

关于金刚石钻进规程参数合理配合的分析研究

汤凤林^{1,2}, ЧИХОТКИН В. Ф.¹, 高申友², 蒋国盛¹, 彭 莉², 张晓西¹, 卢春华¹

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

摘要:机械钻速、钻头进尺和每米钻探成本通常称之为是钻探工程的主要技术经济指标。这些技术经济指标均与选用的钻头、所用钻进规程参数和操作技术紧密相关。选用的钻头应与所钻地层的硬度、研磨性(可钻性)相适应。操作技术主要取决于司钻人员的技术、经验和水平。而钻进规程参数的选取和确定及其合理配合则是非常重要的一个因素,不可忽视。提出了临界钻进规程的概念。临界规程是一条红线,不可逾越,否则就会发生事故。正常钻进规程时,钻压和钻头转速应该合理配合,冲洗液量宜保证岩粉处于正常规程状态,以得到理想的钻探工程技术经济指标。建议根据功率表读数变化来调整钻压和钻头转速的合理配合,利用流量计监控孔底的冲洗液数量,严格控制临界规程的形成,把经验打钻和科学打钻结合起来。

关键词:探矿工程;技术经济指标;临界钻进规程参数;合理配合;操作技术;科学打钻;分析研究

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 - 7428(2015)10 - 0076 - 05

Analytical Research on Rational Combination of Drilling Parameters in Diamond Drilling Engineering/TANG Feng-lin^{1,2}, CHIKHOTKIN V. F.¹, GAO Shen-you², JIANG Guo-sheng¹, PENG Li², ZHANG Xiao-xi¹, LU Chun-hua¹ (1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Wuxi Drilling Tools Factory Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214174, China)

Abstract: Penetration rate, bit footage and cost per meter drilling are main technical and economical indexes of exploration engineering. The indexes depend upon bit selected, drilling parameters used and operation technology. The selected bit should be suitable for hardness, abrasiveness (drillability) of rock to be penetrated. The operation technology mainly depends upon qualification and experience of driller. And selection, definition and their rational combination of the drilling parameters are an important factor, which can not be neglected. Concept about critical drilling parameters has been put. The critical parameters are a red line not to pass, otherwise accident will occur. In normal parameters drilling weight on bit and rotary speed should be rationally combined and flow rate of fluid should guarantee cuttings in the bottom of the hole in normal state in order to obtain good technical and economical results. It is suggested to adjust rational combination of weight on bit and rotary speed and control the appearance of critical drilling parameters with wattmeter seriously and quantity of the drilling fluid in the bottle of the hole with flow meter and to combine drilling with experience with drilling with science.

Key words: exploration engineering; technical and economical indexes; critical drilling parameters; rational combination; drilling with science; analytic research

0 引言

机械钻速、钻头进尺和每米钻探成本通常称之为钻探工程的主要技术经济指标。这些技术经济指标均与选用的钻头、所用钻进规程参数和操作技术紧密相关^[1-4]。选用的钻头应与所钻地层的硬度、研磨性(可钻性)相适应。操作技术主要取决于司钻人员的技术、经验和水平。而钻进规程参数的选取和确定及其合理配合则是非常重要的一个因素,不可忽视。

金刚石钻进是我国目前一种主要钻进方法,在地质勘探,特别是在固体钻探中得到了广泛的应用。在金刚石钻进过程中,当钻头-岩石付相互作用时,在钻进规程参数(钻压 F_H 、钻头回转速度 n 、给定性能冲洗液量 Q)的作用下,孕镶在钻头上的金刚石破碎岩石,形成孔底,岩屑适量沉积在孔底,磨损钻头胎体,使金刚石露出,继续破碎岩石,钻进过程如此循环。

