

• 聚焦国家重点研发计划 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201800263

基于热伏材料中低温地热发电原理与技术构想

谢和平^{1,2}, 昂然³, 李碧雄⁴, 邓建辉¹, 莫思特^{5*}, 陈志禹³, 唐明静³, 尹聪³

(1.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 水利水电学院, 四川 成都 610065;

2.深圳大学 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060;

3.四川大学 辐射物理及技术教育部重点实验室, 原子核科学技术研究所, 四川 成都 610064;

4.四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 5.四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:本文系统分析了中国中低温地热发电的现状和技术瓶颈,提出了热伏材料概念,以大尺寸单晶热伏材料及其相应的热伏器件等为关键技术切入点,系统提出了高效、稳定的中低温地热热伏发电以及基于冷、热、电联供一体化的工程实施和精准对接的技术原理和构想。该技术构想突破了传统中低温地热发电通过机械能转化为电能的局限性,利用大尺寸单晶热伏材料将热能直接高效转化为电能,这一创新技术研发对保持中国在地热发电领域尤其是中低温区领域的国际核心竞争力、获取自主知识产权、实现地热能高效利用和规模开发具有重要的战略指导意义。同时,该战略性技术构想有望引领全球地热发电新的技术革命,以奠定中国在中低温地热发电领域处于全球领先地位,从而实现地热资源的清洁绿色可持续利用。

关键词:中低温地热发电;热伏材料;大尺寸单晶;温差发电;工程化对接技术

中图分类号:TM616

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)02-0001-12

Principle and Technological Conception of Middle-low Temperature Geothermal Power Generation Based on Large-scale Single Crystals of Thermovoltaic Materials

XIE Heping^{1,2}, ANG Ran³, LI Bixiong⁴, DENG Jianhui¹, MO Site^{5*}, CHEN Zhiyu³, TANG Mingjing³, YIN Cong³

(1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng.,College of Water Resources and Hydropower,Sichuan Univ.,Chengdu 610065,China;

2.Inst. of Deep Earth Sci. and Green Energy,Shenzhen Univ.,Shenzhen 518060, China;

3.Key Lab. of Radiation Physics and Technol.,Ministry of Education,Inst. of Nuclear Sci. and Technol.,Sichuan Univ.,Chengdu 610064,China;

4.College of Architecture and Environment,Sichuan Univ.,Chengdu 610065,China;

5.College of Electrical Eng. and Info. Technol.,Sichuan Univ.,Chengdu 610065,China)

Abstract: This paper systematically analyzes the present situation and technological difficulties of middle-low temperature geothermal power generation in China. The concept of thermovoltaic materials is proposed. The key technologies such as large scale single crystals of thermovoltaic materials and thermovoltaic devices are utilized as the starting point. We systematically proposed the high efficient and stable middle-low temperature geothermal thermovoltaic power generation system, and proposed the technological principle and conception of engineering implementation and precise transfer based on cold, hot, and electrical consolidated integration. The technological conception breaks through the traditional restriction of middle-low temperature geothermal thermovoltaic power generation from mechanical energy to electricity, and directly converts heat energy into electricity effectively by utilizing large-scale single crystals of thermovoltaic materials. The research and development of such subversive technology is of great strategic guiding significance, especially in the middle-low temperature region, to maintain our country's international core competitiveness in geothermal power, to acquire independent intellectual property, and to realize the efficient utilization of geothermal energy and scale development. Meanwhile, this strategic technology concept is expected to lead a new technological revolution of geothermal power generation in the world, to establish our country in the field of middle-low temperature geothermal power generation for global leader, and to achieve the clean and green sustainable utilization of geothermal resources.

收稿日期:2018-03-11

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600701)

作者简介:谢和平(1956—),男,中国工程院院士,教授,博士。研究方向:深地科学与绿色能源。E-mail: xiehp@scu.edu.cn

* 通信联系人 E-mail: mosite@scu.edu.cn

网络出版时间:2018-03-21 20:48:59

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180321.2048.008.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

Key words: middle-low temperature geothermal power generation; thermovoltaic materials; large-scale single crystals; electric generation by temperature difference; engineering technology transfer

随着中国经济持续高速增长和对国外能源需求的不断增加,全球能源地缘政治格局博弈进一步加剧,中国能源安全形势日趋严峻,构建清晰和有效的中国能源政治战略显得迫切而必要。同时,中国作为负责任的大国,必须承担节能减排的大国义务,提升大国形象,争夺国际能源政治话语权。因此,在全球局势变化多端、节能减排日益趋紧的国际形势下,必须追求持续、安全、高效、低碳的国内能源供应体系,全面优化中国严重依赖煤炭和石油的能源结构,大力发展可再生清洁能源,这是减少温室气体排放、解决全球气候变化问题的根本途径。

“十二五”期间中国新能源发展取得了重大进展,风电、光伏发电的规模均跃居世界首位。截至2015年年底^[1],全国发电装机容量达 1.53×10^9 kW,风电、光伏发电累计并网容量分别达到 1.31×10^8 kW和 4.218×10^7 kW,分别约占全球总装机容量的34%和18%^[2]。“十二五”期间年均增长分别为35%和178%,核电 0.27×10^8 kW;火电 9.93×10^8 kW(含煤电 9×10^8 kW,气电 0.66×10^8 kW);水电 3.2×10^8 kW;生物质能发电 0.13×10^8 kW。非化石能源装机占比从2010年的27%提高到2015年的35%,其中,水电占比为20.9%,其他清洁能源仅占14.18%。电力发展“十三五”规划(2016—2020年)^[3]提出,截至2020年,非化石能源发电装机容量达到 7.7×10^8 kW左右,比2015年增加约 2.5×10^8 kW,占比约39%,提高4个百分点。

开发新能源是电力发展“十三五”规划的重中之重。然而,目前已取得快速发展的风电、光伏发电均有着共同的缺点,即产电周期非常长,主要归因于阳光不充足,或者没有风的来源。而作为可再生能源之一的地热资源的开发与利用,现已得到国家主管部

门的高度重视。2017年1月,国家发改委发布《地热能开发利用“十三五”规划》明确提出^[4],将地热能开发利用作为国家清洁能源战略的重点发展项目。地热能具有低成本、不受气候变化影响、可持续利用和环保、可维持像煤炭和核能一样不间断负载运行、规模可调等其他能源不可比拟的独特优点。因此,大力推进地热资源开发利用,改善能源结构,对于解决日趋严重的全球环境问题具有重要的现实意义。

习近平总书记指出“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”,开发深地资源已经成为未来中国科技发展的重要方向。开发地下城市空间,是一举多得的创新思路,比太空定居更为现实和可行^[5-11]。地下城市能量系统的构建和循环是建设新型地下生态宜居城市必须解决的技术难题之一,采用深地增强型地热转换与储存技术合理开发利用深地多元清洁能源,为利用深地地热资源构建地下城市能量系统提供了探索思路^[12-19]。“推进万千瓦级高温地热发电项目建设”“因地制宜发展中小型分布式中低温地热发电项目”“开展深层高温干热岩发电系统关键技术研究 and 项目示范”等地热资源开发利用举措已正式提上日程。另一方面,据《联合国世界能源评估报告(WEA2004)》,可再生能源发电及非电直接利用成本如表1所示,相比而言,地热发电成本较低,地热发电站的建设成本约 $2 \times 10^8 \sim 4.5 \times 10^8$ 欧元/MW,地热电站发电成本40~100 欧元/MWh,地热发电良好的经济效益指标为其发展奠定了有利的经济基础。此外,为实现新能源与电网的协调发展,“十三五”新能源开发将调整布局,中东部及南方地区将成为开发重点^[20],为用量需求高、电力供应紧张的中国东南部发达地区提供了电力保障。

