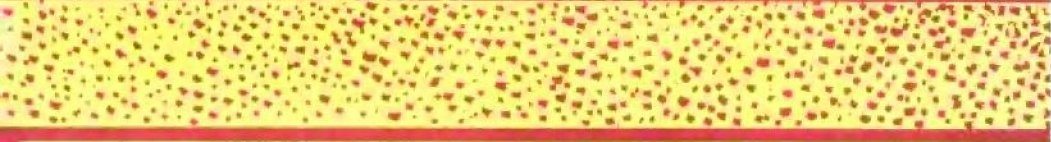


矿山岩体力学

[波] M. 鲍莱茨基 M. 胡戴克 著 于振海 刘天泉 译 刘天泉 校



矿山岩体力学

〔波〕 M. 鲍莱茨基 M. 胡戴克 著

于振海 刘天泉 译 刘天泉 校

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书在全面总结波兰矿山岩体力学方面科研成果的基础上,详细地论述了有关岩石的物理力学及流变性质,矿山巷道及岩体中的应力分布,以及各类巷道、井筒及回采工作面支架压力的计算等基本问题;深入地讨论了矿井开采对地表变形和地下工程发生冲击地压、岩石与瓦斯突出的影响及其预防措施,以及矿井煤柱的留设与开采等。

全面地介绍了研究矿山岩体力学的实验室模拟方法,岩体和岩石的物理力学性质的实验室和现场测试方法及仪表装置。

叙述了确定地面建筑物等保护煤柱的规程,以及立井井筒保护煤柱开采技术理论、方法和对井筒的加固防护措施。

本书可供煤矿、金属矿等矿山及科研、设计部门的工程技术人员阅读,也可供高等矿业院校师生参考。

责任编辑:金连生

MARCIŃ BORECKI MIROSŁAW CHUDEK

MECHANIKA GÓROTWORU Wyd.1

Wydawnictwo "Śląsk" Katowice 1972

矿 山 岩 体 力 学

[波] M.鲍莱茨基 M.胡戴克 著
于振海 刘天泉 译 刘天泉 校

*
煤炭工业出版社 出版

(北京安地门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*
开本850×1168¹/₃₂

印张 14⁵/₈

字数410千字

印数1—3,400

1985年7月第1版

1985年7月第1次印刷

书号15035·2689 定价2.90元

译者的话

矿山岩体力学是一门综合性较强的实用性学科，它在采矿工程中应用非常广泛。该学科是解决采矿工程中有关井巷设计、开采方法、安全生产、资源回收、各类矿柱尺寸确定以及地面建筑物、水体、铁路和立井井筒保护等问题的基础理论。随着采矿工业的发展，矿山岩体力学的研究内容不断深入，研究规模不断扩大，研究方法手段不断更新，研究水平不断提高。煤矿的生产实践表明，矿山岩体力学正在显示其日益重要的作用。

近年来，我国矿山岩体力学的研究工作有了较大的发展，对外交流日益增加，但对波兰矿山岩体力学的发展情况了解很少。为了向我国读者介绍波兰矿山岩体力学方面的研究成果，以便吸取有用的经验，我们翻译了波兰《矿山岩体力学》这本书，供有关人员参考。

本书是波兰矿山岩体力学方面的代表性著作，对我国读者有重要的参考价值。它系统总结了波兰老一辈学者的研究成果。本书在同类著作中具有与众不同的特点，如分析详尽，理论性、实用性都较强。

本书共分十二章，主要论述了以下几方面的问题。

首先详细地论述了矿山岩石的物理力学及流变性质，矿山巷道及岩体中应力分布的基本概念以及各类巷道和井筒支架压力的计算。

其次深入地探讨了回采工作面矿压的理论研究成果；讨论了冲击地压产生的原因及预防措施；分析了深部开采时岩石与瓦斯突出的机理及预防方法；研究了采空区残留煤柱的尺寸、强度及其在上下部岩层中引起的附加应力，并提出了松散含水层覆盖煤层露头安全煤柱的确定方法。

