



## 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组研判得到的 Top 12 工程研究前沿见表 5.1，涵盖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，“人工智能辅助能源材料设计”“低成本水系电池关键材料研究”“深海 CO<sub>2</sub> 水合物固态规模化封存技术”属于能源和电气科学技术与工程领域；“核聚变用高温超导磁体研究”“超临界 CO<sub>2</sub> 循环的铅冷微堆等第四代核电技术的应用”“核电站智能诊断技术”属于核科学技术与工程领域；“基于大数据的成矿预测技术”“超临界 CO<sub>2</sub> 致裂页岩储层增渗技术”“CO<sub>2</sub> 压裂裂缝扩展机制及碳封存技术”属于地质资源科学技术与工程领域；“非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”“多源数据驱动智能钻井方法及数字井筒模型研究”“煤层气多相流动规律及对产能提升的作用机制”属于矿业科学技术与工程领域。2019—2024 年各研究前沿相关核心论文的发表情况见表 5.2。

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	人工智能辅助能源材料设计	506	14 885	29.42	2022.5
2	核聚变用高温超导磁体研究	402	4 835	12.03	2022.0
3	基于大数据的成矿预测技术	210	3 586	17.08	2021.4
4	非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究	724	12 839	17.73	2021.8
5	低成本水系电池关键材料研究	577	150 763	261.29	2020.7
6	深海 CO <sub>2</sub> 水合物固态规模化封存技术	98	1 522	15.53	2021.9
7	超临界 CO <sub>2</sub> 循环的铅冷微堆等第四代核电技术的应用	1 411	26 084	18.49	2021.8
8	核电站智能诊断技术	264	3 190	12.08	2022.2
9	超临界 CO <sub>2</sub> 致裂页岩储层增渗技术	691	13 661	19.77	2021.8
10	CO <sub>2</sub> 压裂裂缝扩展机制及碳封存技术	357	6 840	19.16	2021.8
11	多源数据驱动智能钻井方法及数字井筒模型研究	436	3 791	8.69	2022.6
12	煤层气多相流动规律及对产能提升的作用机制	161	3 246	20.16	2021.3

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，前沿 1、3、5、6、9、10 为专家提名，其余为数据挖掘+专家提名。

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	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	人工智能辅助能源材料设计	24	47	61	77	102	195
2	核聚变用高温超导磁体研究	49	48	57	66	71	111
3	基于大数据的成矿预测技术	53	18	20	27	25	64
4	非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究	91	91	111	150	123	158
5	低成本水系电池关键材料研究	126	158	139	103	43	8
6	深海 CO <sub>2</sub> 水合物固态规模化封存技术	15	10	12	18	15	28
7	超临界 CO <sub>2</sub> 循环的铅冷微堆等第四代核电技术的应用	173	209	206	243	256	324
8	核电站智能诊断技术	14	36	40	45	52	77
9	超临界 CO <sub>2</sub> 致裂页岩储层增渗技术	91	93	115	116	111	165
10	CO <sub>2</sub> 压裂裂缝扩展机制及碳封存技术	58	37	49	68	63	82
11	多源数据驱动智能钻井方法及数字井筒模型研究	26	30	45	72	74	189
12	煤层气多相流动规律及对产能提升的作用机制	48	12	12	19	19	48

### (1) 人工智能辅助能源材料设计

人工智能 (AI) 辅助能源材料设计是 AI 与材料科学交叉融合的一个快速发展的前沿领域, 指利用 AI 技术 (如机器学习、深度学习、生成模型和大语言模型等), 结合材料科学、计算化学和物理学原理, 加速能源相关材料的发现、优化与开发过程。其总体目标是通过数据驱动和智能化方法, 设计出用于能量存储与转换、催化反应以及性能优化的高效、低成本能源材料。该领域的主要研究方向和发展趋势包括: ① 从“小数据”向“大数据”范式转变——早期依赖迁移学习解决数据稀缺问题, 现转向大数据创造, 利用开放数据库和云平台加速材料发现, 嵌入物理知识以提升模型可解释性; ② 模型驱动与数据驱动融合——结合深度学习与物理/化学理论, 构建混合模型预测复杂行为, 如电池寿命和反应路径; ③ 高通量与自动化实验——集成机器人与 AI 智能体, 实现自主化材料设计, 缩短能源材料开发周期。

### (2) 核聚变用高温超导磁体研究

在未来清洁能源体系中, 核聚变被视为解决能源与环境问题的终极途径, 而高温超导 (HTS) 磁体的出现为实现紧凑型、高场强的聚变装置提供了革命性的技术支撑。相较于传统低温超导材料 (NbTi、Nb<sub>3</sub>Sn), HTS 材料 (如 REBCO、Bi-2212 等) 具备更高的临界温度、临界电流密度和耐受磁场强度上限, 使得磁体能够在 20 T 以上稳定工作, 从而显著提升等离子体约束能力, 减小装置体积和成本, 并拓展运行工况的安全裕度。这不仅为磁约束聚变装置 (如托卡马克与仿星器) 的紧凑化和商用化提供了可能, 也为探索新型磁约束方案开辟了道路。

当前研究方向主要集中在 3 个方面: ① 材料与导体开发, 包括高性能 REBCO 涂层导体、长

长度 Bi-2212 线材及其稳定性与均匀性研究；② 磁体结构与工程设计，涉及高场环向场（TF）、中心螺线管（CS）、极向场（PF）线圈的绕制工艺、应力管理和电磁-力学耦合分析，以及无绝缘（NI）、部分绝缘（PI）等新型绕线技术在聚变条件下的应用；③ 运行与保护技术，包括交流损耗控制、屏蔽电流效应抑制、热稳定性与快速保护策略，以及低温冷却与整体系统集成方案。通过上述研究，科学家正逐步解决 HTS 在强电磁负载与复杂三维结构下的可行性和可靠性问题。

### （3）基于大数据的成矿预测技术

随着露头矿和浅表矿被勘探殆尽，矿床的发现已变得越来越困难。例如，据标普全球市场财智（S&P Global Market Intelligence）统计，1990—2023 年全球共发现大型铜矿 239 个，而最近 5 年却只发现 4 个。相较于传统的找矿勘察，基于大数据 + 人工智能的成矿预测技术在成矿理论的指导下，通过挖掘、提取和融合多源、多尺度、多维地学大数据中的成矿有利信息，对预测单位的成矿有利度、勘探风险及资源量进行定位、定量、定概率计算，实现三维成矿预测与靶区圈定。成矿有利信息的数据挖掘、提取、融合是三维成矿预测的关键环节，随着计算机科学的发展，其已从传统静态的统计分析向动态的成矿过程数值模拟、大数据 + 人工智能的方向发展。例如，在中国华北重点金矿集区的资源预测评价中通过融合地质大数据与深度机器学习已圈定了多处找矿靶区。此外，国外研究机构和资本市场也正加大对大数据 + 人工智能成矿预测的投入，美国科博尔德金属（KoBold Metal）公司更是利用人工智能找矿技术在赞比亚发现了世界级的 Mingomba 铜矿。这些成矿预测理论技术的创新与应用，极大地提高了找矿过程中智能化空间决策水平与效率，是未来全球找矿勘查领域的必争高地。

### （4）非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究

非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究是通过智能化技术与地质工程深度融合，突破页岩气、致密油等低渗难采资源开发瓶颈的系统性工程，从而创新性实现低成本、高采收率、低环境影响。其主要研究方向包括：① 复杂储层智能化表征及甜点精准预测方法——整合地震、测井、生产动态等数据，通过机器学习方法构建高精度储层三维模型，基于历史生产数据训练智能模型，实现区域甜点精准预测；② 开发方案高效决策及生产方式智能优化——基于大模型与物联网实时监测井口压力、流量、含水率等数据，结合大数据分析实现生产参数（如排量、井底压力）的动态调整，进而高效提采；③ 新型提采工艺及智能提采装备开发——研发超临界 CO<sub>2</sub> 压裂、自生酸压裂、脉冲压裂等低伤害提采方法，研制自动化提采装备等。该研究领域主要呈现三大发展趋势：一是智能化深度渗透，如数字孪生平台开发应用；二是绿色低碳转型，如电驱压裂设备研发、生物可降解压裂液研制等；三是跨学科技术协同突破，如纳米流体驱油技术等。

### （5）低成本水系电池关键材料研究

在全球能源结构加速向可再生绿色能源转型的大背景下，低成本安全储能电池技术是实现“双碳”目标的关键技术之一。目前商用的锂离子电池和钠离子电池因使用了易燃易爆、有毒有害的有机电解液，无法突破高能量密度与本征安全的矛盾；金属锂固态电池无法破解低成本、长寿命的瓶颈。因此，现有的化学储能电池技术均无法满足高能量密度、长循环寿命、本征安全、低成本、环境友好等要求。

水系锌离子储能体系因其体积能量密度高、本征安全性好、环境友好和成本低廉等优势，在大规模储能领域展现出巨大潜力。然而，水系电池受限于正极、电解液、隔膜等关键材料，仍面临着循环稳定性差、质量能量密度较低等挑战，尚未实现规模化商业应用。为应对上述挑战，需研究水系锌离子电池的反应机理和动力学过程，研发低成本、高容量、长寿命的正极材料，设计宽电化学窗口、长寿命的水系电解液，研发高离子迁移、高力学性能的隔膜材料，设计器件结构，完善制造工艺。随着技术成熟和规模化生产，水系锌离子电池的成本将持续下降。其在大规模风电/光伏储能、家用分布式储能、低速电动车、两轮电动自行车、电网备用电源、5G基站等对安全要求高、需快速充放电的场景中拥有广阔的应用市场。

#### (6) 深海 CO<sub>2</sub> 水合物固态规模化封存技术

深海 CO<sub>2</sub> 水合物固态规模化封存技术是指利用深海高压低温环境下 CO<sub>2</sub> 自然形成笼型水合物的特性，将 CO<sub>2</sub> 规模性注入海床或浅层沉积层，使其逐步形成 CO<sub>2</sub> 水合物并实现长期稳定封存。该技术封存潜力大、效果显著，其核心机理和促进方法已得到初步原理性验证。该领域的研究主要聚焦于4个关键方向：① CO<sub>2</sub> 相态转化研究——致力于探究 CO<sub>2</sub> 临界相态转化机制，建立海洋环境下 CO<sub>2</sub> 水合物快速形成碳矿的方法；② 深海浅层 CO<sub>2</sub> 高效注入及规模固化研究——旨在揭示沉积物孔隙中液态 CO<sub>2</sub> 的迁移规律，建立 CO<sub>2</sub> 高效注入方法，强化 CO<sub>2</sub> 水合物规模化生成；③ “地层-海底-水体”多维声-光-电一体化监测技术——融合地震监测、传感器阵列和声波测试等多种技术手段，构建全方位的 CO<sub>2</sub> 封存状态、运移、逸散监测体系；④ 风险评价和规模化封存技术工艺及装备研发——重点攻关固化封存风险评价体系，实现海上液态 CO<sub>2</sub> 注入关键技术与装备自主可控，支撑形成百万吨级到千万吨级 CO<sub>2</sub> 年封存能力。未来，该技术有望与海洋地质碳封存相结合，构建覆盖深海多层系、多模式的海洋 CO<sub>2</sub> 封存体系，从而显著提升其经济性与规模化应用潜力。

#### (7) 超临界 CO<sub>2</sub> 循环的铅冷微堆等第四代核电技术的应用

基于21世纪初第四代核能系统国际论坛(GIF)提出的可持续性、经济性、安全性与可靠性、废物最小化、防扩散和实体保护六大领域的技术目标及相关评估指标，第四代核电技术遵循“零功率装置—原型堆—示范堆—商业堆”的研发和试验验证路径，成为国际上小型和微型核反应堆开发热点堆型，有望成为核能创新领域的“游戏改变者”。

GIF对130余种先进核能概念进行综合对比，重点考虑安全性、经济性、核资源最佳利用、核废物最小化等与堆型选择和设计密切相关的特性指标，最终锁定6种最具发展前景的候选堆型：一是钠冷快堆，根据技术成熟度和工业发展水平，有望利用自裂变核能时代起积累至今的裂变及增殖核材料，以提供电能；二是超高温气冷堆，具有提供具有多种工业用途的高温热能的潜力，可在700~950℃的堆芯出口温度范围内供应核热和电力，可以实现高温制氢；三是铅冷快堆，铅或铅合金中子吸收和慢化能力弱，反应堆中子经济性好，使其具有更高的核废物嬗变和核燃料增殖能力，结合超临界 CO<sub>2</sub> 循环可实现高热电转化效率；四是钍基熔盐堆，以氟化盐与溶解 U、Pu、Th 等的氟化物熔融混合后作燃料，在600~700℃高温和低压下运行，探索钍作为核燃料应用；此外，还包括气冷快堆和超临界水冷堆。

