



第五章 能源与矿业工程前沿



5.1 工程研究前沿

5.1.1 Top 12 工程研究前沿发展态势

能源与矿业工程领域研判的 Top 12 工程研究前沿见表 5.1, 涵盖了能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程 4 个学科。其中, “二氧化碳捕集与原位转化一体化技术” “高离子传导固态电解质研究” “电力系统运维大模型研究” 属于能源和电气科学技术与工程领域; “紧凑型核聚变及氦资源转换原理” “玻璃固化等核废物处置原理模拟和试验” “新型热管式反应堆在空间堆应用试验研究” 属于核科学技术与工程领域; “基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术” “造山型金矿床物质来源及成矿过程研究” “长 7 段页岩油原位转化机理” 属于地质资源科学技术与工程领域; “油气与风-光-热-储多能融合开发利用方法” “深层油气储层智能精细表征方法” “煤矿安全智能监控系统传感器网络优化” 属于矿业科学技术与工程领域。2018—2023 年各研究前沿相关的核心论文逐年发表情况见表 5.2。

(1) 二氧化碳捕集与原位转化一体化技术

二氧化碳 (CO₂) 捕集与原位转化一体化技术是指 CO₂ 被捕集后不经过传统的变温变压脱附过程, 而是在吸附状态下原位催化转化为高附加值产物的技术。该技术的核心是在同一材料体系中完成 CO₂ 的捕集和转化利用, 从而省去了 CO₂ 分离、提纯、存储和运输等过程, 理论上可大幅降低成本和能耗, 并简化系

表 5.1 能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	二氧化碳捕集与原位转化一体化技术	50	4 890	97.80	2020.2
2	紧凑型核聚变及氦资源转换原理	2	89	44.50	2018.0
3	基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术	21	4 103	195.38	2020.7
4	油气与风-光-热-储多能融合开发利用方法	312	54 332	174.14	2019.9
5	高离子传导固态电解质研究	559	26 142	46.77	2021.2
6	电力系统运维大模型研究	307	6 737	21.94	2021.4
7	玻璃固化等核废物处置原理模拟和试验	24	433	18.04	2019.8
8	新型热管式反应堆在空间堆应用试验研究	39	889	22.79	2020.8
9	造山型金矿床物质来源及成矿过程研究	42	2 145	51.07	2020.7
10	长 7 段页岩油原位转化机理	18	1 105	61.39	2020.2
11	深层油气储层智能精细表征方法	1 088	12 237	11.25	2021.0
12	煤矿安全智能监控系统传感器网络优化	4	200	50.00	2021.0

注: 前沿来源包括三类, 即数据挖掘、专家提名、数据挖掘 & 专家提名; 序号 1、4~6 为专家提名前沿, 11 为数据挖掘 & 专家提名前沿, 其余为数据挖掘前沿。

表 5.2 能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	二氧化碳捕集与原位转化一体化技术	7	13	7	12	10	1
2	紧凑型核聚变及氦资源转换原理	2	0	0	0	0	0
3	基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术	0	3	6	7	5	0
4	油气与风-光-热-储多能融合开发利用方法	65	67	64	72	38	6
5	高离子传导固态电解质研究	37	66	75	120	108	153
6	电力系统运维大模型研究	13	24	49	47	82	92
7	玻璃固化等核废物处置原理模拟和试验	4	5	8	5	2	0
8	新型热管式反应堆在空间堆应用试验研究	1	3	12	10	11	2
9	造山型金矿床物质来源及成矿过程研究	3	5	11	11	7	5
10	长 7 段页岩油原位转化机理	2	1	9	5	0	1
11	深层油气储层智能精细表征方法	107	121	159	198	250	253
12	煤矿安全智能监控系统传感器网络优化	0	1	0	1	2	0

统流程。二氧化碳捕集与原位转化一体化技术可采用固体吸附法或溶液吸收法捕集 CO₂ 并耦合催化转化，目前主流的技术方案是采用由碱 / 碱土金属氧化物吸附剂和贵金属或过渡金属催化剂组成的吸附催化双功能材料，吸附态的 CO₂ 通过甲烷化、逆水煤气、甲烷干重整等反应过程进行原位转化。该领域的主要研究方向和发展趋势包括：① 高性能、低成本、长寿命的 CO₂ 吸附催化双功能材料以及 CO₂ 吸附和原位催化转化的耦合反应机理；② 流程和工艺参数优化以及可再生能源耦合技术；③ 真实场景的规模化示范应用和技术经济性分析。

（2）紧凑型核聚变及氦资源转换原理

在磁约束聚变领域，紧凑型核聚变是一种旨在实现小型化、低成本的核聚变反应装置技术。过去，国际上先后建成了多个大型托卡马克装置用于探索聚变研究，但这些装置需要投入巨大的经济成本。即使是多方合作的国际热核聚变实验堆（ITER）计划也需要各方共同承担经济成本。近年来，随着高温超导强场磁体技术的突破，聚变堆的经济成本大幅降低，使紧凑型聚变堆技术迎来了快速发展。相比传统核裂变，核聚变的能源更为清洁和安全。然而，对于最容易实现的氘氘聚变来说，聚变所需的氘在自然界中含量较少，为了获取足够的氘以满足未来聚变堆的需求，可以通过在反应堆中设计锂包层，利用聚变产生的中子轰击锂产生氘，并开发高效的氘回收系统，实现氘资源的循环利用。

（3）基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术

基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术是利用深度学习模型从高分辨率遥感影像中自动识别和提取地质解译信息（如矿化带、岩石类型、地质构造等关键信息）、矿化信息（蚀变、羟基）以及矿物资源相关特征，结合多源数据融合与特征优化，实现对潜在矿化区域的精准定位与分类，从而提升矿产勘探的效率和准确性，为矿产资源勘探提供科学依据。该领域的主要研究方向包括特征提取与识别、多源数据融合、时空变化分析和智能化地质解译。特征提取与识别通过深度学习模型，从遥感影像中自动提取矿物和地质特征；多源数据融合多尺度多模态遥感数据，增强成矿信息的识别能力；时空变化分

析利用时序遥感数据,监测地质体的动态变化,识别潜在的成矿活动;智能化解译通过耦合多源信息,自动生成地质解译报告,以辅助专家开展矿产潜力评估。未来,基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术将迎来一系列重要的发展趋势。通过多源数据融合和时空分析获取更全面的成矿信息,同时增强模型的解释性与可信度,确保解译结果的透明度与可靠性,基于遥感大数据与人工智能的深度结合,实现海量数据的高效分析与挖掘。该技术将在矿产资源勘探、矿产资源成矿预测与潜力评价中发挥越来越重要的作用。

(4) 油气与风-光-热-储多能融合开发利用方法

油气与风-光-热-储多能融合开发利用方法是指在油气田开发和生产过程中,利用不同能源形式的协同作用,提高能源利用效率并降低环境影响。该方法通过综合考虑可再生能源(如风能、太阳能、地热能)以及储能技术的特点和优势,采取综合性的规划、共享基础设施、储存转换技术、智能管理系统以及政策激励措施,在智慧油田建设过程中实现多能互补和能源的高效利用。该领域的主要研究方向包括:①多能互补微网与油气生产融合发展研究;②多能互补微网生产协同优化与控制理论研究;③油气田多能微网的源-网-荷-储配置及生产调度优化方法研究。油气与可再生能源(风能、太阳能等)及储热等由独立系统内作用机制与优化方法,逐渐形成油气与风-光-热-储的协同作用机制与优化方法。随着信息技术的进步,油气与风-光-热-储多能融合开发利用方法将向着高效模拟、优快决策和智能调控的方向发展。

(5) 高离子传导固态电解质研究

相较于有机电解液,固态电解质具有更宽的电化学窗口以及更高的安全性,因此被视为未来动力电池和储能电池的重要发展方向。现阶段,全固态电池的主要应用瓶颈之一在于充放电速度较慢。固态电解质中离子间相互作用力强,且电解质-电极界面阻抗高,导致锂离子迁移能垒是液体的10倍以上,从而成为限制电池充放电速度的决定步骤。高离子传导固态电解质通常由无机离子化合物组成,其中硫基固态电解质基于其稳定的离子传输通道以及良好的界面力学适配性,室温下锂离子电导率超过10 mS/cm,可与商用电解液媲美。通过电解质成分设计与界面稳定性研究可降低限速步骤的反应能垒,从而进一步提升固态电解质锂离子传导能力。电解质成分设计的发展方向是优化化学成分和调控晶体结构,致力于增加离子传导通道和降低离子-离子相互作用,为锂离子的自由移动提供有利条件。界面稳定性研究主要从界面钝化层、涂层包覆、缓解界面应力等方向发展。值得注意的是,固态电解质体相与表界面的离子输运、界面电化学等物理化学过程具有鲜明的化学场、电场、力场耦合特征。全面考量多场耦合效应,构建真实工况下固态电解质的实验环境与理论模型,可有效揭示其实际应用下的失效、失控机制,是未来高离子传导固态电解质发展的重要方向。

(6) 电力系统运维大模型研究

电力系统是规模最大、最复杂的人造系统之一。在新型电力系统建设的背景下,海量分布式电源和灵活负荷接入电力系统,其运维问题呈现出高维、非线性、动态变化的特点。传统的基于静态建模与集中优化求解的方式在计算精度和效率方面逐渐难以满足要求。

以大模型为代表的人工智能技术在解决上述问题上具有广阔的前景。广义的大模型是指具有庞大参数规模的深度神经网络,具有强大的复杂规律挖掘能力,可从电力系统时序量测数据、图像数据、网架拓扑数据等多源异构数据中提取规律,支撑新型电力系统的运维工作。狭义的大模型是指以ChatGPT为代表的大语言模型,可通过对话的方式实现知识的整合与呈现,亦可成为支撑电力系统运维的有效交互形式。

电力系统运维大模型的研究存在以下几个关键点：① 有限样本环境下的大模型调优问题。相比于互联网上海量的文本信息，电力系统运行数据的样本量相对有限，尤其是故障、极端工况等关键样本更为稀少。如何基于有限的样本完成大模型的高效调优亟待研究。② 大模型的可解释性与鲁棒性问题。大模型内核为基于超大规模神经网络的数据统计规律挖掘，难以对其产生决策的过程进行解释，且难以保证少数特殊情形下模型的可靠性，这与电力系统极高的安全性要求存在矛盾。③ 数据安全隐患问题。大模型存在泄露电力系统隐私信息的风险，需要对其进行针对性地防范。

（7）玻璃固化等核废物处置原理模拟和试验

高放废液处理技术是核燃料循环后处理后端的关键技术，也是我国核能可持续发展中的挑战之一。玻璃固化是目前世界上唯一实现工业化的高放废液处理技术，主要包括焦耳加热陶瓷熔炉技术和冷坩埚技术。其中，冷坩埚技术作为第四代玻璃固化工艺，被认为是当前最有应用前景的玻璃固化技术。高放废液组成复杂，包含 20 种以上组分，当其与基础玻璃经历近千摄氏度的温度变化时，会发生复杂的物理化学反应与物相转变，实现从高放废液玻璃配合料向玻璃态的转化。仿真配合料向玻璃态转化过程是安全、高效运行玻璃固化熔炉的理论依据。随着燃耗增加，乏燃料中裂变产物和锕系元素含量会增加，导致动力堆高放废液的放射性水平高、衰变热高、含盐量高，也会使裂变产生的 Zr、Mo 等玻璃固化中难溶物以及贵金属的含量大幅升高，从而导致大量贵金属在熔炉底部聚集，造成出料堵塞。冷坩埚因其独特的感应加热方式能够很好地解决以上问题。因此，需要吸取电熔炉的经验，重点开展基础问题研究、设备和工艺长时间验证，以及冷坩埚玻璃固化配方验证和性能研究。

