

我国中深层地热资源赋存特征、发展现状及展望

曹 锐¹⁾, 多 吉^{1,2)}✉, 李玉彬²⁾, 蒙晖仁¹⁾, 蔡永强¹⁾

1) 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059 2) 西藏自治区地质矿产勘查开发局, 拉萨 850010

✉通信作者, E-mail: bmwb@vip.163.com

摘 要 地热资源具有储量大、能源利用效率高、运行成本低和节能减排等优点,是唯一不受天气、季节变化影响的地球本土可再生清洁能源,对于实现双碳目标有重要意义。为了解中深层地热资源赋存特征和发展现状,系统梳理了国外中深层高温地热资源的发展历程和最新进展,并与我国中深层地热资源开发情况进行对比分析,以期为我国中深层地热资源开发利用提供借鉴和启示。总体来讲,我国传统水热型地热资源潜力巨大且开发程度不高,具有很大的开发空间;针对我国地热流体中伴生矿产资源的相关开发依然存在着稀有元素分布特征不清、潜力不明、整体开发利用程度不高等问题,应在评估地热流体中伴生矿产资源潜力基础上,进一步加强地热流体中伴生矿产资源的综合开发利用;随着矿产资源开采深度的加大和高温地热带周边相关工程建设的开展,高温热害成为不可忽视的问题。但目前深部矿井和工程建设中“热害资源化”的研究相对不足,造成了地热资源的浪费,应在“热害资源化”潜力评估的基础上,进一步推动“矿-热共采”及工程建设中的“热害资源化”利用。

关键词 中深层地热资源;水热型;EGS;稀有金属;热害资源化

分类号 TG142.71

Occurrence characteristics, development status, and prospect of deep high-temperature geothermal resources in China

CAO Rui¹⁾, DOR Ji^{1,2)}✉, LI Yu-bin²⁾, MENG Hui-ren¹⁾, CAI Yong-qiang¹⁾

1) State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2) Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lhasa 850010, China

✉ Corresponding author, E-mail: bmwb@vip.163.com

ABSTRACT The geothermal resource has some advantages in energy-saving and emission-reduction. They include enormous reserves, high energy utilization efficiency, and low-cost operation and have played an important role in achieving the targets of carbon peak and carbon neutrality as the only renewable-clean energy on the planet that is not affected by weather and seasons. A systematical analysis of the developing courses and new progress of foreign countries' middle-deep high-temperature geothermal resources was carried out to analyze the occurrence characteristics and development status of high-temperature geothermal resources. Furthermore, in comparison to the development of high-temperature geothermal resources in China, several suggestions which may provide a reference for the utilization of middle-deep geothermal resources in China are put forward for the actual demands. Conventional hydrothermal geothermal resources in China generally have mature power technology and significant potential. However, in comparison to the total resources, geothermal resources in China have a low development degree and significant development potential. Significantly, a variety of rare mineral resources are associated with geothermal fluids in China, but some issues exist in the development of the associated

收稿日期: 2022-04-07

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0804);国家自然科学基金资助项目(U21A2015);中国工程院咨询项目(2019-XZ-16);西藏自治区重点研发计划资助项目(XZ201801-GB-01, XZ202101ZY0014G);西藏自治区矿产资源勘查专项资金资助项目(藏矿勘[2018]09号);中国石化科研项目(P21083)

mineral resources in high-temperature geothermal fluids, such as unclear trace element distribution and development potential, resulting in a low level of resource development. Consequently, based on the potential evaluation of the associated mineral resources, comprehensive utilization of the associated mineral resources in deep geothermal fluids should be strengthened. High-temperature heat harm has become a significant problem as engineering construction in the high-temperature geothermal area has advanced, and the mining depth of mineral resources has gradually increased. The high-temperature heat harm not only has a serious impact on the health of workers but also impedes the construction process and raises costs. However, the resource attribute of high-temperature heat harm, on the other hand, has received little attention. Hence, there is relatively little research on the “resource utilization of heat energy” in deep mines and engineering construction, resulting in the waste of geothermal resources. Based on the potential evaluation of “heat harm resources,” more attention should be paid to the utilization of “heat harm resources” in engineering construction and “ore-thermal co-mining” in deep mines, as well as actively developing high-temperature heat harm resource utilization technology. In general, more attention should be paid to the development of China’s middle-depth geothermal resources. The development of an enhanced geothermal system based on conventional hydrothermal geothermal resources could be more effective. Furthermore, geothermal resource utilization should not be limited to geothermal fluid; associated mineral resources and high-temperature heat-harm resources have enormous resource potential as well.

KEY WORDS geothermal resources in middle and deep layers; hydrothermal type; EGS; rare metals; resource utilization of heat harm

近年来,在全球能源革命和“双碳”目标的推动下,节能减排和应对气候变化使得地热能、太阳能及风能等清洁能源和可再生能源的开发利用成为世界各国能源发展的重要战略^[1]。其中,地热能是唯一不受天气、季节变化影响的地球本土的可再生清洁能源^[2],因其具有储量大、能源利用效率高、运行成本低和节能减排等优点,目前已经成为新能源领域关注的焦点^[3]。

中深层地热资源主要有传统水热型地热系统和增强型地热系统两大类,相比浅层地热资源而言,其具有储量大且利用方式多等优势。为进一步了解中深层地热资源赋存特征和发展现状,本文在系统梳理国外中深层地热资源发展过程和最新进展的基础上,结合国内中深层地热资源开发现状,对中深层地热资源开发过程中涉及的传统水热型地热资源利用、EGS 相关技术突破、地热流体中伴生矿产资源的综合利用、“矿-热共采”及工程建设中的“热害资源化”等相关问题进行了总结分析,以期为我国中深层地热资源开发利用提供借鉴和启示。

