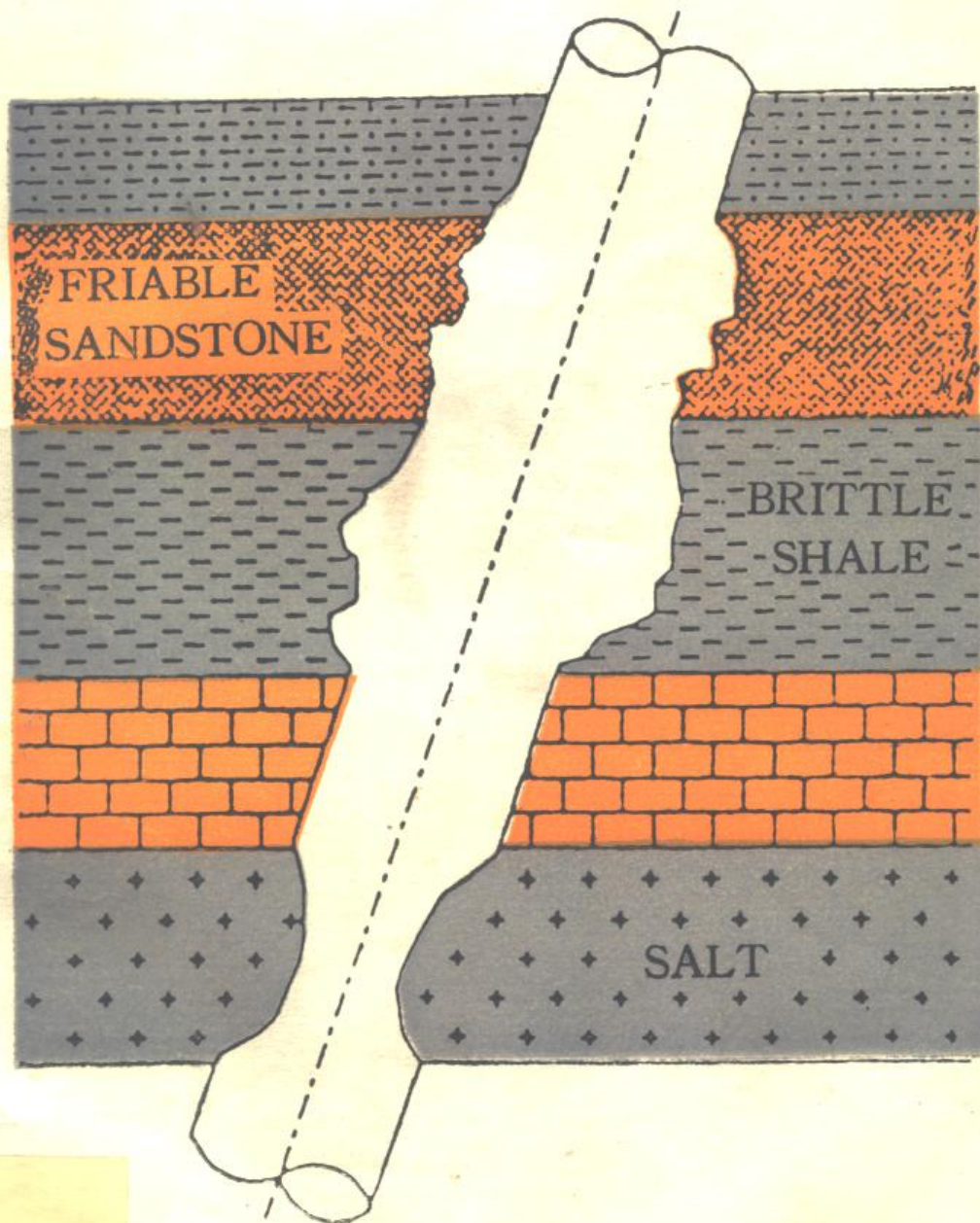


井壁稳定技术译文集

(上册)

中国石油天然气总公司情报研究所



(北京)

1-53

01

井壁稳定技术译文集 (上册)

开本787×1092毫米1/16·印张17¹/₁₆

字数：44万 印数：3000

单价：8.00元

1991年10月 北京第一次印刷

编辑：中国石油天然气总公司情报研究所

出版：中国石油天然气总公司情报研究所

印刷：北京市朝阳区新源印刷厂

发行：中国石油天然气总公司情报研究所

邮编：100011 (北京安外安华里二区三号楼)

前 言

自党的十一届三中全会以来，我国的各行各业都取得了辉煌的成绩。石油工业中，钻井技术的飞速发展也带动了钻井液技术的长足进步。

在原石油部有关司局的领导下，首先于1983年制订了“泥浆处理剂三年发展规划”，接着又于1986年“七五”计划开始时，在长庆油田召开了会议，制订了“七五”期间钻井液、完井液的发展规划。这些规划的制订与实施对推动我国钻井液技术的发展起到了主导作用。

在召开泥浆处理剂三年发展规划的会议上，我所在分析国内外钻井液处理剂发展的基础上提出了发展我国钻井液处理剂的具体建议；为了祝贺“七五”期间钻井液、完井液规划会议的召开，我所与长庆石油勘探局钻采工艺研究所一起组织翻译了当时几个国外泥浆公司来我国进行技术座谈的材料和一部分有关文献，分三期刊登在长庆石油勘探局主编的《钻采工艺研究》期刊上；1989年我们又汇编了有关《低毒油基泥浆文献汇编》两册；1990年在杭州召开的检查、总结“七五”期间钻井液、完井液技术发展规划执行情况的会议上，我所再次编写了《国内外钻井液新技术择编》。我们认为，这些对国内外有关钻井液、完井液文献的收集、分析和翻译，不仅有助于提高同志们的业务水平和外语水平，同时也为更好地制订科研规划、完成科研项目提供了参考依据。

在“八五”期间的钻井液攻关科研项目中，我所承担了“深井钻井液技术”和“井壁稳定技术”两个课题的研究。为了能更好地吸收国外先进技术，使“八五”期间的这两项课题能顺利进行，我们又在近期中国石油天然气总公司情报所和钻井工程局所汇编的《深井钻井技术》、《钻井液译文集》及《保护油层译文集》的基础上，补充编译了这两本《井壁稳定技术译文集》。

