



# 地下工程围岩稳定分析

于学馥 郑颖人 刘怀恒 方正昌 著

煤炭工业出版社

TD31  
12

# 地下工程围岩稳定分析

于学馥 郑颖人 著  
刘怀恒 方正昌



煤炭工业出版社

B057607

石力学参数试验与选取中所带来的误差，将随着科学的发展而逐渐得到改善。所以定量的计算是科学发展的必然产物。而当前的定量计算，虽然仍处于定性使用阶段，但是，它是必需的和不可忽视的。如果定性的结论没有科学的定量分析作为依据，则这种定性结论更缺乏科学性。

在理论分析中，常常对均质岩体中的圆形隧洞进行分析，这是因为：第一，计算圆形围岩应力不需要更高的数学知识，并且容易建立围岩破坏、稳定的物理概念；第二，圆形的分析结果，在定性上不失其一般性的规律性。对于更复杂的形状和非均质各向异性等问题，目前则主要运用有限单元法，才能得到认识。本书的最后各章节，就是为解决这个问题而写出的。

本书的读者对象主要是从事地下工程和采矿设计、施工和科研的技术人员、大专院校教师、研究生和学生。本书内容亦可作为有关地下工程开挖和采矿专业研究生和大学生教学参考之用。

由于作者水平所限，而且作为围岩稳定理论分析和围岩压力理论的系统论著，还是初次尝试，所以错误与疏漏之处，在所难免，敬希读者批评指正。

## 前 言

《地下工程围岩稳定分析》是研究地下工程围岩稳定和支持原理的科学论著。地下工程包括为国防和民用目的而在地下开挖的各种坑道、厂房、仓库、机库、油库、地下铁道、隧道、隧洞以及矿山井巷等工程。随着经济和技术的发展，世界各国地下工程开挖量与日俱增。我国地下工程开挖工作量非常大，在国家基建费用中占有重要的比重。学习和研究围岩稳定理论，并将其用以解决工程实际问题，对于促进我国现代化建设，具有重要意义。

当前认识地下工程围岩破坏、稳定规律和围岩压力理论的基本方法主要是经验的工程类比的方法和结构力学方法。这两种方法都没有从地应力和围岩应力认识其变形破坏规律，因而不会得到很好的认识。科学的认识方法是从围岩变形、破坏的根本作用力——地应力出发，研究围岩应力、变形和破坏规律，以及从围岩与支护的共同作用认识围岩压力理论。

认识围岩稳定问题，需要牵扯到有关地应力、围岩应力及变形和岩体结构构造及其物理力学性质方面的理论和测试等很多问题。关于地应力和岩体结构构造及其物理力学性质方面的问题，已形成专门问题在有关地质学科中论述，而关于围岩稳定从地应力出发，研究围岩应力、变形、破坏，以及从围岩与支护的共同作用认识围岩压力的问题，直到目前为止，还研究得很不系统，甚至在岩石力学教科书中，还未形成系统的体系。本书着重地从理论上探讨这些问题。对于有关地应力，围岩应力及其变形，岩石物理力学性质的测试理论和方法，以及模拟理论与试验等问题，应作为专题论述，本书不作讨论。

近二十年来，随着岩石力学学科的迅速发展，岩体、岩石测试技术和电子计算技术的进展，以及弹性、塑性和流变理论，尤

其是有限单元法、边界元法的发展,使围岩稳定和围岩压力理论,无论在观点上、还是在定量计算上都有很大进展。目前围岩稳定理论正处在从工程类比方法向科学理论和定量计算发展的过渡阶段。它摆脱了单纯从结构力学概念出发,搬用地面结构设计理论来分析和处理地下工程围岩稳定问题的约束,向运用岩石力学与结构力学原理共同解决地下工程围岩稳定问题的方向发展。

从科学的意义来看,工业的发展都具有阶段性。以地面建筑工业为例,当它的建筑结构稳定理论还处于工程类比阶段,不会出现今日这样的高楼大厦和其他特殊建筑物。由于结构力学和地基基础理论的发展并用于地面建筑工程之后,才使地面结构设计从工程类比进入科学理论和定量计算阶段。从而使地面建筑工业得到迅速发展,出现了前所未有的更符合科学理论、稳固可靠和经济合理的现代化建筑。

