

# 气举反循环连续取心工艺探索

殷国乐<sup>1,2</sup>, 王艳丽<sup>1,2</sup>, 陈浩文<sup>1,2</sup>, 王林清<sup>\*1,2</sup>, 许刘万<sup>1</sup>

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

**摘要:**气举反循环钻进技术是钻井工程中一种比较成熟的钻进手段, 凭借钻进效率高、钻头寿命长、成井质量好等特点, 目前已经得到了广泛应用及推广。气举反循环连续取心技术仍处在探索研究阶段, 前人针对这一技术做了原理性的探究试验, 但尚未进行连续的取心试验, 而且现有的双壁钻具也存在无法满足由于上返岩心质量和直径大对其密封性和耐用性的要求。因此有必要进一步开展理论研究、参数计算、优化钻具设计、进行连续取心试验来探究这一工艺的发展前景。通过试验证明大通径双壁钻具具有可靠的耐用性, 并能连续取得岩心。所取岩心及时, 无污染, 代表性强, 能较真实地反映地层层位、深度、颗粒级配, 不存在对岩心的反复冲刷及重复破碎情况。

**关键词:** 钻井工程; 气举反循环; 双壁钻具; 连续取心; 取心钻头; 参数计算

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)02-0022-08

## Air lift reverse circulation continuous coring technology

YIN Guoyue<sup>1,2</sup>, WANG Yanli<sup>1,2</sup>, CHEN Haowen<sup>1,2</sup>, WANG Linqing<sup>\*1,2</sup>, XU Liuwan<sup>1</sup>

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou),  
Guangzhou Guangdong 511458, China)

**Abstract:** Air lift reverse circulation drilling technology is a relatively mature drilling method in drilling engineering. With the characteristics of high drilling efficiency, long bit life, and good well quality, it has been widely used and promoted. However, air-lift reverse circulation continuous coring technology is still in the stage of exploratory research. The predecessors have done theoretical exploration tests on this technology, but continuous coring tests have not been carried out, and the existing double-wall drilling tools are also unable to meet the requirements for sealing and durability due to the quality and diameter of the returning cores. Therefore, it is necessary to further carry out theoretical research, parameter calculation, optimization of drilling tool design, and continuous coring test to explore the development prospects of this technology. The tests have been done, and the results show that the design of the large diameter double wall drilling tool is reliable and durable, and it can successfully obtain cores continuously. The cores were timely taken, free of pollution, highly representative, and can truly reflect the stratum level, depth, and particle gradation without repeated erosion and repeated fragmentation.

**Key words:** drilling engineering; air lift reverse circulation; double wall drilling tool; continuous coring; core bit; parameter calculation

收稿日期: 2021-05-25; 修回日期: 2021-09-08 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.02.004

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“新型隔水管闭路循环钻井技术研究”(编号: GML2019ZD0501); 中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑”(编号: DD20190585)、“智能化深部钻探技术升级与应用示范”(编号: DD20211421)

第一作者: 殷国乐, 男, 汉族, 1991年生, 从事多工艺空气钻进技术研究及相关钻具设计研发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 254942344@qq.com。

通信作者: 王林清, 男, 汉族, 1993年生, 地质工程专业, 硕士, 主要从事钻探新技术、新设备新工艺的研发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, wanglinqingmail@163.com。

引用格式: 殷国乐, 王艳丽, 陈浩文, 等. 气举反循环连续取心工艺探索[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 22-29.

YIN Guoyue, WANG Yanli, CHEN Haowen, et al. Air lift reverse circulation continuous coring technology[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 22-29.

## 0 引言

气举反循环钻进技术是钻井工程中一种比较成熟的钻进手段<sup>[1-3]</sup>,除在水井、地热井钻探得到普遍应用外,在煤层气钻探井、瓦斯排放井、大口径工程施工中也得到了广泛应用<sup>[3-9]</sup>。但气举反循环连续取心技术在国内尚未铺开,而钻探取心一直都是掌握地下地质情况、直接获得真实可靠的地下岩层有关资料的最有效手段,如能将气举反循环连续取心技术开发完善,将对补充完善我国钻探取心技术体系、促进我国钻探水平发展具有重大意义。