综观钻井液、完井液技术的发展，随着科学技术的进步，这一

边缘学科也正向着更高、更深的技术领域进军。特别是八十年代初期阳离子聚合物钻井液的出现，有可能彻底替代应用了四十多年所形成的以膨润土为基浆的阴离子悬浮液体系。通过一个由量变到质变的变革最终将形成一系列的、新概念的阳离子悬浮液体系。这一新体系的形成和发展，将有可能使随着井深的增加而日益尖锐化的“钻井液体系稳定性”与“井壁稳定性”得到较好的统一和解决，也有可能将“钻井液”与“完井液”的矛盾得到较好的统一和解决。

这两本译文集的文章由总公司情报所和钻井所共同选定，由姚荣魁、张克勤两同志分别进行审定，最后由情报所负责编辑加工。

这两本译文集的封面设计、出版和印刷全由情报所同志承担，另外还得到了河北省涞水县726厂化工分厂、北京市延庆县延庆腐植酸厂、山东省安邱县膨润土矿和河南省新乡市星火化工厂等单位的大力支持和帮助，在此一并表示谢意。

译文中的错误和不妥之处，请识者指正。

孙 宁

1991年10月

目 录

力学因素

井眼稳定性.....	5960/20	杨金华	译(1)
井眼稳定性——岩石力学.....		常 思	译(11)
力学稳定性测井.....		朱春启	译(24)
井眼“力学”稳定性理论在开发井设计中的应用.....		刘玉石	译(33)
垂直井眼和斜井眼稳定性的试验研究.....		常 思	译(43)
多学科研究在确定原地应力和井壁稳定性分析中的应用.....		刘岩生	译(54)
井眼稳定性分析：现有分析方法的回顾及其现场应用.....		刘玉石	译(65)
井眼稳定性：强度准则对泥浆比重推荐值的影响.....		刘玉石	译(80)
井眼膨胀如何改变钻进特性.....		王胜启	译(89)
应用井眼稳定性分析成功地钻成大斜度井.....		陈祖锡	译(99)
22/11区块Nelson油田大斜度井的力学稳定性评价.....		陈安贵	译(111)
加拿大西部逆掩断层带地层井眼稳定性.....		孙 宁	译(121)

物理化学因素

表面积法是分析井眼稳定性的主要方法.....		熟 年	译(136)
粘度影响分散试验结果的定量测定方法改善了对钻井液聚合物的 试验.....		孙延平	译(148)
一些工业粘土稳定剂的体积处理效率.....		王彪霞	译(162)
试验研究揭示了油基钻井液增强页岩稳定性的机理.....		常 思	译(173)
纤维素聚合物钾盐的研制及其抑制易水化粘土的作用.....		潘小镛	译(181)
部分水解聚丙烯酰胺(PHPA)对地层钻屑的吸附特性.....		仲夏怀	译(193)
部分水解聚丙烯酰胺泥浆的现场应用.....		韦 实	译(208)
保护性胶体体系提高了固控效率、钻井液稳定性和钻井效率.....		秦礼曹	译(225)
井眼不稳定的现场处理.....		孟繁华	译(238)
用低固相不分散流体控制固相和防止页岩坍塌.....		孙延平	译(242)
醋酸钾增强了钻井泥浆的适应性.....		王彪霞	译(245)
埃及用改性泥浆降低了井眼扩大程度.....		刘雨晴	译(251)
用钾稳定墨西哥湾页岩.....		朱罗河	译(258)

井眼稳定性

J.B.Cheatham Jr.

杨金华 译
熟 年 校

引言

在油气井的钻井和生产期间，保持井眼稳定具有十分重要的意义。在钻井期间，必须控制井眼的形状和方向，而在生产期间，必须防止井壁坍塌和固体颗粒侵入井眼。要使井眼保持稳定，则不可控制因素（地应力、岩石强度和孔隙压力）与可控制因素（井内液柱压力和泥浆化学成份）之间必须达到适当的平衡。

井眼不稳定情况可能有几种类型（见图1）。当塑性岩石被挤入井眼时，就会发生井眼缩径，而页岩坍塌或硬岩石剥落会引起井径扩大。如果井内液柱压力太高，则因地层会遭到意外水力压裂，而导致井漏；如果井内液柱压力太低，井壁就可能坍塌。过高的生产速度可导致固体颗粒侵入井眼。井眼不稳定还会引起卡钻，以及挤毁套管或尾管。这些复杂情况可能会导致侧钻新井眼和油井报废。

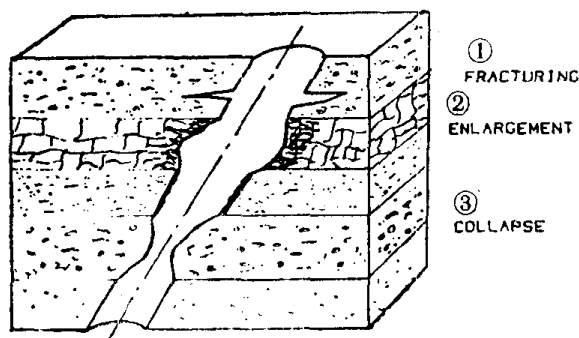


图1 井眼不稳定情况的类型

①破裂；②扩大；③坍塌

自1940年以来，人们一直为解决与井眼不稳定性相关的岩石力学问题做了大量的努力，在过去10年中取得了重大进展，提出了一些预测性解析法。本文对可以代表这项研究工作的部分文献进行了讨论，讨论的重点是了解影响裸眼稳定性因素，井眼破坏的预测方法，以及岩石力学原理在控制井眼稳定性方面的应用情况。对以前的研究作了简要回顾之后，讨论各种类型的井眼不稳定情况，并介绍了现场井眼稳定性问题的研究成果。

井眼周围的应力

1940年，H.M.Westergaard⁽¹⁾发表了一篇题为“深井周围应力的塑性状态”的论文，这篇经典论文对井眼稳定性问题作了如下定义：

“下列分析是同Karl Terzaghi博士交谈的结果。他提出了这样一个问题即：在深

裸眼井周围的土壤内，应力可能是怎样分布的？如果井内未下套管，或者下了一层结构强度较低的薄“火炉管”，什么样的应力分布能使井眼不坍塌？”〔1〕。

Westergaard用柱面坐标中的应力函数来解决下述情况下的弹-塑性井眼问题即：井内压力为零，且所有法向应力分量都等于远离井眼的上覆地层压力。对于弹性区，利用了Hooke定律；而对在塑性区，则采用了一种假设的Coulomb屈服条件，在这种屈服条件下，Mohr圆的极限曲线是一条直线，他得出的结论是：

