

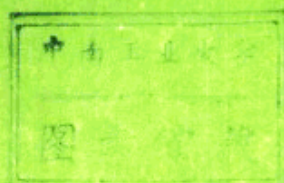
688699

岩心钻探实用计算

(第二版)

[苏] 普·阿·甘朱缅著

高 森 译



新疆地质学会探矿工程专业委员会
新疆地质矿产局探矿工程处

1988年5月

简介（书评）

P.A.甘朱緬著“岩心钻探实用计算”一书第二版（1986年）修订本，有253页，16个图，64个表，附参考文献47种。

第二版（第一版是1978年）中反映了岩心钻近期成就。特别重视了利用高频液动和风动冲击器的高转数金刚石钻进，绳索取心钻具，水力输送岩心技术装置和最优化钻进方法的推广。编写了水平钻进规程，非金属加固孔壁，繁重过程机械化，水井钻进规程参数和钻头类型尺寸选择等问题。阐述了钻探工艺研究中如何利用实验计划和预测的统计方法。

本书适用于从事勘探孔钻进和研制新技术装备的工程技术人员。

前 言

为了适应高等院校和地质勘探部门工作人员的需要，也考虑到岩心钻探工程近期成就和大量新资料的出现，本版做了重大修改和补充，书中各章节均做了必要的改动。

本书具有方法性指导目的。作者不简单地指出进行具体数字计算的途径，也就是按公式计算出结果，而是力求帮助读者获得解决岩心钻领域中现实问题的素养。这正是新版中为何减少了每章最后求解问题数量和带着手册性质的附表容量的缘故。计算所需全部数据，读者可查阅专门文献。

岩心钻迅速发展紧密地与各种设备、工具、仪器、化学药剂、止水混合物等的应用相关联。某种技术手段或工艺措施应用于岩石物理力学性质差别极大的具体地质条件下，造成钻进规程选择的复杂化。许多实际重大问题强调要求寻找最佳答案，其中包括寻求碎岩工具工作规程，具体事件信息不灵不全要对答案做出选择。

遗憾的是没有一个技术领域象岩心钻这样，需要如此大的实验量，因为影响因素太多。在目前岩心钻孔深和工作量增加、技术复杂的情况下，仅仅掌握一般工程计算是不够的。许多实际课题的解决有必要借助实验设计和预测的数理统计方法。这个问题另辟新的单独一章讲述。

目 录

第一章 钻孔时岩石破碎	(1)
§ 1. 岩石的物理力学性质	(2)
§ 2. 岩石的可钻性	(5)
§ 3. 岩石的破碎方法	(6)
§ 4. 岩石力学性质的各向异性	(7)
题解示例	(7)
第二章 无冲洗浅孔钻进	(9)
§ 1. 螺旋和振动钻探方法	(9)
§ 2. 钢绳冲击钻进	(12)
题解示例	(14)
第三章 钻孔冲洗及气体介质洗井	(16)
§ 1. 冲洗介质种类和参数的选择	(16)
§ 2. 有关冲洗介质的制造、净化、化学处理和加重的计算	(18)
§ 3. 水力计算	(24)
§ 4. 气体介质洗井	(28)
题解示例	(30)
第四章 岩心钻探工艺	(35)
§ 1. 钻进方法的选择	(35)
§ 2. 岩石破碎工具的选择	(36)
§ 3. 钻孔结构的选择	(37)
§ 4. 钻进规程设计	(40)
§ 5. 钻进规程的参数的监测和优化	(50)
§ 6. 岩心和岩屑的采集	(52)
§ 7. 地质勘探钻进中小口径涡轮和螺杆井底动力机的应用	(54)
题解示例	(56)
第五章 钻柱的工况	(62)
§ 1. 钻柱和钻铤的类型尺寸选择	(62)
§ 2. 钻柱强度校核计算	(63)
§ 3. 钻杆使用的有关计算	(69)
题解示例	(70)
第六章 钻进过程中的事故和复杂情况	(74)
§ 1. 钻进中复杂情况的预防	(74)
§ 2. 事故的预防和处理	(78)

