

编者按:2020 年初,中国地质科学院勘探技术所启动了执行周期为 2 年的所管科技项目,旨在加强科技创新力量,培育关键技术成果,拓宽青年技术人员成长渠道与空间,建立好科技创新人才梯队。项目涉及内容有深水深井钻探关键器具装备研究、深部热能热交换技术研究、特深科学钻井关键技术研究、重要钻探技术标准在“一带一路”的推广、钻探工程信息化建设等。本专栏收录了其中几个项目的初步研究成果,以促进这些成果的推广应用及研究工作的深入。

地热连通井热交换隔离开采技术研究综述

侯 岳, 刘春生, 刘 聃

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:近些年,随着地热资源不断开发和利用,无论是单井开采还是定向井和直井结合开采,由于井筒和地层没有实现完全封隔,注水开采地热过程中,注入的地表水跟地下水将产生交换,导致地下水资源的污染以及大量尾水带来的环保隐患。尤其随着城市大量地热资源的开发,这一问题将显得尤为突出。本技术研究将通过地热连通井热交换隔离开采技术的设计与实施,分析地热连通井的热交换效率和井筒与地层的封隔技术手段,建立一套热交换隔离开采技术方法,实现地热井开采过程中取热不取水,为城市周边地热资源的开发提供基础数据和技术支撑。

关键词:地热资源;连通对接井;化学凝胶密封;热交换

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)07-0041-06

Review of research on isolated heat exchange technology with connected geothermal

HOU Yue, LIU Chunsheng, LIU Dan

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: In recent years, geothermal resources have seen continuous development and utilization. With either single well recovery or recovery by the well set of a directional well connected with a vertical well, injected surface water and groundwater will exchange in the process of water injection exploitation of geothermal resources, resulting in the pollution of groundwater resources and a large number of environmental hazards brought by tail water since the well bore and the stratum are not completely isolated. It is specially true with the large scale development of geothermal resources in the city. Through the design and implementation of isolated heat exchange technology with connected geothermal wells, this paper analyzes the heat exchange efficiency of connected geothermal wells and the sealing measures between the well bore and the stratum to establish a set of isolated heat exchange and recovery methods, so that heat can be extracted without taking out ground water in the process of geothermal well recovery; thus providing basic data and technical support for the development of geothermal resources around the city.

Key words: geothermal resources; connected well; chemical gel seal; heat exchange

0 引言

地热能源是一种新型的环保型能源,是集“热、矿、水”三位于一体的能源,也是清洁的可再生能源。目前已广泛应用于地热采暖、保健、康复医疗、温泉

洗浴以及养殖等方面,取得了良好的社会效益和经济效益,具有良好的发展潜力和前景^[1-5]。近些年,随着地热资源不断开发和利用,无论是单井开采还是定向井和直井结合开采,由于井筒和地层没有实

收稿日期:2020-05-08 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.07.007

基金项目:中国地质科学院勘探技术研究所科技项目“地热连通井热交换隔离开采技术研究”(编号:YB202001)

作者简介:侯岳,男,汉族,1985 年生,高级工程师,应用化学专业,长期从事钻井液和定向钻井技术研究及现场施工工作,河北廊坊市金光道 77 号,271399879@qq.com。

引用格式:侯岳,刘春生,刘聃.地热连通井热交换隔离开采技术研究综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):41-46.

HOU Yue, LIU Chunsheng, LIU Dan. Review of research on isolated heat exchange technology with connected geothermal[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(7):41-46.

现完全封隔,注水开采地热过程中,开采的热水难以实现100%回灌,同时回灌尾水过程中易窜层污染,导致地下水资源的污染以及大量尾水带来的环保隐患。尤其随着城市大量地热资源的开发,这一问题将显得尤为突出。为了解决这一问题,有必要对现有的地热井钻完井技术进行研究,建立新的地热井开采方式,避免地热开采过程中与地下水直接接触,实现只从地层取热不取水,有效解决城市周边地热资源开发利用所存在的困扰,为推动城市周边地热资源的利用提供技术支持。

