



金刚石钻进的钻孔弯曲问题

湖北地质局科研所

郭绍什 林凤章

一

岩芯钻探工作中, 钻孔弯曲的发生与发展, 是地质情况和钻进工艺技术的综合作用结果。每个矿区的具体情况各不相同, 各种因素对钻孔弯曲的影响也不一样。有些矿区可能是地质情况为主, 有些可能是钻进工艺技术为主。在某些情况下, 可能是两类因素相互促使; 也可能是两类因素相互抑制。因之, 对各矿区的钻孔弯曲原因应做具体分析, 不可一概而论。

金刚石钻进、硬质合金钻进、钢粒钻进虽都是机械迴转钻进, 但由于它们使用的磨料、破碎岩石机理、钻具组合、钻进参数等不同, 所以在相同的地质情况下, 引起的钻孔弯曲度有所不同。它们有共同之处, 也有其各自的特点。

众所周知, 钻孔弯曲是带有某些规律性的。在金刚石钻进中, 常见的规律是: 在变质岩中钻进时, 钻孔弯曲度大于在沉积岩中钻进, 更大于在火成岩中钻进; 钻进层里发育或软硬相间变换频繁的地层时, 如岩层倾角大, 而钻孔与岩层面夹角小于 $20\sim 25^\circ$ 时, 钻孔轴心线可能沿岩层面偏斜, 如岩层倾角小, 而钻孔与岩层面夹角大于 $55\sim 60^\circ$ 时, 钻孔轴心线趋向与层面垂直的方向发展; 钻进厚度较大的松散破碎地层时, 直孔一般出现上漂, 斜孔可能趋于下垂; 往往在钻孔顶角变化小时, 方位角变化大; 在钻孔顶角变化大时, 方位角变化小; 斜孔钻进时, 方位角向右上方(顺时针方向)偏斜的可能性大; 直孔钻进时, 随着顶角变化小的情况, 可能出现局部孔段方位角向左上方缓慢变化。

二

钻进时, 岩层的抗破碎性能与地质构造、岩层特性、小构造, 以及地层结构等有直接的关系。由于这些因素的存在, 在采用一定破岩手段

(破岩方式、破岩方法、破岩工具等)的情况下, 钻孔未能按预定方向呈直线发展, 而出现不同程度的弯曲。

显然, 对客观存在的地质情况不可能人为地予以改变, 只能是通过对它了解、分析、研究, 得以利用或就目前的技术水平改善破岩方法与工具以减少其影响。

岩层特性主要是指岩石组份、结构、构造、产状等。

小构造主要是指层理、劈理、片理、小褶皱、裂隙等及其空间位置、分布。

地层结构主要是指溶洞、卵石、砾石、包裹体、结核、岩脉、小侵入体、构造破碎带(如断层等)、裂隙充填物、风化带等原生构造、次生构造。

当然, 这些问题在某些情况下是相互关联的, 但它又不可能同时出现在某一个矿区, 因而我们对各个矿区的地质情况要做认真研究, 要从其各种特征的内在联系进行分析归纳, 找出其主要问题, 方可有针对性地采取预防钻孔弯曲的措施。

一般地说, 常见的超基性、基性、中性、酸性、碱性火成岩以及火山碎屑岩(如凝灰岩), 其主要矿物结晶颗粒虽粗细不均, 而质地较一, 层位较厚, 矿物分布较为匀散。尽管其矿物组份排列可能紊乱, 但引起钻孔弯曲的可能性较小。需注意的是, 在某些石英或长石或暗色矿物密集或解理发育的部位, 可能出现钻孔弯曲, 但只要在钻进工艺技术上加以注意, 通常不会成为突出的问题。

常见的砂岩、灰岩、白云岩等沉积岩以及沉积型矿层, 虽有沉积碎屑岩、化学与生物化学沉积岩、有机沉积岩之分, 但多成层状(或透镜状)出现, 如无明显的结构、构造变化, 而呈厚层状, 则钻孔弯曲问题不一定严重。但是, 某些频繁交互层或经次生构造形成的多重褶皱、严重破

