

## 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。其中新兴前沿包括“与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”“光催化和光电催化分解水制氢研究”“大数据和人工智能与电网的耦合方法研究”“全固态高密度锂电池和快速充电锂电池”“油气田地质-工程-地面一体化中的大数据应用方法”，传统深入研究包括“核电站严重事故特性及预防与缓解措施”“关键金属富集机制”“超高温高压钻井液研究”“深部金属矿开采过程中多场耦合致灾机理”，融合交叉学科前沿包括“人工智能与油藏预测机制”“煤炭与油气安全高效智能化开采理论”“先进核燃料

和相关材料损伤机理及验证”既属于新兴前沿又属于颠覆性前沿。

各个工程研究前沿所涉及的核心论文在 2013—2018 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

#### (1) 与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法

可再生能源包括水能、风能、太阳能、生物质能、地热等，其大规模高效利用是全球能源和环境可持续发展的必然选择和重要保障。受限于资源状况和技术发展水平，风能、太阳能和水能最具发展前景而发电是最有效的利用方式，但风力和太阳能发电的一个显著缺点是发电输出功率受环境和气候因素的影响，具有很大的波动性、随机性和间歇性。保证发电系统连续、稳定地输出质量合格的电力是可再生能源大规模接入电网的基础和关键，构建风、光、水、火和储能相结合的可再生能源系统是解决这一问题的重要途径，是全球电力发展的趋势。

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	与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法	210	8856	42.17	2015.9
2	先进核燃料和相关材料损伤机理及验证	106	1064	10.04	2016.8
3	人工智能与油藏预测机制	44	244	5.55	2015.8
4	煤炭与油气安全高效智能化开采理论	17	62	3.65	2016.2
5	光催化和光电催化分解水制氢研究	25	1023	40.92	2017.6
6	大数据和人工智能与电网的耦合方法研究	397	3180	8.01	2016.1
7	全固态高密度锂电池和快速充电锂电池	73	3806	52.14	2016.3
8	核电站严重事故特性及预防与缓解措施	209	7518	35.97	2014.3
9	油气田地质-工程-地面一体化中的大数据应用方法	11	185	16.82	2015.8
10	关键金属富集机制	243	6785	27.92	2014.6
11	超高温高压钻井液研究	111	1005	9.05	2016.0
12	深部金属矿开采过程中多场耦合致灾机理	142	762	5.37	2015.8

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	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
1	与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法	30	17	31	38	49	45
2	先进核燃料和相关材料损伤机理及验证	0	5	15	15	31	40
3	人工智能与油藏预测机制	8	8	2	5	9	12
4	煤炭与油气安全高效智能化开采理论	2	3	0	1	6	5
5	光催化和光电催化分解水制氢研究	0	0	0	2	7	16
6	大数据和人工智能与电网的耦合方法研究	23	40	74	85	80	95
7	全固态高密度锂电池和快速充电锂电池	6	7	9	11	14	26
8	核电站严重事故特性及预防与缓解措施	66	62	41	32	7	1
9	油气田地质-工程-地面一体化中的大数据应用方法	1	0	2	6	1	1
10	关键金属富集机制	63	63	54	42	17	4
11	超高温高压钻井液研究	14	15	13	17	18	34
12	深部金属矿开采过程中多场耦合致灾机理	26	18	18	20	23	37

储能技术是将能量吸收储存一段时间，然后再可控地释放的一种能源利用技术，分为机械储能、电气储能、电化学储能、热储能和化学储能五大类。具有高能量密度和高功率密度性能的高密度储能方法才能对电网进行调峰和调频，是可再生能源大规模高效利用的关键，是储能技术的研究热点。

新兴前沿包括：低成本、高性能的单一类别的高储能密度储能方法；与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法；满足可再生能源发、输、配、用各环节不同需求的多元高密度储能方法；基于风、光、水、火和高密度储能相结合互补的可再生能源电力供应系统等。

### （2）先进核燃料和相关材料损伤机理及验证

核燃料包含了大部分的放射性物质，是核电厂阻止放射性物质释放的第一道防线，因此国际社会在开发先进核燃料的同时，也在大力开展核燃料与相关材料的损伤机理的研究。目前，针对当前压水堆燃料的损伤机理的研究重点主要集中于以下几方面：功率瞬态下燃料与包壳间相互作用，大破口失水事故下包壳失稳氧化、燃料碎片化和移位等行为，干法贮存下乏燃料包壳性能退化等。为了解释宏观上的燃料与材料行为，各研究机构在材料学上开展

各类微观研究，掌握不同材料在各类腐蚀环境、中子辐照、温度场与应力场等条件下的材料行为，并结合分子动力学的方法，对先进核燃料与相关材料的损伤机理进行预测、评估与验证。

### （3）人工智能与油藏预测机制

随着人工智能的发展，其在石油领域也已经开始逐渐渗透，将人工智能应用到油藏预测中，可解决油田勘探开发中存在的各种瓶颈和难题，但人工智能在石油工业中的应用处于探索起步阶段。此项预测机制旨在对油藏预测过程中获得的海量数据，如地质数据、地质力学数据、油藏数据、工程数据、经济数据等进行储存、分析，运用大数据做高精度地质建模、高效油藏数值模拟，并对地下油藏进行比较精确的描述。最终把所有数据集成在一个统一平台上，从数据和模型两个层面进行油藏预测，帮助我们进行科学、合理的决策。总之随着时代创新和技术更新，唯有在传统石油工程技术知识及人工智能相结合的基础上，实现创造力及创意思维的战略整合，才可以主动适应和赢得未来的石油工业发展。

### （4）煤炭与油气安全高效智能化开采理论

智能感知、智能决策和自动控制（执行）是智

能化开采的三要素。安全高效智能开采区别于一般自动化开采的显著特点是设备具有自主学习和自主决策功能，具备自感知、自控制、自修正的能力。具备这样能力的智能化综采系统才能充分的响应生产环境变化、实现真正意义上的智能化开采，实现有限条件下的无人开采目标。

煤炭智能化开采关键技术包括薄煤层和较薄煤层智能化开采、厚煤层大采高和超大采高智能化开采、特厚煤层综放开采智能化技术。发展趋势是未来全面推进综采智能化技术，实现有限无人化开采目标和机器人流态化开采的无人化目标。

随着油气勘探开发逐渐向非常规、低渗透、深层、深水等复杂油气领域发展，油气开采在安全、经济和效率等方面面临难题和挑战。因此，亟需加快大数据、人工智能、信息工程、井下控制工程学等跨界融合，建立完善的安全高效智能化开采理论体系，实现油气资源开采全过程的超前探测、闭环调控、实时预警和智能决策，推动油气资源的安全经济高效开采进程，为实现我国复杂油气开采重大突破提供重要支撑。油气安全高效智能化开采理论主要涉及油气藏表征、井下工况感知、参数闭环调控和方案智能决策。其中，油气藏表征主要是对储层油气流动特征进行描述，其研究趋势是油藏要素精细刻画、三维地质动态建模、地质模型实时修正和重构理论等；井下工况感知主要是对井下条件进行识别、诊断和风险预警，其研究趋势是井下监测装置响应机理、井内风险自动诊断和预警理论等；参数闭环调控主要是利用井下和地面信息的双向传输建立闭环实时调控，其研究趋势是海量数据双向高效实时传输、井下控制参数闭环优化理论等；方案智能决策主要是利用油气田开采大数据，通过人工智能等对开采方案进行实时优化，其研究趋势是基于大数据和人工智能的油气开采方案动态优化、海量数据智能流动、融合与自我净化理论等。

#### (5) 光催化和光电催化分解水制氢研究

当半导体催化剂受到光照射后，其位于价带上

的电子由于获得外部的光能发生跃迁从而产生自由电子，同时在原有的价带位置处相应的产生带正电的空穴。由于光生电子和空穴分别具有还原能力和氧化能力，能够使水分解为氢气和氧气，这种催化反应被称为光催化制氢反应。除此之外，利用外加偏压促使光生载流子定向迁移从而提高产氢效率的方法，被称之为光电催化制氢。光催化和光电催化在未来实现可持续太阳能制氢中具有巨大发展潜力。

光催化及光电催化制氢效率的主要制约因素包括光吸收率、光生载流子分离效率以及催化反应动力学等因素。当前，其研究主要集中在如下几方面：能带调控策略、异质结构、晶面调控、光阴/阳极半导体材料改性等。寻找高效光催化剂，开发新型廉价稳定的催化材料体系和反应体系等也成为了研究的热点。最近，选择匹配的催化剂进行光催化制氢的同时实现水中污染物的降解也受到广泛关注。

#### (6) 大数据和人工智能与电网的耦合方法研究

大数据是数量巨大、结构复杂、类型众多的数据构成的数据集，以数据分析为核心，内容涵盖数据预处理、数据融合、数据存储和数据处理，具有高容量、快速性、多样性和价值密度低的特点。人工智能广义上是指能够以人类智能的方式做出反应的智能机器，以深度学习为代表的机器学习是实现人工智能的方法。大数据和人工智能与电网的耦合是数据、自主知识学习和应用场景的深度融合，是应对电网日益复杂化和不确定性加剧的有效途径。

目前的主要研究方向包括：考虑时空相关性的可再生能源发电功率预测；自动挖掘提取电网稳定评估和紧急控制的关键特征；电网智能分析与决策；电网故障智能诊断与辨识；海量负荷数据分类与预测；电力用户行为分析等。

新兴前沿为：更先进、更智能的分析方法开发与平台建设，以及更深入、更核心的领域应用。

在分析方法的开发和平台建设方面，引入成熟、高效、先进的大数据分析与人工智能方法，集成现有的分析平台从而逐步建成用于处理电网领域业务的人工智能集成系统平台；在领域应用方面，结合电网需求加以适当改造人工智能方法，增强算法的适用性以增加耦合深度，并将应用扩展至电网安全稳定分析与控制、电网调度运行等核心领域，增加耦合广度。

### （7）全固态高能量密度锂电池和快速充电锂电池

全固态锂电池是一种使用固态电极材料和固态电解质材料、不含有任何液体的锂电池。它具有安全性高、能量密度高、循环寿命长、工作温度范围宽、电化学窗口宽、结构灵活、对环境友好、有望实现快速充电等特点，是最具潜力的电化学储能装置，受到广泛的关注。

全固态锂电池的优势和挑战均来源于固态电解质。固态电解质需要满足比较苛刻的性能要求，包括高锂离子电导率（ $\text{Li}^+$  迁移数接近 1，室温电导率  $>10^{-4}$  S/cm）；优异的热稳定性、化学稳定性和良好的力学性能；低原料成本、容易合成。在目前已开发的固态电解质中，聚合物电解质的热稳定性和力学性能欠佳；硫化物的电导率接近甚至超过有机电解液，但化学稳定性较低；氧化物稳定性好，成本低，能够实现规模化制备，但电导率较低。目前尚未有一种固态电解质可以满足全部的要求，是全固态锂电池发展的瓶颈，也是目前材料研究的热点。此外，固态电解质 / 电极界面的接触问题直接影响到锂离子在电池内的传导，对电池性能、尤其是充电速率有决定性影响，因此也对电池的制备工艺提出了较高的要求。

全固态锂电池是实现高能量密度和快速充电的关键技术，我国仍需在关键材料、结构设计以及制备工艺上进行突破，早日实现市场渗透。

### （8）核电站严重事故特性及预防与缓解措施

核电站严重事故是指事故严重性超过设计基准

事故，并造成堆芯明显恶化，甚至熔化，并且相应的安全设施失效可能导致大量放射性物质释放的事故过程，是核电站超设计基准事故的一部分。事故过程分为三个阶段：堆芯熔化解体、压力容器失效、安全壳失效。