## 1 取心工艺研究

### 1.1 取心工艺发展

在20世纪80年代,地矿部成都水文地质工程地质中心、勘探技术研究所与相关地质队等单位联合进行了气举反循环取心(样)钻进技术相关研究工作。1984年成都水文地质工程地质中心在“连续取心(样)判层”项目中,由地矿部九一五水文队在四川乐山军分区供水井施工,使用SHB127/80双壁钻具,采用四牙轮钢齿取心钻头钻进,取出直径36 mm、最长150 mm的岩心。后又经四川省地矿局一零九队、二零八队、攀西地质队野外8个孔的试验,分别选用不同结构的取心钻头,钻头直径范围190~445 mm,最深井195.62 m,累计连续取心进尺600余米。这是国内气举反循环取心技术的首次尝试,试验证明了气举反循环取心钻进的可行性,克服了正循环岩心管回次取心钻进时对岩心反复冲刷及重复破碎的问题。

1986年地矿部在系统内进行气举反循环钻进技术推广应用期间,也进行了气举反循环连续取心钻进试验。如:北京市水文地质工程地质公司,平电-8井探采结合孔采用拼装镶齿取心牙轮钻头,孔

深119~353 m进行了气举反循环取心钻进。河南省煤田地质局三队、四队分别采用镶齿组焊取心牙轮钻头取心钻进,口径445 mm、钻进深度500 m,上返岩心直径87 mm,最长岩心长度175 mm。勘探技术研究所设计加工了4个直径152 mm的连续取心硬质合金钻头,并通过安徽省地矿局水文队、山西省地矿局水文二队进行试验,也成功返出了岩心。

从各单位气举反循环取心钻进试验结果来看,钻井取心深度在500 m以浅,岩心直径控制在30~90 mm之间,长度 $\geq$ 180 mm,岩心收取及时,岩心采取率高。但以上尝试并无连续取心的案例,均为原理性试验,验证了气举反循环取心的可行性,并没有进行连续的取心试验,同样也存在双壁钻具无法满足岩心质量大、直径大对其密封性和耐用性的要求。因此有必要进一步开展理论研究、优化钻具设计、进行连续取心工艺试验。

### 1.2 原理分析

气举反循环技术是将高压气体由高压配气装置(气盒子)送入双壁钻杆环状间隙,通过气水混合器进入钻杆中心通道,使空气与井内钻井液混合膨胀,形成众多小气泡,气泡在沿钻杆中心通道迅速上升的同时迅速膨胀。由于高压气体不断地进入钻井液中,在气水混合器上部附近形成低密度的气、液混合液,而孔内气水混合器以下及钻杆外的钻井液密度大,根据连通器原理钻具内部的气、液混合液在压差作用下向上流动,从而产生气举作用。并且把井底的岩心或岩屑连续不断地带出钻孔,通过振动筛将岩屑与钻井液分离。分离后的钻井液再流回孔中,经孔底气举反循环钻头进入钻杆内部,如此不断循环形成气举反循环连续钻进的过程<sup>[9-15]</sup>。气举反循环钻进常用钻具组合如图1所示。

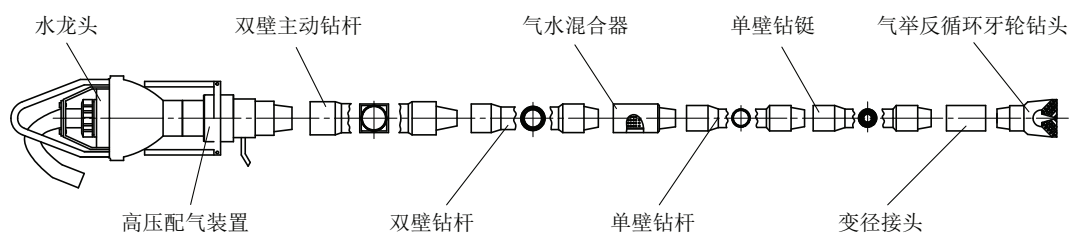


图1 气举反循环钻进钻具组合

Fig.1 Air lift reverse circulation drilling tool assembly

气举反循环连续取心四牙轮钻头结构如图2所示,常规三牙轮钻头结构如图3所示。主要有两点不同:一是常规牙轮钻头水眼方向正对牙掌,以便钻进时钻井液及时冲洗附着在牙掌上的岩屑和钻井液从钻杆与孔壁的环状间隙排出。气举反循环连续取心牙轮钻头钻进产生的岩屑及钻井液等是从钻具内通道上返,所以需要在钻头中心设有吸渣通道,为岩屑及钻井液提供上返通道;二是气举反循环连续取心牙轮钻头牙掌胎体之间焊接有挡板,迫使大的岩块经过再次破碎后再进入钻头吸渣口,同时还可迫使钻井液更接近井底流过,提高钻井液井底流速,改善钻井液携岩效果。