第四代核电技术是综合性能大幅提升的革新性核能技术，离不开先进燃料、材料等一系列共性技术的突破，特别是能够实现快中子辐照环境下材料考验的超高通量反应堆，其建设将是决定未来燃料材料能否成熟和第四代核电技术能否落地的关键。

#### (8) 核电站智能诊断技术

近年来，人工智能技术被广泛应用于核电领域，以促进核电厂通过实现自诊断、自寻优、自适应，最终达到提高生产效率、降低运行成本、提升运行安全性的目的，包括故障诊断、瞬态工况识别和核电维修机器人3个典型应用。第一，建立结合神经网络和基于规则的实时专家系统的核反应堆混合监测系统，通过神经网络进行核电厂动态建模，通过实时专家系统成功显示系统运行状态。针对核电厂可能出现的不同类型故障，利用神经网络、数据融合和符号有向图等技术构建混合智能模糊神经网络，对核电厂的不同故障进行检测和识别；对组件等核心部件进行智能诊断，降低潜在的核电厂安全威胁。第二，瞬态工况识别，通过自动诊断来提升瞬态工况识别的准确性和速度，利用动态神经网络聚合模型对瞬态工况进行检测、分类和预测，并通过分类器获得瞬态工况的类型、位置和严重程度。第三，核电维修机器人，核电设备复杂且具有放射性，在人员不可到达或操作精度要求较高的区域，通过远程操控机器人完成对设备的检测、维修、处理等操作在核电维修领域尤为重要。

通过对模型、算法和系统的可解释性研究，实现知识-数据双向驱动的可信、可靠人工智能技术，是该交叉领域的研究趋势，这一趋势也将推动人工智能产业达到新的应用高度，助力核电行业在确保安全的前提下实现数字化转型和智能化升级。

#### (9) 超临界 CO<sub>2</sub> 致裂页岩储层增渗技术

超临界 CO<sub>2</sub> 致裂页岩储层增渗技术以超临界 CO<sub>2</sub> 作为压裂液，通过物理压裂在页岩储层中形成复杂缝网，并利用超临界 CO<sub>2</sub> 特有的置换吸附、溶解有机质等物理化学特性，大幅提高页岩储层的渗流能力，是一种节水、环保、高效的新型页岩气增产技术。目前，该领域的研究主要集中在以下4个关键方向：① 超临界 CO<sub>2</sub> 在页岩储层中的裂缝起裂、扩展机制及其影响因素研究；② 超临界 CO<sub>2</sub> 与页岩储层之间的物理化学作用机理及其对改造效果的影响研究；③ 超临界 CO<sub>2</sub> 压裂配套装备与压裂材料的研发，重点包括大排量、超高压、耐腐蚀的 CO<sub>2</sub> 泵送设备的设计与制造，以及高性能 CO<sub>2</sub> 增稠剂、减阻剂等压裂液添加剂的开发；④ 超临界 CO<sub>2</sub> 压裂施工参数的优化设计与智能控制技术研究，依托数值模拟、实时监测与大数据分析，实现压裂过程的精准调控与动态优化。未来该技术的研究将更加注重与材料科学、地球物理学、化学等学科的深度融合，进一步发展和完善数值模拟方法，并积极推进现场试验，有望实现该技术的大规模商业化应用，为全球页岩气资源的高效开发和能源绿色转型提供有力支撑。

#### (10) CO<sub>2</sub> 压裂裂缝扩展机制及碳封存技术

CO<sub>2</sub> 压裂裂缝扩展机制及碳封存技术是以超临界或液态 CO<sub>2</sub> 作为压裂液，通过高压注入储层，以相变膨胀、低黏度渗透和竞争吸附为核心，诱导岩石破裂并形成多尺度裂缝网络，通过地质构造封闭、溶解扩散和矿物碳酸化三重机制实现碳封存。该领域的研究主要聚焦于4个关键方向：

① 超临界 CO<sub>2</sub> 压裂过程中温度场、流体场、岩石力学场的动态耦合作用，包括低黏度流体诱发

复杂裂缝网络的机理以及起裂压力骤降现象的物理原理；② 量化  $\text{CO}_2$ -矿物反应对岩石断裂韧性的降解规律，研究矿物沉淀/溶解对裂缝长期导流能力的影响机制，以评估封存稳定性；③ 开发基于真实地质结构的数值模型，整合裂缝粗糙度、尺寸效应和非均质性，精准模拟超临界  $\text{CO}_2$  在低渗透储层中的裂缝分支行为，研究注入压力诱发断层活化的临界条件，建立含杂质  $\text{CO}_2$  的管道减压-裂纹扩展预测模型，并设计专用止裂技术以防控泄漏风险；④ 优化支撑剂输送方案，降低对高成本设备的依赖，探索相变压裂参数对煤层渗透率增强的调控机制，提升封存开采协同效益。该技术可显著提升低渗透储层开发效率，实现压裂过程中的部分碳封存，兼具增产与减排双重效益，在非常规油气开采和碳封存领域具有广阔的应用市场。

#### (11) 多源数据驱动智能钻井方法及数字井筒模型研究

多源数据驱动智能钻井方法及数字井筒模型研究是结合地质数据、工程数据和设备数据，通过智能化手段优化施工参数，并构建数字化井筒模型辅助钻井方案决策。其主要研究方向包括：多源数据治理技术及智能算法优化研究，实现多源数据时空对齐与特征提取，解决异构数据融合难题，结合钻井工程现实场景动态调整智能模型参数，在神经网络中嵌入机理先验知识，实现钻井参数精准推荐；高精度数字化井筒模型构建，通过多物理场耦合建模实现井下数据演化过程实时监测；井下风险智能预警与复杂工况钻井参数智能调控，基于深度学习分析钻井参数时序数据，分类识别卡钻、井漏、井涌等井下作业风险并实现智能预警，构建实时反馈系统，基于智能模型对复杂工况进行闭环调控等。该研究主要呈现两大发展趋势：一是多源数据知识库共享搭建及数据实时决策，如多区块数据共享及随钻提取参数就地分析决策；二是“绿色+智能化”协同发展，研发低碳钻井装备，结合钻井参数优化减少现场泥浆浪费与碳排放等。

#### (12) 煤层气多相流动规律及对产能提升的作用机制

煤层气多相流动规律是指煤层中气体和液体在煤体孔隙与裂隙中共存并相互作用的复杂流动过程。煤层气赋存于煤体的孔隙与裂隙系统中，其运移过程涉及解吸、扩散与渗流等多阶段行为，同时受到煤层水、应力扰动与裂隙结构演化等多因素影响，形成复杂的非线性、多相、多尺度耦合流动特征。深入揭示其多相流动机制，对科学指导排采制度设计、实现煤层气稳定高产具有重要意义。其主要研究方向包括：煤层气中气与水两相耦合流动机制、煤层气解吸-扩散-渗流多过程协同机制、裂隙网络演化对渗流路径与气体运移能力的影响、多尺度多场耦合的数值模拟与实验验证方法，以及关键控制参数对抽采产能的敏感性分析等。未来，煤层气多相流研究将朝着模型精细化、参数智能反演与开发工艺动态调控方向发展。将人工智能算法引入产能预测与抽采调控中，实现对不同煤层气赋存条件下排采过程的精准优化；结合数字孪生与物联网感知系统，构建“监测-模拟-调控”闭环协同机制，推动煤层气开发向高效、安全、绿色方向迈进。

## 5.1.2 Top 4 工程研究前沿重点解读

### 5.1.2.1 人工智能辅助能源材料设计

人工智能辅助能源材料设计是指利用人工智能技术，包括机器学习、深度学习、生成模型和

大语言模型等方法，结合材料科学、计算化学和物理学，加速能源相关材料的研发过程。其核心目标是通过高通量筛选、属性预测、逆向设计和自主实验，开发高效、可持续、低成本的材料，用于能源存储、能量转化、催化反应及可再生能源系统。通过人工智能方法整合实验数据、模拟数据和公开数据库，挖掘材料结构-性能关系，可以显著缩短传统试错式研发的周期。

早期材料设计主要依赖实验试错和基础计算方法。高通量计算开始兴起时，因受限于计算资源和数据规模而进展缓慢。随着人工智能技术的发展，支持向量机、随机森林等机器学习算法开始用于材料属性预测，早期应用集中于以简单回归模型预测电池材料或催化剂性能。2010年后，深度学习和图神经网络的引入显著提升了预测精度，生成模型实现逆向设计。自主实验室概念也应运而生，将机器人与人工智能相结合，实现实验自动化。如今，大语言模型和多模态人工智能正被用于知识提取和复杂系统优化。生成式人工智能在探索未知化学空间和可持续材料设计中展现出巨大潜力。

结合最新研究进展，人工智能辅助能源材料设计的主要研究方向包括以下方面：① 材料属性预测与高通量筛选描述——利用机器学习模型，结合密度泛函理论（DFT）等高通量计算方法，预测材料物理化学属性，筛选候选材料，可应用于电池电极材料优化、能源材料性能预测；② 生成模型与逆向设计描述——采用对抗神经网络、扩散模型等生成模型，从目标性能反向生成新材料结构，探索未知化学空间，可应用于新型碳捕集材料、高效光伏材料设计；③ 催化材料智能设计与合成——结合 AI 智能体和机器人技术，预测催化剂活性，优化合成路径并实现自动化，可应用于燃料电池催化剂、CO<sub>2</sub> 电还原催化剂、电解水材料的设计和合成。

“人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿中核心论文数最多的国家是美国、中国和德国（表 5.3）。核心论文的主要产出机构为麻省理工学院、清华大学、中国科学院、多伦多大学和新加坡国立大学等（表 5.4）。核心论文主要国家间和机构间的合作网络分别如图 5.1 和图 5.2 所示。施引核心论文数排名靠前的国家是中国和美国（表 5.5），施引核心论文数排名靠前的机构是中国科学院、麻省理工学院、浙江大学、清华大学和上海交通大学（表 5.6）。

表 5.3 “人工智能辅助能源材料设计”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	美国	167	33.00	6 191	37.07	2022.3
2	中国	160	31.62	4 300	26.88	2022.6
3	德国	42	8.30	1 402	33.38	2022.0
4	英国	35	6.92	1 445	41.29	2022.1
5	加拿大	31	6.13	1 102	35.55	2022.3
6	印度	31	6.13	466	15.03	2022.9
7	韩国	30	5.93	421	14.03	2023.2
8	日本	28	5.53	1 161	41.46	2022.1
9	新加坡	21	4.15	749	35.67	2022.8
10	澳大利亚	16	3.16	952	59.50	2022.2

表 5.4 “人工智能辅助能源材料设计”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	麻省理工学院	19	3.75	1 236	65.05	2022.1
2	清华大学	17	3.36	310	18.24	2022.9
3	中国科学院	17	3.36	236	13.88	2022.7
4	多伦多大学	13	2.57	839	64.54	2022.2
5	新加坡国立大学	13	2.57	391	30.08	2022.8
6	美国西北大学	13	2.57	321	24.69	2023.0
7	上海交通大学	12	2.37	352	29.33	2022.9
8	浙江大学	10	1.98	668	66.80	2021.9
9	加州理工大学	10	1.98	585	58.50	2021.9
10	阿贡国家实验室	9	1.78	520	57.78	2021.8

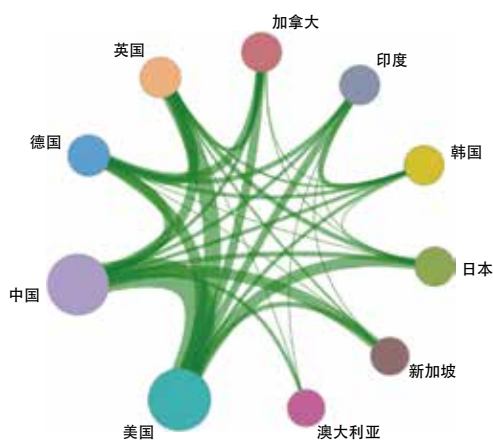


图 5.1 “人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿主要国家间的合作网络

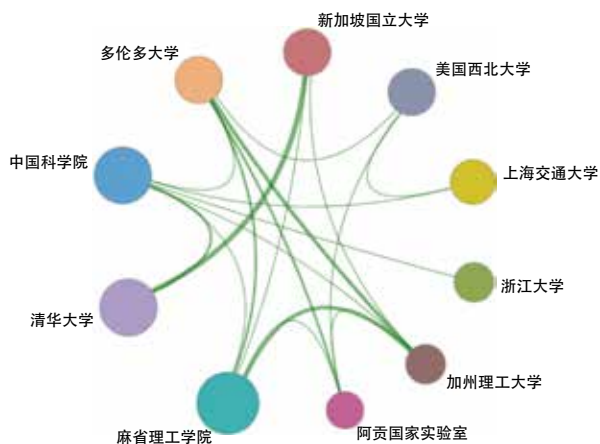


图 5.2 “人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 5.5 “人工智能辅助能源材料设计”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	4 677	37.41	2023.5
2	美国	2 667	21.33	2023.1
3	印度	876	7.01	2023.5
4	英国	854	6.83	2023.2
5	德国	739	5.91	2023.1
6	韩国	634	5.07	2023.5
7	日本	542	4.33	2023.1
8	加拿大	414	3.31	2023.2
9	澳大利亚	413	3.30	2023.2
10	沙特阿拉伯	371	2.97	2023.5

