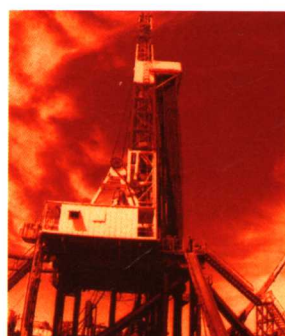


● 邓金根 程远方 陈勉 蔚宝华 著

井壁稳定预测技术



**JINGBI
WENDING
YUCE
JISHU**

石油工业出版社

井壁稳定预测技术

邓金根 程远方 陈 勉 蔚宝华 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了井壁失稳的力学机理和预防井塌的力学原理,包括地应力及其确定方法、岩石材料的力学特性及测定方法,井壁围岩的应力状态,井壁的坍塌及破裂,井壁的塑性缩径和黏弹性变形等。

本书可供从事井壁坍塌研究和组织现场施工的技术人员参考,也可作为高等院校师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

井壁稳定预测技术/邓金根等著.
北京:石油工业出版社,2008.4
ISBN 978-7-5021-6518-5

- I. 井…
- II. 邓…
- III. 井壁-稳定性-预测技术
- IV. TD26

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 032384 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.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 10.25

字数: 260 千字 印数: 1—1000 册

定价: 48.00 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

泥页岩井壁稳定问题是全球性普遍问题。因此,研究解决这类问题的办法具有重要意义。

造成井壁失稳的原因很多,包括天然的和人为的两个方面。在天然因素方面有:地质构造类型和原地应力、地层的岩性和产状、含黏土矿物的类型、弱面的存在及其倾角、层面的胶结情况、地层强度、裂隙节理的发育情况、孔隙度、渗透性及孔隙中的流体压力等。在人为因素方面有:钻井液的性能(失水、黏度、流变性、密度)、钻井液的成分与泥页岩化学作用的强弱(水化、膨胀作用)、井周钻井液侵入带的深度和范围、井眼裸露的时间、钻井液的环空返速、对井壁的冲蚀作用、循环动压力和起下钻的波动压力、井眼轨迹的形状、钻柱对井壁的摩擦和碰撞等。

井壁失稳问题,从广义上讲应包括脆性泥页岩井壁的坍塌剥落、塑性泥页岩井壁的缩径和井眼的黏弹塑性变形及地层在钻井液压力作用下的水压破裂(多发生在砂岩层段)。由于问题的复杂性,不可能对上述影响因素一一做出定量的分析。

解决井壁失稳问题主要应从钻井液化学和岩石力学两个方面入手,抓住主要影响因素进行分析,才能获得完满的结果。

长期以来,由于种种原因,研究的焦点多集中于化学防塌机理方面,为此钻井液研究者进行了大量的工作,从化学角度出发,研究出抑制泥页岩的水化、分散和膨胀以及实现离子活度平衡的新型钻井液处理剂、钻井液体系和配方,使井眼失稳现象大为减少,井壁失稳技术取得了长足进展。但是,至今仍未能很好地解决水化程度弱的脆性泥页岩井壁坍塌问题,其中的重要原因是未能强化从力学上研究防塌机理以及从化学和力学耦合的角度研究不同类型泥页岩的防塌措施。

井壁岩石失稳垮塌,一般都可归结为井壁岩石所受的应力超过它在井眼状态下的强度的结果,钻井液的侵蚀作用会减弱泥页岩的强度,同时产生的水化应力会改变泥页岩中的应力状态。只有从钻井液化学和围岩力学的耦合研究才能确定出在给定钻井液体系下为保持井壁稳定所需的合理钻井液密度。

近年来,国外不少学者已转向从力学或力学与化学的耦合作用角度去研究井壁失稳的机理,许多钻井液公司也在这方面下了不少功夫,力图在预防井壁失稳的技术上有所突破。

本书是向从事井壁防塌研究和组织现场施工的技术人员,包括钻井技术人员和钻井液技术人员,介绍一些井壁失稳的力学机理和预防井塌的力学原理,并力求结合国内外的最新动向和最新的研究成果(包括我们自己的研究成果),为吸收、理解和掌握这方面的基本理论、原理和方法搭桥铺路。为了使读者易于掌握、消化,我们在编写时尽量避免复杂的数学、力学推导过程,只给出主要的结论性的公式或结果。

本书的内容包括地应力及其确定方法、岩石材料的力学特性及其测定方法、井壁围岩的应力状态、井壁的坍塌和破裂、井壁的塑性缩径和黏弹性变形、钻井液化学和岩石力学对井壁稳定的耦合作用、地层各向异性对岩石强度和井壁坍塌的影响、利用测井资料对井壁地层稳定的连续预测等几章。

