

## 高地应力地层深孔钻探护壁与稳定控制技术

马德义 杨新江

新疆维吾尔自治区地质局阿克苏地质大队, 新疆 阿克苏 843000

**[摘要]**随着深层矿产资源的开采以及地下空间的应用越来越广泛, 在这样的大背景下, 对高应力地层中深孔钻探所遇到的卡钻失稳的问题也越来越严重化成为了影响整个项目的进展过程中的一个很大的技术难题。文章通过系统的研究分析了在高应力地层中孔洞失稳的发生原因, 即主要是由地应力和工程扰动共同作用下所造成的由于岩石强度低于地应力的压力而产生的剪切破坏、拉伸破坏以及蠕变变形等现象的结果来得出的结论。同时针对这个现象从优化钻井液配方, 设计合理化的套管方案出发提出了针对性的护壁技术; 另外从优化钻孔路径、调整钻进参数、孔壁压力释放、孔壁加固封堵等方面入手制定了系统的钻孔稳定的控制措施。更进一步的研究的是关于孔壁稳定性的评估标准、现场实时监测报警手段、围护结构整体评价体系和技术经济效益相适应程度等的技术应用成效评价系统。

**[关键词]**高地应力; 深孔钻探; 孔壁失稳; 护壁技术

DOI: 10.64635/ja.2026.1197

中图分类号: P634

文献标识码: A

### Borehole Wall Protection and Stability Control Technology for Deep-Hole Drilling in High In-Situ Stress Strata

Ma Deyi, Yang Xinjiang

Aksu Geological Brigade, Geological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Aksu, Xinjiang 843000, China

**Abstract:** With the exploitation of deep mineral resources and the increasingly extensive application of underground space, drilling jamming and instability encountered in deep-hole drilling under high-stress strata have become increasingly serious, posing a major technical challenge to the progress of related projects. This paper systematically analyzes the causes of borehole instability in high-stress strata. The results indicate that borehole instability is mainly caused by the combined effects of in-situ stress and engineering disturbance, leading to shear failure, tensile failure, creep deformation, and other phenomena when rock strength is lower than the pressure exerted by in-situ stress. In response to this problem, targeted borehole wall protection technologies are proposed from the perspectives of optimizing drilling fluid formulations and designing rational casing programs. In addition, systematic borehole stability control measures are developed, including optimization of drilling paths, adjustment of drilling parameters, borehole wall pressure relief, and borehole wall reinforcement and plugging. Furthermore, an evaluation system for the application effects of related technologies is established, covering borehole wall stability assessment criteria, on-site real-time monitoring and early warning methods, overall evaluation of support structures, and the adaptability between technical measures and techno-economic benefits.

**Keywords:** high in-situ stress; deep-hole drilling; borehole wall instability; borehole wall protection technology

#### 引言

深孔钻探是探索地球深处的秘密, 获取深层矿产财富、进行深部地学及工程研究的有效途径之一。随着探测和开采深度从几十千米甚至向千米以下迈进, 钻探过程遇到的各种地质条件越来越复杂, 尤其是一些高压状态下易造成钻孔壁坍塌的地层更为突出。高压条件下岩体内积蓄了大量的弹性能, 钻进扰动打破了地层内部原有的应力状

态, 在钻柱周围产生应力集中区; 当集中应力大于岩石强度时就会出现钻穿孔壁、劈裂孔壁、软岩中的蠕变现象等一系列事故, 使卡钻、埋钻、井漏等一系列事故频繁发生, 给钻探带来极大的安全隐患, 浪费了大量的时间, 加大了工程造价。因此, 加强高应力地层大直径深孔钻进护壁及加固措施的研究很有必要, 有重要的理论指导作用以及实际的应用价值。