表 1 新能源的每瓦电建设成本对比表

Tab.1 Comparison of construction cost per watt of new energy

地热发电	风能	生物质能	太阳能光伏发电	太阳能热发电	非电直接利用		
					生地热	物质能	太阳能利用
2~10	4~8	3~12	25~160	12~34	0.5~5.0	1~6	2~25

美分/W

地热能是来自地球深处的可再生热能,具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点,是一种极具竞争力的清洁能源。地热能的利用可分为地热发电和直接利用两大类。根据其形成机理和传热属性,地热能可分为4种类型:①水热型地热能,即地壳浅处(地下100~4 500 m)暴露的热水或蒸汽;②地压地热能;③干热岩地热能;④岩浆热能。根据地热流体温度及开发利用目的的不同,可将水热型地热资源

分为高温(>150℃)、中温(90~150℃)和低温(<90℃)地热。目前,高温地热主要用于发电,中低温地热主要用于直接利用(如工业、种植、养殖、供暖、制冷、旅游疗养等)。美国能源部在2009年的地热能技术报告中指出,每兆瓦时地热能发电成本为266~437元,其经济性优于风能发电、太阳能发电和光伏太阳能发电等其他可再生能源发电利用方式。此外,国土资源部中国地质调查局2015年调查评价结果^[4]:全国

336个地级以上城市浅层地热年可开采资源量折合 7×10^8 t标准煤;全国水热型地热资源量折合 1.25×10^{12} t标准煤,年可开采资源量折合 1.9×10^9 t标准煤;埋深在3 000~10 000 m的干热岩资源量折合 8.56×10^{14} t标准煤。可见,合理开发这部分地热资源用于发电,对于降低化石能源依赖、促进可再生能源开发利用、减少CO₂等温室气体排放、实现经济可持续发展具有重要的战略意义。

地热发电探索由来已久,早在1904年,意大利就建立了发电量为250 kWh的地热电站^[21]。至2016年,全世界地热电站的总装机容量已达到13.8 GW,利用热能发电的国家达25个。中国作为地热资源富有国,适用于发电的地热资源主要分布在西南和东南沿海地区,总发电潜力 9.96×10^6 kW,其中,高温地热资源发电潜力为 8.46×10^6 kW,中低温地热资源发电潜力为 1.5×10^6 kW^[22]。截至2014年底,中国地热发电装机总容量仅为27.28 MW,排名世界第18位,与世界地热发电大国的装机容量相距甚远。目前,中国在传统高温地热发电领域有一定的研究进展,但在中低温地热发电领域研究水平相对滞后,发展不平衡。尤其中国是一个以中低温地热资源为主的国家,且这些地热资源主要分布在东南沿海地区,这些地区人口密集,经济发达,电力需求大,因此,发展中低温地热发电技术在某种程度上比发展高温地热发电更为重要。

鉴于此,国家发改委在《地热能开发利用“十三五”规划》中明确指出^[4],要在中国东部沿海地区大力发展中低温地热发电项目,采取政府引导、逐步培育市场与企业的举措,积极推进中低温地热发电,同时要求围绕地热能开发构建相关产业链、标准规范、人才培养和服务等体系,以完善地热能产业体系,并将广东省明确列为中低温地热发电项目建设的重点省区。据初步估算,“十三五”期间,地热发电可拉动投资约400亿元,可带动地热资源勘查评价、钻井、热泵、换热等一系列关键技术和设备制造产业的发展。由于中低温地热是“十三五”国家新能源战略支持发展的重点,必然拉动新一轮投资热。

1 中低温地热发电的现状和技术瓶颈

1.1 中低温地热发电的历史和现状

自意大利在Larderello实现了地热发电之后,新西兰在Wairakei建成了地热发电厂,1960年美国第一座发电量11 MWh的地热电站在加利福尼亚州盖塞尔斯地热田建成,顺利运行长达30年之久。1950年以来,全球地热发电的总装机容量和发电量如图1所示^[23],其中,2020年的装机容量是预测值,地热发电整体呈线性增长趋势。2010年全球地热发电总装机中,高温发电装机容量高达8 GW,中低温地

热发电装机容量为1 GW,对全球低碳、绿色发电的贡献不容忽视^[24]。从技术发展上,美国建成了热源为76.6℃伴生地热水、实际发电功率为180 kW的低温地热发电站;还实现了地热资源温度107℃、装机容量为2台500 kW模块化机组,可靠率达98%;此外,美国正在筹建1 MW中低温地热电站。德国实现了从3 500 m地热井抽取122℃地热水,发电装机容量为3.5 MW,可为2万户家庭提供电力和生活用热。日本利用中低温地热建成1 MW的ORC电站。冰岛采用中低温卡琳娜循环发电系统,以氨水混合物为工质,地热水和冷却水的进口温度和流量分别为124℃、90 kg/s(324 t/h)和5℃、182 kg/s,实现净输出功率为2 MW^[24]。此外,墨西哥、意大利、澳大利亚、瑞典、南美等国均已建成中低温地热电站。

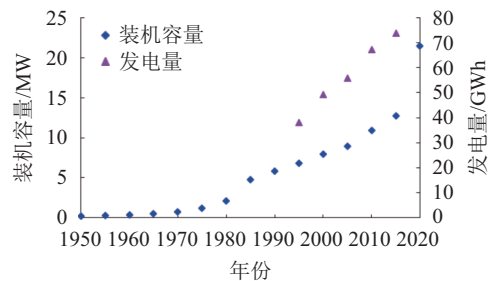


图1 1950—2020年全球地热发电总量

Fig.1 Total global geothermal power generation between 1950 and 2020 years

中国中低温地热发电技术源于20世纪70年代初国际能源危机的大背景,侧重于技术研发和应用,系统的经济性并不是当时的主要关注点^[24]。先后建立了7个67~92℃的低温地热发电的试验电站,机组容量在50~300 kW。之后,随着计划经济向市场经济转型,中低温地热资源发电效率低等问题凸现,目前仅广东丰顺300 kW地热电站仍在低效率运行,其余地热电站均已停运,造成“中低温地热发电经济上不可行”的影响一直延续至今。2011年,中国华北油田利用伴生地热资源建成400 kW双螺杆发电站,发电效率偏低,但已成为中国在中低温地热发电关键技术研究的重大突破口。中国在中低温地热发电利用和开发领域进展缓慢,仍与世界发达国家差距悬殊。总体来看,当前中低温地热发电运行投入成本高,发电系统运行复杂,有机工质或氨水混合物对环境有一定的污染和影响。至今中国建成的地热发电站如表2所示,发电原理为扩容闪蒸法或双工质循环法,目前仅有3座电站仍在运行。西藏羊八井地热电站是中国目前唯一的高温地热电站,装机容量25.18 MW,实际发电量稳定在15.0 MWh左右,地热水温度130~170℃,地热水总量为 1.095×10^5 m³/d,主要为拉萨市提供电力。据称,2017年“瑞丽100 MW地热发电项

