

深部各向异性硬岩钻进用新型金刚石钻头试验研究

汤凤林^{1,2}, 沈中华¹, 段隆臣², 高申友¹, 彭莉¹, Чихотки В. Ф.²

(1. 无锡钻探工具厂有限公司, 江苏 无锡 214174; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要:我国正在进行深部地质找矿和深部矿产资源开发,“十三五”计划规定了对地下空间的利用和开发进行研究,这些都离不开深部钻探。深部钻探中遇到的岩石多为各向异性岩石,在这种岩石中钻进时,钻孔容易偏斜,影响钻探效率和质量。俄罗斯博士 Скоромных В. В. 教授等对此进行了研究,提出了钻头水口大小变化的设计思想。对比试验结果表明,这种新钻头钻进技术指标较好,值得研究和探讨。

关键词:各向异性硬岩;钻进;金刚石钻头;钻头水口

中图分类号:P634.4⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)04-0074-06

Experimental Research on New Type Diamond Bit for Drilling in Deep Hard Anisotropic Rocks/TANG Feng-lin^{1,2}, SHEN Zhong-hua¹, DUAN Long-chen², GAO Shen-you¹, PENG Li¹, CHIKHOTKIN V. F.² (1. Wuxi Drilling Tools Factory Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214174, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Deep geological survey and exploitation of deep mineral resources are carrying out in China, and the 13th five-year plan sets the research on the exploitation and utilization of underground space, which are inseparable from deep drilling. The rocks encountered in deep drilling are mostly anisotropic ones; borehole is easy to be deflected in this condition, which affects the penetration rate and drilling quality. The related research has been carried on by Russian Professor Скоромных В. В. and some others, a new design idea of diamond bit with waterway of different sizes is proposed. The comparative experiment results show that the technical indexes of this new bit are better than the old diamond bits with standard waterway sizes, and this technology is worth while researching and discussing.

Key words: hard anisotropic rocks; drilling; diamond bit; bit waterway

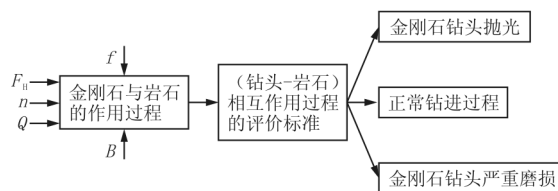
1 问题的提出

钻头和所钻岩石的矛盾是钻探工作的主要矛盾之一。钻头是此矛盾的主要方面。我们要研究钻头,也要分析岩石。选择钻头要根据所钻岩石的物理力学性质来考虑,研究好了岩石的性质,才能研制出针对性强的高效钻头来^[1-11]。

大家都知道,金刚石钻进时,钻头-岩石付相互作用与所钻岩石物理力学性质 f 、所用钻头类型 B 、钻进规程参数(F_H 、 n 、 Q)和正常钻进条件的关系,如图1所示^[8]。

从图1可见,金刚石钻进过程中,首先要解决金刚石钻头-岩石副相互作用问题,即钻头破碎岩石,岩石也磨损钻头的问题;当然也有钻头选用和钻探工艺合理性的问题。

我国正在进行大规模深部地质找矿工作,并已取得了很大的成绩。“十三五”提出要开发和利用地下



F_H —钻压; n —钻头转速; Q —冲洗液量; f —外界因素(岩石物理力学性质等); B —与钻进规程参数无关的参数(钻头类型等)

图1 “金刚石钻头-岩石副”相互作用示意图

空间。深部地质找矿和开发利用地下空间都需要进行深部钻探。深部钻探中遇到的地层多为各向异性(非各向同性)岩石。从岩石力学和岩石破碎原理得知,钻进各向异性岩石时(可以以圆柱形平底压模进行模拟),不同方向的强度是不同的。在垂直地层方向岩石最容易钻进破碎,其他方向破碎阻力较大,因此破碎核成椭圆形(见图2a)。轴载 P 用于克服岩石的内摩擦阻力和克服来自岩石的反力,在

