

岩心钻探实用计算

〔苏〕普·阿·甘朱缅 著

高 森 译

地 质 出 版 社

岩心钻探实用计算

〔苏〕普·阿·甘朱缅 著

高 森 译

杨惠民 校

地质出版社

Р. А. ГАНДЖУМЯН
ПРАКТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ В
РАЗВЕДОЧНОМ БУРЕНИИ

МОСКВА «НЕДРА» 1978

岩心钻探实用计算
〔苏〕普·阿·甘朱缅 著
高 森 译 杨惠民 校

•

地质部书刊编辑室编辑
地质出版社出版
(北京西四)

地质印刷厂印刷
(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

•

开本: $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $9^{1/2}$ · 字数 245,000
1980年11月北京第一版·1980年11月北京第一次印刷
印数 1—5,100册·定价 1.30元

统一书号: 15038·新556

前 言

当前在有用矿产普查和勘探中广泛采用钻探工程的情况下，采用本领域中最新成就进行实际工程计算，这个问题的迫切性是十分明显的。

但是，至今从事固体矿产岩心钻探的工程技术人员（还有学习“岩心钻探工艺和技术”课程的大学生）尚没有用以对岩心钻探各种课题进行实用计算的专用书籍或手册。

在编写本书时，作者力求采用最先进的计算方法，并阐明其实际的应用，使读者集中注意到岩心钻探工艺和技术的最重要问题。问题涉及范围包括了与各种技术的、工艺的和经济命题解答有关的实际建议。重点是岩心钻探工艺和技术问题。

书后附录中列有计算最必需的参考资料表。

由于钻探实际中，使用多种测值计量单位制，还有大量非标准单位，造成工作上的不便和困难。因此，本书编写中主要采用国际单位制（SI）。为便于新老单位换算，附录中列出主要折合值。

现用公式（同类数值采用多种单位）转用国际单位制后带来一些变化。一些公式简化了，消除了一些换算系数。

作者将十分感谢对本书提出批评和改进意见的诸位读者。

目 录

第一章 钻孔时岩石破碎	1
§ 1. 岩石的物理机械性质	1
§ 2. 岩石的可钻性	7
§ 3. 岩石破碎方法	8
题解示例	9
第二章 无冲洗浅井钻进	12
§ 1. 浅孔钻探方法	12
§ 2. 钢绳冲击钻进	16
题解示例	18
第三章 钻孔冲洗及气体介质洗井	24
§ 1. 冲洗介质种类和参数的选择	24
§ 2. 有关冲洗介质的制造, 化学处理和加重的 计算	27
§ 3. 岩屑携上及水力计算	34
§ 4. 气体介质洗井	39
题解示例	43
第四章 岩心钻探工艺	58
§ 1. 钻进方法的选择	58
§ 2. 岩石破碎工具的选择	60
§ 3. 钻孔结构的选择	61
§ 4. 钻进规程设计	67
§ 5. 钻进规程参数的检测	78
§ 6. 岩心和岩屑的采集	80
§ 7. 地质勘探小口径涡轮钻进	82
题解示例	86

第五章 钻杆柱的工况	103
§ 1. 钻杆柱和钻铤的类型尺寸选择	103
§ 2. 钻杆柱强度校核计算	105
§ 3. 钻杆使用的有关计算	115
题解示例	117
第六章 钻进过程中的事故和复杂情况	127
§ 1. 钻进中复杂情况的预防	127
§ 2. 事故的预防和处理	134
题解示例	136
第七章 钻孔弯曲、定向钻进和多孔身钻进	143
§ 1. 钻孔轴线设计方向的选择	143
§ 2. 钻孔自然弯曲的预防	144
§ 3. 钻孔的人工弯曲	148
题解示例	155
第八章 岩心钻探设备	162
§ 1. 给定工作条件下钻探设备的选择	162
§ 2. 钻探设备数目和大修次数的确定	164
§ 3. 岩心钻探用动力机功率的确定	165
§ 4. 钻塔（桅杆）的选择及其在工作时的受力 计算	166
§ 5. 滑车装置和钢绳的选择	171
§ 6. 繁重劳动工序的机械化	173
题解示例	175
第九章 钻孔加固	186
§ 1. 套管作用载荷	186
§ 2. 水泥固井	189
题解示例	192
第十章 水文地质钻探	196
§ 1. 钻进方法和钻探设备类型的选择	196
§ 2. 水文地质钻孔结构的选择	197