题解示例·····	(80)
第七章 钻孔弯曲、定向钻进和多孔身钻进·····	(83)
§1. 钻孔轴线设计方向的选择·····	(83)
§2. 钻孔自然弯曲的预防·····	(83)
§3. 钻孔的人工弯曲·····	(85)
题解示例·····	(88)
第八章 岩心钻探设备·····	(91)
§1. 给定工作条件下钻探设备的选择·····	(91)
§2. 岩心钻探用动力机功率的确定·····	(92)
§3. 钻塔(桅杆)的选择及其在工作时的受力计算·····	(93)
§4. 滑车装置和钢绳的选择·····	(96)
§5. 繁重劳动工序的机械化·····	(98)
§6. 钻探设备数目和大修次数的确定·····	(99)
题解示例·····	(99)
第九章 钻孔加固·····	(104)
§1. 套管作用载荷·····	(104)
§2. 水泥固井·····	(106)
题解示例·····	(108)
第十章 水文地质钻探·····	(111)
§1. 钻井方法和钻探设备类型的选择·····	(111)
§2. 水文地质钻井结构的选择·····	(111)
§3. 钻头类型尺寸、钻进规程参数和冲洗液种类的选择·····	(112)
§4. 滤水管类型的选择及其主要尺寸计算·····	(113)
§5. 含水层试验·····	(115)
§6. 抽水设备的选择和计算·····	(116)
题解示例·····	(119)
第十一章 钻探中统计和实验数据的数学处理·····	(123)
§1. 钻进指标平均值的估计·····	(123)
§2. 粗大误差的估计·····	(125)
§3. 随机值的分布规律和参数精度评估的确定·····	(125)
§4. 测定结果处理的某些知识·····	(129)
题解示例·····	(129)
第十二章 钻探工艺研究中实验设计及预测方向的应用·····	(137)
§1. 实验设计方法·····	(137)
§2. 实验钻进必需工作量和钻具试验次数的确定·····	(142)
§3. 最优解概念·····	(143)
§4. 预测方法的应用·····	(144)

题解示例	(146)
第十三章 推广新技术和先进工艺的经济效果计算	(153)
§1. 一般原则	(153)
§2. 推广金刚石钻进、无岩心钻进、液动冲击钻进和小口径合金钻进的 经济效果评价	(154)
§3. 推广多孔身定向钻进的经济效果评价	(156)
§4. 推广气体介质洗井的经济效果的评价	(156)
§5. 钻头合理使用范围的评价	(157)
§6. 推广升降工序机械化装置经济效果的评价	(158)
§7. 金刚石钻进推广孔底防振器和防振剂经济效果的评价	(158)
§8. 推广YKE型钻探设备经济效果的评价	(159)
§9. 推广绳索取心钻具钻进技术的经济效果的评价	(160)
题解示例	(160)
附录	(162)
文献目录	(189)

第一章 钻孔时岩石破碎

钻进过程就是连续不断地用岩石工具破碎岩石，并将岩屑排出孔底携到地表。

钻进过程中岩石的抗破碎强度完全由岩石的物理机械性质表征。因此，只有很好地认识岩石的物理力学性质（硬度、强度、研磨性等），才能达到有效地破碎岩石。

§1. 岩石的物理力学性质

当解算与各种技术、工艺和经济问题有关的勘探钻进（岩心钻）实际计算命题时，必须了解岩石的物理力学性质，才能保证合理选择钻进方法、岩石破碎工具和钻进工艺规程参数。

硬度——这是岩石最重要的性质之一，它影响着钻头侵入岩石的深度。确定岩石硬度有多种方法和仪器。目前流行很广的是Л.А.史立涅尔建议的方法，是在磨光的岩样表面上压入底面积为1~5毫米²的平底压模。1~2毫米²的压模（硬质合金制）用于致密、均质孔隙性岩石；对低硬度岩石（颗粒值0.25毫米²）采用3毫米²的压模，强孔隙性、低强度岩石用5毫米²的压模。

史氏硬度（ p_m ）用УМГП-3型专用仪器或液压机确定，以破碎力（ P ）与压模面积（ S ）之比表示：

$$p_m = \frac{P}{S} \text{ 帕斯卡 (帕)} \quad (1.1)$$

史氏推荐的岩石硬度分级为12级，各级岩石与岩心钻探采用的12级可钻性分级相对应。

岩石级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		100	250	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000	
硬度 p_m , 兆帕	100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	>
		250	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000	7000	7000