表 5.6 “人工智能辅助能源材料设计”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	500	23.85	2023.4
2	麻省理工学院	224	10.69	2022.9
3	浙江大学	202	9.64	2023.3
4	清华大学	195	9.30	2023.5
5	上海交通大学	190	9.06	2023.5
6	北京科技大学	155	7.40	2023.1
7	新加坡国立大学	141	6.73	2023.3
8	西安交通大学	125	5.96	2023.4
9	哈尔滨工业大学	123	5.87	2023.4
10	上海大学	122	5.82	2023.5

“人工智能辅助能源材料设计”领域未来的重点发展方向和趋势（图 5.3）如下：

- 1) 从“小数据”向“大数据”范式转变：早期依赖迁移学习解决数据稀缺，现转向大数据创造，利用开放数据库和云平台加速材料发现，嵌入物理知识，提升模型可解释性。
- 2) 模型驱动与数据驱动融合：结合深度学习与物理/化学理论，构建混合模型预测复杂行为，如电池寿命和反应路径。
- 3) 高通量与自动化实验：集成机器人和 AI 智能体，实现材料自主设计，缩短能源材料开发周期。



图 5.3 “人工智能辅助能源材料设计” 工程研究前沿的发展路线

### 5.1.2.2 核聚变用高温超导磁体研究

核聚变用高温超导磁体研究作为一个关乎未来能源的前沿工程领域，其全球科研力量分布呈现多极化格局，且国际合作网络紧密。从国家层面看，中国和美国构成了该领域的绝对双核心（表 5.7）。数据显示，中国的核心论文产出数量以 128 篇（占比 31.84%）位居全球第一，展现了强大的科研产出能力。美国则以 107 篇（占比 26.62%）紧随其后，并在论文影响力上更胜一筹，其被引频次（2 389）和篇均被引频次（22.33）均大幅领先，表明其研究成果获得了更广泛的关注和认可。意大利、日本、瑞士、德国、英国等传统科技强国也是重要的参与力量，共同构成了第二梯队。值得注意的是，韩国虽然论文总数不多，但其篇均被引频次高达 37.44，凸显了其卓越的研究质量。

表 5.7 “核聚变用高温超导磁体研究” 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	128	31.84	1 020	7.97	2022.0
2	美国	107	26.62	2 389	22.33	2022.1
3	意大利	43	10.70	404	9.40	2022.4
4	日本	42	10.45	862	20.52	2021.2
5	瑞士	40	9.95	892	22.30	2021.5
6	德国	39	9.70	592	15.18	2021.7
7	英国	30	7.46	553	18.43	2021.9
8	法国	26	6.47	204	7.85	2021.5
9	韩国	18	4.48	674	37.44	2022.6
10	西班牙	17	4.23	102	6.00	2022.4

从机构分布来看，领先机构呈现出中、美、欧三足鼎立的态势（表 5.8）。中国科学院以 78 篇核心论文（占比 19.40%）的绝对优势成为全球最高产的机构，中国科学技术大学也表现活跃，排名第二。这标志着中国科研机构在该前沿的基础研究中扮演着引领角色。美国方面，麻省理

工学院和劳伦斯伯克利国家实验室是两大核心支柱，其中麻省理工学院的篇均被引频次（28.67）尤为突出。欧洲的研究力量则相对分散，包括意大利的都灵理工大学、德国的卡尔斯鲁厄理工学院以及跨国的欧洲核能机构等。尤其值得关注的是，美国的联邦聚变系统公司（CFS），其篇均被引频次高达 46.75，位居所有机构之首，显示出私营企业在尖端技术研发与创新上的巨大活力。

表 5.8 “核聚变用高温超导磁体研究”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	78	19.40	614	7.87	2022.1
2	中国科学技术大学	49	12.19	333	6.80	2022.3
3	麻省理工学院	30	7.46	860	28.67	2022.3
4	劳伦斯伯克利国家实验室	28	6.97	305	10.89	2021.8
5	都灵理工大学	22	5.47	225	10.23	2022.2
6	卡尔斯鲁厄理工学院	20	4.98	391	19.55	2021.5
7	欧洲核能机构	18	4.48	217	12.06	2022.6
8	联邦聚变系统公司	16	3.98	748	46.75	2022.7
9	科罗拉多大学	16	3.98	556	34.75	2021.3
10	日本东北大学	14	3.48	113	8.07	2021.1

合作情况方面，该领域具有高度的国际化特征。图 5.4 和图 5.5 显示，全球主要国家间和主要机构间已形成了密集而复杂的合作网络。这种合作不仅体现在共同发表核心论文上，更体现在知识的交流与扩散中。

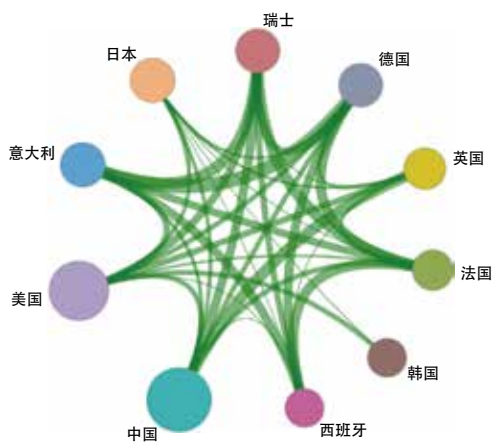


图 5.4 “核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

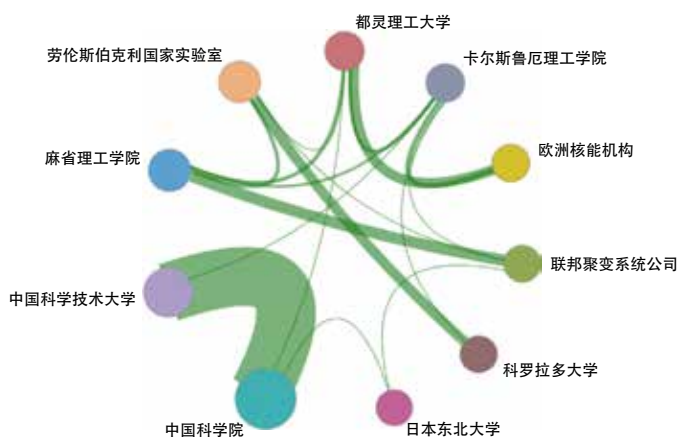


图 5.5 “核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

从施引核心论文数据来看，中国（1 049 篇）和美国（654 篇）同样是最大的知识消费与跟进群体（表 5.9），他们积极关注、参考并推动该领域的最新成果。其中，中国科学院同样是施引核心论文的最主要产出机构（表 5.10），这表明其不仅自身研究成果丰硕，也在持续追踪并融入全球科研对话，积极推动着该前沿领域的持续演进与发展。

综上所述，全球科研界正通过紧密的跨国、跨机构合作，共同推动核聚变用高温超导磁体技术走向成熟。

图 5.6 为“核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿的发展路线。首先，高场紧凑型聚变装置将成为未来的突破口，例如基于 20 T 级 HTS 磁体的紧凑托卡马克已进入实验验证阶段。其次，规模化与工程化将是核心任务，包括长长度导体生产工艺的成熟、低成本化以及磁体模块化装配的实现。再次，跨学科融合将日益重要，结合先进仿真[如有限元建模（FEM）、多物理场耦合]、人工智能优化设计与新型冷却技术，将加速 HTS 磁体工程的落地。最后，随着国际聚变计划与初创企业的推动，HTS 磁体有望在未来 10~20 年内完成从实验室验证到商用反应堆原型的跨越，成为推动人类迈向可持续核聚变能的重要基石。

表 5.9 “核聚变用高温超导磁体研究”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	1 049	31.73	2023.0
2	美国	654	19.78	2022.9
3	日本	293	8.86	2022.7
4	英国	254	7.68	2022.9
5	德国	212	6.41	2022.8
6	意大利	205	6.20	2023.1
7	韩国	168	5.08	2022.8
8	瑞士	158	4.78	2022.7
9	法国	137	4.14	2022.9
10	俄罗斯	90	2.72	2022.6

表 5.10 “核聚变用高温超导磁体研究”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	386	28.87	2023.1
2	麻省理工学院	147	10.99	2023.0
3	中国科学技术大学	142	10.62	2023.2
4	兰州大学	117	8.75	2022.9
5	上海交通大学	103	7.70	2022.7
6	首尔大学	90	6.73	2022.8
7	联邦聚变系统公司	87	6.51	2023.3
8	西南交通大学	72	5.39	2022.7
9	普林斯顿等离子体物理实验室	65	4.86	2022.9
10	华中科技大学	64	4.79	2023.0

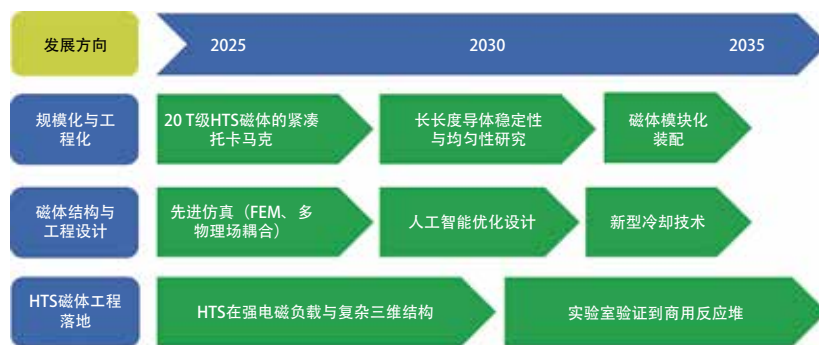


图 5.6 “核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿的发展路线

### 5.1.2.3 基于大数据的成矿预测技术

成矿预测主要关注矿产资源形成的地质作用、成矿机制及时空分布规律，预测潜在的成矿区域。进入“大数据时代”后，海量、多源、异构的地质信息及数字化平台为成矿规律的系统发掘和预测精度的提升提供了新条件，地质大数据与智能化手段的结合已成为该领域的核心前沿。

传统成矿预测依赖经验与现场调查，近年逐步由定性向定量转变，由数据稀疏向数据密集过渡。当前研究强调多源数据融合、区域数字平台构建和可重复定量预测体系的工程化落地。成矿预测正由单一学科方法向跨学科、数据驱动和工程化实施方向演进。基于大数据的成矿预测能处理海量、多维地质信息，快速锁定潜在靶区，显著提升找矿效率、降低勘查成本；数据驱动的预测比单纯经验判断更为客观，可对不确定性进行量化，为决策提供更可靠依据。

基于大数据的成矿预测技术主要聚焦于：① 构建大数据找矿信息平台，实现地质、地球物理、遥感、勘探、地球化学等多源数据的标准化、整合与可视化管理；② 研究如何从海量异构数据中提取关键成矿信号和指标，建立统一的特征表征与融合框架；③ 开发可工程化部署的成矿预测系统，构建面向区域决策的量化评价与潜力区优先级排序流程；④ 构建成矿知识库/图谱，整

合结构化与非结构化知识，支持知识检索、溯源和可视化表达。

“基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿中核心论文数排在前三位的国家是中国(136)、澳大利亚(37)和加拿大(19)；篇均被引频次排在前三位的国家是英国(71.40)、印度(69.17)和西班牙(54.00)，见表5.11。在主要产出国家中，中国与澳大利亚、加拿大间的合作较多，见图5.7。核心论文数排在前三位的机构是中国地质大学(武汉)(42)、中南大学(29)和中国科学院(19)；篇均被引频次排在前三位的机构是西澳大学(65.50)、阿米卡比尔理工大学(34.29)和中国地质大学(武汉)(28.21)，见表5.12。在主要产出机构中，中国地质大学(武汉)与中国地质科学院的合作较多，见图5.8。