1 中深层地热资源简述

根据热传递过程、温度、赋存条件、成因机制、控热构造和热储性质等考虑因素的不同,地热资源有多种分类方式:Muffler^[4]根据热量传递方式将地热资源划分为与高渗透率水热系统等相关的对流型地热资源及与低渗透率岩石等相关的传导型地热资源;其后 Muffler 和 Cataldi^[5]又依据储层温度将地热资源划分为低温地热资源($T < 90\text{ }^{\circ}\text{C}$)、中温地热资源($T = 90 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)和高温地热资源($T >$

$150\text{ }^{\circ}\text{C}$)。有学者也相继提出了不同的温度界限^[6],而我国在 2010 年出版的《地热资源地质勘察规范》国家标准(GB1615—89)中沿用了 Muffler 的划分方案^[4]。

考虑到我国地热系统的热储特征、热量赋存以及开发利用方式等情况,目前比较常用和公认的方法是《地热能十三五规划》及《地热资源地质勘察规范》中的分类:浅层地热资源、水热型地热资源和干热岩三种类型。浅层地热资源是从恒温带至地下 200 m 深度范围内,储存于水体、土体、岩石中可采用热泵技术提取利用的地热能^[7],浅层地热资源具有分布广泛、温度稳定、开发利用相对简单和成本较低等特点,在京津冀等地区冬季取暖和夏季制冷等方面发挥着重要作用^[8]。水热型地热资源,一般指以热水形式埋藏在 200~3000 m 深度范围内的地热资源,主要赋存于高渗透孔隙或裂隙介质中,以液态水或蒸气等形式存在^[9]。根据地质要素和地质作用特征的不同,可划分为:分布在板块活动边缘或板内火山活动区且以熔融体/岩浆囊为主要热源的岩浆型、与区域性深大断裂密切相关的断裂-深循环型、与伸展区较高热流背景或稳定区低热流背景相关的断陷盆地型^[10]。水热型地热资源是世界上目前开采和利用的主要地热能,在取暖、医疗康养、农业种植和工业发电等领域都有广泛应用^[11]。“干热岩”自提出以来,由于其储量巨大且没有靶区局限性等优势引起了全球科学家的广泛关注^[12-15]。但对“干热岩”是否含有流体和经济性评价指标等方面存在争议。因而,有学者提出了广义和狭义两个方面的定义来加以区分^[16],相应提出了“干热型”的概念。

由上可见,根据考虑因素的差异,地热资源的划分方案中地质要素的侧重各有不同,也存在一定的争议.若将地热系统作为一个相对独立的地质单元来考虑,根据埋深和热源性质等差异,为了跟“浅层地热资源”相区别,我们将水热型和干热型地热资源统一归类到中深层地热资源加以讨论.

2 中深层地热资源开发利用现状

中深层地热资源勘探和开发工作可以追溯到20世纪.根据勘探技术的不同,中深层地热资源勘探开发可以分为传统水热型地热系统和增强型地热系统两大类.传统水热型地热系统发电已经发展了100多年的历史,技术比较成熟;而EGS所能开发的深部高温地热资源量巨大,相应得到了各国的重视.据估计全球陆区3~10 km蕴藏的深部地热能资源总量约为 4.95×10^{15} t标准煤,相当于全球所有煤炭、石油和天然气所蕴藏能量的30倍.因此,各国相继开展了一系列的EGS示范工程,以期在深部高温地热资源开发中有更大的突破.

2.1 国外中深层地热资源开发和发展过程

2.1.1 国外传统水热型地热资源开发过程

世界地热发电最早起源于意大利,1904年意大利在西北部的拉德雷罗建立了世界上第一台装机容量为10 kW的实验性地热发电机组,并于1913年建成了世界第一座商业性地热发电站,开启了地热发电商业化的先河(表1).拉德雷罗地热田位于第勒尼安火山区内,热源与侵入地壳浅部的岩浆活动有关,是世界代表性的干蒸汽田之一.新西兰于1950年在Mairakei建立了世界上第二个地热发电站,该地热田位于新西兰北岛长250 km,宽50 km的地热异常区中,热储主要由中酸性凝灰岩和碎屑岩等组成,地热流体最高温度可达270 ℃.美国也是最早尝试利用地热发电的国家之一,1922年,在索诺玛地区开发了第一口地热气井,开始利用地热蒸汽供暖和驱动小型蒸汽机发电,但开发进程缓慢,直到1960年才建成了该国的第一座地热发电站,发电站位于世界最大的地热田——盖瑟斯地热田中.盖瑟斯地热田面积达185 km²,地球物理资料显示地表以下8 km处直径约为20 km的岩浆囊为其主要热源.随后,美国地热发电相关产业发展迅速,到2005年便拥有了209个地热发电机组,占世界地热发电机组总量的40%以上,地热发电总量居世界第一^[17].

