

## 四、能源与矿业工程

### 1 工程研究前沿

#### 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 1.1.1, 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, “高安全性高能量密度电池体系关键材料” “新能源发电灵活性提升与电网支撑理论” “有机体系电化学氮还原合成氨” 属于能源和电气科学技术与工程领域; “乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究” “核废物玻璃体材料性能研究” “等离子体与反应堆材料相互作用机理” 属于核科学技术与工程领域; “水力压裂三维裂缝扩展模型” “地球深部碳氢循环过程与油气资源分布规律研究” “陆相钾锂盐智能找矿与资源综合定量研究” 属于地质资源科学技术与工

程领域; “深部开采冲击地压诱发机理与预警方法” “二氧化碳驱油提采-捕集封存机制研究” “岩性智能识别方法” 属于矿业科学技术与工程领域。

2016—2021 年各研究前沿相关的核心论文逐年发表情况见表 1.1.2。

#### (1) 高安全性高能量密度电池体系关键材料

电池技术的发展改变了人们的生活, 电池是电子产品、电动汽车和智能电网的核心部分。现有的锂离子电池的能量密度已接近其理论值, 很难满足电动汽车市场的发展需求, 并且在大规模的应用中, 其安全性问题也成为阻碍行业发展的难题。电池主要由正极、负极和电解质组成, 其整体的能量密度依赖正负极, 而安全性则取决于电解质。电极的能量密度由电压和容量决定。高能量密度正极主要发展方向是高电压正极材料和高容量的硫正极材料, 负极则主要向锂金属和硅负极方向发展, 电解质主要向固态电解质发展, 其中, 固态电解质不仅能够

表 1.1.1 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	高安全性高能量密度电池体系关键材料	177	10 783	60.92	2019.7
2	乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究	83	3 466	41.76	2017.8
3	水力压裂三维裂缝扩展模型	239	4 020	16.82	2019.0
4	深部开采冲击地压诱发机理与预警方法	214	3 374	15.77	2019.1
5	新能源发电灵活性提升与电网支撑理论	188	3 058	16.27	2018.9
6	有机体系电化学氮还原合成氨	20	930	46.50	2020.0
7	核废物玻璃体材料性能研究	145	1 134	7.82	2018.8
8	等离子体与反应堆材料相互作用机理	391	19 957	51.04	2017.6
9	地球深部碳氢循环过程与油气资源分布规律研究	157	2 931	18.67	2019.0
10	陆相钾锂盐智能找矿与资源综合定量研究	140	1 884	13.46	2018.7
11	二氧化碳驱油提采-捕集封存机制研究	94	1 618	17.21	2019.0
12	岩性智能识别方法	119	2 608	21.92	2019.7

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。

**表 1.1.2 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	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	高安全性高能量密度电池体系关键材料	7	8	20	31	49	62
2	乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究	15	20	21	19	8	0
3	水力压裂三维裂缝扩展模型	26	20	45	42	52	54
4	深部开采冲击地压诱发机理与预警方法	21	20	35	37	44	57
5	新能源发电灵活性提升与电网支撑理论	18	27	31	43	25	44
6	有机体系电化学氮还原合成氨	0	0	0	5	9	6
7	核废物玻璃体材料性能研究	18	22	24	23	27	31
8	等离子体与反应堆材料相互作用机理	92	109	78	77	32	3
9	地球深部碳氢循环过程与油气资源分布规律研究	22	17	21	21	35	41
10	陆相钾锂盐智能找矿与资源综合定量研究	22	15	24	27	22	30
11	二氧化碳驱油提采-捕集封存机制研究	5	16	12	19	24	18
12	岩性智能识别方法	2	8	15	17	30	47

从本质上解决电池的安全性问题，而且可以适配高能量密度的正负极。固态电解质分为聚合物固态电解质、无机固态电解质和复合固态电解质。复合固态电解质结合了聚合物电解质良好的加工性能和无机电解质高离子电导率的优点，是未来发展的重要方向。

### (2) 乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究

核燃料后处理的主要任务是利用化学处理方法分离乏燃料中的裂变产物，回收和纯化有价值的可裂变物质  $^{235}\text{U}$  和  $^{239}\text{Pu}$  等，然后再将它们制成燃料元件返回核电站（热堆或快堆）使用，提高核燃料的利用率，节约铀资源，另外，通过提取超铀元素和裂变产物，发展同位素在医疗、航天等方面的应用。核燃料后处理流程基于是否在水介质中进行分为水法和干法两大类。水法流程指在水溶液中采用沉淀、溶剂萃取、离子交换等方法对乏燃料进行化学分离纯化；干法流程则指在无水状态下采用氟化物挥发法、高温冶金处理、高温化学处理、液态金属过程、熔盐电解法等方法对乏燃料进行化学分离纯化。干法后处理是当前乏燃料后处理的重要研究方向之一，其在处理高燃耗乏燃料，特别是快堆乏燃料方面更具优势，但工程技术难度较大。当前，

国际上广泛开展分离/嬗变和先进核燃料循环的研究，其中，从核废物中分离回收次锕系核素和长寿命裂变产物是该研究的关键。乏燃料后处理和高放废液分离一体化流程与现有乏燃料处理处置方式相比，流程简单、二次废物少、经济性高，更能满足先进核燃料循环的分离要求。

### (3) 水力压裂三维裂缝扩展模型

水力压裂是通过往地层中泵入高排量流体，在储层中产生人工裂缝来沟通天然裂缝的储层改造技术。在水力压裂数值模型中，传统的二维模型以及准三维模型由于在裂缝高度方向上为裂缝几何形貌引入了理想化的假设，无法描述实际水力裂缝的扩展过程。三维水力压裂模型指在模型中放松了对裂缝的几何约束条件，因而能够更接近实际的裂缝设计方案。目前，三维水力压裂模型可分为平面三维模型与非平面三维模型。平面三维模型假设水力裂缝只能在原始裂缝平面内扩展，而非平面三维模型放宽了这一条件，得以模拟水力裂缝的非平面偏转。在三维水力压裂模型中，裂缝的扩展模式更加复杂，往往是耦合了三种基本模式的混合扩展模式，需采用新的裂纹扩展准则，导致裂缝形貌相比二维模型更加复杂，

需要新的算法来准确捕捉裂缝前沿及计算裂纹尖端的应力场。除此之外，二维模型中面临的问题如地应力、滤失效应、储层非均质性、压裂方式等对水力裂缝扩展的影响，支撑剂的运移等仍需在三维模型中进一步探索。

### （4）深部开采冲击地压诱发机理与预警方法

冲击地压是指岩体中聚积的弹性变形势能在一定条件下突然猛烈释放，导致岩石爆裂并弹射出来的现象，是一种严重的动力灾害。随着矿井开采深度的增加，煤矿冲击地压灾害形势严峻，冲击地压灾害发生机理、监测预警与防控技术研究对煤矿安全开采愈发重要。该前沿的主要研究内容包括：深部煤矿冲击地压动力响应及灾变机理、深部煤矿冲击地压灾害智能监测预警理论与技术、深部煤矿冲击地压防控机理与方法。针对冲击地压的发生机理，揭示围岩应变能释放突变机制是研究冲击地压发生机理新的突破途径；在冲击地压预警技术方面，融合数据挖掘、大数据处理分析等人工智能算法，实现冲击地压灾害的智能监测预警与多场多维感知是今后的发展方向。

### （5）新能源发电灵活性提升与电网支撑理论

大力发展以风能、太阳能为代表的新能源发电，是中国推动能源电力行业绿色低碳转型，实现“30·60”碳中和气候应对目标的必由之路。不同于出力平稳、可控的传统发电设备，新能源发电具有强波动性和弱可控特性，将从根本上改变电力系统的物理形态与运行方式。随着集中式与分布式新能源的快速发展，电力系统源荷双侧不确定性持续增加。同时，随着传统火电机组的逐步退役，电力系统灵活调节资源愈发紧缺，电力供需平衡与电网安全经济运行面临前所未有的挑战。亟须探索新能源发电灵活性提升与电网支撑理论的关键技术，以源网荷储有机协同破解新能源高比例接入下的多时间尺度电力电量平衡难题，助力高比例新能源的广域高效消纳。新能源发电灵活性提升与电网支撑理论的主要研究方向包括：电力系统灵活性平衡机理、

调控技术与市场机制；火电机组灵活性改造和转型为调节电源的技术经济评估；规模化风光发电系统惯量控制与主动频率支撑技术；规模化风光发电系统的电网暂态电压支撑技术；规模化风光发电系统的稳定控制技术；多周期、多类型储能设施协同配置与优化运行方法；海量异质需求侧资源的分层聚合、协调控制与分布式交易。

### （6）有机体系电化学氮还原合成氨

氨是全球年产量排名第二的化工原料。在全球能源倡导可持续发展的背景下，通过电化学氮还原反应合成氨已引起广泛关注，被视为一种替代哈伯反应的有效方法。电化学氮还原反应合成氨根据反应介质的不同，可分为水体系和有机体系，后者通常具有较高的法拉第效率。各种氮还原反应体系中，有机电解质中的锂介导氮还原反应以其优异的氨产率和法拉第效率脱颖而出。有机体系的锂介导氮还原反应分三步进行：首先是锂离子的电沉积产生金属锂，其可以与氮气发生自发的化学反应生成锂氮复合物，最后通过质子化反应形成氨。因此，有机锂介导体系的氮还原活性与锂沉积物的特性直接相关，相关研究主要集中在电解质（质子供体、锂盐和添加剂）优化，包括质子供体、锂盐和添加剂的优化。理想的电解质组分可以诱导形成具有高反应活性和高稳定性的锂沉积物。当前报道的最高电流密度和法拉第效率已分别接近  $1 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  和 100%，优于美国能源部设定的目标（电流密度  $0.3 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，法拉第效率 90%，能量效率 60%）。此外，有机体系电化学氮还原合成氨需要进一步提升能量效率和改善耐久性。

### （7）核废物玻璃体材料性能研究

高放废液的安全处理与处置是世界各国需共同应对的挑战，也是制约核工业可持续发展的关键因素之一。玻璃固化是目前国际上唯一工业化应用的高放废液处理方法。玻璃具有近程有序、远程无序的结构特点，可使元素周期表中大部分核素进入其结构中，它对核素具有较强的包容性，

因此,国内外学者普遍研究运用玻璃固化处置高放废液,涉及的玻璃体系包括铝硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃、硅酸盐玻璃、硼硅酸盐等。磷酸盐玻璃固化体的熔制温度比较低,易制备,但对设备腐蚀严重,到目前为止,仅有俄罗斯采用磷酸盐玻璃固化核废物;硅酸盐玻璃含较多 $\text{SiO}_2$ ,虽然抗浸出性能好,但是其固化工艺较复杂,并且其对含铯量高的高放废液固化效果较差;硼硅酸盐玻璃因稳定性好、制备工艺简单、机械强度大、废物包容量大等优点,被广泛应用于处理高放废液,也是固化高放废液的首选基材。目前,我国首座玻璃固化工厂已进入运行阶段,现已开展玻璃固化体析晶行为和抗浸出性能的研究,这对玻璃固化体的安全生产、暂存和处置具有十分重要的意义。

#### (8) 等离子体与反应堆材料相互作用机理

可控核聚变能源是未来理想的清洁能源,目前最有可能实现的可控热核聚变方法是磁约束聚变,其中,托卡马克装置及未来反应堆的材料问题是实现磁约束聚变能的关键问题,该问题的解决在很大程度上取决于对等离子体与壁材料相互作用过程(plasma-wall interactions, PWI)和机理的深入理解。PWI现象主要发生在托卡马克磁场最外封闭磁面以外的边界等离子体(又称刮削层,scraped-off layer, SOL)和直接接触SOL的面向等离子体材料区域内,因此PWI问题直接决定了聚变装置的安全运行、壁材料部件研发进程和未来壁的使用寿命。理清PWI的各种物理过程和机理并施以有效的控制,是实现未来核聚变能的重要环节。国际托卡马克物理活动组织(ITPA)刮削层/偏滤器(SOL/Div)专题工作组成员负责甄别PWI问题并协调国际组织进行联合攻关,研究结果将对未来核聚变示范电站(DEMO)和商业堆的设计、制造和运行产生重要影响。目前,等离子体与反应堆材料相互作用机理主要研究方向是等离子体材料的选择、边界等离子体的基本物理过程、等离子体辐照下表面损