压水堆核电站防止核裂变产物外泄，依赖于设置的三道屏障，分别为燃料包壳、一回路压力边界和安全壳。当发生堆芯熔化等严重事故时，事故的缓解和处理主要集中在缓解堆芯损伤和保证第三道屏障（安全壳）的功能，减少放射性物质向环境的释放。

在核电厂严重事故缓解措施设计中需要考虑实际消除的堆芯损伤严重。事故工况主要包括：

直接安全壳加热；大规模蒸汽爆炸；氢气爆炸；安全壳热量导出丧失；熔融物 - 混凝土相互作用。

研究方向：首先要研究堆芯熔融机理，通过开展堆芯熔融物在堆内迁移以及堆外迁移的主要进程和现象研究，优化完善事故预防与缓解的工程技术措施，包括堆内熔融物滞留技术、堆芯熔融物捕集器和消氢技术等；然后开展保障安全壳完整性研究，包括安全壳失效概率计算、源项去除等预防及缓解措施，应对安全壳隔离失效、安全壳旁路和安全壳早期失效和其他导致安全壳包容功能失效的事故序列；采取确定论和概率论方法并开发严重事故分析方法和软件工具，验证能否实现消除大规模释放。

### （9）油气田地质 - 工程 - 地面一体化中的大数据应用方法

油气勘探开发过程中，甜点区域已经慢慢减少，迫使各大石油公司实行降本增效，成本管控上要求更加严格，而大数据在一定程度上可以弥补理论上的缺陷，油气田地质 - 工程 - 地面一体化中的大数据应用方法就是在这个背景下提出来的。基于大数据方法，结合模式识别技术，对钻井、测井、录井、试油、压裂酸化、测试、地面等大量实际作业数据和历史数据开展多尺度数据挖掘，提高经济效益和

社会效益。通过研究整合地质、工程、地面等全流程数据,进行大数据采集、处理与存储、云计算、交换与共享,最终应用于战略分析与决策。即通过建立一体化数据库,运用现有基本成熟的数据挖掘方法进行规律分析、因次分析、关联分析以及经验相关式的统计回归,进而指导实际油田的生产实践。同时,该应用需要新管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。总之,该方法是油气田科学勘探开发的必需技术,可以使数据更快、更有效地转化为信息,快速发现油气,降低生产成本,必将为各大油气田带来新的活力,推动油气田开发的信息化和智能化发展。

#### (10) 关键金属富集机制

关键金属,又称战略性金属,通常指稀有、稀土、分散金属和铂族元素等,是发展现代高端精密制造业、低碳绿色能源科技和未来新兴产业必不可少的原料。部分关键金属是我国的优势矿种,例如,我国供应了世界所需稀土元素总量的95%,钨总量的84%和钽总量的53%;而锰、铌、铍、镍、钴、铬和铂族元素等是我国紧缺的关键金属矿产,可能会对我国高端制造业和新兴产业的发展造成“卡脖子”的制约。近年来欧美发达国家加大了对关键战略性金属元素富集机制和成矿规律的研究,鼓励并启动了一系列针对关键金属资源的勘查项目。关键金属成矿通常具有分散性、低品位、吨位小和难以选冶的特征;可以单独形成低品位矿床,但通常是以伴生产物的形式与主要成矿元素共生;矿化不连续,矿体难以控制;矿化成因和富集机制不明,与之相关的成矿富集理论亟待构建。因此,应加强探索低丰度关键金属元素的富集过程与成矿机制,剖析关键金属元素微观尺度的赋存形式和宏观尺度的分布规律,厘清导致关键金属成矿的地质-物理-化学(生物)过程的耦合因素,寻找关键金属矿床新类型,扩增关键金属矿产资源储量,以保障我国对紧缺和优势关键矿产资源的供应,为实现“中国制造2025”战略性目标提供原料物质储备。

#### (11) 超高温高压钻井液研究

钻井液是钻井工程的血液,为钻井过程中清除井底岩屑、冷却钻井工具、控制地层压力等提供重要支撑,其性能是关系到钻井成败的关键。目前,随着能源需求逐年增加,地球深部勘探开发已成为必然趋势,尤其是深层超深层、海洋油气及新能源如干热岩等。井内超高温高压环境对钻井液性能提出严峻挑战,甚至会导致钻井液性能急剧恶化,造成各种井下复杂事故。因此,亟需研究超高温高压钻井液,优化钻井液抗高温和抗高压性能,建立超高温高压水基钻井液、超高温高压油基钻井液、超高温高压合成基钻井液体系,确保深部地层安全高效钻井。其中,超高温高压水基钻井液的研究包括:开展新单体合成与转化;研制抗盐高温高压降滤失剂、降黏剂、抑制剂、润滑剂、封堵剂和井壁稳定剂等;研制抗高温增稠剂和高温高压降滤失剂。超高温高压油基钻井液的研究包括:研制超高温高效乳化剂、增黏剂、降滤失剂、絮凝剂等油基钻井液处理剂;研制高性能提黏切剂和表面活性剂;研制新型可逆乳化钻井液体系;形成系统的流变性控制方法。超高温高压合成基钻井液的研究包括:研制新型低成本合成基材料;研制适用于合成基钻井液的乳化剂、流型调节剂、增黏剂和絮凝剂等。

#### (12) 深部金属矿开采过程中多场耦合致灾机理

针对深部金属矿开采面临着“三高一扰动”,即:高地应力、高渗透压、高温和强开采扰动的复杂环境,探索深部金属矿开采应力场、渗流场、温度场和化学场的多场耦合规律,揭示多场耦合环境下深部岩爆、软岩大变形等深部金属矿灾害的孕育、演化与发生机制,为实现深部金属矿灾害的超前预测与调控奠定基础。

研究方向包括:研发深部应力、渗流、温度、化学等多场环境识别传感器和快速检测手段,精准识别深部开采多场耦合环境;研制多场耦合作用力学试验系统,探明多场耦合作用下岩体力学行为;

开发多场环境智能反演和动态监测分析技术，基于有限测试数据推演开采区域多场环境；探明深部开采多场耦合致灾机理，开发多场耦合下采动灾害数值模拟软件，发展多场耦合环境岩体控制理论与技术。

依托现有研究基础，未来聚焦“深部多场耦合环境精准智能识别技术”“深部多场耦合力学试验系统”“多场环境智能推演和动态监测分析技术”和“深部开采多场耦合致灾机理与岩体控制技术”等关键领域，实现创新性理论发展和装备水平突破。

### 1.2 Top4 工程研究前沿重点解读

#### 1.2.1 与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法

##### (1) 概念阐述与关键技术

可再生能源包括水能、风能、太阳能、生物质能、地热能等，其大规模高效利用是全球能源和环境可持续发展的必然选择和重要保障。基于资源状况和技术发展水平，利用水能、风能和太阳能发电最为现实，前景最为广阔。但风力和太阳能发电的一个显著缺点是发电输出功率受环境和气候因素的影响，具有很大的波动性、随机性和间歇性，这种质量不合格的电力不能大规模直接接入电网。

储能技术是将能量吸收储存一段时间，然后再可控地释放的一种能源利用技术。按照储存介质的不同，储能技术可以分为机械储能、电气储能、电化学储能、热储能和化学储能五大类。机械储能主要包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能等；电气储能主要包括超级电容器储能和超导储能等；电化学储能包括各类电池；热储能是将电能以显热、相变热或者化学热的形式存储在隔热容器的介质中，而后根据需要再转化为电能或者直接以热能的形式加以利用；化学储能主要是指利用电能制氢或者合成天然气、氨等二次能源载体。储能密度用以衡量单位质量或者单位体积的储能设备的储能能

力，又分为能量密度和功率密度。前者对应所储能量的多少，后者对应储存和释放能量的快慢。具有高能量密度和高功率密度性能的高密度储能方法才能对电网进行调峰和调频，是可再生能源大规模高效利用的关键。其发展方向包括：同时具有高能量密度和高功率密度的性能单一储能方法，以及采用多种储能方法相结合的多元高密度储能。

##### (2) 发展状况与未来发展趋势

可再生能源发电和储能技术在全球发展迅速。截至2018年年底，全球可再生能源发电总装机容量为2351 GW，其中水电为1172 GW，风能为564 GW，太阳能为480 GW，生物质能为121 GW，地热能为539 GW；全球已投运储能项目的累计装机规模为180.9 GW，同比增长3%，其中抽水蓄能为170.7 GW，占比94%；电化学储能达4.89 GW，同比增长66.3%，其中锂离子电池所占比重达86%，其次是钠硫电池和铅蓄电池的占比均为6%。2018年，全球可再生能源新增装机容量为171 GW，同比增长7.9%，其中太阳能为94 GW，风电为49 GW，水电为21 GW，新增发电量的2/3均来自可再生能源；全球新增投运储能项目的装机规模为5.5 GW，其中电化学储能的新增投运规模最大，为3.5 GW，同比增长288%。

我国是可再生能源发电和储能技术发展最迅速的国家。截至2018年年底，全国可再生能源发电装机容量为728.96 GW，占全国总装机容量的38.4%，其中水电为352.26 GW，占比18.5%，风电为184 GW，占比9.7%，光伏为174 GW，占比9%；我国已投运储能项目的累计装机规模为31.2 GW，同比增长8%，其中抽水蓄能约为30.0 GW，占比96%，同比增长5%，其次是电化学储能和熔融盐储热，分别为1.01 GW和0.22 GW，同比分别增长159%和1000%。2018年，全国新增可再生能源装机容量为44.26 GW，新增投运储能项目的装机规模为2.3 GW，其中电化学储能的新增投运规模最大，为0.6 GW，同比增长414%。

构建风、光、水、火和储能相结合的发电系统是解决再生能源发电的不连续、不稳定的重要途径。我国近期成功地开展多个大规模可再生能源并网技术示范应用。在青海建立了全球最大的水光互补电站，将 850 MW 光伏电站作为“虚拟水电机组”接入水电站，通过水轮机组的快速调节，将光伏电源平滑稳定地送入电网。在吉林两个风电场分别实现了储能系统融合蓄热式电锅炉快速跟踪弃风功率运行，以及风电和储能系统的联合运行示范。

总的来说，迄今为止国内外单一的大规模储能技术只有抽水蓄能和压缩空气储能相对成熟，但二者都受地理条件制约，在役的压缩空气储能还需要燃烧化石燃料提供热源。其他储能技术的可靠性、使用寿命、成本及应用能力都有待突破，制约了可再生能源的高效大规模利用。将可再生能源发电技术与多元高密度储能相耦合不仅可以将可再生能源大规模接入电网，而且能够满足智能电网亟需的灵活性调峰要求。

新兴前沿包括：低成本、高性能的单一类别的高储能密度储能方法；与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法；满足可再生能源发、输、配、用各环节不同需求的多元高密度储能方法；基于风、

光、水、火和高密度储能相结合互补的可再生能源电力供应系统等。

### (3) 重点研究国家 / 地区和机构及其合作情况分析

根据表 1.2.1 可知，该研究方向的核心论文产出数量较多的国家为中国、美国、印度和英国。其中，中国和美国占据前两位，核心论文比例分别为 39.05% 和 20.95%。印度和英国的核心论文比例皆为 9.05%。

根据表 1.2.2 可知，该研究方向的核心论文产出数量较多的机构为中国科学院、上海交通大学、中国科学院大学、马来西亚大学彭亨分校和清华大学。根据图 1.2.1 可知，较为注重该工程研究前沿国家或者地区间合作的有中国、美国、英国、澳大利亚和西班牙等。中国发表的核心论文数最多，与中国合作发表论文的主要国家有美国、英国、澳大利亚和日本。美国发表的核心论文其次，与美国合作发表论文的主要国家有中国、西班牙、澳大利亚和加拿大。

