

# 岩心钻探中地层压力预测初探

汪涛

(中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083)

**摘要:**地层压力变化是导致孔内情况复杂化的关键因素,地层压力预测是钻探施工中泥浆设计和事故防范的重要手段,合理预知地层压力情况有助于最大限度地解决深孔钻探中的复杂问题<sup>[1]</sup>。近年来,地层应力预测技术在国内外得到了广泛探讨,而传统的水压致裂地层压力测量方法仍然是简单实用的手段之一。通过云南某矿区复杂地层深孔钻探工程中的应用实例,验证了地层压力预测在绳索取心钻探工程上的合理性和可行性。

**关键词:**地层压力;预测;岩心钻探;孔壁失稳;泥浆设计

**中图分类号:**P634.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2012)10-0016-04

**Formation Pressure Prediction for Core Drilling Operation/WANG Tao** (China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The change of underground formation pressure is crucially related to the complexity of borehole condition. Formation pressure prediction is an important means for borehole design and drilling risk control, and rational prediction of formation pressure is furthest solving complicated difficulties in deep drilling. In recent years, modern techniques of earth stress prediction have been widely explored in academic circle and application field in the world; but the traditional water-pressure test is still the most applicable method due to its simplicity of on-site operation. In this paper, by the case of a deep drilling project in complex formations in Yunnan Province, the rationality and feasibility of formation pressure prediction in wire-line coring drilling activities are verified.

**Key words:** formation pressure; prediction; core drilling; borehole instability; mud design

## 0 引言

地层压力变化是导致孔内情况复杂化的关键因素,地层压力局部集中释放是导致孔壁坍塌等孔内事故的直接原因。预知地层结构和地层压力分布情况有助于采用合适的钻探工艺和泥浆工艺以有效维持孔内压力平衡,提高钻探作业效率并防范孔壁坍塌等钻孔事故的发生。

地层压力预测的方法包括传统的压力实验(如现场水压致裂实验)和仪器探测(如超声探测和电磁探测),以及当前国内普遍关注的地层压力三维预测系统(如澳大利亚 PSI 公司的全球地层压力预测系统)。多年来,地层压力预测在石油钻探行业得到了较为广泛的应用,而在小口径岩心钻探领域,由于泥浆泵性能及岩心钻探操作规程等原因,一直没有得到普遍使用<sup>[2]</sup>。

随着深孔、超深孔以及复杂地层钻探项目的不断增加,钻探的时间成本和资金成本都在大幅度上升,系统研究有效应对钻孔风险的技术方法已经日益显得迫切和重要。本文通过云南某矿区深孔钻探工程中的应用实例,验证了地层压力预测在绳索取

心钻探工程上的合理性和可行性。

## 1 地应力和孔内压力平衡问题

地层压力即地应力可理解为地下某深度处的岩石受到的周围岩体对它的挤压力而产生的内应力效应,地层压力变化是导致孔内情况复杂化的关键因素。形成地应力的因素极为复杂,它是随时间和空间变化的。主要产生原因为:上覆岩体的自重、板块边界的挤压、地幔热对流、地质构造运动、地球旋转、岩浆侵入、地温梯度的不均匀性和地下水的压力梯度等<sup>[3]</sup>。

对于钻探工程,所涉及的地应力研究属于局部性的地应力,其应力来源可归结为岩体的自重和地质构造运动产生的构造应力,主要以 2 种形式存在于岩石中:一部分是弹性能形式,另一部分是由于种种原因在地层中处于自我平衡而以冻结形式保存。

原始地应力大小可用 3 个主地应力来表示(见图 1):

- (1) 上覆地层压力  $S_v$ ;
- (2) 最大水平主地应力  $S_H$ ;

收稿日期:2012-09-07

作者简介:汪涛(1968-),男(汉族),山东人,中国地质大学(北京)博士生,地质工程专业,从事地质勘探设备市场销售、应用开发、工艺整合等工作,北京市海淀区学院路 29 号,lrzywng@yahoo.com。