伤和结构效应、杂质与灰尘、壁处理等。尽管国内外对PWI问题已经做了不少研究工作,但仍存在诸多问题需要解决,如边界等离子体的原子分子过程数据尚不完善,粒子输运和再沉积的行为不完全清楚等。针对国家聚变科学工程和国际热核聚变实验堆计划(ITER)对PWI相关数据的紧迫需求,国内外还需尽快全面深入开展PWI相关的基础研究工作。

#### (9) 地球深部碳氢循环过程与油气资源分布规律研究

地球深部的碳-氢长周期循环与地表短周期碳-氢循环密切相关,板块俯冲带作为地球物质循环的“加工厂”,是认识深部地球的窗口,但其内在复杂性也制约了对地球深部物质“生、运、聚”过程的理解。“海洋圈-岩石圈-大气圈”之间物质与能量的交换在俯冲工厂得到加强,挥发性组分如 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 等通过俯冲带的地壳沉积物等被带入到地幔,深部作用的产物再通过岛弧火山和裂谷盆地的岩浆系统、深海和热液系统循环进入并离开地壳。通过阐明板块俯冲过程、深部地质作用及无机成因油气资源之间的纽带与关联性,可以揭示跨岩石圈的动力学和物质能量交换机制,以及无机成因油气独立成藏可能性。未来该研究领域的工作将重点围绕我国东部俯冲带影响下的各类沉积盆地,通过分析其与深部地质作用之间的直接或间接关系,揭示俯冲工厂框架下的海洋圈、岩石圈、大气圈相互作用机理与动力学机制,阐明岩石圈与软流圈间物质能量交换的能源资源效应。同时,厘清海洋圈、岩石圈、大气圈之间的有机无机相互作用下的碳氢循环过程,阐明板块俯冲背景下的无机成因油气、地热等资源富集机制,建立无机成因油气资源的评价标准和富集区优选方法。

#### (10) 陆相钾锂盐智能找矿与资源综合定量研究

陆相钾锂盐是指形成于陆相沉积环境的钾锂盐。目前,我国钾盐资源-产业是以柴达木盆地为

主的现代陆相盐湖型。近期，柴达木西部新发现古近纪—新近纪深层卤水型陆相钾锂盐，对其开展智能找矿与资源综合定量研究是未来该类型资源—产业发展的趋势。

利用大数据、人工智能、区块链等新技术开展深部卤水钾锂资源高效、智能协同关键技术研究，并通过应用新技术实现深部卤水钾锂资源的数据深度挖掘、多维智能评价，对支撑深层卤水钾锂资源智能找矿与资源综合定量研究、保障国家战略资源安全具有重要意义。

下一步工作：一是利用钾锂勘查与油气勘探地震和测井数据相结合刻画储卤层展布；二是开展勘查井调查及放水试验，求取含水层段水文地质参数，确定富水性、卤水成分、含水层的渗透系数（ $K$ ）、给水度（ $m$ ）、释水系数（ $S$ ）、大气降水入渗系数（ $a$ ）、灌溉入渗系数（ $b$ ）、潜水的蒸发极限深度（ $D$ ）等资源评价关键参数；三是利用测井岩心标定或核磁测井识别原始含水饱和度和可动水饱和度；四是综合井数据、地震数据、各类成果数据，创建构造模型、含锂储层相模型，采用相控与趋势控制相结合约束建模方法，建立储层属性模型，利用智能手段实现批量运算对钾锂资源定量化评价。

### （11）二氧化碳驱油提采—捕集封存机制研究

二氧化碳驱油提采与捕集封存技术指将捕集到的二氧化碳注入低渗透油藏，在驱油增产的同时实现二氧化碳埋藏与封存。该技术在助力碳减排的同时实现油气井增产，实现“双赢”，对国家“双碳”目标的实现具有重要意义。二氧化碳驱油技术始于20世纪50年代初的美国，目前二氧化碳注入能力可达6800万吨/年，已成为美国低渗透、特低渗透区块的主要提采手段。我国低渗透油藏储量丰富，约占总资源量的一半，但大部分陆相低渗透油藏储层条件复杂且原油性质特殊，现有的二氧化碳驱油工艺技术复杂、捕集输运成本高、埋存难度大，限制了二氧化碳驱油封存规模。目前我国二氧化碳驱油封存技术年封存量约为120万吨/年，亟须探索

适合我国陆相低渗透油藏储层的二氧化碳驱油提采与捕集封存机制。二氧化碳驱油提采—捕集封存机制主要研究方向有二氧化碳高效捕集技术、二氧化碳安全输运技术、二氧化碳驱油提采技术、二氧化碳高效封存机制等。揭示二氧化碳驱油提采与捕集封存机制，加快推进我国陆相低渗透油藏二氧化碳驱油、埋存技术，有望为我国能源结构的优化和双碳目标的实现贡献重要力量。

### （12）岩性智能识别方法

岩石岩性分类识别是地下工程的首要任务，是岩体工程地质定量分析的依据，是地质安全评价中的重要内容。岩性识别的研究方法主要包括超声波、回弹指数、密度等物理试验方法；对地层岩石主元素进行统计、分析、对比的数理统计方法；岩性智能识别方法。岩性智能识别方法的发展趋势表现为智能识别方法对样本数据的依赖性较强，当样本数据不足时，模型的泛化能力容易受到影响；另外，仅借助岩石单一特征（如图像光学特征）进行岩石岩性分类的误差较大，因此还需要对岩石其他物理特征或性质进行分析，提高分类准确率。将岩石图像识别模型和岩石音频强度回归模型耦合，实现了岩石岩性的快速识别，有效提高模型的泛化能力和准确度，结合对比专家法识别结果，辅助工程人员对岩性做出正确的分类。

## 1.2 Top 4 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 高安全性高能量密度电池体系关键材料

安全性和能量密度是阻碍电池行业发展的难题。电池主要由正极、负极和电解质组成，其整体的能量密度依赖于正负极，而安全性则取决于电解质。现有的电池体系中应用最广泛的是锂离子电池，其本质上是一个锂离子在正负极之间来回脱嵌的摇椅式电池。早在1990年，日本索尼公司率先将锂离子电池商业化。电池的发展已改变人们的生活，它是电子产品、电动汽车和智能电网的核心部分。

锂离子电池负极应用最广泛的是石墨、钛酸锂，电解质为碳酸酯类电解液，正极则是氧化物如磷酸铁锂、钴酸锂和镍钴锰酸锂。

电极的能量密度由电压和容量决定。高能量密度正极主要发展方向是高电压正极材料和高容量的硫正极材料，负极则主要向锂金属和硅负极方向发展。高电压的正极材料包括富锂锰基正极、镍锰酸锂、高电压钴酸锂，高容量的正极材料主要是硫正极。正极材料的成本占总成本的 40% 以上，但兼具高容量和高电压的理想正极材料仍待突破。近年来，学术界和工业界对金属锂与硅负极进行了广泛的研究，但在工业规模下金属锂的枝晶问题和硅负极的循环问题仍使其难以商业化，流行的折中做法是使用硅碳负极，通过添加一定比例的硅材料来提高负极的整体容量。

电解质的主流发展趋势是固态电解质。固态电解质不仅能够从根本上解决电池的安全性问题，而且可以适配高能量密度的正负极。固态电解质可以分为聚合物固态电解质、无机固态电解质和复合固态电解质。聚合物固态电解质加工性能好，易于薄膜化，具有宽的电化学窗口，但受限于较低的室温离子电导率和迁移数；无机固态电解质在离子电导

率上已接近现有的液态电解液，但差的稳定性和高的界面阻抗严重阻碍了其应用；复合固态电解质结合了聚合物电解质和无机电解质的优点，若能够进一步改善电解质与电极材料之间的固固界面以及提高电极材料的负载量，则有望率先实现全固态电池产业技术的突破。

“高安全性高能量密度电池体系关键材料”工程研究前沿中，核心论文数排名前三位的国家分别是中国、美国和德国，其篇均被引频次均超过 60（表 1.2.1）。其中，中国、美国的合作最多，其次是中国和澳大利亚（图 1.2.1）。核心论文数较多的机构有中国科学院、中南大学和华中科技大学等（表 1.2.2）。其中，中国科学院与清华大学的合作较多（图 1.2.2）。施引核心论文数排名前三位的国家分别是中国、美国和韩国（表 1.2.3）。施引核心论文的主要产出机构有中国科学院、郑州大学、中南大学等（表 1.2.4）。

电池行业的发展离不开材料的革新。正极材料将由高电压钴酸锂向低成本的高容量硫正极发展，负极材料将由初始的硅碳负极向纯硅负极并最终向锂金属负极发展，电解质则由复合固态电解质向无机固态电解质发展，最终开发出的全固态高

表 1.2.1 “高安全性高能量密度电池体系关键材料”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	154	87.01	9 718	63.10	2019.6
2	美国	18	10.17	1 673	92.94	2019.3
3	德国	10	5.65	1 183	118.30	2019.3
4	澳大利亚	9	5.08	805	89.44	2019.7
5	加拿大	8	4.52	984	123.00	2019.4
6	新加坡	5	2.82	410	82.00	2019.6
7	韩国	5	2.82	152	30.40	2019.8
8	日本	5	2.82	63	12.60	2020.4
9	西班牙	2	1.13	676	338.00	2018.5
10	沙特阿拉伯	2	1.13	65	32.50	2021.0

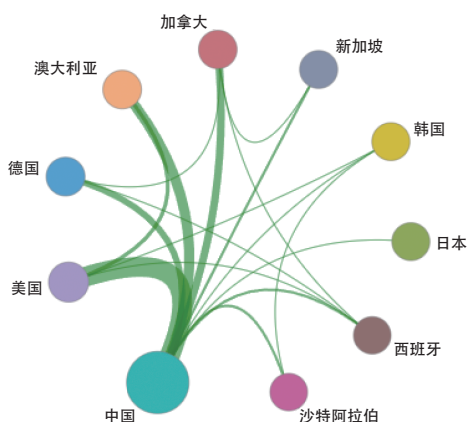


图 1.2.1 “高安全性高能量密度电池体系关键材料”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.2 “高安全性高能量密度电池体系关键材料”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	26	14.69	1 639	63.04	2019.1
2	中南大学	10	5.65	109	10.90	2020.9
3	华中科技大学	9	5.08	349	38.78	2019.0
4	北京理工大学	8	4.52	328	41.00	2019.8
5	清华大学	6	3.39	916	152.67	2019.5
6	香港理工大学	6	3.39	531	88.50	2019.3
7	武汉理工大学	6	3.39	460	76.67	2018.8
8	郑州大学	6	3.39	215	35.83	2020.7
9	复旦大学	5	2.82	2 759	551.80	2017.6
10	南开大学	5	2.82	618	123.60	2019.2

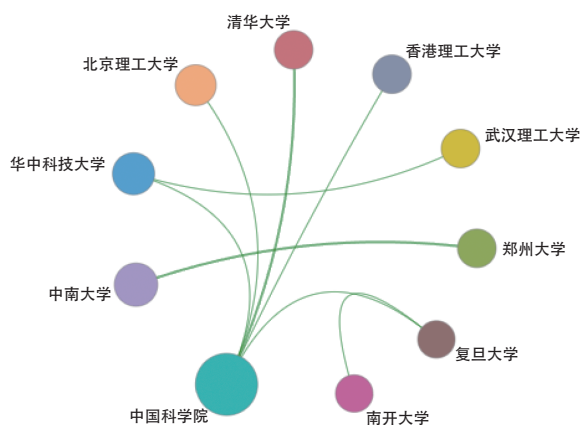


图 1.2.2 “高安全性高能量密度电池体系关键材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

**表 1.2.3 “高安全性高能量密度电池体系关键材料”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	6 177	63.87	2020.1
2	美国	866	8.95	2020.1
3	韩国	498	5.15	2020.3
4	印度	408	4.22	2020.2
5	澳大利亚	385	3.98	2020.1
6	德国	377	3.90	2020.3
7	日本	233	2.41	2020.1
8	新加坡	221	2.29	2020.1
9	英国	213	2.20	2020.3
10	加拿大	178	1.84	2020.1

