

增强型地热系统的开发

——以法国苏尔土地热田为例

王晓星, 吴能友, 苏 正, 曾玉超

(中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘 要: 增强型地热系统是指从地下 3~10 km 低渗透岩体中经济开采深层地热的人工热能系统, 主要用于发电。目前地热技术是再生能源领域的重要发展方向, 而对其进一步研究受到发达国家的高度重视, 但我国在该领域研究还基本处于空白。法国的苏尔土地热田是欧洲目前仍在运行的增强型地热系统(EGS) 现场试验场, 在 20 多年的实践过程中产生了大量的科研成果。本研究通过回顾该地热田在开发阶段取得的成果, 得到其地质勘探、人造储层、循环测试等方面的主要结论, 以便为国内 EGS 科学研究及项目实施提供参考。

关 键 词: 增强型地热系统(EGS); 苏尔土; 人造热储; 循环测试

中图分类号: TK529

文献标识码: A

引 言

增强型地热系统(EGS—Enhanced/Engineered Geothermal Systems) 是指在地下 3~10 km 低渗透性的高温岩体中, 利用水力压裂等井下作业措施形成储层, 经济地开采热能并用于发电的人工热能系统。1970 年, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室最早提出了这种高温岩体地热资源开发的概念与思路, 1974 年世界上第一个 EGS(当时称为 HDR—Hot Dry Rock) 项目在新墨西哥州北部的芬登山(Fenton Hill) 正式开始场地试验^[1~2], 而后英国、德国和法国等欧洲国家也开始着手进行类似试验。其中, 法国苏尔土地热田的前身是著名的 Pechelbronn—Merkwiller 油田, 该油田近 500 口油井的温度测量结果显示, 其沉积盖层(~1 km) 的地温梯度达到 110 °C/km, 且热流值大于 140 mW/m²^[13~5]。因此, 在欧盟委员会的协调下, 对各项目进行详细比较之后, 最终把项目

重点确定在了苏尔土。

20 多年来, 苏尔土项目的开发实践产生了大量的科研成果和先进技术, 特别是通过 3 口 5 km 深井的取芯、测井、激发及循环测试, 基本认识了其深层结晶岩体中温度、裂隙及水力等性质^[4~8], 期间测量和监测的各类数据以及积累的宝贵经验不仅对欧洲, 乃至世界 EGS 发展都具有重要贡献。本研究通过回顾苏尔土项目的开发历程, 总结其地质特征、人造储层、循环测试等方面的主要成果, 以便为国内 EGS 的科学研究及项目实施提供参考。

1 地质特征

苏尔土地热田隶属于法国东北部的阿尔萨斯大区, 靠近上莱茵地堑西缘。内部充填海相和湖相的灰岩、泥灰岩和蒸发岩沉积物。不整合界面之上还覆盖有侏罗纪灰岩和日耳曼三叠纪地层。这些新生代和中生代的沉积物之下是由斑状二长花岗岩和二云母花岗岩组成的古生代基底。根据已有的温度测井资料, 该地区等温线主要受莱茵地堑构造的影响, 因此, 地热田的第一口井 GPK1 即在垂直高温异常最明显处—地垒西部位置, 并在 1.376 km 深度钻遇花岗岩基底。GPK1 井的钻进, 也标志着苏尔土地热田开发阶段正式开始^[9~11]。

1987~1988 年, GPK1 井钻进至 2.002 km, 井底温度 140 °C。由于技术原因, 1.4~2.0 km 取芯失败, 只收集到累积长度为 50 m 的岩样。1991 年, 将旧油井 EPS1 加深至 2.227 km, 在 0.930~2.227 km 进行了连续取芯^[11], 其高质量和高覆盖率的取芯, 为后续的岩石学、矿物学以及裂隙系统的研究提供

收稿日期: 2011-12-21; 修订日期: 2012-03-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性基金资助项目(KGCX2-YW-805)、广州能源研究所博士后基金资助项目(y107611001) 和所长基金资助项目(y10721)