表1 世界典型“传统水热型”高温地热发电站

Table 1 World's typical “conventional hydrothermal” high-temperature geothermal power plants

Name	Country	Location	Reservoir temperature/℃	Type	Medium	Installed capacity/MW	Start date	Status	Remarks
Larderello	Italy	Tuscany	350	Magmatic type	Dry steam	769	1913	Ongoing	The oldest geothermal power plant
Wairakei	New Zealand	Pauto, North Island	266	Modern volcanic type	Wet steam	140	1958	Ongoing	The first wet steam geothermal power plant
Gaithers	America	Sonoma, CA	250	Magmatic type	Dry steam	200	1960	Ongoing	The first geothermal power plant in America
Tiwi	Philippines	Albay Province	315	Magmatic type	Wet steam	330	1979	Ongoing	The largest geothermal power plant in the Philippines
Olkaria	Kenya	Hell's Gate National Park	235	Modern volcanic type	Hot water	727	1981	Ongoing	The largest geothermal power plant in Africa
Hellisheiði	Iceland	Henger	>230	Modern volcanic type	Hot water and steam	303	2006	Ongoing	The largest geothermal power plant in Iceland
Darajat	Indonesia	Pasirwangi District, garut, West Java	225–245	Modern volcanic type	Dry steam	255	2007	Ongoing	The second-largest geothermal power plant in Indonesia
Sarulla	Indonesia	Tapanuli Utara North Sumatra province	>250	Modern volcanic type	Hot water	330	2017	Ongoing	The largest geothermal power plant in Indonesia

1926年,印度尼西亚在爪哇岛开展了五个测试钻井,但直到1983年才真正开始利用地热发电.2007年和2018年分别在达拉哈特和萨鲁拉建成了两座地热发电站,装机容量分别为271和330 MW.印尼位于特提斯构造域的东南端,近代火山活动频繁,地热资源丰富,约占全球总量的40%,主要

集中在苏门答腊、努沙登加拉和巴布亚等地,发电潜力约为28910 MW,潜力巨大.截至2020年,印度尼西亚的地热发电站装机容量已达2289 MW,位居世界第2位.1977年,菲律宾第一座地热发电站开始运营,开启了菲律宾地热发电的历史,随后的20多年里,又陆续修建了6座地热发电站.截

至 2020 年, 菲律宾的地热发电装机容量已达 1918 MW, 位居世界第 3 位。此外, 日本和土耳其等国家都在利用自身地热资源的优势积极布局地热发电产业。日本于 1966 年在岩手县建成蒸汽优势型松川地热发电站, 开启了日本商业性地热发电。随后的数十年日本地热发电快速发展, 陆续修建了十多座地热发电站, 尤其在 2012 年福岛核事故之后, 日本更加重视发展地热发电产业^[18]。截至 2020 年, 地热发电站已在 29 个国家或地区运营, 总装机容量约为 15950 MW, 其中装机容量在 10 MW 以上的地热发电站有 73 座。近年来, 印度尼西亚、肯尼亚、美国和冰岛等国家这几年地热发电总装机容量明显增长(图 1), 尤其是像印度尼西亚等国家计划开发更多的地热能发电项目, 预计 2027 年印度尼西亚地热发电总装机有可能超过美国, 成为全球地热发电领先者^[19]。

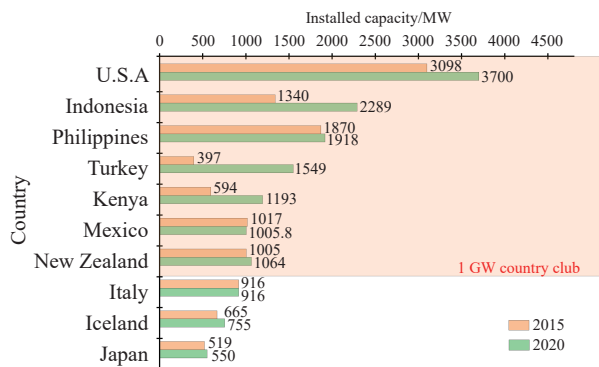


图 1 2015—2020 年全球地热发电装机容量排名前十的国家

Fig.1 Top 10 countries with the most installed geothermal power capacity in 2015–2020

2.1.2 国外 EGS 地热资源开发和发展过程

最早在 20 世纪 70 年代, 美国在新墨西哥州 Fenton Hill 尝试开展世界上第一个工业规模的 3000 m 左右深部地热资源开发时, 预估深层岩体中不会有流体存在, 因此将这种无流体、无裂隙、距离地面 2~3 km 以下且温度 $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温岩体称之为“Hot dry rock”^[12]; 而后日本在 Hijiori 火山口进行深层岩体地热能开发过程中发现在 1800~2200 m 处深部岩体中不仅发育大量天然裂缝还存在地热流体, 因此将其命名为“Hot wet rock”^[13]; 澳大利亚在 Cooper Basin 花岗岩中开展水力压裂, 以期建立永久连通裂隙网络, 将这种人工造储的深部地热资源称为“Hot fractured rock”^[14]; 而瑞士将这类深部具有高温的岩石归类到了“Deep heating mining”^[15]。

我国国家能源局在 2019 年实施的《NB/T10097—2018 地热能术语》中将干热岩定义为“不含或仅含少量流体, 温度高于 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其热能

在当前技术经济条件下可以利用的岩体”。目前, 美国能源部将此类需采用水力压裂等工程手段, 从地下 3~10 km 的低渗透性岩体中经济地获得相当数量深层热能的人工地热系统, 统称为“Enhanced Geothermal Systems(EGS)”^[20]。

