

# 多年冻结岩石钻进冷压缩空气洗井技术试验研究

汤凤林<sup>1,2</sup>, 鲁华章<sup>3</sup>, 赵荣欣<sup>1</sup>, Джураев Р.У.<sup>4</sup>,  
李 博<sup>1</sup>, 刘 浩<sup>1</sup>, 段隆臣<sup>2</sup>, Чихоткин В.Ф.<sup>2</sup>

(1.上海市建筑科学研究院有限公司,上海 200032; 2.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074; 3.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 4.俄罗斯国立地质勘探大学(Российский государственный геологоразведочный университет),莫斯科(г.Москва) 117997,俄罗斯(Россия))

**摘要:**俄罗斯幅员辽阔,其北部和西伯利亚地区地下多是多年冻结岩石。在冻结岩石中富含多种矿产,急待勘探与开发,要求钻探工程予以支撑和确认。这些地区的工程建设,也需进行钻探工程,以确定地下岩石的物理力学性质。在钻探施工中遇到的主要问题是冲洗液对岩石中冰的热作用,导致岩石塌落,孔壁坍塌,常常发生孔内事故。俄罗斯专家提出利用旋流制冷器,使其产生的冷空气的温度低于孔底岩石的温度,将其冷空气送到孔底,以保证正常钻进、安全施工,提高机械钻速,增加钻头进尺,取得了很好的经济技术效果。中国也存在多年冻结岩石和季节性冻结岩石,俄罗斯的冷空气洗井钻进多年冻结岩石技术,对中国具有一定的借鉴意义和应用价值。

**关键词:**多年冻结岩石;钻进技术;冷空气洗井;旋流制冷器

**中图分类号:**P634.6<sup>+</sup>3;TE252 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)04-0010-07

## Experimental research on drilling technology in permafrost rocks with flushing by cold compressed air

TANG Fenglin<sup>1,2</sup>, LU Huazhang<sup>3</sup>, ZHAO Rongxin<sup>1</sup>, DRURAEV R.U.<sup>4</sup>,  
LI Bo<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, DUAN Longchen<sup>2</sup>, CHIKHOTKIN V.F.<sup>2</sup>

(1. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd, Shanghai 200032, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 3. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Russian State Geological Prospecting University, Moscow 117997, Russia)

**Abstract:** Russia is a country with a vast territory. There are permafrost rocks underground in the northern part of Russia and in Siberia. In the permafrost rocks there are mineral resources, which are explored and developed urgently and that must be supported and confirmed by drilling engineering. In the engineering construction of these areas, it is necessary to determine the physical and mechanical properties of the underground rocks by drilling engineering. The problem in drilling engineering is the effect of flushing fluid on the ice in the rocks, leading to collapse of the rocks and the borehole wall and the frequent occurrence of accidents. Russian specialists have proposed to use a vortex cooler to make the temperature of the cold compressed air lower than that of the bottom-hole rocks, and sending the cold air to the bottom of the hole in order to guarantee normal drilling and safe construction, increase the penetration rate and raise the bit footage. Good technical and economical results have been obtained. In China, there are also permafrost rocks

收稿日期:2025-03-06; 修回日期:2025-04-07 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.04.002

基金项目:国家自然科学基金面上项目“不同结构高压电脉冲钻头的破岩过程与预测模型研究”(编号:42272366)

第一作者:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院外籍院士,俄罗斯自然科学院外籍院士,国际矿产资源科学院院士,主要从事探矿工程方面的教学和科研工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,fltang\_wuhan@aliyun.com。

通信作者:鲁华章,女,满族,1972年生,副教授,安全工程专业,博士,主要从事地质工程安全和职业卫生、安全方面的教学和科研工作,北京市海淀区学院路29号,luhz@cugb.edu.cn。

引用格式:汤凤林,鲁华章,赵荣欣,等.多年冻结岩石钻进冷压缩空气洗井技术试验研究[J].钻探工程,2025,52(4):10-16.

TANG Fenglin, LU Huazhang, ZHAO Rongxin, et al. Experimental research on drilling technology in permafrost rocks with flushing by cold compressed air[J]. Drilling Engineering, 2025,52(4):10-16.

and seasonal frozen rocks. The drilling technology in permafrost rocks with flushing by cold compressed air in Russia has certain reference value and practical significance for China.