碎甚至倒转的地层（尤其是老地层）或裂隙充填物异常或因结构、构造关系引起的钻孔超径、缩径、坍塌等地层，由于具有明显的各向异性，往往会引起钻孔弯曲。通常是钻孔轴心线随各互层间物理机械性质的差异和钻孔与岩层界面夹角的不同（即所谓遇层角），产生钻速差，出现“顶层进”或“顺层跑”的现象。

变质岩为主的矿区，钻孔弯曲的可能性明显地增加。其强弱的顺序大致是：浅变质形成的板岩、含铁石英岩、千枚岩化岩类等岩石；变质强烈的深部变质形成的角闪片麻岩、闪长片麻岩、阳起石片麻岩、混合片麻岩等片麻岩类和混合花岗岩类等混合岩化岩类岩石；动力变质的糜棱岩化类岩石；热液变质和围岩蚀变形成的硅化、夕卡岩化、接触交代岩石等。所有这些岩石构成的地层常伴有极为明显的岩性变化和小构造以及结构变异等。施工的钻孔必将按其特定的、多种客观条件综合的规律而发生弯曲，其弯曲度常是很突出的。

地层结构问题常是单一出现的，其影响多是个别钻孔或一个孔的部份孔段。这是由于钻孔在轴心压力和迴转力的作用下，沿其受力不均界面（主要是指钻孔与不均界面的交角）向着可能弯曲的方向发展，有时会出现局部的急剧弯曲。在情况出现前，如能有预见性地（如配合物探或地层推断或邻孔经验等）采取必要措施，或在问题发生后，采取纠正措施，是可以奏效的。

三

当前所采用的迴转钻进方式、施压方法、切削工具、钻具组合等，是在一定条件（主要指地层）下，产生钻孔弯曲的根由。

对于钻孔弯曲严重的矿区，采用冲击迴转钻进，会得到明显的改善。

但在现有机械迴转钻进和施压的情况下，根据地质特徵，采用相应的钻进技术方法，合理的钻进参数，适当的钻具级配，良好的钻具刚度，得当的钻头品种（唇部造型、胎体硬度、金刚石粒度与浓度、水道几何形状与数量），合理的使用钻头，优质的冲洗液，有效的护孔技术，以及配

备有关的器具（如孔底减震器）等综合措施，以尽可能地提高钻具的稳定性，减小粗径钻具与孔壁的环状间隙，改善钻头在孔底的工作状况，增强钻头的均匀破碎能力等，有可能增加钻孔沿直线方向发展的趋势。

一般地说，在钻孔由加压钻进转为减压钻进的100~150米的范围（不是指孔深）内和机械钻速异常变快的孔段，多是钻孔弯曲加剧的部位。

很显然，在钻孔弯曲突出的矿区，从钻孔开孔起就应十分注意浅部的稳斜、保直工作，这对深部钻进具有重要意义。

应当说明，本文只拟对孔底钻具的钻进工艺技术问题做些分析，而对由平整地基、设备安装、开孔工作、钻具加工等问题所引起的钻孔弯曲不做讨论。

1. 孔底钻具的受压因素 我们需要对钻进过程中孔底钻具（指粗径钻具而言）的受力状况进行分析研究，因为它往往是工艺技术因素中引起钻孔弯曲的重要问题。

向钻孔底部传递机械功的钻柱，其细长比值很小，常被视为弹性杆件。而钻头在孔底破碎脆性岩石时，常被视为半无限平面上的线载荷作用。根据材料力学中压杆稳定的计算得知粗径钻具的临界力是

$$P = \frac{\pi^2 EJ}{(\mu l)^2}$$

式中 E —弹性系数，一般钢材为

$$2 \times 10^6 \text{ 公斤/厘米}^2;$$

J —粗径钻具横断面的惯性矩，

$$J = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4), \quad (D \text{—粗径钻具的外径; } d \text{—粗径钻具的内径);}$$

l —粗径钻具长度;