目”一期4 MW发电机组首台1 MW发电设备在云南省德宏州瑞丽市进行了首次地热发电实验,已并网

成功,机组在并网过程中设备各项参数正常,状态控制良好,具备了发电能力。

表 2 中国已建成的地热发电站一览表

Tab.2 List of geothermal power stations built in China

地点	年代	地表温度/℃	装机容量/kW	发电原理	备注
	70	91	1 [#] 机组 86	单极闪蒸	停运
广东丰顺县邓屋	70	91	2 [#] 机组 200	双工质循环	停运
	80	91	3 [#] 机组 300	单极闪蒸	发电效率低,经济效益相对较差
江西宜春市温汤	70	67	50	双工质循环	运行中发生了工质爆炸事故,后温度偏低,经济效益不佳,已拆除
河北怀来县后郝窑	70	85	200	双工质循环	温度偏低,经济效益不佳,已拆除
湖南宁乡县灰汤	70	90	300	单极闪蒸	地热水温度偏低,停止运行
辽宁营口市熊岳	70	84	100	双工质循环	温度偏低,经济效益不佳,已拆除
山东招远县	70	91	200	单极闪蒸	温度偏低,经济效益不佳,已拆除
广西象州	70	79	200	单极闪蒸或双工质循环	温度偏低,经济效益不佳,已拆除
	70	145	1 [#] 机组 1 000	分离蒸汽	停运
西藏羊八井	80	140~160	2 [#] , 3 [#] , 4 [#] , 5 [#] 机组 3 000(每台)	两极闪蒸	长期稳定运行
	90	140~160	6 [#] , 7 [#] , 8 [#] , 9 [#] 机组 3 000(每台)	两极闪蒸	长期稳定运行
西藏阿里地区朗久	80	104	1 000 (实际最高300)	单极闪蒸	发电效率低,间断运行
西藏那曲镇	90	110	1 000	双工质循环	结垢问题严重,电厂未能很好运行,在间断运行至1999年垢死,未再使用
台湾清水	80	226	3 000	单极闪蒸	停运
台湾土场	80	173	300	双工质循环	停运

1.2 现有中低温地热厂的发电原理

现有的中低温地热发电与火力发电的原理相同,均为先将热能转变为机械能,再转化为电能,因能量二次转化造成发电效能较低。根据可利用地热资源的特点以及采用技术方案的不同,地热发电可分为图2中的类型^[23,25-27]。其中,地下热水发电包括闪蒸地热发电、中间介质地热发电(双循环)、闪蒸-双工质联合循环发电等三大类。闪蒸(或称扩容)地热发电原理为将地热井口的地热水先送到闪蒸器中进行降压闪蒸或扩容使其产生部分蒸汽,再引至常规汽轮机做功发电,又可分为单级、两级、三级闪蒸法。采用闪蒸法的地热电站,具有设备简单、易于制造、且可以采用混合式热交换器的优点,但设备尺寸大,腐蚀结垢问题突出,热电转化效率偏低,此外,对于地下热水的温度、矿化度以及不凝气体含量等有较高的要求。中间介质地热发电又称为双工质法,借助热交换器,利用地下热水加热某种低沸点的工质,使之变为蒸汽,以此蒸汽推动汽轮机,并带动发电机发电。工质流体应具有与地热资源相匹配的沸点和冷凝点,如卡琳娜(Kalina)循环的氨/水混合物、有机

朗肯循环(ORC)的低沸点有机物。该发电方法具有利用低温位热能的热效率较高、汽轮机的尺寸小、能较好地适应化学成分比较复杂的地下热水等优点,但双工质法不能方便地使用混合式蒸发器和冷凝器,且大部分低沸点工质传热性比水差,采用此方式需有相当大的金属换热面积,低沸点工质价格较高,来源不广,有些低沸点工质还有易燃、易爆、有毒、不稳定、对金属有腐蚀等优点。

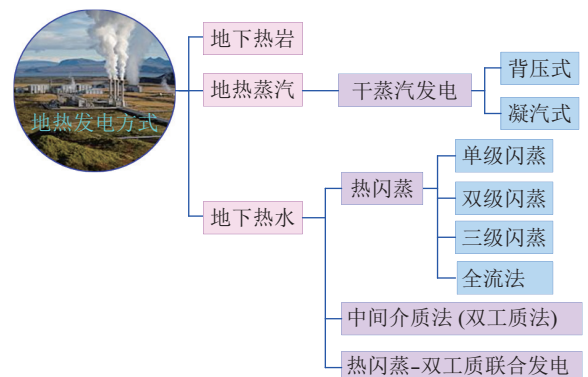
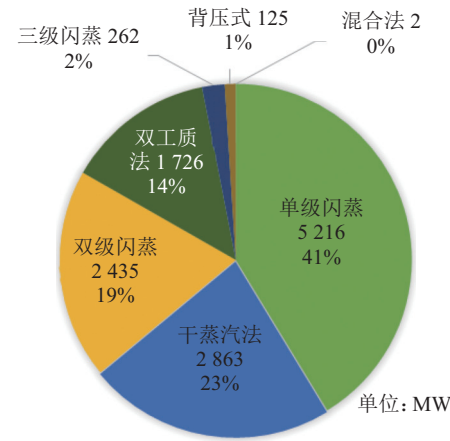


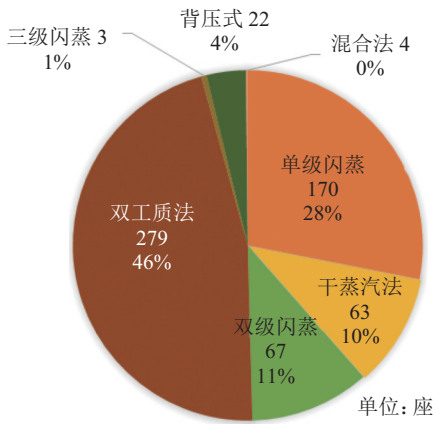
图 2 地热发电类型

Fig.2 Types of geothermal power generation

对截止2016年全球已有的地热发电厂采用的发电方式进行统计, 每一种发电方式的总装机容量(MW)和发电厂的数量分别如图3(a)和(b)所示^[23]。由此可见, 闪蒸法不管是从发电厂的数量还是总的装机容量来看, 都占较大比重。



(a) 每一种发电方式的总装机容量



(b) 每一种发电方式发电厂的数量

图 3 地热发电方式统计

Fig.3 Statistics of geothermal power generation modes

1.3 中低温地热发电存在的主要问题

1) 技术方面

中低温地热发电涉及地热资源勘查与资源评价、地热钻井成井工艺、地热水保温及换热、地热利用的防腐防垢、地热发电系统、地热尾水回灌等技术环节, 如图4所示。每一个环节均存在制约地热发电的关键技术问题。例如, 地热与风力、水流、太阳辐射等可再生能源不同, 后者在地面上看得见摸得着, 而地热储存于地下深处, 其资源探测和储量评估难度大。又如, 地热水引起的换热设备和管件的结垢和腐蚀问题突出, 也是制约地热能高效利用的瓶颈之一, 从已有文献资料及工业实际运行状况来看, 由于地热流体的复杂性, 地热水的水化学特征及腐蚀结垢特性还缺乏广泛的数据资料及分析, 对换热表面上污垢成核、生长、成垢过程的机理认识尚不深入, 仍需进一步探讨换热表面成垢机理, 才有可能找到解决该问题的途径。此外, 如前所示, 现有的地热发电系统尚存在各种缺陷和技术障碍亟待攻克。

