

贵州碳酸岩地层地热深井 空气潜孔锤钻进技术应用研究

赵华宣¹, 李强¹, 陈涛¹, 陈浩¹, 苏宁², 王虎^{3,4}

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 114 地质大队, 贵州 遵义 563000; 2. 贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州 贵阳 550008; 3. 贵州省地质矿产勘查开发局 111 地质大队, 贵州 贵阳 550008; 4. 贵州地质工程勘察设计院, 贵州 贵阳 550008)

摘要:研究了空气潜孔锤钻井工艺在贵州省碳酸盐岩地层地热深井中的应用, 涉及溶隙、裂隙发育, 涌水、漏风、掉块、排渣困难等情况频发的碳酸盐岩地层的 10 ~ 1100 m 井段和 $\varnothing 216 \sim 406$ mm 井径的条件, 探讨了在这样环境下空气潜孔锤钻进机具设备配置、钻具组合和钻进参数; 分析了空气潜孔锤钻进工艺钻进过程中的常见问题并提出了相应的技术措施; 总结了深井碳酸盐岩地层复杂井况的空气潜孔锤钻进效率与经济效益。研究表明, 通过合理的设备机具配置和技术措施, 可有效提高贵州省碳酸岩层空气潜孔锤钻进效率, 进而大幅度提高贵州地热深井的钻进效率 and 经济效益。

关键词:碳酸岩地层; 深井; 空气潜孔锤钻进; 地热井

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2017)02-0037-06

Research and Application of Air DTH Hammer Drilling Technology for Deep Geothermal Well in Guizhou Carbonate Formation/ZHAO Hua-xuan¹, LI Qiang¹, CHEN Tao¹, CHEN Hao¹, SU Ning², WANG Hu^{3,4} (1. No. 114 Geological Brigade of Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Zunyi Guizhou 563000, China; 2. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang Guizhou 550008, China; 3. No. 111 Geological Brigade of Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang Guizhou 550008, China; 4. Guizhou Geological Engineering Investigation Design and Research Institute, Guiyang Guizhou 550008, China)

Abstract: The research is made on the application of air DTH hammer drilling technology for geothermal wells in the carbonate formation of Guizhou Province. In a well section of 10 ~ 1100m in depth with 216 ~ 406mm in diameter, cracks and fractures develop; water gushing, air leakage, block falling and difficult slag discharge frequently occur. In this paper, the DTH hammer equipment configuration, bottom hole assembly and drilling parameters in such complicated conditions are discussed; common problems in the drilling process with air DTH hammer drilling technology are analyzed and the corresponding technical measures are put forward. This paper also summarizes the drilling efficiency and economic benefit of air DTH hammer used for deep well drilling in the complex conditions of carbonate formation. The study results show that by reasonable equipment configuration and technical measures, the drilling efficiency of air DTH hammer can be effectively improved, which is great beneficial to deep geothermal wells of Guizhou Province.

Key words: carbonate formation; deep well; air DTH hammer; geothermal well

0 引言

贵州省地热资源十分丰富, 但勘探起步较晚, 勘查开采程度较低^[1-2], 钻井技术主要为常规牙轮正循环回转钻进, 工期长、效益低^[3-4], 已不适应贵州省建温泉省、公园省及生态文明建设的需要, 亟需进行深井钻井新技术、新工艺的应用研究。

空气潜孔锤钻进技术具有钻效高、工期短、成本低等优势, 在井径小、钻深浅(200 m 以内)的水文井中应用广泛^[5-7]。贵州属典型喀斯特地貌, 碳酸岩地层占全省面积 60% 以上^[8-9], 浅表层受雨水浸蚀, 岩溶裂隙极为发育, 钻进中常遇漏失、涌水、掉块等复杂井况, 常规方法钻进困难; 空气潜孔锤钻进常遇涌

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-01-05

基金项目:贵州省社会发展科技攻关资助项目“贵州复杂地层深井钻探工艺应用研究”(编号: 黔科合 SY 字[2015]3002); 贵州省地矿局地质科研资金资助项目“地热钻井泥浆技术的研究应用”(编号: 黔地矿科合[2014]01); 贵州省科技计划项目“贵州省地下热水资源赋存条件及勘查关键技术研究”(编号: 黔科合[2016]支撑 2842)