μ —长度折算系数，粗径钻具在孔底可视为一端固定一端自由的压杆， $\mu = 2$ 。

显然，粗径钻具临界力的大小与其刚度 EJ 成正比，与其长度 l 的平方成反比。而在给定的孔底压力情况下，粗径钻具的临界计算长度是

$$l = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\pi^2 EJ}{P}}$$

如采用直径55毫米、壁厚3.5毫米的岩芯管，在 $P = 600$ 公斤的情况下，其计算长度 $l \approx 3.93$ 米。而采用直径45毫米、壁厚3.5毫米的岩芯管，在 $P = 500$ 公斤的情况下，其计算长度 $l \approx 3.13$ 米。由此可知，当粗径钻具的孔底实际临界力和临界计算长度超过临界值时，粗径钻具就可能失去弹性平衡（改变了动平衡状况），逐渐发生弯曲形变，从而导致钻孔的弯曲。

正常的孔底压力应根据所钻岩层、钻头底唇面积、钻头胎体硬度、金刚石品级、金刚石含量、钻杆与孔径差、管材质量等全面考虑确定。一般地说，完整的、中硬到坚硬的或弱研磨性的岩层，钻头底唇面积大、较硬的胎体、镶嵌颗粒小而好的金刚石，可允许适当地增大孔底压力。但在钻头磨钝后，切不可勉强使用，更不可盲目加压，单纯追求钻头进尺与钻进速度，那将造成许多不良后果。

2. 孔底钻具的迴转因素 粗径钻具在孔底迴转时，可视为一迴转摆，其迴转力矩的关系式为

$$M = J\omega G\omega_1$$

式中 J — 粗径钻具横断面的惯性矩；

ω — 粗径钻具迴转角速度；

G — 刚性模量；

ω_1 — 粗径钻具偏离转轴线转动的偏角速度。

很显然，粗径钻具在力矩 M 为一定值时，为了提高其稳定性和抵抗使粗径钻具出现偏斜力的能力（即降低 ω_1 值），就必须增加惯性矩 J （采用厚壁管材）或合理地增加钻具转数，或两者同时采用。

正常的转速应是，一般的完整、均质、弱研磨性的岩层可采用较高的转速，而裂隙、破碎、非均质的和高研磨性的岩层须降低转速。孕镶钻头的转速需高于表镶钻头，细粒金刚石钻头的转速要比粗粒金刚石钻头高。表镶钻头的线速度宜采用1.0~2.0米/秒，孕镶钻头的线速度宜采用1.5~3.0米/秒。孕镶钻头在过低的转速下钻进，不仅会降低钻速，还会使钻头过早磨损。要防止不顾地层特点（特别是在变质岩地区、易超径孔段等）盲目开高速度。尤其是在钻头磨钝或

者在岩芯堵塞的情况下，绝不可采用提高转速处理。

3. 孔底钻具的水力因素 对金刚石钻进来，一般是在地面估算泵量的（泵量 = 钻头直径 [厘米] × 经验系数 [5~8]）。其确定值与所钻岩层的性质、完整程度、渗漏状况等有关。在转速较高、钻速较快、岩石研磨性较强时，应选用较大泵量。但对孔底钻具来说，应考虑以钻头底唇面上单位面积的水马力值做为衡量指标为好。钻头底唇面上单位面积的水马力值的大小对钻头底部的冲净程度有直接关系。它以钻进速度的高低、产生岩粉的多少为依据。它与钻头水道的几何形状、分布形式、水道总断面积、泵量等密切相关。

美国克里斯坦森(Christensen)公司提出，经美国国际钻井承包商协会(IADC)肯定，在钻进速度2.4~6米/小时的软地层，钻头水马力(马力/英寸²)为2.8~3.0；钻进速度1.5米/小时的较硬地层，钻头水马力为1.5~2.5，可获得良好的效果。水马力值由下式确定：

$$H_{HP} = \frac{V \times P}{1714}$$

式中 V — 泵量（加仑/分）；

P — 压力损耗（磅/英寸²）。

合理的钻头水道和泵量能及时冷却钻头，冲净钻头唇面，保持孔底清洁，充分发挥钻头使用效益，提高钻头寿命。

较小的钻头过水断面和较大的泵量，往往钻头水马力也大。冲洗液在孔底的流速过大，会造成钻头胎体冲蚀和孔底钻具轴心压力损失。轴心压力的损失是由于高速的冲洗液流经金刚石钻头水道和孔底之间的空隙（特别是钻头内侧的环状间隙）造成的。它导致孔底钻具内腔压力增高，形成举离力，这就需要额外增加钻压来补偿。因而增加了孔底钻具振动、不稳定性 and 钻孔弯曲的可能性。

