

四、能源与矿业工程领域

1 工程研究热点及工程研究焦点解读

1.1 工程研究热点发展态势

能源与矿业工程领域¹研判的 Top10 工程研究热点见表 1.1.1。Top10 工程研究热点涉及了能源与矿业工程领域的多个研究方向，其中“高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结”“混合可再生能源系统研究及优化”“二氧化碳固定、存储及利用”“太阳能热化学过程”“波浪能资源和潜力评估”和“高效动力电池热能管理系统”6 个是新兴热点，“极端条件下的流动、传热传质和燃烧”“区域工业能源效率及二氧化碳减排”“斯特林发动机”和“垂直轴风力发电机结构、材料和性能”4 个是传统研究的深化和拓展。各个热点所涉及的核心论文自 2011 年至

2016 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

(1) 高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结

太阳能光伏产业主要包括光伏材料、太阳电池与组件、光伏逆变器和光伏系统集成技术等，但核心器件是太阳电池，目前商业化的太阳电池主要是晶体硅太阳电池与薄膜太阳电池两大类。研发更高效、更经济、更环境友好的太阳电池无疑是相关科技界乃至全人类面临的重大课题。迄今为止，受益于以硅为代表的半导体材料科学与技术的蓬勃发展，广泛的应用和相对低廉的成本使得已经较大规模产业化的太阳能光伏发电技术仍以硅基 p-n 结为基本电池结构（市场份额在 90% 以上）。但多种其他材料结构，包括多种半导体薄膜乃至钙钛矿结构，正在与硅基光伏结构竞争并迎头赶上。现阶段高效太阳电池的研发热点包括效率大于 22% 的特

表 1.1.1 能源与矿业工程领域 Top10 工程研究热点

序号	工程研究热点	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	专利引用篇数
1	高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结	87	7724	88.78	2014.05	35.6%	1
2	混合可再生能源系统研究及优化	49	1395	28.47	2014.24	18.4%	1
3	极端条件下的流动、传热传质和燃烧	212	4888	23.06	2014.00	16.0%	2
4	太阳能热化学过程	37	1574	42.54	2013.35	16.2%	0
5	二氧化碳固定、存储及利用	46	2230	48.48	2014.11	19.6%	0
6	区域工业能源效率及二氧化碳减排	47	1655	35.21	2013.64	6.4%	1
7	波浪能资源和潜力评估	44	1538	34.95	2013.48	11.4%	1
8	斯特林发动机	31	919	29.65	2014.39	54.8%	0
9	高效动力电池热能管理系统	41	1112	27.12	2014.24	9.8%	1
10	垂直轴风力发电机结构、材料和性能	41	1068	26.05	2014.00	12.2%	2

¹ 2017 年 1 月 15 日能源与矿业工程学部常委会讨论决定：作为项目第一期探索，能源与矿业工程领域研判的学科范围只涉及能源和电气科学技术与工程（热能动力工程、电气工程、水电工程、能源新技术）、核科学技术与工程（核能工程、核材料与核燃料、核安全、防护和环境、核科学技术应用）、地质资源科学技术与工程（油气资源和勘探）和矿业科学技术与工程（煤炭开发、石油和天然气工程）。

表 1.1.2 能源与矿业工程领域 Top10 工程研究热点逐年核心论文发表数

序号	工程研究热点	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1	高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结	3	10	12	29	21	12
2	混合可再生能源系统研究及优化	1	3	6	16	19	4
3	极端条件下的流动、传热传质和燃烧	22	16	30	47	67	30
4	太阳能热化学过程	5	7	9	5	8	3
5	二氧化碳固定、存储及利用	3	5	5	10	17	6
6	区域工业能源效率及二氧化碳减排	3	8	8	14	12	2
7	波浪资源和潜力评估	6	6	9	9	12	2
8	斯特林发动机	0	1	6	7	14	3
9	高效动力电池热能管理系统	3	0	5	13	16	4
10	垂直轴风力发电机结构、材料和性能	5	5	6	4	11	10

色结构晶体硅电池和先进薄膜电池两个方面。特色结构高效晶体硅电池主要包括非晶硅 / 晶体硅异质结太阳电池、背接触太阳电池和将背接触设计理念应用到异质结结构上的硅背接触异质结太阳电池三种。先进薄膜电池的研究热点包括新型钙钛矿结构太阳电池和铜铟镓硒及其替代物铜锌锡硫太阳电池等。目前，美国、德国、日本和瑞士等国家的高校和科研机构研究人员瞄准最新光伏电池技术，紧密合作，在本热点研究领域取得了突破性的进展。

(2) 混合可再生能源系统研究及优化

可再生能源（风能、太阳能）具有间隙性、波动大的特点，通过组成混合能源系统可以提高输出稳定性，既可以实现可再生能源充分利用，又可以满足用户负荷的需求，如太阳能 - 风能混合能源系统和可再生能源 - 天然气燃气轮机（或燃气内燃机）发电混合能源系统等。目前利用可再生能源的混合系统主要有两类：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进行结合的混合发电系统，利用多种能源形式进行混合发电可大幅提高能源利用效率并控制环境污染问题，并有效实现低碳