由于编写时间仓促和编者水平所限,难免有漏误之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 岩石的力学特性及强度准则	(1)
第一节 三向应力作用下的岩石力学特性.....	(1)
第二节 岩石的拉伸破裂试验.....	(4)
第三节 温度对岩石力学性质的影响.....	(4)
第四节 有效应力的概念.....	(6)
第五节 有效应力系数.....	(7)
第六节 摩尔—库仑 (Mohr—Coulomb) 强度准则	(8)
第七节 德鲁克—普拉格 (Drucker—Prager) 准则	(10)
第八节 有孔压岩石的强度准则.....	(11)
第二章 地应力的测定方法及分层规律的数值模拟计算	(12)
第一节 现场水力压裂试验法测定地应力.....	(12)
第二节 声发射凯塞尔效应法测定地应力.....	(14)
第三节 部分油田区块的实测地应力值.....	(20)
第四节 分层地应力计算模型.....	(21)
第五节 最大水平主地应力方向的确定.....	(25)
第三章 井壁坍塌和破裂的力学分析	(31)
第一节 井壁围岩中的应力.....	(32)
第二节 井壁上的应力.....	(33)
第三节 井壁应力的非线性修正.....	(33)
第四节 井壁坍塌压力的计算.....	(36)
第五节 地层破裂压力的计算.....	(40)
第六节 地层坍塌压力和破裂压力的计算及影响因素分析.....	(41)
第四章 地层强度参数的测定	(47)
第一节 室内三轴强度试验测定岩石的强度参数.....	(47)
第二节 用人造岩心确定泥页岩的强度.....	(52)
第三节 用露头岩心确定泥页岩的强度.....	(53)
第四节 声波法测定岩石的强度参数及弹性参数.....	(55)
第五章 利用测井资料建立地层的孔隙压力、坍塌压力和破裂压力剖面	(61)
第一节 建立三个地层压力剖面的 BSMA 程序	(61)
第二节 利用测井资料确定地层坍塌压力及破裂压力剖面.....	(63)
第三节 我国部分油田三个压力剖面的确定及井壁稳定性分析.....	(66)
第六章 泥页岩水化规律及对井壁稳定影响的数值计算	(76)
第一节 泥页岩的矿物组成及结构特点.....	(76)
第二节 泥页岩水化的机理.....	(77)
第三节 泥页岩井壁吸水扩散方程的建立.....	(78)

第四节	泥页岩吸水扩散系数的测量方法	(80)
第五节	泥页岩吸水膨胀系数的实验测定	(85)
第六节	泥页岩弹性模量和强度参数与其含水量的相关关系式	(86)
第七节	井眼周围泥页岩地层吸水随时间的变化规律	(89)
第八节	泥页岩井壁应力的力学化学耦合计算模式及数值解法	(93)
第九节	泥页岩地层吸水后井眼周围的应力分布规律	(95)
第十节	泥页岩水化坍塌压力计算及坍塌周期预测	(99)
第七章	煤层井壁稳定的离散单元法分析	(102)
第一节	离散单元法的基本原理	(102)
第二节	煤层井眼的离散单元计算	(103)
第三节	结论	(110)
第八章	地震层速度钻前预测井壁稳定性	(111)
第一节	相似构造选择	(111)
第二节	声波测井数据聚类分层	(111)
第三节	层速度偏差校正	(113)
第四节	层速度单因素钻前井壁稳定预测模型与应用	(116)
第五节	层速度钻前井壁稳定预测神经网络模型与应用	(120)
第九章	地震原始记录钻前预测井壁稳定性	(131)
第一节	利用地震记录构建测井曲线	(131)
第二节	声波速度与泥质含量、孔隙度的关系	(138)
第三节	有效流体压力	(139)
第四节	利用常规井壁稳定力学方法预测钻前井壁稳定	(139)
第五节	利用非线性函数曲线拟合预测钻前井壁稳定	(145)
第六节	应用实例	(147)
第十章	岩盐井眼塑性及黏弹性缩径变形速率的计算	(150)
第一节	塑性地层的井眼缩径	(150)
第二节	黏弹性地层的井眼变形	(152)

第一章 岩石的力学特性及强度准则

岩石力学性质主要是指岩石的变形特征及岩石的强度。由于在石油工程中，井壁稳定、出砂分析、水力压裂、储层物性变化等都与岩石力学性质密切相关，因此有必要研究岩石的力学性质及其在物理环境下应力场中的反映。影响岩石力学性质的因素很多，例如岩石的类型、组构、围压、温度、应变率、含水量、载荷时间以及载荷性质等。要研究这些复杂因素对岩石力学性质的影响，只能在实验室内严格控制某些因素的情况下进行。

岩石的变形特性，最直观的表达方法是通过应力—应变关系曲线及应变随时间变化的曲线来表示。通常首先研究在常温、常压（即室温与通常大气压）条件下岩石的力学性质，然后再考虑其他影响因素下岩石的力学性质。这样才能逐渐弄清在地质条件下，综合因素对岩石力学性质的影响。

岩石在常温、常压下一般产生脆性破坏，但深埋地下的岩石却表现为明显的延性。岩石这一性质的变化是由于所处物理环境的改变造成的。

所谓脆性与延性至今尚无十分明确的定义。一般所谓脆性破坏是指由弹性变形发生急剧破坏，破坏后塑性变形较小。延性是指弹性变形之后产生较大的塑性变形而导致破坏，或直接发展为延性流动。所谓延性流动是指有大量的永久变形而不至于破坏的性质。对于岩石而言，破坏前的应变或永久应变在 3% 以下可作为脆性破坏，5% 以上作为延性破坏，3%~5% 为过渡情况。

第一节 三向应力作用下的岩石力学特性

由于地下的岩体和井壁围岩均处于三向应力状态，所以对岩石力学性质的测定不能靠简单的单轴压缩试验方法，而必须在一定的围压作用下（必要时还要考虑温度的作用）进行试验测定。真三轴试验（岩石上三个主方向的作用力均不等）十分复杂，一般均不采用。普遍采用的是常规三轴压缩试验方法，一般用圆柱形岩样，在其横向施加液体围压，即在水平的两个主方向上的应力相等且等于围压 p_c ，如图 1-1 所示。

