

工程实用岩石力学

K. G斯塔格 O. C. 晋基维茨 主编

地质出版社

工程实用岩石力学

K·G·斯塔格 O·C·晋基维茨 主编

成都地质学院工程地质教研室译

陆恩泽 校

地质出版社

内 容 提 要

本书是岩石力学的一本专门著作，旨在总结这一学科的已有进展，指出有希望的研究途径和当前的实际用途。全书共十二章，分别由熟悉这方面的作者编写。阅读对象是岩石力学的研究人员，有关专业的师生和地质、土木、采矿、水利工程、地震预报等方面的技术人员。

Rock Mechanics in
Engineering Practice

K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz

John Wiley & Sons

工程实用岩石力学

K.G. 斯塔格 O.C. 晋基维茨 主编

成都地质学院工程地质教研室译

陆恩泽 校

*

国家地质总局书刊编辑室编辑

地质出版社出版

地质印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1978年2月北京第一版·1978年2月北京第一次印刷

统一书号：15038·新222·定价1.30元

译者序

本书是岩石力学的一本专著，它系统总结了近年来国外在这一学科领域已经取得的进展，指出了有希望的研究途径以及当前的实际用途。

全书共分十二章，论述了岩石力学的基本理论、测试技术及数学分析方法。其中一、二、三、四、七、十章论述作为地质作用产物的岩石和岩体的特点及其力学性质，间隙水对岩体性能的影响，脆性破坏机制，岩体动力性能以及岩体极限性状等岩石力学的基本理论；五、六、十一章分别评述岩体现场试验、岩体中应变和应力测量和岩石力学的模拟试验等测试技术；八、九章则分别以连续介质模型和碎块体模型研讨岩体内应力-应变及岩体内荷载-变形的数学分析方法；第十二章讨论改善岩体性能的方法。

这是一本集体编写的著作，在统一大纲下由熟悉这方面问题的各国专家分章撰写，再经相互校阅、修改而成。是国外岩石力学著作中系统较严格、内容较全面、论述较简明扼要的一本著作。本着“洋为中用”的原则，我们把它译成中文供岩石力学、工程地质、土木、水利工程、采矿及地震预报等方面技术人员及大专院校师生参考。

全书由成都地质学院工程地质教研室译。参加翻译工作的同志是：前言、引言、七、十一章张倬元译；一、二、六章孔德坊译；三章王兰生译；四、十章王士天译；五章朱春润译；八、九章卢盛松译；十二章赵泽三译。译后由张倬元同志进行初校和整理，然后由武汉地质学院陆恩泽同志校订，最后又由译者进行了复校。在校订和复校过程中，第四章及第十二章曾参阅过长江水利水电科学研究院梅剑云同志的译稿。书中除照片、个别附图和

参考文献未加采用，人名索引以及各章、节的致谢或涉及资本主义社会的法律与诉讼等与专业无关内容略去未译外，其它都保存了原书的系统和面貌。

由于译者的专业和外文水平有限，难免有不少缺点和错误，欢迎同志们提出批评和指正。

译 者

前 言

在一个文献充斥几乎成为一种灾难的时代——仅科学和技术方面,目前估计每年出版数量为论文900000篇和书籍100000本,在一个人为另一本书写一篇前言之前,他应根据以下两点检查自己该不该写,即:这本书是否满足某种实际需要和它是否正确地传授现代知识。

显然,可以用种种理由证明这本著作的出版和它的集体编写是正当的,这些理由是:岩石力学在科学上和技术上的重要性,它的迅速发展和它所涉及问题的复杂性,对更精确预测的不断增长的需要,最后还有:我们的新科学和其它许多知识分支有密切联系。

作为一门“纯”科学,岩石力学能使我们透彻理解岩石和岩体的变形现象,地壳的褶皱和断裂过程以及地震的起源和传播。从土木工程师和采矿工程师的观点看来,设计对象的规模不断增大及由之而产生的重大责任,要求我们具有定量方面的知识。目前坝高已接近300米,大型地下电站、隧道和矿山坑道的开挖深度已超过3000米,这些仅是这类工程活动规模的少数几个例子。