作者简介:赵华宣, 男, 苗族, 1968 年生, 高级工程师, 主要从事钻井工程工作, 贵州省遵义市红花岗区海尔大道, 1060440458@qq.com。

通讯作者:王虎, 男, 汉族, 1985 年生, 钻探工程公司主任工程师, 工程师, 硕士, 主要从事钻井工程工作, 贵州省贵阳市三桥百花大道 5 号, wanghu235@163.com。

水、漏风、超径、掉块、排渣困难情况频发等复杂井况影响钻进效率和钻井安全^[10-11]。地热井施工井径大、深度大(2000~3000 m),浅孔、小井径采用的偏心跟管钻进技术^[12-14]不适应深井钻进。需对空气潜孔锤在岩溶发育岩层深井钻进中的相关技术问题进行开展研究,以提高钻进效率和确保钻进安全。

1 贵州省地热井常用井身结构

贵州地热井地质结构复杂,钻井深度大、井径大、根据钻进地层结构、地层岩性复杂程度,多采用“三开”或“四开”的井身结构。

1.1 三开结构

地热井地层结构及岩性均较简单时,采用三开结构。

(1)地表管井段:井径 395~406 mm,深度 10~30 m,下 Ø377 mm 普通套管或 Ø339.7 mm 石油套管并水泥固结,阻隔地表水入井和防空气钻井冲塌表层松散土。

(2)一开井段(泵室段):井径 311~320 mm (Ø315~320 mm 为空气潜孔锤钻进、Ø311 mm 为其它工艺),深度 600~1000 m 以满足抽水设备入井要求,下 Ø244.48 mm 石油套管并水泥固结保温及封隔低温含水层或欠/不稳定地层护壁。

(3)二开井段:井径 216~220 mm (Ø216~220 mm 为空气潜孔锤钻进、Ø216 mm 为其它工艺),深度 1500~2000 m,揭穿需封隔低温含水层或欠/不稳定地层,下 Ø177.8 mm 石油套管并水泥固结保温及封隔低温含水层或欠/不稳定地层护壁。

(4)三开井段:井径 152 mm,终孔井段。

1.2 四开结构

地热井地层结构及岩性均复杂时,采用四开结构。

(1)地表管井段:井径 440 mm,深度 10~30 m,下 Ø426 mm 普管并水泥固结,阻隔地表水入井和防空气钻井冲塌表层松散土。

(2)一开井段:井径 406 mm (空气潜孔锤钻井或其它工艺),深度 100~200 m,下 Ø339.7 mm 石油套管并水泥固结保温及封隔富水层或欠/不稳定地层护壁。

(3)二开井段(泵室段):井径 311~320 mm (Ø315~320 mm 为空气潜孔锤钻井、Ø311 mm 为其它工艺),深度 600~1000 m 以满足抽水设备入井要求,下 Ø244.48 mm 石油套管并水泥固结保温及封

隔低温含水层或欠/不稳定地层护壁。

(4)三开井段:井径 216~220 mm, (Ø216~220 mm 为空气潜孔锤钻井、Ø216 mm 为其它工艺井径),深度 1500~2000 m,下 Ø177.8 mm 石油套管并水泥固结保温及封隔低温含水层或欠/不稳定地层护壁。

(5)四开井段:井径 152 mm,终孔井段 (Ø152 mm 井段,目前小径潜孔锤质量不能满足深井钻进井况,不宜使用空气潜孔锤钻进)。

2 钻具组合及钻井参数

2.1 钻具组合

空气潜孔锤钻具组合,应充分利用原有的地热钻井机具(尽可能使用较大直径的 Ø127 mm 钻杆,减小钻杆与井壁间的环状间隙),钻遇溶蚀发育段的涌水漏水情况和排渣困难时,在钻杆与钻铤处和排渣困难段下部接旁通阀,利于排渣;为减少排余气时间、防井底余渣上窜堵塞冲击器,在钻杆上每隔 200 m 加一个单向阀。机具配套见表 1。

