

## 四、能源与矿业工程

### 1 工程研究前沿

#### 1.1 Top13 工程研究前沿发展态势

能源与矿业工程领域研判的 Top13 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 3 个工程研究前沿是基于科睿唯安共被引聚类分析获得，分别为“微电网与智能输配电系统”“三维地震数据分析和重构技术”“新一代太阳电池：包括钙钛矿、钙钛矿/硅异质结叠层、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  薄膜、聚合物及量子点敏化太阳电池”，其余是专家提名前沿。其中新

兴前沿包括“可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”“微电网与智能输配电系统”“先进高性能燃料电池关键技术”“页岩油地下原位改质机理与大规模开发关键技术”“非常规油气微观渗流机理与高效开采技术”“深空及深海核反应堆及电源技术”，传统深入研究包括“煤炭高效、洁净加工和转化”“三维地震数据分析和重构技术”“全智能一体化小型模块式反应堆技术”，颠覆性前沿为“新一代太阳电池：包括钙钛矿、钙钛矿/硅异质结叠层、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  薄膜、聚合物及量子点敏化太阳电池”，融合交叉学科前沿包括“先进核能技术：聚变-裂变混合堆技术”“煤炭与油气开采智能化

表 1.1.1 能源与矿业工程领域 Top13 工程研究前沿

| 序号 | 工程研究前沿                                                                  | 核心<br>论文数 | 被引<br>频次 | 篇均被引<br>频次 | 平均<br>出版年 | 常被引论文<br>占比 | 被专利引用<br>的文献占比 |
|----|-------------------------------------------------------------------------|-----------|----------|------------|-----------|-------------|----------------|
| 1  | 先进核能技术：聚变-裂变混合堆技术                                                       | 802       | 35 451   | 44.20      | 2013.43   | —           | —              |
| 2  | 可再生能源发电利用及储能、节能环保技术                                                     | 687       | 37 042   | 53.92      | 2013.76   | —           | —              |
| 3  | 煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料                                                  | 75        | 146      | 1.95       | 2014.75   | —           | —              |
| 4  | 微电网与智能输配电系统                                                             | 10        | 130      | 13.00      | 2016.60   | 50.00%      | 0.00           |
| 5  | 先进高性能燃料电池关键技术                                                           | 595       | 30 669   | 51.54      | 2013.27   | —           | —              |
| 6  | 煤炭高效、洁净加工和转化                                                            | 810       | 36 477   | 45.03      | 2013.46   | —           | —              |
| 7  | 页岩油地下原位改质机理与大规模开发关键技术                                                   | 75        | 452      | 6.03       | 2015.20   | —           | —              |
| 8  | 三维地震数据分析和重构技术                                                           | 37        | 403      | 10.89      | 2016.49   | 0.00%       | 0.00           |
| 9  | 基于大数据和认知理论的剩余油气资源空间分布预测技术                                               | 147       | 1507     | 10.25      | 2014.88   | —           | —              |
| 10 | 非常规油气微观渗流机理与高效开采技术                                                      | 1100      | 9872     | 8.97       | 2015.16   | —           | —              |
| 11 | 全智能一体化小型模块式反应堆技术                                                        | 573       | 25 436   | 44.39      | 2013.52   | —           | —              |
| 12 | 深空及深海核反应堆及电源技术                                                          | 97        | 1117     | 11.52      | 2014.43   | —           | —              |
| 13 | 新一代太阳电池：包括钙钛矿、钙钛矿/硅异质结叠层、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 薄膜、聚合物及量子点敏化太阳电池 | 120       | 6395     | 53.29      | 2015.85   | 22.50%      | 0.00           |

关键工程技术、装备与材料”“基于大数据和认知理论的剩余油气资源空间分布预测技术”。各个前沿所涉及的核心论文在 2012 年至 2017 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

**(1) 先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术**

聚变 – 裂变混合堆（简称混合堆）是一种结合聚变和裂变的优点、克服二者缺点的核能技术。混合堆与纯聚变堆的主要区别是包层内含有裂变燃料，裂变燃料比 Be 或者 Pb 有更好的中子增殖能力和能量放大能力，有利于降低聚变工程的难度。从氦循环来看，有利于实现氦自持、减少初始投氦量；从能量平衡看，可以降低聚变功率，减少高能中子对材料的辐照损伤。与裂变堆相比，混合堆是聚变中子源驱动的深度次临界系统，安全性能突出，在能量输出的同时可以很好解决裂变燃料增殖和超铀元素嬗变问题。混合堆的主要研究方向包括：驱动器技术（含托卡马克、激光惯性约束聚变、Z 箍缩惯性约束聚变等技术方向），次临界堆技术（含产

氦、增殖、嬗变、能源供应等技术方向），高增益聚变靶设计技术（对惯性约束聚变而言）等。混合堆的发展趋势是立足于近期可实现的聚变参数并借鉴成熟的裂变堆技术，促进聚变能的提前应用，探索解决裂变能源可持续发展的途径。

**(2) 可再生能源发电利用及储能、节能环保技术**

基于可再生能源的能源系统是解决世界范围内的能源利用问题和环境污染问题的有效途径，是能源利用走可持续发展道路的必然选择和有效措施。以可再生能源的高效、清洁利用为核心，可再生能源发电和储能技术领域快速发展，在世界范围内获得越来越多的关注。

从目前可再生能源的资源状况和技术发展水平看，利用风能、太阳能、水能发电，最为现实，前景广阔。可再生能源的发电技术可分为单一能源发电系统和混合能源发电系统。其中单一可再生能源发电系统与其他发电系统相对独立，易受到可再生

表 1.1.2 能源与矿业工程领域 Top13 工程研究前沿核心论文逐年发表数

| 序号 | 工程研究前沿                                                                          | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 |
|----|---------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术                                                             | 253    | 188    | 192    | 108    | 52     | 9      |
| 2  | 可再生能源发电利用及储能、节能环保技术                                                             | 150    | 173    | 161    | 117    | 69     | 17     |
| 3  | 煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料                                                          | 6      | 15     | 12     | 16     | 11     | 15     |
| 4  | 微电网与智能输配电系统                                                                     | 0      | 0      | 0      | 0      | 4      | 6      |
| 5  | 先进高性能燃料电池关键技术                                                                   | 201    | 165    | 126    | 75     | 25     | 3      |
| 6  | 煤炭高效、洁净加工和转化                                                                    | 230    | 213    | 193    | 115    | 57     | 2      |
| 7  | 页岩油地下原位改质机理与大规模开发关键技术                                                           | 5      | 8      | 9      | 14     | 23     | 16     |
| 8  | 三维地震数据分析和重构技术                                                                   | 0      | 0      | 0      | 1      | 17     | 19     |
| 9  | 基于大数据和认知理论的剩余油气资源空间分布预测技术                                                       | 11     | 22     | 25     | 32     | 30     | 27     |
| 10 | 非常规油气微观渗流机理与高效开采技术                                                              | 96     | 116    | 137    | 206    | 256    | 289    |
| 11 | 全智能一体化小型模块式反应堆技术                                                                | 164    | 145    | 124    | 89     | 46     | 5      |
| 12 | 深空及深海核反应堆及电源技术                                                                  | 13     | 22     | 16     | 15     | 18     | 13     |
| 13 | 新一代太阳电池：包括钙钛矿、钙钛矿 / 硅异质结叠层、Cu <sub>2</sub> ZnSnSe <sub>4</sub> 薄膜、聚合物及量子点敏化太阳电池 | 1      | 2      | 7      | 28     | 48     | 34     |

能源自身局限性的影响。混合可再生能源发电系统主要分为两类：一类是利用风、光、水能等可再生能源进行互补结合，克服单一种类的可再生能源在使用时不连续、不稳定的缺陷；另一类是将可再生能源与现有的化石能源进行结合的混合发电系统。

储能技术是通过在电力需求低时储电、在电力需求高时放电的方式帮助电网更好地融合风电、水能、太阳能等可再生能源发电的一种技术。按照储存介质不同储能技术可以分为机械类储能、电气类储能、电化学类储能、热储能和化学类储能等。

目前的主要研究前沿有：可再生能源材料、新型能源系统构成、热力循环特性，区域内可再生能源就地利用最大化、天然气使用最小化和全范围多能源供需平衡，大容量储能的规划及与可再生能源发电的协同调度技术，基于储能的能量流优化和能量调度技术等。

### （3）煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料

煤炭与油气智能开采是基于采集的海量数据，在不需要人工直接干预情况下，通过采掘环境的智能感知、采掘装备的智能调控、采掘作业的自主巡航等智能分析和信号反馈，由采掘装备独立完成的回采作业过程，或对油气生产动态进行智能调控。煤炭与油气智能开采是环境感知、智能决策、自动控制三个技术单元的深度整合，涉及工程环境感知、数字矿山、矿山物联网、大数据云计算、装备控制自动化五个分支。煤炭智能化开采未来的发展方向为：智能探测，是指对采场未知区域的自动探查和检测，包括煤岩分界、煤矸识别和超前探测等专业领域；智能导航，指利用先进的计算机、光电和导航技术对开采设备和人员进行自动定位，以实现安全监控和精确开采；智能控制，智能化采掘设备与自动调度决策集为一体，融合采煤机智能记忆截割、液压支架智能跟机自动化、工作面运输系统煤流平衡、智能集成供液、工作面可视化视频监控、远程遥控、三维虚拟现实、一键启停等多项技术。

油气开采智能化主要涉及智能化钻井、智能化完井、智能化生产三个研究方向。其中智能化钻井通过结合大数据、人工智能等，利用闭环调控、精准制导，可有效规避钻井风险，提高钻井速度，降低钻井成本，是确保完井、生产顺利开展的基础。智能化完井是借助先进的传感、传输、自动化控制设备，结合大数据、人工智能，可对油气生产过程进行实时监测与控制，为智能生产的进行提供有力支撑。智能化生产是基于大数据对油气田全生命周期的生产进行动态管理与优化。利用研究分支间协同工作，通过资料数据、仪器设备、施工作业等有效整合，进而可实现油气开采智能化。油气田智能化生产需要基于多元数据，通过智能分析，确定开发动态，然后利用智能调控对生产进行实时优化，数据智能采集、传输、分析、调控缺一不可，各个环节需要协同工作，因此数据智能采集—高效传输—智能分析—智能调控一体化技术将是未来发展趋势。同时，工程装备、材料与人工智能深度融合，能够监测油气藏实时状态，进一步提高采收率，可为数据采集、分段压裂、分层生产、数据挖掘等提供有力支撑，也将是未来研究前沿。

### （4）微电网与智能输配电系统

微电网和智能输配电系统是由分布式电源、储能、能量转换装备、监控和保护装置、负荷等汇集而成的新型发、输、配、用电一体化系统，是一个具备自我控制和能量管理的自治系统。微电网和智能配电系统运行和控制方式灵活，能够无缝接入多样化交直流装备，可工作于并网、离网等多个模式，从而大幅度改善电力系统对分布式电源的接纳能力，提升系统运行效率，并可保证关键负荷的连续、可靠供电。针对微电网和智能输配电系统的设计、运行及其控制特点，近年来综合规划与设计、多时间尺度能量管理、优化调度运行，高性能数字物理混合仿真，电力电子化新型装备及其控制等方向逐步成为了本领域研究前沿。此外，随着大数据、人工智能、新型储能等技术不断突破，未来的微电网和

智能输配电系统将呈现更加高度的开放性和灵活性，实现与冷、热、交通等异构能源系统的融合和互动。

### （5）先进高性能燃料电池关键技术

燃料电池是一种不经过燃烧，通过电化学方式将储存在燃料和氧化剂中的化学能直接转变为电能的装置，具有高效、清洁、无噪音等优点。氢能燃料电池技术最近几年出现了重大进展，燃料电池汽车已进入全球产业化前夜。汽车用燃料电池在比功率、发电效率和低温启动等方面均已达到或者接近商业化目标。然而，其寿命需要进一步提高，成本需要大幅度降低。主要研究方向为开发高活性、高稳定性（超）低铂氧还原电催化剂及其批量化合成技术，高性能、长寿命（超）低铂膜电极及其批量化制备技术，高耐蚀金属双极板涂层技术，高性能、（超）低铂阴极传质及水管理技术。通过突破核心部件和关键材料技术，形成自主知识产权，大幅度提高性能、降低成本。

### （6）煤炭高效、洁净加工和转化

煤炭的高效利用是根据终端需要，将经过洁净加工的煤炭作为燃料或原料使用，从而实现煤炭的宝贵价值，煤炭高效利用包括高效燃烧和高效转化；煤炭的洁净加工是根据用户的实际需要，对原煤进行适当的提质处理，从而为其高效利用提供品种对路、质量稳定的煤炭产品；煤炭的洁净转化是将煤炭作为原料使用，分为将煤炭转化为气态、液态及固态燃料或化学产品以及具有特殊用途的炭材料。

煤炭高效利用的主要任务是改善煤炭的终端消费结构，目前科研前沿在煤炭向洁净二次能源（电力、燃料气、燃料油）的就地转化，强化以获取化工原料或产品（气态、液态、固态）为目的的深度加工。煤炭洁净加工的主要任务是提高商品煤质量。目前科研前沿在选煤新技术的开发，特别应针对高效降灰、脱硫以及省水型或干法选煤技术，重点放在动力煤洗选上。煤炭转化技术主要针对除燃烧之外的煤炭化学转化，目前科研前沿有五种煤炭转化技术：煤气化、煤液化、煤制天然气、煤制化

产品和低阶煤热解。

考虑到煤炭利用技术的现状及未来对环境保护更高的要求，未来煤炭高效、洁净加工和转化必将是煤的高效燃烧、发电技术与燃煤污染物控制技术的结合，高效率的燃煤发电机组、循环流化床燃烧技术，以煤气化技术为核心的整体煤气化联合循环技术，CO<sub>2</sub>的捕集与封存技术、富氧燃烧分离CO<sub>2</sub>的技术会得到较大的发展。

### （7）页岩油地下原位改质机理与大规模开发关键技术

页岩油原位转化是采用原位加热技术，将富有机质页岩中尚未转化的有机质和滞留油气转化为轻质油和气的物理化学过程，可称之为“地下炼厂”。该技术的基本原理是对页岩油矿层加热，生成并产出高品质石油和天然气，在地下高温条件下呈气态存在，大大提高了其流动性，原位转化过程中页岩会产生微裂缝和高压，形成人工渗流系统，增大渗流能力。页岩油原位转化产出的高品质石油经简单加工后可达到航空煤油级别，大大节省了原油炼化成本，产生的残留物保存在地下，减少了环境污染，省去水力压裂，节省水资源，可综合利用风能、太阳能等新能源，减少二氧化碳排放。目前，该技术基本具备了工业化利用条件，但尚未达到工业化程度，应加大对该技术的扶持力度、加大投入，研发适用于中国陆相富有机质页岩油的原位转化技术，推动该技术的工业化进程，对大幅度降低我国原油对外依存度和国家能源安全至关重要。

### （8）三维地震数据分析和重构技术

在地震数据采集过程中，由于实际环境的影响（如山川、河流、建筑物等）以及经费的约束，采集到的原始数据常不规则，导致后续的处理，如偏移、多次波压制、地震成像等带来不利影响。三维地震数据分析与重构作为地震资料处理的重要步骤，可有效解决这一问题。该技术的主要研究方向是如何提高野外观测到数据的规则性，以提高抗噪性和成像精度。目前主要的研究趋势集中在针对稀疏地震

数据的 F-K 域地震道插值方法、针对不规则缺失数据的非稳态地震数据重构方法，包括基于预测滤波的数据重构、基于数学变换的数据重构和基于波动方程的数据重构等。目前的发展趋势是将这些核心技术应用到微地震弱信号检测、提高信噪比、油气检测、高精度水力压裂监测、测井约束全波形反演、致密砂岩中的油气检测等领域。

#### (9) 基于大数据和认知理论的剩余油气资源空间分布预测技术

剩余油气资源空间分布预测技术，是为了满足当前常规剩余油气资源分布较为分散与隐蔽、非常规油气资源分布非均质性较强的特点而研发的技术，是对传统资源评价方法的重要补充和延伸。以往剩余资源分布研究工作更多地是从油气资源管理角度，开展油气资源-区带-目标的一体化管理。而当前剩余油气资源空间分布预测技术可以实现剩余油气资源的空间定位与勘探风险可视化，大数据 (big data) 与认知理论 (theories of cognition) 为这一技术提供了条件。大数据指无法在一定时间范围内用常规软件工具进行捕捉、管理和处理的数据集合，是需要新处理模式才能具有更强的决策力、洞察发现力和流程优化能力的海量、高增长率和多样化的信息资产。认知理论是关于有机体学习的内部加工过程，如信息、知识及经验的获得和记忆、达到顿悟、使观念和概念相互联系以及问题解决的各种心理学理论。随着油气勘探开发程度的深入，石油工业界积累了海量油气生产相关数据，如勘探开发生产性统计数据、地震与测井等地球物理资料、测录试等钻测井资料、分析测试等地质研究资料。在成因法、统计法、类比法等传统油气资源评价方法定量评价油气资源量基础上，在认知理论指导下开展大数据的勘探地质处理与开发地质处理，实现油气资源的空间分布预测，明确资源分布规律，指明油气目的层（储层）的有利成藏地带或具体赋存位置，是今后剩余油气资源分布预测技术发展的大势所趋。

