全球干热岩勘探开发研究态势分析*

赵婉雨，贾苹

（中国科学院文献情报中心， 北京 100190）

摘要：干热岩勘探开发研究对推动全球能源结构转型、实现清洁能源可持续利用以及助力碳中和目标具有重要意义。为全面宏观地了解干热岩勘探开发领域最新研究进展和技术发展态势，对干热岩领域相关论文和专利进行了计量分析和主题挖掘，分析了发文趋势、专利申请趋势、主要国家与机构分布、研究主题及研究热点等。分析表明，全球范围内干热岩领域研究处于快速发展时期，中国在基础研究和技术研发方面已占据主导地位，但研究质量和国际化进程仍有提升空间；研究热点集中在地热能提取与利用、干热岩成因机制与资源勘探、储层力学特性与热储建造、储层监测与评价、地震预测与控制等5个方面，其中高温环境与应力耦合作用机制、低温压裂技术、核磁共振技术的应用等是近年来的重要研究领域。尽管干热岩的开发利用正逐步进入工程示范阶段，但商业化开发仍面临技术瓶颈、环境风险和经济性不足等挑战，未来应进一步加强地球物理勘探技术的研发和应用，提升热储改造技术，优化水力压裂和钻井工艺，深入探索裂缝网络的动态演化、热储层的长期稳定性，优化热储层的热能提取过程，提高热提取和换热效率；同时持续深化基础研究与应用技术的协同发展，突破技术瓶颈，降低开发成本，推动干热岩资源的可持续开发利用。

关键词：干热岩；增强型地热系统；勘探开发；文献计量；主题聚类

中图分类号：TD15；P314 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)09-0287-16

Analysis of Global Trends in Exploration and Development of Dry Hot Rocks

ZHAO Wanyu, *JIA Ping*

(National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Research on the exploration and development of hot dry rock is significant for promoting the global energy transition, achieving sustainable utilization of clean energy, and supporting carbon neutrality goals. To comprehensively and macroscopically understand the latest research progress and technological trends in the field of hot dry rock exploration and development, a bibliometric analysis and thematic exploration of relevant papers and patents were conducted. The trend of publication, the trend of patent application, the distribution of major countries and institutions, research topics and research hotspots were analyzed. The results indicate that the global research in the field of hot dry rock is in a period of rapid development, and China has occupied a dominant position in basic research and technology research and development, but there is still room for improvement in research quality and internationalization process. The research hotspots focus on five key areas, including geothermal energy extraction and utilization, genesis and resource exploration of hot dry rock, reservoir mechanical properties and heat storage construction, reservoir monitoring and evaluation, and seismic prediction and control. Among them, the coupling mechanism of high temperature environment and stress, low temperature fracturing technology and the application of nuclear magnetic resonance technology are important research fields in recent years. Although the development and utilization of hot dry rock is gradually entering the engineering demonstration stage, the commercialization still faces challenges such as technical bottlenecks, environmental risks, and insufficient economic viability. Future efforts should focus on advancing geophysical exploration technologies, enhancing heat reservoir modification techniques, optimizing hydraulic fracturing and drilling processes, investigating the dynamic evolution of fracture networks and long-term stability of heat reservoirs, and improving heat extraction and heat exchange efficiency. Additionally, strengthening the integration of fundamental research and applied technologies is critical to overcome technical challenges, reduce development costs, and

* **收稿日期**：2025-03-06

基金项目：中国科学院文献情报能力建设专项(E4290440)

作者简介：赵婉雨(1989—)，女，陕西西安人，硕士，馆员，主要从事地球环境领域学科情报分析工作。E-mail：zhaowy@mail.las.ac.cn

通信作者：贾苹(1964—)，女，北京人，研究馆员，主要从事区域产业情报研究工作。E-mail：jiap@mail.las.ac.cn

promote the sustainable utilization of hot dry rock resources.

Key words: Hot dry rock, Enhanced geothermal system, Exploration and development, Bibliometric analysis, Topic clustering

0 引言

地热能作为一种清洁的可再生能源,具有稳定可靠、清洁环保、分布广等特点,其开发利用受到各国政府和学界的重视。地热资源可分为水热型和干热岩型,其中干热岩型地热储量远高于水热型地热储量[1]。干热岩是指埋藏于距地表以下 3～10 km,不含或含微量流体,温度高于 180 ℃的岩体,因其具有热能潜力巨大、地理分布广泛、绿色无污染等特性,是未来地热能源开发利用的重点[2-4]。据统计,全球可开采利用的干热岩资源量是地球上所有石化资源总量的 30 倍[5]。我国自 2012 年以来,先后在青海、西藏、四川、福建、广东、山东、海南、黑龙江等重点高热流区域开展干热岩资源勘探[6],确定了一批干热岩有利靶区。根据中国地质科学研究院对我国大陆地区 3～10 km 的干热岩储量估算,其资源基数为 2.5×10^{25} J,相当于 8.56×10^{6} 万 t 标准煤,按照 2%的可采资源量计算[7],相当于 2023 年我国能源消耗总量的 2 990 倍。

增强型地热系统(Enhanced Geothermal System,EGS)是开发干热岩地热的关键技术,通过水力压裂等工程手段在干热岩体中形成高渗透性的人工地热储层,并采出大量热能加以利用[1]。自 20 世纪 70 年代以来,美国、英国、德国、法国、澳大利亚、日本、中国等国家均开展了 EGS 研究,并建立了一批研究试验基地。全球多个国家和地区先后发布了地热能开发的相关政策,并启动 EGS 项目资助,如美国的地热能研究前沿瞭望台计划(FORGE)和增强型地热系统联合实验室(EGS Collab)项目,其目标是攻克干热岩资源开发过程中遇到的钻探、压裂和持续开采等技术难题[8];欧洲的深层地热技术与创新平台(ETIP Geothermal)项目[9]旨在提高深层地热资源的开发效率,降低成本并拓展资源开发的深度,同时在欧洲"地平线"计划框架下,持续为多个地热能专项提供资金支持;我国 2016 年发布的《地热能开发利用"十三五"规划》明确了干热岩资源调查与勘探的目标和关键技术研发方向,2022 年出台的《"十四五"可再生能源发展规划》进一步支持干热岩开发技术与高温地热发电技术的研究与应用。美国和欧洲更强调以技术突破为核心,注重干热岩商业化开发和产业化应用,而我国则更加聚焦资源勘探和关键技术研发,这反映了中美欧在干热岩开发阶段和技术需求上的不同(见表 1)。我国近年来围绕干热岩资源调查与勘探、开采机理、能量获取及利用等关键问题布局了多个项目,有望在干热岩地热资源的高效开发利用领域实现新的技术突破。

表 1 中美欧干热岩开发政策与技术研发举措对比

Table 1 Comparison of policies and technology research and development initiatives for the development of hot dry rock in China, the United States and Europe

	美国	欧洲	中国
重要政策支持	美国能源部启动 FORGE 计划和 EGS Collab 项目	欧洲深层地热技术与创新平台项目	地热能开发利用"十三五"规划和"十四五"可再生能源发展规划
主要研发目标	解决钻探、压裂、监测技术难点,形成可降低工业开发风险和促进干热岩产业化开发的严谨、可复制的方法。	降低深部地热发电成本,推动其商业应用,实现 2050 年深层地热能覆盖欧洲 50%的电力需求和 80%的供热需求的愿景。	推进干热岩资源勘查与选区评价,突破热储改造与高效取热技术,实现试验性发电先进技术示范。
资金投入	FORGE 等计划累计投入超 5 亿美元,持续滚动支持。	欧洲"地平线"计划,2020—2030 年总预算超 18 亿欧元。	中央财政与地方配套资金,重点支持示范项目。
技术研发重点	储层刺激改造,裂缝网络优化,高温硬岩钻井,微震监测,诱发地震风险控制。	地热资源预测与评估,资源获取与开发,热电联产与系统集成,地热能技术开发政策研究,数据共享平台建设。	地热资源评价技术,高效换热技术,中高温热泵技术,高温钻井工艺技术,干热岩发电试验项目可行性论证。
主要科研力量	桑迪亚、爱达荷、劳伦斯伯克利等 9 家国家实验室;犹他大学、加州大学等多个高校。	德国亥姆霍兹联合会,法国国家科学研究中心,苏黎世联邦理工学院,冰岛地质调查局等科研机构。	中国科学院,中国地质调查局,吉林大学,中国石油大学(北京),中石化集团,中石油集团等。
国际合作	美欧等国联合开展多项地热研发项目与工程	法德英三国共同实施苏尔茨 EGS 工程	国内产学研合作为主
关键成果	芬顿山项目首次证实干热岩发电可行性;犹他州干热岩开发示范项目循环换热测试达产业化规模。	苏尔茨 EGS 项目成为兆瓦级发电工程;法国冰岛 IDDP-2 井实现超临界地热流体开采。	初步建成青海共和干热岩勘查试采示范基地,实现试验性发电与并网。

为科学客观地把握干热岩领域的发展脉络，并从多维度剖析该领域的研究态势，本文以文献计量学方法为核心，重点分析学术论文的年度发文量变化、重点发文国家与机构分布、研究主题演进与热点趋势，系统揭示干热岩基础研究的全球格局与动态。在此基础上，结合专利技术分析作为补充视角，进一步探讨该领域的应用技术发展现状与创新方向，以期对我国干热岩地热勘探开发的未来研究提供参考和借鉴。