施引核心论文数排在前三位的国家是中国(1258)、澳大利亚(292)和美国(215)，见表5.13；施引核心论文的主要产出机构有中国地质大学(武汉)(355)、中国科学院(162)、中国地质科学院(147)等，见表5.14。

表 5.11 “基于大数据的成矿预测技术”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	136	64.76	2 434	17.90	2021.7
2	澳大利亚	37	17.62	1 282	34.65	2020.0
3	加拿大	19	9.05	656	34.53	2021.5
4	伊朗	12	5.71	388	32.33	2021.8
5	南非	10	4.76	438	43.80	2021.3
6	美国	9	4.29	372	41.33	2021.6
7	印度	6	2.86	415	69.17	2021.5
8	西班牙	6	2.86	324	54.00	2022.0
9	巴西	6	2.86	320	53.33	2022.0
10	英国	5	2.38	357	71.40	2022.2

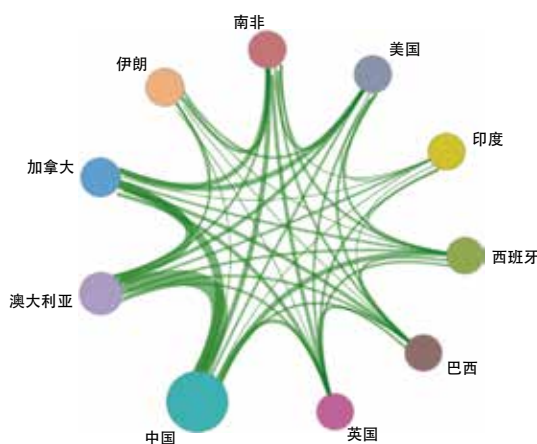


图 5.7 “基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 5.12 “基于大数据的成矿预测技术”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	中国地质大学（武汉）	42	20.00	1 185	28.21	2020.7
2	中南大学	29	13.81	195	6.72	2023.1
3	中国科学院	19	9.05	231	12.16	2022.4
4	中国地质科学院	15	7.14	164	10.93	2021.5
5	中国地质调查局	10	4.76	74	7.40	2022.8
6	中国地质大学（北京）	9	4.29	171	19.00	2021.6
7	西澳大学	8	3.81	524	65.50	2020.6
8	成都理工大学	8	3.81	147	18.38	2021.2
9	阿米卡比尔理工大学	7	3.33	240	34.29	2021.6
10	悉尼大学	7	3.33	83	11.86	2020.9

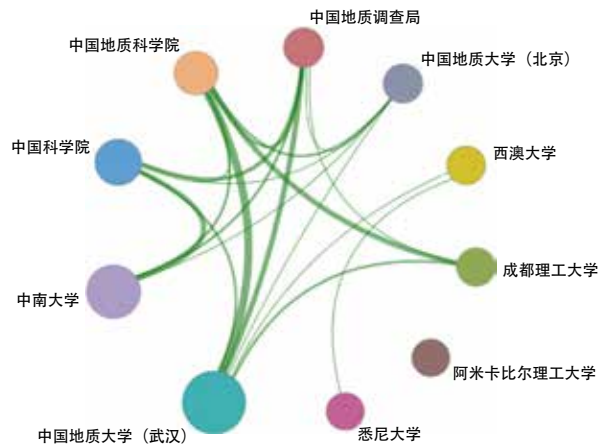


图 5.8 “基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 5.13 “基于大数据的成矿预测技术”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	1 258	47.49	2022.4
2	澳大利亚	292	11.02	2021.4
3	美国	215	8.12	2022.7
4	伊朗	215	8.12	2022.2
5	加拿大	210	7.93	2022.1
6	南非	96	3.62	2022.1
7	英国	88	3.32	2022.7
8	印度	87	3.28	2022.7
9	德国	87	3.28	2023.0
10	巴西	54	2.04	2022.3

表 5.14 “基于大数据的成矿预测技术”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	中国地质大学（武汉）	355	27.41	2022.1
2	中国科学院	162	12.51	2022.4
3	中国地质科学院	147	11.35	2021.7
4	中南大学	117	9.03	2022.8
5	西澳大学	91	7.03	2020.8
6	吉林大学	76	5.87	2022.6
7	成都理工大学	74	5.71	2022.6
8	中国地质调查局	73	5.64	2022.8
9	阿米卡比尔理工大学	70	5.41	2022.4
10	中国地质大学（北京）	65	5.02	2022.4

未来 5~10 年，基于大数据的成矿预测技术将重点聚焦区域 / 省域级地质大数据平台建设与共享、端到端工程化预测系统研发、多源时空（3D/4D）信息融合与成矿表征，以及示范工程建设和标准化工作。在发展趋势上，将整体从原型化探索转向可解释、可监管、可工程化的成熟体系，并更加注重不确定性量化与多尺度协同分析。其发展潜力体现在有望显著提升找矿效率与成功率，为保障国家关键金属资源安全供给提供支撑，并推动向低环境影响的绿色勘查模式转型。其主要应用场景包括国家与省域层面的矿产资源普查与潜力区排序、关键金属矿产的靶区发现与评价、企业勘探流程的优化与加速，以及环境敏感区的低干扰勘查。同时，技术与人才培养、数据共享机制以及法规标准将成为推动落地的关键保障。图 5.9 为“基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿的发展路线。

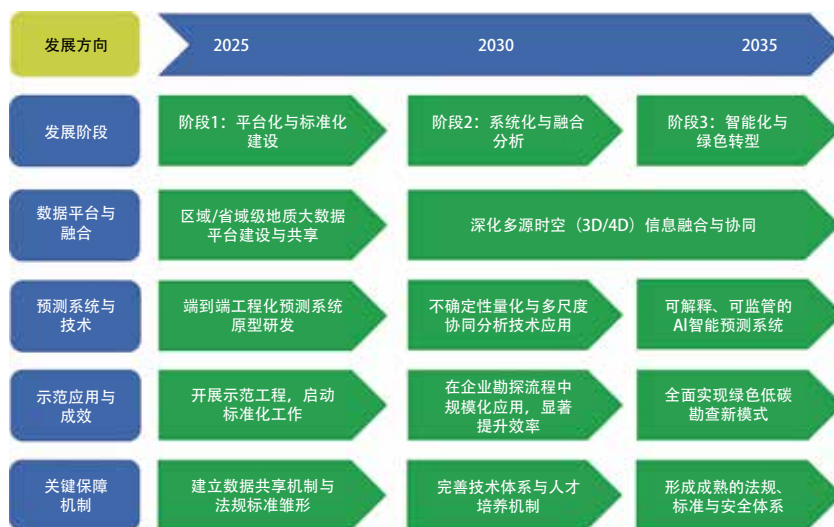


图 5.9 “基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿的发展路线

#### 5.1.2.4 非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究

随着全球常规油气资源渐趋紧张，开发非常规油气资源可拓宽能源供给渠道，在增强国家能源安全保障的同时带动相关产业发展，推动区域经济增长。非常规油气资源包括页岩气、致密油等，具有储层致密、渗透率低、开发难度大等特点。非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究是基于开发地质信息及工程信息，结合智能化开发手段，实现对非常规油气资源的精准勘探—高效开采—数字化管理，在提高资源开发效益的同时降低开发成本和环境影响。受开发与提采技术所限，早期非常规油气开发进展缓慢；直至 20 世纪 90 年代末，美国凭借水平井与大规模分段压裂技术掀起“页岩气革命”，才推动非常规油气开发的飞跃。21 世纪以来，伴随着物联网、大数据、人工智能技术的兴起，油气田智能开发逐渐成为主流趋势。当下，全球范围内的多源数据整合分析与油气田开发大数据库构建，推动了“甜点区块”储层的精准定位，结合智能设备对开采参数的实时调控，非常规油气资源开采效率持续提升。目前，该研究主要形成了 3 个主要研究方向：① 复杂储层智能化表征及甜点区块精准预测方法，通过多源数据融合与智能算法实现储层精细刻画及高产区域定位；② 开发方案高效决策及生产方式智能优化，通过数字孪生、优化算法与实时数据交互，实现开发方案动态调整与生产方式自主优化；③ 新型提采工艺及智能提采装备开发，围绕压裂、驱替及井下作业等环节，开发高效提采技术与智能化装备。

中国在该研究前沿中占据绝对主导地位，核心论文数（503 篇，占比 69.48%）和被引频次（9 297）均遥遥领先，但篇均被引频次（18.48）相对较低（表 5.15）。美国、加拿大和澳大利亚的论文数量虽远少于中国，但其篇均被引频次更高，研究影响力更为突出。英国、德国等国家虽论文产出较少，但研究质量普遍较高。主要合作集中在中国、美国、加拿大和澳大利亚之间（图 5.10）。国内研究机构主要为石油高校及企业，如中国石油大学（北京）、中国石油大学（华东）、西南石油大学、长江大学等石油院校，中国石油长庆油田及中国石化华东油气田（页岩气开发技术先导企业）等石油企业，同时石油高校与企业间开展了广泛的协同合作，如油气行业产学研联盟；国际从事相关研究机构主要集中在北美（如加拿大的卡尔加里大学）（表 5.16 和图 5.11）。该前沿中施引核心论文的主要产出国家和机构分别见表 5.17 和表 5.18）。

表 5.15 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”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	503	69.48	9 297	18.48	2022.0
2	美国	132	18.23	2 823	21.39	2021.2
3	加拿大	54	7.46	1 496	27.70	2021.6
4	澳大利亚	31	4.28	1 402	45.23	2021.5
5	沙特阿拉伯	26	3.59	387	14.88	2021.5
6	伊朗	22	3.04	351	15.95	2021.9
7	英国	12	1.66	466	38.83	2021.0
8	印度	12	1.66	277	23.08	2022.2
9	马来西亚	12	1.66	175	14.58	2021.5
10	德国	10	1.38	303	30.30	2021.2

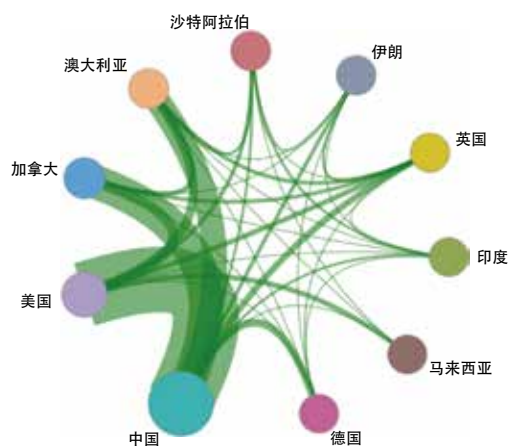


图 5.10 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 5.16 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”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	中国石油大学(北京)	135	18.65	2 634	19.51	2022.1
2	中国石油大学(华东)	60	8.29	1 038	17.30	2021.9
3	西南石油大学	50	6.91	697	13.94	2022.3
4	中国科学院	45	6.22	688	15.29	2022.0
5	中国石油天然气股份有限公司	41	5.66	721	17.59	2021.9
6	卡尔加里大学	35	4.83	1 279	36.54	2021.2
7	中国地质大学(武汉)	34	4.70	832	24.47	2021.8
8	东北石油大学	23	3.18	298	12.96	2022.9
9	中国石油化工集团有限公司	19	2.62	193	10.16	2022.7
10	长江大学	18	2.49	260	14.44	2022.3

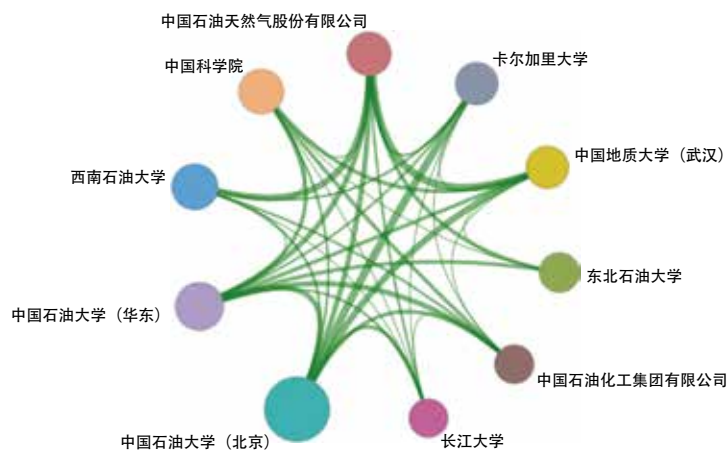


图 5.11 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 5.17 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”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	7 171	65.57	2023.0
2	美国	991	9.06	2022.5
3	加拿大	550	5.03	2022.7
4	俄罗斯	398	3.64	2022.8
5	伊朗	382	3.49	2022.5
6	澳大利亚	326	2.98	2022.5
7	沙特阿拉伯	301	2.75	2022.8
8	英国	265	2.42	2022.6
9	印度	259	2.37	2023.0
10	德国	164	1.50	2022.8