经济和能源利用结构的优化。

从工程学科上来看，混合可再生能源的发电系统涉及动力机械、流体机械、材料和电力电子及控制等多个学科。目前的主要研究热点包括：混合能源系统构成的拓扑结构，混合能源系统的热力循环特性，混合能源系统动态模型建立，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。

(3) 极端条件下的流动、传热传质和燃烧

流动、传热传质和燃烧涉及能源领域的众多工业应用，其应用场景涉及高温、高压和高热流密度等极端工况。该热点主要包括四个分支，分别为蒸发和凝结、沸腾换热、传热优化以及燃烧。沸腾、蒸发和凝结是气液相变的主要形式，在电子器件热管理、海水淡化、燃烧过程中起着非常重要的作用。传热优化是指通过改变换热器（散热器）类型、结构、表面和流体等，使得在固定换热器（散热器）换热面积等约束下，实现高温高压、含尘含灰和高热流密度等条件下传热能力的最大化。燃烧是一种强烈的化学放热反应，是目前产生动力的主要途径，广泛地应用于燃气轮机、内燃机和工业炉等众多领域。该热点包含的问题涉及多相、多组分、湍流流动、化学反应和多目标优化等关键技术问题，需采

用经典理论分析、高精度模拟计算和先进光学测试等综合技术手段进行深入研究。在发展基础理论的同时，必须兼顾为实际工业生产提供理论指导和技术方法。

（4）太阳能热化学过程

太阳能热化学过程主要是利用热化学反应过程，将所聚焦的太阳能转化为碳氢燃料的化学能，从而实现太阳能的高效转换和高密度储能。利用该技术可以在太阳能资源丰富的地方将太阳能转化为二次燃料再运输到其他地方使用，并能解决单独太阳能热发电系统不稳定、不连续的问题。

太阳能热化学过程的主要应用研究包括水解反应、甲烷重整耦合、煤气化和化石燃料裂解等，相关研究成果主要表现在高温太阳能热化学反应器设计与研制、催化剂研发、复杂太阳能集热器阵列汽阻和高温直接吸收式真空管材料等。近年来，利用太阳能热化学过程实现对二氧化碳的固定和利用的研究备受关注。以某些金属氧化物作为催化剂或者氧化还原中间体（氧载体）的方式分解二氧化碳以获得一氧化碳或某些碳氢燃料，具体过程包括二氧化碳分解和两步法热化学氧化还原循环等，研究主要聚焦在高效催化剂的制备、反应动力学及机理和目标产物选择性等关键科学技术问题。

（5）二氧化碳固定、存储及利用

二氧化碳是最主要的温室气体。碳捕集与封存（CCS）被认为是解决二氧化碳减排问题的主要方案。可实现的储存地点包括地质构造（石油天然气储层、深盐沼地、不可开采的煤储层等）和海洋等。CCS技术已经在世界许多地区进行了一定规模的实践，并且被认为是一种较成熟的技术。同时，该技术的投资成本、经济效益和安全性等的评估也受到关注。近年来人们开始研究更合适的二氧化碳解决方案，其中利用化学转换的方式进行二氧化碳固定，并对其实现有价值的利用备受瞩目。

二氧化碳的利用方式主要包括物理应用和化学应用。二氧化碳的物理应用是指利用它的物理性能，

如作为空调制冷剂、固化硬化剂和食品添加剂等。二氧化碳的化学利用表现出更广泛的应用前景，其关键技术是解决二氧化碳分子的活化问题，主要方法有：生物法、光化学还原、电化学还原以及非均相和均相催化还原等，以二氧化碳为原料合成小分子或直接固定为高分子材料（如甲醇、甲酸、碳酸二甲酯、尿素、水杨酸、碳酸酯、羧酸和烃类等）。以能源转换和利用为目的的二氧化碳重整制合成气及制取各种液体燃料备受关注，高转换效率、高选择性和高稳定性的催化剂的制备以及催化反应机理和动力学研究成为当前热点。

（6）区域工业能源效率及二氧化碳减排

区域工业能源效率就是在一定区域范围内工业生产过程中消耗能源所产生的效益，它是一种投入产出比，是指投入的能源成本和企业得到的收益之间的比值，能源成本越低其能源效益就越高。

发展中国家普遍存在能源利用综合效率（特别是工业用能效率）低的问题。中国在以较快增长速度发展经济的同时，也消耗了大量的能源，排放的二氧化碳量也大幅上升。面对支撑经济发展和减少碳排放的双重挑战，区域工业领域不仅要严格控制能源消费总量，还需要调整产业结构，将能源利用方式由粗放型向集约型转变，合理有效地提高能源利用效率。要立足国内能源结构的现状，提高煤炭利用效率，加大对可再生能源的利用，以降低能源需求压力、减少能源供给制约，缓解能源生产所带来的环境污染问题。目前主要的研究热点包括：基于大数据的能耗分析、实时耗能计量和统计、工业用能高效转换新技术和CCS技术等。

（7）波浪能资源和潜力评估

波浪能是由风产生的，是太阳能辐射的衍生物。波浪能的主要优点是它具有高质量的形式——振动的机械能，并且可以进行长距离、几乎没有能量损失的传递。目前，有关波浪能的利用与开发主要集中在波浪能资源评价方法研究和波浪能转换装置的优化设计。