虽然“干热岩”的定义存在分歧, 但普遍接受的是与 EGS 密切相关的深层地热资源潜力巨大且不受靶区限制, 相应得到了国际上各国的重视, 相继开展了一系列的 EGS 示范工程。1973 年, 美国开展了世界第一个干热岩开发项目, 实现了干热岩地热发电从概念到实验的飞跃, 钻井 EE-2 井深为 4390 m, 储层温度为 $327\text{ }^{\circ}\text{C}$, 产量为 $10\sim18.5\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。验证了在渗透率很低的岩层中通过人工压裂的方法建立储层, 通过流体循环提取储层热量的方法是可行的, 为地热能的发展提供了新的方向。

1984 年, 德国、法国和英国联合在法国莱茵河地堑的 Soultz 开展了 EGS 示范工程, 热井最大井深约为 5000 m, 储层温度约为 $202\text{ }^{\circ}\text{C}$, 热储岩性为花岗岩, 产量为 $30\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, 同时对储层压裂过程中的相关微震开展了监测工作。1997 年, 该项目吸引了一批企业加入, 开启了产业化的尝试, 建成了世界上第一个 EGS 示范电站。日本在 1985 年的 Hijiori 火山口南部开展了该国的第一个 EGS 示范工程, 前期研发了 EGS 开发的相关技术, 并成功建造了浅部储层, 浅部热储深度为 1800 m, 储层温度约为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 深部热储深度为 2200 m, 温度约为 $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

20 世纪以来, 随着各国在干热型地热资源开发技术的成熟, 开始了 EGS 示范电站相关建设。2003 年, 澳大利亚在其南部 Cooper Basin 开展 EGS 研发示范项目, 其目标是扩展示范场地并进行发电。该项目是当时全球最大的增强型地热系统研发示范项目, 最大井深为 4421 m, 热储温度约为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但由于水损率较大, 难以维持出口取热温度, 目前仍未实现商业开发。截至 2021 年, 世界上已有近 14 个国家开展了 EGS 高温地热资源开发工作, 其中美国、日本、法国、德国和澳大利亚等国家均实现了试验性发电, 但也有部分项目因为开发技术不成熟、缺乏经费持续支撑和压裂过程中诱发地震等原因而终止, 总体而言, 利用 EGS 高温地热资源发电还处于试验探索阶段。

2.2 我国中深层地热资源开发利用现状

2.2.1 我国传统水热型地热资源开发和发展过程

20 世纪 50 年代末, 著名地质学家李四光先生便倡导开发中深层地热资源, 组建了我国第一个地热研究组。在 60 年代建立了地热实验室和地热

深井观测点,促使地热能的利用从医疗扩大到了工、农业等领域,同时开始了地热发电的可行性研究^[21]。在李四光先生的倡导下,在北京、河北和西藏等地重点开展了地热资源普查工作,进一步推动了我国地热资源的全面开发利用^[21]。从20世纪70年代开始我国先后在广东丰顺县和西藏羊八井建立了地热电站^[22]。羊八井地热电站是西藏第一座高温地热发电站,现有装机容量25.18 MW。在20世纪90年代初期,发电量曾占拉萨电网的40%(夏季)至60%(冬季),被誉为是青藏高原上的一颗明珠。截至2020年6月,羊八井地热电厂累计发电34.1亿kW·h,为西藏社会经济发展和节能减排作出了重要贡献^[23]。

我国西藏、云南腾冲和川西等地具有丰富的地热能,尤其是西藏地区各类地热显示区(点)600余处,发电潜力约为3000 MW,居全国之首。2017年由国家发改委、国家能源局和国土资源部三部委联合发布的《地热能开发利用“十三五”规划》明确提出“在西藏地区有序启动400 MW装机容量规划或建设工作”的目标。我国传统水热型地热资源发电潜力为6700 MW,在全球排第3位,但目前总装机容量仅为34.89 MW,排世界第19位,跟资源总量明显不符,具有很大的开发空间^[24]。基于此,2021年9月国家发改委、国家能源局、财政部和自然资源部等八部委联合发布《关于促进地热能开发利用的若干意见》,指出:到2025年,在资源条件好的地区建设一批地热能发电示范项目,全国地热能发电装机容量比2020年翻一番;到2035年,地热能发电装机容量力争比2025年翻一番。

2.2.2 国内EGS高温地热资源开发和发展过程

我国EGS高温地热资源勘探和开发等工作起步较晚,1993年中国地震局地壳应力研究所和日本中央电力研究所在北京房山开展了干热岩发电相关试验工作,开启了我国干热岩研究初步探索阶段^[25]。2007年中国能源研究会地热专业委员会与澳大利亚Petratherm公司联合开展了“中国工程型地热系统资源潜力评价的研究”国际交流项目,在我国西藏、云南、四川、福建、广东、海南初步进行资料收集、分析测试和模型研究等工作,完成了靶区选取和潜力评价工作^[26]。2012年,针对干热型地热资源开发过程相关关键技术问题,吉林大学、中科院广州能源研究所、清华大学和天津大学等科研院校联合申报了国家高技术研究发展计划“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”,创建了大尺寸高温高压干热岩水力压裂实验室模