1　数据来源与分析方法

本文分析的论文数据来源于科睿唯安下的 Web of Science 平台核心合集 SCIE 数据库(SCI-Expanded)。对干热岩和增强型地热系统的不同表达进行梳理，并利用相关关键词设计检索策略为(“hot dry rock＊” or “heat dry rock＊” or “dry heat rock＊” or “dry hot rock＊” or “dry and hot rock＊” or “hot and dry rock＊” or “enhanced geothermal system＊” or “dry rock geothermal system＊” or “dry heat geothermal rock＊” or “HDR Resource＊” or “Deep Geothermal stimulation” or “FORGE EGS Site” or “Geothermal Energy FORGE” or “HDR Site” or “EGS Site” or “hot fractured rock＊” or hot-dry-rock＊ or (HDR and geothermal))。文献类型限制为“研究论文”和“综述论文”，检索截止时间为 2024 年 12 月，共筛选干热岩相关的研究性论文 2 194 篇。同时，利用中国知网数据库(CNKI)补充检索中文核心期刊论文，共筛选符合要求的中文文献 433 篇。

专利数据来源于 incoPat 数据库，将中文“干热岩”和“增强型地热”及其英文表达纳入检索策略，不限制检索起始日期，截止日期为 2024 年，专利类型筛选“发明申请”与“发明授权”，共检索到 1 319 件专利。

以检索论文和专利为数据样本，利用 Web of Science 平台和 incoPat 数据库自带分析工具、Derwent Data Analyzer (DDA)、Excel 2019、VOSviewer 和 CiteSpace 等软件，对检索到的数据结果从发文趋势、专利申请趋势、期刊、国家、机构、主题关键词、技术类别等维度进行分类清洗、共现、聚类等相关分析，并绘制相关知识图谱，以了解干热岩研究热点和技术发展趋势。

2　基于论文的干热岩基础研究态势分析

2.1　发文量年度变化分析

研究论文的发文量可以在一定程度中反映某个领域的科研热度和发展情况。从图 1 可以看到，干热岩领域的研究大致可以分为三个阶段。第一阶段是萌芽期(1975—2011 年)，最早的干热岩基础研究可追溯到 20 世纪 70 年代，加州大学伯克利分校、法国地质调查局和京都大学共同合作发表题为“Theory of Heat Extraction from Fractured Hot Dry Rock”的研究性论文，探讨了干热岩裂隙取热的理论[10]；随后很长的时间内，美国、日本、法国、澳大利亚、英国、德国等发达国家尝试开展干热岩发电试验项目，由于干热岩勘探开采以及取热发电难度较大，该领域的研究进展较为缓慢。第二阶段是发展期(2012—2017 年)，随着全球能源结构变革，地热发电在全球能源供应中扮演着越来越重要的角色。这一时期中国也开始进行干热岩领域的研究，2012 年，国家“863”计划“干热岩热能开发与综合利用关键技术研究”立项，正式拉开我国干热岩专项研究的序幕。第三阶段是快速增长期(2018—2024 年)，这一阶段的发文占比达 67.61%，说明国际上干热岩领域的研究已经被较多的科研人员关注。从中国的发文量占比变化可以看到，随着“碳达峰、碳中和”目标的提出，2020 年以来发表的文献数量已占当年全球该领域文献数量的 60%以上。全球和中国在干热岩研究领域的年度发文量变化如图 1 所示。

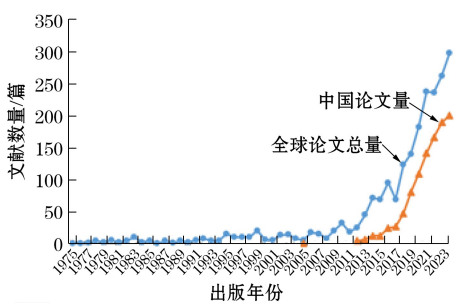


图 1　干热岩领域研究年度发文量的变化

Fig.1　The changes of annual publications for the research on hot dry rocks

2.2　主要发文期刊分析

全球刊发干热岩领域相关论文的期刊超过 331 种，约 44.23%的论文发表在发文量排名前四十的期刊上(见表 2)，其中发文量最多的期刊为

Geothermics,截至检索日期共有 336 篇相关论文发表,远超其他期刊,*Renewable Energy* 和 *Energy* 分别以 85 篇和 70 篇的发文量位列第二和第三。从期刊的论文研究方向来看,以地热学、能源、岩石力学、地球物理等方向的期刊为主,研究领域较为集中。从期刊水平来看,有 8 种期刊位于 Q1 区,其中 *Renewable Energy* 和 *Energy* 的影响因子最高,均为 9。

表 2 发文量排名前十位的期刊分布

Table 2 Distribution of top 10 journals

序号	期刊名称	发文量/篇	影响因子(2023 年)	JCR 分区
1	*Geothermics*	336	3.5	Q1
2	*Renewable Energy*	117	9.0	Q1
3	*Energy*	108	9.0	Q1
4	*Applied Thermal Engineering*	93	6.1	Q1
5	*Energies*	79	3.0	Q3
6	*Rock Mechanics and Rock Engineering*	59	5.5	Q1
7	*Journal of Geophysical Research Solid Earth*	55	3.9	Q1
8	*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*	51	7.0	Q1
9	*Geophysical Journal International*	40	2.8	Q2
10	*Geomechanics and Geophysics for Geo Energy and Geo Resources*	36	3.9	Q1

2.3 学科类别分析

图 2 展示了基于 Web of Science 类别的全球干热岩领域相关论文的研究方向。从图 2 可以看出,能源燃料(1 082 篇)和地球科学(772 篇)是最主要的两个学科领域,二者的发文量占比均超过 35%,其次为热力学(295 篇)、地球化学与地球物理(292 篇)、工程地质(240 篇)、力学(220 篇)、绿色可持续技术(185 篇)、工程机械(143 篇)、环境科学(118 篇)和工程化学(100 篇)等。部分文章所属不同学科类别,但是总体来说,有关干热岩领域的研究多集中在地球科学、石油工程、地质学、矿业科学等学科领域,并呈现一定的学科交叉融合态势。

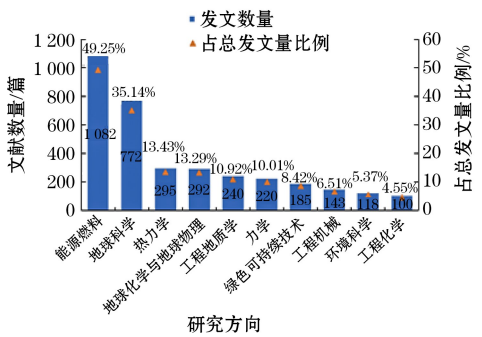


图 2 干热岩研究的重点学科分布

Fig.2 Distribution of key disciplines in hot dry rock research

2.4 重点发文国家与机构分析

目前全球共有 74 个国家和地区在干热岩领域展开研究,表 2 展示了发文数量最多的前十个国家,这些国家同时也是在干热岩和 EGS 项目开发较多的国家。中国是在干热岩领域的研究工作虽然起步较晚,但是近年来的发展势头强劲,尤其是 2020 年以来,年发文量超过 100 篇,近三年发文量占54.35%。美国以 479 篇论文位列第二,同时也是最早开展干热岩领域研究的国家。1973 年,美国政府开始资助关于干热岩开发的 EGS 试验研究[2],1974 年洛斯·阿拉莫斯国家实验室在新墨西哥州的芬顿山钻成全球第一口干热岩井[11],1977 年完成了全球第一个干热岩热储且安全运行,验证了采热提取能源的技术可行性。此外,德国、法国、瑞士、澳大利亚、日本和英国等国家发文量超过 100 篇,位列第二梯队,这些国家也先后进行了干热岩地热发电试验研究。从干热岩领域主要发文国家的合作研究情况来看,这些国家的合作关系较为密切,中国多与美国、澳大利亚和德国开展合作研究,但总体来看,合作发文的占比较低。

h 指数(h-index)是一个混合量化指标,指某国家/机构/作者等至多有 h 篇论文被引用了至少 h 次,篇均被引频次代表每篇论文的被引次数,这两个指标可用于评估国家、机构、研究人员等的学术产出数量与学术产出水平。中国在干热岩领域的 h 指数位列第一,但篇均被引频次排名最低,说明中国在该领域的研究具有一定的影响力,但是整体研究质量还有待提升。美国在该领域的 h 指数位列第二,篇均被引频次表现较为优异,研究成果总体影响力较高。此外,瑞士和英国在该领域的研究论文水平较高。发文量排名前十位的国家分布见表 3。

表 3 发文量排名前十位的国家

Table 3 Top 10 countries in terms of published papers

排名	国家	发文量/篇	篇均被引频次/次	h 指数	近三年发文占比/%	主要合作国家/篇
1	中国	1 034	19.79	69	54.35	美国(74) 澳大利亚(51) 德国(27)
2	美国	479	32.93	63	25.47	中国(74) 瑞士(30) 德国(28)
3	德国	218	35.50	48	21.56	瑞士(40) 美国(28) 中国(27)
4	法国	156	35.65	44	16.03	德国(22) 瑞士(19) 中国(18)
5	瑞士	133	48.71	44	18.05	德国(40) 美国(30) 法国(19)
6	澳大利亚	125	36.42	38	19.20	中国(51) 美国(16) 法国(8)
7	日本	109	27.40	28	21.10	美国(18) 英国(14) 法国(13)
8	英国	100	46.89	34	18.00	德国(19) 中国(16) 美国(16)
9	加拿大	67	22.28	22	35.82	中国(13) 德国(12) 美国(10)
10	韩国	63	38.46	24	25.40	美国(16) 中国(13) 德国(8)

对发文量排名前 20 位的机构进行了分析,见表 4。从发文量来看,排在第一位的是中国科学院,共发表 143 篇论文,主要发文研究单位包括中国科学院武汉岩土力学研究所、中国科学院广州能源研究所、中国科学院地质与地球物理研究所等;排在第二位的是中国石油大学(北京),共发表 106 篇论文;亥姆霍兹联合会和吉林大学均以 103 篇论文位列第三。

