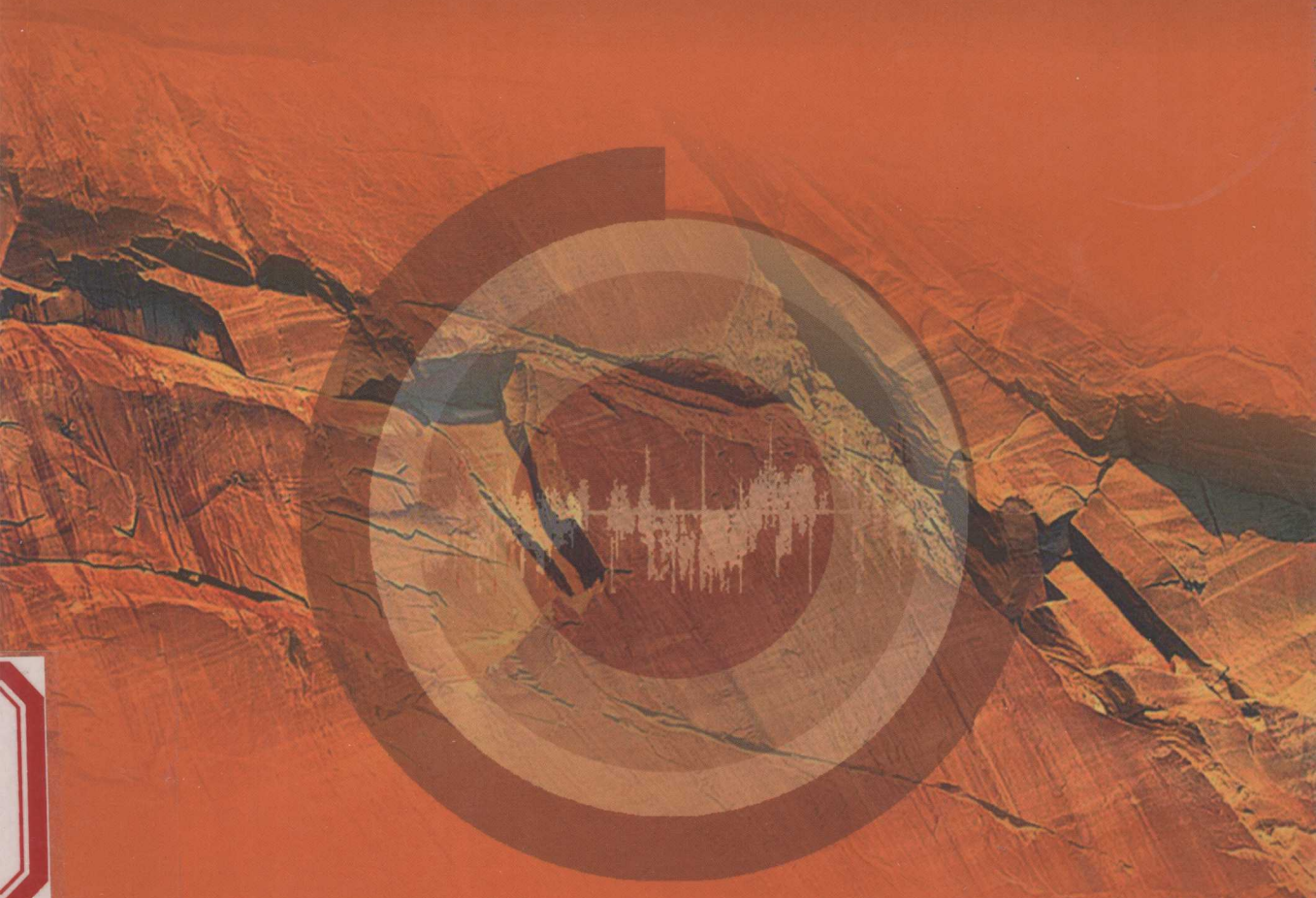


章根德 何 鲜 著

油井套管变形损坏机理



石油工业出版社

油井套管变形损坏机理

章根德 何 鲜 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对引起油井套损的各种主要原因,结合实际情况建立相应的数学模型进行了定量的分析。在此基础上,结合工程实践对防治油井套损的问题提供了相关的参考建议。

本书适应于从事油气田开发、采油、钻井等专业的科研人员与工程技术人员阅读,亦可以供相关专业的大学教师、研究生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

油井套管变形损坏机理/章根德等著.

北京:石油工业出版社,2005.7

ISBN 7-5021-4911-2

I. 油…

II. 章…

III. 套管(钻孔)-损坏-防治

IV. TE925

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 002164 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.cn

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.75

字数:275 千字 印数:1—2000 册

定价:38.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

油水井套管的变形和损害严重地影响了原油的正常生产。造成巨大的经济损失。所以，套损问题在世界各国的石油及天然气开发中已引起了人们的高度重视。

油水井套损问题在许多国家都出现过。例如原苏联地区近几十年来一直都有油水井套管损坏的报道。班长达勒威油田有 30% 的井因套管损坏而停产。北高加索气田就有 600 多口井的套管柱被破坏。阿塞拜疆油田套管的损坏，从 1986 年到 1991 年就导致 155 口油井停产。在西伯利亚油田，1991 年报道，已有 10% 的油井由于套损而停产。美国密西西比南帕斯油田，1971 年报道，出现了 54 口井的损坏和 21 口井的报废。罗马尼亚的坦勒斯娄油田，开发 22 年已有 20% 油井套管损坏。在我国，油田套损的情况也十分严重，到 2004 年底，已发现套损井达到了 20000 多口，其分布范围，从东部的油田一直延伸到西部的吐哈油田和塔里木油田。据统计，从 1977 年至 1983 年，大庆、扶余、胜利、大港、玉门等十几个油田已有套管损坏的井 3688 口之多，从 1983 年后，套管损坏还呈增多的趋势。由于油水井套管的损坏，对油田的稳定生产造成了很大的威胁，同时也给油田造成了巨大的经济损失。

造成油水井套管变形损坏的原因很多。习惯地，人们将套损的原因归结于地质因素，如岩层蠕变，泥岩吸水膨胀，地块断层运动，地层出砂等等；工程因素，如工程设计不当，生产中长期高压注水开发，压裂，酸化等各种施工作业不当，固井质量不好等等；其他因素，如射孔问题，腐蚀问题等等。但从科学的角度来说，套损是深埋于岩层中油水井套管在岩层地应力和其他物理化学因素作用下的变形和损坏，实际上是套管结构物与岩层地应力和其他的物理化学等因素相互作用的结果。除了像腐蚀等一类纯化学影响因素外，油水井的套损问题差不多与岩层地应力变化有关。所以，从某种意义上来说，套损问题是结构物与具有孔隙流体的岩体相互作用，相互耦合的问题。

本书采用了连续介质力学研究流—固耦合问题的方法对影响套损的诸多因素进行了数值模拟，试图给受诸多地质因素影响复杂的岩体—结构相互作用问题以科学的解答。作者希望从事油田开发工作的工程师们能受益于本书中的某些章节，能为防治油水井套损保障油田开发工作的正常运行提供参考意见。

