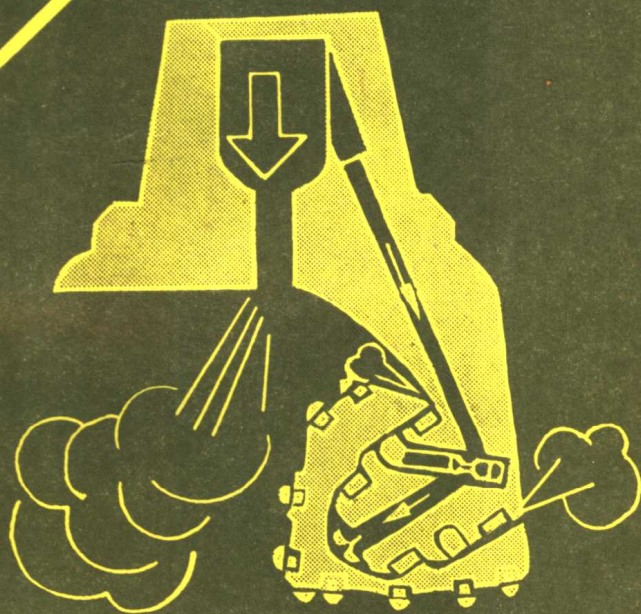


Б. Б. 库德里亚绍夫

А. И. 基尔萨诺夫

勘探孔空气钻进

张祖培 胡耿寰 等译



地质出版社

勘探孔空气钻进

Б.Б.库德里亚绍夫 А.И.基尔萨诺夫

张祖培 胡耿寰 赵国隆 周国荣 蒋荣庆 译

地质出版社

·北京·

(京) 新登字 085 号

内 容 简 介

本书阐述了钻进过程中气体和气液混合物运动、岩屑运送和热交换过程的计算和理论基础；论述了利用气液介质进行钻进工艺的有效性；提供了表面活性剂的配方、控制压缩空气和气液混合物的专用设备和仪器；在永冻层中空气吹洗钻进时压缩空气人工冷却和干燥的技术。

本书可供从事地质勘探孔钻进的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

勘探孔空气钻进 = БУРЕНИЕ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЗДУХА/(苏) 库德里亚绍夫(Б. Б. КУДРЯШОВ) 著；张祖培，胡耿寰译。-北京：地质出版社，1994.10

ISBN 7-116-01631-7

I. 勘… II. ①库… ②张… ③胡… III. 空气钻进—探矿工程
IV. P 634.5

中国版本图书馆CIP数据核字 (94) 第 01562 号

БУРЕНИЕ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

с применением воздуха

Б. Б. Кудряшов А. И. Кирсанов

МОСКВА "НЕДРА" 1990

地质出版社出版发行

(100013 北京和平里七区十号楼)

责任编辑：冯士安

*

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本：850×1168¹/₃₂ 印张：8.375 字数：218000

1994年10月北京第一版·1994年10月北京第一次印刷

印数：1—600册 定价：8.45元

ISBN 7-116-01631-7

P·1320

序 言

地质勘查钻探部门，对保证国民经济的矿物原料基地有极重要的作用，它的科学技术进步的方向之一，是合理应用气体和气液清洗介质代替冲洗液。前苏联和各国的钻探实践证明，这类清洗介质能够保证大大提高机械钻速，降低并消除地质复杂情况的时间消耗，从而使钻探工作效率和效益急剧增长。应用表明，它们在最不宜用液体冲洗的条件下很有效：如钻进常年冻结岩层，严重漏失带，供水困难的荒漠、高山，难于通行的地区，以及严寒地区。

空气钻进的合理应用范围不断扩大，普及到极不相同的地理区域和矿山地质条件。它派生了一些新的方法：如充气冲洗液钻进用于漏失含水岩层；泡沫钻进用于松软、膨胀及冻结岩层；气动冲击钻进用于坚硬岩层；用空气升液器或压气传动的潜水泵使地下水局部循环钻进；雾化钻进及真空钻进等。