## 1 高地应力地层孔壁失稳机理分析

高地应力地层孔壁失稳的本质是由于钻探工程破坏引起应力重分配及材料本身的力学特性不相适应造成的。孔壁失稳机制复杂,一般为多重破坏方式相互叠加的结果。首先是应力集中是造成孔壁失稳的主要因素,在开挖成孔以后,原来处于三向应力平衡下的岩体,径向应力消失而切向应力加大很多。按照弹性力学原理,在均质水平地应力环境条件下,孔周围最大的切向应力可以达到原始地应力的两倍以上乃至更多倍数。一旦这种集中的应力超过了岩石所能承受的最大限度,孔壁就会遭到破坏。对于脆性岩石,主要是出现剪切破坏形成“狗腿”或者坍塌;而对塑性岩石来说就是产生挤压变形或者缩径<sup>[1]</sup>。其次,岩体结构面及其强度的不同方向对于孔壁的稳定性有着支配效应。地下深处往往存在大小不同的各种节理,裂隙、层理等地质面,它们都是较薄弱的层面,使岩体力学指标降低很多,在高应力状态下,当钻孔遇到地质层面时极易沿层面产生剪切、扩张,导致崩塌和片落。尤其是钻孔轴线与主层面成一定角度如 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 等情况下,孔壁的失稳问题更严重,再加上高地应力和流体介质之间的相互影响更使得问题更加复杂,钻孔的过程中钻井液同岩石之间以及同地层流体之间的交换会使岩石出现一系列物理化学变化。泥页岩在吸水的过程中,强度可能下降到 $40\%\sim 60\%$ ,并且会产生附加的压力,与地层应力相加,更容易导致孔壁失稳,另外,在高应力状态下的岩石由于微裂缝的出现会使得其渗透性能发生变化,产生流体与固体相互作用的效果,最终引起孔壁的侵蚀破坏,岩石的流变性质也是深孔钻探时需要考虑的重要因素,比如盐岩、软弱的泥页岩等地质层会有明显的蠕变现象,即使最初的应力没有超过瞬间破坏值,在长时间的高压下,孔壁会发生随着时间推移而逐渐发生的塑性流动变形,导致孔径缩小或受到挤压的情况,严重的还会使套管产生形变,蠕变失稳有延后性和持久性,给钻井液护壁、井眼稳定控制带来长期性难题。

## 2 高地应力地层深孔钻探护壁技术

### 2.1 钻井液体系优化与性能控制

钻井液是钻探工程的“血液”,它的质量好坏直接影响着孔壁的状态,在高低应力地层下,钻井液体系完善的关键就是做到以下三层协调:力学平衡、化学平衡及物理封堵平衡。从力学平衡来看,主要是要准确选定钻井液密度,传统的以地层孔隙压力和破裂压力为准,但对高地应力地层而言,还应考虑地应力引起的坍塌压力,在测井

曲线、地应力测试、岩石力学参数的基础上,构建坍塌压力剖面图。进而得到钻井液密度的安全范围,合理的提升钻井液密度,增加足够的液柱压力去抗住孔壁,这是对高地应力造成的剪切破坏最简单的方式。然而密度窗口相对较小,在较高密度时容易造成井漏,在化学平衡上对于水敏性的地层应该采用强抑制性的钻井液体系,例如油基钻井液或者合成基钻井液或者是高效能的水基钻井液等,加入相应的抑制剂可以很好的抑制泥页岩发生水化胀开和分散,避免由于水化造成的强度下降和破裂压力叠加的问题;在滤液的化学作用上,改善滤液成分,使活度降低,达到与地层流体的化学平衡状态;在物理封堵上,对位于高地应力地层中存在的微裂缝,应增强钻井液所具有的封堵能力。采用加入超细碳酸钙、石墨及纤维等封闭材料,在孔壁外快速构建紧密牢固的泥皮并关闭邻近井壁周围的细微裂隙,阻止压力传输以及滤失物渗入,增加孔壁的“宽容量”。<sup>[2]</sup>对裂缝发育的地层还应研制与其裂缝宽度相对应的随钻堵漏材料,做到“钻而堵之”。如某高地应力破碎带地层钻探工程,在微裂缝造成的井壁剥落问题上采取了强抑制性聚磺防塌钻井液体系。配方如下:4%钠基膨润土+0.3%纯碱+0.2%KPAM+2%FT-1+3%超细碳酸钙+0.5%聚合醇。其密度范围是 $1.25\sim 1.30\text{g/cm}^3$  API滤失量小于3ml。现场效果证明其利用聚合醇的浊点效应及沥青物质的物理封堵作用,在井壁迅速生成了一张致密泥饼,有效的阻止了压力传递现象的发生,使该复杂井段的平均井径扩大率由原来的28%降低到9%以下,极大的降低了卡钻的可能性。