表 1 空气潜孔锤钻进机具配套表

序号	机具名称	规格	备	注
1	封井器	Ø339.7/165 mm	除防尘、导渣水、防钻渣乱窜	
2	旁通阀	NC50	接 Ø127 mm 钻杆	
	旁通阀	NC38	接 Ø89 mm 钻杆	
3	单向阀	NC50	接 Ø127 mm 钻杆	
	单向阀	NC38	接 Ø89 mm 钻杆	
4	排渣管汇	Ø219 mm	导渣、导水	
5	冲击器	TS12/TS8	长沙天河(带防脱套)	
6	冲击锤头	Ø315、320、406 mm	一开、二开井段钻井	
	冲击锤头	Ø216、220 mm	三开井段钻井	

各井段的钻具组合如下。

(1) Ø406 mm 井段钻具组合: Ø406 mm 锤头 + TS12 冲击器 + Ø203 mm 钻铤(2 柱) + Ø127 mm 钻杆(1 单根) + 旁通阀 + Ø127 mm 钻杆(1 单根) + 单向阀(NC50) + Ø127 mm 钻杆 + 单向阀 + 主杆。

溶蚀发育段或软硬互层频繁,防斜、防拐点组合: Ø406 mm 锤头 + TS12 冲击器 + Ø203 mm 钻铤(2 柱) + Ø400 mm 扶正器/稳定器 + Ø127 mm 钻杆(1 单根) + 旁通阀 + Ø127 mm 钻杆(1 单根) + 单向阀(NC50) + Ø127 mm 钻杆 + 单向阀 + 主杆。

(2) Ø315/320 mm 井段钻具组合: Ø315 (Ø320) mm 锤头 + TS12 冲击器 + Ø20 mm 3 钻铤(2 柱) + Ø127 mm 钻杆(1 单根) + 旁通阀 + Ø12 mm 7 钻杆

(1 单根) + 单向阀 (NC50) + Ø127 mm 钻杆 (10 柱) + 旁通阀 + Ø127 mm 钻杆 (9 柱) + 单向阀 + 主杆。

(3) Ø216/220 mm 井段钻具组合: Ø216 (Ø220) mm 锤头 + TS8 冲击器 + Ø165 mm 钻铤 (3 ~ 4 柱) + Ø127 mm 钻杆 (1 单根) + 旁通阀 + Ø127 mm 钻杆 (1 单根) + 单向阀 (NC50) + Ø127 mm 钻杆 + Ø89 mm 钻杆 + 单向阀 (NC38) + 主杆。

2.2 钻进参数

2.2.1 钻压

合理的钻压可以保证锤头球齿与岩石紧密接触和克服冲击器及钻具的反弹力。潜孔锤有钻压限值时,钻压应小于限值;无限值时,以锤头直径 (cm) 乘以 $0.9 \text{ kN}^{[15]}$ 为宜;遇溶蚀发育、软弱互层频繁时,应适当减小钻压,以防止井斜和保护钻具。

2.2.2 转速

旋转钻具可以改变硬质合金刃破岩的位置。通常潜孔锤钻进转速要求在 $30 \sim 50 \text{ r/min}^{[16]}$,在钻进施工中采用钻机的 I 速 (43 r/min)。

2.2.3 风量

风量的大小与冲击器的耗气量、井内环空面积、钻进深度及复杂井况相关,需满足上返风速 $20 \sim 30 \text{ m/s}$ 的要求,风量越大井底越清洁,重复破碎的机率越小,钻进效率越高。

风量和风压的确定需综合考虑钻具组合、井径、井深及地层涌水等因素。在实际操作中,先算得参考值,再根据现场情况确定。

$$Q = 60k_1k_2(D^2 - d^2)\pi v/4$$

式中: Q ——风量, m^3/min ; k_1 ——孔深修正系数,随着孔深增加,环状间隙压力损失增大,导致流量减小,一般 $100 \sim 200 \text{ m}$ 时取 $1.05 \sim 1.1$, $200 \sim 500 \text{ m}$ 时取 $1.1 \sim 1.25$, $500 \sim 1000 \text{ m}$ 时取 $1.25 \sim 1.5$, 1000 m 以上时取 1.5 ; k_2 ——孔内有涌水时的风量增加系数,与涌水量有关,中小涌水时取 1.5 ; D ——钻孔直径, m ; d ——钻杆外径, m ; v ——上返风速,深井取 $20 \sim 30 \text{ m/s}$ 。