**表 1.2.4 “高安全性高能量密度电池体系关键材料”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	742	29.22	2020.2
2	郑州大学	244	9.61	2020.3
3	中南大学	241	9.49	2020.6
4	清华大学	204	8.03	2020.2
5	中国科学技术大学	191	7.52	2020.2
6	南开大学	184	7.25	2020.2
7	香港城市大学	161	6.34	2020.2
8	华中科技大学	161	6.34	2020.0
9	天津大学	150	5.91	2020.2
10	北京理工大学	135	5.32	2020.4

电压锂金属电池或锂硫电池有望应用于电子产品、电动汽车和储能电网中。“高安全性高能量密度电池体系关键材料”工程研究前沿的发展路线如图 1.2.3 所示。

## 1.2.2 乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究

### (1) 乏燃料后处理研究

世界范围内工业规模的乏燃料后处理研究已有 40 多年，全球共计有 17 个国家发展乏燃料后处理技术，建设了包括中间装置和试验装置在内的 32

个乏燃料后处理厂，每年总计处理约 4 800 吨乏燃料，其中，英国和法国的乏燃料后处理水平处于世界领先地位。

我国乏燃料后处理发展经历了生产堆后处理和动力堆后处理两个阶段，已基本确定了“中试规模—示范规模—大型商业规模”三阶段的发展思路。中试厂热调试的成功运行表明我国已掌握动力堆乏燃料后处理核心技术，具有里程碑意义。我国乏燃料后处理工业示范厂预计于 2023 年建成，届时我国将具备工业规模的乏燃料后处理能力；另外，我国



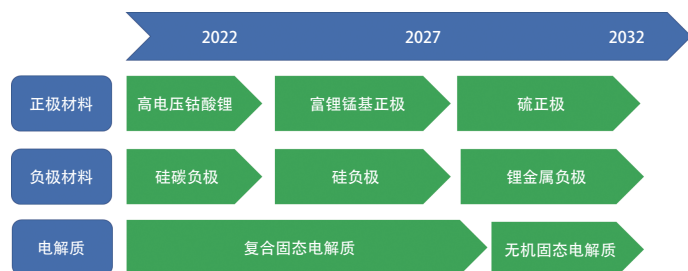


图 1.2.3 “高安全性高能量密度电池体系关键材料”工程研究前沿的发展路线

计划在“十四五”期间完成后处理的技术集成，将整体具备自主设计、建造大型后处理厂的能力。

技术发展趋势：乏燃料后处理按照乏燃料在主工艺中被处理的存在状态分为湿法（亦称“水法”）和干法两种。湿法主要是基于普雷克斯（PUREX）流程，干法则采用电解熔融包括乏燃料在内的卤族盐类来分离可裂变材料以及裂变产物。

1) 湿法后处理技术：由于乏燃料后处理对象的不同以及能耗的提高，湿法后处理主要发展方向包括：① 在提高 U、Pu 分离效率的基础上，强化 Np 和 Tc 等的分离，改进并加强对  $^{14}\text{C}$  和  $^{129}\text{I}$  放射性气体排放的控制；② 为降低最终放射性废物的毒性和体积，对锕系元素（MA）和长寿命裂变产物（LLFP）进行“分离-嬗变（P&T）”。除了对乏燃料后处理 PUREX 流程进行改进之外，考虑到 MA 和 LLFP 的“分离-嬗变”，国际上提出了“先进后处理”概念，其包括以分离为主的后处理技术以及以嬗变为主的快堆或加速器技术，其中，分离技术可以通过两种方案得以实现，即“全分离”和“后处理-高放废液分离”。目前，乏燃料后处理厂的设计理念、关键设备、仪控、废物管理、核安全等方面均在不断改进发展。

2) 干法后处理技术：干法后处理技术主要包括卤化挥发法、高温冶金和电解精炼等方法，其中，电沉积和电解精炼技术被普遍认为是最具发展前景、可行性、经济性、可靠性的干法后处理技术，但该方法在大多数国家仍处于实验室研究阶段，仅有美国已完成实验室和工程规模的模拟实验，正在

着手准备中试规模的热实验。

### （2）高放废液分离研究

美国、法国、俄罗斯、日本和中国等都提出了各自的高放废液分离流程。20 世纪 90 年代，俄罗斯在马雅克建造了采用 CCD-PEG（chlorinated cobalt dicarbollide and polyethylene glycol）的高放废液分离中试设施（UE-35），用于从高含盐废液中回收 Sr 和 Cs；美国已完成从实验室到工程规模高放废液的分离，2016 年 6 月，美国在萨瓦纳河国家实验室建成了高放废液分离工厂，截至 2021 年 6 月已处理 4 000 多立方米的高放废液；我国清华大学自 20 世纪 80 年代开始进行高放废液分离技术的研究，提出了具有自主知识产权的分离流程，完成了生产堆高放废液处理在实验室的所有研究工作，正在开展动力堆高放废液分离热实验研究，为高放废液分离技术工程热验证及应用奠定了良好基础，具备了进行工程化应用的条件。

技术发展趋势：目前，超铀元素（TRU）的分离流程包括美国 TRUEX-TALSPEAK 及其改进流程、美国 ALSEP 流程、法国 DIAMEX-SANEX 流程、欧洲 GANEX 流程、日本 ARTIST 流程、俄罗斯二丁基磷酸锆萃取流程等；Sr、Cs 分离流程包括俄罗斯 CCD-PEG 流程、法国 CSSEX 流程、美国 FPEX 流程、日本萃取色层分离流程等；我国提出了分离锕系元素的三烷基氧膦（TRPO）流程，分离锶的冠醚流程和分离铯的杯芳烃冠醚流程。

我国目前已基本完成高放废液分离工艺、设备等方面的研究工作，正在开展动力堆高放废液分离

工艺热实验验证研究工作，后续进一步开展高放废液分离工艺中试规模热验证工作，力争在 2030 年前掌握高放废液分离的工程化技术，实现高放废液分离的工业化应用。

由表 1.2.5 可知，该研究前沿的核心论文数排名前四位的国家分别是中国、美国、英国和德国，其中，中国居第一位，论文比例超过 30%，美国、英国、德国的论文比例均超过 10%。由图 1.2.4 可知，较为注重该领域国家间合作的有中国、美国、日本、德国、英国、法国、西班牙，另外，美国发表论文数量较多，主要是与中国、法国、德国、英国、日本进行合作发表。由表 1.2.6 可知，核心论

文主要产出机构中，中国科学院、曼彻斯特大学、四川大学、德国于利希研究中心、英国国家核能实验室、苏黎世联邦理工学院的核心论文产出数均超过 2 篇。由图 1.2.5 可知，曼彻斯特大学、德国于利希研究中心、英国国家核能实验室有合作。

由表 1.2.7 可知，施引核心论文产出最多的国家为中国，施引核心论文比例为 32.28%；美国次之，施引核心论文比例为 20.47%。由表 1.2.8 可知，施引核心论文产出较多的机构有中国科学院、重庆大学、青岛科技大学、清华大学、新南威尔士大学、得克萨斯大学奥斯汀分校、山东科技大学，其中，中国科学院、重庆大学、青岛科技大学施引核心论

表 1.2.5 “乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究”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	25	30.12	1 067	42.68	2017.8
2	美国	14	16.87	800	57.14	2017.6
3	英国	12	14.46	459	38.25	2017.8
4	德国	10	12.05	348	34.80	2017.7
5	西班牙	8	9.64	512	64.00	2017.0
6	法国	7	8.43	373	53.29	2018.1
7	日本	6	7.23	354	59.00	2017.7
8	印度	4	4.82	136	34.00	2018.8
9	加拿大	4	4.82	133	33.25	2017.8
10	瑞士	4	4.82	124	31.00	2019.5

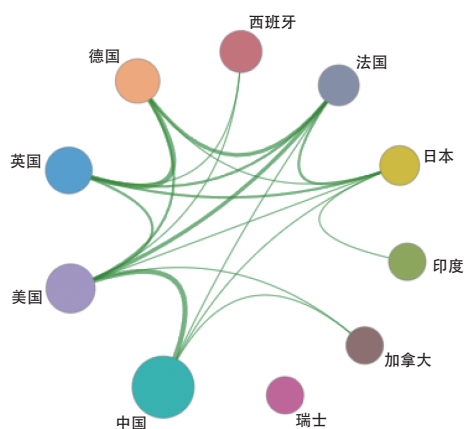


图 1.2.4 “乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6 “乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究”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	5	6.02	168	33.60	2018.0
2	曼彻斯特大学	4	4.82	104	26.00	2018.0
3	四川大学	3	3.61	136	45.33	2017.3
4	德国于利希研究中心	3	3.61	134	44.67	2018.3
5	英国国家核能实验室	3	3.61	129	43.00	2018.3
6	苏黎世联邦理工学院	3	3.61	98	32.67	2019.3
7	得克萨斯大学奥斯汀分校	2	2.41	229	114.50	2018.0
8	北海道大学	2	2.41	147	73.50	2017.5
9	日本科学技术振兴机构	2	2.41	147	73.50	2017.5
10	麻省理工学院	2	2.41	121	60.50	2017.5

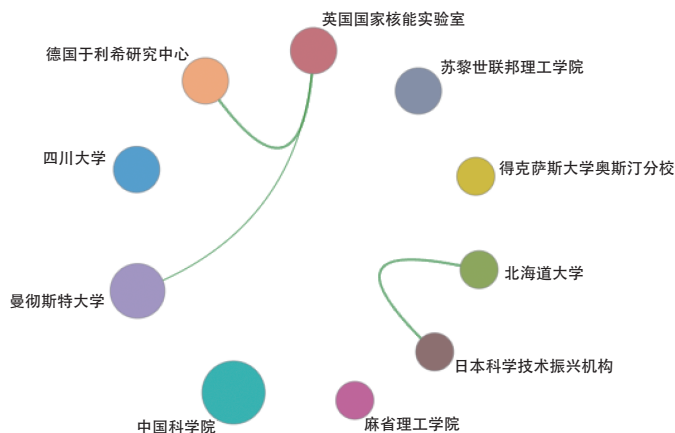


图 1.2.5 “乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究”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	123	32.28	2019.2
2	美国	78	20.47	2018.8
3	澳大利亚	31	8.14	2018.9
4	法国	24	6.30	2018.8
5	德国	24	6.30	2018.8
6	意大利	21	5.51	2019.0
7	西班牙	20	5.25	2018.6
8	英国	19	4.99	2018.8
9	印度	19	4.99	2018.7
10	日本	12	3.15	2018.5

文比例超过 10%。

通过以上数据分析可知，中国和美国在“乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究”工程研究前沿的核心论文产出及施引数量处在世界前列，中国机构施引核心论文数量较多。

基于不同的后处理对象和能耗的提高，湿法后处理的主流发展方向为在提高 U、Pu 分离效率的基础上，强化 Np 和 Tc 等的分离，另外为降低最终放射性废物的毒性和体积，需要对 MA 和 LLFP 进行“分离-嬗变”。分离技术可以通过两种方案得以实现，即“全分离”和“后处理-高放废液分离”。在干法后处理方面，大多数国家尚处于实验室研究阶段，仅有美国完成了实验室规模和工程规模的模拟实验，正在着手准备中试规模的热实验。

预计到 2025 年，乏燃料后处理工业示范厂建成投运，并实现稳定运行，我国将全面开展后处理

科研专项工作，并具备自主建设大厂的能力；力争在 2030 年前掌握工程化技术，进一步开展高放废液分离工艺中试规模热验证工作；到 2035 年前后，依托后处理专项科研技术攻关，掌握大型乏燃料后处理厂的核心技术，自主建成大型后处理厂；到 2050 年，完成先进水法后处理科研技术研究和干法后处理技术验证，基本建成干法后处理工程示范厂，建立先进完善的后处理、放射性废物处理处置产业（图 1.2.6）。