作者简介: 王晓星(1982-), 女, 吉林人, 广州能源研究所博士后。

了宝贵的资料。1992 年, GPK1 井加深至 3.590 km, 温度为 168℃, 并在 3.51 km 处进行取芯, 如图 1 所示。1995 年钻成 GPK2 井, 深度达 3.876 km, 井底距 GPK1 约 450 m, 温度为 168℃。1999 年将其加深至 5 km, 温度升高到 202℃。从 2001 年起, 开钻 GPK3 井至 5.093 km, 该井与 GPK2 井底间距约为 600 m。2003 年在与 GPK2、GPK3 同一井场钻 GPK4 井, 深度 5.105 km, 井底距 GPK3 约 650 m^[14, 12]。

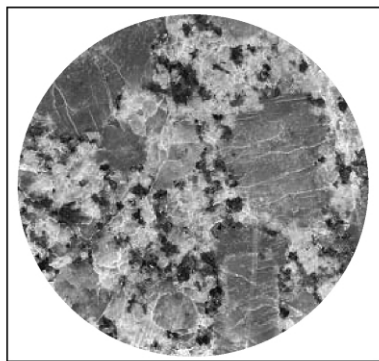


图 1 富含长石斑晶和黑云母的花岗岩取芯样品 (GPK1 井 3.51 km 深处)^[11]

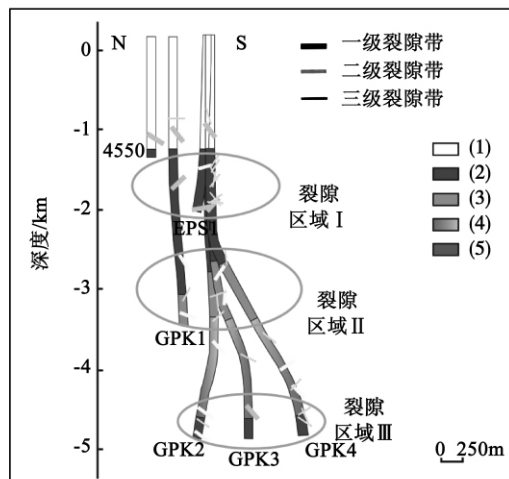
Fig. 1 Core-taken specimen of granite rich in feldspar phenocryst and biotite (at the depth of 3.51 km GPK1 well)

除岩性、温度外, 识别和描述裂隙是确定地质特征的重要工作。苏尔士项目中除钻井取芯、岩屑和常规测井方法以外, 还广泛采用了各种成像测井方法, 包括 UBI (超声波成像)、BHTV (井下电视)、FMS (地层微电阻率扫描)、FMI (地层微电阻率成像) 和 ARI (方位电阻率成像), 并与更大尺度的 VSP (垂直地震剖面) 和微地震结果进行比对。基于测井解释和统计学方法, 95% 的裂隙可归纳为 N-S、E/W、NW-SE 和 NE-SW 走向, 特别是前两种走向, 在所有裂隙中比例高达 60%。由于 GPK3 在 1.448 ~ 5.107 km MD (Measured Depth measured along the hole, 下同), GPK4 井在 1.446 ~ 5.259 km MD 几乎全部进行了 UBI 成像测井, 因此, 还计算了沿井眼轨迹分布的裂隙密度, 其范围分别为 0.3 ~ 1.4 frac/m (条裂隙/米) 和 0.23 ~ 2.86 frac/m (条裂隙/米)^[9, 11]。

在 4.550 km、EPS1 和 GPK1 ~ 4 六口井中, 共划分 39 个裂隙带, 按照其尺度和连通性分成 3 个级别, 如图 2 所示。一级裂隙带: 水力激发之前就具有渗透性, 钻井过程中有泥浆漏失现象, 是主要的裂隙

带; 二级裂隙带: 激发过程中有超过 20% 的水损, 或有地球物理或取芯等资料支持其裂隙宽度较大并有明显的水热蚀变显示; 三级裂隙带: 周围水热蚀变显示不明显, 激发过程中水损小于 20%, 同时裂隙带规模小于前两个级别^[9 ~ 12]。