第三简要地叙述了矿井开采引起的岩层和地表变形的理论、计算方法，各种影响因素，以及减少矿井开采对地表变形的措施。

第四全面地介绍了研究矿山岩体力学的实验室模拟方法，岩石和土的物理力学性质的实验室和现场测试方法。

最后介绍了立井井筒保护煤柱的开采技术理论、方法及井筒的加固防护措施。

本书由于出版年代的限制，有关矿山岩体力学方面的最新理论、现场测试方法和手段未能得到充分反映。

目 录

1 基本概念和定义	1
1.1 矿山岩体力学研究对象	1
1.2 岩石的物理和力学性质	2
1.3 岩石的流变性质	17
2 矿山压力	27
2.1 矿山压力——岩石中的原始应力状态	27
2.2 巷道支架的岩石压力计算	29
2.2.1 静压	30
2.2.1.1 别尔巴乌麦尔理论	30
2.2.1.2 普罗托迪雅柯诺夫理论	31
2.2.1.3 秦巴列维奇理论	33
2.2.1.4 萨乌斯托维奇理论	35
2.2.1.5 埃什托理论	36
2.2.2 动压(形变压力)	38
2.2.2.1 凯尔文和马克斯威尔介质作为时间函数的形变压力值	38
2.2.2.2 A.萨乌斯托维奇的支架动荷载理论	45
2.2.3 两个相邻巷道支架的压力计算	47
2.2.4 底板压力计算	49
2.2.5 荷载对巷道支架最佳形状的影响	49
2.2.6 全周受压时椭圆形支架的压力计算	53
2.3 立井井壁的岩石压力计算	56
2.3.1 立井井筒围岩中的应力状态	56
2.3.2 立井井筒的临界深度	57
2.3.3 松散和致密岩体中立井井壁压力计算	58
2.3.3.1 普罗托迪雅柯诺夫方法	58
2.3.3.2 秦巴列维奇方法	60
2.3.3.3 萨乌斯托维奇方法	60
2.3.3.4 伽兰卡方法	63
2.3.4 塑性岩体中立井井壁的水平压力	65

2.3.5	含水岩体中立井井壁的压力计算	66
2.3.6	井壁的非均布压力	68
2.3.7	不需要支护的井筒段长度的确定 (M.胡戴克)	71
2.4	岩土工程条件对深部岩体压力的影响	73
2.5	回采工作面 (长壁工作面) 周围岩体压力的分布	78
2.5.1	压力波理论	82
2.5.1.1	W.布德雷克理论	82
2.5.1.2	弹性地基上的梁弯曲理论在采场中应用范围的扩展	88
2.5.2	长壁工作面中非周期性的增压过程 (M.鲍莱茨基)	97
2.5.3	长壁采煤工作面的矿山压力显现 (A.比林斯基)	102
2.5.4	顶板岩体对长壁工作面支架的作用特征及大小	111
2.5.5	几个煤层同时开采的相互影响	114
3	巷道周围的应力状态	117
3.1	弹性问题	117
3.1.1	圆形断面巷道周围岩体中的应力状态	117
3.1.2	矩形断面巷道周围岩体中的应力状态	121
3.1.3	椭圆形断面巷道周围岩体中的应力状态	123
3.1.4	压力拱理论	127
3.2	弹性-塑性-粘性问题	128
3.3	带裂纹的弹性问题	132
4	矿井开采对岩体变形的影响	137
4.1	概述	137
4.2	长壁工作面周围岩体的变形	140
4.3	断裂带和连续变形带的岩体变形	142
4.4	实现充分垮落的长壁工作面合理走向长度	145
4.5	上行开采时破坏性影响区高度的确定	145
5	冲击地压	148
5.1	冲击地压的类型及起因	148
5.2	流变试验中的冲击地压	159
5.3	冲击地压的预防	161
6	深井瓦斯和岩石突出	164
6.1	岩石和瓦斯突出的形成及过程	164