收稿日期:2017-02-05

基金项目:江苏省江苏双创团队资助项目(编号:苏人才办[2014])27号)

作者简介:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院院士,俄罗斯自然科学院院士,国际矿产资源科学院院士,探矿工程专业,主要从事探矿工程方面的教学和科研工作,湖北省武汉市鲁磨路388号中国地质大学(武汉),fltang_wuhan@aliyun.com。

岩石反力分力 $P_{\parallel}^B$ 和 $P_{\perp}^B$ 的作用下,产生翻转力矩 M_{on} (见图 2b), $M_{on} = P_{\parallel}^B a - P_{\perp}^B c$, 在这个翻转力矩的作用下,钻头将偏离中心线一个角度 Ψ (见图

2c)。钻头偏斜(哪怕很小),钻孔自然偏斜,直接影响钻进效率和钻孔质量。因此,要解决钻头偏斜问题^[12]。

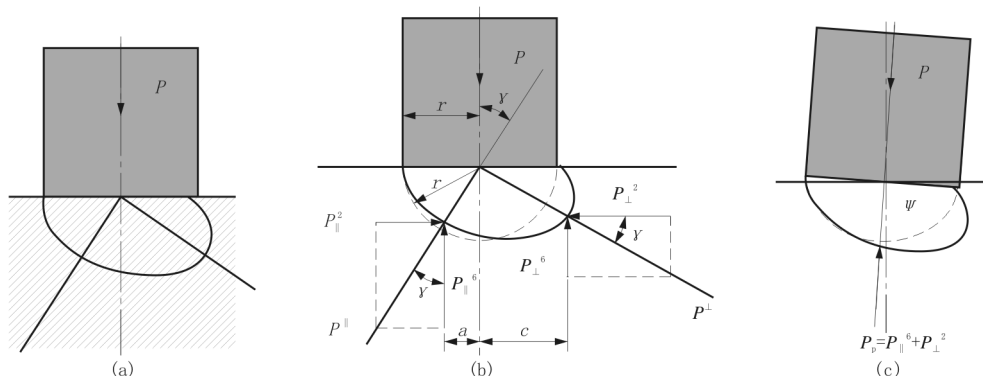


图2 各向异性岩石钻进时岩石破碎示意图

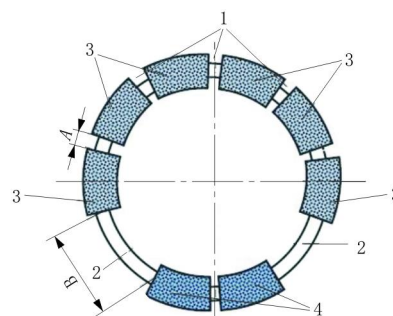
2 新型钻头的设计思路^[13-16]

现用金刚石孕镶钻头多为扇形块大小相等、水口大小相等的钻头,使用这种钻头不能降低异向各性岩石中钻进时钻孔弯曲的情况。考虑到深孔钻进时,许多情况下多数岩石是各向异性的,所以保持钻孔设计方向不变非常重要。俄罗斯博士 Скоромных В. В. 教授等对此进行了研究,提出了钻头水口大小变化的设计思想。

地层各向异性决定了孔底和孔壁破碎不均匀,而且由于翻转力矩 M_{on} 的作用,钻头处于偏斜状态,易于围绕自身中心线回转,于是钻孔弯曲加剧,偏离钻孔设计方向。

新设计的钻头胎体唇面由窄水口1、宽水口2和大小相等的扇形块3和4组成(见图3)。窄水口1宽度 A 是一种标准尺寸,宽水口2宽度 B 是另一种标准尺寸, B 是可以变化的,但是一定要 $B > A$ 。同时,水口2在胎体上的布置,应能保证钻头胎体相对其纵轴中心线是偏心的,这一点可以通过水口2两侧的扇形块3和4的数目不同来达到。例如,宽水口2一侧的扇形块3的个数为6个,另一边的扇形块4的个数为2个。而且,扇形块4的硬度要比扇形块3的大。扇形块4的硬度为 S_1/S_2 , 其中 S_1 是窄水口1钻头半个唇面上的扇形块3的面积, S_2 是宽水口2钻头半个唇面上的扇形块4的面积。