**Key words:** permafrost rocks; drilling technology; flushing with cold compressed air; vortex cooler

## 0 引言

俄罗斯北部边疆地区和西伯利亚地区拥有丰富的金矿、金刚石矿及其它自然资源,急需勘探和开发,需要钻探工程予以支撑和确认。上述地区的多年冻结岩石占俄罗斯冻结岩石的60%以上。多年冻结岩石矿区的气候、水文地质和钻探条件非常恶劣,极不稳定。在此地区进行钻探工作最主要的问题之一是解决孔内温度(岩石冻结)问题。钻探施工中,由于冲洗液对冻结岩石中冰的热作用,岩石胶结矿物颗粒的胶结性和强度大大降低,导致岩石塌落和孔壁坍塌,发生孔内事故,大大影响地质取心钻探的效率和质量。而降低冲洗液温度,又容易出现冲洗液冻结问题。

多年冻结岩石钻进实践中,使用冷的压缩空气代替冲洗液排出孔底岩屑是一种有效措施。由于压缩空气在低温时不冻结,可以避免由于孔内冲洗液冻结带来的复杂情况。但是,由于钻进破碎岩石时钻头的机械能变成热能,使从压缩机进入孔内的空气温度大为提高,有产生孔壁和岩心融化的危险,需要采取措施把压缩空气冷却到足以吸收孔底产生热量的温度。由此,需要明确循环冲洗介质的温度规程、评价孔底产生的热功率、空气洗井钻进时使用的空气压缩机的工作效果等。

中国西北和东北地区,以及高原地区,地下也有多年冻结或季节性冻结的岩石,常称冻土。那里的矿产资源勘探开发以及工程建设中,钻探工程必不可缺,因此,有必要对冷空气洗井钻进技术进行试验和研究<sup>[1-6]</sup>。俄罗斯在这方面做了很多工作,取得了很多成果<sup>[7-17]</sup>,值得参考和借鉴。

## 1 冷空气的制备与试验<sup>[1,7]</sup>

多年冻结岩石钻进中可以使用的空气制冷装置有多种,其中最有效、最经济的装置是压缩空气旋流制冷器,见图1。

从图1可见,压缩空气从喷嘴进入旋流器后,形成强大的圆环气流,产生分层效应(Эффект Ранка),靠近中心线部分流层的温度显著降低,通过隔膜孔眼以冷气流形式(蓝色)流出;而边缘层

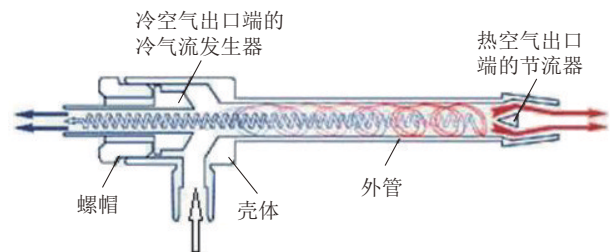


图1 压缩空气旋流制冷器

Fig.1 Vortex cooler for compressed air

升温,通过节流器以热气流形式(红色)流出。节流器用来调整冷气流和热气流的流量。这种结构的旋流器,可以扩大空气的温度范围,并在钻进中维持在最优温度范围,冷气流温度可达 $-40^{\circ}\text{C}$ ,热空气流的温度可以升高到 $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。冷气流在温度最低时的流量也最小。在旋流器内,有可以更换的黄铜管制冷发生器,可以改变旋流器内空气的温度和流量,还可以调整冷出口和热出口的温度范围。制冷发生器主要有两种类型,可以得到最低温度的C型和最大冷却能力的H型。

压缩空气的压力和流量影响旋流器出口的温度,需要进行试验研究,以便确定不同工作规程条件下的温度变化关系。

为了确定不同规程条件下温度变化的基本规律和得到旋流器工作模拟数据,在俄罗斯国立地质勘探大学科研基地进行了试验研究,试验装置示意图见图2<sup>[7-8,10]</sup>,试验台实物见图3<sup>[7]</sup>。