6.2	突出的防治方法	170
6.3	利用格子档限制突出范围	174
7	矿井开采引起的岩层和地表变形的确定方法	175
7.1	矿井开采对地表影响学科的发展	175
7.2	确定地下开采引起的地表变形方法的发展过程	176
7.3	开采对地表影响的现代波兰理论及其评价	177
7.4	地表变形的主要概念	179
7.5	布德雷克-克诺特理论	181
7.6	李特维尼申理论	191
7.7	萨乌斯托维奇理论	194
7.8	柯瓦尔契克理论	199
7.9	柯赫曼斯基理论	205
7.10	奥哈布理论	209
7.11	阿维尔申理论	211
7.12	采区形状、尺寸和推进方向对地表变形的影响	214
7.13	回采速度对地表变形的影响	221
7.14	疏排含水层引起的地表变形	222
7.15	减少开采对地表影响的可能性	233
7.16	开采引起的管道变形计算(M.胡戴克)	234
8	矿井开采的煤柱问题	236
8.1	煤层残块中的应力大小及其分布	236
8.1.1	影响煤柱压力的因素	245
8.1.2	煤柱强度	246
8.2	支承煤柱宽度的计算	248
8.2.1	普罗托迪雅柯诺夫的支承煤柱宽度算法	249
8.2.2	按允许压应力计算支承煤柱的宽度	251
8.3	残留煤柱下方或上方岩体中的应力状态	252
8.4	在煤层露头上方有含水层时安全煤柱的确定标准	258
8.5	保护煤柱	264
8.5.1	保护煤柱的最小尺寸	264
8.5.2	回采井筒保护煤柱时围岩和井壁变形的确定	266
8.5.3	保护煤柱的开采方法	279
8.5.4	双向和单向开采引起的井筒变形	281

9	研究岩石性质及在岩体中所产生的采动影响现象的 实验室和现场测试仪器及方法	288
9.1	岩体力学研究的基本课题	288
9.2	岩体模拟的基础	289
9.2.1	模拟相似准则	290
9.2.2	相似材料的力学指标	291
9.2.3	相似材料的配比	295
9.2.4	模型制作技术对其质量的影响	296
9.2.5	采掘空间周围矿压显现的模拟方法	297
9.2.5.1	有一个和两个裸露面的岩层模拟试验	297
9.2.5.2	二氧化碳突出时岩体状态及其对支架影响的模拟试验	299
9.2.5.3	巷道围岩状态的模拟试验	300
9.2.5.4	采场周围岩体矿压显现的模拟试验	303
9.2.5.5	立井井壁矿压模拟试验	305
9.2.5.6	岩体变形及其与井壁相互作用的模拟试验	307
9.3	岩体的物理力学性质试验	308
9.3.1	现场条件下岩体性质的初步试验方法	308
9.3.1.1	岩体裸露面的直接试验方法	309
9.3.1.1.1	岩石的宏观试验及其范围	309
9.3.1.1.2	用动力法测试岩体的物理力学性质	315
9.3.1.2	地球物理测井法	323
9.3.1.2.1	钻孔测井法	323
9.3.1.2.2	岩石物理性质试验	332
9.3.2	岩石物理力学性质的实验室测试方法	335
9.3.2.1	实验室试验岩样的采集及制备方法	336
9.3.2.1.1	未受扰动岩样的采集	338
9.3.2.1.2	扰动岩样的采集	340
9.3.2.1.3	实验室试样的保护	342
9.3.2.1.4	试样标签的制作	342
9.3.2.2	岩石物理力学性质试验	343
9.3.2.2.1	松散岩石粒度成分的测定	343
9.3.2.2.2	岩石湿度测定	350
9.3.2.2.3	有机物含量测定	351