4.450 km、EPS1 和 GPK1 井在 1.200 km 深度附近与一个斑砂岩统的较大断层交叉, 形成一级裂隙带, 内部充填石英、硫化矿和重晶石。GPK1 和 4.550 km 井在该深度附近钻井泥浆全部漏失。4.550 km 井的 BHTV 成像测井也显示了裂隙特征。在 GPK1 井的 1.820 km MD 一级裂隙带处还发现了天然盐水和非常高的氦同位素异常, 石英脉晶洞以及伊利石。GPK2 井上部花岗岩的裂隙带也引起了钻井液的漏失, 收集不到岩屑。2.120 km MD 处的一级裂隙带显示出明显的蚀变, 在裸眼井段进行水力测试, 发现该裂隙带吸入了 95% 的流量。由于 GPK4 井中不存在一级裂隙带, 随着深度的不断增加, 地热田深部流体流动的主要通道出现在 GPK3 井底部约 4.770 km MD 处, 该一级裂隙带由若干裂隙 (累积视厚度在 15 km MD 左右) 组成, 还出现 K 含量边缘高、中心低的蚀变晕^[9 ~ 12]。



(1) 沉积盖层; (2) 标准花岗岩; (3) 带有蚀变岩脉的标准花岗岩; (4) 由富含黑云母和角闪石的花岗岩逐步变为标准花岗岩; (5) 富含二云母和黑云母的花岗岩^[10]

图 2 苏尔士地热井裂隙分布 N-S 剖面综合图

Fig. 2 Comprehensive N-S sectional view of the fracture distribution along a geothermal well in Soultz

花岗岩中的大多数裂隙带又被归纳为三个大区域。其中, 裂隙区域 I (1.8 ~ 2 km TVD) (True Vertical Depth, 下同) 主要为一级裂隙带; 裂隙区域 II (3 ~ 3.4 km TVD) 裂隙尺度中等, 含有大量粘土和

热液矿物 作为储层目标进行激发后 ,在 1997 年进行了第一次为期 4 个月的循环试验;裂隙区域Ⅲ位于 4.7 km 处两个花岗岩单元的交界面附近 ,蚀变程度较低 ,用于发电的循环试验主要在该处激发的储层进行^[10]。

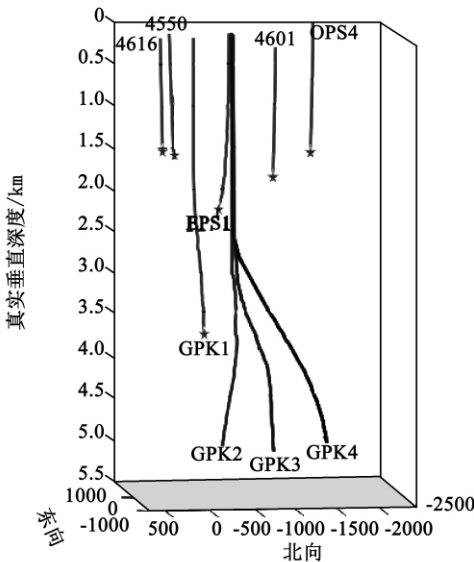
2 人造热储

由于深部花岗岩储渗能力差 ,因此 ,如何通过人工方法在岩体中构造具有高渗透性的裂隙体系成为 EGS 设计中最为关键的一步。在苏尔土地热田中 ,主要采用水力激发方式 ,并利用微地震手段监测其激发所产生的岩石破裂事件 ,进而得到人造热储的时间和空间变化。

