

大同地区干热岩勘查高温高压自喷井综合治理工艺

王平, 师鹏峰*

(山西省地质勘查局, 山西太原 030001)

摘要:在大同天镇干热岩勘查项目中,当钻进至1622 m时,井内突然涌出大量高温高压气水混合物,这在干热岩钻井工作中极其罕见。针对这一中东部地区深部地热资源的重大发现,山西地勘局组织专家分析研究井口涌出情况,通过反复实践,利用方箱开合闸板实现引流,并进一步运用“下钻—注浆—降温—减压—压井—安装采油树”综合治理工艺,成功地完成了这眼地热井的保井发电试验任务。本文分析了自喷井形成原因,系统地总结了整个治理工艺过程,为今后同类型地热资源勘查钻探工作提供宝贵的经验和技術支撑。

关键词:干热岩勘查;高温高压;方箱闸板;注浆;压井

中图分类号:P634;TE24 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2021)S1-0258-06

Comprehensive treatment technology for high temperature and high pressure blowing wells in hot dry rock exploration in Datong

WANG Ping, SHI Pengfeng*

(Shanxi Provincial Geological Prospecting Bureau, Taiyuan Shanxi 030001, China)

Abstract: In the hot dry rock exploration project in Tianzhen, Datong, a large amount of high temperature and high pressure gas-water mixture blew out of the well when drilling reached 1622m, which is extremely rare in the drilling of hot dry rock. In response to this major discovery of deep geothermal resources in the central and eastern region, the Shanxi Geological Prospecting Bureau organized experts to analyze and study the wellhead gushing situation. Through repeated practice, the square box was used to open and close the gate valve to achieve diversion with comprehensive treatment of “drilling-grouting-cooling-depressurizing-killing well-installing Christmas tree”. As a result, the geothermal well was successfully protected with power generation test completed. This paper analyzes the generation of the blowing well, and summarizes systematically the entire treatment process, providing valuable experience and technical support for future exploration and drilling for similar geothermal resources.

Key words: hot dry rock exploration; high temperature and high pressure; square box gate valve; grouting; killing well

0 引言

2020年3月,山西省地质勘查局第一水文地质队承担的天镇干热岩预可行性勘查项目取得重大成果,在钻进至1622 m处时,突然探获高温高压地热流体。后经省自然资源厅组织专家鉴定为“我国内陆中东部地区发现的第一口温度最高、自流量最

大的地热井”。

在山西省政府制订的转型跨越发展战略中,新能源突破无疑有着举足轻重的地位,对于这一重成果发现,省委省政府领导高度重视,多次作出重要指示并亲临现场指导^[1]。在各级领导的重视下,在社会各界力量的共同努力下,该项目成果逐步扩

收稿日期:2021-05-31 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.S1.043

作者简介:王平,男,汉族,1961年生,教授级高级工程师,二级巡视员,探矿工程专业,从事勘查技术施工管理工作,山西省太原市并州北路27号,wp891168@163.com。

通信作者:师鹏峰,男,汉族,1987年生,工程师,探矿工程专业,从事勘查技术施工管理工作,山西省太原市并州北路27号,597067984@qq.com。

引用格式:王平,师鹏峰.大同地区干热岩勘查高温高压自喷井综合治理工艺[J].钻探工程,2021,48(S1):258-263.

WANG Ping, SHI Pengfeng. Comprehensive treatment technology for high temperature and high pressure blowing wells in hot dry rock exploration in Datong[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):258-263.

大,从最初的探获一孔高温高压自喷井(见图1),到综合治理并安装采油树后,实现了“可控可喷”状态,最终建成为科研示范试验电站基地。



图1 高温高压自喷井现场

本文主要介绍了勘查区地质情况、钻井工艺,分析高温高压自喷井产生原因,系统总结从“自喷”到“可控”的整个治理工艺。经查阅,目前国内尚无类似高温高压自喷井治理工艺的案例,本次综合治理工艺的成功运用,为今后同类型地热资源勘查钻探工作提供了宝贵的经验借鉴。

1 勘查区地质情况

勘查区位于大同新生代断陷盆地北端,内蒙断块南部,地势总体北东高南西低。境内的主要构造有^[2-5]:云门山前大断裂阳高段,断裂总体走向北东方向 80° ,延伸42 km进入境内,又沿 70° 方向延伸30 km进入河北怀安县;熊山山前大断裂,境内延伸长

