

坑内单层钻杆反循环水力连续取心的试验研究

谭志军 章兼植

(中国有色金属工业总公司矿产地质研究院)



钻探技术

岩心钻探是地质找矿的重要手段,提高钻进效率和取心效果,一直是钻探工作者奋斗的目标。目前国外的取心钻进几乎均为金刚石钻进,而其中采用绳索取心的又占80~90%,因而绳索取心金刚石钻进技术在当前的岩心钻探中占统治地位。它与普通取心法相比,大大减少了起、下钻杆的次数,从而增加了纯进时间,相应地提高了效率。但绳索取心仍然未能完全消除花费在取心上的非生产时间,这是因为钻进一定长度(一般约3米)后,需用钢绳提放一次内岩心管。为了彻底免除取心工序的耗时,近年来发展了反循环水力连续取心(简称水力取心)技术。纯钻进时间比重的增加,是水力取心的一大优点。此外,由于水流方向与岩心进入的方向一致及水流对岩心的悬浮、包围隔离作用,极大地提高了岩心的完整性和采取率,并因这种反循环的水流使钻头重复破碎岩屑的机会大为减少,从而提高了机械钻速和钻头寿命。由于水力取心具有上述这些十分吸引人的优点,国外已很重视这一技术的发展。苏联在这方面取得的进展较快,受到了国家的嘉奖。我国目前对这项技术也开始了研究试验。

水力取心目前又可分为两种方式,一是双层钻杆水力取心(简称双管法),二是单层钻杆水力取心(简称单管法)。双管法的优点是外管在钻进过程中起到了护壁套管的作用,并且洗井液几乎不进入外套与井壁之间,因而无论什么地层均可用清水作为洗井液,又不会出现漏失问题。但其缺点是钻杆结构复杂,能达到孔底的水较少,致

使钻头冷却不好,故目前还只适于用合金钻头钻进中硬以下的岩层。单管法的优缺点则与双管法相反。

当前,我们正在大力推广人造金刚石坑内钻进技术。由于坑内钻探施工场地空间有限,致使起下钻具困难,耗时多,故国外在100米以浅的坑内钻孔中也采用绳索取心技术。可见,在坑内钻孔中应用水力取心技术是很有意义的。

坑内钻孔与地面钻孔相比,所钻岩层比较简单,特别是没有难钻的覆盖层(往往出现坍塌、漏水),因而在坑内钻孔中进行水力取心时,一般采用单管法。

我国目前坑内钻孔深度多在100米以内,应用单管法水力取心技术条件较好。可与普通取心法或绳索取心法采用同一规格的钻杆。除了在井口需附加一个结构并不复杂的密封装置外,没有其他的特殊要求。如遇井内漏水较严重时,则可立即改用普通取心法或绳索取心法。由此可见,单管反循环水力连续取心的试验成功和推广,将会促进我国坑内金刚石钻进技术向更高水平发展。

单管水力取心的钻进原理及主要装置

单管水力取心钻进,是借助于冲洗介质上返的液流,将孔内岩心连续不断地送上地面。其钻进原理如图1所示。主要特点是改变了以往钻进过程中冲洗介质的传统循环流向。冲洗液由泵经孔口密封装置进入钻杆与孔壁之间,再由钻头底部经岩心卡簧、岩心挤断器、钻杆腔、水接头和具有一定曲率半径的软管而流回水源箱。在返回

