

# 高温岩体热能开发及钻进技术

张伟

(中国地质调查局,北京 100037)

**摘要:** 高温岩体热能资源量巨大,增强型地热系统(EGS 技术)是提取高温岩体热能的有效技术手段,而其中注水井和生产井的钻进效果对 EGS 系统运行的经济性有着举足轻重的影响作用。在坚硬的岩石中和高温条件下钻进对钻探技术提出了极大的挑战,本文探讨了高温岩体钻进技术问题,涉及硬岩钻进方法、高温定向钻进工具和井底钻具组合,可为今后开展高温岩体钻进的关键技术问题研究提供参考。

**关键词:** 高温岩体;热能开发;钻进技术;干热岩;增强型地热系统

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)10-0219-06

**Extraction of High Temperature Rock Mass Heat Energy and Related Drilling Technologies/ZHANG Wei** (China Geological Survey, Beijing 100037)

**Abstract:** This article introduces resources potential and principle of heat energy extraction of high temperature rock mass. In addition, characteristics of drilling operation of high temperature rock mass and drilling technologies are discussed, referring to hard rock drilling methods, drilling tools for high temperature directional drilling and bottom hole assembles.

**Key words:** high temperature rock mass; heat energy extraction; drilling technology; hot-dry-rock; EGS

## 0 引言

地下 3~10 km 以内岩体中储藏的热能巨大,远远大于地球上所有一次性能源(石油、天然气、煤等)的总和。高温岩体热能的开发以 1974 年美国的 HDR 项目为开端,以 HDR 技术为基础的增强型地热系统(EGS)是高温岩体热能提取的有效技术手段,在世界范围内正逐渐得到推广应用。采用 EGS 技术提取高温岩体热能,具有资源量巨大、地理分布广、零污染排放、安全性好、热能连续性好、利用效率高等优点,具有极好的应用前景。高温岩体钻进的对象是坚硬的岩石,钻进难度大,钻进效果对 EGS 系统运行的经济性有着举足轻重的影响作用。

## 1 高温岩体热能资源潜力

目前对高温岩体尚无统一的定义,参考钻探施工领域对温度的划分以及采用增强型地热系统(EGS)的温度范围,本文将温度高于 150 °C 的岩体称为高温岩体。目前,高温岩体热能利用的最有效的手段是增强型地热系统(EGS),其技术可行的深度范围是 3~10 km。

受美国能源部(DOE)的委托,美国麻省理工学院对美国的 EGS 资源量进行了预测<sup>[1]</sup>(见图 1):在可开采的范围(3~10 km)内,高温岩体热能总量为  $14 \times 10^6$  EJ ( $1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$ , 美国 2005 年的总能耗为 100 EJ),对预计可开采热能的估计是:保守值为  $2.8 \times 10^5$  EJ;中间值为  $2.8 \times 10^6$  EJ;上限值为  $5.6 \times 10^6$  EJ。

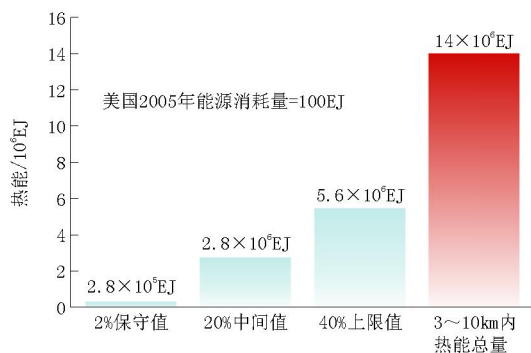


图 1 美国 EGS 能源预测

根据欧盟对 EGS 热能研究的结果<sup>[2]</sup>:采用 EGS 技术,将  $1 \text{ km}^3$  高温裂缝岩体从 200 °C 冷却到 180 °C,产生的能量,相当于 127.5 万 t 原油;或提供 1 万人口的城镇 20 年所需的电能。

收稿日期:2016-07-31

**作者简介:** 张伟,男,汉族,1954 年生,中国地质调查局汶川地震科学钻探工程中心总工程师,中国地质大学(武汉)客座教授,博士,探矿工程专业,负责组织汶川地震科学钻探项目的钻探和测井施工,北京市西城区阜外大街 45 号院(通讯地址:北京市房山区长阳镇九洲溪雅苑小区 A2-601,102488), zhangwei@wfsd.org。

基于现有地热测量数据,中国大陆3~10 km深度段干热岩资源总量为 $2.09 \times 10^7$  EJ,相当于 $71.5 \times 10^5$  亿 t 标准煤,即便按2%的可开采资源量计算,亦达 $4.2 \times 10^6$  EJ,相当于 $14.3 \times 10^3$  亿 t 标准煤,是中国大陆2010年能耗总量的4400倍<sup>[3]</sup>。

因此可以说,高温岩体热能用之不尽,取之不竭。

## 2 高温岩体热能开发技术

### 2.1 干热岩技术

干热岩(HDR),通常指温度大于200℃、埋深数千米,内部不存在流体或仅有少量地下流体的高温岩体。这种岩体的成分可以变化很大,绝大部分为中生代以来的中酸性侵入岩,但也可以是中新生的变质岩,甚至是厚度巨大的块状沉积岩。

干热岩热能开发采用的技术原理如下:从地表往干热岩中打一眼井(注水井),向井中注入温度较低的水,建立起非常高的压力,使岩体在大致垂直于最小地应力的方向产生许多裂缝。随着水不断注入,裂缝不断增加、扩大,并相互连通,最终形成一个大致呈面状的人工干热岩热储构造。在距注水井合理的位置处钻一口或几口井贯通人工热储构造(图2)。这些井用来回收高温水、汽,称之为生产井(图3)。注入的水沿着裂隙运动并与周边的岩石发生热交换,产生了高温高压水或水汽混合物,沿生产井上返至地表,用于地热发电和综合利用。利用之后的温水又通过注入井回灌到干热岩中,从而达到循环利用的目的<sup>[4]</sup>。

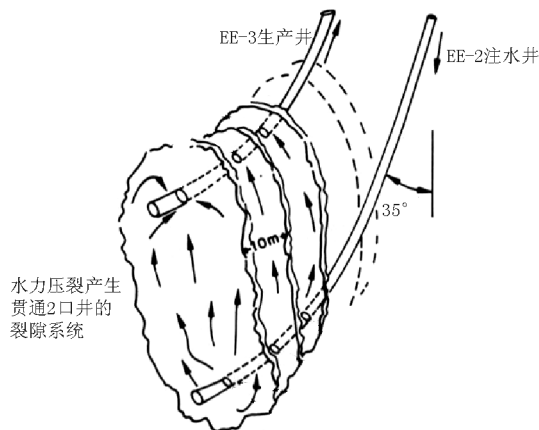


图2 人工热储采热系统

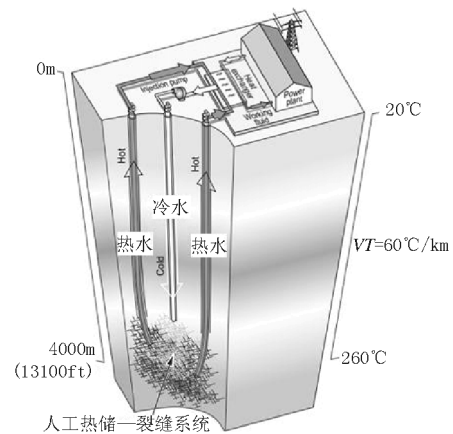


图3 干热岩资源开发利用原理

世界上最早进行干热岩技术研究的国家是美国。1974年,美国洛斯·阿尔莫斯(Los Alamos)国家实验室在美国新墨西哥州的芬登山开始钻第一眼HDR深井,拉开了干热岩研究的序幕。在芬登山项目中,美国科学家施工了两对HDR采热深井(最大井深为4660 m,最高井底温度为320℃)<sup>[4]</sup>,开展了注水和高温岩体热能提取试验,取得了许多宝贵的资料,积累了丰富的经验,揭示了干热岩技术应用的良好前景,为干热岩的开发利用做出了巨大贡献。

### 2.2 增强型地热系统

增强型地热系统(EGS)是利用工程技术人为地在地下高温岩体内建造裂缝网或者改善原有裂缝网,使从地表注入的冷水流经裂缝网返回地表后其温度升高,利用闪蒸或双循环发电和/或供热。

EGS的概念起源于HDR(干热岩),是HDR的扩展。EGS包含了HDR,HDR是EGS最早项目的研究对象,而目前EGS的工程对象则不再局限于此。一方面温度可以低到85℃(利用ORC发电)或者100℃(利用Kalina发电);另一方面岩石既可以是结晶岩,也可以是火山岩或沉积岩;既可以是干热岩体,也可以是湿热岩体。

从20世纪80年代开始,在全球范围内掀起了EGS研究和实践的热潮,参与的国家有德国、日本、法国、英国、澳大利亚、新西兰、瑞士、俄罗斯等。施工了许多口高温岩体热能提取的深井,并建成了多个地热能发电站,其中最大的装机功率达到了700 MWe(图4)<sup>[5]</sup>。

## 3 高温岩体钻进施工特点

### 3.1 定向钻进和微地震监测

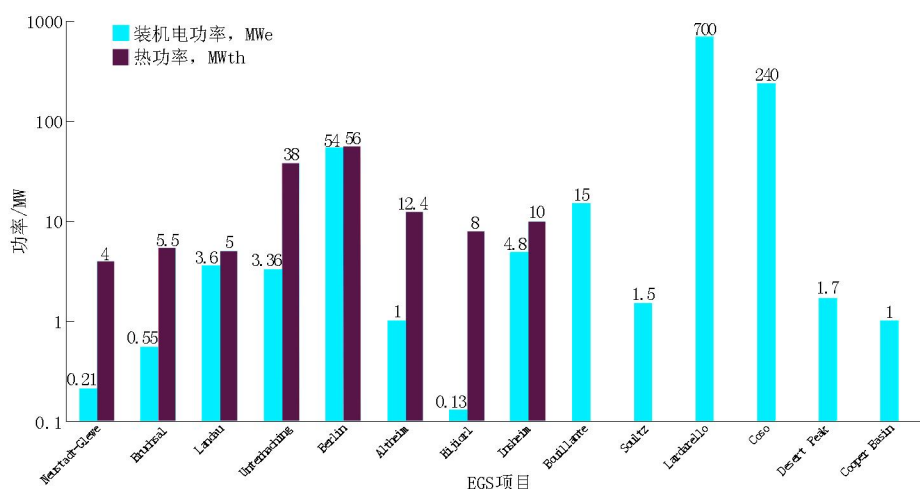


图 4 世界上主要 EGS 项目的热能和装机功率

生产井必须钻进在注水井压裂后产生的热储构造(裂缝系统)范围内,使注水井与生产井之建立良好的水力联系,才能获得最佳的热能产出。美国芬登山 HDR 项目实施的结果,充分证实了这一点<sup>[6]</sup>。

芬登山第一口深钻 GT-2 井于 1974 年施工,完钻井深 2932 m,井底温度 180 ℃。进行水力压裂之后,施工第二口深钻 EE-1 井(生产井)。该井直接位于 GT-2 井下方,目的是钻入压裂产生的裂缝带。注水试验结果表明,只有极少量的水渗入生产井。为了建立两井之间的水力联系,在 EE-1 井下部裸眼井段进行了一次较大的水力压裂作业。两井之间的水力联系还是很弱。根据在 EE-1 井中进行温度和微地震测量的结果,在 GT-2 井中进行了 2 次侧钻。在第二次侧钻后,才在两井之间建立起令人满意的水力联系,产生了世界上第一对 HDR 人工热储。

1979 年 HDR 项目的第二阶段开始实施,先后施工了 EE-2 井(注水井,深度 4660 m,井底温度 320 ℃)和 EE-3 井(生产井,深度 4400 m,井底温度 280 ℃)。1982—1984 年在 EE-2 井中进行了数次水力压裂试验,都未能建立起 EE-2 井和 EE-3 井之间的水力联系。此结果导致人们对 HDR 热储的本质有了一个全新的认识。大量微地震测量结果和地质证据表明:原来认为通过水力压裂在基岩中产生大量新裂隙的想法是不对的,所有证据表明,压裂只是使岩体中已有的处于封闭状态的裂隙重新张开,而裂隙的方向近似于垂直于最小主应力的方向。

基于这种认识,决定根据微地震数据通过侧钻方法重新钻进生产井 EE-3 井的下部。侧钻井深

为 2829 m,完钻井深为 4018 m,完钻井底温度为 265 ℃。侧钻产生的井眼命名为 EE-3A。该井眼穿过了微地震带和人工热储,与 EE-2 井之间有很好的水力联系。

通过总结芬登山 2 对 HDR 采热井施工的经验,得出了 EGS 系统钻井施工的程序:(1)先在高温岩体中钻一口注水井;(2)对注水井进行水力压裂,同时利用浅钻进行微地震监测,监测获得的地震云显示了裂缝系统的空间位置,从而获得 EGS 热储构造空间分布情况(图 5);(3)根据微地震数据,采用定向钻进方法施工贯穿热储的生产井。



图 5 水力压裂在钻孔中造成微地震的测量结果——地震云

### 3.2 硬岩钻进

调研结果表明,EGS 系统的主要岩性为花岗岩等火成岩,也有变质岩和沉积岩(图 6)。EGS 项目的钻井施工遇到的岩石主要是坚硬岩石<sup>[5]</sup>。

### 3.3 高温钻进

EGS 项目的井深一般在 2000 m 以上,最深的超过 5000 m;温度一般在 100 ℃ 以上,最高为 400 ℃(图 7)<sup>[5]</sup>。

### 3.4 全面钻进为主

除了前期的勘探钻孔之外,EGS项目的钻孔钻进过程中一般不取心,主要采用牙轮钻头进行全面钻进。

## 4 高温岩体钻进技术

高温岩体钻进涉及的关键技术问题包括钻进技术、轨迹控制技术、钻井液技术、固井技术和井控技术等。本文重点讨论高温岩体的钻进技术问题。

### 4.1 硬岩钻进方法

高温岩体钻进主要在坚硬岩石中进行,遇到的主要问题是:机械钻速低,钻进工具(钻头、扩孔器、扶正器等)寿命低。在高温岩体中钻进,钻进方法的选择至关重要。

目前,可用于硬岩全面钻进的钻进方法主要有:顶驱或转盘驱动牙轮钻头;螺杆马达驱动牙轮钻头;涡轮马达驱动孕镶金刚石钻头。

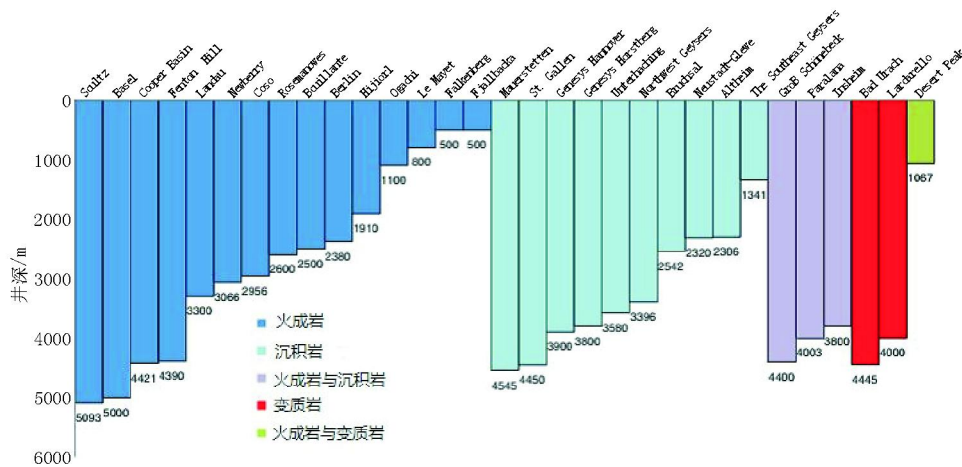


图6 世界上主要EGS项目的岩石类型和井深

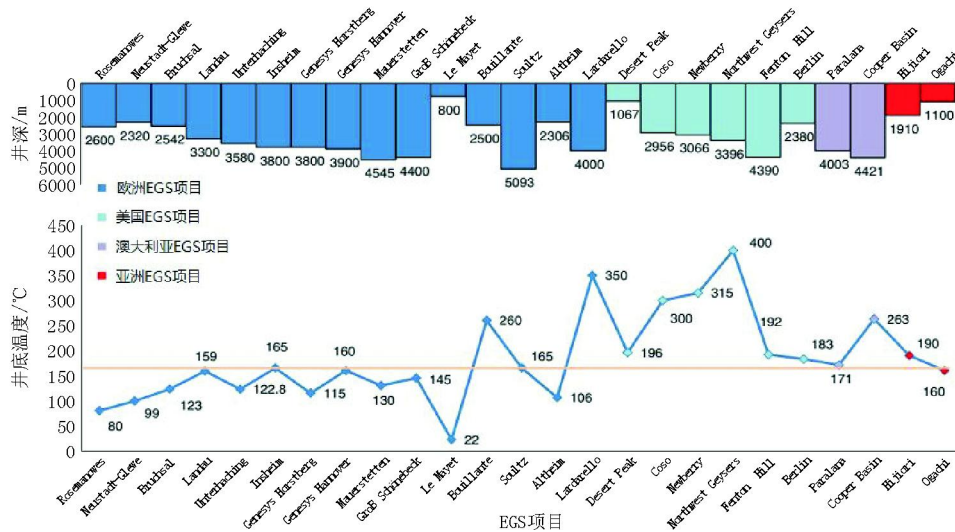


图7 世界上主要EGS项目的井深和井底温度

顶驱或转盘地表驱动的方法是一种传统的全面钻进方法。大量实践结果表明,该方法与井底驱动的钻进方法相比,存在着诸多弱点:(1)由于转速低,导致机械钻速低;(2)由于钻杆柱工作稳定性差和钻杆柱受力复杂,导致钻进工具寿命低;(3)钻进时钻杆柱频繁敲击井壁,使井壁稳定性变差,坍塌掉

块卡钻的可能性加大。因此,这种钻进方法正逐渐受到冷遇。

相比之下,螺杆马达驱动牙轮钻头的钻进方法在机械钻速、钻具寿命和井壁稳定性等方面都比地表驱动方法显示出优越性,在越来越多的硬岩深孔钻进施工中得到了应用,如德国大陆深钻计划

(KTB)主孔、美国芬登山干热岩钻孔以及我国的汶川地震科学钻探四号孔和浙江等地施工的干热岩钻孔等。

通过将液动锤钻具引入该钻进系统,形成螺杆马达-液动锤-牙轮钻头钻进系统,可望使机械钻速得到进一步提高。

在江苏东海进行的液动锤钻进试验结果表明:配上液动锤后,牙轮钻头的机械钻速提高了近1倍(表1)<sup>[7]</sup>。

在松南气田的火山岩中,液动锤钻进(石油部门称为旋冲钻井)比普通的回转钻进机械钻速提高1~2倍(表2)<sup>[8]</sup>。

中国大陆科学钻探工程科钻一井取心钻进的数据统计表明:在榴辉岩和片麻岩地层钻进中,加上液动锤后,螺杆取心钻具的机械钻速提高了1倍多(见表3)<sup>[9]</sup>。

表1 江苏东海液动锤钻进试验结果

孔深/ m	进尺/ m	机械钻速 /( $m \cdot h^{-1}$ )	钻进方法	备注
15.40 ~ 51.89	36.49	5.55	液动锤+固定式球齿钻头	岩层较软
51.89 ~ 54.46	2.59	0.83	液动锤+固定式球齿钻头	岩石硬,硬质合金齿迅速磨钝
54.46 ~ 73.59	19.47	2.98	液动锤+牙轮钻头	岩石硬,钻头齿正常磨损
73.59 ~ 75.73	1.78	1.52	牙轮钻头	岩石硬,钻头齿正常磨损
75.73 ~ 101.00	29.05	2.98	液动锤+牙轮钻头	岩石硬,钻头齿正常磨损

注:钻进的岩石为片麻岩。

表2 旋冲钻井技术在腰深7井的应用情况

钻井方式	井段/m	进尺/m	机械钻速/( $m \cdot h^{-1}$ )
常规钻井	3348.90~3479.00	30.08	0.91
常规钻井	3479.00~3504.70	25.73	0.67
常规钻井	3542.10~3557.20	15.10	0.38
旋冲钻井	3557.20~3589.20	32.72	1.16
旋冲钻井	3589.20~3624.10	34.15	1.15

注:钻头类型为球齿牙轮钻头。

表3 CCSD科钻一井2046~5118 m井段取心钻进情况统计

取心钻进方法	取心 回次	进尺/ m	回次长 度/m	机械钻速/ ( $m \cdot h^{-1}$ )	岩心采 取率/%
螺杆马达+液动锤 取心钻进	371	2938.12	7.92	1.14	85.3
螺杆马达取心钻进	22	83.13	3.78	0.5	58.3
其它取心钻进方法	24	28.48	1.19	0.49	50.6
总计	417	3049.73	7.31 (平均)	1.09 (平均)	84.3 (平均)

利用高转速涡轮马达驱动孕镶金刚石钻头是一种新型的硬岩全面钻进方法。近些年该方法使用的结果表明:涡轮马达+孕镶金刚石钻头钻进方法有可能获得比螺杆马达+牙轮钻头钻进方法更高的机械钻速和钻头寿命。石油钻井部门在我国川东北陆相水平井钻进施工中,对地表驱动牙轮钻头、牙轮钻头+普通螺杆钻、孕镶钻头+高速螺杆和孕镶钻头+涡轮钻几种钻进方法进行对比评价,结果列于表4。很明显,孕镶钻头+高速螺杆和孕镶钻头+涡轮钻钻进方法的效果较好<sup>[10]</sup>。

表4 不同钻进方法的应用效果

钻具类型	进尺/ m	机械钻速/ ( $m \cdot h^{-1}$ )	钻头寿 命/m	井段
牙轮钻头+螺杆钻	350.28	0.45	38.92	斜导眼
孕镶钻头+涡轮钻	599.10	1.30	85.59	侧钻井段
牙轮钻头	21.35	0.34	21.35	侧钻井段
牙轮钻头+螺杆钻	28.43	0.62	28.43	水平段
孕镶钻头+高速螺杆	327.78	0.79	327.78	水平段

## 4.2 高温岩体的定向钻进技术问题

EGS系统的钻孔须采用定向钻进技术施工。目前,最常用的定向钻进技术是有缆(或者无缆)随钻测量系统和弯螺杆钻具。高温岩体钻进的温度在200℃以上。这对于随钻测量仪器和螺杆钻来说都是技术难题。

随钻测量探头内部有电子器件,螺杆钻的定子材料是橡胶,因此这2种定向钻进器具的耐温能力都不是太高。根据斯伦贝谢公司的资料<sup>[11]</sup>,改进后的随钻测量探头耐温能力可达175℃,耐高温螺杆钻的耐温可达190℃。

涡轮钻采用全金属结构,因此耐温能力明显较高。目前市场上商用高温涡轮钻的耐温能力可达260℃。不过,常规涡轮钻的转速较高,约为1000 r/min,或更高,对于定向钻进来说转速太高。为了解决这个问题,美国在芬登山HDR项目实施过程中研发了带减速器的涡轮钻,转速范围为50~200 r/min,可在275~300℃温度条件下使用。该涡轮钻在芬登山HDR项目的EE-2和EE-3井的钻进中进行了成功的使用<sup>[12]</sup>。

## 4.3 井底钻具组合有关问题

### 4.3.1 稳定器

硬岩的研磨性强,尤其是采用井底动力驱动时转速高,稳定器磨损非常迅速。在硬岩中钻进,宜采用滚轮式稳定器,可减轻稳定器与岩石之间的摩擦,

一方面可提高稳定器寿命,另一方面可降低钻进扭矩。此外,滚轮磨损后,可方便地更换,使稳定器的使用成本降低。

#### 4.3.2 减震器

在硬岩中采用牙轮钻头钻进时,钻柱震动很严重。钻压和转速加大时,震动更严重。这一方面导致钻头提前损坏,另一方面限制了钻压和转速,导致机械钻速降低。因此,采用牙轮钻头硬岩钻进时,应该在钻具组合中加减震器。

#### 4.3.3 振击器

在深钻施工中,井壁掉块是经常发生的情况。硬岩碎块的强度很高,通过活动钻具的方式很难将其挤碎,结果会导致钻具被卡死。为预防可能发生的掉块卡钻事故,有必要在硬岩钻进的井底钻具组合中加上振击器。

### 5 结语

高温岩体热能储量巨大,具有诸多优点,是一种具有极好应用前景的新型能源。希望大家充分认识到这种新能源的优越性,尽早开展高温岩体热能的研究与开发。在坚硬的岩石中和高温条件下钻进换热深井(注水井和生产井)是对钻探技术的极大挑战,应针对性地开展钻探技术研发,解决高温岩体钻进的关键技术问题,最终降低高温岩体热能的开发成本。

### 参考文献:

- [1] U. S. Department of Energy. An Evaluation of Enhanced Geothermal Systems Technology[R]. 美国能源部报告,2008.
- [2] Joerg Baumgaertner. The European Hot Dry Rock Project at Soultz [EB/OL]. [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hdr\\_pres\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hdr_pres_en.pdf).
- [3] 汪集旸,胡圣标,庞忠和,等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报,2012,30(32):25-31.
- [4] J. C. Rowley. DEEP DRILLING TECHNOLOGY FOR HOT CRYSTALLINE ROCK[R]. 美国洛斯,阿拉莫斯国家实验室研究报告 LA-UR-84-2564,1984.
- [5] Katrin Breede et al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future[J]. Geothermal Energy, 2013,(1):1-27.
- [6] Dave Duchane & Don Brown. Hot dry rock (HDR) geothermal energy research and development at Fenton Hill, New Mexico[J]. GHC BULLETIN, 2012,(12):13-19.
- [7] 张伟,谢文卫. 大直径硬岩钻孔中的液动锤全面钻进[J]. 地球科学,2004,29(S1):2-4.
- [8] 穆国臣,陈晓峰,王雪. 松南地区深井钻井提速难点与对策[J]. 石油钻探技术,2011,39(6):19-22.
- [9] 王达,张伟,张晓西,等. 中国大陆科学钻探工程科钻-井钻探工程技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [10] 兰凯,张金成,母亚军,等. 高研磨性硬地层钻井提速技术[J]. 石油钻采工艺,2015,37(6):18-22.
- [11] High temperature drilling operations. 斯伦贝谢公司产品手册[M].
- [12] J. W. Neudecker, J. C. Rowley. High-Temperature Directional drilling turbo-drill[R]. 美国洛斯,阿拉莫斯国家实验室研究报告 LA-9231-MS,1982.