“塑性作用有可能使稳定井眼必需的大围压不是出现在井眼柱面上，而是出现在距井眼柱面一定距离的地方，因为在井眼柱面上，大围压可能伴随着大径压。用已导出的公式可解释使深井保持稳定的条件”。

Westergaard得出的弹性解与lamé用受到相同边界条件的厚壁圆筒得出的解是一致的。

Hubbert和Willis〔2〕（1957年）阐述了从正断层区到逆冲断层区地应力的变化情况。根据Coulomb破坏模型，他们认为，地壳内最大主应力与最小主应力的最大比值约为3:1。他们利用Kirsch弹性解来计算井眼周围双轴应力场内的应力。将非渗透性井眼内液体压力的作用与上面用lamé解计算厚壁圆筒内的内压力进行叠加。

考虑到多数井眼都是向实际主应力轴线方向倾斜的，Fairhurst〔3〕于1964年对Barrenblatt和Cherepanov提出的弹性解进行了修正，使之包含了纵向剪切对井眼应力的影响。对于任何井眼，不管其轴线与地壳应力场对应方位如何，用本项研究的成果都可以计算出井眼周围的弹性力。

有效应力原理

上述研究成果只限于各向同性且均质的非渗透性岩石。多数井眼不稳定问题都与流体流入或流出孔隙性和渗透性岩石有关。图2示出了在不同流动条件下井筒周围的压力分布情况。1943年，Terzaghi〔4〕根据对饱和土壤所做试验的结果提出了一种有效应力原理。

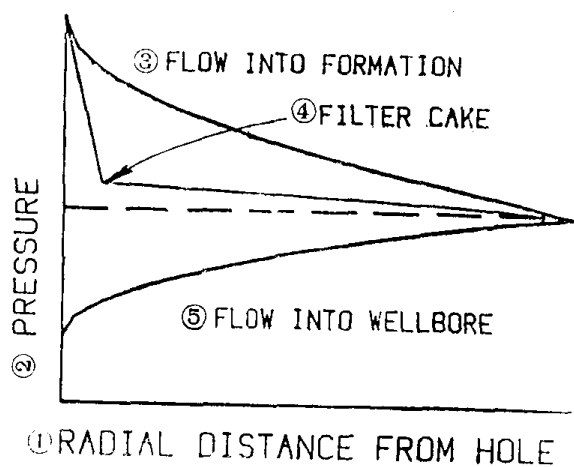


图2 井筒周围的压力分布情况

- ①距井壁的径向距离；②压力；③流入地层；
④滤饼；⑤流入井筒

按这一原理，有效压应力等于总压应力减去孔隙压力。1980年，Carroll〔5〕分析了继Terzaghi之后提出的各种有效应力定律，他得出了一些结论，例如，有效法向应力 $\langle\sigma_z\rangle$ 为：

$$\langle\sigma_z\rangle = \sigma_z + cp \quad (0 \leq c \leq 1) \quad (1)$$

式中： σ_z 是沿Z轴的总法向应力， p 为空隙流体压力。

由于方程(1)中的拉应力为正，因而要从法向压缩应力中减去部分孔隙压力。Carroll指出，对常数 c 的值仍有些争议，因为人们并非始终认为该值取决于有效应力概念的具体应用场合。对于不可压缩的固体基质来说，他指出 $c=1$ ，且方程(1)与Terzaghi得出的方程是一致的。

Carroll还推导出了各向异性弹性材料的有效应力方程〔5〕。

多孔弹性

Biot于1941年提出了一些多孔弹性方程〔6〕,并于1955年将它们加以拓展,用于分析多孔各向异性固体的胶结情况〔7〕。Bowen〔8〕用有关混合物的连续力学理论扩展了Biot的理论,提出了描述可压缩多孔介质的模型。Lubinski〔9〕指出:将热弹性比拟成多孔弹性是合适的,并指出多孔材料的Hooke定律可写为:

$$e_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \frac{1-2\nu}{E} (1-\beta-\phi)p \quad (2)$$

式中:

e_x ——应变在x轴上的分量

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ——应力在x, y, z轴上的分量

ν ——多孔材料的泊松比

E ——多孔材料的杨氏模量

β ——孔隙间材料的压缩系数与多孔材料的压缩系数之比

ϕ ——孔隙度

对于 e_y 和 e_z 可以列出类似的方程。有了这种比拟法,就可以采用解决热应力问题的弹性方法来解决包括多孔固体孔隙压力引起的应力在內的问题。

使用Lubinski的比拟法时会遇到两种复杂情况。第一种复杂情况是,流动中的流体能增大体积力,而热流则不能。该体积力等于孔隙度与压力梯度之积,即:

$$X = -\phi \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

式中, X为多孔材料单位体积在X方向上的体积力。第二种复杂情况是,为计算外表面上的压力,必须估计边界条件。当渗透性边界上某点处的压力为p时,单位面积上的表面力为:

$$\bar{X} = [-(1-\phi)p]l \quad (4)$$

式中, l为该点处表面的外法向的方向余弦。若非渗透性边界外侧的压力为 p_0 ,则:

$$\bar{X} = (\phi p - p_0)l \quad (5)$$

Lubinski曾采用热应力比拟法来解一个数学例题,以求受稳定径向流作用的多孔长筒內的应力分布情况〔9〕。

多孔塑性

多孔介质的塑性或多孔塑性是研究井眼周围多孔岩石的永久变形的基础。Weidler和Paslay〔10〕所做的研究是为了确立粒状介质应力与塑性应变增量之间的关系。粒状介质既会出现加工硬化(屈服强度增大),又会出现加工软化(屈服强度减小)。他们的理论是建立在下面这种现象基础之上的:一般说来,当塑性流动使材料变得更加致密时,材料就会加工硬化;而当材料变得更加疏松时,它就会产生加工软化。有关多孔介质塑性方面的早期研究工作,请见他们发表的论文〔10〕。