### 1.2.3 水力压裂三维裂缝扩展模型

自 20 世纪 50 年代起至今，水力压裂裂缝扩展模型研究在解析求解和数值计算方面都一直不断发展。早期最先发展出 Perkins-Kern-Nordgren (PKN)、Khristianovic-Geertsma-de Klerk (KGD)、Penny 三种经典的水力压裂模型。20 世纪 80 年代前后，

表 1.2.8 “乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究”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	11	12.94	2018.7
2	重庆大学	9	10.59	2019.0
3	青岛科技大学	9	10.59	2018.9
4	清华大学	8	9.41	2018.5
5	新南威尔士大学	8	9.41	2019.0
6	得克萨斯大学奥斯汀分校	8	9.41	2018.6
7	山东科技大学	8	9.41	2019.0
8	西班牙高等科研理事会	6	7.06	2018.5
9	麻省理工学院	6	7.06	2018.3
10	香港理工大学	6	7.06	2019.3

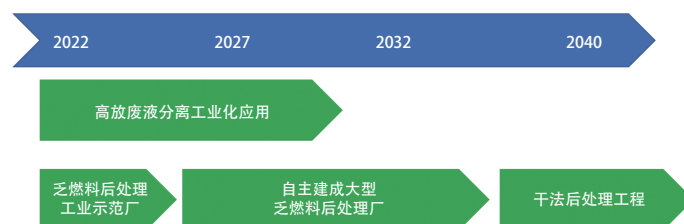


图 1.2.6 “乏燃料后处理及高放物质分离工艺研究”工程研究前沿的发展路线

随着计算固体力学技术的进步，又逐渐发展出考虑流体与储层热交换的压裂流体相态变化的裂缝扩展模型。1983年，Cleary建立了全三维水力压裂裂缝扩展模型，采用奇异积分方程描述岩体的变形，利用有限元方法模拟裂缝内流体的流动，运用该模型分析了应力差异和层理面对裂缝扩展的影响，可直接用于压裂设计。随后，Settari、Hongren Gu和Donsov等大批学者采用有限差分、有限元网格法和隐式水平集等算法，建立了考虑支撑剂、热能传递和压裂液压缩性等因素的多种三维水力裂缝扩展模型，均是为了紧密结合水力压裂裂缝扩展特征及实际情况，实现对水力裂缝几何形态的全面描述，掌握水力压裂裂缝扩展规律。世界各国针对三维水力裂缝扩展模型都开展了大量研究，其中中国和美国的研究力度最大，相关成果文章最多。统计数据显示（表1.2.9和图1.2.7），中美两国是对水力压裂三维裂缝扩展模型研究最为关注的国家，为相关核心论文的主要产出国家，其中，中国核心论文数量达143篇（占比为59.83%），美国核心论文数量90篇（占比为37.66%），合计占比高达97.49%。“水力压裂三维裂缝扩展模型”工程研究前沿核心论文的主要产出机构也集中在中美两国高校，数据显示（表1.2.10和图1.2.8），核心

论文产出排名前十的机构中有6所中国高校、3所美国高校，其中，中国石油大学核心论文数为32篇（占比为13.39%），得克萨斯农工大学核心论文数为22篇（占比为9.21%），上述两个机构分别是中国、美国核心论文产出最多的机构。另外，中国和美国也是施引核心论文的主要产出国家（表1.2.11），中国施引核心论文有1676篇（占比高达55.77%），而美国施引核心论文有617篇（占比高达20.53%），两国合计占比高达76.3%。施引核心论文的主要产出机构都集中在中美两国高校（表1.2.12），排名前十的机构中有8所中国高校、2所美国高校。上述数据充分说明了中美两国对“水力压裂三维裂缝扩展模型”这一工程研究前沿课题的重视。

国内学者对三维水力裂缝模型的研究起步较早，现阶段研究已经揭示部分影响模型，并采用ABAQUS等大型计算软件进行了大量计算模拟，但是发展速度非常缓慢，主要是因为三维水力裂缝扩展是多个复杂问题的耦合，需要大量数学和力学知识进行统筹耦合。未来5~10年，三维水力裂缝扩展模型研究的重点仍将集中在厘定包括支撑剂、热能传递、压裂液压缩性、三相流动、水力裂缝与天然裂缝干扰行为等多种因素的影响机理，结合大

表 1.2.9 “水力压裂三维裂缝扩展模型”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	143	59.83	2 128	14.88	2019.3
2	美国	90	37.66	2 151	23.90	2018.6
3	加拿大	18	7.53	160	8.89	2019.2
4	澳大利亚	14	5.86	331	23.64	2018.9
5	德国	11	4.60	580	52.73	2018.8
6	俄罗斯	7	2.93	19	2.71	2018.6
7	英国	6	2.51	65	10.83	2019.5
8	越南	4	1.67	369	92.25	2019.2
9	法国	4	1.67	92	23.00	2017.8
10	瑞士	3	1.26	204	68.00	2019.0

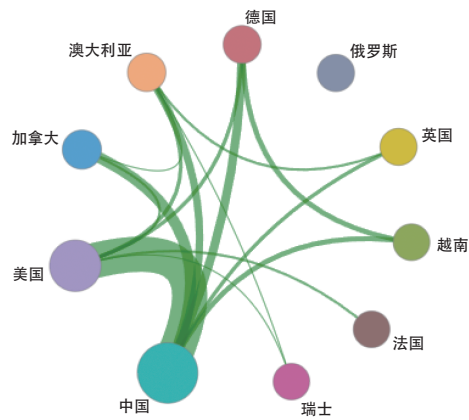


图 1.2.7 “水力压裂三维裂缝扩展模型”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.10 “水力压裂三维裂缝扩展模型”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	32	13.39	432	13.50	2019.3
2	西南石油大学	28	11.72	281	10.04	2019.2
3	得克萨斯农工大学	22	9.21	456	20.73	2019.4
4	得克萨斯大学奥斯汀分校	20	8.37	869	43.45	2017.6
5	中国石油大学（华东）	12	5.02	160	13.33	2019.2
6	俄克拉荷马大学	10	4.18	135	13.50	2019.1
7	重庆大学	10	4.18	76	7.60	2019.5
8	同济大学	8	3.35	431	53.88	2019.2
9	中国矿业大学	8	3.35	167	20.88	2019.2
10	澳大利亚联邦科学与工业研究组织能源中心	7	2.93	228	32.57	2018.6

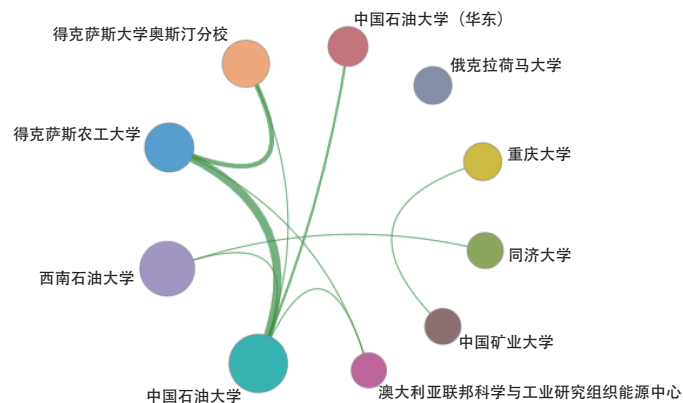


图 1.2.8 “水力压裂三维裂缝扩展模型”工程研究前沿主要机构间的合作网络

量的物理模拟实验进行多因素交汇影响的模型验证，在确保模型预测的准确性后，依靠新型高性能计算机和软件，开发多因素耦合模型软件，进行高

精度的三维水力压力裂缝预测，为水力压裂技术改造提供理论依据（图 1.2.9）。

表 1.2.11 “水力压裂三维裂缝扩展模型”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	1 676	55.77	2020.0
2	美国	617	20.53	2019.7
3	加拿大	136	4.53	2019.9
4	澳大利亚	134	4.46	2019.8
5	德国	104	3.46	2020.0
6	英国	95	3.16	2019.9
7	伊朗	60	2.00	2019.9
8	俄罗斯	58	1.93	2019.9
9	法国	51	1.70	2019.6
10	印度	38	1.26	2020.1

表 1.2.12 “水力压裂三维裂缝扩展模型”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	314	22.57	2020.0
2	西南石油大学	198	14.23	2019.8
3	中国石油大学(华东)	139	9.99	2019.9
4	中国矿业大学	138	9.92	2020.0
5	中国科学院	116	8.34	2020.1
6	得克萨斯大学奥斯汀分校	101	7.26	2019.2
7	重庆大学	97	6.97	2020.1
8	得克萨斯农工大学	95	6.83	2019.7
9	中国地质大学	73	5.25	2020.0
10	同济大学	61	4.39	2020.0



图 1.2.9 “水力压裂三维裂缝扩展模型”工程研究前沿的发展路线

### 1.2.4 深部开采冲击地压诱发机理与预警方法

冲击地压是指岩体中聚积的弹性变形势能在一定条件下突然猛烈释放，导致岩石爆裂并弹射出来的现象，是一种严重的动力灾害。随着矿井开采深度的增加，煤矿冲击地压灾害形势严峻，因此冲击地压灾害的发生机理、监测预警与控制技术研究对煤矿安全开采意义重大。

目前，在世界主要的产煤国家中，我国面临的深部开采情况最多，冲击地压的危害最为严重。为提升冲击地压的监测预警与控制水平，我国在深部开采冲击地压诱发机理与预警方法研究中投

入了大量的科研力量。该领域核心论文产出量最高的国家是中国，核心论文比例达 78.5%，其次是加拿大、澳大利亚（表 1.2.13）；篇均被引频次最高的是葡萄牙，被引频次达 35.67。核心论文产出量较高的机构主要集中在中国高校，其中中国矿业大学、山东科技大学和北京科技大学位列前三（表 1.2.14）。核心论文的主要产出国家中，中国和澳大利亚合作较多，其次是中国和加拿大、美国的合作也排前列（图 1.2.10）；核心论文的主要产出机构中，中国矿业大学和山东科技大学，北京科技大学和华北科技学院合作最为紧密（图 1.2.11）。

表 1.2.13 “深部开采冲击地压诱发机理与预警方法”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	168	78.50	2 860	17.02	2019.2
2	加拿大	21	9.81	516	24.57	2018.5
3	澳大利亚	18	8.41	486	27.00	2019.1
4	美国	12	5.61	153	12.75	2018.8
5	波兰	11	5.14	82	7.45	2018.9
6	捷克	9	4.21	117	13.00	2018.0
7	俄罗斯	6	2.80	16	2.67	2017.7
8	南非	4	1.87	27	6.75	2018.8
9	葡萄牙	3	1.40	107	35.67	2018.0
10	日本	3	1.40	32	10.67	2019.3

表 1.2.14 “深部开采冲击地压诱发机理与预警方法”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	中国矿业大学	43	20.09	720	16.74	2018.7
2	山东科技大学	28	13.08	536	19.14	2019.0
3	北京科技大学	21	9.81	230	10.95	2019.3
4	中南大学	10	4.67	322	32.20	2019.9
5	华北科技学院	10	4.67	153	15.30	2019.4
6	安徽理工大学	10	4.67	92	9.20	2020.0
7	中国矿业大学(北京)	9	4.21	147	16.33	2019.6
8	西安科技大学	9	4.21	58	6.44	2020.1
9	中国科学院	8	3.74	112	14.00	2019.4
10	捷克科学院	7	3.27	109	15.57	2018.3