同样,由于岩石力学被引入地下工程,才有可能使今日的地下工程逐步摆脱工程类比的认知方法,进入科学理论和定量计算阶段。并可预见,在不久的将来,地下工程也会像结构力学和地基基础被引入地面建筑一样,出现一个前所未有的迅速发展,使对围岩稳定性的评价更稳妥可靠,维护方法和支护设计更科学,更安全可靠和经济合理,使地下空间和地下资源的利用更充分。

本书是在前人的基础之上,结合作者们近几年的研究成果,加以系统论述写成的。全书以地应力为前提,根据围岩的弹性、塑性、粘性和存在弱面的特点,分别论述了围岩的应力、变形和破坏机理、稳定性验算和围岩压力计算及支护原理等内容。为了读者方便,书中适当地补充了某些必要的岩石力学和弹性、塑性及流变理论等基础知识,形成了一个围岩稳定和围岩压力理论分析的新体系。

当前在围岩稳定分析中,有人忽视甚至怀疑理论计算的使用价值。诚然,有些理论计算的定量数值还达不到 $2+3=5$ 的准确水平,但很多可以达到 $4.5\sim 5.5$ 的水平,并逐渐向5逼近的发展之中。同时由于在力学模型选取中、在数学力学方法处理中、在岩

# 目 录

前 言	
第 一 章 绪论	1
§ 1-1 围岩稳定和围岩压力理论的发展和现状	1
§ 1-2 围岩稳定和围岩压力理论的研究内容和方法	4
第 二 章 岩石的力学性质	7
§ 2-1 概述	7
§ 2-2 岩石的力学性质	7
§ 2-3 岩石强度理论	13
§ 2-4 岩体结构面的分类及其力学特征	19
§ 2-5 岩体的力学性质	28
§ 2-6 岩体分类	32
第 三 章 原岩应力	37
§ 3-1 概述	37
§ 3-2 重力应力	39
§ 3-3 构造应力	40
§ 3-4 地壳浅部地应力的变化规律	42
§ 3-5 地应力的影响因素	49
§ 3-6 构造应力与我国地下工程稳定分析	52
§ 3-7 地应力的分析方法	56
第 四 章 围岩应力和变形的线弹性分析	61
§ 4-1 概述	61
§ 4-2 线弹性理论平面变形问题基本方程	63
§ 4-3 线弹性理论平面变形问题的复变函数解	68
§ 4-4 圆形隧洞围岩应力及变形	79
§ 4-5 非圆形隧洞围岩应力	98
第 五 章 围岩应力与变形的弹塑性分析	122
§ 5-1 概述	122
§ 5-2 一点的应力状态和应变状态	124

	§ 5-3	塑性力学基本理论	131
	§ 5-4	轴对称条件下围岩应力及变形的弹塑性分析	136
	§ 5-5	三种型式极限曲线围岩应力与位移的统一表达式	150
	§ 5-6	非轴对称情况下围岩塑性区应力和边界线的近似 计算	156
第 六 章		弱面体围岩应力分析	171
	§ 6-1	概述	171
	§ 6-2	弱面的破坏准则	172
	§ 6-3	圆形隧洞围岩剪裂区应力的计算	189
	§ 6-4	圆形隧洞围岩剪裂区的计算	192
	§ 6-5	圆形隧洞围岩剪裂区位置	196
第 七 章		围岩应力与变形的粘弹塑性分析	200
	§ 7-1	概述	200
	§ 7-2	几个常用的流变学模型	204
	§ 7-3	流变问题的一般解法	213
	§ 7-4	圆形隧洞围岩应力及变形的粘弹性分析	216
	§ 7-5	圆形隧洞围岩应力及变形的粘弹——塑性分析	236
第 八 章		围岩破坏机理与稳定性分析	245
	§ 8-1	围岩破坏类型与机理	245
	§ 8-2	局部落石破坏的稳定性验算	259
	§ 8-3	遍节理岩体的块体稳定计算	272
	§ 8-4	拉裂、重剪和复合破坏情况下破坏区的预测	283
第 九 章		围岩压力理论与计算	293
	§ 9-1	围岩压力分类	293
	§ 9-2	影响围岩压力的因素	295
	§ 9-3	松动压力的计算	309
	§ 9-4	变形压力的计算	316
	§ 9-5	膨胀压力的计算	323
	§ 9-6	围岩分类与围岩压力经验公式	331
第 十 章		锚杆喷混凝土支护的计算与设计	346
	§ 10-1	概述	346
	§ 10-2	锚喷支护设计和施工原则	352