利用带有8H型冷空气发生器的旋流器进行试

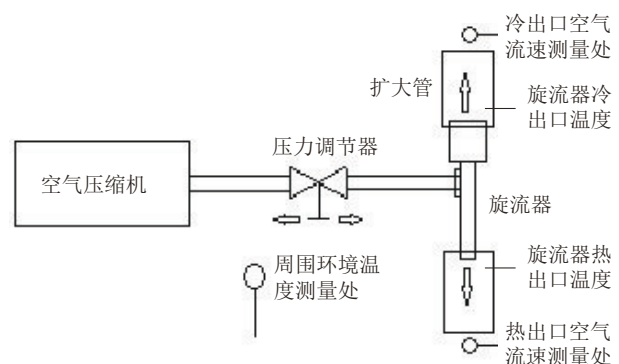


图2 旋流制冷器试验装置示意

Fig.2 Equipment of vortex cooler testbed



图3 旋流制冷器试验装置照片  
Fig.3 Photo of vortex cooler testbed

验,利用调节器把压缩空气流量调整到中等流量。结果表明,压缩空气压力每增加 0.1MPa 时,空气温度降低 2~4 °C。冷气流的温度在初始压力 0.2 MPa 时为 -16 °C,在最大压力 0.8 MPa 时为 -30 °C。根据试验数据得到的冷气流温度与压缩空气压力的回归方程为:

$$t = -24.6P - 10.9 \quad (1)$$

式中:  $t$ ——冷气流温度, °C;  $P$ ——从压缩机出来的压缩空气的压力, MPa。

冷气流温度与压缩空气压力的关系曲线见图 4<sup>[12]</sup>。

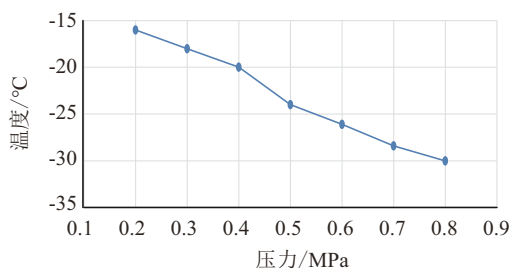


图4 冷气流温度与压缩空气压力的关系曲线  
Fig.4 Curve of cool air temperature and pressure of compressed air

## 2 冷空气洗井实验室钻进试验<sup>[7,12]</sup>

为了确定孔底岩石破碎引起孔底冷空气温度升高的具体情况,进行了压缩空气洗井实验室钻进试验,见图 5、图 6。钻进使用的仪器和设备有:电表、电动凿岩机(Status MPR-70,功率 1200 w、转速 600 rpm)、制冷器(50008H)、水龙头、Ø33 mm 硬合金钻头、岩样、多通道温度测量器(ИПТ-4)、风速计(smart sensor AR816)、转速表(CEM.AT-8)、称重器、活塞式空压机(ПКСД-5, 25ДМ(Р))、带压力表的减压阀(压力调节器)等。

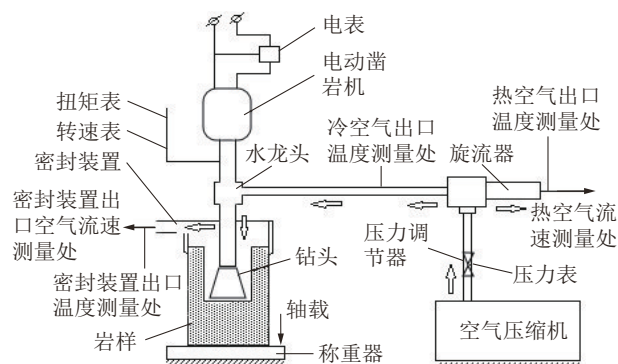


图5 空气洗井钻进实验室试验装置  
Fig.5 Drilling testbed in laboratory with flushing by compressed air



图6 空气洗井钻进实验室试验台外观照片  
Fig.6 Exterior Photo of drilling testbed in laboratory with flushing by compressed air

试验过程如下:把冷空气发生器 8H 接到旋流器上,旋流器接到空压机储气罐上。在储气罐和旋流器之间的连接软管上,接有压力调节器。旋流器冷出口通过软管接到水龙头上。然后,把电动凿岩机通过水龙头与钻头连接。在岩块下面装有称重器。通过电闸把凿岩机连接到电网上,按回转和空气洗井规程的要求接通凿岩机。利用压力调节器把压力调到 0.8 MPa,利用手把向凿岩机施加轴载 1 N,轴载通过称重器确定。记录时间、电表读数(Wh)和轴载,用转速表测量钻头的转速。在温度平稳后,用多通道测量仪(ИПТ-4)测量周围环境的温度、热气流的温度、旋流管冷出口的温度和从密封装置出来的气流的温度。

