	延伸率/%	摩擦系数	腐蚀质量损失/(mg·cm ⁻²)
7075铝合金	93.6	478.5	3.1	0.46	2.0
BF-7075复合材料	105.4	465	4.5	0.44	0.8

2 BF对金刚石钻头胎体性能的影响

2.1 钻头胎体的制备

胎体选用WC基配方,Wc作为骨架材料,663-Cu作为粘结材料,添加Ni、Co、Mn作为基体调节材

料,BF作为WC的骨架弱化材料。使用球磨后的BF与胎体粉进行混料,采用热压烧结工艺制备样品,烧结参数为980 °C,15 MPa下保温保压4 min。分别制备了不含金刚石的纯胎体和金刚石体积浓度为20%的孕镶钻头材料,BF添加量分别为0 wt.%、1 wt.%、3 wt.%和5 wt.%,各组样品的胎体成分如表4所示。

表4 胎体粉末材料的化学成分(wt. %)

BF添加量	WC	663-Cu	Ni	Co	Mn
0	54	35	5	3	3
1	53	35	5	3	3
3	51	35	5	3	3
5	49	35	5	3	3

2.2 性能测试和结果

使用HXD 1000TM/LCD型显微硬度计和DDL-100型万能试验机对不同BF含量的纯胎体的显微硬度和抗弯强度进行测试,显微硬度测试参数为压力500 g,保压15 s,弯曲试验的加载速度为0.1 mm/min。硬度和抗弯强度测试结果如图1所示。测试结果显示,随着BF含量的增多,胎体的硬度先下降后上升,抗弯强度先上升后下降,在BF含量为1 wt.%分别达到最小硬度和最大强度。使用孕镶金刚石钻头钻进坚硬致密弱研磨性地层时,硬度的降低使胎体磨损加快,使得金刚石能更好地出露,而强度的提升能够保证钻头的使用寿命,避免出现掉块等。

对含金刚石的钻头样品进行性能测试:使用DHM-2型磨耗比测试仪对含金刚石的钻头样品的耐磨性进行测试,摩擦副选用SiC砂轮,摩擦线速度15 m/s,加载压力为300 g,样品摆动频率设置为35 Hz,记录试验前后砂轮与样品的失去质量之比得到钻头材料的磨料比;采用阿基米德排水法计算样品

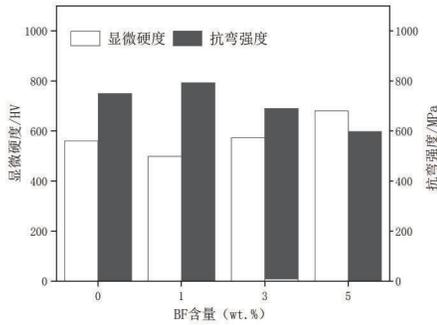


图1 不同BF含量的纯胎体的显微硬度和抗弯强度

的密实度;采用Hot Disk公司的TPS2500S型Thermal Constants Analyser测试样品的导热性,采用单面测试法,测试功率1.8 W,测试时间10 s;使用万能试验机测试样品的抗弯强度,并根据抗弯强度计算胎体对金刚石的把持力,把持力系数由公式(1)计算:

$$F = \frac{\sigma_D}{\sigma_B} \times 100\% \quad (1)$$

式中: σ_D 和 σ_B ——分别为含金刚石样品和纯胎体样品的抗弯强度,MPa。

含金刚石胎体性能测试结果如表5所示,随着BF含量的增多,样品的磨耗比减小,样品的密实度、导热系数和把持力系数都是先升高后降低。磨耗比的减小表明BF的加入弱化了胎体的耐磨性能,BF作为非金属材料,与基体的结合面属于脆弱边界,随着BF含量的增大,胎体中的脆弱边界增多,在钻进时BF出现脱落,胎体磨损速度加快。含金刚石样品的密实度、导热系数和把持力系数,表现出和纯胎体抗弯强度一样的变化趋势,并且均在BF加量为1 wt.%时达到最大值,这表明当添加适量的BF时(1 wt.%),胎体的孔隙率减小,金刚石与基体的界面结合强度提高,内部空隙的减少有利于热量的传递,在钻井液的作用下能提高钻头的冷却效果。而当BF含量过高时,胎体中基体的完整性和连续性会被破坏,BF的聚集还会导致胎体内部缺陷增多,不利于胎体强度的保持。