### 2.2 套管程序设计与下套管工艺

套管是最为终末的一道保障钻孔经久不衰的防线。在高应力条件下的套管程序方案不仅要解决钻孔内常见封隔问题还要预防解决地层缩径、蠕变及挤压等带来的挑战。首先是套管层次以及下入深度的设计,在进行此方面的设计时应该以精确的地层三压力剖面为基础来合理制定技术套管封固深度。对于蠕变地层来说应当选择使用厚壁、高强度的套管并保留充足的抗挤压安全系数。研究指出塑性流体地层中套管抗外挤强度的设计需要考虑到地层蠕变造成的长期且不均衡的载荷作用,并且这种设计的安全系数也应该大于一般地层中的1.25倍以上。其次是在下套管工艺环节上要保证好能够顺利下放到设计的目标深度。对于可能存在的缩径部分,在通井中应开展“拉-刮-扩”的工作,修理井壁。下套管时要控制好下放速率,防止由于过大压力激动引起地层破断或者井喷。对高应

力、易垮塌地层，建议采取“尾管加回接”的施工方案，减小套管在失稳井段上的裸露距离，减弱套管柱所受的压缩应力以及弯曲变形的概率。固井作业上，调整水泥膏系统保证其能经受较高温度环境及有较好的耐压性能、粘结效果，以避免由于水泥环失效造成套管支撑不足发生变形问题。

### 3 高地应力地层钻孔稳定控制方法

#### 3.1 钻孔轨迹优化设计与控制

钻孔路径规划是保障稳定的先决条件。在高应力环境下的岩体，合理设计钻孔轨迹能够大幅度的改善钻孔附近区域内的应力状况。钻孔轨迹设计的原则是尽量让钻孔的中心线与最大的主应力方向一致。由 Kirsch 公式可知，当钻孔沿着最大的主应力方向进行时，孔壁周围的压力最平均，压力集中度最低，减少了剪切破坏的发生可能性；相反，如果钻孔与最大主应力方向成直角或者大角度相交，那么孔壁就会受到极大的不均衡的作用力，在最小主应力作用下出现“耳状”的应力集中带，很容易导致井壁坍塌，所以在前期地质设计的时候要充分利用好地应力测试的结果，设计出与地应力场相适应的井眼轨迹。但是在钻进过程中，利用旋转导向等多种先进的仪器设备，准确操控好钻具轨迹，防止由于钻头方向的变化而导致井壁坍塌情况急剧增加的现象发生。

#### 3.2 钻进参数匹配与动态调控

钻进参数直接影响着孔壁的稳定性，不良参数会引起过大的机械振动或者压力波动，引起或者是加重了孔壁失稳。低钻压，高转速的参数容易引起钻柱的涡动和横向振动，给井壁造成周期性的冲击从而引起疲劳破坏；或者引起钻具弯曲，在造斜段或是大斜度井段造成“键槽”现象或者“狗腿”，阻碍了套管的顺利下入。合适的钻进参数应该做到“平稳、连续、高效”，以保持井底压力的平衡。在通过脆性地层的时候更要注重起下钻以及刮削之类的动作引起的“抽吸”、“激动”压力。基于水力模型，实时计算并及时调节泵速及排量大小，使 ECD 处于允许范围内是避免井漏、以及井塌发生的重要手段。