用压气代替冲洗液钻进的第一次试验是在1918年的鲍利斯拉夫城进行的。其后，由于冲洗液钻进效率增长，以及缺乏合适规格的空压机，空气钻进仅限于极少数情况下使用。1949年，空气钻进在美国开始实际应用于露天采场爆破孔钻进；1950年用于地震孔钻进。与此同时，前苏联莫斯科煤田地质管理局提出空气钻进。1951年，美国在圣胡安地区用空气钻进石油天然气深井，获得创记录的钻进速度，钻头寿命增加，钻进成本降低，极大地促进了这种新方法的发展。

1957—1958年，根据前苏联地质部的指示，固体矿产空气钻进，在下列地区进行试验：中亚细亚（A. M. 马古尔杜莫夫，H. C. 马库林，B. C. 费拉托夫），乌克兰（Ю. И. 巴图林，И. Д. 西罗塔），乌拉尔及科拉半岛（B. B. 库德里亚绍夫），哈萨克斯

坦 (Г. С. 维拉耶夫), 东西伯利亚 (B. B. 加列耶夫, A. A. 扬科), 远东和萨哈林 (E. A. 科兹洛夫斯基, Ю. С. 洛帕京), 雅库梯亚和科累马 (Т. М. 伊尔拉里诺娃, A. И. 基尔萨诺夫) 以及中部地区 (П. М. 斯捷帕诺夫)。试验获得的结果, 将使这种方法在勘探钻进实践中得到广泛应用。

1959年, 前苏联在地质勘探孔中的空气钻进开始了工业应用。美国和加拿大空气钻进及其派生的工作量, 没有准确的报导。前苏联矿山地质系统, 仅在1987年以后, 地质勘探孔空气及气液钻进就超过了一百万米 (1 Mm), 这还不包括地震孔。这几年, 地质勘探孔空气钻进积累了大量实践经验, 发展了各种技术手段, 建立了理论基础。

本书试图总结空气及气液钻进的研究、开发和使用的研究成果。这些成果是在作者领导之下在全苏勘探技术研究所和以Г. Б. 普列汉诺夫命名的列宁格勒矿业学院的实验室, 以及在前苏联矿山地质生产单位完成的, 并总结了本国及外国的文献资料。

前言、第1章、结束语由B. Б. 库德里亚绍夫、A. И. 基尔萨洛夫合写; 第2、3、5章由B. Б. 库德里亚绍夫编写; 第6、7、8章由A. И. 基尔萨诺夫编写; 第4章由B. Б. 库德里亚绍夫与H. И. 斯柳萨列夫编写, 其中5.1节与A. A. 雅科夫列夫, 5.4节与A. B. 科兹洛夫一同编写; 第9章由B. Я. 克里莫夫编写。

作者向所有参与共同研究、开发在地质勘探工作中运用气体及气液钻进的全体成员, 表示诚挚的谢意。

主 要 符 号

- a —— 导温系数, m^2/s
- A —— 功, 能, J (焦耳)
- c —— 比热 (对空气, 在常压下一 c_p), $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
- D, d —— 直径, m
- F, f —— 面积, m^2
- G —— 质量流量, kg/s
- H, h —— 垂直方向终孔深度和活动坐标, m
- i —— 水力梯度, 无量纲
- k —— 系数
- L, l —— 长度, m
- N —— 功率, W (瓦)
- p —— 压力, Pa
- Q —— 体积流量, m^3/s
- R —— 气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 半径, m
- s —— 机械钻速, m/s
- r —— 特征方程的根, 无量纲; 半径, m
- T, t —— 温度, $^\circ\text{C}$, K
- u —— 岩粉运动速度, m/s
- v —— 气流平均流速 (沿通道截面), m/s
- w —— 临界速度, m/s
- V —— 体积, m^3
- z —— 水准面高差, m
- α —— 充气度, 无量纲; 散热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$
- β —— 体积含气量, 无量纲
- λ —— 流体阻力系数, 无量纲; 导热系数, $\text{W}/(\text{cm}\cdot^\circ\text{C})$