2) 社会经济效益方面

第一, 地热发电工程初期钻井勘探投入高, 约占整个项目投资的50%以上。第二, 新地热开发区钻探风险大, 由于地热资源储存的地质条件复杂, 探测难度大, 据统计^[28], 初勘的钻探成功率仅为25%, 进入开发阶段以后才有可能提升至60%~70%。第三, 地热能源勘探开发周期长, 一个万千瓦级的地热能源项目从地质勘探到选址建造再到建成投产通常需要4~6 a甚至更长的时间, 对于很多投资者吸引力不大。第四, 地热能源项目集资困难, 2012年地热能源投资不足新能源项目总投资的1%。第五, 从事地热勘探开发方面的人才短缺, 这是制约地热能源开发的一个重要因素, 据2002—2011年获得中国国家自然科学基金委员会资助立项涉及地热能、风能和太

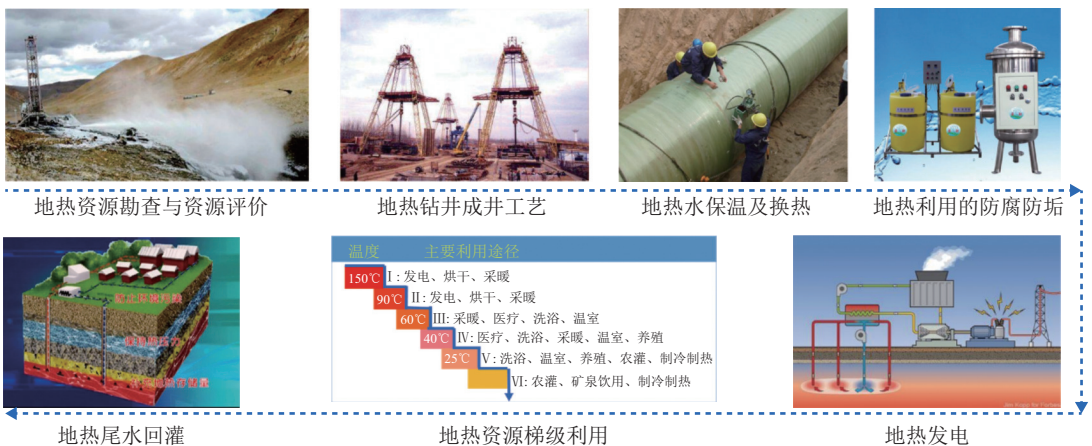


图 4 传统地热发电的主要技术环节

Fig.4 Main technical links of traditional geothermal power generation

阳能的项目的统计分析^[28],按数目计地热项目所占份额仅为2%,而按金额计则仅为1.81%。

现有的地热发电厂发电效率低,通常不到10%^[29]。对全球94个地热发电厂(6个干蒸汽、34个单级闪蒸、18个双级闪蒸、31个双工质、2个闪蒸-双工质混合)的转换效率分析显示^[30],其平均转换效率为12%,某些双工质法的转换效率仅为1%,普遍低于传统的热电厂。

3) 环境问题

现有的中低温地热发电系统尚存在一些环境问题,如地热能发电的有机工质或氨水混合物污染、地热水化学物质处置、地面沉降等。

综上所述,中低温地热发电技术是新能源发展的重要方向,不仅需要国家政策支持,更亟待技术上的全新突破。鉴于目前的现状和技术瓶颈,迫切需要寻找一种高效率、低成本的新技术,重点开发和利用中低温地热资源,为国家地热发电做战略补充。

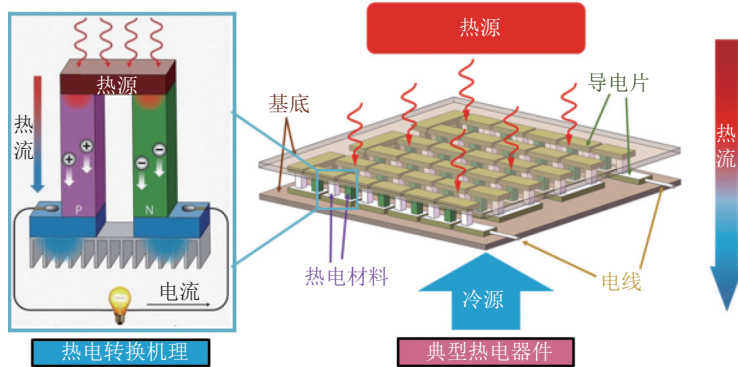


图 5 热电材料发电技术原理图

Fig.5 Principle diagram of power generation technology based on thermoelectric materials

在热电发电器件和发电装置研发方面,国内外均取得了较大进展^[36-39]。早在20世纪40年代,前苏联率先研制出温差发电机,当时热电转换效率达到5%。此后,前苏联和美国对温差发电技术进行了全面改造升级,在外太空探索领域的应用尤为成功。例如,美国宇航局1977年发射的Voyager 1探测器目前仍在正常工作,其动力由中低温热电材料制成的放射性同位素温差发电装置(RTG)提供,这是目前可靠性最高、工作寿命最长、技术最成熟的热电能量转换方式。俄罗斯有1 000余个类似的RTG装置用于北极圈附近的海洋灯塔,具有免维护运行20 a设计工作寿命。Global公司和俄罗斯Biapos公司还开发出燃气小型温差发电机,功率为90 W,额定电压为24 V,使用寿命为10 a。在微温差电池领域,国外先后利用人体体温发明制造了诸如温度手表、心脏起搏器等相关产品,进一步拓展了小型化热电发电应用领域的范围。除了中低温热电材料应用之外,在中高温区国

1.4 基于热电材料中低温地热发电的研究进展

除了上述将地热能转化为机械能再转化电能这一技术外,也可利用温差热电效应,直接将地热能转化为电能,即热电发电技术。温差热电效应(如图5所示),也被称为赛贝克(Seebeck)效应,自从1825年该效应被发现后,基于热电材料研究获得了蓬勃的发展^[31-34]。科学家先后发现性能优良的热电材料 Bi_2Te_3 及其固熔体合金,该类材料功率因子大,热电优值ZT值高,不仅是常用的热电致冷材料,还是应用前景广阔的热电发电材料。此外,热电发电材料还包括 PbTe 、 BiSb 、 SiGe 等半导体材料。理论研究表明^[35],禁带宽度是半导体热电变换材料的重要参数,其值在0.2~0.3 eV之间时热电变换器件的效率至少可提高25%,可见禁带宽度为0.29 eV的碲化铅是很有希望的热电材料之一。迄今为止, Bi_2Te_3 (低温热电材料)和 PbTe 体系(中温热电材料)一直被看作是理想的候选热电材料。

外也取得了较大进展。

中国在热电发电领域也取得了一定的成绩。中国科学院正在研制一种可植入人体内的微型热电器件,直接利用人体皮肤表面与外界的温差发电,可用来长期驱动植入体内的医学器件^[40]。中国江西纳米克公司可生产450 W汽车尾气热电发电机、300 W热电半导体发电机,以及不同功率的直燃式热电发电机。中国天加公司最近发明了一种热电效率较高的中低温发电系统,该系统针对中低温余热(80~300℃)进行回收发电,具有高发电效率、高可靠性、可自动并网及高度集成等优点,能将低温余热(80~300℃)的热电效率从国内现今水平的5%~9%提升至10%~23%,是目前国内较高热电效率的低温发电系统。