拟系统,提出了中国首部干热岩靶区定位行业规程,为我国的干热型地热资源勘探开发提供了相关理论依据和技术支撑^[27]。

2013年中国地质调查局重点在福建漳州、广东阳江和雷琼断陷盆地等地开展了干热岩资源潜力评价与示范靶区项目。2014年,青海省水工环地质调查院在青海共和盆地恰卜地区实施的ZKD23井,2866 m的井底温度达181℃,为我国首次发现的优质干热型高温地热资源;2017年,在地热地质调查和地球物理勘探等工作基础上,中国地质调查局和青海省国土资源厅共同组织在青海共和盆地实施了GR1和GR2井,其中GR1井底温度达236℃,是我国迄今为止钻获的温度最高的干热型地热资源,取得了我国干热型地热资源勘查的突破^[28]。近年来,国内其他地区也陆续开展了高温干热型地热资源勘查工作。2018年,李德威在海南澄迈实施了琼北花东1R井,历时66 d,于2018年3月在井深4387 m处钻获超过185℃的干热岩资源。琼北花东1R井是我国东部第一口成功实施且具有独立知识产权的干热岩参数井,对我国干热型高温地热资源的开发利用具有里程碑式意义。2018年6月江苏地质调查院组织实施了“江苏省干热岩资源调查评价项目”,在苏北盆地圈定了干热型高温地热资源靶位,并于2021年1月在兴化市城北成功实施了“苏热1井”,孔深约为4700 m,钻获温度约155℃,证实了苏北盆地含有丰富干热岩资源。2022年元旦后,“苏热1井”已预备进行热储层压裂实验,准备打造干热岩勘查开发试验示范基地。

3 我国中深层地热资源发展展望及建议

3.1 我国中深层地热资源的开发过程中,传统水热型地热资源开发是基础,EGS相关技术突破是关键,在水热型地热资源开发基础上的EGS将更有成效性

在全球的四大地热带中,我国主要位于环太平洋地热带与地中海-喜马拉雅地热带的交汇部位。在特殊的背景下,产生了与青藏高原陆-陆碰撞背景下降升过程密切相关且以熔融体/岩浆囊为主要热源的高温地热系统,如青藏高原腹地藏南及其东缘川西等地区;与岩石圈减薄过程构造-岩浆活动密切相关且以区域地幔热异常/花岗岩放射性生热为主要热源的东南沿海中低温地热系统,如福建漳州和广州佛冈等地区;与古潜山/伸展断陷构造密切相关且以地幔热源/基岩放射性生热为主要热源的沉积盆地型层控中低温地热系统,如

华北盆地、江汉盆地和松辽盆地等位于我国中东部的中/新生代沉积盆地;与近代火山活动密切相关且以岩浆囊/次火山岩为主要热源的高温地热系统,如滇西和台湾中央山脉两侧火山活动区。目前,我国中低温水热型地热资源相关地区主要应用于取暖、医疗康养和农业种植等方面。高温水热型地热资源主要集中在青藏高原腹地藏南、云南滇西腾冲和青藏高原东缘川西等区域,是我国地热发电的主要地区。要达到“全国地热能发电装机容量比 2020 年翻一番”的目标,我国中深层地热资源的开发过程中,青藏高原腹地藏南和东缘川西地区、云南滇西等重点区域传统水热型高温地热资源的开发是基础。

虽然近年来,我国相继在共和盆地、海南澄迈和苏北盆地等地成功开展了一系列 EGS 高温地热资源勘查工作,取得了喜人的成绩,但依然在人工压裂建储和流体循环等方面存在诸多关键技术和经济性问题的,导致了 EGS 高温地热资源商业化发电依然任重道远。目前,我国传统水热型地热资源潜力巨大且开发程度不高,其进一步开发和利用依然具有优势,是我国中深层地热资源开发的基础。

2002 年,美国在 Raft river 对现有的废弃地热井进行 EGS 改造,容量超过 10 MW,有效降低了成本并提高了开采能力,成功实现了商业发电。其成果表明采用 EGS 相关技术在现有的水热型地热田中建立人造热储,并与天然热储相连可以增加其生产能力,可迅速获得经济效益^[27]。我国高温地热资源具有干热型地热系统和水热型地热系统共存的特征,如曾在羊八井施工的 ZK4002 钻孔,在 1850 m 处无地热流体且温度高达 329.8 °C。因此,在水热型地热资源开发基础上利用 EGS 开发高温地热资源将更有成效性。

3.2 在评估地热流体中伴生矿产资源潜力基础上,进一步加强其综合开发利用

自 1951 年中国科学院西藏工作队调查了那曲附近错馬拉热泉型雄黄点以来,西藏地勘局、地科院矿床地质研究所和地质力学研究所等单位先后在西藏开展水热矿床的工作^[29]。郑绵平等^[30]与雒洋冰等^[31]在青藏高原盐湖相关研究工作中关注到了地热水与盐湖之间的成因联系,认为青藏高原特种盐湖中钾盐、镁盐、锂、锶、硼及芒硝矿为主体的矿产富集区与火山-地热水系统具有很高的相关性,地热水是青藏高原盐湖钾盐、铯、铷、锂、硼等矿床的主要物质来源。郑绵平等^[29]曾重

点对谷露、塔格架和色米等含铯硅华区开展了地表地质调查和水文地球化学等研究,发现了含铯硅华主要为含铯蛋白石(含铯的二氧化硅胶体),认为西藏谷露、塔格架和色米等地热田中含铯硅华是一种新的工业铯矿床。多吉等^[32]首次报导了与热泉在空间上和成因上有密切联系的马攸木金矿床。作为西藏首例独立岩金矿床,马攸木金矿周围地热活动强烈,古泉华发育普遍含金(最高含金达 18.72 g·t⁻¹)。其主要经过了热液期、风化期和沉积期等三个成矿期次,深部地下热水通过深循环沿构造上升,对金元素的矿化富集起到了关键性作用^[33]。