根据图 1.2.2 可知，中国科学院和中国科学院大学有紧密合作、中国科学院和清华大学有合作、MIT 和 Pacific NW Natl Lab 有合作。

表 1.2.3 显示，施引核心论文数产出最多的国

表 1.2.1 “与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 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	82	39.05%	1929	21.78%	23.52
2	USA	44	20.95%	4388	49.55%	99.73
3	India	19	9.05%	476	5.37%	25.05
4	UK	19	9.05%	681	7.69%	35.84
5	Australia	16	7.62%	1001	11.30%	62.56
6	Germany	12	5.71%	337	3.81%	28.08
7	Canada	11	5.24%	212	2.39%	19.27
8	Spain	10	4.76%	367	4.14%	36.70
9	South Korea	9	4.29%	125	1.41%	13.89
10	Japan	7	3.33%	113	1.28%	16.14

表 1.2.2 “与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”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	被引频次比例	篇均被引频次
1	Chinese Acad Sci	11	5.24%	219	2.47%	19.91
2	Shanghai Jiao Tong Univ	7	3.33%	63	0.71%	9.00
3	Univ Chinese Acad Sci	6	2.86%	110	1.24%	18.33
4	Univ Malaysia Pahang	5	2.38%	136	1.54%	27.20
5	Tsinghua Univ	5	2.38%	83	0.94%	16.60
6	Indian Inst Technol	4	1.90%	112	1.26%	28.00
7	Univ Wollongong	4	1.90%	85	0.96%	21.25
8	Pacific NW Natl Lab	3	1.43%	692	7.81%	230.67
9	MIT	3	1.43%	572	6.46%	190.67
10	Stanford Univ	3	1.43%	753	8.50%	251.00

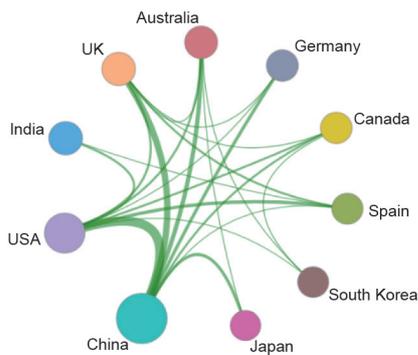


图 1.2.1 “与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

家是中国，施引核心论文比例为 45.38%，其次是美国，施引核心论文比例为 17.98%。德国和韩国的施引核心论文比例也超过 5%。

表 1.2.4 中，施引核心论文数产出最多的机构是中国科学院，施引核心论文比例为 27.65%，其次是中国科学院大学，施引核心论文比例为 10.28%，其后的是清华大学和中国科技大学，施引核心论文比例分别为 9.51% 和 8.11%。

通过上述数据分析可知，中国和美国在“与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿的核心论文产出及施引数量处在世界前列，中国科学院和中国数所大学等机构的核心论文产出及施引数量位于世界前茅。

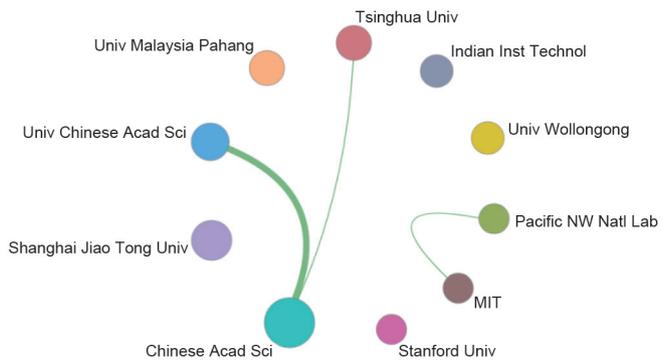


图 1.2.2 “与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

### 1.2.2 先进核燃料和相关材料损伤机理及验证

核燃料包容了大部分的放射性物质，是核电厂阻止放射性物质释放的第一道防线，因此国际社会在开发先进核燃料的同时，也在大力开展核燃料与相关材料的损伤机理的研究。

目前，根据已有的工程经验与材料辐照行为，已经能够较好的预测与评估现有的压水堆燃料在稳定运行条件下的包壳腐蚀、应力应变、裂变气体释放等行为，因此，当前国际上的研究重点主要集中在核电厂瞬态与事故场景下的材料损伤与失效机理研究方面。其中，功率瞬态下燃料与包壳间相互作用效应 (Pellet-Cladding Interaction, PCI) 涉及到包壳的初始微小裂纹在腐蚀性裂变气体气氛的作用

表 1.2.3 “与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”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	4173	45.38%	2017.3
2	USA	1653	17.98%	2016.8
3	Germany	631	6.86%	2016.9
4	South Korea	558	6.07%	2017.0
5	Australia	417	4.53%	2017.2
6	UK	342	3.72%	2017.0
7	India	342	3.72%	2017.5
8	Japan	336	3.65%	2016.9
9	Singapore	273	2.97%	2016.9
10	Canada	249	2.71%	2016.9

表 1.2.4 “与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”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	Chinese Acad Sci	573	27.65%	2017.2
2	Univ Chinese Acad Sci	213	10.28%	2017.5
3	Tsinghua Univ	197	9.51%	2017.1
4	Univ Sci & Technol China	168	8.11%	2017.4
5	Univ Munster	159	7.67%	2016.4
6	Huazhong Univ Sci & Technol	137	6.61%	2017.0
7	Nanyang Technol Univ	135	6.52%	2016.9
8	Cent S Univ	133	6.42%	2017.3
9	Forschungszentrum Julich	128	6.18%	2017.5
10	Tianjin Univ	117	5.65%	2017.3

下,由于燃料的挤压而不断扩展进而引起包壳失效。目前核电厂失水事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)研究除了对包壳的失稳氧化特别关注之外,还要关注能够深刻影响该事故后果的燃料本身在事故过程中发生的碎片化和移位等行为。除了上述的堆内损伤机理与失效行为外,压水堆乏燃料干法贮存过程中乏燃料包壳的材料性能退化机理,包括氢氧化物重取向、延迟氢化开裂等,与干法贮存乏燃料安全性紧密相关,因此也是目前国际社会的重点研究方向。

先进核燃料与相关材料的损伤与失效行为的分

析与机理研究,主要结合宏观与微观的多尺度研究分析来开展。宏观上是指开展各类实验,包括各类材料性能试验、离子辐照试验、再制棒(re-fabricated rod)试验等,来获取材料在特定场景下的行为。微观则是指采用各类微观结构、形貌及成分分析工具,如金相显微镜、扫描电镜、透射电镜等,对材料内部的缺陷、位错、相变、偏析等材料表征进行研究,从而解释宏观上的材料行为。

为了更好地实现多尺度下材料行为与机理的统一,国际上多个国家均在分子动力学范畴上开展辐照条件下先进核燃料与相关材料损伤机理的研究,

并建立相关模型来预测材料的辐照行为。

根据表 1.2.5 可知，该研究方向的核心论文产出数量较多的国家是美国、中国、韩国、瑞典、英国。其中，美国占据第一位，其核心论文比例达到 64.15%；中国核心论文比例超过 10%。

由表 1.2.6 可知，该研究方向的核心论文产出数量较多的机构是 Oak Ridge Natl Lab，Idaho Natl Lab，核心论文产出数均等于或超过 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、英国、德国、捷克、法国、韩国、瑞典。中国的发表论文数量较多，主要

是与美国和瑞典进行合作发表。

根据图 1.2.4 可知，Oak Ridge Natl Lab，Idaho Natl Lab，Penn State Univ，Los Alamos Natl Lab 和 Westinghouse Elect Co，Univ Wisconsin 有合作。

表 1.2.7 中，施引核心论文产出最多的国家是美国，施引核心论文比例达到 37.44%，中国达到 26.99%，韩国达到 10.92%。

表 1.2.8 中，施引核心论文产出最多的机构是 Oak Ridge Natl Lab，施引核心论文比例达到 29.03%，Korea Atom Energy Res Inst 的施引核心论文比例达到 10.26%。

表 1.2.5 “先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 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	68	64.15%	751	70.58%	11.04
2	China	12	11.32%	55	5.17%	4.58
3	South Korea	10	9.43%	150	14.10%	15.00
4	Sweden	6	5.66%	40	3.76%	6.67
5	UK	6	5.66%	38	3.57%	6.33
6	Japan	3	2.83%	44	4.14%	14.67
7	France	3	2.83%	24	2.26%	8.00
8	Germany	3	2.83%	20	1.88%	6.67
9	The Czech Republic	3	2.83%	13	1.22%	4.33
10	Poland	2	1.89%	1	0.09%	0.50

表 1.2.6 “先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”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	Oak Ridge Natl Lab	22	20.75%	328	30.83%	14.91
2	Idaho Natl Lab	10	9.43%	88	8.27%	8.80
3	Penn State Univ	7	6.60%	124	11.65%	17.71
4	Los Alamos Natl Lab	7	6.60%	53	4.98%	7.57
5	MIT	7	6.60%	47	4.42%	6.71
6	Korea Atom Energy Res Inst	6	5.66%	131	12.31%	21.83
7	Westinghouse Elect Co.	6	5.66%	108	10.15%	18.00
8	GE Global Res	6	5.66%	7	0.66%	1.17
9	Univ Wisconsin	4	3.77%	21	1.97%	5.25
10	Gen Atom Co.	3	2.83%	96	9.02%	32.00

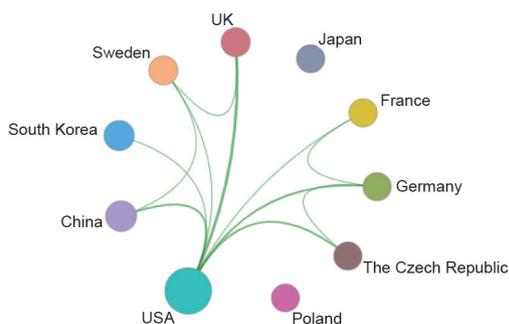


图 1.2.3 “先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

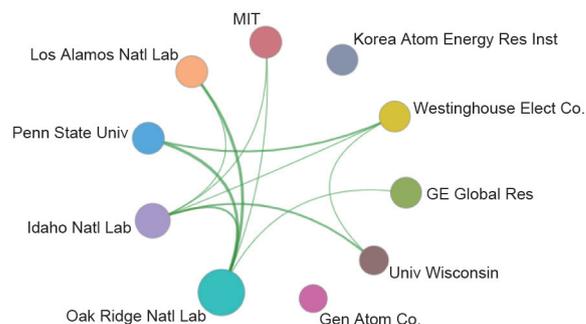


图 1.2.4 “先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 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	240	37.44%	2017.7
2	China	173	26.99%	2018.2
3	South Korea	70	10.92%	2017.6
4	UK	39	6.08%	2018.2
5	Germany	26	4.06%	2018.1
6	Sweden	22	3.43%	2017.9
7	Japan	21	3.28%	2018.0
8	Russia	18	2.81%	2018.3
9	France	13	2.03%	2018.4
10	Canada	11	1.72%	2018.4

表 1.2.8 “先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”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	Oak Ridge Natl Lab	99	29.03%	2017.5
2	Korea Atom Energy Res Inst	35	10.26%	2017.5
3	Idaho Natl Lab	33	9.68%	2017.8
4	Los Alamos Natl Lab	31	9.09%	2018.2
5	Univ Wisconsin	25	7.33%	2017.8
6	Chinese Acad Sci	25	7.33%	2018.5
7	Univ Tennessee	21	6.16%	2018.1
8	Penn State Univ	19	5.57%	2017.6
9	Nucl Power Inst China	19	5.57%	2018.4
10	MIT	17	4.99%	2018.0

