

2018年地热勘探开发热点回眸

马峰^{1,2}, 王贵玲^{2*}, 魏帅超², 孙占学³

1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083
2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061
3. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 南昌 330013

摘要 2018年地热领域研究热点纷呈:世界各国在地热发电领域发展迅猛,中国面临着很大的机遇和挑战,地热勘查逐步走向精细化,地热开发逐步走向集约化,地热利用逐步走向综合化。地热成为地质界真正的热点,封闭式井下换热技术、采灌均衡地热评价技术、地热-太阳能等混合能源开发利用等方面相关技术和规范不断完善,在理论方面,地热开发过程与微地震的发生之间的机制认识更进一步,干热岩开发理论更加深入,此外,围绕地热流体的生态环境、微生物以及油田地热开发方面也呈现出创新性的见解。

关键词 地热;井下换热;采灌均衡;增强型地热

人类的生存与发展和能源有密切关系,人类的一切经济活动和生存都依赖于能源的供给。《世界能源蓝皮书:世界能源发展报告(2018)》出版,对世界经济形势、各国能源政策等各种因素对世界能源局势所产生的深刻影响进行了深入分析。国际上,受全球贸易争端与摩擦加剧、贸易保护主义升温影响,国际油价动荡起伏。“2018国际能源变革论坛”主题为“能源——为美好生活”,探讨构建清洁低碳、安全高效的能源体系。清洁可再生能源是人类的未来,近年来,地热能作为清洁能源的重要组成部分逐渐被人们所熟知。2018年地热领域的热点颇多,集中在:提高资源探测精度方面,建立高精度的三维地质模型;提高资源评价的可信度方面,建立采灌均衡条件下的评价技术体系;提高地热利用效率方面,攻关地热高效换热与安全利用技术与装备。除此之外,水热型地热探测深度逐步加大,探测

手段呈综合化;干热岩型地热,国际上不断进行储层建造与采热发电的尝试,国内干热岩初步探获的高温岩体,相关后续示范基地建设方案正加紧谋划;国内地热新闻报道层出不穷,《中国地热能发展报告(2018)》正式发布,中国地热勘查开发逐步进入了规范发展的时期,地热发展的春天来了。

1 封闭式井下换热技术由浅层走向深层

李四光在20世纪70年代就提到:“我们将来要想一种办法光取热不取水,保护地质环境。”井下换热技术就是在取热不取水的情况下实现热能的可持续利用,近年来越发受到关注。所谓封闭式井下换热技术是指不直接开采地下热水,而是通过封闭系统内的工质在井下与地热流体或高温岩石进行热交换,并把从

收稿日期:2019-01-05;修回日期:2019-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41602271,41741018);中国地质调查局地质调查项目(DD20189112);中国地质科学院水文地质环境地质研究所基
本科研业务费资助项目(SK201501)

作者简介:马峰,高级工程师,研究方向为地热资源探测与评价,电子信箱:mf-1203@163.com;王贵玲(通信作者),研究员,研究方向为地热资源评价、
深部地热开发等,电子信箱:guilingw@163.com

引用格式:马峰,王贵玲,魏帅超,等. 2018地热勘探开发热点回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(1): 134-143; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.01.014

地下获取的热量传输到地表以供利用的技术。封闭式井下换热技术已经在浅层地源热泵中得到广泛应用,但在中深层地热能源开发中的应用还处于初级实验阶段。研究开发只取热不取水的封闭式高效井下换热技术,是进一步推广中-深层地热资源开发利用的迫切需要。

近年来,井下套管换热技术被众多媒体报道,或被称为干热岩地热能、地岩热技术,有时也被称为深层单井封闭式旋流地源热泵技术,相关技术和工艺一度处于保密状态,对于换热器材料、循环介质、取热量极限等关键参数一直没有给出明确的答案。在2018年度地热领域内举办的多次高层论坛上,相关科研报告就此进行了详细的研究分析,逐渐解开了封闭式单井换热技术的奥秘。系统主要由地下换热系统、水循环换热系统、热泵机组和用户末端系统四部分组成。核心技术原理是在深井中通过同轴套管进行单井内部流体循环,基于热传导的方式与地层换热,以“取热不取水”形式开发深部地热能^[1]。流体从套管之间进入井下与地层发生热交换后,从内管中取出,在热泵换热后重新注入井下循环换热(图1)。影响换热效果的核心取决于岩土体以及井筒的导热性能,另外包括双层套管内管的隔热保温性、井深、流量、地温等因素。在内管隔热效果理想,井深和地温一定的条件下,换热器周边岩土中的水流速度会提高换热效率,而增大井深和过分提高循环流量对整个系统的换热影响较小。

很多学者提出将套管换热技术应用于石油废弃井的地热开发^[2]。其优势在于,首先,石油废弃井多数处于高地温梯度分布区,井底温度高,具有较好的开发潜

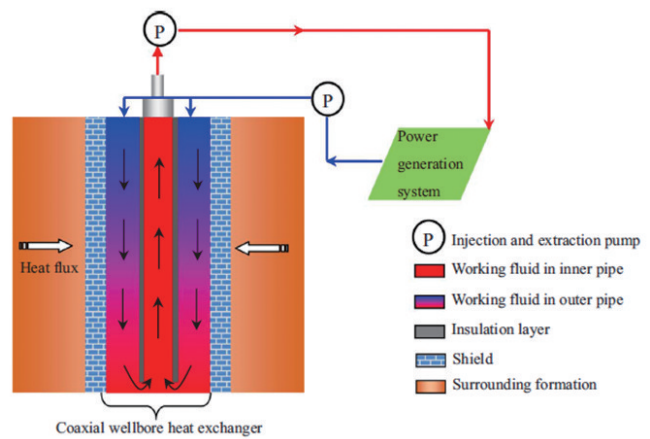


图1 封闭式井下换热系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of closed downhole heat exchange system

