

西南石油学院油气田勘探与开发国家重点实验室系列丛书

# 石油测井 与井壁稳定

刘向君 罗平亚  
编著

石油工业出版社

5

西南石油学院油气田勘探与开发国家重点实验室系列丛书

# 石油测井与井壁稳定

刘向君 罗平亚 编著

石油工业出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

石油测井与井壁稳定/刘向君, 罗平亚编著.  
北京: 石油工业出版社, 1999.9  
ISBN 7-5021-2786-0

I. 石…

II. ①刘… ②罗…

III. ①采油井-测井-基本知识

②采油井-井壁-稳定性-基本知识

IV. TE15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 43560 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云红光印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 8.125 印张 204 千字 印 1—1000

1999 年 9 月北京第 1 版 1999 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2786-0/TE·2182

定价: 16.00 元

## 前 言

井漏和井塌是钻井工程中经常遇到的井壁不稳定问题，它严重地影响了钻井的速度、质量及油田开发的综合经济效益。因此，研究井壁稳定具有重要意义。

自 40 年代以来，许多研究工作者为解决井眼稳定性问题作了大量努力，取得了很大进展，但早期研究井壁稳定过分强调原地应力及原岩强度的作用，而很少考虑到井壁失稳的物理化学原理。50~80 年代，许多研究人员开始考虑到井壁失稳是由两个因素共同作用的结果：即井周地层的岩石力学性质和钻井液滤液对易坍塌岩石的物理化学作用。但这一时期，研究的重点仍然分别集中于化学防塌和井壁稳定性力学分析两方面。在化学防塌方面，对粘土矿物的膨胀机理进行了研究，提出了阳离子交换容量、毛细吸附时间等评价泥页岩水化、分散、膨胀特性的指标，研制出了一系列抑制泥页岩水化、分散、膨胀的新型钻井液和处理剂，有利于井壁的稳定。在井壁稳定性力学分析方面，主要着眼于钻井液不与所钻地层发生明显物理化学作用的条件，提出了一系列井壁稳定性力学分析模型，利用这些力学模型可以确定地层的坍塌应力、破裂应力，为钻井过程提供“安全”密度范围。然而实际钻井过程表明，泥页岩与钻井液的相互作用是必然的，只是不同岩石和不同钻井液接触时产生物理化学作用的程度不同。因此，尽管对井眼稳定性的研究开展了很多，却始终未能从根本上解决井壁稳定问题。随着井壁稳定性研究的深入，人们逐渐认识到力学、物理化学耦合将是解决井壁稳定问题的必由之路，而且这一观点已被越来越多的人认识和采纳。

由于测井响应是在一定的钻井背景下测得的，每一个时刻得到的测井响应值都必然隐含了井周地层在钻井过程中所经受的各种应力变化和强度变化，对应了钻井液与地层之间的一种作用状态。可见，测井资料所反映的就是力学、物理化学耦合后的一种产物，因此，充分认识和利用现有测井手段，把各种测井仪器组合起来，可望就钻井液对井壁围岩地层所造成的不良影响和钻井液抑制地层水化的能力进行评价。同时，由于测井资料信息量大，成本低廉，又有较高精度，因此，把测井资料与力学、物理化学耦合研究井壁稳定的原理相结合，开展井壁稳定性现场评价方法研究具有重要的应用价值。这不仅有助于拓展测井资料的应用领域，以满足日益膨胀的工程技术需要，而且也为现有钻井液性能室内评价方法提供了有益补充，做到钻前预测、钻后验证。本书的研究工作就是基于这样一个背景而开展的。

在本书的完成过程中，西南石油学院测井教研室夏宏泉同志参与了第三章的编写，并对本书提出了不少宝贵意见。另外，西南石油学院测井专业 96、97、98 届毕业生高国忠、韩乾凤、金德刚等都作了大量有益的工作，在此表示感谢。

编著者  
1999 年 6 月

# 目 录

第一章 概 论	1
第一节 井壁稳定性研究状况及基本原理	1
第二节 测井在井壁稳定性研究中的应用现状及发展趋势	9
第三节 力学、物理化学耦合研究井壁稳定的必要性	12
第四节 利用测井深入研究井壁稳定性的可行性	15
第二章 钻井对泥页岩地层常规测井响应的影响	18
第一节 泥页岩地层测井资料的影响因素分析	19
第二节 泥页岩地层测井响应的推移特性	20
第三节 利用测井资料的推移特性和径向分布特征评价泥页岩地层的水化状况	26
第三章 利用测井资料确定泥页岩地层的物理化学性质	27
第一节 粘土矿物类型及性质	27
第二节 利用测井资料确定泥页岩地层粘土矿物类型及含量	30
第三节 利用测井资料估算地层的阳离子交换能力	46
第四节 泥页岩两种水含量、矿化度和电阻率的计算	48
第五节 利用核磁共振测井资料计算粘土结合水	51
第四章 地应力测井	55
第一节 测井评价地应力的理论基础	55
第二节 井壁坍塌的测井显示及鉴别	59
第三节 裂缝的测井显示和鉴别	68
第四节 利用测井资料连续计算地应力	79
第五节 地层孔隙压力估计	80
第五章 岩石机械强度的测井	88
第一节 岩石机械强度研究概况	88
第二节 基于神经网络技术预测岩石的机械强度	94
第三节 参数预测实例及结果分析	97
第六章 水敏性泥页岩地层与钻井液接触时水化能力评价	100
第一节 泥页岩地层扩散吸附系数的现有确定方法及存在问题	100
第二节 利用电阻率参数确定扩散吸附常数	101
第七章 水化对泥页岩地层井壁稳定性的影响	106
第一节 力学和物理化学耦合定量研究水敏性泥页岩地层井壁稳定性	106
第二节 水敏性地层坍塌应力和破裂压力的变化规律	108
第八章 泥页岩水化评价的意义	116
第一节 泥页岩水化评价在油层保护中的应用	116
第二节 井壁稳定性研究在测井解释中的应用	118
参考文献	120