正常情况下,上返风速取 $20 \sim 30 \text{ m/s}$ 即可满足钻进要求;岩溶发育碳酸岩地层溶蚀裂隙发育、富水性,潜孔锤钻进井内常遇涌水、漏风、超径等复杂井况。供气量除满足井径、井深的要求外,还应有一定余量 (一般超 30% 以上)。

2.2.4 风压

高压空气为潜孔冲击器冲击做功及克服空气排渣上返的阻力提供动力,同时须克服管道压力损失、

孔内压力降、潜孔锤压降、井内液柱压力等;风压计算公式:

$$P = Q_2L + P_m + P_c + P_s$$

式中: P ——风压, MPa ; Q_2 ——每米干孔的压力降,一般为 0.0015 MPa/m ; L ——钻杆柱长度, m ; P_m ——管道压力损失,取 $0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$; P_c ——潜孔锤压降, MPa ; P_s ——钻孔内水柱压力。

钻进中涌水、井内液柱压力增加致钻进中风压增大 $0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$ (现场试验记录)。钻井中需根据井径、冲击器性能参数及井内涌水、漏风、超径等情况匹配空压机和增压机,提高钻进效率和经济效率。碳酸岩地层深井空气潜孔锤钻进参数如表 2。

表 2 碳酸岩地层深井空气潜孔锤钻进参数

井段/m	井径/mm	钻压/kN	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	供气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	供气压 力/MPa
0 ~ 200	406	20 ~ 25	43	60.3 ~ 93.7	1.4 ~ 1.8
0 ~ 400	315/320	20 ~ 25	43	60.5 ~ 93.6	1.6 ~ 2.2
400 ~ 800	315/320	20 ~ 25	43	76.4 ~ 114.6	1.8 ~ 2.3
800 ~ 2000	216/220	18 ~ 20	43	52.4 ~ 92.7	2.5 ~ 7.3

3 钻井设备配置及组合

3.1 钻井设备配置原则

在原地热钻井设备的基础上,增添空气潜孔锤钻进用相关设备,主要包括:大功率空压机、增压机及高压管线、泡沫泵、注油泵等。

3.2 潜孔锤钻进设备配置及组合

地热井井径大、深度大及碳酸岩地层岩溶发育,钻进涌水、漏风将消耗较多的风能。钻进的供气量除满足井径、井深的要求外,还应有一定余量 (一般超 30% 以上),以满足涌水、漏风、超径等复杂井况的要求。单台空压机供风量不能满足要求,空压机配置组合为采用多台空压机联动 (并列) 供气,井内涌水液柱压力高及钻进深度大所需风压超过空压机供气压力时需增压机增压。设备组合见表 3。

4 现场试验

4.1 试验井情况

在 4 口地热深井的碳酸岩地层进行了空气潜孔锤钻进试验,钻井试验地层有大冶组、娄山关组、高台组、清虚洞组等,岩性主要为灰岩和白云岩,试验井直径为 $315 \sim 406 \text{ mm}$,钻进中井内涌水大钻进困难或地层变为碎屑地层 (未列入本文),在碳酸岩地层最大试验井深 499.3 m 、最大涌水量超 $167 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

表 3 深井潜孔锤钻井设备组合

设备名称	规格/型号	井径/mm	井深/m	数量/台	备注
空压机	英格索兰 1070/1170; 寿力 1070/1400	406	200	4~5	井内涌水、空压机压
		315/320	≤400	3	力不足时,
		315/320	400~800	4	增压机增
		216/220	≤800	2	压
		216/220	800~1100	3	
		216/220	>1100	3~4	X台增压机
增压机	视增压机的能力				
泡沫泵	排量 15~30L/min	附属设备,连接地面高压管汇			注泡沫液
注油泵	可调式				注油润滑