表 5.18 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”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	中国石油大学（北京）	1 186	21.72	2022.9
2	中国石油大学（华东）	789	14.45	2022.9
3	西南石油大学	671	12.29	2023.1
4	中国科学院	530	9.71	2022.9
5	中国矿业大学	478	8.75	2022.7
6	中国地质大学（武汉）	404	7.40	2022.9
7	东北石油大学	327	5.99	2023.1
8	中国石油天然气股份有限公司	318	5.82	2023.0
9	长江大学	282	5.16	2023.1
10	卡尔加里大学	242	4.43	2022.7

未来 5~10 年，非常规油气开发将以“智能化、绿色化、全球化”为主线，通过 AI 大模型、量子计算、碳捕获利用与封存（CCUS）等技术突破，实现从“资源驱动”向“技术驱动”的跨越。智能化深度融合方面，将基于 GeoGPT、昆仑大模型等智能化平台，构建“地质-工程-经济”一体化数字孪生系统，实现从储层表征到生产优化的全流程智能决策；高效提采技术升级方面，将迎来 CCUS 规模化应用，即采用枢纽模式整合捕集、运输、封存环节，降低全链条成本，扩展至多气源接入，形成区域性碳管理网络；绿色低碳技术体系构建，实现全生命周期环保及新能源融合，构建“油气+光伏+储能”多能互补系统；基础理论与装备突破，如纳米孔隙渗流模型、智能装备国产化等。图 5.12 为“非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿的发展路线。



图 5.12 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”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组研判得到的 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，“人工智能驱动的虚拟电厂”“海上风光耦合发电系统”“沙戈荒能源大基地风-光-火-储多能互融工程技术”属于能源和电气科学技术与工程领域；“极端天气核能安全技术”“核电站数

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	人工智能驱动的虚拟电厂	563	1 204	2.14	2023.3
2	极端天气核能安全技术	63	239	3.79	2022.6
3	复杂油气藏压裂优化与产能预测技术	776	3 197	4.12	2022.3
4	超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备	963	2 126	2.21	2022.3
5	海上风光耦合发电系统	91	307	3.37	2022.2
6	沙戈荒能源大基地风-光-火-储多能互融工程技术	2 101	2 489	1.18	2021.6
7	核电站数字孪生技术	50	252	5.04	2019.0
8	核电站提升功率输出方法和设备研究	250	408	1.63	2022.2
9	战略性矿产资源综合评价技术	1 323	6 000	4.54	2022.1
10	智能地下成像与储层建模一体化技术	1 294	18 879	14.59	2022.2
11	煤矿井下瓦斯增产及采空区 CO <sub>2</sub> 封存技术	455	594	1.31	2022.5
12	深部矿井热害治理技术	174	628	3.61	2022.0

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，前沿 1、5、6、9 为专家提名，其余为数据挖掘+专家提名。

字孪生技术”“核电站提升功率输出方法和设备研究”属于核科学技术与工程领域；“复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”“战略性矿产资源综合评价技术”“智能地下成像与储层建模一体化技术”属于地质资源科学技术与工程领域；“超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”“煤矿井下瓦斯增产及采空区 CO<sub>2</sub> 封存技术”“深部矿井热害治理技术”属于矿业科学技术与工程领域。2019—2024 年各开发前沿相关核心专利的公开情况见表 5.20。

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	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	人工智能驱动的虚拟电厂	13	17	22	38	137	336
2	极端天气核能安全技术	6	6	6	4	11	30
3	复杂油气藏压裂优化与产能预测技术	48	74	95	151	166	242
4	超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备	79	97	111	151	220	305
5	海上风光耦合发电系统	10	3	14	20	22	22
6	沙戈荒能源大基地风-光-火-储多能互融工程技术	323	300	379	381	322	396
7	核电站数字孪生技术	50	0	0	0	0	0
8	核电站提升功率输出方法和设备研究	15	26	34	62	41	72
9	战略性矿产资源综合评价技术	120	163	164	229	292	355
10	智能地下成像与储层建模一体化技术	146	144	140	179	243	442
11	煤矿井下瓦斯增产及采空区 CO <sub>2</sub> 封存技术	19	27	48	118	111	132
12	深部矿井热害治理技术	19	29	17	20	41	48

### (1) 人工智能驱动的虚拟电厂

人工智能驱动的虚拟电厂是将人工智能技术深度应用于含海量电力需求侧灵活资源的虚拟电厂，提升虚拟电厂发用电曲线预测及可调能力评估精度，提高虚拟电厂交易运行收益，并增强虚拟电厂对新型电力系统支撑能力的“AI+能源”融合技术。该领域的主要研究方向包括：人工智能驱动的虚拟电厂发用电预测技术，提升虚拟电厂聚合资源发用电曲线的预测准确性；人工智能驱动的虚拟电厂可调能力动态评估技术，实现需求侧资源差异化用电行为偏好的精准建模，以及资源的真实可调能力的动态评估；人工智能驱动的虚拟电厂竞价及调度策略生成方法，在复杂电力市场环境（需求响应市场、电能量市场、辅助服务市场等）下结合外部市场信息及内部资源特征生成最优交易策略，并基于市场交易结果制定最优调度方案。未来，该领域的发展趋势包括：融合气象特征、企业生产、人流/交通流趋势等多源异构数据，进一步提升虚拟电厂资源预测精确度；通过同态加密、差分隐私、联邦学习等技术，保护需求侧资源数据隐私，防范虚拟电厂聚合资源的隐私泄露风险；利用区块链技术增强虚拟电厂交易、调度与结算的透明性、可信赖性和可追溯性等。

### (2) 极端天气核能安全技术

随着对气候变化认识的深入，我们在关注气候变暖的同时也应该重视极端天气事件的强度与频率发生的变化。核电站的设计与运行充分考虑了地震、洪水和热带气旋等因素，能够配合

电网安全应对极端天气。然而，气候变化诱发的海生物异常繁殖与附着导致鼓网堵塞等现象，迫使核电机组降功率甚至停机停堆。随着类似经验反馈的增多，冷源安全问题愈发突出。冷源系统是电站的循环水系统，最关键的要素是最终热阱的设计。为进一步提高核电厂冷源安全性，强化纵深防御措施，须从监测、预防、处置等方面进行改进：首先，可通过运行参数监测、取水口定期巡检、卫星遥感、水质和水文监测、反冲洗生物采集监测、监测雷达、水下视频与声响探测等手段，对不同致灾物进行全面、全时监测，及时发现可能引发取水系统堵塞的异常情况；其次，制定取水口拦污设施相关设计规范，加强冷源系统管理与维护，制定维修大纲和策略以及工作过程管理，维持冷却水取水口建筑物、设备及相关系统的工作能力。通过实施“纵深防御”策略，从取水口位置选取与水域监测、除污设备设置、备用水源规划、福岛核事故后设计改进到冷源系统组织管理等多个方面进行全方位优化和创新实践，能够有效提升核电厂冷源的安全性和可靠性。

### （3）复杂油气藏压裂优化与产能预测技术

复杂油气藏压裂优化与产能预测技术是致密砂岩、碳酸盐岩等复杂储层高效开发的核心技术。此类储层具有低孔低渗、非均质性强特点，常规开发难以实现经济有效开采，需通过水力压裂构建人工裂缝网络提升产能。该技术融合地质建模、工程优化、实时监测与机器学习，旨在实现压裂设计精确化与产能预测智能化。

其核心技术内涵分4个方面：一是多尺度数据融合与联合反演，基于地震、测井、岩心数据，借助全波形与岩相反演提升储层参数识别精度，为压裂设计提供地质依据；二是地质力学分析与裂缝预测，结合地应力、岩石力学参数和微震监测，构建三维裂缝模型，优化压裂施工参数；三是动态数据实时优化，利用光纤声波传感等手段监测压裂过程，依托机器学习实现参数动态调控；四是产能预测与数字孪生一体化，融合地质模型、历史生产与实时数据，借助神经网络与数值模拟预测产能，并通过数字孪生优化生产策略。

该技术呈智能化、集成化、绿色化发展趋势：人工智能替代经验模型，实现参数自主优化；地质—工程—生产数据融合，构建“设计—施工—监测—预测—优化”闭环；低污染压裂液与节能工艺是研发重点；应用向页岩油、深层致密气等更具挑战性的储层拓展。

### （4）超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备

超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备是指针对埋深超过6 000 m甚至更深地层的极端地质条件，以实现安全、高效、经济开发为目标，融合绿色环保理念与智能化技术的综合性钻井工程体系。该技术体系涵盖地质勘探、钻井设计、实时控制、废弃物处理等全流程，是多学科交叉、技术密集的系统工程。在智能化方面，该体系的核心在于借助智能算法、物联网传感器、大数据分析、数字孪生等前沿技术，全面提升钻井过程的感知、决策与控制能力。例如，通过随钻测井（LWD）和随钻地震（SWD）技术，能够实时获取地下岩性、物性和流体信息，形成动态地质模型；进而利用机器学习、深度学习等算法，对海量井下数据进行快速解释与反演，实现钻速预测、井眼轨迹精准控制、钻井参数多目标优化（如机械钻速、井身质量、工具安全的协同），从而达到提速、降本、增效的目的。智能系统还能根据实钻数据自主调整钻压、转速、流量等参数，

有效规避复杂地质风险，减少非生产时间。在绿色化方面，该技术体系强调在整个钻井生命周期内贯彻低碳环保原则。针对超深层高温高压环境，研发应用高性能环保型钻井液体系至关重要，这类钻井液需具备良好的生物降解性、低毒性、高循环利用率，并能有效保护产层。同时，大力推广节能装备，如采用网电或混合动力驱动的电动钻机，相比传统柴油钻机可显著降低化石能源消耗与CO<sub>2</sub>排放。此外，对钻井产生的固体岩屑和废水实施严格的无害化处理与资源化利用流程，例如通过热脱附、生物降解等先进工艺实现废弃物的清洁处理和循环再生，最大限度减轻对环境的影响，实现勘探—开采全流程的“绿色化”转型。未来，该领域的发展将更加注重智能化与绿色化的深度融合，例如开发自主决策的智能钻井机器人、构建全生命周期的碳排放监测与优化系统，从而推动超深层油气资源开发向更加安全、高效、清洁、可持续发展的方向发展。

#### （5）海上风光耦合发电系统

海上风光耦合发电系统是指将风电和光伏发电项目在相同或相邻海域集中规划建设，通过共享基础设施，实现风光互补高效利用的综合能源系统。其核心是通过空间立体开发、多能互补与智能调控，最大化提高海域资源利用率，平抑单一能源出力波动，降低度电成本（LCOE），提升发电系统的稳定性与经济性。

该领域聚焦于工程技术应用中的关键技术问题，主要研究方向包括：① 一体化平台设计——研发适用于海上恶劣环境的浮动式/固定式综合平台，实现风电与光伏发电的深度集成或高效空间立体开发；② 智能协同控制技术——基于数字孪生与大数据构建系统状态感知、功率预测和多目标优化控制系统，重点突破风光出力耦合建模、实时动态协调控制等；③ 多能融合系统集成——探索与海洋能、绿氢制储等能源形式的互补融合，构建综合海上能源系统。

随着深远海能源开发战略推进，海上风光耦合发电系统工程开发呈现以下前沿趋势：主战场向深远海（水深 >50 m，离岸 >50 km）延伸，驱动抗极端环境的漂浮平台、高可靠性柔直输电及无人化智能运维技术发展；同时，通过标准化设计、模块化建造、大规模集成、运维船舶人员共享、公共基础设备共享等途径降低成本。

#### （6）沙戈荒能源大基地风—光—火—储多能互融工程技术

沙戈荒能源大基地是针对风能、太阳能等可再生能源能量密度低、不稳定波动等特征，利用沙漠、戈壁、荒滩建设的风电、光伏基地，并配置一定容量的燃煤、光热发电和储能，以实现高比例可再生能源的大规模利用。