静载力学强度——钻进过程中消耗于岩石破碎的能量决定于岩石机械强度。强度愈大，能量消耗愈多。

单轴抗压强度（ $\sigma_{c\pi}$ ）在液压机上试验，按下式计算：

$$\sigma_{c\pi} = \frac{P_{c\pi}}{S}, \text{ 帕} \quad (1.2)$$

式中 $P_{c\pi}$ ——破碎力，牛顿（牛）；

S ——岩样断面积，米²。

某些岩石的单轴抗压强度（极限抗压强度）如下（单位为兆帕）：

极坚硬及韧性的石英岩	294~490
极坚硬及致密的玄武岩和细粒花岗岩	235
坚硬的花岗岩，辉绿岩，闪长岩	215
玄武岩，斑岩，角闪岩，花岗岩	198

片麻岩, 正长岩, 玢岩	177
砂岩, 石灰岩, 坚硬菱铁矿, 片岩	118~137
大理岩, 白云岩, 石灰岩, 菱铁矿	98
石灰岩, 砂岩	78.5
石膏	49
砂质页岩	39
岩盐	20~40
煤	20

为了对岩石的坚固性和抗破碎强度评估和对比, 采用普氏 (M.M. 普罗托季亚科诺夫) 坚固性系数:

$$F = \frac{\sigma_{сж}}{100} \quad (1.3)$$

式中 $\sigma_{сж}$ —抗压强度;

100— $f = 1$ 时的岩石单轴抗压强度。

6. 动载机械强度—它对岩石破碎机理以及对确定不同钻进方法和钻头合理应用范围有很大影响。各种岩石按动载强度的分类见附表 1。

7. 动载强度的测定方法的基础是捣碎法 (用重锤投掷方法使岩石在捣碎筒●中粉碎)。动强度系数按下式计算:

$$F_n = 20 \frac{n_c}{l_n}, \text{ 毫米} \quad (1.4)$$

式中 n_c ——重锤投掷次数;

l_n ——在测容积器中测得被捣碎 (被粉碎) 的岩粉柱高度。

研磨性——研磨性是指岩石磨损与其接触的岩石破碎工具的能力, 它决定了钻头的消耗和合理选用以及切削刃面特点。

已有许多定量评价岩石研磨性的方法, 然而, 能用于实际计算的通用的和公认的方法还没有。多数方法基于测量与岩石对偶磨损过程中金属的体积或质量。

Л. И. 巴隆和 А. В. 库兹涅佐夫提出了最为简单的研磨性测定方法。其实质是直径 8 毫米及长度 70 毫米的钢杆端头, 以转速 400 转/分和压力 150 牛旋转磨损 10 分钟。研磨性指标 A 用下式计算:

$$A = \sum_{i=1}^{i=n} q_i / 2n \quad (1.5)$$

式中 q_i ——钢杆两端磨损重量损失, 毫克;

n ——试验次数, 按系数 K_v 选择:

K_v	2	0.98	0.69	0.57	0.49	0.43
n	1	2	4	6	8	10

$$K_v = \frac{K_n}{V}$$

式中 $K_n = 0.15 \sim 0.25$ ——指标测定精度允许误差;

●原文误为测容积器。本书在翻译过程中, 发现的类似符号、数据等错误数十处, 都已改正, 以下不再逐一注明。

V ——变异系数，由岩石结构决定：对粗粒岩石（颗粒尺寸5毫米） $V=30\%$ ；对中粒（2—5毫米） $V=22\%$ ；对细粒（0.2~2毫米） $V=19\%$ ；对含包裹体的微粒（0.2毫米） $V=34\%$ 。