用风速计(smart sensor AR816)测量旋流器热出口和从密封装置出来的空气流的流速。然后重



复测量空气压力分别为0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2 MPa时的所有参数,以及轴载3、5 N时的所有参数。

根据空气洗井试验结果得出孔底破碎岩石放出的热功率,即用于孔底和钻头升温的热功率:

$$P_{\text{热}} = CG(t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{热}}$ ——热功率, W;  $C$ ——空气热容量, J/(kg·°C);  $G$ ——空气用量, kg/s;  $t_2$ ——从密封装置出来的空气的温度, °C;  $t_1$ ——从旋流器出口出来的空气的温度, °C。

在试验研究过程中,确定了孔底发出的  $P_{\text{热}}$  (W) 与岩石破碎(体积)速度  $V_n$  (m³/s) 的关系,根据试验数据处理得到的回归方程为  $P_{\text{热}} = 7 \times 10^9 V_n - 83.82$ , 见图7。

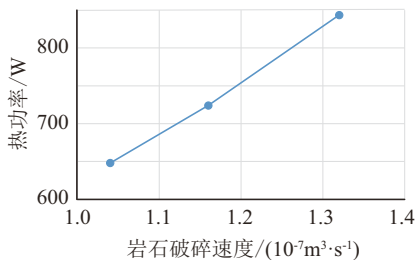


图7 孔底热功率与岩石破碎速度的关系

Fig.7 Dependence of thermal power in bottom hole from rock fragmentation rate

从图7可见,岩石破碎速度为  $1.04 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  时的热功率为 640 W, 而岩石破碎速度增加到  $1.16 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  时的热功率为 724 W。

孔底钻头温度增加值  $\Delta t$  为:

$$\Delta t = P_{\text{热}} / CG = (7 \times 10^9 V_n - 83.82) / CG \quad (3)$$

### 3 冷空气洗井钻进生产试验<sup>[1,7-8,12]</sup>

#### 3.1 孔内钻具

冷空气洗井钻进生产试验使用列宁格勒矿业学院研发的孔内钻具和旋流制冷器 ПВХ-ЛГИ (见图8)。旋流器安装在岩心管的上方,从空压机储气罐出来的压缩空气沿着软管和钻杆进入旋流室,在旋流室内形成热空气流和冷空气流。冷空气进入岩心管内,送到孔底,沿着孔壁和岩心管的狭窄环状空间向上流动,并携带、排出孔底岩粉。热空气流到达孔壁和钻杆间的宽大间隙后与冷空气会合。由于冷空气(仅是总流量的一部分)是在狭窄间隙排送岩粉的,可以满足排出孔底岩粉的需要。