1 地热能源开发现状

地热的利用主要包括高温热能发电和中低温热能两种直接利用方式。据美国地热资源委员会(GRC)调查,全球18个国家开发地热总装机容量在5827.55 MW以上,美国、菲律宾、墨西哥、意大利、新西兰、日本和印度尼西亚等国家装机容量已超过100 MW。我国高温地热资源主要用于发电,中低温地热资源主要用于非电直接利用,如供暖、水产养殖、旅游疗养。利用规模上,目前我国位居世界首位,并以每年近10%的速度稳步增长。近年来,由于城市经济的发展和对外环境质量要求的提高,以及勘探技术水平的进步,城市周边地区地热资源开发进入了一个新的阶段,地热井数量快速增加,尤其是水热型地热能的开发更是受到了热捧。水热型地热能的开发利用主要用于供暖、温泉疗养、种植等方面,该方式主要以抽取深层地下热水的形式进行。由于通过该方式开发地热能简单方便、经济性好,近十年在国内发展迅速,特别是在地热供暖利用方面,北京、天津、山东、陕西咸阳以及雄安新区等地开发水热型地热能用于供暖已形成规模化发展^[6-9]。

近年来,随着环保要求的进一步提高,一些地区也相继出台相关文件严格限制地下热水的抽采;水热型地热能供暖项目要求“以灌定采”确保100%实现地下水的同层回灌,所有地热井全部落实地热井尾水同层回灌,同时对依法新设地热井一律按“一采一灌”原则进行审批设置。实现地热资源可持续利用最有效的途径是回灌技术的应用,它不仅可以提升地热井的水位,还可以延长地热田的使用寿命。

2 地热开采技术现状

2.1 地热井钻井技术

近年来,由于勘探和开发地热的需要,地热井钻井技术水平有了较大提高。地热开发初期,因为没有大型的钻凿设备,机具又很简陋,只能沿用打浅(冷)水井的工艺技术。成井深度浅,出水量和水温较低,而且也无法进行深部地热的勘探开发。地热井的钻井急需引进先进的工艺技术和机具,以达到其口径大、井深、出水量大和出水温度高的要求。石油钻井技术的引进,有效解决了这些难题。目前地热钻井深度超过4000 m、开孔口径445 mm、终孔口径152~216 mm、井深不断增加和井身结构的不断优化进一步提升了地热井开采出水量和出水温度,目前出水量可达200 m³/h、出水温度超过95℃,地热井钻井方式由最初的直井过渡到定向井,现在已逐步推广应用成熟的地热对井技术(一采一灌)。地热对井技术即采用定向井和直井组合,直井作为开采井,定向井作为注入井(回灌井),直井开采的热水在有效利用后,剩下的尾水(凉水)由定向井回灌入地层,这样就形成一套循环系统,既能充分利用地热资源,也能够保持地下水平衡^[15-17]。随着地热井钻井技术的不断发展,对接井技术也已经被逐步推广应用到地热井钻井施工中。

2.2 地热开采存在的问题

近年来,地热资源已经作为一种清洁能源被人们高度认可,也进行了规模化开发。大量地热开采新技术和新装置得到了推广应用,比如水平井开发、对井开发、地热回灌、井下换热装置等^[18-19],这些技术的应用进一步丰富了地热资源的开发手段,有效地提高了地热资源的利用效率,一定程度上减少了地下水资源浪费和失衡。但是,如何在开采地热能源的同时,最大程度上保护地下水资源,在不扰动地下热水系统的情况下实现保护性开采、真正实现“取热不取水”成为了地热开发一直尝试解决的技术难题。从可持续发展和环境保护方面分析,目前地热开采仍然存在以下一些问题^[20-21]:

(1)地下水水质保护不足。地热利用目前主要以地下热蒸汽和地热水为主,干热岩应用甚少,地下热蒸汽和地热水开采都需要进行地下水循环或回灌,一定程度上会改变地下水水质。一些不规范开采对地下水水质和水量补给平衡影响更大。

(2)水温的回归。对储层的热承载能力研究不清,过量开采,地热补给不平衡,导致水温无法回归至原来的恒温特征,致使局部地段出现热污染,从而

影响生态环境和农业发展。

(3)热储压力的降低。热储中岩溶裂隙的发育是非常不均一的,存在各向异性,一旦从地层直接取水来获得热能的话,即使将开采的所有地热流体全部回灌到热储中,仍然不能完全克服热储压力的降低,热储压力的降低将会影响产热量。