#### (10) 非常规油气微观渗流机理与高效开采技术

非常规油气微观渗流机理主要涉及油气在微米孔隙、微裂缝中的流动特征，可用于分析储层中生产动态，为非常规油气藏的准确描述与评价提供重要支撑。同时，非常规油气藏地质特征复杂，微纳米级孔隙油气开发难度大，迫切需要利用高效开采技术提高非常规油气开发效率，实现非常规油气领域重大突破，主要涉及储层改造、生产调控、自动化开采等研究方向。

我国页岩气、页岩油、致密气、致密油、煤层气、稠油等非常规油气资源丰富，是重要的战略接替资源。但是由于储层复杂，相关的理论技术尚不成熟，利用常规手段难以实现经济有效开采，亟需开展渗流机理的研究，为非常规油气生产调控与实时优化提供科学依据。因此围绕非常规油气微观渗流特征，国内外对非达西渗流，多相渗流、多尺度渗流等关注度持续提升，已成为未来研究前沿。同时，无水压裂、多级压裂、同步压裂、分压合采、“多层系、多井型”混合井网开采，平台式“工厂化”开采等高效技术的研究，由于可显著降低开采成本，提高油气采收率，已成为未来发展趋势。

#### (11) 全智能一体化小型模块式反应堆技术

自 2004 年 6 月国际原子能机构 (IAEA) 宣布启动以一体化技术、模块化技术为主要特征的革新型模块式小型堆 (SMR) 开发计划以来，参与的成员国总数已达到 30 个，涌现了 45 种以上的革新型中小型反应堆概念，成为国际上研发前沿领域。小型核反应堆一般是指单堆热功率在 1000 MW (电功率 300 MW) 以下的反应堆，具有无碳排放、容量小、选址灵活、建设投资小、建造周期短、系统设备能在工厂组装和便于运输，且可通过模块化设计建造升级和改善经济性等特点。从国内外已公开的模块式小型堆技术方案来看，有压水堆、高温气冷热堆、高温气冷快堆、铅铋冷却快堆、熔盐堆等多种堆型，但开发立足于短期可部署的模块式小型堆，无一例外选择了一体化压水堆路线，其设计

研发的进度远远超过其他堆型，这主要得益于拥有几十年良好的压水堆技术基础及工业基础。国际上主要小堆机型研发特点：定位于近期推广的一体化压水堆机型，采取设计措施能够排除大冷却剂丧失（LOCA）事故或者弹棒事故，并且采取设计优化提高经济性；船用的模块化或者回路型压水堆机型，采取固有的安全特性和非能动安全系统，充分借鉴了核破冰船和潜水艇的经验，采取标准化设计、批量化生产和装料以增强市场竞争力。小堆属于军民两用技术，既可作为军用动力，应用于舰船动力、边防建设，又可以用于国民经济建设领域（如居民供电、破冰船、城市供热、工业工艺供热和海水淡化），在军民领域应用前景广阔。

### （12）深空及深海核反应堆及电源技术

深空及深海蕴含着丰富的战略资源，是 21 世纪人类可持续发展的崭新领地和宝贵财富，在国家发展和国际竞争中的战略地位日益凸显。伴随着各种深空及深海技术能力需求的不断提升，能源动力问题已逐渐成为多种深海装备性能进一步提升的瓶颈，亟待突破。与常规能源相比，核反应堆电源具有能量密度高、不需要空气、运行时间长的天然优势，可从根本上解决深海装备的动力短板，成为未来深海能源的最优选择。主要技术包括：热管冷却式反应堆技术。区别于传统回路冷却反应堆的新的反应堆类型，通过热管将反应堆的热量带出，具有简单、安全、可靠、避免单点失效等突出优点，十分适合作为深海小型核反应堆电源装置的首选堆型。自由活塞式斯特林发电机技术：回热式热发电技术，通过直线电机来输出电能。它具有长寿命、高可靠性、高转换效率、绿色无污染、低噪音等诸多优点，在空间电源、太阳能热发电、小型热电联供、便携式电源、生物质能发电系统等诸多领域具有广泛的应用前景。反应堆全自主运行技术：反应堆的全自主运行是指反应堆依靠自身物理热工反馈和仪控系统调节实现自动运行，不需要人员在线监控和干预，能够自动响应工况波动，实现长期稳定免

维护运行。反应堆安全技术：针对深海核反应堆安全技术开展专项研究，重点研究深海核反应堆所特有的安全特性、事故机制以及核扩散威胁等问题。

### （13）新一代太阳能电池：包括钙钛矿、钙钛矿/硅异质结叠层、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 薄膜、聚合物及量子点敏化太阳能电池

钙钛矿结构材料是一类具有  $\text{ABX}_3$  分子结构的化合物，起源于钛酸钙 ( $\text{CaTiO}_3$ ) 化合物。钙钛矿结构材料具备很高的吸收系数、陡峭的吸收边及可调带隙范围宽的优点，使钙钛矿太阳能电池效率在短短七年时间里从 3.8% 提升至 22.7%。目前科研前沿主要在效率、稳定性和大面积产业化方面，其中无机取代有机、锡元素取代铅元素是解决钙钛矿稳定性和毒性最有效的方法，逐渐成为新趋势。同时，钙钛矿结构材料独特的晶体结构和光电特性也非常适合于叠层太阳能电池应用。钙钛矿/硅异质结叠层电池技术利用不同带隙的材料吸收不同能量的光子，从而充分利用太阳光，有望成为突破晶硅单结电池效率极限的新兴技术。此技术现阶段的研发主要集中在优化材料制备工艺、减少寄生吸收和反射损失等方面。短短三年时间，钙钛矿/硅异质结两端叠层太阳能电池的效率从 13.7% 快速提升至 25.2%，已经接近单晶硅电池的最高效率。钙钛矿/硅异质结两端叠层电池技术未来必将成为学术界和产业界的研发前沿。

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  薄膜、聚合物及量子点敏化太阳能电池是近年来另一类热门的新型太阳能电池。相比铜铟镓硒薄膜， $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  的带隙更接近理想太阳能电池禁带宽度，而且具有材料储量丰富、无毒且价格低廉等特点，所制备的太阳能电池有望取得更高的转换效率。目前主要研究前沿是通过改进制备方法和掺杂等手段来提高电池的转换效率。代表性的进展包括使用金属前驱物电池效率为 12.3%；采用共蒸法效率为 8.7%（后续认证效率为 10.4%）。聚合物太阳能电池是一种基于有机物半导体的太阳能电池，其特点是易于通过涂布方式制取大面积柔性太阳能电池，

目前可达到 13% 以上的单结电池效率和接近 15% 的叠层电池效率。典型功能层为聚合物电子给体层和富勒烯电子受体层。目前的研究前沿是基于非富勒烯受体层的聚合物太阳电池、使用化学处理（如氯化）对电子给体层进行优化以及采用不同电子给体层制备叠层电池以提高全光谱吸收等。量子点敏化太阳电池是一种并不基于 PN 结、异质结等结构的光电化学太阳电池。利用光阳极（一般为纳米结构氧化物半导体，如多孔氧化钛、氧化锌纳米线阵列等）上吸附的半导体量子点（可以为化合物半导体如 PbS, CdSe 等或者硅锗等单质半导体）作为光吸收材料，并通过其与所接触的固体 / 液体电解质层中的氧化 / 还原态离子电对进行载流子交换，以实现电子 - 空穴分离。其特点是很容易通过量子点的成分变化及尺寸控制实现带隙调控，从而制备光谱匹配的太阳电池，对界面条件及材料纯度等要求不高，易于实现廉价高效的目的。目前掺汞的 PbS/TiO<sub>2</sub> 体系电池效率为 4.72%，掺锰的 In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>+Cu-InS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 体系电池效率可达到 8.0%。

## 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 先进核能技术：聚变 - 裂变混合堆技术

#### (1) 概念阐述和关键技术

聚变 - 裂变混合堆（简称混合堆）是一种结合聚变和裂变的优点、克服二者缺点的核能技术。混合堆与纯聚变堆的主要区别是包层内含有裂变燃料，裂变燃料比 Be 或者 Pb 有更好的中子增殖能力和能量放大能力，有利于降低聚变工程的难度。从氦循环来看，有利于实现氦自持、减少初始投氦量；从能量平衡看，可以降低聚变功率，减少高能中子对材料的辐照损伤。与裂变堆相比，混合堆是聚变中子源驱动的深度次临界系统，安全性能突出，在能量输出的同时可以很好解决裂变燃料增殖和超铀元素嬗变问题。混合堆的主要研究方向包括：驱动

器技术（含托卡马克、激光惯性约束聚变、Z 箍缩惯性约束聚变等技术方向），次临界堆技术（含产氦、增殖、嬗变、能源供应等技术方向），高增益聚变靶设计技术（对惯性约束聚变而言）等。混合堆的发展趋势是立足于近期可实现的聚变参数并借鉴成熟的裂变堆技术，促进聚变能的提前应用，探索解决裂变能源可持续发展的途径。

#### (2) 发展现状与未来发展趋势

混合堆的研究涉及聚变、裂变两大核能领域，立足于近期可实现的聚变技术和成熟的裂变技术，推动聚变能提前应用和裂变能的可持续发展。

聚变领域又分磁约束聚变和惯性约束聚变。磁约束聚变方面，托卡马克研究处于领先地位。我国正式参加了国际热核聚变实验堆（ITER）项目的建设和研究；同时作为 ITER 装置与聚变示范堆（DEMO）之间的桥梁，我国正在自主设计、研发中国聚变工程实验堆（CFETR）。在惯性约束聚变（ICF）方面，Z 箍缩作为能源更具潜力，有可能发展成具有竞争力的聚变 - 裂变混合能源（Z-FFR）。Z-FFR 由 Z 箍缩驱动器、能源靶、次临界能源包层构成。以下重点对 Z-FFR 需要解决的关键技术进行说明。

Z 箍缩惯性约束聚变涵盖了磁流体动力学、辐射输运、原子物理、等离子体微观不稳定性、强脉冲磁场下的输运机制等多物理过程和复杂物理效应。我国已重点开展了 Z 箍缩等离子体内爆动力学及其辐射源物理研究，并获得了丰富的研究成果，Z-FFR 总体概念设计研究取得显著进展。但是，对电流前沿与 Z 箍缩负载参数和内爆动力学的关系、Z 箍缩等离子体辐射源定标律和 Z 箍缩动态黑腔辐射场（温度）定标律，以及 Z 箍缩惯性约束聚变过程中几个重要物理过程的能量转换效率等关键问题，研究甚少。

超强脉冲磁场是 Z 箍缩过程最显著的特征，在此条件下的等离子体形成、磁瑞利 - 泰勒 MRT 不稳定性发展对内爆过程及内爆品质产生决定性影

响。由于在强非线性过程中，负载区的电磁能、Z 箍缩等离子体内能以及辐射能之间的能量交换非常复杂。Spitzer 电阻率不能准确描述 Z 箍缩等离子体电阻率特性，其反常机制还不清楚。如何描述和解释辐射源的产生过程及物理机制极为重要。大电流装置可以为开展 Z 箍缩等离子体物理实验研究提供更宽的参数范围。

典型的 Z 箍缩过程具有柱形内爆特征，而聚变靶为球形内爆，设计合适的黑腔构型，使得负载等离子体 Z 箍缩过程与靶内爆在时间和空间上获得有效分离，这是 Z 箍缩驱动惯性约束聚变的核心问题。在目前我国已有的装置上没有条件开展此项实验研究。相对于激光聚变，Z 箍缩辐射源时间尺度较长，空间尺度较大，难以对波形进行精密调节，需要进行新的聚变靶设计以便有效压缩燃料，获得较高能量增益。

建造新一代大电流的脉冲功率实验平台，有利于开展 Z 箍缩辐射源、黑腔以及靶内爆等 Z 箍缩驱动惯性约束聚变部分关键物理问题的实验研究和验证。建议国家层面支持 2018—2025 年建设峰值电流为 50~70 MA 的 Z 箍缩驱动器，尽快实现聚变点火。一旦点火目标实现，下一步便可开始建设 Z-FFR。Z-FFR 配备大型超高功率重复频率驱动器，首选快脉冲直线变压驱动器（LTD），电容器

标称储能 ≤ 100 MJ，峰值电流为 60~70 MA，上升前沿为 150~300 ns，运行频率为 0.1 Hz；采用“局部整体点火”理念，设计高增益聚变靶丸，能量增益  $Q \geq 100$ ；设计天然铀裂变包层，实现氙自持、能量放大 10~20 倍、裂变燃料增殖。

### （3）重点研究国家 / 地区和机构以及之间的对比及合作情况分析

根据表 1.2.1 可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的国家是美国、德国、英国、法国、日本、意大利和中国。其中，美国占据第一位，核心论文比例超过 50%，德国、英国、法国、日本、意大利和中国的核心论文比例均超过 10%。

由表 1.2.2 可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的机构分别是 Lawrence Livermore Natl Lab、Univ Rochester、Los Alamos Natl Lab、MIT、Gen Atom Co、Ist Nazl Fis Nucl、Sandia Natl Labs、Univ Oxford、Chinese Acad Sci，核心论文产出数均超过 20 篇。

根据图 1.2.1 可知，较为注重该领域国家或地区间合作的有美国、日本、德国、英国、法国、中国。中国的论文发表数量较多，主要是与美国、日本、德国、法国、英国和俄罗斯进行合作发表。

根据图 1.2.2 可知，Lawrence Livermore Natl Lab、MIT、Gen. Atom Co.、Los Alamos Natl Lab、

表 1.2.1 “先进核能技术：聚变 - 裂变混合堆技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

| 序号 | 国家 / 地区     | 核心论文数 | 论文比例   | 被引频次   | 被引频次比例 | 篇均被引频次 |
|----|-------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | USA         | 434   | 54.11% | 20 456 | 57.70% | 47.13  |
| 2  | Germany     | 130   | 16.21% | 6250   | 17.63% | 48.08  |
| 3  | UK          | 116   | 14.46% | 6518   | 18.39% | 56.19  |
| 4  | France      | 111   | 13.84% | 5468   | 15.42% | 49.26  |
| 5  | Japan       | 90    | 11.22% | 5166   | 14.57% | 57.40  |
| 6  | Italy       | 87    | 10.85% | 4316   | 12.17% | 49.61  |
| 7  | China       | 84    | 10.47% | 3326   | 9.38%  | 39.60  |
| 8  | Spain       | 53    | 6.61%  | 2359   | 6.65%  | 44.51  |
| 9  | Russia      | 49    | 6.11%  | 2234   | 6.30%  | 45.59  |
| 10 | Switzerland | 46    | 5.74%  | 2647   | 7.47%  | 57.54  |

Univ. Rochester 有合作。

表 1.2.3 中，施引核心论文产生最多的国家是美国，施引核心论文比例达到 29.75%，中国达到 16.81%，德国的施引核心论文比例超过 10%。

表 1.2.4 中，施引核心论文产出最多的机构是 Chinese Acad Sci，施引核心论文比例达到将近 20%。Lawrence Livermore Natl Lab 的施引核心论文比例超过 16%。

通过以上数据分析可知，美国和中国在聚变-裂变混合堆的核心论文产出及施引数量处在世界前列，中国内地机构的施引核心论文数量较多。

## 1.2.2 可再生能源发电利用及储能、节能环保技术

### (1) 概念阐述和关键技术

基于可再生能源的能源系统是解决世界范围内的能源利用问题和环境污染问题的有效途径，是能源利用走可持续发展道路的必然选择和有效措施。以可再生能源的高效、清洁利用为核心，可再生能源发电技术和储能技术等领域快速发展，在世界范围内获得越来越多的关注。

#### • 可再生能源发电系统

从目前可再生能源的资源状况和技术发展水平看，利用水能、风能、太阳能发电最为现实，前景

表 1.2.2 “先进核能技术：聚变-裂变混合堆技术”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 | 被引频次比例 | 篇均被引频次 |
|----|-----------------------------|-------|--------|------|--------|--------|
| 1  | Lawrence Livermore Natl Lab | 116   | 14.46% | 5810 | 16.39% | 50.09  |
| 2  | Univ Rochester              | 74    | 9.23%  | 2935 | 8.28%  | 39.66  |
| 3  | Los Alamos Natl Lab         | 72    | 8.98%  | 3661 | 10.33% | 50.85  |
| 4  | MIT                         | 44    | 5.49%  | 2674 | 7.54%  | 60.77  |
| 5  | Gen Atom Co                 | 41    | 5.11%  | 1933 | 5.45%  | 47.15  |
| 6  | Ist Nazi Fis Nucl           | 29    | 3.62%  | 1116 | 3.15%  | 38.48  |
| 7  | Sandia Natl Labs            | 25    | 3.12%  | 1323 | 3.73%  | 52.92  |
| 8  | Univ Oxford                 | 21    | 2.62%  | 1553 | 4.38%  | 73.95  |
| 9  | Chinese Acad Sci            | 20    | 2.49%  | 988  | 2.79%  | 49.40  |
| 10 | Univ Calif Berkeley         | 19    | 2.37%  | 1568 | 4.42%  | 82.53  |