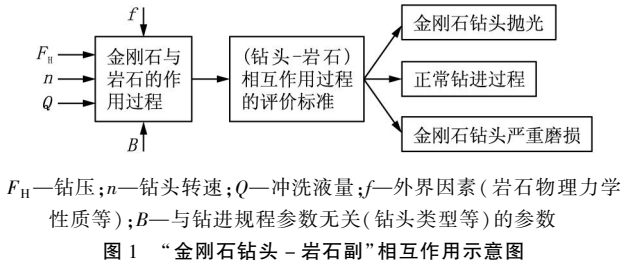
金刚石钻进时,“钻头-岩石副”相互作用与所

收稿日期:2015-07-07

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,ftang_wuhan@aliyun.com。

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见图 1^[5]。



从图 1 可见,如果钻进的地层已知,所用的钻头已经选定,拟用的冲洗液性能已经确定,则钻进过程的状态主要取决于钻进规程参数,即钻压、钻头转速和冲洗液量。

但是,这 3 个规程参数如何配合才算合理,才能提高机械钻速和钻头进尺,才能保证得到高的技术经济指标和钻探安全生产,才能把我们打钻的水平从经验打钻提高到科学打钻上来,是值得讨论的一个重要问题。

1 临界钻进规程的形成

乌克兰超硬材料研究所布加切夫, A. A. 博士等人多年对金刚石钻进工艺参数进行了实验室试验和生产研究,取得了重要成果^[6]。

实验研究是在乌克兰超硬材料研究所钻进实验室进行的。实验台是用 2A55 摇臂钻床改装的,配有液压给进系统、冲洗系统、钻进系统和仪表系统。所用岩样为乌克兰结晶地盾科罗斯德舍夫可钻性 10 级花岗岩,其硬度普氏系数 $f = 14$,压模硬度为 $P_{III} = 2.37 \text{ kN/mm}^2$,石英含量达 23%。所用钻头为直径 46 mm 的 BCC 孕镶金刚石钻头。使用 H-383 自动记录功率表记录钻进时消耗的功率。使用热电偶测量、用 ЭПП-09 电子自动电位器记录钻头胎体温度。钻头磨损是按破碎单位体积岩石的钻头磨损量计算的。

实验研究时记录了钻头不同转速时胎体温度与钻压的关系(见图 2),不同钻压时胎体温度与钻头转速的关系(见图 3)。

图 2 和图 3 表明,胎体温度随着钻头回转速度和钻压的增加而逐步提高。但是,当钻头转速为 600、750、950、1180 和 1500 r/min 和钻压分别对应为 10、8、7、5 和 4 kN 时,胎体温度出现急剧变化,由

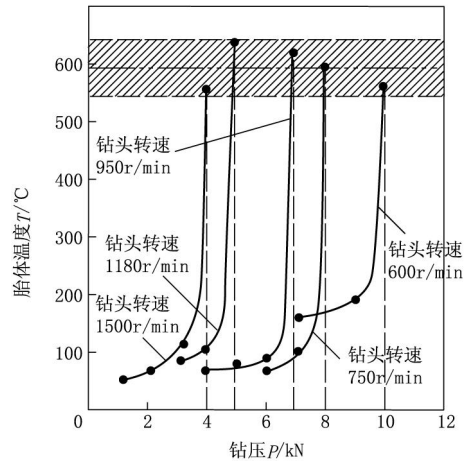


图 2 钻头不同转速时胎体温度与钻压的关系曲线

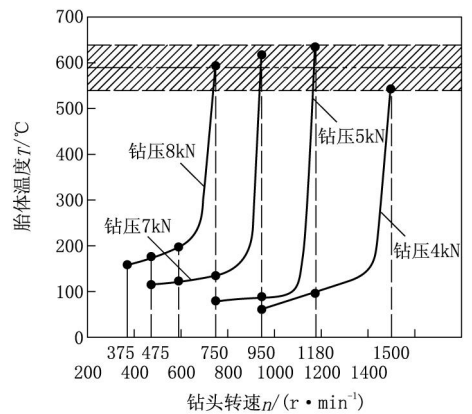


图 3 不同钻压时胎体温度与钻头转速的关系曲线

100 ~ 200 °C 变为 600 ~ 700 °C,正常钻进过程变为临界钻进过程。实验研究发现,发生这种临界规程与钻进规程参数 P 和 n 的乘积值有直接关系,而且这个乘积值是一个定值。对于实验所用的花岗岩来说,这个临界规程乘积值为 $(61.1 \pm 3.8) \times 10^2 \text{ (kN} \cdot \text{r)/min}$ 。其它情况下的钻进规程参数 P 和 n 的乘积临界值,可以根据实验研究确定,也可以在钻探现场根据现场观察及实际经验确定(见表 1)。临界规程时的特点与正常规程时的特点有很大不同,见表 2^[6]。