通过以上数据分析可知，美国、中国在先进核燃料和相关材料损伤机理及验证技术的核心论文产

出及施引数量处在世界前列，美国研究机构的施引核心论文数量较多。

## 1.2.3 人工智能与油藏预测机制

人工智能技术与油田融合可能会解决油田勘探开发中存在的各种瓶颈以及面临的新难题，推进人工智能技术在老油田以及油田工业的转化应用已经势在必行。人工智能对油藏预测最大的启示是在不明确油藏模式和规律的前提下，依靠海量可靠的数据和深度学习算法，得出准确的预测效果。油藏预测过程中涉及大量数据，包括地质数据、地质力学数据、油藏数据、工程数据、经济数据等。但由于数据尺度和分辨率不均，空间密度差异大，时间频率差异大，且绝大多数解释数据都是间接获得，因此不确定性极强。运用大数据做高精度地质建模、高效油藏数值模拟，运用无结构网格、动态模拟技术等，对地下油藏进行比较精确的描述。最终把所有数据全部集成在一个统一平台上，从数据和模型两个层面帮助我们做决策。通过量化和可视化的三维模型呈现油气田勘探开发全生命周期的所有测量数据及规律；通过人工智能算法，在不断丰富的数据驱动下，实现模型持续更新，使得模型的不确定性不断降低，从而帮助我们在充分考虑所有数据及规律的基础上，自动做出最科学、合理的预测和决策。即通过一系列智能化工具、设备和方法，对油藏的多种数据进行深度学习和认知分析，找到油气

富集区。但人工智能技术在油藏预测应用中仍处于理论设想阶段，需要在战略研究上明确方向、在关键技术实施突破和落地，这是我国实现油气勘探开发技术更新换代的关键。希望该应用能够让大数据人工智能技术与油气勘探开发领域的发展齐头并进，从而把蕴藏在地下的更多油气资源开采出来，以满足国家日益增长的能源需求。

相关核心论文发表和引用主要出自伊朗、沙特阿拉伯、美国、中国等国家(见表 1.2.9 和表 1.2.11)，主要机构包括伊朗石油工业大学、法赫德国王石油与矿物大学、伊斯兰阿扎德大学、阿米尔卡比尔大学技术学院等(见表 1.2.10 和表 1.2.12)。国家如澳大利亚和美国，澳大利亚和伊朗，沙特阿拉伯和埃及，沙特阿拉伯和马来西亚之间分别具有合作关系，机构如伊斯兰阿扎德大学和伊朗石油工业大学，伊斯兰阿扎德大学和南十字大学之间分别开展了交流合作(见图 1.2.5 和图 1.2.6)。

## 1.2.4 煤炭与油气安全高效智能化开采理论

## (1) 煤炭安全高效智能化开采理论

煤炭安全高效智能化开采目前还处于初级阶段，正进入技术创新发展的关键阶段，需要对工作面采高、支护系统与围岩智能耦合群组自适应控制、

表 1.2.9 “人工智能与油藏预测机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家/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	Iran	19	43.18%	140	57.38%	7.37
2	Saudi Arabia	10	22.73%	57	23.36%	5.70
3	USA	5	11.36%	9	3.69%	1.80
4	Canada	4	9.09%	18	7.38%	4.50
5	Australia	4	9.09%	6	2.46%	1.50
6	China	3	6.82%	11	4.51%	3.67
7	Egypt	3	6.82%	18	7.38%	6.00
8	Algeria	2	4.55%	7	2.87%	3.50
9	France	2	4.55%	7	2.87%	3.50
10	Malaysia	1	2.27%	14	5.74%	14.00

表 1.2.10 “人工智能与油藏预测机制”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	Petr Univ Technol	9	20.45%	89	36.48%	9.89
2	King Fahd Univ Petr & Minerals	9	20.45%	56	22.95%	6.22
3	Islamic Azad Univ	7	15.91%	83	34.02%	11.86
4	Amirkabir Univ Technol	3	6.82%	35	14.34%	11.67
5	Univ Alberta	3	6.82%	12	4.92%	4.00
6	Southern Cross Univ	3	6.82%	5	2.05%	1.67
7	Univ Tehran	2	4.55%	20	8.20%	10.00
8	Nexen Energy ULC	2	4.55%	11	4.51%	5.50
9	Univ MHamed Bougara	2	4.55%	7	2.87%	3.50
10	Univ Rennes 1	2	4.55%	7	2.87%	3.50

表 1.2.11 “人工智能与油藏预测机制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 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	Iran	76	31.93%	2016.8
2	China	40	16.81%	2017.6
3	Saudi Arabia	27	11.34%	2017.7
4	USA	20	8.40%	2017.4
5	Canada	19	7.98%	2017.5
6	Australia	16	6.72%	2015.9
7	India	11	4.62%	2017.2
8	France	8	3.36%	2016.6
9	South Korea	7	2.94%	2017.4
10	Malaysia	7	2.94%	2017.1

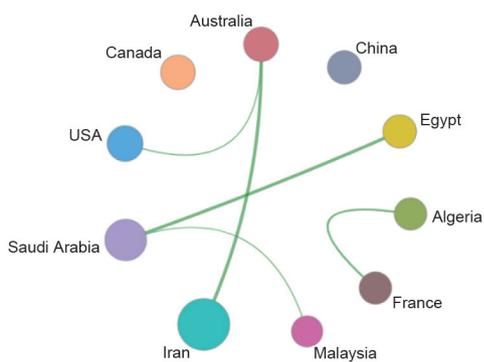


图 1.2.5 “人工智能与油藏预测机制”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

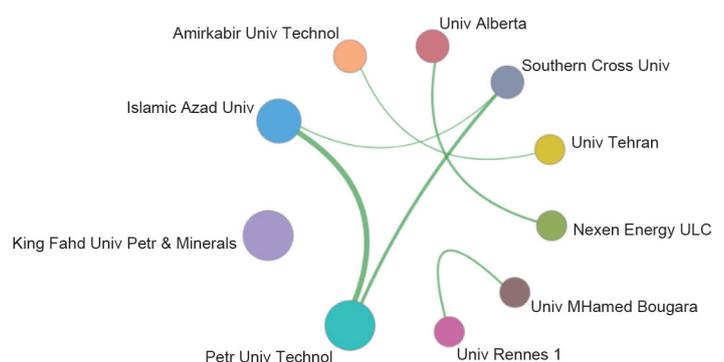


图 1.2.6 “人工智能与油藏预测机制”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.12 “人工智能与油藏预测机制”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	Petr Univ Technol	31	21.83%	2015.7
2	King Fahd Univ Petr & Minerals	21	14.79%	2017.7
3	Amirkabir Univ Technol	19	13.38%	2017.6
4	Islamic Azad Univ	17	11.97%	2016.1
5	Univ Tehran	13	9.15%	2017.4
6	Shahrood Univ Technol	8	5.63%	2018.5
7	Southwest Petr Univ	8	5.63%	2017.4
8	So Cross Univ	7	4.93%	2015.4
9	Tsinghua Univ	6	4.23%	2017.3
10	China Univ Petr	6	4.23%	2017.7

工作面直线度智能导航、系统多信息融合协同、超前支护及辅助作业的智能化等技术进行攻关研发，通过解决综合机械化设备的环境参数自主感知实现开采行为的自主调控，进而实现智能化开采技术升级。随着综采智能化发展，其战略地位越来越突出，智能开采是智慧煤矿的核心系统之一，精准开采也将远程可控的少人无人智能化开采作为重要支撑。当前，许多煤炭企业把握技术发展的新趋势，大力实施开采技术装备升级，为智能化综采技术提供了重要机遇，也面临着对其认识不足等现实问题。

煤炭安全高效智能化开采的主要研究方向包括“透明开采”技术、液压支架群组与围岩的智能耦合自适应控制、采煤机智能调高控制、基于系统多信息融合的协同控制技术、超前支护及辅助作业的智能化控制。

### （2）油气安全高效智能化开采理论

随着油气勘探开发逐渐向非常规、低渗透、深层、深水等复杂油气领域发展，油气开采在安全、经济和效率等方面面临一系列难题和挑战，因此，亟需加快大数据、人工智能、信息工程、井下控制工程学等的跨界融合，建立完善的安全高效智能化开采理论体系，实现油气资源开采全过程的超前探测、闭环调控、实时预警和智能决策，从而推动油

气资源的安全经济高效开采进程，为实现我国复杂油气开采重大突破提供重要支撑。

油气安全高效智能化开采理论主要涉及油气藏表征、井下工况感知、参数闭环调控和方案智能决策。其中，油气藏表征主要是对油气藏在全周期生产过程中油气流动特征进行描述和评价，为油气开采调控提供基础参考。目前，Texas A & M 基于物探大数据开展了关于油气储层多尺度解释的研究。壳牌公司建立了三维透明储层，可以用于实时交互分析。井下工况感知主要是对井下条件进行识别、诊断和风险预警，为油气安全开采提供有力支撑。目前，BP 公司开展了井下安全生产的风险一体化控制研究。中国石油化工集团有限公司初步建立了较完善的风险判识和分级管理机制。参数闭环调控主要是将井下数据传输至地面，利用地面专家系统对井内工况进行动态分析，然后向井下发出控制指令调整井内参数，如此往复循环，利用信息的双向传输形成闭环实时调控，为油气经济高效生产奠定重要基础。目前，斯伦贝谢、中石油等公司基于井下温度、压力、流量等实时数据，初步建立了较完善的油气开采装置的参数自动调控机制。方案智能决策主要是利用油气田开采大数据，通过人工智能等对油气田全生命周期开采方案进行实时优化，为

我国向智慧油田迈进提供关键支撑。目前，壳牌公司基于多维海量数据，初步实现了上百口生产井和注水井开发方案的智能管理。但是我国在该领域的研究尚处于发展初期。

油气藏表征的主要研究趋势是油藏要素精细刻画、三维地质动态建模、地质模型实时修正和重构理论等。井下工况感知的主要研究趋势是井下监测装置响应机理、井内风险自动诊断和预警理论等。参数闭环调控的主要研究趋势是海量数据双向高效实时传输，井下控制参数闭环优化理论等。方案智能决策的主要研究趋势是基于大数据和人工智能的油气开采方案动态优化、海量数据智能流动、融合与自我净化理论等。

### （3）重点研究国家/地区和机构及其合作情况分析

根据表 1.2.13 可知，煤炭与油气安全高效智能化开采理论研究方向的核心论文产出数量较多的国家是中国、美国、沙特阿拉伯，其他国家核心论文比例均低于 10%。其中，中国核心论文比例超过 50%。根据表 1.2.14 可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的机构是西安石油大学，比例超过 10%，其他机构核心论文产出比例均为 6% 左右。

根据图 1.2.7 可知，较为注重该领域国家或地区间合作的是美国和沙特阿拉伯。其中美国与中国、

法国具有合作关系，合作发表的核心论文数量也最多。沙特阿拉伯和巴基斯坦、马来西亚具有合作关系。其他国家或地区之间尚未开展合作研究。根据图 1.2.8 可知，机构之间的合作研究主要集中在 Ocean Univ China、Qingdao Natl Lab Marine Sci & Technol、SINOPEC Res Inst Petr Explorat & Dev、Shandong Univ、Shandong Univ Sci & Technol、Shandong Zhengyuan Construct Engn，均和 4 所机构具有合作关系。但是核心论文发表最多的西安石油大学尚未与其他机构进行合作研究。

根据表 1.2.15 可知，该研究方向的施引核心论文产出数量较多的国家是中国、沙特阿拉伯、加拿大和英国。其中，中国施引核心论文比例超过 30%，其他国家中除沙特阿拉伯外施引核心论文比例均低于 10%。由表 1.2.16 可知，该研究方向的施引核心论文产出数量最多的机构分别是 King Fahd Univ Petr & Minerals、China Univ Petr、Univ Alberta 和 Southwest Petr Univ，施引核心论文比例均超过 10%，平均施引年为 2017 年和 2018 年。

