

## 贵州省复杂地层地热深井钻探工艺

宋继伟<sup>1,2</sup>, 蒋国盛<sup>2</sup>, 苏宁<sup>3</sup>, 余立新<sup>3</sup>, 李奇龙<sup>3</sup>, 王虎<sup>4</sup>, 赵华宣<sup>5</sup>

- (1. 贵州省地质矿产勘查开发局 112 地质大队, 贵州安顺 561000; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074;  
3. 贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州贵阳 550008; 4. 贵州省地质矿产勘查开发局 111 地质大队, 贵州贵阳 550008;  
5. 贵州省地质矿产勘查开发局 114 地质大队, 贵州遵义 563000)

**[摘要]**贵州省地矿局组织实施了“贵州省地热深井钻探技术攻关”项目,研究了喀斯特地区复杂地层情况下地热深井钻探中螺杆钻探工艺和空气钻探工艺的适应性,攻克了两种工艺在该地区应用受地层特性限制的相关技术难题。螺杆马达平均寿命达 200 小时以上,螺杆钻探工艺较常规钻井工艺钻进机械钻速提高 2~3 倍;空气潜孔锤单井应用深度超过 1500m,空气潜孔锤钻探工艺较常规钻井工艺机械钻速提高 10~29.5 倍。同时研究了单井多工艺转换接力钻进技术,以及与上述工艺配套使用的钻井液体系。最终形成了一套适合贵州省地质条件地热深井钻探施工并能显著提高钻井效率和经济效益的组合工艺技术体系。该成果能将 1 口 2000m 以上地热深井施工周期由原来的 8~12 个月缩短至 4~6 个月,将单井平均施工成本由 450 万元降低至 410 万元以下。

**[关键词]** 喀斯特 地热钻井 螺杆钻进 空气钻进 钻井液 贵州

**[中图分类号]** TE242 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2018)05-14

Song Ji-wei, Jiang Guo-sheng, Su Ning, Yu Li-xin, Li Qi-long, Wang Hu, Zhao Hua-xuan. Drilling technology of deep geothermal wells for complex strata in Guizhou Province[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5): 1024-1037.

贵州省是典型的喀斯特地区,地层岩性多变、溶洞裂隙发育、机械破碎严重、水敏、软硬互层、地下水赋存及活动形式多样,地质情况极为复杂。在这种条件下开展钻探工作非常困难,特别是大口径的地热深井。长期以来,上述复杂的地层特性限制了很多先进钻进方法的应用,比如高泥质含量的碎屑岩地层、破碎漏失严重地层等限制了螺杆钻探工艺的应用;大溶洞裂隙、大水量高背压等限制了空气潜孔锤工艺的应用。

因此贵州省地热深井施工核心工艺仍是常规的牙轮正循环回转钻进,钻头一般选用三牙轮钻头。常规牙轮钻进长期作为贵州地热深井的主要钻进方法,是基于牙轮钻头适用范围广,从软地层到硬岩均可钻进,而且该钻进方法工艺技术非常成熟的特点。但牙轮钻进是从油气钻井发展起来的,发展和演化也主要针对油气地层,其碎岩机理是依靠合金球齿

压裂剪切破坏岩石为主,贵州省地热深井钻探涉及的地层普遍比油气地层偏硬 2~3 级,这就决定了牙轮钻进的碎岩方式在贵州地层钻速相对很低。统计显示,在贵州省施工 1 口 2000m 以上的地热深井一般需要 1 年左右,而且成本高昂,平均单井直接成本在 450~500 万。近年来,贵州省编制了《贵州省地下热水勘查开发利用专项规划》,提出了建设温泉省、公园省的战略目标,实现县县有温泉,地热钻井工作量巨大(耿莉萍,1998;毛健全,2001;吴景华等,2003)。落后的钻井工艺已经不能满足当前贵州地热开发的需求(王虎等,2015)。重视地热深井新型设备和新工艺方法的引进研究,尽快提升贵州地热深井的钻探施工水平迫在眉睫(曾铁军,2000;王明章等,2007;许刘万等,2013)。

基于上述背景,贵州省地矿局从 2014 年初开始实施“贵州省地热深井钻探技术攻关”项目,并于

[收稿日期] 2017-04-15; [改回日期] 2018-03-15; [责任编辑] 陈伟军。

[基金项目] 贵州省科技计划项目“多分支定向井钻进技术在贵州省煤系地层‘三气共采’中的研究及应用”(编号:黔科合支撑[2018]2195)资助。

[第一作者] 宋继伟(1982年-),男,博士研究生,探矿高级工程师,长期从事钻井工程工作。E-mail:343219784@qq.com。

2015年以此申报获取贵州省社会发展科技攻关项目“贵州复杂地层深井钻探工艺应用研究”。课题主要研究了螺杆钻井工艺、空气钻井工艺、多工艺转换接力钻进技术、钻井液技术等核心内容。自2015年1月至2016年9月,共进行19口钻井的现场应用研究,试验井段总进尺超过15000m,其中螺杆钻井工艺试验进尺9000余米,空气钻井工艺试验进尺6000余米,最终形成了一套适合贵州省地质条件地热深井钻探施工并能显著提高钻井效率和经济效益的组合工艺技术体系。

## 1 螺杆钻井工艺研究

通过大量资料搜集整理和实地调研,了解螺杆钻具的结构、工作原理及其国内外研究现状;从理论和实际两方面研究了螺杆钻具的工作特性;总结了该工艺钻具优化选型原则和常用型号;在总结贵州省地热钻井常用井身结构的基础上,提出了螺杆钻井工艺合理钻具组合方式;为螺杆钻井工艺进行了合理设备配套;总结了螺杆钻井工艺钻进参数的确定方法;在5口钻井中进行了螺杆钻井工艺现场应用研究,分析了贵州省复杂地层中钻进时钻遇的复

杂井况,并总结出了解决方案;对螺杆钻井工艺的现场使用效果进行了分析,表明该钻井工艺钻进效率是常规牙轮钻井工艺的2~3倍,并可有效降低钻井施工成本,对提升贵州省深井钻探技术有着积极意义;最后总结了螺杆钻井工艺适用地层情况。

螺杆钻井工艺的研究意义在于:螺杆马达能为PDC钻头提供高转速。钻直井的常规技术是牙轮正循环钻进,但是对于比油气地层坚硬很多的贵州省地层,这种钻进方法合金球齿压入剪切困难,钻速极为缓慢。使用螺杆马达+PDC钻头工艺,将螺杆马达的高转速和金刚石聚晶复合片坚硬的优点相结合,能充分发挥金刚石的研磨切削效果,达到类似于小口径岩心钻探的高速钻进效果,大幅度提高钻进速度,实现高速钻直井。

### 1.1 螺杆马达选型

通过螺杆马达理论与实际工作特性对比,依据螺杆外径、螺杆马达转子头数、马达级数、高温螺杆、中空转子螺杆钻具等几方面优选原则,结合考虑钻井液中是否会用到可能影响橡胶寿命的材料或地层中是否可能有油质和气体进入钻井液且无法及时排出的情况而需做特殊处理因素,最终确定了最适于贵州复杂地层地热钻进的螺杆马达型号(表1)。

表1 贵州省地热深井钻进螺杆马达适用型号  
Table 1 Types of screw motors applicable for drilling geothermal deep wells in Guizhou Province

钻具型号	外径尺寸 (mm)	钻头尺寸 (mm)	头数	级数	排量 (L/min)	转速 (r/min)	工作压降 (MPa)	输出扭矩 (N·m)	工作钻 压(kN)	最大钻 压(kN)	输出扭 矩(kW)
5LZ120 × 7.0L-4	120	149~200	5:6	4	694~1388	140~278	3.2	2160	49	100	71
7LZ120 × 7.0L-4			7:8								
5LZ172 × 7.0L-4	172	213~251	5:6	4	947~1894	78~154	3.2	4160	100	170	126
5LZ172 × 7.0L-5			5								
7LZ172 × 7.0L-5			7:8	1183~2366	84~168	7176	150				
5LZ203 × 7.0L-4	203	251~311	5:6	4	1113~2225	79~158	3.2	5022	155	250	99
5LZ203 × 7.0L-5			5								
7LZ203 × 7.0L-5			7:8	1230~2460	75~150	7220	143				

## 1.2 螺杆钻井工艺

### 1.2.1 井身结构设计

井身结构应根据钻孔深度和直径、地层特性、填砾厚度、钻进方法、成井结构及地热井勘察施工中的

新技术应用,并考虑到施工设备的装备情况,按照“安全、合理、经济、实用”的原则设计(卢予北,2004;胡郁乐等,2013)。贵州省地热深井一般要求终孔孔径大于150mm,且考虑到贵州省地质条件复

杂,在井身结构设计时还应留有余地,因此试验井井身结构采用四开或以上结构设计。表2为贵州省地热深井常用井身结构。

表2 贵州省地热深井井身结构  
Table 2 Sizes of geothermal wells and casing's size and material in Guizhou Province

钻进	钻孔直径(mm)	套管外径(mm)	套管材质
一开	425 或 395	377 或 340	无缝钢管
二开	311	245	API 套管
三开	216	178	API 套管
四开	152	裸眼或 127	API 套管筛管

### 1.2.2 钻井设备

#### (1) 钻机

贵州省深部地热钻井普遍采用水源钻机,最初使用的是立轴钻机和转盘钻机。由于立轴钻机动力小、普通标配的泥浆泵排量偏小,难以满足深部地热钻井的要求,现在基本上都使用转盘钻机。但转盘钻机也存在其缺陷,如导向和定向性能相对较差,转盘扭矩大,影响了转速的提高等。目前贵州省常用的深部地热钻井钻机有 RPS 系列、SPS 系列等几个系列的类型,为了弥补转盘钻机的缺陷,各单位开始引进顶驱钻机等更为先进的钻机。本次进行螺杆钻井工艺试验的钻机为 2 台水源钻机(RPS-3000 型钻机和 SPS-2600 型钻机)和 1 台宝峨 RB-T100 型全液压多功能车载钻机。

#### (2) 泥浆泵

泥浆泵为钻井液循环提供动力,是钻井的心脏。泥浆泵的选择对保证钻井效率和提高施工效益有着重要意义:泥浆泵泵量过小、泵压太低,无法满足钻进需要;反之,泥浆泵泵量过大,泵压过高,会使钻井液循环管线压力过高,造成能源浪费。

螺杆钻具对泵量、泵压要求相对较高,而常规钻井液正循环钻进无需过高泵压、泵量。为了满足螺杆钻井工艺对泵压、泵量的需求,同时能在常规钻井液正循环钻进时节约施工成本,试验井均配置 2 台泥浆泵,分别为大泵量、高泵压的 3NB-1300 型泥浆泵和相对泵压、泵量较小的 3NB-500 型泥浆泵。

#### (3) 固相控制和除气系统

钻井过程中,岩屑不断进入钻井液,使得钻井液的比重、粘度、含砂量等性能发生很大变化,特别是使用螺杆钻具时,混入钻井液中的固相颗粒会极大减小螺杆的寿命,一些有害固相还会提高钻井液的滤失量,影响孔壁稳定性,有时还会发生泥包钻头,

导致钻井效率急剧较小。贵州省煤层和泥页岩地层分布广泛,部分地层中含有大量的易燃气体(即煤层气、页岩气)。这些气体进入钻井液后,一方面使钻井液密度减小,另一方面气体的气蚀作用也会减少螺杆寿命。为了使钻井液在整个钻进过程中保持低固相、优性能,保证孔内安全和施工效率,试验井均采用了五级固相控制和除气系统,即振动筛、除气器、除砂器、除泥器和离心机。

#### 1.2.3 钻具组合

贵州省地质条件复杂,易缩径、垮塌地层较多,为减少卡钻、埋钻等事故,一般不使用扶正器。为防斜保直,在钻具组合设计时,一般采用塔式钻具组合或钟摆钻具组合,且在钻井施工时,一般使用减压钻进,即钻头钻压小于钻铤悬重。

使用螺杆钻井工艺钻进时,必需给钻头一定的钻压,否则无法保证钻进效率。钻井开孔时,由于钻具少,重量轻,无法保证钻压要求,此时如使用螺杆钻井工艺钻进,钻进效率低,螺杆钻具空耗寿命,经济效益低下(吴景华等,1997)。因此,螺杆钻井工艺不适用于钻井开孔,一般该工艺用于二开及以后井段钻进(李奇龙,2014)。

钻具组合设计需要满足井身结构设计要求和本身钻进参数的要求。合理的螺杆钻井工艺钻具组合设计见表3。

表3 贵州地热深井螺杆钻井工艺钻具组合  
Table 3 Screw drilling tool assemble for deep geothermal wells in Guizhou Province

钻头直径(mm)	钻具组合
311	PDC 或牙轮钻头 + $\Phi 203$ mm 螺杆 + $\Phi 203$ mm 钻铤 + $\Phi 159$ mm 钻铤 + $\Phi 127$ mm 钻杆
216	PDC 或牙轮钻头 + $\Phi 172$ mm 螺杆 + $\Phi 159$ mm 钻铤 + $\Phi 127$ mm 钻杆
152	PDC 或牙轮钻头 + $\Phi 120$ mm 螺杆 + $\Phi 121$ mm 钻铤 + $\Phi 89$ mm 钻杆

#### 1.2.4 钻进参数

通过现场试验,总结螺杆钻井工艺推荐钻进参数范围见表4。在实际钻进参数设计时,应综合钻头、地层、地质情况等因素在推荐参数范围内确定。在调整钻进参数时,应遵循以下原则:

(1) 使用 PDC 钻头时,应适当减小钻压,增大排量;使用牙轮钻头时,应适当增大钻压。

(2) 钻遇破碎地层或裂隙发育地层时,应适当减小钻压,以防止跳钻对钻头和钻具造成伤害。

(3) 为防止钻进时地层缩径或掉块等导致卡钻,钻井时应尽量开动磨盘或顶驱旋转钻具,同时注

意扭矩变化。

(4) 钻进粘土岩等相对较软地层时,应适当减小

钻压,以防止钻头吃入地层过多;钻进白云岩等相对较硬地层时,应适当增加钻压,保证钻头有效吃入地层。

表4 螺杆钻井工艺推荐钻进参数

Table 4 Recommended drilling parameters of screw drilling technology

钻头直径(mm)	螺杆型号	排量(L/min)	工作钻压(kN)	最大钻压(kN)	磨盘或顶驱转速(r/min)
152	5LZ120 × 7.0L - 4	694 ~ 1388	49	100	20 ~ 40
	7LZ120 × 7.0L - 4	745 ~ 1489			
216	5LZ172 × 7.0L - 4	947 ~ 1894	100	170	
	5LZ172 × 7.0L - 5	1183 ~ 2366			
311	7LZ172 × 7.0L - 5	1113 ~ 2225	155	250	
	5LZ203 × 7.0L - 4	1113 ~ 2225			
	5LZ203 × 7.0L - 5	1230 ~ 2460			

1.3 复杂地层应用及适用地层总结

项目在贵州省遵义县三合镇青龙寺地下热矿水勘查钻孔、贵州省安龙县招提风景区地热水资源勘查勘探钻孔、贵州省沿河县洪滩镇地热勘探孔、贵州省安龙金州农耕地热水资源勘查勘探钻孔、贵州省沿河县洪渡镇风情小镇地热水资源勘查勘探钻孔5口钻井施工中进行了螺杆钻井工艺现场应用试验研究,试验井段直径152mm~311mm,试验井总进尺10824.26m,其中螺杆钻井工艺试验进尺8005.95m。详细研究了水敏地层、含石膏地层、松

散地层、钻井液水泥侵事故、软硬夹层和碎裂地层、低压漏失地层、坚硬地层等复杂井况螺杆钻井工艺的适用特点,针对应用过程中的疑难问题分别形成了针对性的处理措施。

总结出了贵州省螺杆钻井工艺适用的地层规律:根据试验情况,使用螺杆钻井工艺时,配套使用PDC钻头钻进效率最高,地层较复杂时应使用高速牙轮钻头钻进,也有一些地层不适合螺杆钻井工艺钻进,表5为螺杆钻井工艺适用地层统计情况。

表5 螺杆钻井工艺适用地层统计

Table 5 Stratum statistics suitable for screw drilling technology

适用情况	地层岩性	备注
适用地层	白云岩、灰岩、泥质白云岩、泥质灰岩、泥岩、页岩、粘土岩	中硬及以下硬度完整地层,地层泥质高时应使用抑制性钻井液
螺杆 + 牙轮钻头	白云岩、灰岩、泥质白云岩、泥质灰岩、泥岩、页岩、粘土岩、煤层	裂隙发育地层,软弱夹层
不适用地层	破碎带、溶洞等强漏失地层,燧石、石英砂岩、花岗岩等硬岩	开孔不宜使用

1.4 螺杆钻井工艺的钻进效果

表6为5口试验井螺杆钻井工艺和常规牙轮钻井工艺平均机械钻速对比图,从表中可以看出,螺杆

钻具机械钻速是常规牙轮钻井工艺的2~3倍,说明螺杆钻井工艺的引进可以大幅提高贵州省深井钻探钻进效率。

表6 螺杆钻井工艺与常规牙轮钻井工艺机械钻速对比

Table 6 Comparison of mechanical drilling rates between screw drilling technology and conventional cone drilling technology

试验井号	机械钻速(m/h)		对比(倍数)
	螺杆钻井工艺	常规牙轮钻井工艺	
遵义三合	2.98	1.40	2.13
安龙招提	1.98	0.70	2.83
安龙金州	3.36	1.22	2.75
沿河洪滩	2.28	1.14	2.00
沿河洪渡	2.58	1.11	2.32

在使用螺杆钻井工艺进行施工时,应根据不同钻井工艺采取不同技术措施,使用优质钻井液,充分利用固控系统,合理使用钻具组合和钻井参数,以取得最大经济效率和钻进效率。

## 2 空气钻井工艺研究

调查了空气潜孔锤的结构、工作原理以及空气潜孔锤钻井工艺的国内外研究现状;研究了贵州省复杂地层空气潜孔锤优化选型原则及钻具组合;对空气潜孔锤钻井工艺进行了设备配套;研究了空气潜孔锤钻井工艺钻进参数的确定方法;通过现场应用研究,总结了复杂地层情况下复杂井况的原因及处理措施;通过分析空气潜孔锤钻井工艺的应用效果,证明该工艺能大幅提高贵州深井钻探施工效率,缩短钻井工期,降低钻进成本。

空气钻井工艺的研究意义在于:贵州省地层特点决定了常规钻进方式存在很多缺陷,一是岩石较坚硬,使用常规牙轮钻进时,浅部地层钻压不足,钻速极低,即使钻深满足钻压要求后,牙轮钻头的碎岩方式也导致钻速较为缓慢,而空气潜孔锤钻进主要以高频冲击破碎方式为主,非常适用于硬岩钻进,能产生常规钻进方式十倍以上的钻进速度;二是贵州很多地区地表严重缺水,甚至直接无钻探用水,常规钻进方式无法实施,而空气潜孔锤是以压缩空气作为动力和传输介质,可以有效解决该难题;除上述两方面外,空气潜孔锤钻进还具有低钻压、低扭矩、钻进安全、井身垂直度好等诸多优点。

贵州省是典型的喀斯特地层,应用空气潜孔锤存在冲击器受裂隙溶洞漏风、地层富水水头高背压大、碎屑岩井壁不稳定因素影响工作困难或不能使用,以及深部钻进时经济成本不合理等突出难题。通过不同设备、机具和参数的优化组合,能有效解决或者缓解上述疑难,课题本部分工作即重点研究该内容。将空气潜孔锤在多口地热井不同地层情况进行试用,解决出现的问题,确定最优的技术方案,最终形成适合贵州省复杂地层地热深井的空气潜孔锤钻井工艺体系。

### 2.1 空气潜孔锤选型

#### 2.1.1 结构选型

国内生产空气潜孔锤已经非常成熟,不同厂家空气潜孔锤种类繁多。贵州省地热井深度大和地层结构复杂,钻进中多遇溶蚀裂隙发育、软硬不均及软弱夹层多等复杂岩性,钻进井况复杂及钻进压力难以及时调整,锤头断脱事故难以避免及

处理难度大,为此,应选择适应性强的带防脱套的潜孔锤。

#### 2.1.2 锤齿选型

锤齿目前的产品中主要有楔形、锥形、半球形等类型(吴焯等,2013)。经过试验摸索,贵州省地热深井空气潜孔锤钻进最适合的锤齿类型为半球形。贵州省地热井地层结构复杂、岩性多变、裂隙溶蚀发育、软硬不均及软弱夹层多的特点,优先选用半球形齿锤头,能有效提高钻头使用寿命以获取最佳钻进综合效益。

#### 2.1.3 锤头选型

锤头形状按底唇面形状不同,可分为凸底型、凹底型、平底型、扩孔型等。经过试验摸索,贵州省地热深井空气潜孔锤钻进最适合的锤头形状为凹底形。这种类型锤头底部呈凹面,对上部钻具振动影响较小,井眼偏斜较小,锤头寿命长,钻进速度快,可适应地层广,适用于软至坚硬岩层,非常符合贵州省地层的特点,综合效益最好。

## 2.2 空气钻井工艺

### 2.2.1 钻井设备

设备配套包括空气潜孔锤钻进主要设备及辅助设备。贵州地热深井井径大、深度大、地层结构复杂,钻进中所需风量大、风压高,供气设备的配置需满足井径、深度及复杂地质条件的钻进要求。风量和风压应综合井径、井深及地层涌水、软弱夹层超径带来的能量损耗等因素。供气量除满足井径、井深要求外,还应有余量(一般超30%以上),空压机配置采用多台空压机联动(并列)供气(匹配空压机压力应尽量一致以防低压力的空压机卸载不送风而降低实际供风量,赵岩等,2014)。在空压机的压力不能满足钻进要求时使用增压机补偿增压。同时为满足不同空气钻进工艺及机具维护保养要求需配置相应的辅助设备(冯涛等,2009;赵华宣等,2016)。贵州复杂地层深井空气潜孔锤设备配套见表7。

### 2.2.2 钻具组合

地热井空气潜孔锤钻进工艺主要使用在 $\Phi 216\text{mm} \sim \Phi 406\text{mm}$ 井段(卢予北,2011)。贵州省复杂地层地热深井空气潜孔锤钻进钻具组合见表8。空气潜孔锤钻进中,井内环空面积、上返风速与使用钻杆尺寸相关,钻杆尺寸大、井内环空面积小、上返风速增大、排屑效果增强;管道压力损失与钻杆尺寸相关,钻杆尺寸大、管道损失小、减小气压沿程损失、增强钻进效果。因此,在钻杆应尽可能使用较大尺寸的钻杆。

表7 贵州复杂地层深井空气潜孔锤设备配套表  
Table 7 Air DTH hammer equipment of deep wells in complex strata of Guizhou Province

序号	井径(mm)	井深(m)	设备名称	规格/型号及性能	组合型式	备注
1	Φ406	200			4~5 台空压机	
2	Φ315/Φ320	≤400			3 台空压机	井内涌水、井深, 空压机压力不足时, 增压机增压
3	Φ315/Φ320	400~800	空压机	英格索兰: 1070/1170; 寿力: 1070/1400 等	4 台空压机	
4	Φ216/Φ220	≤800			2 台空压机	
5	Φ216/Φ220	800~1100			3 台空压机	
6	Φ216/Φ220	>1100			增压机	视增压机的能力选择不同型号
7		附属设备	泡沫泵	排量: 15~50L/min; 压力高于气压 0.5~1.0MPa	连接地面高压管汇	雾化钻进 泡沫钻进
8			注油泵	可调式		注油润滑

表8 地热深井空气潜孔锤钻进钻具组合见表  
Table 8 Drilling tool assemble of air DTH hammer drilling for deep geothermal wells

序号	井径 mm	地层类别	钻具组合	备注
1	406	碳酸盐岩	Φ406 锤头 + TS12 型冲击器 + Φ203 钻铤(1 柱) + Φ406 扶正器 + Φ203 钻铤(1 柱) + Φ127 钻杆(1 根) + 单向阀(NC50) + Φ127 钻杆(若干) + 单向阀(NC50) + 主杆	1. 深度一般小于 200m; 2. 涌水, 单向阀减少排气时间、防井底余屑反窜堵塞潜孔锤; 3. 加扶正器导正, 防溶蚀裂隙带并斜。
		碎屑岩类 (泥页岩)	Φ406 锤头 + TS12 型冲击器 + Φ203 钻铤(1 柱) + Φ406 扶正器 + Φ203 钻铤(1 柱) + Φ127 钻杆(1 根) + 旁通阀(NC50) + Φ127 钻杆(若干) + 单向阀(NC50) + Φ127 钻杆(若干) + 单向阀(NC50) + 主杆	1. 加单向阀减少排气时间、防井底余屑反窜堵塞潜孔锤; 2. 加旁通阀, 过盈气量从旁通阀上返减少对潜孔锤的损坏和增加排屑效果。
2	320/ 315	碳酸盐岩	Φ320/315 锤头 + TS12 型冲击器 + Φ203 钻铤(2 柱) + Φ127 钻杆(1 根) + 旁通阀(NC50) + Φ127 钻杆(1 根) + 单向阀(NC50) + Φ127 钻杆(若干) + Φ127 钻杆(若干) + 单向阀(NC50) + 主杆	1. 井内涌水或井深大时, 加单向阀减少排气时间、防井底余屑反窜堵塞潜孔锤, 150~200m 一个; 2. 加旁通阀, 过盈气量从旁通阀上返减少对潜孔锤的损坏和增加排屑效果, 150~200m 加一个或加在排屑困难段下部。
		碎屑岩类 (泥页岩)	Φ320/315 锤头 + TS12 型冲击器 + Φ203 钻铤(2 柱) + Φ127 钻杆(1 根) + 旁通阀(NC50) + Φ127 钻杆(1 根) + 单向阀(NC50) + Φ127 钻杆(若干) + 旁通阀(NC50) + Φ127 钻杆(若干) + 单向阀(NC50) + 主杆	
3	220/ 216	碳酸盐岩	Φ220/216 锤头 + TS8 型冲击器 + Φ165 钻铤(4 柱) + Φ89 钻杆(1 根) + 旁通阀(NC38) + Φ89 钻杆(1 根) + 单向阀(NC38) + Φ89 钻杆(若干) + 旁通阀 + Φ89 钻杆(若干) + 单向阀(NC38) + 主杆	1. 每 150~200m 一个单向阀减少排气时间、防井底余屑反窜堵塞潜孔锤; 2. 加旁通阀, 过盈气量从旁通阀上返减少对潜孔锤的损坏和增加排屑效果, 150~200m 一个或加在排屑困难段下部。
		碎屑岩类 (泥页岩)	Φ220/216 锤头 + TS8 型冲击器 + Φ165 钻铤(4 柱) + Φ89 钻杆(1 根) + 旁通阀(NC38) + Φ89 钻杆(1 根) + 单向阀(NC38) + Φ89 钻杆(若干) + 旁通阀(NC50) + Φ127 钻杆(若干) + 单向阀(NC38) + 主杆	

2.2.3 钻进参数

(1) 钻压确定

钻进作业中, 需根据钻进地层岩性、岩石节理裂隙发育及破碎程度、软硬互层及软弱夹层等井内实际情况, 选取适宜钻压值。对贵州复杂地层深井空气潜孔锤钻进钻孔的统计分析和研究表明: 钻压与

钻头的直径有关, 孔径越大、钻压越高, 孔径越小、钻压越低; 钻压与岩石的性质及完整性有关, 同一岩性完整岩体的钻压比溶蚀、裂隙发育带及软弱层的钻压高 2kN~4kN。贵州复杂地层深井空气潜孔锤钻进钻压推荐值见表 9。

表9 贵州复杂地层地热深井空气潜孔锤钻进钻压推荐值  
Table 9 Recommended drilling pressure of air DTH hammer for drilling deep geothermal wells in complex strata of Guizhou Province

井径 (锤头) mm	地层岩性	完整岩 体钻压 (kN)	溶蚀、软弱层 钻压(kN)	井径 (锤头) (mm)	地层岩性	完整岩体 钻压(kN)	溶蚀、软弱层 钻压(kN)
406	白云岩	26~30	22~26	220	白云岩	16~18	14~16
	石灰岩	28~32	24~28		石灰岩	17~19	15~17
	砂砾岩	32~36	28~32		砂砾岩	18~20	16~18
	泥页岩	20~24	16~20		泥页岩	15~17	13~15
320	白云岩	22~23	19~21	216	白云岩	15~17	13~15
	石灰岩	24~26	21~23		石灰岩	16~18	14~16
	砂砾岩	26~29	23~26		砂砾岩	17~19	15~17
	泥页岩	18~21	15~18		泥页岩	14~16	12~14
315	白云岩	20~22	17~19	152	白云岩	9~11	7~9
	石灰岩	23~25	20~22		石灰岩	10~12	8~10
	砂砾岩	25~28	22~25		砂砾岩	12~14	10~12
	泥页岩	17~20	14~17		泥页岩	8~10	6~8

### (2) 转速确定

在深井空气潜孔锤钻进中,根据所钻地层岩性、岩石节理裂隙发育及破碎程度、软硬互层及软弱夹层等井内实际情况及钻井设备转速可调节性进行合理选取。钻机转速可调的转速按钻进地层软、硬情况选取如下:

- ①砂砾岩类的硬岩层 10r/min ~ 30r/min,溶蚀、裂隙发育带调低转速;
- ②白云岩、灰岩类的中硬岩层 20r/min ~ 40r/min,遇溶蚀、裂隙发育带调低转速;
- ③泥页岩类的软岩层 30r/min ~ 50r/min,软弱带调低转速;

④钻机转速不可控的转速用钻机的最低一档(一般为I档)。

### (3) 风量确定

空气潜孔锤钻进中利用环空上返气流进行洗孔和排除岩屑,岩屑在气流介质中因自身的粒度、密度和形状的不同而具有不同的自由悬浮速度,因此,钻孔环状空间内上返风速必须大于岩屑的悬浮速度。贵州省复杂地层地热深井空气潜孔锤钻进中常遇地层涌水、溶蚀裂隙漏风、超径等复杂井况,钻进中应根据井径、井深和所钻地层岩性及可能出现的复杂井况选取适应风量。通过计算与试验,贵州省地热深井空气潜孔锤钻进常用井段所需风量见表10。

表10 地热深井空气潜孔锤钻进常用井段所需风量表  
Table 10 Air flows of conventional well section of air DTH hammer drilling for deep geothermal wells

井径 (mm)	钻杆 (mm)	上返风速 20m/s 所需风量(m <sup>3</sup> /min)						
		井深(m)						
		200	400	600	800	1000	1500	2000
Φ406	Φ89	162.7	177.5	-	-	-	-	-
	Φ127	154.2	168.2	-	-	-	-	-
Φ320	Φ89	97.9	106.9	115.8	124.7	133.6	-	-
	Φ127	89.4	97.6	105.7	113.8	122.0	-	-
Φ315	Φ89	94.7	103.3	111.9	120.5	129.1	-	-
	Φ127	86.1	94.0	101.8	109.6	117.5	-	-
Φ220	Φ89	42.0	45.8	49.6	53.4	57.2	67.1	71.3
	Φ127			39.5	42.6	45.6	53.5	56.9

续表 10  
Continued Table 10

		上返风速 20m/s 所需风量(m <sup>3</sup> /min)						
Φ216	Φ89	47.5	51.1	54.8	64.2	68.2		
	Φ127	37.4	40.3	43.2	50.7	53.8		
		上返风速 25m/s 所需风量(m <sup>3</sup> /min)						
井径 (mm)	钻杆 (mm)	井深(m)						
		200	400	600	800	1000	1500	2000
Φ406	Φ89	203.3	221.8	-	-	-	-	-
	Φ127	192.7	210.2	-	-	-	-	-
Φ320	Φ89	122.4	133.6	144.7	155.8	167.0	-	-
	Φ127	111.8	122.0	132.1	142.3	152.5	-	-
Φ315	Φ89	118.3	129.1	139.8	150.6	161.3	-	-
	Φ127	107.7	117.5	127.3	137.1	146.8	-	-
Φ220	Φ89	-	-	62.0	66.8	71.5	76.3	81.1
	Φ127	-	-	49.4	53.2	57.0	60.8	64.6
Φ216	Φ89	-	-	59.3	63.9	68.5	73.0	77.6
	Φ127	-	-	46.8	50.3	53.9	57.5	61.1

注:表中风量值未考虑井内涌水( $k_2$ )及超径和裂隙漏风的影响,钻进中所需的风量应较表中值略大。

(4) 风压确定

贵州省复杂地层深井空气潜孔锤钻进,特别是溶蚀裂隙发育的碳酸盐岩地层,常遇地层大涌水。水柱压力大且随井深增加而增大,在钻进所需工作气压大于空压机的供气压力时,空压机过载而不送

风、潜孔锤不工作也不排屑;为补偿井内液柱压力及深井钻进的管内阻力,需增压机增压。通过计算与试验,确定贵州省地热深井空气潜孔锤钻进不同水文条件下的最低气压见表 11。

表 11 不同水文条件下空气潜孔锤钻进的最低气压表

Table 11 Lowest air pressures under different hydrological conditions of air DTH hammer drilling

水文条件	井深(m)	$P_1$ (MPa)	$P_m$ (MPa)	$P_{锤}$ (MPa)	$P_{水}$ (MPa)	$P$ (MPa)	水文条件	井深(m)	$P_1$ (MPa)	$P_m$ (MPa)	$P_{锤}$ (MPa)	$P_{水}$ (MPa)	$P$ (MPa)
无水地层	100	0.15	0.1	0.8	0	1.05	中涌水 - 动水位 取 1/3 井深	100	0.15	0.1	1.0	0.33	1.58
	200	0.3	0.1	0.8	0	1.2		200	0.3	0.1	1.0	0.67	2.07
	400	0.6	0.1	0.8	0	1.5		400	0.6	0.1	1.0	1.33	3.03
	600	0.9	0.1	0.8	0	1.8		600	0.9	0.1	1.0	2.0	4.0
	800	1.2	0.1	0.8	0	2.1		800	1.2	0.1	1.0	2.67	4.97
	1000	1.5	0.1	0.8	0	2.4		1000	1.5	0.1	1.0	3.33	5.93
	1200	1.8	0.1	0.8	0	2.7		1200	1.8	0.1	1.0	4.0	6.9
	1400	2.1	0.1	0.8	0	3.0		1400	2.1	0.1	1.0	4.67	7.87
	1600	2.4	0.1	0.8	0	3.3		1600	2.4	0.1	1.0	5.33	8.83
	1800	2.7	0.1	0.8	0	3.6		1800	2.7	0.1	1.0	6.0	9.8
2000	3.0	0.1	0.8	0	3.8	2000	3.0	0.1	1.0	6.67	10.77		

注:(1)表中的值以  $P_m=0.1\text{MPa}$ 、 $P_{锤}=0.8\text{MPa}$ (潜孔锤最低工作压力)取值计算;(2)中涌水地层,以动水位为 1/3 井深计算;(3)表中计算假定潜孔锤的工作压力是恒定的,实际中潜孔锤的工作压力是变化的,即潜孔锤的压力在其工作压力范围内是变动的;(4) $P_m$ 的大小与钻具内径及供气量大小相关。

2.3 复杂地层应用及适用地层总结

课题在 8 口地热井的不同地层岩性进行空气潜

孔锤钻进工艺研究,试验井径 Φ216 ~ Φ406mm、最大试验深度(带增压机:1507.21m、不带增压机:

1029.31m)、进尺 4211.12m,形成了贵州省代表性复杂地层“岩溶发育的碳酸盐岩地层空气潜孔锤钻进技术”和“碎屑岩层空气潜孔锤钻进技术”两大重点成果,总结出成套可行的适应贵州省钻井实际的解决落物堵塞、岩粉倒吸堵塞、落物阻卡、岩粉倒吸阻卡、泥环包裹、锤齿折断、卡埋钻、锤头折断、井眼弯曲等典型空气潜孔锤钻进事故的技术措施。

初步研究确定出空气潜孔锤钻井工艺在贵州省地层的适用性:空气潜孔锤钻进,锤头高频冲击破碎

岩石的过程中部分冲击能向井壁岩体扩散破坏周边岩体结构的整体性和完整性,钻进中高速上返气流对井壁软弱结构物冲刷(剥离)破坏岩体结构影响井壁稳定,循环介质为以空气为主的钻进液密度非常小(水密度的 1‰~2‰)缺乏对井壁平衡支撑功能,为此,空气潜孔锤钻进技术一般只适应于岩体结构较稳定的地层。结合贵州复杂地层结构及岩石特性,贵州地层对空气潜孔锤钻进工艺适应性见表 12。

表 12 空气潜孔锤钻进工艺贵州省地层适应表

Table 12 Formation adaptation of air DTH hammer drilling technology in Guizhou Province

是/否	地层类别	地层岩性	地层名称	备注
适应地层	碳酸盐岩	灰岩	茅草铺、茅口、栖霞、红花园、长兴、桐梓、马平、达拉、摆佐、尧梭、望城坡、玉龙山	1. 富水、局部岩溶裂隙发育; 2. 大井径遇岩溶裂隙易井斜; 3. 钻井涌水量大于 1000m <sup>3</sup> /h, 钻进成本高、需止涌或换工艺。
		白云岩	桐梓、娄山关、石冷水、高台、清虚洞、灯影、尧梭、摆佐、炉山、平井、后坝等	
	板岩、砂砾岩、玄武岩	板溪群、梵净山群、番召、茅台群、峨眉山玄武岩等	一般无水	
不适应地层	碎屑岩	砂质页岩、粉砂岩	金顶山、明心寺(部分)、蓬莱、遂宁、沙溪庙、韩家店、石牛栏、龙马溪等	1. 一般无水,水敏性强,需注意上、下地层涌水; 2. 采用干空气钻进或泡沫钻进(带护壁、防塌性能)。
		泥岩、页岩	金顶山、明心寺、牛蹄塘、湄潭、九节滩、蓬莱、遂宁、沙溪庙、沙堡湾、十字铺等	
	碎屑岩	粘土岩、含石膏及煤、自身不稳定	梁山、龙潭、宣威群等	第三系、第四系等结构松散地层和可塑地层及不稳定地层

## 2.4 空气钻井工艺的钻进效果

### 2.4.1 钻进效率提高

在贵州复杂地层结构的地热深井钻井施工中,对适用空气潜孔锤钻进工艺地层,采用空气潜孔锤钻进技术可大幅提高机械钻速、缩短钻井周期。

(1)岩溶较发育的碳酸盐岩地层,平均机械钻速为 8.62~17.37m/h,为常规工艺(0.86m/h)的 10.0~20.2 倍。

(2)岩溶发育的碳酸盐岩地层,平均机械钻速为 10.36~12.63m/h,为常规工艺(0.88m/h)的 11.8~14.4 倍。

(3)水敏性碎屑岩地层,平均机械钻速为 15.34~27.70m/h,为常规牙轮钻进(0.52~1.02m/h)的 29.5~27.1 倍。

### 2.4.2 钻井成本降低

空气潜孔锤钻进工艺可大幅降低钻进直接成本。

(1)岩溶较发育的碳酸盐岩地层,钻进直接成

本 294.62 元/m~372.82 元/m,为常规工艺(884.0 元/m)的 0.33~0.43 倍。

(2)岩溶发育的碳酸盐岩地层,钻进直接成本 377.85 元/m~523.67 元/m,为常规工艺(899.0 元/m)的 0.42~0.59 倍。

(3)水敏性碎屑岩地层,钻进直接成本 249.46 元/m~368.07 元/m,为常规工艺的(828.0 元/m) 0.30~0.44 倍。

## 3 多工艺转换接力钻进技术研究

为了更好的发挥各种钻井工艺的优势,研究了多种工艺复合钻井技术,总结出各种工艺的转换方法和接力钻进规律。

贵州省地热深井钻井工艺转换基本规律为:浅部正循环空气潜孔锤钻进工艺→地层复杂或者中深部成本不合理时换用螺杆马达+PDC 钻头回转钻进工艺(或常规牙轮回转钻进工艺)→极端复杂地层情况或深部时换用气举反循环钻进工艺。

开孔后在浅部地层使用空气潜孔锤技术施工,

具有碎岩快、事故率低、垂直度好等优点(许刘万等,2007),能取得常规牙轮钻进工艺4~11倍的钻进效率,同时大幅度节约成本。但是当遇到特别复杂的岩溶裂隙发育、松散沉积易水敏的碎屑岩等地质层以及钻井太深情况时也会出现工作困难、危及钻井安全、成本高昂等问题。此时,就应该根据钻进时发生的复杂情况及时采取措施处理或将空气潜孔锤

工艺更换为钻井液钻井工艺(李杰等,2008;苏宁等,2016),以确保钻井安全和提高钻井效率。各类钻井液钻井工艺在继续使用过程发现不适合时同样应及时作出相互调整或者换用气举反循环工艺。贵州省地热深井由浅至深自空气潜孔锤工艺向其它工艺转换规律见表13。其它工艺之间转换也可根据表中规律灵活配置(王亮等,2011)。

表13 贵州省地热深井钻井工艺转换简表  
Table 13 Transformation of drilling technologies for deep geothermal wells in Guizhou Province

地层类别	岩性	井况		工艺转换条件及工艺类型		
		井内涌水 (m <sup>3</sup> /h)	井内情况	转换条件	转换措施	工艺类型
碳酸盐岩	白云岩 灰岩	20~50		下部无水敏岩层	/	气举反循环
		50~100	钻进效率低 不稳定掉块	下部岩溶不发育	止涌(堵漏) 护壁钻进	螺杆钻进
		>100		下部岩溶发育		常规牙轮钻进
	板岩	无水	/	下部无水敏岩层	/	气举反循环
	砂砾岩 玄武岩	小涌水	岩体较破碎 冲刷掉块	下部为欠稳定 水敏岩层	止涌(堵漏)、护壁钻进	常规牙轮钻进 或螺杆钻进
碎屑岩	砂质页岩 粉砂岩 泥岩 页岩	无水	软弱结构体 冲刷掉块	/	护壁钻进	螺杆钻进
				整体较稳定	/	雾化(护壁)钻进
		小涌水	软弱体冲刷 岩体水化掉块	岩体欠稳定 岩体不稳定	止涌(堵漏)	螺杆钻进 常规牙轮钻进

#### 4 钻井液技术研究

在大量理论调研的基础上,结合贵州省深井钻探实际情况制定了常用钻井液材料的检验标准,并依此进行了常用钻井液材料的优选;分析了贵州省常见复杂地层情况,对9种典型岩石样品进行了成分分析,并根据结果总结了不同岩性地层对钻井液的要求;研究了适合不同复杂地层的钻井液配方。基于空气钻井工艺的需要,研究了充气钻井液和泡沫钻井液配方及应用技术。在室内研究的基础上,进行了多口钻井的现场应用研究,验证了室内实验配方的有效性和根据具体情况钻井液的调整方法。

##### 4.1 贵州省常用钻井液材料评价标准制定

钻井液处理剂的质量和水平直接关系到钻井与

完井液的质量,没有高质量的产品就不可能得到高质量的钻井与完井液体系。为此,项目组参考相关标准,结合贵州省钻井需要,制定了“贵州省常用钻井液材料评价标准(试行版)”。该标准涉及了钻井液用粘土(Clay)、低粘钠羧甲基纤维素(CMC-Lv)、高粘钠羧甲基纤维素(CMC-Hv)、高粘聚阴离子纤维素(PAC-Hv)、低粘聚阴离子纤维素(PAC-Lv)、磺化沥青(SAS)(李勇等,2015)、腐植酸钾(KHm)、聚丙烯酸钾(KPAM)、水解聚丙烯酰胺(PHP)等9种常用钻井液材料的评价方法,并对国内外常用钻井液材料及其作用进行了总结,可供今后贵州省地热深井钻探选择和研究钻井液处理剂使用。根据该标准评价方法优选了目前国内部分钻井助剂厂家最适合贵州省地热深井钻探的产品(表14),一段时期内具有借鉴意义。

表14 钻井助剂厂家优选适合贵州地热深井地层产品  
Table 14 Drilling additives products by different manufacturers suitable for deep geothermal deep wells in Guizhou Province

序号	生产厂家	销售的产品
1	北京探工所	各种钻井液处理剂,低粘增效粉

续表 14

Continued Table 14

序号	生产厂家	销售的产品
2	潍坊易达膨润土	膨润土、钙土、抗盐土
3	潍坊市浩瑞膨润土	膨润土、钙基膨润土、钠基膨润土,抗盐土
4	潍坊远东膨润土	工程专用土粉、高粘膨润土 穿越膨润土 工程泥浆土 地连墙膨润
5	江苏泰康膨润土	膨润土、钙基膨润土、钠基膨润土,抗盐土。
6	江西萍乡五联化工	腐植酸钾,聚丙烯晴铵盐,纤维素(高粘、中粘、低粘),聚丙烯酰胺(分子量 300~600 万;1000 万以上),聚丙烯酰胺钾盐,聚丙烯酸钾,植物胶,随钻堵漏剂,防塌剂,
7	民权永胜化工	纤维素(高粘、中粘、低粘),PAC 系列产品
8	徐州力源化工	纤维素(高粘、中粘、低粘),PAC 系列产品
9	濮阳乙强化工	纤维素(高粘、中粘、低粘),PAC 系列产品
10	郑州伟业化工	纤维素(高粘、中粘、低粘),聚丙烯酰胺,PAC 系列,等
11	江西萍乡市联科化工	腐植酸钾,聚丙烯晴铵盐,聚丙烯晴钠盐,高粘纤维素,中粘纤维素,低粘纤维素,广谱护壁剂,防塌剂等。
12	江西春雷泥浆材料销售部	腐植酸钾,聚丙烯晴铵盐,聚丙烯晴钠盐,高粘纤维素,中粘纤维素,低粘纤维素,广谱护壁剂,防塌剂,随钻堵漏剂,高粘防塌护壁剂。
13	延安朝政泥浆	可控凝胶,膨胀堵漏剂,高粘防塌剂,高粘堵漏剂,广谱护壁剂,泡沫剂等

#### 4.2 贵州省复杂地层优选钻井液配方

贵州属于典型的喀斯特地貌,溶洞、裂隙相当发育,褶皱、断层分布广,钻遇地层复杂多变,给钻探工作带来极大困难。钻遇地层大概分为风化残积层、沙层、砾卵石层、硬脆碎地层、破碎带等松散破碎地层;稳定、漏失较小的坚硬、强研磨性地层;泥、页岩、煤系地层等水敏性地层;岩盐、钾盐、天然碱等水溶性地层;异常低压或异常高压地层等。在不同地层中钻井时需要使用不同的钻井液。为研究不同地层的钻井液,在上述地层代表性地区针对性的采集了9个岩样(表15),分别使用X射线衍射仪和金相显微镜对这些进行了结构特征和矿物成分鉴定。

表 15 典型岩样信息

Table 15 Data of typical rock samples

岩样编号	取样地层	岩样岩性	取样地点
YY01	J <sub>1-2</sub> zl	石英砂岩	贵阳花溪陇头
YY02	P <sub>3</sub> β	玄武岩	普安县三板桥镇法浪河
YY03	T <sub>2</sub> h	白云岩	贵阳花溪陇头
YY04	E	砾岩	贵阳乌当区洛湾
YY09	Ptbnbf	凝灰岩	台江县南官乡交官村
YY11	T <sub>2</sub> h	泥质白云岩	贵阳市云岩区三桥省地勘院
YY12	Ptbnbf	变余砂岩	剑河县柳川镇
YY17	E <sub>1</sub> m	页岩	台江县台拱镇台雄村
YY19	T <sub>1</sub> y	泥岩	贵州省遵义县龙坑镇梳池村

通过典型岩样的分析,可以得出以下结论:

(1)贵州省大部分岩石均含有不同比例的粘土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石),因此在配置钻井液时,均应当适当控制钻井液的抑制性,防止地层造浆,破坏钻井液的性能。

(2)YY11号泥质白云岩样品中粘土矿物总含量虽然不高,但其含有最高含量的蒙脱石,因此其对水敏感性最高,更容易造浆,这也与现场试验情况相符(在遵义三合、安龙招堤和安龙木咱三口钻井钻进过程中,在钻进至泥质白云岩或泥质灰岩地层时,均有钻井液比重增加的情况出现,说明有地层造浆)。今后在设计泥质白云岩和泥质灰岩地层钻井液时,需更加严格控制钻井液的抑制性。

(3)YY01号石英砂岩和YY03号白云岩粘土矿物含量最少,在配置钻井液时,可适当降低对抑制性的要求,以节省钻井液配置成本。

(4)YY01号石英砂岩、YY09号凝灰岩和YY12变余砂岩中石英成份含量超过35%,岩石硬度高,在配置钻井液时,应减少粘土的添加量,提高钻头的碎岩效率。

(5)YY17号页岩和YY19号泥岩所含黏土矿物基本为伊利石,其造浆能力并不如YY11号泥质白云岩,可见了解岩石矿物组成比单纯从岩石名称判断其水敏性更为准确。

依据上述结论指导,开展了“松散破碎地层钻井液技术研究”、“水敏性地层钻井液技术研究”、

“抗石膏侵钻井液技术研究”等工作(丁海峰等, 2006),通过钻井液处理剂选择、初选实验、优选实验等步骤,确定了一批用于贵州省常见复杂地层的钻井液推荐配方(表16)。

表16 贵州省常见复杂地层钻井液推荐配方

Table 16 Drilling fluid recommendations for common complex strata in Guizhou Province

序号	地层情况	钻井液配方
1	断层破碎带、机械性松散地层	1000kg 水 + 钠土粉 11% + 纯碱 0.25% + 铵盐 1% + 防塌润滑剂 1% + 聚丙烯酸钾 0.18% + HV - CMC0.1% - 0.2% + 磺化褐煤树脂 0.13%
2	一般水敏性、煤系地层	1000kg 水 + 钠土粉 11% + 纯碱 0.25% + 铵盐 1% + 防塌润滑剂 1% + 聚丙烯酸钾 0.18% + HV - CMC0.1% - 0.2% + 磺化褐煤树脂 0.13% + 聚丙烯酰胺钾盐 0.05%
3	高水敏性、煤系地层	水 1m <sup>3</sup> + 钠土粉 5% + 纯碱 0.1% + KPAM0.3% + 铵盐 0.2% + 防塌剂 0.3% + 护壁剂 0.2%
4	高水敏性软塑地层	水 1m <sup>3</sup> + 钠土粉 7% + 纯碱 0.2% + 铵盐 0.3% + 防塌剂 0.3% + 护壁剂 0.2% + HV - CMC0.1% - 0.2%
5	含盐(石膏)复杂、水敏性地层	水 + 7% 优质钠土 + 0.4 ~ 0.6% 纯碱 + 0.1% 高粘羧甲基纤维素 + 1% 聚丙烯晴铵盐 + 0.8% 磺化沥青 + 1% 防塌润滑剂 + 包被剂
6	强风化、砂层、破碎地层	基浆 + 聚丙烯酸钾 0.4% + 护壁防塌剂 1% + 固体润滑剂 2% + 加重剂 1.0% + 随钻堵漏剂 2% + GSP0.4% + CMC0.1% + 磺化沥青 0.2%

同时进行了充气钻井液和泡沫钻井液的研究,形成了“0.5m<sup>3</sup>水 + 25kg 膨润土 + 2kg ~ 3kg CMC + 0.25kg K12”和“水 + 0.2% k12(发泡剂) + 0.2% OP - 10(发泡剂) + 0.25% CMC(稳泡剂) + 0.25% 稳泡剂 PAM”配方(王虎等,2015)。

#### 4.3 钻井液现场应用效果

上述钻井液体系分别在“贵州省遵义县三合镇青龙寺地下热矿水勘查”、“石阡县弯塘 CK6 地热井”、“安龙沼提风景区 ZK2 地热井”、“镇隆镇煤矿勘查”、“黔南页岩气勘查代页 1 井”、“贵安新区地热整装勘查 CK1 地热井”等项目进行了试用研究,效果良好,起到了有效配合多工艺钻井工艺、稳定井壁、保护储层、辅助提高钻井效率的作用。

### 5 结论与建议

(1)项目研究形成了“贵州省地热深井钻探螺杆钻井工艺”、“贵州省地热深井钻探空气钻井工艺”、“贵州省地热深井钻探多工艺组合钻井”、“贵州省地热深井钻探钻井液”等技术体系,螺杆钻井工艺钻进效率达到常规牙轮钻井工艺的 2 ~ 3 倍,空气钻井工艺钻进效率达到常规牙轮钻井工艺的 4 ~ 11 倍,同时两种工艺均可有效降低钻井施工成本;新的钻井液体系可有效实现钻井过程优质稳定井壁、钻完井结束良好解堵保证开发效果作用。该成果能将 1 口 2000m 以上地热深井施工周期由原来的 8 ~ 12 个月缩短至 4 ~ 6 个月,将单井平均施工成本由 450 万元降低至 410 万元以下,具有重大的推

广价值。

(2)虽然项目研究工作取得了丰富的实用成果,但是仍然存在很多不足。贵州地层的复杂程度、钻探工作的特殊性 & 本次研究内容的多样性决定了成果不可能面面俱到,建议今后在以下方面继续深入开展研究:螺杆马达选型规律、大漏地层使用可能性研究;空气潜孔锤冲击扰动地层规律、机具疲劳破坏规律、深部使用成本分析系统理论研究;气举反循环钻井工艺研究;更便捷的生物酶解堵技术研究及其它储层保护和增产技术研究。

#### [References]

Ding Hai-feng, Wei Xue-cheng, Zhang Xin-xu, Pei Jian-zhong, Li San-jie. 2006. Mud system transformation in air drilling practices[J]. Petroleum Drilling Techniques, 34(4): 12 - 15 (in Chinese with English abstract)

Feng Tao, Zhu Yu-xin. 2009. The use of air DTH hammer in drilling process[J]. Zhongzhou Coal, 165(9): 81 - 83 (in Chinese)

Geng Li-ping. 1998. Geographic distribution and application of geothermal energy in China[J]. Geology and Exploration, 34(1): 50 - 54 (in Chinese with English abstract)

Hu Yu-le, Zhang Hui, Zhang Qiu-dong, Xiao Dong-shun, Zhang Gu-bin, Liu Yao-dong, Wang Jun-jie, Yang Tao, Zhang Jian-bing. 2013. Drilling and completion techniques of deep geothermal well [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 2 - 5 (in Chinese)

Li Jie, Yuan Qi-ji, Li Zhen-xiang, Xu Peng. 2008. Research on transformation of air drilling into mud drilling [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, (10): 212 - 213 (in Chinese)

Li Qi-long. 2014. Application of screw drill in geothermal well drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 41(3): 56 - 58 (in Chinese with English abstract)