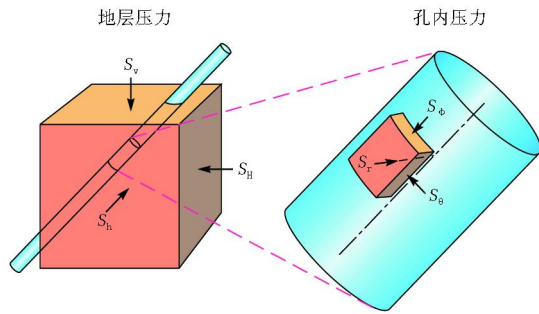


图 1 原始地层压力示意图

(3) 最小水平主地应力  $S_h$ 。

由于地质构造运动的方向性,2 个水平向的地应力是不同的,产生的原因也是很复杂的,其作用大小及方向也会随时间和地点的不同而各异。地史上形成并遗留下来的各种类型的断层、褶皱有助于我们判断当时地质构造力的大小及方向。但正断层、逆断层、走向滑动断层因其形成机理不同而产生的地应力的大小、方向也是不同的。实际的断层方向还可能是倾斜的,断块除了相对滑动外还可能产生旋转。

钻探工程中,当地层被钻穿以后,钻孔循环液液柱压力代替了被钻掉的岩石所提供的原始应力。钻孔周围的应力被重新分解为周向应力、径向应力和轴向应力,在斜孔中,还会产生一个附加的剪切应力。当某一方向的应力超过岩石的强度极限时,就会引起地层破裂(表现为孔内坍塌、掉块、缩径等)。知道地应力以后,可以指导钻探工程采取措施,调整泥浆配方和钻探工艺来防止孔壁失稳,实现平衡压力钻进。

地应力的实际情况比我们所能描述的要复杂得多,但为了工程计算的需要,通常采用简化实际情况的方法对地应力进行估算<sup>[4]</sup>。

上覆地层压力由岩石的自重产生,可用下式求得:

$$S_H = \int_0^H \rho(z) g dz$$

式中: $S_H$ ——深度为  $H$  处的上覆地层压力; $\rho(z)$ ——地层密度,可用取样试验法求得,是深度  $z$  的函数; $g$ ——重力加速度。

2 地层压力对钻孔的影响

预知地层压力并根据地层压力采取对应的钻探工艺和泥浆工艺维持孔内压力平衡,可以最大限度地解决孔壁坍塌等深孔钻探中的复杂问题。

造成孔壁坍塌的原因主要是由于地层被钻开

后,地层压力趋向于向孔内集中释放。当孔内冲洗液液柱压力与地层压力失衡时,孔壁周围岩石所受应力超过岩石本身的强度而产生剪切破坏<sup>[5]</sup>,如果是脆性地层就会产生坍塌掉块、孔径扩大,如果是塑性地层则孔内产生塑性变形出现孔内缩径(图 2)。

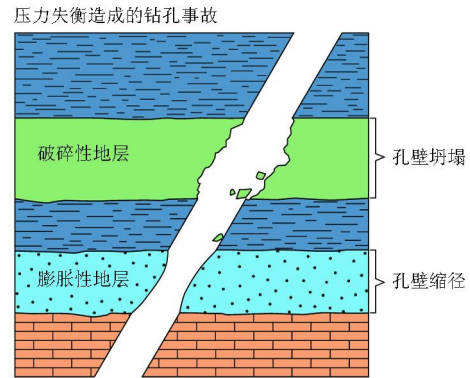


图 2 压力失衡示意图

孔内垮塌在地质方面的直接原因是岩石孔隙压力异常和岩石受地质构造影响,当孔内液柱压力小于坍塌压力时就发生孔内坍塌。解决这种原因造成的垮塌关键是计算岩层的坍塌压力,然后在钻进中采取措施达到孔内压力平衡。

垮塌还会因为物理-化学方面的原因,如泥页岩的水化作用产生水化膨胀压力使泥页岩强度降低,或因某种原因使岩石孔隙压力增大而发生孔内垮塌。因为地层的不均匀性,强度较低的岩石在侧压力的作用下向井内移动导致孔内垮塌。处理这类垮塌,首先要检测泥浆密度,密度过大可压裂地层,还会加速泥页岩地层水化分解<sup>[6]</sup>。