（8）新型热管式反应堆在空间堆应用试验研究

与传统的化学电源和太阳能电源相比，核反应堆电源由于具有能量密度高、工作寿期长、无需光照和氧化剂等优点，是实现深空探测的首选方案之一。自 20 世纪 50 年代起，美国、俄罗斯设计了多种核反应堆电源方案，如俄罗斯的 ROMASHK、BUK、TOPAZ 和 TOPAZ-2，美国的核辅助动力系统 SNAP-10A 和 Kilopower 等。然而，作为高空飞行系统，受质量和体积的限制，需要通过提高传热效率来减小反应堆体积，而基于热管小堆的航空核动力装置刚好可以解决这个问题。随着航空核动力系统的发展，其未来将应用于战略巡航导弹推进系统、核动力货运飞机和核动力推进等方面。热管堆已成为目前空间核反应堆领域的研究重点。不同于传统的反应堆设计，热管反应堆设计具有极强的灵活性和创新性，采用不同的碱金属热管和热电转换方式对于系统功率、整个系统质量等各方面都有着直接的影响，其中热电转换器对整个系统的寿命起着决定性作用，可以尝试将热管与多种不同热电转换方式结合；热管式反应堆采用模块化设计，针对不同模块分别进行改进，从而降低整体系统质量，提高系统安全性。因此，热管反应堆在未来拥有极大的发展空间和潜力。

（9）造山型金矿床物质来源及成矿过程研究

经典的造山型金矿是指在汇聚板块边缘的增生或者碰撞造山带中，在挤压或者走滑变形的条件下形成的石英脉型金矿。一般情况下，造山型金矿的形成与岩浆作用是不同时的，也没有明显的成因联系。造山型金矿的成矿物质主要来源于陆源沉积物、大陆镁铁质岩（如科马提岩）、洋壳及其上覆沉积物和交代地幔。陆源沉积物在沉积—成岩过程中，金赋存于含砷的黄铁矿中，在之后的变形过程中被释放出来，并被绿片岩相—角闪岩相的进变质过程中的绿泥石脱水所提取，形成含金流体。俯冲洋壳失水形成的流体活动能够从岩石圈根下部的镁铁质岩中萃取大量的金元素，形成含金流体。在洋壳的俯冲变质过程中，含金沉积物

中的金可以发生活化和迁移,形成含金流体。而交代地幔中的金在短暂的活化事件中也能够形成含金流体。这些流体中的金以 S、Cl 络合物或者胶体的形式迁移,在特定的位置通过络合物分解、金属液滴汲取、胶体凝聚等机制沉淀,形成了造山型金矿。因此,目前科研人员重点关注造山型金矿中金的来源、金的活化及运移机制,以及金的高效富集沉淀机制。这些问题有望通过原位微区分析、金属稳定同位素分析以及实验矿床学等技术得到解决。

(10) 长 7 段页岩油原位转化机理

页岩油地下原位转化是利用热传导、对流、辐射等加热方式,将埋深 300~3 000 m 页岩中的重质油、沥青和各类有机物大规模转化为轻质油和天然气的物理化学过程,可称为“地下炼厂”,在清洁开采、总量规模与产出物品质等方面具有明显优势。针对长 7 段富有机质页岩特点,利用地下“水平井电加热轻质化”高效转化技术,开发利用页岩油资源是行之有效的方法。

陆相有机质超量富集的成因、母质结构与原位转化动力学是页岩油原位转化的核心科学问题,长 7 段页岩油原位转化机理研究的主要方向包括:① 富有机质页岩的形成机理研究;② 原位转化技术与传热机制研究;③ 页岩油原位转化的流动机制研究;④ 页岩油原位开发技术。

鄂尔多斯盆地长 7 段富有机质页岩连续厚度大、有机质丰度高、成熟度适中,页岩油原位转化的现实性最好,未来基础研究发展趋势包括有机质超量富集的环境响应与外物质介入作用,有机质超富段母质结构、能量场与产出物构成,有机质多相转化热传导动力学,烃物质多相态多场耦合流体场与原位转化烃排驱效率,中低熟页岩油富集机理与资源分布等方面。在原位转化技术与装备方面,稳定加热器制造技术、小井距高精度钻井技术、原位转化油气开发工程技术、降本增效技术、精准可控储层改造技术等是未来发展趋势。

(11) 深层油气储层智能精细表征方法

深层油气储层智能精细表征方法是指通过整合多源地球物理数据、地质模型和人工智能算法,对地下深层油气储层的结构、物性及流体分布等进行高精度的定量化描述和分析,旨在更准确地描述深层储层的复杂结构及其流体分布特征,提高油气储层的勘探精度和开发效率。

该领域的主要研究方向包括:① 利用人工智能和机器学习等形成地震数据、测井数据、岩心分析结果等多元数据融合方法,以构建更为精细的储层模型;② 基于高分辨率的三维地震数据和地质资料,建立深层储层的数字化模型来模拟油气的生成、运移和聚集过程;③ 强化机器学习和深度学习算法的应用,使得储层参数预测和流体分布识别更加精确。综合应用各类技术手段,实现对深层油气储层开发的全面指导。

随着计算能力的提升和大数据技术的发展,智能精细表征方法越来越依赖于实时数据处理和动态模型更新。未来的研究趋势体现在:① 钻探过程实时数据获取和处理,储层的动态精细表征;② 不同尺度的储层特性集成分析;③ 未来的表征方法将更加自动化,智能算法能够在最小的人为干预下完成储层的精细表征。

(12) 煤矿安全智能监控系统传感器网络优化

煤矿安全智能监控系统是集成多种传感器技术、数据处理技术和通信技术的综合性系统,其核心在于通过传感器实时监测矿井内部的环境参数(如气体浓度、温度、湿度、压力等),并通过网络将数据传输至中央控制系统。传感器网络优化是提升传感器布局、数据传输效率和信息处理能力,实现实时、高效、安全的监控目标,确保矿工的生命安全和设备的正常运转的基础。其主要研究方向包括传感器布局优化方

法、多元数据融合与处理技术、通信网络优化。

未来,煤矿安全智能监控系统的传感器网络布设将朝着智能化、自动化和集成化的方向发展,具体趋势包括:在智能传感器的应用方面,不断开发智能化程度高的传感器(如多功能传感器、智能化监测设备),以增强数据采集的多样性和精确性;在物联网技术的融合方面,随着物联网技术的发展,更多的传感器通过网络连接,实现实时数据共享和智能分析,形成一个高效的安全监控网络;在监控大数据处理方面,开发煤矿安全云计算平台和大数据分析技术,实现海量数据的存储、处理与分析,为煤矿安全管理提供决策支持;构建自适应监控系统,研究如何使监控系统能够根据环境变化自动调整传感器的工作状态和监测策略,以提高监控系统的灵活性和响应速度。

5.1.2 Top 4 工程研究前沿重点解读

5.1.2.1 二氧化碳捕集与原位转化一体化技术

二氧化碳捕集与利用(carbon capture and utilization, CCU)技术是实现“碳达峰、碳中和”目标的关键技术手段和托底技术保障,但传统的CCU过程中 CO_2 的脱附/解吸、提纯、运输存储以及后续的转化利用都需要消耗大量能量且系统复杂,极大地制约了CCU技术的推广应用。二氧化碳捕集与原位转化一体化(integrated CO_2 capture and in-situ utilization, ICCU)技术在同一材料体系中完成 CO_2 的捕集和转化利用, CO_2 被吸附后不经过解吸/脱附、提纯、存储和运输等过程,而是在吸附状态下被催化转化为燃料或化学品,可减少系统复杂程度并且大幅提高能量利用效率,是一种集成化、低能耗的新型CCU技术。

ICCU技术可采用固体吸附法或化学吸收法捕集 CO_2 并耦合催化转化。2015年,哥伦比亚大学的Melis教授团队最早提出吸附催化双功能材料的概念,在氧化铝载体上负载氧化钙吸附剂和钨催化剂,形成了双功能材料,逐步发展为基于碱/碱土金属氧化物吸附剂和贵金属或过渡金属催化剂组成的吸附催化双功能材料的主流ICCU技术方案。目前ICCU技术的研究中, CO_2 原位催化转化路径主要通过甲烷化、逆水煤气、甲烷干重整等反应过程进行。ICCU技术的主要研究方向包括:①高性能、低成本、长寿命的 CO_2 吸附催化双功能材料以及 CO_2 吸附和原位催化转化的耦合反应机理;②流程和工艺参数优化以及可再生资源耦合技术;③真实场景的规模化示范应用和技术经济性分析。

“二氧化碳捕集与原位转化一体化技术”工程研究前沿中,核心论文发表量与篇均被引频次排在前列的国家是中国和美国(表5.3),中国与英国的合作较多(图5.1)。在核心论文的主要产出机构中,发文量排在前列的是华东理工大学和中国科学院,篇均被引频次排在前列的是中国地质大学和四川大学(表5.4)。其中,电子科技大学与中国地质大学和四川大学的合作较多(图5.2)。施引核心论文的主要产出国家和机构分别见表5.5和表5.6。

面向规模化的工业示范应用,未来5~10年,二氧化碳捕集与原位转化一体化技术将进一步提高双功能材料的性能并实现低成本的大批量制备,通过反应器设计、流程优化、可再生能源耦合等手段降低运行能耗。同时通过材料的创新,扩展应用场景,例如直接空气 CO_2 捕集结合原位转化一体化,探索新的转化路径(例如光催化、电催化、等离子体催化、均相催化等)。目前二氧化碳捕集与原位转化一体化技术已完成实验室小试验证,预计到2029年可实现 CO_2 捕集量千吨级中试示范验证,到2034年实现工业示范(图5.3)。

表 5.3 “二氧化碳捕集与原位转化一体化技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	37	74.00	3 782	102.22	2020.3
2	美国	7	14.00	738	105.43	2019.0
3	英国	6	12.00	512	85.33	2020.7
4	新加坡	4	8.00	283	70.75	2020.8
5	瑞士	3	6.00	213	71.00	2019.3
6	澳大利亚	2	4.00	645	322.50	2019.0
7	加拿大	2	4.00	165	82.50	2021.0
8	瑞典	2	4.00	130	65.00	2020.0
9	埃及	1	2.00	155	155.00	2020.0
10	印度	1	2.00	155	155.00	2020.0

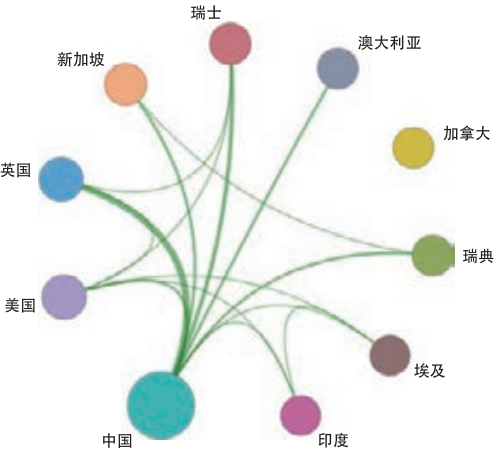


图 5.1 “二氧化碳捕集与原位转化一体化技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 5.4 “二氧化碳捕集与原位转化一体化技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	华东理工大学	4	8.00	269	67.25	2022.0
2	中国科学院	3	6.00	809	269.67	2018.3
3	电子科技大学	3	6.00	752	250.67	2020.0
4	贝尔法斯特女王大学	3	6.00	301	100.33	2021.7
5	新加坡国立大学	3	6.00	216	72.00	2021.0
6	南京理工大学	3	6.00	160	53.33	2020.0
7	中国地质大学	2	4.00	672	336.00	2020.0
8	四川大学	2	4.00	567	283.50	2019.5
9	中国科学技术大学	2	4.00	420	210.00	2019.0
10	南加州大学	2	4.00	337	168.50	2019.0

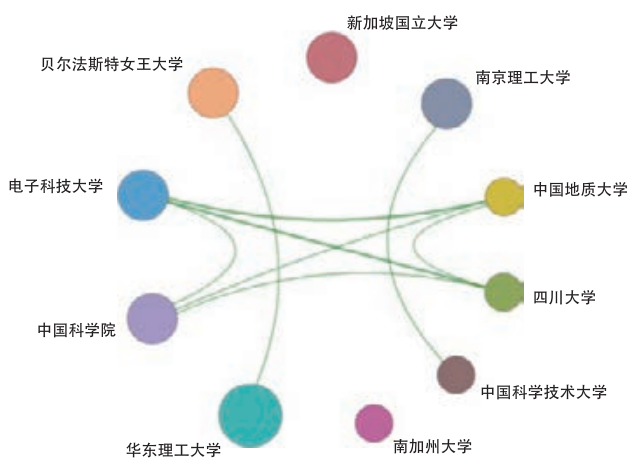


图 5.2 “二氧化碳捕集与原位转化一体化技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 5.5 “二氧化碳捕集与原位转化一体化技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	458	57.76	2020.8
2	美国	68	8.58	2020.3
3	澳大利亚	55	6.94	2020.6
4	英国	35	4.41	2020.9
5	印度	34	4.29	2020.5
6	新加坡	30	3.78	2021.0
7	韩国	27	3.40	2020.6
8	德国	23	2.90	2020.8
9	日本	22	2.77	2020.6
10	加拿大	21	2.65	2021.0