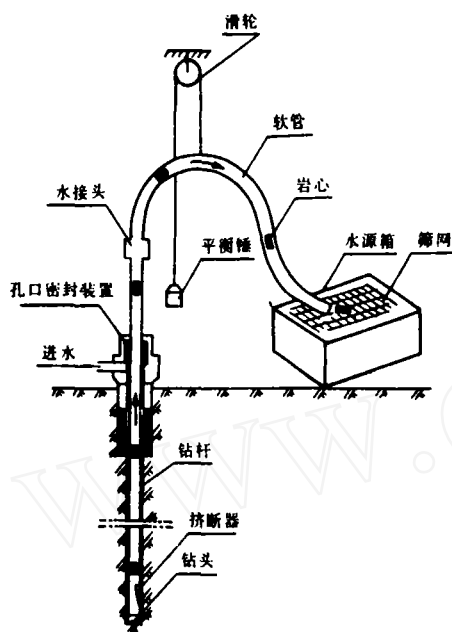


图1 单管水力取心钻进工作原理示意图

途中，将钻进过程中形成的岩心，经岩心挤断器断成一定长度的短柱后，借助冲洗液的携带，被连续不断地送出地面，落到水源箱的筛网之上。

单管水力取心的主要装置有：

一、孔口密封装置

此装置（图2）装在钻孔的孔口部分，用来封闭孔口与钻杆间的环隙敞开之一端，当冲洗液进入装置后，即被迫流向孔底而不至于在孔口

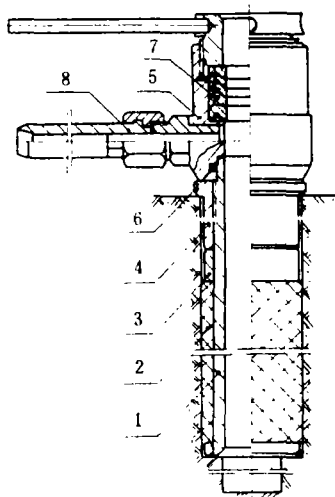


图2 孔口密封装置示意图

溢出。对孔口密封装置的要求，一是要密封性好；二是要与孔壁有相对的固定能力，在压力水作用下不致松脱；三是要能保持钻杆在密封条件下灵活旋转，阻力不能过大。图2中的1是孔口管，在这次试验中为 $\varnothing 50 \times 5.5$ 钢管制成；2为孔壁密封填料，是由矩形断面的石棉浸油盘根承担，对孔口管与孔壁间进行密封；3为压套，4为孔口管螺母，用于压紧石棉盘根；5为密封套，借以密封钻杆，其下部与孔口管之间用O形圈6密封；上部与钻杆之间用V形密封圈7密封；8为进水接头，是冲洗液进入孔内的入口。冲洗液进入装置后，由于各处密封严密，只能沿孔壁与钻杆的环状间隙进入孔内。

二、钻杆

要使岩心在钻杆内能顺利通过，必须使钻杆内壁光滑，不得有飞边、毛刺。因此，钻杆内径公差要较为严格，以采用直联方式为好，不要另加接头。钻杆丝扣连接应作到密封性好，不漏水。

在设计本方案时，曾考虑与绳索取心钻进配合使用，在孔内严重漏失时可立即换用绳索取心钻进。加工合格的绳索取心钻杆，是具备水力取心钻杆的全部要求的，因此可以共同使用。但在本专题研究中，采用的孔径为 $\varnothing 36$ ，而这种绳索取心钻杆，国内尚未正式投产。因此临时采用了 $\varnothing 33 \times 5$ 的常规钻杆，其加工要求不变，保证了钻进试验的性能。

三、岩心挤断器

结构如图3所示。它是用一块楔形铁装在一个圆环上。此装置固定在孔底靠近钻头一定距离的位置上。主要用于打向下孔的时候。它是依据楔子原理把孔底形成的岩心挤断成一定长度（120毫米）的柱体，以保证岩心能被冲洗液顺利带走，并能顺利通过具有一定曲率半径的岩心软管。如果所钻岩层比较破碎，也可不装此岩心挤断器。

四、专用水接头

结构如图4所示。它的作用是，把转动的钻杆与不转动的岩心输送软管连接起来。反循环时，水接头内通过的是低压冲洗液，不象正循环时通过的是高压冲洗液，因而对此水接头的密封要求不高，并且因其承受的轴向载荷小，所以结