施引核心论文的主要产出国家排名前两位分别是中国和澳大利亚，两者合计占比超过 80%，平均

施引年集中在 2020 年（表 1.2.15）。施引核心论文的主要产出机构排名前三位分别是中国矿业大

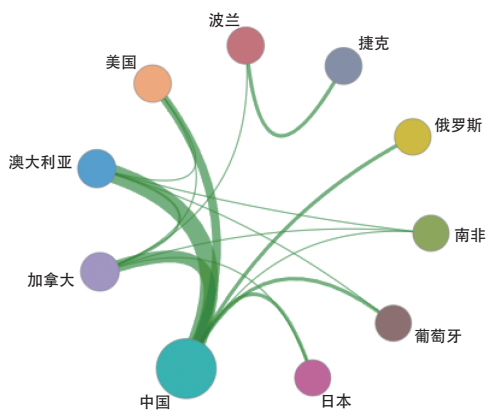


图 1.2.10 “深部开采冲击地压诱发机理与预警方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

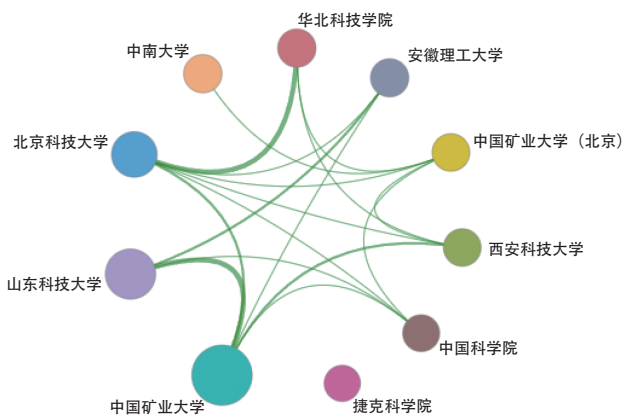


图 1.2.11 “深部开采冲击地压诱发机理与预警方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.15 “深部开采冲击地压诱发机理与预警方法”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	2073	74.49	2020.2
2	澳大利亚	164	5.89	2020.1
3	加拿大	102	3.67	2019.9
4	美国	101	3.63	2019.9
5	伊朗	73	2.62	2020.2
6	越南	62	2.23	2020.5
7	波兰	59	2.12	2020.3
8	英国	42	1.51	2020.0
9	俄罗斯	41	1.47	2020.2
10	马来西亚	37	1.33	2020.4

学、中南大学和山东科技大学，三者合计占比为53.07%（表 1.2.16）。

围绕冲击地压发生机理及防治技术，目前研究主要集中在深部煤矿冲击地压动力响应及灾变机理、深部煤矿冲击地压灾害智能监测预警理论与技术、深部煤矿冲击地压防控机理与方法三个方面。针对冲击地压的发生机理，揭示围岩应变能释放突变机制是研究冲击地压发生机理新的突破途径；在冲击地压预警技术研究方向，融合数据挖掘、大数据处理分析等人工智能算法，实现冲击地压灾害的智能监测预警与多场多维感知是今后的发展方向。在深部开采冲击地压诱发机理与预警方法领域开展深入研究并取得突破，有助于解放深部矿产资源，是实现能源、资源可持续发展的前提。“深部开采冲击地压诱发机理与预警方法”工程研究前沿

的发展路线如图 1.2.12 所示。

## 2 工程开发前沿

### 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 2.1.1。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，“大规模风光储互补发电及稳定并网技术”“燃煤机组快速灵活调峰技术”“氨燃料发动机技术”属于能源和电气科学技术与工程领域；“多用途新概念微型反应堆”“高放废物处理处置技术体系”“核聚变制氙技术”属于核科学技术与工程领域；“页

表 1.2.16 “深部开采冲击地压诱发机理与预警方法”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	中国矿业大学	469	25.93	2019.9
2	中南大学	265	14.65	2020.4
3	山东科技大学	226	12.49	2019.9
4	重庆大学	145	8.02	2020.0
5	中国矿业大学（北京）	130	7.19	2020.3
6	北京科技大学	122	6.74	2020.1
7	河南理工大学	101	5.58	2020.3
8	东北大学	97	5.36	2020.3
9	安徽理工大学	94	5.20	2020.4
10	中国科学院	85	4.70	2020.0

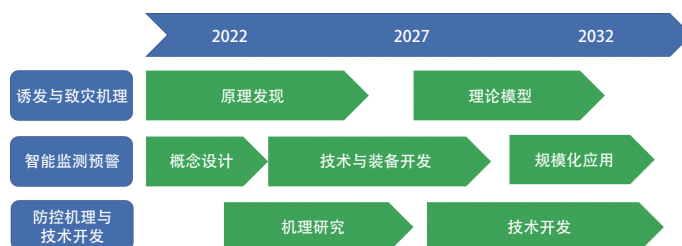


图 1.2.12 “深部开采冲击地压诱发机理与预警方法”工程研究前沿的发展路线

岩油气产能高精度预测系统”“高精度智能化三维可视化勘查系统”“新型杂卤石钾盐矿和富锂卤水的智能识别与资源综合评价技术”属于地质资源科学技术与工程领域；“油气钻井随钻前探与远探技术研发”“页岩储层高效压裂技术研发”“煤矿井下煤层长钻孔分段压裂增透与抽采技术”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

2016—2021年的公开情况见表 2.1.2。

### (1) 大规模风光储互补发电及稳定并网技术

风力发电和太阳能发电具有天然的互补性，结合储能系统形成的风光储互补发电系统能够克服风光资源的波动性与随机性，降低大规模风光基地整体功率波动水平，保障新能源高渗透电力系统稳定运行。近年来，随着风光发电占比不断增大，风光

表 2.1.1 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	大规模风光储互补发电及稳定并网技术	70	89	1.27	2018.6
2	多用途新概念微型反应堆	60	150	2.50	2018.6
3	页岩油气产能高精度预测系统	145	589	4.06	2019.0
4	油气钻井随钻前探与远探技术研发	128	344	2.69	2017.9
5	燃煤机组快速灵活调峰技术	157	124	0.79	2019.8
6	氨燃料发动机技术	70	53	0.76	2020.3
7	高放废物处理处置技术体系	140	172	1.23	2018.7
8	核聚变制氦技术	94	110	1.17	2018.5
9	高精度智能化三维可视化勘查系统	129	311	2.41	2018.8
10	新型杂卤石钾盐矿和富锂卤水的智能识别与资源综合评价技术	162	336	2.07	2018.9
11	页岩储层高效压裂技术研发	190	766	4.03	2019.3
12	煤矿井下煤层长钻孔分段压裂增透与抽采技术	192	329	1.71	2019.5

表 2.1.2 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	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	大规模风光储互补发电及稳定并网技术	9	6	19	9	19	8
2	多用途新概念微型反应堆	13	6	9	9	5	18
3	页岩油气产能高精度预测系统	9	23	27	19	27	40
4	油气钻井随钻前探与远探技术研发	29	30	29	12	20	8
5	燃煤机组快速灵活调峰技术	2	11	18	19	42	65
6	氨燃料发动机技术	2	2	2	2	16	46
7	高放废物处理处置技术体系	18	22	23	21	27	29
8	核聚变制氦技术	17	17	14	9	14	23
9	高精度智能化三维可视化勘查系统	23	15	18	14	20	39
10	新型杂卤石钾盐矿和富锂卤水的智能识别与资源综合评价技术	16	17	29	32	28	40
11	页岩储层高效压裂技术研发	9	20	24	40	41	56
12	煤矿井下煤层长钻孔分段压裂增透与抽采技术	8	9	31	31	50	63

互补发电向着高电压等级、多场站协调方向发展,此外用于协调互补的储能形式也向绿色、低碳转变,如大规模氢储、抽水蓄能站等。大规模风光储互补发电系统涉及的关键技术包括:风电场、光伏电站和储能电站的联合选址定容技术;风光储协调控制、调度与经济运行技术;风光储互补发电系统的主动电网支撑技术;风光储互补发电系统的非计划并网无缝切换技术;风光储互补发电系统的稳定控制技术。

### (2) 多用途新概念微型反应堆

国际原子能机构(IAEA)一般将发电功率在10 MW以下、具有模块化特征的反应堆称为微型核反应堆。微型核反应堆既不是大型核电厂的微型化,也不是验证技术可行性的原型反应堆,而是按照用户需求提供兆瓦量级能源且具有先进技术特征的新型反应堆。微型核反应堆具有广阔的应用前景以及其他能源不可替代的优势,是实现国家战略的重要支撑之一。IAEA和国际主要核能大国均认可微型核反应堆的发展前景并大力支持其发展,例如美国、加拿大和英国等已制定微型核反应堆技术路线,并提供长期的政策支持和资金支持。当前,美国研究了微型核反应堆部署在技术开发与执照申请、工程设计采购与建造、燃料循环等关键环节所面临的挑战,并提出了建议,明确了技术发展路径,通过协同用户、项目核准单位、核安全审评单位、技术开发单位和运营单位等拟在2027年年底前建成并运行至少一座微型示范核反应堆。

### (3) 页岩油气产能高精度预测系统

产能预测是油气开发理论体系的重要组成部分,预测结果是否可靠是影响资产评估、开发方案设计等工作的核心因素之一。页岩油气产能预测常用方法包括数值模拟法、递减分析法和解析模型法。研究者在数值模型搭建、现代生产动态资料分析、井间干扰风险预测等方面开展了大量研究,旨在探究裂缝、簇间距、孔隙介质、压实作用、流体相态

等因素对产能的影响。但页岩储层岩性复杂、孔隙介质尺度跨度大、烃类赋存形式多样,水平井、体积压裂等开发工艺复杂,致使产能预测结果与实际产量存在偏差,亟须研发适合页岩油气产能预测的高精度系统,发展趋势包括:①深入和完善页岩油气赋存特征与渗流机理研究,为推进页岩油气产能可靠预测奠定坚实基础;②利用人工智能技术,开展地质参数和工程参数的大数据分析,探索产量主控因素并建立相关关系模型,进而预测产量;③开展不确定性产能预测方法研究,结合不确定性数学理论与数学物理方法,推导出不确定性的产能解析模型或数值模型,实现对产能的不确定性预测;④页岩油气水平井立体开发物理模拟和理论研究,推动形成页岩油气水平井立体开发产能评价方法的系统理论研究成果。

### (4) 油气钻井随钻前探与远探技术研发

随钻测量是指在钻探过程中实现钻孔轨迹信息和地质参数的实时测量与上传的技术。油气钻井随钻前探与远探技术既能用于地质导向,又能对复杂井、复杂地层的含油气情况进行评价,已成为行业研究热点。国外随钻前探与远探技术已获得巨大发展,美国斯伦贝谢科技公司、美国哈利伯顿能源服务公司等先后推出各种随钻技术,远探距离可达60 m,前探距离可达30 m。目前,我国油气勘探开发领域正逐渐转向深层超深层、复杂地层、深海和非常规油气藏,对钻井工程提出了更高要求,随钻前探与远探技术有望成为提高钻遇率和油气产量的关键技术。我国目前已取得阶段性进展,但总体技术仍落后于国外。油气钻井随钻前探与远探技术研发主要技术研究方向有井下测试仪器研发、测试工艺改进、数据传输与存储、数据分析与解释等。随钻前探与远探技术的发展趋势是降本增效和提升智能化水平,该技术可用于地质导向、随钻油藏描绘,有望成为智慧油田、智能钻井的重要组成部分,对筑牢中国能源安全的油气资源基础具有重要的现实与战略意义。

### （5）燃煤机组快速灵活调峰技术

燃煤机组快速灵活调峰技术是根据电网的负荷变化指令进行快速响应和深度低负荷稳定运行的燃煤发电技术，该技术是大规模使用燃煤发电的国家或区域提高可再生能源发电比例并最终实现碳中和的必由之路和关键途径。由于可再生能源具有波动性、间歇性和不稳定性的特点，且可再生能源供给与终端能源消耗存在显著的时空差异，在储能技术不成熟和经济性差的相当时间内必须依靠燃煤机组进行快速灵活调峰，以保障电网的安全和能源的稳定供给。燃煤机组快速灵活调峰技术主要发展的方向包括：① 不同煤质下的超低负荷煤粉锅炉燃烧技术和循环流化床燃烧技术；② 超低负荷和变负荷运行下的燃煤机组热力系统的水动力安全可靠性和机组经济性；③ 燃煤机组的快速启停技术；④ 燃煤机组负荷快速响应机制以及与多种储能系统的耦合技术；⑤ 燃煤机组快速负荷变化对受热面材料的影响；⑥ 燃煤机组全负荷超低排放技术和二氧化碳减排评估；⑦ 热电燃煤机组的经济高效热电耦技术以及宽负荷调峰技术等。燃煤机组快速灵活调峰技术的核心指标是电网负荷变化指令的响应速度，其发展趋势是调峰速度越来越快，超临界机组达 5 Pe/min（额定负荷/分钟）以上，亚临界机组达 8 Pe/min 以上。

