

气举反循环钻进井壁稳定及适用性探讨

郑伯乐¹, 郑秀华¹, 段晨阳¹, 叶宏宇²

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2.北京泰利新能源科技发展有限公司,北京 101118)

摘要:气举反循环工艺具有钻进效率高、携带岩屑能力强、防漏效果好以及钻头寿命长等优点,同时还可以提高流体矿物的产能。但是一般认为气举反循环钻进抽吸作用会产生负压,不利于井壁稳定,不宜在松散地层应用。本文通过计算气举反循环钻进环空水力参数,并从环空压力以及冲洗液流态、流速等方面探讨研究气举反循环钻进中井壁稳定及其适用性,指出通过选取合适的钻具组合以及调节冲洗液性能,可使气举反循环工艺对不同地层的适应性更广。

关键词:气举反循环钻进;井壁稳定;环空压力;冲洗液性能;流态;地层适应性

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)06-0013-06

Discussion on stability and applicability of gas lift reverse circulation drilling

ZHENG Bole¹, ZHENG Xiuhua¹, DUAN Chenyang¹, YE Hongyu²

(1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2.Beijing Taili New Energy Technology Development Co., Ltd., Beijing 101118, China)

Abstract: The gas lift reverse circulation process has the advantages of high drilling efficiency, strong cutting-carrying capability, good loss prevention effect and long bit life, etc., and can also increase the productivity of liquid minerals. However, it is generally believed that the suction action of gas lift reverse circulation drilling will produce negative pressure, which is not conducive to the stability of the well wall and not suitable for application in loose formations. In this paper, by calculating the hydraulic parameters of the gas lift reverse circulation drilling annulus, and discussing the well wall stability and applicability of gas lift reverse circulation drilling from the aspects of annulus pressure, drilling fluid flow state and flow velocity, it is pointed out that suitable combination of the drilling string and conditioning of drilling fluid properties can make the gas lift reverse circulation process more adaptable to different formations.

Key words: gas lift reverse circulation drilling; wall stability; annular pressure; drilling fluid performance; flow state; formation adaptability

0 引言

气举反循环钻进是指输送到一定深度的压缩空气在钻杆内腔与冲洗液混合,使钻杆内外流体产生密度差形成反循环的钻进方法^[1],因其具有降低洗井成本、提高成井质量、钻进效率高、携带岩屑能力强、防漏效果好以及钻头寿命长等优点,在水文、地热、地质勘探等领域已得到广泛应用^[2-6]。实际钻井施工中遇漏失地层时,使用清水顶漏钻进时存在

沉屑过多现象,易卡钻、埋钻,需要洗井等措施排屑;泥浆堵漏不仅耗时耗力,由于部分漏失层也是取水层,可能堵住含水裂隙,损伤产层。而气举反循环钻进施工时,能够解决漏失地层钻进问题,并且可明显增加产能(出水量等),优势明显^[7-11]。

通常,气举反循环不宜在松散易垮塌的不稳定地层中应用。这是由于反循环的抽吸原理,导致井壁更易垮塌。本文通过气举反循环环空模型,从环

收稿日期 2019-08-16 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.06.003

基金项目:国家自然科学基金项目“具有绿色环保自降解特性的地热井碱激发泡沫暂堵水泥的设计及其制备研究”(编号:41572361)、“高温热储环境下微气泡钻井液特性及作用机理研究”(编号:41872184)

作者简介:郑伯乐,男,汉族,1995年生,在读硕士研究生,地质工程专业,研究方向为气体钻井,北京市海淀区学院路29号,18668718750@163.com。

通信作者:郑秀华,女,汉族,1965年生,教授,从事钻完井流体和地热工程研究工作,北京市海淀区学院路29号,xiuhua@cgub.edu.cn。

引用格式: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.