#### 3.3 孔壁应力释放与卸压技术

在极高地应力地质条件下，有目的地释放一部分地应力是降低孔壁应力的有效手段之一。卸压的方法主要是通过钻孔开凿小直径先导孔或者使用扩张钻头等方式达到的目的。先导孔可使应力集中带向更深的位置扩散，进而减少完钻后剩余孔径处的应力集中的强度；分级扩张法即把一个大直径一气呵成的一次成孔分成若干个小直径分

步进行扩孔的过程，这样就大大缩小了一次扩孔对于岩石的应力影响量；卸压法主要用于处理高应力软弱岩层，它是利用钻孔或水力切缝等方式使孔壁周围的岩石产生卸压空间或者卸压带，从而把孔壁附近高压向深处或者大面积散开。此方法可以认为是在孔壁与地应力场之间设置了一个“缓冲区”，从而大大减少作用于孔壁的有效应力而遏制岩石发生塑性变形直至破裂的情况。如：在盐岩或者强蠕变泥岩等易造成缩径的地层环境下，先期开凿几个直径小，沿半径方向深度大的卸载孔，就可以大大减慢主孔径扩的速度。

#### 3.4 孔壁强化与堵漏技术

如果孔壁已经有失稳征兆或者非常危险的情况下就需要进行加固和封堵，要及时“补牢”。孔壁加固方法分为物理加固以及化学加固两种。物理加固主要是采用下膨胀管，使失稳部位形成一层紧紧包裹孔壁的金属“套管”，直接承受地层压力，隔离出事故地层。膨胀管技术可以在不丧失井径大小的基础上，迅速有效地加固孔壁。化学加固是指向地层内泵送粘结性物质的化学浆液，以渗透、扩散的方式把破碎带或微裂缝胶结起来，增强孔壁周围的岩石块体的完整度和稳定性。堵漏技术用于封堵由高应力导致的裂缝型漏失最为有效。常规桥塞堵漏对于高压高渗裂缝性漏失情况效果不佳。近年来研发出的“凝胶-水泥浆”复合堵漏，“高失水”堵漏和“交联聚合物”等智能化堵漏工艺可以根据漏失孔道类型自动调节，生成强而有力，坚韧耐久的封堵体<sup>[3]</sup>，并且发展了钻井随钻堵漏技术，把堵漏剂当成钻井液的一部分，在钻井的时候就能对微漏进行及时封堵，防微杜渐。针对高应力引起的裂缝型恶性漏失，在施工现场采取过“预交联凝胶+纤维水泥”组合封堵法。即先泵入由 4%预交联凝胶颗粒和 0.5%有机铬交联剂及 0.3%引发剂配制而成的堵漏浆液 8m<sup>3</sup>，通过凝胶胶体优异的变性性能堵塞裂缝主要流道孔洞；再泵入混入了 1.5%玄武岩短纤维的 G 级微膨胀水泥浆进行加固封堵。

### 4 技术应用效果评价与监测

#### 4.1 孔壁稳定性评价指标

构建一个科学合理、可衡量的岩屑稳定性的评定标准是评判施工成效的前提条件，主要分为直接指标与间接指标两种类型。直接指标有：井径增大幅度、井径规整性、井漏体积数、坍塌物质返出数量、起下钻遇阻/遇卡次数、电测成功率为数。其中井径增大幅度最直观地体现了整个孔壁的径向稳定性情况，在规定范围内优质孔段井径

增大幅度应小于等于 5%~10%，而间接指标主要有：钻井液特性指标、实时观测到的环空压力值以及扭矩值还有钻具震动等等，通过对以上几种数据出现异样的情况进行分析，从而反推出孔壁的状态来。另外，通过测井得出所求得的动态岩石物理参数能够更加准确的评价洞身围岩的完整度<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 实时监测与预警技术

