

世界地热能发电新进展

罗兰德·洪恩¹, 李克文²

1. 斯坦福大学能源工程系, 美国加利福尼亚州 94305-2220
2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

摘要 简要回顾了国际地热发电的历史,介绍了过去5年全球地热能开发的理论、技术和设备等方面的巨大变化。2005年开始的高油价以及减少温室气体排放的全球性需求使各国开始把注意力聚焦在可再生能源方面。地热能的开发在全世界范围内发展迅速,既有像新西兰、印度尼西亚和美国这样长久以来热衷于开发地热能的,也有像澳大利亚和德国这样过去对地热能不太感兴趣的。分析表明,一些新的地热开发项目依旧遵循传统思路在火山活动区域使用常规水热资源,而另一些则选择在非火山活动区采用增强地热系统(EGS)技术开发干热岩地热能。目前,部分国家已经建立一些EGS项目,比如美国,有6个建设中的EGS项目,试图在不同的技术层面进行探索和研究。现代地热开采和发电技术使得人们可以在缺少冷却水以及交通不便的情况下对温度较低的常规地热资源进行开发。根据目前情况来看,预计未来地热工业的发展在发现新的地热田以及提高现有地热田开发程度方面将面临较大的技术挑战,主要可能有以下两个关键问题:(1)在开发过程中的“生产盲区”问题,这主要针对那些温度不高也不低的地热田,温度不太高但又高到无法下泵,温度不太低但又不能采用闪蒸方法发电;(2)可靠的EGS开发方案和技术研发,要求可以确保有可持续、足够高的产能(温度与流量),并能向公众,特别是项目附近的居民保证不会诱发地震灾害。

关键词 地热的未来;地热井产能;增强地热系统

中图分类号 TM616

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.32.009

New Progress in the World Geothermal Power Generation

Roland N. Horne¹, LI Kewen²

1. Department of Energy Engineering, Stanford University, CA 94305-2220, USA
2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract The history of geothermal power generation in the world has been briefly reviewed. In the past five years, considerable changes in the geothermal development have been brought. Historically high oil prices since 2005, supporting by a global ambition to address greenhouse gas reduction have impelled every country in the world paying attention to the renewable energy. Geothermal developments have accelerated in many parts of the world, either in the countries, such as New Zealand, Indonesia, and the USA having a traditional interest in conventional geothermal resources, or in the countries having no historical interest in geothermal energy, such as Australia and Germany. The analysis conducted indicates that some new developments have followed well-worn paths using conventional hydrothermal resources in volcanic regions, while others have struck out in new directions involving Enhanced Geothermal System (EGS) projects in non-volcanic regions. Technology advance has allowed to developing conventional resources with lower temperature, restricted water access, and constrained surface utilization. EGS projects have launched in a variety of different directions and places, currently the USA keeps six EGS projects in operation. Based on current status, the future for the operation expansion of geothermal developments depends on new fields exploration and technical challenges overcoming in known but not-yet-exploited fields. Two issues are currently being addressed by the world geothermal community, they are (1) the productivity gap in the exploitation of fields, namely, temperature is too high for down-hole pumps, however it is too low for flash production; (2) the reliable EGS development procedures are able to ensure sustainable flow rates and assure the public that seismologic disasters will not be induced.

Keywords future of geothermal power; geothermal well productivity; enhanced geothermal system

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2012-10-30

作者简介: 罗兰德·洪恩, 教授, 研究方向为热储工程、试井理论与方法、系统优化技术, 电子邮箱: horne@stanford.edu; 李克文(通信作者), 教授, 研究方向为热储工程、地热发电理论与技术、提高采收率, 电子邮箱: likewen@cugb.edu

0 引言

过去5年中,地热能开发在世界范围蓬勃发展。例如,美国地热能协会(GEA)2011年4月发布的年度报告中(图1^[1])清楚地表明,美国重拾了对于地热能开发的兴趣。尽管增长速度因2008—2009年的金融危机而有所减缓,但是在此期间美国的地热发电装机容量仍稳步上升。