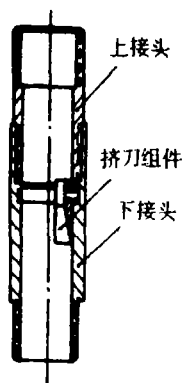


图3 岩心挤断器示意图

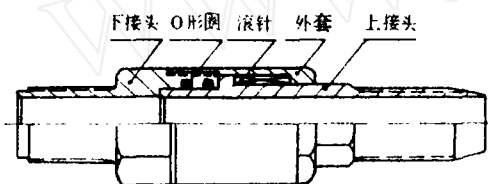


图4 专用水接头示意图

构比较简单。

五、液流换向装置

为了使冲洗液的流向能按反循环、正循环的方向任意变换,所以必须设计这一装置。此装置由4个截止阀组成,其工作原理如图5所示,在

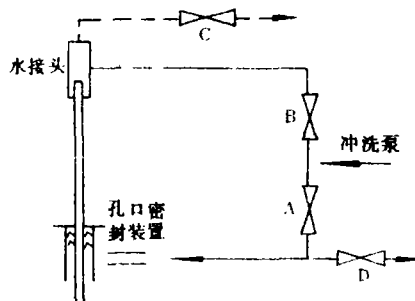


图5 液流换向装置工作原理示意图

进行正常的反循环水力取心钻进时,可将A,C阀打开,将B,D阀关死。冲洗液即经A阀进入孔底,然后再携带岩心经水接头由C阀流回水源箱。如孔内严重漏失,需进行正循环常规钻进时,则将B,D阀打开,A,C阀关死,冲洗液的流向即改为正循环,可进行常规的双管或绳索取心钻进。此装置还有一项用途,即在中途遇到轻微的心卡时,使用正循环水流反冲,消除卡心,也有一定效果。

六、岩心输送软管

此管是一根普通橡胶软管,固定在水接头的后端(图1),是为输送岩心后期调整其运动方向用的。例如在进行垂直孔钻进时,岩心的运动方向一直是向上运动的,但是到了孔口之后,为了使岩心平稳地落到筛网上,就需要有一段软管加以引导,这就是软管的作用。打水平孔时,也有引导问题。

对软管的安置,有两个问题需要考虑:一个是软管内径与岩心直径的间隙的选择,另一个是软管的允许曲率半径。

(一) 软管内径的选定

影响选定的因素是岩心直径和泵量。要求的原理是,如泵量足够,使岩心在进入软管后,仍能有一定的速度排出管外,故内径大些为好。我们试验时的岩心直径为 $\varnothing 19$ 毫米左右,泵量为25~36升/分,经多次试用后,认为胶管内径以 $\varnothing 25$ 毫米为宜。

(二) 曲率半径的选定

在打垂直钻孔时,软管应放置在一个固定的框架上,使其保持一定的曲率,以便于岩心在管内运行,其最小曲率半径的计算可按下式进行:

$$R = \delta + \frac{L^2}{16\delta}$$

式中 R —曲率半径(毫米); L —岩心长度(毫米); δ —岩心单边间隙(毫米)

$$\delta = \frac{\text{软管内径} - \text{岩心直径}}{2}$$

本试验采用的是: $L = 120$ 毫米; $\delta = (25 - 19)/2 = 3$ 毫米。所以最小曲率半径(R)为303毫米。为了更为可靠,选用500毫米为好(图6)。

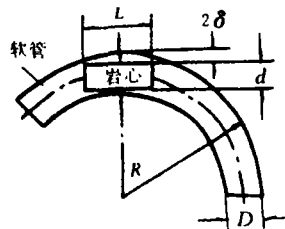


图6

单管法钻进的几个技术问题

一、管内水力输送岩心的动力学

在管内用液体输送圆柱状物体的运动学至今未见研究资料。为了对水力取心有关参数的选择有所依据,我们参照水力学的一般原理,从理论上对水力输送的动力学作些探讨,并作了对比模拟试验。

先研究垂直条件下液体输送圆柱体的动力学。为了便于理解,我们可以把使管内圆柱体往上运动的液流分为二个部分,一部分是使柱体处于悬浮状态的液流,称为平衡流量。这一液流与柱体间有相对运动。另一部分液流带动柱体上升。称为速度流量,这一液流与柱体间无相对运动。