Johnson和Green〔11〕对描述多孔介质特性的数学模型进行了归纳,提出了一些新的理论研究结果,这些研究结果对含饱和流体的岩石进行了解析描述。他们得出的结论是,依靠孔隙挤毁显微模型可以对材料结构性能建立起最有希望的模型,因为这种显微模型所需的材料参数比正规塑性理论所需的少,能够描述多孔介质的压力-体积曲线。

Kojić和Cheatham〔12〕提出了一个关于多孔介质在液流影响下塑性的普通理论。他们根据有效应力张量、固体单位体积的体积力、及固体和流体之间的相互作用力提出了固体平衡方程。根据流体的运动方程,相互作用力可用流体惯性力、流体体积力和流体压力来表示。根据固体内的有效应力建立的屈服函数,可以用来求多孔介质在给定外载荷和体积力下的初始塑性变形量。

由经常使用的Coulomb屈服条件可预言,不管压缩程度如何,岩石的抗剪强度都与平均压缩应力成正比。当多孔岩石的应力很大时不适用,因为此时多孔岩石会被压实,孔隙会被挤毁。

为描述多孔灰岩的塑性特性,Cheatham等人〔13〕提出了一个动硬化塑性模型。根据该模型,多孔灰岩在静水应力状态下也能够发生屈服。用这个模型可以解释这种岩石在主应力不相等的情况下屈服时出现的各向异性现象。Nordgren〔14〕采用了一个抛物线型屈服函数,与Coulomb所做的假设条件相比,它能更准确地拟合岩石的三轴试验数据。Geertsma〔15〕在分析井眼破坏时采用了一种应变软化塑性理论。

井眼失稳的原因

裸眼井是否稳定,取决于井内流体与井壁之间的力学作用和化学反应。膨胀性页岩的水化会引起岩石垮塌和井眼扩大;过高的井眼压力会引起井漏,而低井眼压力可导致井喷或井塌;过高的生产速度能使固体颗粒进入井眼,并引起井眼扩大。

一旦了解了井眼失稳的原因,就可以采取相应的补救措施或预防措施。因此,了解井眼破坏方面的基本原理是有益的。尽管近年来研究工作取得了重大进展,但有关井眼破坏的所有基本的岩石力学原理,目前尚未了解透彻。下面对井眼失稳的原因逐一加以讨论。

膨胀性页岩的水化

据Gray和Darley〔16〕宣称,在过去,页岩的水化一直是井眼失稳的最重要原因。但是,在过去20年内,用改进后的钻井液已经在很大程度上控制住了膨胀性页岩,并减少了页岩层段的井眼问题。

当水吸附在页岩中的粘土表面上时,页岩的体积要增大,如果页岩的膨胀受到限制,则会增大页岩的膨胀压力。当粘土晶格的表面上吸附有单分子水层时,粘土容易发生结晶膨胀或表面水化,水被紧紧地吸附着,页岩的体积增加很少。有些粘土,比如钠蒙脱石,当静电力在粘土表面附近吸附了大量的离子时,就容易发生渗透膨胀,这种膨胀可使页岩体积增加很多,但水被吸附得并不紧〔16〕。

页岩的膨胀压力可以用Chenevert〔17〕提出的方法进行预测。当试样在已知的相对湿度下与水蒸汽达到平衡时,测量它的含水量,用这种方法就可以绘出吸附-解吸附曲

线。这样就可以将任何含水量下的膨胀压力表达为页岩内水的活性的函数，在任何含水量下，页岩内水的活性都约等于与页岩达到平衡的相对水蒸汽压力。根据这一经验，Chenevert^[18]提议使用以高浓度盐水为内相、油为连续相的平衡活性泥浆。现场经验表明，这种泥浆能够防止因页岩水化而造成的井眼失稳。

随着时间的推移，页岩内的裂缝在高围压作用下已经局部合拢了。当水沿这些裂缝线渗入页岩时，膨胀压力就会破坏页岩内的胶结，从而导致页岩分散。当膨胀压力使井筒周围的周向应力超过页岩的屈服强度时，页岩就会发生水化剥落。

如果油基泥浆含有过量的盐，其活性就可能小于页岩内水的活性。模拟井眼试验^[19]和现场经验^[16]表明，水从页岩流入这种泥浆并不使井眼失稳。对此可作如下解释：当井眼压力低于临界毛细压力（它可能极高）时，油无法进入粒度很小的页岩中。因此，对油基泥浆来说，整个泥浆压力都作为围压作用在井壁上；而对水基泥浆来说，围压只是泥浆压力与孔隙压力之差^[16]。由此可见，密度相同但类型不同的泥浆，不可能达到同样的井眼稳定效果。

为抑制页岩膨胀及分散，近来研制出了一种含可溶性盐的聚合物泥浆^[20]。要成功地使用这种泥浆，则必须利用机械分离装置来防止钻屑的积聚。活性受到控制的油基泥浆能够更好地控制页岩水化，但成本高，而且还会引起污染问题。

由上面的论述可以得出这样一个结论，即：为维持井眼稳定，选择泥浆性能是一个很复杂的问题。Gray和Dailey^[16]列出了应收集的地质数据和其他现场数据，并指出了对“有问题的页岩”的岩心或岩屑应该做哪些室内试验。

井眼拉伸破坏

当井眼压力与地层孔隙压力之差大于井眼周围的总压应力与岩石抗拉强度之和时，井眼就会发生意外的地层破裂或井漏事故。由于多数岩石的抗拉强度很小，在天然裂缝上甚至为零，因而常常将岩石的抗拉强度忽略不计。

地静压力梯度通常为1磅/英寸²/英尺（22.6千帕/米），在仍在进行压实作用的沉积盆地内，上覆地层压力梯度更小。在地压层中，孔隙压力梯度低则大约为0.46磅/英寸²/英尺（10.4千帕/米）（正常值），高则超过0.9磅/英寸²/英尺（20.4千帕/米）^[21]。对于正常应力区来说，最大主压应力等于垂直上覆地层应力，各水平应力大致相等，约为垂直上覆地层应力的1/3—1/2。在异常高压地层内，泥浆柱压力只有一个很小的安全范围，只要泥浆柱压力超过这个安全范围，就会发生井漏；如果泥浆柱压力低于地层孔隙压力，则会发生井喷^[16]。