### （6）氨燃料发动机技术

依托化石燃料的发动机等动力装置广泛应用于发电、陆路运输、舰船动力、航空航天等领域，是二氧化碳排放的主要来源之一。氨气作为一种新型“零碳”燃料，被视为降低传统碳基燃料碳排放的有效途径。然而，由于氨气的自燃温度高且火焰传播速度低，氨气燃烧常面临着稳定性较差、容易失火等问题。另外，由于燃料分子本身含氮，排放物中氮氧化物的浓度高，也制约了氨气作为发动机替代燃料的发展。

利用高活性燃料掺混氨燃烧以提高燃烧稳定性是实现氨燃料发动机的可行技术路线。在众多高活

性燃料中，氢气作为另一种零碳燃料，因其可以由氨气裂解在线制备而占据优势，基于此的氨氢燃料高效催化转化技术也受到广泛关注。然而，由于氨气的强扩散性及氨气的高汽化潜热，氨氢燃料在发动机燃烧室内的浓度及温度分布常是高度不均匀的。因此，如何调制燃料喷射策略以实现氨燃料在发动机内的合理分布，并进一步有效控制燃烧状态是待解决的重要问题。另外，氢气等活性燃料的添加虽提升了氨燃料的燃烧活性，却同时使得燃烧温度提升，氮氧化物排放急剧增加。即使富燃情况下氮氧化物排放有一定的降低，但又会导致燃烧经济性差及未燃氨排放增加等其他问题。因此，氨燃料发动机耦合选择性催化还原（selective catalytic reduction, SCR）和氨气氧化催化剂（ammonia slip catalyst, ASC）等后处理手段以降低氮氧化物及未燃氨排放势在必行。

总体来说，单一氨燃料发动机技术目前尚面临较大挑战。为实现氨燃料发动机的效率及排放优化，发展氨在线快速高效催化转化高活性氢燃料技术、强湍流情况下预燃室高温富燃射流及主燃室多段喷射等燃料混合分层策略、基于无焰燃烧的高温低氧稀释氨燃烧技术、船用发动机大空间氨氢燃料早燃爆震抑制策略、宽温度窗口高转化效率氮氧化物/未燃氨后处理系统等将成为未来氨燃料发动机的发展趋势。

### （7）高放废物处理处置技术体系

高放废物安全处置是核能可持续发展的关键。高放废物是一种放射性强、毒性大、半衰期长、释热量大的放射性废物，其进行安全处置的难度极大，为解决该难题，大多数有核国家通过制定法律法规、建立管理体制、成立实施机构、建立筹资机制、制定长远规划、建立地下实验室等方法，以确保高放废物的安全处置。自 20 世纪 60 年代开展高放废物地质处置研究开发以来，在地质处置选址和场址评价、工程屏障、处置库设计和建造技术、地下实验室建设和实验、安全评价研究等方面取

得大量成果,其中芬兰、法国和瑞典在处置库工程的实施方面表现最为突出。高放废物处理的核心技术包括:①场址评价技术,高精度水文地质参数测量系统,裂隙网络模拟技术,(超低浓度)放射性核素迁移评价技术;②工程屏障设计制造技术,处置容器设计、评价、制造技术;③安全评价技术,超长时间尺度和超大规模安全评价模拟技术;④处置坑开挖设备和废物容器就位设备等关键设备,高精度可靠性水文参数测试系统。

### (8) 核聚变制氦技术

氦在军事、能源、工业、科学研究等领域都发挥着重要作用。自然界天然氦极其稀少并难以利用,一般通过加速器、核裂变反应堆等途径生产,相比其他途径,核聚变反应可直接产生高能中子,因此在制氦方面更具优势。核聚变制氦技术主要是指利用高能中子与Li-6的核反应产生氦,并在安全包容前提下对氦进行提取纯化。核聚变制氦技术涉及的主要技术包括:核聚变堆产氦包层设计与制造,氦提取和分离纯化,安全包容。根据氦产生效率要求,核聚变堆产氦包层可设计为常规包层或混合包层,其中常规包层具有清洁的特点但产氦效率不高,混合包层通过引入裂变燃料对中子产额进行链式放大实现高效产氦,但清洁性较差。国际热核聚变实验堆(ITER)的目标之一是验证氦增殖包层技术,中国聚变工程试验堆(CFETR)的核心目标是通过包层产氦实现氦自持。氦提取、分离纯化和安全包容技术是影响氦自持的核心因素,因此,发展核聚变制氦技术仍需在产氦包层设计、产氦包层制造与验证、降低氦渗透滞留、提高氦提取与分离纯化效率、实现氦操作的安全包容等方面集中攻关。

### (9) 高精度智能化三维可视化勘查系统

高精度智能化三维可视化勘查系统是指在矿床理论指导下,综合与矿产勘查有关航空和地面地球物理、多光谱和高光谱遥感、地面红外光谱、地球化学、地质等各类勘查数据,通过人工智能技术深

入挖掘有用信息提高精度和准确性,从而实现矿产勘查三维可视化。该系统包括硬件和软件,主要研究方向是通过发展传感器硬件技术和软件算法等,不断提高勘查的精度和准确性。硬件上主要体现在高性能传感器、核心芯片可靠性能、数据采集精度、功率等方面发展,软件上主要是深层次找矿信息挖掘的算法创新,最终通过自主可控的人工智能找矿勘查软件实现立体勘查。高精度智能化三维可视化勘查系统的未来发展趋势:一是与勘查有关的硬件性能不断提升,能够更加准确地获取地质勘查信息;二是勘查精度上不断提高,深入挖掘的各类信息特别是提出的靶区准确性高;三是人工智能使操作简单化,通过人工智能技术把专家体系进行封装,实现用户界面简单化和友好化;四是三维可视化、实时化,通过系统把最新的勘查数据实时三维可视化显示。

### (10) 新型杂卤石钾盐矿和富锂卤水的智能识别与资源综合评价技术

钾盐是关系粮食安全的战略性矿产资源,一直被国家列为大宗稀缺战略性矿产,锂盐是关键战略性新兴产业矿产,然而其对外依赖程度居高不下,严重威胁国家矿产资源安全。我国深部钾/锂盐资源探测难点主要是:资源赋存状态多(固相、液相)、后期构造变形复杂、卤水储层非均质性强等,导致长时间难以有效突破。

迄今,国际上尚无深部新型杂卤石钾盐和富锂卤水的评价规范。新型杂卤石钾盐矿和富锂卤水的智能识别与资源综合评价技术是在长期实践的基础上建立的:利用深部“新型杂卤石钾盐矿”高伽马、高钾、高电阻、低钍、低铀、大井径的地球物理与钻井数据特征,建立起“三高二低一大”综合测井识别技术;针对富锂钾卤水地质特点,梳理其特有表征参数,建立起“三高、四低”(高中子孔隙度、高声波时差、高伽马能谱钾、低自然伽马、低自然电位、低电阻率、低密度)测井综合智能识别技术;结合海量三维地震数据信息开展平面智能识别预

测，对深部新型杂卤石钾盐矿和富锂卤水层进行有效预测，给出目的层所处层位的深度、厚度、含矿性、卤水储层孔隙度等信息，在此基础上，得到深部钾盐/锂盐资源评价的必要参数，完成综合评价。新型杂卤石钾盐矿和富锂卤水的智能识别与资源综合评价技术由郑绵平院士团队首先创建于川东北宣汉地区，并实现了深部钾锂资源勘查的重大突破，该项技术有利于破解我国深部海相钾锂资源综合评价技术的“卡脖子”难题。

下一步，新型杂卤石钾盐矿和富锂卤水的智能识别与资源综合评价技术还需提高预测精度，增加标志性参数，完善现有成套深部地质探测技术，并创建深部固体盐类与深藏卤水盐类的相关规范，推动中国形成首个大型“海相锂钾资源综合产业基地”，形成国内外先导性成果。

### （11）页岩储层高效压裂技术研发

页岩以微纳米级孔喉为主，脆性矿物含量一般大于35%。压裂是缩短油气渗流距离，实现页岩经济开采的核心技术。页岩的储层改造需形成交错穿插的缝网形态已成为业内共识，水平井分段多簇压裂技术是储层改造的主体技术。近年来，压裂设计的级数、簇数、加砂量不断增大，采用滑溜水压裂的比例逐步提高，压裂间距、簇间距不断缩短。不同于北美平原地区稳定的构造条件，我国页岩地层连续性差且分割强烈。国内页岩开发不能照搬多井分段缝网压裂的模式，需要寻求形成全井段缝网模式，达到少井高产。缝网的最大化展布是高效压裂的关键，但面临以下挑战：裂缝非同步起裂、形成主裂缝、缝间干扰和近井地带裂缝转向等。针对以上问题，研究方向主要有分支井压裂技术、高速通道压裂技术、变排量压裂技术、重复压裂技术、同步压裂技术、拉链式压裂技术、转向压裂技术、小井距立体开发技术等。目前，各压裂工艺均存在一定局限性，形成地质与工程相匹配的储层一体化解决方案，有望获取最优的储层改造体积，助推中国页岩油气的高效开发。

### （12）煤矿井下煤层长钻孔分段压裂增透与抽采技术

随着我国煤矿开采深度的逐步增大，高瓦斯低渗煤层的比例不断扩大，新形势下的瓦斯防治、高效抽采问题亟须解决。煤层长钻孔分段压裂增透与抽采技术是利用定向钻机施工煤层水平定向长钻孔，采用胶囊封孔器对钻孔进行分段密封，通过高压密封钻杆将压裂液输送至密封孔段对煤体进行分段压裂，能有效地改造煤层裂隙发育情况，提高煤层渗透率，大幅度提升钻孔抽采浓度与流量。深孔压裂工具串的开发、压裂支撑剂的优选、井下用高压大流量压裂泵的研制、气液协同压裂工艺的探究等是该前沿的主要研究方向。未来，煤矿井下煤层长钻孔分段压裂增透与抽采技术将大大提升煤矿区域瓦斯超前治理的效率，缩短瓦斯抽采达标时间，有望替代当前水力割缝、造穴、冲孔等常规水力化增透措施，实现低渗煤层增透抽采措施向着更加快捷、高效、节能方向发展。

## 2.2 Top 4 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 大规模风光储互补发电及稳定并网技术

风光出力由于其随机性和波动性，直接并网将对电力系统造成冲击，电网企业为保证电网稳定运行，往往通过调度手段限制风电、光伏发电上网，或是由火电机组提供备用服务，这样虽然保证了系统的稳定运行，但弃风、弃光造成了严重的浪费。风电和光伏发电具有一定的互补性，结合储能装置形成的风光储一体化的发电系统，在智能调控技术作用下将成为优质电源，通过风光互补发电与储能协调可以提升风光资源的消纳率和稳定供电能力。丹麦、英国等风力资源丰富的欧洲国家在沿海区域规划了大量的风光储一体化发电场，丹麦 Eurowind Energy 公司规划了超过 1 GW 的风光储陆上能源中心，并考虑采用氢电解作为大规模储能。美国通用电气在俄勒冈州建设了 380 MW 的大规模风光

储项目，澳大利亚 Walcha Energy 公司在新南威尔士州建设了 4 GW 的风光储项目。我国最早的风光储互补发电项目是 2004 年 12 月华能南澳建成的 54 MW/100 kWp 风光互补发电场。随着国家政策向新能源发电倾斜，风光储一体化发电技术得到了充分的发展和应用。受限于地理布局，我国大部分风光储互补发电系统分布在阳光或风能资源充足的西北和沿海地区。未来风光储发电将与输电系统共同规划设计，我国首个千万千瓦级风光储输多能互补综合能源基地已于 2021 年在甘肃正式启动建设。中国能源建设股份有限公司、国家能源集团有限公司、山西国际能源集团有限公司、北京能源集团有限责任公司、国家电力投资集团有限公司等 15 家央（国）企签约风光储项目 27 个，总项目规划规模 42.49 GW。