坝和岩石斜坡的几起重大破坏事故——其中某些事故曾使很多人丧失性命——使我们有理由强调指出:必需获得更新的知识。

岩体的特性和它的复杂构造不断地要求我们探讨专门的研究方法。时间尺度变化范围可以从地质年代到微秒(在爆破中涉及到),应力强度变化范围可以从几个大气压到原子爆炸时可以使岩石液化的压力。

为了研究这些现象,一方面需要有高精度的实验技术,而另一方面则需要应用以电子计算机为基础的现代计算方法。

例如，当前有限单元法就提供了一种计算手段，它使得工程师们能够抛弃那些必须加以各种限制的简化方法，并使得能够适当处理非线性问题和随时间而变化的现象。

这种从广泛基础上“入手”就意味着：现代知识的绝大部分都是通过各种各样的出版物传播的。往往在“专家”之间还存在不同的理解，所以显然需要进行综合性探讨。

因此，当前我们就面临着一个重大的问题——怎样组织科学著作：实际上，这个问题是我们在每一个科学领域都会遇到的，也就是说，怎样才能够把超出任何一个人的智力和经验的知识综合起来：很显然，这个问题的答案就是编写一本集体的著作。因为没有另外一种途径可以避免个人偏重或来自于任何一定专业范围的知识的局限性。但是，编写集体著作又会使我们在观点、形式和陈述方式等方面很难取得一致，这就和人们遇到的其它问题一样，要靠人们的组织才能来解决了。

组织这样一批著名的专家、成功地出版了这本著作是O·C·晋基维茨 (Zienkiwrcz) 教授和K·G·斯塔格 (Stagg) 博士的功劳。关于这本书的突出的必要性我已经在上面提到。可以预见，本书对岩石力学这门学科有关知识的综合与传播方面将会有很大的帮助，本书编著者在这些方面的贡献实在值得我们感谢。

国际岩石力学学会主席

曼纽厄耳·罗恰

(Manuel Rocha)

引 言

1966年于里斯本召开国际岩石力学学会第一次大会时，当时已可明显地看出：这一比较新的学科已经达到一个需要某种“定型”的新阶段。在那次会议上提出的论文超过300篇，表明地质、采矿、石油钻井工艺和土木工程等类专业对此学科的关注和他们在这方面的活动。但是也再次确证，在这方面还缺乏共同语言，各个部门间还存在工作重复现象，对于基本问题往往观点分歧，工程师在如何着手它的工作方面仍然缺乏指导。

学科发展到这样一个阶段，显然需要有一本教程或专著总结已经取得的进展，指出有希望的研究途径以及当前的一些实际用途。

由一个作者编写这样一本教程的缺点是难免有些偏重——至于所需要的漫长的时间就不必说了，所以，编者想做一个尝试，看看是否可以编写一本多作者的教程，在这一本教程中，每一章由在那一方面相当熟习的作者来编写（避免使用“权威”或“专家”这类词汇，因为它很快就会变得毫无意义）。

这样一个建议得到了参加编写组的人们的热烈响应。所有的人（毫无例外的）都同意了，而更重要的是，按时提出了所需要的初稿。超出原预料更进一步的是，全体同意相互校核，而结果往往需要大量改写。编辑们应衷心地感谢他们。一个多作者的教程也有它自己的缺点，各人所写的稿件在观点上并不是经常一致的，不过，倘使他们的观点要能经常一致的话倒真是令人奇怪了。然而，对于有识别能力的读者来说，把这些观点并列起来并详细地加以合乎逻辑的解释反而是一个优点。这样，观点一致和不一致的范围便可以更清楚地确定了——这是任何一个学科继续发展的必要前提。

选择每一章的标题和基本内容（这一点由编辑们负完全责任）的指导方针是：在岩体上或岩体中设计结构物的工程师将会遇到的专题都广泛包括。

通篇的重点是关于岩石力学及其原理。所以，尽量不介述其它教程所包括的辅助材料。如果弹性方法论原理是有关系的话，本书中只承认这些原理并介绍读者去参考其它教程。我们认为重要的是从岩体的一项研究中所可能得到的资料类型和它与设计分析的关系。细节必须省略，以免编成的书又成为一本手册。这样做的附带结果是在保持本书的综合性叙述的同时，又能使篇幅保持在合理限度内（同样，也就保持了合理的售价）。