当前沙戈荒能源大基地主要以风—光—火—储多能互补的模式为主，通过大电网集中调度，采用电能“削峰填谷”为主的刚性耦合和调控方式。在新型储能技术尚有待突破的背景下，仍依赖于火电机组的灵活调节能力，以牺牲效率和安全性以及高碳排放强度为代价；风、光等可再生能源消纳和利用途径单一。要突破上述挑战，亟须建设本质安全可靠、灵活低碳的多能互融新能源大基地。改变大型风光电力基地模式，综合考虑风—光—火—储等不同能源的能源与资源双重属性，进行风、光与化石能源的源头互补；通过异质能量与多元物质跨系统的深度耦合，突破电—氢/燃料—碳多过程协同有序转化、不同品位能量的梯级利用和多元存储等关键技术；构建热—流—力—电—控动态特性的数字孪生表征体系，实现高比例可再生能源非稳态输入与多负荷输出的全

时空源荷匹配。

预计到 2030 年，我国沙戈荒能源大基地总装机容量将超过 4.5 亿千瓦。风-光-火-储多能互融工程技术有望对沙戈荒能源大基地的系统构建、规划设计与全工况优化运行提供有力支撑。

### (7) 核电站数字孪生技术

数字孪生是实现物理系统向数字化模型映射的关键技术。它通过多维度信息感知与现实物体的交互融合，并借助智能算法等工具，实现对现实物体的智能认知、迭代优化等功能。数字孪生核电站是动力学、机械学、建模、仿真、数据处理、智能算法、优化迭代等多种技术的系统结合体，是面向复杂系统和设备的建模与仿真。目前，尽管数字孪生技术在学术和实践上仍处于发展阶段，但其有潜力广泛应用于关键复杂核电设备的设计、制造、运行维护、性能优化等全生命周期过程。

关键技术包括：① 核电设备及系统的数字模型——实现孪生核电站的基础，建模方法包括三维动态仿真与数字特征建模，其中系统级建模是数字孪生建模研究的重点和难点，也是未来进一步研究的方向；② 数字孪生海量数据的信息处理技术——通过数据管理平台和中心数据库实现核电系统的状态信息管理，借助信息传感交互与协同技术建立中心数据库与各离散数据库的信息协同，实现数字孪生核电站设备之间数据的匹配和真实映射；③ 数字孪生核电站的仿真运维研究——依托数字孪生核电站模型和信息处理技术，进行孪生核电站设备的运行状态模拟、设备检测模拟、维修模拟、设备改造、整体性能优化模拟等，通过沉浸式仿真技术可更加真实地反映数字孪生核电站数据对实体核电站运维的预测效果。

### (8) 核电站提升功率输出方法和设备研究

随着核电技术的进步，核电机组的安全性显著提升。利用新技术对早期核电厂进行改造，可以充分释放其潜力，提升其发电能力，持续增强核电竞争力。根据核电机组反应堆功率提升幅度不同，功率提升主要有 3 种途径：① 测量不确定度再俘获（measurement uncertainty recapture），可使功率增加近 2%。实现功率提升的方法是改善反应堆功率计算技术，即通过采用最先进的给水流量测量装置降低测量不确定度，反过来这也为更精确的功率计算打下了基础。② 伸展功率提升（stretch power uprate），一般可使功率提高 2%~7%，但是仍处于机组的现有设计容量范围内。各台机组的实际功率提升比率将取决于机组的运行裕度设计。伸展功率提升通常需要修改仪表设备的整定值，但不需要实施重大的电厂改造。③ 扩展功率提升（extended power uprate），可使功率提高 7%~20%，需要对核电厂配套设备如高压涡轮、冷凝泵和马达、主发电机和 / 或变压器进行重大改造。掌握功率提升方法，可增加核电机组出力，并为核电机组的设计优化和核电技术自主创新奠定基础，从而充分发展核电优势，提高核电竞争力，为群堆优化提供支撑，实现核电可持续发展。

### (9) 战略性矿产资源综合评价技术

战略性矿产资源综合评价技术是指对战略性矿产资源的成矿地质条件、成矿控制因素、找矿潜力、矿产调查、矿产勘查、资源量（储量）的数量和品质、共伴生矿产综合利用价值等，进行多方法、多指标综合评价的技术方法。成矿地质条件和成矿控制因素研究的主要技术方向

包括放射性同位素定年技术、稳定同位素示踪技术、岩石矿物结构分析技术、元素成分及含量高精度高准确度分析技术、流体/熔体包裹体分析测试技术、成岩成矿模拟实验技术等。找矿潜力和矿产调查研究的主要技术方向包括地质调查、物探、化探、遥感、综合信息评价、人工智能(AI)找矿预测区(靶区)圈定等技术。矿产勘查研究的主要技术方向是绿色勘查技术,包括卫星多光谱和高光谱技术、航空和无人机物探技术、无人机遥感技术、绿色化探技术、尽量用浅钻代替探槽和剥土工程、环保钻井泥浆技术、绿色高效钻探技术等。资源量(储量)的数量和品质研究的主要技术方向包括几何法和矿体圈定与资源量(储量)估算软件(如SD法、MicroMine等)。共伴生矿产综合利用价值研究的主要技术方向包括共伴生矿产的赋存状态研究方法、伴生矿产含量的高精度测试技术、综合指标评价技术、综合利用技术、生态环境影响评估技术等。战略性矿产资源综合评价技术的发展趋势包括:高精度微区原位同位素定年技术、非传统同位素示踪技术、不透明矿物流体包裹体分析技术、成岩成矿模拟实验技术、天(卫星)-空(无人机)-地(地面)-井(钻孔)联合探测技术、多矿种联合勘查(如油钾兼探等)技术、新发现矿种(如天然氢、高纯石英原料等)勘查技术、多元信息联合反演技术、地质图AI读图技术、当量指标矿体圈定方法等。

#### (10) 智能地下成像与储层建模一体化技术

智能地下成像与储层建模一体化技术是融合地震成像、多物理场反演、数字孪生与人工智能的跨学科技术体系。其核心是通过多源数据融合与智能算法,突破传统地质建模的“静态、单一尺度、低分辨率”局限,实现地下储层从宏观构造到微观孔隙的全尺度、动态化、高精度表征,构建可实时更新的三维数字孪生模型,为油气勘探开发、深地工程及碳封存提供全生命周期决策支持。

其技术内涵分为3个方向:一是多物理场耦合反演,整合地震、测井、重力、电磁等多物理场数据,结合深度学习突破传统反演的线性假设限制,提升复杂地质体的成像分辨率;二是数据增强与知识嵌入,通过生成对抗网络合成稀缺数据,结合地质先验知识构建约束模型,解决小样本问题;三是数字孪生与动态建模,基于实时监测数据构建储层参数的“四维”动态模型。

技术发展趋向于自动化、多尺度化和生态化:从“人工干预”向“端到端自动化”演进,实现孔隙-裂隙网络的自动识别与参数反演;从宏观构造建模向微观孔隙成像延伸,结合纳米CT和分子模拟,指导“甜点”评价;研发自主可控的建模平台,并构建开放应用程序接口(API),支持第三方算法插件集成,形成“核心软件+生态应用”的产业格局。

#### (11) 煤矿井下瓦斯增产及采空区CO<sub>2</sub>封存技术

煤矿井下瓦斯增产技术旨在通过多种物理和化学方法,提高煤层中瓦斯的抽采效率,保障矿井安全并实现资源的有效利用。采空区CO<sub>2</sub>封存技术则是在煤矿采空区内注入CO<sub>2</sub>,实现瓦斯替代、环境治理和温室气体减排的多重目标。二者结合,构成了矿井瓦斯治理与环境保护的重要工程技术体系。其主要研究方向包括:高瓦斯煤层高效增透增产技术(如水力压裂、液态CO<sub>2</sub>致裂、定向爆破等);采空区裂隙演化及其对气体运移通道的影响,CO<sub>2</sub>吸附-渗流-封存行为模拟与实验验证;封存稳定性与风险评估模型构建;井下多气体协同调控技术。

未来发展趋势主要集中在“增产+封存”一体化、过程智能控制与环境安全评估等方面。具体表现为：基于物联网与智能传感器的井下气体动态监测系统将进一步完善，实现多源气体浓度与压力信息的实时采集与远程调控；基于大数据驱动的瓦斯抽采-CO<sub>2</sub>注入协同优化算法将不断推进；同时，采空区碳封存将与碳资产管理挂钩，形成“资源化+低碳化+智能化”融合的新型煤矿绿色发展路径。

### （12）深部矿井热害治理技术

深部矿井热害治理技术是指针对矿井深部高温、高压和复杂地质条件下出现的热灾害，采取的预防、控制和缓解技术措施。随着矿井开采深度增加，地温升高、热源多样、热负荷增大，井下热害问题日趋严重，呈现出高温、高湿、多源叠加的复杂特点。有效的热害治理需从热源控制、传热路径削弱和作业面降温等多个层次协同开展，实现热环境的系统性调控。其主要研究方向包括：高温地热场建模与热源识别；冷却系统设计（如制冷站、冰浆/冷水输送系统）；热障隔热与通风耦合系统优化；深部热害多物理场数值模拟与动态控制策略；热能回收利用与绿色能源协同系统构建。

未来，热害治理将朝着系统集成化、运行智能化和能效梯级利用方向发展。具体趋势包括：发展集制冷、通风、控湿于一体的智能热害调控系统，实现对矿井不同作业区域的差异化温控；引入热能回收技术，将深部高温废热用于井上供暖、工业余热利用等，实现能源循环；同时，结合AI智能算法与数字孪生平台，提升井下热环境响应式调控能力，为深部矿井安全、舒适、高效作业提供技术保障。

## 5.2.2 Top 4 工程开发前沿重点解读

### 5.2.2.1 人工智能驱动的虚拟电厂

虚拟电厂是基于电力系统架构，运用现代信息通信、系统集成控制等技术，聚合分布式电源、可调节负荷、储能等各类分散资源，作为新型运营主体协同参与电力系统优化和电力市场交易的电力运行组织模式。不同于传统集中式电厂，虚拟电厂聚合资源类型多元、发用电行为机理复杂、调节能力及偏好差异性高，给其规模化发展带来较大挑战。

人工智能驱动的虚拟电厂通过融合先进人工智能算法、发用电资源物理特征和电力市场机制规则，实现对分布式光伏、用户侧储能、工商业用户、电动交通工具等海量电力需求侧灵活资源的精准预测、高效交易与最优调度。借助时间序列预测、强化学习、大语言模型等人工智能技术，虚拟电厂可精准识别并聚合多类型需求侧资源的灵活调节能力，为新型电力系统缓解保供压力、提高新能源消纳能力、提升电力资源配置效率、助力能源电力行业低碳化转型提供解决方案。

虚拟电厂概念最早于20世纪90年代提出，其发展历程经历了从人工调度到自动化控制，再到利用人工智能技术实现自适应优化的演变。早期虚拟电厂主要依赖人工指令进行调度，本质是在用电紧张时段进行负荷削减与有序用电。随着信息化、数字化技术的进步，虚拟电厂逐

步转变为集中控制模式，通过预设规则进行自动化调度。近年来，随着物联网、云计算与大数据技术的发展，虚拟电厂具备了海量数据实时采集与分析能力，人工智能方法开始广泛应用于虚拟电厂发用电预测、调节能力建模、交易策略生成与调度优化等各个环节，使虚拟电厂的价值不再局限于电力保供，还可满足新型电力系统调峰、备用、调频等灵活调节需求。在此背景下，“AI+能源”模式成为虚拟电厂技术发展的主流方向。主要研究内容包括人工智能助力下的高精度负荷预测与行为建模、基于人工智能的可调能力动态评估、智能竞价策略生成以及多类型资源自适应调度优化等。在新型电力系统发展趋势下，人工智能驱动的虚拟电厂在促进可再生能源消纳、保障电网安全运行以及推动能源结构转型等方面将具有重要的现实意义和战略价值。

在“人工智能驱动的虚拟电厂”工程研究前沿中，印度以 316 件核心专利位居世界第一，公开量为 56.23%，其次为中国、美国和韩国（表 5.21）。其中，美国与印度的合作最多，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拉夫里科技大学、国家电网有限公司、卡林加大学等（表 5.22），但机构之间并无合作。

表 5.21 “人工智能驱动的虚拟电厂”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	印度	316	56.23	10	0.83	0.03
2	中国	112	19.93	277	23.01	2.47
3	美国	93	16.55	811	67.36	8.72
4	韩国	27	4.80	26	2.16	0.96
5	德国	8	1.42	32	2.66	4.00
6	加拿大	4	0.71	17	1.41	4.25
7	荷兰	4	0.71	6	0.50	1.50
8	以色列	3	0.53	49	4.07	16.33
9	阿拉伯联合酋长国	3	0.53	0	0.00	0.00
10	日本	3	0.53	0	0.00	0.00