近年来,在低碳转型过程中,锂矿资源作为新能源领域重要的电池原材料受到了高度关注^[34]。素有“白色石油”之称的锂矿,先后被欧盟、美国和中国等国家列为战略性矿产目录中。目前发现的锂矿床最主要的有卤水型、伟晶岩型和沉积岩型这 3 种类型,而卤水型锂矿床是其中最为重要的类型,占全球锂资源的 78.3%^[35]。据估算,卤水型锂可解决全球 3/4 的锂资源需求,而其锂的来源(如玻利维亚乌尤尼盐湖及美国银峰盐湖和西尔斯盐湖等^[36])与地热水的活动密切相关。因此,越来越多的研究者关注到了与地热水相关的锂资源^[37]。在西藏科技厅重点研发计划《西藏地热水中的锂稀有金属资源调查及提取技术研究》等项目的支持下,多吉等^[38]系统调查了西藏富锂温泉并开展了相关地球化学分析,从东向西划分了 11 个地热型锂资源异常带,随后开展了地热水中锂元素的提取实验。整体来讲,西藏富锂温泉受高温地热区和活动构造控制,锂浓度大于 20 mg·L⁻¹,赋存于地下热水中,水化学组成简单,易于提取。

综上所述,地热田中深层地热流体中富含钾、铯、锂和硼等元素,部分地热田中相关元素已富集到工业品位,有些甚至达到矿床级别,形成了地热水相关的新类型的矿床^[39]。加州能源局曾在 2021 年 3 月发布的关于美国第二大地热田——萨尔顿海地热田的相关研究报告中预测,萨尔顿海地热田中碳酸锂的年供应量将超过 60 万吨,有巨大的经济效益^[40]。据不完全统计,青藏高原西藏高温地热田(如卡乌曲灿沸泉、拉不朗沸泉和拉旺孜热泉等)中锂含量达到或超过 20 mg·L⁻¹ 的有数十处,初步估算通过地热流体排出的锂资源大约有 4281 t 之多^[41]。因此,进一步开发深部地热流体中伴生矿产资源迫在眉睫。但目前来讲,我国地热流体中伴生矿产资源相关开发依然存在着稀有元素分布特

征不清、潜力不明、整体开发利用程度不高等问题。针对以上存在问题,应加强地热水中稀有金属形成规律和超常富集机理研究,并针对性地研发相关勘查和提取技术,在评估地热流体中伴生矿产资源潜力基础上,进一步加强地热流体中伴生矿产资源的综合开发利用。

3.3 矿山资源开发和工程建设中常遇到高温“热害”,“矿-热共采”及工程建设中的“热害资源化”利用等有待于进一步发展和加强

近年来,随着矿产资源开采深度的加大和高温地热带周边相关工程建设的开展,高温热害成为了不可忽视的问题。根据《煤炭安全规程》的规定,生产矿井采掘面工作面温度不得超过 26℃,当工作面温度超过 30℃时,则必须停止工作;TB 10003—2013《铁路隧道设计规范》规定施工隧道内温度不宜大于 28℃;但有时遇到的温度远远超过了上述标准的温度范围,如:徐州沛县龙谷镇三尖河煤矿的 700 m 开采深度处岩温为 37.7℃,980 m 深处岩温高达 46.5℃,矿井突水水温更是达到了 50℃。日本安房公路隧道长 4.35 km,线路通过火山带,坑道涌水温度最高达 75℃。我国的拉林铁路桑珠岭隧道,最大埋深为 1347 m,在开挖 1 号横洞时出现了高地温问题,最高温度达 86.7℃,洞内岩温达 74.5℃。目前正在修建的川藏铁路雅安—林芝段穿越数条大型地热活跃带,构造条件极为复杂,也面临高温热害规避和防护等方面挑战。此外,随着滇藏、新藏铁路规划和建设,其穿越高温地热带时,高温热害将成为修建过程中面临的主要地质灾害之一。

在处理此类热害问题时,往往以防护为主,忽视了热害的资源属性,如何将热害资源利用起来“变害为宝”值得思考和探索。曾有部分矿区进行了热害资源化利用的尝试,如我国张双楼煤矿开采过程中在 1000 m 深度时遇到了 43.7℃的岩温,使用热泵技术将热害资源利用起来后,工作面温度降低了 7℃,同时每年可节省燃煤 11790 t^[42]。2009 年,德国 Castle Freudenstein 地热项目成功投产,该项目利用当地矿井水的地热能为 Castle Freudenstein 供暖和制冷^[43]。

总体来讲,矿山资源开发和工程建设中常遇到高温“热害”,但针对深部矿井“矿-热共采”和工程建设中“热害资源化”的研究相对不足,造成了地热资源的浪费。因此,需要进一步开展矿山资源开发和工程建设中高温“热害”评估工作,并积极发展热害资源化利用技术,推动“矿-热共采”及

工程建设中的“热害资源化”利用。

4 结论

(1)我国中深层地热资源的开发过程中,传统水热型地热资源利用是基础,EGS 相关技术突破是关键,在水热型地热资源开发基础上的 EGS 将更有成效性。

(2)我国部分地区的地热流体中富集稀有元素,但目前存在地热流体中伴生矿产资源分布特征不清、潜力不明等问题,应加强地热水中稀有元素形成规律和超常富集机理研究,进一步开展深部地热流体中伴生矿产资源的综合开发利用。

(3)矿山资源开发和工程建设中常遇到高温“热害”,需要进一步开展矿山资源开发和工程建设中高温“热害”评估工作,并积极发展热害资源化利用技术,推动“矿-热共采”及工程建设中的“热害资源化”利用。