为使通篇符号一致也做了努力。本书采用了常用的（铁摩申科的）应力应变符号，但把压应力改为正号。这是与土力学的应用相一致的，并且强调了由于岩石具有不连续的本性而基本上不能承受张力这一点。

我们希望本书对研究工作者、大学生和实践工程师等都能同样适用。

K·G· 斯塔格

O·C· 晋基维茨

目 录

第一章 地质研究 D·U·迪尔 (1)	
1.1 引言..... (1)	
1.2 岩性(或岩石类型)的重要性..... (2)	
1.3 完整岩块的工程分类..... (4)	
1.4 岩体的构造特征..... (13)	
1.5 为工程目的而进行的自然条件下 的岩石分类..... (15)	
1.6 应力的自然状态..... (20)	
第二章 岩石的力学性质 A·J·小亨德朗 (21)	
2.1 引言..... (21)	
2.2 完整岩块的工程性质..... (21)	
2.3 原地岩石的工程性质..... (40)	
第三章 间隙水对岩体性能的影响 J·L·塞拉芬 (51)	
3.1 引言..... (51)	
3.2 孔隙固体中的水流..... (52)	
3.3 各向异性岩石中的稳定流..... (59)	
3.4 裂隙岩体中的非稳定流..... (60)	
3.5 孔隙和裂隙对非稳定流的影响..... (68)	
3.6 坝基水渗流的观测..... (70)	
3.7 岩体中的有效应力..... (73)	
3.8 岩石孔隙压力的有效面积..... (78)	
3.9 间隙水压引起的应力状态..... (81)	
3.10 岩体渗透性的现场测定..... (88)	
3.11 孔隙固体中的间隙水效应: 由于水 循环所引起的力学和化学变化..... (90)	

第四章 岩石的脆性破坏	E. 霍埃克 (94)
4.1 引言	(94)
4.2 破裂的开始	(94)
4.3 破裂的发展	(98)
4.4 压应力下岩石的破裂	(101)
4.5 脆性岩石的破坏标准	(104)
4.6 影响岩石破坏性状的因素	(107)
第五章 岩体现场试验	K.G. 斯塔格 (118)
5.1 现场试验的必要性	(118)
5.2 变形试验	(119)
5.3 现场试验中的动力法	(137)
5.4 现场剪切试验	(140)
5.5 渗透性和原始应力状态	(144)
5.6 结论	(144)
第六章 岩体中应变和应力的测量	A. 罗伯茨 (146)
6.1 引言	(146)
6.2 岩石应力测量的原理	(152)
6.3 钻孔变形计	(154)
6.4 钻孔包裹式应力计	(159)
6.5 钻孔应变测量装置	(166)
6.6 利用液压元件测定岩石的应力	(173)
6.7 岩石应力的间接测量	(176)
6.8 应力测量方法的选择	(178)
6.9 自然状态下应力测量的成果	(180)
第七章 岩体的动力性能	N.N. 安布腊西斯 (184)
	A.J. 小亨德朗
7.1 岩石中的动力源和动力效应	(184)
7.2 岩石中爆破引起的地面振动和损害	(199)
7.3 原地变形性的动力测定及其与 静力测定的对比	(208)

第八章 用以解决岩体问题的

连续介质力学O.C. 晋基维茨(214)

8.1 应力、应变分析在岩石力学中的作用.....(214)

8.2 连续介质法的属性和它的局限性.....(217)

8.3 材料模型和它的适用性.....(219)

8.4 初始应力, 孔隙压力与施加的荷载.....(224)

8.5 有限单元法在应力分析中的应用.....(225)

8.6 线弹性力学的应用.....(227)

8.7 非线性的应用.....(233)

8.8 应变分析中的蠕变效应.....(244)

8.9 结束语.....(250)

第九章 岩体问题中的不连续介质力学

或碎块体力学.....D.H. 特罗洛普(251)

9.1 引言.....(251)

9.2 碎块体模型.....(253)

9.3 碎块体力学在岩体问题中的应用.....(259)

9.4 静态的外部荷载问题.....(271)

9.5 地震与动力问题.....(274)

9.6 破坏标准.....(276)

9.7 流动问题.....(290)

第十章 岩石结构的极限性状.....N.R. 摩根斯特恩(297)

10.1 引言.....(297)

10.2 极限平衡方法的原理.....(301)