从机构类型来看,发文机构以高校为主,有 16 所学校;科研院所有 6 家,包括中国科学院、亥姆霍兹联合会、法国国家科学研究中心、洛斯·阿拉莫斯国家实验室、劳伦斯伯克利国家实验室和中国地质科学院;政府机构有 2 家,均为地球科学领域的管理部门,包括法国地质矿产调查局和中国地质调查局;此外,还有 2 家为石油公司,分别是中国石油天然气集团有限公司和中国石油化工股份有限公司。

从机构所属国家来看,发文量排名前 20 位的 26 家机构中,中国的机构有 14 家,除中国科学院、中国石油大学(北京)和吉林大学外,中国矿业大学、中国地质调查局、中南大学、中国石油大学(华东)、天津大学等机构在该领域的研究投入较多。此外,美国和法国分别有 5 家和 3 家机构上榜,德国、瑞士、日本和韩国均各有 1 家机构位列前 20 位中。具体的机构及其所属国家见表 4。

洛斯·阿拉莫斯国家实验室、苏黎世联邦理工学院、法国地质矿产调查局等均在 20 世纪 70 年代就开展了干热岩开发的相关研究,中国的机构进入该领域的时间较晚。各大机构近年来对干热岩的研究热度不减,中国石油天然气集团有限公司、中南大学、四川大学等机构的近三年发文占比超过 70%,说明深层地热研究仍是地热开发利用的重点。

从各机构的论文影响力来看,苏黎世联邦理工学院、亥姆霍兹联合会的论文 h 指数和篇均被引频次均在该领域表现出较高的影响力;中国科学院、中国石油大学(北京)的论文 h 指数排名分别位列第二和第三,但篇均被引频次相对靠后,说明研究成果的整体影响力还有待提升。

表 4 发文量前 20 位的机构分布

Table 4 Distribution of the top 20 research institutions in terms of published papers

排名	机构名称	发文量/篇	所属国家	篇均被引频次/次	h 指数	近三年发文占比/%
1	中国科学院	143	中国	24.81	31	40.56
2	中国石油大学(北京)	106	中国	29.20	30	48.11
3	亥姆霍兹联合会	103	德国	42.19	38	20.39
3	吉林大学	103	中国	16.70	23	50.49
4	苏黎世联邦理工学院	99	瑞士	50.57	38	17.17
5	中国矿业大学	91	中国	15.20	20	62.64
6	中国地质调查局	77	中国	19.68	20	46.75
7	法国国家科学研究中心	71	法国	32.27	28	23.94
8	洛斯·阿拉莫斯国家实验室	66	美国	23.82	23	16.67
9	中南大学	64	中国	13.45	16	70.31
10	劳伦斯伯克利国家实验室	59	美国	63.95	29	18.64
11	Tohoku University	56	日本	31.07	19	17.86

续表

排名	机构名称	发文量/篇	所属国家	篇均被引频次/次	h 指数	近三年发文占比/%
12	中国石油大学(华东)	50	中国	31.14	18	36.00
13	天津大学	47	中国	30.11	18	36.17
14	斯特拉斯堡大学	43	法国	36.93	24	6.98
15	法国地质调查局	40	法国	46.20	20	10.00
15	中国地质科学院	40	中国	11.28	13	55.00
15	斯坦福大学	40	美国	38.23	18	42.50
15	犹他大学	40	美国	21.58	15	30.00
16	宾夕法尼亚州立大学	38	美国	24.84	16	50.00
17	四川大学	37	中国	18.08	14	70.27
17	西南石油大学	37	中国	21.22	10	59.46
17	中国地质大学(武汉)	37	中国	13.92	14	64.86
18	中国石油天然气集团有限公司	36	中国	8.83	8	77.78
19	中国石油化工股份有限公司	35	中国	33.80	17	45.71
20	首尔国立大学	34	韩国	45.15	18	20.59

2.5 研究主题分析

2.5.1 ESI 高被引论文分析

ESI 高被引论文可以在一定程度上反映近年来的研究热点和趋势。截至 2024 年 7—8 月,干热岩领域 ESI 高被引论文共有 36 篇。被引频次排名前 15 的研究型 ESI 论文的分析见表 5,研究内容主要包括地热开采时的地震诱发及地震控制研究,地热系统热提取性能的数值模拟,增强型地热系统刺激作用机理研究,岩石裂缝网络渗透率模型研究,加热和水冷处理后花岗岩物理和机械特性,水力压裂在增强型地热系统中的应用等。被引频次居于前三名的论文分别发表在 *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 和 *Science* 上,引用次数均超过了 300 次(截至 2024 年 12 月 13 日),分别为 475 次、349 次和 327 次,并且三篇文章均围绕地热开采的地震诱发展开研究。排名第一的论文是美国地质调查局对深层注入流体诱发地震的研究[12],排名第二和第三的论文均围绕 2017 年韩国浦项地震开展研究,并讨论了地震诱发与韩国 EGS 发电站的可能性[13-14]。

表 5 被引频次排名前 15 位的 ESI 研究论文

Table 5 Top 15 ESI research papers in terms of citation frequency

排名	题名	发表年份	发文期刊	被引频次/次	第一作者机构
1	Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection	2014	*Journal of Geophysical Research-Solid Earth*	475	美国地质调查局
2	The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea	2018	*Science*	349	苏黎世联邦理工学院
3	Assessing whether the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event	2018	*Science*	327	釜山大学
4	Numerical simulation of the heat extraction in EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model	2017	*Energy*	284	中国石油大学(华东)
5	Numerical simulation of heat extraction performance in enhanced geothermal system with multilateral wells	2018	*Applied Energy*	280	中国石油大学(北京)
6	An investigation of stimulation mechanisms in Enhanced Geothermal Systems	2014	*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*	262	得克萨斯大学奥斯汀分校
7	A fractal analysis of permeability for fractured rocks	2015	*International Journal of Heat and Mass Transfer*	250	华中科技大学
8	Hydraulic fracturing under high temperature and pressure conditions with micro CT applications: Geothermal energy from hot dry rocks	2018	*Fuel*	224	蒙纳士大学
9	Laboratory investigation on physical and mechanical properties of granite after heating and water-cooling treatment	2018	*Rock Mechanics and Rock Engineering*	200	中国科学院武汉岩土所
10	Triggering of the Pohang, Korea, Earthquake (Mw 5.5) by enhanced geothermal system stimulation	2019	*Seismological Research Letters*	196	斯坦福大学

续表

排名	题名	发表年份	发文期刊	被引频次/次	第一作者机构
11	Numerical simulation of the heat extraction in 3D-EGS with thermal hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model	2018	*Geothermics*	184	中国石油大学(华东)
12	Controlling fluid-induced seismicity during a 6.1-km-deep geothermal stimulation in Finland	2019	*Science Advances*	153	德国亥姆霍兹地球科学研究中心
13	Experimental study on damage and fracture characteristics of beishan granite subjected to high-temperature treatment with DIC and AE techniques	2021	*Rock Mechanics and Rock Engineering*	124	中国科学院武汉岩土所
14	Effect of water-cooling shock on fracture initiation and morphology of high-temperature granite: Application of hydraulic fracturing to enhanced geothermal systems	2023	*Applied Energy*	95	西安理工大学
15	A FDEM-based 2D coupled thermal-hydro-mechanical model for multiphysical simulation of rock fracturing	2022	*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*	84	中国地质大学(武汉)

2.5.2 研究主题聚类分析

关键词是研究者用来表述文献研究内容的重要词汇,也是文献研究内容特征的高度概括和总结,对文献关键词进行统计和分析可以较为快速且有效地了解某研究领域的热点及其变化趋势。

选取 SCI 论文集中词频大于 5 次的关键词,并进行清洗合并,共计得到关键词 215 个。利用 VOSviewer 对干热岩领域的文献进行关键词聚类,每个节点代表一个关键词,节点大小代表关键词出现的频次高低。如图 3 所示(颜色标识见电子版,下同),干热岩的主要研究方向主要聚焦在 5 个方面:地热能提取与利用(红色区域)、干热岩成因机制与资源勘探(紫色区域)、储层力学特性与热储建造(绿色区域)、储层监测与评价(蓝色区域)和地震预测与控制(黄色区域)。

对 CNKI 论文集进行关键词共现聚类,选取词频大于 3 次的关键词,并进行清洗合并,共计得到关键词 80 个,如图 4 所示。由图 4 可以看出,国内期刊论文的发文主题重点围绕干热岩资源成因机制(红色区域)、储层力学特性(黄色和紫色区域)、储层改造(绿色区域)以及干热岩开发利用(蓝色区域)等 4 个方面,与国际上的研究主题基本一致。