这些新增的地热开发项目很明显不仅限于“清理废弃项目”——之前被搁置的地热项目,大量项目属于在“未开采”地区进行地热能开发利用(图2^[1])。GEA对“未动用资源”的定义是:“常规水热资源(未动用)——天然的热储温度和储层流动能力足以进行地热发电,但之前的开发没有达到能够支撑地热电站持续运行程度的地热资源。”

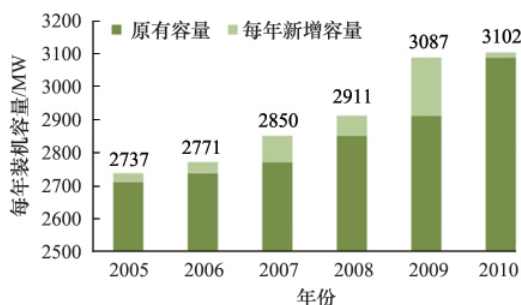


图1 2005—2010年美国的装机容量

Fig. 1 Installed capacity in the USA during the period of 2005—2010

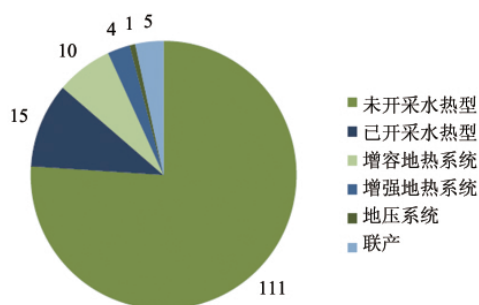


图2 美国正在开发的146个地热项目分布

Fig. 2 Total of 146 geothermal projects under development in the USA, and their classification

所以,这111个属于常规/未动用资源的地热项目代表在目前尚未投产的新区内的勘探开发工程。

2005—2010年,许多国家的装机容量都出现了增长,世界范围内总装机容量增长了1782MW,目前总装机容量为10715MW^[2]。图3^[2]为1950—2010年世界范围内装机容量和发电量的变化曲线,以及2015年的预测值。根据正在开发的项目数推测(图2),预测2015年装机容量将达到18500MW,是十分可信的。还应当指出的是,20世纪80年代初的高油价也促进了随后地热能的迅速发展。

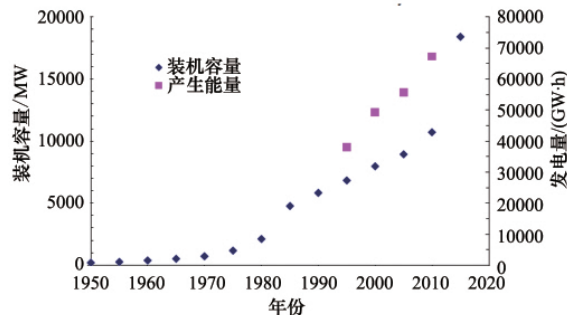


图3 1950—2010年世界地热发电的装机容量和发电量

Fig. 3 Installed capacity (MW) and produced electricity (GW·h) of geothermal electricity in the world during the period of 2005—2010

地热能的增长是世界经济、政治力量(主要是油价攀升和倡导利用可再生能源的意识)与先进技术相结合的结果。其中,先进技术使得地热能更容易利用(例如,电站效率的提高和低温热流体的利用)。技术创新主要包括以下方面。

(1) 将闪蒸发电与双工质底部循环技术相结合的新型发电设备。这些设备得到了越来越多的应用,该技术有利于提高热能资源的采收率。

(2) 精细设计的双工质循环电站。该技术可以利用温度更低的地热流体,从而使得可采地热资源更多、更加广泛。一个成功的实例是美国阿拉斯加 Chena 电站,利用250kW的有机朗肯循环装置,可以用一个地热流体温度仅为74℃的地热储发电^[3]。

(3) 储层改造技术。目前世界上第一个商业化增强地热系统(EGS)已在德国 Landau 建成,该工程始于2008年^[4]。目前,世界范围内有多个EGS项目正在开发中,仅在美国就有6个。