# 第一章 概 论

## 第一节 井壁稳定性研究状况及基本原理

### 一、井壁稳定性研究状况

井壁的张性破裂(井漏)和剪切垮塌(井塌),是钻井过程中经常遇到的井壁稳定性问题,严重地影响着钻井的速度、质量及成本,对部分新探区还会因井壁不稳定而无法达到目的层,延误勘探开发的速度,影响其综合经济效益。因此,井壁稳定性问题早就引起了人们的重视,本世纪40年代就有人开始着手研究井壁的稳定性;进入80年代以来,对井壁稳定性的研究进入了一个新时期,发表论文较多。

自40年代以来,井壁稳定性研究所取得进展包括以下方面:

#### 1. 岩石力学本构关系及强度判别准则

岩石力学本构关系及强度判别准则是用来模拟岩层对荷载的响应的。自40年代以来,在连续介质力学的基础上,许多研究者提出了一系列预测井眼应力分布的本构关系及评价井壁稳定性的强度判别准则。采用线—弹性体分析井眼稳定性的有 Bradley<sup>[1]</sup>、Fairhurst<sup>[2]</sup>、Aadnøy<sup>[3]</sup>、Paslay 和 Cheatham<sup>[4]</sup>、Sulem<sup>[5]</sup>以及 Santarelli<sup>[6]</sup>等,在所有这些本构关系中,假定的最简单的地层特性是均质、各向同性和线—弹性,据此,井周应力可以由一些简单的方程确定出。除此以外,Aadnøy 在其模型中还考虑了井周地层的弹性各向异性,Paslay 和 Cheatham 的模型中则考虑了流体流动对井壁稳定性的影响,他们的模型虽然可以准确地描述现场情况,但获取模型所需的参数较难。由于岩石最终达到屈服破坏时,很少呈现纯弹性方式,所以,Westergaard<sup>[7]</sup>、Mictchell 和 Goodman<sup>[8]</sup>、Bratli 和 Risnes<sup>[9]</sup>、Morita 和 Gray<sup>[10]</sup>、Veeken<sup>[11]</sup>等采用弹—塑性方法分析井眼稳定性,采用纯塑性模型模拟屈服以后的岩石特征。在 Morita 和 Gray、Veeken 等的模型中还进一步引入了材料的应变—硬化和应变—软化概念。用弹—塑性分析方法虽然更合乎实际,但存在以下问题:①确定失稳前塑性变形的程度较困难,而且通常较武断;②弹—塑性分析需要较多参数,而从实验中获取这些参数较难;③通常弹塑性分析结果不能直接用于解释岩石破裂。因此,井壁稳定性力学分析模型及研究方法的确定不仅受岩石力学学科发展的制约和岩石本身复杂性的影响,而且受岩石特性测试手段及相关技术发展的制约。

评价井壁稳定的常用强度判别准则主要有线性 Mohr—Coulomb 准则<sup>[8,12,13,14]</sup>、Druck—Prager 准则<sup>[15,16]</sup>和非线性 Pariseau 准则<sup>[1,17,18,19]</sup>及 Hoek—Brown 准则<sup>[6,20]</sup>。在这些准则中,Mohr—Coulomb 准则最常用,而且其预测结果也被认为最切合实际<sup>[21]</sup>。

#### 2. 井壁稳定性研究理论的发展

早期研究井壁坍塌过分强调地应力及岩石强度的作用,而很少考虑到坍塌现象的物理—化学原理,结果导致长期以来都采用加重钻井液的方法克服井壁失稳。由于在钻井过程中使

用具有最小滤失量的加重钻井液不仅不能确保井壁在任何时候都不垮，而且还可能诱发井壁破裂等井下复杂事故。因此，50~80年代，许多研究者开始考虑到井壁失稳是两个因素共同作用的结果：即井壁地层的力学特性和钻井液滤液对于易坍塌岩石的物理—化学作用。但这一时期，研究的重点仍然分别集中于化学防塌和井壁力学稳定性分析两方面。在化学防塌方面，钻井液工作者做了大量工作，对粘土矿物的膨胀机理进行了研究，提出了诸如阳离子交换容量、毛细吸附时间、滚动回收率、页岩膨胀指数等评价泥页岩水化、分散、膨胀特性的一些指标，研制出了一系列抑制泥页岩水化、分散、膨胀的新型钻井液和处理剂。在井壁力学稳定性分析方面，主要着眼于钻井液不与所钻地层发生明显物理化学作用的条件。对于二者的综合作用都很少涉及。然而，实际上泥页岩与钻井液的相互作用是必然的，只是不同岩石和不同钻井液接触时作用的程度不同，从而对井壁稳定的影响程度也大不相同。因此，这些研究成果都未能从根本上解决井壁稳定问题。随着井壁稳定性研究的深入，人们逐渐认识到力学、物理化学耦合将是解决井壁稳定问题的必由之路，而且这一观点已被越来越多的人认识和采纳。C. H. Yew<sup>[22]</sup>等首先把钻井液和地层之间的物理—化学过程从实验阶段引入到井壁稳定性力学分析中。

最近的研究表明，与泥页岩稳定性有关的力学因素主要包括孔隙压力扩散、毛管作用、岩石强度特性及地应力分布；与泥页岩稳定性有关的物理化学因素主要包括表面水化、渗透水化和离子扩散等。泥页岩与钻井液接触时产生的表面水化、渗透水化及离子扩散过程最终将导致地层的孔隙压力、原岩强度及应力分布状态改变，因此，物理化学过程最终都将体现在力学因素的变化中。所以，无论从纯力学还是力学、物理化学耦合的角度，井壁稳定性研究最终都要归结为一个力学问题，都遵循图 1-1 这样一个力学分析过程。

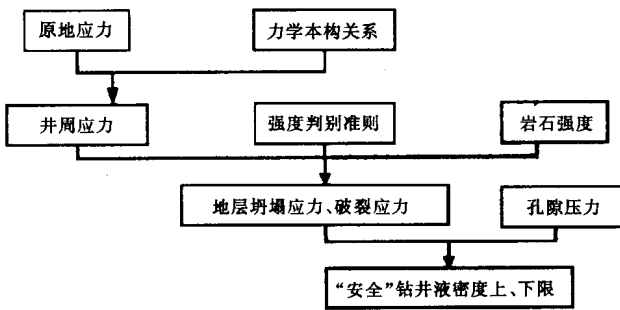


图 1-1 井壁稳定力学分析流程

从后继章节可以看到，纯岩石力学研究井壁稳定与力学、物理化学耦合研究井壁稳定二者尽管遵循相同的力学分析过程，但其力学本构关系、岩石强度在物理意义上有本质区别，即它们将由于钻井液与岩石的化学、物理化学作用而有重大改变。在水敏性泥页岩地层，力学、物理化学耦合研究井壁稳定必须在抑制和定量评价地层水化的前提下进行，是一个动态平衡过程。