10.3 岩体中的结构不连续面.....(315)

10.4 岩体的强度和累进性破坏.....(318)

10.5 水压力和岩石结构物的抗力.....(322)

第十一章 岩石力学问题的模拟试验E. 富马加利(325)

11.1 弹性、弹-塑-粘滞性和极限荷载

范围内力学模拟的一般原理.....(325)

11.2 弹性范围内的模拟.....(330)

11.3 弹-塑-粘滞和极限荷载范围内的三维模拟	(331)
11.4 深坑道问题的二维模拟, 效用和适用界限	(344)
11.5 结论	(347)
第十二章 改善岩体性质的	
方法	P·F·F. 兰卡斯特-琼斯 (348)
12.1 引言	(348)
12.2 压力灌浆	(349)
12.3 岩石加固	(369)
12.4 岩石冻结	(378)
12.5 预防岩石性质恶化	(380)
12.6 结语	(381)
专题索引	(382)

第一章 地质研究*

D·U·迪 尔

1.1 引言

岩石力学是岩石力学性能的理论和应用科学；是探讨岩石对其周围物理环境中力场反应的、力学的分支**。

近来由一批岩石力学工作者作出的这个定义，初看起来好象强调力学的作用，而忽视地质学的作用。这个定义确实是相当广泛的。“对其周围物理环境中力场的反应”这种措词，充分广泛地适用于一切范围的问题。例如，应包括对高压和高温下经受应力的矿物晶体的变形机制，实验室试样的三轴性能，隧道周壁的稳定性，甚至包括对地球本身的地壳运动机制等的研究。

但是地质学的作用随后就可被看清——上述定义中所涉及的材料全部是存在于地质环境中的、或从地质环境中取出来的岩体。这些材料具有一定的自然特征，这些特征决定于其形成的方式和后来作用于其上的地质作用。一定地区在其地质历史中所发生的各种作用的总和，使其具有特有的岩性、特有的一套地质构造以及特有的应力的天然状态。所有这些方面的变化都发生在区域范围内，并且尤其重要的是，也可局部地发生在一定的工程场地范围以内。在进行勘探时，以及用外推法将试验点上的试验结果外推到相邻范围中去时，一定要考虑场地中出露的、不同地质单元的分布情况。实践证明，这样的工作最好由工程地质工作者来进

* 录自D. U. 迪尔所著的《工程地质学》和《岩石力学》的两卷集。

** 这是国立科学院岩石力学委员会1966年在《岩石力学研究》中所下的定义。

行。因为他们除了具备必要的地质科学基础知识、能用来查明当地的详细地质情况外，还熟悉岩石勘探的现代技术，了解岩石力学工作者和工程师的要求。

在应用岩石力学中，特别是在土木工程和采矿工程领域内，设计程序包括选择一个试验设计和预测所期望的性能。要利用理论力学和应用力学的公式。然而，在几乎每一情况下，都必须将岩石的一些力学性质引入到公式中去。这样求得的答案的正确性决不会比所引用的力学性质的正确性更高。完整的实验室岩样的力学性质，可以与采取岩样的岩体的力学性质差别很大。因此，近年来特别强调现场试验。

遭受应力变动的岩体，其性能决定于完整岩石材料的力学性质以及岩体中地质不连续面的数量和性质。在这些控制岩石性能的因素中，每种因素的相对重要性主要决定于所研究的工程作业的规模与不连续面间距的比例。在那些应力变化范围较大、而裂隙间距相对说来较小的地方，如在坝基或大型地下开挖工程中，裂隙的影响可能是非常显著的。但在裂隙间距很宽，而工程或建筑作业的面积相对来说很小时，如爆破孔的钻进或用隧道开挖机在块状岩石中开挖隧道，岩石的性能就更多地决定于岩石材料固有的性质。

对于应用岩石力学的许多问题来说，一个场地上任何既定深度的应力状态，也是一种必要的资料。正如本章后面所指出的那样，应力状态是本地区过去所发生的地质变化的直接结果。不过，要想对应力状态作出一个合理的估计，仅凭地质史的知识是不够的。