Bradley^[21]在Fairhurst^[3]所做的研究的基础上，提出了一些用于计算斜井眼周围弹性应力的方程。用 S_1 、 S_2 和 S_3 表示原地应力，将这些原地应力转换成井筒坐标（Z轴代表井筒轴线）中的应力分量，则得远离井筒处的应力 S_x 、 S_y 、 S_z 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 和 τ_{yz} （见图3）。井壁处的边界条件为： $\sigma^r = p_w$ （井筒压力）和 $\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0$ 。井壁处其它应力分量的弹性能为^[21]：

$$\sigma_\theta = S_x + S_y - p_w - 2(S_x - S_y)\cos 2\theta - 4\tau_{xy}\sin 2\theta,$$

$$\sigma_z = S_z - \nu[2(S_x - S_y)\cos 2\theta + 4\tau_{xy}\sin 2\theta],$$

$$\tau_{\theta z} = 2(\tau_{yz} \cos\theta - \tau_{xz} \sin\theta), \quad (6)$$

式中, ν 为泊松比, θ 是应力与 x 轴的夹角。

对于正常应力区的垂直井而言, 当 $S_1 = S_V > S_2 = S_3 = S_H$ 时, 应力为:

$$\sigma_r = p_w, \quad \sigma_\theta = 2S_H - p_w, \quad \sigma_z = S_V \quad (7)$$

有效切向应力为:

$$\langle \sigma_\theta \rangle = \sigma_\theta - p = (2S_H - p_w) - p \quad (8)$$

式中, p 为地层孔隙压力。如果岩石抗拉强度忽略不计, 井眼压力满足下式时预示着井眼将出现破裂或井漏:

$$p_w > 2S_H - p \quad (9)$$

此时有效应力变为拉应力 ($\langle \sigma_\theta \rangle < 0$)。

对斜井来说, 假设井壁上裂缝的方位垂直于最小压缩主应力, 这是因为随着 p_w 的增加, 最小压缩主应力要从压应力变为拉应力 (图 4)。在一个给定的正常应力地层内, 井斜角相同的所有井, 不论井眼方位如何, 在井筒坐标 (即 S_x 、 S_y 等) 中都具有相同的应力。但在水平地应力不相等的那些地区, 井筒坐标中的应力则随方位的变化而变化, 无论在何种情况下, 井筒坐标中的剪切应力 τ_{yz} 和 τ_{xz} 都取决于井斜角。

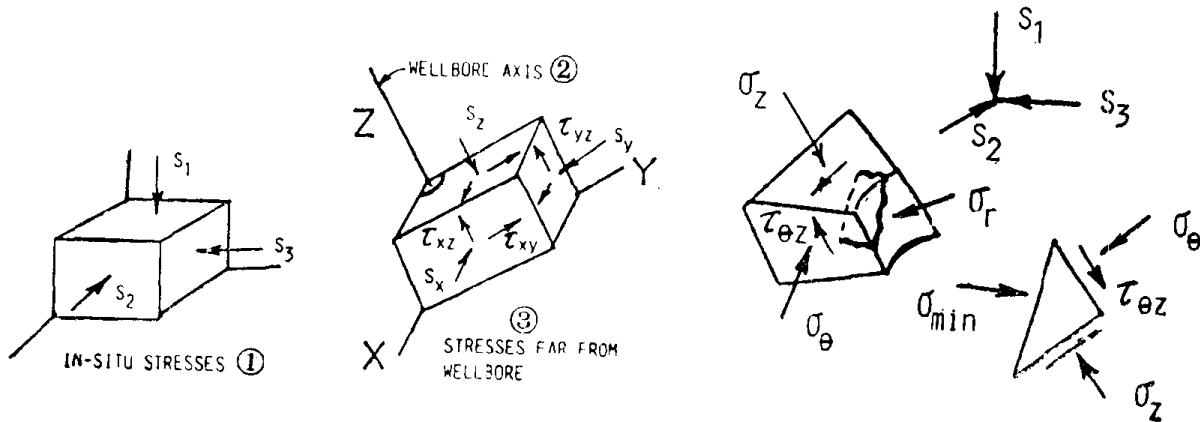


图 3 将坐标变换成井筒坐标

①原地应力; ②井筒轴线; ③远离井筒处的应力

图 4 垂直于最小压缩主应力的裂缝^[21]

使井眼破裂所需的井眼压力随着井斜角的增大而减小。Bradley^[21] 曾用数值来近似描述正常应力地区, 指出, 如果井斜角从 0° 增大到 60° , 则可将使井眼破裂所需的泥浆密度降低 3 磅/加仑 (0.36 毫克/米³)。不过, 请注意, 一旦裂缝超过井眼破裂压力延伸的影响范围, 裂缝延伸压力就与井斜角和方位角无关。

井眼压缩破坏

井眼的压缩破坏会因为塑性流动而导致井眼缩径, 在易碎岩石中则会因为剥落而导致井眼扩大。可用经拓展的 Misès 屈服条件, 按下式描述试验中获得的岩石破坏数据:

$$J_2 = f(\bar{J}_1) \quad (10)$$

式中, 广义剪切应力为:

$$J_2^{1/2} = \left\{ \frac{1}{6} [(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + \tau^2_{r\theta} + \tau^2_{\theta z} + \tau^2_{zr}] \right\}^{1/2}$$

平均应力为:

$$J_1 = \frac{1}{3} (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)$$

Bradley建议将试验中获得的岩石破坏数据绘成 $J_2^{1/2}$ 与 J_1 的关系曲线。曲线中的 J_1 ($= J_1 - p$)为有效平均应力。对于稳定的井眼来说,在用井眼压力计算出的 J_1 值下,用井眼压力计算出的 J_2 值应小于试验中获得的 J_2 值,即 J_2 计算值 $< J_2$ 试验值。