表 5.6 “二氧化碳捕集与原位转化一体化技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	66	24.81	2020.3
2	中国地质大学	33	12.41	2020.7
3	中国科学技术大学	26	9.77	2020.9
4	郑州大学	24	9.02	2021.1
5	江苏大学	23	8.65	2020.8
6	天津大学	19	7.14	2020.6
7	电子科技大学	18	6.77	2021.3
8	清华大学	16	6.02	2021.4
9	南洋理工大学	15	5.64	2020.9
10	北京化工大学	14	5.26	2020.4



图 5.3 “二氧化碳捕集与原位转化一体化技术”工程研究前沿的发展路线

5.1.2.2 紧凑型核聚变及氦资源转换原理

核聚变技术的发展始于 20 世纪中叶。早期的研究主要集中在大规模的核聚变装置，其中一些在实验上取得了成功。例如，美国普林斯顿等离子体物理实验室于 1982 年建成了一个可进行氦氦实验的大型托卡马克装置 TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor)。该装置大半径为 3.1 m，小半径为 0.96 m，磁场强度达到 6 T，等离子体电流为 3 MA，总加热功率为 50 MW。欧洲建造了首个进行 50%:50% 氦氦实验的装置 JET (Joint European Torus)。与 JET 的目标类似，日本也建造了一个大型的托卡马克装置 JT-60 (Torus-60)，与 TFTR、JET 被列为世界三大托卡马克。为了推动聚变能的发展，欧盟、中国、韩国、俄罗斯、日本、印度和美国 7 个国家和地区合作开展了国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划。ITER 计划是当今世界规模最大、影响最深远的国际大科学工程。这些大型装置旨在探索磁约束聚变能开发利用的可行性。但由于其规模庞大、成本高昂，商业化应用面临挑战。进入 21 世纪后，随着高温超导强场磁体技术的突破，研究者们开始关注紧凑型核聚变装置的开发。紧凑型核聚变技术依托高温超导磁体可以实现聚变装置的小型化，大大降低了聚变开发的经济成本。其中具有代表性的有：美国麻省理工学院独立出来的核聚变创业公司 Commonwealth Fusion Systems 正在开发的高温超导紧凑型托卡马克装置 SPARC，其超导线圈可以产生高达 20 T 的磁场。SPARC 计划于 2025 年建造完成并进行氦氦实验；以及英国卡拉姆聚变能源中心负责的 STEP 装置等。紧凑型核聚变的研究在很大程度上依赖于国际合作，这种合作不仅包括研究机构之间的双边或多边合作，还需要材料科学、等离子体物理、工程学等多个学科的协作。总之，全球范围内都在开展针对紧凑型核聚变的研究，各国和地区需要通过密切合作，共同应对技术挑战，推动该领域的持续发展。

“紧凑型核聚变及氦资源转换原理”工程研究前沿中，核心论文数最多的国家是英国、德国和加拿大（表 5.7 和图 5.4）。核心论文的主要产出机构为卡勒姆科学中心、欧洲聚变联盟、卡尔斯鲁厄理工学院、Kinectrics 公司和开放大学（表 5.8）。其中，卡勒姆科学中心、欧洲聚变联盟和卡尔斯鲁厄理工学院合作较多，Kinectrics 公司与开放大学合作较多（图 5.5）。施引核心论文数排名靠前的国家是德国和美国（表 5.9），施引核心论文数排名靠前的机构是卡尔斯鲁厄理工学院和马克斯·普朗克等离子体物理研究所（表 5.10）。

紧凑型核聚变未来的发展将集中在技术优化、材料创新、规模化应用等方面，主要包括：

1) 高温超导磁体的应用与优化：高温超导磁体是紧凑型核聚变装置中的核心部件。未来的研究将集中于开发更高效、更稳定的超导磁体，提升等离子体约束能力，减少装置体积并提高能量密度。麻省理工学院等机构已在这方面取得初步突破，未来将进一步优化磁体材料和冷却技术。

2) 新型材料的开发：核聚变装置内的材料需承受极高温度和强辐射。未来研究将聚焦于耐高温、抗

辐射的新型材料的开发，以提高反应堆的寿命和安全性。

3) 氚燃料循环系统：氚资源的生产、回收和管理是紧凑型核聚变装置能否持续运行的关键。研究方向包括高效的氚生成技术、氚回收和再利用系统等。

4) 反应堆设计的小型化与模块化。

表 5.7 “紧凑型核聚变及氚资源转换原理”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 / %	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	英国	2	100.00	89	44.50	2018.0
2	德国	1	50.00	48	48.00	2018.0
3	加拿大	1	50.00	41	41.00	2018.0

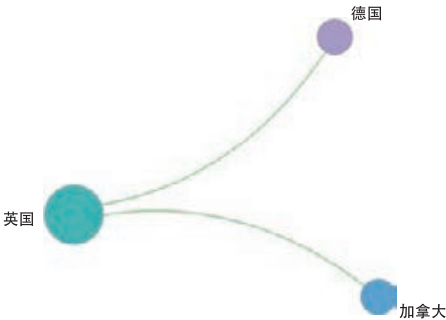


图 5.4 “紧凑型核聚变及氚资源转换原理”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 5.8 “紧凑型核聚变及氚资源转换原理”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 / %	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	卡勒姆科学中心	1	50.00	48	48.00	2018.0
2	欧洲聚变联盟	1	50.00	48	48.00	2018.0
3	卡尔斯鲁厄理工学院	1	50.00	48	48.00	2018.0
4	Kinectrics 公司	1	50.00	41	41.00	2018.0
5	开放大学	1	50.00	41	41.00	2018.0

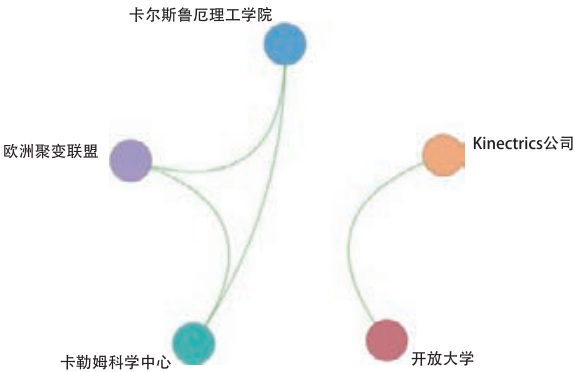


图 5.5 “紧凑型核聚变及氚资源转换原理”工程研究前沿主要机构间的合作网络

未来的发展趋势主要为：从实验验证到原型机开发和商业化探索。紧凑型核聚变在能源安全与可持续性方面具有巨大的发展潜力。另外，核聚变技术的发展还将带动其他高技术领域的发展。未来，紧凑型核聚变技术的研究将重点探索高温超导磁体、新型材料、氦燃料循环系统等领域（图 5.6）。其发展潜力巨大，应用场景广泛，不仅有望解决能源危机，还能推动科技进步和经济发展。然而，商业化应用仍需要时间以及国际合作的共同努力。

表 5.9 “紧凑型核聚变及氦资源转换原理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	德国	19	19.59	2020.4
2	美国	19	19.59	2021.6
3	意大利	14	14.43	2021.3
4	英国	12	12.37	2020.9
5	中国	10	10.31	2020.8
6	俄罗斯	6	6.19	2020.5
7	日本	6	6.19	2021.8
8	法国	4	4.12	2021.0
9	罗马尼亚	3	3.09	2020.0
10	加拿大	2	2.06	2022.0

表 5.10 “紧凑型核聚变及氦资源转换原理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	卡尔斯鲁厄理工学院	10	19.61	2020.6
2	马克斯·普朗克等离子体物理研究所	6	11.76	2020.2
3	欧洲核聚变联盟	5	9.80	2019.8
4	都灵理工大学	5	9.80	2022.0
5	中国科学院	4	7.84	2021.2
6	卡勒姆科学中心	4	7.84	2020.2
7	中国工程物理研究院	4	7.84	2021.2
8	意大利国家新技术、能源与可持续发展机构	4	7.84	2021.5
9	中山大学	3	5.88	2019.7
10	鲍曼莫斯科国立技术大学	3	5.88	2020.0

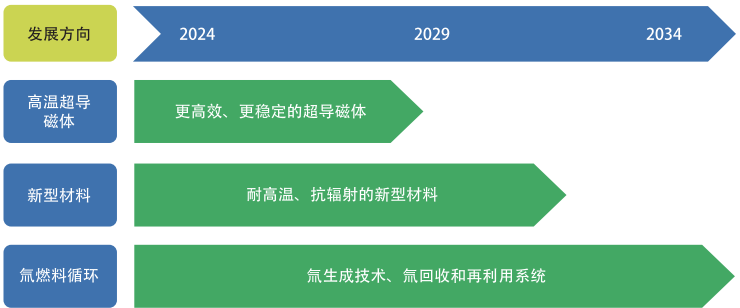


图 5.6 “紧凑型核聚变及氦资源转换原理”工程研究前沿的发展路线

5.1.2.3 基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术

高分辨率遥感成矿信息提取技术是一项依赖于遥感影像处理、地质信息分析和深度学习的综合性技术，广泛应用于地质矿产勘探领域。其核心是利用深度学习算法从高分辨率遥感影像中自动识别和提取地质解译断裂构造、矿化信息以及矿物资源等相关特征，结合多源数据融合与特征优化，实现对潜在矿化区域的精准定位与分类，从而提升矿产勘探的效率和准确性，辅助地质勘探和资源评价。基于遥感影像的成矿信息提取技术经历了从传统影像解译到自动化、多源数据融合，再到智能化深度学习算法的演变。最初的遥感成矿信息提取依赖于专家经验和人工解译，随着高空间、高光谱遥感数据的广泛应用，成矿信息的获取逐步转向基于像素和特征的自动化分析，通过新的 RGB 组合、波段比和选择性主成分分析等方法突出并提取与矿物相关的遥感蚀变，实现矿物间接识别。近年来，随着搭载高空间和高光谱分辨率光学传感器遥感卫星的持续发射以及无人机遥感技术的普及，弱监督目标检测、语义分割、变化检测等方法被广泛应用于成矿信息的高精度识别与提取。在此背景下，“人工智能 + 遥感大数据”模式成为成矿信息提取领域的主流方向。主要研究内容包括高分辨率影像的“空间 - 光谱 - 时相”联合特征提取、基于深度学习的自动化矿化信息提取算法等。这些高精度、智能化的成矿信息提取技术在矿产资源勘探、国家战略资源保障等方面具有重要的现实意义和战略价值。

中国在实现新一轮找矿突破战略行动中，强调推进星 - 空 - 地 - 深一体化遥感找矿勘查体系示范与应用，从三个层面开展了研究：一是针对成矿带，利用卫星遥感数据，特别是近些年发射的高光谱卫星数据，选择找矿远景区；二是在重点研究区，利用航空或是无人机遥感数据进行选点或圈定靶区；三是在矿田尺度，利用地面或岩芯光谱仪开展地表或岩芯的精细蚀变矿物填图，分析成矿环境，圈定热液中心，为后续找矿部署提供技术依据。

“基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术”工程研究前沿中，核心论文数排名第一的国家是中国，论文占比达 95.24%，其他国家占比均低于 10.00%；核心论文数排名第二的是意大利，论文占比为 9.52%（表 5.11）。在核心论文数排名前十的机构中，中国占 8 个，其中武汉大学、中国科学院和北京航空航天大学位列前三（表 5.12）。中国也是该工程研究前沿中施引核心论文产出最多的国家，论文占比为 73.04%，第二名是美国，仅占 5.98%（表 5.13）。施引核心论文的主要产出机构中，前三名为武汉大学、中国科学院和西安电子科技大学（表 5.14）。该领域的合作以中国为主，意大利、美国和荷兰等国围绕中国开展合作（图 5.7），机构间的合作研究集中在武汉大学、南京信息工程大学、意大利航天局和中国矿业大学之间（图 5.8）。