§ 3. 滤水管类型的选择及其主要尺寸计算	198
§ 4. 含水层试验	199
§ 5. 抽水设备的选择和计算	201
题解示例	205
第十一章 推广新技术和先进工艺的经济效果计算	212
§ 1. 一般原则	212
§ 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	214
§ 3. 推广一基多孔身定向孔经济效果的评价	216
§ 4. 推广气体介质洗井的经济效果的评价	217
§ 5. 钻头合理使用范围的评价	217
§ 6. 推广升降工序机械化装置经济效果的评价	219
§ 7. 金刚石钻进推广孔底防振器和防振剂经济 效果的评价	220
题解示例	221
第十二章 钻探中统计和实验数据的数学处理	228
§ 1. 钻进指标平均值的估计	228
§ 2. 粗大误差的估计	231
§ 3. 偶然值的分布规律和参数精度评估的确定	231
§ 4. 钻头和其它钻具必要试验次数的确定	233
题解示例	234
附 录	244
附表 1. 国际单位制单位 SI (ГОСТ 9867-61)	244
附表 2. 厘米·克·秒, 米·千克 (公斤)·秒制折 合国际单位制 (SI) 换算表	245
附表 3. 常见测量单位的换算值	246
附表 4. 不同岩石的动强度	247
附表 5. 不同岩石的研磨性程度和研磨性系数	247
附表 6. 岩石稳定性分级	248
附表 7. 回转机械钻进时岩石可钻性分级	249

附表 8. 螺旋钻机的技术性能	250
附表 9. 螺旋钻杆的基本参数	251
附表10. 最常见岩石的相关系数 (k) 值	251
附表11. 振动机的技术性能	252
附表12. 标准丝扣套管的性能 (ГОСТ632-64)	253
附表13. 系数 K_A 值	255
附表14. 不同等级岩石的 α_0 和 v_0 值	256
附表15. 钢绳冲击钻机技术性能	256
附表16. 冲洗液返流速度的合理范围	256
附表17. 不同温度时动力粘度系数 μ_{*} 值 (100 厘 米 ³ 水中用盐 25.7克), 单位厘泊 (10^{-3} 帕·秒)	257
附表18. 不同流变性泥浆的 η 和 τ_0 值	257
附表19. 形状系数和成球系数的平均值	257
附表20. 球形固体颗粒的正面阻力系数与雷诺数 的关系	258
附表21. 系数 K_1 值	259
附表22. 钻头体基本规格	260
附表23. 岩心钻探常用压风机的技术性能	260
附表24. 合金钻头基本规格	261
附表25. 金刚石钻头基本规格和参数	263
附表26. 钻粒钻头基本规格	264
附表27. 牙轮钻头基本规格和参数	265
附表28. 单层岩心管和接头的基本规格	266
附表29. 钻粒钻进用岩心管	266
附表30. 岩粉管	266
附表31. 含金刚石层和钻头底唇面的工作面积	267
附表32. 液动冲击器技术性能	267
附表33. 岩心钻探用风动冲击器的技术性能	267
附表34. 粗径钻具中与钻头端面产生的压降有关	