本文将以上述3方面为主线,阐述未来地热工业发展。

1 复合型地热电站

多年来,地热电站在一定程度上可以说是大同小异,形成这一现象的原因可能是早期部分闪蒸发电站的成功,后来就沿袭这些成功的方案。根据在美国地热田的经验,与世界其他地区一样,55MW的电站在美国被认为是“标准”规模。基于当时普遍的热储温度,汽轮机入口压力通常处在约600kPa。

然而在不久之前,电站的设计策略出现了较大的变化,新西兰 Rotokawa 的联合循环电站(图4)就是一个很好的例子,这是第一批依靠闪蒸发电站排汽作为双工质循环电站进汽的电站之一。该电站由具有较高入口压力(2550kPa)的背压汽轮机和3个双工质装置组成^[5]。与 Geysers 地热田的8kg/(kW·h)^[6]或萨尔瓦多的 Ahuachapán 地热田的9kg/(kW·h)^[7]相比,这种联合循环机组的蒸汽消耗仅为5kg/(kW·h),是非常有利的。如今,双工质与闪蒸装置的结合也应用于一些其他项目中。



图 4 新西兰 Rotokawa 地热电站——复合循环闪蒸/双工质电站

Fig. 4 Geothermal power plant in Rotokawa, New Zealand——A combined cycle flash-steam/binary station

目前,地热新技术已经不仅仅是不同地热发电技术的结合。在过去几年中,科学家对地热发电与其他资源的结合也产生了浓厚的兴趣,例如在萨尔瓦多 Ahuachapán 地区,地热



图 5 Chena 双工质电站

Fig. 5 Binary power plant at Chena Hot Springs, Alaska of USA

随着低温发电变得切实可行,利用油田伴生地热资源发电开始受到国际上的高度重视。先导工程项目已经在美国怀俄明州^[13-14]和中国华北油田^[15-16]相继展开。如图 7^[14]所示,怀俄明的有机朗肯循环装置自 2008 年 9 月开始运行。全球石油工业每天产水高达 3 亿桶(540000kg/s),许多油田的储层温度都在地热发电站的运行范围内。油田通常也是用电大户,所以本地发电是十分有利的。

资源温度的重要性比表面上看起来更为复杂,尽管简单来说温度越高越好,但在资源获取方面仍然存在一个“黑洞”,当温度处于一个特定的范围时,自喷井生产能力大幅下降,而另外一方面,井下水泵只有在特定的温度范围内才有效。Sanyal 等^[17]对这个“黑洞”进行了简单的解释,如图 8^[17]所示,在 190—220℃存在一个温度缺口,在此范围内不论泵采还是自喷都不是完全有效。

上述地热资源的温度“黑洞”问题是目前地热工业需要面

能和太阳能技术的结合^[7-8],还有在美国内华达州由 ENEL 绿色电力公司在 2011 年 8 月开始的 Stillwater 项目^[9]。地热能 & 太阳能的结合为热流体温度的进一步提高提供了更多的可能,甚至可以使太阳辐射的间歇问题得以解决。

在未来,地热能源综合利用方面,例如冰岛的电力和热水供应相结合的项目等,一定会产生越来越多的新技术。

2 中低温发电技术

双工质发电装置的广泛使用拓宽了地热资源可用于发电的温度范围。尽管目前尚未普及,但已有一些较为成功的实例,如图 5 所示,在阿拉斯加的 Chena 电站,就可以从温度仅为 74℃的地热水中发电^[10]。Chena 电站距离最近的电力传输线至少有 100km,因此除此之外仅能依赖柴油机发电。事实上,许多在阿拉斯加远离电网的社区都可以通过采用类似的地热发电获得便利和经济效益,从而摆脱代价高昂的柴油发电。地热发电在 Caribbean 这类的岛屿社区中也具有同样的优势^[11],图 6 是一个正在 Akutan 岛实施的钻井项目^[12]。



图 6 在 Akutan 岛正在实施的钻井项目

Fig. 6 Drilling project at Akutan, Alaska of USA



图 7 怀俄明 Rocky Mountain 油田试验中心的双工质装置从油田伴生地热水中获得热能

Fig. 7 Binary plant recovering heat from coproduced oilfield water at Rocky Mountain oilfield testing center in Wyoming, USA