其中，波浪能资源评价方法研究主要集中在：基于先进的海洋波浪的实时监控系统和测试数据，采用科学合理的数学模型，较为精确地预估未来某一个时期（短期或长期）、某一个海域的波浪能资源分布，为波浪能开发项目的可行性分析提供理论依据和支持。

根据能量的收集方法，波浪能转换装置可分为振荡水柱式、筏式、摆式、鸭式、越浪式和点吸收式等类型。其中，振荡水柱式波浪能转换装置是最早开发的波浪能转换装置。目前，波浪能转换装置的研究主要集中在：研究开发高效、安全、长效的波浪能转换装置，同时对波浪能转换装置对海洋生态环境和渔业发展等方面的影响进行评价和分析。

（8）斯特林发动机

斯特林发动机（Stirling engine）是一种外部供热的活塞式发动机，它以气体作为工作介质，按闭式回热循环的方式工作。一个典型的斯特林发动机工作循环包括：工作介质通过换热器被外界热源加热，工作介质受热膨胀，对外界输出有用功，工作介质被冷却、压缩，再一次重新利用。理想化的斯特林循环装置由一副装有对置活塞的气缸、加热器、冷却器及一个设置于两活塞之间的回热器组成。斯特林发动机一般采用结构简单、性能可靠、雾化性能好、泵用能量低的压力涡流喷嘴。到目前为止，斯特林发动机的工作循环及关键部件的性能研究一直是斯特林发动机研究的重点。

斯特林发动机能源适应性很广，可以采用除常规柴油以外的各类替代燃料（包括沼气、煤层气、天然气，甚至可以采用秸秆和木材等），因此替代燃料斯特林发动机的性能研究成为研究热点，研究主要针对备用电站发电、冷热电联产等领域。

斯特林发动机可以完全脱离大气环境工作。它具有振动小、噪声低和运转宁静的特点，可以消除航迹，利于长期潜航，适用于潜艇的动力。目前许多国家也在致力于研究和研制潜艇和深潜器用的斯特林发动机。因此高背压条件下的斯特林发动机的

喷雾、燃烧和可靠性也是其研究热点。

（9）高效动力电池热能管理系统

动力电池热能管理是使动力电池处于理想热环境的保证，对电池的安全、寿命和性能等均有重要影响。需要解决电池生热机理及生热量预测模型、换热介质材料及器件、高效热能管理系统模式及设计方法和电池系统温度控制与电池单体间的温差控制等关键技术问题。可以通过空气、液体和相变材料等介质或复合介质换热，对电池进行外部散热、加热（也可通过电加热方式）或恒温等主动或被动热管理；通过建立电池系统在全工况和全环境温度条件下的热-机-电多物理场耦合仿真模型和方法，研究热能管理系统模式并进行多目标设计优化，可使电池系统温度被控制在理想温度，并实现单体电池间的温差控制；采用热管技术、热泵技术、微通道换热片技术等，实现对电池系统的高效热能管理；通过能表征电池系统温度场分布的多点温度反馈，实现对电池系统温度的智能控制。接下来，预计还将主要开展以下研究：先进相变材料与流体换热复合的热能管理技术；基于电池生热量预测的电池热能管理预测控制；面向电池单体或电池系统分区的主动精益热能管理；通过外部电流脉冲激励或内置加热电路利用电池自身能量的单体电池内部温度调节热管理技术等。

（10）垂直轴风力发电机结构、材料和性能

垂直轴风力发电机是一种中小型风力发电设备，具有安装方便、启动风速低、维修便利等特点，这类风力发电机是风能利用的重点方向之一。垂直轴风力发电机按风轮叶片工作原理可分为阻力型、升力型和升力-阻力组合型。与传统风力发电机相比，垂直轴风力发电机具有以下优点：高效利用风场，占地面积小；结构简单，质量较轻，维修方便；可以接受全方向来风，抗风能力强；设备使用寿命长，噪声污染低；不需尾翼和偏航系统来驱动桨叶；增速齿轮箱和发电机能安装在地面上。垂直轴风力发电机发电可与太阳能、小型水力发电、天然气发

电和地热发电等组成互补发电系统。

垂直轴风力发电技术属于综合性系统工程，涉及空气动力学、计算流体力学、材料力学、自动控制 and 电机学等诸多学科。其研究热点有：垂直轴风力发电机叶片空气动力学性能分析，高性能垂直轴风力发电机叶片设计技术，垂直轴风力发电机结构动力优化研究，风力发电机并网及控制技术研究。

1.2 工程研究焦点解读

1.2.1 高效太阳电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结

（1）概念阐述和发展现状

化石燃料能源的使用促进了人类社会的进步，但是化石燃料的过度消耗也导致了全球气候变暖和生态环境的恶化，给人类的生存带来了巨大威胁。改变能源消费结构，大力发展可再生能源，已成为世界各国的共识。在众多的可再生能源中，太阳能具有取之不尽用之不竭、清洁安全无污染和应用地域广阔等特点，因此特别受到人们的重视。近几十年来，以太阳能光伏发电为代表的可再生能源发展迅速，但截至 2015 年底，全球太阳能光伏发电仅占全球发电量的 1.2%，中国 2016 年光伏发电量为 662 亿千瓦时，也只占全社会总用电量的 1.1%。预计太阳能光伏发电将在 2030 年占到世界能源供给的 10% 以上，届时会对世界能源供给和能源结构调整做出实质性的贡献。因此，无论是在全球还是在中国，太阳能光伏产业都具有很大的发展前景。太阳能光伏产业主要包括光伏材料、太阳电池与组件、光伏逆变器、光伏系统集成技术等，但核心器件是太阳电池，目前商业化的太阳电池主要是晶体硅太阳电池与薄膜太阳电池两大类。研发更高效、更经济、更环境友好的太阳电池无疑是相关科技界乃至全人类面临的重大课题。