空压力以及冲洗液流态、流速等方面分析井壁稳定和携带岩屑问题,探讨气举反循环在不稳定地层中的适应性。

1 气举反循环钻进原理及应用

1.1 气举反循环钻进原理

气举反循环即用空压机将压缩空气经由双壁钻杆的内外管环空通道进入到混合器中,与冲洗液混合成为密度较低的三相流,使其与钻杆外的冲洗液产生密度差,进而引起压力差以达到“气举”效果,驱动环空内流体携带岩屑经由钻头水眼进入钻杆内部排入沉淀池。沉淀后的冲洗液再次流回孔内形成连续钻进的过程。

混合器是气举反循环较为关键的部分,其本身使用受沉没比的影响。沉没比即混合器在动水位以下的浸没深度与其至气水龙头弯管最高处中心线的长度比。浅部地层时未到达地下水位,气举反循环难以进行。通常认为,孔深 30 m 内不宜采用气举反循环钻进,沉没比不宜小于 0.5,钻孔内地下水应具备稳定的自然或回灌动水位且小于 200 m^[1]。

1.2 气举反循环钻进应用

贵州地质工程勘察院于 2007 年 8 月在贵阳施工 ZK3 号地下热水井。该井热储地体盖层有较厚的泥灰岩、泥页岩,属于易垮塌地层。在正循环全面钻进施工时,于 858.18 m 处遇溶洞,泥浆全部漏失,采取多种措施堵漏无果后决定采用气举反循环技术,向孔内补充高粘度泥浆后钻透热储盖层并下入技术套管护壁,成功使用气举反循环技术钻至 2191 m 完井^[12]。

京热 164 号井在使用泥浆正循环钻进施工至 2760 m 井深后,因钻进效率下降(平均纯钻进效率 0.7 m/h),改进双壁钻具后使用气举反循环钻进工艺,解决目的层漏失问题,且明显提高了纯钻效率和单钻头进尺,大大节约成本^[13]。

四川达县仙女山温泉 2 井采用常规正循环钻井时出现失返、井壁垮塌和卡钻现象,泥浆堵漏、护壁无果。由于所钻地层出水量大,井壁虽然不稳易垮塌但无天然气,最终决定采用气举反循环钻进。在使用专用反循环牙轮钻头划眼后成功实施气举反循环钻进,采取及时发现参数异常、及时划眼和快速接单根等措施,保证了施工安全,最终钻至井深 863 m 完钻^[14]。

由以上应用可见气举反循环在钻井中尤其是地

热井应用较多,钻进效率高,针对漏失地层效果明显,但对于设备、技术水平以及钻遇地层都有一定要求。下面就气举反循环钻进时的井壁稳定和岩屑携带问题进行探讨。

2 井壁稳定

钻进过程中,冲洗液液柱压力取代了所钻地层提供井壁支撑,引起井眼周围应力重分布。此时若环空压力过大,则引起井壁发生张性破坏,导致井漏;若环空压力太低,对于围岩易产生剪切破坏,根据岩石性质,发生扩径或缩径^[15]。实际上,环空压力为冲洗液液柱压力与其摩擦阻力之和或差,取决于循环方式。而气举反循环钻进环空内冲洗液流体向下流动,则环空压力为上述二者之差。因此,冲洗液性能与井壁稳定息息相关。出于实际钻进应用考虑,有必要寻找合适的冲洗液参数,包括密度、粘度。

此外,冲洗液对井壁的冲蚀也是影响井壁稳定的问题之一。通常为保证携带岩屑效率,一般模型中多认为冲洗液处于湍流状态,此时岩屑不存在转动和滑落,可保证清理环空岩屑。但湍流也有缺点,其要求冲洗液返速较高,所需求泵排量大,同时也使摩擦阻力造成的功率损失大。同时,湍流对井壁有冲蚀作用,抑制泥饼形成,严重时引起井眼坍塌。而层流则对井壁冲刷作用较小,因此钻进中应尽量使环空冲洗液流态为层流^[16]。在气举反循环钻进中,因反循环原理,本身内管流速大,携屑能力较强,因此考虑使环空冲洗液流态为层流以减少冲蚀,有利于井壁稳定。