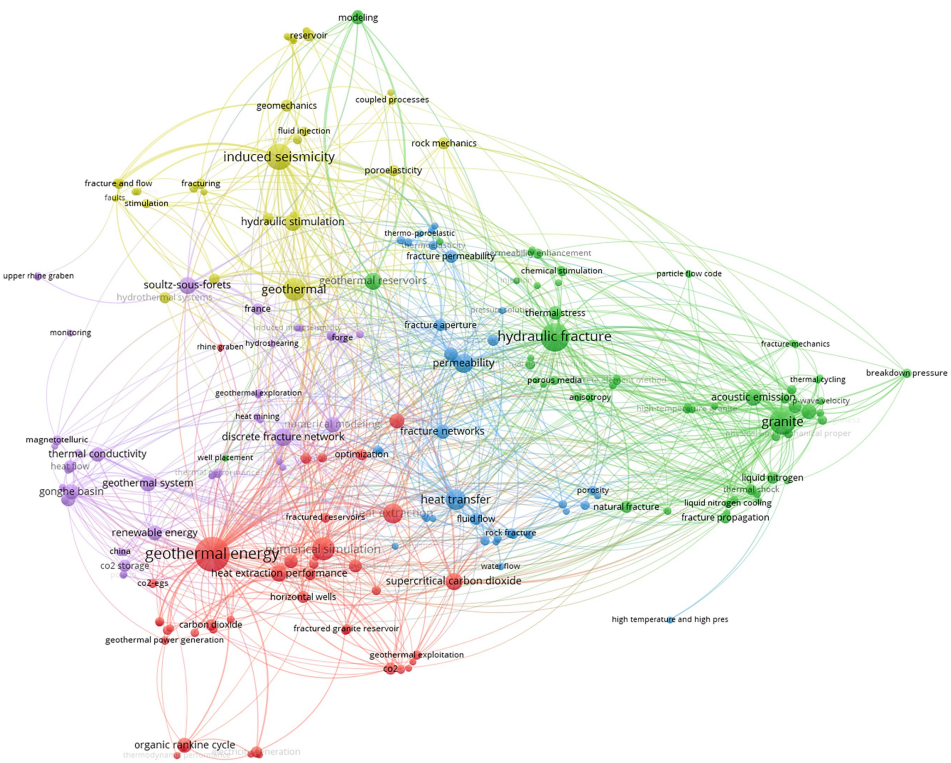


图 3 基于 SCI 论文的关键词共现聚类图谱

Fig.3 Key words co-occurrence cluster map based on SCI papers

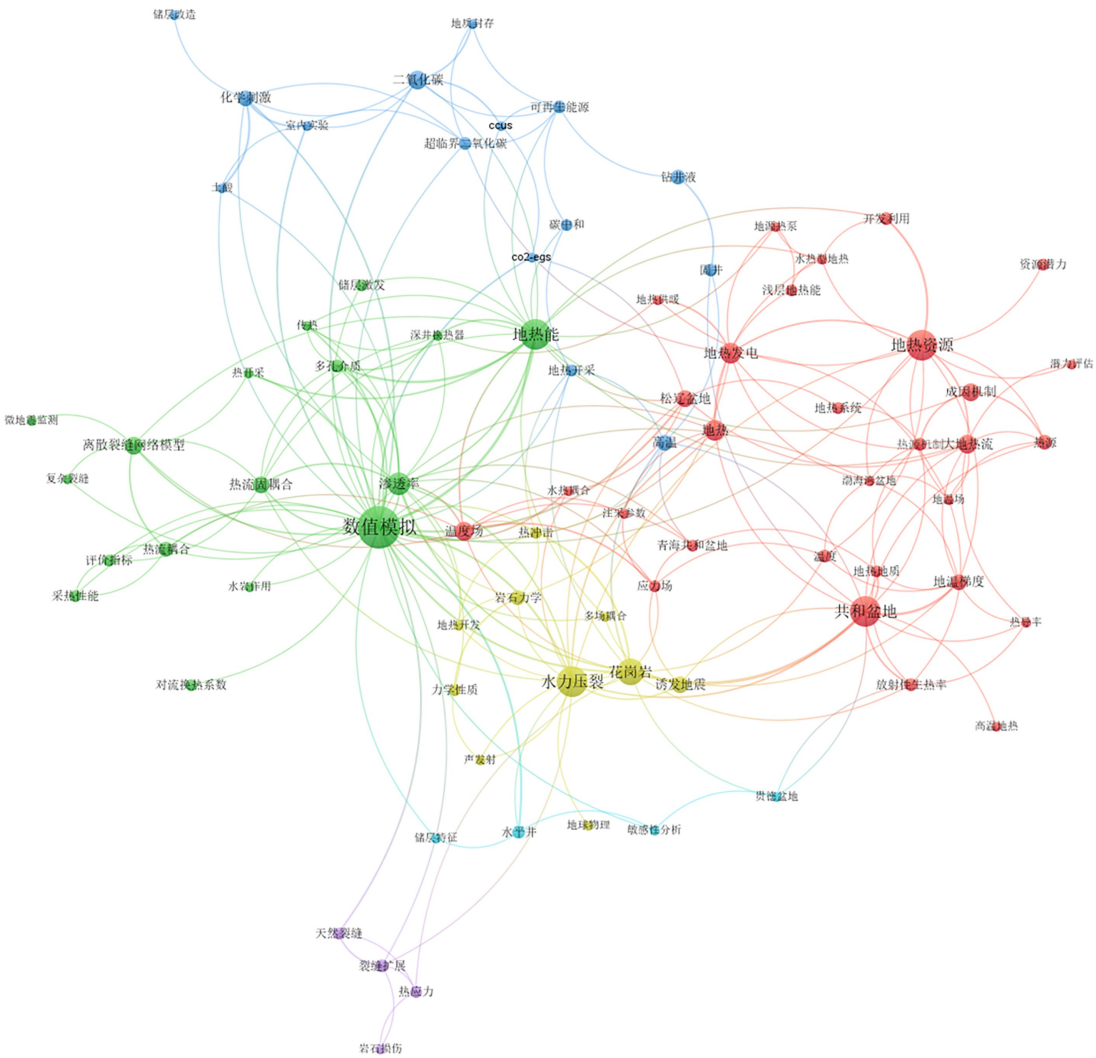


图 4 基于 CNKI 文献的研究主题聚类图谱

Fig.4 Key words co-occurrence cluster map based on CNKI papers

地热能提取与利用方向的高频共现关键词包括超临界二氧化碳、数值模拟、热提取性能、有机朗肯循环(ORC)、热流固耦合(THM)等。通过人工手段构建地热储层,EGS 可以有效地提取地下储存的热量,同时 ORC 系统可以利用 EGS 提取的热量发电[15]。研究热点主要包括探索使用超临界二氧化碳作为干热岩地热系统中的工作流体,以提高热提取效率[16];利用数值模拟技术分析干热岩热提取效率和发电性能,如通过热流固耦合建立干热岩裂隙的数值模拟研究等[17];生命周期评估(LCA)可以全面评估干热岩发电项目在其整个生命周期中的环境影响[18-19]。

干热岩成因机制与资源勘探方向的高频共现关键词包括数值建模、共和盆地、热传导、二氧化碳储存、磁辐射、大地热流、成因机制、地温梯度等。成因机制研究是干热岩地热资源高效勘探开发利用的基础[20]。张保健等[21]揭示了青海共和盆地干热岩成因源于印度-欧亚板块碰撞引发深部动力作用,导致软流圈热物质沿岩石圈薄弱带上涌迁移,壳幔热流在浅部受地下水活动、岩性差异及热导率影响形成不均一聚集,并阐明了其热源传递与赋存规律;熊波等[22]揭示了内蒙古中部干热岩热源为深部熔融体及残余岩浆囊,储层以新生代基性侵入岩为主,盖层为白垩系等沉积层,并且浅部高温水热系统与深部干热岩同源共生。干热岩资源勘探常用的技术方法包括遥感技术、地震勘查技术、电磁法勘查技术、重力勘查技术、地球化学勘探技术等[23]。TAN H 等[24]利用广域电磁法(WFEM)对青海共和盆地的干热岩进行勘探,根据 WFEM 结果推断出了干热岩的位置,并通过钻井进行了验证,同时提供了温度

与反演电阻率之间的关系，确定了具有采矿潜力的勘探区域；DAI W M 等[25]利用电磁数据三位反演算法描述了深部干热岩的空间分布范围，为该地区地热资源的持续勘探提供了方向；ZHAO J W 等[26]结合三维磁场成像和瑞雷波与相速度反演等研究成果，利用三维重力聚焦反演方法，基于卫星重力数据，获得了高分辨率的共和盆地地下空间密度分布模型，首次从重力角度证实了部分熔融层的存在，该高温熔融层可能是共和盆地干热岩地热资源的主要热源。

储层力学特性与热储建造方向的高频共现关键词包括水力压裂、地热储层、声发射、热应力、钻井、钻井液、固井、裂缝扩展等。水力压裂是最常用的干热岩热储层激发方法之一，该方法通过高压注入流体来增强岩石中原有裂缝，形成与井筒相连通的裂缝网络，增加地热储层的渗透性，提高地热能的提取效率。另一方面，学者们利用声发射技术识别干热岩储层的可压裂性、压裂效果以及岩石裂缝的发展规律。LI H L 等[27]利用声发射监测超临界二氧化碳饱和度对干热岩破坏过程的影响，认为花岗岩矿物颗粒胶结度和颗粒大小的退化是声发射特性变化的根本原因；ZHAO Y 等[28]通过试验研究了液氮冷却条件下花岗岩断裂特征和声发射特征，同时基于花岗岩断裂过程中的声发射结果提出了一种利用上升角和平均频率临界值判别裂纹类型的方法；付文姜等[29]通过单轴压缩与声发射监测发现，花岗岩在 300～600 ℃区间内呈现显著的脆-延转变特征，且在 500～600 ℃区间存在导致耗散能骤降的临界温度。此外，高温钻井液技术、高温井控技术以及井下耐高温钻具的研究对于形成稳定的热储通道至关重要[30-31]。刘畅等[32]和聂德久等[33]针对钻井液的高温稳定性、环保性技术难点，对抗高温钻井液体系进行了组分和含量设计；张东清等[34]基于青海共和 GR1# 钻井工程，揭示温度、结构面厚度及倾角对干热岩井筒热力耦合变形规律的影响，发现结构面中部最大变形处为井壁弱面，需重点防控温度与结构面几何参数变化引发的损伤破坏。