下面分析和推导柱体处于悬浮状态(即不动)时的动力学和理论计算公式。

(一) 理论计算公式

1. 柱体受力分析:

(1) 向下力。柱体受的向下力比较单一,即为重力 W 。

$$W = r \cdot L \cdot a$$

式中 r —柱体的比重,克/厘米³; L —柱体长度,厘米; a —柱体断面积,厘米²。

(2) 向上力。柱体受到的向上之推力比较复杂(图7),有下列几个:

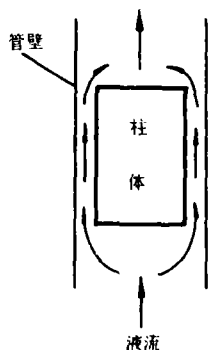


图 7

①形状阻力(F_1)。柱体阻挡液体流动而使其迎面受压及背面形成涡流(负压)而产生的力。

$$F_1 = C_D \frac{r_0 V_0^2}{2g} \cdot a$$

式中 V_0 —管中液流速度,厘米/秒; r_0 —液体的比重,克/厘米³; C_D —形状阻力系数; g —重力加速度,为980厘米/秒²。

②液体与柱体表面的摩擦阻力(F_2)。

$$F_2 = \frac{1}{2} f \frac{L^{0.7}}{d} \times \frac{r_0 V^2}{2g} \times a_1$$

其中 $f = \frac{1}{(2 \lg \frac{d}{\varepsilon} + 1.14)^2}$, 即粗糙管紊流时

摩擦系数。

d —水力直径,厘米, ε —绝对粗糙度; V —环隙中液流速度,厘米/秒; a_1 —环隙面积,厘米²。

摩擦阻力 F_2 公式得出的推导过程为:

$$\tau \cdot P \cdot L = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{r_0 V^2}{2g} \cdot a_1$$

式中 τ —边界切应力; P —环隙湿周。

环隙湿周实际上是由管子内圆周和柱体外圆周组成,考虑间隙值较小,故可看作环隙的内、外圆周等长,则柱体的外圆周面上所受到的摩擦为:

$$\tau \cdot \frac{P}{2} \cdot L = \frac{1}{2} f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{r_0 V^2}{2g} \cdot a_1$$

对于粗糙表面,摩擦力随 $L^{0.65} \sim L^{0.75}$ 而变化,并不与 L 成正比,因而得

$$F_2 = \frac{1}{2} f \cdot \frac{L^{0.7}}{d} \cdot \frac{r_0 V^2}{2g} \cdot a_1$$

③ 管壁间隙中流动阻力造成的压差力(F_3)

$$F_3 = f \cdot \frac{L^{0.7}}{d} \cdot \frac{r_0 V^2}{2g} \cdot a$$

④ 柱体两端液流先收缩、后扩张造成的压差力(F_4)。

$$F_4 = \left[\left(\frac{a_0}{\beta a_1} \right)^2 - 1 \right] \frac{r_0 V_0^2}{2g} \cdot a$$

式中 $\beta = 0.598 + 395 \left(\frac{a_1}{a_0} \right)^2$; a_0 为管子内断面面积,厘米²。

⑤ 浮力(F_5)。

$$F_5 = r_0 \cdot L \cdot a$$

2. 平衡方程式:

$$W = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$$

$$r \cdot L \cdot a = C_D \cdot \frac{r_0 V_0^2}{2g} \cdot a + \frac{1}{2} f \cdot \frac{L^{0.7}}{d} \cdot \frac{r_0 V^2}{2g} \cdot a_1 + f \cdot \frac{L^{0.7}}{d} \cdot \frac{r \cdot V^2}{2g} \cdot a +$$

$$+ \left[\left(\frac{a_0}{\beta a_1} \right)^2 - 1 \right] \frac{r_0 V_0^2}{2g} \cdot a + r_0 \cdot L \cdot a$$