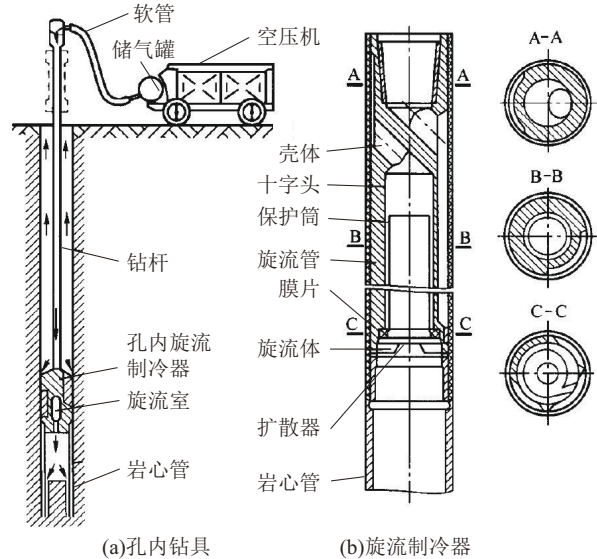


图8 孔内钻具和旋流制冷器

Fig.8 Drilling tools in bottom hole and vortex cooler

孔内旋流制冷器 ПВХ-ЛГИ 是小口径钻探用的孔底旋流制冷器。从图8(b)可见,其壳体同时是承载部件,将钻杆柱和岩心管连接起来。压缩空气从钻杆柱出来,沿着壳体内通道通过喷嘴入口进入旋流室,从旋流室出来后,以很高的速度切向进入旋流管内,在此气流温度分区。在旋流管的上部,旋流被十字头堵塞。此后,热气流通过壳体内通道流入钻孔的外环状空间。而冷气流则通过膜片的中心孔和扩散器进入岩心管,流向孔底。冷气流从钻头唇面底部出来,上返流入钻杆和孔壁间的环状空间,与热气流混合。以很高速度流入环状空间的热气流产生抽吸作用,降低了从钻头唇面底部流出的冷空气的背压,增加了流入冷空气的数量,从而改善了孔底的排粉条件。

#### 3.2 压缩空气的二级冷却和干燥<sup>[1,7]</sup>

多年冻结岩石钻进时需要对压缩空气进行二级冷却和干燥。压缩空气二级冷却系统原理见图9。来自空压机储气罐的压缩空气进入肋管式热交换器,在这里与强制循环的大气中的空气进行热交换,使压缩空气的温度与大气温度相近(第一级冷却)。压缩空气在液体分离器中除掉冷凝水和油后,进入氟利昂蒸发器中,在这里与氟利昂存储罐流出的液态氟利昂(低温沸腾)发生热交换,使压缩空气的温度降到负值(第二级冷却)。第二个液体分离器用来收集残油。此后,冷的压缩空气沿着高

压软管进入钻杆、送入孔内。从蒸发器出来的氟利昂蒸汽被压缩器吸入,进入冷凝器中被压缩并冷却,氟利昂变成液态,重新进入氟利昂存储罐中。压缩空气冷却循环如此持续进行。

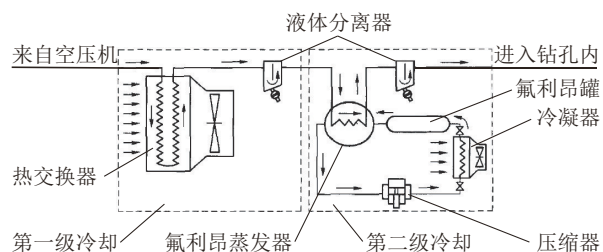


图9 压缩空气二级冷却系统原理

Fig.9 Schematic diagram of secondary compressed air cooling system

不同季节,特别是夏季,需要利用二级冷却系统把压缩空气流冷却到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下。还要通过吸附方式把压缩空气干燥到低温露点,需要使用不同的固态、固液态和液态吸附剂,其中最常用的是硅胶,其强度大,化学上呈惰性、无毒,常使用颗粒直径为 $2\sim 4\text{ mm}$ 。压缩空气冷却、干燥示意图10。从空压机出来的压缩空气进入第一级冷却系统后,进入干燥罐,水分被硅胶吸附。干燥后的压缩空气在第二级冷却系统被冷却到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下。

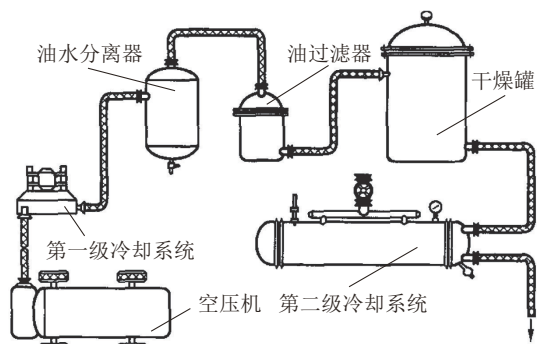


图10 压缩空气冷却系统、干燥系统示意

Fig.10 Schematic diagram of cooling system and drying system of compressed air

别列列夫综合地质勘探大队钻进用压缩空气冷却、干燥生产试验结果见表1<sup>[1,7]</sup>。

### 3.3 生产试验及结果<sup>[1,7-8]</sup>

生产试验采用硬质合金钻头和金刚石钻头,在多年冻结岩石和季节性冻结岩石,可钻性3~11级、含冰率 $0\sim 41.7\%$ 、自然温度 $-0.1\sim -11^{\circ}\text{C}$ 的松散