3 气举反循环钻进水力参数分析

探讨气举反循环钻进工艺尤其在不稳定地层中的适用性,除去下入护壁套管、加速辅助作业等手段外,有必要从理论上研究气举反循环钻进过程中的井壁稳定和携带岩屑的问题,为此,建立环空压力模型以进一步研究。

3.1 气举反循环钻进环空模型

针对气举反循环钻进有如下假设:

(1)假设所有可压缩气体均近似符合理想气体方程,可压缩气体在冲洗液中的流动阻力损失忽略不计,在混合器处的压力与流量损失忽略不计。

(2)假设所有冲洗液均为不可压缩流体,并且其密度不随温度变化。

(3)假设岩屑颗粒大小、密度相同,并在多相流中均匀分布,随多相流等速运动。

(4)假设多相流在内管内均匀分布,并近似认为多相流符合流体动力学基本规律。

在气举反循环钻进过程中,环空内只有冲洗液,环空压力由冲洗液的静液压力和摩擦阻力构成,取井口为原点,以井口向下为正,假设井径保持不变,单壁钻杆外径与双壁钻杆外径一致,冲洗液充满整个环空,则环空压力可以表示为:

$$P = P_g - P_f + P_0 \quad (1)$$

$$P_g = \rho_l g h \quad (2)$$

$$P_f = f \rho_l v^2 h / [2(d_{wb} - d_{to})] \quad (3)$$

$$v = 4Q_1 / [\pi(d_{wb}^2 - d_{to}^2)] \quad (4)$$

式中: P ——环空压力,MPa; P_g ——冲洗液静液压力,MPa; P_f ——环空摩擦阻力,MPa; P_0 ——标准大气压,取 0.1 MPa; ρ_l ——冲洗液密度,kg/m³; g ——重力加速度,取 9.8 m/s²; h ——井深,m; f ——范宁摩擦系数; v ——环空冲洗液流速,m/s; d_{wb} ——井径,m; d_{to} ——双壁钻杆外径,m; Q_1 ——环空内冲洗液流量,m³/s。

若环空流体为层流,范宁摩擦系数由下式给出^[17]:

$$f = 64/Re \quad (5)$$

若环空流体为湍流,则范宁摩擦系数由 Haaland 关系式表示:

$$f = \left\{ -1.8 \lg \left[\left(\frac{\epsilon_{av}}{3.7(d_{wb} - d_{to})} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} \quad (6)$$

$$\epsilon_{av} = (\epsilon_{wb} d_{wb}^2 + \epsilon_t d_{to}^2) / (d_{wb}^2 + d_{to}^2) \quad (7)$$

$$Re = \rho_l v (d_{wb} - d_{to}) / \mu \quad (8)$$

式中: ϵ_{av} ——环空表面绝对粗糙度,m; ϵ_{wb} ——裸眼表面绝对粗糙度,取 0.003 m; ϵ_t ——钻杆表面绝对粗糙度,取 0.0002 m; Re ——环空内冲洗液雷诺数; μ ——冲洗液动力粘度,清水取 0.001 Pa·s。

在不考虑漏失的情况下,可认为在钻杆内气液混合器以下冲洗液流量等于环空冲洗液流量,即:

$$Q_1 = Q_t = (1/4)\pi d_{ti}^2 v_t \quad (9)$$

式中: Q_t ——钻杆内气液混合器以下冲洗液流量,m³/s; d_{ti} ——单壁钻杆内径,m; v_t ——钻杆内冲洗液上返速度,m/s,根据气举反循环规程,三相流上返速度应控制在 2~3 m/s^[1]。