(4)地热利用对环境的副作用。在利用地热资源的过程中,如果外排不回灌易造成地热水资源的衰减,过量开采甚至造成地面沉降,地下水有害成分将对大气、水环境、土壤环境以及地质环境造成损害和污染,尾水中热量释放易造成热污染,如果在城市周边尾水外排还会增加城市污水管网负担;如果采取对井回灌,回灌流体注入热储层过程中,与储层中的原有热流体不断相互作用,同时不断吸取围岩热量,热传递作用使得原先处于天然状态下的温度场会在一定含水层空间范围内被打破,引起热储层局部热储温度降低,同时回灌尾水中的悬浮颗粒以及回灌过程中造成的储层孔隙内颗粒运移将会形成回灌堵塞,降低热储层的渗透率。

综上所述,导致地热开发过程中出现上述问题的根本是开发地热过程中通过获取地下热水来取得热能,而不是单纯通过地下热交换的方式获得地下热能。因此,要想彻底解决地热开发过程中所存在的上述问题,就必须摒弃“取水取热”的开采方式,利用“取热不取水”的开采方式进行地热开发。

2.3 取热不取水技术

目前,各种“取热不取水”的开采方法被逐步发明,并试图推广到地热开发中。井内换热技术就是其中的一种,该技术主要是通过钻机向地层一定深度(1500~3000 m)高温岩层钻孔,在钻孔中安装密闭的金属换热器,通过换热器内工作介质循环将地下深处的热能导出。然而,这种开采方式在应用过程中出现了井内出水温度低,采热量受限,井内换热器堵塞等一系列的技术问题^[18-19]。

为了进一步提高取热效率和采热量,“U 型”地热对接井开发技术被尝试应用到地热开发中,地热对接井采用金属套管全封闭,利用外部水流介质循环获取岩层地热能,直接利用井筒与地层进行换热。该技术与井内换热技术对比,最大的好处能够实现井筒与地层的直接换热,不需要在井筒内进行二次换热,同时通过增加水平段的长度可以提高热储层的交换长度,最终将大大提升井内出水温度和循环

水量。目前该技术已被研发并应用到地热开发中,2019 年,河北工程大学新校区“取热不取水”实验项目,利用复杂的定向钻探与精准对接工艺,施工了垂直深度 2500 m、水平距离 684 m 的大型对接井,实现总换热长度 5499 m;地热井采用金属套管全封闭,利用外部水流介质循环获取岩层地热能,金属套管里面的循环水与地下水不发生任何接触,实现了真正意义的“取热不取水”,成为地热资源可持续发展探索的新方向;通过换热实验,实际测量“U 型”对接井换热量为 1565 kW,在采用燃气调峰补充的模式下,能够满足 8~10 万 m² 节能建筑物供暖,一个供暖季可节约标准煤 1040 t,减少二氧化碳排放 2725 t、氮氧化物 7.8 t、二氧化硫 8.8 t、粉尘 70 t,环境效益显著。但是该项目最大的技术问题还没有彻底实现真正意义上的井筒与地层隔离,虽然地热对接井全部下入金属套管,但是水平井套管段并没有进行固井作业,同时垂直井对接腔室也是地层直接裸露,当利用“U 型”管路进行水循环换热的时候,在水平井和垂直井对接处,地表注入水与地层之间还是会一定程度上发生交换。因此,地热对接井开发要实现真正意义上的“取热不取水”,就必须将对接井筒与地层彻底隔离开,而彻底隔离的关键就在水平井与垂直井对接处的密封处理。