定量研究井壁稳定性问题在国内起步较晚，“七五”以后的大量工作也都主要集中于消化吸收国外研究成果，系统而全面地认识井壁失稳机理主要起于近几年。

## 二、井壁稳定性力学分析基本原理

引起泥页岩地层井壁不稳定的因素很多，下面的分析着重从纯岩石力学角度阐明井壁稳定性力学分析过程中涉及的有关问题，钻井液及其滤液对井壁岩石的物理化学作用暂不涉及。从中我们可以了解到井壁稳定性研究的基本力学过程及在纯岩石力学研究井壁稳定过程中测井所能承担的作用。

## 1. 井眼围岩应力分布

一口井开钻前，地应力就已存在于岩层中。如图 1-2 所示，地应力一般用 3 个主应力描述，即垂向应力 ( $\sigma_v$ ) 和水平方向两个主应力 ( $\sigma_{H1}$ 、 $\sigma_{H2}$ )。某处的总垂直应力通常假设为上覆岩层压力，水平方向两个主应力取决于上覆岩层压力和构造应力状态，一般水平方向两个主应力不相等。钻井过程中扰动了原岩的自然平衡状态，使井周在一定范围内的地应力发生变化，变化后的应力称为次生应力。见图 1-3，在柱坐标系，井壁次生应力状态可用  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_z$ 、 $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{\theta z}$  和  $\tau_{rz}$  6 个应力分量描述，井周围岩内次生应力大小、方向及其分布规律是井壁稳定性力学分析的基础。

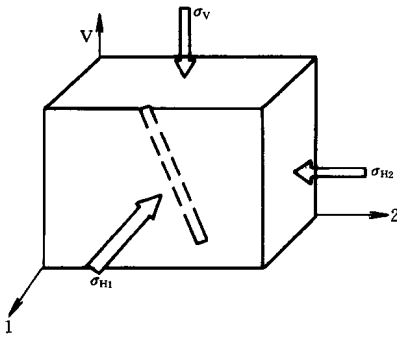


图 1-2 原地应力

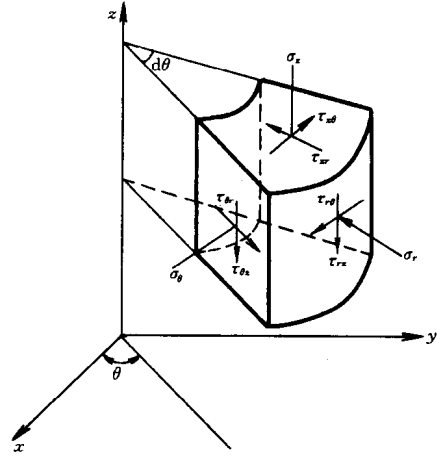


图 1-3 任意柱坐标系中井壁次生应力分量

井眼围岩应力计算主要依赖于地层的应力—应变特性。以均质、各向同性和线—弹性地层为例，当远场孔隙压力恒定时，可用 Fairhurst 方程来计算所钻井眼周围的次生应力分布状态。

井眼围岩应力分布由 Fairhurst 方程表示为：

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_r &= \left( \frac{\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty}{2} \right) \left( 1 - \frac{r_w^2}{r^2} \right) + \left( \frac{\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty}{2} \right) \left( 1 + \frac{3r_w^4}{r^4} - \frac{4r_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\
 &\quad + \tau_{xy}^\infty \left( 1 + \frac{3r_w^4}{r^4} - \frac{4r_w^2}{r^2} \right) \sin 2\theta + p_{wf} \frac{r_w^2}{r^2} \\
 \sigma_\theta &= \left( \frac{\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty}{2} \right) \left( 1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \left( \frac{\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty}{2} \right) \left( 1 + \frac{3r_w^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\
 &\quad - \tau_{xy}^\infty \left( 1 + \frac{3r_w^4}{r^4} \right) \sin 2\theta - p_{wf} \frac{r_w^2}{r^2} \\
 \sigma_z &= \sigma_{zz}^\infty - 2\mu(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) \frac{r_w^2}{r^2} \cos 2\theta - 4\mu\tau_{xy}^\infty \frac{r_w^2}{r^2} \sin 2\theta \\
 \tau_{r\theta} &= - \left( \frac{\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty}{2} \right) \left( 1 - \frac{3r_w^4}{r^4} + 2 \frac{r_w^2}{r^2} \right) \sin 2\theta + \tau_{xy}^\infty \left( 1 - \frac{3r_w^4}{r^4} + \frac{2r_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\
 \tau_{\theta z} &= \left( -\tau_{xz}^\infty \sin \theta + \tau_{yz}^\infty \cos \theta \right) \left( 1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) \\
 \tau_{rz} &= \left( \tau_{xz}^\infty \cos \theta + \tau_{yz}^\infty \sin \theta \right) \left( 1 - \frac{r_w^2}{r^2} \right)
 \end{aligned} \right\} (1-1)$$



当  $r=r_w$  时, 得到井壁应力计算式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r|_{r_w} &= p_{wf} \\ \sigma_\theta|_{r_w} &= (\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty) - 2(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty)\cos 2\theta - 4\tau_{xy}^\infty\sin 2\theta - p_{wf} \\ \sigma_z|_{r_w} &= \sigma_{zz}^\infty - 2\mu(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty)\cos 2\theta - 4\mu\tau_{xy}^\infty\sin 2\theta \\ \tau_{r\theta}|_{r_w} &= 0 \\ \tau_{\theta z}|_{r_w} &= 2(-\tau_{xz}^\infty\sin\theta + \tau_{yz}^\infty\cos\theta) \\ \tau_{rz}|_{r_w} &= 0 \end{aligned} \right\} (1-2)$$