表1 别列列夫综合地质勘探大队钻进用压缩空气冷却、干燥的生产试验结果

Table 1 Experimental results of cooling system and drying system of compressed air in Belelev comprehensive geological and explorational party

| 孔号  | 钻进孔段/<br>m | 大气温<br>度/ $^{\circ}\text{C}$ | 压缩空气温度/ $^{\circ}\text{C}$ |             |       |
|-----|------------|------------------------------|----------------------------|-------------|-------|
|     |            |                              | 干燥后                        | 第二级冷<br>却出口 | 钻孔入口  |
| 142 | 67.6~85.5  | 14.0                         | 18.8                       | -11.6       | -3.6  |
| 142 | 88.5~94.5  | 9.0                          | 19.0                       | -2.0        | 3.0   |
| 142 | 94.5~101.5 | 6.0                          | 17.0                       | -5.0        | 0     |
| 148 | 0~18.3     | 17.8                         | 25.0                       | -5.2        | -1.1  |
| 148 | 18.3~24.0  | 14.0                         | 22.0                       | -14.8       | -4.0  |
| 148 | 24.0~34.0  | 19.2                         | 23.8                       | -6.8        | -3.5  |
| 148 | 42.2~46.0  | 24.0                         | 31.0                       | -9.0        | 4.0   |
| 139 | 0~8.6      | 18.0                         | 16.2                       | -12.5       | -2.7  |
| 139 | 8.6~13     | 19.3                         | 23.3                       | -12.3       | -2.0  |
| 137 | 0~33       | 16.1                         | 21.5                       | -15.3       | -5.1  |
| 137 | 33.0~48.0  | 6.5                          | 2.1                        | -16.3       | -10.3 |
| 137 | 48.0~72.5  | 10.1                         | 17.7                       | -10.5       | -5.3  |
| 137 | 72.5~114.5 | 10.0                         | 18.1                       | -11.6       | -2.2  |

岩石和坚硬岩石中进行。不同松散岩石包括黏土、亚黏土、亚砂土、不同粒度砂、碎石、砂砾石和砾卵石。坚硬岩石包括砂岩、泥质片岩、花岗闪长岩、流纹岩和安山岩等。

在生产试验钻进中,完成工程勘察孔总进尺3000 m(孔深40 m),地质勘探孔总进尺4000 m(孔深300 m)。

工程勘察生产钻进试验使用СБУДМ-150-ЗИВ、УГБ-50М型自行车装钻机,地质勘探钻进使用ЗИФ-300М、ЗИФ-650М和СБА-500型钻机。使用柴油机驱动的ПКС-53ИФ-55ДК-9М型移动式空压机站,ВХМ-ЛГИ-1型冷却机进行二次冷却,冷空气温度可达 $-25^{\circ}\text{C}$ 。为了进行对比,一些钻进回次使用了温度达 $40^{\circ}\text{C}$ 的热空气进行压缩空气洗井。

生产试验结果表明,当供给孔内的冷压缩空气的温度不高于所钻岩石的温度时,孔壁和岩心都未发生任何解冻的情况,岩屑以冻结粉尘和冰块形式排出孔外,机械钻速高,钻头寿命长。供给孔内压缩空气温度达到 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 时,发现孔壁和岩心解冻,空气由于与较低温度孔壁接触以凝结水的形式析

出。向孔内供给 20℃ 以上压缩空气时,提钻时出现卡钻现象。

生产试验表明,不能采用“干钻”,因为“干钻”不但机械钻速低,而且还破坏了岩心的原始结构,失去了代表性,甚至有发生孔内事故的危險。

为了减小孔底岩石破碎时产生的热能对孔内压缩空气流温度升高的影响,除了使用合理的钻探工艺和提高操作水平外,还对所用钻头结构进行了改进。使用硬质合金钻头时,建议使用肋骨式钻头或外出刃大的钻头。使用金刚石钻头时,建议增加水口数量,调整水口排列,钻头侧面呈肋条式,把空气动力学阻力减小到最低程度,以改善钻头的冷却条件。