热电发电技术的核心在于热电材料,为大幅度提升热电材料的性能,实现温差发电,国际科研界已对其进行了系统而富有成效的研究和探索,但目前仍面临以下挑战亟待攻克。

1)研究表明^[41],达成约30%的能量转换效率需要制备出ZT大于4的热电材料,对目前普遍的ZT约为1的热电材料来说,其能量转换效率通常低于10%^[41]。

2)实际应用中的热电器件与实验室制备的热电材料在ZT值上存在较大差距^[42]。热电器件需要p型与n型热电材料组成p-n结,也就意味着首先p型端材料与n型端材料要同时具有高ZT值。此外,组成p-n结需要使用焊料,这也会导致过程中能量的损失,例如,最高ZT值达到1.1的Bi₂Te₃,做成器件之后的综合ZT值仅有0.7,损失掉36%^[42]。

3)部分热电材料在长时间服役中存在较严重的机械及热电性能衰减^[43]。因为大部分热电材料需要在空气中服役,长时间的冷热循环可能导致热电器件逐渐氧化,进而老化、变脆,最终导致失效。另外,部分含Cu、Ag的热电材料中的阳离子在长时间服役中会发生迁移,逐渐以单质的形式析出至材料表面,从而导致材料成分发生偏离,性能衰减。

因此,未来的热电材料研发除了往更高的ZT值迈进,还应着眼于寻找更加匹配的p型材料与n型材料,并且控制能量在器件本身中的损耗。另外,在实际应用当中热电器件的稳定性紧密地关系着其应用领域的安全问题。如果热电器件无法再长时间服役中拥有较高的稳定性与安全性,那么将不仅增加使用成本还可能造成安全隐患。可见,热电材料和相应器件的颠覆性创新是发展热电发电的基本前提。

虽然热电材料发电技术在诸多温差发电领域均有成功应用,但应用于地热发电,全球报道的很少,进展非常缓慢,且未见工程案例。中国地质大学李克文团队^[44-46]为利用低温地热资源设计了温差为200℃、装机容量为500 W的热电发电机,试验测得温差为80℃时输出功率为160 W,随后设计了温差为120℃、装机容量为1 kW的热电发电机,前后两次试验结果均表明其热电器件的发电功率与冷热端间的温差几乎成正比,最高的瞬间转化效率仅为4.5%。该研究成果目前尚不具备工程推广的基础。鉴于热电发电技术具有运行简单、无机械能损耗、体积小、原地发电、生态环境影响小等诸多优势,若能突破现有的热电材料和热电器件,将热电温差发电技术与地热开发相结合,形成基于热电材料、具有高热电转化效率的地热发电技术,为中国丰富的中低温地热资源开发提供科学可靠的技术支撑。

2 基于热电材料中低温地热发电所面临的重大挑战

传统的热电发电一般规模较小,将其应用于地

热发电,须重点解决以下两个关键问题。

2.1 大尺寸高性能热电单晶制备技术

大尺寸热电单晶制备技术一直是国际热电材料学界难以攻克的重大科技难题,大尺寸热电单晶可定向切割成众多性质均一、无缺陷、高性能的热电块材,这是实现热电材料商业化应用的关键。一方面,在热电大尺寸单晶生长设备的研制中,精密控制温度和构建热场分布是关键技术难点。另一方面,创新性研发大尺寸热电单晶的生长技术,获取制备具有超高热电性能晶体的新工艺是目前国际科研界急需解决的另一重大科技挑战,因为这直接关系到多模块热电器件协同发电、寿命和稳定性。一旦突破上述两个核心技术难点,将形成国际领先的具有完全自主知识产权的关键配套设备和热电单晶规模化工程技术。

2.2 基于热电单晶材料原位中低温地热发电装置创新性集成技术

将大尺寸单晶热电发电技术和中低温地热开发相结合,直接将地热能转化为电能,这种发电模式无需传统地热发电汽轮机转动等诸多环节,进而全面提升发电效率与大幅降低成本。从技术角度来看,这是地热发电模式的探索和创新,极具挑战性。须重点解决大尺寸热电单晶材料的研制、原位地热电发电装置集成技术等关键问题,包括内嵌闭合回路冷水循环技术、闭合地热储水循环技术、热电发电系统温差补偿技术(温度场恒定控制技术)、发电装置稳定持久控制技术,以实现地热规模化发电。上述集成技术可扭转中国在地热发电领域的落后局面,使中国在地热热电发电领域尤其是中低温区形成领先优势。

3 基于大尺寸单晶热伏材料中低温地热发电的关键技术构想

3.1 热伏材料的定义表述

众所周知,光伏材料是利用半导体界面的光生伏特效应将光能直接转变为电能的一种功能材料。类似地,将利用温差实现热能和电能直接转化的功能材料,定义为热伏材料。用于电能正极输出的热伏材料称为正极热伏材料,用于电能负极输出的热伏材料称为负极热伏材料。

3.2 大尺寸高性能单晶热伏材料的制备技术

系统模拟大尺寸单晶热伏材料生长过程,研制可精密控制温度、热场的大尺寸热电单晶生长设备,研发稳定固-液生长界面工艺技术,探索温度梯度、升降温速率等关键工艺参数对单晶缺陷形成的影响

机制。形成制备大尺寸、高质量单晶的新方法和新技术,并研发单晶热伏材料定向与精密加工工艺技术。系统研究单晶热伏材料各向同性和各向异性调控技术,分析单晶热伏材料的稳定控制技术原理,并不断优化单晶热伏材料的制备工艺技术。通过调控载流子迁移率、材料Seebeck系数,增加不同波长声子散射及降低晶格热导率以最终获取可实用的高性能单晶热伏材料。

3.3 长寿命多模块热伏器件协同发电技术

研发大尺寸单晶热伏材料定向切割技术,并开展热伏器件微纳加工技术研究。系统研发多层次多样化热电器件封装与致密化技术,研究以密封结构及材料升华为约束条件的热伏器件稳定机制、热电器件寿命关联机制,并建立热伏器件热力学理论模型,研究热伏器件温差、转换效率与输出功率作用机制。系统开发在不同温区热伏器件转换效率调控技术、热伏器件发电理论与技术,最终研发多模块热伏器件串并联技术以及高效热伏器件协同发电技术。

4 基于大尺寸单晶热伏材料中低温地热发电工程化构想及路线图

4.1 单晶热伏材料中低温地热发电相关理论的实验测试技术

针对大尺寸单晶热伏材料的属性,结合中低温地热发电的特点,深入系统地开展单晶热伏材料中低温地热发电系统中的电学理论、热学理论、热电能量转换理论研究,为此,需专门研制相关的实验装置,形成科学的实验测试技术,以满足高绝缘绝热、精准温度控制、高精负载控制,以及精准电压和电流测试技术的要求。实验测试示意图如图6所示。

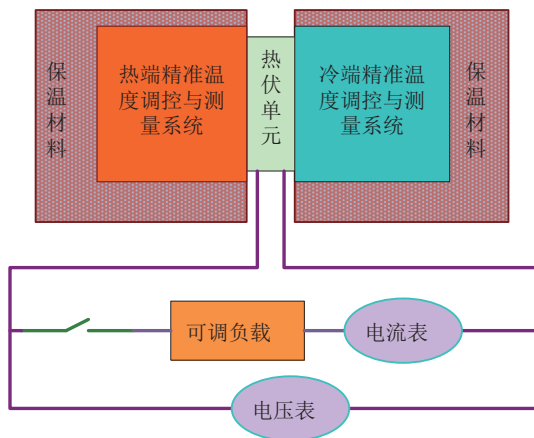


图 6 热伏单元实验测试装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of thermovoltaic unit for experimental test