储层监测与评价方向的高频共现关键词包括热传递、裂隙网络、裂缝渗透率、流体流动、温度、裂隙形态、传热系数、孔隙率等。在水力压裂过程中和压裂结束后对岩石裂隙发育程度、发展变化、空间分布、连通性、裂隙走向与密度等关键特征进行监测和识别，以及对储层流体分布的评估，是对干热岩热储评价的关键[5]。该方向的研究内容主要包括裂隙形态对传热特性的影响、水力压裂对天然裂隙的影响、裂隙内的流体流动与热传递机制等方面。HE R H 等[35]通过数值模型模拟了不同表面粗糙度的单一断裂中的流体流动和热传递，研究结果表明，随着流速的增加，断裂表面粗糙度对传热强度的促进作用逐渐减弱；NADIMI S 等[36]为模拟和确定犹他州地热能研究前沿瞭望台计划(FORGE)拟建的第三阶段注入井和生产井的最佳水力裂缝网络，开发了一个三维离散裂缝网络(DFN)模型，研究了水力压裂增加对天然裂隙的影响，发现黏度更高的流体会增加压裂高度，并对中间井段的裂缝扩展产生显著影响；惠峥等[37]通过高温三轴渗流-换热试验系统研究砂岩单裂隙渗流传热特性，发现渗流换热系数受流速和温度的影响显著高于裂隙开度的影响。

地震预测与控制技术方向的高频共现关键词包括诱发地震、地质力学、岩石力学、热液系统、微地震等。地震诱发是大规模开发干热岩所需要应对的关键挑战，其中断层活动和流体压力过高是引发强震的两个主要因素[38]，在世界各地采用 EGS 进行干热岩储能开发的项目中，有 68.8%的项目诱发震级超过了 2.0 级的地震，31.2%的项目诱发的地震震级甚至超过了 3.0 级，在这些地震事件中记录到的最大震级为 MW5.5[39]。该方向的研究内容主要包括干热岩开采诱发地震的成因机理、诱发地震的风险评估、建立交通信号灯协议的地震风险管理[40]、从地层环境分析诱发地震活动的特征、减震策略研究[41]等方面。为了降低诱发地震带来灾害的风险，学术界和工业界已经实施了一系列措施，包括但不限于制定限制诱发地震的流体注入策略、对注入和开采方案进行及时的验证和调整、以及对地震活动进行持续监测和采取相应的缓解措施[39]。

2.5.3　研究热点与发展趋势分析

对文献关键词的突现进行分析，可以了解在一定时期内学术界对该领域关注的热点变化。利用 CiteSpace 对干热岩领域相关研究文献进行了关键词突现分析。分析结果表明，早期研究主要集中在干热岩资源的基础理论与区域性勘探开发过程中诱发地震的风险评估与控制。美国早期在新墨西哥州芬顿山启动深层干热岩钻探试验，开展现场注采与微地震监测研究。欧洲莱茵地堑(Rhine Graben)是早期 EGS 技术试验的核心区域，法国苏尔茨兆瓦级

EGS发电工程因其自运行特性成为全球较为成功的示范案例,证明了在天然裂隙发育岩体中无需大规模高压即可构建大型热储的可行性。水力刺激(Hydraulic Stimulation)作为干热岩热储建造的关键技术,也在这一时期得到了广泛关注。2010—2020年这一时期的突现词包括流体传输(Transport)、流体注入(Fluid Injection)、多孔介质(Porous Media)、断裂花岗岩储层(Fractured Granite Reservoir)、三维瞬态模型(3 Dimensional Transient Model)、超临界二氧化碳(Supercritical CO_2)等,学者们开始关注裂隙网络的流体流动和热传递机制,多孔介质渗流模拟与裂隙网络表征成为优化热储性能开发的重要方向,相关研究通过数值模拟与试验手段揭示了裂缝连通性对热提取效率的影响。随着时间推移,有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle)作为一种高效的发电技术,成为干热岩发电系统的重要研究方向。此外,干热岩研究与全球碳中和目标深度融合,二氧化碳封存(CO_2 Sequestration)和敏感性分析(Sensitivity Analysis)等关键词表明,干热岩开发的环境影响和经济性评估是基础研究的关注点。

对SCI论文和CNKI论文的关键词进行演化分析,利用VOSviewer对干热岩地领域论文的关键词进行聚类分析,聚类分析结果表明,机器学习、深度学习、人工神经网络模型、核磁共振、渗透率演变、复杂裂隙网络、热流固耦合、低温压裂、岩石力学、热应力、岩石损伤、采热性能、裂缝扩展等关键词在近年来的发文中高频出现。

探究高温与应力耦合作用下岩石的力学特性是突破干热岩开发技术瓶颈的关键前提,储层岩石在EGS建设过程中会遇到不同冷却条件,研究不同条件下干热岩的力学特征具有重要意义[42]。刘坤等[43]通过开展200~800 ℃高温水冷却花岗岩试样的单轴压缩试验与声发射损伤监测,发现600 ℃是花岗岩热冲击后抗压强度劣化效果转变的阈值;MA X等[44]自主研发了实时高温真三轴试验系统与高温水力压裂模块,实现了对干热岩储层高温和三维高应力的准确模拟;马双泽等[45]通过剪切渗透试验,揭示了增强型地热系统中高温与循环冷却对花岗岩物理力学性能及微观结构的影响;孙勇等[46]通过液氮循环冷冲击试验揭示了干热岩在温差效应下的孔裂隙演化机制,阐明了石英晶粒热膨胀差异及循环冷冲击疲劳损伤主导的裂隙网络形成机理。

由于裂缝的方向与连通性直接影响流体流动和热传递效率,在裂缝性储层中,热流固耦合过程至关重要[47]。近年来,学者多利用三维THM耦合模拟来研究干热岩热储层变化和热提取性能。ALIYU M D等[48]开发了一种基于THM耦合过程的干热岩热储三维数值模型,并利用芬顿山一期干热岩系统的实地测量数据进行了验证,证实了井筒放置对储层性能的影响较大;WANG Y等[49]通过一系列三维THM耦合模拟,证实了注水引起的储层冷却和孔隙压力增加控制了水力剪切刺激机制,使用水平井有利于FORGE工程的地热开发;LIU J等[50]建立了一个基于离散裂缝的THM耦合模型,发现影响热回收率的关键因素依次为渗透率、裂缝连通性和基岩导热率,对优化地热储层的热能提取过程提供了重要的指导价值。

传统的水力压裂法存在耗水量过大、破坏地层和回流液污染等问题。为了应对这些挑战,研究人员近年来探索无水压裂技术,以期替代传统的水力压裂。其中以液氮为压裂介质的低温压裂技术因其独特的低温属性备受关注[51],该技术的研究多集中在液氮单次或循环冷却致裂岩石力学机制和液氮压裂造缝机理方面[52]。低温液氮压裂表现出优异的压裂效率,可以形成比水力压裂更为复杂的裂隙网络,同时可提高储层渗透率[53-55],目前已经取得良好的试验效果。但低温液体的冷却效应可能导致岩石的热应力分布不均匀,局部应力集中可能引发岩石的不均匀破裂,从而增加诱发地震的风险,未来仍需优化压裂参数、实时监测裂缝扩展和地震活动,以进一步提高压裂效果。

核磁共振技术近年来逐渐被用于地热能储层开发利用中,该技术在测量地热储层岩石的孔隙度、渗透率、饱和度和孔隙结构等关键物性参数中发挥着重要作用[56-57]。评估流体传输的能力,并分析未知岩石物性对地热能开发可能构成的潜在障碍,对提升热采效率具有重要意义。

随着人工智能技术的快速发展,机器学习、深度学习、人工神经网络模型等新兴技术逐渐被应用于干热岩的勘探、储层模拟和地热资源评价的研究中。这方面的研究内容包括利用深度学习模型的长期或实时微地震监测[58]、通过深度学习优化钻井工艺及钻进速率预测[59-60]、干热岩地热资源预测[61-62]、深

层流体流动模拟及热性能预测[63-64]以及提高干热岩中裂缝探测精度[65]等。机器学习等 AI 技术具有强大的数据处理和模式识别能力，为传统热储工程数值模拟提供了新的有效途径。

3　基于专利的干热岩应用技术态势分析

3.1　专利申请趋势分析

全球干热岩领域专利申请最早可追溯到 1977 年，是美国 REX ROBERT W 发明的一种从干热岩石系统中提取能量的方法，为了防止在干热岩地热系统中形成水垢，使用丙酮和水的混合物作为工作流体。随后至 2004 年，有关干热岩开发的专利技术处于萌芽阶段。2005—2016 年，年度专利申请量逐年攀升，中国干热岩领域相关专利申请起步，并在 2014 年达到第一个申请高峰。2017—2024 年，随着能源供给格局的多样性需求不断攀升，干热岩技术研发进入快速发展期，2019 年以来年申请量均超过 100 件。我国在这一时期占据技术主导地位，近五年的专利申请量占比均超过 80%。全球和中国在干热岩领域的相关专利情况见图 5。