Nordgren^[14]将屈服函数描述为一个线性函数,即:

$$J_2^{1/2} = \tau_0 + \alpha J_1, \quad (11)$$

式中, τ_0 和 α 都是材料性能常数。他还采用了一个抛物型屈服函数,即

$$J_2 = C J_1 \quad (12)$$

式中, C 为材料性能常数。

在预测井壁初始屈服时,将用方程(6)计算出的应力代入Bradley、Nordgren或其他人提出的屈服函数。为防止井壁坍塌,斜井需要的泥浆密度要比垂直井的高一些。Bradley^[21]研究了地应力条件相同的井漏例子,发现,如果将井斜角从 0° 增大到 60° ,则泥浆密度必须增加2.5磅/加仑(0.30毫克/米³)才能防止井壁坍塌。与垂直井相比,大斜度井在不出现破裂的情况下其承受泥浆柱压力的能力有所降低,并需要用较高的泥浆柱压力才能防止井壁坍塌。因此,出于稳定井眼的需要,在斜井中可能需要下更多的套管柱。

固体颗粒侵入井眼

通过将流体压力梯度模拟为一个体积力,即可分析生产井的出砂趋势或地层颗粒侵入生产井的趋势。有人^[22]已经用这种方法来解决多孔弹性问题。出现这种问题时,地层流体要经过渗透率较低的区域流入井眼。1982年,Risnes等人^[23]拓展了这种分析法,使之包括了渗透率可变井眼周围的塑性区。他们得到了一个井眼稳定性极限,在这个极限条件下,流体的流动参数等于岩石的强度参数,即:

$$\frac{\mu q}{2\pi h k_c} = 2S_0 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (13)$$

式中, μ ——流体粘度

q ——流体流量

h ——生产层的高度

k_c ——塑性区的渗透率

S_0 ——岩石的抗剪强度

ϕ ——内摩擦角

按照这种分析法,要使井眼稳定,则方程(13)左边的值必须小于右边的值。

Fahrenthold^[24]曾在流向裸眼井和受约束井的非均匀液流的流场和多孔弹性情况

下应用了复变函数映射。进行这项研究的目的是为了预测射孔孔眼周围地层的破坏情况。

在分析地层颗粒侵入生产井的过程中, Geertsma^[15]认为, 井眼周围的岩石在保持相容性的同时要丧失凝聚力。他指出, 井眼失稳不是由应力造成的, 而是由应变造成的。用考虑了孔隙压力效应的应变软化塑性理论可以建立这种现象的模型。Geertsma得出的结论是, 用目前的井眼稳定性分析方法可预测安全的最小容许井眼压力, 但对于易碎地层, 用它们预测出的最大容许井眼压力太高。今后的研究可望获得更好的实用估算法。

现场井眼稳定性问题的研究

井眼稳定性方面的大多数研究都是针对现场情况进行的。这一节简要讨论其中与具体问题有关的几项研究。研究的对象包括: 盐丘内和盐丘附近的井眼破坏, 高横向地应力地区的钻井问题, 地层塑性流动引起的套管挤毁, 压力和温度梯度引起的地应力变化, 以及由井壁裂缝型式确定地应力方位。

最新的研究表明, 在钻井过程中, 不利的地应力能使井眼失稳。据信, 盐丘周围地层应力场的改变会增大井漏和薄弱岩石塑性坍塌的危险性。Bradley^[25]建议利用井眼稳定性理论并根据井史记录来估算地应力和岩石强度, 并将这些估算值用于设计同一油田今后的井的井眼轨迹、泥浆类型和泥浆密度, 以及套管下入深度。

Hottman等人^[26]曾用阿拉斯加湾的井眼不稳定性数据来计算该地区较高的水平地应力的近似值。他们得出的结论是, 逆冲断层和由此造成的较高的水平应力与异常高的孔隙压力有关。他们讨论了与过平衡压力钻井或使用低泥浆密度有关的钻井问题, 过平衡压力钻井会降低钻速, 增大压差卡钻的可能性, 而使用低密度泥浆可导致井眼失稳, 并使井眼不好评价, 增大扭矩, 以及引起卡钻和井眼报废。

在某些载荷条件下, 岩石的塑性流动会挤毁套管。据信, 对于在盐岩层段受到均匀载荷的套管来说, 盐岩作用在它上面的压力随着时间的推移而不断增加, 最终等于上覆地层应力^[27]。设计出能够承受住这种均匀载荷的套管是不成问题的。但是, 水泥环中的空隙使盐岩得以流动并产生非均匀的套管载荷。设计出能够承受住最不均匀的载荷的套管, 看来是不可能的。

白垩岩产层段中的套管也可能被挤毁。Pattillo和Smith^[28]分析了由射孔套管周围的白垩岩流动引起的一些问题。他们在二次屈服条件下模拟了白垩岩, 指出, 套管破坏与油气藏生产压差对射孔套管周围白垩层应力的影响有关。

水力压裂施工中产生裂缝的压力取决于井筒周围的地应力。Perkins和Gonzalez^[29]分析了注入大量的冷水为何能够降低井眼周围的地应力, 进而降低压裂地层所需的压力。

Gough和Bell^[30]根据加拿大和得克萨斯州的井的井壁岩石剥落情况推断出了最大地应力和最小地应力的方位。他们得出的结论是, 由于应力集中使井眼按长轴方向延伸(其长轴在西北—东南方向上), 在应力集中区, 水平地应力较大, 且互不相等。他们认为, 最大水平压应力作用在井眼的长轴上(如果井壁岩石这种剥落现象是由较大的压应力造成的, 则可以得出这样的结论, 即最大地应力的方向在 90° 和Gough及Bell假

定的那个方向之间)。

需要进一步开展的研究

要分析井眼稳定性,则必须了解地应力和岩石性能。在用现场数据推算井眼周围地应力和岩石强度方面已经取得了进展,但要大幅度提高预测井眼稳定性的精度,则需要有更好的原地应力计算法和岩石强度参数的准确测量技术。为了描述岩石的应变硬化和应变软化塑性流动,需要确定更真实的岩石结构关系,这种结构关系应考虑岩石强度各向异性和流体压力梯度效应。

结 论

使井眼失稳的因素很多。页岩的水化能增大它的膨胀压力,进而有可能引起井眼破坏,平衡活性的油基泥浆和聚合物泥浆为控制这类井眼不稳定问题提供了两种方法。井眼压力不得超过地层破裂压力,但必须大于发生井喷的压力。在地压地层中,井眼压力的上限和下限差不多大。低井眼压力也可能导致井壁坍塌和固体颗粒侵入井眼。