参 考 文 献

- [1] Lin B Q, Li Z. Towards world's low carbon development: The role of clean energy. *Appl Energy*, 2022, 307: 118160
- [2] Dincer I, Rosen M A. *Exergy Analysis of Heating, Refrigerating and Air Conditioning: Methods and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2015
- [3] Lund J W, Boyd T L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 2016, 60: 66
- [4] Muffler L J P. Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 1993, 15(2): 5462134
- [5] Muffler P, Cataldi R. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 1978, 7(2-4): 53
- [6] Hochstein M P. Classification and assessment of geothermal resources In: *Dickson M H and Fanelli M, ed. Small Geothermal Resources-A Guide to Development and Utilization*. Rome: UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Sources, 1990: 31
- [7] Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. GB/T11615—2010 *Geologic Exploration Standard of Geothermal Resources*. Beijing: Standards Press of China, 2010
(中华人民共和国国土资源部. GB/T11615—2010 地热资源地质勘查规范. 北京: 中国标准出版社, 2010)
- [8] Zhou Y, Deng N D, Wang F, et al. Fractal theory of suitability zoning structure of shallow geothermal energy. *China Geol Surv China*, 2017, 4(1): 18
(周阳, 邓念东, 王凤, 等. 浅层地热能适宜性分区结构的分形原理. 中国地质调查, 2017, 4(1): 18)
- [9] Dor J. The basic characteristics of the Yangbajing geothermal field—A typical high temperature geothermal system. *Eng Sci*, 2003, 5(1): 42

- (多吉. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征. 中国工程科学, 2003, 5(1): 42)
- [10] Zhang S Q, Li X F, Song J, et al. Analysis on geophysical evidence for existence of partial melting layer in crust and regional heat source mechanism for hot dry rock resources of Gonghe Basin. *Earth Sci*, 2021, 46(4): 1416
(张森琦, 李旭峰, 宋健, 等. 共和盆地壳内部分熔融层存在的地球物理证据与干热岩资源区域性热源分析. 地球科学, 2021, 46(4): 1416)
- [11] Dor J, Wang G L, Zheng K Y. *Study on the Development and Utilization Strategy of Geothermal Resources in China*. Beijing: Science Press, 2017
(多吉, 王贵玲, 郑克桢. 中国地热资源开发利用战略研究. 北京: 科学出版社, 2017)
- [12] Brown D. The US hot dry rock program-20 years of experience in reservoir testing // *Proceedings of World Geothermal Congress*. Florence, 1995, 4: 2607
- [13] Hashizume R. Study of hot dry rock geothermal power plant in the kansai area // *Proceedings of World Geothermal Congress*. Florence, 1995, 3: 2685
- [14] Edwards B, Douglas J. Selecting ground-motion models developed for induced seismicity in geothermal areas. *Geophys J Int*, 2013, 195(2): 1314
- [15] Häring M O, Schanz U, Ladner F, et al. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics*, 2008, 37(5): 469
- [16] Li D W, Wang Y X. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy. *Earth Sci*, 2015, 40(11): 1858
(李德威, 王焰新. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题. 地球科学, 2015, 40(11): 1858)
- [17] Luo C X. New trends in global geothermal power generation. *Sino-Global Energy*, 2016, 21(5): 21
(罗承先. 世界地热发电开发新动向. 中外能源, 2016, 21(5): 21)
- [18] Luo C X. Geothermal power generation in Japan today and what can be learned for China. *Sino-Global Energy*, 2015, 20(12): 28
(罗承先. 日本地热发电开发现状及启示. 中外能源, 2015, 20(12): 28)
- [19] Gutierrez-Negrin L C A, Felix I C, Romo-Jones J M, et al. Geothermal energy in Mexico: Update and perspectives // *Proceedings World Geothermal Congress 2020*. Reykjavik, 2020: 1
- [20] Boston. *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2006
- [21] Ma S Y. Li Siguang and China energy // *First Symposium on Earth Science and Culture and the 17th Annual Academic Meeting of the Professional Committee of Chinese Geological History*. Beijing, 2005: 249
(马胜云. 李四光与中国能源//首届地球科学与文化学术研讨会暨中国地质学史专业委员会第17届学术年会. 北京, 2005: 249)
- [22] Xu M J, Luo C H, Li S Z. Geothermal resources and the continuous operation of power station the last decade in fengshun County, Guangdong Province. *Acta Energaie Solaris Sin*, 1995, 16(1): 121
(徐名捷, 罗楚豪, 李颂哲. 广东省丰顺县的地热资源及地热电站. 太阳能学报, 1995, 16(1): 121)
- [23] Dor j, Zeng Y, Jiao X Y, et al. Review and reflection on geothermal power generation in Tibet // *Development and Protection of Geothermal Resources in China-Proceedings of the National Symposium on the Development, Utilization and Protection of Geothermal Resources*. Beijing, 2007: 46
(多吉, 曾毅, 焦兴义, 等. 西藏地热发电的回顾与思考//中国地热资源开发与保护—全国地热资源开发利用与保护考察研讨会论文集. 北京, 2007: 46)
- [24] Zhao X, Yang Y, Liu Y H, et al. Development trend and outlook of geothermal industry in the world. *World Petroleum Ind*, 2020, 27(1): 53
(赵旭, 杨艳, 刘雨虹, 等. 全球地热产业现状与技术发展趋势. 世界石油工业, 2020, 27(1): 53)
- [25] Li C H. Types and development prospects of geothermal resources. *Manage Strategy Qinghai Land Resour*, 2014(4): 48
(李长辉. 地热资源类型及发展前景. 青海国土经略, 2014(4): 48)
- [26] Mao H J, Ma H W. Discussion on the technology of enhanced geothermal generation and its application prospect in Guangdong province. *Energy Eng*, 2010(5): 25
(毛宏举, 马洪伟. 增强型地热发电技术及广东省应用前景分析. 能源工程, 2010(5): 25)
- [27] Xu T F, Zhang W. Enhanced Geothermal Systems: International developments and China's prospects. *Pet Sci Bull*, 2016, 1(1): 38
(许天福, 张炜. 增强型地热工程国际发展和我国前景展望. 石油科学通报, 2016, 1(1): 38)
- [28] Lin W J, Wang G L, Shao J L, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: Progress and inspiration. *Acta Geol Sin*, 2021, 95(5): 1366
(蒯文静, 王贵玲, 邵景力, 等. 我国干热岩资源分布及勘探: 进展与启示. 地质学报, 2021, 95(5): 1366)
- [29] Zheng M P, Wang Q X, dor J. *A New Type of Hydrothermal Deposit—Cesium-Baring Geyserite in Tibet*. Beijing: Geological Publishing House, 1995
(郑绵平, 王秋霞, 多吉. 水热成矿新类型—西藏铯硅华矿床. 北京: 地质出版社, 1995)
- [30] Zheng M P, Zheng Y, Liu J. The new discoveries of saline lacks and geothermal ore deposits on the Qinghai-Tibet Plateau. *J Chin Acad Geol Sci*, 1990(1): 151
(郑绵平, 郑元, 刘杰. 青藏高原盐湖及地热矿床的新发现. 中国地质科学院院报, 1990(1): 151)
- [31] Luo Y B, Zheng M P, Ren Y Q. Metallogenic correlation of special salt lake and hydrotherm, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Sci Technol Rev*, 2017, 35(12): 44
(雒洋冰, 郑绵平, 任雅琼. 青藏高原特种盐湖与深部火山-地热水的相关性. 科技导报, 2017, 35(12): 44)
- [32] Dor J, Wen C Q, Liu J L, et al. Discovery of the Mayum placer