将式(2)~(8)代入式(1),即得到气举反循环过

程中环空压力。注意选取双壁钻杆规格时需保证井眼直径大于双壁钻杆最大外径的 1.2 倍^[1]。

3.2 计算(实例)

以 2000 m 井深为例。常见地热钻井井眼尺寸有 Ø152、216 和 311 mm。根据现场经验^[3,18]及 MATLAB 程序模拟计算,双壁钻杆下入深度与井深比(以下简称下深比)范围通常在 1:(4~10)。这里双壁钻杆下入深度取 300 m。

为探讨环空井底压力与井径及双壁钻杆规格关系,根据 3.1 中所述模型,编写相应 MATLAB 程序,通过迭代计算,得到井径分别为 152、216 和 311 mm,冲洗液为清水的情况下的结果,具体见表 1。

表 1 不同井径及双壁钻杆规格计算结果(冲洗液为清水)
Table 1 Calculation results for different well diameters and dual-wall drill pipe specifications (drilling fluid: water)

井径/ mm	上返速 度/(m· s ⁻¹)	双壁钻 杆规格/ mm	环空流 体流速/ (m·s ⁻¹)	环空流 体雷诺 数 Re	环空井 底压力/ MPa	环空井底 摩擦压 力/MPa
152	2	Ø89/59	0.46	28888	19.5505	0.1495
		Ø114/73	1.05	40068	17.9610	1.7390
	3	Ø89/59	0.69	43332	19.3674	0.3326
		Ø114/73	1.58	60102	15.8035	3.8965
		Ø89/59	0.18	22826	19.6915	0.0085
		Ø114/73	0.32	32297	19.6635	0.0365
216	2	Ø127/76	0.38	33679	19.6357	0.0643
		Ø140/89	0.59	44500	19.5050	0.1950
		Ø168/108	1.27	60750	17.8746	1.8254
	3	Ø178/127	2.15	81873	12.1823	7.5177
		Ø89/59	0.27	34239	19.6814	0.0186
		Ø114/73	0.47	48445	19.6193	0.0807
311	3	Ø127/76	0.57	50519	19.5571	0.1429
		Ø140/89	0.88	66750	19.2647	0.4353
		Ø168/108	1.90	91125	15.6063	4.0937
	2	Ø178/127	3.23	122810	2.8173	16.8827
		Ø89/59	0.08	17405	19.6992	0.0008
		Ø114/73	0.13	25078	19.6975	0.0025
311	2	Ø127/76	0.14	26255	19.6965	0.0035
		Ø140/89	0.21	35126	19.6924	0.0076
		Ø168/108	0.34	48701	19.6729	0.0271
	3	Ø178/127	0.50	65967	19.6364	0.0636
		Ø219/168	1.16	106506	19.0997	0.6003
		Ø89/59	0.12	26108	19.6983	0.0017
3	Ø114/73	0.19	37616	19.6947	0.0053	
	Ø127/76	0.22	39382	19.6924	0.0076	
	Ø140/89	0.31	52690	19.6833	0.0167	
3	Ø168/108	0.51	73052	19.6399	0.0601	
	Ø178/127	0.74	98951	19.5584	0.1416	
	Ø219/168	1.74	159758	18.3544	1.3456	

从式(1)~(3)可看出,增加冲洗液密度时,环空井底压力也会上升。此外,还需探讨冲洗液流态与

粘度、流速等变量的关系。假设环空冲洗液为塑性流体,则当雷诺数 $Re < 2000$ 时为层流。取冲洗液密度 1050 kg/m^3 ,粘度为 $20, 30 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,在不同井径情况下,由上述模型,计算环空返速及流态,计算结果见表 2、3,仅列出雷诺数 $Re < 2000$ 的结果。

表 2 不同井径及双壁钻杆规格计算结果
(冲洗液密度 1050 kg/m^3 ,粘度 $20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)

Table 2 Calculation results for different well diameters and dual-wall drill pipe specifications
(drilling fluid: density 1050 kg/m^3 , viscosity $20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)