#### 4 柴油机废气和旋流器热气流利用<sup>[7,9-10,12]</sup>

目前,利用冷空气洗井钻进多年冻结岩石时,通常使用移动式柴油机空压机站。从柴油机出来的废气进入大气污染环境。此外,旋流器出来的热气流也可以利用起来,使柴油机和旋流器产生出来的热能不再进入大气,而是直接用于满足有关单位的供暖、供热水的需要,这样既可以保护环境,又可以使柴油机的效率提高 30~40%<sup>[7]</sup>。

在移动式空压机站中,如果柴油机长期使用,可以使用空气为辅助热载体,即在搬迁、停止使用时水会冻结,而辅助热载体可以接受柴油机废气和冷却系统中水的热能,防止水冻结。

柴油机废气和旋流器热气流利用系统示意图 11。

该系统运行过程为:压缩空气从空压机、储气

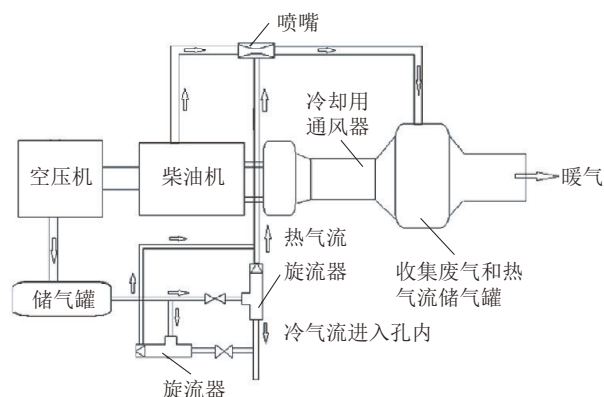


图 11 柴油机废气和旋流器热气流利用系统示意

Fig.11 Schematic diagram of utilization system of diesel engine exhaust gas and hot gas from vortex cooler

罐出来,进入旋流器。在旋流器内,发生分层效应,把压缩空气分为冷气流和热气流。分层后,冷气流进入孔内。热气流通过喷嘴,与从柴油机出来的废气混合,流向暖气储气罐。从旋流器出来的热气流流速很大,在喷嘴中产生负压,把废气吸引过来,废气流动阻力降低,柴油机燃油用量降低。钻进过程停止时,空压机空转。图中第二个旋流器用来向储气罐供应热空气。

根据统计资料<sup>[7]</sup>,采用上述节能技术,每钻进 1000 m 进尺可以获得 217730 卢布的经济效益。

#### 5 分析、讨论与建议

根据上述分析和试验资料,可做如下分析、讨论和建议。

(1)俄罗斯幅员辽阔,多年冻结岩石地区面积较大。该地区矿产资源丰富,急需勘探开发,工程建设正在大规模展开,均需钻探工程予以支撑协助。钻探工程中遇到的一个问题是冻结岩石温度很低,由于冲洗液对冻结岩石中冰的热作用,使岩石胶结矿物颗粒的胶结性和强度大大降低,导致岩石塌落和孔壁坍塌,发生孔内事故。中国也有季节性岩石冻结地区遇到了类似问题,需要解决。俄罗斯提出的利用冷压缩空气洗井钻探技术,解决了多年冻结岩石钻进的一大难题,取得了很好的经济技术效果,具有一定参考和应用价值。

(2)俄罗斯专家利用压缩空气旋流冷却器制得的冷空气送到孔底,使冷却的压缩空气温度低于孔底岩石的温度,从而保证了正常钻进、安全施工,提高了机械钻速和钻头寿命。生产实践成功证明这种冷空气洗井技术是多年冻结岩石钻进的优先选项。

(3)为了减少破碎孔底岩石产生的热能对孔底压缩空气温度升高的影响,应该改进钻进时使用的钻头。建议使用肋骨式或外出刃大的硬合金钻头,以及增加水口数量、调整水口排列、钻头侧面呈肋条式的金刚石钻头。

(4)旋流制冷器出来的热空气和柴油机的废气,可以用于生产单位和居民取暖,做到废物利用。这一措施也有实际意义和经济价值。可见,旋流制冷器出来的冷空气和热空气均可利用,既解决了钻进洗井需要的冷空气,又解决了生产单位和民用需要的供暖问题,值得研究和推广。柴油机废气的采