力;其次,全球越来越多的石油井随着产量的下降处于废弃状态,统计显示全球已经废弃的石油井大约为2000万~3000万口,通过石油废弃井改造可以节约钻探成本,应用前景广阔;另外,石油废弃井的封井会带来诸多严重的环境污染问题,废弃井处置费用成本过高。最新的技术指向了利用CO₂作为循环工质开采石油废弃井热能(图2^[3])。CO₂由于资源的巨大、相变温差换热量大、循环能力强而被选择为工作流体。目前对水平井内CO₂流动的研究还比较有限,工作主要集中在数值模拟方面,较小的注入速率对于获得较高的地热生产效率至关重要,注入压力过高则会对设备有更高的要求;为了获得较高的地热能提取率,宜采用较大的质量流量和较小的注入温度,以获得较高的地热能提取率^[3]。目前,西安、天津、哈尔滨等地均试验运行了封闭式深层的井下换热器,运行效果差异性较大。

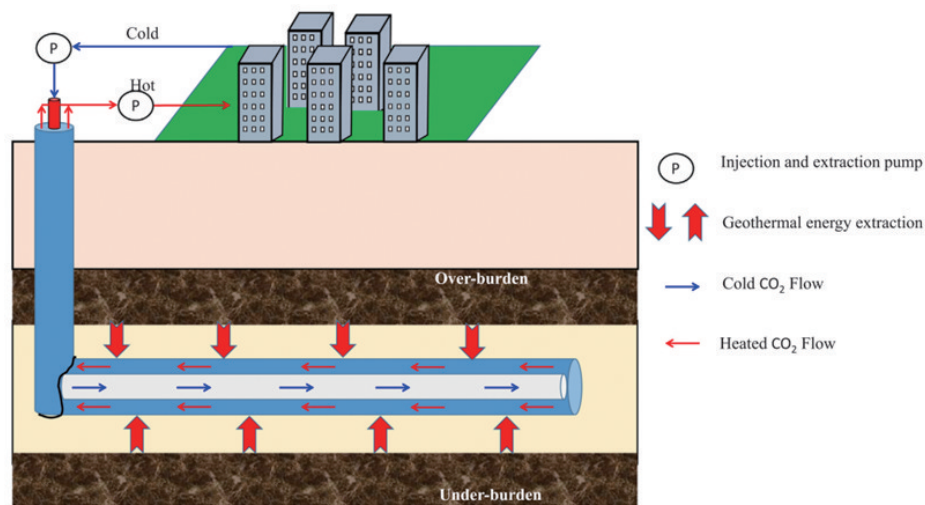


图2 利用废弃水平井提取地热能的工艺流程示意

Fig. 2 CO₂ circulating in a full-length horizontal geothermal well

需要强调的是,上述所讲的封闭式井下换热技术不同于国际上基于材料技术的重力热管换热技术。热管是一种具有极高导热性能的传热元件,利用重力的作用不需要外力而实现自下而上的长距离热量传递,采用相变工质的循环,把地壳深部热能源源不断输送到地表,在重力作用下,液体回流到热管底部,完成一个闭合循环,将大量的热量从下部受热端传到上部放热端(图3)。它通过在全封闭真空管内的液体的蒸发与凝结,利用毛细作用等流体原理传递热量,具有很高的导热性、热流密度可变性、热流方向可逆性、可远距离传热等一系列优点。目前,国际上正在开展千米级超长或多级热管方向的研究,有待使井下换热技术进一步规模化和经济化。

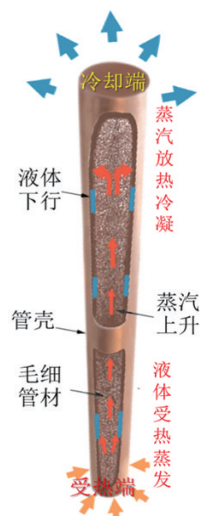


图3 重力热管传热原理示意

Fig. 3 Schematic diagram of gravity heat pipe heat transfer principle

2 采灌均衡条件下评价技术体系被广泛认可

采灌均衡是指对于某个开发的地热田,目标储层水位和温度在长期开采过程中能够保持动态的平衡,不会发生明显的水位下降和热突破(图4)。近年来,京津冀地区水热型地热资源的开发逐步由粗放式的“乱采乱排”转变为采灌均衡“取热不取水”的可持续开发利用。随着地热田勘查精度的不断提高,以往采用最大允许降深法或开采系数法计算单井地热流体可开采量,并且按回灌条件下开采100年,消耗15%的地热储量作为限定条件来评价地热资源可采资源量的方法均

无法服务于地热资源区块化开发利用的规划。建立采灌均衡的评价技术方法成为本年度热点问题。以雄安新区为例,未来的地热资源开发将会以分布式清洁热力系统的能源子站和分区热力管网为主,区块化、规模化是地热开发的主要模式。因此,在资源评价中应充分考虑地热资源禀赋条件,按照区划分区后整体评价,同时建立热储预测和评价模型,模拟分散式采灌、集中采灌等不同采灌布局下的可采资源量,提高评价精度,为新区的地热规模化开发提供更为详细扎实的数据。目前,在模拟方面常用的软件包括基于有限体积法的TOUGH软件和基于有限元的OpenGeoSys、COMSOL、FEFLOW等。热储采灌均衡的约束条件是在模拟计算中的关键参数,而不同的地区约束条件不尽相同,因此就需要针对不同地区的地热储层特征首先建立相应的限制条件。对于华北地区而言,地热开发具有多年的历史,结合前人工作,采灌均衡原则为:区块内地热水回灌率达到90%;10年地下水水位下降小于5 m;单井地下水水位不低于150 m;开采井100年水温下降小于2℃。采灌均衡的评价方法仍然在不断的完善中,未来亟待建立不同类型区采灌均衡条件下的评价规范,指导区域地热资源的可持续开发。