又因 $d = 2\delta$

$$V_0 = \frac{4Q_{\pi}}{\pi D_0^2}$$

$$V = \frac{Q_{\pi}}{\pi (D_i + \delta) \delta}$$

$$Q_{\pi}^2 = 2g\pi^2 \left(\frac{r}{r_0} - 1 \right) \cdot$$

$$\frac{16}{D_0^4 L} \left\{ C_D + \left[\left(\frac{a_0}{\beta a_1} \right)^2 - 1 \right] \right\} + \frac{2 + \frac{a_1}{a} L^{-0.3}}{4 (D_i + \delta)^2 \delta^3 \left(2 \lg \frac{2\delta}{\varepsilon} + 1.14 \right)^2}$$

$$\text{其中 } \frac{a_0}{a_1} = \frac{D_0^2}{4 (D_i + \delta) \delta}$$

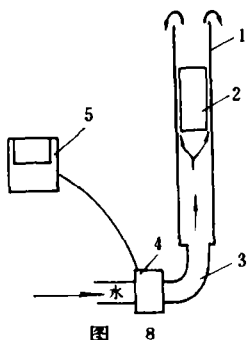
$$\frac{a_1}{a} = \frac{4 (D_i + \delta) \delta}{D^2}$$

$$\delta = \frac{D_0 - D_i}{2}$$

(二) 平衡水量的模拟试验测定

1. 模拟试验装置:

该装置比较简陋, 见图 8 示意。1 为内径 2.35 厘米之有机玻璃管; 2 为圆柱状试样(在我们的试验中用了岩心和圆钢; 3 为输水胶管; 4 为 EL-3 型电磁流量计的传感器; 5 为仪表箱。



在试验时, 先用较大水量把柱体冲到一定的高度, 然后减少水量使其悬浮在某一位置并从流量计上读出水流量值。

其中 δ —环隙的间隙值, 厘米; Q_{π} —平衡水量, 厘米³/秒; D_i —柱体直径, 厘米; D_0 —管子内径, 厘米。

可以得到

2. 实测结果:

共实测了 7 个试样, 其中 1、2、3 号为岩心, 4、5、6、7 号为表面未经加工的圆钢, 结果见表 1。

表 1

样号	D_i (cm)	L (cm)	δ (cm)	r	γ_0	D_0 (cm)	Q_{π} (升/分)
1	2.062	6.5	0.144	2.7			4
2	2.062	7.8	0.144	2.7			4
3	1.850	8.7	0.250	2.56	1	2.35	8
4	1.850	9	0.275	7.4			19
5	1.650	9	0.350	7.4			24
6	1.650	25.4	0.350	7.4			33
7	1.650	32.5	0.350	7.4			35

(三) 理论计算与模拟试验测定结果对比

我们通过 FX-702P 电子计算器, 应用前面的理论公式对 7 个试样进行 Q_{π} 的计算, 结果列于表 2。

在计算时, C_D 取 1.17。这是圆片状物体的阻力系数, 对于我们所用的圆柱状物体, 由于把形状阻力 F_1 和液体与柱体表面的摩擦阻力 F_2 是分开考虑的, 所以单纯从形状阻力来看, 只需考虑迎面和背面, 圆柱状物体与圆片状物体可以认为是一样的。管壁和柱体表面的绝对粗糙度 ε , 我

表 2

Q_{Ψ} (升/分)		
计 算	实 测	相对误差 (%)
3.79	4	- 5.15
3.96	4	- 0.95
8.12	8	+ 1.51
18.44	19	- 2.9
21.59	21	- 2.4
32.71	33	- 0.86
34.33	35	- 1.75

们取为0.035cm, 这一值并非是实测值, 而是参照表面光洁度为▽1时, $\varepsilon = 0.032\text{cm}$ 来选取的。

理论计算和模拟试验实测结果对比列于表2。

由上面的理论计算和模拟试验实测的结果来看, 环状间隙对于平衡水量有较大的影响, 几乎成正比的增长关系, 这可由试样4、5号对比看出。由5、6、7号试样对比可知, 柱体长度对平衡水量有影响, 但影响不大, 柱体越长时, 平衡水量的相对增量越小。