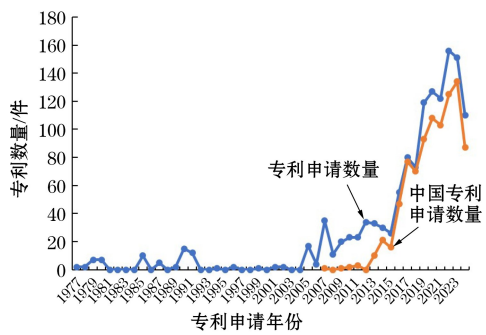
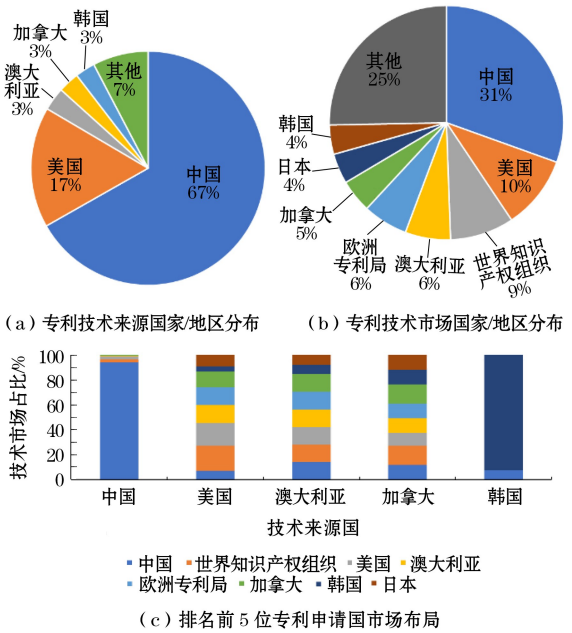


图 5　干热岩领域相关专利的年度变化趋势

Fig.5　Annual trends of patents quantity related to hot dry rock

3.2　主要专利申请国分析

全球共有 19 个国家和地区在干热岩领域进行了专利布局。基于申请人国家(技术来源国)与同族专利国家(技术市场国)的双维度分析结果见图 6。由图 6 可知，中国是最大的技术来源国，共申请 897 件专利，占全球专利数量的 67%，此外，中国同样也是最大的技术市场国。美国、澳大利亚和加拿大虽然专利申请量不占优势，但是技术输出比例较高，注重海外市场的布局；中国则从技术来源到市场布局均以本土为主，国际化进程相对滞后。



(a) 专利技术来源国家/地区分布　(b) 专利技术市场国家/地区分布

(c) 排名前 5 位专利申请国市场布局

图 6　主要专利申请国家/地区分布

Fig.6　Distribution of major patent applicantion countries/regions

3.3　主要专利申请人分析

对专利申请量前 10 位的申请人进行分析，分析结果见表 6。从竞争格局来看，中国机构占据绝对主导地位，前 10 位中仅第 6 位的加拿大埃沃尔技术股份有限公司为境外企业，其余 9 家均为中国机构，高校、企业和科研院所的数量分别为 6 家、2 家和 1 家。中国地质调查局以 93 件专利遥遥领先，中国石油化工股份有限公司(65 件)与吉林大学(50 件)分列第 2 位和第 3 位，形成了“科研院所-企业-高校”的三级创新梯队。中国矿业大学虽总量排名第 5(34 件)，但近三年的专利申请量占比高达 73.53%，说明近年技术布局非常活跃。

表 6　申请量前 10 位的专利申请人

Table 6　Top 10 patent applicants in terms of application quantity

序号	申请人	专利数量/件	所属国家	近三年专利申请占比/%
1	中国地质调查局	93	中国	46.24
2	中国石油化工股份有限公司	65	中国	20.00
3	吉林大学	50	中国	26.00
4	中国石油大学(华东)	47	中国	19.15
5	中国矿业大学	34	中国	73.53
6	埃沃尔技术股份有限公司	29	加拿大	13.79
7	西南石油大学	27	中国	37.04
8	中国石油天然气股份有限公司	24	中国	66.67
9	太原理工大学	23	中国	47.83
10	中国石油大学(北京)	17	中国	11.76

3.4 技术研发热点分析

利用国际专利号(International Patent Classification,IPC)分析技术研发热点。选取干热岩领域专利申请数量20件以上的IPC分类号(大组),并进行清洗合并,分析结果见表7。由表7可知,该领域专利技术申请的技术主题覆盖干热岩全产业链布局,即勘探—开发—利用。

表7 专利技术热点主题布局

Table 7 Hotspot technology theme layout of patent applications

序号	技术主题	涉及的IPC分类号	专利数量/件	近三年的占比/%
1	资源勘探	G01V1、G01V11	47	65.96
2	钻井工艺	E21B7、C09K8、E21B47、E21B33、E21B49、E21B21、E21B41、E21B17	387	26.61
3	储层改造	E21B43、G06F30、G01N3、G06F119、G01N15、G06F111、G06F113	537	35.38
4	热能提取	F24T10、F24J3、F24T50	510	23.73
5	地热能利用	F03G4、F03G7、F01K25、F22B1	258	13.57

干热岩地热资源勘探方向的专利申请数量最少,共47件,该方向的技术布局时间较晚,主要聚焦干热岩热储定位与评价,涵盖地质构造解析、地球物理探测方法(如电磁法、地震勘探)、热储参数测量装置研发及资源潜力评估模型构建。如专利文献[66]利用航磁数据确定岩体分布信息、地壳温度分布信息和地壳断裂分布信息,从而确定干热岩靶区;专利文献[67]利用梯度提升树模型构建干热岩分布识别模型,为实现海底干热岩分布的准确预测识别提供支撑。

钻井工艺方向共有387件专利申请,针对高温硬岩环境,重点攻关高效破岩钻具设计、耐高温钻井液体系开发、井筒稳定性控制技术以及适用于深部热储的智能完井方案等。专利文献[68]开发了一种利用工作流体配方,在钻孔的同时将裸眼钻孔的井筒密封,以在井筒/地层界面处形成抗渗层,提高了热传递效率;专利文献[69]开发了一种干热岩地热能开采的浸没式气动潜孔锤钻孔装置,能够使低温水充分冷却气动潜孔锤,减少钻头的磨损,显著提高钻头的寿命,提升钻进效率。

储层改造方向热度最高,共有537件专利申请,技术主题以增强热储渗透性为目标,研究水力/化学刺激压裂工艺、裂缝网络扩展模拟技术、微地震监测系统以及环境友好型压裂液配方优化。专利文献[70]对天然裂缝中主井的热储层与主井眼裂缝扩展连通性差异较低或较差的热储层进行注入和改善,降低了微地震风险;专利文献[71]开发了一种具有声发射监测装置的注水压裂剪切试验系统,为研究干热岩水压裂剪切裂纹扩展机理提供了一种有效的室内试验方法。

热能提取方向的专利申请数量为510件,重点围绕热能提取效率提升,探索超临界二氧化碳/水工质循环机制、裂隙-流体耦合传热模型、井下测温与流量监测装备,以及热储动态调控策略等方面进行研究。专利文献[72]通过将超临界流体注入地层压裂岩石,形成储层并提取地热能,实现热量传输与发电应用,值得注意的是该专利被引证195次,转让4次,为后续地热井热能传输与提取奠定了基础;专利文献[73]提供了一种高温高压条件下超临界二氧化碳岩石裂隙渗流装置,可以对注采温度和岩石内部温度进行有效控制。

地热能利用方向共有258件专利申请,技术方向延伸至地热能转化端,涉及干热岩发电系统集成、区域地热供暖网络设计等多元化应用场景。专利文献[74]提供了一套干热岩发电与压缩二氧化碳储能耦合系统,具有储能膨胀发电系统,通过二氧化碳气体驱动外部发电机辅助发电,提高了能源利用效率;专利文献[75]开发了一种多能联合干热岩储能供暖系统,通过地热水开采井水平井段与地热水开采井直井段的底端连通,减少了热能资源浪费。

4 总结与展望

干热岩作为清洁、安全、可再生的新型地热资源,具有巨大的开发潜力,有望在未来成为全球重要战略能源,对推动全球能源结构的转型和清洁能源的发展做出重要贡献。本文以学术论文和专利为数据来源,对全球干热岩勘探开发领域的基础研究和应用技术进行文献计量和主题聚类分析,较为系统全面地分析了该领域的研究态势。当前全球干热岩领域的研究规模快速扩增,在全球范围内得到重视。地热学、能源、岩石力学、地球物理等方向的期刊囊括了该领域的主要研究成果。美国等发达国家在干热岩勘探开发领域开展研究较早,近年来中国逐渐成为基础研究和技术研发的主力,但研究影响力和技术市场布局有待进一步提升。研究主题包括地热能提取与利用、干热岩成因机制与资源勘探、储层力

学特性与热储建造、储层监测与评价、地震预测与控制等方面。专利技术主题与基础研究基本一致,其中干热岩热储建造与监测评价仍是近年来关注的热点,探究高温环境与应力耦合作用机制、低温压裂技术开发、核磁共振技术的应用等是目前的热点研究方向。此外,人工智能等新兴技术逐渐成为重要研究手段,为干热岩热储监测与热能提取研究注入了新动能。

干热岩勘探开发与利用技术的研究具有重要的科学意义和实际应用价值,基础研究与应用技术的演进关系呈现出相互促进、动态发展的过程。通过干热岩地质特性、热力学性质、裂缝形成机理等方面的研究,支撑了压裂技术与钻井技术的改进,从单井压裂发展到多井压裂,能够更有效地形成复杂的裂缝网络;实际开发过程中面临的热能提取效率、诱发地震以及裂缝网络复杂性等方面的问题又反馈促进了多场耦合模拟、裂缝动态演化机理等基础研究的进一步深化,遵循"理论突破—工程验证—数据反馈—模型优化"的双向驱动路径。

近年来,干热岩的开发利用逐步进入工程示范阶段,美国的 FORGE 计划和中国青海共和盆地试验基地等项目,通过实际工程验证了 EGS 技术的可行性,并积累了宝贵的实践经验。然而,干热岩的商业化开发仍面临技术瓶颈、环境风险和经济性不足等挑战。未来的研究可以重点关注以下几个方面。

(1) 进一步加强地球物理勘探技术的研发和应用,提高干热岩资源的精准定位和评估能力;构建地热资源勘探和热能开采的专业数据库,促进数据的开放共享,为资源评估提供科学依据。

(2) 提升热储改造技术,优化水力压裂和钻井工艺,深入探索裂缝网络的动态演化、热储层的长期稳定性;干热岩开发对环境的影响效应尚未完全明确,尤其是基于井口压力、总液量和水力能反馈调节的控震机制仍需进一步研究。

(3) 利用三维 THM 耦合模拟技术,优化热储层的热能提取过程,提高热提取和换热效率。

(4) 持续深化基础研究与应用技术的协同发展,突破技术瓶颈,降低开发成本,提高经济效益,推动干热岩资源的可持续开发利用。

(5) 推动国际合作与交流,加强与发达国家的技术合作,制定相关政策,鼓励国际间的技术交流与合作,推动干热岩资源的全球化开发利用。

参考文献(References):

[1] 许天福,胡子旭,李胜涛,等.增强型地热系统:国际研究进展与我国研究现状[J].地质学报,2018,92(9):1936-1947.
XU Tianfu, HU Zixu, LI Shengtao, et al. Enhanced geothermal system: international progresses and research status of China[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9): 1936-1947.