按此方法划分的岩石研磨性分为八级（附表11）。

苏联中央地质勘探研究所（ЦНИГРИ）研究的研磨性测定方法〔22〕是基于测定0.5毫米和0.5毫米以细的岩粉磨损铅丸的质量损失。

研磨性系数为：

$$K_{\text{а6p}} = \frac{Q}{100} \quad (1.6)$$

式中 Q ——被磨损材料（铅丸）的质量损失，毫克。

岩石研磨性列于附表Ⅱ中。

岩石尚有一系列其它的岩石物理力学性质，它们是：密度、孔隙度、弹性、塑性、裂隙性和稳定性。上述性质在岩心钻中进行计算和合理组织钻进工艺过程时均应有所了解。

密度和比重——这种性质决定着钻进过程中岩屑排送条件。比重的概念会在多处用到，例如，确定孔底及孔壁上所承受的冲洗液柱静水压力等。

岩石的密度按下式计算：

$$\rho_{\text{п}} = \frac{m}{V}, \text{ 公斤/米}^3 \quad (1.7)$$

式中 m ——岩样质量，公斤；

V ——岩样总体积，米³。

岩石的比重为：

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{G}{V}, \text{ 牛/米}^3 \quad (1.8)$$

式中 G ——岩石的重力，牛。

孔隙度—岩样（如岩心）的孔隙度用下式表示：

$$K_{\text{п}} = \frac{V_1}{V_2} 100\% \quad (1.9)$$

式中 V_1 ——岩石中空洞容积，厘米³；

V_2 ——岩石的总容积，厘米³。

$$V_1 = \frac{(m_2 - m_1)}{\rho_{\text{в}}}, \text{ 厘米}^3 \quad (1.10)$$

式中 m_2 ——淡水完全饱和时的岩样质量；

m_1 ——纯的和干的岩样质量；

$\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ 公斤/米}^3$ ——水的密度。

弹性和塑性——表征岩石的这种性质的主要指标是纵向弹性模数（杨氏模数） E ，泊松比 μ 和塑性系数 k 。岩石的弹性和塑性对岩石破碎过程影响很大。弹性模数愈大，岩石在钻进过程中的抗破碎强度愈大；高塑性岩石比脆性岩石难于钻进。

从实际应用出发，弹性模数 E 和塑性系数 k 可近似的利用刚性压模压入岩石时的变形图加以确定（史氏法）。纵向弹性模数按下式计算：

$$E = \frac{P(1 - \mu^2)}{d \Delta \epsilon}, \text{ 帕} \quad (1.11)$$

式中 P ——实验所得弹性变形曲线上某点所对应的载荷，牛；

μ ——泊松比；

d_m ——压模接触面的直径，米；

ε ——与该载荷对应的岩石的弹性变形，米。

塑性系数 k 可取为压模压入时岩石破碎总功与弹性变形功之比。某些岩石的 k 值如下：

粘土	0.5~0.9 (应是1~∞；译者注)
硬石膏	2.9~4.3
砂岩和粉砂岩	1.3~4.3
石灰岩	1.5~7.0
白云岩	1.5~6.0
燧石	1.0~2.0

纵向弹性模数 E (10^{-10} 帕) 如下：

粘土	0.03
泥页岩	1.5~2.5
砂岩	3.3~7.8
石灰岩	1.3~8.5
大理岩	3.9~9.2
白云岩	2.1~16.6
花岗岩	<6.0
玄武岩	<9.7
石英岩	7.5~10.0

泊松比由横向相对变形 ε_1 与纵向相对变形 ε 之比确定：

$$\mu = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \quad (1.12)$$

岩石的泊松比变化于0.10~0.45间：

泥页岩	0.1~0.2
致密粘土	0.25~0.35
花岗岩	0.26~0.29
石灰岩	0.28~0.33
砂岩	0.03~0.35
岩盐	0.44

用公式(1.11)确定 E 和确定不同岩石的侧压系数时要用到 μ 值。

裂隙性——钻孔地质剖面中存在强裂隙和破碎岩石会导致钻进效率、采心率和金刚石钻头寿命的降低，金刚石消耗量急增，切削具折断，造成漏失和孔壁坍塌等复杂情况。可用裂隙性指数 T 评价岩石被裂隙造成的破坏程度，所用公式如下：

$$T = \frac{\cos \alpha}{l_k} \quad (1.13)$$

式中 α ——裂隙倾角；

l_k ——岩心柱状体平均长度 (岩心柱状体总长度与块数之比)。

按ЦНИГРИ法[22]评价岩心的裂隙性，可将全部岩石分为四级：弱裂隙的 (裂隙性承

• 公式用于 $\alpha < 90^\circ$

数 $k_T \leq 0.45$); 中等裂隙的 ($k_T = 0.45 \sim 0.90$); 强裂隙的 ($k_T = 0.90 \sim 1.80$); 破碎的 ($k_T > 1.8$)。