迄今为止，受益于以硅为代表的半导体材料科学与技术的蓬勃发展，广泛的应用和相对低廉的成

本使得已经较大规模产业化的太阳能光伏发电技术仍是以硅基 p-n 结为基本电池结构（市场份额在 90% 以上）。但多种其他材料结构，包括多种半导体薄膜乃至钙钛矿结构，正在与硅基光伏结构竞争并迎头赶上。现阶段高效太阳电池的研发热点包括效率大于 22% 的特色结构晶体硅电池和先进薄膜电池两个方面。特色结构高效晶体硅电池主要包括非晶硅 / 晶体硅异质结太阳电池、背接触太阳电池和将背接触设计理念应用到异质结结构上的硅背接触异质结太阳电池三种。先进薄膜电池的研究热点包括新型钙钛矿结构太阳电池和铜铟镓硒及其替代物铜锌锡硫太阳电池等。

硅材料原料丰富以及晶体硅太阳电池效率高、性能稳定，这些特点决定了晶体硅太阳电池具有巨大的产业化优势。晶体硅太阳电池的产业化技术储备雄厚，目前市场主流的钝化发射极背面接触（PERC）电池正在如火如荼地进行产业化（效率为 21.0%~21.5%），非晶硅 / 晶体硅异质结太阳电池和背接触太阳电池的产业化工作也在快速发展中，下一代硅背接触异质结太阳电池技术也日趋成熟。相对而言，先进薄膜电池技术的产业化还有很长的路要走。现阶段，钙钛矿太阳电池的发展主要体现在继续冲高效率、大面积制备、稳定性和无毒替代等方面，产业化工作刚开始探索；铜铟镓硒薄膜太阳电池技术的发展在于进一步缩小产业化组件效率（~16%）与实验室小面积电池效率的巨大差异和铜锌锡硫材料的替代。薄膜太阳电池因为低材料消耗和不断提高的转换效率在未来光伏电池技术发展中也占有重要的位置，柔性薄膜电池是其发展的最重要特色之一。柔性太阳电池也一直是太阳电池研发的一个热点问题，可以利用塑料和金属等柔性片材作为电池的衬底材料，这也是薄膜电池的发展优势，以满足未来消费者对能源的差异化需求。

（2）我国现状

从 2005 年以来，中国光伏产业发展突飞猛进，近两年世界 75% 以上的太阳电池组件都产自中国，

预计中国作为太阳能电池生产第一大国的地位在未来很长一段时间内不会改变。目前常规工艺单晶硅电池效率可以达到 20%~21%，多晶硅电池效率达到 18%~19%。中国光伏企业几乎全部集中在常规工艺晶体硅电池领域，中国太阳能光伏产业在这一领域处于领跑地位，使得太阳能光伏产业成为中国为数不多的具有国际竞争优势的战略性新兴产业。目前中国一些光伏骨干企业和重点大学、研究机构已经开始将效率超过 22% 的晶体硅太阳能电池规模化生产作为重点突破方向，在国家科技部“863”计划等计划的支持下，通过国际合作，非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池和背接触太阳能电池技术取得了明显的进步，在国际上已处于并跑地位，但硅背接触异质结太阳能电池研发则刚刚起步，还处于跟跑阶段。这几年钙钛矿太阳能电池的研究和产业化在中国发展很快，已形成一大批特色技术，在产业化探索方面也取得较好的进展，目前在国际上已处于并跑地位。虽然我国许多高校和科研机构很早就开展了铜铟镓硒等薄膜太阳能电池的研究，但与国际先进水平的差距是巨大的。这几年中国一些薄膜电池骨干企业通过引进欧美先进技术、甚至收购欧美主流铜铟镓硒薄膜电池公司，大举进军铜铟镓硒薄膜电池领域，使得中国的铜铟镓硒薄膜电池产业化水平发展迅猛，目前已处在并跑地位。应该指出的是，中国还缺乏一个像德国 Fraunhofer ISE、美国 NREL、日本 AIST、荷兰 ECN 等那样的国家级光伏实验室，中国的太阳能电池研发分散在高校、科研机构和骨干光伏企业中。虽然前几年科技部成立了两个光伏国家重点实验室，但都建设在企业中，影响了先进技术的推广和普及。

虽然中国已经是国际光伏产业大国，但绝不是光伏产业强国，我们一定要对中国光伏产业即将面临的严峻局面有清醒的认识。目前，美国、德国、日本和瑞士等国家的高校和科研机构研究人员瞄准最新光伏电池技术，紧密合作，在铜锌锡硫薄膜太阳能电池、钙钛矿结构太阳能电池、非晶硅/晶体