§ 10-3	锚喷支护设计方法概述	361
§ 10-4	均质岩体中锚喷支护的计算与设计	371
第十一章	岩石力学线弹性问题有限单元法	388
§ 11-1	概述	388
§ 11-2	线弹性分析基本概念	390
§ 11-3	最常用的平面单元	397
§ 11-4	岩石性态的模拟	411
§ 11-5	边界条件、原始应力、计算荷载	413
§ 11-6	支护结构的模拟	420
§ 11-7	对计算模型的要求及计算实例	426
第十二章	弹-塑性分析有限单元法	432
§ 12-1	岩石的非线性	432
§ 12-2	塑性增量理论简述	435
§ 12-3	弹-塑性模型	442
§ 12-4	非线性问题基本解法	449
§ 12-5	弹-塑性分析的初应变法及初应力法	455
§ 12-6	拉破坏的非线性分析	463
§ 12-7	流变问题有限元分析	470
§ 12-8	算例及应用简介	477
第十三章	考虑弱面及岩体结构特征的有限元分析	482
§ 13-1	岩体结构特征	482
§ 13-2	弱面的特性及破坏形态	485
§ 13-3	模拟弱面的单元	492
§ 13-4	层状岩体及单元特性	502
§ 13-5	弱面岩体的非线性模型	508
§ 13-6	计算示例	513
第十四章	空间问题及有限元半解析法的应用	518
§ 14-1	空间问题简述	518
§ 14-2	旋转轴对称问题	521
§ 14-3	非轴对称荷载的旋转轴对称结构	525
§ 14-4	层状岩体半解析法的应用	536
第十五章	有限元法的实施及电算程序	547



§ 15-1	概述	547
§ 15-2	计算原始数据的处理	548
§ 15-3	NCAP-1程序简介	554
§ 15-4	NCAP-1程序简要说明	562
§ 15-5	NCAP-1程序全文	577

# 第一章 绪 论

## § 1-1 围岩稳定和围岩压力理论的发展和现状

早在原始社会，人类为了居住，便开始使用了地下洞穴。此后几千年来，劳动人民在生活和生产中逐渐积累了若干使围岩稳定的经验。但是对围岩稳定和围岩压力理论的提出和深入研究，还是随着科学和大工业的发展开始的。松散地层（主要是土层）围岩稳定和围岩压力理论的研究，至今已有百余年的历史，它与土力学的发展密切相关。随着采矿事业的发展，坚硬岩层围岩稳定和围岩压力理论的研究也有七十余年历史。而岩石力学作为一门学科提出，则是本世纪五十年代的事。特别是最近二十年来，这门学科发展极其迅速。岩石力学的发展，一方面是由于采矿、交通、水利水电、战备及其他民用地下工程开发发展的需要，另一方面也与量测技术及其他学科的发展是分不开的，尤其是弹性、塑性和流变理论等基础理论，以及有限单元法、电子计算技术的应用，使岩石力学的理论分析与计算，获得了有效的手段。

本世纪廿年代以前，主要是古典的压力理论阶段。这类理论认为，作用在支护结构上的压力是其上覆岩层的重量  $\gamma H$ 。可以作为代表的有海姆 (Haim, A)、朗金 (Rankine, W.J.M) 和金尼克 (Диник, А.Н.) 理论<sup>(1)</sup>。其不同之处在于，他们对地层水平压力的侧压系数有不同的理解。海姆认为侧压系数为 1，朗金根据松散体理论认为是  $\operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ ，而金尼克根据弹性理论认为是  $\frac{\mu}{1-\mu}$ 。其中， $\mu$ 、 $\varphi$  和  $\gamma$  分别表示岩体的泊松比、内摩擦角和容重， $H$  是地下工程所在深度。由于当时地下工程埋藏深