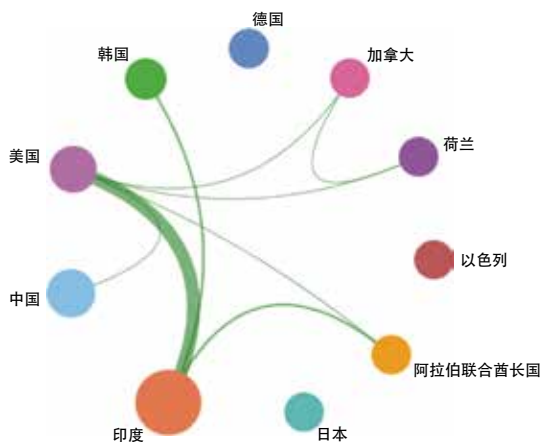


图 5.13 “人工智能驱动的虚拟电厂”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 5.22 “人工智能驱动的虚拟电厂”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	拉夫里科技大学	17	3.02	0	0.00	0.00
2	国家电网有限公司	15	2.67	41	3.41	2.73
3	卡林加大学	11	1.96	1	0.08	0.09
4	强力电气工程投资组合 2022 有限责任公司	10	1.78	4	0.33	0.40
5	萨维塔工程学院	6	1.07	0	0.00	0.00
6	萨维塔医学与技术科学 研究所	6	1.07	0	0.00	0.00
7	通用电气公司	5	0.89	162	13.46	32.40
8	韩国三星电子公司	5	0.89	8	0.66	1.60
9	尼提梅纳克希理工学院	5	0.89	1	0.08	0.20
10	阿努拉格大学	5	0.89	0	0.00	0.00

未来 5~10 年，“人工智能驱动的虚拟电厂”的主要发展方向包括：① 灵活性资源多源异构数据融合与协同分析——融合企业生产、电力气象、人流 / 交通流趋势等海量多元数据，构建更精确、更鲁棒的虚拟电厂预测与运行模型，进一步深挖需求侧资源灵活性潜力；② 面向虚拟电厂的隐私保护与安全协同技术——应用差分隐私、联邦学习、安全多方计算等方法，在满足虚拟电厂调度运行需求的前提下，保护需求侧资源的发用电特征数据隐私，提升虚拟电厂数据安全性；③ 可解释性和可信赖性提升——增强人工智能技术在虚拟电厂场景中的可解释性和可信赖性，规避人工智能黑箱模型导致的小概率极端结果或不可行结果。随着人工智能技术的进步和虚拟电厂市场环境的日益完善，人工智能驱动的虚拟电厂将在未来新型电力系统中发挥日益重要的作用，成为未来能源系统调节资源的重要组成部分。图 5.14 为“人工智能驱动的虚拟电厂”工程开发前沿的发展路线。

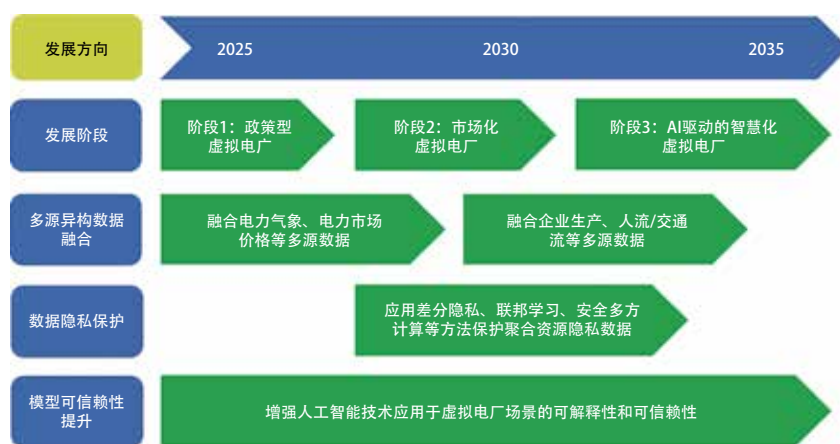


图 5.14 “人工智能驱动的虚拟电厂”工程开发前沿的发展路线

### 5.2.2.2 极端天气核能安全技术

极端天气是相对罕见的且对人类社会和生态系统产生破坏的天气现象的统称。根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）最新评估报告，全球气候变化不断加剧，台风、干旱、强降雨等极端天气事件频发。核电发展始终围绕“安全”这一核心主题，安全被视为核工业的生命线。为积极应对日益增多的极端天气，核电界主要从选址、应急和冷源三方面考虑。

根据国内外核电厂选址有关法规要求，在核电厂选址中需要评价3个方面的基本内容：首先是厂址外部环境对核电厂安全可能产生的影响，包括极端天气；其次是核电厂对厂址周围区域环境可能产生的影响，包括极端天气导致核电站对所在区域的影响；最后是实施应急计划的可行性，即在假定核电厂发生需要采取应急事故的工况下，极端天气对实施应急计划的影响。在核电厂选址中，要对这些事件因素（尤其是极端天气可能产生的影响）以极低的发生概率水平或极端状态进行安全评价，以确定厂址的适宜性和工程的设计基准。

核反应堆运行期间，包括停运后，热量必须从堆芯安全导出，而冷源在这一过程中扮演着不可或缺的角色。冷源丧失事件会导致机组降功率运行甚至停机停堆，严重影响核电厂的安全稳定运行。据世界核电运营者协会（WANO）的权威统计，自2004年以来，全球范围内已发生上百起核电厂冷源安全风险事件。我国所有核电厂均建设在沿海地区，受海洋环境变化影响显著。首先，优化核电厂取水构筑物，采用直流冷却水系统，而部分电厂由于取水海域条件限制或取水水深要求等，采用深层涵洞取水或组合型取水方式；其次，冷源相关设施的优化和改造是提升核电冷源可靠性的关键环节，包括提升鼓网抗堵能力、优化和改造前置冷源设施等措施；最后，取水构筑物及海水过滤设施的改进，取水构筑物的改进以降低取水流速为标准，并基于生物对外界刺激的应激反应，增设声呐、气泡幕等生物行为驱导装置。

在“极端天气核能安全技术”工程研究前沿中，中国以35件核心专利位居世界第一，公开量比例为57.38%，其次为美国、德国和日本（表5.23）。其中，美国与丹麦的合作最多（图5.15）。专利产出较多的机构有鞍钢股份有限公司、中广核研究院有限公司、南佛罗里达大学等（表5.24），但机构之间并无合作。

表 5.23 “极端天气核能安全技术”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	35	57.38	57	24.26	1.63
2	美国	16	26.23	125	53.19	7.81
3	德国	2	3.28	28	11.91	14.00
4	日本	2	3.28	21	8.94	10.50
5	丹麦	2	3.28	2	0.85	1.00
6	法国	2	3.28	0	0.00	0.00
7	印度	1	1.64	4	1.70	4.00
8	加拿大	1	1.64	0	0.00	0.00
9	韩国	1	1.64	0	0.00	0.00
10	沙特阿拉伯	1	1.64	0	0.00	0.00

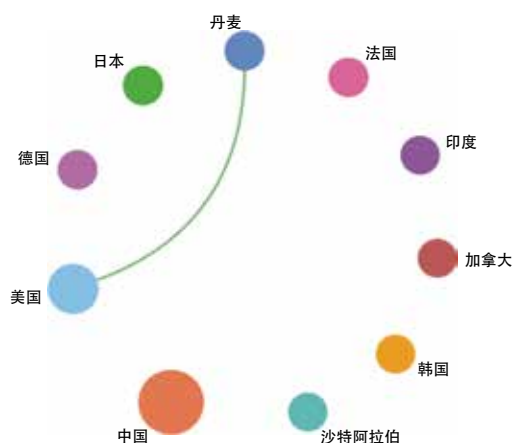


图 5.15 “极端天气核能安全技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 5.24 “极端天气核能安全技术”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	鞍钢股份有限公司	5	8.20	5	2.13	1.00
2	中广核研究院有限公司	2	3.28	22	9.36	11.00
3	南佛罗里达大学	2	3.28	2	0.85	1.00
4	华北电力大学	2	3.28	0	0.00	0.00
5	罗谢尔集团有限责任公司	2	3.28	0	0.00	0.00
6	丰田汽车公司	2	3.28	0	0.00	0.00
7	布里萨国际有限责任公司	1	1.64	36	15.32	36.00
8	索利迪亚技术公司	1	1.64	28	11.91	28.00
9	光谱系统与技术有限公司	1	1.64	21	8.94	21.00
10	日本触媒株式会社	1	1.64	20	8.51	20.00

未来 5~10 年重点发展方向（图 5.16）包括：

1) 基于原机组循环水系统设备进行升级改造，以提高抵御流道堵塞的能力：海工优化实体工程推进；拦截过滤设施阶梯配置；海生物化学抑制研究；使用高强度网兜提高拦截和处理效率；建立取水区堵塞物监测预警系统。

2) 分析冷源丧失的最极端工况，结合事故特征进行多重事故叠加工况下的安全分析：电源方面，地震导致失去厂外 500 kV 和 220 kV 供电、地震导致 6 台固定式柴油发电机无法正常工作；设备方面，安全厂用水泵因失电无法启动；气象方面，取水头部海域大风导致人员无法进行清污作业，造成海面浮游生物不断向取水头部聚集；海生物方面，大量海生物堵塞取水头部；厂区道路，地震导致厂区道路受损，移动柴油发电机、移动泵等设备无法运输至规定位置。

3) 多种冷源方案探索：正常运行时机组采用海水冷却二回路，海水丧失后机组采用空冷塔进行冷却，并进行三回路海水流道的清理，同时积极探索二次循环冷却技术在核电站的应用。

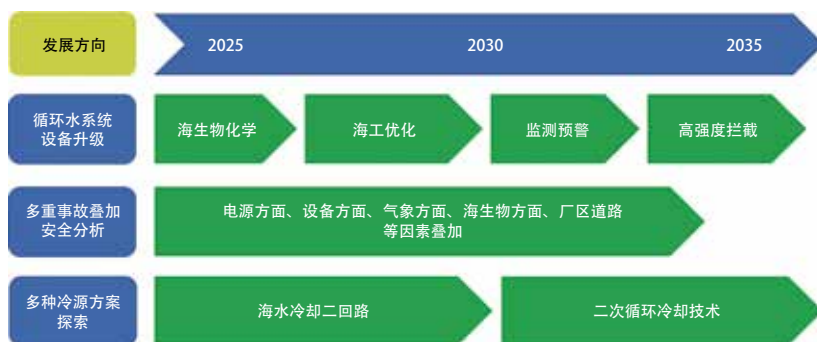


图 5.16 “极端天气核能安全技术” 工程开发前沿的发展路线

### 5.2.2.3 复杂油气藏压裂优化与产能预测技术

复杂油气藏压裂优化与产能预测技术是针对低渗透、超低渗透、页岩气、致密油等非常规油气资源开发的关键工程技术，该技术通过融合地质建模、压裂工艺优化、动态监测与大数据分析等多学科手段，实现对复杂油气藏的高效开发。随着全球能源结构转型，非常规油气资源占据越来越重要的地位。推动该技术的研究与应用，可大幅提升复杂油气藏的单井产量和最终采收率，对保障国家能源安全、促进油气行业技术升级具有重大意义。该技术起源于 20 世纪 70 年代的水力压裂技术，随着水平井和多段压裂技术的发展，逐步形成了以“地质-工程一体化”为核心的现代压裂优化体系。近年来，随着人工智能、大数据等技术的融合应用，压裂优化与产能预测正朝着智能化、精细化、实时化方向发展。

从专利产出情况来看，中国在该领域的专利公开量占比高达 91.88%（表 5.25），显示出极强的技术活跃度和主导地位。美国、加拿大、澳大利亚、法国等国家虽然专利数量不多且公开量较少，但平均被引数较高，表明其技术质量与影响力较强。从机构层面看，中国石油天然气股份有限公司、中国石油化工集团有限公司、西南石油大学、中国石油大学（北京）等机构在专利公

表 5.25 “复杂油气藏压裂优化与产能预测技术” 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	713	91.88	2 428	75.95	3.41
2	美国	20	2.58	406	12.70	20.30
3	韩国	13	1.68	39	1.22	3.00
4	日本	8	1.03	22	0.69	2.75
5	俄罗斯	6	0.77	10	0.31	1.67
6	加拿大	3	0.39	74	2.31	24.67
7	澳大利亚	2	0.26	69	2.16	34.50
8	印度	2	0.26	51	1.60	25.50
9	法国	2	0.26	43	1.35	21.50
10	荷兰	2	0.26	38	1.19	19.00