集和利用,还解决了其进入大气、污染周围环境的问题。

(5)建议中国有关专家和单位,对在冻结岩石中钻进使用的冷压缩空气洗井技术进行研究与试验,以确定其在中国应用的可行性和必要性。

### 参考文献(References):

- [1] 刘广志,汤凤林.特种钻探工艺学[M].上海:上海科学技术出版社,2005.  
LIU Guangzhi, TANG Fenglin. Special Drilling Technology [M]. Shanghai: Shanghai Scientific And Technical Publishers, 2005.
- [2] 汤凤林,А.Г.加里宁,段隆臣.岩心钻探学[M].武汉:中国地质大学出版社,2009.  
TANG Fenglin A.G. Калинин, DUAN Longchen. Coring Drilling Technology [M]. Wuhan: The Press of The China University of Geosciences, 2009.
- [3] 胡郁乐,张惠,王稳石,等.深部岩心钻探关键技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.  
HU Yule, ZHANG Hui, WANG Wenshi, et al. Key Technologies in deep Core Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [4] 段隆臣,潘秉锁,方小红.金刚石工具的设计与制造[M].武汉:中国地质大学出版社,2013.  
DUAN Longchen, PAN Bingsuo, FANG Xiaohong. Design and Manufacture of Diamond Tools [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2013.
- [5] 朱恒银.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.  
ZHU Hengyin. Research and Application of Diamond Bit for Deep Geological Drilling [M]. Wuhan: The Press of the China University of Geosciences, 2014.
- [6] 朱恒银.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.  
ZHU Hengyin. Deep Core Drilling Technology and Management [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [7] Джуграев Р У. Исследование температурного режима при бурении геологоразведочных скважин с продувкой воздухом и использованием системы утилизации тепла автореферат дис [D]. Москва: Рос. гос. геологоразведоч. ун-т им. С. Орджоникидзе, 2015.
- [8] Джуграев Р У, Меркулов М В. Нормализация Температурного Режимы Скважины При Бурении С Продувкой Воздухом [М]. Навоий: Издательство имени Алишера Навои, 2016.
- [9] Джуграев Р У, Меркулов М В. Утилизация теплоты ДВС привода компрессора и избытков воздуха при бурении геологоразведочных скважин с продувкой воздухом [J]. Горный информационно – аналитический бюллетень, 2016, 7: 186 – 192.
- [10] Джуграев Р У, Меркулов М В. Овозможности применения вихревых труб при бурении геологоразведочных скважин [J]. Известия Вузов.Геология и разведка, 2013, 3: 76–78.
- [11] Джуграев Р У, Меркулов М В. Анализ бурения скважин с продувкой воздухом [J]. Горный информационно – аналитический бюллетень (научно – технический журнал), 2014, 12: 327–330.
- [12] Джуграев Р У, Меркулов М В. Результаты экспериментальных исследований вихревой трубки применительно к бурению геологоразведочных скважин [J]. Горный информационно – аналитический бюллетень (научно – технический журнал), 2015, 4: 349–352.
- [13] Джуграев Р У, Меркулов М В. Моделирование температурного режима при бурении скважин в мерзлых породах с продувкой воздухом [J]. Горный информационно – аналитический бюллетень-ГИАБ, 2015, 11: 287–293.
- [14] Эгамбердиев И П, Джуграев Р У. Повышение эффективности системы воздухораспределения поршневых компрессоров [R]. Материалы Республиканской научно – технической конференции на тему «Современные технологии и инновации, 2012: 166–167.
- [15] Джуграев Р У. Анализ и возможность применения вихревых труб при бурении геологоразведочных скважин [C]//Сборник докладов XI международной 23 конференции «Новые идеи в науках о Земле», посвященной 95 – летию МГРИ-РГГРУ, – М.: 2013.
- [16] Джуграев Р У. Опыт бурения скважин с продувкой воздухом [C]//Сборник докладов Международной конференции «Молодые – наукам о Земле». 15–17 апреля 2014 г. Москва, МГРИ-РГГРУ.
- [17] Джуграев Р У. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в осложненных горно – геологических условиях [R]. Сборник докладов Международной научно – практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» 08 – 10 апреля 2015 г. Москва, МГРИ-РГГРУ.

(编辑 王跃伟)