受风量及井内涌水影响,机械钻速为 21.6~1.89 m/h。钻进试验井径、地层及钻进情况见表 4。

4.2 施工注意事项

在岩溶发育的碳酸盐岩地层中进行空气潜孔锤钻进施工时,为提高钻进效率和确保钻井安全,应注意以下事项。

(1)应有专人观察空压机压力,在井底积渣过多导致气压异常升高时,及时提醒司钻停钻或上提排渣,避免由此引发复杂井况发生。

(2)有专人观测出渣口返渣情况,出渣差时

表 4 试验井段地层及空气潜孔锤钻进情况

试验井名	地层岩性	井段/m	井径/mm	风量/(m ³ ·min ⁻¹)	风速/(m·s ⁻¹)	风压/MPa	钻速/(m·h ⁻¹)	空气潜孔锤钻进情况
贵安 CK1	大冶组灰岩夹页岩	104.65~428.22	315	76.4	19.5	1.6~2.2	20.1~15.6	开始无灰尘大,井口注水除尘,涌水量随井深增至 20 m ³ /h,钻速随井深、涌水量增加而降低;至 400 m 井口风量偏小,增大供风量;发生 3 次钻具内附着物堵塞潜孔锤而起钻检修
		428.22~499.3	315	114.6	29.2	1.8~2.3	18.8~16.2	
毕节 CK2	娄山关白云岩含硅质	11.97~30.36; 63.01~88.02	320	60.3	14.8	1.4~1.6	21.6~10.84	无水时灰尘大,井口注水除灰,涌水量增 30~40 m ³ /h,钻速随涌水量增加而降低,下管固结隔水、换径
	娄山关白云岩含硅质	88.75~147.55	315	60.6	15.4	1.7~1.9	13.6~2.73	涌水量随井深增加增大,至 163.26 m 涌水量>167 m ³ /h,钻速降为 1.89 m/h,投水泥固结;后井深增加
	高台组白云岩	147.55~174.11	315	93.6	23.9	1.7~2.1	15.6~1.89	涌水量从 12.5 m ³ /h 增至大于 54 m ³ /h,钻速降低、成本高(超 2600 元/m)而换气举钻进;随涌水增大、排渣困难,注泡沫排屑
	清虚洞白云岩含硅质/灰岩燧石	174.11~255.8	315	93.6	23.9	1.9~2.0	9.6~5.5	
凤岗永安 CK1	清虚洞白云岩含硅质/灰岩含燧石	11.95~114.44	406	66.2	9.4	1.6~1.8	13.64~6.08	无水时灰尘大,井口注水除灰;涌水量增至 10 m ³ /h,钻速随涌水量增加而降低;风量小、排屑差,注泡沫排渣;钻铤与井径(锤头)级差大、溶蚀段出现拐点、下管前通扫井壁
	清虚洞灰岩含燧石	114.44~140	315	66.2	16.9	1.7~1.8	15.85~14.24	涌水量增至 5 m ³ /h,钻速随井深、涌水量增加而降低;漏风、风量小、排屑差,注泡沫排屑
金沙安底		22.83~104.99	406	60.5	8.6	1.6~1.7	18.8~9.6	涌水量随井深增至 20 m ³ /h,钻速随井深、涌水量增加而降低;风量小、排屑差,注泡沫排渣
		104.99~186.76	406	63.4~93.7	9.05~13.37	1.4~1.7; 1.7~1.9	9.53~2.55	弱涌水(1~2 m ³ /h)泥包钻具;涌水量随井深逐增至 160 m ³ /h;风量小、排屑欠佳,注泡沫排屑、钻速猛降、水泥固结止水失败,下管封隔
	高台组白云岩	186.76~296.56	315	60.5	15.5	1.4~1.6	2.7~3.3	涌水量 10~40 m ³ /h,空压机故障,风量不同,钻速变化大,排渣欠佳,注泡沫排屑遇溶蚀水量突增至 150 m ³ /h,钻速猛降、换工艺
				90.8	23.3	1.7~1.8	10.5~5.2	

及时采取措施排渣,确保井内清洁。

(3)有条件时尽可能采取大供风量钻进以提高钻进效率。

(4)多空压机联动供风,空压机压力应匹配一致,避免弱压力空压机过载“假工作”。

(5)涌水量超 150 m³/h、钻速低于 3 m/h 时,空气潜孔锤钻进工艺经济性差,应更换其它适宜的钻进工艺。

4.3 钻遇复杂情况及技术措施

(1)无水地层灰尘大;毕节 CK2 井开始钻进时

灰尘大,在井口装置安设注水除尘导屑,在井口密封导屑屑置^[18]、下部井管上焊接短管与泵连接,注水除尘(注水量 8~10 m³/h),后钻进中无灰尘。注水量控制在排渣管口无尘、无粘稠物排出。