未来 5~10 年内，基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术将迎来一系列重要发展趋势：① 深度学习模型的优化与创新，将出现更多针对遥感数据特点优化的深度学习模型，如轻量化模型和自监督学

表 5.11 “基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 / %	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	20	95.24	4 037	201.85	2020.6
2	意大利	2	9.52	466	233.00	2020.5
3	美国	2	9.52	69	34.50	2022.0
4	荷兰	1	4.76	623	623.00	2019.0
5	澳大利亚	1	4.76	61	61.00	2020.0

表 5.12 “基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	武汉大学	9	42.86	2 248	249.78	2020.1
2	中国科学院	3	14.29	368	122.67	2020.7
3	北京航空航天大学	2	9.52	795	397.50	2020.5
4	南京信息工程大学	2	9.52	468	234.00	2020.0
5	中国矿业大学	2	9.52	277	138.50	2020.0
6	新疆大学	2	9.52	253	126.50	2021.5
7	首都师范大学	2	9.52	194	97.00	2021.5
8	乌特勒支大学	1	4.76	623	623.00	2019.0
9	地理空间技术协同创新中心	1	4.76	347	347.00	2020.0
10	意大利航天局	1	4.76	347	347.00	2020.0

表 5.13 “基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 173	73.04	2022.1
2	美国	96	5.98	2021.8
3	印度	58	3.61	2022.4
4	英国	50	3.11	2022.0
5	德国	47	2.93	2021.8
6	意大利	42	2.62	2021.8
7	韩国	40	2.49	2021.8
8	加拿大	33	2.05	2021.8
9	法国	24	1.49	2021.8
10	澳大利亚	22	1.37	2021.9

表 5.14 “基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	武汉大学	179	26.09	2021.9
2	中国科学院	166	24.20	2022.0
3	西安电子科技大学	55	8.02	2022.2
4	中国地质大学	49	7.14	2022.0
5	南京信息工程大学	46	6.71	2021.8
6	中山大学	40	5.83	2022.0
7	西北工业大学	34	4.96	2021.8
8	北京航空航天大学	31	4.52	2022.0
9	南京工业大学	29	4.23	2022.1
10	自然资源部	29	4.23	2022.2

习模型，提高成矿信息提取的精度与效率；② 多源数据融合与联合分析，“时－空－谱”联合分析模式，实现更全面的成矿信息提取；③ 无人机与地面遥感协同应用，通过高精度数据采集与成矿特征分析，增强找矿精度；④ 星载遥感、航空遥感、地面勘测和深部探测融合形成一体化找矿体系（星－空－地－深一体化遥感找矿体系），提高不同尺度成矿信息的提取能力和应用水平；⑤ 遥感大数据与人工智能的深度结合，实现海量数据的高效分析与挖掘。随着这些发展趋势的不断推动，基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取的应用前景将更加广泛，为资源管理、成矿预测、矿产资源潜力评价提供更多有力工具。图 5.9 所示为“基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术”工程研究前沿的发展路线。

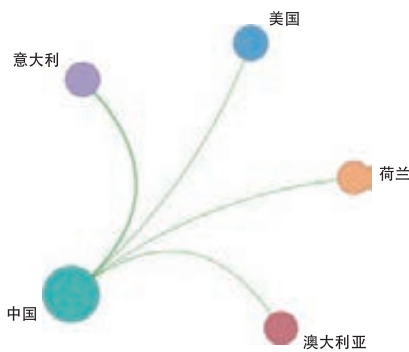


图 5.7 “基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

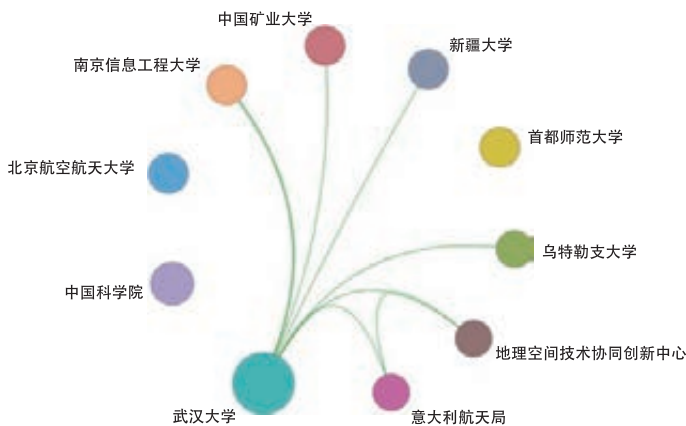


图 5.8 “基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

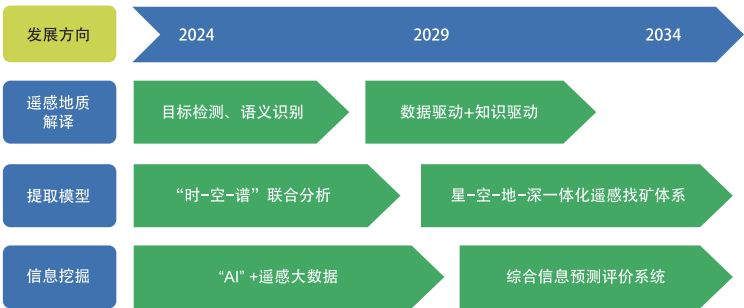


图 5.9 “基于深度学习的高分辨率遥感成矿信息提取技术”工程研究前沿的发展路线

5.1.2.4 油气与风-光-热-储多能融合开发利用方法

多能融合开发利用是构建清洁低碳、安全高效新型能源体系的关键途径，同时也是解决油气勘探开发中能源问题的必然趋势。在油气田开发场景下，将风能、太阳能、地热能等新能源与传统化石能源相结合，实现多能协同互补，进一步促进油气的稳步增产与高效开发，从而推动油气行业的可持续发展与绿色低碳转型。

在多能融合领域，美国、日本等国家积极发布相关政策予以支持，如瑞典早在 1989 年即建成太阳能和生物质联合供热项目。近年来，风-光-热-储多能融合开发利用因涉及新能源与储能的协同优化而成为研究热点。研究主要针对由光伏、风力电站配以储电电池组成的系统，或者配以电加热和储热装置组成的系统，优化设备装机容量及分析系统发电经济性能。伴随着能源供应短缺、世界经济前景不明朗等不确定因素增加，在油气田场景下推进风-光-热-储多能融合发展将为油气行业高质量发展提供有效手段。充分利用风电开发为油气平台提供绿色电力，形成风电与油气田区域电力系统互补供电模式，提升新能源就地消纳能力。在油气矿区及其周边地区，利用太阳能聚光集热及储热技术，充分发挥地热储能在调峰调频、应急备用、容量支撑等方面的多元功能，促进地热在电源侧和油气勘探开发用户侧的多场景应用，有序推动储能与新能源的协同发展。在原油开采后期，吨油生产用能约为 140~160 kW·h，其中电费支出占开发成本的 30% 以上，而风-光-热-储多能融合开发利用方法可以以低于国家电网的交易电价就地消纳光伏和风电电力，实现油气开发效果最佳化、经济效益最大化和安全环保科学化。

油气与风-光-热-储多能融合开发利用方法的研究方向是提高风能、太阳能资源预报准确度和风电、光伏发电功率预测精度，提升风电、光伏发电适应电力系统扰动能力，拓展地热储能调峰、调频等功能，支撑油气生产平稳运行。此外，针对油气田应用场景，因地制宜优化系统设备配置方案，实现多能协同经济供应，以获得经济供能的风光储系统。并针对光照强度、风速、气温等天气条件以及能源需求实时波动问题，制定相应运行策略，优化系统参数调控方法，合理分配电能和热能，从而实现系统能源的灵活、可靠供应。

“油气与风-光-热-储多能融合开发利用方法”工程研究前沿中，核心论文数排名前三的国家是中国、美国和德国（表 5.15 和图 5.10）；核心论文数排名靠前的机构为中国科学院、清华大学和新加坡国立大学（表 5.16）；机构间的合作主要集中在中国科学院、清华大学、苏黎世联邦理工学院、剑桥大学、劳伦斯伯克利国家实验室、加州大学伯克利分校、麻省理工学院、科罗拉多矿业学院之间（图 5.11）。施引核心论文数排在前三位的国家是中国、美国和澳大利亚（表 5.17）。施引核心论文数排名靠前的机构是中国科学院、清华大学、天津大学、郑州大学和中国科学技术大学（表 5.18）。

多能协同能够促进新能源与传统能源行业的融合发展，是构建清洁低碳、安全高效新型能源体系的重要手段。以清洁替代为主导方式，在产能利用井场土地、废弃油气井（场）等布置各类绿电装置，实现油气田绿电替代率的最大化；在生产方式、工艺流程、管理制度上进行变革，包括由稳定生产调整为间抽、间注、间歇气举等非稳定工况运行，通过运行调度决策方法实现低成本、大规模、高效率地消纳绿电；拓展不同类型储能的互补调节能力，达到电/热/氢储能的协同优化，实现油田井场的储能综合优化。

油气与可再生能源（风能、太阳能等）及储热等由独立系统内作用机制与优化方法，逐渐形成油气与风-光-热-储的协同作用机制与优化方法，随着信息技术的发展，油气与风-光-热-储融合开发方法向着高效模拟、优快决策、智能调控的方向发展。预计到 2029 年形成油气与新能源应用可行性方案，将传统油气与新能源结合，构建多元化、宽尺度的储能技术的应用模式，到 2034 年完成风-光-热-储多能协同的油气生产协同优化与控制方法，形成新能源+油气田智能开采、废弃井地热能源提取、综合能源优化利用等“低碳、智能”体系，保障油气田增产稳产、节能减排、绿色低碳（图 5.12）。

表 5.15 “油气与风－光－热－储多能融合开发利用方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	121	38.78	18 982	156.88	2019.9
2	美国	57	18.27	12 905	226.40	2019.9
3	德国	35	11.22	8 282	236.63	2019.8
4	英国	31	9.94	6 135	197.90	2019.8
5	澳大利亚	23	7.37	6 114	265.83	2020.1
6	印度	20	6.41	2 779	138.95	2020.6
7	加拿大	18	5.77	3 273	181.83	2020.6
8	沙特阿拉伯	16	5.13	1 729	108.06	2020.2
9	新加坡	14	4.49	3 216	229.71	2020.1
10	意大利	14	4.49	2 251	160.79	2020.1

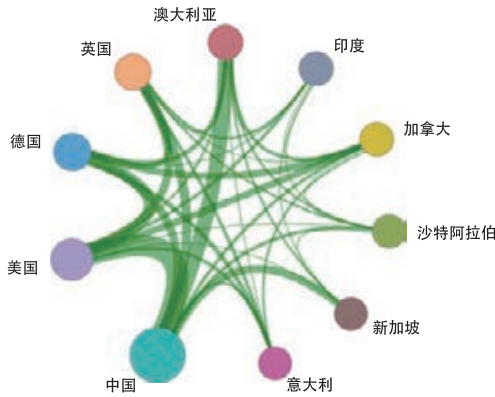


图 5.10 “油气与风－光－热－储多能融合开发利用方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 5.16 “油气与风－光－热－储多能融合开发利用方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	16	5.13	2 972	185.75	2020.3
2	清华大学	9	2.88	1 654	183.78	2019.7
3	新加坡国立大学	9	2.88	1 547	171.89	2020.1
4	苏黎世联邦理工学院	7	2.24	1 240	177.14	2020.9
5	天津大学	7	2.24	915	130.71	2019.4
6	剑桥大学	6	1.92	1 979	329.83	2020.2
7	劳伦斯伯克利国家实验室	6	1.92	1 063	177.17	2019.2
8	加州大学伯克利分校	6	1.92	988	164.67	2019.0
9	麻省理工学院	6	1.92	896	149.33	2021.0
10	科罗拉多矿业学院	5	1.60	2 786	557.20	2019.8