## 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

表 1.2.13 “煤炭与油气安全高效智能化开采理论”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家/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	10	58.82%	25	40.32%	2.50
2	USA	3	17.65%	11	17.74%	3.67
3	Saudi Arabia	2	11.76%	21	33.87%	10.50
4	Iran	1	5.88%	2	3.23%	2.00
5	France	1	5.88%	7	11.29%	7.00
6	Norway	1	5.88%	0	0.00%	0.00
7	Canada	1	5.88%	7	11.29%	7.00
8	Malaysia	1	5.88%	12	19.35%	12.00
9	Pakistan	1	5.88%	9	14.52%	9.00

表 1.2.14 “煤炭与油气安全高效智能化开采理论”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 Shiyou Univ	2	11.76%	0	0.00%	0.00
2	Ocean Univ China	1	5.88%	1	1.61%	1.00
3	Qingdao Natl Lab Marine Sci & Technol	1	5.88%	1	1.61%	1.00
4	SINOPEC Res Inst Petr Explorat & Dev	1	5.88%	1	1.61%	1.00
5	Shandong Univ	1	5.88%	1	1.61%	1.00
6	Shandong Univ Sci & Technol	1	5.88%	1	1.61%	1.00
7	Shandong Zhengyuan Construct Engn	1	5.88%	1	1.61%	1.00
8	Univ Southern Calif	1	5.88%	0	0.00%	0.00
9	Birjand Univ Technol	1	5.88%	2	3.23%	2.00
10	Univ Tehran Med Sci	1	5.88%	2	3.23%	2.00

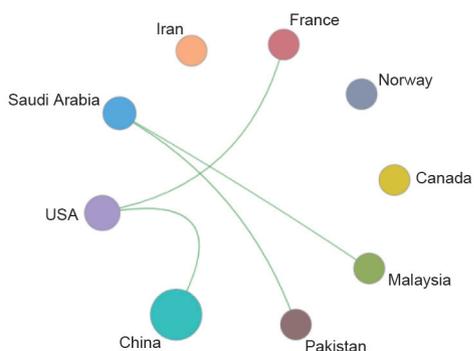


图 1.2.7 “煤炭与油气安全高效智能化开采理论”工程研究前沿主要国家/地区间的合作网络

前沿见表 2.1.1 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。其中新兴前沿包括“高

效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术”“煤炭高效转化和超低污染排放控制技术”“可再生能源制氢及储运一体化技术”“智能一体化模块式浮动堆技术”。传统深入研究包括“基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统”“海洋地震勘探的地震信号获取和处理技术”“新型压裂技术、装备与压裂液、支撑剂及添加剂的开发”“深部金属矿开采灾害超前预警系统开发”。“核能高温制氢及氦气透平发电技术”是颠覆性前沿技术，融合交叉学科前沿包括“煤炭安全智能精准开采技术”“基于无线传感器网络的油田综合数字生态管理系统”。“数字化、智能化核电站及反应堆技术”既属于颠覆性前沿又属于融合交叉学科前沿。

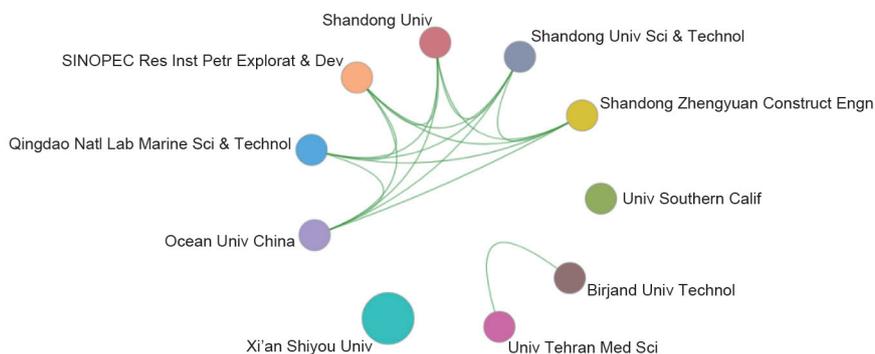


图 1.2.8 “煤炭与油气安全高效智能化开采理论”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.15 “煤炭与油气安全高效智能化开采理论”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 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	23	32.39%	2018.1
2	Saudi Arabia	11	15.49%	2017.5
3	Canada	7	9.86%	2018.4
4	UK	7	9.86%	2018.0
5	USA	5	7.04%	2017.6
6	Malaysia	4	5.63%	2017.3
7	Iran	4	5.63%	2018.0
8	India	3	4.23%	2019.0
9	Tunisia	3	4.23%	2017.0
10	Egypt	2	2.82%	2018.5

表 1.2.16 “煤炭与油气安全高效智能化开采理论”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	King Fahd Univ Petr & Minerals	7	18.92%	2017.3
2	China Univ Petr	7	18.92%	2017.4
3	Univ Alberta	4	10.81%	2018.3
4	Southwest Petr Univ	4	10.81%	2018.5
5	China Univ Petr East China	3	8.11%	2018.7
6	Saudi Arabian Oil Co.	2	5.41%	2017.0
7	Univ Malaysia Sarawak	2	5.41%	2017.0
8	Texas A&M Univ	2	5.41%	2018.0
9	Digital Res Ctr Sfax CRNS	2	5.41%	2017.0
10	Higher Inst Comp Sci & Multimedia Sfax	2	5.41%	2017.0

各个工程开发前沿所涉及的核心专利在 2013 年至 2018 年间的逐年公开量见表 2.1.2。

### (1) 高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术

和传统的燃油汽车相比，电动汽车是指动力能源系统全部由动力电池 + 电机构成的汽车。而混合动力汽车是指兼具发动机与驱动电机双动力系统的汽车。电动汽车具有温室效应气体（Greenhouse Gas, GHG）排放小、能耗低、噪音小等优点，但和传统的燃油汽车比较则普遍存在充电时间长、有效行驶里程短、动力电池寿命低等不足之处。混动

汽车则同时兼具燃油汽车与电动汽车的优势，比燃油车油耗更低、污染更小，同时由于其双储能优势，相较于纯电动汽车具有快速充能与更远行驶距离的优势，但其结构较燃油汽车更为复杂，成本也普遍较高。动力电池对电动 / 混合动力汽车均有重要影响。常用的动力电池主要包括磷酸铁锂电池和三元锂电池。近年来，电动 / 混合动力汽车以及动力电池技术的重要研究方向包括：先进动力总成、能量管理、高级辅助驾驶、自动驾驶、电池快充与寿命、电池材料与体系、电池模型与管理控制等。未来依托于人工智能、大数据、智能交通系统以

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	引用量	平均被引数	平均公开年
1	高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术	290	11 923	41.11	2014.1
2	核能高温制氢及氦气透平发电技术	196	418	2.13	2014.9
3	基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统	69	861	12.48	2014.5
4	煤炭安全智能精准开采技术	119	198	1.66	2016.3
5	煤炭高效转化和超低污染排放控制技术	316	704	2.23	2015.5
6	可再生能源制氢及储运一体化技术	277	1715	6.19	2014.7
7	数字化、智能化核电站及反应堆技术	390	1130	2.90	2014.9
8	智能一体化模块式浮动堆技术	160	556	3.48	2015.2
9	基于无线传感器网络的油田综合数字生态管理系统	237	2968	12.52	2014.2
10	海洋地震勘探的地震信号获取和处理技术	205	2253	10.99	2014.3
11	新型压裂技术、装备与压裂液、支撑剂及添加剂的开发	225	3872	17.21	2014.1
12	深部金属矿开采灾害超前预警系统开发	38	31	0.82	2016.2

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	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
1	高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术	124	69	53	33	11	0
2	核能高温制氢及氦气透平发电技术	20	16	12	28	49	32
3	基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统	16	21	17	11	4	0
4	煤炭安全智能精准开采技术	9	6	11	28	31	31
5	煤炭高效转化和超低污染排放控制技术	18	33	79	66	47	55
6	可再生能源制氢及储运一体化技术	25	23	35	48	40	48
7	数字化、智能化核电站及反应堆技术	51	74	44	45	57	73
8	智能一体化模块式浮动堆技术	18	19	20	37	35	19
9	基于无线传感器网络的油田综合数字生态管理系统	88	71	37	32	9	0
10	海洋地震勘探的地震信号获取和处理技术	67	65	31	31	11	0
11	新型压裂技术、装备与压裂液、支撑剂及添加剂的开发	78	79	44	20	4	0
12	深部金属矿开采灾害超前预警系统开发	6	2	5	3	9	13

及 5G 数据传输技术等相关研究的快速发展带来的优势，电动 / 混合动力汽车以及动力电池管理控制技术将进一步获得更大的研究进展。而研究电池新材料、新体系，进一步提高动力电池的能量密度、功率密度、安全性、循环寿命、充电性能、高 / 低温性能等，发展新一代的车用动力电池（如固态锂离子电池、锂空气燃料电池、锂硫电池等），

仍将是动力电池研究和开发的重点。

### （2）核能高温制氢及氦气透平发电技术

核能制氢就是利用核反应堆产生的热作为一次能源，从含氢元素的物质水或化石燃料制备氢气。在核能制取氢气的技术路线中，核热辅助的烃类重整利用高温气冷堆的工艺热代替常规技术中的热源，可部分减少化石燃料的使用，也相应减少部分

CO<sub>2</sub> 排放。利用核能发电再经常规电解制氢，是已成熟技术的结合，但从一次能源转化为氢能的效率较低。在一些压水堆发电能力过剩、需要消纳或者特殊应用的场景中，可利用电解制氢实现储能或者供给需要氢气的场合。要实现核能到氢能的高效转化，必须部分或全部利用以反应堆提供的工艺热，减少热-电转换过程中的效率损失。目前研发的主流核能制氢技术包括热化学循环（碘硫循环和混合硫循环）和高温蒸汽电解。

高温堆气体透平直接循环发电建立在闭式布雷登循环的理论基础上，将气体透平与模块式高温气冷堆相结合，利用高温堆产生的高温气体直接推动气体透平做功，进行核能高效发电。氦气透平直接循环发电的效率可以达到 50% 以上。

### （3）基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统

随着微地震监测技术理论研究的成熟，目前微地震监测技术广泛应用于低渗油田的水力压裂改造的裂缝勘探，能够实现储层压裂裂缝监测、注水注气后的油藏驱动实时监测，在油田勘探开发中具有重要的意义。传统的微地震定位所采用的反演方法耗费大量的时间和人力资源，定位精度难以满足要求，基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统应运而生。该系统经过模型试算和对实际数据的应用，对微地震事件进行有效分类可以得到组成裂缝带的各个小裂缝和微小裂缝的形态、展布，结合时间等信息，可以得到每条裂缝的发育及延伸情况。进一步判断水力压裂的效果、缝网系统形成情况、是否可以提高自然产能等，以实现最大的开发效果。总之，这种处理方法和系统可以对压裂过程中的微地震数据连续采集记录并实现实时处理和形象化解释，有效地优化压裂方案，提供油气藏资源评价和钻井位置图，达到增产和指导油气田开发的目的。

### （4）煤炭安全智能精准开采技术

煤炭安全智能精准开采技术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，具有风险判别、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。目前主要的研究方向包括：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，力争到 2020 年矿业安全智能精准开采取得阶段性突破，到 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。

### （5）煤炭高效转化和超低污染排放控制技术

煤炭转化有两种方式：一种以煤炭为原料，通过煤化工过程将煤炭转化为具有高价值的化工产品、化工原料或其他形式的燃料；另一种以煤炭为燃料，通过燃烧等过程将煤炭中的化学能转化为热能或者电能。