图2 四牙轮气举反循环取心钻头

Fig.2 Four-cone air lift reverse circulation core bit



图3 三牙轮气举反循环钻头

Fig.3 Tri-cone air lift reverse circulation drill bit

常规气举反循环牙轮钻头与气举反循环取心牙轮钻头结构上的主要变化是由三牙轮增加为四牙轮,四牙轮可以将岩心更为全面的包覆,利于形成完整的岩心。另外钻头内部设有直径70 mm的通孔,且距钻头底部以上120 mm处设有岩心卡断器,岩心卡断器上嵌有球形合金卡断头。在正常钻进到

120 mm时,岩心卡断器上的卡断头会卡断岩心,以此来保证岩心柱直径稳定在70 mm左右,长度控制在120 mm以内。岩心直径和长度如过长会提高对整套钻具性能的要求,增加使用成本。包括空压机输出风量风压能力,双壁钻杆强度及密封性,气盒子密封性,水龙头鹅颈管曲率半径、耐磨性等等。

### 1.3 气举设备

气举反循环连续取心试验钻具组合为:  $\varnothing 311$  mm牙轮取心钻头+ $\varnothing 168$  mm加重钻杆+气水混合器+ $\varnothing 168$  mm双壁钻杆+主动钻杆+高压配气装置+大通径水龙头。

(1)大通径水龙头:鹅颈管需有足够大的曲率半径和内径,需大于上返岩心的长度和直径,且要留有一定余量,以此来保证岩心的通过性。鹅颈管顶部补心为加厚型且可更换,因为气举反循环钻进时岩屑从井底上返,有较大的上返速度,岩屑会对鹅颈管顶部产生较大的冲击和磨损。如采用气举反循环取心工艺,由于岩心体积和质量远大于岩屑,对顶部的冲击力会更大,所以使用可更换的加厚补心(见图4),来应对大体积岩心的冲撞。

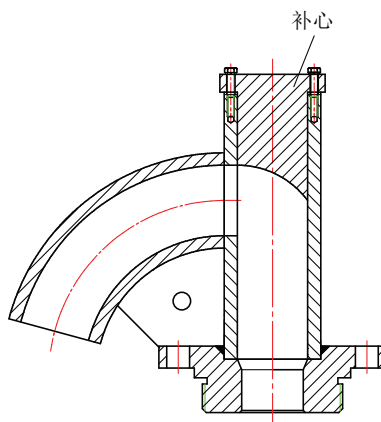


图4 可换式加厚补心结构示意图

Fig.4 Structure of the replaceable thick bushing

(2)高压配气装置:采用组合式旋转密封,该密封具有使用寿命长、耐高压的优点,最高可承受50 MPa的压力,极端天气仍可正常运转,可在 $-50\sim 220$  °C温度下工作,可承受3 m/s的转速,远大于实际工作转速。组合式旋转密封与主轴之间设置有可换式耐磨装置,此装置与主轴通过键块传扭同时转动,保证密封只磨损耐磨装置,如发生磨损沟槽、漏气现象,可快速方便地进行更换,增加了主轴的使用

寿命。高压配气装置壳体设有防转板,防转板与大口径水龙头下法兰固定,可防止壳体随主轴转动,从而避免高压进气管缠绕。

(3)主动钻杆:四方200 mm×200 mm,内管通径 $\Phi 100$  mm×15 mm,保证岩心上返通道足够大,此内径通道与双壁钻杆、气盒子保持一致,防止岩心上返通道出现由大变小的台阶,阻挡岩心上返,进而出现堵塞。

(4)双壁钻杆:内管之间采用插接形式,并设有三道O形密封圈保证密闭性,外管之间通过螺纹连接,端面密封。内管外壁交错120°焊接有扶正座,扶正座上安装橡胶材质扶正块,橡胶具有较大的弹性形变回弹量和摩擦系数,既不影响内外管装配,也可增加内外管之间摩擦力,尽可能保证双壁钻杆内外管同轴转动。