度为36 km,总体呈北东方向,在孤峰山处弯曲,东部呈北西西向向河北境内延伸。

区内地层主要有太古宙集宁群(ArJ)、元古宇长城系(Z)、中生界白垩系(K)、新生界新近系(N)和第四系(Q)。出露的地质体以新太古代变质基底为主,为一套深度变质、混合岩化的各种片麻岩和麻粒岩。该区干热岩热储为太古宙变质岩、花岗结晶岩体、岩柱、岩浆侵入体,特点埋藏浅,温度高。

2 钻井工艺

2.1 设备选型

钻机:选用模块化大口径全液压力头CMD-150T型钻机。

泥浆泵:选用3NB-350型泥浆泵。

取心钻具:项目要求每钻进100 m取心10 m,选用川8-4型取心钻具。

钻头:因螺杆密封橡胶圈遇高温会快速老化,导致螺杆钻具功能失效,故该井选择常规牙轮钻头。

2.2 钻孔结构

GR1勘探孔设计采用了三开孔身结构,钻孔结构见表1。其中,0~251 m环状间隙全部用红土回填,4.00~469.47 m环状间隙采用高压水泥浆体系固井,444.60~1502.82 m环状间隙采用耐高温、高压水泥浆体系固井。

表1 GR1勘探孔钻孔结构

序号	施工口径/mm	施工孔深/m	下管直径/mm	下管深度/m	备注
1	600	0~251	426×10	0~251	冲击钻进
2	406	251~469.47	339.7×10.92、 339.7×12.19	4.00~469.47	CMD150T钻进
3	311	469.47~1502.82	244.5×10.03	444.60~1502.82	与339.7 mm石油套管重叠24.87 m
4	215	1502.82~1624.01			裸眼

2.3 泥浆

针对GR1井温度高、压力大的情况,通过对比不同外加剂加量下泥浆性能,摸索出一套适应于勘查区的高温钻井泥浆技术体系^[6-7]。采用钻井泥浆材料为钠基膨润土、AK650、HPAN、801、CMC、KGW-PAM。

(1)耐中高温钻井泥浆配方(温度 $<110^\circ\text{C}$):3%~5%钠基膨润土+1.0%~1.5%AK650+0.5%~1.0%HPAN+1.0%~1.5%801+0.3%~0.5%CMC。

(2)耐高温钻井泥浆配方(温度 $110\sim 160^\circ\text{C}$):3%~5%钠基膨润土+1.0%~1.5%AK650+0.5%~1.0%HPAN+1.0%~1.5%801+0.3%~0.5%CMC+0.1%~0.2%KGW-PAM。

在钻井过程中使用该配方的钻井泥浆,循环钻井液密度、马氏漏斗粘度、含砂量与钻孔深度成比例变化。该钻井液携带岩屑能力优,始终未发生明显分层现象,泥浆性能保持稳定。随着井深的不断增加,地层温度逐步上升,地层温度与泥浆出口温度差

值略微增加,但该泥浆降温效果明显,泥浆密度适宜,泥浆压力控制与地层压力匹配,井壁稳定安全,未出现塌孔和大量漏失情况,顺利地完成了钻井任务。具体泥浆出口温度变化曲线如图2所示。

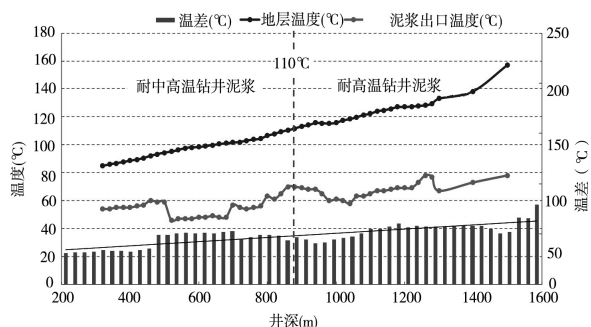


图2 泥浆出口温度随井深变化

2.4 高温固井

经过多批次多温度室内实验研究,探索不同添加剂加量下水泥浆抗高温性能,形成了一套适应于勘查区的高温固井水泥浆技术体系^[8-9]。该水泥浆体系可满足150℃环境下的固井要求,水泥浆稠化时间满足施工需求,高温沉降稳定性好,24 h水泥浆抗压强度达18.54 MPa,在低于-20℃的现场搅拌,高压泵输送灌注,固井质量良好。该水泥配比浆液室内稠化试验效果如图3所示。