δ —— 固体密度, kg/m^3

Δ —— 增量; 压差

ρ —— 液体或气体密度, kg/m^3

σ —— 地温梯度, $^{\circ}\text{C/m}$

φ —— 角度, 度

Ψ —— 阻力系数, 无量纲; 相变比热, J/kg

μ —— 浓度, 无量纲; 动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

ν —— 运动粘度, m^2/s

τ —— 时间, s

Ar —— 阿基米德常数, $\text{Ar} = \frac{g d^3 (\delta - \rho)}{\rho \nu^2}$

Rc —— 雷诺数, $\text{Rc} = \frac{v d \rho}{\mu} = \frac{v d}{\nu}$

Bi —— 毕奥 (Био) 常数, $\text{Bi} = \alpha R / \lambda$

Fo —— 傅立叶 (Фурье) 常数, $\text{Fo} = a \tau / R$

Pr —— 普朗特 (Прандтл) 常数, $\text{Pr} = \nu / a$

下脚标符号

г —— 表示气

з —— 表示孔底

ж —— 表示液体

п —— 表示岩石

э —— 表示等效尺寸

см —— 表示混合物

о —— 表示正常条件或球

1, 2 —— 分别表示向下气流及上升气流; 或内径及外径

н, к —— 分别表示开始及结束

оп —— 表示试验值

рас —— 表示计算值

ср —— 表示平均值

目 录

序 言

主要符号

第一章 钻进用气体、气液介质及其合理的应用范围	1
1.1 低密度、低热容冲洗介质作为完善钻进工 艺的手段.....	1
1.2 低密度冲洗介质的发展及其合理应用范围	3
1.3 低密度冲洗介质的优点和缺点	5
第二章 钻屑输送规律	8
2.1 球体在介质中自由降落的速度	8
2.2 玻璃球在钻孔模型中临界速度的试验研究	24
2.3 颗粒形状和环空限制性影响的试验研究	28
2.4 实际条件下临界速度的影响因素及其计算	33
2.5 空气钻进时要求的气流上升速度, 速度诺谟图	46
第三章 吹洗钻进时循环过程的规律性	50
3.1 吹洗规程计算方法	50
3.2 钻孔内纯空气循环系统中的压力损失	56
3.3 实际条件下钻杆柱内的压力损失	60
3.4 钻杆柱内空气泄漏及其对压力损失的影响	67
3.5 钻孔环状间隙中运送岩屑的压力损失	76
3.6 供气规程计算, 所得计算关系式可靠性的评价	86
第四章 气液介质钻进时循环过程的规律性	93
4.1 充气冲洗液循环时压力损失的计算方法	93
4.2 泡沫钻进冲洗循环过程的规律性	96
4.3 确定泡沫冲洗工艺参数的指南	106
第五章 压缩空气和气液介质钻进的热交换过程	114

5.1	碎岩工具的温度规程	114
5.2	钻孔和围岩的温度规程	125
5.3	冻结岩层空气钻进温度因素的正常化	130
5.4	泡沫钻进冻结岩层的优越性	136
第六章	气体介质制备和应用的专用设备	140
6.1	空压设备及其选择、安装和使用特点	140
6.2	孔口装置	151
6.3	辅助设备	156
6.4	设备布置和管汇系统	161
6.5	空气钻进的专用设备	163
第七章	空气洗孔钻进工艺	181
7.1	无岩芯钻进	181
7.2	取芯钻进	188
7.3	涌水条件下钻进的工艺特点	192
7.4	负温岩层钻进的工艺特征	196
第八章	气液混合物钻进	201
8.1	制备和注入气液混合物的方法和器具	201
8.2	定量供给泡沫剂的方法和器具	207
8.3	气液混合物的消泡方法和器具	207
8.4	泡沫钻进装备的布置与安装	213
8.5	气液混合物的性能和配方	219
8.6	气液混合物清洗孔底的钻进工艺	229
第九章	气动冲击钻进	238
9.1	气动潜孔锤的结构和工作	238
9.2	取芯钻具及辅助工具	241
9.3	地质勘探气动潜孔锤钻进工艺	245
9.4	气动冲击钻进的发展途径	254
结束语		256
参考文献		258