苏尔土地热田的微地震监测网由 6 口井构成 ,如图 3 所示 ,其中速度检波器被安装在 GPK1、EPS1 和 4616 井中 (深度分别为 3.500 ,2.017 ,1.480 km) ,加速度检波器安装在 4601、OPS4 和 4550 (深度分别为 1.539 ,1.484 ,1.482 km) 井中。采集系统频率带宽为 10 Hz ~ 1 kHz ,采样间隔为 0.5 ms ,一个记录长度是 5 s。使用 IFP (法国石油研究院) 的 Perseids 地震监测设备进行地震信号快速采集 ,使用 Semore Seismic 公司的 DIVINE 成像软件包进行数据处理^[13~16]。

在 GPK2 的激发过程中 ,为了更好的打开深部裂隙 ,首先注入密度为 1.2 g/cm³ 的盐水 ,随后注入淡水。GPK3 激发阶段的前 6 天 (2000 年 5 月 27 日 ~ 2000 年 6 月 1 日) 实施正常单井注水 ,考虑到两井同时进行激发 ,井之间注入压力产生叠加 ,将更

有助于裂隙发育 2003.06.02 ~ 2003.06.04 进行了 GPK2 和 GPK3 同时注水的尝试 ,流速分别为 50 L/s 和 20 L/s。为了避免强地震事件的发生 ,GPK4 减小注入流量和激发时间。激发结束之后 ,均通过循环测试对激发效果进行检验^[14~18]。



GPK2 和 GPK4 为生产井 ,GPK3 为注入井 ,周围是监测井 ,星号指示检波器位置^[15]

图 3 地热井分布草图

Fig. 3 Sketch showing the distribution of geothermal wells: GPK2 and GPK4 well are production ones , GPK3 is an injection one. The ones around are monitoring wells and the asterisk indicates the location of the wave detector

表 1 水力激发及微地震监测数据

Tab. 1 Hydraulically - excited earthquake and microseismic monitoring data

井名	激发时间	注入量 /m ³	注入流速 /L · s ⁻¹	微地震事件 /件	最大震级 /ML	激发体积 /km ³	生产指数 /L · (s · bar) ⁻¹
GPK2	2000	23400	31 41 51 (峰值 90)	触发 315000	2.6	0.468	激发前: 0.02
	06.30 ~ 07.06			定位 14000			激发后: 0.4
GPK3	2003	37500	30 50 (峰值 60 90)	触发 92980	2.9	1.013	激发前: 0.2
	05.27 ~ 06.07			定位 22000			激发后: 0.3
GPK4	2004	9400	30 (峰值 40 ~ 45)	触发 36536	2.3	0.164	激发前: 0.01
	09.13 ~ 09.17			定位 5700			激发后: 0.2
	2005			定位 3000			激发前: 0.2
	02.07 ~ 02.12	12300	30 45 25			0.179	激发后: 0.2

从微地震的监测结果来看 ,随着激发时间的延长 ,微地震的发生由井逐步向外扩散 ,累计事件的数量随注入体积的增大而增大 ,但微地震并不与注水

结束同时停止 ,而是相对滞后 ,如图 4 所示 ,且最强烈的地震事件往往出现在关井阶段 ,并处于已激发区域的边缘^[15]。GPK2 和 GPK4 的第一次激发 ,激

发前后生产指数均增大 20 倍,激发效果最为明显。GPK3 虽然进行了双井激发,但是生产指数变化不大,原因可能是由于激发地层附近本身存在渗透率较大的破碎带,导致了快速导水^[14~17]。

通过钻井岩屑、取芯的分析以及测井资料解释证明,裂隙中充填有碳酸钙和其它可溶矿物,因此,苏尔土地热田采用了一系列化学激发来增强地热井及近井周围渗透率,这也同时避免了水力压裂过程中可能诱发的、具有危害性的地震^[19~21]。

激发使用的工作液主要包括以下 4 种:(1) 盐酸 HCl: 溶解裂隙中的次生碳酸盐(方解石和白云石);(2) 常规泥酸 RMA(Regular Mud Acid): 由浓度为 12% HCl 和 3% HF 混合而成,溶解裂隙中的