图3 稠化效果

通过实验,确定150℃温度下耐高温水泥浆最终配比为:6.7%高温降失水剂CG82L,1.58%高温缓凝剂H40L,0.67%高温稳定剂CF40L,15.8%200目硅粉,0.5%消泡剂GX-1,0.5%HV-PAC。该水泥浆体系API滤失量为16 mL/30min,密度为1.8 g/cm³,3 h稠度达到100 Bc,抗压强度达18.54 MPa,上下水泥浆密度差<0.02 g/cm³。

清洁井壁:GR1井实际完钻井深1624.01 m。该井用 $\varnothing 244.5$ mm \times 10.03 mm石油套管下深444.60~1502.82 m。2020年12月,对该井段进行了固井作业,前置液采用清水+低密度水泥浆组合,冲刷井壁及套管外壁,提高水泥浆胶结质量,固井采用高温固井水泥浆体系,水泥浆设计密度为1.80 g/cm³。

固井步骤:注入5 m³密度为1.01 g/cm³前置液,隔离循环泥浆及固井水泥浆,泵入高温固井水泥浆33 m³,直至井口返出固井水泥浆液,泵入替浆液15 m³,顶替循环管路水泥浆。

3 自喷井形成机理分析及治理技术难点

3.1 机理分析

(1)本次自喷井的形成,客观地讲是一场遭遇战。尽管分析认为,勘查区所在的天阳盆地为新生代断陷盆地,具有盆地传导型兼断裂对流型良好热储地热地质背景,为阴山东西向大断裂与北东向新华夏系汾渭地堑交接部位。根据前人资料,深部存在“低速—高导层”具有温度(600℃)的物理特性,可能是因物质高温熔融,也可能是含水破碎带,说明深部普遍存在热异常区域^[10]。但地质报告中没有详细和准确地表述在2000 m以浅有高压高温地热资源。我们人类的认知科技水平尚未达到预知水平。

(2)在钻进至1593.31 m时井内曾出现过泥浆漏失情况,可能在该处遇到断裂构造带。构造带内源源不断的流体随泥浆经高温岩体上涌,断层作为补水通道将上游水持续补给井内与干热岩发生作用汽化、膨胀、增压,沿井内通道涌向井外,形成带压汽水混合物。

(3)防范保护不规范。由于进行干热岩地热井的施工经验不足,没有预料到在2000 m以浅会有高温高压热水涌出,所以在井口未安装井控装置,当发生井涌时无法在井口有效控制。

3.2 治理关键技术难点

(1)自喷井口水汽温度达到160℃以上,水量达到231.05 m³/h,水柱高达30 m,井口压强约1.12 MPa,在这种环境条件下要实现“可控放喷”是一个极大的挑战。

(2)发生井喷时井内留有6根 $\varnothing 89$ mm钻杆和1套 $\varnothing 159$ mm筒状取心钻具,总长约70 m。如何实现提下钻时井控装置与钻杆的密切配合是治理成功

的关键。井控装置的设计必须能够达到安全提下钻的目的。

(3)井口设计安装有2层套管,外层 $\text{O}426\text{ mm}$ 为表层套管, $\text{O}340\text{ mm}$ 为技术套管。如何在高温高压汽水流喷出的工况下,分别切割这2层套管,并将方箱闸板井控总承安全焊接固定在井口,是实现井控的关键。

(4)注浆压井工艺及高温泥浆材料和配比的选择确定,是最终实现降温、压井的关键。

(5)如何在实现“可喷可控”的基础上,提取井内热能装置可以为今后达到试验发电提供可靠的系统,是实现单井发电功能的关键工艺环节。

(6)经济且有效地选择单井试验发电设备。

4 压井工艺

压井方案^[11-14]经过省内外钻探、地质、机械及安全等领域专家的反复论证,在确保安全且可操作的前提下,施工环节如下。

4.1 关闭环空

(1)切割 $\text{O}426\text{ mm}$ 套管:将 $\text{O}426\text{ mm}$ 的导管固定牢靠,分别在离地面1.5 m处、3 m处环切,然后对角竖切,将 $\text{O}426\text{ mm}$ 导管切出1.5 m的空间。