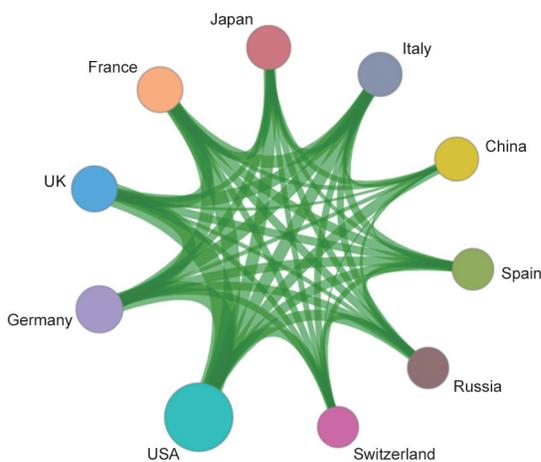


图 1.2.1 “先进核能技术：聚变-裂变混合堆技术”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

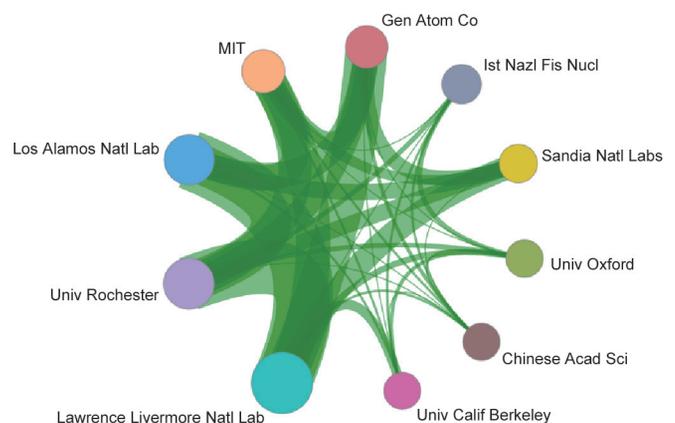


图 1.2.2 “先进核能技术：聚变-裂变混合堆技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

| 序号 | 国家 / 地区 | 施引核心论文数 | 施引核心论文比例 | 平均施引年  |
|----|---------|---------|----------|--------|
| 1  | USA     | 9956    | 29.75%   | 2015.8 |
| 2  | China   | 5626    | 16.81%   | 2016.1 |
| 3  | Germany | 3919    | 11.71%   | 2015.8 |
| 4  | UK      | 2873    | 8.58%    | 2015.9 |
| 5  | France  | 2542    | 7.59%    | 2015.7 |
| 6  | Italy   | 2480    | 7.41%    | 2015.8 |
| 7  | Japan   | 2267    | 6.77%    | 2015.8 |
| 8  | Spain   | 1418    | 4.24%    | 2015.9 |
| 9  | Russia  | 1207    | 3.61%    | 2015.7 |
| 10 | Canada  | 1183    | 3.53%    | 2015.8 |

表 1.2.4 “先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术”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  | Chinese Acad Sci            | 1208    | 19.58%   | 2016.1 |
| 2  | Lawrence Livermore Natl Lab | 1015    | 16.45%   | 2015.3 |
| 3  | Univ Calif Berkeley         | 613     | 9.94%    | 2015.6 |
| 4  | Los Alamos Natl Lab         | 591     | 9.58%    | 2015.5 |
| 5  | Ist Nazl Fis Nucl           | 541     | 8.77%    | 2015.4 |
| 6  | MIT                         | 473     | 7.67%    | 2015.6 |
| 7  | Univ Rochester              | 449     | 7.28%    | 2015.4 |
| 8  | Russian Acad Sci            | 446     | 7.23%    | 2015.6 |
| 9  | Univ Calif Los Angeles      | 419     | 6.79%    | 2016.0 |
| 10 | CALTECH                     | 415     | 6.73%    | 2015.6 |

广阔。可再生能源发电系统可分为单一能源发电系统和混合能源发电系统。其中单一能源发电系统与其他系统相对独立，较易受到可再生能源自身局限性的影响。混合能源发电系统主要有两类：一类是利用风、光、水能等可再生能源进行互补结合，克服单一种类的可再生能源在使用时不连续、不稳定的缺陷。另一类是将可再生能源与现有的化石能源（天然气、沼气、生物质能、地热能等）进行结合的混合发电系统。

保证可再生能源的发电系统连续、稳定的输出电力，并确保供电质量是可再生能源发电的关键技

术。目前的主要技术前沿包括：能源系统构成设计和动态模型建立、混合系统热力循环特性，区域内可再生能源就地利用最大化、天然气使用最小化和全范围多能源供需平衡、能量管理和调度控制系统等。

可再生能源的发展方向是通过分布式可再生能源和能源智能微网等方式，构建风、光、水、火、储多能互补系统，开发面向用户电、热、冷、气等多种用能需求的终端一体化集成系统。混合可再生能源发电系统已经开始在美国、欧洲等世界各国电力系统中投入应用。

## • 先进储能技术

储能技术是通过在电力需求低时储电、在电力需求高时放电的方式帮助电网更好地融合风电、水能、太阳能等可再生能源发电的一种技术。广义的电力储能技术可定义为实现电力与热能、化学能、机械能等能量之间的单向或双向存储设备。

按照储存介质的不同，储能技术可以分为机械类储能、电气类储能、电化学类储能、热储能和化学类储能等。机械类储能主要包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能等；电气类储能主要包括超级电容器储能和超导储能等；电化学类储能主要包括各类电池，例如铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池和液流电池等；热储能将热能储存在隔热容器的媒质（如相变材料）中，需要时可以被转化为电能，也可直接利用热能而不再转化为电能；化学类储能主要是指利用氢或合成天然气作为二次能源的载体，例如通过电解水合成氢气和天然气进行二次利用。

目前抽水蓄能是全球装机规模最大的储能技术，占全球总储能容量的 98%。而压缩空气储能、铅酸电池、锂电池等近年来发展势头迅猛，在全球范围内已成为最具竞争力的储能技术。

其关键技术包括：大容量储能的规划及与可再生能源发电的协同调度技术、基于储能的能量流优化和能量调度技术、储能与能量转换装置的集成设计和协调配置等。

### （2）发展现状与未来发展趋势

#### • 可再生能源发电技术

根据 21 世纪可再生能源政策网络（REN21）发布《全球可再生能源现状报告 2018》，2017 年可再生能源发电占到全球发电量净增加值的 70%，这是现代历史上可再生能源发电量增长最大的一年。

目前全球对新增可再生能源发电的投资已超过对新增化石燃料和核能发电投资总和的两倍以上。由于成本竞争力的提高，2017 年可再生能源投资占电力行业总投资的比例超过三分之二，同时可再

生能源在电力行业的份额仍将会继续上升。

根据国家能源局统计，2017 年我国可再生能源发电量为 1.7 万亿千瓦时，同比增长 1500 亿千瓦时；可再生能源发电量占全部发电量的 26.4%，同比上升 0.7 个百分点。其中，水电为 11945 亿千瓦时，同比增长 1.7%；风电为 3057 亿千瓦时，同比增长 26.3%；光伏发电为 1182 亿千瓦时，同比增长 78.6%；生物质发电为 794 亿千瓦时，同比增长 22.7%。全年弃水电量为 515 亿千瓦时，在来水好于去年的情况下，水能利用率达到 96% 左右；弃风电量为 419 亿千瓦时，弃风率为 12%，同比下降 5.2 个百分点；弃光电量为 73 亿千瓦时，弃光率为 6%，同比下降 4.3 个百分点。我国可再生能源发电比重稳步上升。

目前可再生能源最新技术领域有可再生能源先进发电技术、可再生能源并网技术和可再生能源多能互补技术三个方向。

在可再生能源先进发电技术方面，由于光伏发电输出功率的随机性，保证光伏并网发电的最大功率点的跟踪是其研究重点，由于最大功率点跟踪对跟踪的准确性、快速性和稳定性要求比较高，实现有功输出的有效调节是目前光伏发电的关键技术。变速恒频发电技术可最大限度的捕捉、利用风能，并且转速运行范围相对宽松，调节系统更加灵活，是目前主流的风力发电新技术。

在可再生能源发电并网技术方面，可再生资源受环境温度、天气因素的影响，具有比较大的波动性和间歇性，很容易导致电网电压出现闪变或波动，因此并网消纳是将可再生能源接入现有能源体系的关键技术，这些技术包括：先进逆变器技术。逆变器具有可拓展通信功能、可以对无功和有功进行控制、可以降低有功变化率、实现谐波补偿等，保证电能输出质量更稳定、抗干扰能力更强，并具有可以达到智能电网要求的网源互动技术。可再生能源并网需要更加的精确、快速的电网电压信号锁

定技术，能够在大功率并网时不对称运行情况下和电压采样波动情况下完成精确锁相。系统抗干扰技术。集中式风光电站要在变换器控制的基础上实现低电压穿越，孤岛指令和检测利用输变电系统能量进行管理实现；分布式风光电站要通过控制达到孤岛检测的目的，并利用基于配电网的能量管理系统来发出低电压穿越信号指令。

在可再生能源多能互补技术方面，可再生能源多能互补系统相对于传统发电技术而言，其复杂程度和不确定性都大大增加。在系统规划方面，主要针对可再生能源进行确定性和不确定性分析。确定性分析主要是结合风、光等再生资源情况与负荷需求等历史记录数据进行分析；不确定性分析是基于概率统计理论对可再生能源与负荷的变化特性进行建模，同时考虑自然环境、用户冷热电负荷等因素。在系统综合建模方面，需要针对多能互补的各个子系统的动态特性时间尺度相差悬殊进行研究，例如电力网络功率瞬间平衡，其动态需由微分-代数方程描述；而冷热的转换过程最为缓慢，通常以分、时来表述动态过程。

在优化设计方面，基于牛顿-拉夫逊法的微网潮流算法、电网全寿命周期成本分析、多目标优化策略的混沌量子遗传算法等。以实现能源最佳利用和系统长期经济可靠运行为目标，进行科学合理的系统集成和能量管理。

### • 先进储能技术

截至 2017 年年底，全球已投运储能项目累计装机规模达 175.4 GW，同比增长 4%。其中抽水储能的累计装机规模依旧占据最大比重，为 96%，但较上一年下降 1 个百分点；电化学储能的累计装机规模紧随其后，规模为 2926.6 MW，同比增长 45%，占比 1.7%，较上一年增长 0.5 个百分点。在各类电化学储能技术中，锂离子电池的累计装机占比最大，超过 75%。

2017 年，全球新增投运化学储能项目装机规模为 914.1 MW，同比增长 23%。新增规划、在建

的电化学储能项目装机规模为 3063.7 MW，预计短期内全球电化学储能装机规模还将保持高速增长。

截至 2017 年年底，我国已投运储能项目累计装机规模为 28.9 GW，同比增长 19%。2017 年中国储能市场新增投运储能项目总规模为 121 MW，涉及集中式可再生能源并网、辅助服务、用户侧三个领域。其中在集中式可再生能源并网领域，2017 年储能项目开始在技术示范应用的基础上寻求商业化突破。以青海直流侧光伏储能示范项目、吉林风电场热电混合储能项目为代表。光储领域加快商业化进程，电储能与储热的综合应用成为解决电力系统调峰和可再生能源消纳的新探索方向。新能源快速发展带来的电力系统灵活性和消纳问题，暴露了传统电力运行和调度机制存在的瓶颈，也进一步提高了储能在集中式可再生能源并网领域的应用价值和发展潜力。

目前大规模储能技术中只有抽水储能技术相对成熟，但由于受地理因素制约，其广泛使用受到制约。而其他储能方式还处于实验示范阶段或者初期研究阶段，储能装置的可靠性、使用寿命、制造成本以及应用能力等方面还有待突破。总体来看，我国储能技术研究尚处于发展初步阶段，还不适于在电网全面推广应用，同时还存在着诸如研发体系不健全、经济性收益有待提高、缺乏运行数据支撑等一系列问题。目前储能技术研究的关键技术领域主要分布在以下几个方面。

在储能系统规划方面，主要包括：广域布局的储能系统与常规电源、新能源发电的协同调度方法；百兆瓦级储能系统在新能源发电、输电和配电各环节中的规划布局方法。新型技术与供电商业模式下储能的选型配置方法、分布式储能系统的汇聚效应及在电网中的运行模式和管理策略。储能技术实现市场化应用的政策和制度需求，包括促进储能发展的电价机制、市场准入制度及电力市场机制；研究多种类电力市场交易下储能与其他能源的协调运作机制等。

在储能设备研究方面,主要关键技术方向包括: 针对现有体系下锂离子、铅炭、液流等储能电池的关键材料改性、低成本化制备、能量密度提升和产业化技术;基于离子液体、固态电解质的高安全性电池材料体系和液流电池低成本高可靠膜制备技术。 超级电容器多孔石墨烯电极、高耐压电解质盐和电解液、纤维素隔膜等材料的研制。 空气压缩机和膨胀机技术;高转化效率和低成本的储冷储热和储气技术。 针对下一代储能技术,研究锂硫、锂空气等新型高比能量电池技术;研制高效制氢及氢发电装备,突破低成本、高效率 and 规模化储氢技术;研发大容量高能量密度储热储冷技术装备,突破热相变储能关键材料技术。

在储能系统集成及工程应用方面,主要关键技术包括: 适用于百兆瓦级储能电站集成与控制技术研究及工程示范。 包含储能电池组(BP)、电池管理系统(BMS)、储能变流器(PCS)、中央控制系统(MGCC)和能量管理系统(EMS)的电池储能系统架构;规模化梯次利用电池的重组、集成和热疏导等安全管理技术。 基于新型器件、拓扑及控制方法的储能变流器研制;储能变流器的控制、储能电池管理、以及系统能量监控与调度系统。 储氢系统、相变储能和飞轮储能的系统集成和工程应用技术;海水抽水蓄能和深冷储能系统集成与试验技术等。

物理储能依旧占据主导部分。根据国家“十三五”水电规划,到2020年年底,我国抽水蓄能的累计装机量为40GW。截至2017年年底,抽水蓄能在运规模为28.49GW,在建规模为38.71GW,预计到2020年将完成规模目标。

电化学储能将保持稳定增长。电动汽车等高密度分布式储能系统将使电网形态发生根本改变,随着新能源汽车得到规模化的推广和应用,电池系统的性能和成本逐渐成为影响行业快速发展的主要瓶颈问题。未来电化学储能将围绕高能量密度、低成本、高安全性、长寿命的电池系统作为发展目标。

储能技术与可再生能源系统深度融合。储能技术能够实现可再生能源平滑功率波动、削峰平谷、调频调压,是满足可再生能源大规模接入电网的重要手段。随着智能微电网与能源互联网的发展,市场对灵活性的电力调峰资源和促进可再生能源并网的需求将越发迫切,储能技术在该领域有着广阔的发展前景。

### (3) 重点研究国家/地区和机构以及之间的对比及合作情况分析

根据表1.2.5可知,该研究方向的核心论文产出数量最多的国家是美国、中国、伊朗、印度。其中,美国、中国占据前两位,核心论文比例分别为26.78%和19.51%,印度和伊朗的核心论文比例均超过6%。

由表1.2.6可知,该研究方向的核心论文产出数量最多的机构分别是MIT、Imperial Coll Sci Technol & Med、Univ Malaya、Chinese Acad Sci、Huazhong Univ Sci & Technol,核心论文产出数均超过10篇。

根据图1.2.3可知,较为注重该领域国家或地区间合作的有中国、美国、澳大利亚、英国、德国。中国的发表论文数量较多,主要是与美国、澳大利亚和英国进行合作发表。

根据图1.2.4可知,Imperial Coll Sci Technol & Med和Univ Malaya有合作。

表1.2.7中,施引核心论文数产出最多的国家为中国,施引论文比例为33.96%,美国将近达到20%;印度、英国、伊朗、西班牙、澳大利亚、德国和意大利的施引核心论文比例均超过5%。

表1.2.8中,施引核心论文产出最多的机构是Chinese Acad Sci,比例达到将近25%。Tsinghua Univ和North China Elect Power Univ的施引核心论文比例均超过10%。

通过以上数据分析可知,美国和中国在可再生能源的核心论文产出及施引数量处在世界前列,中国内地机构的施引核心论文数量较多。

表 1.2.5 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

| 序号 | 国家 / 地区   | 核心论文数 | 论文比例   | 被引频次 | 被引频次比例 | 篇均被引频次 |
|----|-----------|-------|--------|------|--------|--------|
| 1  | USA       | 184   | 26.78% | 9997 | 26.99% | 54.33  |
| 2  | China     | 134   | 19.51% | 7261 | 19.60% | 54.19  |
| 3  | Iran      | 46    | 6.70%  | 1908 | 5.15%  | 41.48  |
| 4  | India     | 43    | 6.26%  | 2382 | 6.43%  | 55.40  |
| 5  | Spain     | 40    | 5.82%  | 2172 | 5.86%  | 54.30  |
| 6  | UK        | 39    | 5.68%  | 2289 | 6.18%  | 58.69  |
| 7  | Australia | 39    | 5.68%  | 2158 | 5.83%  | 55.33  |
| 8  | Germany   | 33    | 4.80%  | 1580 | 4.27%  | 47.88  |
| 9  | Canada    | 33    | 4.80%  | 1419 | 3.83%  | 43.00  |
| 10 | Malaysia  | 26    | 3.78%  | 1517 | 4.10%  | 58.35  |