3 地热连通井热交换隔离开采技术

3.1 热交换隔离开采技术思路

地热连通井热交换隔离开采技术立足于定向对接井技术,在对接井技术的基础上,采用化学凝胶封堵技术,在保证采水尾管与地层彻底隔离的同时,尽可能减少尾管与地层的封固长度。该技术主要以一口垂直井为中心作为目标靶井钻至地热水层底板以下 5~10 m,并在井底进行扩腔处理;该垂直井对接腔室完井直径的大小和深度依据当前成熟的基岩扩腔技术和连通对接技术要求而定。水平井井位根据地热水层的分布特征布置于垂直井周围,保证水平段尽可能多地穿越地热水层的基础上,精确钻进至垂直井井底对接腔室内,并与之精准对接连通,水平井生产套管顶部采取管外封隔器封隔、底部采用化学凝胶密封技术与垂直井形成可靠密封,将“U 型”采热通道与地层彻底隔离开,从水平井套管内注入冷水,经水平井段换热,从垂直井采热水管柱进行热水抽采。地热连通井热交换隔离开采如图 1 所示。

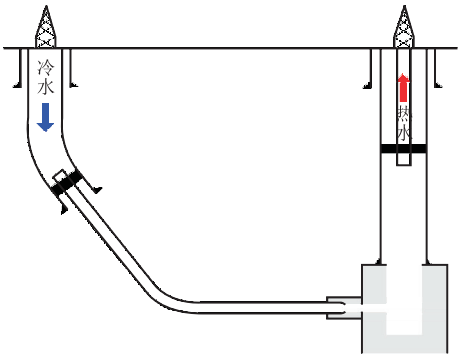


图 1 地热连通井热交换隔离开采示意
Fig.1 Isolated exploitation of heat exchange
in geothermal connected wells

3.2 定向对接技术

为了实现水平井与垂直井的精准对接,在对接施工过程中使用“慧磁”定向钻井中靶引导系统进行对接定向钻进。“慧磁”定向钻井中靶引导系统利用钻头后方的磁接头营造出一个人工旋转磁场,采用位置靶点的探管捕获该旋转磁场的波形变化,最终通过软件解析计算出钻头与探管两者之间的空间位置关系,从而引导钻头准确进入靶区。“慧磁”定向钻井中靶引导原理如图 2 所示。目前,“慧磁”系统测量距离可达 100 m,在对接施工过程中,在“慧磁”仪器接收不到信号之前,定向井工程师可根据设计井眼轨迹进行定向钻进,当“慧磁”探管接收到钻头后方的磁接头发出的磁场信号后,利用软件解析信号并计算钻头与探管的空间关系后,定向井工程师根据计算结果进行井斜和方位调整,最终实现钻头精确钻入垂直井对接腔室中的预定位置。

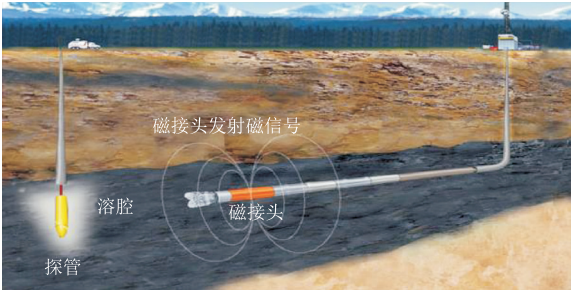
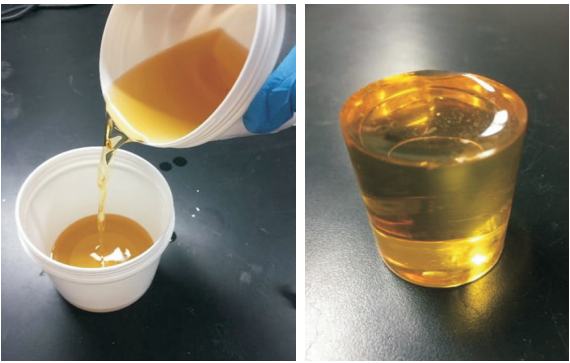


图 2 “慧磁”定向钻井中靶引导原理
Fig.2 Guiding principle of SmartMag

3.3 化学凝胶密封技术

化学凝胶密封技术利用可以固化的水溶性树脂凝胶作为凝胶基液,通过优选膨胀剂、固化剂、缓固剂以及加重剂材料构建一套弹性膨胀凝胶体系,凝胶体系固化前如图 3 所示。



(a) 固化前 (b) 固化后
图 3 凝胶体系固化前后对比
Fig.3 Gel before and after curing

化学凝胶体系具有优异的封隔性能,尤其在胶结强度与弹性回复率方面明显优于常规水泥浆,能够有效预防环空带压问题。目前,化学凝胶密封技术被大量应用于石油勘探开发中,主要用于高强承压、酸性气体腐蚀条件下地层与井筒的封隔,以及常规水泥浆所不能满足的施工作业^[25-29]。化学凝胶密封主要有以下技术特点:

- (1)具有较低的粘度,易于进入微孔也易于进入大的孔隙进行充填,在地层裂缝或套管破损处及井筒中固化,实现在井筒与地层条件下的高强承压。
- (2)具有良好的化学粘结和胶结性能,可以通过高压挤入的方式进入地层微孔实现更加致密的层间胶结和界面胶结,达到对地层微裂隙和微裂缝的封堵。
- (3)抗压强度达到 80 MPa,可依据温度的变化,对凝胶稠化、固化时间进行调整,也可以通过凝胶类型和固化材料类型选择进行强度改善和调节。
- (4)具有一定的硬度和脆性,也具有一定的韧性,可以方便地实现在井下条件下的钻塞作业,同时最大程度上防止钻塞作业对密封性能的影响。
- (5)连续相固化体系,固化体中没有孔隙,具有较好的封堵和密实的隔离效果,满足工程对高压致密性的要求。

鉴于上述化学凝胶的特点,利用化学凝胶进行水平井和垂直井对接处的封堵密封,可以在较短封固段的条件下实现高强承压密封,减少封固段的长度来有效提升水平段套管的换热效率,同时在钻穿水平井尾管附件进行二次连通时,化学凝胶的韧性和胶结性可以防止钻进过程中封固段受外力振动而发生破坏,从而导致密封失效。

4 地热连通井热交换隔离开采技术应用前景

2006 年,我国颁布《可再生能源法》;2010 年,《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)进行了修订;2013 年,国家能源局、财政部、国土资源部、住房和城乡建设部联合发布了《关于促进地热能开发利用的指导意见》。地热能作为一种无污染绿色能源必将在二氧化碳减排、打造天蓝、水绿、山青的人居环境中发挥愈来愈重要的作用^[30]。随着人们环境意识的不断加强,可持续发展的概念已经深入人心。和许多自然资源一样,地热能的开发也必须遵循可持续发展的原则。但是,目前国内多数地热系统的开发利用不能满足可持续发展的要求。地热连通井热交换隔离开采技术不同于常规的地热开采方式,而是单纯地通过热交换来从地层中获取热量,致力解决目前地热开发过程中所存在环境保护和可持续发展的问題,该技术成功研发和应用将大大促进城市周边地热资源的开发,为城市绿色发展提供真正清洁的能源支持,具有非常广阔的应用前景。

5 结语

地热连通井热交换隔离开采技术遵循“取热不取水”的宗旨,以连通对接井为技术基础,引入化学凝胶密封技术实现采热通道与地层的隔离,可以确保地热开发注水采热过程中,地表注入的冷水不与地层接触,实现只从地层取热不取水,有效解决城市周边地热资源开发利用所存在的环境保护问題困扰,为推动城市周边地热资源的利用提供技术支持,在不引起环境问题且不影响热储压力下降的前提下,相当长的时间内从地热系统稳定地、最大限度地提取热能,真正实现地热能源的清洁可持续开采。然而,该技术能否成功推广应用很大程度上取决于换热效率和取热量。因此,地热连通井热交换隔离开采技术在解决“取热不取水”的基础上,要从井身结构选择、地热储层特性、水循环换热工艺等方面充分考虑换热效率,确保井内出水量和出水温度满足地热开发经济要求,最终真正实现商业化推广应用。

参考文献(References):

- [1] 刘思达,王树芳,刘久荣.地热资源的可持续管理[J].岩土工程技术,2013(3):131—136.
LIU Sida, WANG Shufang, LIU Jiurong. Sustainable management of geothermal resources[J]. Geotechnical Engineering

Technique, 2013(3):131—136.