钻探工艺不恰当,钻探操作错误也会引起孔内垮塌。如冲洗液流量过大,泥浆对孔壁的冲蚀、孔内液柱压力“激动”过大而使孔内瞬时的液柱压力变化,造成孔壁岩石受力不均导致的孔内垮塌。另外,钻柱对井壁的机械碰撞,严重的漏失也可导致孔内垮塌。

在实践中,一般可以采取如下钻孔工艺防范孔壁坍塌<sup>[5,7]</sup>:

- (1) 预知地层压力分布,根据垮塌原因调整(提高或降低)冲洗液密度,使孔内液柱压力适应于岩层的坍塌压力;
- (2) 调配低失水、高矿化度、高滤液粘度的水基泥浆或钾基泥浆可有效抑制地层压力失衡;
- (3) 使用防塌泥浆体系,抑制页岩水化、增强泥浆的封堵功能。

在钻孔施工的过程中,孔内坍塌防范、卡钻事故

处理是非常重要的内容。其中,采用地层应力预测方法指导确定钻探工艺和泥浆工艺是岩心钻探行业的创新,经过探索性的实际应用,验证为是一种方便快捷、行之有效的方法。

### 3 云南某矿区地层压力预测应用实例

#### 3.1 工程概况

云南某银铅锌多金属矿床是昌宁-孟连成矿带南段的大型铅锌矿床,是滇西南重要的矿冶基地。但本矿区地处区域构造交汇部位,区内断层、褶皱极其发育,地层条件极其复杂。且钻孔深度普遍在1000 m以深,岩心采取困难,孔内坍塌、缩径、卡钻事故时有发生,施工难度甚大。

矿区常见孔内复杂情况是上部溶洞发育,因孔洞巨大常常堵漏无效,冲洗液漏失;中部巨厚凝灰岩缩径严重;下部孔段地层压力大裂隙发育,极易发生孔内垮塌现象,随之极易引发垮塌卡钻和缩径卡钻事故。

该矿区 ZK14830 号钻孔,设计孔深 1500 m,天顶角 90°,实际终孔孔深 1500.50 m。

#### 3.2 钻遇地层

0~2.40 m,表层浮土;

2.40~437.40 m,白云岩、白云质灰岩,溶洞发育;

437.40~851.2 m,凝灰岩、沉凝灰岩,局部夹玄武岩,含致密块状硫化物矿体;

851.20~1500.20 m,安山岩、角砾岩,节理、裂隙发育,含辉钼矿矿体。

#### 3.3 地层压力实测试验

钻进过程中,为确定最佳的钻探工艺和泥浆工艺,决定在参考当地地质资料的基础上采用水力压裂试验法测定地层应力分布情况。在作业现场通过实测地层破裂压力、瞬时停泵压力及裂缝重张压力,经过计算推导出相应的地层应力。

选用泵量输出大于 300 L/min,泵压可达 20 MPa 的优质泥浆泵,配备高精度防震压力表完成地层压力实测试验。具体实测试验步骤如下:

(1) 下套管后,继续取心钻进 3 m 左右;

(2) 泥浆泵以恒定的流速泵入泥浆,记录下井口每分钟的的压力变化值,直至地层产生破裂时结束;

(3) 地层破裂后继续向井内泵入泥浆,直至裂缝延伸到离开井壁应力集中区,即 6 倍孔径以远时,记录下瞬时停泵时的压力值;