(5)岩心收集装置:岩心在气举作用下上返,通过气盒子之后通道变大,通道内压力释放减小。再经过鹅颈管和排渣管的缓冲后,虽速度变小,仍有一定的冲击力,如不加干预,直接排放,会造成岩心飞溅破碎,无法达到取心效果。故设计了岩心收集装置,此装置设置有缓冲筒(见图5),筒内挂有缓冲板,缓冲板上覆盖一层橡胶板。从排渣管飞出的岩心会冲击到橡胶板上,缓冲掉大部分力后,与钻井液一同掉落进入下方的筛网中,钻井液筛落后,便可得到岩心。

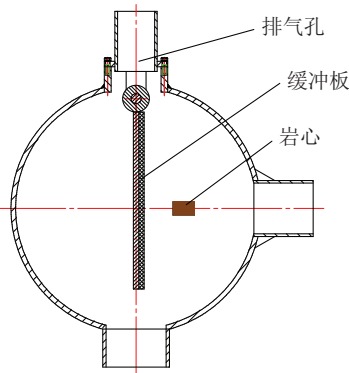


图5 缓冲筒结构示意图

Fig.5 Structure of the buffer cylinder

气举反循环连续取心工艺设备部件如图6所示。

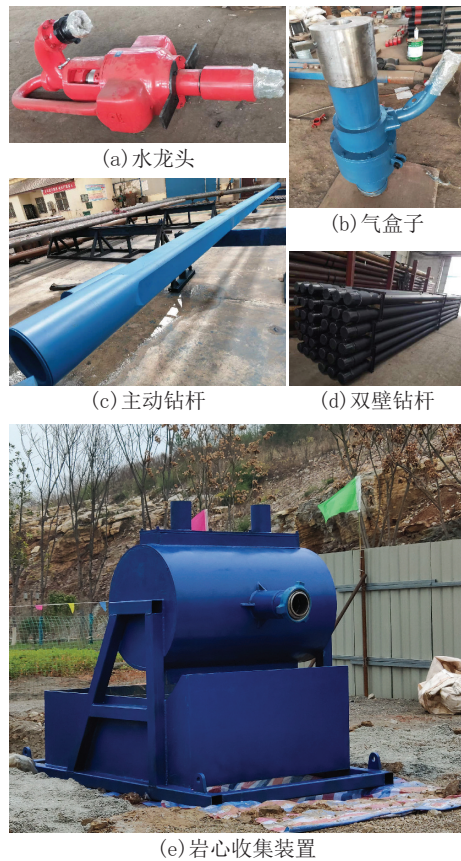


图6 气举反循环连续取心工艺设备部件

Fig.6 Equipment and components for air lift reverse circulation continuous coring process

## 2 试验设计

### 2.1 气举反循环连续取心试验参数的确定

#### 2.1.1 双壁钻杆数量的确定

双壁钻杆的数量按试验钻孔深度 $< 300$  m考虑,从反循环连续取心(心)钻进原理分析,当系统达到平衡时:

$$(L_w + H)\gamma_h = h\gamma_x + L_w\gamma_{xy} \quad (1)$$

式中: $H$ ——双壁钻杆下入的深度,m; $h$ ——自双壁钻杆终端算起的扬程高度,m; $L_w$ ——钻杆柱下部单壁钻具的长度,m; $\gamma_h$ ——冲洗液的密度, $g/cm^3$ ; $\gamma_x$ ——双壁管内气、液、固三相的平均密度, $g/cm^3$ ; $\gamma_{xy}$ ——单壁钻杆内液、固两相的密度, $g/cm^3$ 。

当不考虑各种阻力、惯性力等,要使整个反循环过程形成,则:

$$(L_w + H)\gamma_h > h\gamma_x + L_w\gamma_{xy} \quad (2)$$

分析以上不等式中的四项, $h\gamma_x$ 项是主要项。当使压缩空气输送到双壁钻杆终端后,造成 $\gamma_x$ 下降才

能使不等式成立。只有双壁钻杆下入一定深度后,使整个管路内、外液柱产生压力差,循环运动才能进行。

已知淡水的密度  $\gamma_h=1.05 \text{ g/cm}^3$ ,携带了岩样的冲洗液密度  $\gamma_{xy}$ 按  $1.15 \text{ g/cm}^3$ 考虑,而气液固三相流的密度  $\gamma_x$ 按  $0.5 \text{ g/cm}^3$ 考虑;假设孔口补水到位,稳定水位到鹅颈管的高度按  $20 \text{ m}$ 考虑(具体还需根据实际钻井确定),那么  $h=H+20$ 。