目前，如表 2.2.1 所示，该领域核心专利公开量排名前三位的国家分别是中国、印度和韩国，其中，中国公开量达 63 项（占比达 90%），印度公

开量为 6 项（占比为 8.57%），韩国公开量为 1 项（占比为 1.43%）。中国的专利被引数、平均被引数均为最高，分别为 86 次与 1.37 次，被引数比例为 96.63%。主要产出国家间尚无合作。由表 2.2.2 可知，该前沿核心专利的主要产出机构是国家电网有限公司、河海大学、阳光电源股份有限公司等。国家电网有限公司与诸暨市东白电力安装工程有限公司开展过相关工程合作（图 2.2.1）。

未来 5~10 年，大规模风光储互补发电系统将成为保障电力系统安全运行、支撑系统电压、频率稳定的重要环节，兼顾消纳与主动支撑电网能力，是未来风光储互补发电系统的重点发展方向，其中涉及的关键技术包括：

1) 大规模风光储高比例互补消纳技术——平抑新能源出力波动、补偿功率预测误差、降低弃风率与弃光率、提升新能源并网 / 外送能力。

2) 风光储惯性控制并网技术——以虚拟同步机控制和变下垂控制为代表的动态扰动控制技术，

表 2.2.1 “大规模风光储互补发电及稳定并网技术”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	63	90.00	86	96.63	1.37
2	印度	6	8.57	3	3.37	0.50
3	韩国	1	1.43	0	0.00	0.00

表 2.2.2 “大规模风光储互补发电及稳定并网技术”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	国家电网有限公司	8	11.43	18	20.22	2.25
2	河海大学	2	2.86	3	3.37	1.50
3	阳光电源股份有限公司	2	2.86	1	1.12	0.50
4	上海工程技术大学	1	1.43	13	14.61	13.00
5	南通大学	1	1.43	7	7.87	7.00
6	南京工程学院	1	1.43	6	6.74	6.00
7	哈尔滨电气股份有限公司	1	1.43	5	5.62	5.00
8	广东省电力设计研究院	1	1.43	4	4.49	4.00
9	华夏五维文化产业股份有限公司	1	1.43	4	4.49	4.00
10	诸暨市东白电力安装工程有限公司	1	1.43	4	4.49	4.00



动态调节并入母线频率和电压，提高新能源故障穿越能力。

3) 高能量密度与高可靠性储能系统——提高储能电池、电池管理系统、储能变流器等单体设备的制造工艺、运行能力、安全性能。

在我国建设以新能源为主体的新型电力系统的背景下，我国可再生能源发电占比将从30%提升至50%甚至更高，大规模风光储互补发电及稳定并网技术将成为未来能源建设的核心技术，新增的风光储项目将达5000万kW以上。未来我国将建成大规模风光储发电基地、风光水储互补基地、风光氢储互补基地等相关工程。图2.2.2为“大规模风光储互补发电及稳定并网技术”工程开发前沿的发展路线。

### 2.2.2 多用途新概念微型反应堆

微型核反应堆既不是大型核电厂的微型化，也不是验证技术可行性的原型反应堆，而是按照用户需求提供兆瓦量级能源且具有先进技术特征的新型反应堆。为了满足不同应用场景下用户使用，微型

核反应堆通常具有固有安全性高、易于模块化和扩展、可运输性、便于部署、自主运行等技术特征。

微型核反应堆可为多地区灵活提供能源，例如为偏远海岛和矿区、边防哨所和基地等偏远区域提供小容量或分布式绿色清洁能源和热源，或为灾区和战争受损重要基础设施提供应急或备用电源。微型核反应堆作为能量密度高、体积小、运行期间维护少的能源模块，还可为深海探索和太空探索的重要装备提供长续航自主运行电源。

早在20世纪六七十年代，美国和苏联就曾研发过用于空间探索和军事基地的微型核反应堆。2015年，随着美国空间热管反应堆取得关键技术突破以及陆基核电源出现新的需求，微型核反应堆成为研发热点，主要研究方向为反应堆堆型和系统配置的多样性。

目前，国内外公开的微型核反应堆包括高温气冷堆、热管堆、钠冷快堆、铅冷快堆、熔盐堆和轻水堆等。各种微型核反应堆设计时除考虑发电能力外，也充分考虑了可运输性和可移动性。反应堆容器的尺寸受控制棒、控制鼓、反应堆容器、反应堆

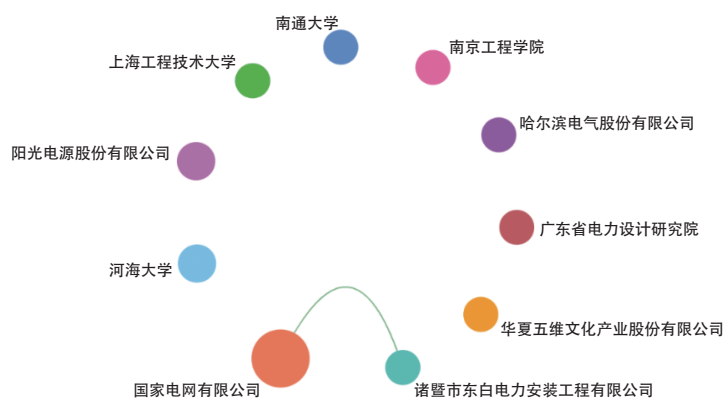


图 2.2.1 “大规模风光储互补发电及稳定并网技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络



图 2.2.2 “大规模风光储互补发电及稳定并网技术”工程开发前沿的发展路线

堆型、燃料类型、富集度、反射层材料等因素影响，进而影响反应堆的可运输性。微型核反应堆在热电转换系统和余热排出系统设计方面，充分考虑紧凑化和轻量化，尽量实现可运输性，其中热电转换系统主要使用紧凑式换热器，朗肯循环，超临界二氧化碳、氮气、氦气闭式布雷顿循环，开式布雷顿循环，余热排出系统则主要采用自然循环或热辐射/热传导将堆芯热量传递到堆芯外围，再通过非能动空气冷却或者金属翅片等将热量导出。

由表 2.2.3 可知，“多用途新概念微型反应堆”工程开发前沿中核心专利公开量排名前三位的国家分别是中国、美国和韩国，其中，中国核心专利占比超过 60%，美国、韩国的核心专利占比均超过 14%，其他国家核心专利占比均低于 2%。主要产出国家间尚无合作。由表 2.2.4 可知，该前沿核心专利公开量排名前列的机构有西安交通大学、西

安热工研究院、西屋电气公司、华南理工大学和中国核动力研究设计院，其核心专利产出占比均超过 4%。由图 2.2.3 可知，深圳阿尔法生物制药有限公司与云南济慈再生医学研究院开展了相关合作。

目前，国内外主要的微型核反应堆项目大多处于关键技术攻关阶段，预计在 2025—2027 年实现首堆示范验证。根据大型核电站技术发展趋势以及小微核反应堆的创新技术特征，可知微型核反应堆的技术发展趋势是固有安全性的提升，运输便捷，便于用户灵活部署和使用等。另外，微型核反应堆的关键技术包括新型燃料（如耐事故燃料）、主回路一体化、新型热电转换、非能动安全系统、智能运维、核能与其他能源耦合等。不同微型核反应堆将基于自身堆型特征及技术成熟度进行上述关键技术攻关和关键设备研发与验证。图 2.2.4 为“多用途新概念微型反应堆”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.3 “多用途新概念微型反应堆”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	39	65.00	65	43.33	1.67
2	美国	9	15.00	80	53.33	8.89
3	韩国	9	15.00	1	0.67	0.11
4	瑞士	1	1.67	4	2.67	4.00
5	德国	1	1.67	0	0.00	0.00
6	日本	1	1.67	0	0.00	0.00

表 2.2.4 “多用途新概念微型反应堆”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	西安交通大学	5	8.33	8	5.33	1.60
2	西安热工研究院	4	6.67	3	2.00	0.75
3	西屋电气公司	3	5.00	22	14.67	7.33
4	华南理工大学	3	5.00	8	5.33	2.67
5	中国核动力研究设计院	3	5.00	3	2.00	1.00
6	深圳阿尔法生物制药有限公司	2	3.33	13	8.67	6.50
7	云南济慈再生医学研究院	2	3.33	13	8.67	6.50
8	辽宁大化国瑞新材料有限公司	2	3.33	11	7.33	5.50
9	泰拉能源有限责任公司	2	3.33	11	7.33	5.50
10	中国航天系统科学与工程研究院	2	3.33	1	0.67	0.50

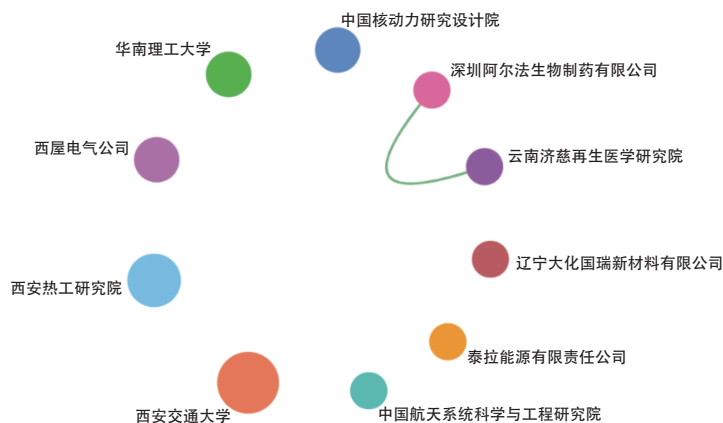


图 2.2.3 “多用途新概念微型反应堆”工程开发前沿主要机构间的合作网络



图 2.2.4 “多用途新概念微型反应堆”工程开发前沿的发展路线

### 2.2.3 页岩油气产能高精度预测系统

产能预测是页岩油气资产评估、开发方案设计等工作的重要前提，另外，对产能、产量的准确把握也是页岩油气开发的关键，这将为科学安排部署各项工作，制定合理生产制度，实现可持续发展等提供有效支撑。页岩储层特低孔低渗及多级压裂的特点，使得油气井较长生产周期内为非稳态流动，不具备产能试井需达到拟稳态流动的条件，对产量递减规律的认识不清，尤其是对后期产量递减规律的认识不够；强压裂改造又使得页岩裂缝系统复杂，识别难度大；多套产能预测模型选择困难，流动机理无定论导致数值模拟不确定性大。因此，页岩油气产能预测难度大，不确定性极强，常规油气产能预测方法在页岩油气中的适应性不强，应注重生产数据挖掘，构建产量与地质工程参数关系，加强动态分析，综合多种预测方法，构建高精度预测系统。

目前，“页岩油气产能高精度预测系统”工程

开发前沿中核心专利公开量排名第一的国家为中国，达 120 项（占比为 82.76%），排名第二和第三的国家分别为韩国和美国，公开量分别为 12 项和 10 项，占比分别为 8.28% 和 6.90%（表 2.2.5）。主要产出国家间尚无合作。专利产出机构主要来自中国，产出数量排名前十的机构中，有 9 家为中国的油气相关企业和高校，其中中国石油化工股份有限公司以 32 项专利排名第一（占比为 22.07%）（表 2.2.6）。中国油气相关企业和高校合作紧密，相互合作最多的机构是四川长宁天然气开发有限责任公司和成都川油瑞飞科技有限责任公司（图 2.2.5）。

页岩油气产能高精度预测系统在未来 5~10 年主要有两个重点发展方向：一是深化页岩油气地质和工程理论认识；二是建立页岩油气产能综合评价方法和预测模型（图 2.2.6）。具体可以细分为下面 4 个部分：① 深入和完善页岩油气赋存特征与渗流机理研究，为推进页岩气产能可靠预测奠定坚

表 2.2.5 “页岩油气产能高精度预测系统”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	120	82.76	485	82.34	4.04
2	韩国	12	8.28	39	6.62	3.25
3	美国	10	6.90	63	10.70	6.30
4	法国	1	0.69	2	0.34	2.00
5	澳大利亚	1	0.69	0	0.00	0.00
6	沙特阿拉伯	1	0.69	0	0.00	0.00