9.3.2.2.4	比重测定	352
9.3.2.2.5	容重和孔隙度测定	353
9.3.2.2.6	岩石渗透系数测定	357
9.3.2.2.7	松散岩石密度测定	360
9.3.2.2.8	实验室固结仪的岩石压缩性试验	367
9.3.2.2.9	利用直接剪切仪测试内摩擦角和密实度	376
9.3.2.2.10	利用三轴剪切仪测试内摩擦角和粘结度	380
9.3.2.2.11	抗压强度测定	386
9.3.2.2.12	抗弯强度测定	390
9.3.2.2.13	抗拉强度测定	392
9.3.2.2.14	致密度测定	396
9.3.2.2.15	三轴受力状态的岩石抗压强度试验	397
9.4	矿井采动影响现象的观测与研究	399
9.4.1	卸载测定法	400
9.4.1.1	岩石卸载测定装置——DMI-RAI-WG-2	400
9.4.1.2	岩石压力变化探测器	400
9.4.2	支架阻力试验装置	401
9.4.2.1	支柱阻力测定器——RBS	402
9.4.2.2	采煤工作面液压支柱压力记录仪	402
9.4.2.3	403型矿用支架荷载测定器	402
9.4.2.4	锚杆锚固力测定器	403
9.4.2.5	SACSIR型锚杆拉力计	403
10	缓倾斜和无构造破坏煤层中井筒保护煤柱的 开采设计指南	405
10.1	立井井筒保护煤柱	405
10.1.1	井筒保护煤柱的留设	405
10.1.2	井筒保护煤柱开采期间及开采结束后井筒功能的确定	406
10.2	井筒保护煤柱开采可能性及范围的评价	406
10.2.1	井壁类型、状态和井筒装备及其附近巷道的调查	406
10.2.2	地表建筑及其设施状况的调查和地面结构物相应保护 等级的划分	407
10.2.3	岩体地质结构的调查	408
10.2.4	岩层含水状况及其对井筒和其它采掘空间以及地面结构物	

影响的调查·····	408
10.2.5 井筒周围已采情况分析（柱外或柱内），采空区位置及其影响的 评价·····	409
10.2.6 矿井开采引起的冲击地压、火灾和瓦斯涌出灾害的调查·····	410
10.2.7 回采保护煤柱引起的岩层和井筒变形预计方法的选择·····	411
10.2.7.1 取决于岩层的地质结构和开采方法的系数和参数的确定·····	411
10.2.7.2 矿井开采对井筒、地面井口结构物和井底巷道可能造成的影响分析·····	411
10.3 井筒保护煤柱合理开采方法的选择·····	412
10.3.1 开采煤层的选择及开采范围和顺序的确定·····	412
10.3.2 开采规程的制定·····	412
10.3.3 采煤方法和充填方法的确定·····	412
10.3.4 协调开采原则的确定·····	413
10.3.4.1 煤柱范围内的等量开采原则·····	414
10.3.4.2 下一煤层开采起始时间的确定·····	414
10.3.4.3 两个或两个以上对井筒和岩层及地面井口结构物产生不良影响的矿井开采协调·····	414
10.4 井筒、井筒附近巷道和井筒附近地面结构物的保护·····	415
10.4.1 井筒附近巷道的保护方法·····	415
10.4.2 井口地面结构物的保护方法·····	415
10.5 岩层、井筒、井口附近结构物以及井筒附近巷道变形观测设计的编写·····	415
10.6 开采井筒保护煤柱经济效果的分析·····	416
11 煤柱开采期间的检测工作·····	417
11.1 井筒保护的准备工作·····	417
11.2 井柱开采时，由于岩体下沉引起井筒（位于石炭纪致密岩层中）井壁破坏的防护·····	418
11.2.1 回采井筒保护煤柱时岩体压力对井壁的影响·····	419
11.2.2 岩层移动对井壁产生的垂直作用力·····	421
11.2.3 井壁保护方法·····	422
11.2.4 开采煤层内井筒周围的加固保护·····	431
11.2.5 开采煤层上、下方井壁的可缩性处理·····	431
11.3 井筒机械设备的保护·····	431

11.4	煤柱回采期的检查工作	437
11.4.1	井筒检查	437
11.4.2	地面设施的检查	439
11.4.3	检测周期及检测记录	439
12	补充	440
12.1	隧道或浅部巷道支架的矿山压力计算——M.胡戴克-E.斯维斯特方法	440
12.2	巷道和断层煤柱的开采	442
12.3	铁矿矿山岩体和地表变形的计算——M.胡戴克和Z.斯勒安赞斯基方法	446
附录	上西里西亚和下西里西亚煤田烟煤矿区结构物、设备和地表保护煤柱留设规程	450