度不大，因而曾一度认为这些理论是正确的。

随着开挖深度的增加，越来越多地发现，古典压力理论不符合实际情况。于是又出现了散体压力理论。这类理论认为，当地下工程埋藏深度较大时，作用在支护结构上的压力，不是上覆岩层重量，而只是围岩坍塌拱内的松动岩体重量。可以作为代表的有太沙基 (Terzahi, K.) 和普氏 (Протоdjяконов, М.М.) 理论。他们的共同观点认为坍塌拱的高度与地下工程跨度和围岩性质有关。不同之处，前者认为坍塌拱是矩形，后者认为是抛物线形。

散体压力理论是相应于当时的支护型式和施工水平发展出来的。由于当时的掘进和支护所需的时间较长，支护与围岩不能及时紧密相贴，致使围岩最终往往有一部份破坏、坍塌。但是当时没有认识到围岩的坍塌并不是形成围岩压力的唯一来源，亦即不是所有的地下空间都存在坍塌拱。更没有认识到通过稳定围岩，以充分发挥围岩的自承作用问题。此外，这类理论也没有能科学地确定坍塌拱的高度及其形成过程。

散体压力理论虽然没有明确指出：“围岩坍塌能自行稳定，自行稳定的围岩具有自承能力”。但坍塌拱的存在说明了这种含义。

“围岩坍塌能自行稳定，自行稳定的围岩具有自承能力”是矿山巷道经常发生的一种破坏形式和失稳现象。《轴变论》从理论上论证了它的发生与发展过程。《轴变论》认为：巷道坍塌又自行稳定可以用弹性理论进行分析，并认为：围岩破坏是由于应力超过岩体强度极限引起的，坍塌是改变巷道轴比，导致应力重分布，应力重分布的特点是高应力下降，低应力上升，并向无拉力和均匀分布发展，直到稳定而停止。应力均匀分布的轴比是巷道最稳定的轴比，其形状为椭圆形。

古典和散体地压理论与《轴变论》分析问题的出发点不一样。前者是以支护结构及其荷载作为前提条件来研究围压理论，这是长期以来人们把地层压力作为支护荷载大力进行研究的由

来。后者研究围岩压力规律，是从原岩体应力为前提条件，因为它是围岩变形、破坏的根本作用力。围岩变形、破坏与原岩体应力侧压系数和轴比密切相关，据此提出了“等应力轴比”、“零应力轴比”、“拉应力轴比”和“压应力轴比”与侧压系数的关系式。最近又补充了“围岩稳定轴比”三规律，从理论上论述了巷道方向、巷道轴比与原岩体应力的关系〔2〕。《轴变论》对于那些受结构面控制的弹性体围岩破坏规律，没有实际指导意义。

实践证明，围岩常常进入塑性状态。所以研究围岩稳定就不能不考虑塑性问题。于是从五十年代后期开始有人引用弹塑性理论来研究围岩稳定问题。著名的芬纳 (Fenner.)-塔罗勃 (Talobre, J.) 公式和卡斯特奈 (Kaster, H.) 公式就是这方面的代表性例子。此外，由于岩土的流变特性，也有人开始将流变理论引用到围岩稳定分析的研究中来，以研究围岩应力、变形的时间效应。

六十年代末，出现了考虑支护与围岩共同作用的弹塑性理论解，同时也出现了考虑围岩节理、裂隙的计算解。这些解答首先是利用有限单元法获得的，而对于其中的某些简单情况，也可以运用解析解进行计算。现在我国科研、设计和教学等部门，以及一些重大工程的设计中，引用共同作用理论求解的实例，已经逐渐普遍起来。运用共同作用理论解决实际问题，必须要以原岩体应力作为前提条件，进行理论分析，才能把围岩和支护的共同变形与支护上的作用力（围岩压力）、支护设置时间、支护刚度等关系，正确的联系起来。否则，使用假设的外荷载条件进行计算，就失去了它的真实性，降低了计算成果的科学价值和实用意义。不过目前应用共同作用理论解决实际生产问题，还有一定问题，如计算所需要的岩石力学参数还难以准确确定、对支护设置前围岩变形量尚缺乏正确的估计、对围岩破坏机理认识不足并缺乏围岩破坏、失稳的判断准则等。因此，目前根据共同作用理论所得的计算结果，一般只能作为设计的参考依据，这就是说，它仅具有定性使用价值。但它对设计的科学指导意义，是不可忽视