本书第一章简略地阐述了岩石（和岩体）的力学特性。第二、第三章简单地介绍了线弹性理论和经典塑性理论的知识。第四章概述了套管的变形损坏形态。第五章分析了油井钻井完毕后的固结过程。第六章研究了断层附近注采井套变的影响因素。第七章研究了油藏开采地面下沉对套损的影响。第八章研究了注水开采引起地层回弹对套损的影响。第九章分析了油井出砂对套损的影响。第十章分析了围岩膨胀对套管的挤压。第十一章分析了围岩蠕变对套管的影响。在上述研究工作的基础上，对防治油水井套损的问题提出了若干建议以供从事油田开发工作的工程师参考。

作 者

2004 年 12 月

目 录

第一章 岩石的力学特性.....	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 围压与温度对岩石特性的影响.....	(3)
第三节 岩石孔隙中的流体效应.....	(8)
第四节 岩石的破裂	(12)
第二章 线弹性理论简述	(19)
第一节 广义 Hook 定律	(19)
第二节 正交各向异性线弹性体	(20)
第三节 横观各向同性线弹性体	(21)
第四节 各向同性线弹性体	(22)
第三章 经典塑性理论简述	(27)
第一节 屈服准则	(28)
第二节 加载和卸载准则	(36)
第三节 硬化规律	(38)
第四节 塑性公设	(41)
第五节 流动规则	(44)
第六节 塑性形变理论与塑性增量理论	(46)
第四章 套管的变形与损坏形态	(51)
第一节 套损问题的严重性	(51)
第二节 套损的形态	(52)
第五章 钻井完毕后的固结过程分析	(55)
第一节 流—固耦合过程基本方程	(55)
第二节 流—固耦合过程方程的解	(57)
第六章 断层附近注采井套变影响因素的研究	(61)
第一节 地应力	(61)
第二节 断裂活动与地应力	(63)
第三节 油井围岩中的应力场	(66)
第四节 断裂扩展对油井影响的实验模拟和数值分析	(68)
第五节 断层滑移引起应力场对套损影响的数值模拟	(73)
第七章 油藏开采地面下沉对套损的影响	(76)
第一节 油田开采引起地面沉降的力学模型	(77)
第二节 油藏开采地面下沉引起油井套管变形损伤的有限元分析	(81)
第八章 注水开采引起地层回弹对套损的影响	(86)
第一节 注水引起岩石特性的变化	(87)
第二节 水在断层中的作用	(89)

第三节 注水引起地层回弹对套损的影响 (91)

第九章 油井出砂对套损的影响 (95)

第一节 油井套管周围砂岩的应力及破坏分析 (95)

第二节 影响油井出砂的参量研究..... (100)

第三节 油井出砂后形成空洞是如何引起套管破坏的..... (105)

第十章 膨胀岩吸水后对油水井套管的挤压分析..... (109)

第一节 膨胀岩的膨胀机理和影响岩石膨胀的主要因素..... (109)

第二节 膨胀岩的本构关系..... (111)

第三节 膨胀岩—油井套管相互作用的数值分析..... (112)

第十一章 围岩蠕变对油水井套管变形损伤的影响..... (121)

第一节 油井周围岩石的蠕变、膨胀及压缩..... (121)

第二节 水平井段周围岩石的蠕变、膨胀及压缩..... (133)

第三节 围岩蠕变对套管变形损伤影响的数值分析..... (151)

第十二章 油井套管变形损坏的防范措施..... (155)

第一节 油井套管的合理设计..... (155)

第二节 提高完井固井质量..... (157)

第三节 采取正确措施保持合理的开采运行..... (158)

结束语..... (161)

第一章 岩石的力学特性

第一节 概 述

岩石的力学特性是指岩石在外力作用下发生变形和破裂过程中的物理力学特性。岩石常含有结晶集合体和被不同量的粘结材料结合在一起的非结晶颗粒。在力学特性的研究中,结晶的尺度是具有代表性的最小尺度,而结晶之间的边界常表现为岩石构造的薄弱点。所以通常从宏观角度视为连续体的岩石,实际上也不是连续的和均匀的。

在几米、几百米甚至数千米范围的尺度内,某些岩石的构造是连续的,但它更经常地被节理、裂缝和断层分割成不同的层面,又显示出不连续性。所以,岩石是连续和不连续的矛盾对立的统一体,随着我们研究所关心的尺度不同,常采用不同的概念和方法来描述岩石的本构特征。

材料力学性能的研究与经典理论的发展是以金属的行为作为基础,以金属作为典型试件的。尽管对金属和岩石二者都做了相同的试验,但不论是宏观行为还是微观行为,都存在着很大的差异。在金属材料中,塑性屈服比破裂更为重要,而在岩石中,破坏或破裂是非常重要的。但是,随着围压或温度的增加,岩石的变形与破坏性状往往呈现出由脆性向延性的转变。

现在来讨论岩石应力应变曲线的一般性质和以后所要用到的术语。在比较复杂的应力系统下的行为是类似的。

对于大多数岩石,应力应变曲线近似地取图 1-1 (a) 的直线形式^[1], 它的 F 点以破坏突然终结。这可用

$$\sigma = E\epsilon \quad (1-1)$$

来表示,其中常数 E 叫做杨氏模量,如果关系 (1-1) 精确地成立,就可将材料描述为线性弹性的;

如果在应力和应变之间有唯一的关系

$$\sigma = f(\epsilon) \quad (1-2)$$

它不必是线性的,如图 1-1 (b),那么就说材料是完全弹性的。术语“加载”将用于如试验中所进行的那样施加渐增的应力于试件的过程,而“卸载”用于减小此应力的过程。完全弹性意味着,如果材料加载,接着卸载,则经历由方程 (1-2) 给出的相同路径;并且,在加载时贮存在试件中的全部能量在卸载时释放。此情形已没有唯一的模量,但是,对于相应于某一 P 点的任何 σ 值,曲线的切线 PQ 的斜率

$$d\sigma/d\epsilon \quad (1-3)$$

称为切线模量,割线 OP 的斜率为 σ/ϵ , 称为割线模量。

如果在加载后接着卸载到零应力,应变回到零,但可能经过不同的路线,如图 1-1 (c),则称材料为弹性的。这种效应叫做滞变。如果它发生,则加载时对物体所做的功比卸载时所做的功大,因此在加载和卸载的循环中,在物体内消耗了能量。卸载曲线在任意点 P 的切线 PQ' 的斜率就是相应于那个应力的卸载模量。