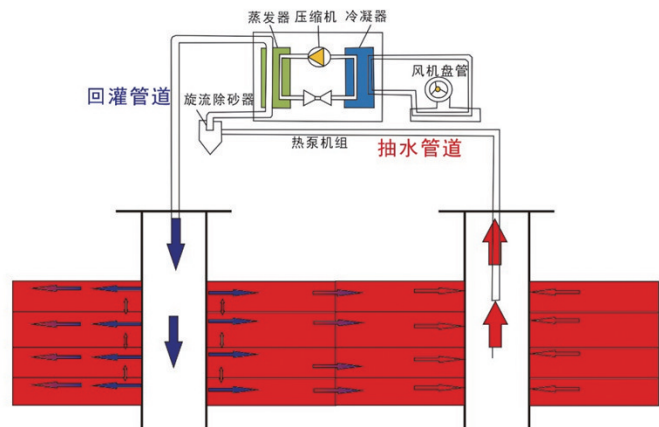


图4 采灌均衡系统示意

Fig. 4 Schematic of balance in exploitation and reinjection

3 热储回灌技术和标准备受关注,相关规范标准即将出台

地热资源作为一种绿色环保的可替代能源,回灌是保证其大规模可持续开发利用的关键。地热资源按热储介质及回灌性能的不同可分为基岩裂隙热储、岩

溶裂隙热储与砂岩孔隙热储三种类型。国内地热回灌主要属于岩溶裂隙热储的回灌,在华北地热供暖回灌已形成较大模式,对保护地热田可持续开发起到了一定的作用,在京津冀地区形成采灌均衡的地热资源开发利用技术将是未来京津冀地区地热攻坚的主要目标。砂岩热储回灌方面,目前北京、天津、山东等地已经出台了各自的热储回灌要求,在西藏羊八井、那曲和朗久3个地热田在基岩裂隙热储回灌方面也进行了大量的研究与生产实践,取得了一些成绩,但目前几乎没有开展生产性回灌,在未来中国西部高温地热开发中将是主要研究课题^[4]。由国家能源局能源行业地热能专业标准化技术委员会组织制定的《地热回灌技术要求》(NB/T 10099—2018)正式印发,为保证地热能行业的可持续发展,加强中国地热资源的科学开发利用提供了标准。2019年即将启动的国家重点研发计划“可再生能源与氢能技术”重点专项,列出了砂岩热储层采灌增效技术及装备(共性关键技术类)课题,研究内容包括:针对未固结砂岩热储开发利用中产能低回灌难等问题,开展储层采灌增效技术、单井换热及回灌流体处理技术与装备研发。预示着未来热储回灌问题将会在技术、工艺、设备等方面有新的突破。

4 深层地热能开发与地震活动之间的关系如何?

随着韩国浦项市增强型地热开发工程于2017年11

月15日引发的5.5级地震,2018年地热资源开发与地震活动的关系成为2018年度领域内研究热点,包括《Nature》^[5]在内的多个国际期刊均刊出了关于地热开发与地震之间关系的论文。首先来讲,地热能不可能在不影响环境的情况下生产和转化为人们可以利用的形式,地热开发的潜在环境影响可能包括空气/水污染、固体废物处置、噪声污染、热污染、土地利用、地面沉降、诱发地震/滑坡、耗水量、天然热液表现扰动、自然景观改变、灾难性事件,特别是,地下水的使用和污染、地面沉降和由于向裂缝性储层注水而引起的地震活动被认为是地热发电厂发展对环境的最重要的影响^[6]。然而,从能量守恒的角度来讲,长期的地热能开发是有益于防震减灾的。通过增强型地热系统开发,让地震危险带地热能释放方式取代地震能量释放方式,达到转危为安、防震减灾的目的。

韩国浦项市地震调查的初步结果显示,发生在2017年的最大地震可能由地热电站引起,是由增强型地热系统(EGS)触发的史上最大规模的地震。韩国釜山国立大学的Kim等根据当地地震网络数据,分析主要地震、六次前震和数百次余震的发生位置和时间,结果发现几乎所有的地震都发生在距离工厂几公里的地表点以下4~6 km处,并且该地区之前缺乏地震活动,综合表明是流体注入引发地震。此外,每一个流体注入阶段中注入水,几天后都伴随着强烈的地震活动,注入结束后,微震活动迅速下降,并且诱发的地震的震级随流体注入净体积增大而增大(图5)^[7]。