如试验在  $300 \text{ m}$ 的钻井内实施,按气举反循环原理公式(2)得出  $H>35 \text{ m}$ 。

在气举反循环钻井中单壁钻杆的长度  $L_w$ 越小,管内液柱压力越小,排渣效率越高。但在深井试验中要考虑钻探成本等,全孔使用双壁钻具重量大,成本高,又需考虑空压机的实际压风能力。当双壁钻杆长度受空压机风压的限制时,尾管也要加长。综合考虑经济成本、空压机能力等,空气钻井相关文献给出反循环连续取(心)钻柱中单壁钻柱的长度计算如下:

$$L_w=(2\sim 4)H \quad (3)$$

地热井工程应用证明<sup>[13]</sup>,当单壁钻具长度  $L_w\geq 4H$ 时,钻进的效率较低,容易发生堵塞事故,所以单壁钻具的长度  $L_w\leq 4H$ 。

对于  $300 \text{ m}$ 的试验井来说,  $L_w+H=300$ ,由此得出  $H>60 \text{ m}$ ;综合公式(2)、(3)计算结果考虑,满足  $300 \text{ m}$ 常规气举钻井深度,选取双壁钻杆总长度  $H>60 \text{ m}$ ,为提高岩心的上返速度尽量提高双壁钻杆的长度,配套  $60 \text{ m}$ 的  $\varnothing 168 \text{ mm}$ 双壁钻杆。

由此确定,在孔深  $300 \text{ m}$ 的气举反循环连续取心施工过程中,双壁钻杆柱总长为  $60 \text{ m}$ ,单壁钻杆柱总长为  $240 \text{ m}$ 。

### 2.1.2 双壁钻杆直径的确定

本次试验是为了进行气举反循环连续取心的试验,试验孔径为  $311 \text{ mm}$ 。根据取心的地质要求,初步设计  $\varnothing 311 \text{ mm}$ 牙轮钻头取心直径为  $70 \text{ mm}$ ,上返岩心长度为  $100 \text{ mm}$ ;按同心式双壁钻杆的结构设计可初步确定  $\varnothing 168 \text{ mm}$ 双壁钻杆。

由表1中的双壁钻杆基本参数来看,地热井常用的气举反循环双壁钻杆为  $\varnothing 127 \text{ mm}$ ,通孔直径仅有  $70 \text{ mm}$ ,无法满足岩心上返的需求。 $\varnothing 168 \text{ mm}$ 双壁钻杆内通孔为  $\varnothing 100 \text{ mm}$ ,因此确定最终配备的双壁钻杆规格为  $\varnothing 168 \text{ mm}/100 \text{ mm}$ 。

表1 双壁钻杆基本参数

Table 1 Basic parameters of double-wall drill rods

规格	材质	外管直径/mm	壁厚/mm	接头直径/mm	内管内径/mm	扣型
$\varnothing 127$	S135	127	9.19	168	70	NC50
$\varnothing 168$	S135	168	10.54	203	100	非标扣

### 2.1.3 反循环钻井空压机压力的确定

根据  $300 \text{ m}$ 钻孔深度,确定反循环混合器的最大安装深度后,即可计算出空压机的最高压力:

$$P=(H\gamma_h)\times 10^{-2}+\Delta P \quad (4)$$

式中: $P$ ——空压机的压力  $\text{MPa}$ ; $H$ ——反循环混合器的最大安装深度,  $300 \text{ m}$ 井深时,  $H=60 \text{ m}$ ; $\gamma_h$ ——冲洗液密度,  $\gamma_h=1.05 \text{ t/m}^3$ ; $\Delta P$ ——高压空气在循环系统中的压力损失,一般  $\Delta P=0.04\sim 0.1 \text{ MPa}$ ,取最大值  $0.1 \text{ MPa}$