[2] 许天福,张延军,曾昭发,等.增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J].科技导报,2012,30(32):42-45.
XU Tianfu, ZHANG Yanjun, ZENG Zhaofa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock)[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 42-45.

[3] 李德威,王焰新.干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J].地球科学:中国地质大学学报,2015,40(11):1858-1869.
LI Dewei, WANG Yanxin. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(11): 1858-1869.

[4] 文冬光,张二勇,王贵玲,等.干热岩勘查开发进展及展望[J].水文地质工程地质,2023,50(4):1-13.
WEN Dongguang, ZHANG Eryong, WANG Guiling, et al. Progress and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 1-13.

[5] 许天福,文冬光,袁益龙.干热岩地热能开发技术挑战与发展战略[J].地球科学,2024,49(6):2131-2147.
XU Tianfu, WEN Dongguang, YUAN Yilong. Technical challenges and strategy of geothermal energy development from hot dry rock[J]. Earth Science, 2024, 49(6): 2131-2147.

[6] 饶松,黄顺德,胡圣标,等.中国陆区干热岩勘探靶区优选:来自国内外干热岩系统成因机制的启示[J].地球科学,2023,48(3):857-877.
RAO Song, HUANG Shunde, HU Shengbiao, et al. Exploration target selection of hot dry rock in Chinese continent: enlightenment from genesis mechanism of global hot dry rock system[J]. Earth Science, 2023, 48(3): 857-877.

[7] 蔺文静,刘志明,马峰,等.我国陆区干热岩资源潜力估算[J].地球学报,2012,33(5):807-811.
LIN Wenjing, LIU Zhiming, MA Feng, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(5): 807-811.

[8] U.S. Department of Energy. FORGE[EB/OL].[2024-12-24]. https://www.energy.gov/eere/geothermal/forge.

[9] ETIP-Geothermal. About the ETIP-Geothermal[EB/OL].[2024-12-24]. https://etip-geothermal.eu/about-the-etip-geothermal/.

[10] GRINGARTEN A C, WITHERSPOON P A, OHNISHI Y. Theory of heat extraction from fractured hot dry rock[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(8): 1120-1124.

[11] 杨吉龙,胡克.干热岩(HDR)资源研究与开发技术综述[J].世界地质,2001,20(1):43-51.
YANG Jilong, HU Ke. A review of hot dry rock(HDR) research and development in the world[J]. World Geology, 2001,20(1):43-51.

[12] MCGARR A. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth,2014,119(2):1008-1019.

[13] GRIGOLI F, CESCA S, RINALDI A P, et al. The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake:a possible case of induced seismicity in South Korea[J]. Science,2018,360(6392):1003-1006.

[14] KIM K H, REE J H, KIM Y H, et al. Assessing whether the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event[J]. Science,2018,360(6392):1007-1009.

[15] WANG J S, SU L D, ZHU Q, et al. Numerical investigation on power generation performance of enhanced geothermal system with horizontal well[J]. Applied Energy,2022,325:119865.

[16] TAGLIAFERRI M, GŁADYSZ P, UNGAR P, et al. Techno-economic assessment of the supercritical carbon dioxide enhanced geothermal systems[J]. Sustainability, 2022,14(24):16580.

[17] ODA M, TAKEMURA T, AOKI T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite[J]. Mechanics of Materials,2002,34(6):313-331.

[18] WANG Y Z, LI C J, ZHAO J, et al. The above-ground strategies to approach the goal of geothermal power generation in China:state of art and future researches[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021,138:110557.

[19] AHMADI A, ASSAD M E H, JAMALI D H, et al. Applications of geothermal organic rankine cycle for electricity production[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,274(20):122950.

[20] 张超,胡圣标,黄荣华,等.干热岩地热资源热源机制研究现状及其对成因机制研究的启示[J].地球物理学进展,2022,37(5):1907-1919.
ZHANG Chao, HU Shengbiao, HUANG Ronghua, et al. Research status of heat source mechanism of the hot dry rock geothermal resources and its implications to the studies of genetic mechanism[J]. Progress in Geophysics,2022,37(5):1907-1919.

[21] 张保建,雷玉德,赵振,等.共和盆地干热岩形成的地球动力学过程与成因机制[J].地学前缘,2023,30(5):384-401.
ZHANG Baojian, LEI Yude, ZHAO Zhen, et al. Geodynamic processes and mechanisms of the formation of hot dry rock in the Gonghe Basin[J]. Earth Science Frontiers,2023,30(5):384-401.

[22] 熊波,许浩,唐淑玲,等.内蒙古中部干热岩地热资源成因机制研究[J].煤田地质与勘探,2024,52(1):36-45.
XIONG Bo, XU Hao, TANG Shuling, et al. Genetic mechanisms of hot dry rock geothermal resources in central Inner Mongolia[J]. Coal Geology & Exploration,2024,52(1):36-45.

[23] 王丹凤,程剑峰."双碳"背景下我国干热岩资源勘查技术现状及展望[J].中国煤炭地质,2023,35(4):43-49.
WANG Danfeng, CHENG Jianfeng. China's dry-hot rock resources present situation and prospect of exploration technology under carbon peaking and carbon neutrality background[J]. Coal Geology of China,2023,35(4):43-49.

[24] TAN H, LING F, GUO Z W, et al. Application of a wide-field electromagnetic method for hot dry rock exploration:a case study in the Gonghe Basin, Qinghai, China[J]. Minerals,2021,11(10):1105.

[25] DAI W M, JIA H F, JIANG N D, et al. A fast algorithm for 3D focusing inversion of magnetic data and its application in geothermal exploration[J]. Energies,2024,17(16):4000.

[26] ZHAO J W, ZENG Z F, ZHOU S, et al. 3-D inversion of gravity data of the central and eastern Gonghe Basin for geothermal exploration[J]. Energies,2023,16(5):2277.

[27] LI H L, ZHOU L, LU Y Y, et al. Influence of supercritical CO_2 saturation on the failure process of hot dry rock with acoustic emission monitoring[J]. Powder Technology,2020, 374(1):241-249.

[28] ZHAO Y, YUAN Y L, WANG C L, et al. The mode Ⅰ fracture toughness and acoustic emission characteristics of hot dry rock under temperature effects[J]. Engineering Fracture Mechanics,2024,301:110047.

[29] 付文姜,杨建明.高温热损伤后花岗岩声发射及特征能量研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):120-126.
FU Wenjiang, YANG Jianming. Study on acoustic emission and characteristic energy of granite after high-temperature thermal damage[J]. Mining Research and Development, 2023,43(8):120-126.

[30] 贾军,张德龙,翁炜,等.干热岩钻探关键技术及进展[J].科技导报,2015,33(19):40-44.
JIA Jun, ZHANG Delong, WENG Wei, et al. Key technology and development of hot dry rock drilling[J]. Science & Technology Review,2015,33(19):40-44.

[31] 季科,郭健翔,毕学军,等.高温干热岩采热系统钻探技术研究进展[J].科学技术与工程,2021,21(28):11900-11909.
JI Ke, GUO Jianxiang, BI Xuejun, et al. Research progress on drilling technology of high-temperature hot dry rock mining heat system[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(28):11900-11909.

[32] 刘畅,许洁,冉恒谦.干热岩抗高温环保水基钻井液体系[J].钻井液与完井液,2021,38(4):412-422.
LIU Chang, XU Jie, RAN Hengqian. An environmentally friendly high temperature water based drilling fluid for hot-dry-rock well drilling[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2021,38(4):412-422.

[33] 聂德久,刘刚,杜志强,等.干热岩钻探高温可循环泡沫钻井液技术研究[J].应用化工,2023,52(9):2542-2546.
NIE Dejiu, LIU Gang, DU Zhiqiang, et al. Study on high-temperature recyclable foam drilling fluid system for HRD drilling[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(9): 2542-2546.

[34] 张东清，李晓雪，熊贵明，等.基于热弹性理论的含结构面的干热岩井筒变形破坏规律研究[J].矿业研究与开发，2020，40(6)：100-107.
ZHANG Dongqing，LI Xiaoxue，XIONG Guiming，et al. Study on the deformation and failure laws of hot dry rock wellbore containing structure surface based on thermal-elastic theory[J]. Mining Research and Development，2020，40(6)：100-107.

[35] HE R H，RONG G，TAN J，et al. Numerical investigation of fracture morphology effect on heat transfer characteristics of water flow through a single fracture[J]. Geothermics，2019，82：51-62.