第一级岩石的裂隙系数按下式计算:

$$k_T^1 = \frac{1}{B^{1.4} l_k^{0.5}} \quad (1.14)$$

式中 B ——岩心柱状体相对采心率 (回次岩心柱状体总长度与回次进尺之比)。

公式 (1.14) 适用于 $l_k > 0.2$ 米和采心率大于 70% 的情况。以下各级岩石的 k_T 按下式推算:

$$k_T^n = k_T^1 q^{n-1} \quad (1.15)$$

式中 $q = 2$ ——几何级数公比;

n ——岩石等级序号。

稳定性——就是岩石被钻穿后出露而能保持不破碎状态的性质, 孔壁状态及采心率就与稳定性有关。

岩石稳定性见附表 IV。

松散性——它取决于岩石的物理力学性质及破碎方法, 由松散系数 k_s 表示, 某些岩石的松散系数如下:

纯砂及砾石	1.05~1.2
亚粘土及亚砂土	1.2~1.25
纯粘土及夹砾石粘土	1.3~1.4
含砾石土	1.4~1.45
泥页岩	1.4~1.6
坚固岩石	1.8~2.5

这种性质在解算钻进过程的各种技术工艺问题时起重要作用, 其中包括选择岩屑由孔内的排出方法, 确定岩粉管容量等。

油气钻井中, 在一定地质条件下钻头工作指标显然取决于岩石特性, 除了硬度和研磨性外, 还有表征岩石结构特性的完整性。

§2. 岩石的可钻性

假若缺乏构成矿床的岩石的力学性质及研磨性质的详细资料, 那么, 为了表征钻进的难易程度可采用钻进效果的综合指标——可钻性。该指标广泛应用于岩心钻中计划定额工作和其它实用计算中。

所谓可钻性就是钻进过程中岩石抗破碎的能力。目前岩心钻中广泛采用的可钻性分级见附表 V。该分级中未考虑岩石的力学性质, 因而, 这种分级不能提供钻进时计算岩石破碎的依据, 不能科学论证钻进规程的最优参数。

为了根据岩石物理力学性质鉴定岩石等级和可钻性, 在勘探队条件下可采用 ЦНИГРИ 法。按照此法, 对软岩 (1~3 级) 使用压模压入 10 毫米深, 对其余的岩石 (4~12 级) 采

• 见“地质剖面岩石综合分级方法, 按分层性质划分岩石及油气由高效牙轮钻头合理类型和结构的选择, М. МИННЕФТЕПРОМ, ВНИИСТ, 1980

用综合指标 ρ_m ，该指标考虑了岩石的动强度 F_d 和研磨性 $K_{a\phi p}$ 的影响。

按可钻性划分，不同岩石的 ρ_m 值如下：

3 级	2.00~3.00
4 级	3.00~4.50
5 级	4.50~6.75
6 级	6.75~10.10
7 级	10.10~15.20
8 级	15.20~22.80
9 级	22.80~34.15
10 级	34.15~51.20
11 级	51.20~76.85
12 级	76.85~115.00及更大

综合指标 ρ_m 按下式计算：

$$\text{对回转钻} \quad \rho_m = 3 F_d^{0.8} K_{a\phi p}$$

$$\text{对冲击回转钻} \quad \rho_m = 2 F_d K_{a\phi p}^{0.41}$$

缺少有关岩石物理力学性质特征数据就不能进行钻进过程工程计算。全苏勘探技术研究所（ВИТР）研究的根据钻进当中与钻头加深同步产生的电性和弹性信号特征测定岩石的方法正处于鉴定阶段。该法的实用将开辟根据钻进剖面地质结构构造借助钻进规程参数变化程序钻进的前景。Ю.Ф.阿列克赛也夫，А.Н.巴茹京，В.П.皮捷尔斯基证明了按照物探研究方法数据（电、声、放射性等）以给定精度预报岩石力学性质的可能性。这些方法允许钻孔剖面按岩石密度划分岩石，评估其孔隙率和弹性。利用物探数据计算岩石力学性质的顺序过程参见第七章 §4。