由公式(4)可得出,  $300 \text{ m}$ 反循环钻井所需的最大压力  $P=0.73 \text{ MPa}$ ,由此可选定空压机的最高压力值。

### 2.1.4 空压机风量消耗计算

单位体积循环介质压风消耗量计算:

$$V_0=\frac{k_1\gamma h}{23\lg\frac{\gamma H_0+10}{10}} \quad (5)$$

式中: $V_0$ ——提升单位体积钻井液的压风消耗量; $\gamma$ ——冲洗液密度,  $\gamma=1.05 \text{ g/cm}^3$ ; $k_1$ ——系数,  $k_1=2.17+0.164h$ ,当  $h=20$ 时,  $k_1=5.45$ ; $h$ ——扬程,  $h=20 \text{ m}$ (按孔口到鹅颈管的最高点确定); $H_0$ ——压风管理入深度,  $H_0=60 \text{ m}$ 。

由此可得:  $V_0=3.2$ 。

上返的流量:

$$Q=AV_{\text{返}} \quad (6)$$

式中: $Q$ ——上返流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ; $A$ ——钻杆内通孔的横截面积,  $\varnothing 168 \text{ mm}$ 双壁钻具的内通径直径为  $100 \text{ mm}$ ,  $A=0.078 \text{ m}^2$ ; $V_{\text{返}}$ ——上返速度,  $\text{m/s}$ ,气举反循环上返速度一般在  $3\sim 5 \text{ m/s}$ ,取中位数  $4 \text{ m/s}$ 。

计算得:  $Q=0.03 \text{ m}^3/\text{s}=1.8 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

所需空气压缩机总风量:

$$V=QV_0=1.8\times 3.2=5.76 \text{ m}^3/\text{min} \quad (7)$$

按提升单位体积冲洗液考虑,计算需风量为  $5.76 \text{ m}^3/\text{min}$ ,并未考虑冲洗液中的岩屑和岩心,当冲洗液中携带大量的岩屑和岩心上返时,需要更多

的风量提升钻井液和岩心岩屑,所以本次试验空压机参数配置为压力10 MPa、风量 $12.5\text{ m}^3/\text{min}$ 。

大口径气举反循环连续取心试验钻孔要求使用设备有大通孔及大提升力,且试验地层为稳定的基岩。对于试验场地的选择具有一定的难度,破碎的地层难以获得完整的岩心,尤其是气举反循环这种会产生超高负压抽吸力的工艺。故本次试验在某一次水泥塞中进行原理性试验,钻遇合适地层再进行验证性试验。

## 2.2 井身结构

设计试验在江苏某地热井中进行,此地热井位于江苏省宜兴市张渚镇老虎山地区,设计井深2000 m,采用三开钻进。

一开设计钻至300 m,井径为444.5 mm,下入 $\Phi 339.7\text{ mm}\times 9.65\text{ mm}$ 套管,岩性为三叠系青龙组灰岩。

二开设计钻至1286 m,井径为311.2 mm,下入 $\Phi 244.5\text{ mm}\times 8.94\text{ mm}$ 套管,岩性为二叠系龙潭组的灰岩和砂岩以及孤峰组页岩。

三开设计钻至2000 m,井径为215.9 mm,岩性多为二叠系栖霞组灰岩、石炭系船山组黄龙组灰岩以及泥盆系五通群组砂岩。

井身结构如图7所示。

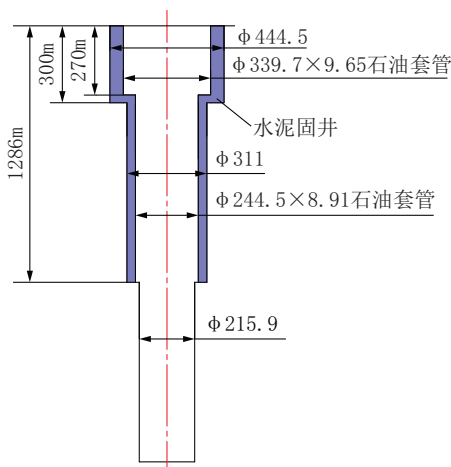


图7 井身结构

Fig.7 Well structure

## 3 取心工艺、钻具效果分析

### 3.1 取心试验

#### 3.1.1 水泥塞取心

气举反循环连续取心试验在地热井280~314

m的地层开展,试验一套气举反循环双壁钻具及 $\Phi 311\text{ mm}$ 反循环牙轮取心钻头,设计试验回次为2个回次以上。第一回次气举反循环连续取心钻井试验,共进尺22 m:在一开套管内扫水泥塞获得多段完整水泥岩心(孔深280~302 m),岩心外径约65 mm(见图8),最大长度为150 mm,水泥岩心上返及时,且上返过程中未出现堵塞钻具通道现象。