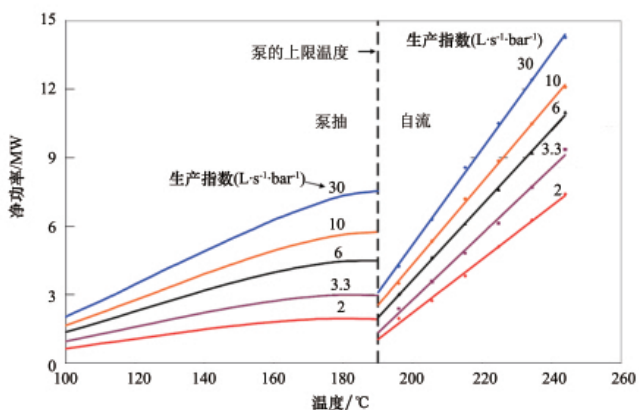


图 8 地热井的净功率随温度的变化
Fig. 8 Net MW capacity of a geothermal well changing with the temperature

对的一项重要的技术挑战。

3 增强地热系统技术

尽管目前正在不断勘探和开采新的常规地热田,但实际上发现大的常规地热田的可能性在逐渐减小。世界上不可能再找出一个像 Geysers 这样的地热田。因此,对地热发展的期望就聚集在了增强地热系统(EGS)上。

麻省理工学院 Tester 等^[18]的报告(MIT 报告),对美国的增强地热系统进行了深入地探讨,这份报告使得政治和经济投资方面都更加青睐于增强地热系统。在未来的 4 年内,美国已经展开了至少 6 个 EGS 项目,同样,其他国家的 EGS 项目也相继展开。尽管对于 EGS 的定义仍争论不止,但根据这些定义,第一个商业性的 EGS 开发项目已经在德国 Landau 于 2008 年开始投入生产^[19]。

追溯到 20 世纪 70 年代,在美国新墨西哥州 Fenton Hill 地区的一些“研究型”EGS 项目中,已经对干热岩进行了成功改造,具体情况参见表 1。然而,只有在项目数量不断增加的情况下,才能对 EGS 的认识和了解更加深刻,进而推广 EGS。

表 1 储层改造和生产都成功的 EGS 项目

Table 1 EGS projects with successful stimulation and production

项目	时间/a	岩石类型	深度/m	生产温度/°C	产量/(L·s ⁻¹)
新墨西哥 Fenton Hill	1972—1996	花岗闪长岩	3600	191	13
英国 Rosemanowes	1978—1991	花岗岩	2200	70	16
法国 Le Mayet	1984—1994	花岗岩	800	22	5.2
日本 Hijiori	1985—2002	石英闪长岩	2200	180	12.8
法国 Soultz	1987—1995	花岗岩	3800	135	21
法国 Soultz	1996—	花岗岩	5000	155	25
德国 Landau	2005—	花岗岩/断层	2600	160	76
南澳大利亚 Habanero	2003—	花岗岩	4250	212	30

2011 年 8 月, Wyborn^[19]就 EGS 的经验发表了一个总结报告,对不同环境下的 EGS 项目进行了详细地比较。经过作者允许,在此提供 Wyborn 的一些表格。需要说明的是,当注水压力低于最小主应力时,如果在特定的地点发生相当大的地震活动,可以取得成功的增产效果。实际上,人们早已熟知这一现象^[20]。

表 1^[19]提供了在储层改造和生产两方面都成功的 EGS 项

目的有关数据,表 2^[19]为进行了储层改造但没有成功的 EGS 项目的有关数据。

另一方面,对花岗岩和其他岩石中(一般为砂岩或者火山岩)的 EGS 项目进行比较也非常具启发性。通常,花岗岩的 EGS(最常见)增产经验,不同于裂缝性砂岩和火山凝灰岩。