(4) 停泵静止压力平稳后,重新开泵记录下裂

缝重张压力值。最后得到压力随时间变化的压裂试验曲线(图 3)。

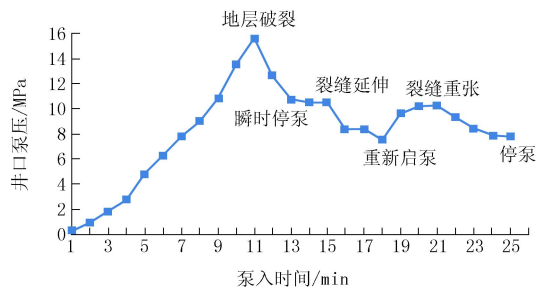


图 3 ZK14830 号钻孔水力压裂试验曲线

实验井深:780.45 m;冲洗液密度:1.70 g/cm<sup>3</sup>;孔压系数:1.20 g/cm<sup>3</sup>;  $P_f = 15.9$  MPa;  $P_s = 11.0$  MPa;  $P_r = 14.0$  MPa;  $S_t = 5.0$  MPa

#### 3.4 试验结果分析

图 3 中,曲线上各关键压力点的物理关系如下:

地层破裂压力  $P_f$  为钻孔内岩石所能承受的最大内压力,是地层破裂造成泥浆漏失时的孔内液体压力;

瞬时停泵压力  $P_s$  是停泵瞬间,裂缝不再向前扩展但仍保持开启时所对应的最小地应力值;

裂缝重张压力  $P_r$  是停泵后重新启动泥浆泵向孔内泵入泥浆使闭合的裂缝重新张开的压力。由于张开闭合裂缝所需的压力  $P_r$  与破裂压力  $P_f$  相比不需要克服岩石的拉伸强度  $S_t$ ,因此可以近似地认为破裂层的拉伸强度等于这 2 个压力的差值,即:

$$S_t = P_f - P_r$$

利用上述 3 个压力值,根据多孔弹性介质理论可以得到地应力的计算公式为:

$$\begin{cases} S_h = P_s \\ S_H = 3S_h - P_f - \alpha P_p + S_t \\ S_t = P_f - P_r \end{cases}$$

式中: $P_p$ ——地层孔隙压力; $S_t$ ——地层抗拉强度; $\alpha$ ——有效应力系数; $P_r$ ——裂隙重张压力; $P_f$ ——地层破裂压力; $P_s$ ——瞬时停泵压力。

由实测参数代入上式,求得地应力为: $S_{h1} = 113.98$  MPa,  $S_{h2} = 84.78$  MPa。

对应的地应力梯度为: $S_{h1} = 0.0263$  MPa/m,  $S_{h2} = 0.0195$  MPa/m,  $S_{h1}/\sigma_{h2} = 1.35$ 。

根据计算出的地层压力,结合孔内钻探条件,制定了有针对性的钻探操作方法和泥浆体系综合方案,通过调节泥浆的密度控制孔内压力平衡,同时通过调配泥浆配方的化学成分实现泥浆的最佳地层适应性,达到了防止孔内地层坍塌和最大限度地减小

孔内缩径现象。简化或消除了孔内复杂情况对钻进的影响。

#### 4 结论

地层压力预测在绳索取心钻探领域的应用尚在初步阶段,相关的应用规范、操作流程、误差修正还需要理论研究和实践探索。

随着深孔、超深孔、复杂地层钻探项目的不断增加,地层压力预测必将成为钻孔工艺设计和孔内风险防范的重要环节。预知地层压力情况,能够有效提高钻探作业效率,合理防范并处理孔内事故,从而提高钻探企业的运营效益和核心竞争能力。

本次地层压力预测实践采用了传统的水压致裂方法,操作相对简单且可因地制宜,但在泥浆泵设备和压力表选用,数据采集和处理方面需要一定的流

程和技巧,实验结果的误差范围还偏大,实际用于泥浆设计时应根据孔内反应实时调整。

近年来,地层压力预测的一些全新的技术手段在国际地质勘探领域得到了普遍关注。这些新技术手段操作简便,数据精确,为地层压力预测在勘探实践的应用推广创造了有利条件。

#### 参考文献:

- [1] 常文会,秦绪英.地层压力预测技术[J].地球物理进展,2005,(10).
- [2] 王薇,张海,任剑.地层压力方法综述[J].内蒙古石油化工,2010,(5).
- [3] 刘允芳.单钻孔水压致裂法的三维地应力测量[J].岩石力学与工程学报,1999,(4).
- [4] 刘翔.垂直孔与地应力破裂压力研究[J].钻采工艺,2009,(3).