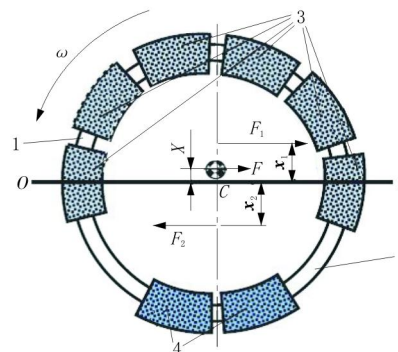
新型 KИT 钻头如下工作。钻进时,钻头在轴载作用下,扇形块3和4切入岩石。由于胎体唇面一侧有两个宽水口2,所以钻头剖面几何重心相对钻头体



1—宽度为 A 的窄水口;2—宽度为 B 的宽水口;3—含金刚石的扇形块;4—硬度大的金刚石扇形块

图3 水口大小变化钻头(KИT)唇面结构图

剖面几何重心(图4c点)移动了一个距离,导致扇形块4上的轴载比扇形块3上的大许多。正因为如此,所以应使扇形块4的硬度更大些。胎体唇面有偏心矩存在,可以保证钻进过程中钻头围绕钻孔中心线回转,并可排除钻孔可能产生最大弯曲的钻头偏斜。



X, X_1, X_2 —分别是中心线 $O-O$ 到胎体唇面重心的距离、 $O-O$ 到两个胎体半个唇面重心的距离; F, F_1, F_2 —分别是岩石切削剪切合力、中心线 $O-O$ 两侧半个胎体唇面的切削剪切力

图4 水口大小变化的钻头唇面岩石切削剪切力分布图

在使用这种新型钻头钻进时,可以排除岩心钻具弯曲和不稳定力、力矩作用下产生的钻头偏斜。

可以把钻头唇面按照中心线 $O-O$ 分成 2 个部分(见图 4)。钻头一侧半个唇面上有窄的标准水口 1,把扇形块 3 分开。由于扇形块 3 上的金刚石是均匀分布的,所以当钻头在钻压和扭矩作用下钻进时,可把钻头唇部这部分中各个单个切削剪切力的合力 F_1 ,以向量的形式置于胎体这半个环状部分的重心上。也可把唇部另一部分中各个切削剪切力的合力 F_2 ,以向量的形式置于胎体另一个半个环状部分的重心上。由于有两个宽水口的半个唇面上的金刚石数量,比另半个唇面上的金刚石数量少得多,所以在数值上 $F_1 > F_2$ 。这两个数值差产生的合力 $F = F_1 - F_2$ 。这个合力 F (见图 4)将位于钻头唇面的重心上,方向与 F_1 方向同向。钻头钻进时,钻头重心是其瞬时回转中心。钻头压向孔壁,可能铣切孔壁和岩心,所以对井筒形成过程产生很大影响,还可能使钻头自身产生局部磨损^[13-16]。

如果钻头扇形块上金刚石分布均匀,则由于钻头工作唇面不平衡而产生的这个力 F ,按下式计算^[16]:

$$F = \frac{\pi(h+0.25\sqrt{dh})^2\sigma_{ck}S_T}{2\tan\gamma_{ck}P_{oc}}\left[\frac{n_6}{S_6}-\frac{n_M}{S_M}\right]+f\frac{P_{oc}}{S_T}(S_6-S_M) \quad (1)$$