上述方程组中,  $r_w$  为井半径,  $p_{wf}$  为钻井液柱压力,  $r$  为径向距离。  $\sigma_x^\infty$ 、 $\sigma_y^\infty$ 、 $\sigma_{zz}^\infty$ 、 $\tau_{xy}^\infty$ 、 $\tau_{yz}^\infty$ 、 $\tau_{xz}^\infty$  为经坐标变换后的原地应力分量。变换坐标系见图 1-4, 新坐标系的  $z$  轴平行于井眼轴线,  $x$ 、 $y$  轴位于垂直井眼轴线的截平面内,  $\theta$  为井壁上某点与  $x$  轴的夹角。

设某井井斜角为  $\alpha$ , 井斜方位与水平最大主应力方位之间的夹角为  $\beta$ , 即沿水平最大主应力方向钻井时,  $\beta=0^\circ$ ; 沿水平最小主应力方向钻井时,  $\beta=90^\circ$ 。

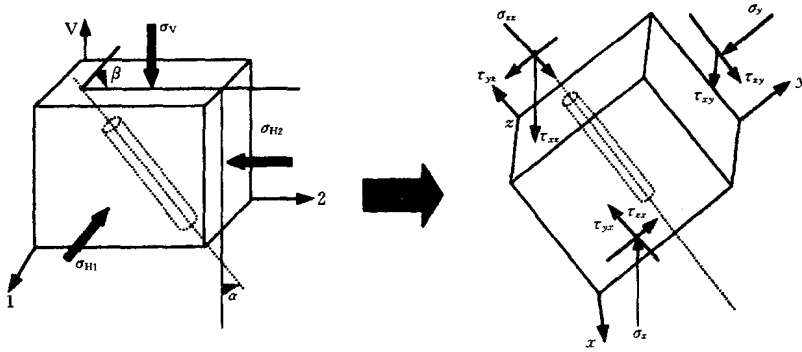


图 1-4 原地应力转换

变换后的原地应力分量  $\sigma_x^\infty$ 、 $\sigma_y^\infty$ 、 $\sigma_{zz}^\infty$ 、 $\tau_{xy}^\infty$ 、 $\tau_{yz}^\infty$ 、 $\tau_{xz}^\infty$  表示为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^\infty &= \cos^2\alpha(\sigma_{H1}\cos^2\beta + \sigma_{H2}\sin^2\beta) + \sigma_v\sin^2\beta \\ \sigma_y^\infty &= \sigma_{H1}\sin^2\beta + \sigma_{H2}\cos^2\beta \\ \sigma_{zz}^\infty &= \sin^2\alpha(\sigma_{H1}\cos^2\beta + \sigma_{H2}\sin^2\beta) + \sigma_v\cos^2\alpha \\ \tau_{xy}^\infty &= \cos\alpha\sin\beta\cos\beta(\sigma_{H2} - \sigma_{H1}) \\ \tau_{xz}^\infty &= \cos\alpha\sin\alpha(\sigma_{H1}\cos^2\beta + \sigma_{H2}\sin^2\beta - \sigma_v) \\ \tau_{yz}^\infty &= \sin\alpha\sin\beta\cos\beta(\sigma_{H2} - \sigma_{H1}) \end{aligned} \right\} (1-3)$$

## 2. 井眼围岩极限平衡性分析

### (1) 井壁主应力计算

确定出井壁各点的应力后, 把计算出的应力与相应岩石强度相对比, 可判断井壁稳定与否, 应力状态超出岩石强度的点, 可认为屈服开始。由于井壁稳定性分析中所采用的大部分

破裂准则都以主应力表示，因此，有必要把井壁上应力转换成主应力。

井壁处主应力由以下矩阵特征值给出：

$$\begin{vmatrix} \sigma_r - \sigma & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{\theta r} & \sigma_\theta - \sigma & \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} & \tau_{z\theta} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix}_{r=r_w} = 0 \quad (1-4)$$

式中：

$$\tau_{rz}|_{r_w} = \tau_{zr}|_{r_w} = 0, \quad \tau_{z\theta}|_{r_w} = \tau_{\theta z}|_{r_w}, \quad \tau_{r\theta}|_{r_w} = \tau_{\theta r}|_{r_w} = 0$$

则有：

$$\begin{vmatrix} \sigma_r - \sigma & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta - \sigma & \tau_{\theta z} \\ 0 & \tau_{z\theta} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix}_{r=r_w} = 0 \quad (1-5)$$

计算得到在  $r = r_w$  处三个主应力分量为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_r|_{r_w} \\ \sigma_2 &= \left[ \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \right]_{r_w} \\ \sigma_3 &= \left[ \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \right]_{r_w} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

$\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  的大小顺序在具体计算中排定。

### (2) 井壁有效应力计算

见图 1-5，在多孔的连续介质中，地层矿物颗粒对颗粒的作用力（有效应力， $\sigma_e$ ）和孔隙压力（ $p_p$ ）一起，支撑着外部总的应力（ $\sigma$ ），即有效应力等于总应力与孔隙压力之差：

$$\sigma_e = \sigma - p_p$$

有效应力越大，岩石抵抗变形的能力越强，因此，井壁稳定取决于有效应力。根据有效应力理论，上述地层中井壁径向、周向、轴向有效应力可表示为：

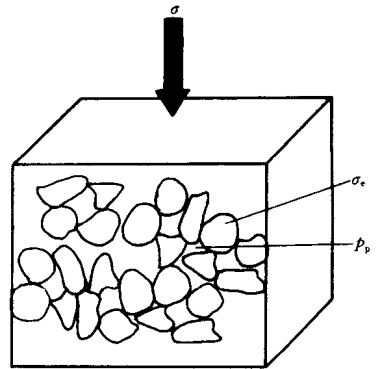


图 1-5 泥页岩受力示意图

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{re}|_{r_w} &= p_{wf} - p_p \\ \sigma_{\theta e}|_{r_w} &= (\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty) - 2(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty)\cos 2\theta - 4\tau_{xy}^\infty\sin 2\theta - p_{wf} - p_p \\ \sigma_{ze}|_{r_w} &= \sigma_{zz}^\infty - 2\mu(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty)\cos 2\theta - 4\mu\tau_{xy}^\infty\sin 2\theta - p_p \end{aligned} \right\} \quad (1-7a)$$