4. 孔底钻具的组合因素 在金刚石钻进中，不合理的钻具级配会增大孔壁间隙，此时若钻压过高，将导致孔底钻具工作不稳定，从而产生一个偏斜力，使孔底钻具的振动加剧，钻头磨

掘加快，钻孔可能弯曲。

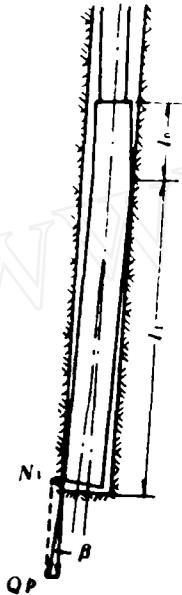


图 1

从图 1 可知，粗径钻具在轴心压力 Qp 的作用下，产生分力 $N_1 = Qp \cdot \sin \beta$ (β 为轴心压力传递方向与钻孔轴心线所成的夹角，也可以说是粗径钻具底部半波长引起的倾斜角)，而粗径钻具迴转时所产生的离心力为 $N_2 = m l \omega^2 k$

$$(m = \frac{ql}{9.8}; \omega = \frac{\pi n}{30}),$$

故粗径钻具偏斜力的关系式是

$$N = N_1 + N_2 \\ = Qp \cdot \sin \beta + (\frac{ql}{9.8}) (\frac{\pi n^2}{30}) \cdot l \cdot k$$

式中 q 一粗径钻具单位长度重量；

l 一粗径钻具长度；

n 一钻具转数；

t 一粗径钻具与孔壁之间的间隙；

k 一粗径钻具最底部半波长以上的长度与粗径钻具最底部半波长的比，即

$$\frac{l_0}{l_1}。$$

很明显，在一定范围内的直孔钻进中，孔底钻具的稳定性（与偏斜力大小相反）和粗径钻具刚度的提高、孔壁间隙的减小、合理转数的平方成近似正比关系。

不言而喻，在易斜地层中钻进时，为了提高粗径钻具刚度，减小孔壁间隙，减少偏斜力出现的可能性，尽量降低钻具振动，减弱钻孔弯曲的产生，提高钻进速度，延长钻头寿命，最好采取“满眼”钻具。这种钻具起码有三个以上的点支撑于孔壁，增加了孔底钻具与孔壁接触的实际长度，如图 2 所示。其中 a 可用于轻微孔斜矿区；b 可用于中等孔斜矿区；c 可用于严重孔斜矿区。这几种钻具组合形式在国内外不少矿区的钻孔施工中收到了稳斜、保直的效果。

在孔底钻具上增加厚壁管（或钻铤），可以提高钻具的刚度，并使钻具重心下移，减少振动。稳定器的作用是：抵抗向钻头底面传递压力时的弯曲力；在钻具迴转时，保持与孔壁有充分的接触面；保证钻头始终紧贴孔底，并使钻头底面迴转中心与丝扣中心以及钻孔中心一致。

5. 孔底钻具的环境因素 护孔堵漏工作实质上就是为孔底钻具创造一定的工作环境。

生产实践告诉我们，钻进破碎、裂隙、坍塌、超径等地层时，往往是孔内事故伴随着钻孔的弯曲。因之，护孔堵漏工作也与钻孔弯曲有着某些内在联系。

众所周知，不能设想使用一种冲洗液能对付所有的地层，更不能认为冲洗液是护孔堵漏的唯一办法。必须根据地层特点，经济合理地选用普通泥浆、优质冲洗液、冻胶泥浆、早强水泥、化学浆液，惰性材料与膨胀性材料，以及套管等方法。