粘土、长石和云母;(3) 有机土酸 OCA(Organic Clay Acid): 由浓度为 5%~10% C₆H₈O₇、0.1%~1% HF、0.5%~1.5% HBF₄ 和 1%~5% NH₄Cl 组成,针对高温或对 HCl 等敏感的高粘土含量地层,增大酸液有效作用距离,达到深部酸化目的;(4) 螯合剂 C₆H₉NO₆(NTA): 由 NaOH 和浓度为 19% Na₃NTA 组成(pH=12),可形成如 Fe、Ca、Mg 和 Al 等阳离子的络合物,降低此类阳离子活度,并使相应的矿物溶解(如方解石等)。由于在使用 RMA、OCA 和 NTA 之前和之后,需要对井进行预冲洗和后冲洗,因此除 HCl 外,其它化学激发均由专业服务公司完成^[21~22]。

表 2 三井化学激发参数统计表

Tab. 2 Statistics table of the chemically excited parameters of the above-mentioned three wells

井名	方式	开始时间	工作液	注入体积/m ³	浓度/%	流速/L·s ⁻¹	持续时间/h
GPK2	普通酸压	2003.02.13	HCl	650	0.18	30	6.0
		2003.02.14	HCl	810	0.09 0.18	15 30	10.0
GPK3	普通酸压	2003.06.27	HCl	865	0.45	20	12.0
	延迟酸压	2007.02.15	OCA	250	—	55	约 1.5
	普通酸压	2005.02.02	HCl	4700	0.2	27.2	48.0
GPK4	普通酸压	2006.05.17	RMA	200	—	22	约 2.3
	螯合剂	2006.10.19	NTA	200	—	35	1.6
	延迟酸压	2007.03.21	OCA	200	—	55	约 1.0

图 4 比较了各种激发方式对注入/生产指数产生的影响。激发后,GPK2 单井生产指数为 0.5 L/(s·bar),由于 GPK2 与 GPK3 之间连通性较好,在双井循环测试中,GPK2 的生产指数达到 0.8 L/(s·bar)。GPK3 的生产指数约为 0.4 L/(s·bar),尽管连续进行了 HCl 和 OCA 激发,但变化不大。主要原因是 4.7 km MD 裸眼井段与导水的裂隙带交叉,减弱了化学激发作用。GPK4 水力激发后的生产指数为 0.2 L/(s·bar),经过一系列化学激发已经上升到 0.5 L/(s·bar),OCA 和 RMA 酸化效果较明显,但注入指数增加的一部分是由两处(4.11 km 和 4.440 km TVD)套管漏失引起的。NTA 使用过程中出现井口高压异常,推测生产区域出现堵塞,生产状况反而有所恶化^[21~22]。

根据注入/生产指数还可以进一步计算等效孔隙介质渗透率 EPM(Equivalent Porous Media Permeability)。激发前生产井 GPK2 和 GPK4 水力测试给出岩体的天然 EMP 分别为 9×10^{-17} 和 5×10^{-17} m²,激发后 EPM 已经达到了毫达西(10^{-15} m²)数量

级。GPK3 初始的 EMP 较高 9×10^{-16} m²,激发后变化不大,但也在毫达西范围^[21]。

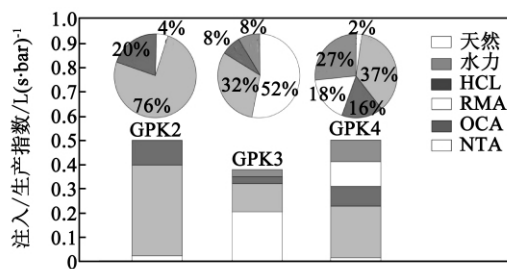


图 4 单一激发方式对地热井注入/生产指数贡献^[21]

Fig. 4 Contribution of a single excitation mode to the injection/production index of the geothermal wells