1 基本概念和定义

1.1 矿山岩体力学研究对象

有益矿物自远古时起即采于地壳。这种矿物以矿层、矿脉或透镜体等多种多样的形态赋存于地壳中。正如矿物本身一样，其围岩亦具有不同的物理、力学性质以及不同的水文地质结构。采矿的技术和工艺方法要求在地壳内掘进矿山巷道。从地壳表面到开掘矿山井巷深度的地壳岩体的总体称为矿山岩体。

由于采掘破坏了岩体的原始平衡状态，使上覆岩层向采空区产生位移。与此同时，岩体中的原始应力产生变化并作用于采掘空间的支架上。

压力的大小及其作用过程，岩层、地表以及地下结构物的变形特征，井巷范围内的应力集中程度及大小，主要取决于采掘深度。此外，还取决于岩体的物理、力学和流变性质，采用的开采方法，岩体的构造与结构，即岩体中位移的性质和数量（即断层、褶曲、地垒等）。

在极坚硬的岩体之间开采地下矿床，一定的条件下会引起围岩突然移动和采掘空间冒落。这种现象称为冲击地压，它常常是引起重大事故的根源。此外，矿床开采时有时会发生瓦斯和岩石突出，这种突出同样会造成严重的灾害。

矿山岩体变形，即围岩移动和变形常常不是产生于进行采掘的瞬间，而是长时间地逐渐形成的。从这一观点出发，在有关上述现象的科学试验和理论研究中，越来越重视流变学的研究。在岩体内部、地表和地下结构物中，由于人类的采矿活动引起的复杂现象应予以科学的解释和阐述，这也正是矿山岩体力学所要研究的课题。