硅异质结太阳能电池、硅背接触太阳能电池、硅背接触异质结太阳能电池以及钙钛矿结构与晶体硅的叠层电池技术等方面取得了突破性的进展。当国际上光伏创新基础研究如火如荼地开展之时，中国光伏界要采取什么对策？难道仅满足于国际光伏产业大国？只有迎头赶上，在源头上创新、在体制上革新才能实现中国光伏产业强国之梦，引领国际光伏产业的发展。

(3) 重点研究国家和机构

在特色结构高效晶体硅太阳能电池研发方面，美国与日本的企业走在了前面。采用全背电极（IBC）和晶体硅/非晶硅异质结（HIT）两种技术，美国 SunPower 公司和日本 Panasonic 公司分别突破了 24% 的转换效率，并先后实现了平均效率为 22.5%~23.0% 的太阳能电池的产业化。最近，日本 Kaneka 公司采用硅背接触异质结（HBC）技术，将晶体硅太阳能电池转换效率的世界纪录提高到 26.6%。我国在先进薄膜电池方面也不甘落后，但最好技术也掌握在欧洲和日本、韩国等国家手中，目前欧洲薄膜太阳能电池技术联盟 Solliance 和韩国化学研究所/蔚山科学技术大学分别开发的毫米级钙钛矿太阳能电池的转换效率最高值为 22.1%，瑞士 EPFL、英国牛津大学等高校在钙钛矿太阳能电池研究方面的成绩非常突出；德国太阳能和氢能研究中心（ZSW）和日本 Solar Frontier 公司的 0.5 cm^2 铜铟镓硒薄膜太阳能电池效率分别达到 22.6% 和 22.3%。近年来另外一个新发展起来的引人注目的方向是钙钛矿结构与晶体硅的叠层电池技术，2017 年美国斯坦福大学的科研人员联合其他大学和企业用此技术集成结构电池（面积为 1 cm^2 ），将光电转换效率提高到 23.6%。

从表 1.2.1 中可以看出国际上研究高效太阳能电池的国家主要有美国、德国、日本、瑞士和西班牙等，表 1.2.2 表明研究高效太阳能电池的机构主要包括 Ecole Polytech Fed Lausanne、IBM Corp 和 Fraunhofer Inst Solar Energy Syst 等。

表 1.2.1 “高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结”工程研究焦点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	常被引论文数	专利引用篇数
1	USA	28	32.18%	4351	61.97%	155.39	8	1
2	Germany	16	18.39%	929	13.23%	58.06	3	0
3	Japan	14	16.09%	763	10.87%	54.50	2	0
4	Switzerland	13	14.94%	587	8.36%	45.15	3	0
5	Spain	7	8.05%	238	3.39%	34.00	1	0
6	Australia	5	5.75%	160	2.28%	32.00	0	0
7	China	5	5.75%	157	2.24%	31.40	0	0
8	Korea	4	4.60%	205	2.92%	51.25	0	0
9	England	4	4.60%	93	1.32%	23.25	1	0
10	France	3	3.45%	164	2.34%	54.67	1	0

表 1.2.2 “高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结”工程研究焦点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	常被引论文数	专利引用篇数
1	Ecole Polytech Fed Lausanne	9	10.34%	458	6.52%	50.89	2	0
2	IBM Corp	7	8.05%	1977	28.16%	282.43	3	1
3	Fraunhofer Inst Solar Energy Syst	7	8.05%	295	4.20%	42.14	1	0
4	Grad Univ	6	6.90%	196	2.79%	32.67	0	0
5	Okinawa Inst Sci & Technol	6	6.90%	196	2.79%	32.67	0	0
6	IREC	6	6.90%	167	2.38%	27.83	1	0
7	Catalonia Inst Energy Res	6	6.90%	167	2.38%	27.83	1	0
8	Univ Calif Los Angeles	5	5.75%	572	8.15%	114.40	0	0
9	Helmholtz Zentrum Berlin Mat & Energie	5	5.75%	389	5.54%	77.80	2	0
10	Purdue Univ	5	5.75%	238	3.39%	47.60	3	0

注：IREC 代表 Interstate Renewable Energy Council。

图 1.2.1 给出了“高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结”工程研究焦点主要国家或地区间的合作情况；图 1.2.2 给出了该研究焦点主要机构间的合作网络分布。

表 1.2.3 给出了“高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结”工程研究焦点中施引核心论文的主要产出国家或地区，美国、德国和瑞士居于前三位；

表 1.2.4 给出了该工程研究焦点中施引核心论文的主要产出机构，Ecole Polytech Fed Lausanne、IREC 和 Catalonia Inst Energy Res 位于前三名。

1.2.2 混合可再生能源系统研究及优化

可再生能源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，是保持在能源利用方面走可持续发展道路的必然选择和有效措施。近十