表 1 钻进规程钻压和钻头转速乘积值 $Pn \text{ (kN} \cdot \text{r)/min}$

钻头转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	钻压/kN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
600	-	-	-	-	-	3600	4200	4800	5400	6000*
750	-	-	-	-	3750	4500	5250	6000*	-	-
950	-	-	-	3800	4750	5700	6650*	-	-	-
1180	-	-	3540	4720	5900*	-	-	-	-	-
1500	1500	3000	4500	6000*	-	-	-	-	-	-

注: * 为临界规程的数值。

表2 正常规程和临界规程的特点

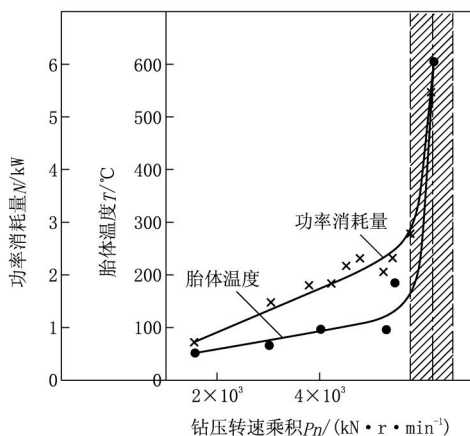
规程	钻头胎体温度/℃	消耗功率平均/kW	温度和耗用功率变化性质	规程参数 P_n 乘积值/(kN·r·min ⁻¹)	计算方法得到的摩擦系数	机械钻速/(mm·min ⁻¹)
正常	100~200	2.3	直线变化	$<61.1 \times 10^2$	0.16	<44.2
临界	600~700	5.4	跳跃式变化	61.1×10^2	0.32	44.2

2 超越临界钻进规程的危害

临界钻进规程是一条红线,不可逾越。到达或超过了这条红线,就会发生事故,胎体温度急剧升高,功率消耗大幅上升,钻头磨损成倍增加,甚至可能发生钻头烧毁事故。临界钻进规程的发现、提出和认定,对于钻探工程工作来说具有重要理论意义和实际价值。

2.1 胎体温度急剧升高和消耗功率急剧增加

图4上的钻头胎体温度、钻进消耗功率与规程参数 P_n 乘积值的关系曲线表明,当这个乘积值达到 $(61.1 \pm 3.8) \times 10^2$ (kN·r)/min 时,由正常钻进规程变成了临界钻进规程,胎体温度由平缓 100~200℃ 急剧增加到 600~700℃,耗用功率由 2~3 kW 增加到 6 kW^[6]。



(图中斜线部分为钻压转速乘积 P_n 临界值的范围)

图4 钻进时钻头胎体温度和功率消耗量与钻压转速乘积的关系曲线图

2.2 钻头可能烧毁

当钻进规程参数 P_n 乘积值小于临界规程乘积值,即正常钻进时,适当的冲洗液量可以保证留在孔底的岩粉有效研磨胎体,使金刚石露出,继续正常钻进。但是,当钻进过程由正常规程变成临界规程时,正常的冲洗液量已经不能满足排除岩粉的要求,即使增大冲洗液量也不能改变临界规程的性质,很容易产生钻头烧毁现象甚至钻头粘在孔底的情况。实

验研究和生产实践已经证明了这一点。

2.3 钻头产生非正常磨损

钻头磨损是用钻头磨损量与破碎单位体积岩石消耗的功之比测定的。在钻进过程中,钻头总是要磨损的。从图5可见,无论在实验室条件下,还是在生产条件下,在正常钻进规程范围内,钻头磨损是平稳的,但是在临界规程范围内钻头磨损强度增加 2~3 倍,在生产条件下增加更多(4 倍),这可能是由于生产条件下,金刚石钻头经受的震动和冲击载荷所致。