Zimmermann 等^[21]研究报道了一个特殊的储层改造实例,该项目位于德国 Groß Schönebeck 地区。该项目中,压裂液分

表 2 成功改造但没有生产的 EGS 项目

Table 2 EGS projects with successful stimulation but production

项目	时间/a	岩石类型	深度/m	储层温度/°C
德国 Falkenberg	1978—1985	花岗岩	250	13
日本 Hachimantai	1983—1988	花岗闪长岩	400	60
瑞典 Fjalbacka	1984—1989	花岗岩	500	15
日本 Ogachi	1989—2001	石英闪长岩	1000	250
瑞士 Basel	2006	花岗岩	4500	180
德国 Bad Urach	2006—2008	花岗片麻岩	4500	180
Jolokia 1	2009—2010	花岗岩	4500	265

别注入砂岩和火山岩两种不同的地层中,不像一般花岗岩中产生的是未支撑的滑移裂缝,该增产措施形成了支撑裂缝,可能是张力缝。

Zimmermann 等^[22]的总结报告也包括了随后的酸化处理,通过水力压裂,井的产能指数从增产前的 $2.4\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{MPa})$ 增至约 $10.1\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{MPa})$,通过酸化压裂后增至 $15\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{MPa})$ 。实施增产措施后,流量约为 16kg/s 。

据 Rivas 和 Torres^[23]报道,在萨尔瓦多 Berlin 地区也进行过火山岩(而不是花岗岩)中的水力压裂。实施措施后,注入能力略有提高,大约由 $0.24\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{MPa})$ 提高至 $0.30\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{MPa})$ 。虽有微震,但震级不大。

尽管 EGS 的发展前景不可估量,但仍然存在一些技术问题需要突破。值得注意的是,MIT 报告^[18]关于 EGS 地热能对美国能源结构的重要影响有一个重要假设,即单井流量要求达到约 80kg/s (L/s)。由表 1 可以发现,目前只有一个 EGS 项目(Landau)基本上达到了这一流量。通过更好地控制压裂过程,如通过采用导流剂制造多重裂缝^[24],在储层中建立更多通道将有利于改善井的生产能力,这些工作目前正在进行中。

4 其他新的地热发电技术

近几年,除了上述新型或先进的地热发电技术外,也出现了一批其他新的或者高效率的地热发电技术。例如,2012 年 Mendive 等^[25]报道了一个成功在井口直接进行地热发电的系统,该井口电站位于肯尼亚的大峡谷,距首都内罗毕西北约 140km ,该井的井底地层温度约 270°C ,单井地热发电功率 2.4MW ,已于 2012 年 1 月正式发电。该井口电站有关设备如图 9 和图 10 所示。



图 9 生产井、分离器等装置

Fig. 9 Production well, separator, and rock muffler

毫无疑问,在井口直接安装地热发电系统具有热损失小、热利用系数高、不需要长距离蒸汽输送管道,因而成本相对较低等优势。但是,大功率井口地热电站的实例并不多。上述较大功率井口地热电站的成功运行证明了井口直接地热发电这一概念在技术上和经济上的可行性。

同样在 2012 年,Hawkins 等^[26]报道了采用永磁轴承的集成发电模块,该模块的发电功率为 125kW ,包括转子、定子和



图 10 井口发电设备(发电机、冷凝器、冷水泵等)
Fig. 10 Power generator, condenser and main cooling water pump

永磁轴承的结构示意图以及集成发电模块照片如图 11 和图 12 所示。采用永磁轴承可以较大幅度地减少摩擦损失、不需要润滑油,从而提高热利用系数和发电效率。采用模块化制造和安装方式可以大幅度减少地热发电站的设计、制造与安装时间。目前,地热发电滞后于太阳能、风能发电的主要原因之一是地热发电站的设计、制造、安装难以模块化,该集成发电模块的实现与现场应用可能是解决上述问题的途径之一。