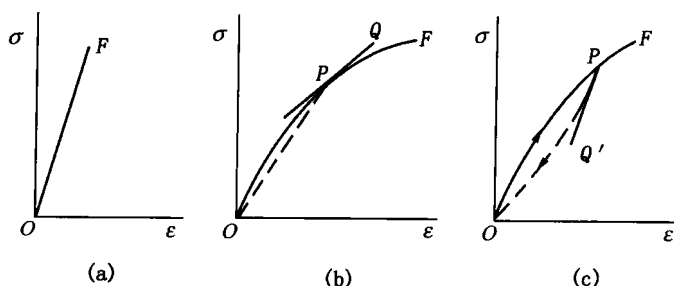


图 1-1 (a) 线性弹性材料；(b) 表示出切线模量 PQ 和割线模量 OP 的完全弹性材料；(c) 表示出加载和卸载循环的有滞变的弹性材料

岩石力学的实验表明，岩石介质一般具有如图 1-2 所示的应力—应变曲线（见 Jaeger 和 Cook, 1979）。它一般可分成四个区域：(1) OA ，在这里，它稍向上凹；(2) AB ，非常接近直线的部分；(3) BC ，在这里它是向下凹的，在 C 点达到最大；(4) 下降的区域 CD 。

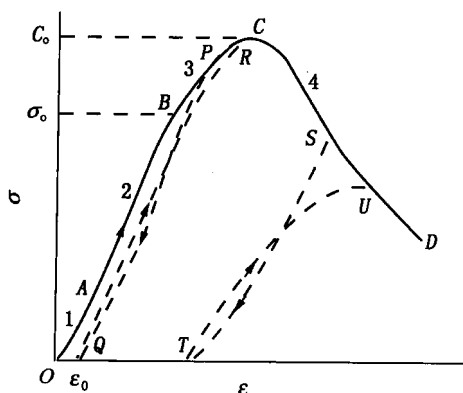


图 1-2 岩石的全应力应变曲线

在前面的两个区域 OA 、 OB 中，行为非常接近于弹性；可以观测到轻微的滞变，但是在该区域加载和卸载，岩石的结构和性质并不产生不可逆的变化。第三个区域 BC ，通常开始于量级为三分之二 C 点最大值的应力时，在该区域中应力应变曲线的斜率随着应力的增加逐渐地减少到零。在此区域，在岩石中引起不可逆变化，并且连续的加载和卸载循环画出不同的曲线。一个卸载循环 PQ ，如图 1-2 导致零应力时的永久变形 ϵ_0 ；如果材料重新加载，则画出曲线 QR ，它位于曲线 $OABC$ 的下面，但最后和它联结。

第四个区域 CD ，开始在应力应变曲线的最大值 C 点处，并用负的应力应变曲线斜率表示。卸载循环 ST ，经常导致大的永久变形，而接着的重新加载循环 TU ，在低于 S 相应的应力时，趋近于曲线 CD 。 CD 区域的特征仍是脆性状态，具有极大的不稳定性，极易导致突然破坏。

观察图 1-2 所示的应力—应变曲线，在 BC 区域内，岩石材料能够维持永久变形而不失去其抵抗载荷能力，我们说岩石材料处于延性变形状态。而在 CD 区域，岩石材料其抵抗载荷能力随着变形的增加而减少，我们说岩石材料处于脆性变形状态。而从延性变形过渡到脆性变形的交界点 C 具有曲线最大的纵坐标，我们称为岩石材料单轴抗压强度。岩石材料从弹性向延性变形过渡的点 B ，通常称为屈服点，而相应的应力称为屈服应力。

下面来简单地概述一下岩石的力学特性。应该注意到，岩石力学性质实验所得的结果，岩石力学性质的参量及其变化规律，由于岩石的不同类型，或虽是同类岩块但产地不同或产地相同但处于不同层位的岩块，其力学性质均可不同。即使是同一岩层的岩块，其实验的结果也因所采用岩块的尺度不同而有所差别。由小尺度的岩块所测得的力学参量如何推广到大尺度范围的岩块，亦是一个尚待深入研究的问题。

由实验所测得的岩石力学性质的参量只是个近似值，因而实际应用后所得的结果也只能是近似的。这是因为实验时假定了岩块边界和内部的应力是均匀的，而实际上各种形状岩块

内部的应力分布是不均匀的，应变分布也是不均匀的；假定了岩块在其所持的尺度内是均质的，而实际上岩块是非均质的多晶体。并且，在计算应力、应变等参量时作了各种不同程度的简化假设，如采用简单边界条件下测得的实验结果去计算复杂边界条件下的相应值，用小面积上应力平均值去计算实际上面积要大得多的岩块的平均值。

综合起来，岩石的力学性质有如下的特征：

(1) 岩石的力学性质参量都不是恒量，皆随着其各种影响因素的变化而变化，影响岩石力学特性的因素较多，诸如围压、浸水程度（孔隙水压力）、温度等等。

(2) 在不同的环境，不同的受力条件下，岩石的变形特性亦是各异的，如显示出弹性、塑性、粘弹塑性等特征。

(3) 由于微观结构和沉积环境的影响，岩石介质一般是各向异性的，并且在变形过程中，会出现相当可观的应力引起的各向异性，结果是应力历史会对岩石的性状产生深远的影响。因此地下岩石工程必须考虑施工过程中加载、卸载对以后实际使用的影响。

(4) 岩石的应力应变曲线在许多情况下呈非线性（或者说线性区域很小），且没有明显的屈服点，非线性应力—应变关系还具有应变硬化或应变软化的特性。

(5) 岩石介质在纯剪应力作用下会产生体积应变，即所谓的剪胀现象。造成岩石体变的原因较为复杂，在某些情况下它与塑性或流变性相关，而在较多的情况下与岩石中的微裂隙的压紧或扩张相关联。

(6) 在地下水较为丰富的水文环境中，岩石的变形与破坏和浸水程度及围压密切相关。在此情况下，岩石介质应视为两相介质，总应力是由固体相（骨架）和流体相（孔隙流体）所共同承担，固相应力—应变关系的模拟要采用有效应力的公式。

第二节 围压与温度对岩石特性的影响

影响岩石力学性质的诸多因素中，围压与温度是两个较为重要的因素。围压与温度是如何影响岩石介质的性状的，从下面所提供的岩石力学实验结果就可以说明。一般地说，当围压增加时，强度增加。随着围压的增大，岩块的屈服极限上升，但破裂引起的应力降则减少。岩块屈服极限的上升与围压的增大，近似成线性关系（图 1-3）。