第一章 钻进用气体、气液介质 及其合理的应用范围

1.1 低密度、低热容冲洗介质作为 完善钻进工艺的手段

直至不久前, 钻探用的冲洗介质, 密度为 $(0.84-2.5) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。固体矿产钻探, 密度范围要小一些, 为 $(0.84-1.3) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, 个别情况能达 $2.0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。冲洗介质为工业用水和低固相泥浆, 其密度为 $(1.0-1.05) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; 普通泥浆密度为 $(1.05-1.3) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; 很少情况下用加重泥浆, 密度可达 $2.0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。在高纬度地区钻探, 用盐水、乳化液、柴油、原油作冲洗介质, 最小密度为 $0.84 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。冲洗介质密度和热容量可以选择的范围有限, 完全没有密度小于 $0.84 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的冲洗介质, 常导致正常钻探过程中断, 产生复杂情况和事故。部分高费用的钻孔不能完成自己的任务。

用压气及气液混合物作冲洗介质, 使密度能达到 0.6 kg/m^3 以下。并可用改变冲洗介质气液比的方法, 在很宽的范围调整它的密度 (图1-1)。

空气的热容量等于 $1 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, 是水热容量的 $1/4$ 。用低热容量冲洗介质, 促使常年冻土带地层钻进工艺过程的改善。分析实际资料和理论研究证明, 在冻土带快速安全钻进的条件是保持孔壁冻土岩层的自然物态和温度状态。忽视温度因素, 由于冲洗液在孔内冻结, 或冰胶结的松散岩层因加温失去粘结, 丧失稳定性, 从而导致钻孔复杂情况的出现^[15]。

用冲洗液钻进冻结层, 最常见的复杂情况如下:

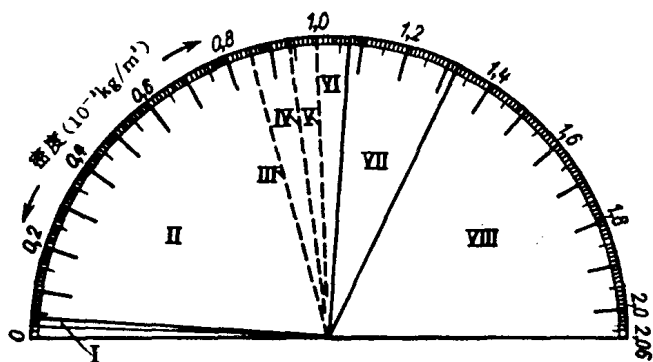


图 1.1 冲洗介质按密度的分布

I—天然气和空气；II—气液混合物；III—原油；IV—油基泥浆；V—水；
VI—低固相泥浆；VII—普通泥浆；VIII—加重泥浆

孔壁冲毁和坍塌是用热水或高浓度盐水作冲洗液，由于加温和冰层破坏造成的。岩石加温而坍塌，常造成卡钻或冲洗液在孔内重新冻结，而导致持久的事故；

孔口冲毁是由充满冰的岩层被烘烤而引起。孔口冲毁的后果是导管偏斜及下沉，钻机不能正常工作，钻塔基座和支承失稳。孔口冲毁后，常常不可能修复，因为冲毁的漏斗直径可达若干米；

水基冲洗液的局部冻结，随后在孔眼内形成冰凌和在孔壁上结冰。这既可能发生在钻进过程中，也可能发生在起下钻具冲洗液短暂停止循环时。钻进过程中孔壁结冰，造成从孔内提升钻具困难，有时成为不可能；而在起下钻具之间结冰，则使下钻至孔底的时间消耗增大；