如果上下垫块是带孔可渗透的，亦可通入孔隙流体压力以研究孔隙压力的影响。

在试验过程中把岩样放在高压室中先对岩样四周用围压油加压至所需的值 p_c （需要时亦可加孔隙压至所需的 p_0 值，并将岩样加热到所需的温度 T ），然后在压机下逐渐增大垂向载荷以升高 σ_1 值，并记录下岩样的轴向压缩应变 ϵ_1 值。

$$\epsilon_1 = \frac{\text{垂向变形量}}{\text{岩样长度}} \quad (1-1)$$

据此可绘制三轴加载时岩样的应力—应变曲线图（如图 1-2 所示）。由此图可见，岩石破坏前的峰值最大轴向应力 σ_1 就是该围压下的强度值，而偏离弹性拐弯点的应力称为该围压下的屈服应力，当增大围压时，不但岩石的强度峰值应力增加，同时塑性也增大（破坏前的应变加大），其中 σ_3 曲线接近于理想塑性情况，而曲线表现为岩石在塑性变形过程中呈现

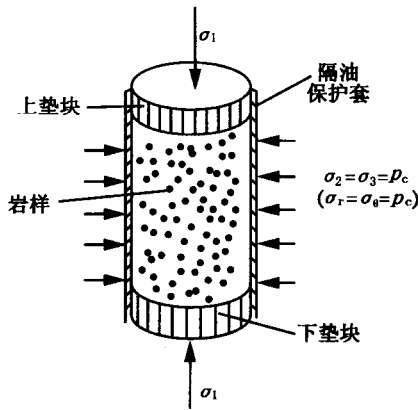


图 1-1 常规三轴压缩实验
($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$)

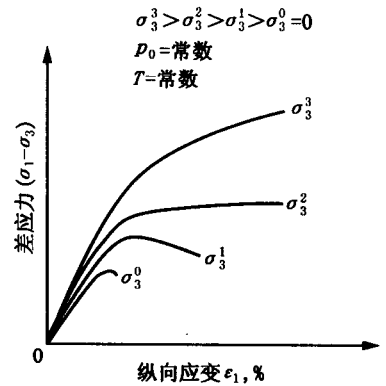


图 1-2 三轴压缩的
应力—应变图

明显的硬化。曲线中弹性段直线的斜率等于该岩石的静态弹性模量 E (MPa)。如果同时也记录下岩样的横向膨胀应变 $\epsilon_2 = \epsilon_3$ 值，则可按下式求得该岩石的泊松比 μ 值：

$$\mu = -\frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} \quad (1-2)$$

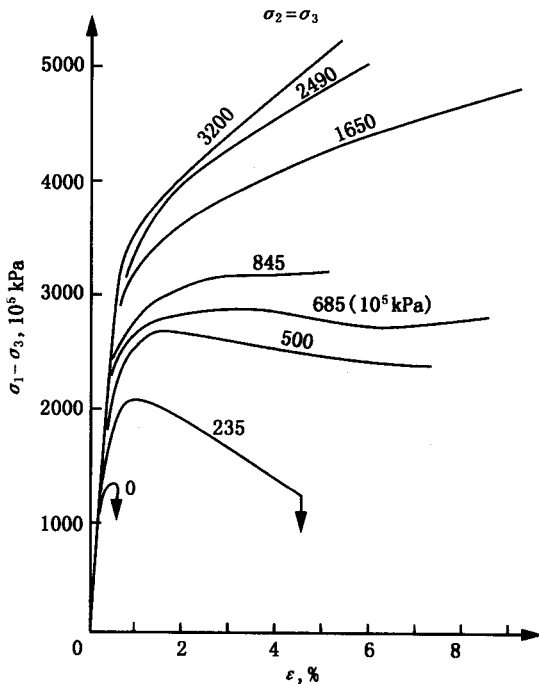


图 1-3 为 Carrara 大理石在不同围压下的
应力—应变曲线

在围压下岩石力学性质的实验，首先是德国 V. Karman (1912) 完成的。他所采用的常规三轴应力实验方法，当前仍广泛应用。图 1-3 为 Carrara 大理石，图 1-4 为克朗波特石灰岩，图 1-5 为白云岩在不同围压下的应力—应变曲线。

实验结果表明：随着围压的增加，岩石逐渐从脆性转化为延性。Carrara 大理岩在围压为零或较低情况下，岩石呈现出脆性状态；围压增加到 50MPa 时，大理岩显示出由脆性转化为延性的过渡状态；围压增加到 68.5MPa 时，则大理岩呈现出延性流动；围压为 165~320MPa 时，均出现应变硬化。这充分表明围压增大是脆性转化为延性的条件之一。但随着岩石类型的不同，其转化围压值也各不相同。例如 Carrara 大理石达到延性流动围压为 68.5MPa (图 1-3)，而白云岩约为 145MPa (图 1-5)。

岩石强度及破坏前应变均随着围压的增加而增加。例如白云岩，当围压由零增加到 145MPa 时，如图 1-5 (a)，其强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 几乎增加一倍以上；而围压为 200MPa 时，强度进一步增大，但强度增大并不与围压成正比关系。大理石及石灰岩亦有类似情况。大理