表 1.2.6 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”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 | 被引频次比例 | 篇均被引频次 |
|----|---------------------------------|-------|-------|------|--------|--------|
| 1  | MIT                             | 15    | 2.18% | 713  | 1.92%  | 47.53  |
| 2  | Imperial Coll Sci Technol & Med | 13    | 1.89% | 798  | 2.15%  | 61.38  |
| 3  | Univ Malaya                     | 13    | 1.89% | 643  | 1.74%  | 49.46  |
| 4  | Chinese Acad Sci                | 12    | 1.75% | 633  | 1.71%  | 52.75  |
| 5  | Huazhong Univ Sci & Technol     | 12    | 1.75% | 495  | 1.34%  | 41.25  |
| 6  | Tech Univ Denmark               | 10    | 1.46% | 717  | 1.94%  | 71.70  |
| 7  | Indian Inst Technol             | 9     | 1.31% | 491  | 1.33%  | 54.56  |
| 8  | Univ New S Wales                | 9     | 1.31% | 443  | 1.20%  | 49.22  |
| 9  | King Fahd Univ Petr & Minerals  | 9     | 1.31% | 440  | 1.19%  | 48.89  |
| 10 | Univ Tehran                     | 9     | 1.31% | 368  | 0.99%  | 40.89  |

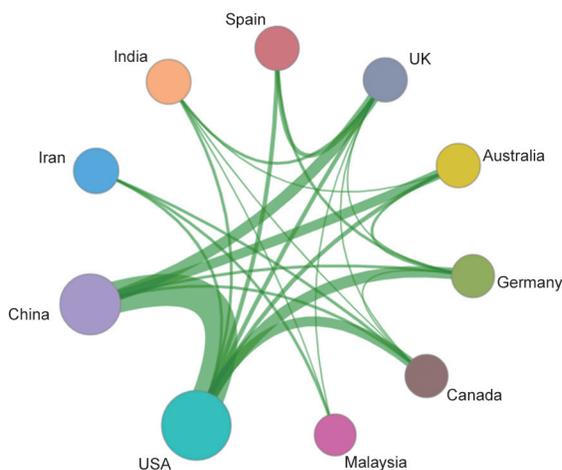


图 1.2.3 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

### 1.2.3 煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料

#### (1) 概念阐述

智能开采始于 20 世纪八九十年代的自动采矿技术 (Automated mining) 和遥控采矿技术 (Telemining /Distance mining), 1992 年芬兰提出智能矿山 (Intellimine) 计划, 煤炭智能开采的概念基本确定。当前我国老油田、非常规、深层、深水等油气勘探开发亟需利用智能化装备与材料, 对油气田生产动态进行智能调控, 以降低开发成本、提高油气产量和采收率。智能开采是指在不需要人

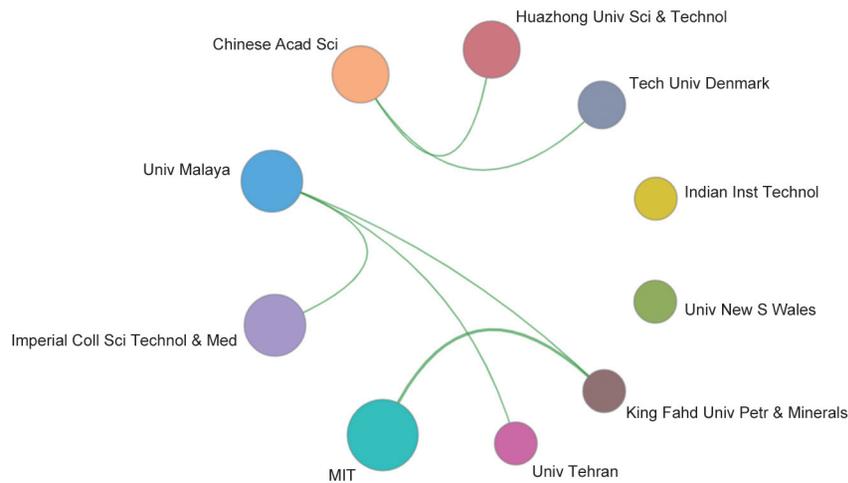


图 1.2.4 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

| 序号 | 国家 / 地区     | 施引核心论文数 | 施引核心论文比例 | 平均施引年  |
|----|-------------|---------|----------|--------|
| 1  | China       | 7544    | 33.96%   | 2016.3 |
| 2  | USA         | 4244    | 19.11%   | 2015.9 |
| 3  | India       | 1920    | 8.64%    | 2016.2 |
| 4  | UK          | 1414    | 6.37%    | 2016.1 |
| 5  | Iran        | 1294    | 5.83%    | 2016.2 |
| 6  | Spain       | 1232    | 5.55%    | 2015.8 |
| 7  | Australia   | 1205    | 5.42%    | 2016.0 |
| 8  | Germany     | 1183    | 5.33%    | 2016.0 |
| 9  | Italy       | 1150    | 5.18%    | 2015.9 |
| 10 | South Korea | 1027    | 4.62%    | 2016.1 |

表 1.2.8 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”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  | Chinese Acad Sci             | 870     | 24.47%   | 2016.1 |
| 2  | Tsinghua Univ                | 417     | 11.73%   | 2016.3 |
| 3  | North China Elect Power Univ | 416     | 11.70%   | 2016.1 |
| 4  | Univ Chinese Acad Sci        | 300     | 8.44%    | 2016.5 |
| 5  | Xi'an JiaoTong Univ          | 299     | 8.41%    | 2016.1 |
| 6  | Nanyang Technol Univ         | 268     | 7.54%    | 2016.1 |
| 7  | Huazhong Univ Sci & Technol  | 259     | 7.29%    | 2016.2 |
| 8  | Shanghai Jiao Tong Univ      | 250     | 7.03%    | 2016.2 |
| 9  | Islamic Azad Univ            | 243     | 6.84%    | 2015.8 |
| 10 | Zhejiang Univ                | 233     | 6.55%    | 2016.1 |

工直接干预的情况下，通过开采环境的智能感知、开采装备的智能调控、开采作业的自主巡航，由开采装备独立完成的回采作业过程。煤炭与油气的智能化开采是在机械化开采、自动化开采的基础上，通过信息化与工业化的深度融合提高生产效率和经济效益的革命性技术。

### （2）各前沿分支工程科学

1) 煤炭智能开采关键工程技术、装备与材料。它是环境感知、智能决策、自动控制三个技术单元的深度整合，涉及工程环境感知、数字矿山、矿山物联网、大数据云计算、装备控制自动化五个分支。工程环境感知是针对井下设备、人员和灾害三个方面的自动探测与传输技术，旨在解决复杂地质条件下采煤作业全过程监控自动化与精细化问题。澳大利亚侧重于以热红外成像为基础的煤层地质结构智能探测；中国聚焦于采煤装备位置与姿态的智能探测。我国智能开采装备水平与国外相当，具有采煤机运行参数、机器故障参数、机器姿态参数等在线感知能力，具有采煤机截割滚筒记忆截割、机载无线收发信号功能，能够构建采煤机远程监控系统。国外主流电液控制液压支架可完成综采工作面设备远程控制和系统故障诊断等功能，国内液压支架电液控制系统可靠性仍与国外技术存在一定差距。目前，我国自主研发的刮板输送机智能化主要体现为软启动控制、刮板链自动张紧和运行工况监测技术。综采工作面智能化集成系统可实现综采工作面采煤机、液压支架、刮板输送机、转载机、破碎机、带式输送机、组合开关、移动变电站等设备的智能化集成控制及协同互锁，在一些煤矿应用之后实现了综采工作面自动化和少人化。装备控制自动化是指在不需要人工直接干预情况下，采掘装备通过预编程序实现自主调控、采掘作业的自主巡航，由采掘装备独立完成的回采作业。澳大利亚重点发展采煤机的记忆割煤与自主导航技术，中国聚焦于井下采掘装备远程遥控技术。

2) 数字矿山与矿山物联网关键工程技术、装备与材料。它是以矿山空间数据与模型为中心，是空间信息技术、网络技术及可视化技术在矿山企业综合应用的集中体现，其基本任务是通过统一时空基准、统一数据标准、统一网络结构和统一集成平台，为矿山生产全过程的可视化、精细化、智能化管控提供数据保障与技术支持。数字矿山未来的主攻方向为：矿山空间数据仓库与数据更新技术、矿山数据挖掘与知识发现技术、真3D实体建模与虚拟采矿技术。矿山物联网由感知层、传输层、分析层和应用层组成，依托覆盖矿山井上井下的高速网络建设矿山传感网，通过多种传感器将矿山环境、设备及人员实时联接起来，对矿山灾害环境、设备健康状况、人员安全态势的实时监测、感知、交流与控制。矿山物联网未来发展的重点为：多网融合传输技术、多参量信息分析处理技术。随着矿山物联网覆盖的范围越来越广，“人、机、物”三元世界在信息空间中交互、融合所产生并在互联网上可获得的数据也越来越大，这些数据的内在价值的提取和利用需要用超大规模、高可扩展的云计算技术来支撑。煤矿大数据云计算技术尚处于起步阶段，需要在统一技术标准、数据建模两方面着力发展。

3) 智能化钻井关键工程技术、装备与材料。智能化钻井通过结合大数据、人工智能等，利用超前探测、闭环调控、精准制导，可有效规避钻井风险，形成高质量井眼，提高钻井速度、钻遇率，降低钻井成本，是保证完井、生产顺利开展的基础。智能化钻井需要基于钻井过程大数据，通过分析实时工况，对钻井破岩参数进行自适应优化，智能调控井眼轨迹。其中智能化钻井关键工程技术主要涉及数据双向高效传输技术、闭环智能调控技术、钻井智能导向技术。钻井过程会产生海量数据，为了确保地面控制系统与井下信息的动态交互，需要利用智能钻杆等装备进行更高效的数据传输。利用对钻井数据的智能分析，通过信号反馈，优化钻井参数，

形成钻井信息闭环调控,显著提高了钻井数据处理效率,具体涉及无人化钻台、智能控压、一体化司钻控制等装备。智能导向是根据地层条件与地面控制指令,控制钻头钻速进行靶点定向钻进,具体涉及智能钻头等装备。为了提高复杂条件下工具性能,碳纤维复合材料、高熵合金、超级钢、纯相多晶金刚石等材料受到国内外广泛关注。同时,仿生钻井液、超分子聚合物钻井液等作为井眼钻进与顺利进行的重要载体在国内外得到了广泛研究。当前,挪威已将高度灵活、可执行多任务无人化钻台应用于现场。贝克休斯首款 TerrAdapt 自适应钻头,通过自动化控制来大幅减小井下故障发生频率。英国北海 Babbage 油田通过智能闭环控制,利用智能钻杆的数据高效传输,使机械钻速提高了近 200%。斯伦贝谢、贝克休斯、威德福、哈里伯顿等相继将智能导向技术用于钻井现场。

4) 智能化完井关键工程技术、装备与材料。智能化完井是借助先进的传感、传输、自动化控制设备,结合大数据、人工智能等,可对油气生产过程进行实时监测与控制,为智能生产的进行提供有力支撑。智能化完井是利用结合大数据、人工智能等,通过自动化装备,进行层间隔离、永久监测、流量控制、出砂控制,为智能化生产提供有效支撑。其中智能化完井关键工程技术主要涉及油井开采入流控制技术、完井参数智能优化技术。当前,一体化完井管理控制系统集井下监测、数据传输、分层流量控制于一体,可以实现油藏信息管理、动态数据共享和流量智能调控,受到国内外广泛关注,具体涉及井下传感器、井下生产控制器、多通道封隔器等装置。当前,贝克休斯 InCharge 完井系统利用电力液压驱动,可控制多达 12 个产层,实现无级节流。斯伦贝谢 Manara 完井系统,可进行数据无线传输、多通道封隔、分层监控。此外,哈里伯顿、中石油等也相继推出了 SmartWell、EIC-Ripened 完井系统。同时,结合纳米材料与完井液的多功能智能化纳米完井

液体系,可对井下复杂情况或事故进行自动识别与处理,已成为未来发展趋势。

5) 智能化生产关键工程技术、装备与材料。智能化生产是基于大数据、尝试学习等对油气田全生命周期的生产进行动态管理与优化。利用研究分支间协同工作,通过资料数据、仪器设备、施工作业等有效整合,进而可实现油气开采智能化。智能化生产利用传感装置采集井下数据,然后传输至地面系统进行智能分析和信号反馈,通过地面与井下装备执行控制指令,对井下工况进行智能管理与优化。其中,智能化生产关键工程技术主要涉及油藏生产动态实时四维解释技术、智能驱替提高油田采收率技术、多元海量数据智能分析利用技术。油气智能化生产主要涉及油田智能监测装备,获取各个环节动态信息,为油气藏实时解释、油气开采智能分析提供支撑。同时,在油气田生产中会产生海量数据,需要利用深度学习与数据挖掘等进行信息的智能分析,对大数据储存、计算装备的性能也提出了更严苛的要求。此外,纳米智能驱油剂由于可以显著提高低渗透油藏的采收率,已得到了国内外高度关注。当前,Anadarko 石油公司基于 Delaware 盆地微生物 DNA 正在构建庞大监测数据库,用于分析油气藏生产动态。油藏机器人可以准确监测复杂条件下温度、压力等信息,已成为国内外研究前沿,阿美石油公司在该领域开展了积极研究。而壳牌公司利用大数据、云计算建立了油田管理系统,初步实现了生产自动调控。为了提高油田采收率,中石油、中石化等在智能精细注水、智能纳米驱油剂提高采收率方面进行了积极探索。加拿大自然资源公司也开展聚合物纳米微球提高采收率先导试验。此外,中国在超级计算机方面发展迅速,已达到国际先进水平,为油气开采中海量数据存储、计算、分析等方面研究奠定了重要基础。

### (3) 发展现状与未来发展趋势

智能化开采未来的发展方向是基于生产过程中的动态信息,依托相关工程技术、装备与材料,对

煤炭及油气开采进行全生命周期实时智能调控。目前，国内外围绕智能化开采的关键领域均进行了大量研究，但仍未实现全过程智能开采，未来需要在以下方面实现重大突破：

1) 工程装备、材料与人工智能的深度融合：通过有效的数据采集、分层智能生产、数据挖掘与智能分析，实现煤炭与油气高效智能开发。利用先进的计算机、光电和导航技术对开采设备和人员进行自动定位，以实现安全监控和精确开采。同时，材料与人工智能的深度融合有助于全方位改善工程装备性能，实现对采场未知区域的自动探查和检测，甚至对井下复杂生产情况或事故进行自动识别与处理。

2) 数据智能采集 – 高效传输 – 智能分析 – 智能调控一体化技术：基于采集的多元海量数据，通过智能分析，确定生产实时动态，利用智能调控开采过程，实现数据采集、传输、分析、调控各个环节协同工作。

#### (4) 国家 / 地区和机构以及之间的对比及合作情况

根据表 1.2.9 可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的国家是中国、印度、加拿大、澳大利亚和英国。其中，中国核心论文比例超过 50%，其他国家核心论文比例均低于 10%。由表 1.2.10 可

知，该研究方向的核心论文产出数量最多的机构分别是 Xi'an Univ Sci & Technol, Luohe Med Coll 以及 China Univ Min & Technol Beijing。其中，Xi'an Univ Sci & Technol 和 Luohe Med Coll 的核心论文产出比例超过 5%。

根据图 1.2.5 可知，较为注重该领域国家或地区间合作的有中国、澳大利亚、美国、英国和意大利。其中中国与澳大利亚、美国、英国这三个国家均具有合作关系，合作国家数最多，合作发表的核心论文数量也最多。而印度、加拿大的论文数尽管较多，但没有与其他国家或地区进行过合作。

根据图 1.2.6 可知，与其他机构具有合作关系的机构有 Luohe Med Coll, Chinese Acad Sci, Henan Qual Engr Vocat Coll, Henan Polytech Inst 和 CSIRO，其中 Luohe Med Coll 分别与 Henan Qual Engr Vocat Coll, Henan Polytech Inst 这两个机构之间彼此具有合作关系，合作发表核心论文数量也较多。中国西安的 Xi'an Univ Sci & Technol 是发表核心论文数量最多的机构，但没有与其他机构开展过合作研究。

根据表 1.2.11 可知，该研究方向的施引核心论文产出数量最多的国家是中国、澳大利亚、美国、英国和印度。其中，中国施引核心论文比例超过 50%，其他国家只有澳大利亚施引核心论文比

表 1.2.9 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

| 序号 | 国家 / 地区   | 核心论文数 | 论文比例   | 被引频次 | 被引频次比例 | 篇均被引频次 |
|----|-----------|-------|--------|------|--------|--------|
| 1  | China     | 43    | 57.33% | 75   | 51.37% | 1.74   |
| 2  | India     | 6     | 8.00%  | 5    | 3.42%  | 0.83   |
| 3  | Canada    | 5     | 6.67%  | 9    | 6.16%  | 1.80   |
| 4  | Australia | 3     | 4.00%  | 24   | 16.44% | 8.00   |
| 5  | UK        | 3     | 4.00%  | 9    | 6.16%  | 3.00   |
| 6  | USA       | 3     | 4.00%  | 8    | 5.48%  | 2.67   |
| 7  | Romania   | 2     | 2.67%  | 11   | 7.53%  | 5.50   |
| 8  | Iran      | 2     | 2.67%  | 2    | 1.37%  | 1.00   |
| 9  | Italy     | 2     | 2.67%  | 2    | 1.37%  | 1.00   |
| 10 | Thailand  | 2     | 2.67%  | 1    | 0.68%  | 0.50   |