随着围压的增加，岩块的变形模量、弹性模量和柔性模量均增大（图 1-4~图 1-6），

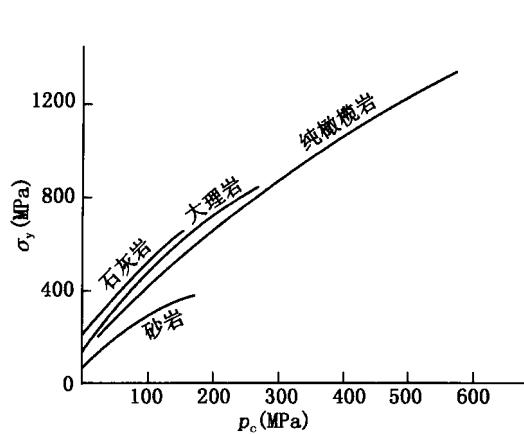


图 1-3 岩块屈服极限与围压的关系

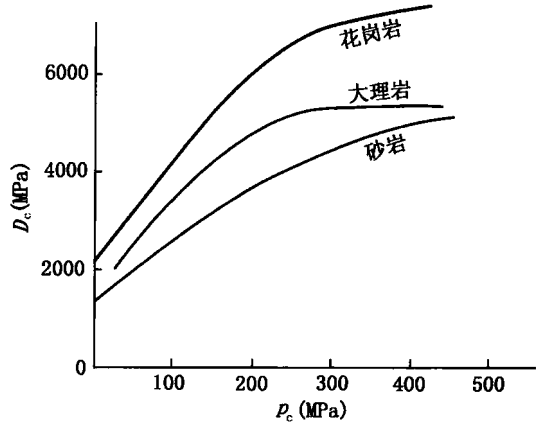


图 1-4 岩块变形模量随围压的变化

但泊松比则有的增大，有的减小（图 1-7）。

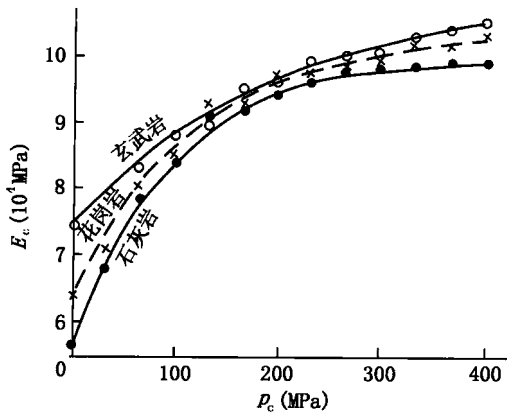


图 1-5 岩块弹性模量随围压的变化

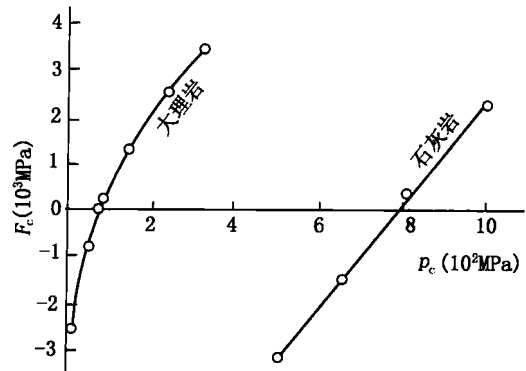


图 1-6 岩块柔性模量随围压的变化

随着围压的增加，岩石介质会出现从脆性行为向延性行为的过渡。图 1-8 表示了 Von Karman^[2]对 Carrara 大理石在各种围压下加载的研究工作结果，对于直到大约 50MPa（约 500bar）的围压，仍发生脆性破裂，具有强度增加和永久变形的少量增加。而当围压达到 68.5MPa（约 685bar）时，应力应变曲线就完全不同了，此时，岩石可受 7%以上的应变而不丧失强度，一般可称此为延性行为，用术语完全延性来表示。

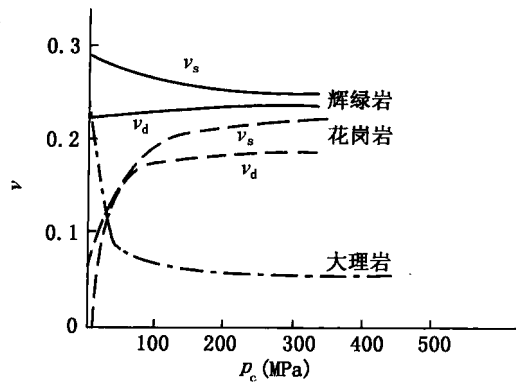


图 1-7 岩块泊松比随围压的变化

(G. Simmons 等, 1965; C. H. Scholz, 1968)

在图 1-8 中，围压为 23.5MPa（235bar）的曲线显示过渡的行为，从图 1-8 得到的结论是，有一个确定得相当差的围压值，在此围压值时，有一个从典型的脆性行为到完全延性行为的过渡，这个过渡叫做脆性—延性过渡。在更高的围压时，如图 1-8 中的 165MPa（1650bar）和 326MPa（3260bar）时，在通过屈服点之后， σ_1 稳定地随着应变的增加而增加，这个现象叫做工作—硬化，Heard（1960）