测试原理如下:

1)通过测量正极热伏材料、负极热伏材料热电转换过程中电压、电流与温度、时间、温差、负载的关系以及冷热两端的温度动态分布情况,探究单独的正极热伏材料、负极热伏材料的热学分析方法和电学分析方法,建立热伏材料的热学模型和电学模型。

2)测量由正极热伏材料、负极热伏材料构成的热伏单元在热电转换过程中电压、电流与温度、时间、温差、负载的关系以及冷热两端的温度动态分布,探究热伏单元的热学分析方法和电学分析方法,建立热伏单元的热学模型、电学模型。分析热伏单元的能量形式、能量转换关系、能量传递关系,建立热伏单元的能量模型;通过测试热伏单元串联、并联、串并联的热学参数、电学参数,建立热伏单元在各种连接方式下的热学电学模型。

3)测量由热伏单元构成的热伏模块在热电转换过程中电压、电流与温度、时间、温差、负载的关系以及冷热两端的温度动态分布,探究热伏模块的热学分析方法和电学分析方法,建立热伏模块的热学模型、电学模型。分析热伏模块的能量形式、能量转换关系、能量传递关系,建立热伏模块的能量模型。

4.2 热伏材料发电装置成套技术

热伏材料发电装置成套技术是实施地热发电的关键,所涉及的核心技术如图7所示。

具体包括:1)建立冷端和热端之间的恒定温差,热伏材料发电的基本原理是通过材料两端温差导致电子和空穴流动产生电压和电流,恒定温差是保证发电效率的关键;2)形成热量补偿、制冷补偿技术,为解决恒定温差问题提供技术支撑;3)设计多级能量循环利用的蓝图,以实现梯级开发、综合利用,从高温到低温“吃干榨尽”;4)研发热电发电装置的电能生产模块单位——热伏模块,为实现最大的效能转化率奠定理论技术基础,采用模块化制造和安装方式可大幅度缩短地热发电站所需的设计、制造与安装时间,分析认为^[47],地热发电站的设计、制造、安装难以模块化是地热发电滞后于太阳能、风能发电的主要原因之一,该集成热伏发电模块的实现及现场应用是实现规模化发展的有效举措;5)妥善解决热伏模块热端与热水的导热设计问题、冷端与冷水的导热设计问题以及热伏模块的优化问题;6)热伏模块设计尚应解决好冷端与热端的绝热设计问题。此外,还应综合考虑发电装置结构设计、材料的选择、绝缘绝热设计、密封设计等细节问题,最终形成综合指标最高的热伏材料发电装置。

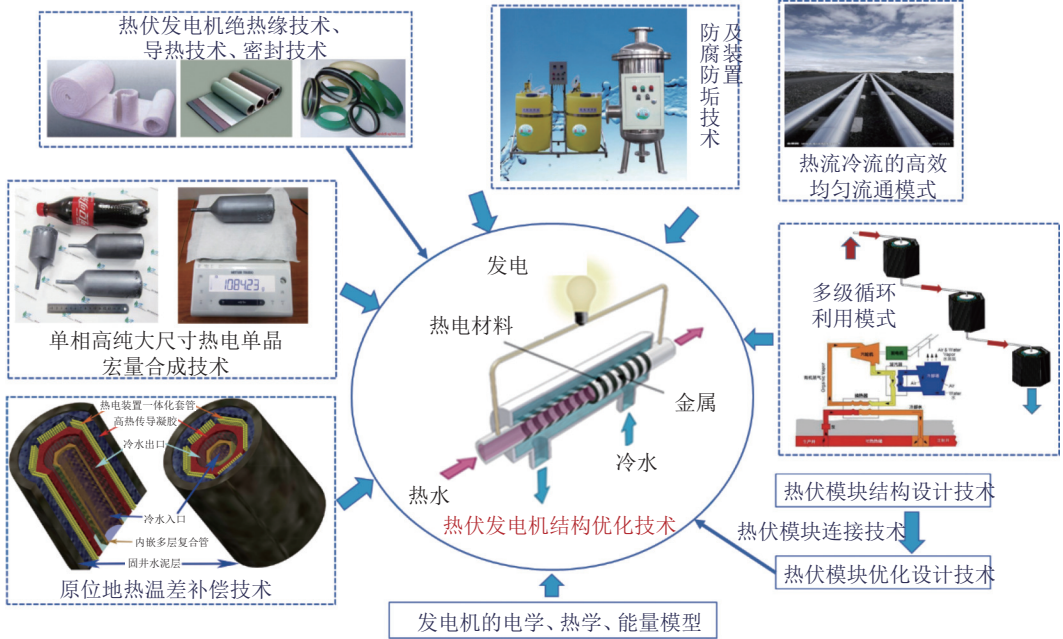


图7 热伏材料发电装置成套技术示意图

Fig.7 Schematic diagram of power generation of unitized technology based on thermovoltaic materials

4.3 热伏材料地热发电精准对接技术

4.3.1 地下水纯化

热伏材料地热发电的前后端对接是影响地热发电大规模商业发展的重要环节。由于地热水温度较高且含有多种化学组分,导致地热水的开发和输送设备会严重腐蚀性破坏和发生结垢现象,从而影响设备的效率和寿命。目前一般通过对地热流体腐蚀性和结垢趋势进行评价,采取防腐防垢的技术装置来减轻影响;已有的设备运行情况表明,该处置方法效果不佳,因腐蚀或结垢导致停产的热电发电厂不在少数。因此,探索一种全新的解决方案对于确保中低温地热发电装置长期稳定运行具有非常重要的意义。本文提出采用地下水纯化系统,引入当今最新水处理成果^[47],去除对地热流体腐蚀性和结垢影响显著的化学成分,有效提取其中附加值较高的成分,提高综合效益。

4.3.2 精准电网对接

对于风电、光电、径流水电来说,其能源产出的不确定性,一方面,造成了电网不稳定而产生安全隐患;另一方面,因无法消纳,导致中国目前存在较为严重的弃风、弃水和弃光问题。通过热电转换的地热发电技术,可以构建能提供冷-热-电需求的能源供应系统。若采用如图8所示的精准电网对接技术,利用基于热电材料的地热发电,不仅可以通过储热、制冷系统消纳风电、光电、径流水电生产的过剩能源,也可以随意调控输出功率,弥补风电、光电、径流水电低谷时产能的不足,还可以为电网的安全稳定运

行提供保障。因此,地热发电是冷热电三联供的完美结合体,是风电、光伏、径流水电等不确定性清洁能源的优质储能系统,是能源互联网的天然调控中枢。地热发电、风电、光伏、径流水电等多种清洁能源的冷热电综合供能系统将成为今后清洁能源的新模式。

在电网精准对接中,需要重点攻克的技术主要包括:

- 1) 研发地热发电电能并入电网的转接装置与控制技术;
- 2) 形成地热能上网稳定与控制技术,及其对电网安全及电能质量影响的评估方法;
- 3) 研究地热发电的冷热电联产联供对接技术,探索基于地热发电技术的综合能源供给新模式;
- 4) 深入研究风电、光电、径流水电、地热发电等清洁能源的输出特性,揭示它们相互间的供能互补关系以及用户用能需求之间的关系,形成基于地热发电的多能源互补供能新技术;
- 5) 系统开展地热发电电热转换、电冷转换、热电转换的转换效益研究,构建基于地热发电的储能新技术;
- 6) 研究基于地热发电的生产供给特征及用户对冷、热、电的需求特征,发展基于冷、热、电联产联供的价格体系;
- 7) 研发基于地热发电的电网状态监控系统以及电网控制信息系统,形成基于地热发电的信息技术,建立基于能源流、信息流、价值流耦合特性的能源互联网技术体系。