石破坏前应变也随着围压的增大而增大,当围压为零时,破坏前应变约为0.3%;围压增大到68.5MPa,应变约为7%;当围压增大到165MPa时,破坏前应变达到9%。大多数岩石随着围压的增加其破坏前应变可达10%以上。白云岩围压与破坏前应变之间几乎成直线关系,如图1-5(b)所示。但并非所有岩石围压与破坏前应变均成线性关系。

围压还影响着岩石的残余强度(residual strength)。从图1-3、图1-4、图1-5可以看出,若围压为零或很低时,应力值达到峰值后,其曲线迅速下降为零,说明岩石在这种条

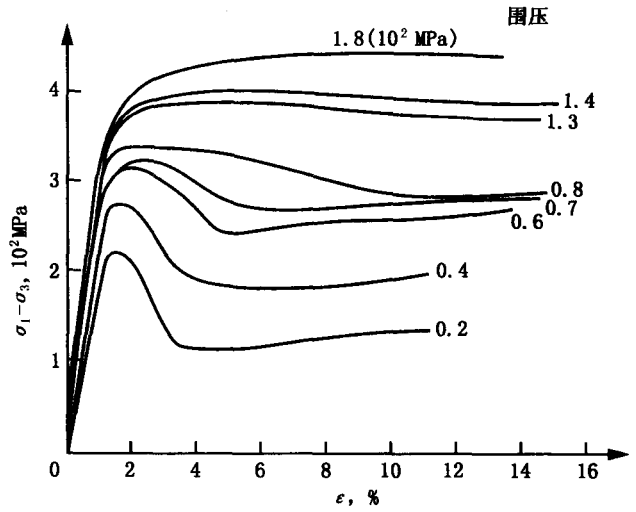


图1-4 克朗波特石灰岩在不同围压下的应力—应变曲线

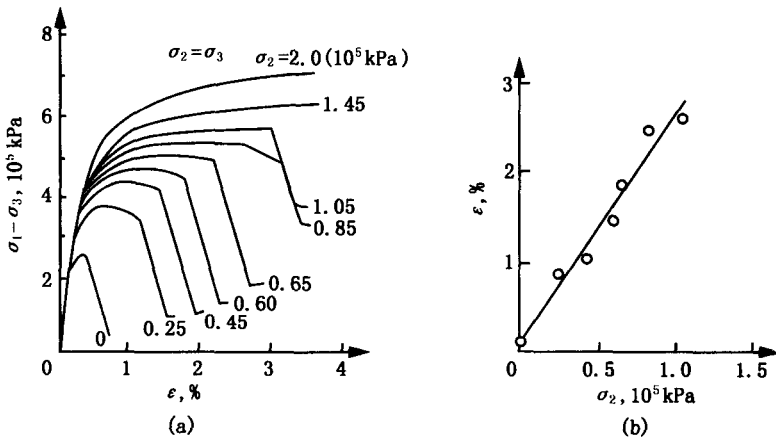


图1-5 白云岩在不同围压下的应力—应变曲线

件下不存在残余强度。但随着围压加大,岩石的残余强度逐渐增加,直到产生延性流动或应变硬化。

围压对岩石的弹性模量的影响一般可分为两种情况:对坚硬低孔隙度的岩石影响较小,而对软弱高孔隙度的岩石影响较大。Hoffmann (1958)对砂岩进行实验指出:随着围压增加,弹性模量可提高20%,接近破坏时则下降20%~40%。但总的来说,随着围压增加,岩石的弹性模量 E 及泊松系数 μ 等都有一定程度的提高。

将上述实验结果归纳如下:

- (1) 随着围压的增加,其破坏强度、屈服应力及延性都增加。
- (2) 在三轴不等压情况下,随着中间主应力 σ_2 的增加,其破坏强度、屈服应力增加,但延性减小。
- (3) 在三轴不等压情况下,随着最小主应力 σ_3 增加,其破坏强度及延性增加,但屈服应力保持不变。

第二节 岩石的拉伸破裂试验

岩石的抗拉强度是指试件在单轴拉伸条件下达到破坏时的极限应力。可采用直接或间接方法来测定岩石的抗拉强度。

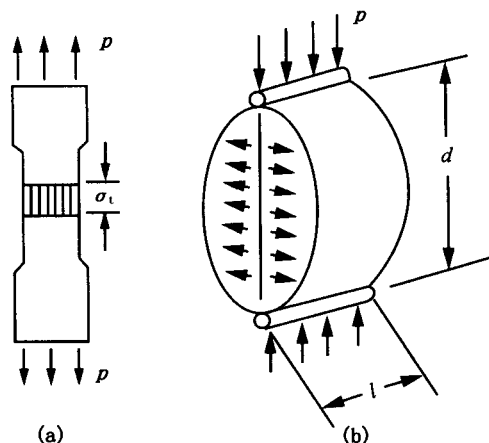


图 1-6 岩石的拉伸实验
(a) 直接法; (b) 间接法

直接法在原理上类似于金属的拉伸破坏实验,但最大的困难是如何使岩石试件夹紧在拉力机中,同时又要使载荷平行于试件的轴线,使岩石试件处于均匀分布的拉应力状态之中,而不使试件产生弯曲或扭转。一般利用水泥及环氧树脂等胶结物将岩石试件的端部与夹具胶结在一起,通过钢丝绳沿轴线方向对试件施加拉力。拉伸试件形状如图 1-6 (a) 所示。若试件破坏时的拉力为 p_t , 试件的抗拉强度 σ_t 可表示为