(2)大径岩溶段井眼轨迹异常弯曲:凤岗永安 CK1 井,在 Ø406 mm 大井径段(Ø406 mm 锤头+Ø203 mm 钻铤+Ø127 mm 钻杆),锤头与钻铤级差大,在 54~59 m 遇岩溶裂隙,井眼轨迹异常弯曲,该段钻后下 Ø339.7 mm 石油套管至 56 m 后下不去,起管修井后方下管。在金沙安底地热同井段、地层,

在钻铤上安设条形扶正稳定器,避免和解决了大径岩溶段井眼轨迹异常弯曲问题。

(3)入井钻具不清洁堵塞潜孔锤:在贵安 CK1 井发生 3 次钻具内附着物堵塞潜孔锤而起钻检修,在后面钻井中认真检查清洁入井钻具有效避免和防止钻具内的附着物掉入堵塞冲击器^[19]。

(4)减压钻进:钻遇溶蚀裂隙发育带、软弱互层带减压钻进,避免井斜。

(5)弱涌水地层泥包:金沙安底钻井中开钻遇弱涌水(涌水 $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{h}$),钻粉粘抱团吸附在钻头上形成泥包,排屑困难、气压升高;注水(注水量 $5 \sim 8 \text{ m}^3/\text{h}$)稀释排除。

(6)掉块卡钻:风岗永安 CK1 井、金沙安底钻遇岩溶带,井壁掉块堆积卡钻、提钻阻力大,后采取在短提升探掉块即卸风加杆前应上提钻具 $3 \sim 5 \text{ m}$,查探有无掉块,提钻时无阻力方可加杆钻进;如有阻力,需解除后加杆钻进。

(7)大涌水、岩溶带排屑困难:在几口地热井钻

进中均超径、裂隙漏风、地层涌水、湿润钻粉粘附井壁形成泥环等复杂情况导致排屑困难时,从送风管汇注入泡沫溶液采取注泡沫排屑,利用泡沫液的强携带能力及瞬间释放形成井喷将钻粉(渣)排出^[20-22],效果较好。

(8)大涌水或破碎地层钻进困难、风险大:在几口地热井钻进中均遇大涌水或掉块严重的破碎地层,影响井内安全或钻速低(小于 3 m/h)。止水无效时,换工艺钻进(及时起钻换泥浆护壁或气举反循环工艺钻进)。

4.4 试验效果分析

4.4.1 钻进效率分析

表 5 为不同地层岩性、井况、井径下空气潜孔锤与牙轮正循环钻井效率统计。牙轮正循环钻速为同井或井径岩性相同井的数据;空气潜孔锤钻速为钻井的实际数据,因地层岩性及井内涌水大小不同钻速差异较大。

表 5 空气潜孔锤钻进工艺和牙轮正循环钻进工艺钻进效率对比

试验井名	地 层 岩 性	井段/m	井径/ mm	空气潜孔锤 钻进时效/m	牙轮正循环 钻进时效/m	钻速 倍数	井内情况
贵安 CK1	大冶组灰岩夹页岩	104.65 ~ 499.3	315	18.10		22.6	涌水量 $5 \sim 20 \text{ m}^3/\text{h}$
		499.3 ~ 659.25	311		0.80		泥浆堵漏后微漏
毕节 CK2	娄山关白云岩含硅质	11.97 ~ 30.36	320/ 311	18.78		31.5	
		30.6 ~ 63.01			0.60		堵漏后微漏
		63.01 ~ 88.02		12.63		21.0	
	娄山关白云岩含硅质	88.75 ~ 147.55	315	9.26		13.2	涌水量 $10 \sim 150 \text{ m}^3/\text{h}$
	高台组白云岩	147.55 ~ 174.11	315	3.67		5.2	涌水量 $150 \sim 167 \text{ m}^3/\text{h}$
毕节 CK2	清虚洞白云岩含硅质/灰岩燧石	174.11 ~ 255.8	315	7.02		10.0	涌水量 $30 \sim 55 \text{ m}^3/\text{h}$
	清虚洞白云岩含硅质/灰岩燧石	255.8 ~ 323.73	311		0.70		微漏
风岗永安 CK1	清虚洞白云岩含硅质/灰岩含燧石	11.95 ~ 114.44	406	8.78		17.6	涌水量 $1 \sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$
	清虚洞灰岩含燧石、小涌水	114.44 ~ 140	315	15.88		31.4	涌水量 $1 \sim 5 \text{ m}^3/\text{h}$
遵义新铺 CK5	娄山关白云岩含硅质/灰岩含燧石	25 ~ 269.57	406		0.50		微漏
		269.57 ~ 860	311		0.60		微漏
		17.6 ~ 22.83	406		0.50		微漏
金沙安底	娄山关白云岩含硅质	22.83 ~ 104.99	406	11.70		23.4	涌水量 $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{h}$
		104.99 ~ 186.76	406	6.47		12.9	涌水量 $20 \sim 160 \text{ m}^3/\text{h}$
	高台组白云岩	186.76 ~ 296.56	315	6.36		10.6	涌水量 $10 \sim 40 \text{ m}^3/\text{h}$
		296.56 ~ 403.87	311		0.60		堵漏后微漏