1.2 岩性（或岩石类型）的重要性

岩石的岩性指的是它的矿物、结构、组构再连接上一个名称或描述术语（从一些已经公认的分类体系中引用的），例如：鲕状灰岩、沥青质页岩、花岗岩、绿泥石-黑云母片岩等。这是地质学的名称和分类。岩石力学工作者时常发现这样的分类体系是不

恰当的，或者至少是不能令人满意的，因为岩性相同的岩石可以显示极不相同的力学性质。甚至有人建议废弃这样的地质名称并采用一种仅以力学性质为基础的新的分类。

虽然这样一个建议可能对许多人有吸引力，但也有几个理由说明应当保留岩性的术语。首先，对于任何一定的岩石类型来说，至少有一个力学性质的数值范围。对于某些力学性质和某些岩石类型来说，这个范围可能大得惊人；但对另外一些来说，却可能是小的。例如，石灰岩的单轴抗压强度可由 5000 磅/吋² 到 35000 磅/吋²；而岩盐的范围却仅由 3000 磅/吋² 到大约 5000 磅/吋²。石英岩的硬度较高，并且相当稳定，而砂岩的硬度则随胶结类型和胶结程度而不同。

采用岩性名称的第二个重要理由，是特定成因岩石中结构、组构和构造的各向异性的相互关系。例如，大多数火成岩具有一种致密的、嵌合组构，力学性质在不同方向的差异微弱（当然，许多喷出地表的熔岩流和浅成侵入岩，一些边部具有流动构造的深成侵入岩，如片麻状花岗岩等不在此限）。沉积岩（如页岩、砂岩和某些石灰岩）是成层的，因而力学性质表现了明显的各向异性。另外一些沉积岩，如岩盐，石膏以及多数石灰岩和白云岩，重结晶成一种嵌合结构，各向异性轻微。变质岩的各向异性可能是最显著的。绿泥石、滑石、和云母片岩有极发达的叶理面，它们是由片状矿物组成的，这些片状矿物使强度和模量随不同的试验方向发生很大的差异。片麻岩表现某些各向异性，但程度较低。板岩由于具有显著的板状解理也具有较高的各向异性。其它变质岩，如大理岩和石英岩，已经再结晶而成嵌合结构，有较好的均质性。

保留地质学名称的另外一个理由是：它可以表示一定的岩石类型和可能出现的其它自然特征之间的关联性。例如，当在野外发现石灰岩、石膏或岩盐时，调查者就会注意寻找洞穴、落水洞和溶解扩大的裂缝等溶蚀特征。又如，玄武岩流的存在，就可能出现柱状节理和与之有关的工程地质问题。与此相似某些类型的

岩石常会呈现出独特的性能或问题。岩盐或其它蒸发岩的出现，常会使人们预料到蠕变问题。因为页岩中含有粘土矿物，它们常会由于压力和湿度的变化而发生膨胀作用和崩解作用。因此，很明显，在列出岩石的地质学名称的同时，也就得出了有关这一岩石的性质和性能的许多重要资料。然而，为了工程目的，单独采用地质学名称是不够的，还应伴以下节中所讨论的工程分类。

1.3 完整岩块的工程分类

所谓完整岩块指的是那些能够取样和在实验室中进行试验、以及没有大规模构造特征（如节理、层面、夹层和剪切带）的岩石材料。科茨（Coates）曾采用过“岩石物质”这一词汇。科茨、科茨和帕森斯（Parsons）、以及米勒（Miller）曾根据力学性质的实验室测定值在完整岩块的分类方面作了极大量的工作。迪尔（Deere）和米勒曾对米勒早期的分类方案做了修改，以下各段所叙述的就是这个经过修改的分类。

这个分类是根据岩石的两种重要工程性质——单轴抗压强度和弹性模量而做出的。所采用的模量是在应力等于岩石极限强度之半时的切线模量。抗压强度是在长度与直径之比至少为 2 的试样上测定的。将岩石分成如表 1.1 中所示的五类*。

表 1.1 完整岩块的工程分类

1. 根据强度(σ_{ult})

级	描 述	单轴抗压强度 (磅/时 ²)
A	强度极高的	超过 32000
B	强度高的	16000—32000
C	中等强度的	8000—16000
D	强度低的	4000—8000
E	强度极低的	小于 4000

* 原文中为六类，但从表 1.1 中来看应为五类，可能系印刷错误，译文中已改正——译者。