在过去40年内,人们针对井眼失稳的各种原因,研究了一些预测法。当斜井周围的地层含有静止孔隙流体或流动着的孔隙流体时,弹-塑性分析法可用来计算这种斜井周围的地应力。用屈服条件可以解释井眼周围岩石塑性流动期间的应变软化现象。然而,为了更真实地描述岩石的力学特性,需要确立更好的岩石结构关系,这种结构关系应考虑岩石各向异性的影响。

更准确地计算地应力和测量岩石物理性能,对更好地控制井眼稳定性大有帮助。随着本文介绍的这些领域取得不断进展,井眼稳定性工程正在逐渐从仿真阶段向工程科学阶段演化。

符 号 说 明

- c——有效应力方程中的孔隙压力系数
- C——用于抛物线型屈服函数的材料性能常数
- E——杨氏弹性模量(弹性应力-应变曲线的斜率)
- $f(\bar{J}_1)$ —— \bar{J}_1 的函数
- h——生产层的高度
- J_1 ——平均应力
- \bar{J}_1 ——有效平均应力($=J_1 - p$)
- J_2 ——广义剪切应力
- K_0 ——塑性区的渗透率
- l——外表面的法向与x轴的夹角的方向余弦
- p——孔隙压力

参 考 文 献

1. Westergaard, H.M.: "Plastic State of Stress Around a Deep Well," *J. Boston Soc. Civil Eng.* (Jan. 1940) 27, 1-5.
2. Hubbert, M.K. and Willis, D.G.: "Mechanics of Hydraulic Fracturing," *J. Pet. Tech.* (June 1957) 153-66; *Trans.*, AIME, 210.
3. Fairhurst, C.: "Measurement of In Situ Rock Stresses, with Particular Reference to Hydraulic Fracturing," *Felsmechanik und Ingenieurgeologie* (1964) 2, 129-43.
4. Terzaghi, K.: *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York City (1943).
5. Carroll, M.M.: "Mechanical Response of Fluid-Saturated Porous Materials," *Proc.*, 15th Intl. Cong. Theoretical and Applied Mechanics, Toronto (Aug. 17-23, 1980) 251-62.
6. Biot, M.A.: "General Theory of Three-Dimensional Consolidation," *J. Appl. Phys.* (Feb. 1941) 12, 144-64.
7. Biot, M.A.: "Theory of Elasticity and Consolidation for a Porous Anisotropic Solid," *J. Appl. Phys.* (Feb. 1955) 26, 182-85.
8. Bowen, R.M.: "Compressible Porous Media Models by Use of the Theory of Mixtures," *Intl. J. Eng. Science* (1982) 20, 697-726.
9. Lubinski, A.: "The Theory of Elasticity for Porous Bodies Displaying a Strong Pore Structure," *Proc.*, Second U.S. Natl. Cong. Applied Mechanics, ASME (1954) 247-56.
10. Weidner, J.B. and Paslay, P.R.: "Analytical Description of Behavior of Granular Media," *J. Eng. Mech. Div. Proc. ASCE* (April 1969) 379-95.
11. Johnson, J.N. and Green, S.J.: "The Mechanical Response of Porous Media Subject to Static Loads," *The Effects of Voids on Material Deformation*, S.C. Cowin and M.M. Carroll (eds.), ASME (1976) 92-123.
12. Kojić, M. and Cheatham, J.B.: "Theory of Plasticity of Porous Media With Fluid Flow," *Soc. Pet. Eng. J.* (June 1974) 263-70; *Trans.*, AIME, 257.
13. Cheatham, J.B., Allen, M.B. and Celle, C.C.: "Kinematic Hardening of a Porous Limestone," accepted for publication, *Rock Mech. and Rock Eng.* (1984).
14. Nordgren, R.P.: "Strength of Well Completions," *Proc.*, 18th Symposium on Rock Mechanics, Keystone, CO (June 1977) 4A3-1-9.
15. Geertsma, J.: "Some Rock-Mechanical Aspects of Oil and Gas Well Completion," paper EUR 38 presented at the European Offshore Petroleum Conference and Exhibition, London, Oct. 24-27, 1978.
16. Gray, G.R. and Darley, H.C.H.: *Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids*, Gulf Publishing Co., Houston (1980) 338-90.
17. Chenevert, M.E.: "Adsorptive Pressures of Argillaceous Rocks," *Proc.*, 11th Symposium on Rock Mechanics, Berkeley, CA (June 1969) 16-19.
18. Chenevert, M.E.: "Shale Control With Balanced Activity Oil-Continuous Muds," *J. Pet. Tech.* (Oct. 1970) 1309-16; *Trans.*, AIME, 249.
19. Darley, H.C.H.: "A Laboratory Investigation of Borehole Stability," *J. Pet. Tech.* (July 1969) 883-39; *Trans.*, AIME, 246.
20. Darley, H.C.H.: "Advantages of Polymer Muds," *Pet. Eng. Intl.* (Sept. 1976) 46-52.
21. Bradley, W.B.: "Failure of Inclined Boreholes," *J. Energy Resources Tech.* (Dec. 1979) 233-39; *Trans.*, ASME, 101.
22. Paslay, P.R. and Cheatham, J.B.: "Rock Stresses Induced by Flow of Fluids into Boreholes," *Soc. Pet. Eng. J.* (March 1963) 85-94.
23. Risnes, R., Bratli, R.K., and Horsrud, P.: "Sand Stresses Around a Wellbore," *Soc. Pet. Eng. J.* (Dec. 1982) 883-94; *Trans.*, AIME, 273.
24. Fahrentz, E.P.: "Elastic and Plastic Stresses in a Porous Medium Containing Spherical and Cylindrical Cavities," PhD dissertation, Rice U., Houston (May 1984).
25. Bradley, W.B.: "Borehole Failures Near Salt Domes," paper SPE 7503 presented at the 1978 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Oct. 1-4.
26. Hottman, C.E., Smith, J.H., and Purcell, W.R.: "Relationship Among Earth Stresses, Pore Pressure, and Drilling Problems, Offshore Gulf of Alaska," paper SPE 7501 presented at the 1978 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Oct. 1-4.
27. Cheatham, J.B. and McEver, J.W.: "Behavior of Casing Subjected to Salt Loading," *J. Pet. Tech.* (Sept. 1964) 1070-76.
28. Patillo, P.D. and Smith, M.B.: "The Effect of Formation Flow on the Integrity of Perforated Casing," paper SPE 11123 presented at the 1982 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Sept. 26-29.
29. Perkins, T.K. and Gonzalez, J.A.: "Changes in Earth Stresses Around a Wellbore Caused by Radially Symmetrical Pressure and Temperature Gradients," *Soc. Pet. Eng. J.* (April 1984) 129-40.
30. Gough, D.I. and Bell, J.S.: "Stress Orientations from Oil-Well Fractures in Alberta and Texas," *Can. J. Earth Sci.* (1981) 18, 638-45.