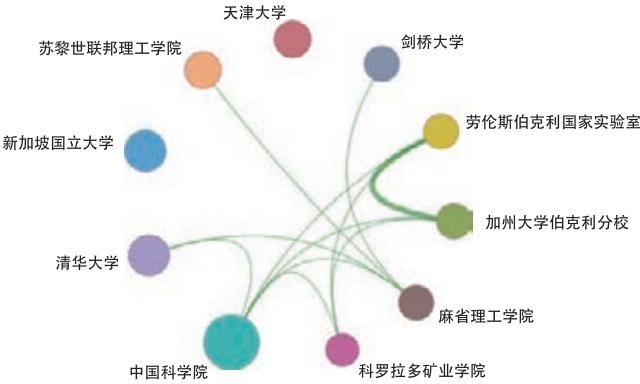


图 5.11 “油气与风 – 光 – 热 – 储多能融合开发利用方法” 工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 5.17 “油气与风 – 光 – 热 – 储多能融合开发利用方法” 工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	2 864	46.23	2020.7
2	美国	813	13.12	2020.6
3	澳大利亚	462	7.46	2020.8
4	英国	387	6.25	2020.9
5	印度	320	5.17	2021.0
6	德国	320	5.17	2020.6
7	韩国	270	4.36	2020.9
8	日本	203	3.28	2020.5
9	沙特阿拉伯	202	3.26	2021.1
10	加拿大	179	2.89	2021.0

表 5.18 “油气与风 – 光 – 热 – 储多能融合开发利用方法” 工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	359	27.24	2020.7
2	清华大学	139	10.55	2020.9
3	天津大学	124	9.41	2020.7
4	郑州大学	103	7.81	2020.8
5	中国科学技术大学	101	7.66	2020.9
6	南洋理工大学	84	6.37	2020.6
7	昆士兰大学	84	6.37	2020.3
8	深圳大学	84	6.37	2020.9
9	新加坡国立大学	82	6.22	2020.8
10	浙江大学	81	6.15	2020.8

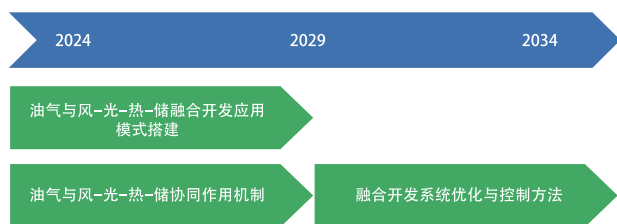


图 5.12 “油气与风-光-热-储多能融合开发利用方法”工程研究前沿的发展路线

5.2 工程开发前沿

5.2.1 Top 12 工程开发前沿发展态势

能源与矿业工程领域研判的 Top 12 工程开发前沿见表 5.19。它们涵盖了能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程 4 个学科。其中，“高比能长寿命低成本固态电池技术”“热化学储能与固态储氢装置及系统研发”“大功率宽范围双向充电技术与装备”属于能源和电气科学技术与工程领域；“基于同位素电源的核电池开发”“核辐射无人机寻源系统”“核反应堆分散控制系统的验证方法、验证装置及验证系统”属于核科学技术与工程领域；“复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统”“花岗岩型铀矿深部有利成矿空间识别及定位技术”“页岩气井产能实时在线预测系统”属于地质资源科学技术与工程领域；“万米深地复杂地层钻井技术与设备研发”“煤层气与煤炭资源共采技术”“二氧化碳矿化充填封存一体化技术”属于矿业科学技术与工程领域。各开发前沿涉及的核心专利在 2018—2023 年的公开情况见表 5.20。

（1）高比能长寿命低成本固态电池技术

固态电池采用固态电解质替代传统电池中的电解液和隔膜，具有更大的能量密度、更长的使用寿命和更高的安全性。进一步提升固态电池能量密度可增加电动汽车的续航里程，并进一步支撑电动重卡和电动飞机的开发。具体而言，能量密度为 400 Wh/kg、2 000 圈稳定循环的固态电池可将电动汽车续航里程提升至 1 000 km，是纯电动车普及的重要支撑技术。此外，固态电池可大幅降低飞机质量，提升飞机推重比。上述固态电池亦可驱动双座轻型飞机几千次飞行，是开拓低空经济领域、实现现代交通电动化革命的关键技术。然而，固态电池能量密度与循环寿命受到界面不稳定、锂枝晶生长与电解质衰退的影响。并且，固态电解质合成工艺复杂、产率低，一般在每千克 190 美元以上，远高于每千克 50 美元的商业化门槛。通过本征材料改性与制造工艺优化可进一步提升固态电池能量密度，增长循环寿命，降低合成成本。本征材料改性主要从正极材料改性、电解质结构设计、固态电解质钝化层方向发展。电解质的开发和制造工艺优化主要发展方向是成膜工艺改进、大规模量产技术与超快精准合成技术。其中，超快精准合成技术可以在短短几秒内实现多组分甚至高熵固态电解质的精准合成，不仅能高效筛选探索具有特定目标组分的电解质材料，而且可实现多元素准确、均匀地合成单一纯相材料，是未来固态电池材料开发和工业化合成的重要趋势。

（2）基于同位素电源的核电池开发

同位素电源是基于放射性同位素衰变产生的热能或者射线粒子，利用静态或者动态能量转换技术，将衰

表 5.19 能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引数	平均被引数	平均公开年
1	高比能长寿命低成本固态电池技术	328	648	1.98	2021.2
2	基于同位素电源的核电池开发	554	1 028	1.86	2020.8
3	复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统	1 070	9 413	8.80	2020.7
4	万米深地复杂地层钻井技术与设备研发	199	4 026	20.23	2019.8
5	热化学储能与固态储氢装置及系统研发	552	655	1.19	2021.9
6	大功率宽范围双向充电技术与装备	812	2 078	2.56	2020.3
7	核辐射无人机寻源系统	638	5 917	9.27	2020.2
8	核反应堆分散控制系统的验证方法、验证装置及验证系统	203	1 199	5.91	2019.9
9	花岗岩型铀矿深部有利成矿空间识别及定位技术	580	8 062	13.90	2020.0
10	页岩气井产能实时在线预测系统	421	4 720	11.21	2020.1
11	煤层气与煤炭资源共采技术	73	1 138	15.59	2019.9
12	二氧化碳矿化充填封存一体化技术	508	1 198	2.36	2020.8

注：前沿来源包括三类，即数据挖掘、专家提名、数据挖掘 & 专家提名；序号 4、7~9、11 为数据挖掘前沿，3 和 10 为数据挖掘 & 专家提名前沿，其余为专家提名前沿。

表 5.20 能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	高比能长寿命低成本固态电池技术	28	35	39	54	85	87
2	基于同位素电源的核电池开发	77	84	67	97	121	108
3	复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统	111	143	225	197	284	110
4	万米深地复杂地层钻井技术与设备研发	40	53	38	38	25	5
5	热化学储能与固态储氢装置及系统研发	20	17	40	86	138	251
6	大功率宽范围双向充电技术与装备	155	181	118	118	117	123
7	核辐射无人机寻源系统	107	124	132	114	122	39
8	核反应堆分散控制系统的验证方法、验证装置及验证系统	45	52	40	25	30	11
9	花岗岩型铀矿深部有利成矿空间识别及定位技术	104	127	137	98	97	17
10	页岩气井产能实时在线预测系统	96	91	59	61	59	55
11	煤层气与煤炭资源共采技术	16	10	23	12	11	1
12	二氧化碳矿化充填封存一体化技术	70	66	72	111	84	105

变能转换为电能的核能源装置。同位素电源具有寿命长、能量密度高、可靠性高、环境适应性强、自持免维护等优点，是极端特殊环境下电力长期供应的理想选择，已被应用于空间探测、深海与极地勘探、极偏远地区的电力保障。同位素电源的技术方向主要集中在温差电源、辐伏电源、热光伏电源、辐光伏电源和动态斯特林电源的研究上。其中，温差电源的可靠度和技术成熟度最高，已实现广泛应用；辐伏电源被认为最有望实现微型化与微机电系统（MEMS）的集成，但仍需提升功率和功率密度；动态斯特林电源具有较高的系统效率，但需要解决运动部件的可靠性和寿命问题。未来，针对空间、深海和无线网络的多领域型谱化应用需求，同位素电源的发展将聚焦于四个方面：采用模块化热源结构，提升温差电源的安全性和多任务适配性；开发高效热电材料和器件，提升温差电源的转换效率和经济性；突破半导体芯片设计与堆栈集成

技术,提升辐伏电源功率等级、转换效率和功率密度;优化自由活塞设计与工艺,解决动态斯特林电源的可靠性与寿命问题。

(3) 复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统

随钻智能探测与识别系统是针对复杂地质条件设计的一种先进钻探技术,旨在提高钻探过程中的地层识别精度和作业效率。该系统融合了地质学、控制工程学、机械力学、数据分析及智能算法等多种理论与技术,通过实时监测与分析钻井过程中的各种参数,实现对地质结构、地层岩性、含油气性等特征的智能探测与精准识别。

主要技术方向包括随钻测量、随钻测井、随钻声波测井、随钻地震等随钻测量技术,以及利用先进的智能算法对收集到的数据进行处理和分析。通过这些技术,系统能够实时获取井下各种物理参数,如温度、压力、电阻率、声波速度等,从而为地层评价和钻井决策提供关键信息。

未来发展趋势上,将不断引入人工智能、大数据、物联网等新技术,提高数据处理速度和精度,增强系统的智能化水平。技术创新将聚焦于提升系统对复杂地质环境的适应性,解决现有技术中识别准确性不高、数据传输和处理速度较慢等问题。此外,随着智能钻井技术的整体发展,智能钻机、智能钻头、智能钻杆等硬件设施的研发与应用也将进一步推动随钻智能探测与识别系统的完善。

(4) 万米深地复杂地层钻井技术与设备研发

万米深地复杂地层钻井技术与设备研发是指针对地球内部深度达到1万米以上的复杂地质环境,研发和应用一系列先进的钻井技术与装备,以克服高温高压、复杂地层等极端条件,实现高效精准钻探的目标。万米超深层油气科学探索是践行国家“四深”探测计划的重要任务,能够更好地抢占深地科技创新制高点。塔里木油田的“深地塔科1井”是我国第一口垂深超过1万米的井,其钻探克服了超高压、超高温和超重载荷等众多问题,形成了万米特深井安全高效钻完井等核心技术。主要技术方向包括:超深井钻机装备;极限深度井身结构优化与拓展;高效破岩与钻井提速技术;耐高温钻完井工作液;钻井液降摩阻技术;高温高压固井技术;复杂状况防控与处置技术等。其发展趋势包括:强化地质工程一体化,提高对复杂地质环境的探测精度;提高深地钻井设备的智能化与模块化水平,实时诊断、预测和调控;研发耐高温、高压和腐蚀的高性能材料,增强其极端条件下的耐用性;创新钻井提速方法和工具,提高破岩效率。

(5) 热化学储能与固态储氢装置及系统研发

热化学储能是一种利用可逆气固化学反应进行热量存储与释放的储能技术。合金与氢气的可逆化学反应也是一种固态储氢技术,镁基金属/钛基金属等合金与氢气反应形成金属氢化物实现氢气存储并释放热量,再对氢化物进行加热后进行分解反应释放氢气,因此可视为一种集热化学储热与固态储氢于一体的技术。现有研究多将热化学储热与固态储氢分开研究,各自利用,但是储放氢过程受到储放热及传热过程的制约,相互影响,且化学反应热的大小对固态储氢的储能效率有着极大的影响。未来如果协同考虑储放氢与储放热过程,实现氢热联供,将是一种提高能源利用效率的有效方法。装置及系统的设计优化是该技术面临的重要挑战,需要综合考虑高传热性能、高系统利用效率、反应循环稳定性等因素进行系统集成,并从化学、传热学、热力学、机械设计等多学科进行协同考虑。这些技术将为储氢和储热领域带来新的突破。

(6) 大功率宽范围双向充电技术与装备

大功率宽范围双向充电技术是电动汽车与电网之间进行双向直流(DC)/交流(AC)变换的技术,其实现依赖于大功率双向充电桩。大功率双向充电桩电网接入侧交流输入、输出电压一般为单相220V或三

相 380 V, 电动汽车接入侧直流输入、输出电压范围涵盖 200~1 000 V, 双向交互功率最高可达 240 kW。大功率宽范围双向充电技术提升了能源的利用效率, 增强了电动汽车的灵活性和经济性, 为车网互动提供了新的场景。