的卸载力 (千牛)	268
附表35. 金刚石钻进时的卸载力 (千牛) (钻头 直径 59 毫米, 钻杆直径 42 毫米, 清水 洗井)	268
附表36. 锁接箍连接钻杆及锁接箍的基本规格	269
附表37. 接头连接钻杆及接头的基本规格	269
附表38. 钻杆材料的机械性能	270
附表39. 一些岩石的屈服极限	270
附表40. 岩心钻机的技术性能	271
附表41. 回转钻进孔深 150~500 米的自行式钻 机技术性能	273
附表42. 活塞式钻井泵的技术性能	275
附表43. 按机动时间计的设备利用率	275
附表44. 修理循环周期和报废前大修次数	276
附表45. 各用电单位的需用系数 K_c 和功率因数 $\cos \varphi$ 值	276
附表46. 岩心钻探用金属钻塔的技术性能	277
附表47. 钻探用桅杆的技术性能	277
附表48. 钢丝绳的技术性能	278
附表49. 升降工序中拧卸钻杆的手动和机动时间	279
附表50. 固体矿产钻探用套管的基本规格 (ГОСТ8238-52)	279
附表51. 套管丝扣规格	280
附表52. 推荐过滤管的型式	281
附表53. 过滤管通孔规格	281
附表54. 双作用拉杆泵的技术性能	282
附表55. 同心式空气升液泵单位风量的校正系数	282
附表56. 巴申斯基系数	283
附表57. 司都顿分布准则 t_0 值表	283
附表58. 公式 (1.14) 的 $B^{1.4}$ 值	284

附表59. 公式 (1.14) 的 $L_{\pi}^{0.3}$ 值	284
附表60. 公式 (4.13), (4.22), (4.19), (4.12), (4.8) 和 (4.7) 中相应的 $\rho_{\pi}^{0.18}, \rho_{\pi}^{0.34}, \rho_{\pi}^{0.45}, \rho_{\pi}^{0.68},$ $\rho_{\pi}^{0.79}, \rho_{\pi}^{1.18}$ 值	284
附表61. 公式 (5.22) 和 (5.26a) 中的 $L^{0.68}$ 和 $L^{0.9}$ 值	285
附表62. 公式 (5.23) 的 $100 I_{\theta \text{cp}}^{1.43}$ 值	285
附表63. 公式 (5.24), (5.25), (5.26a) 和 (5.26 б) 相应的 $n^{0.25}, n^{1.5},$ $n^{1.6}$ 值	286
附表64. $F_{\pi}^{0.8}$ 值	286
附表65. $K_{\alpha \sigma p}^{0.41}$ 值	286
文献目录	287

第一章 钻孔时岩石破碎

钻进过程就是连续不断地用岩石破碎工具破碎岩石，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机械性质（硬度、强度、研磨性等），才能达到有效地破碎岩石。

§ 1. 岩石的物理机械性质

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机械性质，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，它影响着钻头吃入岩石的深度。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^[98]，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型专用仪器或液压压力机确定，以破碎力（ P ）与压模面积（ S ）之比表示。

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

史氏推荐的岩石硬度分级为12级，各级岩石与勘探钻进所

① 书中采用国际统一单位，参见附表1、2、3。

用 12 级可钻性分级相对应。硬度分级如下。

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

还有用 M. И. 考夫曼仪器采用磨损法测定硬度的方法^[76]。该法的实质是在被覆有标准金刚砂砂布的回转圆盘上磨损规格为 $10 \times 10 \times 30$ 毫米的岩样，以磨损前和磨损后岩样质量差确定之。

硬度 (H_{ncr}) 按下式确定：

$$H_{ncr} = 100 \frac{S_n \rho_n}{(m_1 - m_2)}, \text{ 米}^{-1} \quad (1.2)$$

式中 S_n ——磨损面积，米²；

ρ_n ——岩样密度，公斤/米³；

m_1 和 m_2 ——试验前和试验后的岩样质量，公斤。

静载机械强度。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。

单向抗压强度 (σ_{cm}) 在液压机上试验，按下式计算：

$$\sigma_{cm} = \frac{P_{cm}}{S}, \text{ 帕} \quad (1.3)$$

式中 P_{cm} ——破碎力，牛顿 (牛)；

S ——岩样断面积，米²。

某些岩石的单向抗压强度 (抗压强度极限) 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及细粒花岗岩	235
坚硬的花岗岩，辉绿岩，闪长岩	216
玄武岩，斑岩，角闪岩，花岗岩	196
片麻岩，正长岩，玢岩	177
砂岩，石灰岩，坚硬菱镁矿，页岩	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