式中: h ——钻头切入岩石深度; σ_{ck} ——岩石抗剪强度; S_T ——金刚石钻头唇面总面积; γ_{ck} ——岩石剪切角; P_{oc} ——轴载; n_6 、 n_M ——分别是 $O-O$ 线两边窄水口扇形块和宽水口扇形块上的金刚石粒数; S_6 ——窄水口(见图 4)扇形块 3 半个唇面的面积; S_M ——宽水口扇形块 4 半个唇面的面积; f ——钻头和岩石的摩擦系数。

F 力的存在,可使钻头以钻头体和胎体的侧面,按照该力的作用方向压向孔壁,保持胎体侧面与孔壁接触。在这种情况下,钻头可以在一定程度上抵消各向异性岩石钻进中岩石破碎不均匀而产生的影响。

3 新型钻头和标准钻头的对比试验

为了研究和评价新型钻头的性能,进行了钻头对比试验,即使用水口大小变化的 KHT 钻头和标准水口大小不变的 KHT 钻头进行对比。KHT 钻头型号为 NQ 系列、薄壁 8 mm,外径 76.2 mm 的孕镶金

刚石钻头(见图 5),KHT 钻头为标准水口的金刚石钻头(见图 6)。



图 5 KHT 钻头

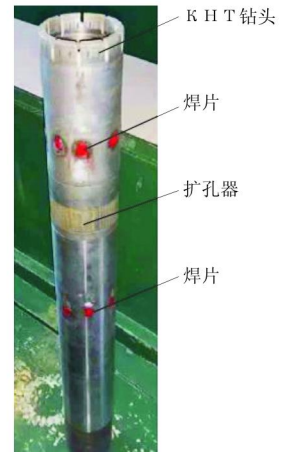


图 6 KHT 钻具

钻头试验是在俄罗斯新西伯利亚联邦大学钻进试验台上进行的。试验台配有 СКБ 钻机和 НБ-3 水泵。钻机安装在 2 m 高的台架上。钻机下面挖有 $0.7\text{ m} \times 0.7\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ 的坑,以供固定岩块使用。钻机装有测量钻进功率消耗的功率表和测量机械钻速的仪表 ИСБ。所用岩石为粗粒玄武岩。所用冲洗液是浓度为 0.12% 的皂化液。钻进过程中,用秒表记录钻进时间,用仪表 ИСБ 记录机械钻速,同时记录不同规程参数时的功率消耗。试验设计是用全因子试验(ПФЭ)方法进行的。根据试验结果得到了不同规程参数(轴载和转速)时有关机械钻速、孔底钻头每转进尺、功率消耗、单位进尺功耗量、所得岩心直径和钻头压到孔壁地点的资料。试验过程中,冲洗液量没有变化,均为 40 L/min ^[16-19]。

3.1 岩石强度的确定

为了确定岩石的力学性质,使用了平底直径为 18 mm 的压膜。所用岩石为粗粒玄武岩(弹性性岩石),岩样为边长 40 mm 的立方体。压膜试验是用三种介质:空气、清水、乳化液(浓度为 0.12% 的皂化液)进行的。测量了岩石硬度 P_m 、塑性系数 K_m 、刚度 C 、弹性模数 E 、屈服极限 P 和破碎单位体积岩石消耗的功 A_s ,测量结果见表 1。

3.2 钻头性能对比试验研究

对水口大小变化的 KHT 钻头和标准水口大小不变的 KHT 钻头进行的对比研究试验,是用二水平全因子试验(ПФЭ)方法进行的。由于冲洗液量没有变化,所以主要是研究目标函数与钻压和转速

表 1 所钻岩石力学性质

岩石硬 介质	塑性 度 P_m / MPa	系数 K_{in}	刚度 C / ($dN \cdot$ mm^{-1})	弹性模 数 E / MPa	屈服极 限 P_o / MPa	破碎单位体积 岩石消耗的功 $A_s/(J \cdot m^{-3})$
空气	3156	1.5	6527.7	36265	2117	897
清水	2831	1.4	5373.8	29855	2374	818
乳化液	2438	1.2	4030.1	22389	2078	693