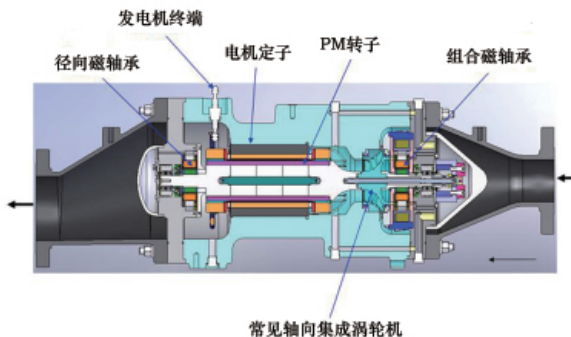


图 11 集成发电模块,包括转子、定子和永磁轴承
Fig. 11 Diagram of the IPM including stator, rotor and magnetic bearings

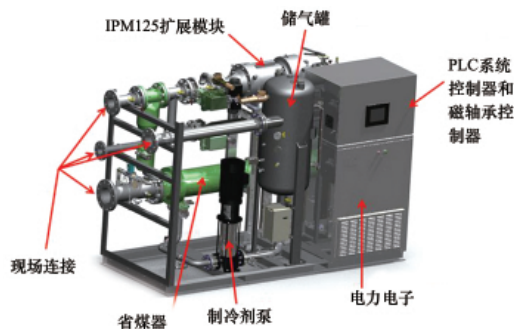


图 12 预装好、可快速安装的发电系统
Fig. 12 WHG125 is prepackaged and mounted as a module for rapid deployment

另外值得一提的是在钻井理论和技术方面的进展。目前, 地热发电尤其是增强地热的关键问题是钻井成本过高。Tsuchiya 等^[27]于 2012 年提出了“减压热裂钻井”的概念和理论, 其主要机制是在较低的压力下, 通过注入温度很低的流体使岩石从高温突降到低温时, 岩石将产生大量的微裂缝, 最终提高钻井的速度、降低钻井成本, 减压热裂钻井的概念示意图如图 13。减压热裂钻井需要使用冷泥浆, 其基本的操作过程为: 钻遇到热储即高温岩石时(图 13(a)), 注入温度很低的钻井泥浆, 使得钻孔周围岩石的温度突然下降, 此时, 进行常规的水力压裂, 产生一些较大的主裂缝(图 13(b))。然后, 降低压力, 在温差增加、压力降低的情况下, 由于热应力的产生, 岩石将产生许多微裂缝(图 13(c))。之后, 可以继续开始钻井, 由于大量微裂缝的存在, 钻井速度将大幅度提高。

如前所述, 目前利用油田伴生地热资源发电开始受到国

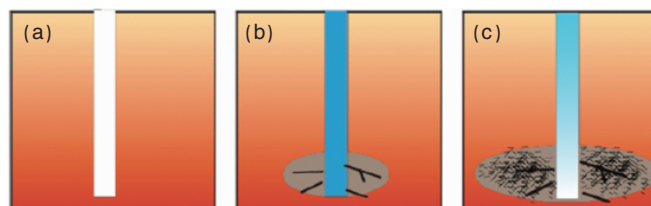


图 13 减压热裂钻井的概念示意图

Fig. 13 Conceptual scheme of decompression drilling

际上的高度重视, 其中地热发电的效益与原油生产的效益相比要小得多, 如何使石油公司重视油田伴生地热发电是关键。在这方面, 中国华北油田^[16]的先导性试验具有重要意义, 其试验结果表明: 油井提液后井口产液温度和原油的产量都有大幅度的提高, 如图 14^[16]和图 15^[16]所示。

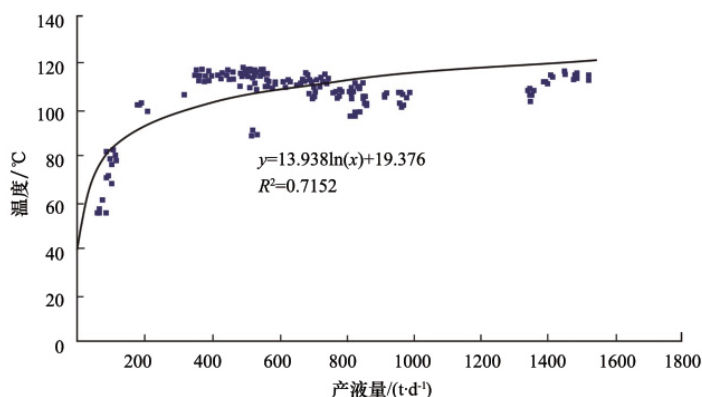


图 14 井口液体温度与油井产量的关系

Fig. 14 Relationship between well head liquid temperature and oil well production