表 2.2.6 “页岩油气产能高精度预测系统”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	中国石油化工股份有限公司	32	22.07	129	21.90	4.03
2	西南石油大学	21	14.48	73	12.39	3.48
3	中国石油天然气股份有限公司	20	13.79	125	21.22	6.25
4	中国石油大学(北京)	9	6.21	17	2.89	1.89
5	重庆科技学院	6	4.14	32	5.43	5.33
6	四川长宁天然气开发有限责任公司	4	2.76	1	0.17	0.25
7	长江大学	3	2.07	15	2.55	5.00
8	中国地质大学(北京)	3	2.07	9	1.53	3.00
9	韩国地球科学与矿产资源研究院	3	2.07	8	1.36	2.67
10	成都川油瑞飞科技有限责任公司	3	2.07	0	0.00	0.00

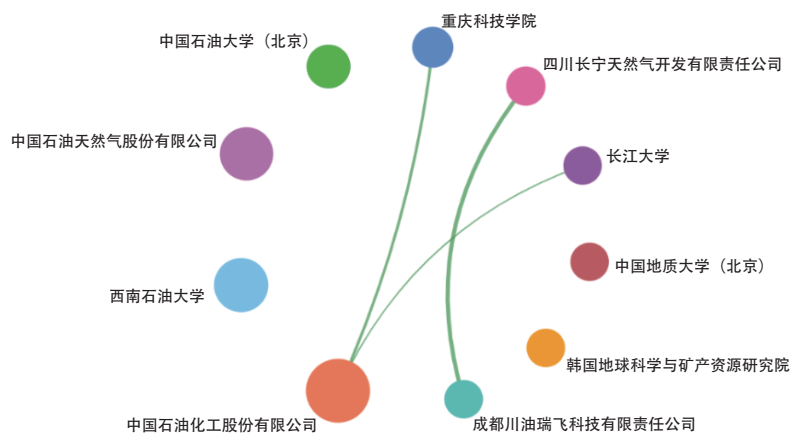


图 2.2.5 “页岩油气产能高精度预测系统”工程开发前沿主要机构间的合作网络

实基础；② 利用人工智能技术，开展地质参数和工程参数的大数据分析，探索产量主控因素并建立相关关系模型，进而预测产量；③ 开展不确定性产能预测方法研究，结合不确定性数学理论与数学

物理方法，推导出不确定性的产能解析模型或数值模型，实现对产能的不确定性预测；④ 开展页岩油气水平井立体开发物理模拟和理论研究，推动形成页岩油气水平井立体开发产能评价方法的系统理

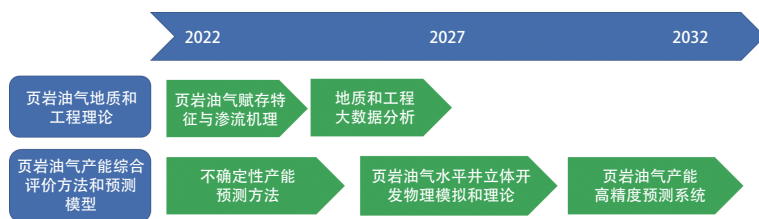


图 2.2.6 “页岩油气产能高精度预测系统”工程开发前沿的发展路线

论研究成果。通过充分考虑页岩油气藏开发实际条件和不确定因素，利用页岩油气产能综合评价方法和预测模型可以实现产能准确预测，为推动中国陆相页岩油、海相页岩气的增储上产、经济开发提供科学指导。

#### 2.2.4 油气钻井随钻前探与远探技术研发

随钻测量是指在钻探过程中实现钻孔轨迹信息和地质参数的实时测量与上传的技术。油气钻井随钻前探与远探技术既能用于地质导向，又能对复杂井、复杂地层的含油气情况进行评价，已成为行业研究热点。其中，随钻前视技术是利用测井仪器探测钻头前方未钻开地层的地质界面，探测方向与井眼/钻进方向相同，主要用于地质导向。随钻远探技术是利用测井仪器探测距井眼较远范围的流体边界、地层边界以及其他地层信息，探测方向垂直于井眼方向，主要用于油藏描述与地层评价。

国外随钻前探与远探技术已获得巨大发展，美国斯伦贝谢科技公司、美国哈利伯顿能源服务公司等先后推出 Geosphere、Earthstar、IriSphere 等随钻技术，远探距离可达 60 m，前探距离可达 30 m。目前，我国油气勘探开发领域正逐渐转向深层超深层、复杂地层、深海和非常规油气藏，对钻井工程提出了更高要求，随钻前探与远探技术有望成为提高钻遇率和油气产量的关键技术。2006年，国家“863计划”设立了“随钻地震技术研究”项目，在垂直地震剖面（vertic seismic profiling, VSP）技术上取得了一定突破；2014年，长城钻探推出的电磁波电阻率随钻测量仪（GW-LWD），型号 BMR，探

测距离达 2~3 m，达到国际先进水平；2016年，渤海钻探工程有限公司推出方位远探测声波成像测井仪，能够进行储层预测。目前，我国随钻前探与远探技术已取得阶段性进展，但总体技术仍落后于国外，其主要技术研究方向有井下测试仪器研发、测试工艺改进、数据传输与存储、数据分析与解释等。

“油气钻井随钻前探与远探技术”工程开发前沿中，核心专利公开量排名前两位的国家是美国和中国，公开量分别为 63 项和 56 项，占比分别为 49.22% 和 43.75%，其他国家的专利占比均低于 6.00%；其中，美国的专利被引数最高（206），被引数占比达 59.88%，中国和加拿大的被引数占比分别为 35.47% 和 11.92%，其他国家相关技术的专利被引数占比均小于 10.00%；加拿大的平均被引数最高（5.86）（表 2.2.7）。在核心专利主要产出机构（表 2.2.8）方面，哈利伯顿能源服务公司（32）、斯伦贝谢科技公司（18）、中国石油天然气股份有限公司（10）、中国石油化工股份有限公司（9）和中国科学院地质与地球物理研究所（7）产出较多；其中，哈利伯顿能源服务公司被引数比例最高（27.62%），中国科学院地质与地球物理研究所平均被引数最高（8.29）（表 2.2.8）。注重领域合作的国家有美国、荷兰、加拿大和法国（图 2.2.7），机构之间的合作研究集中在中国海洋石油集团有限公司和杭州迅美科技有限公司（图 2.2.8）。

随钻前探与远探技术在地质导向和复杂油气评价领域具有广阔的发展前景（图 2.2.9）。未来 5~10 年该技术的重点发展方向是降本增效，提升智能化水平。将随钻前探与远探技术与“一趟

表 2.2.7 “油气钻井随钻前探与远探技术研发”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	美国	63	49.22	206	59.88	3.27
2	中国	56	43.75	122	35.47	2.18
3	加拿大	7	5.47	41	11.92	5.86
4	法国	7	5.47	31	9.01	4.43
5	荷兰	7	5.47	31	9.01	4.43
6	俄罗斯	2	1.56	1	0.29	0.50
7	挪威	2	1.56	0	0.00	0.00
8	德国	1	0.78	3	0.87	3.00
9	沙特阿拉伯	1	0.78	2	0.58	2.00

表 2.2.8 “油气钻井随钻前探与远探技术研发”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	哈利伯顿能源服务公司	32	25.00	95	27.62	2.97
2	斯伦贝谢科技公司	18	14.06	78	22.67	4.33
3	中国石油天然气股份有限公司	10	7.81	16	4.65	1.60
4	中国石油化工股份有限公司	9	7.03	9	2.62	1.00
5	中国科学院地质与地球物理研究所	7	5.47	58	16.86	8.29
6	中国海洋石油集团有限公司	5	3.91	6	1.74	1.20
7	贝克休斯公司	4	3.12	20	5.81	5.00
8	杭州迅美科技有限公司	3	2.34	5	1.45	1.67
9	中国科学院声学研究所	3	2.34	4	1.16	1.33
10	电子科技大学	2	1.56	9	2.62	4.50

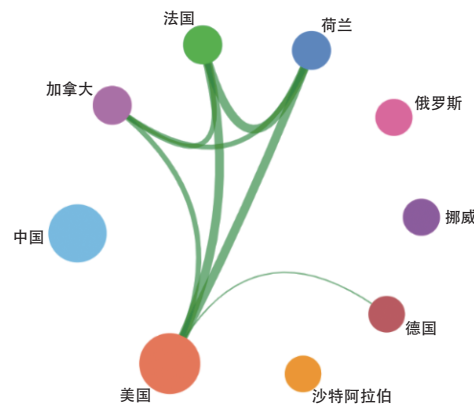


图 2.2.7 “油气钻井随钻前探与远探技术研发”工程开发前沿主要国家间的合作网络

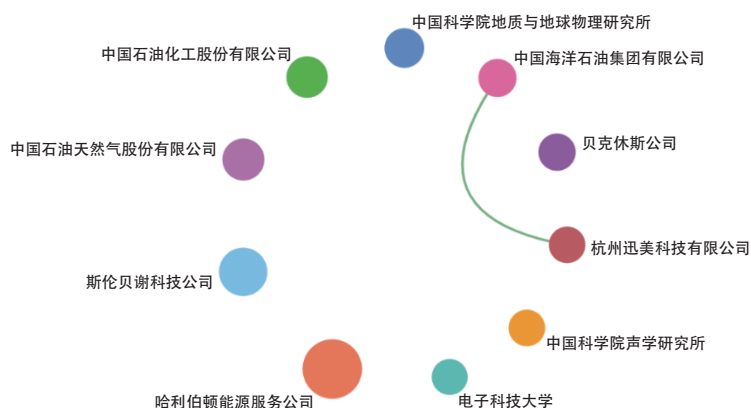


图 2.2.8 “油气钻井随钻前探与远探技术研发”工程开发前沿主要机构间的合作网络

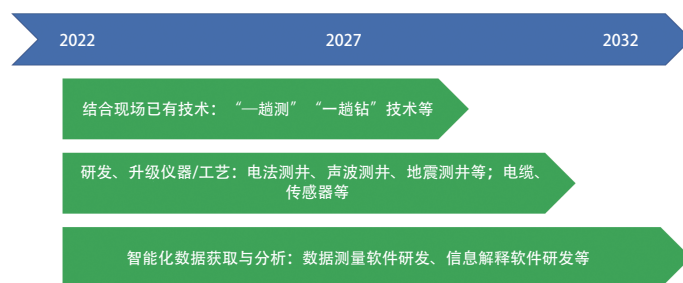


图 2.2.9 “油气钻井随钻前探与远探技术研发”工程开发前沿的发展路线

测”“一趟钻”技术相结合，可以简化作业流程，降低使用成本。研发新仪器、新工艺，可以高效获取测井信息，并实现流体和岩心采样，有望大幅提高钻遇率和产量，提升经济效益。结合大数据、

云计算，提高智能化水平，加强数据测量、信息解释等相关软件研发，实现高效率、高精度的数据获取与分析，有望成为智能钻井和智慧油田的重要组成部分。

## 领域课题组人员

课题组长：翁史烈 倪维斗 彭苏萍 顾大钊

课题副组长：黄震 巨永林 刘静

中国工程院二局：王振海

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 付凌霄

图书情报人员：陈天天 陈梦

能源和电气科学技术与工程学科组：

组长：翁史烈 岳光溪

秘书长：巨永林 张海

参加人：蔡旭 代彦军 韩东 罗加严

刘静 钱小石 沈水云 邵能灵 王倩

谢晓敏 徐潇源 杨立 杨林 严正

章俊良 赵长颖 赵一新

执笔人：韩 东 沈水云 邰能灵 杨 立

严 正 张 海

**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

参加人：郭英华 李恭顺 郭 晴 汪宗太

杨 勇 刘效言

执笔人：苏 罡 李恭顺 汪宗太 郭 晴

刘效言 郭英华

**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：张国生 刘 敏

参加人：刘 敏 王 坤 简 伟 李永新

董 劲 关 铭

执笔人：姚佛军 邢恩袁 侯献华 李永新

董 劲 关 铭

**矿业科学技术与工程学科组：**

组 长：袁 亮 李根生

秘书长：周福宝 吴爱祥 张 农 宋先知

副秘书长：江丙友

参加人：江丙友 时国庆 阮竹恩 梁东旭

姬佳炎 黄中伟 王海柱 尹升华

执笔人：江丙友 宋先知 时国庆 梁东旭

许富强 张 超 巩思园 辛海会 荣浩宇

王海柱 姬佳炎