的关系。根据钻探操作规程并考虑钻机的性能,选用的规程参数 4 个组合为:

$$(1) n = 435 \text{ r/min}, p = 1000 \text{ dN};$$

$$(2) n = 435 \text{ r/min}, p = 1400 \text{ dN};$$

$$(3) n = 710 \text{ r/min}, p = 1000 \text{ dN};$$

$$(4) n = 710 \text{ r/min}, p = 1400 \text{ dN}。$$

研究的目标函数为机械钻速 v_m (m/h)、钻头每转进尺 h_{06} (mm/转)、单位进尺钻进能耗量 N/v_m (kWh/m)、钻进功率 N (kW) 和岩心直径 d (mm)。

标准水口大小不变 KHT 钻头用清水作冲洗液的试验数据处理结果为:

$$v_m = 11.08 + 1.36p + 2.54n + 0.32pn \quad (2)$$

$$h_{06} = 0.32 + 0.04p - 0.004n - 0.0002pn \quad (3)$$

$$N = 10.9 + 0.025p + 1.125n - 0.025pn \quad (4)$$

$$N/v_m = 1.02 - 0.04p - 0.01pn \quad (5)$$

用乳化液作冲洗液的标准水口大小不变 KHT 钻头试验数据处理结果为:

$$v_m = 11.6 + 1.99p + 2.5n + 0.57pn \quad (6)$$

$$h_{06} = 0.34 + 0.057p - 0.009n - 0.0003pn \quad (7)$$

$$N = 11.15 + 1.18p + 1.58n - 0.125pn \quad (8)$$

$$N/v_m = 1.0 - 0.0635p - 0.0735n - 0.012pn \quad (9)$$

水口大小变化的 KHT 钻头用清水作冲洗液的试验数据处理结果为:

$$v_m = 12.08 + 2.12p + 2.49n + 0.45pn \quad (10)$$

$$h_{06} = 0.355 + 0.062p - 0.013n - 0.002pn \quad (11)$$

$$N = 11.73 + 1.125p + 1.275n + 0.175pn \quad (12)$$

$$N/v_m = 1.0 - 0.083p - 0.1n + 0.012pn \quad (13)$$

用乳化液作冲洗液的水口大小变化的 KHT 钻头试验数据处理结果为:

$$v_m = 12.32 + 2.48p + 2.54n + 0.66pn \quad (14)$$

$$h_{06} = 0.36 + 0.072p - 0.013n - 0.0021pn \quad (15)$$

$$N = 12.0 + 1.5p + 1.25n - 0.25pn \quad (16)$$

$$N/v_m = 1.0 - 0.078p - 0.103n - 0.003pn \quad (17)$$

上述关系式中,第一项表示是试验结果平均值,如(2)式中第一项表示机械钻速为 11.08 m/h;第二项表示机械钻速与钻压的关系,第三项表示机械钻

速与转速的关系,第四项表示交互作用,即机械钻速与钻压和转速乘积的关系,各项前面的数值表示该因子的作用(权重),下同。

从(2)、(6)和(10)、(14)式比较得知,水口大小变化 KHT 钻头的机械钻速、钻头每转进尺均比标准水口大小不变的 KHT 钻头为高,用乳化液作冲洗介质时比用清水作冲洗介质效果更好。

对比(4)、(8)和(12)、(16)式得知,水口大小变化 KHT 钻头的钻进功率消耗量比标准水口大小不变的 KHT 钻头为高,用乳化液作冲洗介质时比用清水作冲洗介质效果更高。但是,KHT 钻头的单位进尺能耗量比标准水口的 KHT 钻头为低,用乳化液作冲洗介质时比用清水作冲洗介质的单位进尺能耗量也是如此。我们知道,钻头单位进尺能耗量比钻进功率消耗量更能说明问题,更为重要。

上述结果说明,KHT 钻头技术指标均比标准水口的 KHT 钻头技术指标好,说明这种新型钻头设计思想是成功的。这可能是由于钻进时,水口大小不同、流速不同,引起了水力动力学特性发生变化,有利于岩石破碎、岩粉排除和冷却钻头金刚石切削具所致。