表 1.2.10 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”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 | 被引频次比例 | 篇均被引频次 |
|----|----------------------------------|-------|-------|------|--------|--------|
| 1  | Xi'an Univ Sci & Technol         | 6     | 8.00% | 0    | 0.00%  | 0.00   |
| 2  | Luohe Med Coll                   | 4     | 5.33% | 0    | 0.00%  | 0.00   |
| 3  | China Univ Min & Technol Beijing | 3     | 4.00% | 3    | 2.05%  | 1.00   |
| 4  | Henan Qual Engr Vocat Coll       | 3     | 4.00% | 0    | 0.00%  | 0.00   |
| 5  | Chinese Acad Sci                 | 2     | 2.67% | 27   | 18.49% | 13.50  |
| 6  | Shiraz Univ                      | 2     | 2.67% | 2    | 1.37%  | 1.00   |
| 7  | Henan Polytech Inst              | 2     | 2.67% | 0    | 0.00%  | 0.00   |
| 8  | Univ Alberta                     | 2     | 2.67% | 0    | 0.00%  | 0.00   |
| 9  | Shandong Univ Sci & Technol      | 1     | 1.33% | 35   | 23.97% | 35.00  |
| 10 | CSIRO                            | 1     | 1.33% | 24   | 16.44% | 24.00  |

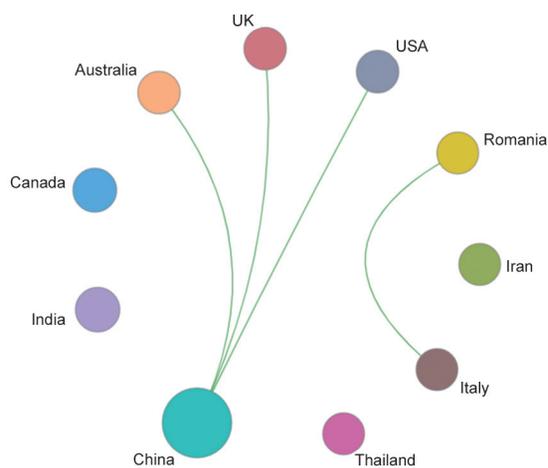


图 1.2.5 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

例高于 10%。由表 1.2.12 可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的机构分别是 China Univ Min & Technol、Chinese Acad Sci 以及 Shandong Univ Sci & Technol。其中，China Univ Min & Technol 和 Chinese Acad Sci 的施引核心论文产出比例均超过 20%。

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top14 工程开发前沿发展态势

能源与矿业工程领域研判的 Top14 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

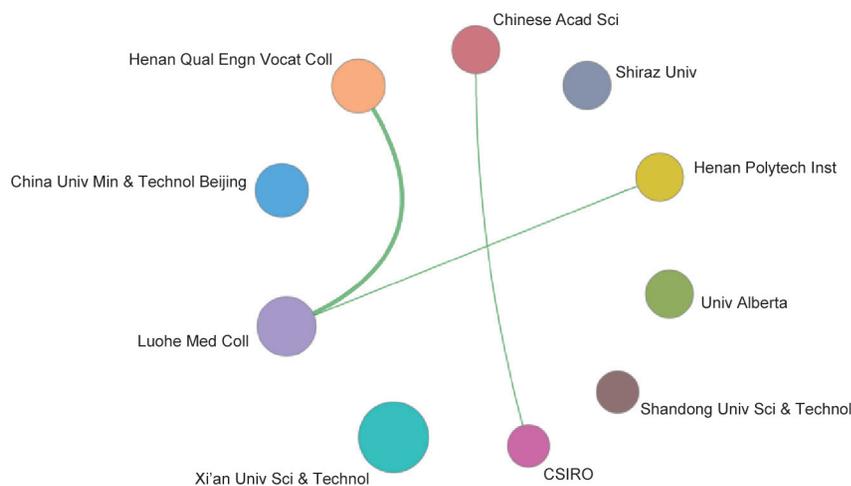


图 1.2.6 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

| 序号 | 国家 / 地区         | 施引核心论文数 | 施引核心论文比例 | 平均施引年  |
|----|-----------------|---------|----------|--------|
| 1  | China           | 78      | 53.06%   | 2017.0 |
| 2  | Australia       | 15      | 10.20%   | 2016.5 |
| 3  | USA             | 11      | 7.48%    | 2016.4 |
| 4  | UK              | 10      | 6.80%    | 2017.3 |
| 5  | India           | 10      | 6.80%    | 2016.7 |
| 6  | South Korea     | 6       | 4.08%    | 2017.3 |
| 7  | Italy           | 5       | 3.40%    | 2014.8 |
| 8  | Malaysia        | 4       | 2.72%    | 2016.0 |
| 9  | Japan           | 4       | 2.72%    | 2016.3 |
| 10 | Taiwan of China | 4       | 2.72%    | 2017.3 |

表 1.2.12 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”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  | China Univ Min & Technol     | 24      | 32.88%   | 2017.8 |
| 2  | Chinese Acad Sci             | 17      | 23.29%   | 2015.7 |
| 3  | Shandong Univ Sci & Technol  | 10      | 13.70%   | 2017.9 |
| 4  | CSIRO                        | 5       | 6.85%    | 2016.8 |
| 5  | Newcastle Univ               | 5       | 6.85%    | 2017.0 |
| 6  | China Univ Geosci            | 3       | 4.11%    | 2016.3 |
| 7  | Univ Sydney                  | 3       | 4.11%    | 2016.7 |
| 8  | New Jersey Inst Technol      | 2       | 2.74%    | 2017.0 |
| 9  | Univ Malaya                  | 2       | 2.74%    | 2015.5 |
| 10 | Petru Maior Univ Tirgu Mures | 2       | 2.74%    | 2016.5 |

与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程和矿业科学技术与工程 4 个学科。其中 5 个工程开发前沿基于科睿唯安共被引聚类分析获得，分别为“能源与电力系统中的先进储能技术”“无线电力传输及其相关设备的研究及应用”“可再生能源发电系统的运行与控制”“石油工程新工具新材料”“非常规油气藏储层测井识别”，其余是专家提名前沿。

其中新兴前沿包括“无线电力传输及其相关设备的研究及应用”“绿色采矿技术（煤、油、气、矿）”“矿业安全智能精准开采技术与装备”，传

统深入研究包括“化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备”“乏燃料后处理及核设施仪器仪表”“可再生能源发电系统的运行与控制”“先进反应堆技术及设备研发”“石油工程新工具新材料”“非常规油气藏储层测井识别”“三维地质建模技术”，颠覆性技术包括“先进核燃料技术研发”，融合交叉学科前沿包括“电力系统高压大功率电力电子器件及装备”“能源与电力系统中的先进储能技术”“矿产和地热宽谱段遥感勘查”。各个工程开发前沿所涉及的核心专利在 2012 年至 2017 年的逐年发表情况见表 2.1.2。

### (1) 化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备

煤炭开发利用系统与核心技术包括采掘两方面，其中煤矿综采自动化智能化无人化成套技术与

装备一般可泛指在综采成套装备中应用自动化和智能化控制技术，实现不同程度的工作面少人化或无人化开采作业。发展综采自动化和智能化技术，最终实现煤矿工作面无人化开采是煤炭开采技术的发

表 2.1.1 能源与矿业工程领域 Top14 工程开发前沿

| 序号 | 工程开发前沿                      | 公开量    | 引用量     | 平均被引数 | 平均公开年   |
|----|-----------------------------|--------|---------|-------|---------|
| 1  | 化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备 | 7570   | 19 467  | 2.57  | 2014.51 |
| 2  | 电力系统高压大功率电力电子器件及装备          | 30 142 | 93 793  | 3.11  | 2014.02 |
| 3  | 乏燃料后处理及核设施仪器仪表              | 6868   | 6162    | 0.90  | 2014.97 |
| 4  | 能源与电力系统中的先进储能技术             | 34 878 | 112 316 | 3.22  | 2014.26 |
| 5  | 无线电力传输及其相关设备的研究及应用          | 1700   | 32 763  | 19.27 | 2014.47 |
| 6  | 可再生能源发电系统的运行与控制             | 23 387 | 55 280  | 2.36  | 2014.56 |
| 7  | 先进反应堆技术及设备研发                | 1147   | 6231    | 5.43  | 2013.65 |
| 8  | 矿产和地热宽谱段遥感勘查                | 5821   | 19 950  | 3.43  | 2014.4  |
| 9  | 石油工程新工具新材料                  | 10 890 | 52 436  | 4.82  | 2013.77 |
| 10 | 绿色采矿技术（煤、油、气、矿）             | 400    | 1080    | 2.70  | 2014.3  |
| 11 | 非常规油气藏储层测井识别                | 4766   | 17 227  | 3.61  | 2014.51 |
| 12 | 三维地质建模技术                    | 3072   | 5108    | 1.66  | 2016.51 |
| 13 | 先进核燃料技术研发                   | 46 462 | 244 048 | 5.25  | 2013.69 |
| 14 | 矿业安全智能精准开采技术与装备             | 3932   | 5379    | 1.37  | 2014.83 |

表 2.1.2 能源与矿业工程领域 Top14 工程开发前沿核心专利逐年公开量

| 序号 | 工程开发前沿                      | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 |
|----|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备 | 599    | 747    | 848    | 1819   | 1796   | 1116   |
| 2  | 电力系统高压大功率电力电子器件及装备          | 3203   | 4236   | 4377   | 4812   | 4750   | 5115   |
| 3  | 乏燃料后处理及核设施仪器仪表              | 620    | 841    | 938    | 1145   | 1556   | 1651   |
| 4  | 能源与电力系统中的先进储能技术             | 4039   | 4882   | 5309   | 5355   | 5627   | 6614   |
| 5  | 无线电力传输及其相关设备的研究及应用          | 140    | 192    | 234    | 255    | 312    | 392    |
| 6  | 可再生能源发电系统的运行与控制             | 2468   | 3501   | 3656   | 4064   | 4251   | 4394   |
| 7  | 先进反应堆技术及设备研发                | 127    | 102    | 144    | 161    | 160    | 232    |
| 8  | 矿产和地热宽谱段遥感勘查                | 492    | 811    | 831    | 804    | 1006   | 1308   |
| 9  | 石油工程新工具新材料                  | 1077   | 1246   | 1473   | 1608   | 1719   | 1890   |
| 10 | 绿色采矿技术（煤、油、气、矿）             | 34     | 46     | 48     | 56     | 80     | 86     |
| 11 | 非常规油气藏储层测井识别                | 273    | 590    | 608    | 713    | 669    | 880    |
| 12 | 三维地质建模技术                    | 15     | 44     | 157    | 259    | 622    | 1151   |
| 13 | 先进核燃料技术研发                   | 5150   | 5667   | 6509   | 6113   | 6723   | 8068   |
| 14 | 矿业安全智能精准开采技术与装备             | 336    | 528    | 553    | 762    | 907    | 747    |

展方向。主要技术方向包括：研发液压支架围岩耦合自适应控制技术，研发基于智能决策、时序控制、记忆放煤和人工干预协同控制的自动化放顶煤控制系统，研发可靠、实时、安全的工作面多机协同控制系统，研究工作面端头与超前支护系统自动化等。煤巷智能快速掘进技术与装备是指采用具有感知能力、记忆能力、学习能力和决策能力的掘锚机、锚杆机、破碎转载机、带式输送机煤巷掘进装备，以自动化控制系统为枢纽，以远程可视监控为手段，实现掘进工作面巷道掘进系统“全断面快速掘进、掘支运平行作业”的安全协调高效掘进技术。智能快速掘进技术创造了掘进、支护、运输“三位一体”的快速掘进新类型，实现了设备的集中协同控制，为下一步掘进工作面无人化奠定了基础。主要技术方向及关键技术包括：智能截割技术、智能锚护技术、输送带多点驱动功率平衡技术和张紧力自动控制技术、辅助工序自动化技术、物联网集成技术、系统的适应性研究等。煤巷智能快速掘进技术的发展趋势是由掘支运“三位一体”向掘支运辅“四位一体”方向发展。此外，下一步需要研究构建掘进机大数据库和云计算中心，这一平台将有效解决掘进机的智能控制和远程服务问题，“无人值守、智能掘进”将变成现实。

我国非常规油气资源储量丰富，是重要的战略接替资源。但由于非常规油气储层具有低孔、低渗、较大渗流阻力和低采收率的特点，通过传统手段难以实现非常规油气的经济高效开发。亟需通过长水平井技术、大规模体积压裂改造技术和高效“井工厂”技术的工程系统与核心技术装备的创新，提高非常规油气的产量和采收率，降低其开发成本，进而实现我国非常规油气领域的重大突破，为保障我国能源战略安全贡献力量。长水平井技术是扩大非常规油气储层泄流面积，提高井眼控制体积，并进行分段压裂改造的有效方法，它可以显著提高单井产量和采收率。长水平井钻完井的关键技术包括：旋转导向钻井技术、

高效钻井液技术和井筒完整性控制。体积压裂通过压裂的方式对储层实施改造，在形成一条或者多条主裂缝的同时，通过分段多簇射孔、高排量、大液量、低黏液体、以及转向材料及技术，使天然裂缝与人工裂缝相互交错，从而增加改造体积，提高初始产量和最终采收率。“工厂化”钻井利用自动化钻机，通过将各项钻井作业标准化和专业化，采用流水线式的“工厂化”生产模式批量完成钻井作业，提高设备、人员和组织施工效率，从而缩短整体钻井时间，降低了综合开发成本。因此长水平井技术、体积压裂和“井工厂”钻井可显著提高非常规油气的产量和采收率，降低作业成本，已成为国内外竞相研发的前沿。

### （2）电力系统高压大功率电力电子器件及装备

高压大功率电力电子器件及装备是电力系统中实现电能传输、分配和变换的基础和核心，尤其是特高压交直流输电和智能电网技术的核心，其包含高压大容量或高频电力电子器件，基于电力电子器件的柔性交流输电系统（FACTS），静止同步补偿器（STATCOM），静止无功补偿装置（SVC），电力电子变压器（PET）和能源路由器装备等。随着国家能源结构调整与迅速增长的能源需求，电力系统高压大功率电力电子器件及装备领域在向大功率、高频化和智能化方向发展。高压大容量电力电子器件的研发，尤其是大容量晶闸管、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）和集成门极换流晶闸管（IGCT），是实现我国发展更经济的远距离大容量特高压交直流输电，实现长距离大容量的西电东送、南北互供以及全国联网的核心技术之一，高压大容量电力电子器件的可靠性、模块内芯片的并联均流、高压模块封装的热阻以及驱动保护等技术是其主要技术研究方向。基于碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）材料的新型高压高频电力电子器件，能满足智能电网和新能源技术高效、高功率密度和更多新功能的发展需求，其主要技术方向包括高质量 SiC 厚外延和硅衬底 GaN 外延技术、栅氧可靠性和电流崩塌

问题、器件高压终端保护技术和智能驱动技术等。高压交直流输电容量的大幅提升需要依靠高性能大容量电力电子装备来实现，智能化、信息化的大容量电力电子装备与智能电网的结合将更加紧密。

### (3) 乏燃料后处理及核设施仪器仪表

乏燃料后处理是指对从反应堆卸出后的核燃料（称为“乏燃料”）的处理和处置过程。包括乏燃料的中间贮存、乏燃料的后处理和放射性废物的处理、最终处置等过程。乏燃料后处理是核燃料循环后段的核心，是对核电站卸出的乏燃料元件进行处理、分离和回收未烧尽的铀和新生成的钚，同时对放射性废物进行处理，满足处置要求。后处理技术按照乏燃料在主工艺中被处理时的存在状态而分为湿法（亦称“水法”）和干法两种。水法萃取流程是目前唯一经济实用的后处理流程，常用的普雷克斯流程（PUREX）就是将反应堆乏燃料元件经过适当的预处理转化为硝酸水溶液，然后采用有机溶剂（常用磷酸三丁酯的煤油溶液）进行萃取分离，以达到回收核燃料和除去裂变产物的目的。而干法后处理对于处理高燃耗乏燃料，特别是快堆乏燃料具有一定的优势，是当前一个重要的研究方向。

为保障核电运行全寿期的安全高效运营，加强核电关键系统和设备的自动运行监控，提高系统、设备的可靠性；同时提高核电站运行的可利用率，提高经济性；实现对人不可达区域进行机器人维修，减少工作人员的受照剂量；最终为严重事故处理及退役创造技术条件。包括数字化技术、人工智能及核测仪表，其他涉及核安全的关键仪表技术。

### (4) 能源与电力系统中的先进储能技术

在能源的生产和消费链中，任何阶段都可以实施能量的储存技术。储能技术对新型能源和现代电力系统而言尤为重要。因为在大型电力系统中，一直存在着能源生产和需求在空间和时间上的错配问题，可再生能源都有间歇性和波动性，智能电网更是需要通过先进储能技术，实现能源的高效清洁利用。

一般而言，只要能满足能源与电力系统中对功率和能量的需求，目前已有的和正在开发的储能技术都能应用于该系统中，具体包括电化学储能技术，如各种传统和新型二次化学电池，液流电池等；化学储能技术，如氢气的存储技术；热化学的储能技术，如氨气的分解和复合反应，甲烷的分解和复合反应等；储热技术，如显热和潜热利用技术；动能储能技术，如飞轮储能；势能储热技术，如抽水电站，压缩空气储能；电磁的储存技术，如超导磁能储存以及超级电容器等。