高效转化和超低污染排放控制的要求覆盖煤炭利用全生命周期，包括煤炭加工、煤炭转化和废弃物利用。新兴前沿包括：动力用煤的高效降尘、脱硫和省水选煤技术，以及煤炭超净分选新工艺等煤炭加工技术；高效、超低污染的煤气化、煤液化、煤制天然气、煤制化学品和低阶煤热解等以煤为原料的煤炭转化技术；包括三超（超高参数、超低排放、超超临界）锅炉技术、炉内超低污染物排放燃烧技术、与可再生能源和储能相耦合的高灵活性燃煤发电技术、低成本和无二次污染的先进烟气净化技术、高效低污染民用煤燃烧技术、高可靠性整体煤气化联合循环技术、煤基超临界 CO<sub>2</sub> 联合循环发电技术、

煤基高温燃料电池技术、煤基富氧燃烧技术以及其他先进 CO<sub>2</sub> 捕集与封存技术等以煤为燃料的煤炭转化技术；此外，还包括燃煤灰渣与脱硫灰渣无害化利用技术、SCR 脱硝催化剂的高效再生和无害处置技术等废弃物利用技术。

### （6）可再生能源制氢及储运一体化技术

氢能被广泛地认为是未来最具发展前景的清洁能源，其能量密度高、来源广泛、零排放。供氢系统结合质子交换膜燃料电池技术是目前最有潜力替代汽车内燃机动力系统的清洁能源技术。但当前超过 95% 的氢气属于二次能源，来源于化石燃料的生产加工，仍算不上完全的清洁能源。此外，氢气的高效安全储运也是限制氢能应用的瓶颈问题。因此，利用可再生能源（如风、光、水能）制氢并实现储运一体化可以有效解决以上这些问题，具体体现在以下两个方面：

1) 可再生能源制氢。在风能与水电资源富集的区域，可将大量无法上网的弃风电与弃水电通过电解制氢的方法将能量转化为化学能存储在氢气中。在阳光充足的地域，可以采用直接光制氢，并结合光电、光热效应用于分解水制氢，将光能转化为氢气的能量。

2) 氢气的储运一体化。由于氢气的密度小、沸点低、难压缩，氢气的储运一直是氢气应用的一大难题。相比传统的高压气态储氢以及低温液态储氢，固态储氢可以达到高的储氢容量和高安全性的目的，是未来的重要发展方向之一。特别是近年来镁基储氢材料的开发使得高容量安全储运氢气成为可能，其储氢量可达 7.6wt% 且廉价易得。采用镁基固态储氢材料的长管拖车，其单车储氢量可达 1.2~1.5 t，是传统长管储氢拖车的 3~4 倍。通过在资源丰富地区利用可再生能源制氢，将过剩能量转化为氢气的化学能，再通过安全高效储氢媒介进行一体化建设，实现氢气的绿色生产、大规模储运以及应用，将成为未来氢能利用的必经之路，如图 2.1.1 所示。

### （7）数字化、智能化核电站及反应堆技术

信息技术的飞速发展，使得设计本身的数字化和智能化成为可能，也使得核电研发、设计、验证、制造、建造、调试和运行的数字化体系成为目前的前沿方向。通过使核电全周期、全产业链的数据在数字化平台上交互共享，大幅提高核电各环节的效率和可靠性，进一步在此平台基础上实现核电技术的迭代升级。

核电领域智能化发展分为三个阶段。第一阶段是基础建设，智能化一定要立足在数字化的基础上，从智能仪表和智能控制器采用到核电站全数字仪控系统建立，国内除了早期的几个核电站外，其他大部分核电站都已经数字化。第二阶段是人工智能架构的建立，利用“互联网+”建立大数据系统，开发数字核电站并开发应用虚拟现实（VR）技术，其中数字核电站包括两类，一类是虚拟的三维数字化核电站，用于安装维护检修，另一类是动态的，实时展示核电站的各种参数和状态。第三阶段是核电人工智能应用开发，包括操作指导、事故处理指导、核电站设备系统智能维护、高放射性区域不可达地区的应用机器人或者机器人系统维修。这三个阶段不是相互割裂的，而是交叉发展的，使得我们的数字化、信息化慢慢成熟发展起来，逐步实现智能化，这是当前国际上的热点，也是占领技术和科学制高点的一项关键工作。

### （8）智能一体化模块式浮动堆技术

智能一体化模块式浮动堆技术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。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。

突破小型智能堆关键设计技术、重大试验验证



图 2.1.1 可再生能源制氢及储运一体化技术示意图

技术、关键设备改进设计和制造技术，形成一批具有完全自主知识产权的先进小型智能堆技术。在模块化设计、固有安全性、智能控制与经济性等方面取得全面突破，开发供热、供电、热电联产、海水淡化与特殊用途的小型堆核电技术。具体开展一体化反应堆总体设计与布置共性关键技术研究，长寿期、不含硼堆芯设计共性关键技术研究，模块化设计共性关键技术研究，智能设计共性关键技术研究，全数字化智能仪控系统、多堆控制共性关键技术研究，支持安全评审的共性关键技术研究，研制小型屏蔽泵、小型钢安全壳、直流蒸汽发生器、内置蒸汽稳压器等关键设备。

#### (9) 基于无线传感器网络的油田综合数字生态管理系统

基于无线传感器网络技术的油田综合数字生态管理系统通过创新技术和管理理念，建立全油田统一的生产管理、综合研究的数字化管理平台，可以显著提升生产工艺过程的实时监控水平。无线传感器网络融合了传感器技术、嵌入式计算技术、无线通信技术及分布式信息处理技术，具有多学科高度交叉、技术高度集成的特点，它是物联网技术的核

心和基础。无线传感器网络系统的硬件电路分为数据采集、路由节点、网关节点以及监控中心电路等，软件主要由无线通信网络软件的子系统与监控中心管理软件的子系统组成。无线传感器网络所采集的各类数据，通过无线网络传输到控制中心后，经过相应软件处理后存储，并完成动态信息自动录入、复杂数据的查询、分析和挖掘功能，自动生成数据报表。传感器采集节点的灵活与网络的稳定应用保证了油井监控的可信赖性，有助于油井作业效率的提高和网络运行成本的降低，促进了油田生产的自动化与信息化发展。

#### (10) 海洋地震勘探的地震信号获取和处理技术

随着海洋油气勘探逐步转向深部油气层、高速屏蔽层下油气储层和复杂构造油气田等领域，为适应新勘探形势下地震资料精确成像的要求，海洋地震采集技术得到了创新和发展，在激发方式上，从平面震源发展到多层震源、立体震源；在接收方式上，从水平电缆发展到上下缆和斜缆（变深度电缆），从单一的压力型检波器电缆发展到速度和压力组合的双检波器电缆；在海洋三维勘探中，从直

线航线的窄方位角采集发展到环形宽方位角采集。这些新地震采集技术的应用，有效地克服了海洋地震勘探的不足，增加了地震原始信号的低频能量、拓宽了地震频带，提高了深部有效反射信号信噪比和成像效果，满足了复杂油气田勘探、开发的需求。同时由于地震勘探时所采集到的地震资料中包含的噪声将增多，因此需要对其进行数字处理，从中提取有用信息，从而为地震勘探的地质解释提供可靠的资料，其中信号降噪便是数字处理中尤为重要的一步，它被用于从地震资料中提取有用信息，提高地震资料的信噪比。

### （11）新型压裂技术、装备与压裂液、支撑剂及添加剂的开发

压裂是实现油气增产、提高经济效益的关键工程手段，其主要是通过地面高压装置将压裂液泵入油气储层产生裂缝，随后利用支撑剂将裂缝支撑，使其形成永久性裂缝，从而提高储层渗透性，为实现增产增效提供重要支撑。随着油气藏勘探开发复杂程度的日益加深，传统压裂存在压裂效率低，压裂效果不理想等挑战，严重制约了复杂油气资源的经济高效开采，亟需探索新型压裂技术，研究前沿装备与压裂液，开发高性能支撑剂及添加剂，推动复杂油气资源的高效开采。新型压裂技术可以达到增大储层改造体积和裂缝复杂指数的目的，如无限级压裂、无水压裂、重复压裂、高端压裂、同步压裂、拉链式压裂、选择性压裂及工厂化压裂等。先进压裂装备，如超高压大功率压裂机组、大功率压裂车、大功率压裂泵、可完全溶解的多级压裂系统、无限级压裂滑套、可完全降解的压裂桥塞、复合压裂塞等，可以满足高泵压、低污染、远程操作、降本增效等目的。高性能压裂液和支撑剂，如耐高温压裂液体系、软粒子压裂液、超高温储层速溶压裂液、抗高温黏弹性表面活性剂基压裂液、复合压裂液体系、低密度支撑剂、新型功能性环保支撑剂等，可以达到减少对储层污染、减少漏失、有良好的悬浮性的目的。

### （12）深部金属矿开采灾害超前预警系统开发

针对复杂多场环境下深部金属矿开采灾害，开发致灾信号超前获取、灾害孕育智能分析、灾害发生超前预警、潜在灾害动态规避的成套预警系统，实现对深部金属矿开采灾害信息的智能分析与动态调控，极大地提高深部资源开发的安全性及效率。

研究方向包括：金属矿多场耦合环境下开采地压多元动态监测与分析理论；深部强卸荷作用诱发岩爆的时滞性特征与预测预报方法；深部灾害孕育演化过程特征动态拾取与实时预测模型；基于大数据的深部采动信息智能研判与灾害预警；深部采动灾害信号与类型的智能关联机制；深部开采灾害时空预测与动态调控的集成智能系统。

聚焦“深部开采灾害信息精准与实时拾取”“灾害信号智能分析与孕育过程研判”和“多场耦合下采动灾害超前预测与动态处置”，实现深部开采灾害超前预判、超前预警与超前处置，进一步推动深部矿产资源安全、绿色和高效开采。

## 2.2 Top4 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术

#### （1）概念阐述与关键技术

电动 / 混合动力汽车是新能源汽车领域的一个重要组成部分。当前，能源枯竭的危机以及环境污染的压力成为全球通病，而电动 / 混合动力汽车的高效率、低污染的特点为其带来了新的发展机遇。包括我国在内的各个国家都加大了在该领域的研发和投资力度，力求掌握其核心技术。电动汽车的动力系统部分采用的是动力电池（高压）+ 驱动电机的方式。由于电机在整体工作范围内都具有较高的效率，所以电动汽车一般为直驱方式，也有增加传动变速箱进行多档位调节的形式。混合动力汽车由于具有内燃机（燃油）与电机（耗电）两套储能和驱动系统，其结构较为复杂，模式也更加多样化。根据电机相对于传统动力系统的位置，可以将混动

方案分为 P0~P5 几个大类。动力电池由早期的铅酸蓄电池到镍氢电池再到现如今的锂电池，其性能有了长足的发展。目前常用的动力电池一般为锂离子电池，主要包括磷酸铁锂电池和三元材料锂电池。

### (2) 发展现状与未来发展趋势

2013—2018 年，我国的新能源汽车的销售量分别为：1.76 万辆、7.47 万辆、33.1 万辆、50.7 万辆、77.7 万辆、125.6 万辆。2018 年全年我国新能源汽车产销分别为 127 万辆和 125.6 万辆，比上年同期分别增长 59.9% 和 61.7%。其中纯电动汽车产销分别为 98.6 万辆和 98.4 万辆，比上年同期分别增长 47.9% 和 50.8%；插电式混合动力汽车产销分别为 28.3 万辆和 27.1 万辆，比上年同期分别增长 122% 和 118%。根据预测，国内新能源汽车的销量将在 2020 年超过 200 万辆，未来销量的年同比增速将超过 40%。

电动 / 混合动力汽车的研究重点除了稳步推进传统的能量优化与管理、动力耦合等研究方向的同时，逐步向智能联网、智能驾驶、智能出行等进阶研究方向发力。基于人 - 车 - 路协同管理的理念，在优化车辆动力配置，丰富能量管理的基础上，将其纳入到智能城市网络架构中进行综合控制，将整车性能由单车优化的模式扩展到城市整体出行面的