3.3 岩心磨损和 KHT 钻头体磨损研究

3.3.1 岩心磨损

钻头对比试验时,测量了岩心的磨损情况。标准水口大小不变 KHT 钻头使用清水作冲洗液时,岩心直径为 61.25 mm,使用乳化液时为 61.4 mm;水口大小变化 KHT 钻头使用清水作冲洗液时,岩心直径为 60.0 mm,使用乳化液时为 61.25 mm。试验得到的岩心直径 d_k 与规程参数的关系式为:

$$d_k = 61.025 + 0.025p - 0.05n \quad (18)$$

从(18)式可见,岩心直径随钻头转速的增加而减小,钻头转速对岩心直径减小的影响比钻压的影响大,大一倍,这可能是因为钻头转速快时产生的离心力大,使钻头产生摆动大,因而岩心直径磨损大,直径变小了。

3.3.2 钻头体磨损

为了研究钻头体外壁的磨损情况,在钻头体上焊了 8 个 1.5 mm × 1.5 mm 的焊片(见图 7 和图 8)。在此焊点上,可以查明磨损最大的部位。焊片的厚度是用 BB2207 厚度仪测量的。KHT 钻头体焊片厚度(高度)测量结果见表 2,焊片磨损量大小见表 3。



图7 不同钻进规程时水口变化钻头的钻头体与孔壁的接触点

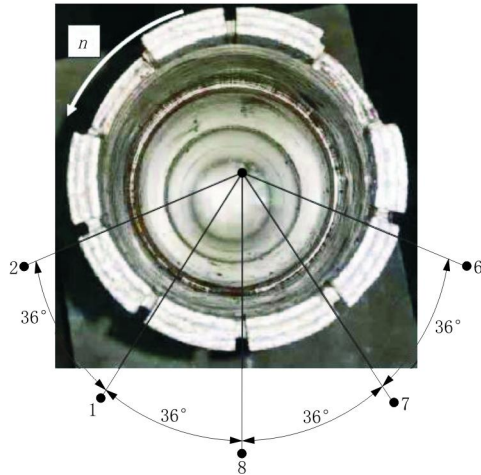


图8 水口变化 КИТ 钻头体上焊片磨损值最大的各个焊片(1、8、7、6)

从表3可见,不同规程时,焊片磨损值是不同的。最大值是用黑体字标注出来的。如果把最小钻进规程1时的1号焊片(见图8)作为对比点,则随着钻压和钻头转速的提高,磨损最大的接触点沿着钻头回转方向向8号、7号和6号焊片移动(见图8)。但是,值得注意的是,钻头体磨损较为严重的焊片,均位于水口窄边的一侧,说明这一侧的磨损与其切削剪切力 $F_1 > F_2$ 有关,证实了前面理论分析(见图4)的正确性。

表2 钻头体焊片高度测量结果

mm

序 号	初始 高度	钻 进 规 程			
		1	2	3	4
		$n=435 \text{ r/min},$ $p=1000 \text{ dN}$	$n=435 \text{ r/min},$ $p=1400 \text{ dN}$	$n=710 \text{ r/min},$ $p=1000 \text{ dN}$	$n=710 \text{ r/min},$ $p=1400 \text{ dN}$
1	0.773	0.631	0.537	0.521	0.498
2	0.701	0.628	0.597	0.564	0.532
3	0.532	0.500	0.456	0.452	0.429
4	0.582	0.543	0.540	0.506	0.456
5	0.432	0.43	0.427	0.423	0.403
6	0.547	0.517	0.497	0.488	0.387
7	0.863	0.820	0.748	0.614	0.503
8	0.689	0.614	0.497	0.389	0.351