如果地热发电的同时还能够增加原油的产量, 发电后的余热还可以进行原油伴输, 石油公司无疑会对油田伴生地热发电非常重视。可以预计, 上述先导性试验的成功将有利于促进油田伴生地热发电的发展。

5 结论

(1) 在过去 5 年中, 随着多项新技术的应用和更多国家的加入, 世界地热能的开发取得了重要的复兴, 得到了蓬勃的发展。

(2) 基于新型发电技术以及储层改造技术的应用, 地热未来可以在更多的地区得到利用。

致谢 本文中使用了多个学者的研究成果, 包括图表和照片, 程昌慧与刘昌为进行了部分翻译, 笔者对于他们的支持谨致谢意。

参考文献 (References)

[1] Geothermal Energy Association (GEA). Annual US Geothermal Power Production and Development Report [EB/OL]. 2011-04. <http://www.geo-energy.org>.

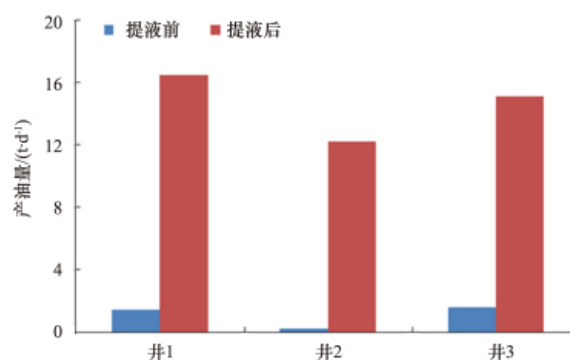


图 15 油井提液前后单井原油产量的变化

Fig. 15 Oil production yields before and after the production enhancement

[2] Bertani R. Geothermal Power Generation in the World, 2005—2010 Update report [C]. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25—29, 2010.

[3] Holdmann G. The Chena Hot Springs 400kW Geothermal Power Plant: Experience Gained During the First Year of Operation [C]. Geothermal Resources Council 2007 Annual Meeting, Sparks (Reno), NE, USA, September 30—October 3, 2007, 31: 515—519.

[4] Schellschmidt R, Sanner B, Pester S, *et al.* Geothermal Energy Use in Germany [C]. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25—29, 2010.

[5] Legmann H, Sullivan P. The 30MW Rotokawa I Geothermal Project Five Years of Operation [C]. International Geothermal Conference, Reykjavik, Iceland, September, 2003.

[6] Sanyal S K, Eney S L. Fifty Years of Power Generation at the Geysers Geothermal Field, California—The Lessons Learned [C]. Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, CA, USA, January 31—February 2, 2011.

[7] Handal S, Alvarenga Y, Recinos M. Geothermal Steam Production by Solar Energy [C]. Geothermal Resources Council Transactions, Sparks (Reno), NE, USA, September 30—October 3, 2007, 31: 503—510.