显而易见，使用低固相或无固相冲洗液对提高较为均质、完整地层的钻进速度关系较大。因为随着冲洗液固相含量的增加，粘度自然提高，粘滞性也将增加。而粘滞性高的冲洗液较粘滞性低的冲洗液进入孔底岩石破碎裂隙的速度要慢得多，使孔底破碎接触面的平衡压力所需时间增长，钻头在孔底对岩石表面破碎变为体积破碎的过程减慢，钻头冲净程度降低，岩粉可能被

重复破碎。在这种情况下，就需提高钻头的水马力，从而也就带来一连串的不良后果。

美国米尔凯姆(Milchem)公司提出冲洗液流变性关系式

$$\tau = Kr^n$$

式中 τ — 剪应力;
 K — 稠度系数 (与冲洗液粘度有关);
 r — 剪切速率;
 n — 流动指数。

提高 K 值可以增加冲洗液上返时携带岩粉的能力，但会影响孔底钻具的工作环境，降低钻进速度。 r 值与钻杆和孔壁间的环状空间有关。 n 值对水等牛顿型液体为1，对泥浆等非牛顿型流体以0.5为好。而对低固相冲洗液来说和普通泥浆应有所差别，故 n 值可高些，若在某些情况下， K 值降低， n 值不易提高时，可加入微量发泡剂，以提高冲洗液悬浮携带岩粉的能力。

显然，在研究提高金刚石钻进工艺技术时，需注意研制低固相、低比重、低粘度、高减阻（润滑）、高稳定和具有一定悬浮能力的含有岩石软化剂的优质冲洗液。

在孔底钻具工作环境中，岩芯堵塞问题既常见又不可忽视。造成岩芯堵塞的原因一般是由于岩层破碎，软硬交互，钻头与岩芯管配合不当，卡簧尺寸不合宜，钻头不规则或发生变形，孔底压力或转速不均，泵压或泵量不合适，钻具振动，残留岩芯等等。

正因为岩层的破碎、软硬交互是钻孔弯曲的一种地质因素，而在施工中又容易出现岩芯堵塞，所以这两者常伴随出现。这就需要在施工中采取相应措施。

总之，在金刚石钻进工艺技术上的防斜问题归纳起来可以说，刚性的孔底钻具和良好的孔底条件。所谓刚性的孔底钻具就是：在情况允许时，设法使孔底钻具刚度达到条件最大值，尽力减小孔底钻具与孔壁间的间隙，越是底部对间隙要求越严格，增强孔底钻具与孔壁接触的良好“弹性支撑”作用，合理增加孔底钻具与孔壁接触的实际长度，所谓孔底钻具的良好工作条件就是：根据不同地层和孔底钻具（钻头品种、钻具