图8 水泥心

Fig.8 Cement cores

#### 3.1.2 灰岩层取心

水泥塞扫掉后进入灰岩地层钻进约12 m(孔深302~314 m),钻取中未得到柱状岩心,多为块状岩心,最大长度约110 mm(见图9)。主要原因为此段灰岩胶结性差,较破碎,地层呈层状,无法获取完整岩心。但采用此工艺岩心上返及时,无污染,代表性强,能较真实地反映地层层位、深度、颗粒级配。

### 3.2 取心效果评价

在水泥塞中钻进时达到试验预期效果,取得完整岩心柱,岩心采取率80%以上,岩心外径约65 mm,最大长度为150 mm,上返过程中未出现堵塞钻具通道现象。岩心直径小于取心钻头预设直径、长度大于预设长度。分析其主要原因为反循环取心钻头的岩心、岩屑均从中心通道上返,当岩心还未从岩体断裂上返时,持续上返的岩渣对岩心表面进行修磨,使得最终在地面看到的岩心直径略小于设计直径;当岩心直径磨小过多后,岩心上端面与岩心卡



- 发中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):225-229.
- XU Liuwan, WANG Yanli, YIN Guoyue, et al. Application of multi-process air drilling technology in geothermal well exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):225-229.
- [5] 彭彬,李帮民,王丹,等.气举反循环技术在石油钻井中的适应性分析[J].科学技术与工程,2016,16(19):179-184.
- PENG Bin, LI Bangmin, WANG Dan, et al. The adaptability analysis of gas lift reverse circulation technology in oil drilling [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16 (19) : 179-184.
- [6] 李元灵.油气井气举反循环携岩效果理论和设备配套方案研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
- LI Yuanling. Research on equipment matching of air-lift reverse circulation drilling for oil and gas wells[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [7] 郑伯乐,郑秀华,段晨阳,等.气举反循环钻进井壁稳定及适用性探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):13-18.
- ZHENG Bole, ZHENG Xiuhua, DUAN Chenyang, et al. Discussion on stability and applicability of gas lift reverse circulation drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(6):13-18.
- [8] 金丽娜.反循环钻井合理注气参数的研究[D].大庆:大庆石油学院,2008.
- JIN Lina. Research on reasonable gas injection parameters of the counter-circulation drilling[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [9] 耿令强.气举反循环钻进深度的理论计算与加深试验[J].中国煤田地质,2001,13(2):86-87.
- GENG Lingqiang. Depth theory calculation and deepen testing of air reverse circulation drilling [J]. Coal Geology of China, 2001,13(2):86-87.
- [10] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望——回顾探矿工程事业70年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):1-31.
- WANG Da, ZHAO Guolong, ZUO Ruqiang, et al. The development and outlook of geological drilling engineering—To review the 70th anniversary of exploration engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):1-31.
- [11] 许刘万,王艳丽.牙轮钻头的应用领域及钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(9):60-64.
- XU Liuwan, WANG Yanli. Application fields and drilling technologies of roller bit [j]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(9):60-64.
- [12] 郝文奎,宋宏兵,康亢,等.多工艺空气钻井工艺在深水井施工中的应用实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(12):11-14.
- HAO Wenkui, SONG Hongbing, KANG Kang, et al. Application practice of multi-process air drilling technology in deep well construction [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(12):11-14.
- [13] 王永全,许刘万.气举反循环钻进技术在地热深井施工中的应用[J].探矿工程,2001(S1):212-214.
- WANG Yongquan, XU Liuwan. The application of gas lift reverse circulation drilling technology in geothermal deep well construction [J]. Exploration Engineering, 2001(S1):212-214.
- [14] 王剑,王虎,李勇,等.气举反循环钻进工艺在贵州地热井中的推广应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):18-23.
- WANG Jian, WANG Hu, LI Yong, et al. Popularization and application of air-lift reverse circulation drilling technology in Guizhou geothermal deep wells [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(12):18-23.
- [15] 陈怡,段德培.气举反循环钻进技术在地热深井施工中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(4):23-24,28.
- CHEN Yi, DUAN Depei. Application of air-lift reverse circulation drilling in Baoli ZK3 deep geothermal well of Guizhou [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009,36(4):23-24,28.

(编辑 荐华)