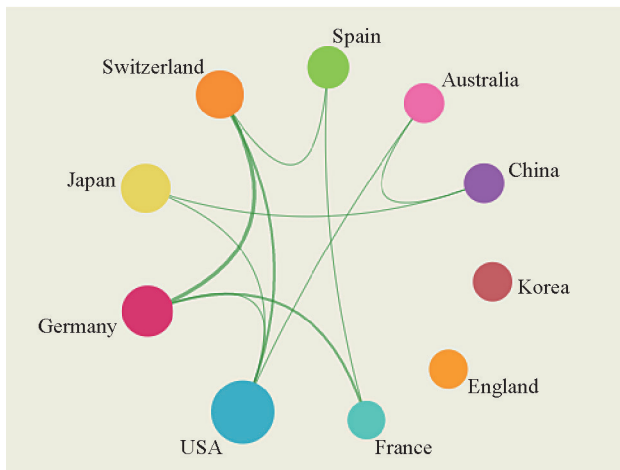


图 1.2.1 “高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络¹

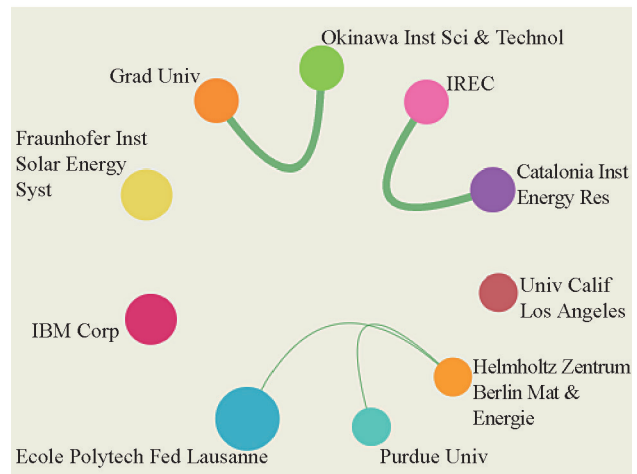


图 1.2.2 “高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结”工程研究焦点主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结”工程研究焦点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	23	25.84%	2013.87
2	Germany	12	13.48%	2013.92
3	Switzerland	12	13.48%	2014.33
4	Japan	10	11.24%	2015.00
5	Spain	6	6.74%	2014.67
6	Australia	5	5.62%	2014.80
7	China	4	4.49%	2014.75
8	England	3	3.37%	2014.33
9	Korea	3	3.37%	2014.33
10	France	2	2.25%	2015.50

多年来，混合可再生能源的发电系统在世界范围内获得越来越多的关注。

从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，且前景广阔。混合能源发电系统通常包括两种或两种以上的分布式发电电源、能量储能系统和各种电力电子控制装置等。目前利用可再生能源的混合系统主要有两类：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（如天然气等）进行结合的混合发电系统，利用多种能源形式进行混合发电可大幅提高能源利用效率并控制环境污染问题，并有效实现低碳经济和能源利用结构的优化。

从工程学科上来看，混合可再生能源的发电系统涉及动力机械、流体机械、材料、电力电子及控

¹ 图中，节点表示国家/地区，节点大小表示论文数量，节点连线表示有合作发表论文，连线粗细表示合作论文数量，全文相同。

表 1.2.4 “高效太阳能电池：包括薄膜、钙钛矿、硅异质结、背接触、硅背接触异质结”工程研究焦点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	Ecole Polytech Fed Lausanne	8	5.33%	2014.50
2	IREC	6	4.00%	2014.67
3	Catalonia Inst Energy Res	6	4.00%	2014.67
4	IBM Corp	6	4.00%	2013.17
5	Univ Calif Los Angeles	5	3.33%	2013.20
6	Helmholtz Zentrum Berlin Mat & Energie	5	3.33%	2014.20
7	Grad Univ	4	2.67%	2015.50
8	Fraunhofer Inst Solar Energy Syst	4	2.67%	2013.75
9	Natl Renewable Energy Lab	4	2.67%	2013.50
10	Univ Barcelona	4	2.67%	2014.25

制等多个学科。

风电和光伏发电等可再生能源之间具有天然的互补特性，并且水电具有快速调节的能力。从时间角度来说，白天光照充足，风力偏弱；夜晚没有光照，但风力充足；晴朗天气光照强而风力弱；阴雨天气光照弱而风力强。光伏发电的时间局限性和风力发电的不稳定性是这两种电源的固有缺陷，必须与具有相当规模和较好调节性能的备用电源搭配，风-光伏发电才能成为国民经济发展的可靠保证。水电是规模大、调节性能良好的电源，可以充分利用水库的调节能力，克服光伏和风能发电不连续、不稳定的缺点，组成风-光-水互补发电系统，确保供电质量。因此，保证混合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关键技术。

针对风电和光伏发电等可再生能源发电的不稳定性，中国目前主要有火电和水电参与调峰，而将可再生能源与天然气发电系统结合，将其用于电力系统调峰，不但能够提高电网适应负荷变化的能力，而且更加环保。燃机的低排放特性具有较大的环境效益，在污染日益严重的今天，尤其在经济发达的大城市，可以适当发展燃机，用以替代煤机进行调峰。

目前，国内外机构和学者对混合发电技术领域

展开了广泛的研究，下面就风能与太阳能、可再生能源与化石燃料以及其他一些混合发电系统来阐述混合发电技术领域的相关研究动态。

(1) 风能与太阳能混合发电系统的发展现状

在优化软件研发方面，美国可再生能源实验室很早就开发了 HYBRID2 和 HOMER 系统，用于对风能和太阳能混合发电系统进行仿真与优化。西班牙大学等在遗传算法基础上用语言研发了一套适用于风-光、光-柴油机等能源互补型混合发电系统的优化软件，并对光柴油机混合发电系统进行了完善和优化。