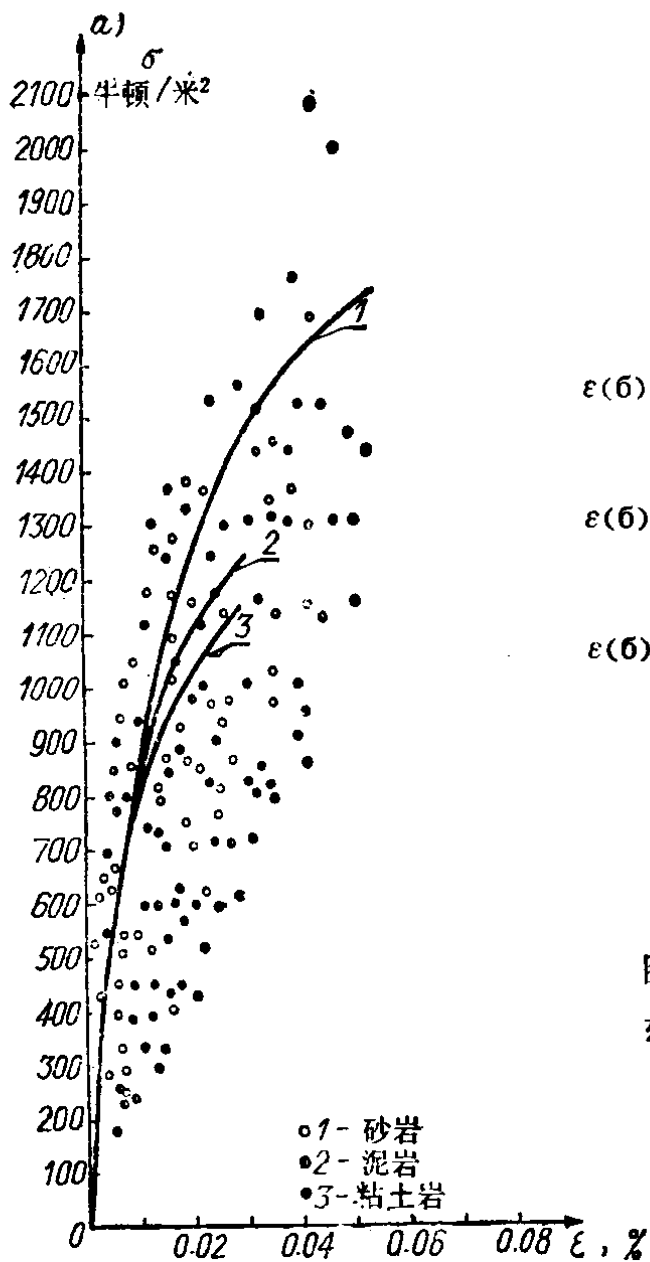
1.2 岩石的物理和力学性质

岩体中各种现象的显现在很大程度上取决于岩石的物理、力学性质。所谓岩石的物理力学性质是指岩石的结构与构造、容重和比重、孔隙度、裂隙度、层理、节理、岩石的水文地质特性、强度和硬度、岩石的致密性、切割性、热学性质及其它。这些性质制约于：岩石的生成、构造（断层、裂缝、断裂）影响和组成该岩石的颗粒大小、形状、胶结物的性质及节理等。

表 1.1 某些岩石的容重和比重

岩石名称	容重 (牛顿/分米 ³)		比重 (牛顿/分米 ³)	孔隙度 (%)
	干岩	湿岩		
花岗岩	23.0~26.7	23.5~27.0	26.0~27.0	0.02~0.38
玄武岩	29.3~29.9	29.5~30.0	29.3~30.8	0.02~1.8
石英岩	19.0~26.4	21.9~26.4	20.5~29.0	0.01~3.4
砂岩	16.1~26.8	20.0~27.7	25.9~27.7	2.5~11.12
石灰岩	20.0~27.6	22.5~27.6	27.0~28.4	0.17~13.4
白云岩	21.0~29.5	22.0~30.0	27.0~28.5	0.5~13.4
砂质页岩	23.7~27.3	24.0~28.0	24.6~31.6	3.6~13.5
泥质页岩	22.2~26.7	22.5~27.0	27.3~28.1	5.0~18.9
炭质页岩	17.6~18.0	17.8~19.5	21.5	17.98
砂质油性粘土	19.8~19.9	15.9~22.0	25.3	44.0~47.0 52.0~55.0
黄土	7.5~12.5	14.4~17.8	15.5~21.0	40~60
致密软泥	18.5~19.5	19.0~20.8	22.0~26.5	5~50
淤泥, 泥炭		7.0~11.5		70~90
耕植土, 相同粒度砂子	16.5~19.3	19.0~12.0	19.5~23.0	45~65 25~50
不同粒度砂子	17.0~19.5	17.8~22.5	20.5~28.5	15~40
煤	11.5~14.0	12.5~15.0	12.3~15.8	5~25
砾石	16.5~19.3	17.5~20.5	20.5~28.5	35.0~40.0

在表1.1到表1.8中列出了岩石的某些物理性质。在表1.9和图1.1中, 给出了根据M. 胡戴克和R. 莫罗兹的试验而取得的石炭纪地层部分岩石在三轴应力状态中的某些强度性质。该试验是由格利维茨西



$$\epsilon(\sigma) = -0.0176 \ln \left[1 - \frac{\sigma}{1789 \cdot 10^5} \right]$$

(砂岩)

$$\epsilon(\sigma) = -0.0110 \ln \left[1 - \frac{\sigma}{1250 \cdot 10^5} \right]$$

(泥岩)