## 大兴安岭地区找矿前景良好

《中国矿业报》消息(2012-10-16) 大兴安岭地区是20个国家级重点成矿带之一,其优越的成矿地质条件和巨大的资源潜力长期为地质专家所关注。中国地质调查局质量万里行活动调研组近日对大小兴安岭地区(以下简称大兴安岭地区)地质找矿进行了实地考察。调研组认为,近年来大兴安岭地区地质找矿取得重大进展,铜、铅锌、钼、金、银、富铁矿等矿产资源储量显著增长,显现出良好的找矿前景,有望成为新的国家级有色金属基地。

大兴安岭地区以往探明了黑龙江多宝山铜矿、内蒙古乌努格吐山铜钼矿、黄岗大型铁锡矿、白音诺尔铅锌矿等一批大型矿床。但是,由于森林、草原、沼泽等特殊的地貌景观条件,传统勘查技术手段受到明显限制,地质找矿工作曾经长时期效果不佳。1999年国土资源大调查实施以来,随着基础地质调查程度的提高、区域成矿规律研究取得新的认识、勘查技术方法攻关示范取得的效果,找矿取得重大进展。新发现并评价了黑龙江省岔路口钼矿、三道湾子岩金矿、内蒙古白音乌拉银铅锌矿等35处大中型矿产地,其中岔路口钼矿资源储量246万t;新发现翠中富铁矿,初步控制资源量4000万t。据不完全统计,截止到2011年底,大兴安岭地区探明铅锌资源储量2219万t、钼368万t、金487t、银28496t。与2001年相比,铅锌资源储量增加了2倍,金增加了2倍,银增加了3倍,钼增加了9倍,铜增加了0.7倍。根据目前资源基础,重要有色金属产能将大幅度提高,预期形成年产铜金属超过20万t、铅锌70万t、钼3万t、金25t、银350t的国家级有色金属资源基地。

内蒙古呼伦贝尔占大兴安岭成矿带面积的30%,2004

年以来设置探矿权436个,勘查面积1.3万km<sup>2</sup>,其中110个探矿权发现矿产,近50个有望达到中型以上规模。预计新增铜资源量100万t、钼100万t、铅锌600万t、银5000余t,即将建成15万t有色金属矿石/日矿山产能。

黑龙江大小兴安岭地区,近10多年来相继发现了松岭区岔路口钼矿、铁力市鹿鸣钼矿、黑河市争光金矿、黑河市三道湾子金矿、逊克翠中富铁矿等10多处大中型矿产地,估算铅锌资源量50余万吨、钼300余万吨、金100余吨、富铁矿矿石4000万t,形成了一批具有重要经济意义的矿集区。

同时,老矿山(区)通过外围深部找矿,新增了一批重要后备资源。初步统计,新增铜资源量60万t、铅锌360万t、银540t,其中内蒙古乌努格图山铜钼矿深部探获铜60万t、钼20万t;甲乌拉铅锌银矿深部探获铅锌300万t、银200t;得耳布尔铅锌银矿深部探获铅锌62万t、银540t。另外,黑龙江多宝山铜矿、争光金矿、翠宏山铁矿、东安金矿、团结沟金矿,内蒙古黄岗铁锡矿、朝不楞铁多金属矿、三河铅锌矿、白音诺尔铅锌矿、额仁陶勒盖银矿等矿的深部及外围尚有很大的找矿潜力。

专家表示,大兴安岭地处古生代古亚洲构造-成矿域与中生代环太平洋构造-成矿域叠加地段,多期成矿作用的复合,成矿地质条件优越、成矿强度大。根据全国矿产资源潜力评价成果,结合以往成果资料分析,大兴安岭地区重要矿产未查明资源潜力:铜600万t、铅锌4500万t、钼1500万t、金650t、银72400t,主要分布在已确定重要找矿远景区、整装勘查区和重点勘查区内,其重要有色金属矿产资源潜力巨大。