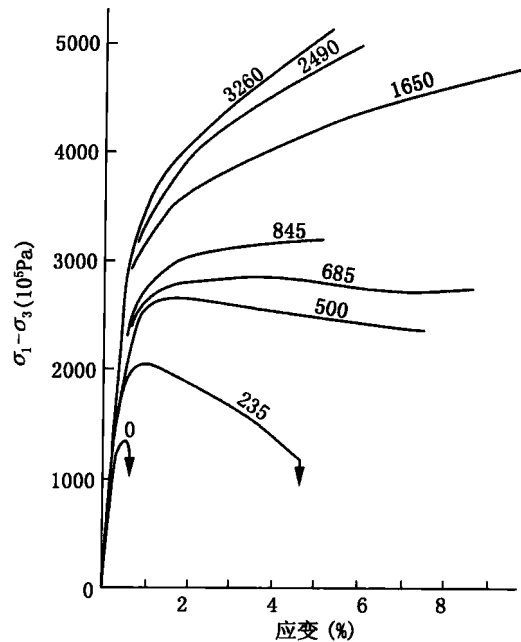


图 1-8 Carrara 大理石在各种围压下的应力—应变曲线（引自 Von Karman）
曲线上的数字是围压，以巴计

对于 Solenhofen 石灰岩求得类似的和更详细的结果。

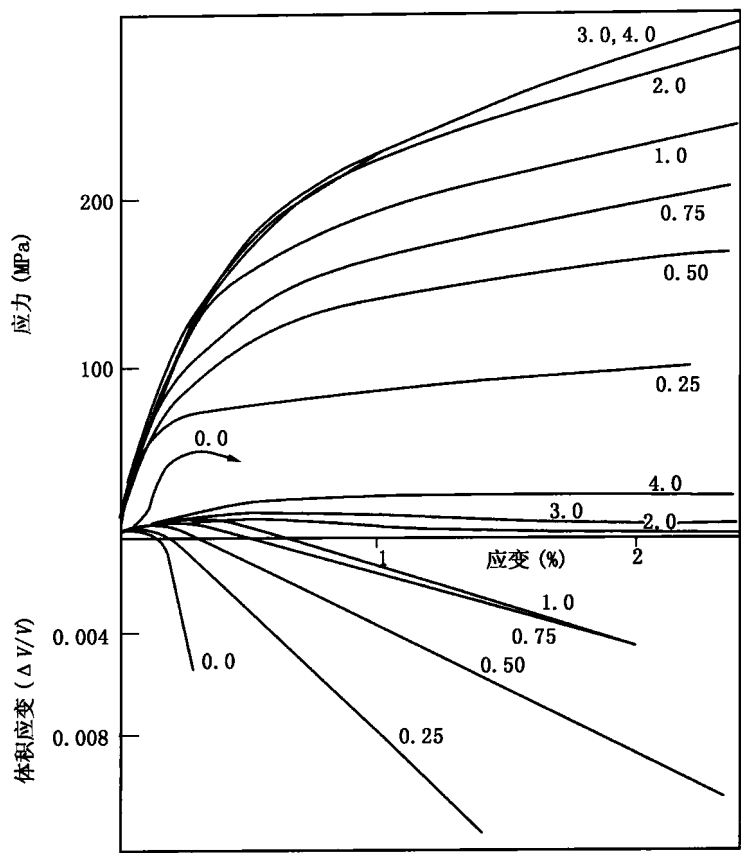


图 1-9 大理岩在一系列围压下的变形曲线
 图上部为应力—应变曲线，在低围压下与应力强烈相关，高围压下相关性消失；
 图下部是体积应变和轴向应变的关系图，表明围压增加逐渐抑制了扩容。在围压为 300MPa 时岩石完全塑性化了

图 1-9 为几种围压下大理岩变形的应力—应变曲线 (Scholz, 1968)。这种岩石在单轴压缩时以破碎的方式发生破坏，但当围压仅有 25MPa 时便可发生延性变形；高围压实验表明，岩石仍为延性变形，但与围压密切相关。其屈服强度和屈服后的应力—应变曲线坡度表示的应变硬化指数都随围压的升高而增大，直到围压达 300MPa 后二者不再发生变化。图中还给出了体积应变和轴向应变的关系图：在较低围压下，屈服后的轴向应变伴有稳定的扩容率，表明岩石内在发生微破裂作用，围压的作用是逐步限制扩容，直到 300MPa 时扩容消失。扩容和轴向应变的比值关系类似于围压对轴向应力—应变曲线的效应：都是在低围压下最大，并逐渐减小，直到在围压为 300MPa 时都消失。在较低的围压下，岩石发生脆性转变，随着围压逐渐增高到 300MPa，形变中的脆性作用逐渐减小，在围压为 300MPa 时，脆—塑性转换结束，岩石完全塑性化了。

增加温度的效应是降低脆性—延性过渡压力，图 1-10 表示花岗岩在围压 500MPa 和不同温度下的曲线 (见 Griggs、Turner 和 Heard (1960))。在室温下行为是脆性的，而在较高的温度下，可以产生显著的永久变形量，而不丧失载荷，在 800℃ 时材料几乎是完全延性

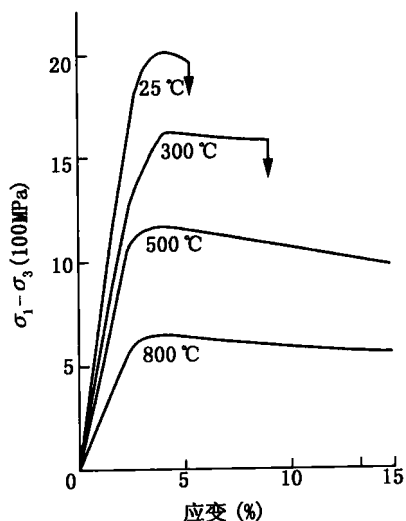


图 1-10 花岗岩在 500MPa 围压和各种温度下的应力应变曲线 (引自 Griggs, Turner 和 Heard)

的。脆性—延性过渡可作为压力和温度的函数来研究。应变率对它也有影响，在应变率非常低时，过渡压力降低。

在与下部地壳材料的行为相联系的地质学和地球物理学中，脆性—延性过渡是有很感兴趣的。由于此，对过渡容易观测到的材料给予了极大的注意。砂岩表明在室温下，约在 140MPa 时发生过渡（见 Murrell (1965)）。Handin 和 Hager (1957) 在室温 (1958) 和在高温时，对若干水成岩进行了研究。Griggs、Turner 和 Heard (1960) 在高温时，对多种岩石进行了广泛的实验。

MgO 单晶的变形研究表明，低温只有 $\{110\}$ ， $\langle 110 \rangle$ 易滑系统是活动的； $\{100\}$ ， $\langle 110 \rangle$ 滑移系只有在高温时才活化，此时其屈服强度在很大程度上取决于温度（图 1-11）； $\{110\}$ $\langle 110 \rangle$ 系统仅具备两个独立的滑移系，所以，只有当 $\{100\}$ $\langle 110 \rangle$ 系统也活化之后才能满足多晶塑性流动的 Mises - Taylor 准则。由此可知，

多晶体的 MgO 在室内温压条件下是脆性的。

Paterson 和 Weaver 研究了围压为 0, 200MPa 和 500MPa 条件下不同温度时 MgO 多晶的变形，其屈服应力如图 1-11 低温时，变形为突变式，围压对屈服强度有明显影响；当温度为 300°C 以上时，屈服强度随着温度提高而减小，围压对强度的影响也开始下降；在 650°C 时，多晶强度曲线和活化的 $\{100\}$ $\langle 110 \rangle$ 滑移系的屈服强度曲线相交；在该点，围压为 200MPa, 500MPa 的强度收敛到 $\{100\}$ $\langle 110 \rangle$ 活化系统的强度点，然后，温度升高，它们的强度彼此相近。从这一点开始，不再存在任何强度的围压效应，多晶体变成为完全塑性。

由钻孔和矿井中测得的地温资料及放射性元素的蜕变估计，地下岩层的温度梯度为：沉积岩中每米 0.04~0.02°C，花岗岩层中每米 0.03~0.013°C，玄武岩层中每米 0.015°C，橄榄岩层中每米约 0.008°C。不同地区岩层中的温度梯度由岩石的导热性，地岩中放射性元素的含量以及地层的构造运动状况而异，一般地说，在地下 40km 深处温度约为 600~1200°C。具体数值因地而异。

岩石从脆性向延性的转变温度范围随岩石性质而不同的。例如粗粒砂岩，在温度 1000°C 时还处于脆性状态；而有的细粒砂岩，在常温时是脆性的，到了 800°C 就出现了延性，如图 1-12，总的说来，随着温度的升高，屈服极限降低，如图 1-13。这说明弹性变弱，而塑性

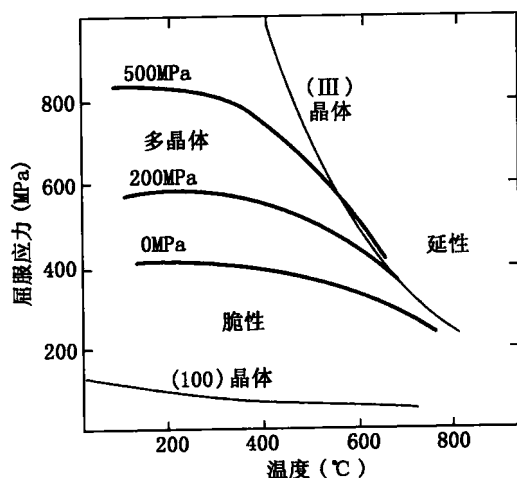


图 1-11 MgO 单晶与多晶脆—塑性转换时的相互关系。活化的易滑系在 $\{100\}$ 晶体内，难滑系在 $\{111\}$ 晶体内；只有当两个系统都活化了，多晶体才变为塑性 (据 Paterson 和 Weaver, 1970)