抗剪强度采用戈隆诺维奇仪器以单向剪切方式测定，计算公式类似 (1.3)。

动载机械强度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。

动载强度的确定方法（冲击弯曲试验，捣碎法，击碎性测定法，冲击韧性测定法）在专门著作中^[46]已有详细论述。岩石动载强度分类列于附表 4^[48]。

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，它决定了钻头及切削具的消耗和合理选用。

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。可以采纳的方法要算按钻孔结果确定研磨性，即“钻头法”^[76]。此法的岩石研磨性计算公式如下：

$$A = \frac{(m_1 - m_2)}{h}, \text{ 公斤/米} \quad (1.5)$$

式中 m_1 及 m_2 —— $\phi 46$ 毫米自磨式钻头在恒定钻进规程（转速 200 转/分；钻压 4.9 千牛，冲洗液量 10 升/分）对该种岩石在钻进前和钻进后的质量，公斤；

h ——钻孔进尺，米。

由于多数情况下一个回次会遇到不同岩性的岩石，从而很难采用这种方法进行测定。

ЦНИГРИ 研究院研究的研磨性测定方法是基于测定 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：

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

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 5 中。

岩石尚有一系列其它的岩石物理机械性质，它们是：密度，孔隙度，弹性，塑性，裂隙性和稳定性。

上述性质在岩石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：

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

式中 m ——岩样质量，公斤；

V ——岩样总体积，米³。

岩石的比重公式为：

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

式中 G ——岩石的重力，牛。

孔隙度。岩样（如岩心）的孔隙度计算公式如下：

$$k_{\text{a}} = \frac{V_1}{V_2} 100\% \quad (1.9)$$

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。

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

式中 m_2 ——含淡水达饱和状态时岩样的质量；

m_1 ——无水岩样的质量；

$\rho_s = 1000$ 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^[98]。

从实际应用出发，弹性模数 E 和塑性系数 k 可近似地利用刚性压模压入岩石时的变形图加以确定（史氏法）。

此时，纵向弹性模数可按式计算：

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

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 $1\sim\infty$ ，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	1.6~6.0
燧石	1.0~2.0

纵向弹性模数 E （兆帕）如下

粘土	0.03×10^{10}
泥页岩	$(1.5 \sim 2.5) \times 10^{10}$
砂岩	$(3.3 \sim 7.8) \times 10^{10}$
石灰岩	$(1.3 \sim 8.5) \times 10^{10}$
大理岩	$(3.9 \sim 9.2) \times 10^{10}$
白云岩	$(2.1 \sim 16.5) \times 10^{10}$
花岗岩	$< 6.0 \times 10^{10}$

玄武岩

$<9.7 \times 10^{10}$

石英岩

$(7.5 \sim 10.0) \times 10^{10}$

泊松比由横向相对变形 ϵ_1 与纵向相对变形 ϵ 之比确定:

$$\mu = \frac{\epsilon_1}{\epsilon} \quad (1.12)$$

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^[27], 所用公式如下:

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

式中 α ——裂隙倾角;

l_r ——岩心柱状体平均长度 (岩心柱状体总长与块数之比)。

按 ЦНИГРИ 法^[15]评价岩心的裂隙性, 可将全部岩石分为四级: 弱裂隙的 (裂隙性系数 $k_r \leq 0.45$); 中等裂隙的 ($k_r = 0.45 \sim 0.90$); 强裂隙的 ($k_r = 0.90 \sim 1.80$); 破碎的 ($k_r > 1.80$)。

第一级 (弱裂隙) 的 k_r 按下式计算:

$$k_r^1 = \frac{1}{B^{1.4} l_r^{0.3}} \quad (1.14)$$

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 $l_n > 0.2$ 米和采心率大于 70% 的情况。

以下各级岩石的 k , 按下式推算:

$$k_n^* = k_1^* q^{n-1} \quad (1.15)$$

式中 $q=2$ ——几何级数公比;

n ——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。

岩石稳定性分级见附表 6。

松散性。它取决于岩石的多种物理机械性质及破碎方法, 由松散系数 k_p 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
纯粘土及夹卵石粘土	1.3~1.4
含碎石土	1.4~1.43
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。

§ 2. 岩石的可钻性

假若缺乏构成矿床的岩石的机械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7。该分级中未考虑岩石的机械性质, 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。

为了根据岩石物理机械性质检定岩石等级和可钻性, 在勘探