冲洗液完全冻结是由于水泵或发动机损坏、断电或处理断钻卡钻缺乏必需的工具，冲洗液长时间停止循环而引起的。弄清停工原因之后，在孔内重新钻进冰层，需要很长时间。如果冲洗液冻结时，孔内有钻具，会发生严重的事故（重新钻进或烘烤冰层，同时拧开钻具，逐根提出）。消除事故，变得如此之难和需要很长时间，以至于重新钻一个新孔，在经济上更为合算；

钻具以过冷状态（冬天）下入钻孔，冻结在孔壁上；

钻进结冰层和易冲蚀的岩层时，岩矿芯采取率低或完全取不出岩矿芯。

上列复杂情况是钻探工作效率非常低，每米成本高，地质勘探工作质量低的原因。用冲洗液不能解决常年冻土带快速、安全、经济地钻进问题。只有用压气或气液混合物，才可以避免在冻土条件下钻孔出现困难。

气体和气液介质的低密度，允许对钻进地层有低的静液压力，并能加以控制——调节对地层的反压力，必要时使孔内的静液柱压力与地层孔隙压力相等。这就能够改善钻进工艺过程，在部分或全部漏失条件下钻进，降低消除复杂情况的非生产时间消耗，避免裸露岩石的污染和生产层的淤塞。

为了在各种具体情况下成功地应用气体及气液介质，必须仔细分析钻孔施工执行的任务，正确设计工艺过程，保证有必要的设备、工具、材料，以及高技能的工程技术人员。钻孔条件，特别在勘探钻进时，常常是不可预测的，常急剧变化，以致要随时修正钻进参数，在钻进一个钻孔期间，可采用不同的气体及气液冲洗介质。

1.2 低密度冲洗介质的发展 及其合理应用范围

极低和低密度冲洗介质，一般可分为气体介质及气液介质。

气体介质有：压气、天然气、内燃机尾气、液化氮气；气液介质有：雾、泡沫、充气液体。

一般公认，为了成功地应用空气钻进，必须有如下地质技术条件：在剖面中具有硬的，不含水或亲水，用水基冲洗液有坍塌、崩陷趋向的岩层；没有不能承受气流侵蚀的岩层；没有异常高压或压力急剧下降的地层；不含硫化氢、甲烷的岩层。

钻孔中有碳氢化物进入，用空气冲洗能生成爆炸物时，应用天然气、内燃机尾气或氮气。钻进可以用正循环或反循环；在反

循环时，用真空泵或高压抽风机在孔口造成负压。

用气体介质，可以有效地与回转钻及冲击回转钻（带气动潜孔锤），电钻和空气涡轮钻相结合。

当地下水进入钻孔，产生复杂情况时，可应用雾化钻进。它是气体与液体的混合物，气液体积比达2000。分散介质是空气或其它气体，细分散相是表面活性剂（泡沫剂）的水溶液。如果岩石为水敏页岩，是脆性的或溶胀性的，则加入抑制性添加剂和氯化钾。

在前苏联，雾化钻进主要应用范围：采矿场钻进爆破孔；气动冲击钻进的勘探孔；深度不大的工程地质和地震勘探孔。在空气钻进过程中大量涌水时，保持很高的气流上升速度，在经济上不合算，且在很多情况下，由于没有中压空压机而不可能，在此种条件下应用泡沫。

泡沫是空气和表面活性剂（发泡剂）水溶液的分散混合物，气液比为50—300。在此混合物中，液体是分散介质（薄膜状），空气是分散相。在钻探实践中，泡沫为具有极低密度的独立的冲洗介质，用于：漏失条件下从钻孔中清除岩粉；空气钻进时与涌水条件下产生的复杂情况作斗争；开采井的修井；钻开低压生产层；钻进冻土带；在北极条件下用双壁管钻进时作为隔离液或缓冲液。