增强，一般地，岩石的弹性模量、柔性模量、强度、泊松比和波速，都随着温度的升高而降低，如图 1-14~图 1-19。

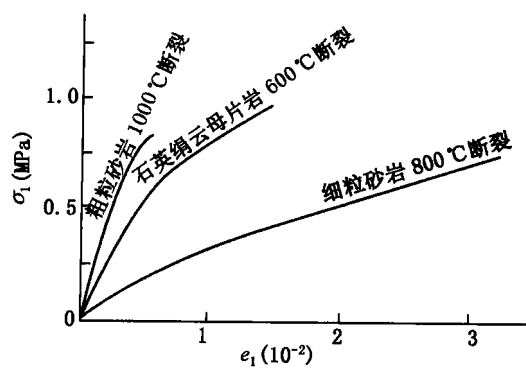


图 1-12 岩块在高温下的拉伸应力—应变曲线

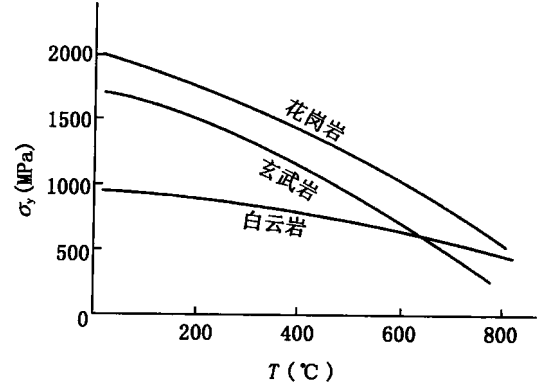


图 1-13 在 500MPa 围压下温度对岩块屈服极限的影响

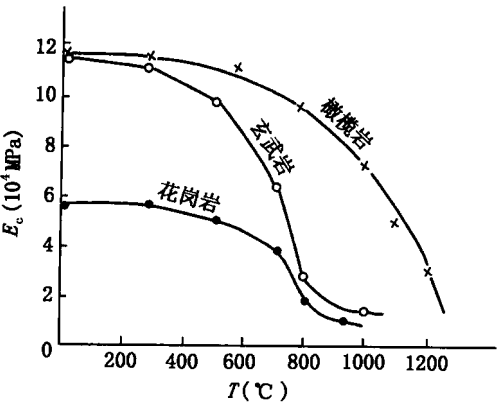


图 1-14 岩块弹性模量与温度的关系

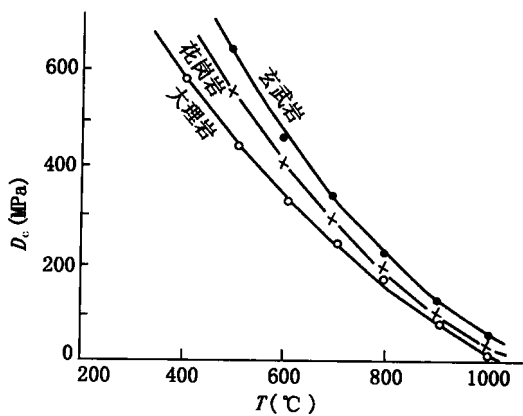


图 1-15 岩块柔性模量与温度的关系

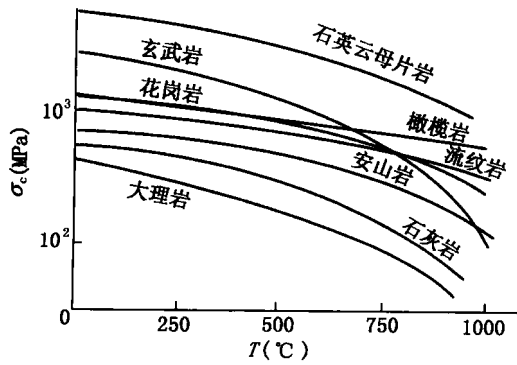


图 1-16 岩块抗压强度与温度的关系
(D. T. Griggs 等, 1960; 作者)

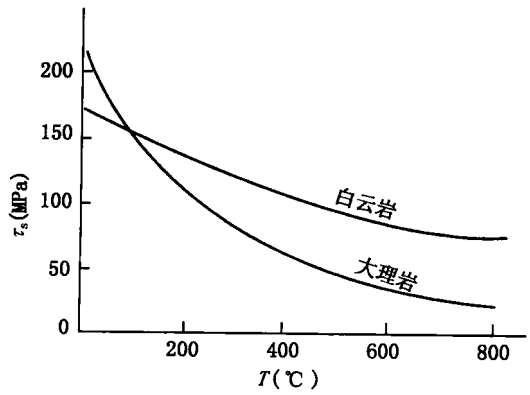


图 1-17 岩块抗剪强度与温度的关系
(H. C. Heard, 1980)

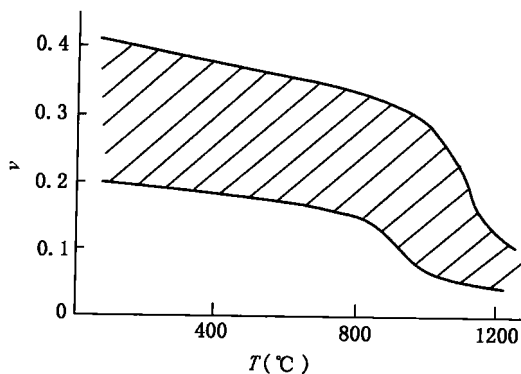


图 1-18 各种岩块泊松比与温度的关系

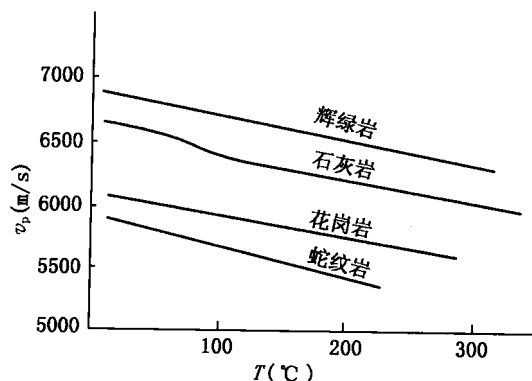


图 1-19 岩块中纵波速度与温度的关系

(М. П. Воларович, 1977)

第三节 岩石孔隙中的流体效应

在岩石孔隙中的流体压力效应和流体通过孔隙流动的影响是特别重要的。这是因地下的岩石介质一般条件下都含有孔隙和裂缝，它们中的某些可互相连接形成流体的渗流通道。流体充填在岩石介质中，沿着岩石介质中通道流动，可使岩块发生湿润、吸附和化学作用。岩块中的流体介质会严重地影响岩块的力学性质。其影响的大小，取决于多种因素：