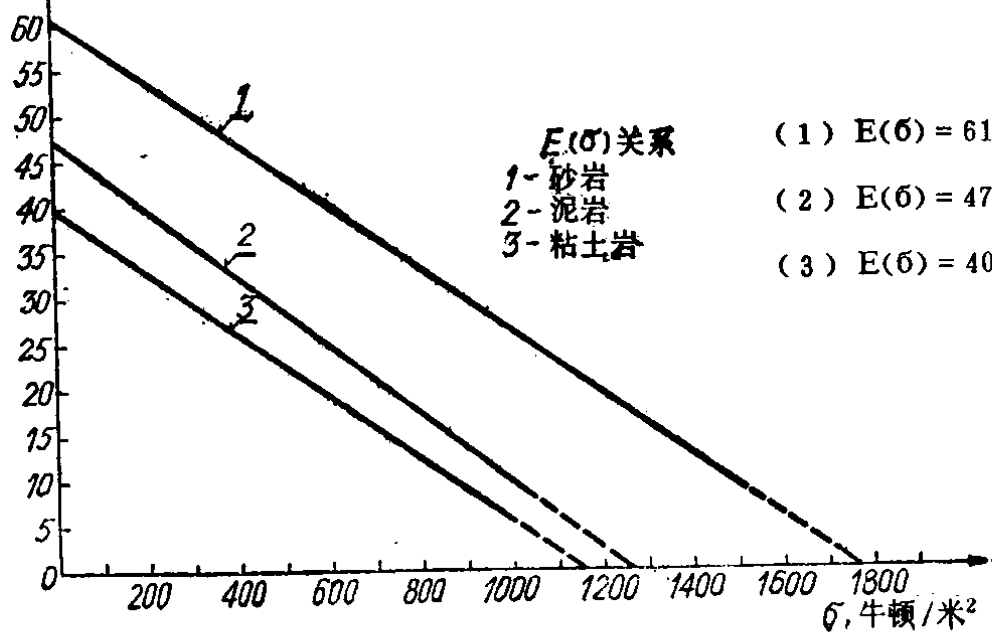
$$\epsilon(\sigma) = -0.0961 \ln \left[1 - \frac{\sigma}{1150 \cdot 10^5} \right]$$

(粘土岩)

图 1.1 根据 A. 胡戴克和 R. 莫罗兹方法所求出的砂岩、淤泥岩和软泥的关系曲线

a—关系 $\epsilon(\sigma)$, b—关系 $E(\sigma)$

$E \cdot 10^4$ 牛顿/米² b)



$E(\sigma)$ 关系
1- 砂岩
2- 泥岩
3- 粘土岩

$$(1) E(\sigma) = 610 \cdot 10^8 - 3426$$

$$(2) E(\sigma) = 470 \cdot 10^8 - 3756$$

$$(3) E(\sigma) = 400 \cdot 10^8 - 3466$$

里西亚工学院采矿系矿井建设教研室进行的。在表 1.10 和图 1.2 中，给出了采矿研究总院根据 A. 基迪宾斯基方法在确定岩石力学指标试验中所得到的最后结果。

在分析表 1.4 的结果时可以发现不同岩石的抗压强度 R_c 差异很大，将岩样在压力机上进行单轴压力试验，或利用经验公式可相当近似地求出 R_c 值。

$$R_c = \frac{P}{0.15} \left(\frac{\gamma}{10 \text{ g}} \right)^{0.67} \quad (1.1)$$

式中 P —— 力的临界值，牛顿；

表 1.2 上西里西亚煤田石炭纪煤系的岩石性质 (据小库赫拉)

岩石类别	比重 (牛顿/ 分米 ³)	容重 (牛顿/ 分米 ³)	吸水性 (%)	强度	
				抗压 (牛顿/ 厘米 ²)	抗断 (牛顿/ 厘米 ²)
高岭土 (泥质页岩、粘土岩)	23.4~26.5	22.8~26.0	1.85~2.20	1400~3000	300~600
泥质高岭土 (塑性页岩)	24.1~26.0	21.8~25.4	在水中崩解	310~1600	110
石英绢云母高岭土 (砂质泥质页岩)	25.4~26.8	23.8~26.0	0.90~3.0	1400~4000	450
绿泥绢云母高岭土 (页岩)	26.7~29.1	26.0~28.3	0.85~2.50	1000~5000 平均3450	550
普通淤泥岩	25.2~27.8	24.3~26.9	0.1~1.0	2000~6000 平均4500	930
绢云母淤泥岩	27.8~30.2	26.9~29.3	0.08~0.67	1500~10000 平均4700	1520
粉砂岩	25.4~27.8	28.4~28.4	0.5~4.5	1000~12000 平均7000	450~1670 平均1020
细粒砂岩	25.7~27.8	23.4~26.0	0.6~3.4	1000~21930 平均7500	430~1950 平均1100
中粒砂岩	25.9~27.2	21.0~26.1	0.3~12.0	600~14000 平均5200	850~1490 平均800
粗粒砂岩	25.8~26.7	20.0~25.7	2.8~14.0	960~1100 平均4800	平均670
细粒砾岩	26.0~26.4	22.0~25.0	3.9~16.3	1000~6000 平均3000	--