§3. 岩石的破碎方法

机械破碎法包括回转、冲击、冲击回转和振动法。

回转法破碎岩石是依靠施加有恒定轴向压力的钻头的回转作用进行的。根据所用钻头类型（全面钻头、取心钻头），或者破碎全部孔底（全面钻进），或者仅破碎近孔壁部分（取心钻进）。岩石破碎方式可以是表面破碎、疲劳破碎或体积破碎。

岩石产生有效体积破碎条件是：

$$\frac{P_s}{S_k} \geq p_m \quad (1.16)$$

式中 P_s ——孔底轴向压力，牛；

S_k ——钻头切削刃与岩石的总接触面积，米²；

p_m ——岩石硬度，帕。

冲击破碎岩石方法是用钻头将一定冲击力和冲击速度的冲击作用加于岩石（主要属松软岩石）。

冲击回转法是同时给钻头上作用于扭矩、静压和一定频率和幅度的脉动冲击力。

振动破碎岩石方法（松软岩石），是由在专用的孔底钻具上施加以纵向强迫振动和轴向压力的作用下实现破碎岩石。

岩心钻探方法可按下述两个特点分类：

- 1) 岩石破碎作用（回转、冲击、冲击回转、振动）；
- 2) 由钻孔排除岩屑方法（用冲洗液及不用冲洗液）。

岩心钻主要采用回转钻进法（取心法），其中有：硬合金钻进、金刚石钻进和钻粒钻进。还采用无岩心回转钻进、冲击回转钻进和螺旋钻进。

正确确定某种钻进方法合理应用范围的依据是反映钻探效果的数量、质量和经济指标（机械钻速、回次进尺、台月效率和每米进尺成本）。

§4. 岩石力学性质的各向异性

研究钻孔自然弯曲原因和规律中拥有有关岩石力学各向异性程度的资料是十分重要的，视孔轴相对对称平面轴的位置不同，它会影响机械钻速值的大小。

岩石力学各向异性测定方法很多。A. 鲁宾斯基引入的“钻进各向异性指数”由下式决定：

$$1 - a = \frac{C_1}{C_2} \quad (1.17)$$

式中 a ——岩石各向异性指标（ $a = 0$ 相应于各向同性岩石）；

C_1 和 C_2 ——相应于平行和垂直岩石层理面的可钻性。

具体岩石各向异性指标是由钻孔钻进指标经分析后经验地提出的。

另一个方法的实质是确定平行和垂直层面方向的弹性模数或者抗压强度间的相对差值。由于当压模在相同方向重复侵入时获得的指标分散，在许多情况下，该方法导致各向异性评价的误差。

岩石各向异性可根据两个正交方向（岩心上两个正交直径或高度及直径）的超声传播速度的等比所得声学数据加以评估。测量波在岩石中传播时，若岩石属各向异性，则波在上述方向以不同速度传播。波速不仅取决于岩石弹性和密度，还取决于其结构和构造特性。然后计算每个试验岩样的各向异性系数：

$$K_A = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.18)$$

式中 v_1 和 v_2 ——相应于顺、横岩样的超声通过速度。

顺岩样取 3~4 个测值的算术平均值。根据岩心结构构造特点在正交方向取数点（3—5 个）测定。计算时取最能全面反映岩石各向异性的 v_2 之最小值。声速 v_1 和 v_2 可借助 YKB—1 M 便携式超声仪测定。

问题 1.1 圆柱状岩心直径为 4.1×10^{-2} 米，长度 $l = 12 \times 10^{-2}$ 米，是由孔中取出的无水干样，其质量 $m_1 = 0.32$ 公斤。岩样饱和淡水后的质量 $m_2 = 0.34$ 公斤。试确定岩心的孔隙度和岩石固相密度。

解： 岩心中的空洞按公式 (1.10) 计算：

$$V_1 = \frac{0.34 - 0.32}{1000} = 2 \times 10^{-5} \text{ 米}^3$$

$$\begin{aligned} \text{岩心总体积 } V_2 &= \pi R^2 l = 3.14 \times (2.05 \times 10^{-2})^2 \times 12 \times 10^{-3} \\ &= 158.4 \times 10^{-6} \text{ 米}^3 \text{ (R——岩心半径)。} \end{aligned}$$