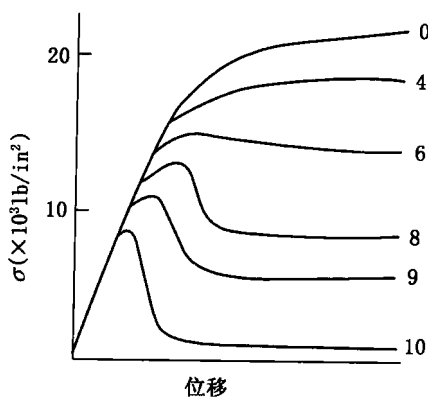


图 1-20 围压为 $10 \times 10^3 \text{ lb/in}^2$ ，石英岩中孔隙压力对脆性—延性过渡的效应。

曲线上的数值是孔隙压力值

如岩块种类和组成成分，浸入岩块中流体成分；岩块的孔隙率和吸水率；岩块吸水后引起的湿胀应变等等。一般地说，岩块的弹性模量和强度极限都随吸水率的增加而减少。某些岩块吸水后会出现由脆性向延性的转化，而这种变化由有效围压所控制，如图 1-20 表示了 $10 \times 10^3 \text{ lb/in}^2$ 围压下各种孔隙压力作用下石灰岩的应力—应变曲线，这些曲线表示出了随着孔隙压的增加岩石介质从脆性行为向延性行为的全面变化，见 Robinson^[11]。图中所示为石灰岩在 $10 \times 10^3 \text{ lb/in}^2$ 围压和各种孔隙压力作用下的应力—应变曲线。这些曲线表示出了随着压力的增加岩石介质从脆性行为到延性行为的全面变化。

岩石介质是由固体骨架与颗粒之间的空隙所组成的。由于地下水的存在，孔隙中部分或全部充满了孔隙水。此时，整个孔隙介质的变形不仅决定于各相的变形，而且还决定于各相之间的相互耦合作用。当外界扰动作用于部分或完全饱和的岩石介质上时，骨架与孔隙水中的反力也随之增加，这将引起孔隙水压力的变化并导致孔隙水的流动。孔隙水连续流动，压力传递到岩石骨架上，便会引起骨架的连续变形，当孔隙水压力增加得过高时，将会对岩石的破坏性状产生较大的影响。

Honndin 等人 (1963) 指出^[12]，假如岩石介质中有足够的渗透率允许孔隙流体的流动，并且孔隙系统是连续的，孔隙流体的作用是单纯力学性质的，(即不存在化学反应之类的问题)

题) 则有效应力原理所表示的破坏准则具有充分的合理性。这种情况下, 可以利用连续介质力学基本理论来处理岩石介质中孔隙流体的流动问题。

如果岩石单位体积的总量 V_T 分为实体部分 V_S 和空洞部分 V_V , 则孔隙率 ϕ 由 $\phi = V_V/V_T$ 来确定, 它一般是一个小数或百分数。

图 1-21 表示各种岩石的纹理结构与孔隙度的关系。其中有必要区分出: 由于岩石基质而形成的原生孔隙度 [图 1-21 (a)、图 1-21 (b)、图 1-21 (c) 和图 1-21 (d)] 和由于一些次生溶解现象 [图 1-21 (e)] 或在构造上受区域性裂隙 [图 1-21 (f)] 控制的“次生孔隙度”的区别。

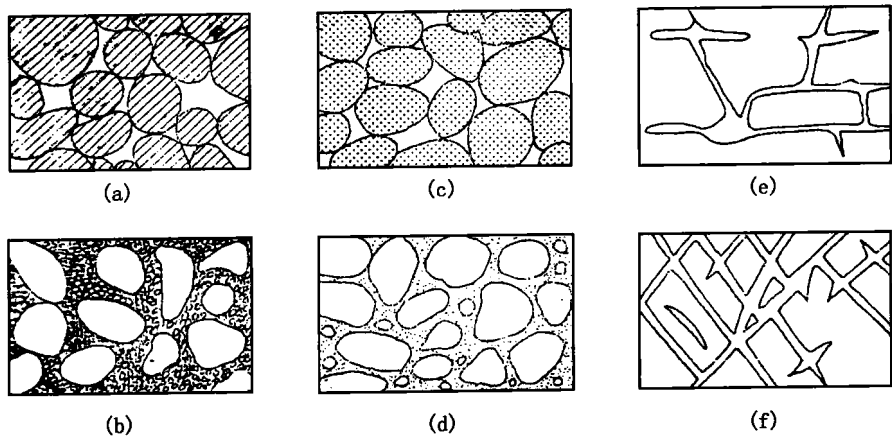


图 1-21 岩石的纹理结构与孔隙度之间的关系

- (a) 具有高孔隙度的经过良好分选的沉积物; (b) 具有低孔隙度的分选性差的沉积物; (c) 由本身具有孔隙的砾石组成的经过良好分选的沉积物, 因此这种沉积物整体都具有很高的孔隙度; (d) 经过良好分选的沉积物, 但它的孔隙已被其孔隙中所沉积的矿物质所堵塞; (e) 由于溶解作用而重新产生了孔隙的岩石; (f) 由于破碎而再度发生孔隙的岩石 [根据

迈因策尔 (Meinzer, 1923)]^[13]

表 1-1 以戴维斯 (1969) 所收集的数据为基础列出了各种地质材料的代表性孔隙度范围。一般来说, 岩石比土壤的孔隙度低; 由尖角和滚圆颗粒组成的砾石、砂和淤泥, 其孔隙度比富含扁平状粘土矿物的土壤孔隙度低。分选得不好的沉积 (图 1-21 (b)) 比分选得好的沉积 (图 1-21 (a)) 孔隙度低。

表 1-1 孔隙度值的范围

种 类	ϕ (%)	岩 石	ϕ (%)
非固结沉积物	25~40	裂隙玄武岩	5~50
砾石	25~50	喀斯特石灰岩	5~50
砂	35~50	砂岩	5~30
淤泥	40~70	石灰岩、白云岩	0~20
粘土		页岩	0~10
		裂隙结晶岩	0~10
		密实结晶岩	0~5

孔隙度对水力传导率 K 是一个重要的控制性影响因素。在分选得好的沉积沙层或裂隙岩石组中采样时可知, 具有较高孔隙度 ϕ 值的样品, 一般具有较高的 K 值。但是, 在区域性的规模上, 纵观所可能遇到的岩石和土壤类型谱可知, 并不总是存在这种关系的。例如富含粘土的土壤, 一般比砂或砾石土有较高的孔隙度, 但水力传导率却比较低。

当我们用宏观平均的方法来对地下水流动进行分析时, 实际上是意味着, 我们是在用一种理想的孔隙介质的代表性连续体来取代砂粒 (或粘土颗粒或岩石碎块) 的真实集合体。正因为这样, 我们才能够确定宏观参数 (诸如水力传导率) 和利用宏观定律 (诸如达西定律) 来提供微观动态问题的宏观平均描述。