在水平条件下, 液体对柱体的作用力只需克服柱体与管壁的摩擦力就可达到临界平衡状态, 故平衡等式为

$$(W - F_s) f_3 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$

其中: f_3 — 柱体与管壁摩擦系数; F_1 、 F_4 均与垂直条件下相同。

水平时, 由于间隙为偏心, F_2 、 F_3 将比垂直时小。但在紊流条件下会减小多少, 没有可参考的资料。试验证明, 由于 f_3 不大, 水平时的 Q_{Ψ} 要比垂直时小得多, 因而配套水泵能满足垂直孔的要求就必然能满足水平孔, 故对水平孔的 Q_{Ψ} 就不作深入的计算分析了。

二、水力取心所需泵量的确定

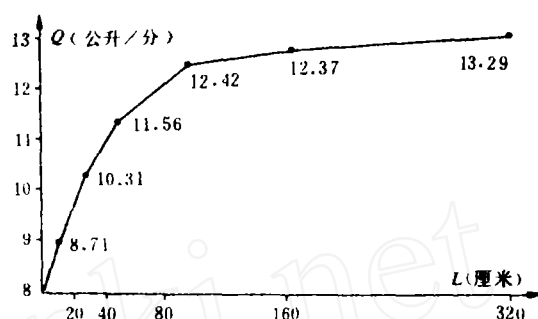
在垂直孔时, 水力取心所需泵量最大, 所以可由垂直孔作为确定泵额定能力的依据。

上面已导出了垂直孔时平衡泵量的计算公式, 单纯有 Q_{Ψ} 还不能实现水力输送岩心, 还需要附加一个使岩心能以一定速度上升的速度水量 $Q_{\text{速}}$, 即:

$$Q = Q_{\Psi} + Q_{\text{速}}; \quad Q_{\text{速}} = \frac{\pi D_i^2}{4} \times V_{\text{岩}}$$

其中 $V_{\text{岩}}$ 为所需的岩心上升速度。

当取 $D_0 = 2.35\text{cm}$, $\delta = 0.25\text{cm}$, 对于 $r = 2.7$ 的岩石, Q_{Ψ} 与 L 的关系曲线见图9。

图9 Q_{Ψ} 与 L 的关系曲线图

由图9可知, 当 $L = 20\text{cm}$ 时, $Q_{\Psi} = 10.31$ 升/分。

$Q_{\text{速}}$ 取决于要求的 $V_{\text{岩}}$, 对于内孔径为2.35cm的钻杆, 若取 $V_{\text{岩}} = 10$ 米/分, 则算得 $Q_{\text{速}} = 4.31$ 升/分, 当 $\delta = 0.25\text{cm}$ 时, 所需总水量 $Q = Q_{\Psi} + Q_{\text{速}} = 14.65$ 升/分。但实际钻进试验表明, 孔深达100米时, 用35升/分的水量才能使岩心达到10米/分的上升速度。造成实际所需流量比理论计算值要大的原因, 可能是由于岩心是在呈波状的高速回转的钻杆中运动的, 且间隙又较小, 因而岩心的上升运动经常要受到管壁的阻碍。

我们所导出的流量理论计算公式, 目前还只能用来定性分析管径、间隙、柱体长、柱体比重等参数变化对流量的影响。要用它来确定实际所需流量时, 还需加一经验的增大系数, 根据我们的试验, 这个增大系数可取为2.5。

把 $V_{\text{岩}}$ 定为10米/分, 这是考虑到对于100米深的孔, 钻出的孔底岩心折断后经十分钟就可排出孔外, 这一时间值不算长。另外考虑到目前坑内用的100米金刚石钻机大都配用BHA—36型泵 (最大排量为36升/分)。

试验表明, 在钻头外径为 $\varnothing 36.5$, 钻杆规格为33×5的条件下, 反循环水流量为35升/分时, 100米孔深时的泵的总压力损失为18公斤/厘米² 这个数值也是可以接受的 (BHA—36泵的最大压力25公斤/厘米²)。