该领域的主要技术方向包括: 双向 AC/DC 和 DC/DC 变换技术; 双向充电功率和电压范围提升技术; 耐压、绝缘以及散热技术; 双向充电集成管理技术; 双向充电计量技术; 电动汽车、双向充电桩与电网间通信协议设计; 双向充电控制策略优化等。

该领域未来发展趋势包括: 技术层面, 研究高效大功率双向交、直流变换技术; 装备层面, 结合液冷技术, 提升大功率双向充电桩散热效率, 减小双向充电枪线体量, 提高装备可靠性和使用寿命; 系统层面, 搭建大功率双向充电能量管理平台, 实现电动汽车、充电桩与电网间信息互通和协同控制。

(7) 核辐射无人机寻源系统

伴随着无人机商用化日趋成熟, 利用无人机搭载辐射监测仪进行辐射监测或放射源搜寻, 可以实现高效搜寻辐射事故放射源并降低寻源人员受辐照风险, 能够应用于核事故污染情况监测、辐射场地调查和放射源搜寻等领域。基于小型无人旋翼机的良好机动性, 结合核探测、信号处理、GPS 定位、无线通信等技术实现了大范围环境放射性实时监测, 并通过无线数传模块实现了机载监测系统与地面控制站的数据交互, 上位机软件实时获取测量数据并处理后, 显示当前测量环境的辐射热点图。系统核心设备和技术包括辐射探测设备, 可以同时实现环境剂量率和能谱测量。例如采用寻源迭代算法对放射源进行精确定位; 采用克里金插值算法进行剂量率绘图, 勾勒出放射性环境下的热点区域, 对于放射源的搜寻工作以及放射性泄漏排查都具有重要的意义。

(8) 核反应堆分散控制系统的验证方法、验证装置及验证系统

分布式控制系统是由过程控制级和过程监控级组成的以通信网络为纽带的多级计算机系统。作为核电站的中枢神经系统, 分布式控制系统分为安全级分布式控制系统和非安全级分布式控制系统两大类。其主要功能是对核电站运行过程中的各个参数进行实时监控, 包括对核反应堆的保护和控制等, 这对于确保核电站安全可靠和稳定运行具有非常重要的作用。按照核法规 HAF 要求, 安全级分布式控制系统的验证与确认是确保软件安全性与可靠性的必要环节。验证仿真平台的设计特点体现在采用先进、成熟且开放性良好的数字化监控系统组态软件, 建立准确的仿真模型, 以准确模拟被控系统的动态运行特性, 并为控制系统提供必要的实时运行反馈, 形成控制闭环; 这些仿真模型包括相关的物理堆工模型、电气模型、热工水力模型和控制仿真模型, 通过集成仪表控制主控室人机界面设计、逻辑图及模拟图部分控制系统功能自主设计仿真平台, 根据验证需求动态、实时地对核电厂基本物理现象和动态过程进行模拟仿真与修改。

(9) 花岗岩型铀矿深部有利成矿空间识别及定位技术

铀资源是国家军民两用战略资源, 关乎国家战略安全和能源安全。花岗岩型铀矿是我国重要的工业铀资源类型, 但找矿深度有限, 已探明花岗岩型铀矿勘查深度大部分局限于 500 m, 近年来达到 1 000~1 200 m, 国外同类型铀矿勘查深度大于 2 000 m。花岗岩型铀矿深部有利成矿空间识别及定位技术的主要研究方向包括深部有利成矿空间平面及垂向定位地质示踪技术、深部地质结构及铀成矿条件地球物理探测技术、多元成矿信息综合提取技术、三维地质-成矿-勘查模型构建技术、深部铀资源高效综合预测评价技术等方面。该技术体系在多个花岗岩型铀矿找矿勘查中取得了显著成效, 在诸广南部铀矿田油洞地区, 成功在 950 m 深度发现厚大工业矿体, 并在 1 550 m 深度发现了我国目前最深工业铀矿, 刷新了我国工业铀矿发现的深

度纪录。随着大数据、人工智能等找矿预测技术的发展与应用,花岗岩型铀矿深部有利成矿空间及定位技术的未来主要发展趋势包括:大深度隐伏矿体元素-同位素地质识别技术、深部弱异常信息增强提取技术、高精度地球物理探测技术、基于大数据的深部铀资源智能化找矿预测技术、大深度花岗岩型铀矿四维建模与预测评价技术等。

(10) 页岩气井产能实时在线预测系统

页岩气井产能实时在线预测系统是一种集成了数据采集、处理、分析与预测功能的综合性系统。该系统旨在通过实时监测页岩气井的生产数据,建立量化评价模型,对页岩气井的产能进行快速、准确的预测。这种实时在线预测可提高预测效率和精度,为页岩气开发提供重要依据。

主要技术方向包括:①建立页岩气井目标产量数据集,利用神经网络训练获得动态产能预测模型,确定页岩气井在所述目标时刻的产量;②综合考虑裂缝建模、动态模拟、历史拟合到产能预测的产能评价方法,采用马尔可夫链-蒙特卡罗智能化历史拟合算法,结合嵌入式离散裂缝技术耦合数值模拟器形成了一体化页岩气井产能评价模型,预测页岩气井产能;③综合考虑地质因素与工程因素,整合页岩气开采全周期地质、钻井、压裂、生产等数据,基于机器学习对页岩气井产量进行了评价与预测。

融合机器学习、深度学习等先进技术与统计学理论模型,提高页岩气井产能预测的精度和效率,并实现动态、分阶段评价与预测是未来发展趋势。

(11) 煤层气与煤炭资源共采技术

煤层气(coal-bed methane, CBM)与煤炭资源共采技术是近年来在煤炭开采领域逐渐兴起的前沿技术,旨在实现煤层气与煤炭的高效、经济和环保的联合开采,以提高资源利用率,减少环境影响,并为能源结构转型作出贡献。主要研究方向包括:开采技术集成、煤层气资源评估、水文地质影响分析、智能监测与控制技术、经济性与可持续性研究。

未来,煤层气与煤炭资源共采技术将朝着智能化、绿色化和系统化的方向发展。在智能化方面,随着传感器技术和数据处理能力的提升,智能监测与控制系统将更加普及,有助于实现开采过程的实时监控和优化调节。在绿色化方面,技术的发展将更加注重环境保护,力求在开采煤层气的同时,减少对生态环境的影响,避免水土流失和地下水污染。在系统化方面,将推动多学科的交叉融合,结合地质、工程、环境科学等领域的研究成果,形成一套系统的共采技术框架,优化资源的综合开发利用。

(12) 二氧化碳矿化充填封存一体化技术

二氧化碳矿化充填封存一体化技术是将二氧化碳封存技术与充填开采技术进行有机结合,实现二氧化碳的大规模化充填封存利用的技术。该技术通过矿化反应将二氧化碳固定在充填体中,不仅能够有效减少二氧化碳气体排放,提高充填体强度,降低充填成本,还可以减少因固体废弃物排放不当对空间的占用和环境的破坏,减轻矿山开采造成的岩层移动、地表沉陷等问题。二氧化碳矿化充填封存一体化技术主要包括固碳充填材料的制备、充填料浆的输送以及充填体强度的形成三大环节。该过程主要包括矿化反应、料浆输运、二氧化碳在充填材料内扩散等子过程。二氧化碳矿化充填封存一体化技术的主要发展方向包括:①固液气三相管道输送研究;②二氧化碳矿化机理研究;③矿化充填体力学特性研究;④二氧化碳矿化强化技术;⑤二氧化碳充填材料制备技术;⑥物理-化学协同封存二氧化碳机理研究;⑦二氧化碳充填采矿方法研究等。二氧化碳矿化充填封存一体化技术的主要核心目标是增加二氧化碳封存量以及降低充填成本,在保护环境的同时节省成本。

5.2.2 Top 4 工程开发前沿重点解读

5.2.2.1 高比能长寿命低成本固态电池技术

固态电池采用固态电解质替代电解液和隔膜，为锂金属负极的使用提供了可能，从而大大提高了锂离子电池的能量密度，是进一步提升电动车市场渗透率和促进交通工具电动化革命的必要途径。现阶段，电极-电解质界面不稳定、锂枝晶生长与电解质随电池循环衰退是影响固态电池能量密度与服役寿命的关键因素，也是导致电池容量衰减与安全问题的主要原因。此外，固态电解质合成工艺复杂、产率低、生产成本低，成为固态电池商业化的主要障碍。

本征材料改性与制造工艺优化可进一步提升固态电池能量密度、增长循环寿命、降低合成成本。本征材料改性主要从正负极材料改性、电解质结构设计、原位界面钝化层等方向进行。电极表面包覆导电材料，掺杂 Si、C 等元素，以及减小材料颗粒粒径，有利于缓解界面副反应，提升锂离子扩散速率，提高固态电池能量密度。优化固态电解质中离子传输的定向和连续界面通道，构建多层异质电解质结构，掺杂 Zn、F 等元素以提升电解质电化学稳定性，有助于减少锂枝晶生长，减缓电解质衰退，延长电池循环寿命。通过设计富氟化锂、氮化锂的原位界面钝化层，可降低电池内阻、缓解电解质衰退与减缓枝晶生长，提升电池循环性能与安全性能。然而，由于固态电池内部与界面电化学等过程具有鲜明的化学场、电场、力场耦合特征，单一设计难以兼顾多参数的全面优化。综合考量多场耦合效应，构建真实工况下固态电解质的实验环境与理论模型，可有效揭示其实际应用下的失效、失控机制，为设计固态电池能量密度、优化循环寿命提供有力支持。

制造工艺优化主要包括成膜工艺改进、大规模量产技术与超快精准合成技术三个方面。成膜工艺分为湿法工艺和干法工艺，其中湿法工艺成膜操作简单、工艺成熟、易于规模化生产，是目前最有希望实现固体电解质膜量产的工艺之一，但其工艺还需进一步研发。电解质大规模生产技术目前尚在探索中，高原料成本与均匀化合成是亟须突破的难关，业内预计将在 2025 年实现小批量生产，大规模商业化则需等到 2030 年左右。超快精准合成技术可以在短短几秒内实现多组分高熵固态电解质的超快合成，不仅能高效筛选探索具有特定目标组分的电解质材料，而且可实现多元素准确、均匀地合成单一纯相材料，是未来固态电池材料开发和工业化合成的重要趋势。

“高比能长寿命低成本固态电池技术”工程研究前沿中，中国以 149 件专利公开量位居世界第一，公开量比例为 45.43%，其次为日本、美国和韩国（表 5.21）。其中，美国与韩国的合作最多，中国主要与美国建立了合作（图 5.13）。专利产出较多的机构有丰田汽车公司、现代汽车公司、起亚汽车公司、松下集团、LG 化学有限公司、东风日产汽车公司、本田汽车公司、北京卫蓝新能源科技股份有限公司、三星电子有限公司、宝马汽车公司（表 5.22）。其中，现代汽车公司与起亚汽车公司的韩国本土合作最为密切，其他公司的合作相对较少（图 5.14）。

“高比能长寿命低成本固态电池技术”工程开发前沿的发展路线如图 5.15 所示，其在交通电气化、储能系统等领域具有广阔的应用前景。未来 5~10 年，该领域的重点发展方向是本征材料性能提升与大规模制造工艺。基于正负极材料改性、电解质结构设计和原位界面钝化层进一步提升固态电池能量密度与循环寿命，实现电池小型化与便携化。同时，电解质大规模量产技术、成膜工艺改进与超快精准合成技术将推动固态电池量产化进程，更好地服务于能源、动力等领域，提升社会经济效益。

表 5.21 “高比能长寿命低成本固态电池技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	149	45.43	200	30.86	1.34
2	日本	61	18.60	220	33.95	3.61
3	美国	45	13.72	99	15.28	2.20
4	韩国	43	13.11	65	10.03	1.51
5	德国	17	5.18	21	3.24	1.24
6	比利时	5	1.52	14	2.16	2.80
7	英国	4	1.22	15	2.31	3.75
8	法国	3	0.91	0	0.00	0.00
9	荷兰	2	0.61	11	1.70	5.50
10	西班牙	2	0.61	10	1.54	5.00