井径/mm	上返速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	双壁钻杆规格/mm	环空流体流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	环空流体雷诺数 Re	环空井底压力/MPa	环空井底摩擦压力/MPa
152	2	Ø89/59	0.46	1517	20.4514	0.2286
		Ø89/59	0.18	1198	20.6629	0.0171
216	2	Ø114/73	0.32	1696	20.6191	0.0609
		Ø127/76	0.38	1768	20.5789	0.1011
	3	Ø89/59	0.27	1798	20.6464	0.0336
		Ø89/59	0.08	914	20.6780	0.0020
311	2	Ø114/73	0.13	1317	20.6748	0.0052
		Ø127/76	0.14	1385	20.6730	0.0070
	3	Ø140/89	0.21	1844	20.6658	0.0142
		Ø89/59	0.12	1371	20.6761	0.0039
		Ø114/73	0.19	1975	20.6697	0.0103

表 3 不同井径及双壁钻杆规格计算结果
(冲洗液密度 1050 kg/m^3 ,粘度 $30 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)

Table 3 Calculation results for different well diameters and dual-wall drill pipe specifications
(drilling fluid: density 1050 kg/m^3 , viscosity $30 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)

井径/mm	上返速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	双壁钻杆规格/mm	环空流体流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	环空流体雷诺数 Re	环空井底压力/MPa	环空井底摩擦压力/MPa
152	2	Ø89/59	0.46	1011	20.4221	0.2579
		Ø114/73	1.05	1402	18.3084	2.3716
		Ø127/76	1.66	1449	10.3558	10.3242
	3	Ø89/59	0.69	1517	20.1656	0.5144
		Ø89/59	0.18	799	20.6601	0.0199
216	2	Ø114/73	0.32	1130	20.6106	0.0694
		Ø127/76	0.38	1179	20.5657	0.1143
		Ø140/89	0.59	1558	20.3762	0.3038
	3	Ø89/59	0.27	1198	20.6415	0.0385
		Ø114/73	0.47	1696	20.5430	0.1370
		Ø127/76	0.57	1768	20.4524	0.2276
311	2	Ø89/59	0.08	609	20.6776	0.0024
		Ø114/73	0.13	878	20.6739	0.0061
		Ø127/76	0.14	923	20.6718	0.0082
	3	Ø140/89	0.21	1229	20.6637	0.0163
		Ø168/108	0.34	1705	20.6310	0.0490
		Ø89/59	0.12	914	20.6755	0.0045
	3	Ø114/73	0.19	1317	20.6682	0.0118
		Ø127/76	0.22	1385	20.6642	0.0158
		Ø140/89	0.31	1844	20.6480	0.0320

4 气举反循环水力参数对井壁稳定影响分析

4.1 环空压力

由表 1 的计算结果可知,在合适的井径下,通过选取合适的双壁钻杆规格,可使得冲洗液的摩擦阻力 P_f 与其静液压力 P_g 相比较小,可在理论上一定程度说明气举反循环钻进存在可行性。