井壁 3 个主应力分量的有效应力可表示为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1e} &= \sigma_r|_{r_w} - p_p \\ \sigma_{2e} &= \left[ \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \right] \Big|_{r_w} - p_p \\ \sigma_{3e} &= \left[ \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \right] \Big|_{r_w} - p_p \end{aligned} \right\} \quad (1-7b)$$

### (3) 井壁稳定性分析

钻井过程中, 钻井液替代了原在井眼处的岩石, 3 个大小不等的主应力支撑的岩石被三向应力相同的流体替代, 结果导致井壁应力集中, 井壁地层内应力变化可使井周岩石变形, 并可能引起井壁失稳。

井壁不稳定分两种情况: 一是岩层剪切破坏引起井壁剥落或垮塌; 另一种是井壁岩层发生张性破裂, 出现井漏。因此, 钻井液密度存在一个“安全”范围, 在这个“安全”密度范围内钻井, 将不会出现井壁垮塌或钻井液漏失等复杂情况。

利用 Mohr—Coulomb 准则, 描述井壁发生剪切变形; 利用最大拉应力理论, 表征岩石张性破裂。

Mohr—Coulomb 破坏判据表示为:

$$(\sigma_{\max} - p_p) - (\sigma_{\min} - p_p) \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} = \frac{2F_c \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (1-8)$$

$$\text{或} \quad (\sigma_{\max} - p_p) - (\sigma_{\min} - p_p) \tan\varphi = C_0 \quad (1-9)$$

其中  $F_c$ 、 $\varphi$  分别为内聚力和内摩擦角,  $C_0$  为岩石的单轴抗压强度,  $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  分别为井壁最大、最小主应力分量。

$$\text{令} \quad [\sigma_1] = (\sigma_{\max} - p_p) - (\sigma_{\min} - p_p) \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

$$[\sigma_c] = \frac{2F_c \cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

则井壁稳定性系数:

$$k = \frac{[\sigma_1]}{[\sigma_c]} \quad (1-10)$$

$[\sigma_c]$  为岩石允许承载载荷,  $[\sigma_1]$  为岩石实际承受载荷。当  $k > 1$  时, 井眼发生塑性变形; 当  $k = 1$  时, 岩石处于极限平衡态;  $k < 1$  时, 井壁稳定。

由 (1-7b) 式知,  $\sigma_{3e} \leq \sigma_{2e}$ , 故  $\sigma_{1e}$ 、 $\sigma_{2e}$ 、 $\sigma_{3e}$  之间存在 3 种可能的关系:

$$(I) \quad \sigma_{3e} < \sigma_{1e} < \sigma_{2e}$$

$$(II) \quad \sigma_{1e} < \sigma_{3e} < \sigma_{2e}$$

$$(III) \quad \sigma_{3e} < \sigma_{2e} < \sigma_{1e}$$

假设应力分布满足 (I), 由 Mohr—Coulomb 判别准则有:

$$\sigma_{2e} = C_0 + \sigma_{3e} \tan\varphi$$

将  $\sigma_{2e}$ 、 $\sigma_{3e}$  代入上式整理得到:

$$(A_{12}^2 - 1)p_{wf}^2 + 2(A_{12}A_{11} + A_4)p_{wf} + A_{11}^2 - A_4^2 - A_3 = 0 \quad (1-11)$$

其中:

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_x + \sigma_y - 2(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta - 4\tau_{xy}\sin 2\theta$$

$$A_3 = 4(\tau_{\theta z}|_{r_w})^2$$

$$A_4 = \sigma_{\theta\theta} - \sigma_z|_{r_w}$$

$$A_{11} = [2C_0 + (\sigma_{\theta\theta} + \sigma_z|_{r_w} - 2\alpha \cdot p_p)] / (1 + \tan\varphi)$$

$$A_{12} = (1 - \tan\varphi) / (1 + \tan\varphi)$$

当应力分布满足 (I') 时, 由 Mohr — Coulomb 判别准则有:

$$\sigma_{2e} = C_0 + \sigma_{1e}\tan\varphi$$

将  $\sigma_{2e}$ 、 $\sigma_{1e}$  代入上式整理得到:

$$(A_{22}^2 - 1)p_{wf}^2 + 2(A_{21}A_{22} + A_4)p_{wf} + A_{21}^2 - A_4^2 - A_3 = 0 \quad (1-12)$$

其中:

$$A_{21} = 2C_0 - \sigma_{\theta\theta} - \sigma_z|_{r_w} + 2\alpha(1 - \tan\varphi)p_p$$

$$A_{22} = 2\tan\varphi + 1$$

当应力分布满足 (II) 时, 由 Mohr — Coulomb 判别准则有:

$$\sigma_{1e} = C_0 + \sigma_{3e}\tan\varphi$$

将  $\sigma_{3e}$ 、 $\sigma_{1e}$  代入上式整理得到:

$$(A_{31}^2 - 1)p_{wf}^2 + 2(A_4 - A_{31}A_{32})p_{wf} + A_{31}^2 - A_4^2 - A_3 = 0 \quad (1-13)$$

其中:

$$A_{31} = [2C_0 + (\sigma_{\theta\theta} + \sigma_z|_{r_w} - 2\alpha \cdot p_p)\tan\varphi + 2\alpha \cdot p_p] / \tan\varphi$$

$$A_{32} = (2 + \tan\varphi) / \tan\varphi$$

求解方程 (1-11)、(1-12)、(1-13) 可以得到保证井壁不发生剪切变形的钻井液柱压力极限, 称为坍塌压力极限。

式 (1-11)、(1-12)、(1-13) 以通式表示为:

$$Ap_{wf}^2 + Bp_{wf} + C = 0 \quad (1-14)$$

按最大拉应力理论, 井壁拉伸屈服时满足以下不等式:

$$\sigma_{\min} - p_p \leq -|\sigma_t| \quad (1-15)$$

式中  $\sigma_t$  —— 岩石抗拉强度;

$\sigma_{\min}$  —— 井壁最大拉应力。

$\sigma_{\min} - p_p = -|\sigma_t|$  时, 井壁岩石处于张性极限平衡态。求解该方程可以得到保证井壁不发生张性破裂的钻井液柱压力极限, 称之为张性破裂压力 ( $p_t$ )。