表3 水口变化钻头体上焊片磨损值

mm

序 号	钻 进 规 程			
	1	2	3	4
	$n=435 \text{ r/min},$ $p=1000 \text{ dN}$	$n=435 \text{ r/min},$ $p=1400 \text{ dN}$	$n=710 \text{ r/min},$ $p=1000 \text{ dN}$	$n=710 \text{ r/min},$ $p=1400 \text{ dN}$
1	0.142	0.094	0.016	0.020
2	0.073	0.031	0.033	0.003
3	0.032	0.044	0.004	0.023
4	0.039	0.003	0.105	0.025
5	0.002	0.003	0.004	0.002
6	0.030	0.020	0.009	0.101
7	0.043	0.072	0.134	0.111
8	0.084	0.117	0.108	0.038

4 讨论和建议

根据上述资料,可作以下讨论和建议。

(1)我国正在进行深部地质找矿和深部资源开发和利用研究,均需要深部钻探。深部钻探时遇到的岩石多半是各向异性的,钻头容易偏斜,钻孔容易弯曲。这可能会影响钻探的效率和质量,应该引起我们的注意。

(2)工欲善其事必先利其器。钻探工程中,首先要解决的是钻头问题。异向各性岩石中钻进时,更是如此。俄罗斯专家提出了水口大小变化的金刚石钻头的设计思想。试验证明,这种新型钻头比水口大小不变的标准钻头的技术指标(机械钻速高、每转进尺高、单位进尺能耗量低)均好,说明这种钻头设计思想是有价值的,可以借鉴。

(3)这种设计思想和对比试验数据尚不够充分,只能从定性上肯定其有价值的,在定量上还需进一步研究和探讨,例如水口尺寸多大为好?宽水口面积和窄水口面积比例多大为好?水口大小在不同可钻性岩石中钻进时是否有差异?水口大小与钻进

规程的关系等等。

参考文献:

- [1] 王达,李艺,周红军,等.我国地质勘探现状和发展前景分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):1-9.
- [2] 吴烨,王建华,卢予北.“钻探+”在民生地质工作中的作用与地位[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(11):1-5.
- [3] 汤凤林,Чихоткин В. Ф. 蒋国盛,等.加强钻孔水力开采技术研究,拓宽探矿工程发展空间[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(9):1-8.
- [4] 朱恒银,王强,杨展,等.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2014.
- [5] 朱恒银,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
- [6] 段隆臣,潘秉锁,方小红.金刚石工具的设计与制造[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2012.
- [7] 汤凤林,А. Г. 加里宁,段隆臣.岩心钻探学[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2009.
- [8] Чихоткин В. Ф.,高申友,蒋国盛,等.关于金刚石钻进工艺优化几个问题的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):18-22.
- [9] 汤凤林,高申友,Чихоткин В. Ф.,等.纳米金刚石钻头试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(6):76-80.
- [10] 汤凤林,Чихоткин В. Ф.,高申友,等.关于金刚石钻进规程参数合理配合的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):76-80.
- [11] 汤凤林,彭莉,Чихоткин В. Ф.,等.关于提高金刚石钻头胎体耐磨性的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(1):7-13.
- [12] Алмазная коронка для компановки бурового снаряда;Россия, 207819[P].
- [13] Буровой инструмент;Россия,2246603[P].
- [14] Алмазная коронка для бурения;Россия,148333[P].
- [15] Скоромных В. В.,Калинин А. Г. Направленное бурение [М]. Москва;Изд. – ство Высшее нефтегазовое образование, 2009.
- [16] Скоромных В. В. и др. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных породах [J]. Известия Томского политехнического университета, 2015, 326(4):30-40.
- [17] Скоромных В. В. Разрушение горных пород при бурении [М]. Красноярск ;Изд. – ство СФУ, 2014.
- [18] Скоромных В. В. Направленное бурение и основы кернометрии [М]. Красноярск ;Изд. – ство СФУ, 2012.
- [19] Дудюков Е. Ю.,Власюк В. Е.,СпиринВ. Е. Алмазный инструмент бурения направленных и многоствольных скважин [М]. Тула;Изд. – ство ЗАО«Гриф и К», 2007.