级别。同时基于联网与深度学习算法的高级辅助驾驶与自动驾驶等技术也成为未来的主要发展趋势。动力电池的研究主要集中在能量密度、安全性以及快充等方向。其中固态电池具有轻（能量密度高）、薄（电解液 / 质更少）、安全、柔性、电化学窗口宽、循环寿命长等优点，正逐渐受到越来越多的重视。除此之外，基于大数据与机器学习等算法的研究也为动力电池的状态预测、参数估计、动态管理等提供有力的支持。

### (3) 重点研究国家 / 地区和机构及其合作情况分析

根据表 2.2.1 可知，该方向的核心专利产出数量较多的国家是美国、中国以及日本。其中美国的占比达到 50%，中国和日本的占比分别为 16.21% 和 15.86%。

由表 2.2.2 可知，该研究方向核心专利产出数量较多的机构分别是 FORD、TOYT、GENK、HYMR。

根据图 2.2.1 可知，比较重视该领域国家或地区间合作的有美国、韩国、日本、加拿大、德国、以色列以及瑞士。其中美国拥有的合作国家数最多，它与韩国、日本、加拿大以及德国均有合作，而以色列与瑞士之间合作最多。

表 2.2.1 “高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术” 工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	145	50.00%	6514	54.63%	44.92
2	China	47	16.21%	1290	10.82%	27.45
3	Japan	46	15.86%	1688	14.16%	36.70
4	South Korea	24	8.28%	1032	8.66%	43.00
5	Germany	13	4.48%	605	5.07%	46.54
6	Switzerland	6	2.07%	261	2.19%	43.50
7	Israel	5	1.72%	231	1.94%	46.20
8	UK	3	1.03%	96	0.81%	32.00
9	Canada	2	0.69%	122	1.02%	61.00
10	Sweden	2	0.69%	111	0.93%	55.50

根据图 2.2.2 可知，所有机构中仅 HYMR 与 GLDS 之间存在合作，其他机构之间均不存在合作。

### 2.2.2 核能高温制氢及氢气透平发电技术

#### (1) 核能制氢

氢是重要的工业原料，也是未来理想的二次能源或能源载体。氢作为二次能源便于储存和运输，且可以直接作为燃料使用。除传统的合成氨、合成甲醇、石油精炼外，氢气在氢冶金、煤液化以及燃料电池汽车等领域都能够得到大规模利用。核能制氢是一种高效、清洁的大规模制氢方法，可在未来

氢气大规模供应方面扮演重要角色。以核能制氢为核心的高温堆工艺热综合利用（氢、电、热联合供应）将对我国多个工业行业的技术革命提供重要支撑，在产品升级换代、降低污染、减少碳排放等方面发挥重要作用。

核能制氢的构想始于 20 世纪 70 年代。石油危机之后，热化学循环相关的研究较多，核能制氢的国际合作也比较活跃。在第四代反应堆国际研讨会（GIF）上，探讨了氢生产、海水淡化、热利用等核能非电利用，并制定了利用核能产氢的研究开发计划，其中高温气冷堆系统设置了制氢项目管理部，

表 2.2.2 “高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术” 工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	FORD	23	7.93%	808	6.78%	35.13
2	TOYT	12	4.14%	433	3.63%	36.08
3	GENK	10	3.45%	549	4.60%	54.90
4	HYMR	10	3.45%	403	3.38%	40.30
5	GOOG	9	3.10%	573	4.81%	63.67
6	QCOM	8	2.76%	446	3.74%	55.75
7	TESM	6	2.07%	418	3.51%	69.67
8	GLDS	6	2.07%	199	1.67%	33.17
9	GENE	6	2.07%	197	1.65%	32.83
10	BETT	5	1.72%	231	1.94%	46.20

注：FORD 表示 Ford Global Technologies LLC；TOYT 表示 TOYOTA Motor Corp.；GENK 表示 General Motors Corp.；HYMR 表示 Hyundai Motor Co., Ltd.；GOOG 表示 Google Inc.；QCOM 表示 Qualcomm Inc.；TESM 表示 Tesla Motors Inc.；GLDS 表示 LG Chem Ltd.；GENE 表示 General Electric Co.；BETT 表示 Better Place GmbH。

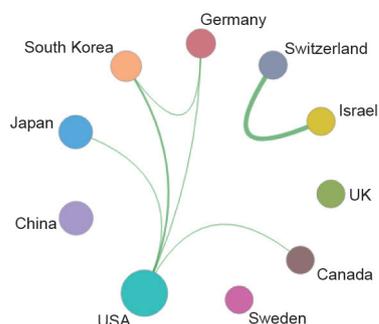


图 2.2.1 “高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术” 工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

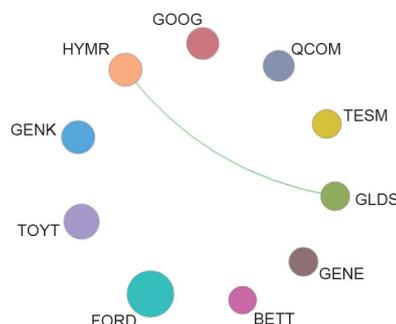


图 2.2.2 “高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术” 工程开发前沿的主要机构间合作网络

国际原子能机构 (IAEA) 设置了核能制氢经济性相关的协调项目, 有十多个国家共同参与进行核能制氢技术经济的评价。

从核能制氢技术的特点和优势可见, 高温气冷堆制氢适合对氢气集中式、大规模、无排放的应用场景, 因此所选择的与高温气冷堆耦合的制氢技术也应该具有这些特点。核能发电-电解是最成熟的技术, 可在剩余核电的消纳或特殊场景下利用小型堆电解制氢。核能辅助的化石燃料重整可用核热作为替代热源, 节省部分化石燃料并部分降低排放。例如, 如果采用高温堆工艺热辅助的天然气重整技术制氢, 可以节省约 30% 用作热源的天然气, 降低 30% 的 CO<sub>2</sub> 排放。该技术可作为近期核能制氢的过渡技术, 在反应堆与制氢厂耦合、核氢安全性研究与许可证申请、核能制氢技术经济评价等方面进行探索和推进。

从远期来看, 热化学循环与高温蒸汽电解以高温气冷堆的高温工艺热为热源, 以水为制氢原料, 可完全消除制氢过程的碳排放, 是更具发展前景的核能制氢技术。核能制氢技术的发展路线必须考虑以下因素: 技术特性 (包括产氢能力、产品氢气纯度、终端用户、废物管理)、成本 (氢气价格、技术经济评价假设的适用性、研发费用等)、风险 (技术发展现状与成熟度、研发风险) 等。

## (2) 高温气冷堆氦气透平直接循环发电

高温堆气体透平直接循环发电建立在闭式布雷顿循环的理论基础上, 将气体透平与模块式高温气冷堆相结合, 利用高温堆产生的高温气体直接推动气体透平做功, 进行核能高效发电。氦气透平直接循环发电的效率可以达到 50% 以上。

电氦气透平压气机组是氦气透平直接循环发电系统的核心部件, 氦气条件下的透平压气机组研制在国际上目前尚无成功先例, 而电磁轴承又是高温气冷堆氦气透平发电系统的关键技术之一。由于高温气冷堆的堆芯出口温度可以达到 900℃ 以上, 因此压力壳结、透平叶片等能够耐高温高压的结构和

部件材料也是高温堆气体透平直接循环发电的关键技术之一。

目前国外针对氦气透平直接循环的研究主要集中在以下几个项目: 美国和俄罗斯合作开发的 GT-MHR 计划和日本的 GTHTTR300 计划, 其堆芯出口温度均为 850℃, 均采用闭式氦气透平直接循环, 透平叶片采用镍基合金, 不设置叶片冷却, 但是至今为止还停留在研究设计阶段; 南非的 PBMR 计划起初设计堆芯出口温度为 900℃ 的氦气透平直接循环, 之后由于财政等方面的问题迫使项目终止。我国清华大学则以 HTR-10GT 项目计划, 开展商用高温气冷堆氦气透平发电关键技术研究, 包括商用高温气冷堆氦气透平发电厂方案设计, 氦气透平基本特性研究, 大型板翅式换热器的工程试验研究和大型电磁轴承的工程试验研究等内容。目前, 国内第一台氦气压机单级样机试验装置已经建立并进行了大量试验。用于工程验证试验的大型重载柔性转子电磁轴承试验台架也已建造完毕, 工程实验正在进行中。

在高温气冷堆领域, 具有固有安全性的模块式高温气冷堆是一个先进的反应堆堆型, 氦气透平直接循环发电则是一个理想的能量转换技术方案。以模块式高温气冷堆和氦气透平循环为基础发展起来的超高温气冷堆概念, 被当今国际社会认为是第四代核能系统中有竞争力的候选方案之一。从远期来看, 随着超高温气冷堆技术的发展和氦气透平直接循环关键技术和部件的突破, 氦气透平直接循环发电技术将得到广阔的发展和应用。在此基础上如果采用氦气直接透平和蒸汽透平联合的发电方式, 则可以进一步提高其发电效率。

## (3) 重点研究国家/地区和机构及其合作情况分析

根据表 2.2.3 可知, 该研究方向的核心专利产出数量较多的国家是中国、日本、韩国。其中, 中国占据第一位, 核心专利比例超过 75%。

由表 2.2.4 可知, 该研究方向的核心专利产出

数量较多的机构分别是 UYQI、HRBE、CNUU。

根据图 2.2.3 可知，国际间无合作，但是 GIF 组织内的合作在图中没有反映。

根据图 2.2.4 可知，UYQI、CNUU、CHHN 之间有合作。

通过以上数据分析可知，中国、日本和韩国在核能高温制氢技术的核心专利产出处于世界前列。

### 2.2.3 基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统

微地震监测技术是水力压裂中监测裂缝发育情况的有效地震方法，目前普遍应用于各大油气

田的开发、规划，裂缝不仅决定了注水效果，而且控制了层系的划分和注采井网的布置，直接决定了油田开发的效果。但在实际应用中仍存在诸多问题，开展微地震震源机制反演及裂缝解释和成像技术非常关键，为油藏描述提供有效的信息。研究方向包括：利用目标区域的数据信息进行裂缝扩展模拟，获得压裂裂缝的形态分布信息；利用目标区域的微地震监测数据反演压裂引起的微地震事件，获得压裂裂缝的强度范围；根据所述形态分布信息和所述强度范围得到压裂相分布模型；并且通过对目标数据体中的每个体积单元，根据检波器的接收信号恢复原始信号；计算各体

表 2.2.3 “核能高温制氢及氦气透平发电技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家/地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	148	75.51%	181	43.30%	1.22
2	Japan	23	11.73%	94	22.49%	4.09
3	South Korea	12	6.12%	91	21.77%	7.58
4	USA	10	5.10%	44	10.53%	4.40
5	France	1	0.51%	8	1.91%	8.00
6	Germany	1	0.51%	0	0.00%	0.00
7	India	1	0.51%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4 “核能高温制氢及氦气透平发电技术”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	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	UYQI	36	18.37%	105	25.12%	2.92
2	HRBE	15	7.65%	5	1.20%	0.33
3	CNUU	14	7.14%	9	2.15%	0.64
4	CHHN	13	6.63%	9	2.15%	0.69
5	JAAT	7	3.57%	3	0.72%	0.43
6	USHS	7	3.57%	1	0.24%	0.14
7	KAER	5	2.55%	23	5.50%	4.60
8	SUZH	5	2.55%	0	0.00%	0.00
9	KOAD	4	2.04%	2	0.48%	0.50
10	XENE	4	2.04%	0	0.00%	0.00