优化选择一种或多种储能技术应用于能源与电力系统中，必须同时考虑技术和经济两方面的问题，比如投资成本，运行成本，能量或功率密度，循环次数以及对环境的影响因素等。

### (5) 无线电力传输及其相关设备的研究及应用

无线电力传输是运用近场谐振耦合、电磁波或超声波等技术，实现电能由发射端到接收端无线传输的技术。其中，近场感性谐振耦合技术被广泛用于研制统一的可携带电子设备无线充电平台、电动汽车静态无线充电装置、电动汽车动态无线充电系统、工业机器人无线充电装置、植入式电子设备无线充电装置、电网监控设备或巡线无人机的无线充电装置、无人潜艇的海底无线充电系统等设备。基于微波或激光无线电力传输技术的空间太阳能电站是未来重要的可再生能源发电方式。大功率远场无线电力传输技术、大功率高频电力电子技术、大功率高频电力器件技术、最高效率跟踪技术、动态控制技术、多场耦合分析、电磁超材料等成为研究前沿。未来无线电力传输技术将向远距离、高功率、高效率、高安全性、微型化等方向发展，在交通电气化、航空航天、植入式电子医疗设备、水下探测、智能家居等应用领域发挥重要的作用。

### (6) 可再生能源发电系统的运行与控制

可再生能源发电系统的运行与控制技术是运用先进电力电子技术、控制理论与信息通信技术，

实现风电、光伏等可再生能源发电系统在不同容量等级与并网方式下安全、高效、灵活运行的综合技术体系。

可再生能源发电系统可采取集中式与分布式两种运行方式。集中式可再生能源发电，通过构建新能源基地和场站集群，可实现可再生能源的规模化开发、集中式并网与远距离外送，有效解决我国可再生能源分布与负荷中心不匹配的问题，适应我国电网未来发展建设格局；但面临故障穿越、并网稳定性、灵活运行控制、高效外送消纳与电网预测调度等突出技术挑战。分布式可再生能源发电，利用分布式发电单元、逆变器或直流变换器等装置，实现可再生能源的分布式转换接入与本地化消纳利用，具有经济、高效、灵活、可靠的特点；但同时存在与配电系统协调控制、故障定位保护、系统稳定性等技术难点。

因地制宜，采取不同开发规模与并网形式，实现各类可再生能源规模化开发与高效率消纳利用，同时有效克服其波动性、间歇性、随机性对电力系统安全稳定运行的负面影响，实现一次能源结构升级，构建清洁低碳、安全高效的电力能源系统，是相关领域研究的主要目标与技术方向。

当前前沿技术包括：可再生能源发电基地直流外送系统的稳定控制技术；分布式发电与微电网、主动配电网等电力系统新形态的融合技术；高比例分布式发电直流并网消纳技术；多种可再生能源发电系统联合优化调度与智能控制；面向安全稳定并网的可再生能源发电系统内电力电子设备集群协调运行控制技术。

### （7）先进反应堆技术及设备研发

针对先进反应堆技术及设备研发发展，国际“第四代核能国际论坛”于2002年提出了第四代核电的6种研究开发的堆型（包括各自的燃料循环）和研究开发“路线图”；国际“全球核能合作伙伴”致力于推动安全、可持续发展、经济和防止核扩散的先进核能技术联合研发；国际原子能机构发起国

际项目致力于发展可持续的革新核能系统。第四代核电站开发的目标：具有固有安全性，充分利用核资源，提高热效率，开发核能制氢、冶金、化工等多种用途，处置核废料，防止核扩散、反恐。目前国际上遴选出了6种最具前景的反应堆系统，分别是钠冷快堆（SFR）、超高温反应堆（VHTR）、气冷快堆（GFR）、铅冷或铅-铋共熔物冷却的快堆（LFR）、熔盐堆（MSR）和超临界水堆（SCWR）。第四代堆选择快谱反应堆是因为其具备核燃料增殖的能力，钠冷快堆、铅冷快堆、气冷快堆和熔盐堆都具备这方面的能力，明显提高铀资源的利用率；并能够嬗变以实现废物最小化。而超高温气冷堆的作用是能够实现高温制氢、提高核电厂的发电效率，同时其高温热可以在工业领域进一步拓展核能的应用。美国针对本国核能特点推出行波堆，中美开展合作共同开发。行波堆是快中子堆的一种特殊设计，利用高性能燃料和材料技术，通过长寿命和深燃耗使占天然铀中绝大部分的 $^{238}\text{U}$ 在堆内实现原位增殖和焚烧，降低对乏燃料后处理需求。

### （8）矿产和地热宽谱段遥感勘查

矿产和地热宽谱段遥感勘查主要与国家需求相关。随着资源勘查程度的增加，寻找新矿难度也在逐步增加，迫切需要新的技术手段。从过去几十年来的发展来看，遥感逐步发展成为资源勘查评价方法的常用的技术手段，世界各国争先发射各种勘查卫星，包括可见光-短波红外、热红外、微波等宽谱段。目前来说，虽然干旱区-半干旱区和浅覆盖区的遥感资源勘查方法相对成熟且已经具有很大成效，但是，其一，世界范围内陆地绝大部分被植被所覆盖，给目前勘查技术手段带来很大困难，而遥感作为一种新技术需要突破植被覆盖区找矿，可以利用植被抑制和光谱层析剥离技术来实现；其二，备受国际社会追捧的清洁能源——地热可供使用的大部分被第四系所覆盖，热红外识别温度场和微波识别构造一定程度上揭示了隐伏区下的深部信息，所采用的技术需要增

强和提取有用信息并且抑制和减弱干扰信息，从而有效地指导勘查，提供资源预测的准确性和有效性。总之，矿产和地热宽谱段遥感勘查，其技术本质就是通过较宽电磁波谱段范围内的各类不同作用的遥感数据，有效地增强和提取与矿产和地热资源勘查有关的信息，抑制和减弱干扰信息，最终目的是指导勘查，满足资源勘查开发中有效靶区选取的生产需求，实现资源找矿突破。

### （9）石油工程新工具新材料

随着油气藏勘探开发的复杂程度日益加深，为应对井下高温高压等复杂工况，迫切需要研制石油工程新工具新材料，以实现井眼顺利钻进与油气高效开采，推动复杂油气藏勘探开发进程。其中石油工程新工具主要涉及钻井、完井、生产等方面，新材料则用于提高石油工具、钻井液、压裂液、支撑剂等的性能。

目前，世界油气勘探开发领域由浅层向深层，由浅海向深水，由常规向非常规进一步拓展，日趋复杂的地质环境为石油工程提出更高、更新的要求，在国家创新驱动发展战略与中国制造 2025 战略的引领下，为了提升油气勘探开发规模和效益，开展石油工程中工具材料创新研究是必然趋势。当前，石油工程新工具的研究前沿包括：智能导向工具，旋转导向工具、智能同井注采工具、智能分层注水工具等。而前沿材料有：纳米颗粒材料、功能梯度材料、碳纤维复合材料等，可以用于显著改善工具性能。此外纳米减阻剂、纳米智能驱油剂、自愈性聚合物材料等在提高钻井液、压裂液与支撑剂等性能方面起到了重要的推动作用。

### （10）绿色采矿技术（煤、油、气、矿）

绿色开采就是使开采对矿区环境的扰动量小于区域环境容量，实现资源开发利用最优化和生态环境影响最小化，在开采过程中既要严格实施科学有序的开采，又要对矿区及周边环境的扰动控制在环境可控制的范围内。煤、油、气、矿绿色开采技术，是从开采的角度认识和对待煤、油、气、矿、瓦斯、

水、土地、矸石等一切可以利用的能源资源，防止或尽可能减轻开采能源资源对环境和其他资源的不良影响，在取得经济效益的同时实现最佳的环境效益和社会效益。

煤炭资源绿色开采是针对煤炭大量开采造成的环境问题提出的，仍然是资源环境领域科学研究的重点，应从采煤方法的源头进行技术开发与创新，加强伴生资源共同开采和利用技术研究，加强技术和装备的研究。研究内容包括保水开采技术、土地与建筑物保护与生态重建技术、煤与瓦斯协调开采技术、减沉开采、矸石减排、瓦斯浓缩利用技术、固体废弃物利用技术、矿产资源清洁开发与加工技术、矿区废弃地生态修复技术、矿产开发效益效果评价、矿区资源环境安全与监测预警等。金属非金属矿山绿色开采的重点是采选一体化技术、无废开采技术，突破机械连续切割掘进、采矿技术，创新高压水射流、激光和等离子破岩掘进与采矿技术。

绿色油田开采是一个系统整体的概念，它以追求环境效益、社会效益、经济效益为目标，可持续发展为模式。通过现代技术科技的生态化研究开发生态产品，形成清洁采油甚至无废物污染生产技术系统，并使其转化为可在市场上销售的环保产品，改变以往采油企业高能耗、高污染的高消耗发展模式，建立起生态经济一体化的可持续发展模式。其技术创新主要包括提高注水水质处理技术、注入水精细过滤技术，创新生产流程中的关键设备，提高资源的利用率；创新生产流程控制系统，提高生产效率。

### （11）非常规油气藏储层测井识别

非常规油气藏是指用传统技术无法获得自然产能、需用新技术改善储层渗透率或流体黏度等才能经济开采的油气藏，常规测井方法在非常规油气藏中适用性很差，需要进行测井解释模型的重新探索，利用新型测井技术，形成非常规油气藏储层测井识别技术。目前主要技术包括：ECS 测井（元素能谱测井仪）、成像测井、核磁共振测井等特殊测井技术，以及测井曲线重叠图像快速识别、自然伽马和三孔

隙度测井识别,电磁电阻率和电阻率-流体性质法,页岩油气有效裂缝层段检测技术等,这些技术具有高识别精度和速度,通过确定有效储层和非储层连续识别深度范围,提高非常规油气藏有效储集层预测准确性,满足非常规油气藏有效储层勘探开发中压裂有效层段的生产需求。未来非常规储层测井识别仍是难点和前沿,将会在采集技术、岩石物理研究、处理与解释方法研究以及储层评价等系列技术方面提升优化,预计未来数字岩石物理技术将在测井评价与分析方面发挥更重要的作用,此外测井解释评价软件向多学科一体化方向发展,更重视油气藏综合评价,测井基础理论方法研究力度加大,分析技术与手段更为丰富。

### (12) 三维地质建模技术

三维地质建模技术是运用计算机技术,在虚拟三维环境下,将空间信息管理、地质解译、空间分析与预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来,并用于地质分析的技术。数据源包括钻孔数据、剖面数据、三维地震资料和其他地质数据等。建模方法包括相控地质建模、沉积微相约束的岩相建模和孔、渗、饱等参数建模。克里金方法、随机建模方法、序贯高斯模拟方法、双模迭代技术、沉积相耦合岩石物理类型建模、井震协同建模技术、三维储层参数建模、四维地震技术等成为研究前沿。未来三维地震建模软件将更加成熟,应用更为广泛;由早期的注重形态建模向形态与物性并重的方向发展;与地震、测井、电法、重、磁等物探数据和钻井、地质认识等资料结合更加紧密;与各种专业模型(矿藏描述、成藏模拟、重磁场三维反演、沉积环境分析等)与应用结合更加紧密,大数据分析、云计算、物联网等IT主流技术将成为主要手段。

### (13) 先进核燃料技术研发

在2011年日本福岛核事故发生之后,各国开始加速以耐事故燃料(简称ATF)为代表的先进核

燃料的研发工作。相比传统燃料,ATF燃料通过增强燃料包容裂变产物和包壳材料抗氧化的能力来提高反应堆和乏燃料水池在事故情况下的安全性,提供更长的事故应对时间,并因此潜在的通过主动或被动方式缓解事故后果,实现更深的燃耗,并提高燃料的经济性。ATF可以在新建和在役核电站应用,因此ATF燃料的研发对于核电的安全发展具有重大意义。研发方向均着眼于包括革新的包壳和新型燃料,可分为三个方向:提高锆合金包壳的高温抗氧化能力及强度;具有高强度和抗氧化能力的非锆合金;比 $UO_2$ 具有更好性能和裂变产物滞留能力的新型燃料。扩展的ATF还应包括几何形状的变化,如环形燃料。研究包括材料、工艺和检测、验证技术。

### (14) 矿业安全智能精准开采技术与装备

矿业安全智能精准开采技术与装备是指基于透明空间地球物理和多物理场耦合,以智能感知、智能控制、物联网、大数据、云计算等作支撑,具有风险判识、监控预警等处置功能,能够实现时空上准确安全可靠的智能少人(无人)安全精准开采的新模式新方法新装备。目前主要研究方向:创新具有透视功能的地球物理科学,智能新型感知与多网融合传输方法与技术装备,动态复杂多场多参量信息挖掘分析与融合处理技术,基于大数据云技术的精准开采理论模型,多场耦合复合灾害预警,远程可控的少人(无人)精准开采技术与装备,救灾通信、人员定位及灾情侦测技术与装备和基于云技术的智能矿山建设,这些研究方向为实现“互联网+”科学开采的未来少人(无人)采矿提出了技术路径。聚焦矿业智能少人(无人)安全开采,进一步加大矿业科技创新力度,力争2020年矿业安全智能精准开采取得阶段性突破,2035年基本实现矿业安全智能精准开采,到2050年全面实现矿业精准开采,以矿业开采全面实现高科技产业改造升级,助推中国能源科技强国梦。

## 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备

#### （1）煤矿综采自动化、智能化、无人化成套技术与装备

煤矿综合机械化长壁开采是煤炭的主要开采方式，综采成套装备的技术进步是促进煤炭安全、高效、绿色开采技术发展的引擎。现代自动化、信息化、智能化技术及先进制造技术与煤炭开采技术的深度融合，使煤矿综采成套装备实现自动化、智能化、无人化成为可能。煤矿井下工作条件恶劣，安全隐患和危害职业健康的因素多，加强煤矿智能化开采装备技术的研究和应用，淘汰落后的开采方法和装备，引导煤矿向安全、高效、绿色开采方向发展，提升装备的自动化和智能化水平，逐步实现少人化、无人化开采是煤炭综采技术发展趋势和矿井现代化生产的必然要求。

为更好地反映和表述综采工作面的自动化技术内涵和水平，依据综采工作面成套装备控制系统在感知、决策和执行三要素方面的水平，定义为自动化综采工作面、智能化综采工作面、无人化综采工作面。自动化综采工作面，是指综采工作面采用了具有自动化控制功能的液压支架、采煤机、刮板输送机等机电一体化成套装备，实现了工作面少人操作、安全高效开采。智能化综采工作面，是指综采工作面采用了具有充分全面的感知、自学习和决策、自动执行功能的液压支架、采煤机、刮板输送机等机电一体化成套装备，实现了工作面的高度自动化少人远程监控、安全高效开采。无人化综采工作面，是指综采工作面采用了具有完全自动化、智能化控制功能、高可靠性的液压支架、采煤机、刮板输送机等机电一体化成套装备和远程智能化综合控制系统，实现了工作面（两端头以内）完全无人操作的安全高效开采。

综采自动化和智能化是实现工作面无人化开采的基础，无人化开采是煤矿开采技术发展的终极目标。主要技术主流及拟解决的关键技术包括：

1) 基于液压支架与围岩耦合原理，研发液压支架围岩耦合自适应控制技术；基于排队理论，研究综采工作面群组支护系统协同控制技术；研发智能型液压支架姿态工况监测预警与耦合控制装置，研发高可靠性液压支架智能感知和控制元件；研发基于智能决策、时序控制、记忆放煤和人工干预协同控制的自动化放顶煤控制系统。

2) 研究煤岩性状对截割负载及调控的敏感性，建立煤岩截割负载突变的在线检测及截割状态判别准则，提出截割转速与进给速度相结合的自适应截割自主控制方法，研发采煤机自主精确定位和自主学习、智能调高、记忆截割的智能化控制技术，研究综采工作面采煤机截割—液压支架支护—运载集成系统的多源信息融合方法，解决多机协同作业的冲突消解与避让算法和技术，研发可靠、实时、安全的工作面多机协同控制系统。

3) 研究综采装备关键元部件失效模式与故障机理，构建装备关键部件及系统可靠性评价体系，完善可靠性设计，攻克关键元部件材料和制造工艺，切实解决综采装备的可靠性问题，特别是提高采煤机的可靠性，提高工作面综合开机率，为工作面自动化、智能化和无人化提供可靠保障。

4) 加强工作面端头与超前支护系统自动化的研究，解决工作面端头与超前支护的制约。同时，要进一步研究突破工作面两端过渡段斜切进刀工艺自动化和智能化难题。

开发和推广应用综采自动化和智能化技术，减人提效是实现煤炭安全高效开采的根本途径，提高综采工作面成套装备的可靠性和适应性，并与自动化和智能化控制技术融合，目前已经在部分先进矿井实现了工作面少人化或有限条件下的无人化生产。通过不断的技术攻关，发展综采自

动化和智能化技术，最终实现煤矿工作面无人化开采是煤炭开采技术的发展方向。

### （2）煤巷智能快速掘进技术与装备

采掘协调一直是煤炭生产过程中关注的重要问题。随着井下综采工作面装备的自动化、智能化水平提升，掘进效率低下导致的采掘失衡已经成为现代化大型矿井面临的难题。经过近十几年的发展，我国煤巷掘进技术水平有了大幅度提高。特别是近年来，中国煤炭科工集团太原研究院联合神东公司合作开发了高效快速掘进系统，该系统于2014年7月至2015年11月应用于神东大柳塔煤矿5-2煤层综采工作面，实现了全断面快速掘进、掘支运平行作业、远距离监控操作、辅助作业机械化（部分），是目前机械化、自动化、信息化程度最高的快速掘进系统。但是，高效快速掘进系统仍然存在不足：