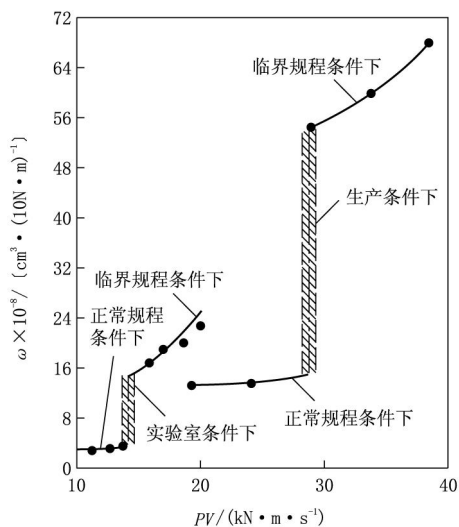


图5 金刚石钻头磨损强度与钻压转速乘积的关系曲线图

3 临界钻进规程的破解和钻进规程参数的合理配合

从普通物理学得知,力和速度的乘积是功率。临界钻进规程,即钻头转速和钻压的乘积,实际上也是力和速度的乘积,也是钻进时消耗的功率。正常钻进规程时,胎体温度和功率消耗比较平稳,属于量变阶段。临界钻进规程时,钻头转速和钻压乘积到达临界值,发生质变,功率消耗急剧上升,随之胎体温度多倍提高,到了事故的边缘(见图6)^[8]。

现在钻机上一一般都配有功率表。现场钻机上应该随时注意功率表读数的变化,预防临界规程的出现和发生。发现临界钻进规程出现征兆时,立即采取措施,即降低钻压或钻头转速,把临界规程降下来,或把钻具提起来,尽快使其回到正常规程的条件下来。

实验研究和生产实践证明,利用功率表显示的功率变化情况,可以判断钻头工作是否正常,金刚石表面是否抛光,胎体磨损是否严重,钻头是否急剧

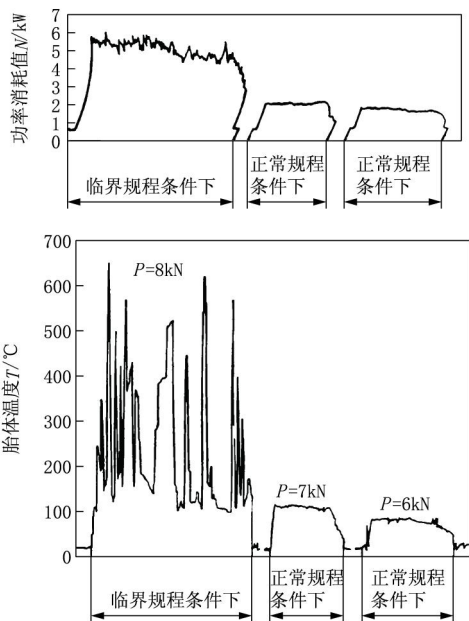


图 6 不同钻进规程条件下胎体温度和功率消耗值变化情况

升温并可能烧毁,钻头是否在孔底打滑,钻具是否在孔内、卡住,钻进裂隙岩石时岩心是否自卡,等等。所以,司钻人员一定要注意并跟踪功率表读数的变化。

从数学上看, $Pn = \text{常数}$ (临界值范围) 是一个等轴双曲线,因为钻压和钻头转速都是正的,不可能是负的,所以我们取其第一象限(见图 7)^[9]。

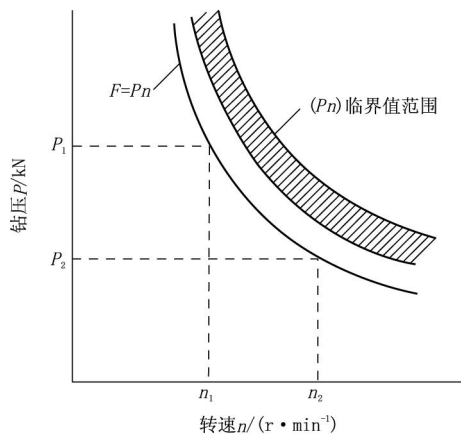


图 7 钻压 P 和钻头转速 n 的合理配合

从图 7 可见,使用的规程乘积不应大于临界值范围,否则就会由正常钻进规程变为临界钻进规程,发生烧钻、非正常磨损或其它事故。但是另一方面, Pn 值不能太小,因为机械钻速也随钻压、钻头转速及其乘积的增加而提高(见表 3)^[8],所以应该采用强力规程。此外,如果 Pn 值太小,则功率也小,没