三、管内、外间隙值的选取

钻杆内壁与岩心间的间隙称为管内间隙; 钻杆外壁与孔壁间的间隙称为管外间隙。

从理论计算和模拟试验可知,管内间隙对平衡水量的影响颇大,并涉及到钻头的壁厚(岩石的直径),因而从减少水量及减少钻头壁厚的目的出发,应取小的值。但间隙越小,对岩心上升的阻碍将越大,因而要达到设想的上升速度总水量并不能减少。另外间隙小易产生岩心在管内被挤夹住,因而减少钻头壁厚与岩心顺利排出之间存在着矛盾。可见,间隙值的合理选取是很重要的。目前,间隙值还只有靠试验来定。从我们的试验来看,管内间隙值 δ 一般可取:

垂直孔, δ 不小于0.25厘米,水平孔, δ 不小于0.15厘米。

管外间隙的选择主要是考虑整个水路的压力损失。由于水力反循环取心使用冲洗液量要比正循环时大,因而外间隙选得大一些是有利的。但外间隙值同样会涉及到钻头的壁厚。还要考虑到孔径的标准化。由于钻杆的尺寸也已标准化了。所以实际上管外间隙无多大的选择余地了。

从上分析可知,采用壁薄的钻杆比壁厚的较易调和钻头壁厚应尽可能薄而管内间隙应尽可能大的矛盾。我们的试验因受国内现用钻杆规格的限制。管壁较厚。而国外现已出现了 $\varnothing 33 \times 3.75$ 、 $\varnothing 43 \times 4$ 等系列规格的轻型绳索取心钻杆。若用这样的薄壁管来进行水力取心钻进,必将获得更好的技术经济效果。另外水力取心虽然有其独特的优点。但它也不是万能的,在实际应用中一定要考虑到与绳索取心法等配合应用的可能性,因而我们也应发展这样的轻型绳索取心钻杆。

试验效果

试验工作是在湘东钨矿进行的,一共钻进了水平孔三个,垂直向下孔三个,总进尺537米,其中为了对比用普通取心法钻进了39米。试验结果表明:与普通取心法相比,岩心采取率由82.78%提高到98.58%;钻头寿命由12米/个

提高到43米/个;机械钻速由1.36米/时提高到1.84米/时;回次进尺由1.5以内增长到11.84米。

由上对比可见,在坑内钻进中采用单管反循环水力取心技术具有明显的优越性。

在试验中出现的,至今未能完满解决的一个问题是:在较破碎地层中钻进时易发生岩心卡塞(特别是在垂直向下孔时)而使岩心的输出中断。岩心卡塞大部分是卡于钻杆中,并且一般不造成堵水。虽然我们也曾采取过一些措施,如敲打钻杆,反向水力冲击等,虽有些效果但成功率不高,目前我们采用的补救办法是:在出现岩心卡塞而不排出时,只要不堵水就不提钻而继续钻进,实质上是采用反循环长筒取心的办法。我们曾在垂直向下孔中钻了5个回次的长筒取心,共进尺41.39米,平均四次进入8.28米,其中最长的一个回次达13.27米,岩心采取率仍可达到水力取心的水平为97.8%。

我们的研究试验证明,在坑内钻进时,只要钻孔不严重漏水就可采用单管水力反循环取心技术。一旦出现岩心卡塞,可辅之以反循环长筒取心法。

参考文献

- [1] Кардыш, В. Г. и др.: Современные зарубежные буровые станки и установки, 1976.
- [2] 地矿部勘探技术研究院编, 国外地质勘探技术专辑, 1982, 第7期.
- [3] 地矿部情报所编, 国外探矿工程情报, 1982, 第1期.
- [4] Квитка, В. Г. и др.: Внедрение прогрессивных способов в практику буровых работ, 1975.
- [5] P. S. Barna: Fluid Mechanics for Engineers, 1964.
- [6] Л. 普郎特, 流体力学概论, 科学出版社, 1974.