以表 1 中井径 311 mm 的计算结果为例,内管上返速度取 3 m/s ,将其结果绘制成图,见图 1。

正循环环空井底压力 P' 即为冲洗液的摩擦阻力 P_f 与其静液压力 P_g 以及大气压之和,与气举反循环环空井底压力正好相差 2 倍的摩擦阻力 P_f 。

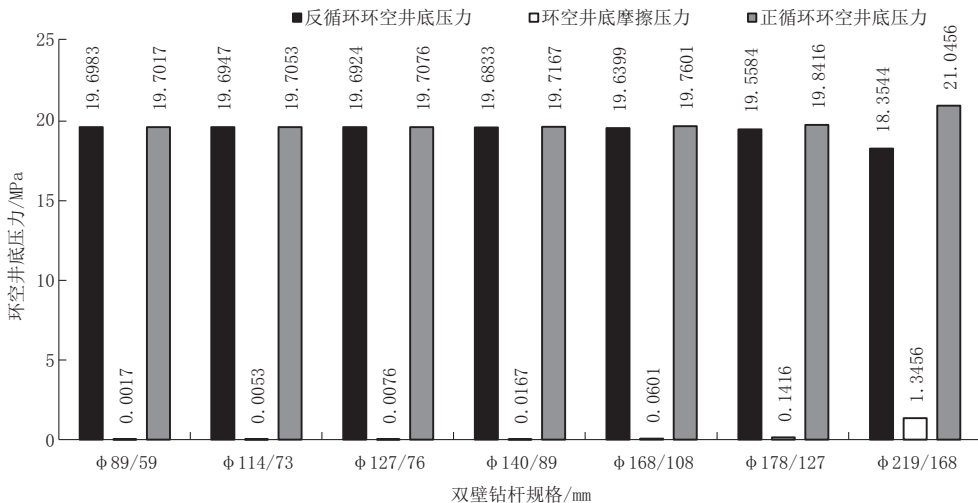


图 1 井径 311 mm 下不同双壁钻杆规格对环空井底压力及摩擦阻力的影响

Fig.1 Influences of different dual-wall drill pipe specifications on bottom-hole annular pressure and friction resistance at well diameter of 311mm

而图中摩阻大部分情况下很小,也即正反循环的环空井底压力之差(2 倍的冲洗液的摩擦阻力 P_f)相比于本身的冲洗液静液压力 P_g 很小。由此,理论上可以得出结论:若在使用清水正循环工艺,可以正常进行钻进的地层,则在合适的井身结构设计,以及选取合适的钻具组合(如合适的双壁钻杆规格)的情况下,也能使用气举反循环钻进。

4.2 冲洗液流态

从表 2、3 的结果对比可以看出,随着粘度的增加,符合层流的情况增加了。因此可知,增加粘度可明显降低环空冲洗液的雷诺数,更易使环空流体处于层流状态,有利于保护井壁。

若假设能降低双壁钻杆内管的混合流流速至 0.5~1.5 m/s,以表 3 为基础,即冲洗液密度 1050 kg/m³,粘度 30 mPa·s,再次计算,结果见表 4。为方便起见,对所得表格中的数据进行筛选,仅列出雷诺数 $Re < 2000$ 的情况。

由表 3 和表 4 对比可见,若能适当降低内管的上返速度,就有利于进一步降低环空流速,实现层流。因此,从理论上可以认为,在使用合适的冲洗液情况下,适当降低内管上返速度,更有利于减小环空流速,使环空冲洗液为层流,减少冲洗液冲蚀,有利于井壁稳定。

5 结论

(1)依据气举反循环工作原理和流体力学理论,经适当简化,建立了一个简单的气举反循环压力模型,利用该模型及 MATLAB 软件编写简单程序,计算得到气举反循环钻进过程中井底压力和摩擦压力。

(2)利用所得计算结果对气举反循环与正循环的应用作探讨,在理论上得出结论:气举反循环在适当的井身结构设计、双壁钻杆规格的选择下可使摩擦阻力较低,对于可以利用清水正循环钻进的地层,也可以利用气举反循环钻进。

(3)从冲洗液流态、环空流速及上返速度的角度探讨了其对井壁稳定及携带岩屑能力的影响,在其他条件一定的情况下,当地层稳定性较差时,可以通过调节冲洗液性能进行气举反循环钻进,包括提高冲洗液密度和粘度,可使环空冲洗液流态保持层流状态,有利于保护井壁,而在使用合适的冲洗液进行气举反循环钻进时,适当降低上返速度,可进一步减少对井壁的冲蚀,更有利于井壁稳定。

表 4 不同上返速度计算结果
(冲洗液密度 1050 kg/m³,粘度 30 mPa·s)
Table 4 Calculation results for different uphole velocities
(drilling fluid: density 1050kg/m³, viscosity 30mPa·s)