有得到充分利用,也是个浪费。

表 3 机械钻速与钻头转速、钻压的关系

钻头转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	钻压/kN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
600	-	-	-	-	-	20.0	25.0	30.0	36.0	40.0*
750	-	-	-	-	30.0	35.0	37.0	44.5*	-	-
950	-	-	-	30.0	32.0	37.0	44.0*	50.0*	58.0*	-
1180	-	-	30.0	35.0	45.0*	-	-	-	-	-
1500	27.0	35.0	37.0	47.5*	-	-	-	-	-	-

注: * 为临界规程的机械钻速值。

通过实验研究或现场实践确定 (Pn) 临界值乘积范围后(见图 7),我们可从图 7 上选用一条略低于临界值范围的强力规程曲线 $F = Pn$,该曲线上有很多点,如 P_1n_1 、 P_2n_2 、 P_3n_3 等,其中 $P_1 > P_2 > P_3$, $n_1 < n_2 < n_3$ 。为了便于讨论,我们随意从中选择 P_1n_1 和 P_2n_2 两个点。 P_1n_1 点是大钻压和小转速的配合, P_2n_2 点是小钻压和大转速的配合。选哪一种配合,要根据所钻岩石的物理力学性质决定。例如,对于可钻性 9~10 级、研磨性不强的岩石来说,可以采取轻压快转的办法,对于研磨性强(如石英含量大)的岩石来说,重压慢转更为合理。当然,还有其他组合。

实验研究结果已经证明,当钻进达到临界规程状态时,增加冲洗液量不能改变其临界规程的性质,胎体温度和功率消耗不会降低,钻头非正常磨损情况不会改变,发生事故的可能性不可避免。只有把钻进拉回到正常规程时,调整冲洗液量才会发挥作用。

在金刚石钻进时,钻压和钻头回转速度可以决定钻进速度和孔底岩屑的多少,但不能改变留在孔底岩屑的数量,而改变孔底岩屑数量在很大程度上取决于冲洗液的数量。冲洗液量过大时,会导致孔底没有岩屑,全被冲走,不能磨损胎体,金刚石不能露出,结果是钻头抛光。冲洗液量过小时,不能排走孔底岩屑,滞留孔底岩屑过多,致使钻头产生非正常磨损,如拉槽、金刚石脱落等。只有冲洗液量合适时,才能保持孔底有适量的岩屑,既能保证岩屑有效磨损胎体,使金刚石露出,保持正常钻进,又不致于孔底岩屑过多而使钻头产生非正常磨损。可见,在这种情况下,冲洗液量大小是金刚石正常钻进中非常关键的规程参数

正常钻进条件下的岩屑规程,可用下式表示^[5]:

$$\frac{Q}{S_{\Sigma}} = (16 \times 10^2 \sim 31 \times 10^2) V_M \quad (1)$$

式中: Q ——冲洗液用量, m^3/s ; S_{Σ} ——钻头冲洗系统过水通道总面积, m^2 ; $16 \times 10^2 \sim 31 \times 10^2$ ——金刚石钻头最优钻进规程时进行正常钻进的边界条件范围; 16×10^2 ——边界条件下限; 31×10^2 ——边界条件上限; V_M ——机械钻速, m/s 。