- gold deposit, Burang County, Tibet, and its significance. *Reg Geo China*, 2003, 22(Suppl 1): 896
(多吉, 温春齐, 刘建林, 等. 西藏普兰县马攸木砂金矿床的发现及其意义. 地质通报, 2003, 22(增刊1): 896)
- [33] Guo J C, Dor J, Wen C Q, et al. Mineralization background and stages of the Mayum gold deposit, Xizang. *Sediment Geol Tethyan Geol*, 2006, 26(1): 60
(郭建慈, 多吉, 温春齐, 等. 西藏马攸木金矿成矿背景与成矿阶段. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(1): 60)
- [34] Munk L A, Hynek S A, Bradley D C, et al. Lithium brines: A global perspective. *Rev Econ Geol*, 2016, 18: 339
- [35] Wang Q S, Yuan C H, Xu H. Analysis of the global lithium resource distribution and potential. *China Min Mag*, 2015, 24(2): 10
(王秋舒, 元春华, 许虹. 全球锂矿资源分布与潜力分析. 中国矿业, 2015, 24(2): 10)
- [36] Bradley D, Munk L A, Jochens H, et al. *A Preliminary Deposit Model for Lithium Brines*. Virginia: U. S. Geological Survey, 2013
- [37] Cetiner Z S, Doğan Ö, Özdilek G, et al. Toward utilising geothermal waters for cleaner and sustainable production: Potential of Li recovery from geothermal brines in Turkey. *Int J Glob Warming*, 2015, 7(4): 439
- [38] Dor J, Li M L, Deng T L, et al. *Investigation, Evaluation and Extraction of Lithium Resources in Key Lithium Bearing Geothermal Activity Areas in Tibet*. Lhasa: Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2021
(多吉, 李明礼, 邓天龙, 等. 西藏重点含锂地热活动区锂资源调查评估与提取试验研究. 拉萨: 西藏地质矿产勘查开发局, 2021)
- [39] Li Z Q, Hou Z Q, Nie F J, et al. Enrichment of element cesium during modern geothermal action in Tibet. *China Acta Geol Sin*, 2006, 80(9): 1457
(李振清, 侯增谦, 聂凤军, 等. 西藏地热活动中铯的富集过程探讨. 地质学报, 2006, 80(9): 1457)
- [40] Stringfellow W T, Dobson P F. Technology for the recovery of lithium from geothermal brines. *Energies*, 2021, 14(20): 6805
- [41] Tong W, Liao Z J, Liu S B, et al. *Hot Springs in Tibet*. Beijing, Science Press, 1999
(佟伟, 廖志杰, 刘时斌, 等. 西藏温泉志. 北京: 科学出版社, 1999)
- [42] Guo P Y, Qin F. Preventive measures against heat hazard and its utilization in Zhangshuanglou Coal Mine. *J China Coal Soc*, 2013, 38(Suppl 2): 393
(郭平业, 秦飞. 张双楼煤矿深井热害控制及其资源化利用技术应用. 煤炭学报, 2013, 38(增刊2): 393)
- [43] Kranz K, Dillenaar J. Mine water utilization for geothermal purposes in freiberg, Germany: Determination of hydrogeological and thermophysical rock parameters. *Mine Water Environ*, 2010, 29(1): 68