3 循环试验

1997 年 7~11 月,苏尔土地热田第一次由

GPk1(注入井)和GPk2(生产井)组成的双井系统作为上部储层(3.0~3.6 km),进行为期4个月的循环试验。试验期间,GPk2共生产温度为142℃盐水244 kt,通过离心泵回注进GPk1的流体温度为40℃,流体流速为25 kg/s。为提高采收率,GPk2井下0.43 km处安装有水泵。初始循环时产出流体的比重为1.048 g/cm³,结束时达到1.063 g/cm³,反映出地层水比例不断增加。示踪剂的回收率为30%,相对较小,而且产出快,说明井与井之间存在某些“短路”通道。应用离散裂隙网络模型进行的模拟显示,在流量为25 L/s的双井循环系统中,地热田运行20年后,储层温度下降5%。在试验后期,40℃的注入温度产生的热功率为11 MW^[4 6~7]。

2005年7~12月,经过一系列水力和化学激发以后,苏尔土地热田第一次由GPk2(生产井)、GPk3(注入井)和GPk4(生产井)组成的三井系统作为下部储层(4.5~5 km),进行为期5个月的循环试验。试验期间,GPk2、GPk3和GPk4的流速分别为12.5、15.0和2.5 kg/s,GPk2(160℃)和GPk4(120℃)共生产209 km³热盐水。循环过程中进行的示踪测试显示,GPk2和GPk4井分别回收注入示踪剂的25%和2%。结果的不对称性首先表明由裂隙或断层组成的流体流动路径非常复杂;其次,GPk2、GPk3之间要比GPk3、GPk4之间水力连通更加直接和快速。在循环中,示踪测试以及各种地球化学数据均显示,即使在大量外部流体注入以后,排出的流体中也一直含有天然热盐水,再次印证了地热田中的人造热储与某个天然热储存在连通的观点。近半年的循环中记录了大约600次微地震事件,部分微地震事件震级超过2.0,且一般出现在注入流量和压力突然增加之后^[4 6~7 23~24]。

2008年6~8月,再次进行了为期2个月的循环试验,GPk3注入,GPk2生产,GPk3关井。GPk2井350 m深处安装有总轴泵(LSP, line-shaft pump),流体流速为25 L/s,出水温度155℃。注入井井口压力初始为6 MPa,期间缓慢增加,测试结束前一周时为7 MPa。循环中记录约190个微地震事件,发生位置不超出之前地震云范围,震级小于1.4。两次循环存在区别的原因,主要是循环持续时间和循环水量不同以及有无使用水泵造成的。除此之外,2005~2008年,地热井本身也通过化学激发发生变化^[4 6~7 23~24]。

4 电站建设

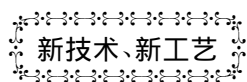
苏尔土地热田开发目标首先是建成一个电功率1.5 MW的地热电站,考虑到地热流体的高温和高矿化度,选择使用有机朗肯循环系统,热-电转换中使用低沸点的异丁烷作为有机工质,汽轮机转速为13 000 r/min,发电机采用异步方式,机转速1 500 r/min,机组输出功率11 kV。在进行回注之前,地热流体在热交换装置中冷却到80~90℃。截至2009年9月,电站装置已经组装,并且在2008年6~8月的循环期间进行了发电,此时,GPk2井原来的LSP已经由于结垢被拆除,在井下250 m深处重新安装。之后,GPk4井下500 m处安装电潜泵(ESP, electro-submersible pump),并首次实现三井系统中两口生产井同时带泵运行。下一阶段的主要任务是进行系统的长期循环测试,优化电站运行,逐步增加电力生产,并入当地电网^[4 23]。

参考文献:

- [1] U. S. Massachusetts Institute of Technology. The Future of Geothermal Energy [EB/OL]. (2007) [2011-12-20]. <http://geothermal.inel.gov>.
- [2] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, KANG Jian-rong. Introduction to HDR geothermal development [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [3] Buday T, Kozak M. Necessity, experiences and abilities of deep heat mining [EB/OL]. (2007) [2011-12-20]. <http://geo.science.unideb.hu/acta/geolgeom/dokument/volumes/vol22007/17buday.pdf>.
- [4] Genter A, Evans K, Cuenot N, et al. Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS) [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2010, 34: 502-516.
- [5] Dezayes C H, Gentier S, Genter A. Deep geothermal energy in western Europe: the Soultz project. BRGM/RP-54227-FR [EB/OL]. (2005) [2011-12-20]. <http://www.brgm.fr>.
- [6] Genter A, Evans K, Cuenot N, et al. The EGS Soultz (France): from reservoir development to electricity production [C]//Annual Meeting of the Geothermal Resources Council. Reno, Nevada, 2009.
- [7] Fritsch D, Baumgaertner J, Cuenot N, et al. The soultz EGS pilot plant: energy heat and power from deep enhanced geothermal systems [C]//3rd International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies. Monaco, 2008.
- [8] Genter A, Fritsch D, Cuenot N, et al. Overview of the current activities of the European EGS Soultz project: from exploration to electricity production [C]//Proceedings Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California, 2009.

- [9] Benoit Christian Valley. The relation between natural fracturing and stress heterogeneities in deep-seated crystalline rocks at Soultz-sous-Forest(France) [D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology 2007.
- [10] Dezayes C H ,Genter A ,Valley B. Overview of the fracture network at different scales within the granite reservoir of the EGS Soultz site (Alsace ,France) [C]//Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bail Indonesia 2010.
- [11] Genter A ,Dezayes C H ,Ledest B ,et al. Geological reconnaissance of deep fractured geothermal reservoirs: what we have learnt at Soultz in 20 years [C]//EHDRA Soultz scientific Meeting. Soultz ,France 2008.
- [12] Valley B ,Dezayes C H ,Genter A. Multi-scale fracturing in the Soultz-sous-Forests basement from borehole images analyses [C]//Soultz Scientific Meeting. Soultz-sous-Forest 2007.
- [13] 王爱国. 微地震监测与模拟技术在裂缝研究中的应用[D]. 东营: 中国石油大学(华东) 2008.
WANG Ai-guo. Application of micro-seismic monitoring and simulation technology in the study of fracture [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China) 2008.
- [14] Baria R ,Michelet S ,Baumgaertner J ,et al. Microseismic monitoring of the world's largest potential HDR reservoir [C]//Proceedings Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford ,California 2004.
- [15] Schindler M ,Nami P ,Schellschmidt ,et al. Correlation of hydraulic and seismic observations during stimulation experiments in the 5 km deep crystalline reservoir at Soultz [C]//EHDRA Soultz scientific Meeting. Soultz ,France 2008.
- [16] Michelet S ,Baria R ,Baumgaertner J ,et al. Seismic source parameter evaluation and its importance in the development of an HDR/EGS system [C]//Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford ,California 2008.
- [17] Evans K ,Baisch S ,Cuenot N ,et al. Milestone events & key observations in seismics at Soultz [C]//EHDRA Soultz Scientific Meeting. Soultz ,France 2008.
- [18] Evans K ,Hopkirk B ,Jung R ,et al. Milestone events & key observations in thermics ,stress and hydraulics at Soultz (1987-2002) [C]//EHDRA Soultz scientific Meeting. Soultz ,France 2008.
- [19] Andre L ,Rabemanana ,Vuataz F D. Influence of water-rock interactions on fracture permeability of the deep reservoir at Soultz-sous-forets(France) [J]. Geothermics 2006 35: 507 - 531.
- [20] Portier S ,Andre L ,Vuataz F D. Review on chemical stimulation techniques in oil industry and applications to geothermal systems [EB/OL] (2007) [2011 - 12 - 20]. http://engine.brgm.fr/Deliverables/Period2/ENGINE_D28_WP4_ChemicalStimulation_DHMA_052007.pdf.
- [21] Nami P ,Schindler M ,Tischner T ,et al. Chemical stimulation results at Soultz and overview of the flow performance of the wells [C]// EHDRA Soultz scientific Meeting. Soultz ,France 2008.
- [22] Nami P ,Schellschmidt R ,Schindler M ,et al. Chemical stimulations for reservoir development of the deep crystalline HDR/EGS system at Soultz-Sous-Forest (France) [C]//Proceedings Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford ,California 2008.
- [23] European Deep Geothermal Energy Proaranrme [R]. Geothermie Soultz 2012: 10.
- [24] Gerard A ,Genter A ,Kohl T ,et al. The deep EGS (Enhanced Geothermal System) project at Soultz-Sous-Forest (Alsace ,France) [J]. Geothermics 2006 35: 473 - 483.

(辉 编辑)



新技术、新工艺

世界上第一台半潜式风力涡轮

据《Offshore Marine Technology》2010 年第三季度刊报道,Tideland Signal 信号设备公司已向 Statoil ASA 供应成套导航设备,以便警示在 Hywind 浮动风力涡轮附近航行的船队。

由 Technip 公司建造的 Hywind 是世界上第一个设置在大陆架的海上全尺寸浮动风力涡轮,它被安装在一个翼形梁浮体上、有 3 个 80 m 直径叶片的 2.3 MW Siemens 涡轮机。可以设置在水深从 120 ~ 700 m 范围的水域,以便获得最佳风力和环境条件。这可以排除水深大于 30 ~ 50 m 处需要很大成本的底座。

高出海平面 65 m 灯塔站被设计成装有 3 个 Tideland MLED-455 Syncrolan 灯塔,每个灯塔照射范围为 5 海里。它们以 120°间隔围绕灯塔站周围以 15 m 高度安装在不锈钢支架上,并且装有持续 48 h 电池备用光源。

MLED-455 被设计成利用太阳光作为光源,维护要求最低而使用寿命却达 7 年。

(学 牛 摘译)

增强型地热系统的开发—以法国苏尔土地热田为例 = **Development of Enhanced Geothermal Systems (EGS) —With Soultz Geothermal Farm in France Serving as an Example** [刊, 汉] / WANG Xiao-xing, WU Neng-you, SU Zheng, ZENG Yu-chao (Key Laboratory on Renewable Energy and Natural Gas Hydrate, Guangzhou Energy Source Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2012, 27(6). — 631 ~ 636

Enhanced geothermal systems denote the artificial thermal energy systems economically exploiting the geothermal energy at a depth of 3 to 10 meters under the ground surface from low penetration rocks and mainly used for power generation. As the currently important development direction in the geothermal energy domain, their investigation gains a wide attention in the developed countries but in China basically remains virginal ground. Soultz geothermal farm, which is located in the northeast part of France, is regarded as an important representative of the EGS currently still in operation in Europe and conducting on-site tests. During its operation in more than 20 years, it has produced a great quantity of achievements in scientific research. By looking back the main understandings of the geothermal farm obtained during its development process, the authors have summarized the main conclusions concerning the geological prospecting, artificially-made storage layer and circulation testing etc., thus offering reference for scientific research and project implementation of the EGS in China. **Key words:** enhanced geothermal system (EGS), Soultz, artificial heat storage, circulation testing

轴流涡轮基元级动叶稠度对转静干涉的影响 = **Influence of the Rotating Blade Solidity of the Elementary Stage of an Axial Flow Turbine on the Interference Between Its Rotor and Stator** [刊, 汉] / YANG Jie, QIAO Wei-yang, ZHAO Lei, TAN Hong-chuan (College of Power and Energy Source, Northwest China Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2012, 27(6). — 637 ~ 642

An unsteady numerical simulation was made of the flow conditions in the elementary stage of an axial flow turbine at various rotating blade solidities and investigated was the mechanism governing the influence of the rotating blade solidity on the unsteady potential interference on the rotor of the turbine, interference on the stator blade wake and rotating blades as well as the unsteady characteristics of the elementary stage. The research results show that in a certain range of the rotating blade solidity, the intensity of the unsteady potential interference on the rotor will rapidly diminish with an increase of the rotating blade solidity. However, in the upstream stator, such influencing range has no obvious relationship with the rotating blade solidity. Any change of the rotating blade solidity will affect the inten-