井径/ mm	上返速 度/(m· s ⁻¹)	双壁钻 杆规格/ mm	环空流 体流速/ (m·s ⁻¹)	环空流 体雷诺 数 Re	环空井 底压力/ MPa	环空井底 摩擦压 力/MPa	
152	0.5	Ø89/59	0.11	253	20.6512	0.0288	
		Ø114/73	0.26	351	20.4503	0.2297	
		Ø127/76	0.41	362	19.7543	0.9257	
	1.0	Ø89/59	0.23	506	20.5967	0.0833	
		Ø114/73	0.53	701	19.9690	0.7110	
		Ø127/76	0.83	725	17.7036	2.9764	
	1.5	Ø89/59	0.34	758	20.5199	0.1601	
		Ø114/73	0.79	1052	19.2535	1.4265	
		Ø127/76	1.24	1087	14.5680	6.1120	
	216	0.5	Ø89/59	0.04	200	20.6776	0.0024
			Ø114/73	0.08	283	20.6722	0.0078
			Ø127/76	0.09	295	20.6673	0.0127
Ø140/89			0.15	389	20.6486	0.0314	
Ø168/108			0.32	532	20.4636	0.2164	
Ø178/127			0.54	716	19.9290	0.7510	
1.0		Ø89/59	0.09	399	20.6732	0.0068	
		Ø114/73	0.16	565	20.6574	0.0226	
		Ø127/76	0.19	589	20.6431	0.0369	
		Ø140/89	0.29	779	20.5854	0.0946	
		Ø168/108	0.63	1063	19.9869	0.6931	
		Ø178/127	1.08	1433	18.1532	2.5268	
1.5	Ø89/59	0.13	599	20.6674	0.0126		
	Ø114/73	0.24	848	20.6367	0.0433		
	Ø127/76	0.28	884	20.6090	0.0710		
	Ø140/89	0.44	1168	20.4942	0.1858		
	Ø168/108	0.95	1595	19.2662	1.4138		
	311	0.5	Ø89/59	0.02	152	20.6797	0.0003
Ø114/73			0.03	219	20.6793	0.0007	
Ø127/76			0.04	231	20.6790	0.0010	
Ø140/89			0.05	307	20.6781	0.0019	
Ø168/108			0.09	426	20.6748	0.0052	
Ø178/127			0.12	577	20.6695	0.0105	
1.0		Ø219/168	0.29	932	20.6089	0.0711	
		Ø89/59	0.04	305	20.6792	0.0008	
		Ø114/73	0.06	439	20.6779	0.0021	
		Ø127/76	0.07	462	20.6772	0.0028	
		Ø140/89	0.10	615	20.6746	0.0054	
		Ø168/108	0.17	852	20.6644	0.0156	
1.5	Ø178/127	0.25	1154	20.6479	0.0321		
	Ø219/168	0.58	1864	20.4493	0.2307		
	Ø89/59	0.06	457	20.6785	0.0015		
	Ø114/73	0.10	658	20.6761	0.0039		
	Ø127/76	0.11	692	20.6748	0.0052		
	Ø140/89	0.15	922	20.6698	0.0102		
1.5	Ø168/108	0.26	1278	20.6497	0.0303		
	Ø178/127	0.37	1732	20.6169	0.0631		

参考文献(References):