(2)焊接支撑钢板:在 $\text{O}340\text{ mm}$ 套管离地面1.6 m处焊接内孔为 $\text{O}340\text{ mm}$ 、长宽厚尺寸为 $1050\text{ mm}\times 920\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 的两块铁板对接,铁板上预先割孔,孔径、孔距与方箱一致,作为放置方箱的平台,然后在下面加焊 90° 的4块长角铁竖向焊接加固。

技术难点是:需要克服Q235钢板与N80套管的焊接工艺难题。

(3)切割 $\text{O}340\text{ mm}$ 套管:考虑到 $\text{O}340\text{ mm}$ 套管一旦割开会因喷射水柱造成工作面施工的困难,因此,要把前期工作尽量一次性完成。特别是要将钻机南北两个方向的引流管安装就绪。具体做法是:放喷引流管设置为南北两个方向, $\text{O}273\text{ mm}$ 螺纹钢管,北边伸出井场围墙以外,南边至井场中间,管与管之间用法兰盘连接及焊接,钢管端头安装阀门及向上出口弯头。为了防止放喷引流钢管在高压大流量的汽水混合物的冲击下震动脱节,引发安全事故,在引流管中间相隔几米就设置一个十字地锚加以固定,地锚埋深1.8 m。锚坑直径1 m。用混凝土浇筑加固。钢地锚支撑钢管悬空,用钢卡与钢管联接

固定。

在切割前,还须将 $\text{O}340\text{ mm}$ 套管上部焊接固定抱箍,用4道钢丝绳固定好,以防止切割后在汽水流作用下上蹿或掉落伤人。操作手还需穿高温防护服,用LGK-101Q内置气源逆变等离子切割机切割,大风量鼓风机配合吹散井口蒸汽。切割时先在 $\text{O}340\text{ mm}$ 套管距支撑钢板平面200 mm处环切割透,预留约20 mm的连接部分,后续再拧断脱开。见图4。



图4 切割 $\text{O}340\text{ mm}$ 套管效果

(4)闸板方箱设计与安装:设计的指导思想是在操作井台的下方,完成对现有 $\text{O}89\text{ mm}$ 钻杆的抱合封闭以及对将要下入的 $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆抱合封闭,同时实现南北方向分流引流汽水混合物。当开合闸板闭合时,汽水混合物向南北两个方向分流,操作井台无汽水流干扰。实现井口可控状态,可正常安全拧卸提下钻具。闸板的开合采用液压油缸伸缩实现,利用钻机配备的电动液压控制系统来完成。

抢装方箱闸板时,吊车将方箱伸入吊至井台内支撑钢板上方,随后将 $\text{O}340\text{ mm}$ 套管剩余20 mm的连接距离完全割透,抢险队员立即用气动扳手安装固定方箱(见图5)。然后左右两侧连接放喷管线。

(5)拔除 $\text{O}340\text{ mm}$ 套管,远程液压控制关井:在吊钳的配合下,用已经在井台架内安装好的导链连接 $\text{O}340\text{ mm}$ 套管吊耳,缓慢用力将 $\text{O}340\text{ mm}$ 套管从上方拔除,然后快速合拢关闭方箱闸板,实现关井引流(见图6)。井口达到干净安全,具备提下钻具的工作环境。

4.2 关闭钻具水眼及下钻

要实现“注浆—降温—压井”的目的,必须先将在井口下放至井内合适的位置。具体工序如下:

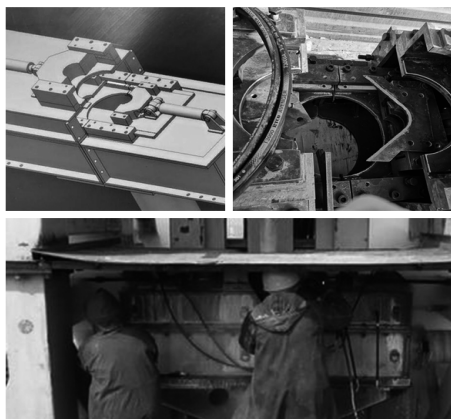


图5 方箱剖面、内部结构、安装效果



图6 井口封闭后双方向引流

(1)连接带旋塞的 $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆:在 $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆上端母扣接旋塞(打开状态),下部公扣接 $\text{O}127\text{ mm}$ 转 $\text{O}89\text{ mm}$ 的转换接头,然后用动力头接好 $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆。将带旋塞的 $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆对准 $\text{O}89\text{ mm}$ 钻杆,下放动力头并上扣。