已知保证井壁不发生剪切变形的钻井液柱压力极限和保证井壁不发生张性破裂的钻井液柱压力极限后, 可以得出保持井壁稳定的“安全”钻井液柱压力范围, 上限记为  $p_u$ 、下限记为  $p_d$ 。习惯地称上限  $p_u$  为破裂应力, 下限  $p_d$  为坍塌应力。

### 三、井壁稳定性力学分析算例

根据前面的分析可以编制纯岩石力学状态下计算地层破裂应力和坍塌应力的计算程序,利用该计算程序可就纯岩石力学状态下,不同井眼轨迹“安全”钻井液密度的变化规律进行定量研究,如图1-6和1-7所示。图1-6是破裂应力和坍塌应力在井眼方位角(30°)不变时随井斜角的变化情况。图1-7是破裂应力和坍塌应力在井眼方位角60°时随井斜角的变化情况。

图1-6和图1-7中点划线曲线地应力条件为 $\sigma_v=72\text{MPa}$ ,  $\sigma_{H1}=\sigma_{H2}=109\text{MPa}$ ,  $p_p=32\text{MPa}$ ;虚线曲线地应力条件为 $\sigma_v=90\text{MPa}$ ,  $\sigma_{H1}=109\text{MPa}$ ,  $\sigma_{H2}=72\text{MPa}$ ,  $p_p=32\text{MPa}$ ;实线曲线地应力条件为 $\sigma_v=109\text{MPa}$ ,  $\sigma_{H1}=90\text{MPa}$ ,  $\sigma_{H2}=72\text{MPa}$ ,  $p_p=32\text{MPa}$ 。

对比图1-6和图1-7的点划线曲线可见,随着井斜角的增大,坍塌应力、破裂应力都逐渐降低。在井斜角大于30°、小于40°左右时,坍塌应力曲线与井斜角坐标轴相交,因此,在这种地层钻井,当井斜角约大于30°时,岩石抵抗剪切垮塌的能力增强,但破裂应力和坍塌应力不随方位角变化。可见,在这种地区钻井,随着井斜角的增大,坍塌应力、破裂应力都逐渐减小,但它与方位角无关。

对比图1-6和图1-7的虚线曲线可见,当方位角取30°时,随着井斜角增大,破裂应力先逐渐增大后又所减小,坍塌应力逐渐降低;而当方位角取60°时,破裂应力变化不明显;当井斜角约小于60°时,井壁岩石抵抗剪切垮塌的能力强;井斜角约大于60°时,坍塌应力逐渐增大;井斜角90°时,破裂应力与坍塌应力的差值最小。

对比图1-6和图1-7的实线曲线可见,该应力状态下,总的而言,破裂应力和坍塌应力都随方位角增大而有所增加,随井斜角增大破裂应力与坍塌应力的差值减小。

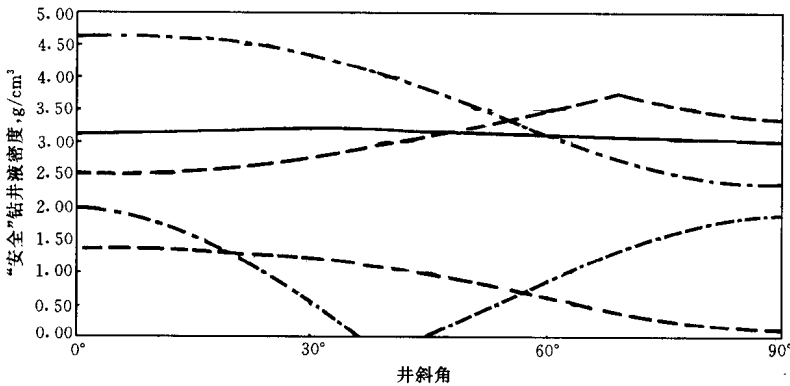


图1-6 “安全”钻井液密度随井斜角变化(方位角30°)

综上所述,从纯岩石力学研究井壁稳定的理论出发,井眼轨迹一定时,特定地层的安全钻井液柱压力为一恒定值。井眼围岩处于稳定状态的“安全”钻井液柱压力范围取决于两个方面:一方面取决于合理的力学本构关系及强度判别准则;另一方面取决于精确的地应力参数及岩石材料参数,即原地最大、最小水平主应力,以及垂向应力、孔隙压力、岩石的抗压强度、岩石的抗拉强度、泊松比等。

合理本构关系的选取既要考虑到岩石的应力—应变特性,又要考虑到模型参数获取的可能性和模型求解的难易程度,是一个相对复杂的问题,本书不予探讨。

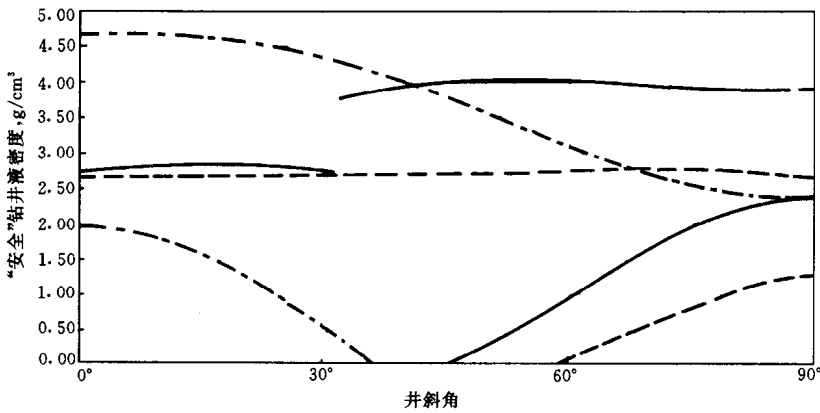


图 1-7 “安全”钻井液密度随井斜角变化 (方位角 60°)

## 第二节 测井在井壁稳定性研究中的应用现状及发展趋势

与井壁稳定性研究理论相对应, 测井在井壁稳定性研究中的应用也分为两个阶段:

- ①与纯岩石力学研究井壁稳定性理论相结合;
- ②与力学、物理—化学耦合研究井壁稳定的原理相结合。

其中第一阶段已发展较为完整、成熟, 在这一阶段主要利用测井资料估计井壁稳定性力学分析所需原地应力参数和岩石强度参数; 而第二个阶段则处于发展阶段, 是我们所面临的重要课题。