γ ——岩石平均容重，牛顿/米³；

g ——试样重量，公斤。

闪长岩和辉绿岩的岩石抗压强度最大，且垂直岩石层理方向试验的强度较大，而平行岩石层理方向试验的强度较小。抗压强度 R_c 大于抗拉强度 R_t ， R_c/R_t 比值甚至能达到30。总的可以认为， R_t 比抗压强度 R_c 小几倍到十几倍，但抗弯强度 R_b 比 R_t 大一倍。

表 1.3 某些岩石的极限抗压强度

岩石	结构	吸水系数 (%)	极限抗压强度 (牛顿/厘米 ²)		湿、干岩石 强度关系 (%)
			干岩	湿岩	
石灰岩	致密	1.6	15480	10750	69
石灰岩	最大粒度1毫米	2.3	7510	6500	87
石灰质砂岩	粉粒	0.8	17390	14040	81
砂岩	中粒	3.1	9570	7380	77
砂岩	孔隙	6.2	2060	1570	76
泥质页岩	密实	0.5	12080	7720	64
花岗岩	花岗	0.3	23570	20480	87

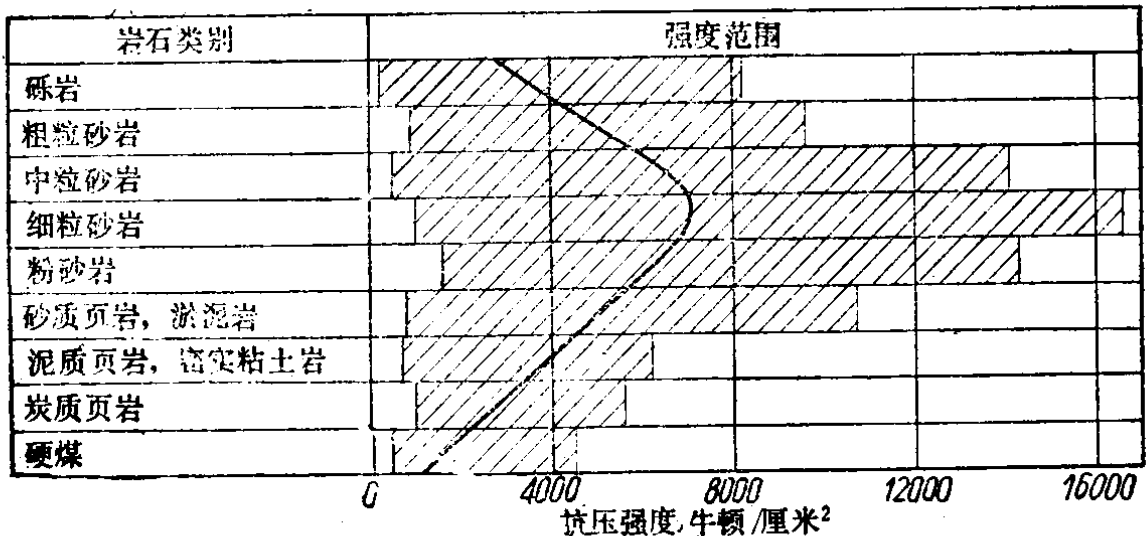


图 1.2 据采矿研究总院试验上西里西亚煤田石炭纪岩石的抗压强度

岩石强度在很大程度上取决于它的湿度（表1.2）。湿度可以使砂岩强度降低40%，页岩降低60%。

在掘进和维护巷道的岩体中，会遇到胶结性减弱面（节理、劈