(2)钻杆内止喷:松开夹紧装置、开闸板,下放钻具到坐吊卡位置,关闭 $\text{O}127\text{ mm}$ 闸板,坐吊卡,关闭旋塞,钻杆内止喷。

(3)连接箭型逆止阀:卡好 $\text{O}127\text{ mm}$ 钻具死卡,防止钻具上窜。再卸开动力头,连接箭型逆止阀。最后,打开旋塞,实现关闭钻具水眼。

(4)打开 $\text{O}127\text{ mm}$ 闸板,下放第一根 $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆至钻台面,第一套旋塞、箭型逆止阀入井,关闭 $\text{O}127\text{ mm}$ 闸板,钻具死卡卡紧,卸开动力头,进行接钻杆操作。

(5)在第二根已经割孔好若干个 $\text{O}10\text{ mm}$ 出浆孔的 $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆上部接好第二只箭型阀,先打开 $\text{O}127\text{ mm}$ 死卡,人员撤离,再开 $\text{O}127\text{ mm}$ 闸板,下放钻具至钻台面,关闸板、坐吊卡、卡死卡,最后经确认无误后再卸开动力头与钻杆的连接(即要保证钻具不上窜,同时也要保证钻具不落井)。

(6)利用方箱闸板开合,连续不断地下入 $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆 151 根,深度 1501.54 m。

4.3 注浆压井

(1)注清水压井试验:在下钻完成后 3 d 内。在 500、1111、1500.54 m 处分别注入清水 5 h 以上,泵压在 1.25~3.75 MPa 之间,井口喷出情况没有改善的迹象,单纯采用清水降温压井的工艺方法难以奏效。

(2)注入泥浆:根据现场条件,经反复研究,初步确定每 100 m^3 压井泥浆配浆材料为:膨润土 7 t,纯碱 0.2 t,烧碱 0.2 t,聚阴离子纤维素(PAC-HV) 0.3 t,重晶石粉 27 t(密度 4.0 g/cm^3 以上)。粘度 103 s。要求膨润土必须预水化 24 h,备用。

首次注浆时先开泵注水 100 min,井口出水温度降至 $90\text{ }^\circ\text{C}$,然后迅速注入密度 1.15 g/cm^3 的泥浆约 50 m^3 ,24 min 后井口机引流管汽水逐渐停止溢流,压井成功。派专人定时测量井口水位变化,发现井内水位在缓慢上升后,又分 2 次共补浆 17 m^3 。停止溢流 6h 后井内开始复喷。

(3)再次注浆:经过分析研究,专家们认为首次注浆压井,实现“降温—减压—注浆—控制井涌”这一压井工艺方法是正确的,是治理高温地热井井涌最有效安全的方法。但是稳定时间太短,不能够满足提钻要求的时间,以及安装采油管 and 采油树的时间,需要改进泥浆材料和配比。

为此,在后续的泥浆配置中加入了大量的复合堵漏材料。二次注浆 70 m^3 ,再次压井成功,井内水位下降至 48 m。为了防止复喷,在 2 d 内又陆续注浆 12 次,累积补充注浆量 187 m^3 。井内液面始终保持在 55 m 左右,彻底实现了井内压力平衡。直至后续提钻和下入采油管 and 安装采油树,井内再没有复喷。

4.4 提钻并下入 $\text{O}89\text{ mm}$ 采油管

(1)提钻前再次注入密度 1.15 g/cm^3 的泥浆约 10 m^3 ,井内水位稳定在 55 m。

(2)根据 $\text{O}127\text{ mm}$ 钻杆体积计算,每提出一根钻杆大概需要注入泥浆 1 m^3 。因此,为了保持井内压力平衡,采用了边提钻边注浆的方式,缓慢提钻至 600 m。在井内钻具小于 600 m 后,加快了提钻速度。整个提钻过程历时 628 min。

(3)提钻结束后,观测井内水位,稳定没有变化。随后立即开始下入 $\text{O}89\text{ mm}$ 油管。为了节省时间,采用了吊车下钻法,共计下入 $\text{O}89\text{ mm}$ 油管 183

根,深度1504.45 m,历时21.42 h。

4.5 安装采油树

(1)拆掉井口方箱,将支撑钢板切割去除,卸除剩余半截 $\text{O}340$ mm套管,此环节操作时不能损坏 $\text{O}340$ mm套管母接箍和丝扣。