$$\sigma_t = p_t / A \quad (1-3)$$

由于直接法进行拉伸破坏实验有一定困难,因此一般采用间接法进行,如图 1-6 (b) 所示。

间接法一般采用劈裂法,又称巴西实验法 (Brazilian test)。将岩石试件切割成圆柱体,沿圆柱体直径方向均匀施加载荷,即将试件横置于压力机压头上,在试件上下承压板上各放置一条钢条,然后施加压力至试件沿直径方向劈裂为止。若假设材料为均匀、各向同性的弹性体,用弹性理论即可得出抗压强度为

$$\sigma_t = 2p / (\pi \cdot d \cdot l) \quad (1-4)$$

式中 d ——试件直径;
 l ——试件厚度;
 p ——破坏载荷。

岩石抗拉强度远远低于抗压强度,一般前者为后者的 $1/10 \sim 1/20$,甚至为 $1/50$ 。其抗拉强度低的原因主要是受岩石内部结构的影响,一般情况由于岩石内部微裂隙、孔隙较为发育,这种缺陷对抗拉强度降低尤为敏感,在拉应力作用下具有削弱岩石强度的效应。岩石的抗拉强度还受到岩石本身内部组分的影响,例如矿物成分、颗粒间胶结物的强度都影响岩石的抗拉强度。

在钻井过程中由于钻井液密度或井内流体循环波动压力过大所造成地层破裂、井壁有效的周向应力超过了地层的拉伸强度所致,所以掌握岩石的抗拉强度对于分析井壁破裂也是很重要的。

第三节 温度对岩石力学性质的影响

地球内部由于放射性物质蜕变等原因,使温度随着深度而逐渐升高。地表以下温度梯度随着地区而不同。一般约为 $20 \sim 30^\circ\text{C}/\text{km}$,在亚洲大陆地温梯度平均约为 $25^\circ\text{C}/\text{km}$,大庆油田约为 $50^\circ\text{C}/\text{km}$,区域变质地区可达 $40 \sim 80^\circ\text{C}/\text{km}$ 。若按这些数字估计,在几千米到十

几千米深处，温度可达 100℃ 以上，使岩石力学性质与常温、常压下相比有明显差别。即使典型的脆性岩石，在这种物理环境下也可能会转化为延性破坏。因此，研究温度与围压因素影响下岩石力学性质，对理解石油工程中地下岩石的力学性质具有十分重要的意义。

实验表明：岩石在一定围压下，随着温度的升高，无论是拉伸或压缩，其屈服应力与强度均要降低，加速了由脆性向延性转化。其影响程度随着岩石种类及受力状态的不同而各异。

图 1-7 为大理岩、花岗岩、辉长岩在围压 5×10^2 MPa 条件下，温度变化时，拉伸与压缩的应力—应变曲线。从实验结果可以看出，在室温（25℃）下，其屈服应力与强度较高，随着温度升高，屈服应力与强度下降，并且逐渐转化为延性。例如花岗岩在围压为 5×10^2 MPa，室温为 25℃ 时，强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 可达到 2×10^3 MPa，且出现脆性破坏；但温度升高到 800℃，强度下降为 6×10^2 MPa 左右，约为室温（25℃）下强度的 1/3 左右，且出现延性流动。

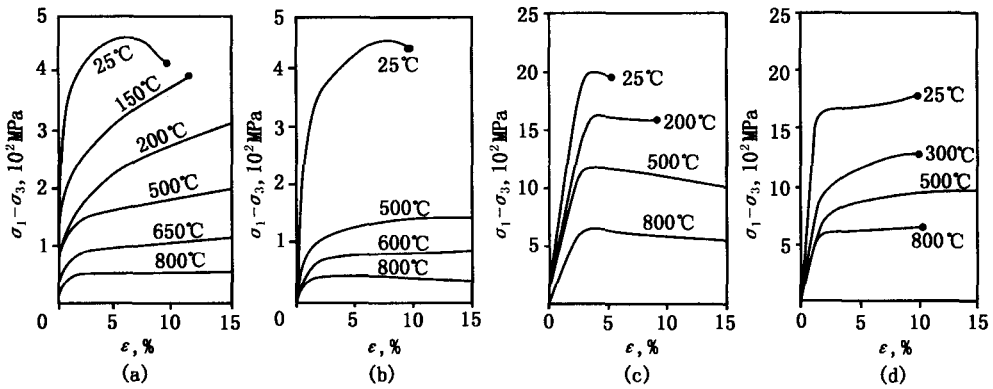


图 1-7 大理岩、花岗岩、辉长岩的应力—应变曲线

因此一定围压下温度是由脆性转化为延性的主要因素。温度升高产生延性的原因是由于岩石内部分子的热运动增强，因此，削弱了它们之间的内聚力，使晶粒面容易产生滑移的缘故。图 1-8 为索伦霍芬石灰岩在围压为 3×10^2 MPa 下，温度变化时拉伸及压缩的应力—应变