将所得值代入公式(1.9)可得:

$$K_{\Pi}(\%) = \frac{2 \times 10^{-5}}{158.4 \times 10^{-6}} \times 100\% = 12.6\%$$

岩石固相密度由下式决定:

$$\begin{aligned} \rho_{\Pi} &= \frac{m}{\left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) V_2} \\ &= \frac{0.32}{(1 - 0.126) \times 158.4 \times 10^{-6}} = 2300 \text{ 公斤/米}^3 \end{aligned}$$

第二章 无冲洗浅孔钻进

无冲洗钻进（干钻）时，岩屑借助钻具或专用工具以机械方式自孔底排除。这种方法主要应用于各种用途的浅孔钻进：地质测量、地震勘探、砂矿勘探、工程地质水文地质勘察等。孔深400米的供水孔（水井）可用钢绳冲击钻机钻进和施工。

§1. 螺旋和振动钻探方法

浅孔钻进可采用不同方法*：冲击、螺旋回转、振动、压入法等。实用计算最有意义的是螺旋钻和振动钻。

螺旋钻进用于钻进软及中硬岩石，孔深50~80米。最常用的螺旋钻进设备的技术性能见表Ⅳ。

保证岩粉向上输送的螺旋钻杆最低转数 n_{min} ，由Л.Н.巴什卡托夫公式计算：

$$n_{min} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g(\sin\alpha + f_m \cos\alpha)}{Rf_c K_1 K_2 (\cos\alpha - f_m \sin\alpha)}}, \text{ 转/分} \quad (2.1)$$

式中 g ——重力加速度，米/秒²；

α ——螺旋钻杆螺旋带外圆处起升角；

$f_m = 0.2$ ——岩石与螺旋带面间的摩擦系数；

R ——螺旋钻杆的半径，米；

$f_c = 0.5 \sim 0.6$ ——岩石与孔壁间的摩擦系数；

$K_1 = 0.9 \sim 0.8$ ——螺旋钻杆的充满系数；

$K_2 = 0.9$ ——考虑对运动岩屑的摩擦力的系数。

在输送过程中，降落在螺旋螺面上的岩屑应该在离心力作用下移向螺旋钻杆的边缘部分。否则，螺旋钻杆的排粉效率就将降低。满足这个条件所必须的转数按下式计算：

$$n_{min} \geq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{gf_m \cos\alpha_r}{r}}, \text{ 转/分} \quad (2.2)$$

式中 α_r ——半径为 r 的螺旋带内圆处的起升角。

$$\alpha_r = \frac{\alpha r \operatorname{ctg} S_m}{2\pi r}$$

式中 S_m ——螺距。

螺旋钻实际工作中，为了能自孔底有效排粉，避免在钻头上形成泥包，必须遵守下述条件：

$$Q_m \geq Q_0$$

式中 Q_m ——螺旋钻设备生产率；

Q_0 ——钻头的生产率。

* 坚硬岩石中钻进浅孔也使用有冲洗岩心回转钻进，见第四章

实际计算时,将 Q_m 和 Q_6 的计算值代入不等式后,它相对于最大钻进速度 u_0 有下列形式,

$$\frac{\pi(R^3 - r^3)\psi_3 u_z}{R^2 j k_p} \geq u_0 \quad (2.3)$$

式中 R 及 r ——螺旋带的内径和外径;

$\psi_3 = 0.2 \sim 0.5$ ——螺旋钻杆自由截面的充满系数;

u_z ——岩屑运动速度的垂直分量,米/分;

$j = 1.1 \sim 1.2$ ——考虑扩孔使岩粉增多的系数;

k_p = 岩石松散系数。

螺旋钻进时,岩层的地质岩石界线可由相关系数校正,该系数考虑了岩屑排至地表的时间延迟,由下式决定:

$$Z = Z_\phi k, \text{ 米} \quad (2.4)$$

式中 Z ——岩样真实赋存深度,米;