(2)安装底法兰,钢圈涂抹黄油后放入钢圈槽,注意钢圈槽绝对不能碰伤,然后安装好采油树,关闭相应闸门,完井成功。

5 综合利用

GR1高温高压自喷井实现“可控可喷”后,山西省地质勘查局党委迅速行动,成立了工作专班,在充分调研和论证的基础上,以科技成果转化为载体,进一步开展放喷试验和示范电站建设工作。

5.1 放喷试验

GR1高温高压自喷井为持续喷发,根据放喷试验资料,焖井状态下,井口稳定压强1.12 MPa,稳定温度 $56\text{ }^{\circ}\text{C}$;放喷状态下井口稳定压强0.8 MPa,稳定温度 $160.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,稳定流量 $231\text{ m}^3/\text{h}$ 。通过试验表明井底含水层的压力传递快,水动力场稳定、补给条件好、水量丰富。

5.2 试验示范电站

电站坚持科研试验属性,采用“小功率、多机组”的方式,探索试验区域地热水质与发电工艺适应性,为下一步大规模工业化生产做前期试验研究。经综合调研研究,选择2台小功率机组用于一期试验电站。

1号发电机组设计装机功率300 kW,主要采用的是ORC有机朗肯循环螺杆膨胀机发电技术,通过回收高温地热水中的热量进行发电;其技术优势为自主研发的混合工质,做功能力强,内部循环工质零泄露,采用同步发电机组,不消耗无功功率,可达到节能、减排、增效等多重经济和社会效益。

2号发电机组设计装机功率280 kW,主要采用的是ORC有机朗肯循环透平膨胀机发电技术,整个发电系统主要包括ORC发电系统、冷却水系统、加药系统及空压机系统4部分组成;其主要特点为可靠性高、模块化拼装、自动并网、高度集成、高发电效率、可实现远程控制。

6 结语

从发现自喷井→实现“可控可喷”→建成试验电站,高温高压自喷井综合治理工艺的成功实践,不仅填补了国内高温高压持续自喷条件下压井工艺的空白,更为后续成果的实践运用提供了重要技术保障。目前,该项目在建成投产试验示范电站的基础上,将进一步开展深部高温地热资源勘查专项工作。同时,将建设地热资源勘查与开发利用省级重点实验室,探索“政产学研用”新模式,建设成为集地热发电、供暖、养殖、疗养、教学为一体的综合性示范基地。

参考文献:

- [1] 姚晓敏,赵志成.贺天才在大同天镇调研干热岩勘查项目[N].山西日报,2020-09-26(002).
- [2] 岑敏,董树文,施伟,等.大同盆地形成机制的构造研究[J].地质评论,2015,61(6):1235-1247.
- [3] 陈国顺.对大同断陷盆地形成演变过程的几点认识[J].华北地震科学,1983,1(2):31-36.
- [4] 杨裕利.桑干河盆地新构造运动[J].测绘地理信息,1989(4):60-64.
- [5] 孟令超,吴芳,马述江.山西断陷盆地成因机制分析[J].华北水利水电学院学报,2013,4(5):72-76.
- [6] 汤松然,陶士先.高温地热钻井泥浆研究[J].西部探矿工程,1995(1):1-5.
- [7] 何世明,刘崇建,黄桢,等.温度与压力对水泥浆稠化时间的影响规律[J].钻井液与完井液,1999(2):25-27.
- [8] 李全双,王治国,邹书强.适用于干热岩固井抗高温高强度水泥浆体系研究[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(10):164-167,169.
- [9] 刘会斌,李建华,庞合善,等.青海共和盆地干热岩GR1井超高温固井水泥浆技术[J].钻井液与完井液,2020,37(2):202-208.
- [10] 周文龙,胡祥云,谢敬涛.大同盆地干热岩勘探研究[C]//中国地球物理学会,2019.
- [11] 王鹏涛,李红岩,刘斌,等.高温高压自喷地热井装置:CN212250012U[P].2020-12-29.
- [12] 邓泽穆.西藏羊八井地热田钻井井喷原因与压井工艺[J].西部探矿工程,1995(1):59-60,63.
- [13] 许超.干热岩井施工关键技术研究[J].中国煤炭地质,2018,30(S1):94-96,104.
- [14] 汤松然.西藏那曲热田ZK1102井多层热储敞口压井技术[J].探矿工程,1991(6):18-21.