系统仅适应于神东等地质条件较好的矿区，系统的适应性不高；系统配套设备的机械化、自动化、智能化程度总体不高，存在进一步提升的空间；

单机设备的可靠性有待提高；系统没有实现掘辅平行作业。为此，需要进一步研究煤巷快速掘进的有关问题，探索智能快速掘进技术，以便进一步提高掘进作业的各项技术指标，满足安全高效采煤的需要。

目前，国内外主要有三种类型的煤巷机械化快速掘进技术：综合机械化掘进技术、连续采煤机掘进技术、掘锚一体化掘进技术。这三种传统煤巷快速掘进技术存在的主要问题是：掘、支、运不平衡；掘锚后配套系统能力差；系统未实现协同控制；智能化程度不高。以上问题制约了巷道掘进速度，形成采掘失调的矛盾。

智能快速掘进技术是指采用具有感知能力、记忆能力、学习能力和决策能力的掘锚机、锚杆机、破碎转载机、带式输送机等煤巷掘进装备，以自动化控制系统为枢纽，以远程可视监控为手段，实现掘进工作面巷道掘进系统“全断面快速掘进、掘支

运平行作业”的安全协调高效掘进技术。智能快速掘进技术创造了掘进、支护、运输“三位一体”的快速掘进新类型，实现了设备的集中协同控制，为下一步掘进工作面无人化奠定了基础。

国外掘锚机和全断面掘进机拥有自动截割技术、输送设备监测和自动控制技术，实现了全功能遥控、截割断面监视；德国、美国、奥地利等国已经掌握可弯曲带式输送机的线摩擦多点驱动技术、输送带的转弯技术等。但目前自动化的单机设备大部分应用在金属矿、盐矿等非煤矿山领域，国外煤矿掘进工作面的技术装备仍处于半自动化水平，目前尚无智能快速掘进成套技术与装备。我国智能化快速掘进技术与国际同行处在同一起跑线，而且，我国是世界上最大的煤炭生产国，如果能够在智能化快速掘进技术的领域有所突破，必将占领该领域的技术制高点，为我国掘进技术与装备在国际煤矿市场赢得一席之地。

煤巷智能快速掘进的主流技术及关键技术如下。

1) 智能截割技术。掘锚机是快速掘进系统的“龙头”装备，掘锚机的智能化研究主要体现在智能截割技术上，包括：掘锚机的自动定位和导向技术、煤岩特性智能识别技术、煤岩自适应截割技术、掘锚机智能感知技术。

2) 智能锚护技术。巷道支护是制约快速掘进的主要因素。随着掘进能力的提升，掘快支慢的矛盾越来越突出。因此，必须研制全自动钻架和全自动锚杆钻车，实现整个锚杆作业工序（钻孔、装药卷、上锚杆、紧固锚杆、锚杆供给）的全部自动化，实现辅助工序（铺网）的自动化，提高锚杆支护的速度和效率，并逐步减少人的参与，最终实现锚杆支护无人化，为整个掘进系统的智能化水平打下基础。智能锚护技术需要研究的关键问题有围岩状态实时监测及锚护参数的动态设计、锚护位置自动定位技术、智能锚钻集中控制系统、药卷自动喷射技术、智能健康诊断技术、自动铺网技术等。

3) 输送带多点驱动功率平衡技术和张紧力自动控制技术。带式输送机是快速掘进系统中的核心装备,目前的带式输送机存在的主要问题有:输送带弯曲运行时张力大、易跑偏;输送带弯曲率与机架最小弯曲半径不匹配;输送带磨损严重、使用寿命低等。为解决上述问题,保证输送机在输送带运行过程中顺利拐弯,需要采用多点驱动技术,减小胶带张力。进一步研究带式输送机驱动点的选择、驱动功率的平衡、驱动策略的制定等。同时需要对输送带的张紧力实现自动控制,确定最小张紧力,减小输送带张力对输送机弯曲运行的影响。

4) 辅助工序自动化技术。快速掘进技术的研究,除需解决掘进与支护的矛盾外,还需解决掘进和辅助工序的矛盾。供水、供电、通风、除尘、辅助运输、带式输送机延伸等辅助工序也是影响巷道掘进效率和速度的制约因素。有必要考虑将部分辅助作业逐步实现机械化、自动化,从而逐步实现掘进与辅助工序的平行作业。

5) 物联网集成技术。结合物联网技术,实现工作面的无线传输,组成设备各状态传感器网络,实现相关设备的位姿识别、状态监控、故障预警等功能,从而大幅减少工作面人员数量、降低劳动强度,提高掘进效率,打造协调、连续、高效作业的掘进工作面,实现“机械化换人、自动化减人”目标。

6) 系统的适应性研究。结合我国不同矿区特殊的煤层地质条件,特别是在较为复杂的煤层赋存和地质条件下,研究新的作业工艺、新的设备配套形式,实现掘进一次成巷、掘支运平行连续作业,提高系统的适应性。神东快速掘进系统,能适应中厚煤层巷道的掘进工艺,要求顶板、底板比较稳定,具备一定的空顶距,需要进一步研究适应神东矿区、阳泉矿区、黄陵矿区地质条件的快速掘进系统,特别是掘锚联合机组。

智能快速掘进技术的发展趋势是由掘支运“三位一体”向掘支运辅“四位一体”方向发展。此外,下一步需要研究构建掘进机大数据和云计算中心,这一平台将有效解决掘进机的智能控制和远程服务问题,“无人值守、智能掘进”将变成现实。

### (3) 非常规油气开发利用系统与核心技术创新装备

非常规油气是指在油气藏特征与成藏机理方面有别于常规油气藏,由于特殊的储层岩石性质(基质渗透率低,存在天然裂缝)、特殊的充注(自生自储岩石中的吸附气,甲烷水合物)以及/或者特殊的流体性质(高黏度),而只有采用先进技术、大型增产处理措施和/或特殊的回收加工才能获得经济开发的油气聚集。其关键参数是储层孔隙度一般小于10%,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;关键标志是“油气大面积连续分布,圈闭界限不明显”和“无自然工业稳定产量,达西渗流不明显”。随着常规油气勘探开发难度的不断加大,非常规油气资源已日益引起全世界的高度重视。可以说,非常规油气是世界油气工业发展的必然趋势、必由之路和必然选择。因此,加快对非常规油气的开发利用对弥补能源缺口、确保国家能源安全具有十分重要的战略意义。

非常规油气开采的分支工程技术主要包括:钻井技术(水平井钻井技术为前沿主流),压裂技术,平台式“工厂化”开采技术。

1) 水平井钻井技术。与直井相比,水平井具有泄油气面积大、单井产量高、穿透度大、储量动用程度高、节约土地占用、避开障碍物和环境恶劣地带等优点,在提高单井油气产量和提高油气采收率方面具有重要作用,目前已成为非常规油气资源高效勘探开发的关键技术。随着水平井综合能力和工艺技术的发展,催生了多种水平井新技术,如大位移水平井、侧钻水平井、多分支水平井、羽状水平井、丛式水平井(PAD)、欠平衡水平井、连续

油管钻井等。

2) 压裂技术。近年来，压裂规模从小型化向大型化发展，压裂层数从单层向多层发展，压裂井型从直井向水平井发展，形成了直井分层压裂、水平井分段压裂、重复压裂、同步压裂等多种压裂技术及配套工艺，成为非常规油气资源经济有效开发的核心技术，对非常规油气快速发展发挥了关键作用。目前压裂技术正向以下 3 方面发展：现有压裂技术不断发展与融合，如连续油管压裂、小井眼压裂、井下混配压裂等技术不断发展与完善；压裂装备向大功率化、模块化、小型化、便携化等方向发展；高效、低成本、环境友好的压裂技术将是未来重要的发展方向，如正在试验的体积压裂改造、高速通道压裂等技术。

3) 平台式“工厂化”开采技术。主要是基于井间接替策略，采用丛式水平井钻井、同步压裂或者交叉压裂的作业方式，在一个井场进行数十口井同步作业，节约土地、降低成本，突破了一个井场单井开采效益差的难题，为实现页岩气等非常规油气资源经济开发提供了高效运行模式。

目前，非常规油气开发技术较复杂、成本较高，未来应该最大化地去研究在保证非常规油气顺利勘探开采的基础上，如何降低成本，以达到预期的开采目标。主要研究趋势：坚持长期的基础理

论创新，为非常规油气的勘探开发提供坚实的理论基础和技术指导。坚持核心技术进步与规模化应用，是非常规油气突破的关键；可将水平井规模压裂，平台式“工厂化”开采等技术的开发作为重点来抓；强化工艺技术攻关，尽快形成低成本的配套工艺技术。加强对非常规油气资源开发的调控工作，制定科学的发展规划，有序开发利用，建立和规划所需人才队伍培养体系，形成由研究者和技术专家等构成的人才组织，从而保证非常规油气资源的合理发展。

#### (4) 国家/地区和机构以及之间的对比及合作情况

根据表 2.2.1 可知，该研究方向的核心专利产出数量最多的国家是中国、美国、日本、俄罗斯和德国。其中，中国核心专利比例超过 80%，其他国家核心专利比例均低于 5%。由表 2.2.2 可知，该研究方向的核心专利产出数量最多的机构分别是 UYMT, UYMB、SHGR、UYHP 以及 SNPC。其中，仅 UYMT, UYMB 和 SHGR 的核心专利产出比例均超过 2%。

根据图 2.2.1 可知，较为注重该领域国家或地区间合作的有美国、中国、澳大利亚、加拿大和德国。其中中国、美国这两个国家具有合作关系，合作发表的核心专利数量也较多。而日本

表 2.2.1 “化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

| 序号 | 国家/地区       | 公开量  | 公开量比例  | 被引数    | 被引数比例  | 平均被引数 |
|----|-------------|------|--------|--------|--------|-------|
| 1  | China       | 6330 | 83.62% | 10 363 | 53.23% | 1.64  |
| 2  | USA         | 364  | 4.81%  | 5646   | 29.00% | 15.51 |
| 3  | Japan       | 227  | 3.00%  | 679    | 3.49%  | 2.99  |
| 4  | Russia      | 132  | 1.74%  | 111    | 0.57%  | 0.84  |
| 5  | Germany     | 82   | 1.08%  | 612    | 3.14%  | 7.46  |
| 6  | South Korea | 78   | 1.03%  | 45     | 0.23%  | 0.58  |
| 7  | Australia   | 64   | 0.85%  | 287    | 1.47%  | 4.48  |
| 8  | France      | 50   | 0.66%  | 359    | 1.84%  | 7.18  |
| 9  | India       | 48   | 0.63%  | 139    | 0.71%  | 2.90  |
| 10 | Canada      | 41   | 0.54%  | 786    | 4.04%  | 19.17 |

和俄罗斯核心专利数量尽管较多，但与其合作的国家或地区数量均不超过两个，与中国也没有合作关系。

根据图 2.2.2 可知，与其他机构具有合作关系的机构有 UYMT, UYMB, SHGR, SNPC 和 Univ Xi'an Sci & Technology，其中 UYMT, UYMB, SHGR 这三个机构之间彼此具有合作关系，合作发表的核心专利数量也最多。中国西安的 Univ Xi'an

Sci & Technology 分别与 UYMB, SHGR 有合作关系，但合作发表的核心专利数较少。

## 2.2.2 电力系统高压大功率电力电子器件及装备

### (1) 概念阐述和关键技术

大功率电力电子技术使用大功率半导体器件，通过信息流对能量流的精确控制，实现电能的有效变换与传输，提升大功率电力电子装备的转换效率

表 2.2.2 “化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

| 序号 | 机构                          | 国家    | 公开量 | 公开量比例 | 被引数  | 被引数比例 | 平均被引数 |
|----|-----------------------------|-------|-----|-------|------|-------|-------|
| 1  | UYMT                        | China | 247 | 3.26% | 1221 | 6.27% | 4.94  |
| 2  | UYMB                        | China | 189 | 2.50% | 356  | 1.83% | 1.88  |
| 3  | SHGR                        | China | 153 | 2.02% | 440  | 2.26% | 2.88  |
| 4  | UYHP                        | China | 141 | 1.86% | 332  | 1.71% | 2.35  |
| 5  | SNPC                        | China | 91  | 1.20% | 374  | 1.92% | 4.11  |
| 6  | UYTL                        | China | 85  | 1.12% | 150  | 0.77% | 1.76  |
| 7  | Univ Xi'an Sci & Technology | China | 79  | 1.04% | 128  | 0.66% | 1.62  |
| 8  | KOBM                        | Japan | 74  | 0.98% | 225  | 1.16% | 3.04  |
| 9  | BJSW                        | China | 73  | 0.96% | 67   | 0.34% | 0.92  |
| 10 | SDST                        | China | 69  | 0.91% | 108  | 0.55% | 1.57  |

注：UYMT 表示 Univ China Mining & Technology；UYMB 表示 Univ China Mining & Technology Beijing；SHGR 表示 Shenhua Group Corp Ltd；UYHP 表示 Univ Henan Polytechnic；SNPC 表示 China Petroleum & Chem Corp；UYTL 表示 Univ Taiyuan Technology；KOBM 表示 Kobe Steel Ltd；BJSW 表示 Beijing Shenwu Environment & Energy Tech；SDST 表示 Univ Shandong Sci & Technology。

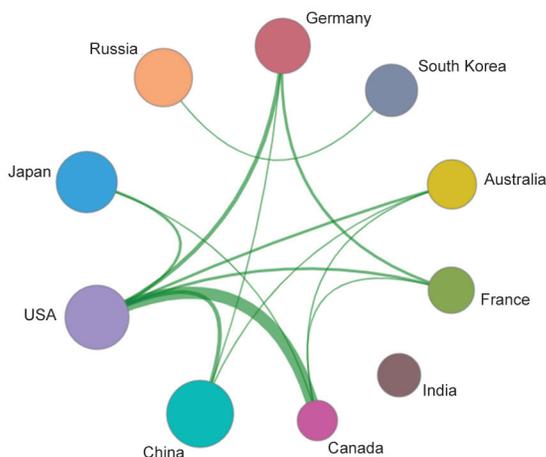


图 2.2.1 “化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

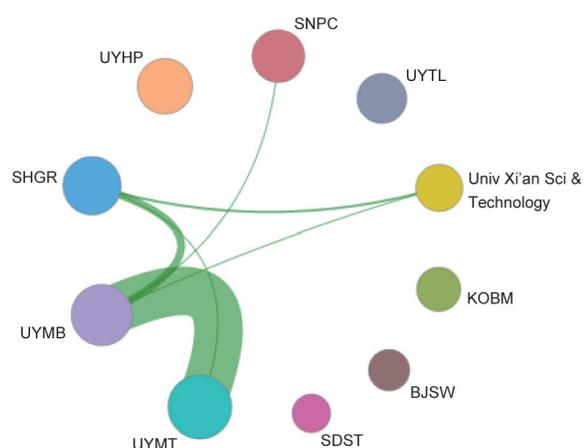


图 2.2.2 “化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备”工程开发前沿的主要机构间合作网络

和精度。当前，我国正处于能源需求增长和能源结构调整变革的关键时期，特高压交直流输电技术和智能电网的发展受到了全社会的广泛关注，电力系统高压大功率电力电子器件及装备领域面临巨大的发展机遇和挑战，在向大功率、高频化和智能化方向发展的进程中，一些重大关键科学技术问题亟待解决。

(2) 发展现状与未来发展趋势

1) 高压大容量电力电子器件。为实现我国长距离大容量的西电东送、南北互供以及全国联网，发展更经济的远距离大容量特高压交直流输电，相比其他国家，我国急需更高容量的高压 IGBT 和 IGCT 来实现高压交直流输电容量的大幅提升。我国已实现了 6 英寸 8000V/4000A 晶闸管、4500V/4000AIGCT、3300V/2400AIGBT 的量产，2018 年株洲中车研发了世界上容量最大的 4500V/3000A 压接式 IGBT 样品，瑞士 ABB 和日本三菱分别研发了 8500V/4240A 晶闸管、4500V/2100A IGBT 产品。高压大容量电力电子器件研发拟解决的关键科学技术问题主要包括高压 GTO 晶闸管的快速开关和可靠性问题、IGBT 模块内芯片的并联均流、模块封装的热阻和成本降低、

驱动保护技术等。

2) 新型高压高频电力电子器件。为了适应智能电网发展和新能源技术发展的需要，急需能高频开关和耐高压的电力电子器件来实现高能效和高功率密度，重点发展碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 电力电子器件。欧洲、美国、日本等国家和地区的企业先后实现了 900V-1700V SiC 器件和 30V-650V GaN 器件的产业化，研制报道了 10kV SiC MOSFET、27kV SiC IGBT 和 22kV SiC GTO 样品，我国目前已研制报道了 10kV SiC MOSFET 和 10kV SiC IGBT 样品。研发拟解决的关键科学技术问题主要包括高质量 SiC 厚外延技术、栅氧可靠性问题、器件高压终端保护技术等。

3) 大容量和智能化电力系统电力电子装备。高压交直流输电容量的大幅提升需要依靠高性能大容量电力电子装备来实现，包括基于电力电子器件的柔性交流输电系统 (FACTS)，静止同步补偿器 (STATCOM)，静止无功补偿装置 (SVC)，电力电子变压器 (PET)，能量路由器。研发拟解决的关键科学技术问题主要包括高可靠大容量电力电子装置技术、能量双向流动电力电子装置、高能效装置技术等。