综合上述实验结果,当添加适量的BF时(1 wt.%),既能实现对钻头胎体的弱化,又能提高胎体对金刚石的把持力,使得钻头在“打滑”地层钻进时,既能保证金刚石及时出露,又能保证金刚石不至于过快地脱落,最大程度上提高钻头的钻进效率和使用寿命。

表5 含金刚石胎体的性能测试结果

BF含量/ wt. %	磨耗比	密实 度/%	导热系数/ [W·(mK) ⁻¹]	把持力系 数/%
0	1495	97.7	13.93	41
1	1264	98.0	18.43	53
3	972	96.9	15.02	46
5	966	96.7	8.91	38

3 BF在套管和油管中的应用展望

BF管材制备时,是将纤维连续缠绕在模具上,加入聚合粘结剂,在成型之后卸下模具并切割成所需的长度。目前,油气钻井领域常用的套管和油管多为碳钢或合金钢管材,表6和表7^[45]展示了部分油气钻井用常规套管和油管的主要性能指标。与钢制管材相比,BF管材质量轻,耐腐蚀性强,刚度好,成本低廉。在俄罗斯,生产出的BF管材被用在石油领域,包括油管、套管和地面输油管等^[9]。此外,世界范围内也有众多学者对BF管材进行了研究,Roslán等^[46]研究了BF薄壁编织复合管材的轴向冲击破碎性能。Mertiny等^[10]研究了BF管材、E-玻璃纤维和S-玻璃纤维管材的强度和破坏行为,结果显示BF管材具有比E-玻璃纤维管材更高的强度,但低于S-玻璃纤维管材。Fiore等^[47]研究了海用的BF-玻璃纤维/环氧树脂复合管材。

表6 套管使用性能指标(P110钢级)

外径/mm	壁厚/mm (最小值)	抗挤强 度/MPa	延性断裂强度/MPa (取 $a_N=5$)
114.30	6.35	52.2	84.9
127.00	7.52	61.0	90.7
139.70	7.72	51.5	84.4
168.28	8.94	46.4	81.0
177.80	9.19	42.9	78.8
193.68	9.53	36.9	74.7
244.48	11.05	30.5	68.4
273.05	11.43	25.2	63.2
298.45	12.42	24.9	62.8
339.72	12.19	16.1	53.9
406.40	16.66	23.9	61.9

在油气钻井领域,套管的使用环境中常伴有H₂S、CO₂等气体,而在海洋钻井中,套管受海水侵蚀同样极易发生腐蚀,因此,质量轻、耐腐蚀性强的BF

表7 油管使用性能指标(P110钢级)

外径/mm	壁厚/mm (最小值)	抗挤强度/MPa	延性断裂强度/MPa (取 $a_N=5$)
52.40	5.72	147.3	174.7
60.32	4.83	111.1	124.8
73.02	5.51	100.2	117.3
88.90	6.45	93.2	112.5

管材必然会得到越来越多的关注和应用研究。

4 结论与展望

本文总结了BF在国内外油气和钻具相关领域的研究现状,并介绍了所在课题组对BF在铝合金钻杆材料和孕镶金刚石钻头中的应用研究和已取得的成果,包括BF对7075铝合金钻杆材料和WC基金刚石复合材料的性能影响,并对BF在套管和油管领域的应用研究进行总结和展望,得出以下结论:

(1)BF的力学性能和耐蚀性非常好,其密度又和铝合金接近,同时两者又具有较好的界面结合强度,以7075铝合金粉末为基体,BF为增强相,制备了BF/7075铝基复合材料,结果表明适量的BF加量,提升了BF/7075铝基复合材料的力学性能和耐腐蚀性能,这为设计制造新型轻质高强铝合金钻杆提供了一种新思路。

(2)在WC基孕镶金刚石钻头胎体中添加适量的BF时,含金刚石钻头胎体的磨耗比降低,密度和导热系数得到提升,胎体对金刚石的把持力提高,使得在“打滑”地层钻进时,既能保证金刚石及时出露,又能保证金刚石不至于过快脱落,从而提高钻进效率。

(3)BF管材在世界范围内已经得到了广泛的研究和应用,与钢制管材相比,BF管材具有明显的性能优势,质量轻、耐腐蚀性强的BF管材在钻井领域必然会得到越来越多的关注和研究,具有广泛的应用前景。