开量和被引数方面领先（表 5.26），显示出中国在产业化与学术研究方面的双重优势。尤其是西南石油大学、成都理工大学等高校在平均被引数上表现突出，表明其研究成果具有较高的学术影响力。国际合作方面，中国虽在数量上领先，但与国际高水平机构的合作仍有待加强；中国国内机构之间的合作较为密集，但跨国合作，尤其是与欧美高水平研究机构的合作，则相对较少（图 5.17 和图 5.18）。

图 5.19 为“复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”工程开发前沿的发展路线。从发展趋势来看，复杂油气藏压裂优化与产能预测技术未来将更加注重跨学科融合，特别是与岩石力学、渗流力学、地球物理、计算机科学、人工智能等的结合，推动复杂油气藏压裂技术向“智能、精准、绿色”方向发展。该技术不仅适用于传统页岩气、致密油等非常规油气开发，还可拓展至深层油气、海洋油气等领域。此外，随着碳中和目标推进，该技术还可与 CCUS 技术结合，推动油气行业绿色低碳转型。

表 5.26 “复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”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	中国石油天然气股份有限公司	152	19.59	577	18.05	3.80
2	中国石油化工集团有限公司	98	12.63	305	9.54	3.11
3	西南石油大学	65	8.38	311	9.73	4.78
4	中国石油大学（北京）	65	8.38	231	7.23	3.55
5	中国海洋石油集团有限公司	55	7.09	98	3.07	1.78
6	中国矿业大学（北京）	17	2.19	92	2.88	5.41
7	北京科技大学	15	1.93	50	1.56	3.33
8	西安石油大学	13	1.68	54	1.69	4.15
9	成都理工大学	9	1.16	136	4.25	15.11
10	中煤科工集团重庆研究院有限公司	8	1.03	8	0.25	1.00

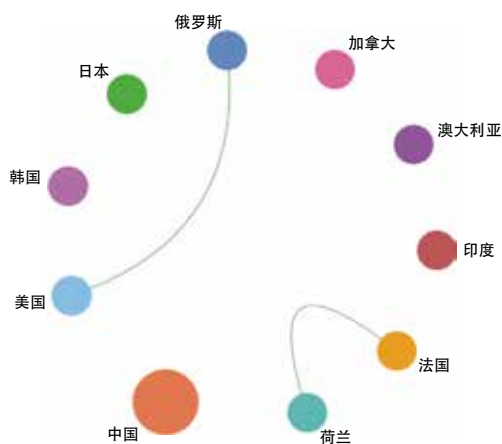


图 5.17 “复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

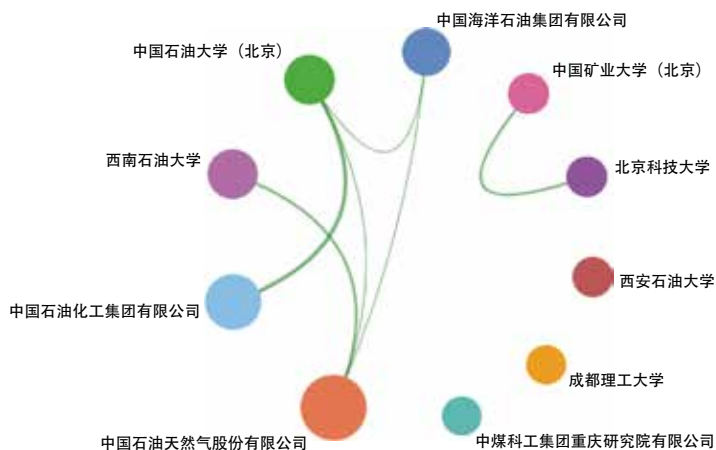


图 5.18 “复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

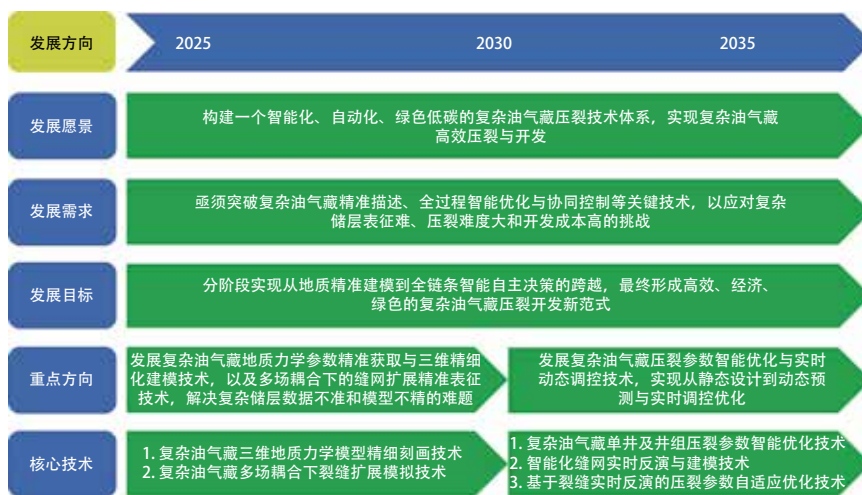


图 5.19 “复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”工程开发前沿的发展路线

#### 5.2.2.4 超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备

深层与超深层赋存我国 39% 剩余石油、57% 剩余天然气，预测万米深地仍蕴藏大量油气资源。我国超深层油气资源集中于塔里木盆地、四川盆地等区域。当前钻完井深度突破 9 000 m，但超深层“四超”条件导致钻井风险大、质量控制困难。发展超深层油气资源开采技术可增强我国能源自主供给能力，减少进口依赖，缓解能源供需矛盾；绿色智能一体化钻井技术及装备的发展能够推动钻井过程提速降本，减少环境影响，实现经济与环保双赢。超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备是指融合智能化、绿色环保理念与先进钻井工艺，利用智能算法、传感器、大数据，集成地质数据采集、井眼轨迹控制、钻井参数优化，配合节能低污染装备，实现全流程智能-绿色作业。早期钻井技术简单，难以满足超深层需求，而近年深井超深井技术迅猛发展，自动化钻机、井身结构优化、控压钻井等关键技术实现突破，8 000 m 超深井常态化，首口万米井塔科 1 井挺进 11 100 m。国内，塔里木盆地超深层油气丰富，中国石化西北油田在此开展智能导

钻实钻应用；四川盆地也是重点区域，地层复杂，需先进钻井技术。国际上，中东地区如沙特阿拉伯、阿联酋超深层油气开发活跃，吸引全球技术合作；美国二叠纪盆地，页岩油气开发推动钻井技术进步。未来，智能化与多技术融合加深，5G、大数据、云计算助力实时决策与数字孪生；绿色低碳升级，研发环保钻井液、采用清洁能源；装备向高可靠性、高适应性发展。

在专利产出方面，中国占据绝对主导地位，其专利公开量占比高达 99.17%，被引数占比 94.87%（表 5.27）。其余国家如澳大利亚、美国、阿根廷等虽然也有少量专利产出，但数量和影响力远低于中国；美国、阿根廷和荷兰的平均被引数较高，显示出较强的个别影响力。主要研究机构包括：中国石油大学（北京）、西南石油大学、成都理工大学等高校，其在钻井技术理论研究、装备研发贡献突出；中国石油天然气股份有限公司、中国石油化工集团有限公司等大型石油企业，其拥有先进研发与实践平台（表 5.28）。国际化合作开展较少，当前相关研究合作主要集中在阿根廷与荷兰之间（图 5.20）。主要机构间的合作网络如图 5.21 所示。

表 5.27 “超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”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	955	99.17	2 017	94.87	2.11
2	澳大利亚	3	0.31	10	0.47	3.33
3	美国	2	0.21	48	2.26	24.00
4	阿根廷	1	0.10	51	2.40	51.00
5	荷兰	1	0.10	51	2.40	51.00
6	日本	1	0.10	0	0.00	0.00
7	南非	1	0.10	0	0.00	0.00

表 5.28 “超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”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	中国石油天然气股份有限公司	219	22.74	350	16.46	1.60
2	中国石油化工集团有限公司	148	15.37	211	9.92	1.43
3	西南石油大学	147	15.26	400	18.81	2.72
4	中国石油大学（北京）	118	12.25	422	19.85	3.58
5	四川谐铭科技有限公司	18	1.87	35	1.65	1.94
6	中国海洋石油集团有限公司	16	1.66	31	1.46	1.94
7	中国建筑材料科学研究总院有限公司	14	1.45	30	1.41	2.14
8	西安石油大学	10	1.04	31	1.46	3.10
9	长江大学	9	0.93	14	0.66	1.56
10	成都理工大学	7	0.73	90	4.23	12.86

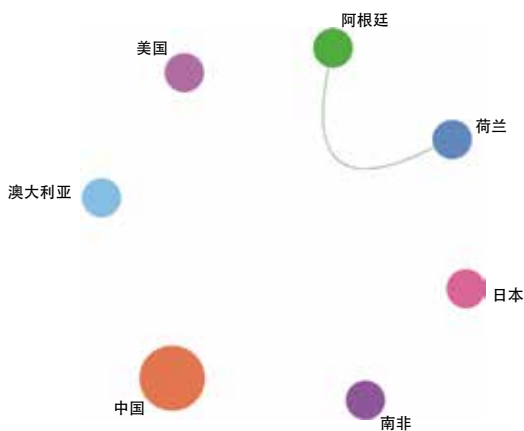


图 5.20 “超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”工程开发前沿主要国家间的合作网络

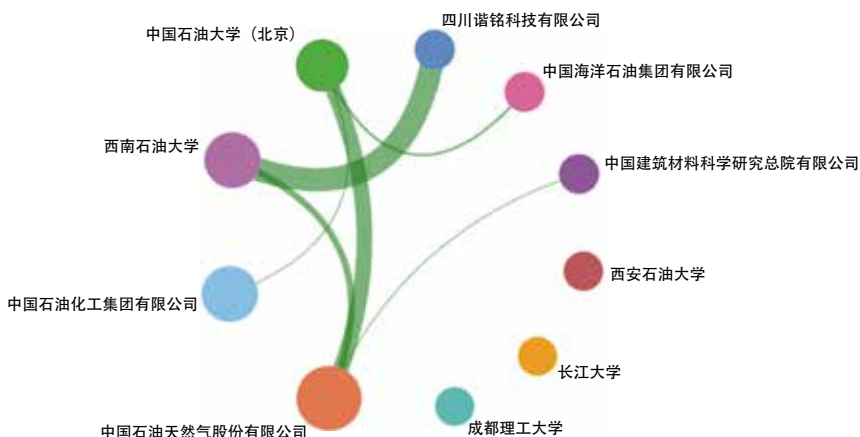


图 5.21 “超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”工程开发前沿主要机构间的合作网络

未来 5~10 年，超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备将迎来全方位的变革与突破，为能源行业的可持续发展注入强大动力。中国已在塔里木盆地、四川盆地等地的现有超深层油气田利用绿色智能一体化技术及装备对老井进行改造，提高钻井效率，并优化新井钻井方案，提升开发效益。该领域的重点发展方向及趋势如下：钻井智能决策与精准控制，例如借助 5G 通信技术的高速低延迟特性，实现井下与地面数据的即时传输，结合大数据分析、人工智能算法，对钻井过程中的地质变化、设备状态等进行实时分析，使钻井决策更精准高效；井下智能机器与高效能装备研发，研发能在复杂井下环境自主作业的机器人，执行钻井工具更换、井壁修复等任务，降低人工干预，提升作业安全性与精准度，进一步提高钻机的自动化程度，实现更多作业环节的自动控制，减少人工操作，增强设备的可靠性与稳定性，降低故障率，保障超深层钻井作业的连续性；新型钻井低碳环保型材料研发，通过应用绿色技术大幅减少钻井作业对环境的负面影响，减少化学药剂使用、降低废弃物排放、提高资源利用率。图 5.22 为“超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”工程开发前沿的发展路线。



图 5.22 “超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”工程开发前沿的发展路线

## 领域课题组成员

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：解光辉 邢慧娴

*Frontiers in Energy* 编辑部：刘瑞芹 殷靓 付凌霄

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：严正 沈文忠 上官文峰 沈水云 王倩 陈思捷 赵耀 韩东 张家博

执笔组成员：李昂 张宸 林天全 冯云岗 杜小泽 董保灿

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 杨勇 郭晴 郭林 林贤军 白云生

执笔组成员：李恭顺 杨勇 郭晴 郭林 林贤军 白云生

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 王坤 丁麟 简伟 李永新 王辽 徐文华

执笔组成员：简 伟 王 坤 刘 敏 李永新 陈 念 李厚民 王 辽 徐文华 关 铭

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：宋先知 江丙友 时国庆 梁东旭 阮竹恩 王海柱 王高升

执笔组成员：江丙友 时国庆 梁东旭 阮竹恩 王高升 张鹏成 孙 一