在实际应用方面，2007 年阿联酋迪拜建成一座采用太阳能光伏发电设备与风能涡轮机联合供能的摩天大楼，该项目是风光混合发电系统与城市建筑的首次结合，开创了混合发电系统应用的崭新领域。2009 年，中国河北省张家口市张北县、尚义县风电场建成全国首个太阳能光伏发电 / 风能发电 / 化学储能的规模为 100/500/75 MW 的风光储能示范项目。

此外，近几年，中国各种形式和规模的混合可再生能源发电系统已经大量应用于路灯、油井边远单井设备、高速公路设备、航标站、油气输送加热设备、自然保护区、居民小区和工业园区等。

(2) 其他形式的混合发电系统的发展现状

国内外学者还对风能、氢能、生物质能和太阳能混合发电系统，风能与柴油混合发电系统，煤炭地下气化与高温燃料电池混合发电系统，太阳能与燃料电池混合发电系统，以及太阳能与地热闪蒸混合发电系统等混合发电技术进行了相关研究和分析。

德国首座风能、氢能、生物质能和太阳能混合发电厂已于 2010 年正式投入生产，该系统利用风能和太阳能进行发电，产生的电能一部分并网使用，另一部分电解水产生氢能。当风能和太阳能发电无法满足负荷时，利用氢能和生物质能作为补充能源发电，其装机总容量为 6 MW。挪威建成了一座新型的风能与柴油混合发电站，装机容量为 2000 kW，节约燃料 50% 以上。德国 Schatz 能源研究中心与 Yurok Tribe 在美国红杉国家公园建造了一座太阳电池和燃料电池混合发电系统，系统主要为偏远地区的无线通信中继站提供电能，总效率可达 64%，净效率可超过 48%。欧洲 PV-FC SYS 在法国建成了一座太阳电池和燃料电池混合发电系统，该系统的净效率可达 50%。地热能具有运行稳定可靠的优势，2014 年土耳其艾登就建成了一座太阳能 - 地热能混合发电试点电站。

(3) 未来发展趋势

混合可再生能源是按照不同资源条件和用能对象，采取多种可再生能源品种互相补充，通过智能化协调控制和优化调度，提高能源利用综合效率，促进可再生能源消纳，促进生态环境良性循环的系统工程。目前主要有以下两种模式。

终端一体化集成供能系统：终端一体化集成供能系统主要指面向终端用户电、热、冷、气等多种用能需求，因地制宜、统筹开发、互补利用传统能源和新能源建设的一体化集成供能基础设施，通常采取天然气热电冷三联供、分布式可再生能源和能源智能微网等方式，实现多能协同供应和能源综合梯级利用。

风光水火储多能互补系统：风光水火储多能互补系统主要利用大型综合能源基地风能、太阳能、水能、煤炭和天然气等资源组合优势，充分发挥流域梯级水电站和具有灵活调节性能的火电机组的调峰能力，开展风光水火储多能互补系统一体化运行，提高电力输出功率的稳定性，提升电力系统消纳风电和光伏发电等间歇性可再生能源的能力和综合效益。

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印度、中国、伊朗、希腊和马

表 1.2.5 “混合可再生能源系统研究及优化”工程研究焦点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	常被引论文数	专利引用篇数
1	India	9	18.37%	119	9.92%	13.22	0	0
2	China	8	16.33%	329	27.42%	41.13	2	0
3	Iran	7	14.29%	175	14.58%	25.00	0	0
4	Greece	4	8.16%	124	10.33%	31.00	0	0
5	Malaysia	4	8.16%	123	10.25%	30.75	0	0
6	USA	4	8.16%	116	9.67%	29.00	1	0
7	Algeria	3	6.12%	81	6.75%	27.00	1	1
8	Canada	3	6.12%	79	6.58%	26.33	0	0
9	Indonesia	3	6.12%	75	6.25%	25.00	0	0
10	Korea	3	6.12%	46	3.83%	15.33	1	0

来西亚。其中，印度、中国和伊朗的核心论文比例均超过 10%。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 Hong Kong Polytech Univ、Univ Tehran 以及 Univ Malaya。其中，Hong Kong Polytech Univ 和 Univ Tehran 的核心论文产出比例均超过 10%。

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伊朗、马来西亚、印度尼西亚和美国。其中伊朗与三个国家之间具有合作关系，合作发表的论文数量也较多。中国的发表论文数量同样较多，主要是与美国进行合作发表。印度的论文发表数量

最多，但没有与其他国家或地区进行过合作。

根据图 1.2.4 可知，与其他机构合作较多的机构有 Univ Tehran、Univ Malaya 和 Univ Tenaga Nas，这三个机构之间彼此具有合作关系，并且发表的论文数量均位于前五位。两所印度机构之间互相保持有合作关系。中国香港的 Hong Kong Polytech Univ 是发表论文数量最多的机构，但没有与其他机构进行过合作发表。

2016 年 7 月，为加快推进多能互补集成优化示范工程建设，国家发改委和国家能源局发布《关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意