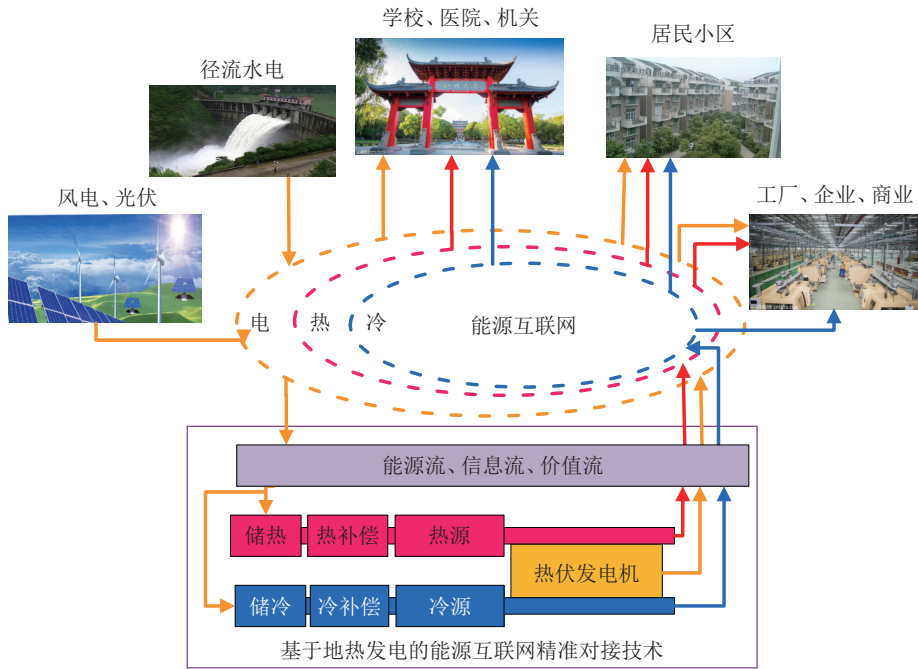


图 8 热伏材料地热发电精准对接技术及规模应用示意图

Fig.8 Schematic diagram of precise technology transfer and large-scale application for geothermal power generation based on thermovoltaic materials

5 结论和展望

近百年来,大量科研工作者和工程人员致力于中低温地热发电系统的研发,取得了重要进展,但仍停留在热动力发电的传统模式层面,均需要先将地热能转换机械能,再转化为电能,技术上没能实现颠覆性的突破。因此,纵然全社会都充分认识到地热发电的重要性和迫切性,但进展仍非常缓慢。可见形成创新的中低温地热发电新技术体系是破解该困局的唯一出路。本文系统提出了基于大尺寸单晶热伏材料中低温地热发电的技术构想,并指出了实施过程中的基础问题与重大挑战;初步设计了工程化实践路线,基于冷、热、电联供一体化思路,综合考虑中低温地热发电系统的前端、后端等各个环节,提出了精准对接技术思路。本文的构想为破解中低温地热发电困境、建立热伏发电技术体系及适应性评价方法提供了有效途径,有望开辟全新的地热发电模式,引领地热发电技术革命,实现深部地热资源清洁、高效、生态、绿色开发。

[致谢]本文形成过程中,很多学者如四川大学朱世富教授、赵北君教授、叶金文副教授、何知宇副教授、邱彧冲博士生、高明忠副教授、谢果副教授,深圳大学刘福生教授等参与讨论并提出建议,在此一并致谢。

参考文献:

[1] 中国电力企业联合会.2015全国电力工业统计资料汇编

[R].北京:中国电力企业联合会,2016.

[2] 国家电网公司.促进风电发展白皮书2016[R].北京:国家电网公司,2016.

[3] 电力发展“十三五”规划(2016-2020)[R].北京:国家发展和改革委员会,国家能源局,2016.

[4] 地热能开发利用“十三五”规划[R].北京:国家发展和改革委员会,国家能源局,国土资源部,2017.

[5] Xie Heping,Gao Feng,Ju Yang,et al.Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J].Advanced Engineering Sciences,2017,49(1): 1-8.[谢和平,高峰,鞠杨,等.深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J].工程科学与技术,2017,49(1):1-8.]

[6] 谢和平.深地科学三个颠覆性创新理论与技术构想[Z].北京:地球深部探测中心,2016.

[7] Xie Heping,Gao Mingzhong,Zhang Ru,et al.The subversive idea and its key technical prospect on underground ecological city and ecosystem[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(6):1301-1313.[谢和平,高明忠,张茹,等.地下生态城市与深地生态圈战略构想及其关键技术展望[J].岩石力学与工程学报,2017,36(6):1301-1313.]

[8] Xie Heping,Cao Mingzhong,Gao Feng,et al.Strategic conceptualization and key technology for the transformation and upgrading of shut-down coal mines[J].Journal of China Coal Society,2017,42(6):1355-1365.[谢和平,高明忠,高峰,等.关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J].煤炭学报,2017,42(6):1355-1365.]