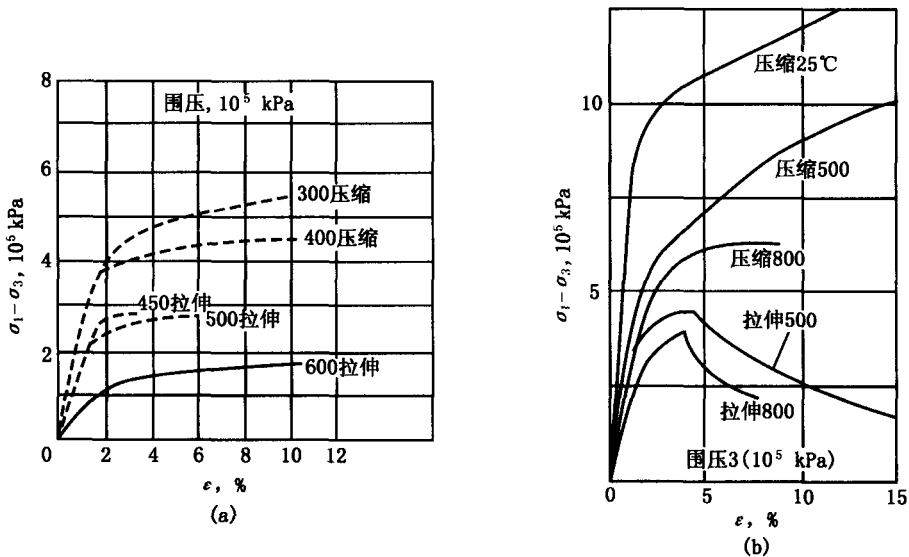


图 1-8 索伦霍芬石灰岩应力—应变曲线

变曲线。这些结果不仅说明了温度对强度、屈服应力及脆性转化为延性的影响，而且还说明了不同类型的岩石其影响程度不同。例如，在围压 $3 \times 10^2 \text{MPa}$ 下，对压缩而言，索伦霍芬石灰岩在 400°C 左右即出现延性，其强度为 $(4 \sim 5) \times 10^2 \text{MPa}$ 左右；而白云岩却需要达到 800°C 才出现延性，强度为 $5.5 \times 10^2 \text{MPa}$ 左右。对拉伸而言，索伦霍芬石灰岩 500°C 出现延性，强度为 $(2 \sim 8) \times 10^2 \text{MPa}$ 左右；白云岩在同样温度下仍处于脆性状态，强度为 $4.8 \times 10^2 \text{MPa}$ 左右。即使同一种岩石，在同一围压下拉伸时脆性转化到延性所需温度远远高于压缩时，且压缩的强度远远大于拉伸。

第四节 有效应力的概念

有效应力的概念最早是特查希 (Terzaghi) 于 1923 年在研究土力学时提出的，他认为对于土来说：

(1) 增加静水外压和减小相同量的孔隙压力所产生的土的体积变化是一样的。

(2) 土的剪切强度只是取决于正应力 σ 和孔隙压力 p_0 的差值，这个差值就是有效应力，即

$$\sigma' = \sigma - p_0 \quad (1-5)$$

阿德里 (Aldrih) 1967 年对 Berea 砂岩的试验结果 (见表 1-1) 也证实了这一点。表中的数据说明了对于这种砂岩不论试验的围压多大，只要有效应力相同，其强度也相同。

表 1-1 孔隙压力对岩石强度的影响

围压 σ , MPa	孔隙压力 p_0 , MPa	有效应力 σ' , MPa	岩石强度, MPa
0	0	0	59.80
34.5	34.5	0	58.40
20.7	0	20.7	17.10
34.5	13.8	20.7	16.91
44.8	24.1	20.7	16.67
69.0	48.3	20.7	16.71
34.5	0	34.5	211.00
48.3	13.8	34.5	211.80
69.0	34.5	34.5	212.70
55.2	0	55.2	253.80
69.0	13.8	55.2	250.40

美国学者汉丁 (Handin) 1957 年对不同沉积岩石所做的实验后认为特查希规律，式 (1-5) 只在下述条件下成立：

(1) 孔隙流体对岩石中的矿物成分是惰性的，孔隙压力的作用属于纯力学效果。

(2) 岩石的渗透性足以使流体充满岩石，进而使孔隙中的流体在岩石形变期间能自由地流进流出，从而保持孔隙压力恒定，处处相等。

(3) 岩石中的孔隙是互相连通的，保证孔隙压力能完全传送到整个岩石的骨架颗粒上。

第五节 有效应力系数

毕奥特 (Biot) 提出如果这些条件得不到满足时, 应该采用新的有效应力定律, 即

$$\sigma' = \sigma - \alpha p_0 \quad (1-6)$$

式中的 α 称为有效应力系数 (Biot 系数), 并有

$$f \leq \alpha \leq 1 \quad (1-7)$$

式中 f ——岩石的孔隙度。

必须指出, 孔隙压力只对正应力有影响, 而对剪应力则不产生作用。

进一步的研究发现 α 值与岩石容积的压缩率 C_b 和骨架压缩率 C_r 有关, 即

$$\alpha = 1 - \frac{C_r}{C_b} \quad (1-8)$$

或
$$\alpha = 1 - \frac{E/(1-2\mu)}{E_i/(1-2\mu_i)} \quad (1-9)$$

式中 E 和 E_i ——岩石容积的和骨架材料的弹性模量;

μ 和 μ_i ——岩石容积的和骨架材料的泊松比。

以后会讲到可根据声波在岩石中传播的纵、横波速来计算有效应力系数的方法, 这里先写出它的表达式, 即

$$\alpha = 1 - \frac{\rho_b [3v_{pb}^2 - 4v_{sb}^2]}{\rho_r [3v_{pr}^2 - 4v_{sr}^2]} \quad (1-10)$$