[8] Alvarenga Y, Handal S, Recinos M. Solar Steam Booster in the

- Ahuachapán Geothermal Field[C]. Geothermal Resources Council 2008 Annual Meeting, Reno, NE, USA, October 5–8, 2008, 32: 395–400.
- [9] Greenhut A D, Tester J W, DiPippo R, *et al.* Solar–Geothermal Hybrid Cycle Analysis for Low Enthalpy Solar and Geothermal Resources[C]. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29 2010.
- [10] Lund J W, Gawell K, Boyd T L, *et al.* The United States of America Country Update 2010 [C]. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010.
- [11] Huttner G W. 2010 Country Update for Eastern Caribbean Island Nations [C]. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010.
- [12] Kolker A, Mann R. Akutan Geothermal Project [EB/OL]. Renewable Energy Alaska Project (REAP) Forum, 2011–03, <http://alaskarenewableenergy.org>.
- [13] Johnson L A, Simon D L. Electrical Power from an Oil Production Waste Stream [C]. Thirty–Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, CA, USA, February 9–11, 2009.
- [14] Johnson L A, Walker E. Oil Production Waste Stream, a Source of Electrical Power [C]. Thirty–Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, February 1–3, 2010.
- [15] Gong B, Liang H, Xin S, *et al.* Effect of Water Injection on Reservoir Temperature During Power Generation in Oil Fields [C]. Thirty–Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, January 31–February 2, 2011.
- [16] Xin S, Liang H, Hu B, *et al.* A 400kW geothermal power generator using co–produced fluids from Huabei Oilfield[J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 2012, 36: 219–223.
- [17] Sanyal S K, Morrow J W, Butler S J. Net Power Capacity of Geothermal Wells Versus Reservoir Temperature—A Practical Perspective [C]. Thirty–Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, January 22–24, 2007.
- [18] Tester J, Blackwell D, Petty S, *et al.* The Future of Geothermal Energy: An Assessment of the Energy Supply Potential of Engineered Geothermal Systems (EGS) for the United States [C]. Thirty–Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, January 22–24, 2007.
- [19] Wyborn D. "EGS Concept", a Presentation to the US Department of Energy EGS[C]. Road–Mapping Workshop, San Francisco, USA, August 3–4, 2011.
- [20] Pine R J, Batchelor A S. Downward migration of shearing in jointed rock during hydraulic injections [J]. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1984, 21(5): 249–263.
- [21] Zimmermann G, Reinicke A, Brandt W, *et al.* Results of Stimulation treatments at the Geothermal Research Wells in Groß Schönebeck/Germany[C]. Thirty–Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, January 28–30, 2008.
- [22] Zimmermann G, Reinicke A, Blöcher G, *et al.* Multiple Fracture Stimulation Treatments to Develop an Enhanced Geothermal System (EGS)—Conceptual Design and Experimental Results [C]. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010.
- [23] Rivas J, Torres R. Seismic Monitoring of a Well Stimulation Operation at the Berlin Geothermal Field, El Salvador [C]. Geothermal Resources Council 2003 Annual Meeting, Morelia, Mexico, October 12–15, 2003, 27: 365–368.
- [24] Petty S, Nofziger L, Bour D, *et al.* Fluid Diversion In an Open–hole Slotted Liner[C]. Thirty–Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, January 31–February 2, 2011.
- [25] Mendive D L, Green L H. Wellhead Geothermal Power Plant at Eburru [C]. Geothermal Resources Council 2012 Annual Meeting, Reno, NE, USA, September 30–October 3, 2012, 36: 13–16.
- [26] Hawkins L, Zhu L, Blumber E, *et al.* Heat–to–electricity with High–speed Magnetic Bearing/Generator System [C]. Geothermal Resources Council 2012 Annual Meeting, Reno, NE, USA, September 30–October 3, 2012, 36: 1073–1078.
- [27] Tsuchiya N, Yamamoto K, Hirano N. Experimental approach for decompression drilling in high temperature geothermal conditions [J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 2012, 36: 561–564.

(责任编辑 吴晓丽)

·学术动态·



“2013 年全国高分子学术论文报告会”征文

由中国化学会高分子学科委员会主办,东华大学承办的“高分子,让生活更美好”——2013 年全国高分子学术论文报告会将于 2013 年 10 月 12–16 日在上海举行,这是中国高分子界的一次盛会。

征稿范围:高分子合成;高分子理论、计算与模拟;高分子结构与性能;高分子表征;分子组装与超分子聚合物;功能高分子;光电功能高分子;医用高分子;生物高分子与天然高分子;高分子复合体系;先进纤维;高性能树脂;阻燃高分子;高分子加工与成型;高分子与工业;高分子教育。

截稿日期:2013 年 6 月 15 日。

联系电话:021–67792954, 021–67792362。

电子邮箱:polymer2013@dhu.edu.cn。

大会网站:www.polymer.cn/polymer2013/。