从表 4、表 5 可以看出,岩溶发育的碳酸盐岩地层空气潜孔锤钻进效率受井内涌水量影响大:涌水量 $< 20 \text{ m}^3/\text{h}$ 的地层平均钻速为 $18.78 \sim 8.78 \text{ m/h}$,是牙轮正循环钻速的 $31.5 \sim 17.6$ 倍,涌水量 $< 20 \sim 50 \text{ m}^3/\text{h}$ 的地层平均钻速为 $12.63 \sim 6.36 \text{ m/h}$,是牙轮正循环钻速的 $21 \sim 10$ 倍,钻速、钻效随涌水量增大而降低。特大涌水(大于 $150 \text{ m}^3/\text{h}$)时钻速严重

下降至 1.89 m/h 、甚至无进尺,此时钻速、钻效低、成本高,不利于钻进效益,应根据下部地层稳定性更换相适宜的钻进工艺。

4.4.2 钻井经济效益分析

按设备使用费、市场材料及人员工资标准,空压机使用费 $1200.00 \text{ 元}/(\text{台} \cdot \text{天})$ 、柴油费 $8.00 \text{ 元}/\text{kg}$ (试验期内)、原设备机具使用费 $3000.00 \text{ 元}/\text{天}$ 、人

员工资 5000.00 元/天,计算空气潜孔锤钻进综合成本 本见表 6。

表 6 空气潜孔锤钻进综合成本

试验井	地层岩性	井段/m	井径/ mm	进尺/ m	钻井综合 成本/元	成本/ (元·m ⁻¹)	备 注
贵安 CK1	大冶组灰岩夹页岩	104.65 ~ 499.3	315	394.65	298355.40	756.00	外租设备、涌水量 5 ~ 20 m ³ /h
		11.97 ~ 30.36	320	18.39	11990.00	652.00	涌水量 30 ~ 40 m ³ /h
	娄山关白云岩含硅质	63.01 ~ 88.02	320	25.01	16556.60	662.00	涌水量 30 ~ 40 m ³ /h
毕节 CK2		88.75 ~ 147.55	315	58.80	32575.00	554.00	涌水量 10 ~ 150 m ³ /h
	高台组白云岩	147.55 ~ 174.11	315	26.56	69666.90	2623.00	涌水量 150 ~ 167 m ³ /h
	清虚洞白云岩含硅质/灰岩燧石	174.11 ~ 255.8	315	81.69	47788.70	585.00	涌水量 10 ~ 55 m ³ /h
凤岗永安	清虚洞白云岩含硅质/灰岩含燧石	11.95 ~ 114.44	406	104.39	62634.00	600.00	涌水量 1 ~ 10 m ³ /h
CK1	清虚洞灰岩含燧石、小涌水	114.44 ~ 140	315	25.56	14773.00	578.00	涌水量 1 ~ 5 m ³ /h

从表 6 统计数据可得,岩溶裂隙发育的碳酸盐岩地层空气潜孔锤钻进的综合成本受井内涌水量影响大;地层涌水量 <20 m³/h 的钻进综合成本为 578 ~ 662 元/m(贵安 CK1 外租设备费高),钻进成本随井深、井内涌量增加而升高,低于牙轮正循环钻进的综合成本 900 ~ 950 元/m。特大涌水(大于 150 m³/h)时钻进成本高达 2623 元/m,高于合同单位价 2100 ~ 2300 元/m,不经济。合理选择空气潜孔锤钻进井段可大幅降低钻井成本和提高钻井的经济效益。