(译自《Journal of Petroleum Technology》1984年6月号)

井眼稳定性——岩石力学

Rolf K. Bratli
Rock Mech A/S

常 思 译
张祖兴 校

摘 要

一个油田开发费用的主要部分是钻井成本，而钻井过程中的井眼稳定问题将影响到油田开发的经济性。

本文应用岩石力学原理阐述了井眼稳定分析方法，并表明计算出的钻井液密度的安全极限对降低成本有着很大潜力。

应用这种方法，需要从系统地收集岩石力学特性的基本数据开始。这些数据包括：原地应力、岩石强度和弹性参数。

引 言

当今石油工业正面临这样一个现实，即新油田的开发成本在稳步增长，而油价却是不定的。在这种形势下，重要的是要在可靠的基础上作出开发新油田的决定。由于岩石是生产油气的“容器”，为了作出合理的决定，岩石力学数据将变得越来越重要。

目前，一个油田开发费用的主要部分是钻井成本。如果能将开发井钻成大斜度井，那么每个平台可开发较大的区域，其结果是减少了所需的生产平台数，相应地也就降低了开发成本。钻大斜度生产井时稳定井眼将是至关重要的，而钻穿储层上方非常软弱岩层的岩石时稳定井眼则尤其重要。在北海和Haltenbanken地区，即使钻垂直井，这些软弱岩层也会引起相当大的麻烦，钻斜井时情况就更糟了。为了尽量减少钻井过程中出现这类问题，有必要了解这些岩石的特性。

本文集中讨论了应用岩石力学原理来分析井眼的稳定性，尤其针对大斜度井眼。文中没有列出有关方程式，但给出了一些必要的参考资料。本文旨在论述这种分析方法以及一些必要的考虑因素。

一些实际考虑

评价一口井的稳定问题是常规的岩石力学问题，即预测岩石受机械载荷后的反应。不过，岩石力学在石油开发上还是个相对较新的课题。另外，人们在应用岩石力学原理分析井眼稳定问题时会遇到以下一些特殊问题：

1. 钻头在井下几千米深处工作，由于没有好的方法来进行直观观察，因而难以了

解到在某一特定情况下井下究竟实际发生了什么。

2. 原地应力可能有很大的变化, 而目前尚无办法能系统地测量油田的这些原地应力。

3. 原始岩石的材料参数变化很大。虽然取心成本很高, 但由于地质工程和油藏工程都需要使用这些岩心, 因而将只获取有限的材料来做岩石力学方面的测试。

4. 井筒周围的岩石上存在多个力的作用, 而且除应力重新分布以外, 还会由于孔隙压力及井眼流体压力的作用而产生压力的变化。另外温度变化及物理-化学变化也很重要。

井下应力的描述及井眼不稳定的原因

井下某一深度处的地层受垂直压应力、水平压应力以及孔隙压力作用。钻进时, 未钻部分的岩石必须要承受先前由钻掉的那部分岩石所承受的载荷, 这使得井眼周围岩石的应力发生变化。在弹性情况下, 井眼周围会产生应力集中, 如图 1。如果岩石不很硬, 应力的这种变化会使岩石产生破坏。

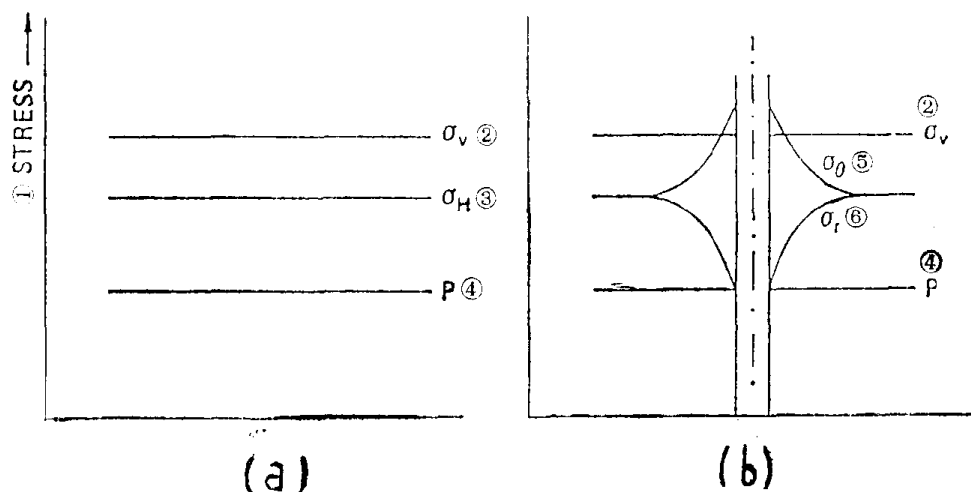


图 1 (a)未钻之前的应力分布, (b)钻完之后的应力分布图

①应力; ②垂直应力, σ_v ; ③水平应力, σ_H ; ④孔隙压力, P ;

⑤切向应力, σ_θ ; ⑥径向应力, σ_r 。

在钻井过程中, 为防止地层流体侵入井内, 并使岩石免遭破坏, 井眼内要充满钻井液。钻井液密度要加以调整, 使得井眼压力可以承受部分次生应力; 另外, 钻井液密度增加得过高, 会压裂地层并造成井漏。

目前, 将钻井液调整到最小密度主要出于防止地层流体的侵入, 而不是出于地层稳定的角度来调整最小钻井液密度。这种情况在致密岩石中是合适的, 但在软弱岩石中就得从井眼稳定角度(不是孔隙压力)来调整钻井液的最小密度。从原理上讲, 井眼破坏有两种方式, 如图 2。压缩破坏是由于钻井液密度不足而造成的, 而拉伸破坏则是钻井液密度过大的缘故。

井径缩小通常是由于地层的塑性流动所造成的(如塑性页岩、盐层), 因而需要对