Z_ϕ ——由回转螺旋钻杆取下岩样时刻的孔深(岩样“虚假”赋存深度);

表 1

岩 土	螺旋 钻 杆 直 径, 毫 米	
	135	180
粘土	0.82	0.87
亚粘土	0.86	0.91
黄土亚粘土	0.95	0.87
中粒和细粒砂, 亚砂土	0.76	0.77
砂质砾石层	—	0.85

注: 1—转数 $n = 70$ 转分,应减少大约0.03; $n = 190$ 转分时相应增加0.02。

2— k 值适用于孔深20米以内,再深时应减少0.02。

k ——相关系数。

对螺旋钻实际最常遇到的各种岩石,其相关系数平均值列入表1中。

振动钻进用以在软岩石和松散岩石中钻进浅孔,也用于起下套管和处理孔内事故(卡钻等)。振动法钻孔采用机械式振动器(振动机或冲击振动机)*。其作用原理基于偏心块回转时离心力产生的定向激振作用。

振动钻有两种不同的类型:采用离心式振动器的纯振动钻进和采用振动锤(主要是无弹簧式)的冲击振动钻进。

决定振动钻进效果的工艺参数为:偏心矩,振动频率和振幅。实用计算中双偏心轮回转时的最大离心力(振动力)由下式确定:

$$F_{max} = (Q_{0e}) n^2 10^{-3}, \text{ 牛} \quad (2.5)$$

式中 Q_{0e} ——偏心轮静力矩,牛米;

*钻进、起下套管和处理事故用的振动机的技术性能列于附表甲中。

n ——偏心轮转数，转/分。

振动器的沉入能力在相应的频率范围内可由振幅评价，振幅可由下述简化公式计算。

$$A = \frac{(Q_0 \varepsilon) a_\infty}{\Sigma Q}, \text{ 米} \quad (2.6)$$

式中 a_∞ ——考虑参与振动的土壤质量的影响系数，对亚粘土和粘土 $a_\infty = 0.7 \sim 0.85$ ，对亚砂土 $a_\infty = 0.85$ ，对细粒砂 $a_\infty = 0.9 \sim 0.95$ ；

$\Sigma Q = Q_1 + Q_2$ ——振动部分的重量，包括振动器 (Q_1) 和钻具 (Q_2)，牛。

振动速度为： $v_{max} = Aw$ ，米/秒 (2.7)

振动器功率 $N_g = \frac{\Sigma Q}{g} n_1 v_{max}^2$ ，牛米/秒 (瓦) (2.8)

式中 $w = \frac{\pi n}{30}$ ——角速度或角频率，秒⁻¹；

n_1 ——取决于土壤性质的振动阻尼系数，秒⁻¹。对粘性土 $n_1 = 20 \sim 30$ ，对弱粘性土 $n_1 < 20$ 。

得到的 N_g 值应当增加 25~30%，以补偿振动器摩擦损失及电动机附加的电力损失。

无弹簧式振动锤的工作效果由冲击部分的回弹值的数据评价。这些数据可以在振动钻进时卸去某些振动质量和求出回弹值的平均值来获得。

偏心轮转数： $n = n_i i$ (2.9)

式中 n_i ——振动锤冲击次数，秒⁻¹；

i ——偏心轮转数与平均冲击次数之比。

不同孔深时 i 的平均值如下：

孔深，米	0~4	4~8	8~15	15~30
i	1	2	3	4

偏心矩： $Q_0 \varepsilon = \frac{P v_i^2}{2 g K_A}$ ，牛米 (2.10)

式中 $P = 2 P_{n_i}$ ——振动锤冲击部分的重力，牛；

$P_{n_i} = 1.12 m_{n_i} g$ ——钻具换算重力，牛；

m_{n_i} ——钻具质量，包括振动锤和钻杆的质量，公升；

$v_i = \sqrt{2 g A_i}$ ——冲击部分运动速度，米/秒

A_i ——砧子至冲击部分的最大距离 (回弹值)，米；

K_A ——振幅系数。

对于不同 i 值的振幅系数 K_A 见下：

i	1	2	3	4	5	6	7
K_A	1.6~2.9	1.8~4.3	1.9~8.8	4.0~13.6	6.4~19.4	9.8~27.0	15.6~30.0