这个公式表明,机械钻速与单位水口的面积的流速有非常直接的关系,所以为了保证正常钻进,必须把产生的岩屑适量地排出去。公式的边界条件说明,在金刚石钻进条件下,在机械钻速选定之后或保持机械钻速不变的情况下,单位面积通道冲洗液流量与机械钻速值之比低于下限 16×10^2 时,就会导致井底岩屑过多而对钻头胎体产生严重磨损;单位面积通道冲洗液流量与机械钻速之比高于上限 31×10^2 时就会导致井底岩屑迅速排走,与钻头胎体接触的岩屑过少,金刚石不能及时出露,从而使金刚石抛光。一般情况下,处于下限 $16 \times 10^2 \text{ m}/\text{s}$ 和上限 $31 \times 10^2 \text{ m}/\text{s}$ 之间时,就可以使钻进处于正常钻探过程之中,机械钻速稳定,因而可以增加回次时间,改善钻头工作条件,提高钻探效率,提高钻探的技术经济指标。俄罗斯多年的钻探实践证明,这个结论是正确的,取得了很好的技术经济效果。当然,在我国钻探实践中,还要根据实际情况,对上限和下限进行合理选取与论证。

4 结语和建议

(1) 临界钻进规程,即钻压和钻头转速的乘积的临界值,是一条红线,不可逾越。越过这条红线,就会发生事故。这个概念的发现和提出,具有重要理论意义和实际价值。但是,正常钻进时,钻探技术指标均与钻压、钻头转速及其乘积的提高成正比,所以应该采用强力规程。因此,不是后者越小越好,只是不能超越临界规程罢了。实验研究证明,临界规程时,增加冲洗液量不能改变该规程的性质,只有在正常规程时,调节冲洗液量才能保证岩粉处于正常状态,使钻进过程正常进行。

(2) 钻压和钻头转速乘积临界值是一个常数,这个常数可以通过实验研究确定,也可以在钻探现场根据实践经验或功率表读数明显变大到临界值来确定。这个乘积临界值在数学上是一条等轴双曲线(见图7),在我们选用的 $F = Pn$ 曲线上可以有多种

钻压和钻头转速的组合,如 $P_1 n_1$ 、 $P_2 n_2$ 等,可以根据所钻岩石物理力学性质确定。例如,利用 XY-4 型钻机,当动力机为 1500 r/min 时,正转低速为 101、187、267、388 r/min 4 种钻头转速,根据在横坐标轴上的这 4 种转速,我们就可以在纵坐标上找出 4 种相应的钻压来,供钻进不同地层时合理配合选用。

(3) 正常规程钻进时,只有冲洗液量合适时,才能保持孔底有适量的岩屑,既能保证岩屑有效磨损胎体,使金刚石露出,保持正常钻进,又不致于孔底岩屑过多而使钻头产生非正常磨损。可见,在这种情况下,冲洗液量大小是金刚石正常钻进中非常关键的规程参数。

(4) 为了进行正常钻进,不踩红线,我们应该把经验打钻和科学打钻结合起来。多数钻机上都配备有功率表,建议充分发挥功率表的作用,注意观察其正常钻进时的读数变化是否平稳,更要观察功率消耗突然猛增的情况,及时采取措施,防止临界规程的出现,保证钻进正常进行。此外,现在钻机上多用泵压表了解孔内情况,但是应该说泵压表只能定性说明孔内钻进情况,不能定量说明孔底冲洗液流量的情况,因此建议安装冲洗液流量计。对于金刚石钻进,特别是孕镶金刚石钻头钻进来说,流量计是不可缺少的。

参考文献:

- [1] 汤凤林, A. 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: 217 - 219.
- [2] 汤凤林, 段隆臣, Чихоткин В. Ф., 等. 合理设计岩屑规程, 保证正常钻进条件 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(6): 45 - 48.
- [3] Чихоткин В. Ф. Исследование призабойных процессов в алмазном бурении [D]. Москва, 1998: 118 - 127.
- [4] В. Ф. Чихоткин, 段隆臣, 汤凤林, 等. 基于破碎单位体积岩石能耗量设计坚硬研磨性岩石用钻头方法的研究 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(S2): 72 - 76.
- [5] 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.
- [6] 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: 31 - 35.
- [7] 朱恒银, 等. 深部岩心钻探技术与工程 [M]. 北京: 地质出版社, 2014: 133 - 136.
- [8] 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: 206 - 209.
- [9] 汤凤林, 李粮纲. 金刚石-岩石摩擦付和正常钻进的条件 [J]. 地质与勘探, 2000, (3): 63 - 66.