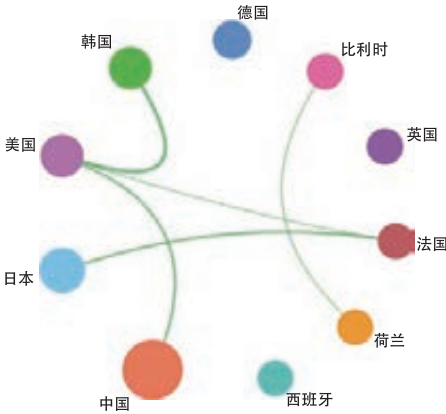


图 5.13 “高比能长寿命低成本固态电池技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 5.22 “高比能长寿命低成本固态电池技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	丰田汽车公司	17	5.18	41	6.33	2.41
2	现代汽车公司	15	4.57	47	7.25	3.13
3	起亚汽车公司	14	4.27	33	5.09	2.36
4	松下集团	11	3.35	76	11.73	6.91
5	LG 化学有限公司	9	2.74	6	0.93	0.67
6	东风日产汽车公司	8	2.44	0	0.00	0.00
7	本田汽车公司	7	2.13	17	2.62	2.43
8	北京卫蓝新能源科技股份有限公司	7	2.13	2	0.31	0.29
9	三星电子有限公司	7	2.13	1	0.15	0.14
10	宝马汽车公司	6	1.83	10	1.54	1.67

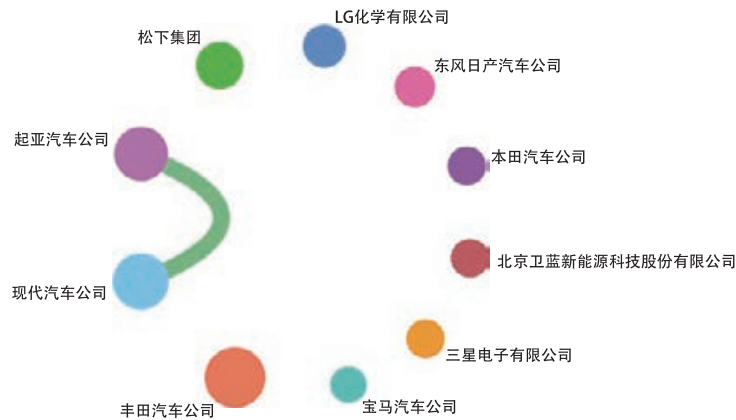


图 5.14 “高比能长寿命低成本固态电池技术” 工程开发前沿主要机构间的合作网络

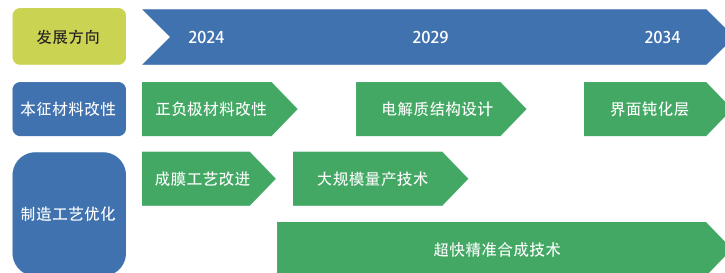


图 5.15 “高比能长寿命低成本固态电池技术” 工程开发前沿的发展路线

5.2.2.2 基于同位素电源的核电池开发

相比于化学和太阳能电池，同位素电源具有能量密度高、环境适应性强、自持免维护等优点，是太空探测、深海与极地勘探、无线网络最具潜力的电力供应技术。自 1961 年实现首台应用后，同位素电源就被美国、俄罗斯、英国等发达国家视为颠覆性技术并大力发展。针对空间、陆上和水下等不同应用环境，在 20 世纪开发出了系列化、型谱化的温差型同位素电源产品，例如：美国用于空间探测的“SNAP”“HWM-RTG”“GPHS-RTG”“MMRTG”钷-238 温差电源，俄罗斯用于远海与极地气象监测和导航的“Penguin”“Beta-M”“Senostav”锶-90 温差电源，以及英国用于航海灯标的“RIPPLE”锶-90 温差电源，功率覆盖瓦级至百瓦级，效率由 2% 提升至 6.7%。进入 21 世纪，为了满足深空和深海探索的电力需求，美国加快了下一代同位素电源的技术开发，包括：进行模块化热源（GPHS）的结构优化改进，提升空间应用安全性；开发方钴矿、半哈、锗硅等高温、高 ZT 值热电材料，提升电源系统效率；开发高效保温结构和高发射率涂层，提升系统热效率；开展动态斯特林转换电源研发和测试等。同时，针对未来无线感知网络和 MESM 系统集成电源，美俄也分别提出了微型钷和镍-63 辐电电源的研发计划。

目前，中国、美国、日本、俄罗斯和韩国是国际上同位素电源研发的主要力量（表 5.23）。其中，中国近十年发展迅速，并在 2018 年实现空间应用，专利公开量位列第一。美国起步最早，发展最完善，技术水平和成熟度最高，专利公开量位列第二。俄罗斯受经济形势影响发展缓慢，专利公开量已跌至第四。由于关系到国家战略核心技术，各国在同位素电源技术领域都遵循自主发展原则，目前未见相关合作报道。中国同位素电源的研发主要以中国原子能科学研究院为主（表 5.24）。目前亦未见机构间合作报道。

未来 10 年，针对不同场景需求，同位素电源的发展仍会以提升电源的功率等级、转换效率、功率密度和安全性为技术突破的重点，并逐步以模块化和标准化来提升同位素电源的多任务适配性，拓展其应用范围。图 5.16 所示为“基于同位素电源的核电池开发”工程开发前沿的发展路线。

表 5.23 “基于同位素电源的核电池开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	471	85.02	873	84.92	1.85
2	美国	30	5.42	90	8.75	3.00
3	日本	19	3.43	30	2.92	1.58
4	俄罗斯	9	1.62	2	0.19	0.22
5	韩国	6	1.08	5	0.49	0.83
6	英国	3	0.54	15	1.46	5.00
7	意大利	3	0.54	7	0.68	2.33
8	法国	2	0.36	0	0.00	0.00
9	印度	2	0.36	0	0.00	0.00
10	土耳其	2	0.36	0	0.00	0.00

表 5.24 “基于同位素电源的核电池开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国原子能科学研究院	27	4.87	78	7.59	2.89
2	西安交通大学	12	2.17	82	7.98	6.83
3	吉林大学	10	1.81	19	1.85	1.90
4	浙江大学	7	1.26	4	0.39	0.57
5	山东省齐鲁干细胞工程有限公司	6	1.08	21	2.04	3.50
6	银丰生物工程集团有限公司	6	1.08	4	0.39	0.67
7	东华理工大学	6	1.08	0	0.00	0.00
8	安徽古一生物科技有限公司	5	0.90	15	1.46	3.00
9	南京航空航天大学	5	0.90	13	1.26	2.60
10	Mitra RxDx 公司	5	0.90	7	0.68	1.40

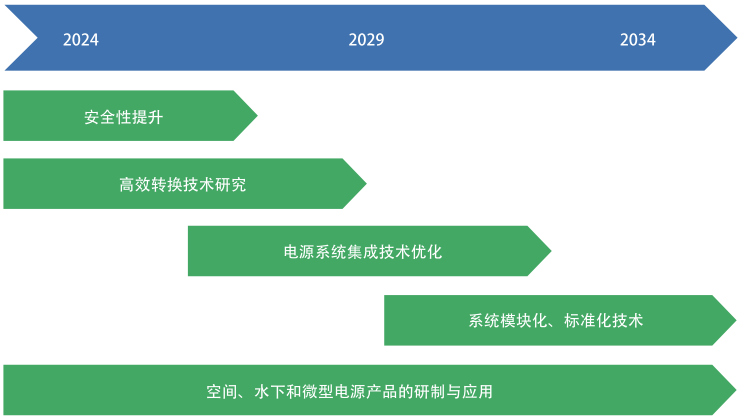


图 5.16 “基于同位素电源的核电池开发”工程开发前沿的发展路线

5.2.2.3 复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统

复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统的开发是石油、矿产和煤炭等地下资源勘探中的关键技术，尤其是在资源分布复杂、地层多变的环境中，该系统可以提高勘探效率和精度、减少钻井风险，优化开发方案，对地下资源的勘探开发具有重要意义。

随钻测量（MWD）和随钻测井（LWD）技术的初步发展可以追溯到 20 世纪 30 年代，最初的随钻测井是电测井方法，系统主要依赖于电磁波、声波等传统测量手段，数据传输速度较慢，实时性较差。随着遥感测量仪器的发展，人们逐渐开发了声波测井、放射性测井等多项随钻测井技术。电子技术和数据处理技术的发展，也使随钻测量和测井技术得到了显著提升。进入 21 世纪后，结合无线电通信和高精度传感器的随钻测量系统逐渐成熟，能够提供更实时、更精确的地质数据。近年来，大数据和机器学习等的兴起进一步推动了随钻智能探测与识别系统的发展。在复杂地质条件下，机器学习算法已被用来自动识别地质特征，优化钻井路径。尽管这方面的研究和应用尚处于初级阶段，但已经显示出巨大的潜力。

“复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统”工程研究前沿中，核心专利产出第一的国家是中国，专利公开量占比达 96.45%，其他国家均低于 2%；排名第二的是美国，公开量占比仅为 1.03%（表 5.25）。在核心专利的主要产出机构（表 5.26）方面，排名前十的机构均来自中国，其中中国中铁股份有限公司、山东大学和中国国家铁路集团有限公司排名前三。该领域的国家间合作集中在美国、法国和加拿大之间（图 5.17），机构间的合作研究集中在中国相关机构，包括中国中铁股份有限公司、中国国家铁路集团有限公司、大连理工大学等（图 5.18）。

未来 5~10 年内，“复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统”的发展方向主要集中在两个方向：一是传感技术革新，一方面采用有线钻杆等新型数据传输技术，保障在深井 / 超深井条件下井地数据传输效率，另一方面利用随钻智能导向钻井方法和人工智能技术提高钻井智能化水平，使其具备自主决策能力，从而减少对数据传输和人类专家的依赖；二是云计算和一体化平台发展，随着物联网和云计算的发展，随钻智能系统将实现远程操作和数据处理，同时将整合地质、钻井工程、实时监测和智能识别功能，形成一体化的平台。这将使钻井操作更加简便和高效，所有关键数据和决策支持功能都将集成在一个界面中（图 5.19）。

表 5.25 “复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	1 032	96.45	8 688	92.30	8.42
2	美国	11	1.03	274	2.91	24.91
3	日本	9	0.84	113	1.20	12.56
4	韩国	9	0.84	104	1.10	11.56
5	加拿大	3	0.28	85	0.90	28.33
6	澳大利亚	1	0.09	73	0.78	73.00
7	伊朗	1	0.09	39	0.41	39.00
8	法国	1	0.09	30	0.32	30.00
9	荷兰	1	0.09	30	0.32	30.00
10	瑞典	1	0.09	19	0.20	19.00

表 5.26 “复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国中铁股份有限公司	21	1.96	137	1.46	6.52
2	山东大学	18	1.68	137	1.46	7.61
3	中国国家铁路集团有限公司	17	1.59	65	0.69	3.82
4	中国矿业大学（北京）	11	1.03	69	0.73	6.27
5	深圳市道通科技股份有限公司	7	0.65	213	2.26	30.43
6	山东科技大学	7	0.65	161	1.71	23.00
7	大连理工大学	7	0.65	59	0.63	8.43
8	中国地质大学（武汉）	7	0.65	56	0.59	8.00
9	中国石油化工股份有限公司	6	0.56	87	0.92	14.50
10	中国航发南方工业有限公司	6	0.56	68	0.72	11.33