- [1] 气举反循环钻探规程[EB/OL]. http://www.mnr.gov.cn/gk/bzgf/201807/t20180720_2200310.html, 2018-07-20.
Regulation on air-lifting reverse circulation drilling[EB/OL]. http://www.mnr.gov.cn/gk/bzgf/201807/t20180720_2200310.html, 2018-07-20.
- [2] 王松珍.气举反循环钻进工艺高发钻铤折断事故分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):34-40.
WANG Songzhen. Analysis of high incidence drill collar breakage in air lift reverse circulation drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7): 34-40.
- [3] 李帮民,侯树刚,杨甘生,等.气举反循环防漏钻井施工参数适应性分析[J].断块油气田,2016,23(6):838-841.
LI Bangmin, HOU Shugang, YANG Gansheng, et al. Adaptability of air-lifting reverse circulation caulk drilling with different parameters[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016,23(6):838-841.
- [4] 王英.气举反循环在水井工程中的应用[J].山东煤炭科技,2016(7):158-160.
WANG Ying. Application of gas lift reverse circulation in water well engineering[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2016(7):158-160.
- [5] 刘炳志.地热井施工技术探讨[J].山东煤炭科技,2017(8):5-6.
LIU Bingzhi. Discussion on geothermal well construction technology[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2017(8):5-6.
- [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] 杨忠彦,贾志,安振营,等.悬挂式独立内管气举反循环在地热钻井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(1):34-38.
YANG Zhongyan, JIA Zhi, AN Zhenying, et al. Application of air-lifting reverse circulation system with suspension type independent inner pipe in geothermal well construction[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(1):34-38.
- [8] 孙丙伦.应用气举反循环钻进工艺成功解决钻井施工疑难技术问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(3):12-14.
SUN Binglun. Application of air-lift reverse circulation drilling technology for resolving well drilling problems[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007,34(3):12-14.
- [9] 朱继东.气举反循环钻进技术在北京地区地热井施工中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(4):47-48.
ZHU Jidong. Application of air lift reverse circulation tech. in geothermal well drilling in Beijing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004,31(4):47-48.
- [10] 张大祥,卞立明.气举反循环在某深井施工中的应用[J].施工技术,2007,36(S1):329.
ZHANG Daxiang, BIAN Liming. Application of air reverse circulation drilling in deep well construction[J]. Construction Technology, 2007,36(S1): 329.
- [11] 马秀民,陈岳.气举反循环钻进技术在大连交流岛地热井施工中的应用[J].地质装备,2014,15(5):34-36.
MA Xiumin, CHEN Yue. The application of air-lift reverse circulation in geothermal drilling[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2014,15(5): 34-36.
- [12] 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.
- [13] 王玉国,肖海龙,谢连生.气举反循环钻进工艺在3512m深的京热164号井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(2):9-11.
WANG Yuguo, XIAO Hailong, XIE Liansheng. Application of air lift reverse circulation drilling in Jingre 164# well of 3512m depth[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009,36(2):9-11.
- [14] 陈涛,陈锦泉,李勇政,等.气举反循环钻井技术在复杂井的探索——以仙女山温泉2井为例[J].天然气技术与经济,2015,9(5):35-37,78-79.
CHEN Tao, CHEN Jinquan, LI Yongzheng, et al. Application of gas-lift reverse circulation drilling to complex wells: An example from Wenquan 2 Well in Xiannushan Mountain[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2015,9(5):35-37,78-79.
- [15] 王文.欠平衡钻井井壁稳定性研究[J].石化技术,2015,22(12):183,192.
WANG Wen. Study on borehole wall stability under the underbalanced drilling[J]. Petrochemical Industry Technology, 2015,22(12):183,192.
- [16] 鄢捷年.钻井液工艺学[M].东营:中国石油大学出版社,2001.
YAN Jienian. Drilling fluids technology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2001.
- [17] 威廉C.莱昂斯,杨虎.空气与气体钻井手册[M].北京:石油工业出版社,2012.
Williams C. Lyons, YANG Hu. Air and gas drilling manual[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [18] 王桦,郝世俊,莫海涛.气举反循环钻进中空压机的启动风压初探[J].煤田地质与勘探,2017,45(4):157-162.
WANG Hua, HAO Shijun, MO Haitao. The pilot study on start pressure of the air compressor during the air-lift reverse circulation drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2017,45(4):157-162.