采用流固两相混合物连续介质理论可以对流体饱和的多孔介质的动力响应问题做出科学的描述。

设流体饱和的多孔介质是由岩石骨架与孔隙流体两部分所组成, 孔隙的体积 V_v , 等于流体体积 V_f , 孔隙率可由孔隙体积占总体积的百分比来表示, 即:

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s} \quad (1-4)$$

式中 V_s ——固体体积。

设固体体积的位移分量为 u_i ($i = 1, 2, 3$), 则固体骨架的应变可定义为:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (1-5)$$

设流体相对于岩石骨架的位移为 w_i ($i = 1, 2, 3$), 则每单位土骨架体积内贮存的流体体积的变化为:

$$\xi = w_{i,i} \quad (1-6)$$

根据 Biot 理论 (Biot, 1941, 1956, 1962), 孔隙弹性介质的本构方程可以表示为:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} + \alpha M \delta_{ij} (\alpha \epsilon_{kk} \delta_{kk} + \xi) \quad (1-7)$$

$$\pi = M(\alpha \delta_{ij}\epsilon_{ij} + \xi) \quad (1-8)$$

式中 σ_{ij} ——应力张量分量;

π ——孔隙流体压力;

C_{ijkl} ——土骨架的弹性刚度:

$$C_{ijkl} = 2\mu\delta_{ik}\delta_{jl} + \lambda\delta_{ij}\delta_{kl} \quad (1-9)$$

式中 μ 、 λ ——土骨架的 Lamé 常数。

在 Biot 理论中, 方程式 (1-7) 和方程式 (1-8) 中的参量 α 与 M 分别定义为:

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \quad (1-10)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{n}{K_f} + \frac{\alpha - n}{K_s} \quad (1-11)$$

式中 K ——骨架的体变模量;

K_s 、 K_f ——分别表示为颗粒与流体的体变模量。

由于颗粒的体变模量比骨架体变模量高很多, 所以式 (1-10) 中的 α 非常接近于 1, 而式 (1-11) 中的 $M \simeq \frac{K_f}{n}$, 于是式 (1-7) 成为:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \pi \delta_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (1-12)$$

式中 σ'_{ij} ——有效应力。

式 (1-12) 与 Terzaghi 关于骨架变形由有效应力所控制的假设是一致的。由于变形包括了不同的两相, 所以能导出两个不同的动力平衡方程。

总体平衡方程可表示为:

$$\sigma_{ij,j} + (1-n)\rho_s r_i + n\rho_f r_i + (1-n)\rho_s \ddot{u}_i - n\rho_f \ddot{U}_i = 0 \quad (1-13)$$

式中 r_i ——每单位质量所受的体积力分量;

$\ddot{u}$ ——质点加速度;

$\ddot{U}$ ——流体加速度。

由 Darcy 定律 $w_i = k_{ij} h_{,j}$ 流体的稳态条件 $h_{,j} = \pi_{,j} + \rho_f r_j - \rho_f \ddot{U}_j$, 最终可以得到表示水岩两相介质动力平衡方程

$$\sigma_{ij,j} + \rho r_i - \rho \ddot{u}_i - \rho_f \ddot{w}_i = 0 \quad (1-14)$$

$$\pi_i + \rho_f r_i - \rho_f \ddot{u}_i + \frac{1}{n} \rho_f \ddot{w}_i + k_{ij}^{-1} \dot{w}_j = 0 \quad (1-15)$$

将式 (1-5)、式 (1-6)、式 (1-7)、式 (1-8) 代入上两式, 可以得到用位移表示的运动方程:

$$[C_{ijkl} u_{k,l} + \alpha M (\alpha u_{k,k} + w_{k,k}) \delta_{ij}]_{,j} + \rho r_i = \rho \ddot{u}_i + \rho_f \ddot{w}_i \quad (1-16)$$

$$[M (\alpha u_{k,k} + w_{k,k})]_{,i} + \rho_f r_i = \rho_f \ddot{u}_i + \frac{1}{n} \rho_f \ddot{w}_i + k^{-1} \dot{w}_i \quad (1-17)$$

相应的边界条件为:

$$\text{在 } S_{1i} \text{ 上} \quad u_i(x, t) = \bar{u}_i(x, t) \quad (1-18)$$

$$\text{在 } S_{2i} \text{ 上} \quad \sigma_i(x, t) = (C_{ijkl} u_{k,l} + \alpha \pi \delta_{ij}) n_j = \bar{\sigma}_i(x, t) \quad (1-19)$$

$$\text{在 } S_3 \text{ 上} \quad \pi(x, t) = M (\alpha u_{k,k} + w_{k,k}) = \bar{\pi}(x, t) \quad (1-20)$$

$$\text{在 } S_4 \text{ 上} \quad w_i(x, t) = \bar{w}_i(x, t) \quad (1-21)$$

在 R 的边界 S 上, S_{1i} 与 S_{2i} , S_3 与 S_4 为互补的子集, 而初始条件为

$$u(x, 0) = u_0(x) \quad \dot{u}(x, 0) = \dot{u}_0(x) \quad w(x, 0) = w_0(x) \quad \dot{w}(x, 0) = \dot{w}_0(x) \quad (1-22)$$

对于裂隙岩石中的水流分析, 可以从下列两个方法之一中得出。即宏观的连续介质力学方法, 或者用单个裂隙中以水流水力学为基础的非连续体方法。对于颗粒孔隙介质来说, 连续体方法包含裂隙介质要被一个代表性的连续体来代换的问题。其中水力传导率、孔隙率和压缩系数的空间确定值可被指定下来, 当裂隙空间的稠密度足够使裂隙介质能在水力上相似的状态下起颗粒孔隙介质的同样作用时, 这个方法才是有效的。虽然, 裂隙介质的代表性单元体积要比颗粒介质的大得多, 但其概念的实质是一样的。如果裂隙空间在一定给定的方向上是不规则的, 这个介质将呈现出非均质性的趋势。如果裂隙空间在某个方向上与其他方向上不同, 则这个介质将呈现为各向异性。斯诺 (1968, 1999)^[18,19] 已表示, 任何裂隙水流问题, 都可用达西定律和一个各向异性的水力传导率张量所构成的标准孔隙介质来解决。

如果裂隙的稠密度非常低, 则需要进行单个裂隙水流的分析, 这个方法已被用于土建筑施工中。其中岩石力学分析指出, 岩石的倾斜和裂缝可以使单个危险裂缝上的建筑物在水流压力作用下遭到彻底破坏。

在宽缝岩石中裂隙水流动常出现非达西水流的情况。特别是对于高速水流, 达西定律是不适用的。达西定律适用的数值范围可借助于“雷诺数 Re ”来加以确定。雷诺数 Re 是一个无量纲的数, 用以表示孔隙流体流动时惯性与粘滞力的比率, 通过孔隙介质的水流的雷诺数由下式确定: