

多工艺空气高效钻进技术在地热井施工中的应用实践

封优生, 谢建军, 李海兴, 吕红波, 刘 旭

(河北伟业地热新能源科技有限公司, 河北 邯郸 057650)

摘要:多工艺空气钻进技术已成为深部地热和地下水资源开发利用中行之有效的办法,在很好地保护地热储层的同时,还具有钻进效率高、成本低、无污染等优势。本文结合多年的生产实践,阐述了地热井施工中多工艺空气钻进技术及其设备配套,气动潜孔锤钻进和气举反循环钻进技术的组合应用,及其在施工中取得的良好效果。

关键词:多工艺空气钻进;地热井;气动潜孔锤钻进;气举反循环钻进;设备配套

中图分类号:TE249:P634.5 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0353-05

Application practice of multi-process high-efficiency air drilling technology in geothermal well construction

FENG Yousheng, XIE Jianjun, LI Haixing, LÜ Hongbo, LIU Xu

(Hebei Weiye Geothermal New Energy Technology Co., Ltd., Handan Hebei 057650, China)

Abstract: The multi-process air drilling technology has become an effective method for the development and utilization of deep geothermal and groundwater resources. It not only offers excellent protection for geothermal reservoirs, but also has advantages such as high drilling efficiency, low cost, and no pollution. Based on years of production practice, this paper describes the multi-process air drilling technology and its equipment used in geothermal well construction, as well as the combined application of pneumatic down-the-hole hammer drilling and air-lift reverse circulation drilling technologies, along with the favorable results achieved in practice.

Key words: multi-process air drilling; geothermal well; pneumatic down-the-hole (DTH) hammer drilling; air-lift reverse circulation drilling; equipment matching

0 引言

多工艺空气钻进技术是用压缩空气代替常规钻进时所用的水或泥浆进行循环,起到冷却钻头、携带岩屑的作用,并为破岩机具提供动力,是一种高效的钻进方法^[1-3]。通过一系列研究与推广应用,我国已较全面掌握和应用该项技术,缩短了与世界先进水平的差距,增强了国际竞争力。

地热井施工中如何保护好热储层是关键,目前大多数地热井施工还是以泥浆正循环钻进工艺为

主。该工艺会对地热井后期成井产生一定影响,导致深部目的层钻进时循环压力过大,岩粉堵塞裂隙出水通道,且泥浆中的高分子聚合物在裂隙中会形成一种胶结性络合物,给后续的洗井作业带来隐患。多工艺空气钻进技术的推广应用,可有效解决地热井施工中存在的这些问题。尤其是采用气举反循环钻进成井,施工过程中岩屑上返速度快,携带岩屑的能力强,不重复破碎,有效保护了裂隙含水层不被堵塞,同时钻进过程已完成洗井,大大缩

收稿日期:2025-06-24; 修回日期:2025-09-04 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.057

第一作者:封优生,男,汉族,1990年生,副总经理,工程师,石油与天然气地质勘探专业,主要从事地热钻探、水文地质勘探项目管理工作,河北省邯郸市广平县金广源路91号, fengyousheng0428@163.com。

引用格式:封优生,谢建军,李海兴,等.多工艺空气高效钻进技术在地热井施工中的应用实践[J].钻探工程,2025,52(S1):353-357.

FENG Yousheng, XIE Jianjun, LI Haixing, et al. Application practice of multi-process high-efficiency air drilling technology in geothermal well construction[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1):353-357.

短了成井周期,降低了施工成本。由此可见,在地热井施工中采用多工艺空气钻进技术,能够发挥巨大的作用^[4-6]。

本单位多年从事地下水资源钻探施工,大量的生产实践证明,常规的泥浆正循环施工工艺已经远远不能满足高效钻井的需求,经常会因井内排屑不彻底,造成埋钻、卡钻事故,导致施工困难,辅助时间长。特别是在地热井热储层和砂岩裂隙层施工,含水通道易被泥浆堵塞,严重影响出水量,成井质量不合格。为解决上述技术难题,自2012年开始采用多工艺空气钻进技术,在深部地热井钻进中优越性较强。近年来,全面推广多工艺空气钻进技术,并在全国起到了示范引领作用。

1 多工艺空气钻进技术与设备配套

地热井施工必须根据井深、井径、地层情况,以及热储层的温度、压力等条件,选择适宜的钻机,还要全面考虑多工艺空气钻进技术对钻机的要求,即钻机要适应钻进工艺,实现高效钻进技术和设备的合理匹配。根据ZJ-50、ZJ-40、ZJ-30及TSJ3000等钻机的实际情况,进行多工艺空气钻进技术的配套,主要包括气动潜孔锤正循环钻进技术、气动潜孔锤反循环钻进技术、气举反循环钻进技术等。

1.1 气动潜孔锤正循环钻进

优选8 in(1 in=25.4 mm,下同)冲击器(冲击器外径180 mm,锤头直径216 mm)、12 in冲击器(冲击器外径275 mm,锤头直径311 mm),根据地层和井深灵活匹配锤头直径。钻具连接依照机台现有塔式钻具组合。另外按环保和安全要求,匹配了适合133 mm×133 mm方钻杆的井口旋转密封装置。辅助配套有气动潜孔锤正循环深井钻进用专用浮阀接头,保护冲击器的过滤器、泡沫泵等。

1.2 气动潜孔锤反循环钻进

为保证井眼垂直度和加压需要,为RC140型反循环冲击器(反循环冲击器外径330 mm、锤头直径430 mm)匹配了直径280 mm、长度9 m的双壁钻铤2根,与SHB140/80双壁钻杆连接,采用气动潜孔锤反循环工艺,实现上部基岩地层高效钻进。同时,现场配有上下冲堵器,以利于气动反循环潜孔锤钻进过程中井内事故的处理。

1.3 气举反循环钻进双壁钻具

双壁钻具作为实现气举反循环钻进技术的核

心配套器具,对钻具结构性能的选择非常重要,直接影响到机械钻速。从技术角度考虑,地热井钻进应选配API标准的钻具螺纹,以便同常用钻具连接,钻杆材质可按钻井口径和深度来确定。目前地热井施工深度一般为2500~5000 m,常见配套2种规格双壁钻具。第一种SHB127/70双壁钻具,双壁钻杆外管接头加长,并配备特制专用钢护丝,主要包括:气盒子、133 mm×133 mm双壁方钻杆、双壁钻杆1500 m、气水混合器、正反循环变换堵头1套、排堵装置1套,满足日常气举反循环钻需求。第二种SHB140/80双壁钻具,主要用于地热井上部基岩地层气动潜孔锤反循环钻进,包括:大通孔水龙头(具有满足反循环钻进鹅颈管易损可换机构)、气盒子、178 mm六方或四方双壁方钻杆、双壁钻杆600 m、气水混合器、正反循环变换堵头1套、排堵装置1套。这套双壁钻具既能满足上部基岩地层大口径反循环潜孔锤高效钻进,也能实现下部气举反循环钻进。

1.4 附属设备

(1)气举反循环钻进用岩屑分离装置,主要满足气举反循环钻进时气、液、固三相流有效分离,便于现场人员对所钻地层分析判断,安全环保。

(2)气举反循环钻进空压机的选配,排气量和工作压力是气举反循环钻进的主要参数,决定着循环液流在钻杆内上升的速度,上升的液流速度大于岩屑的沉降速度才能把岩屑从井底带到地面^[7-10]。当地下水位较深、沉没比较小、钻井口径和双壁钻杆内径较大时,选用大风量的空压机,以提高钻进效率;反之可选择小风量的空压机,以节约能源,降低成本。由于钻井口径决定了双壁钻杆内通径,而钻杆内径和风量有着密切的关系,根据国内常用气举反循环钻具规格,一般地热井钻进空压机风量10~15 m³/min。在实际应用中为获得更高的上返速度以提高钻进效率,通常选择较大压力的空压机,以满足混合器下入深度,具有一定的灵活性。施工中配套2台电动空压机,分别为风量10 m³/min、压力6 MPa和风量12.5 m³/min、压力15 MPa。

(3)目前地热井施工现场一般都能提供电力接口,在空压机选配时尽量选用电动空压机,现场噪声低,空气污染少。我单位与陕西某压缩机公司合作,创新性开发了风量35 m³/min、压力3.5 MPa的三级压缩电动空压机,见图1。同时配套1台风量柴

油动力空压机,供现场灵活选配。施工过程中可依据井内情况匹配增压机,进一步提高深井钻进效率。



图1 三级电动空压机应用现场

(4)采用气动潜孔锤正反循环钻进地热深井时一般选配2~3台空压机、1台增压机,空气管路必不可少。为方便施工现场按地层灵活选择工艺方法,设计配套了三空一增空气管路系统,空压机的胶管耐压16 MPa,增压机的胶管耐压35 MPa,所有管路均为油壬连接,并配有安全绳,以保证施工安全。

2 多工艺空气钻进技术的组合应用

在多工艺空气钻进技术体系中,气动潜孔锤钻进和气举反循环钻进都是用压缩空气代替常规钻进用水或泥浆循环。在地热井施工中有些地点开孔就是岩层,或者覆盖层很浅,下入表层套管后,可首先采用气动潜孔锤钻进工艺,钻进到一定深度后井内背压过大、气动潜孔锤钻进时效明显下降或者无法钻进时,立即转换为气举反循环钻进工艺,使二者很好地组合,发挥各自的优点,这是多年生产实践不断探索得到的经验^[11]。

2.1 气动潜孔锤钻进技术的优点

气动潜孔锤钻进技术的优点主要是碎岩效率高,成井周期短。一般在可钻性等级5~6级岩石钻进效率可达10 m/h左右,7~8级岩石钻进效率可达5 m/h。相比常规钻进效率提高几倍到十几倍,是目前基岩水井、地热井钻进效率最高的一种工艺方法。另外该工艺施工的水井、地热井成井质量好、出水量大,出水量相较其他工艺(如清水或泥浆钻进)提高30%左右,为干旱缺水地区提供了一种“无水钻井技术”,近年来在地热井施工中已得到很好的推广应用。同时可根据地层情况和口径范围灵活选择正循环和反循环气动潜孔锤钻进,该技术是目前提高坚硬岩石和复杂地层钻进效率最有效

手段^[12-13]。

2.2 气举反循环钻进技术的优点

气举反循环钻进时可以利用地层水,不必配置泥浆系统。与潜孔锤钻进相比所需空压机风量小、能耗低,特别适合在深井富水条件下工作。可以实现连续取样和取心钻进,判层及时准确,钻头寿命长,机械钻速高,可解决某些复杂地层钻进难题。在地热井施工中钻进过程同时也是洗井过程,有利于热储层的保护,出水量远远高于正循环钻进^[14-15]。

其最大特点是管路平直,不易堵塞,携带上来的气、液、固三相流不流经任何工作机械,已成为国内外水井、地热井、以及大口径工程井钻进中最受用户青睐的技术。

目前除泥浆正循环钻进技术外,气动潜孔锤钻进技术和气举反循环钻进技术组合应用,构成了多工艺优质、高效开发深部地热和地下水资源的有效方法。

3 多工艺空气钻进技术在地热井施工中的应用实例

由于开采深度越来越大,高效开发地下热水资源已显得尤为重要。近年来,充分发挥多工艺空气钻进技术优势,实现了安全、高效、快速开发地热资源,部分推广应用实例如下。

3.1 承德市高新区闫营子砖瓦窑村重点勘查区地热资源预可行性项目

该项目自2023年11月2日开钻到2024年2月7日完钻,0~2010.14 m采用气动潜孔锤钻进工艺,2010.14~2505.68 m采用气举反循环钻进工艺。地层岩性为流纹岩、凝灰岩、硅质白云岩及石英砂岩,可钻性等级9~10级,钻井周期3个月。通过两种工艺组合钻进时效对比,气动潜孔锤基岩钻进平均时效最高达到9.27 m/h,较常规工艺节约近30%的钻探成本,创造了较好的经济效益。气举反循环钻进由于井底干净,避免重复破碎,不容易堵塞基岩裂隙,使裂隙水涌出量最大化。成井后与该区域泥浆正循环工艺施工的地热井比较,温度和水量都更高。且气举反循环钻进牙轮钻头寿命长,成本低。该项目采用这两种高效钻井工艺,极大地缩短了建井周期,较邻井采用泥浆正循环钻进周期缩短约2/3,施工现场见图2。

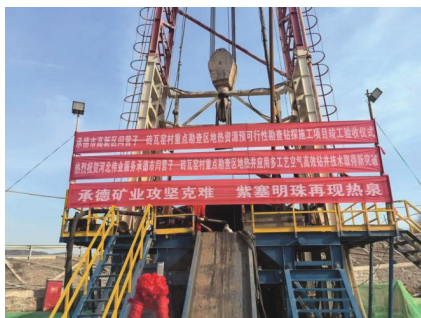


图2 承德闫营子地热井施工现场

3.2 石家庄鹿泉LQDR-1地热温泉井施工

LQDR-1井1900 m以浅分别采用了泥浆正循环和螺杆马达复合钻进,热储层段1900 m到终孔采用气举反循环钻井工艺。钻遇地层为大理岩和白云岩,地层硬度高。采用气举反循环钻进工艺冲洗液上返流速高,携带岩屑能力强,机械钻速明显提高,达1.6 m/h,相比一、二开正循环钻进机械钻速1.07~1.32 m/h,提高了22.7%~51.4%。钻头寿命从86.00~108.17 m,提高到130.14 m,提高了20.3%~51.3%。出水量57 m³/h,水温53℃。此前该井周边区块曾经施工过3口地热井,温度和水量都不理想,故被评价为贫水区。这口井成功出水对该区块富水性的认知有了改变,进一步证明了LQDR-1井采用气举反循环钻进工艺,能够显著提高产能。现场施工情况见图3。



图3 石家庄鹿泉LQDR-1地热温泉井施工现场

3.3 承德宽城某康养中心地热资源勘查项目

此项目位于宽城,成井深度3027 m,一开、二开采用泥浆正循环钻进,三开2192~3027 m热储层段换为气举反循环钻进工艺。出水温度43℃,稳定出水量3192 m³/d(降深75.2 m),水温、水量为该区域

最高,综合评价为优质温泉井。

3.4 内蒙古宁城正航酒店地热勘查项目

该项目位于赤峰市宁城县天义镇,自2024年2月17日开钻到5月7日完钻,除上部0~72 m采用正循环钻进外,一开72~603.55 m、二开603.55~2002.82 m均用气动潜孔锤钻进工艺,施工周期32天。三开2002.82~2511.99 m采用气举反循环钻进工艺,施工周期30天。通过钻进时效对比,气动潜孔锤钻进平均时效最高达到8.39 m/h,建井周期极大缩短。基岩裂隙地层不使用泥浆,有效减少了堵塞,出水温度48.8℃,出水量340 m³/d,为该区在花岗岩毛细型裂隙找水施工成功的第一口温泉井。各井段(岩性均为花岗岩、安山岩,可钻性等级7~9级)不同钻进工艺平均时效见表1。

表1 不同钻进工艺平均时效

井段/m	纯钻时间/h	时效/(m·h ⁻¹)	备注
72~603.55	69	7.7	气动潜孔锤钻进
603.55~2002.82	166.75	8.39	
2002.82~2511.99	378.82	1.34	气举反循环钻进

3.5 江苏宜兴张渚镇老虎山地区地热勘查项目

该项目设计井深2000 m,上部5 m覆盖层采用泥浆正循环钻进,5~350 m采用Ø430 mm大口径气动潜孔锤反循环钻进,配套1台风量32 m³/min、压力3.5 MPa的空压机,平均钻进效率4.87 m/h,如果用2台空压机钻进效率会更高。通过本项目浅层基岩段采用大口径气动潜孔锤反循环钻进,与类似钻井浅层基岩段用Ø445 mm镶齿牙轮钻头正循环钻进相比,效率提高了7倍多。由此可见,上部浅层基岩段应首选大口径气动潜孔锤反循环钻进工艺,钻进效率高,成本低,大幅缩短施工周期。潜孔锤反循环钻进配套钻机和空压机见图4。

4 多工艺空气钻进技术推广取得的技术经济效益

多年来在全国各地地热井工程中推广应用证明,多工艺空气钻进技术取得了显著经济效益和社会效益,对缩短钻井周期、加速地热能源开发起到了推动作用。

4.1 钻进效率高

经过在地热井施工中的实践检验,气动潜孔锤钻进、气举反循环钻进均是成熟的技术,按施工方



(a)钻机

(b)空压机

图4 潜孔锤反循环钻进配套设备

案与现有设备器具进行配套,即可迅速投入应用。与正循环钻探技术方法相比,气动潜孔锤钻进效率可提高10倍以上,气举反循环钻进效率可提高2~3倍,钻探成本可降低50%以上。

4.2 成井时间短、质量高

生产实践证明,采用气动潜孔锤和气举反循环钻进工艺施工的地热井,井径规则,井底干净,井斜率小,对热储层起到保护作用,出水量大,成井周期短。特别是气举反循环钻进过程本身就是洗井过程,具有不污染、不堵塞含水层的特点。

4.3 钻探成本低

气举反循环钻进工艺与常规钻进相比,成井质量好、钻头寿命长、效率高、事故少、材料消耗低,钻探成本大为降低,产生的经济效益非常明显。气举反循环钻进工艺是一项具有“四高”(成井质量高、时间利用率高、钻进效率高、钻头寿命高)、“三少”(事故少、体力劳动少、设备管材耗量少)、“二好”(地质效果好、经济效益好)的先进钻探技术。

4.4 社会效益高

在复杂地层钻进时,气举反循环钻进综合效率是正循环钻进的3~6倍,克服了正循环工艺在复杂地层无法钻进、无法按期完工的困难,具有较高的社会效益。

5 结语

目前多工艺空气钻进技术在地热井施工中发挥了非常重要的作用,能够解决很多常规钻进方法

无法有效解决的技术难题,得到迅速推广。使用过程中受诸多技术因素的影响,设备能力要选择大马拉小车,并要适配钻进工艺。今后将着重在设备器具配套上进行更新和匹配,重点开展气动潜孔锤和气举反循环组合钻进技术,通过这两种钻进技术相结合的方式,优化钻井结构设计,进行不同地层和深度的地热能源开发。同时不断创新,积累经验,有效提高地热井钻进效率,降低施工成本,缩短施工周期。

参考文献:

- [1] 许刘万,刘智荣,赵明杰,等.多工艺空气钻进技术及其新进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(10):8-14.
- [2] 耿瑞伦,陈星庆.多工艺空气钻探[M].北京:地质出版社,1995.
- [3] 耿瑞伦.多工艺空气钻进成就与展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),1999,(S1):132-136.
- [4] 许刘万,伍晓龙,王艳丽.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),2013,40(4):1-5.
- [5] 邵俊琪.天津市地热井钻进与成井工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2001,(S1):202-204.
- [6] 张文庆.气举反循环钻进工艺选用原则及建议[J].西部探矿工程,2014,26(2):46-48.
- [7] 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.
- [8] 伍晓龙,冯钰琦,杜焱森,等.气举反循环双壁钻具流场仿真分析[J].钻探工程,2022,49(3):83-91.
- [9] 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.
- [10] 李黔,张小林,李郑涛,等.环空注气气举反循环钻井工艺及关键参数设计[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(4):35-43.
- [11] 许刘万.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),2007,(9):41-45.
- [12] 刘家荣,王建华,王文斌,等.气动潜孔锤钻进技术若干问题[J].钻探工程,2010,37(5):40-44.
- [13] 杨秋明,周兢,王瑜,等.基于ABAQUS的气动潜孔锤球齿碎岩及布齿优化[J].钻探工程,2024,51(1):40-50.
- [14] 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.
- [15] 王永全,许刘万.气举反循环钻进技术在地热井施工中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2001,(S1):212-214.

(编辑 王跃伟)