(4)BF是由二氧化硅、氧化铝和氧化钙等氧化物组成,具有优异的力学性能、耐腐蚀性能和耐高温性能,但还具有电绝缘和隔热性能,这样就导致BF及其复合材料,在采用加热或通电制备加工过程中成型难,因此,必须结合钻探钻具的工况需求和BF的性能特征,合理设计和选择制备方法和成型工艺。

参考文献:

- [1] Shan, Li, Liang, et al. Design and NC manufacturing of plastic injection mold based on UG software [C]. Proceedings of the 2012 International Conference on Manufacturing, 2012.
- [2] 宋平,高欢,汪灵,等.玄武岩纤维基本特征及应用前景分析[J].矿产保护与利用,2022,42(4):173-178.
- [3] 刘晨曦,于惠舒,张楠楠,等.碳纤维增强铝基复合材料的研究现状[J].钢铁研究学报,2021,33(12):1205-1218.
- [4] 吴复涛,于延龙,李春海,等.纤维增强金属基复合材料研究进展[J].铸造设备与工艺,2022(1):52-56.
- [5] 毕鸿章.碳纤维性能及用途简介[J].建材工业信息,1996(24):6-7.
- [6] 胡显奇.我国连续玄武岩纤维的进展及发展建议[J].高科技纤维与应用,2008,33(6):12-18,38.
- [7] 向宇,余金山,王洪磊,等.碳化硅纤维高温抗氧化性研究进展[J].硅酸盐通报,2022,41(9):3234-3242.
- [8] 张建伟,余希林,刘嘉麒,等.连续玄武岩纤维新材料的制备、性能及其应用[J].材料导报,2023(11):1-14.
- [9] 杨明清,秦黎明,付丽霞.玄武岩纤维管材在石油领域的应用现状及前景分析[J].科技导报,2013,31(7):75-79.
- [10] Mertiny P, Juss K, EL Ghareeb M M. Evaluation of glass and basalt fiber reinforcements for polymer composite pressure piping[J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME, 2009,131(6):061407.
- [11] Colombo C, Vergani L, Burman M. Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites[J]. Composite Structures, 2012,94(3):1165-1174.
- [12] Daghigh V, Khalili S M R, Farsani R E. Creep behavior of basalt fiber-metal laminate composites[J]. Composites Part B-Engineering, 2016,91:275-282.
- [13] Fiore V, Scalici T, DI Bella G, et al. A review on basalt fibre and its composites[J]. Composites Part B-Engineering, 2015,74:74-94.
- [14] Yang Z, Liu J, Feng X, et al. Investigation on mechanical properties and failure mechanisms of basalt fiber reinforced aluminum matrix composites under different loading conditions[J]. Journal of Composite Materials, 2018,52(14):1907-1914.
- [15] 谢雨凌,汪明亮,马乃恒,等.玄武岩纤维增强铝基复合材料的界面反应及力学性能分析[J].铸造技术,2013,34(7):803-806.
- [16] 李乾.玄武岩纤维增强铜基复合材料的制备及性能研究[D].长春:长春工业大学,2022.
- [17] 朱丽娟,刘永刚,李方坡,等.G105钢制钻杆腐蚀失效的原因[J].腐蚀与防护,2016,37(9):775-780.
- [18] 余荣华,袁鹏斌.铝合金钻杆的特点及应用前景[J].石油矿场机械,2011,40(3):81-85.
- [19] 刘月明.不同钢级连续油管疲劳性能的差异[J].化学工程与装备,2020(11):120-121.
- [20] 刘磊,黄侠,邢海军,等.海上连续油管内防腐工艺研究及现场