式中 ρ_b, ρ_r ——岩石容积的和骨架材料的密度;

v_{pb}, v_{pr} ——岩石容积的和骨架材料的纵波速度;

v_{sb}, v_{sr} ——岩石容积的和骨架材料的横波速度。

式 (1-10) 也可改用纵、横波时差来表达, 因声波时差只是声波速度的倒数。式 (1-10) 提供了可根据全波列声波测井资料和密度测井曲线推算各层的有效应力系数的方法。

上面已讲过, 若孔隙流体对于岩石说来非化学惰性时, 则孔隙压力的作用就不是纯力学性质的, 例如泥页岩或黏土矿物胶结的砂岩便是如此, 蒙脱石吸水膨胀将会堵塞孔压传递的孔道, 从而使有效应力系数值 α 难以确定。

泥页岩遇水, 由于渗透水化和表面水化作用会产生水化应力 p_π , 彻勒弗特 (Chenevert) 假定这种水化应力是一种静水压力, 其大小可按下式计算

$$p_\pi = \frac{RT}{V} \ln \left(\frac{p_w}{p_s} \right) \quad (1-11)$$

式中 R ——气体常数;

T ——绝对温度;

\bar{V} ——纯水的偏摩尔体积；

p_s, p_w ——页岩和纯水的蒸汽压。

彻勒弗特在分析泥页岩的井壁不稳定性时，把水化应力作为孔隙压力处理。

最近莫笛 (Mody) 和希尔 (Hale) 又进一步提出泥页岩井壁附近的孔隙压力可按下式推算，即

$$p = \frac{RT}{\bar{V}} \ln \left[\frac{(A_w)df}{(A_w)sh} \right] + p_0 \quad (1-12)$$

式中 p_0 ——远场地层中的孔隙压力；

$(A_w)df$ ——钻井液的化学势 (水的活度)；

$(A_w)sh$ ——泥页岩中水的活度。

并用 $\alpha \frac{1-2\mu}{1-\mu} (p-p_0)$ 叠加到井壁的切向应力 σ_θ 和垂向应力 σ_z 中去，以实现力学和化学应力的耦合计算。

式 (1-12) 中第一项的符号可为正或负，因此近井壁岩石孔隙压力可能比远场地层中的孔隙压力大，也可能比它小，要视钻井液与泥页岩中的水的活度大小而定。

此外，欠压实的超压页岩，由于其原始的孔隙压力比钻井液柱的当量压力大，井壁的有效应力变为负值，这是它产生失稳破坏的主要原因。

第六节 摩尔—库仑 (Mohr—Coulomb) 强度准则

岩石的破坏一般表现为剪切破坏，如图 1-9 所示。

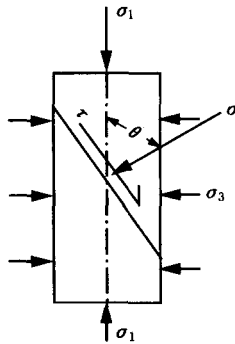


图 1-9 岩石的
剪切破坏

剪切面的法向和 σ_1 的夹角为 θ ，法向应力为 σ_1 。

根据库仑的研究，认为岩石破坏时剪切面上的剪应力 τ 必须克服岩石的固有剪切强度 C 值 (亦称为黏聚力)，加上作用于剪切面上的摩擦力 ($\mu \cdot \sigma$)，即

$$\tau = C + \mu \cdot \sigma \quad (1-13)$$

式中 τ ——剪应力，MPa；

μ ——岩石的内摩擦系数， $\mu = \text{tg}\phi$ ；

C ——固有剪切强度，MPa。

式 (1-13) 称为摩尔—库仑强度准则，可用两个以上不同围压的三轴试验进行确定 (图 1-10)。

例如我们用相同的岩样做了三次试验：

- (1) 围压 $p_c = \sigma_3^0$ ，峰值强度 = σ_1^0 。
- (2) 围压 $p_c = \sigma_3^1$ ，峰值强度 = σ_1^1 。
- (3) 围压 $p_c = \sigma_3^2$ ，峰值强度 = σ_1^2 。

在 (σ, τ) 直角坐标上可画出三个莫尔圆，在 p_c 值不是太大的情况下与这三个圆相切的包络线一般呈直线，其方程便是式 (1-13)，该直线的纵轴截距等于岩石的黏聚力 C ，而其倾斜角便是岩石的内摩擦角 ϕ 。该直线的法线的倾角等于 2θ ，并有

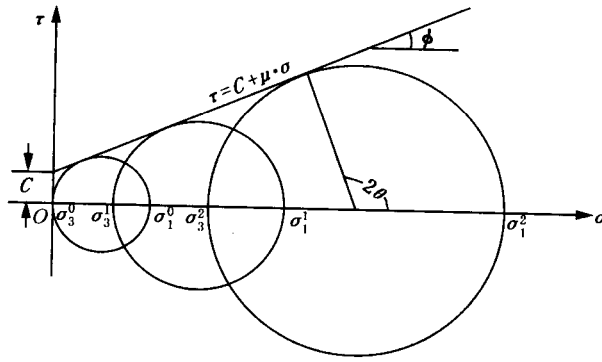


图 1-10 摩尔—库仑强度包络线

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (1-14)$$

摩尔—库仑准则，即式 (1-13) 可以用主应力 σ_1 和 σ_3 改写成如下的形式，即

$$\sigma_1 [(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} - \mu] - \sigma_3 [(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu] = 2C \quad (1-15)$$