- [9] Xie Heping, Xu Weilin, Liu Chao, et al. The subversive idea and key technical prospects on underground hydraulic engineering[J/OL]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (2018-01-12)[2018-02-01]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/42.1397.03.20180112.1738.009.html>. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2017.1058. [谢和平, 许唯临, 刘超, 等. 地下水利工程战略构想及关键技术展望[J/OL]. 岩石力学与工程学报 (2018-01-12)[2018-02-01]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/42.1397.03.20180112.1738.009.html>. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2017.1058.]
- [10] 谢和平. 中国工程院咨询项目“煤炭绿色开发利用与煤基多元协同清洁能源技术革命研究”研讨会报告[Z]. 北京, 2016.
- [11] Xie Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2):1-16. [谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2):1-16.]
- [12] Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, et al. Novel idea of the theory and application of 3D volume fracturing for stimulation of shale gas reservoirs[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61:36-46. [谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 页岩气储层改造的体破裂理论与技术构想[J]. 科学通报, 2016, 61:36-46.]
- [13] Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3):547-556. [谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3):547-556.]
- [14] Xie Heping, Zhou Hongwei, Xue Dongjie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4):535-542. [谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4):535-542.]
- [15] Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2161-2177. [谢和平, 高峰, 鞠杨. 深地岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11):2161-2177.]
- [16] Xie Heping, Liu Hong, Wu Gang. A quantitative analysis of development index and contribution rate between China's economic and coal development[J]. Journal of China University of Mining & Technology (Social Sciences), 2012, 3(9):1-6. [谢和平, 刘虹, 吴刚. 经济对煤炭的依赖与煤炭对经济的贡献分析[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2012, 3(9):1-6.]
- [17] Xie Heping, Liu Hong, Wu Gang. Quantitative analysis of the contribution of coal to the development of national economy[J]. Energy of China, 2012, 34(4):5-9. [谢和平, 刘虹, 吴刚. 煤炭对国民经济发展贡献的定量分析[J]. 中国能源, 2012, 34(4):5-9.]
- [18] 谢和平. 煤炭科学开采与技术变革[Z]. 中国工程院国际工程科技大会报告, 2014.
- [19] 谢和平. 煤炭科技之探索和展望[Z]. 煤炭工业十三五科技发展规划编制会议报告, 2015.
- [20] Li Qionghui, Wang Caixia. Analysis on new energy development based on the 13th Five-Year electric power planning[J]. Electric Power, 2017, 50(1):30-36. [李琼慧, 王彩霞. 从电力发展“十三五”规划看新能源发展[J]. 中国电力, 2017, 50(1):30-36.]
- [21] 徐之平. 世界地热能发电概况[J]. 能源研究与信息, 1986, 1:66-67.
- [22] Wang Guiling, Zhang wei, Liang Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4):449-459. [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.]
- [23] Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report[J]. Geothermics, 2016(60):31-43.
- [24] 朱家玲, 李太禄, 付文成, 等. 中低温地热发电循环效率的分析与研究[C]//地热能开发利用与低碳经济研讨会—第十三届中国科协年会第十四分会论文摘要集, 2011.
- [25] Tomasini-Montenegro C, Santoyo-Castelazo E, Gujba H, et al. Life cycle assessment of geothermal power generation technologies: An updated review[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114:1119-1136.
- [26] DiPippo R. Geothermal power plants: Evolution and performance assessments[J]. Geothermics, 2015, 53:291-307.
- [27] Tomarov G V, and Shipkov A A. World geothermal congress WGC-2015[J]. Thermal Engineering, 2016, 63, (8):601-604.
- [28] Huang Shaopeng. Geothermal energy development opportunities and challenges in China[J]. Energy of China, 2014, 36(9):4-9. [黄少鹏. 中国地热能源开发的机遇与挑战[J]. 中国能源, 2014, 36(9):4-9.]
- [29] International Energy Agency. Electricity Information 2007[M]. Paris: OECD Publishing, 2007.
- [30] Zarrouka S J, Moon H. Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review[J]. Geothermics, 2014(51):142-153.
- [31] Tritt T M. Thermoelectric materials[J]. Science, 1999, 283 (5403):804-805.
- [32] Wood C. Materials for thermoelectric energy conversion[J]. Reports on Progress in Physics, 1988, 51(4):459-539.
- [33] Vining C B. Semiconductors are cool[J]. Nature, 2001, 413(6856):577.
- [34] Disalvo F J. Thermoelectric Cooling and Power Generation[J]. Science, 1999, 285(5428):703-706.
- [35] 小川吉彦, 武笠幸一, 长尾二郎, 等. 热电冷却素子に関する

—考察[C]//电子情报通信学会论文集,1992,J75-C-II(8):416-424.

- [36] Sales B C, Mandrus D, Williams R K. Filled skutterudite antimonides: A new class of thermoelectric materials[J]. *Science*, 1996, 272(5266): 1325–1328.
- [37] Riffat S B, Ma X L. Thermoelectrics: A review of present and potential applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(8): 913–935.
- [38] Venkatasubramanian R, Siivola E, Colpitts T, et al. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit[J]. *Nature*, 2001, 413(6856): 597.
- [39] Shi Wen, Zhong Wu, Yu Dabin. Research progress of micro thermoelectric devices[J]. *Materials Review*, 2010, 24(4): 44–47. [施文, 钟武, 余大斌. 微型热电器件的研究进展[J]. 材料导报: 综述篇, 2010, 24(4): 44–47.]
- [40] Disalvo F J. Thermoelectric cooling and power generation[J]. *Science*, 1999, 285(5428): 703–706.
- [41] Snyder G J, Toberer E S. Complex thermoelectric materials[J]. *Nature materials*, 2008, 7(2): 105–114.
- [42] Qiu P, Shi X, Chen L D. Cu-based thermoelectric materials[J]. *Energy Storage Materials*, 2016, 3: 85–97.
- [43] Liu C W, Chen P Y, Li K W. A 1 kW Thermoelectric generator for low-temperature geothermal resources[C]//Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2014.
- [44] Liu C W, Chen P Y, Li K W. A 500 W low-temperature thermoelectric generator: Design and experimental study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(28): 15497–15505.
- [45] Chen J L, Li K W, Liu C W, et al. Enhanced efficiency of thermoelectric generator by optimizing mechanical and electrical structures[J]. *Energies*, 2017, 10: 1329.
- [46] Roland N, Li Kewen. New progress in the world geothermal power generation[J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 60–66. [罗兰德, 李克文. 世界地热能发电新进展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 60–66.]
- [47] Renew J, Hansen T. Geothermal thermoelectric generation (G-TEG) with integrated temperature driven membrane distillation and novel manganese oxide for lithium extraction[R]. DE-EE0006746.



谢和平, 中国工程院院士, 著名力学科学家, 深圳大学特聘教授, 曾任四川大学校长, 四川省科协主席, 国家重点研发计划“深部岩体力学与开采理论”项目负责人、国家973重大基础研究项目“灾害环境下重大工程安全性的基础研究”和“深部煤炭开发中煤与瓦斯共采理论”的首席科学家、

国家自然科学基金委创新研究群体首席科学家, 兼任《Geomechanics and Geoengineering: an international Journal》《力学学报》《岩土工程学报》等10余种学术刊物的荣誉主编或编委。长期从事矿山工程力学的理论与应用研究, 20世纪80年代在中国最早建立了裂隙岩体宏观损伤力学模型来研究其自然性状及导致灾害性事故发生的机理和过程, 开拓了裂隙岩体损伤力学研究新领域。创造性地引入分形方法对裂隙岩体进行非连续变形、强度和断裂破坏的研究, 形成了裂隙岩体非连续行为分形研究的新方向, 取得显著经济和社会效益。率先组织开展了灾害环境下重大工程安全性的基础研究以及深部煤炭开发中煤与瓦斯共采理论研究, 组织研究并提出了煤炭开发新理念即科学开采和科学产能。率先提出了全球CO₂减排不应是CCS, 而应是CCU, 开创了CO₂矿化利用新领域。致力于深地科学基础研究、低碳绿色能源系统构建的创新探索, 研究方向包括深地原位岩石力学、三维应力场可视化理论与技术、地下空间开发与自循环生态系统、地下空间储能与智能转化、深地固体资源流态化开采、中低温地热发电、深地医学、低碳技术与CO₂矿化利用、海水能源化利用等。出版中英文专著6部, 在国内外学术刊物发表论文200余篇, 被SCI收录80余篇、引用500余次, EI收录78篇, CSCD和CSTPC引用546次。作为全国6名获奖者之一, 获得首届“中国青年科学家奖”; 获得国家自然科学二等奖、国家科技进步二等奖、国家科技进步三等奖、国家自然科学三等奖四项国家级奖, 以及孙越崎能源大奖、何梁何利科技进步奖和省部级二等以上奖励多项。被美国、英国、德国、波兰等国外著名大学聘为客座教授及客座研究员, 2007年被德国克劳斯塔尔工业大学授予荣誉博士学位, 2008年获香港理工大学第十五届“杰出中国访问学人计划”表彰, 2012年10月被香港理工大学授予荣誉博士学位, 2012年11月被英国诺丁汉大学授予荣誉博士学位。

(编辑 张 琼)

引用格式: Xie Heping, Ang Ran, Li Bixiong, et al. Principle and technological conception of middle-low temperature geothermal power generation based on large-scale single crystals of thermovoltaic materials[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(2): 1–12. [谢和平, 昂然, 李碧雄, 等. 基于热伏材料中低温地热发电原理与技术构想[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(2): 1–12.]