的，因为缺乏它而得到的定性结论，更缺乏科学依据。

对于块状和层状的坚硬岩体，还可以运用工程地质和力学计算相结合的分析方法，即所谓岩石块体极限平衡分析法。这种方法主要是在工程地质的基础上，根据极限平衡理论，研究岩块的形状和大小，及其坍塌条件，以分析围岩压力和稳定条件的方法。

目前，设计部门实际采用的主要还是以经验为依据的工程类比的方法。国外还流行一种以测试为手段的“现场监控设计法”，通过现场实测来获得设计的定量参数，作为工程设计依据。

当前，虽然围岩稳定和围压理论有了很大的发展，但至今仍然是初浅的，各种理论也还正处在验证和发展阶段。但是有一点是大家所公认的，企图采用一种理论，解决各种不同地质条件下和不同目的的地下工程围岩稳定是不现实的。为此，应当对围岩稳定和围岩压力理论大力进行研究，以使围岩稳定维护方法更安全可靠和经济合理。

## § 1-2 围岩稳定和围岩压力理论的研究内容和方法

围岩稳定和围岩压力理论是研究围岩应力、变形、破坏规律，以及围岩压力和支持原理的科学。由于围岩应力、变形、破坏和围岩压力都是地层开挖前原岩应力历史发展的延续，所以进行上述研究必须从研究原岩应力状态出发，结合岩石力学性质、本构关系、赋存条件进行研究。

围岩稳定和围压理论研究的方法有：理论分析、室内试验、模型研究和现场实测等方法。其主要内容是：

岩石和土的力学性质、力学模型及本构关系；

岩石和土力学性质的室内测试和现场测试；

地层的原岩应力状态及其测试技术；

各种围岩及各种洞形的围岩应力、变形和破坏规律；

围岩压力的计算；

围岩应力、变形、破坏过程、围岩压力和支持应力、变形状

态的现场测试与模型试验；  
支护的设计与计算；  
围岩稳定性及其分类；  
围岩破坏的防治和加固处理。

在上述研究中，本书着重讨论围岩稳定的理论分析，有关原岩应力、岩石强度试验、现场测试和模型试验等内容，不作叙述。

生产实践和科学实验是围岩稳定和围岩压力理论研究的物质基础。诸如原岩应力的量测、岩石和岩体力学性质的测定、围岩应力和变形的现场试验，以及各种模型试验等，都是建立围岩稳定和围岩压力理论的物质基础。任何脱离物质基础的理论研究，都是缺乏科学依据的。

然而围岩稳定分析离开理论研究也是不可想像的。地下工程围岩稳定分析脱离理论研究只能使其永远在经验的工程类比之中徘徊不前。必须指出，现有的围岩稳定和围岩压力理论几乎都是建立在已有的力学理论基础上的，例如弹性理论、塑性理论、松散介质理论和流变理论等，这些理论都有一定假设条件，它虽然与复杂多变的自然地质体之间存在着一定的差异，但在科学发展的进程中是允许把复杂的条件加以简化和抽象的，并在发展中，逐步提高。因此地下工程设计目前还主要凭藉人们在生产实践中所获得的有限的经验作为依据。但是人们不应当满足于这些经验，更不能因此而阻碍理论的发展。相反，应当积极地去促进理论的发展，因为实践一旦插上理论的翅膀就可自由翱翔。

现代计算技术正在迅速发展，电子计算机的应用使围岩稳定分析进入崭新阶段。过去许多不能计算的问题，现在已经可以进行计算了。此外，因为岩体作为自然体，它所反映的性态是多变的，带有一定的概率性，大量的科学实验数据也需要利用电子计算机进行处理。因此，电子计算机对岩石力学是十分有用的工具。但是它也只能在人们所规定的模式（模型和程序）下工作。在计算技术和手段高度发展的今天，计算模型和物理过程的研究

与提炼, 就显得比以前更重要。

还应当指出, 岩体是天然地质体, 它经历了漫长的自然历史过程, 各类岩体有其各自的成因、也经受了各种地质构造变动过程, 所以围岩稳定和围岩压力理论研究, 与工程地质和地质力学的研究是分不开的。

建立合理的围岩稳定和围岩压力理论, 应当应用各种研究手段。综合利用生产实践经验、现场测试、模型试验和理论研究成果, 才能获得更好的效果。

### 参 考 文 献

- 〔1〕 Динник, А.Н. Статьи по горному Делу, Углетехиздат, 1957.
- 〔2〕 于学馥、乔端, 轴变论和围岩稳定轴比三规律, 有色金属, 1981年, 8月。