- [2] 张金华,魏伟,杜东,等.地热资源的开发利用及可持续发展[J].中外能源,2013(18):30—35.
ZHANG Jinhua, WEI Wei, DU Dong, et al. Exploitation and sustainable development of geothermal resources[J]. Sino—Global Energy, 2013(18):30—35.
- [3] 申建梅,张宏达,陈宗宇,等.地热资源管理与可持续发展[J].地球学报,2000,21(2):140—141.
SHEN Jianmei, ZHANG Hongda, CHEN Zongyu, et al. Geothermal resource management and sustainable development[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2000,21(2):140—141.
- [4] 关凤峻,陈小宁,李继江.中国地热能开发的成就与展望[J].地热能,2010(6):3—8.
GUAN Fengjun, CHEN Xiaoning, LI Jijiang. Achievements and prospects of geothermal energy development in China[J]. Geothermal Energy, 2010(6):3—8.
- [5] 申恒明.我国地热能开发利用现状及发展趋势[J].科学技术创新,2019(14):20—21.
SHEN Hengming. Development and utilization of geothermal energy in China[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(14):20—21.
- [6] 廖忠礼,张予杰,陈文彬,等.地热资源的特点与可持续开发利用[J].中国矿业,2006,15(10):8—11.
LIAO Zhongli, ZHANG Yujie, CHEN Wenbin, et al. Characteristics and sustainable development and utilization of geothermal resources[J]. China Mining Magazine, 2006,15(10):8—11.
- [7] 梁龙豹.洛阳市的地热资源及合理开发利用分析[J].地下水,2015,37(6):40—42.
LIANG Longbao. The analysis of terrestrial heat resources and exploration and utilization in Luoyang city[J]. Underground Water, 2015,37(6):40—42.
- [8] 刘春华,王威,卫政润.山东省水热型地热资源及其开发利用前景[J].中国地质调查,2018,5(2):51—56.
LIU Chunhua, WANG Wei, WEI Zhengrun. Analysis of hydrothermal geothermal resources and its prospect of development and utilization in Shandong[J]. Geological Survey of China, 2018,5(2):51—56.
- [9] 林叶.北京地区地热资源开采评价[J].岩土工程技术,2012,26(1):6—8,13.
LIN Ye. Evaluation of the exploitation of geothermal resources in Beijing region[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2012,26(1):6—8,13.
- [10] 林建旺,刘小满,高宝珠,等.天津地热回灌试验分析及存在问题[J].河南理工大学学报(自然科学版),2006,25(3):200—204.
LIN Jianwang, LIU Xiaoman, GAO Baozhu, et al. Analysis and discussion on geothermal reinjection test in Tianjin[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2006,25(3):200—204.
- [11] 张珂.地热井采灌失衡的解决途径及工程应用[J].煤气与热力,2015(6):3—5.
ZHANG Ke. Solution to imbalance between exploitation and recharge of geothermal wells and its engineering application[J]. Gas & Heat, 2015(6):3—5.

[12] 孙立生.地热回灌技术探讨及应用实例[J].中国新技术新产品,2018(18):65—66.
SUN Lisheng. Discussion and application of geothermal reinjection technology [J]. China New Technologies and New Products, 2018(18):65—66.

[13] 刘久荣.地热回灌的发展现状[J].水文地质工程地质,2003,30(3):100—104.
LIU Jiurong. The status of geothermal reinjection[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003,30(3):100—104.

[14] 崔国圆.关于山东省地热水回灌试验的应用研究[J].山东国土资源,2019,35(7):64—71.
CUI Yuanyuan. Study on the application of geothermal tail water recharge experiment in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2019,35(7):64—71.

[15] 邵俊琪.天津市地热井钻进与成井工艺[J].探矿工程,2001(S1):202—204.
SHAO Junqi. Drilling and completion technology of geothermal well in Tianjin[J]. Exploration Engineering, 2001(S1):202—204.

[16] 武程亮.利用定向井开发山东地热资源[J].山东煤炭科技,2016(1):192—194.
WU Chengliang. Exploitation of geothermal resources in Shandong using the directional well[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2016(1):192—194.

[17] 陈建兵,王振福.关中盆地地热钻井施工常见问题预防及处理方法探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):21—27.
CHEN Jianbing, WANG Zhenfu. Prevention and treatment of common problems in geothermal drilling in Guanzhong Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):21—27.