- 试验[J].中国海上油气,2019,31(6):132-137.
- [21] 高科,孙友宏,高润峰,等.仿生非光滑理论在钻井工程中的应用与前景[J].石油勘探与开发,2009,36(4):519-522,540.
- [22] Ma Y, Xiong H, Chen B. Preparation and corrosion resistance of short basalt fiber/7075 aluminum composite [J]. *Materials and Corrosion*, 2020,71(11):1824-1831.
- [23] Ma Y, Xiong H, Chen B. Effect of heat treatment on microstructure and corrosion behavior of Mg-5Al-1Zn-1Sn magnesium alloy [J]. *Corrosion Science*, 2021,191:109759.
- [24] Liang J, Yue W, Gu Y, et al. Improving corrosion resistance and corrosive wear resistance of aluminum alloy drill pipe by surface nano crystallization and micro-arc oxidation[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018,27(9):4462-4472.
- [25] Yang S Y, Feng C, Feng Y R, et al. Aluminum alloy pipe design and mechanical property analysis[C]. *Proceedings of the Chinese Materials Conference*, Yinchuan, 2018.
- [26] Plácido J C R, Miranda P E V D, Antoun Netto T, et al. Fatigue analysis of aluminum drill pipes[J]. *Materials Research*, 2005,8(4):409-415.
- [27] Wang X, Guo J, Lin Y, et al. Study the effect of SiC content on the wear behavior and mechanism of as-extruded SiCp/Al-Cu-Mg-Zn alloy under simulating drilling operation [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2016,48(8):860-867.
- [28] Wang X, Peng Z, Zhong S, et al. Effect of extrusion texture on corrosion behaviour of D16T drill pipe in 3.5% NaCl Solution [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2018,13(9):8970-8982.
- [29] Pan S, Dong S, Xu M. Electrochemical origin for mitigated pitting initiation in AA7075 alloy with TiB₂ nanoparticles[J]. *Applied Surface Science*, 2022,601:154275.
- [30] Pan S, Yuan J, Linsley C, et al. Corrosion behavior of nano-treated AA7075 alloy with TiC and TiB₂ nanoparticles [J]. *Corrosion Science*, 2022,206:110479.
- [31] Pan S, Saso T, Yu N, et al. New study on tribological performance of AA7075-TiB₂ nanocomposites[J]. *Tribology International*, 2020,152:106565.
- [32] Chi Y, Pan S, Liese M, et al. Wire-Arc directed energy deposition of aluminum alloy 7075 with dispersed nanoparticles[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2023,145(3):031010.
- [33] Yao G, Cao C, Pan S, et al. Thermally stable ultrafine grained copper induced by CrB/CrB₂ microparticles with surface nanostructures via regular casting [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020,58:55-62.
- [34] Adole O, Barekar N, Anguilano L, et al. Fibre/matrix intermetallic phase formation in novel aluminium-basalt composites [J]. *Materials Letters*, 2019,239:128-131.
- [35] 蔡家品,贾美玲,沈立娜,等.难钻进地层金刚石钻头的现状和发展趋势[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):67-73,91.
- [36] 王佳亮,张绍和.坚硬致密弱研磨性地层孕镶金刚石钻头性能优化[J].煤田地质与勘探,2016,44(6):159-163.
- [37] 郭庆清,王佳亮,张绍和.胎体弱化颗粒材质对WC基孕镶金刚石钻头胎体磨损性能的影响[J].中国有色金属学报,2015,25(9):2531-2536.
- [38] 董书山,吴雪峰,刘晓旭,等.金属预合金粉末与单质粉末在应用中的配伍特点研究[J].超硬材料工程,2013,25(1):6-11.
- [39] 金鑫,方小红,段隆臣,等.新型热压WC-Fe基金刚石钻头胎体性能研究[J].煤田地质与勘探,2013,41(3):84-86.
- [40] 王佳亮,张绍和.胎体耐损性弱化孕镶金刚石钻头的试验及碎岩机理分析[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(4):1436-1441.
- [41] 熊洪威,马银龙,张帅,等.玄武岩纤维增强铝基复合钻杆材料的制备研究[J].钻探工程,2021,48(3):140-145.
- [42] 熊洪威.钻杆用玄武岩纤维增强铝基复合材料制备和性能研究[D].长春:吉林大学,2022.
- [43] Chen C, Liu X, Zhou Q Q, et al. Effect of basalt fiber on the thermal conductivity and wear resistance of sintered WC-based diamond composites [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022,105:105829.
- [44] Chen C, Liu X, Zhou F, et al. Effect of basalt fiber on the microstructure and holding strength of sintered WC-based diamond composite[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021,99:105600.
- [45] GB/T 20657—2022,石油天然气工业套管、油管、钻杆和用作套管或油管的管线管性能公式及计算[S].
- [46] Roslan M N, Yahya M Y, Ahmad Z, et al. Axial impact crushing behaviour of thin-walled braided composite tubes: experimental comparison on basalt fibre and glass fibre reinforcement [C]. *Proceedings of the 8th International Conference on Mechanical and Manufacturing Engineering (ICME)*, 2019.
- [47] Fiore V, DI Bella G, Valenza A. Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications [J]. *Materials & Design*, 2011,32(4):2091-2099.

(编辑 王文)