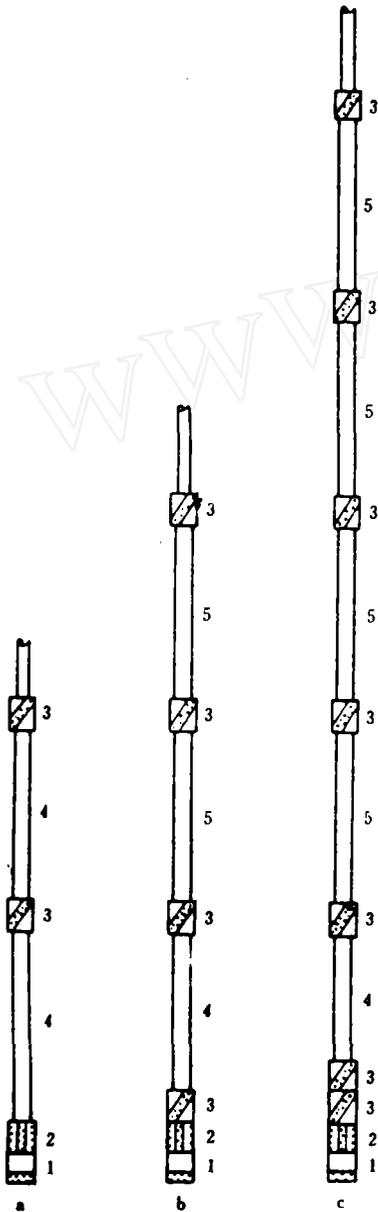


图 2

1—钻头;2—扩孔器;3—稳定器;4—岩芯管;5—厚壁管
 扩孔器直径一般应大于钻头直径0.3~0.5毫米
 (所钻岩石为中硬者,选用大值);稳定器直径应大于
 扩孔器直径0.0~0.2毫米,稳定器长250毫米
 (不包括丝扣部分);岩芯管长度应为3.0米;厚壁管
 单根长度为3.0米。厚壁管可用直径58×13毫米的钻
 头料改制,改后为直径55×11.5毫米;C种钻具的上
 部也可连接减震器

组合) 选择最优的钻进参数配合, 使机械因素与 水力因素得到有效的平衡。

参 考 文 献

- [1] 郭绍什编, 钻孔弯曲与测量, 武汉地质学院印, 1980年
- [2] 北京地质学院岩石教研室编, 岩石学简明教程, 中国工业出版社, 1962年
- [3] Л. А. 史立涅尔著, 朱德懿等译, 岩石力学的物理基础, 石油出版社, 1957年
- [4] 郭绍什著, 机动钢丝绳冲击钻探理论, 人民铁道出版社, 1960年
- [5] 中国地质学会第二届全国探矿工程学术会议论文集, 1980年
- [6] 岩松一雄著, ボーソング ハンドブック, 森北出版株式会社, 1973年
- [7] Г. И. 盖维年编, 北京石油学院译, 钻井技术与工艺学, 石油工业出版社, 1959年
- [8] 陈理中等译, 美国钻井手册, 石油出版社, 1980年
- [9] 石油钻采工艺, 1980年第2期, 第4期

缴粗对钻杆断裂的影响

无锡钻探工具厂 谢 东 方

为增加钻杆螺纹的连接强度, 适应螺纹结构上的需要, 钻杆两端往往要缴粗加工。由于地质队设备条件所限, 缴粗后都不再进行热处理。钻杆端部螺纹是应力最集中的地方。缴粗质量好坏, 对钻杆的使用影响很大。钻杆工作时多在螺纹处断裂。

钻杆缴粗工艺主要由加热、缴粗、缴后冷却三个环节组成, 任何一个环节的疏忽都将给最终性能带来严重影响。

加热对钻杆断裂的影响

合理的加热工艺可以改善钢材的塑性, 减小热变形功, 防止锻裂。不合理的加热工艺则会给缴粗带来各种各样的缺陷。

1. 加热速度过快, 加热不均匀 由于热应力过大导致加热时发生开裂。在加热中工件位置放的不合理、不翻转、喷油嘴与工件距离不当, 或工件一入炉就放在煤或炭炉中的高温风口上都会造成急剧的、不均匀的加热。不均匀的加热使各部分变形能力不同。温度低、塑性低的部

分就有可能锻裂。

加热温度偏低或加热时间不足, 将使工件局部或整体塑性不高, 热变形能力降低, 不禁要消耗较大的热变形功, 还容易导致心部或表面锻裂。在大批量生产或操作不严的情况下, 都有可能出现裂纹。

2. 过热和过烧 在缺乏测温仪器和缺乏观察火色温度经验情况下, 过热是屡见不鲜的。过热使材料晶粒长大变粗, 塑性、韧性降低, 脆性增加, 疲劳强度降低, 反映在使用上容易造成早期断裂。例如江苏一地质队送来小口径钻杆缴粗部位的断头, 金相分析时发现晶粒粗大、不均, 并有典型的魏氏组织(图1与2)。晶粒粗大对材料机械性能的影响见表1与表2。过烧是一种不可挽回的锻造缺陷, 除非切去重锻。

3. 锻造加热 特别是多火加热, 由于在高温下长时间的停留, 会使工件严重氧化、脱炭、烧损。不仅造成材料的消耗和容易损坏模具表面, 还会降低锻造的表面质量。机械加工不能去净表面缺陷, 会降低工件的疲劳性能和使用寿命