在美国，泡沫分为稠密（增稠）泡沫和稳定泡沫。稠密泡沫又称KAΘ泡沫（KAΘ为原子能委员会的缩写，英文为AEC—译注），它是50年代原子能委员会在内华达州试验场钻井时开发的。稠密泡沫由空气以及凝胶体和表面活性剂为基础配制的溶液组成。它能清洗直径达5—7m的井筒。空气和溶液的用量应仔细地调整，以保证上升至地表的泡沫具有如同剃须膏的结构。稠密泡沫因有强烈沾污倾向，在其它用途钻孔中没有得到推广。稳定泡沫类似于前苏联地质勘探孔钻进用的泡沫。泡沫能很好地与回转钻及电钻相结合。

充气液体也是混合物，分散介质是液体，而分散相是空气

或其它气体。充气液体中气液体积比保持在 3—50 范围内。充气溶液用于钻进漏失带，以预防和减少冲洗介质的消耗。已经得到证实，充气液体的钻进技术经济指标高于冲洗液，而低于气体或泡沫。现在，充气液体广泛应用于勘探孔和开采孔在强烈涌水、孔壁坍塌、冲洗液漏失条件下的钻进实践。

气体和气液冲洗介质最适宜于常年冻土带地区，漏失地层，供水有很大困难和材料消耗多的缺水、沙漠、高山等地区。

1.3 低密度冲洗介质的优点和缺点

气体和气液冲洗介质钻进，在条件有利时，具有一系列本质的优点：

1. 机械钻速增大 与冲洗液相比，在坚硬地层增大 3—4 倍，在软地层 1—2 倍。这是由于孔底静液压力减小，在孔底没有泥皮或致密的岩粉垫层，它们阻碍钻屑从孔底冲起排出。

2. 碎岩工具寿命增大 1—4 倍 这是因为空气钻进时孔底岩粉没有二次破碎。实际上，碎岩工具工作面之下的岩粉，由高速紊流的气流瞬间直接带出。由于密度极低，钻进时气体体积流量，气体的运动速度，以及气流的紊流性（紊流程度决定于雷诺数），比用任何冲洗液都高出很多倍。

列宁格勒矿业学院钻进工艺技术教研室研究了冲洗介质性能对碎岩工具寿命的影响^[31]。图 1.2 表示薄片硬合金钻头，其直径

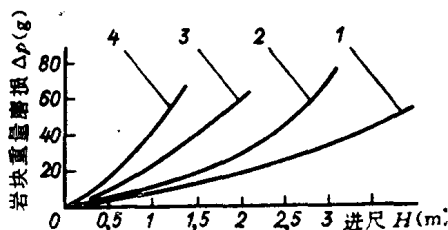


图 1.2 CA 型自磨式钻头，直径 59mm，钻进研磨性岩块，重量磨损与进尺的关系，规程保持一定， $P = 4.5 \text{ kN}$ ， $n = 237 \text{ r/min}$ ，采用的冲洗介质为：1—空气；2—水；3—柴油；4—泥浆

59 mm, 钻进研磨性岩块时重量磨损与进尺的关系曲线。钻压、转速一定, 用不同的冲洗介质, 在所有情况下, 流量保持在环状间隙中相同的岩粉输送能力。实际的孔底平均雷诺数 Re 值: 空气为14150; 水3948; 柴油820; 泥浆434。钻头进尺也类似上述顺序和相似的比例。

最好的钻头工作效果是在空气吹洗时得到的, 最差的是用泥浆冲洗, 正是在空气吹洗时, 创造出最高的钻速和钻头进尺。全苏钻井技术研究所(ВНИИБТ)用空气吹洗电钻钻井时, 获得回次进尺超过900m, 并有钻头进尺超过3000m的实例。从美国的钻井实践得知, 钻井进尺深度3000m, 如果用泥浆冲洗, 花费35天, 用气体介质仅2—3天。泡沫钻进时, 高的钻头寿命是由于它的高润滑和冷却能力。