[36] NADIMI S，FORBES B，MOORE J，et al. Utah FORGE：hydrogeothermal modeling of a granitic based discrete fracture network[J]. Geothermics，2020，87：101853.

[37] 惠峥，冯子军，武治盛，等.多级围压下砂岩单裂隙渗流传热试验研究[J].矿业研究与开发，2020，40(9)：105-110.
HUI Zheng，FENG Zijun，WU Zhisheng，et al. Experimental study on seepage and heat transfer of sandstone with single fracture under multi-level confining pressure[J]. Mining Research and Development，2020，40(9)：105-110.

[38] 上官拴通，田兰兰，潘苗苗，等.干热岩开发断层滑动及诱发地震风险研究：以唐山马头营干热岩场地为例[J].地学前缘，2024，31(6)：252-260.
SHANGGUAN Shuantong，TIAN Lanlan，PAN Miaomiao，et al. Fault slip tendency and induced-earthquake risks in hot dry rock development：a case study in the Tangshan Matouying HDR site[J]. Earth Science Frontiers，2024，31(6)：252-260.

[39] 尹欣欣，蒋长胜，翟鸿宇，等.全球干热岩资源开发诱发地震活动和灾害风险管控[J].地球物理学报，2021，64(11)：3817-3836.
YIN Xinxin，JIANG Changsheng，ZHAI Hongyu，et al. Review of induced seismicity and disaster risk control in dry hot rock resource development worldwide[J]. Chinese Journal of Geophysics，2021，64(11)：3817-3836.

[40] SCHULTZ R，BEROZA G C，ELLSWORTH W L，et al. Induced seismicity red-light thresholds for enhanced geothermal prospects in the Netherlands[J]. Geothermics，2022，106：102580.

[41] CHENG Y X，XU T F，ZHANG Y J，et al. An laboratorial investigation of induced seismicity characteristics in EGS hydraulic fracturing[J]. Geothermics，2022，105：102482.

[42] 解经宇，宋继伟，隋建才，等.我国干热花岗岩在不同冷却条件下的力学响应研究进展[J].煤田地质与勘探，2025，53(3)：126-142.
XIE Jingyu，SONG Jiwei，SUI Jiancai，et al. Advances in research on the mechanical responses of hot dry granites under varying cooling conditions in China[J]. Coal Geology & Exploration，2025，53(3)：126-142.

[43] 刘坤，孙嘉彬，纪沛志，等.水冷却花岗岩力学特性及脆性指标研究[J].矿业研究与开发，2023，43(5)：113-119.
LIU Kun，SUN Jiabin，JI Peizhi，et al. Study on mechanical properties and brittleness index of granite after water cooling[J]. Mining Research and Development，2023，43(5)：113-119.

[44] MA X，DONG W B，HU D W，et al. Mechanical properties of granite at high temperature subjected to true triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2023，164：105313.

[45] 马双泽，陈伟，吕聪聪，等.高温与循环冷却对花岗岩抗剪强度影响试验研究[J].矿业研究与开发，2025，45(3)：137-147.
MA Shuangze，CHEN Wei，LYU Congcong，et al. Experimental study on the influence of high temperature and cyclic cooling on the shear strength of granite[J]. Mining Research and Development，2025，45(3)：137-147.

[46] 孙勇，翟成，丛钰洲，等.温度冲击效应诱导干热岩孔裂隙结构演化及损伤破坏机制[J].煤炭学报，2024，49(12)：4855-4872.
SUN Yong，ZHAI Cheng，CONG Yuzhou，et al. Pore fracture structure evolution and damage failure mechanism of hot dry rockinduced by temperature impact effect[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(12)：4855-4872.

[47] FANG T，FENG Q L，ZHOU R，et al. A coupled thermal-hydrological-mechanical model for geothermal energy extraction in fractured reservoirs[J]. Journal of Petroleum Exploration & Production Technology，2023，13(11)：2315-2327.

[48] ALIYU M D，ARCHER R A. A thermo-hydro-mechanical model of a hot dry rock geothermal reservoir[J]. Renewable Energy，2021，176：475-493.

[49] WANG Y，YUAN Y L，GUO B，et al. Numerical simulation of hydro-shearing stimulation in the enhanced geothermal system at the Utah FORGE site[J]. Engineering Geology，2024，343：107823.

[50] LIU J，PENG C H，XUE Y，et al. The influence of fracture connectivity on heat extraction performance of geothermal doublet systems based on a coupled thermo-hydro-mechanical model[J]. Numerical Heat Transfer Part A：Applications，2024：1-24.

[51] HUANG Z W，ZHANG S K，YANG R Y，et al. A review of liquid nitrogen fracturing technology[J]. Fuel，2020，266：117040.

[52] 洪纯阳，杨睿月，黄中伟，等.液氮循环压裂裂缝起裂与形态特征可视化研究[J].石油科学通报，2023，8(1)：87-101.
HONG Chunyang，YANG Ruiyue，HUANG Zhongwei，et al. Visualization of fracture initiation and morphology by cyclic liquid nitrogen fracturing[J]. Petroleum Science Bulletin，2023，8(1)：87-101.

[53] YANG R Y，HONG C Y，LIU W，et al. Non-contaminating cryogenic fluid access to high-temperature resources：liquid nitrogen fracturing in a lab-scale Enhanced Geothermal System[J]. Renewable Energy，2021，165(Part 1)：125-138.

[54] LONGINOS S N，HAZLETT R. Cryogenic fracturing using liquid nitrogen on granite at elevated temperatures：a case study for enhanced geothermal systems in Kazakhstan[J]. Scientific Reports，2024，14(1)：160.

[55] WANG Y L, HOU P, SU S J, et al. Experimental study on mode Ⅰ fracture characteristics of heated granite subjected to water and liquid nitrogen cooling treatments [J]. Engineering Fracture Mechanics,2024,298:109932.

[56] XI Y, XING J H, WANG H J, et al. Evaluation of pore characteristics evolution and damage mechanism of granite under thermal-cooling cycle based on nuclear magnetic resonance technology [J]. Geoenergy Science and Engineering,2024,241:213101.

[57] 王振强,狄佳,吴杨,等.高温和液氮循环作用后花岗岩孔隙结构演化及其劣化机制[J].科技导报,2024,42(24):70-78.
WANG Zhenqiang, DI Jia, WU Yang, et al. Evolution and damage mechanism of pore structure in granite after high-temperature and liquid nitrogen cycling [J]. Science & Technology Review,2024,42(24):70-78.

[58] YU P L, ZHU T Y, MARONE C, et al. DASEventNet:AI-based microseismic detection on distributed acoustic sensing data from the Utah FORGE well 16A (78)-32 hydraulic stimulation [J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth,2024,129(9):e2024JB029102.

[59] URDANETA C, JEONG C, WU X Q, et al. Deep learning method for improving rate of penetration prediction in drilling[J]. SPE Journal,2024,29(7):3440-3448.

[60] YEHIA T, GASSER M, EBAID H, et al. Comparative analysis of machine learning techniques for predicting drilling rate of penetration (ROP) in geothermal wells:a case study of FORGE site [J]. Geothermics, 2024, 121:103028.

[61] JIAO J, DONG S Y, ZHOU S, et al. 3-D gravity and magnetic joint inversion based on deep learning combined with measurement data constraint[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2024,62:5900814.

[62] GAO W L, ZHAO J T. Deep-time temperature field simulation of hot dry rock:a deep learning method in both time and space dimensions[J]. Geothermics,2024,119:102978.

[63] NING Y, BAILEY J R, BOURDIER J, et al. Optimizing production well geometry in the Utah FORGE geothermal project using machine learning and fluid flow modeling[J]. Renewable Energy,2024,237(Part C):121767.

[64] CHEN C H, DENG Y P, MA H C, et al. Deep learning-based inversion framework by assimilating hydrogeological and geophysical data for an enhanced geothermal system characterization and thermal performance prediction [J]. Energy,2024,302:131713.

[65] 杨婕,赵惊涛,盛同杰,等.基于深度学习的干热岩绕射波属性融合裂缝分析[J].新疆地质,2023,41(增刊1):69.
YANG Jie, ZHAO Jingtao, SHENG Tongjie, et al. Fracture analysis of dry-hot rock diffraction wave attribute fusion based on deep learning[J].Xinjiang Geology,2023,41(Suppl.1):69.

[66] 中国自然资源航空物探遥感中心.一种基于航磁数据勘查干热岩靶区的方法、装置及设备:202410121906.2[P].2025-04-01.

[67] 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所.干热岩分布识别方法、装置、电子设备及存储介质:202411412327.X[P].2024-11-08.

[68] Eavor Tech Inc. Method for Forming High-Efficiency Geothermal Wells: US62693950[P]. 2018-07-04.

[69] 吉林大学.开采干热岩地热能的沉浸式气动潜孔锤钻进装置及方法:202010482673.0[P].2020-08-07.

[70] 北京探矿工程研究所.一种钻探改造干热岩储层的装置及方法:202011380670.2.[P].2021-02-19.

[71] 山东科技大学.用于模拟地热系统干热岩的注水压裂剪切试验系统及方法:201910409149.8[P].2019-09-17.

[72] The University of California. Geothermal energy production with supercritical fluids: US09393397[P]. 2003-12-30.

[73] 中南大学.高温高压条件下超临界二氧化碳岩石裂隙渗流装置:202010063194.5[P].2020-06-02.

[74] 国网青海省电力公司电力科学研究院,中国地质调查局水文地质环境地质调查中心.干热岩发电与压缩二氧化碳储能耦合系统:202311554790.3[P].2024-02-27.

[75] 中国科学院武汉岩土力学研究所.一种多能联合干热岩储能供暖系统:201910190071.5[P].2019-03-13.