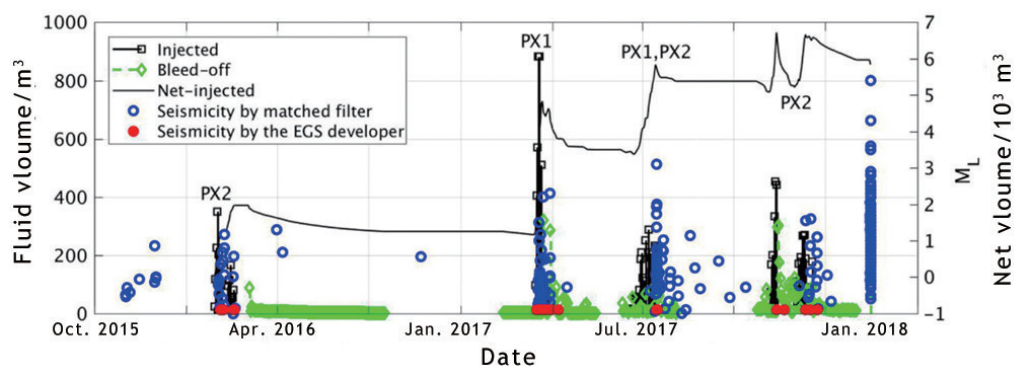
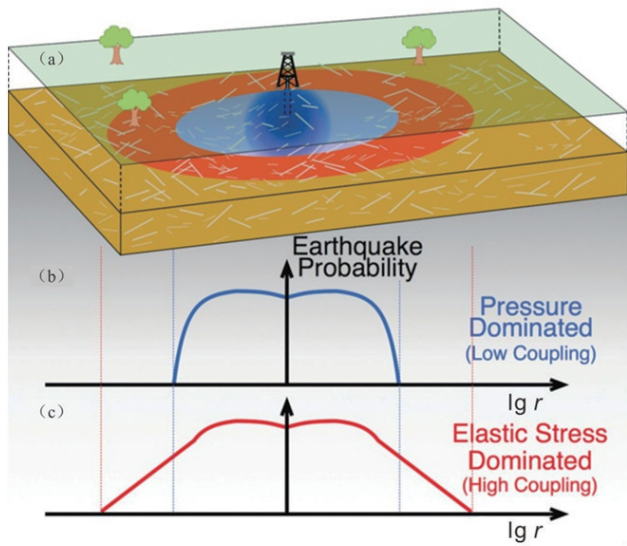


图5 浦项地热电厂流体注入史^[7]

Fig. 5 History of fluid injection volume of Pohang geothermal power plant

同样,美国加州大学圣克鲁兹分校 Brodsky 团队报道称,独立的注水井可能诱发约10 km外的地震。与向结晶基底注水相比,向沉积岩注水,水会对周围的岩石产生压强并产生弹性应力,从而对远处断层施加压力,

正是这种“孔隙弹性耦合”,影响了岩石将流体应力传递至固体岩基中的能力,继而引发强度更大、距离更远的地震,图6^[8]所示为诱发地震与离井距离间的函数关系。



蓝色和红色区域分别表示注入基岩(蓝色)和上覆沉积层(红色)后诱发地震活动的空间范围大小,灰线代表断层网络

图6 诱发地震与离井距离间的函数关系

Fig. 6 The probability of inducing an earthquake at distance r is controlled by fault availability and amplitude of stress perturbation

与此相反,美国威斯康辛大学麦迪逊分校研究人员进行了一项地热井抽水记录与微震活动之间的分析,表明地热生产过程与降低地震活动性之间具有一定的相关性。Cardiff团队对内华达州地热田的Brady热泉2010—2015年间的抽水记录与微震活动进行了分析,发现日产量达到或超过长期平均产量的天数与未发现地震事件的天数之间统计学上具有显著相关性(图7^[9]),而用于工厂维护的泵的关闭与微震活动的增加明显相关。研究人员假设该地区地下有效应力已经适应了当前长期的抽水过程,在这一假设条件下,流体的提取通过增加对断层的有效应力来抑制断层滑动,与此相反,短暂的泵关闭这段时间内有效应力低于长期平均应力,增加了微震活动性的可能性。

诱发地震一般与注入流体有关,很少与地表变形有关。冰岛大学地球科学学院的Juncu团队研究地表形变、地震活动和流体注入三者之间的相互关系,结果发现流体注入引起孔隙压力增加,从而导致地震活动性和断层滑动的增加,并且孔隙压力的增加和断层的滑动都会引起地表变形^[10]。

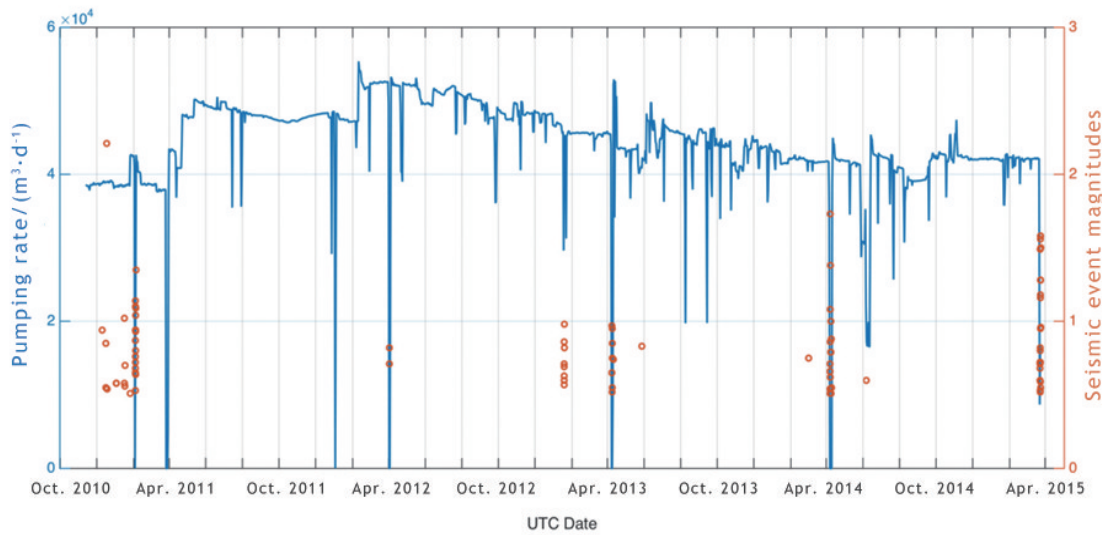


图7 长期的Brady热站抽取率(蓝色线)和长期微震记录的事件时间(橙色圆圈)之间的比较(微震事件程度要求 $M_w > 0.5$)

Fig. 7 Comparison between long-term Brady site extraction rates (blue line) and event times from long-term microseismic catalog (orange circles), for microseismic events with $M_w > 0.5$

5 “地热能+”逐步推广

地热能是清洁、稳定、安全、高效的可再生能源,相对于其他能源具有储量大、易储存的提点,资源条件好的地区可提供稳定的发电负荷,其他地区可作为区域

稳定的供暖热源。建设多能互补的可再生能源供应系统是未来能源供给的方向^[11]。“地热能+”应以水热型地热能开发利用为主,以浅层地热能 and 太阳能等其他新能源利用为辅,集成水热型地热资源开发技术、浅层地热能高效获取技术、光伏发电技术,引进和吸收供暖制

冷、发电、工业热加工等成熟行业的先进技术,形成适用于水热型地热资源利用新的技术集成体系。

2018年, McTigue^[12]提出了5种方案在双级闪蒸热水发电系统加入太阳能,最有前景的解决方案是将太阳能转化为电能,效率为24.3%^[12]。Bassetti建立了一种新型地热能-聚焦式太阳能发电(GEO-CSP)混合动力装置(图8^[13]),使地热能资源得到更好的利用,并在电厂的整个生命周期内提高地热ORC系统的性能。太阳能被用来加热进入ORC热交换器的地热流体,CSP装置设有热能储存装置(TES),可将日间剩余的太阳能累积起来,而在夜间用电效率较高时释放。在抛物线槽CSP系统中集成存储单元,使太阳能年增量能源产量增加19%,与地热发电厂相比,从5.3%提高到6.3%。因此,混合动力装置可从增加TES装置中大大受益^[13]。

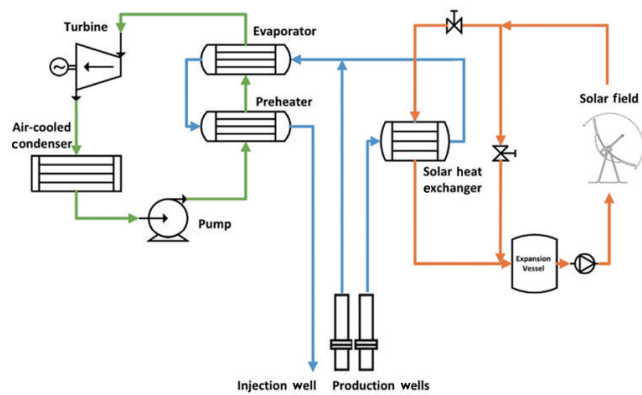


图8 静水混合地热-太阳能电站布置

Fig. 8 Schematic layout of stillwater hybrid geo-solar power plant

“地热能+”的经济效益是最先被关注的问题。考虑到使用时间电价(峰值、非峰值),如何将太阳能辅助地源热泵系统的运行成本降至最低。研究人员提出两个不同的目标:最小化电力消耗和运行成本。澳大利亚墨尔本大学在该技术上有所突破,集成了蓄热系统,提高了调峰效果,降低了电网对昂贵的峰值发电的需求,优化了最低成本后,运行成本降低了7.8%^[14]。香港理工大学He等提出了一种新型的联合系统——闪蒸分级循环加湿脱湿(HDH)脱盐装置^[15]。闪蒸用于发电,剩余的水用于加热海水生产。基于动力与脱盐装置的耦合关系,建立了基于热力学规律的守恒方程。研究还发现,降低海水喷淋温度和海水加热器端面温差有助于提高组合系统的性能。

6 油田地热开采新模式

油田地热开采的潜力和难度已经被广大研究人员所熟知:一方面,油田利用地热资源具有独特的经济技术优势,现有的井筒、地面设施和有用的数据为油田地热工程提供了低成本、低风险和极大便利;另一方面,油田地热开采受开发区域、井老化、储层污染等难题的困扰。2018年的油田地热新模式开始形成,这也是油田地热开发形势所迫。

为提高油气资源的采收率(enhanced oil recovery, EOR)和可持续性,在已发现的油藏中注入化学物质和热流体正变得越来越普遍。对地下油藏的诱发破坏认识不足,可能会给提高采收率的项目带来下行风险和负面经济后果。油田地热开发的模式可以通过不同的油藏系统中控制、预防和利用减少开发对地层的损害。

加拿大卡尔加里大学的Yuan和Wood通过整合最先进的建模、实验室实验和现场应用,提高人们对强化采油过程中机械、化学、生物和热诱导损伤问题的认识。通过从多学科的角度提供对地层损害的综合理解,可以更好地理解和管理使用增强采油技术的石油开采^[16-17]。美国俄克拉荷马大学石油地质工程学院Wang和加拿大卡尔加里大学的Yuan等从多学科角度对油田地热资源进行综合认识,对油田地热资源的特点、地热开采方法、地热利用技术、开发现状及面临的挑战进行了综合评述,此外,研究人员提出了一个综合风险/机会评估和管理框架(图9),以指导油田地热项目的实践^[18]。

7 干热岩开发理论从宏观走向微观

随着干热岩理论的深入,2018年人们对于干热岩的关注开始从宏观的资源评价走向更加深入的增强型地热系统开发甚至裂隙换热性能的研究。Salimzadeh建立了裂隙地热储层热液-机械(THM)全耦合有限元模型,并将其应用于裂缝性地热系统中可变形裂缝对注入冷水的影响研究。结果表明,由于岩体热体积收缩而产生的流动窜流是非常可能的。流体与岩石基体交换热量,导致基体冷却,随后发生体积变形。裂隙周围岩石基体的冷却降低了裂隙表面的接触应力,增大了裂隙孔径。随着接触面应力较低的区域在裂缝上扩展,应力再分布减小了孔径。应力重分布降低了纯开

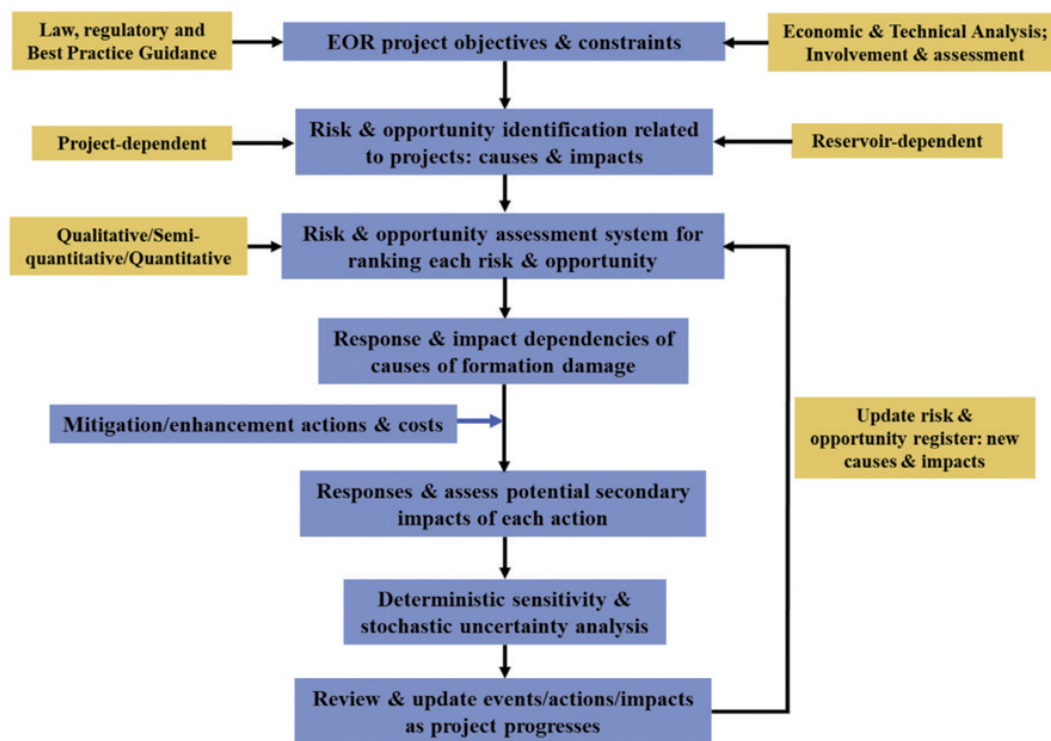


图9 油田地热能源项目风险与机遇识别、评估与管理的综合工作流程

Fig. 9 An integrated workflow for risk and opportunity identification, assessment and management of formation damage issues impacting EOR projects

放模式下裂缝扩展的可能性,而接触应力较低区域的扩展可能增加剪切压裂的可能性^[19]。该成果2018年1月发表在《Geothermics》上。

增产是地热开发的前沿课题。一个前瞻性的生产战略需要调查增产措施,以防产量减少。水力压裂是提高蒸汽产量或创造新的地热产层的关键技术^[20]。目的是通过连接已有裂缝或通过新裂缝的萌生和扩展为蒸汽创造新的通道来刺激地热井周围的区域。数值模拟是激发方案制定和评价储层激发效果的关键。动态流仿真器与地质力学模型之间的紧密连接是数值模拟增产技术有效性的关键,而动态流仿真器与地质力学模型之间的紧密连接是必不可少的。为了正确评价注水井周围地热田压力、温度梯度引起的应力变化,荷兰应用科学研究组织(TNO)的Pizzocolo等以一种单向耦合的方式将数值模拟和解析解连接起来,以将不断变化的流体压力和温度与油井周围应力场的变化联系起来。水力压裂技术在短段衬管无法隔离或费用过高的情况下并不是合适的增产技术。研究证明,在这种情况下,增产措施是无效的,因为诱导裂缝只会扩散到穿

孔衬管的顶部。如果要隔离较短的射孔间隔,为了针对最需要增产的地热段,是有可能的,那么,通过量身定制的处理设计,就可以进行有效的压裂处理。最后,还可以利用产生高裂缝漏失的高注入率应用替代增产措施。压力和温度峰面快速侵入储层,使热、酸增产措施成为水力压裂增产措施的重要替代措施^[21]。该成果2018年2月发表在第43届斯坦福大学地热储层工程研讨会上。

中国干热岩开发的前沿阵地西部,2017年在探获高温岩体上取得突破,2018年在数值评价上取得重要进展,为下一步向干热岩的开发试验又迈了一步。吉林大学Xu等采用两口水平井进行水循环的方法,对中国西北部共和盆地恰卜恰地热田裂缝性地热储层的发电潜力进行了数值研究(图10^[22])。考虑了裂缝中流体与岩体之间的非平衡换热,提高了地下流体热运输的模拟精度,认为水力功率主要取决于裂缝间距和注入温度,而流量阻抗和能量效率受裂缝渗透率的控制^[22]。该成果2018年4月发表在《Energy》上。

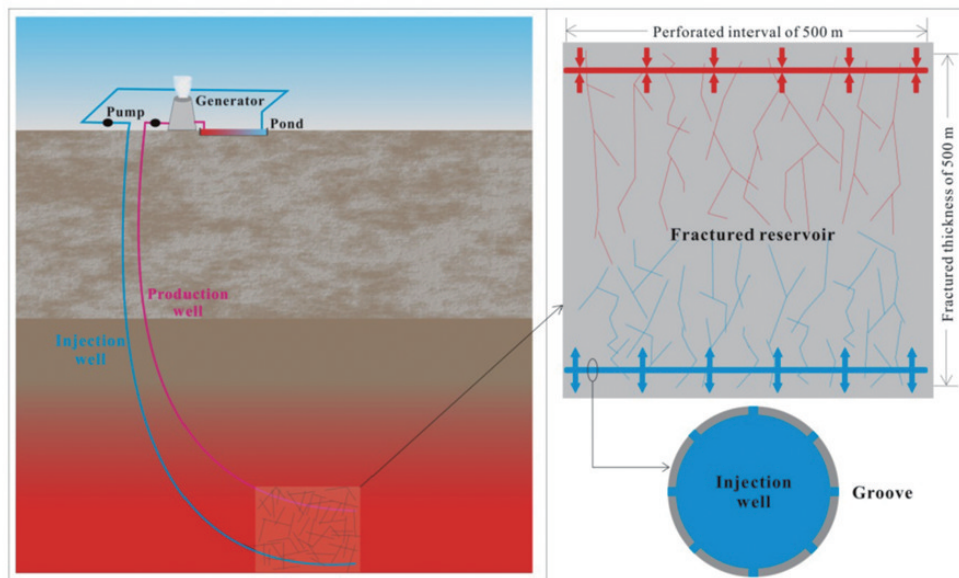


图10 共和盆地两口水平井裂隙储层地热系统示意图及用于地热开采的井设计

Fig. 10 Schematic of the fractured reservoir geothermal system with two horizontal wells and the well design used for geothermal extraction in the Gonghe Basin

8 地热微生物开始受到关注

地热开发中微生物系统的活动一直以来都没有被广大学者所关注,2018年,针对浅层以及中深层地热集约利用中微生物变化规律的研究开始出现。西班牙地质调查局García-Gil等对覆盖城市地下水受微生物污染区域的31个压力计进行了微生物采样。评价影响点与非影响点病原菌含量的平均差异,并计算相关系数。令人惊讶的是,与非冲击式压力计相比,热冲击式压力计的水中病原菌含量有显著而普遍的下降,猜测是由于热交换器内的细菌受到热冲击造成的。水体病原菌数量与温度显著负相关,这可以用细菌的空间分布解释,发现细菌在离注入点越来越远的地方开始恢复。研究结果进一步强化了浅层地热资源作为清洁能源的概念,为控制地下水中病原菌含量提供了依据^[23]。该成果2018年8月发表在《Science of the Total Environment》上。

新西兰地质学和核科学研究所(GNS Science)科学家Power等研究了新西兰热泉中的微生物生物地理的生态系统。由于地热泉代表着离散的、相对均匀的生态环境,分布在多个地理尺度上,跨越了广泛的地球化学梯度,并且减少了后生动物的影响。研究人员检测了来自新西兰925个地热泉(13.9~100.6℃,pH值为1~9.7)的细菌和古菌落组成、46个物理化学参数和元数

据。结果发现,在低于70℃的温度下,多样性主要受pH值的影响;在温度高于70℃后,细菌多样性才会受到温度的显著影响。

此外,群落差异随着地理距离的增加而增加^[24]。该成果2018年7月发表在《Nature Communications》上。

9 结论

2018年,地热从基础调查到相关研究呈飞速发展的势头。国内多个科研院所成立了专门的地热研究机构,在人才培养、技术攻关上形成了核心力量;中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团有限公司、中国核工业集团有限公司等大型企业以及新奥燃气、三全集团等也纷纷加入了地热探测与开发利用的大军,发挥自身优势将地热利用向规模化方向推广。

地热探测深度逐渐增大,中国地热利用逐步从粗放式开发走向节约集约式。地热资源探测评价技术取得了重要的进展。京津冀地区探获深部地热新层系,开辟地热资源第二空间;建成地热资源梯级综合开发示范基地,形成了京津冀地区可复制、可推广的高效利用新模式;西南高温地热发电取得了新的突破,打破了多年来羊八井高温地热发电一枝独秀的局面。

未来,随着区域地热需求的不断提升,地热探测评价精度的不断提高,面向政府决策的地热资源评价会

成为主要方向,地热资源评价将和城市建设和发展规划相衔接,因地制宜,合理评价和规划,提高地热能利用的安全性,雄安新区有望成为中低温地热利用的全球样板^[25]。其次,地热利用增效技术和方案将不断涌现,地热能将结合其他可再生能源,形成多能互补的区域功能系统,充分发挥地热能储量大、可调节的优势,结合能源站功能系统的布局,提升地热能的利用效率。但是,地热资源开发的环境效益仍然值得去思考,建立长期稳定的地热资源开发评价体系和相关监测监管平台,是保障地热资源可持续开发的核心。

参考文献(References)

- [1] 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 Haibin, et al. Principle and capacity quantification of deep-borehole heat exchangers [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(12): 4741-4752.
- [2] Nian Y, Cheng W. Insights into geothermal utilization of abandoned oil and gas wells[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 87: 44-60.
- [3] Sun F, Yao Y, Li G, et al. Geothermal energy extraction in CO₂ rich basin using abandoned horizontal wells [J]. Energy, 2018, 158: 760-773.
- [4] Kang F X, Zhou Q D, Zhang P P, et al. Reinjection experiment for a sandstone aquifer in Pingyuan, China[C/OL]. [2018-12-31]. <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/23007.pdf>.
- [5] Zastrow M. South Korea's most-destructive quake probably triggered by geothermal plant[J]. Nature, 2018. doi: 10.1038/d41586-018-04963-y.
- [6] Pan S, Gao M, Shah K J, et al. Establishment of enhanced geothermal energy utilization plans: Barriers and strategies[J]. Renewable Energy, 2018, 132: 19-32.
- [7] Kim K H, Ree J H, Kim Y H, et al. Assessing whether the 2017 M_w 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event[J]. Science, 2018, 360(6392): 1007-1009.
- [8] Goebel T H W, Brodsky E E. The spatial footprint of injection wells in a global compilation of induced earthquake sequences [J]. Science, 2018, 361(6405): 899-904.
- [9] Cardiff M, Lim D D, Patterson J R, et al. Geothermal production and reduced seismicity: Correlation and proposed mechanism[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 482: 470-477.
- [10] Juncu D, Árnadóttir T, Geirsson H, et al. Injection-induced surface deformation and seismicity at the Hellisheidi geothermal field, Iceland[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2018, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2018.03.019.
- [11] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 449-459.
Wang Guilin, Zhang Wei, Liang Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 38(4): 449-459.
- [12] McTigue J D, Castro J, Mungas G, et al. Hybridizing a geothermal power plant with concentrating solar power and thermal storage to increase power generation and dispatchability [J]. Applied Energy, 2018, 228: 1837-1852.
- [13] Bassetti M C, Consoli D, Manente G, et al. Design and off-design models of a hybrid geothermal-solar power plant enhanced by a thermal storage[J]. Renewable Energy, 2018, 128: 460-472.
- [14] Weeratunge H, Narsilio G, De Hoog J, et al. Model predictive control for a solar assisted ground source heat pump system [J]. Energy, 2018, 152: 974-984.
- [15] He W, Yang H, Han D. Thermodynamic analysis of a power and water combined system with geothermal energy utilization [J]. Geothermics, 2018, 76:106-115.
- [16] Yuan B, Wood D A. A comprehensive review of formation damage during enhanced oil recovery[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018a, 167: 287-299.
- [17] Yuan B, Wood D A. A holistic review of geosystem damage during unconventional oil, gas and geothermal energy recovery [J]. Fuel, 2018b, 227: 99-110.
- [18] Wang K, Yuan B, Ji G, et al. A comprehensive review of geothermal energy extraction and utilization in oilfields[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 168: 456-477.
- [19] Salimzadeh S, Paluszny A, Nick H M, et al. A three-dimensional coupled thermo-hydro-mechanical model for deformable fractured geothermal systems[J]. Geothermics, 2018, 71: 212-224.
- [20] 王贵玲, 马峰, 蔺文静, 等. 干热岩资源开发工程储层激发研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 103-107.
Wang Guiling, Ma Feng, Lin Wenjing, et al. Reservoir stimulation in hot dry rock resource development[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(11): 103-107.
- [21] Pizzocolo F, Heege J H, Fokker P A. Numerical assessment of hydraulic fracturing stimulation treatment of geothermal wells [C]/43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2018.
- [22] Xu T, Yuan Y, Jia X, et al. Prospects of power generation from an enhanced geothermal system by water circulation through two horizontal wells: A case study in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. Energy, 2018, 148: 196-207.

- [23] García-Gil A, Gasco-Cavero S, Garrido E, et al. Decreased waterborne pathogenic bacteria in an urban aquifer related to intense shallow geothermal exploitation[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 765–775.
- [24] Power J F, Carere C R, Lee C K, et al. Microbial biogeography of 925 geothermal springs in New Zealand[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2876.
- [25] 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 等. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. *地球学报*, 2018, 39(5): 523–532.
- Wu Aimin, Ma Feng, Wang Guiling, et al. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan New Area[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2018, 39(5): 523–532.

Summary of hot research topics in geothermal exploitation in 2018

MA Feng^{1,2}, WANG Guiling^{2*}, WEI Shuaichao², SUN Zhanxue³

1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Institute of Hydrogeology and Environment Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China
3. School of Water Resources & Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract This article samples the hot research topics in geothermal exploitation in 2018. With the rapid development of geothermal power generation in countries all over the world, China is facing great opportunities and challenges. Geothermal exploration is gradually refined, geothermal development is gradually intensified, and geothermal utilization is gradually integrated. Meanwhile, geothermy has become a real hot spot in geological field and relevant technologies and norms are constantly improved, for example, closed underground heat transfer technology, geothermal evaluation technology of balance in exploitation and reinjection, geothermal-solar energy and other mixed energy development and utilization. In theories, the mechanism between geothermal water exploitation and the occurrence of microseisms is further understood, and the theory of hot dry rock development becomes more thorough. In addition, innovative ideas in ecological environment and earth science around geothermal fluid are also presented.

Keywords geothermal; underground heat transfer technology; balance in exploitation and reinjection; enhanced geothermal systems ●



(责任编辑 刘志远)