Li Yong, Chen Yi, Wang Hu, Wu Xiao-lan. 2015. Application of sulfonat-

- ed asphalt drilling fluid in geothermal exploration well of Guizhou [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 42(1):27-30 (in Chinese with English abstract)
- Lu Yu-bei. 2004. Analyses and research on frequently occurred problems in geothermal well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 31(2):43-47 (in Chinese with English abstract)
- Lu Yu-bei. 2011. Application of air DTH hammer technology to fast drilling in red beds of Yunnan Province [J]. Geology and Exploration, 47(2):309-315 (in Chinese with English abstract)
- Mao Jian-quan. 2011. The characteristics, distribution, development status and prospects of geothermal resources in Guizhou Province [A]. Chinese Western geothermal resources development strategy study [C]: 29-36
- Su Ning, Wang Hu, Wang Jian, Chen Yi, Li Yong. 2016. Application of multi-Process drilling technology to the well ZK1 in Zunyi, Guizhou Province [J]. Geology and Exploration, 52(1):165-172 (in Chinese with English abstract)
- Wang Hu, Chen Yi, Duan De-pei, Wu Xiao-lan, Li Yong, Su Ning. 2015. Application of low permeability film forming drilling fluid in deep geothermal well in Guizhou Province [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 42(4):13-15, 20 (in Chinese with English abstract)
- Wang Hu, Chen Yi, Duan De-pei, Wu Xiao-lan, Li Yong, Yu Li-xin. Present situation of deep geothermal well in Guizhou and the development suggestion [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 42(2):45-47, 52 (in Chinese with abstract)
- Wang Liang, Wu Zheng-quan, Yang Lan-ping, Ye Zhu-cai, Long Ai-guo, Zeng Jian. 2011. Drilling fluids transformation after gas drilling at the Gaofengchang Block in the eastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 31(3):59-62, 112 (in Chinese with English abstract)
- Wang Ming-zhang, Wang Shang-yan. 2007. Concerns of developing geothermal resources in Guizhou Province and countermeasure proposals [J]. Guizhou Geology, 24(1):9-12, 16 (in Chinese with English abstract)
- Wu Jing-hua. 1997. Technology and problems of controlled directional drilling by positive displacement motor [J]. Geology and Exploration, 33(5):60-63 (in Chinese with English abstract)
- Wu Jing-hua, Yun Xi-bin. 2003. Development and benefit evaluation of geothermal energy [J]. J. Changchun Inst. Tech. (Nat. Sci. Edi.), 4(1):31-34 (in Chinese with English abstract)
- Wu Ye, Lu Yu-bei, Chen Ying. 2013. Research on the air drilling test in the Tengchong volcano-geothermal-tectonic zone [J]. Geology and Exploration, 49(3):528-533 (in Chinese with English abstract)
- Xu Liu-wan, Shi Bing-yan, Li Guo-dong. 2007. Vigorously promote the combined drilling technology of DTH and air lift reverse circulation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), (9):41-45 (in Chinese)
- Xu Liu-wan, Wu Xiao-long, Wang Yan-li. 2013. Development and utilization of geothermal resource in China and the drilling technology [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 40(4):1-5 (in Chinese with abstract)
- Zhao Hua-xuan, Wang Yu-jun, Chen Tao, Chen Hao, Su Ning, Wang Hu. 2016. Application of air DTH hammer drilling technology to deep geothermal wells in clastic rock strata in Guizhou Province [J]. Geology and Exploration, 52(5):942-949 (in Chinese with English abstract)
- Zeng Tie-jun. 2000. Drilling technology used in deep geothermal well [J]. Coal Geology & Exploration, 28(1):60-64 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Yan, Zhong Yu-fang. Construction technology applied in CK1 geothermal exploration well in Leishan of Guizhou [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 41(10):32-35, 40 (in Chinese with English abstract)
- [附中文参考文献]
- 丁海峰, 魏学成, 张新旭, 裴建忠, 李三杰. 2006. 空气钻井过程中的钻井液转换 [J]. 石油勘探技术, 34(4):12-15
- 冯涛, 朱玉新. 2009. 浅谈钻进过程中空气潜孔锤的使用 [J]. 中州煤炭, 165(9):81-83
- 耿莉萍. 1998. 中国地热资源的地理分布与勘探 [J]. 地质与勘探, 34(1):50-54
- 胡郁乐, 张惠, 张秋冬, 肖东顺, 张古彬, 刘耀东, 王俊杰, 杨涛, 张建兵. 2013. 深部地热钻井与成井技术 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 2-5
- 李杰, 袁骥骥, 李真祥, 徐鹏. 2008. 空气钻井转换为泥浆钻井研究 [J]. 内蒙古石油化工, (10):212-213
- 李奇龙. 2014. 螺杆钻具在地热井钻探中的应用初探 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 41(3):56-58
- 李勇, 陈怡, 王虎, 吴晓兰. 2015. 磺化沥青钻井液在贵州地热勘探井中的应用 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 42(1):27-30
- 卢予北. 2004. 地热井常见主要问题分析与研究 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 31(2):43-47
- 卢予北. 2011. 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, 47(2):309-315
- 毛健全. 2001. 贵州省地热资源特征、分布规律、开发现状及发展远景 [A]. 中国西部地热资源开发战略研究论文集 [C]: 29-36
- 苏宁, 王虎, 王剑, 陈怡, 李勇. 2016. 多工艺钻井技术在贵州省遵义县 ZK1 井施工中的应用研究 [J]. 地质与勘探, 52(1):165-172
- 王虎, 陈怡, 段德培, 吴晓兰, 李勇, 苏宁. 2015. 低渗透成膜钻井液在贵州深部地热井中的应用 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 42(4):13-15, 20
- 王虎, 陈怡, 段德培, 吴晓兰, 李勇, 余立新. 2015. 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), 42(2):45-47, 52
- 王亮, 吴正权, 杨兰平, 叶祖才, 龙爱国, 曾健. 2011. 川东地区高峰场区块气体钻井后的钻井液转换工艺 [J]. 钻井工程, 31(3):59-62
- 王明章, 王尚彦. 2007. 贵州省地热资源开发问题及对策建议 [J]. 贵州地质, 24(1):9-12, 16
- 吴景华. 1997. 螺杆定向钻进工艺及存在问题 [J]. 地质与勘探, 33(5):60-63
- 吴景华, 云希斌. 2003. 地热开发应用及效益评价 [J]. 长春工程学院学报 (自然科学版), 4(1):31-34

- 吴 焯,卢予北,陈 莹. 2013. 腾冲火山地热构造带空气钻探试验研究[J]. 地质与勘探, 49(3): 528-533
- 许刘万,史兵言,李国栋. 2007. 大力推广气动潜孔锤及气举反循环组合钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), (9): 41-45
- 许刘万,伍晓龙,王艳丽. 2013. 我国地热资源开发利用及钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 40(4): 1-5
- 赵华宣,王玉军,陈 涛,陈 浩,苏 宁,王 虎. 2016. 贵州碎屑岩层地热深井空气潜孔锤钻进技术应用研究[J]. 地质与勘探, 52(5): 942-949
- 曾铁军. 2000. 深层地热水井钻探工艺[J]. 煤田地质与勘探, 28(1): 60-64
- 赵 岩,仲玉芳. 2014. 贵州雷山县 CK1 地热勘探井施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 41(10): 32-35, 40

## Drilling Technology of Deep Geothermal Wells for Complex Strata in Guizhou Province

SONG Ji-wei<sup>1,2</sup>, JIANG Guo-sheng<sup>2</sup>, SU Ning<sup>3</sup>, YU Li-xin<sup>3</sup>, LI Qi-long<sup>3</sup>, WANG Hu<sup>4</sup>, ZHAO Hua-xuan<sup>2</sup>

- (1. 112 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Anshun, Guizhou 561000;  
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074;  
3. Guizhou Geological Engineering Investigation Design and Research Institute, Guiyang, Guizhou 550008;  
4. 111 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550008;  
5. 114 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Zunyi, Guizhou 563000)

**Abstract:** The Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province has organized and implemented the project "Technology Breakthrough of Drilling Deep Geothermal Wells in Guizhou Province", which studied the adaptability of screw drilling and air drilling technologies of geothermal wells in complex strata of karst areas, overcoming the related technical problems about application of these two technologies limited by stratigraphic characteristics in this region. The expectancy life of the screw motor reach more than 200 hours, and the drilling mechanical rate of screw drilling technology increases 2~3 times compared with the conventional drilling technology. Single well application depth of the air DTH hammer exceeds 1500 m, and the drilling mechanical rate of the air DTH hammer technology increases 10~29.5 times that of the conventional drilling technology. At the same time, this project has studied the transformation relay drilling technology of single wells and the drilling fluid system matched to above drilling technologies. Eventually this work has formed a combined technology system of drilling deep geothermal wells that is suitable for geological conditions of Guizhou Province. It can markedly improve drilling efficiency and economic benefit. The results will reduce the construction period of a geothermal well more than 2000 m from 8~12 months to 4~6 months, lowering the average construction cost of single wells from 4.5 million yuan to less than 4.1 million yuan.

**Key words:** karst, geothermal well, screw drilling, air drilling, drilling fluid, Guizhou Province