### 一、估算井壁稳定性力学分析所需参数

将测井解释与纯岩石力学研究井壁稳定相结合, 在井壁稳定性力学分析中较好地应用了测井资料的首推 Schlumberger 测井公司, 从 70 年代至今, 该公司先后推出了 MSL、IMPACT 等一系列井壁稳定性测井评价软件, 其中代表作为 MSL 力学稳定性测井评价软件, 该软件流程图见图 1-8。

在 MSL 软件中采用了均质各向同性、线—弹性地层的力学本构关系及线性 Mohr-Coulomb 强度判别准则, 分析过程遵循井壁稳定性力学分析的普遍规律。在 Schlumberger 公司推出的这些软件中充分地利用了声波、密度等测井资料为计算地层的坍塌应力和破裂应力提供必要的输入参数, 这些参数包括原地最大、最小水平主应力, 以及垂向应力、孔隙压力、岩石的泊松比、抗压强度等力学参数。正如上节所述, 这些基础参数的准确确定对于井壁稳定性研究意义重大。

在 MSL 软件中, 假定水平方向两个主应力相等, 表示为:

$$\sigma_{H1} = \sigma_{H2} = \frac{\mu}{1 - \mu} (\sigma_v - p_p) + p_p \quad (1-16)$$

式中  $\mu$ ——泊松比;

$p_p$ ——孔隙压力。

$\mu$  可由邻井纵波、横波测井资料计算, 公式为:

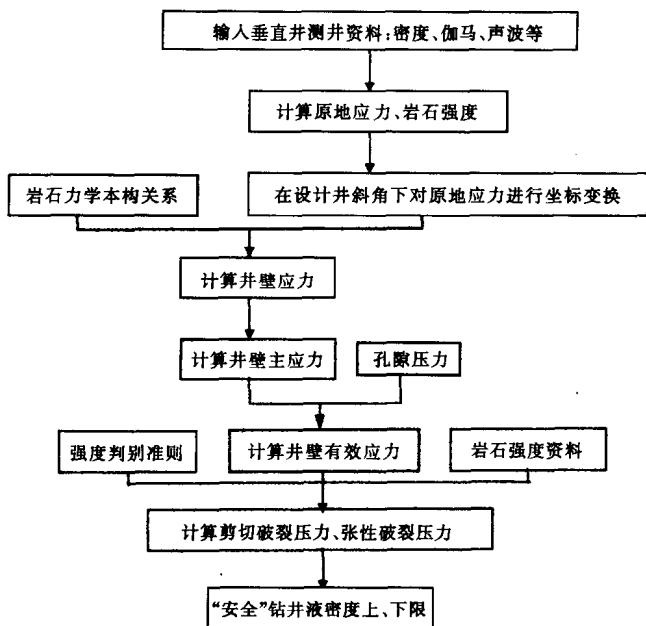


图 1-8 MSL 软件流程图

$$\mu = \frac{0.5 \left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right) - 1}{\left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right) - 1} \quad (1-17)$$

式中  $\Delta t_s$  —— 横波时差;  
 $\Delta t_c$  —— 纵波时差。

岩石强度是指岩石承受各种压力的特性。在 MSL 等以外的井壁稳定性定量分析过程中, 岩石强度资料主要来源于岩心分析实验, 然而现有的岩石力学实验不仅成本高, 所得数据点离散、随机, 而且易塌地层 (如破碎带、泥页岩地层) 本身取心就很困难。测井资料是对地下岩石特性的综合反映, 声波、密度等测井资料更是与地层的强度密切相关, 而且数据连续, 因此, 实验数据与测井资料相结合是利用有限岩心最大限度获取岩石强度数据的有效

途径之一。在 MSL 中利用了 Deere 和 Miller<sup>[23,25]</sup> 由实验得出的沉积岩单轴抗压强度统计关系式来计算岩石的单轴抗压强度 ( $C_0$ ):

$$C_0 = E[0.008V_{cl} + 0.0045(1 - V_{cl})] \quad (1-18)$$

岩石的抗张强度:

$$\sigma_t = C_0/12$$

式中  $E$  —— 岩石动态弹性模量,  $E = \frac{2\rho_b(1+\mu)}{\Delta t_s^2}$ ;

$V_{cl}$  —— 粘土含量。

MSL 及其之后的一系列测井评价软件在生产中取得了一定的应用效果, 与其他研究井壁稳定性的纯岩石力学评价方法一样, 都认为井壁不稳定纯粹是由于井眼形成后, 载荷不平衡引起的。

泥页岩是分布最广泛的一种沉积岩石, 也是钻井过程中最容易坍塌卡钻的地层, 在这类地层中, 地层与钻井液及其滤液接触后发生的物理化学作用是导致井壁不稳定的重要因素。然而 MSL 及其之后的一系列测井评价软件都没有考虑钻井液与地层相互作用对井壁稳定的影响, 因此, 这些测井评价软件都只能给出经历了特定钻井过程、且对应于某个测井时刻的井壁地层的稳定性情况, 而对应于某个测井时刻的井壁地层的状态可能偏离实际地层很远, 并随钻井液性质及地层裸露时间而变化。故 MSL 及其之后的一系列测井评价软件对泥页岩地层钻井过程的指导作用差, 这些软件从诞生之日起在泥页岩地层井壁稳定性评价中就表现出了极大的局限性和严重的不适应性。

## 二、与力学、物理化学耦合研究井壁稳定性原理相结合, 利用测井资料开展井壁稳定性研究

与力学、物理化学耦合研究井壁稳定性原理相结合, 利用测井资料开展井壁稳定性研究,

这是对井壁稳定性机理及测井深刻认识的产物，也是正在兴起和发展的具有重要现实意义的领域。

在水敏性泥页岩地层井壁稳定性评价中是否考虑钻井液与地层之间的物理化学作用在处理问题的方法上有本质区别：

①若假定地层与钻井液之间不存在物理化学作用，则意味着井壁不稳定纯粹是由于井眼形成后载荷不平衡引起的，岩石的机械强度、坍塌应力和破裂应力惟一确定；若考虑地层与钻井液之间存在物理化学作用，则井壁岩石的机械强度、应力状态将随钻井液与地层的作用状况及接触时间增加而变化，结果导致地层的坍塌应力和破裂应力也呈现时间推移性。并且考虑地层与钻井液相互作用以后，井壁岩石的机械强度由于水化将由均匀变得非均匀。见图 1-9。对于均质、各向同性地层，水化的结果使井周岩石特征参数将呈环带状分布，远离井眼依次为强水化带、弱水化带和原状地层，且强、弱水化带宽度随钻井液性质、地层与钻井液接触时间而变化。