实时监控是孔壁稳定的“眼睛”。目前大部分深孔钻进都安装有随钻测量（MWD）、随钻测井（LWD）、地面综合录井仪器。随钻测量仪器可实时传输井斜角与方位角以及工具面角等轨迹参数，井底压力与温度等工程参数为轨迹控制与压力管理提供实时参考；随钻测井可以实现实时测量地层电阻率、自然伽玛、声波速度、密度、中子孔隙度等数据，通过岩石力学分析可以反演孔壁的当前力学状况。

#### 4.3 护壁效果综合评价方法

护壁效果的整体评估必须把以上直接指标、间接指标以及工程进度、造价等方面综合考量进去。可以运用综合评价法如层次分析法（AHP）、模糊综合评价法等系统工程的方法来进行综合评价。可建立多级次的评价体系，如可以有目标层、准则层、指标层等，利用专家评分的方式计算出各指标所占的比例大小来对不同护壁方式或者施工过程中打分并加以对比，这样可以避免单个指标带来的偏差从而更加公正全面地反映出技术的应用效益。

#### 4.4 技术经济性与适应性分析

技术最终要服务工程应用，经济性和适用性才是能不能推广的根本所在。对于技术经济性的评估，就是考虑采用某种护壁技术所需要投入的直接成本以及带来的间接收益。一般采用净现值（NPV）、投资回报率（ROI）来衡量。而对技术的适用性主要是看其适用不同的地质条件情况。比如油基钻井液护壁效率很高，但是环保要求严格、费用高，适合用于水敏特别严重同时有环保许可的区块；膨胀管技术针对性很强，但是工艺很繁琐、风险较大，适合用于一些关键部位的定点加固。所以在选择的时候就要针对具体的工程的地质条件、环境限制、资金需求，采取

“因地制宜”的技术搭配方式。

#### 5 结束语

高应力围岩中深孔钻进过程中防塌防垮控稳定是一个复杂的技术集成问题，涉及到岩石学、钻井工艺、材料科学以及自动化控制等多个领域。高应力围岩孔壁不稳定的发生来源于高应力、岩体结构、流体相互作用以及岩石的蠕变等因素综合作用的结果，必须建立起依靠精细的地应力场和岩石力学参数来描述的不稳定模型作为接下来进行防范的基础。提出了一个包括了“主动预防—动态控制—主动性救援”三个层次的技术体系。其中，钻井液体系就是通过力学—化学—物理之间的协调来进行的，而轨迹调整与卸压就是从根本上减少应力破坏的一种预处理方式等措施。构建了包含直接指标、间接指标和实时监控、智能化报警、综合评估和经济性分析全过程的效果评价框架，保证技术的应用及升级发展顺利进行。今后，只有不断推陈出新，构建起“机理清楚、技术一流、评价合理”的完整的技术链才可以给深孔钻进工程的安全施工提供有力保障。

#### 【参考文献】

- [1]马竹,陈鹏宇,宋倩,等.高地应力隧道围岩力学行为分析[J].四川建筑,2025,45(05):166-167.
- [2]朱福建.复杂地层深孔钻探泥浆护壁技术分析[J].中国高科技,2019(08):12-14.
- [3]李佳欣,陈勉,夏阳,等.塔西南高地应力地层井壁失稳特征及影响因素分析[J].东北石油大学学报,2025,49(02):84-96+136-137.
- [4]李志敏.复杂地层深孔钻探泥浆护壁技术探讨与实践[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(22):189-190.

作者简介：马德义（1970.10—）男，汉族，内蒙古通辽市开鲁县，大专学历，探矿工程高级工程师，研究方向：固体矿产钻探施工；定向钻进施工；高原冻土层施工方法研究；杨新江（1982.06—），男，彝族，籍贯：云南凤庆，大学本科学历，探矿工程副高级工程师，研究方向：固体矿产钻探施工，高原冻土层钻探施工，定向钻探施工方法与工艺研究。