## 第二章 岩石的力学性质

### § 2-1 概 述

岩石是组成地壳的主要成分，它是由矿物和岩屑在地质作用下，按一定规律聚集而成的有一定固结力的地质体。广义的岩石包括“岩体”和“岩块”，狭义的岩石则专指岩块或岩石材料。

岩体是指一定范围内的天然岩石。岩体经受过各种不同构造运动的改造和风化次生作用的演化，所以在岩体中存在着各种不同的地质界面，这种地质界面称为结构面，例如层理面、节理面、裂隙和断层等。由这些结构面所切割和包围的岩块体，称为结构体。因此岩体是由结构面和结构体两种单元所组成的地质体。国内工程地质界称之为岩体结构。岩体的力学性质是结构面和结构体这两个基本单元体力学性质的综合性质，通常由工程现场岩体的力学试验而获得。

岩块是指脱离天然状态的岩石块体，或岩体中的结构体，例如钻取的岩芯、爆破得到的石料，以及各种形状的岩体结构体。所以它是不包含具有显著影响的结构面的均质块体。岩块是由各种造岩矿物的结晶颗粒，借助于颗粒间的分子作用力，或借助于外来胶结物的联结而成。因此岩块或称岩石的力学性质，主要取决于矿物成分，颗粒大小和颗粒间的联结方式，以及它的结构和构造性质。

本章将分别研究岩石的力学性质（即岩块的力学性质）、结构面的力学性质和岩体的力学性质。

### § 2-2 岩石的力学性质

岩石（岩块）力学性质的含义包括两个：岩石的变形特征和强度特征。岩石的变形特征是指岩石试件在各种荷载作用下的变形规律，其中包括岩石的弹性变形、塑性变形、粘性流动和破坏



规律，它反映了岩石的力学属性。岩石强度是指岩石试件在荷载作用下开始破坏时的最大应力（强度极限）以及应力与破坏之间的关系，它反映了岩石抵抗破坏的能力和破坏规律。

岩石的变形特征和强度特征，由岩石试件在单轴或三轴试验机上所得到的应力-应变曲线来描述。由于试验条件不同（单轴的或三轴的，刚性的或非刚性的），所得到的试验结果也各不相同，下面分别加以介绍：

### 一、岩石在单轴压缩状态下的应力-应变曲线

由于物质组成和组织结构不同，岩石表现出多种多样的应力-应变关系曲线。应力-应变曲线是岩石受外力作用时最为明显的力学反应（变形），它是建立力学模型的依据。

米勒(Miller, R.P.)根据28种岩石在单轴压缩状态下的应力-应变曲线，把岩石分为六种类型，如图2.2-1所示。图中第Ⅰ类为弹性曲线，它直到破坏之前都为近似的直线型，岩石有玄武岩、石英岩、辉绿岩、白云岩等。第Ⅱ类为弹-塑性曲线，岩石有软弱灰岩、泥岩、凝灰岩等。第Ⅲ类为塑-弹性曲线，岩石有砂岩、花岗岩及片岩等。第Ⅳ类为塑-弹-塑性曲线，岩石有大理岩、片麻岩等。第Ⅴ类为弹-塑-弹性曲线，它为高压缩性岩石，有片岩（岩样长轴垂直片理）。第Ⅵ类也是弹-塑性曲线，它反映了盐岩类岩石的蠕变特性。不同种的岩石具有不同的力学模型，岩石力学模型的选取必须基于试验结果。

### 二、岩石在三轴压缩状态下的应力-应变曲线

岩石的三向变形性质是通过岩石三向压力试验得到的。可以有两种方式：一种是主应力 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，称为三向不等压试验，采用真三轴压力试验机进行试验；另一种是 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ，这就是目前通常采用的三向压力试验。

围压对应力-应变曲线关系影响甚大。图2.2-2是日本茂木清夫对山口大理岩所作的三向不等压试验〔4〕，纵座标是主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ，横座标为最大主应力方向的应变 $(\epsilon_1)$ 。图(a)描述围压效应 $(\sigma_2 = \sigma_3)$ ；图(b)描述中间主应力 $\sigma_2$ 效应 $(\sigma_3 = \text{常})$