5 结论

(1) 地热深井碳酸岩层采用空气潜孔锤钻进较常规工艺钻速提高 10 ~ 31.5 倍、钻进成本降低 288 ~ 323 元/m,有效提高了钻进效率、降低了钻进成本和缩短了钻井周期。

(2) 中小涌水的碳酸盐岩地层空气潜孔锤钻进技术的应用,大幅度提高了钻进效率。

(3) 满足要求的风量是岩溶发育碳酸盐岩地层空气潜孔锤快速钻进的前提。

(4) 安设扶正器、清洁入井钻具、岩溶裂隙段减压钻进、注泡沫排屑等合理有效的技术措施,是提高复杂碳酸盐岩地层空气潜孔锤钻进效率的保障。

复杂碳酸盐岩地层深井钻进施工中,合理的设备机具配置和有效技术措施是实现空气潜孔锤高速钻进的保障,该地层深井空气潜孔锤钻井技术有很大的研究和推广价值。

参考文献:

- [1] 王明章,王尚彦. 贵州省地热资源开发问题及对策建议[J]. 贵州地质,2007,24(1):9-12,16.
- [2] 毛健全. 贵州省地热资源特征、分布规律、开发现状及发展远景[C]//中国西部地热资源开发战略研究论文集. 北京:地震出版社,2001:29-36.

- [3] 卢予北. 空气潜孔锤在云南红层中快速钻井工艺应用研究[J]. 地质与勘探,2011,47(2):309-315.
- [4] 王虎,陈怡,段德培,等. 贵州省深部地热钻井现状与发展建议[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(2):45-47,52.
- [5] 董润平,胡忠义. RD20II型钻机及空气潜孔锤钻进施工中若干问题探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(12):50-53.
- [6] 黄彦彬,余立明,靳双喜. 河南省空气潜孔锤钻进技术的应用与发展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):39-43.
- [7] 郝文奎,宋宏兵,康亢,等. 多工艺空气钻进技术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.
- [8] 邓晓红,毕坤. 贵州省喀斯特地貌分布面积及分布特征[J]. 贵州地质,2004,21(3):191-193.
- [9] 李宗发. 贵州省喀斯特地貌分布[J]. 贵州地质,2011,28(3):177-181.
- [10] 侯树刚,舒尚文,李铁成,等. 空气钻井安全钻进特性分析[J]. 石油钻探技术(钻井与完井),2007,35(6):50-53.
- [11] 朱江,王萍,蔡利山,等. 空气钻井技术及其应用[J]. 钻采工艺(生产线上),2007,30(2):145-148.
- [12] 赵建勤,李子章,石绍云,等. 空气潜孔锤跟管钻进技术与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(7):55-59.
- [13] 张永勤,刘辉,陈修星. 复杂地层钻进技术的研究与应用[J]. 探矿工程,2001,(S1):159-165.
- [14] 张林,吉勒克补,赵华宣,等. 贯通式空气潜孔锤反循环钻进技术在岩溶地区水井钻探施工中的参数特征及应用[J]. 贵州地质,2013,30(4):302-308.
- [15] 陈怡. 空气潜孔锤钻进技术在援豫抗旱找水成井施工中的应用[J]. 贵州地质,2012,29(2):128-131.
- [16] 刘家荣,王建华,王文斌,等. 气动潜孔锤钻进技术若干问题[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(5):40-43.
- [17] 胡郁乐,张惠,张秋冬,等. 深部地热钻井与成井技术(第一版)[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,2013:172-174.
- [18] 赵江鹏,王四一,张晶,等. 顶驱车载钻机空气潜孔锤钻进用低压防喷装置的研置[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(7):38-41.
- [19] 杨富春. 空气潜孔锤在水源钻井中的应用[J]. 中国煤炭地质,2009,21(6):71-73.
- [20] 赵海平,金江峰,靳慧洁. 气动潜孔锤钻进技术在非洲地区供水井施工中的应用[J]. 地下水,2014,36(5):143-145.
- [21] 刘海波. 空气泡沫潜孔锤钻进技术在大直径基岩深井中的应用试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(5):31-34.
- [22] 汪栋. 在缺水干旱地区施工水井采用常规空气钻进工艺研究[J]. 西部探矿工程,2012,24(12):49-51.