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \sigma_3 + \sigma_c \quad (1-16)$$

$$\sigma_c = \frac{2C \cos\phi}{1 - \sin\phi} + \sigma_3$$

或写成

$$\sigma_1 = \sigma_3 \operatorname{ctg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) + 2 \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \cdot C$$

式中 σ_c ——单轴抗压强度。

$$\tau_m = C \cos\phi + \sigma_m \sin\phi \quad (1-17)$$

$$\tau_m = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$$

$$\sigma_m = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$$

式中 τ_m ——平均应力；
 σ_m ——最大剪应力。

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}^2\theta \quad (1-18)$$

$$\operatorname{tg}\theta = [(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu]$$

$$\sigma_c = 2 \operatorname{ctg}\theta$$

摩尔—库仑准则提供了判别岩石剪切破坏的条件。如果我们把已求得井壁上的应力状态代入到此准则中，便可知道井壁是否产生坍塌掉块。只要应力落在包络线的下方，井壁便是稳定的，否则为不稳定。

第七节 德鲁克—普拉格 (Drucker—Prager) 准则

从上面的分析，可以看到摩尔—库仑准则中没有考虑中间主应力 σ_2 的影响，这是它的不足之处。摩尔—库仑准则也可用三维应力来表示，但其表达式十分复杂，不便应用。为了研究能全部包括三个主应力作用的岩石强度准则，不少学者提出了许多新的方程，其中比较简单且应用比较广泛的要属德鲁克—普拉格准则，它的表达式为

$$\sqrt{J_2} - QI_1 - K_f = 0 \tag{1-19}$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{1-20}$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \tag{1-21}$$

$$Q = \frac{\sqrt{3} \sin \phi}{3 \sqrt{3 + \sin^2 \phi}} \tag{1-22}$$

$$K_f = \frac{\sqrt{3} C \cos \phi}{\sqrt{3 + \sin^2 \phi}} \tag{1-23}$$

式 (1-19) 也可用常规三轴压缩试验的数据绘在 $(I_1, \sqrt{J_2})$ 坐标图上 (图 1-11)。

这个准则在三维应力空间中表示为一个以 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 为轴的圆锥 (破坏面) 而三维摩尔—库仑准则的破坏面是一个与其同轴的且外接德—普圆锥不等边六角锥面，如图 1-11 所示。

从图 1-12 可以看出，随着总应力 I_1 的增大，相应的圆锥截面积也增大，这是岩石材料不同于金属材料的一大特点。对于金属材料的破坏屈服面是一个不随 I_1 变化的圆柱面 (一般称为密塞斯准则)。

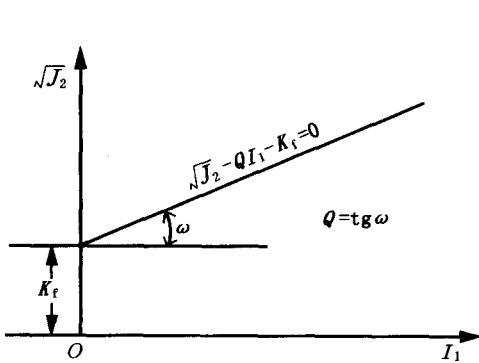


图 1-11 德鲁克—普拉格强度曲线

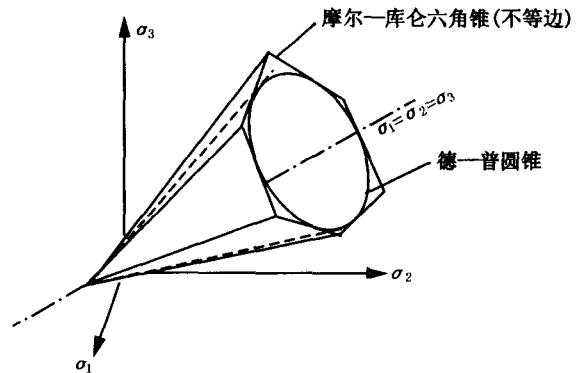


图 1-12 三维破坏面

根据准则的定义可知，只要我们所求得的应力状态点位于德—普圆锥面之内，则岩石会产生破坏；若应力点落在圆锥面之外时，则岩石必定破坏。由此可用来判断井壁岩石是否处于力学稳定状态。

第八节 有孔压岩石的强度准则

在第五节和第六节中所讲的强度准则没有涉及孔隙压力的问题，因此只适用于不饱和有流体压力的干岩石。对于有孔压岩石的强度应该引入“有效应力”的概念，因为此时岩石的强度是受“有效应力”控制的，因此式（1-16）应改写为

$$(\sigma_1 - \alpha p_0) = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}(\sigma_3 - \alpha p_0) + 2C_1 \frac{\cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad (1-24)$$

式（1-20）的 I_1 应改写为

$$I_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - 3\alpha p_0 \quad (1-25)$$

但 J_2 不必改写，因为孔隙压力不会影响剪应力或偏应力。

孔隙压力不影响剪应力 τ ，而最大和最小的正应力和因增大孔压而减小了相同数值，这意味着应力摩尔圆的半径不变，但其圆心却向左移动（有人称此为应力云的漂移）其移动量等于 $\alpha\Delta p$ （ Δp 为孔压增量），使莫尔圆靠近强度包络线，若孔压增量足够大，则摩尔圆便会与包线相切，于是岩石产生了破坏。