注：UYQI 表示 Univ Tsinghua；HRBE 表示 Harbin Electric Co., Ltd.；CNUU 表示 China National Nuclear Corporation；CHHN 表示 China Huaneng Group Corp.；JAAT 表示 Japan Atomic Energy Agency；USHS 表示 Univ Shanghai Sci & Technology；KAER 表示 Korea Atomic Energy Res Inst；SUZH 表示 Suzhou Hailu Heavy Ind Co., Ltd.；KOAD 表示 Korea Adv. Inst. Sci. & Technology；XENE 表示 X-Energy LLC。

积单元的能量，形成四维成像结果并输出，通过压裂相分布模型得到多尺度压裂裂缝模型。这项技术既体现了裂缝本身的形态和方位特征，又考虑微地震反演的裂缝分布范围及强度信息，能够更准确地表征水力压裂裂缝的空间分布，还能反映出各个时刻裂缝的变化过程。总之，基于微地震检测的裂缝形态处理方法和系统可以对压裂过程中的微地震数据连续采集记录并实现实时处理和形象化解释，有效地优化压裂方案，提供油气藏资源评价和钻井位置图，达到增产和指导油气田开发的目的。

该前沿中核心专利的主要产出国家和地区为美国、加拿大、法国、荷兰和中国（见表 2.2.5），主要产出机构是 SLMB, HALL 和 PRAD（见表 2.2.6），

这些国家和机构之间已开展合作交流（见图 2.2.5 和图 2.2.6）。

## 2.2.4 煤炭安全智能精准开采技术

### （1）概述与重要性

煤炭精准开采是以透明空间地球物理和多物理场耦合为基础，以少人（无人）开采技术和安全开采技术为支撑，实现煤炭开采零死亡；以数字化、信息化为重要手段，将不同地质条件的煤炭开采扰动影响、致灾因素、开采引发生态环境破坏等统筹考虑，在时空上实现准确高效的煤炭无人（少人）智能开采与灾害防控一体化的未来采矿新模式，实现煤炭连续开采、资源回收率达国际领先水平。煤炭精准开采对提高煤炭安全开采技术水平、资源开

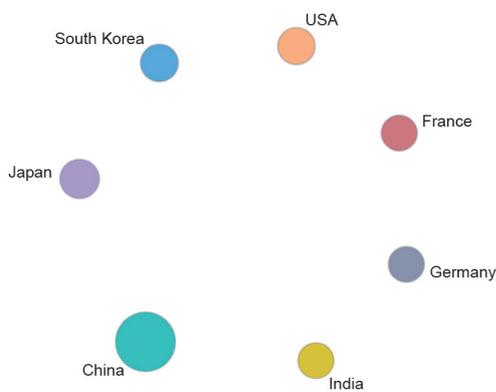


图 2.2.3 “核能高温制氢及氦气透平发电技术”工程开发前沿的主要国家/地区间合作网络

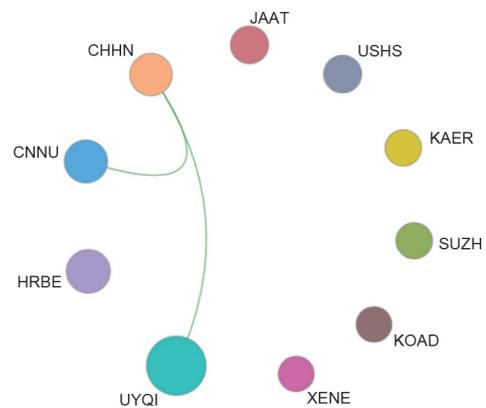


图 2.2.4 “核能高温制氢及氦气透平发电技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

表 2.2.5 “基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家/地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	57	82.61%	707	82.11%	12.40
2	Canada	13	18.84%	220	25.55%	16.92
3	France	10	14.49%	189	21.95%	18.90
4	Netherlands	10	14.49%	189	21.95%	18.90
5	China	5	7.25%	88	10.22%	17.60
6	Russia	2	2.90%	16	1.86%	8.00
7	UK	1	1.45%	28	3.25%	28.00
8	Germany	1	1.45%	9	1.05%	9.00

表 2.2.6 “基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统”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	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	SLMB	20	28.99%	289	33.57%	14.45
2	HALL	16	23.19%	192	22.30%	12.00
3	PRAD	14	20.29%	255	29.62%	18.21
4	BAKO	5	7.25%	42	4.88%	8.40
5	UYPE	2	2.90%	45	5.23%	22.50
6	CARB	2	2.90%	39	4.53%	19.50
7	TEXA	2	2.90%	22	2.56%	11.00
8	LGNE	2	2.90%	19	2.21%	9.50
9	CONO	2	2.90%	18	2.09%	9.00
10	TATN	2	2.90%	16	1.86%	8.00

注：SLMB 表示 Schlumberger Ltd.；HALL 表示 Halliburton Co.；PRAD 表示 Prad Res. & Dev. Ltd.；BAKO 表示 Baker Hughes Inc.；UYPE 表示 Univ China Petroleum；CARB 表示 Carbo Ceramics Inc.；TEXA 表示 Univ Texas System；LGNE 表示 Logined BV；CONO 表示 Conocophillips Co.；TATN 表示 TATNEFT。

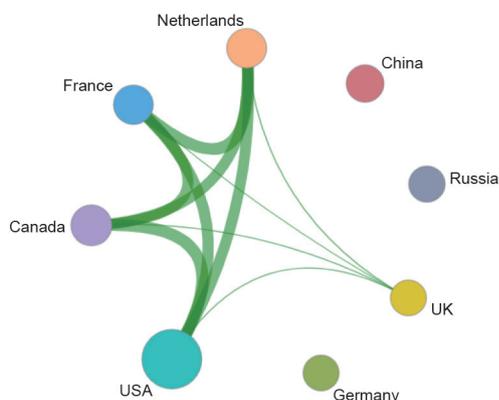


图 2.2.5 “基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

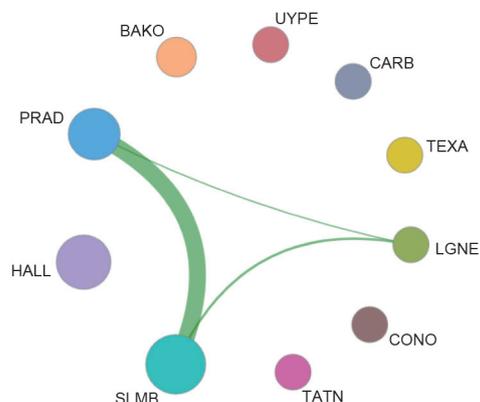


图 2.2.6 “基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统”工程开发前沿的主要机构间合作网络

发效率及实现煤炭工业由劳动密集型向具有高科技特点的技术密集型转变意义重大。

煤炭安全智能精准开采技术需要解决以下科学问题：煤炭开采多场动态信息(如应力、应变、位移、裂隙、渗流等)的数字化定量；采场及开采扰动区多源信息采集、传感、传输；基于大数据云技术的多源海量动态信息评估与筛选机制；基于大数据的多相多场耦合灾变理论研究；

深度感知灾害前兆信息智能仿真与控制；矿井灾害风险预警；矿井灾害应急救援关键技术及装备。

### (2) 历史现状与趋势

纵观国际采矿史，矿难发生的致灾机理和地质情况不清、灾害威胁不明、重大技术难题没有解决等是导致事故的主要原因。要想从根本上破解煤矿安全高效生产难题，煤炭工业须由劳动密集型升级

为技术密集型，创新发展成为具有高科技特点的新产业、新业态、新模式，走智能、少人（无人）、安全的开采之路。第3次工业革命势头强劲，信息化技术日新月异，给采矿业由传统的经验型、定性决策为主向精准型、定量智能决策转变提供了又一次创新、发展的机遇以及挑战，为实现智能少人（无人）的煤炭科学开采提供了可能。

### （3）重点研究国家/地区和机构及其合作情况分析

根据表 2.2.7 可知，煤炭安全智能精准开采技

术的核心专利主要产出国家是中国和澳大利亚。其中，中国核心专利公开量比例超过 98%，且平均被引频次明显高于澳大利亚。

由表 2.2.8 可知，煤炭安全智能精准开采技术核心专利产出数量最多的机构分别是 UYMB、UYMT、CHLY，核心专利产出比例均超过 5%。

根据图 2.2.7 可知，较为注重该领域研究的国家间无合作。

由图 2.2.8 可知，有合作关系的机构有 CHLY 和 HUAI，UYMT 和 UYMB。

表 2.2.7 “煤炭安全智能精准开采技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家/地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	117	98.32%	198	100%	1.69
2	Australia	2	1.68%	0	0%	0.00

表 2.2.8 “煤炭安全智能精准开采技术”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	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	UYMB	24	20.17%	13	6.57%	0.54
2	UYMT	8	6.72%	40	20.20%	5.00
3	CHLY	6	5.04%	23	11.62%	3.83
4	UYCQ	5	4.20%	27	13.64%	5.40
5	ULNT	5	4.20%	2	1.01%	0.40
6	UYXS	5	4.20%	2	1.01%	0.40
7	UYHP	4	3.36%	5	2.53%	1.25
8	UYLG	3	2.52%	16	8.08%	5.33
9	UNBS	3	2.52%	7	3.54%	2.33
10	HUAI	3	2.52%	3	1.52%	1.00

注：UYMB 表示 Univ China Mining & Technology Beijing；UYMT 表示 Univ China Mining & Technology Xuzhou；CHLY 表示 China Coal Technology & Eng Group；UYCQ 表示 Univ Chongqing；ULNT 表示 Univ Liaoning Technical；UYXS 表示 Univ Xi'an Sci & Technology；UYHP 表示 Univ Henan Polytechnic；UYLG 表示 Univ Anhui Sci & Technology；UNBS 表示 Univ Beijing Sci & Technology；HUAI 表示 Huaibei Mining Ind Group Co., Ltd.。



图 2.2.7 “煤炭安全智能精准开采技术”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

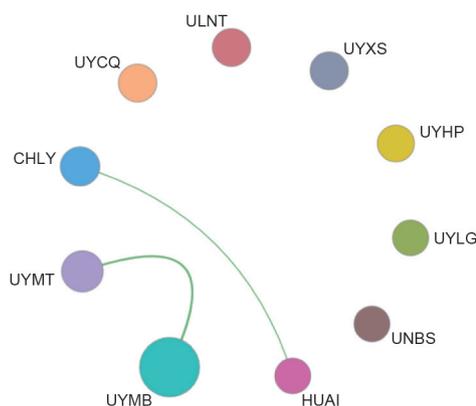


图 2.2.8 “煤炭安全智能精准开采技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

## 领域课题组人员

课题组长：翁史烈 倪维斗 彭苏萍 顾大钊

课题组副组长：黄震 巨永林 刘静

工作组办公室：

能源与矿业工程学部办公室：宗玉生 解光辉

《Frontiers in Energy》期刊编辑部：

刘瑞芹 黄冬苹

图书情报人员：陈天天 于夏薇

课题组成员：

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：

程林 胡伟 林今 刘峰 罗海云

上官文峰 吴文传 杨林 张扬 章俊良

邹建新

执笔人：胡伟 上官文峰 杨林 张海

章俊良 邹建新

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：江小川 元一单 马如冰 郭强

周红波 张涛 李云屹 郭晴 孙晓龙

郭英华

执笔人：江小川 周红波 郭英华 郭晴

苏罡

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：谢桂青 袁顺达 洪为 王淑芳

王坤 梁坤 黄金亮

执笔人：洪为 王淑芳 王坤 梁坤

黄金亮

矿业科学技术与工程学科组：

组长：袁亮 李根生

秘书长：张农 吴爱祥 周福宝 宋先知

参加人：尹升华 江丙友 孙金声 黄中伟

王海柱 冯晓巍 梁东旭 吴冬梅

执笔人：尹升华 江丙友 孙金声 黄中伟

王海柱 冯晓巍 梁东旭