3. 在难以到达的干旱缺水地区以及北极地区, 消除了钻井工作依赖于供水以及组织供水的困难。

4. 免除购买、运送泥浆用粘土、水、处理剂的费用和配制泥浆的时间、劳动和设施的消耗。

5. 大多数情况下能在冲洗液完全漏失的孔段无阻碍地钻进。不需消耗时间和设施以及与漏失作斗争。

6. 改善机台劳动条件, 特别是在低温气候时。

7. 不要挖沉淀池和安装循环系统等, 简化和减轻了安装工作。这种优越性在用自行式钻探设备钻进大量浅孔时特别有价值。

8. 在水润湿岩石自然结构就会破坏的岩层中, 避免孔壁膨胀、冲毁和坍塌。

9. 简化钻孔中的水文地质观测, 便于发现水、油、气层。

10. 避免勘探井和开采井近孔底处地层的污染和水侵, 因此简化了井的开发, 开采时增加产量。

11. 简化下套管和起套管工作。

12. 没有冲洗液污染、冲蚀和溶解岩心。

13. 无岩心钻进时, 按岩粉取样, 能获得和坑道取样相同的可靠性。有时获得地质成果的速度可加快到10—15倍。

14. 减少处理废泥浆问题。

15. 常年冻土带地区钻探工作质量大为提高，钻进过程简化，成本降低。这是由于：

a) 冰胶结的岩层，岩心采取率增大，保证获得低温自然状态的岩石样品，而不会破坏其结构和被污染，这在工程勘测中特别重要；

b) 没有必要安设防寒的循环系统；

c) 减少运输化冰燃料、粘土、水、化学处理剂的耗费；

d) 消除冲洗液在地表和孔内再冻结造成的停工和事故；

e) 由于孔壁稳定性提高，使钻孔结构简化。在大多数情况下，套管只要求封闭上部冲积层，供安装导向管和固定密封装置之用。

16. 在条件顺利时，钻进1m的成本降低，而钻进效率增长，有时达1倍以上。

空气及气液钻进的主要缺点是必须增加价格昂贵的设备；要求技术熟练的操作；钻杆和设备的磨损和锈蚀增大；空气钻进干岩石时与粉尘作斗争的复杂性；为进行某些地球物理工作，必须向钻孔中注入液体。

计划采用气体或气液介质时，必须考虑和估价所有肯定的和否定的因素。在作出决定时，要分析邻近地区钻孔钻进的资料，周密地考虑存在的困难，查明孔壁的稳定性，衡量设备和试剂的耗费，注意到钻探工作人员的技能情况。作最后裁决时，决定的因素是钻孔所用的时间。

第二章 钻屑输送规律

2.1 球体在介质中自由降落的速度

在滴状流体或可压缩流体（气体）中处于下沉状态运动的物体，承受动态阻力（决定于绕流结构、涡流形成的程度）和摩擦阻力（决定于介质粘度）。动态阻力正比于介质密度、物体横截面积（垂直于运动方向的最大截面）和速度的平方。总阻力决定于物体的大小和形状，介质的密度和粘度，运动速度和方向。

介质阻力通常用相应的球体来研究，球体的阻力不决定于冲击的角度。然而即使对于球体运动有关实际介质的阻力分析问题，也未完全解决。

球体运动的试验研究已有二百多年，球体由不同材料做成，直径从 $3\mu\text{m}$ （微米）至 0.3m 。在液体及气体介质中，其速度从每秒几毫米至几百米^[1]。将试验结果整理成阻力系数与雷诺数关系的图形形式，对几何形相似的物体，不论粒度大小和在那种介质中，这种关系均表现为一条曲线。图2.1表示球形物体的瑞利(Рэлей)图（《标准曲线》），它根据最可靠的数据以对数坐标作出。

球体在实际液体或气体介质中的运动规律是分散体系运动的理论基础，也是河床演变过程，沉积作用，水力或风力运输，矿山通风，水力选矿，钻孔钻进及开采时乳状液及气液系统循环，岩粉携带，以及多种其它重要的自然现象、工艺过程、器具和机器的理论基础。

对球体在介质中运动进行理论和实验研究的实际目的，是为了拟定介质阻力和最终速度的可靠计算方法。物体在非限制的液