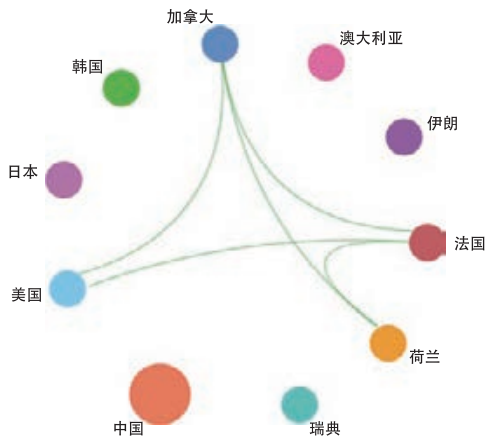


图 5.17 “复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统”工程开发前沿主要国家间的合作网络

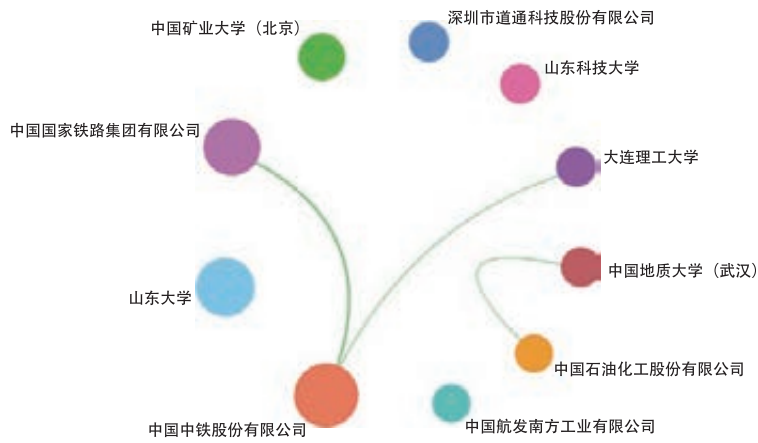


图 5.18 “复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统”工程开发前沿主要机构间的合作网络

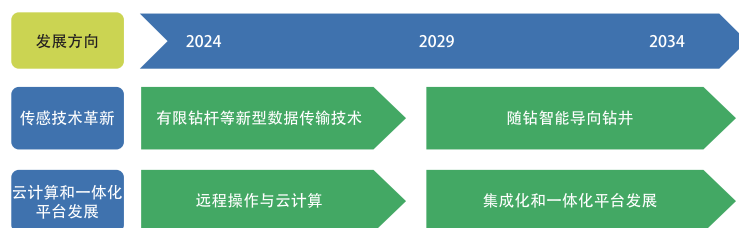


图 5.19 “复杂地质条件下随钻智能探测与识别系统”工程开发前沿的发展路线

5.2.2.4 万米深地复杂地层钻井技术与设备研发

万米深地复杂地层钻井技术与设备研发是一个高度具有挑战性的工程技术领域，旨在应对地球内部超过一万米深度的复杂地质环境。通过开发和应用一系列先进的钻井技术与设备，成功应对高温、高压以及复杂地层等极端条件，从而实现高效且精准的钻探目标。

万米深地复杂地层钻井技术与设备研发在资源开发、技术创新和国家能源安全方面具有多层次的重要战略意义。深地层中蕴藏着丰富的油气、矿产以及地热资源。据统计，世界新增油气储量的 60% 来自深部地层，我国 83% 的深地油气仍有待探明开发，万米深地钻井技术的发展有利于缓解我国油气资源短缺的局面，保障了我国能源供给的安全和稳定。此外，万米深地钻井技术的突破也为高强度耐高温钻井材料和智能化钻井设备的发展提供了广阔的研究和应用前景。

2016 年，习近平总书记提出了“向地球深部进军”的战略目标。2023 年 5 月 30 日，设计井深达 11 100 m 的“深地塔科 1 井”正式开钻，承担着探索地质结构与发现油气资源的双重任务。近年来，中国在地球深部资源探索方面取得了显著成就，屡次打破深度纪录，显示出我国在这一领域的雄厚实力。以塔里木油田为例，目前已有超过 1 700 口井的钻探深度在 6 000 m 以上，占全国总数的 80%。2024 年 3 月 4 日，中国石油在塔克拉玛干沙漠腹地的“深地塔科 1 井”钻探深度突破了 10 000 m，成为亚洲最深的直井，进一步巩固了中国在万米钻探技术领域的领先地位。目前，我国已成功研发出了适用于深度范围在 7 000~12 000 m 之间的超深井自动化钻机系列，以及 8 000/9 000 m 深度的四单根立柱钻机，并在实际应用中展现出显著成效。与此同时，52 MPa 高压钻井泵技术已成熟并广泛应用，而 70 MPa 超高压钻井泵的研制也已取得成功。此外，储能节能与能源管理技术、钻机集成控制技术、智能决策与支持技术以及低压钻井液自动化处理技术等方面，均已完成样机研制或软件开发，并进入工业性试验或小规模应用阶段。这些技术与设备的发展为我国深井钻井技术的持续发展提供了有力的支撑。

“万米深地复杂地层钻井技术与设备研发”工程开发前沿中，核心专利公开量排名前两位的国家是中国和美国，分别为 122 件和 54 件，占比分别为 61.31% 和 27.14%，其他国家相关技术的专利公开量占比均低于 6.00%；其中，中国的专利被引数最高，被引数比例达 53.35%，美国的专利被引数比例为 34.97%，其他国家相关技术的专利被引数比例均小于 7.00%；澳大利亚的平均被引数最高（表 5.27）。在主要产出机构（表 5.28）方面，埃克森美孚上游研究公司、中国石油大学（北京）、中国石油化工股份有限公司、西南石油大学、斯伦贝谢科技公司和中国石油天然气股份有限公司产出较多；其中，被引数比例超过 5.00% 的机构有埃克森美孚上游研究公司和中国石油化工股份有限公司。注重领域合作的国家有中国、美国、沙特阿拉伯、荷兰、加拿大和法国（图 5.20），机构间的合作研究集中在中国石油天然气股份有限公司、中国石油化工股份有限公司和中国石油大学（北京）（图 5.21）。

表 5.27 “万米深地复杂地层钻井技术与设备研发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	122	61.31	2 148	53.35	17.61
2	美国	54	27.14	1 408	34.97	26.07
3	法国	10	5.03	264	6.56	26.40
4	沙特阿拉伯	8	4.02	108	2.68	13.50
5	加拿大	7	3.52	194	4.82	27.71
6	荷兰	7	3.52	194	4.82	27.71
7	日本	5	2.51	93	2.31	18.60
8	韩国	4	2.01	48	1.19	12.00
9	澳大利亚	3	1.51	84	2.09	28.00
10	挪威	2	1.01	55	1.37	27.50

表 5.28 “万米深地复杂地层钻井技术与设备研发”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	埃克森美孚上游研究公司	19	9.55	518	12.87	27.26
2	中国石油大学（北京）	12	6.03	277	6.88	23.08
3	中国石油化工股份有限公司	10	5.03	206	5.12	20.60
4	西南石油大学	9	4.52	201	4.99	22.33
5	斯伦贝谢科技公司	7	3.52	194	4.82	27.71
6	中国石油天然气股份有限公司	7	3.52	193	4.79	27.57
7	哈利伯顿能源服务公司	7	3.52	157	3.90	22.43
8	珠海格力电器股份有限公司	7	3.52	112	2.78	16.00
9	沙特阿拉伯国家石油公司	7	3.52	90	2.24	12.86
10	电子科技大学	4	2.01	78	1.94	19.50

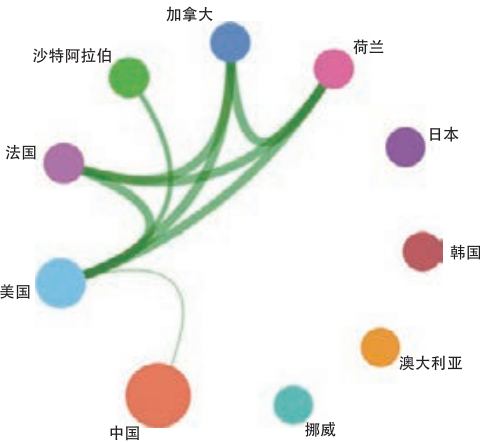


图 5.20 “万米深地复杂地层钻井技术与设备研发”工程开发前沿主要国家间的合作网络

万米深地复杂地层钻井技术与设备研发正朝着多元化和智能化的方向迅速发展，以适应日益严峻的深地钻探挑战。在未来的 5~10 年，深地钻井设备的智能化和模块化水平将显著提升，实时诊断、预测和调控技术的应用将更加广泛，从而有效应对极端地质条件的挑战。为了应对深地层的高压高温环境，高强度且耐高温的井下动力工具、随钻测量系统和垂钻系统等钻井工具将逐步应用。耐高温、耐高压和耐腐蚀的钻井材料研发也将成为研究的核心焦点，这些材料的应用将显著提高设备在极端环境下的耐用性和稳定性。此外，为提高钻探效率，创新钻井提速方法和工具的开发将继续深入，从而加快破岩进程，降低钻探成本（图 5.22）。

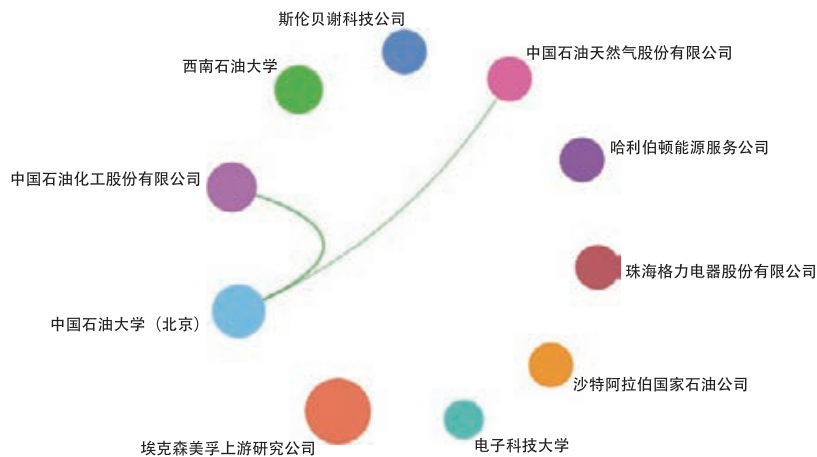
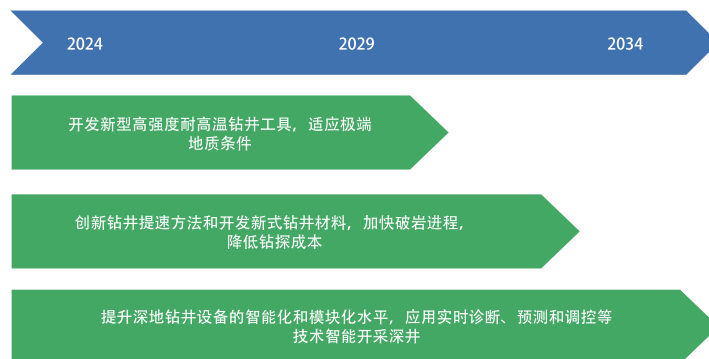


图 5.21 “万米深地复杂地层钻井技术与设备研发”工程开发前沿主要机构间的合作网络



领域课题组人员

课题组长：黄 震 周守为 苏义脑 彭苏萍

中国工程院二局能源与矿业工程学部办公室：宗玉生 解光辉

Frontiers in Energy 编辑部：刘瑞芹 殷 靓

图书情报人员：陈天天

能源和电气科学技术与工程学科组：

组 长：黄 震 岳光溪

秘 书 长：巨永林 周 托

课题组成员：张毅然 梁 正 严 正 徐潇源 杨 立 王 倩

执笔组成员：张毅然 梁 正 徐潇源 王 倩

核科学技术与工程学科组：

组 长：叶奇蓁 李建刚

秘 书 长：苏 罡 高 翔

课题组成员：李恭顺 李 鑫 郭英华 汪宗太 胡 古 张瑞萍 郭 晴

执笔组成员：李恭顺 李 鑫 苏 罡 郭英华 郭 晴 胡 古

地质资源科学技术与工程学科组：

组 长：赵文智 毛景文

秘 书 长：刘 敏 王 坤

课题组成员：刘 敏 梁 坤 简 伟 张国生 王 坤 李永新 董 劲 关 铭

执笔组成员：简 伟 李永新 吴 伶 董 劲 关 铭 郭 建 王 鹏 王 坤 刘 敏

矿业科学技术与工程学科组：

组 长：袁 亮 李根生 吴爱祥

秘 书 长：周福宝 张 农 宋先知 江丙友

课题组成员：江丙友 宋先知 黄中伟 时国庆 王高升 梁东旭 阮竹恩

执笔组成员：江丙友 王高升 梁东旭 阮竹恩 时国庆 李 爽 易俊琳