表 2.2.3 “电力系统高压大功率电力电子器件及装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

| 序号 | 国家 / 地区         | 公开量    | 公开量比例  | 被引数    | 被引数比例  | 平均被引数 |
|----|-----------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1  | China           | 19 056 | 63.22% | 21 726 | 23.16% | 1.14  |
| 2  | Japan           | 4897   | 16.25% | 30 528 | 32.55% | 6.23  |
| 3  | USA             | 1643   | 5.45%  | 22 001 | 23.46% | 13.39 |
| 4  | South Korea     | 1200   | 3.98%  | 2995   | 3.19%  | 2.50  |
| 5  | Germany         | 1139   | 3.78%  | 5953   | 6.35%  | 5.23  |
| 6  | Switzerland     | 469    | 1.56%  | 3607   | 3.85%  | 7.69  |
| 7  | Russia          | 403    | 1.34%  | 125    | 0.13%  | 0.31  |
| 8  | Austria         | 256    | 0.85%  | 2126   | 2.27%  | 8.30  |
| 9  | Taiwan of China | 221    | 0.73%  | 822    | 0.88%  | 3.72  |
| 10 | France          | 196    | 0.65%  | 1087   | 1.16%  | 5.55  |

### (3) 重点研究国家 / 地区和机构以及之间的对比与合作情况分析

我国电力系统高压大功率电力电子器件及装备工程开发前沿的核心专利产出有着总量领先但单个机构的数量和质量有待提高的特点。如表 2.2.3 和表 2.2.4 所示，我国从事高压大功率电力电子器件及装备的企业数量较多，当前电力系统高压大功率电力电子器件及装备工程前沿开发的相关企业数量和相关核心专利数量最多的国家为中国，

但我国专利的平均被引量和被引占比却远低于美国、日本、欧洲等传统发达国家和地区，单个中国企业在工程开发前沿中核心专利的产出普遍落后于欧洲、美国、日本的领军企业。“电力系统高压大功率电力电子器件及装备”工程开发前沿的主要国家或地区间合作日趋紧密，如图 2.2.3 所示，其中，一些企业之间也开展了分工协作，包括半导体代工厂和半导体企业间的合作，如图 2.2.4 所示。

表 2.2.4 “电力系统高压大功率电力电子器件及装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

| 序号 | 机构   | 国家          | 公开量  | 公开量比例 | 被引量  | 被引量比例 | 平均被引量 |
|----|------|-------------|------|-------|------|-------|-------|
| 1  | SGCC | China       | 2186 | 7.25% | 3583 | 3.82% | 1.64  |
| 2  | FJIE | Japan       | 771  | 2.56% | 5982 | 6.38% | 7.76  |
| 3  | INFN | Austria     | 673  | 2.23% | 4827 | 5.15% | 7.17  |
| 4  | MITQ | Japan       | 590  | 1.96% | 3980 | 4.24% | 6.75  |
| 5  | CRRC | China       | 497  | 1.65% | 802  | 0.86% | 1.61  |
| 6  | ALLM | Switzerland | 438  | 1.45% | 3161 | 3.37% | 7.22  |
| 7  | TOKE | Japan       | 437  | 1.45% | 2232 | 2.38% | 5.11  |
| 8  | NPDE | Japan       | 419  | 1.39% | 3037 | 3.24% | 7.25  |
| 9  | TOYT | Japan       | 419  | 1.39% | 2187 | 2.33% | 5.22  |
| 10 | CSPG | China       | 274  | 0.91% | 311  | 0.33% | 1.14  |

注：SGCC 表示 State Grid Corp China；FJIE 表示 Fuji Electric Co Ltd；INFN 表示 Infineon Technologies AG；MITQ 表示 Mitsubishi Electric Corp；CRRC 表示 Zhuzhou Crrc Times Electric Co Ltd；ALLM 表示 ABB Technology Co Ltd；TOKE 表示 Toshiba Corp；NPDE 表示 Nippondenso Co Ltd；TOYT 表示 TOYOTA Jidosha KK；CSPG 表示 China Southern Power Grid Co Ltd。

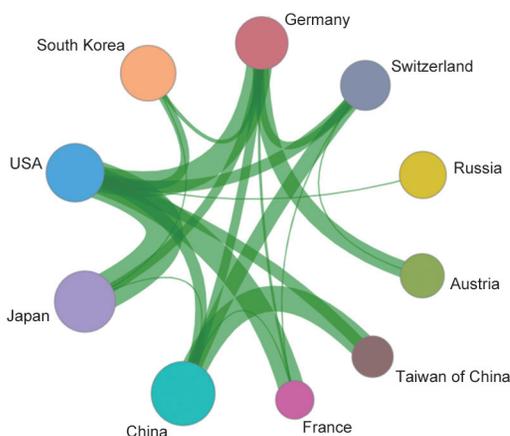


图 2.2.3 “电力系统高压大功率电力电子器件及装备”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

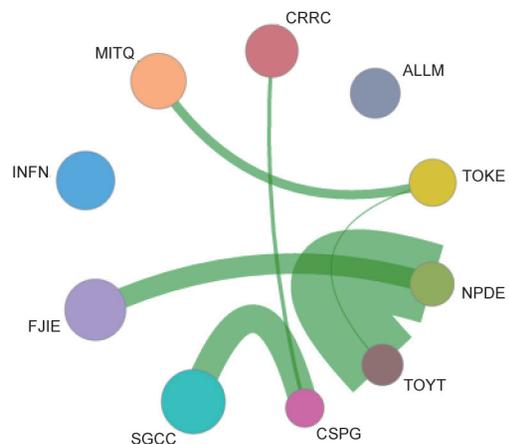


图 2.2.4 “电力系统高压大功率电力电子器件及装备”工程开发前沿的主要机构间合作网络

### 2.2.3 乏燃料后处理及核设施仪器仪表

#### (1) 概念阐述和关键技术

1) 乏燃料后处理是指对从反应堆卸出后的核燃料（称为“乏燃料”）的处理和处置过程。包括乏燃料的中间储存、乏燃料的后处理和放射性废物的处理、最终处置等过程。乏燃料后处理是核燃料循环后段的核心，是对核电站卸出的乏燃料元件进行处理，分离和回收未烧尽的铀和新生成的钚，同时对放射性废物进行处理，满足处置要求。后处理技术按照乏燃料在主工艺中被处理时的存在状态而分为湿法（亦称“水法”）和干法两种。水法萃取流程是目前唯一经济实用的后处理流程，常用的普雷克斯流程（Purex）就是将反应堆乏燃料元件经过适当的预处理转化为硝酸水溶液，然后采用有机溶剂（常用磷酸三丁酯的煤油溶液）进行萃取分离，以达到回收核燃料和除去裂变产物的目的。而干法后处理对于处理高燃耗乏燃料，特别是快堆乏燃料具有一定的优势，是当前一个重要的研究方向。

2) 为保障核电运行全寿命期的安全高效运营，加强核电关键系统和设备的自动运行监控，提高系统、设备的可靠性；同时提高核电站运行的可利用率，提高经济性；实现对人不可达区域进行机器人维修，减少工作人员的受照剂量；最终为严重事故处理及退役创造技术条件，核设施仪器仪表的研发包括数字化技术、人工智能及核测仪表、其他涉及核安全的关键仪表技术。

#### (2) 发展现状与未来发展趋势

1) 动力堆乏燃料后处理厂所处理的介质具有高放射性、高毒性和高腐蚀性，还存在核临界安全和辐射安全等突出问题，对工程技术、专用设备、在线控制与监测、远距离操作、维修等方面要求高，核燃料后处理技术研究难度大，需要开发一系列特殊的工程技术、专用设备和仪表等。国际上对后处

理工艺流程的开发一般包括实验室工艺条件及串级实验，实验室规模台架温热试验，中试规模的热验证等过程；关键设备的开发需经历原理样机研制，设备放大研究和科研样机的研制，以及工程样机研制等阶段，对典型的单元工艺流程、设备和布置、检修方案还需要在非放（或冷铀）条件下进行 1:1 规模的工程验证。在此基础上，才能开展核燃料后处理厂的工程设计工作，以提高后处理厂的可靠性、可操作性和可维修性，从而确保开工率、经济性和安全性。

核能可持续发展必须解决铀资源利用最优化和放射性废物最小化两大问题。通过后处理提取的铀、钚，返回热堆复用仅能使铀资源的利用率提高 30%；返回快堆复用，则可使铀资源的利用率提高 60 倍。同时，通过后处理分离出的长寿命、高放射毒性的次锕系元素和裂变产物，在快堆中以焚烧和嬗变等方式消耗，不仅能够有效降低乏燃料对环境的影响，监管时间也能大幅缩短，减少经济和社会成本。因此，核燃料闭式循环，尤其是包含快堆的核燃料闭式循环，是核能可持续发展的必由之路。

2) 核设施仪器仪表包括数字化技术、人工智能及核测仪表、其他涉及核安全的关键仪表技术。其中核测量仪表是利用射线的某些特征进行射线种类及相关物理测量的设备。核设施仪器仪表主要包括反应堆控制、安全保护和环境监测三部分，按照仪表种类来说包括核测仪表以及涉及核安全的关键仪表。我国已经建立起产品品种比较齐全，可以满足一般需求的核测仪表设备制造体系，但是随着先进核电技术的发展，核电站的安全性和可靠性不断提高，随之而来的对核测仪表及其他涉及核安全关键仪表的测量精度、运行环境和产品可靠性要求也不断提高，产品的更新换代势在必行。由于在关键材料、设计和加工制造水平及条件，测试检验能力

有差距，国内生产企业的现有产品已经无法满足三代核电的技术要求。

美、法、英、俄、印、日等国家是拥有核燃料循环所有环节的国家，除美国以外，都坚持发展后处理和核燃料闭式循环。目前，全世界总的后处理能力约为每年 4850 吨，超过 9 万吨的乏燃料已经被后处理。法国的 UP3、UP2-800 和英国的 THORP 后处理厂代表了当前世界在运行的商业后处理厂的先进水平。国际上积极研发开展快堆乏燃料干法后处理的研究，最终实现一体化快堆（燃料制造—反应堆—后处理在同一厂址）闭式燃料循环（U、Pu、MA 回收利用）。

为保障智能化和智慧化，提升核工业高科技战略产业水平，需深入并广泛应用以工业机器人、图像识别、深度自学习系统、自适应控制、自主操纵、人机混合智能、虚拟现实智能建模等为代表的新型人工智能技术，包括从智能仪表智能控制器采用到核电站全数字仪控系统建立；利用“互联网+”建立大数据系统开发数字核电站（三维动态）开发虚拟现实（VR）技术；到操作指导和事故处理指导，核电站设备系统的智能维护，利

用机器人或机器人系统维修高放射性区域不可达地区的利用。

### （3）重点研究国家和机构以及之间的对比及合作情况分析

根据表 2.2.5 可知，该研究方向的核心专利产出数量最多的国家是日本、美国、中国、荷兰、德国、韩国、法国和俄罗斯。其中，日本核心专利比例超过 30%，美国和中国的核心论文比例均超过 20%，除荷兰外的其他国家核心专利比例均低于 6%。

由表 2.2.6 可知，该研究方向的核心专利产出数量最多的机构分别是 GENE、PHIG、CGNP、MITQ，核心专利产出比例均超过 5%。

根据图 2.2.5 可知，较为注重该领域国家或地区间合作的有美国、荷兰、德国、法国、加拿大和俄罗斯。

根据图 2.2.6 可知，与其他机构具有合作关系的机构有 CGNP 和 CNNU，合作发表的核心专利数量也最多；HITA 分别和 TOKE、GENE 两个机构具有合作关系。

表 2.2.5 “乏燃料后处理及核设施仪器仪表”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

| 序号 | 国家 / 地区         | 公开量 | 公开量比例  | 被引数  | 被引数比例  | 平均被引数 |
|----|-----------------|-----|--------|------|--------|-------|
| 1  | Japan           | 193 | 30.54% | 700  | 18.37% | 3.63  |
| 2  | USA             | 170 | 26.90% | 1921 | 50.42% | 11.30 |
| 3  | China           | 153 | 24.21% | 182  | 4.78%  | 1.19  |
| 4  | The Netherlands | 38  | 6.01%  | 767  | 20.13% | 20.18 |
| 5  | Germany         | 28  | 4.43%  | 289  | 7.59%  | 10.32 |
| 6  | South Korea     | 21  | 3.32%  | 42   | 1.10%  | 2.00  |
| 7  | France          | 16  | 2.53%  | 115  | 3.02%  | 7.19  |
| 8  | Russia          | 14  | 2.22%  | 3    | 0.08%  | 0.21  |
| 9  | Canada          | 9   | 1.42%  | 54   | 1.42%  | 6.00  |
| 10 | Poland          | 6   | 0.95%  | 2    | 0.05%  | 0.33  |

表 2.2.6 “乏燃料后处理及核设施仪器仪表”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

| 序号 | 机构   | 国家              | 公开量 | 公开量比例 | 被引数 | 被引数比例  | 平均被引数 |
|----|------|-----------------|-----|-------|-----|--------|-------|
| 1  | GENE | USA             | 38  | 6.01% | 404 | 10.60% | 10.63 |
| 2  | PHIG | The Netherlands | 34  | 5.38% | 571 | 14.99% | 16.79 |
| 3  | CGNP | China           | 32  | 5.06% | 68  | 1.78%  | 2.13  |
| 4  | MITQ | Japan           | 32  | 5.06% | 71  | 1.86%  | 2.22  |
| 5  | HITA | USA             | 29  | 4.59% | 120 | 3.15%  | 4.14  |
| 6  | SHMA | Japan           | 29  | 4.59% | 146 | 3.83%  | 5.03  |
| 7  | TOKE | Japan           | 25  | 3.96% | 38  | 1.00%  | 1.52  |
| 8  | CNNU | China           | 17  | 2.69% | 17  | 0.45%  | 1.00  |
| 9  | USGO | USA             | 12  | 1.90% | 47  | 1.23%  | 3.92  |
| 10 | WESE | USA             | 10  | 1.58% | 76  | 1.99%  | 7.60  |

注：GENE 表示 General Electric Co；PHIG 表示 Konink Philips NV；CGNP 表示 China Guangdong Nuclear Power Group Co L；MITQ 表示 Mitsubishi Electric Corp；HITA 表示 Hitachi Ltd.；SHMA 表示 Shimadzu Corp；TOKE 表示 Toshiba Corp；CNNU 表示 China National Nuclear Corporation；USGO 表示 USGO: National Nuclear Security Administration, which is an agency within the U.S. Department of Energy and is closely related to U.S. Department of Homeland Security；WESE 表示 Westinghouse Electric Co Llc。



图 2.2.5 “乏燃料后处理及核设施仪器仪表”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

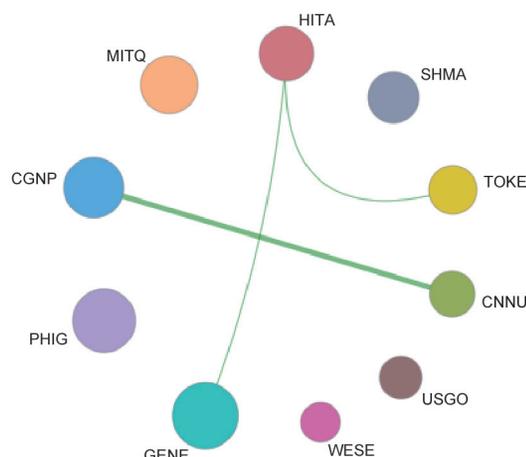


图 2.2.6 “乏燃料后处理及核设施仪器仪表”工程开发前沿的主要机构间合作网络

## 领域课题组人员

课题组长：翁史烈 倪维斗 彭苏萍

专家组组长：袁士义

课题组副组长：黄震 巨永林 刘静

能源与电气科学技术与工程学科组：

组长：翁史烈 罗安

秘书长：巨永林 徐千鸣

参加人（按照拼音排序）：

蔡旭 代彦军 丁小益 韩东 韩敏芳

何晋伟 江亿 李争起 上官文峰 沈水云

沈文忠 盛宏至 史进渊 汪洪亮 王俊

王睿 翁一武 杨林 余晴春 章俊良

赵长颖 钟文兴 朱森

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（按照拼音排序）：

郭 晴 郭英华 胡 古 李思凡 刘少帅

师学明 杨 勇

地质资源科学技术与工程学科组：

组 长：毛景文 赵文智

秘书长：张国生 刘 敏

参加人（按照拼音排序）：

曹 宏 陈志勇 董世泰 侯连华 黄金亮

李潮流 李厚民 李建忠 李 欣 梁 坤

王淑芳 王晓梅 魏国齐 吴 颖 徐兆辉

杨建民 杨 涛 姚佛军 张朝军 张水昌

张 研 周灿灿

矿业科学技术与工程学科组：

组 长：袁 亮 李根生

秘书长：张 农 宋先知 周福宝 吴爱祥

参加人（按照拼音排序）：

安衍培 江丙友 阚甲广 钱德雨 时国庆

薛 生 尹升华

文献情报专家：陈天天 李 婷

工作组办公室：

能源与矿业工程学部办公室：

宗玉生 张 宁 王浩闻

《Frontiers in Energy》期刊编辑部：

刘瑞芹 黄冬苹