②岩石力学本构方程不同。若考虑地层与钻井液之间存在物理化学作用，则对应的岩石力学本构方程应包含物理化学作用对地层应力状态的影响。

③就测井评价而言，若承认地层与钻井液之间存在物理化学作用，也就等于承认了泥页岩地层测井响应的时间推移性。即泥页岩地层测井响应将随地层裸露时间

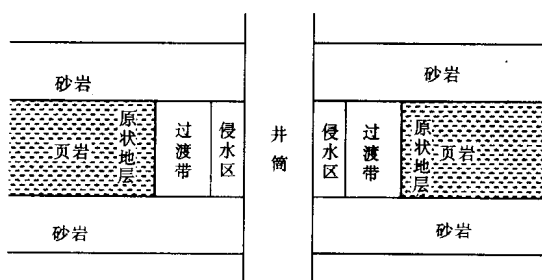


图 1-9 井周泥页岩地层特征

增加而改变。因此，以某时刻测井资料为基本输入资料所导出的相关力学参数仅反映对应测井时刻地层的状态，对应于泥页岩地层水化过程中的一个状态点。泥页岩地层与钻井液之间的相互作用越强烈，其偏离原始状态也越远。可见，将这样得到的相关力学参数代入井壁稳定性力学分析，只能得到一定钻井条件下，对应测井时刻地层的坍塌应力和破裂应力，却反映不了泥页岩地层本身的稳定性情况。只有在地层与钻井液之间存在的物理化学作用可以忽略的情况下，以测井资料为基本输入资料所导出的地层的力学参数、坍塌应力和破裂应力才惟一确定，才能用于反映泥页岩地层本身的稳定性情况。目前国内外的这类研究中对测井资料的应用实际上都作了这样一个隐含的假设，即地层与钻井液之间存在的物理化学作用可以忽略。而实际钻井过程中，钻井液及其滤液对井周泥页岩地层机械强度、岩石结构和对应岩石物理性质的影响通常是不能忽略的。这也正是为什么 MSL 及其之后的一系列测井评价软件都不能完全解决泥页岩地层井壁稳定性评价问题。

这一系列问题的存在，使我们认识到对于水敏性泥页岩这类钻井过程中常遇见的不稳定地层，若利用测井研究其稳定性还停留于利用测井为井壁稳定性力学分析提供必要的地应力参数和岩石强度参数，这远不能适应工程发展的需要。在新理论的指导下建立更广泛意义上的井壁稳定性测井综合评价方法和体系，有效实现泥页岩地层井壁稳定性现场评价、指导新井钻井液设计和安全钻井，已成为目前井壁稳定性研究的必要组成部分，而受到国内外的关注。

该测井综合评价体系应具有以下特点：

①不仅能得出特定测井时刻对应所使用钻井液的安全钻井液密度窗，而且还可以推断出原状地层的坍塌应力、破裂应力。在泥页岩地层只有推断出的原状地层的坍塌应力、破裂应力才反映了地层本身的稳定性。



②能够对所用钻井液体系的抑制性进行恰当评价,为新井钻井液性能调整提供现场使用依据。

③为新井钻井液性能设计提供必需的泥页岩地层特征参数。泥页岩地层的粘土矿物组成类型、含量及阳离子交换容量等理化性能参数是影响泥页岩地层井壁稳定性的客观因素,也是潜在不稳定性的标志。

### 第三节 力学、物理化学耦合研究井壁稳定的必要性

#### 一、泥页岩地层井壁稳定性影响因素

泥页岩地层井周应力分布,不仅与其所处的地应力状态、固有的岩石强度以及井眼几何尺寸有关,而且取决于泥页岩地层与所用钻井液之间的物理化学作用过程。钻井过程中泥页岩地层与所用钻井液之间的物理化学作用过程主要起因于以下两个方面。

##### (1) 钻井压差

即钻井液在正压力差作用下进入地层。同一地层,压差越大,进入地层的钻井液越多,若满足达西渗流,则流量 ( $Q_{\Delta p}$ ) 可表示为:

$$Q_{\Delta p} = \frac{2\pi Kh\Delta p}{\eta \ln(r_e/r_w)} \quad (1-19)$$

式中  $K$ ——地层渗透率;

$h$ ——地层厚度;

$\Delta p$ ——压差;

$\eta$ ——流体粘度;

$r_e$ ——有效渗流半径;

$r_w$ ——井半径。

##### (2) 化学势差

即钻井液在化学势差作用下进入地层。化学势差越大,渗透水化能力越强。

孔隙压力扩散和渗透水化通过改变井壁及近井壁地层孔隙压力、岩石机械强度、应力分布状态,引起井壁失稳。下面简要分析钻井以后,井周地层孔隙压力、岩石机械强度的变化特征及井周地层孔隙压力、岩石机械强度的变化对井壁稳定性的影响。

#### 二、孔隙压力改变对井壁稳定的影响

在钻井过程中,没有流体流入或流出地层时,原状地层孔隙压力将直接决定着地层骨架颗粒间的有效支撑应力 ( $\sigma_c$ ) 的大小,从而在一定程度上决定着地层的承压能力。

但在钻井过程中,钻井液柱压力通常大于地层孔隙流体压力,在正压差作用下,钻井液滤液将向渗透性地层中侵入,这种渗流作用将增大围岩孔隙压力,对围岩稳定性造成不利影响。根据有效应力原理,孔隙压力 ( $p_p$ ) 增大,则骨架颗粒间有效接触应力将减小,因此,在渗透性地层,采用正压钻井时,井眼围岩地层的抗破坏能力还取决于孔隙压力增量。孔隙压力增加对岩体抗剪强度的影响可以表示为:

$$\tau_w = (\sigma_n - p_p - \Delta p_p)\tan\varphi + F_c \quad (1-20)$$

式中  $F_c$ ——岩石的内聚力;

$\varphi$ ——摩擦角。