[18] 张杰,胡洋,张瀚,等.多层 U 型地热井及开采方法:CN201810005437.2[P]. 2018—06—29.
ZHANG Jie, HU Yang, ZHANG Han, et al. Multi-layer U-shaped geothermal well and exploitation method: CN201810005437.2[P]. 2018—06—29.

[19] 窦斌,田红,高辉.一种干热岩地热开采方法和装置:CN201710106298.8[P]. 2017—06—20.
DOU Bin, TIAN Hong, GAO Hui. A method and device for geothermal exploitation of dry hot rock: CN201710106298.8 [P]. 2017—06—20.

[20] 高剑,张进平,孔祥军,等.深部地热资源开采对浅层地下水的的影响分析[J].城市地质,2017,12(1):56—58,64.
GAO Jian, ZHANG Jinping, KONG Xiangjun, et al. The influence of exploiting deep geothermal resources on shallow groundwater[J]. Urban Geology, 2017,12(1):56—58,64.

[21] 孙艺伟.地热资源的利用及其面临的若干问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):44—47.
SUN Yiwei. Geothermal resources utilization and the relative issues[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(10):44—47.

[22] 卜宪标,冉运敏,王令宝,等.单井地热供暖关键因素分析[J].浙江大学学报(工业版),2019,53(5):957—964.
BU Xianbiao, RAN Yunmin, WANG Linbao, et al. Analysis of key factors affecting single well geothermal heating[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(5):957—964.

[23] 孔彦龙,陈超凡,邵亥冰,等.深井换热技术原理及其换热量评估[J].地球物理学报,2017,60(12):4741—4752.
KONG Yanlong, CHEN Chaofan, SHAO Haibing, et al. Principle and capacity of deep-borehole heat exchangers[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017,60(12):4741—4752.

[24] 韩二帅,张家护,鲁冰雪,等.中深层地热能供热技术综述及工程实例[J].区域供热,2019(2):79—83,95.
HAN Ershuai, ZHANG Jiahu, LU Bingxue, et al. Summary and engineering cases of medium-depth geothermal heating technology[J]. District Heating, 2019(2):79—83,95.

[25] 张滨海,王晓亮,许明标,等.用于预防环空带压的弹性膨胀凝胶的研制与现场应用[J].长江大学学报(自科版),2018,15(7):62—64.
ZHANG Binhai, WANG Xiaoliang, XU Mingbiao, et al. Development and field application of elastic expansion gel for preventing annulus pressure[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2018,15(7):62—64.

[26] 张易杭,程立,廖锐全,等.环氧基封隔材料的性能影响因素探究[J].塑料工业,2018,46(9):100—103.
ZHANG Yihang, CHENG Li, LIAO Ruiquan, et al. Study on the influence factors of the properties of epoxy based sealing materials[J]. China Plastic Industry, 2018,46(9):100—103.

[27] 杨浩,魏学斌,高波,等.高温—高压—低弹性复合固井材料研究综述[J].钻采工艺,2012,35(5):35—39.
YANG Hao, WEI Xuebin, GAO Bo, et al. Review of the research on high temperature, high pressure and low elasticity composite cementing materials [J]. Drilling & Production Technology, 2012,35(5):35—39.

[28] 吴柏志,张琪,杜勇,等.桩西地区炮眼封堵技术[J].油田化学,2003,20(6):106—108.
WU Baizhi, ZHANG Qi, DU Yong, et al. A perforation sealing technology for water control in Zhuangxi of Shengli [J]. Oilfield Chemistry, 2003,20(6):106—108.

[29] 滕兆健,汤少兵,安少辉,等.新型固体增韧防窜剂[J].钻井液与完井液,2014,31(6):62—65.
TENG Zhaojian, TANG Shaobing, AN Shaohui, et al. Study and application of a new solid toughening anti-channeling agent[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014,31(6):62—65.

[30] 张进平.北京市地热资源开发利用及远景分析[R].北京:北京市地质工程勘察院,2013.
ZHANG Jinping. Development and utilization of geothermal resources in Beijing and its prospective analysis[R]. Beijing: Beijing Institute of Geological & Prospecting Engineering, 2013.

(编辑 王建华)