表 1.2.6 “混合可再生能源系统研究及优化”工程研究焦点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	常被引论文数	专利引用篇数
1	Hong Kong Polytech Univ	5	10.20%	221	18.42%	44.20	1	0
2	Univ Tehran	5	10.20%	136	11.33%	27.20	0	0
3	Univ Malaya	4	8.16%	123	10.25%	30.75	0	0
4	Indian Inst Technol	4	8.16%	35	2.92%	8.75	0	0
5	Univ Tenaga Nas	3	6.12%	110	9.17%	36.67	0	0
6	Natl Tech Univ Athens	3	6.12%	95	7.92%	31.67	0	0
7	Univ Washington	3	6.12%	60	5.00%	20.00	0	0
8	Indian Inst Technol Roorkee	3	6.12%	29	2.42%	9.67	0	0
9	Technol Educ Inst Crete	2	4.08%	60	5.00%	30.00	0	0
10	Norwegian Univ Life Sci	2	4.08%	56	4.67%	28.00	0	0

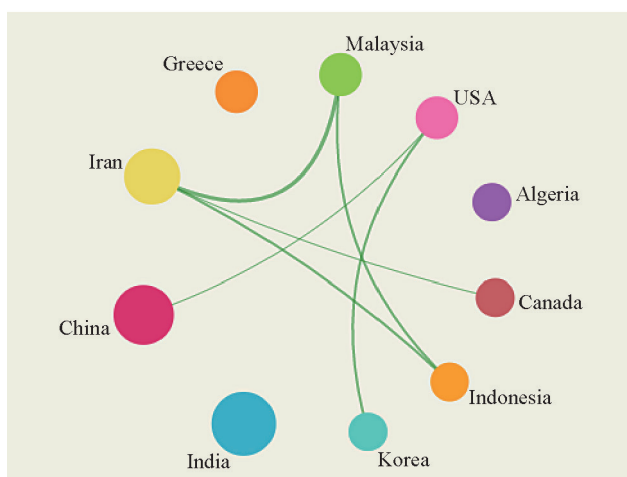


图 1.2.3 “混合可再生能源系统研究及优化”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络

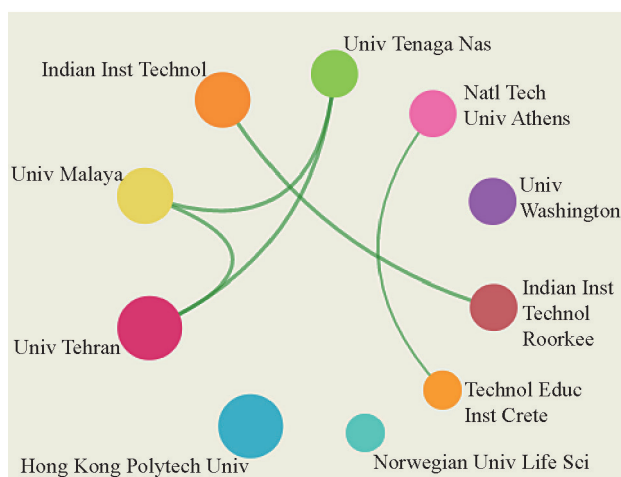


图 1.2.4 “混合可再生能源系统研究及优化”工程研究焦点主要机构间的合作网络

见》。意见的出台，旨在加快推进可再生能源多能互补集成优化示范工程建设，提高能源系统效率，增加有效供给，满足合理需求，带动有效投资，促进经济稳定增长。

意见中规定的可再生能源多能互补集成优化示范工程有两种模式：一种是根据用户电、热、冷、气等多种用能需求的终端一体化集成功能系统；另一种是利用大型综合能源基地风能、太阳能、水能、煤炭和天然气等资源组合优势的风光水火储多能互补系统。国家能源局公布的首批可再生能源多能互补集成优化示范工程入选项目多达 23 个，其中终端一体化集成供能系统 17 个，风光水火储多能互补系统 6 个。发展混合可再生能源系统是构建“互联网+”智慧能源系统的重要途径，有利于提高可再生能源供需协调能力，促进可再生能源开发利用，减少弃风、弃光、弃水限电现象，提高能源系统综合效率，对促进能源利用结构转变，建设低碳、高效的新型能源体系具有重要意义。从技术和发展趋势上看，我国在该领域处于跟跑和并跑阶段，但是发展速度明显快于绝大多数国家。

对中国混合可再生能源系统发展的建议：第一，加大政策扶持力度，确保已出台政策的有效落实；第二，完善能源价格形成机制，体现多能互补集成优化项目的技术优势和综合效益；第三，建立配套

电力调度及市场交易机制，提高风光水火储多能互补系统运行水平；第四，完善标准体系，规范多能互补技术发展及电（气）网接入等行为；第五，加强对多能互补集成优化示范工程规划及重大项目执行情况的监管；第六，在“可再生能源发电项目信息管理系统”设立多能互补项目板块，方便项目信息录入、项目管理和电价附加补贴申报。

表 1.2.7 中，施引核心论文产出最多的国家分别是印度、伊朗和中国，施引核心论文比例均超过 10%；表 1.2.8 中，施引核心论文产出最多的机构是 Hong Kong Polytech Univ、Univ Tehran 和 India Inst Technol，其中 Hong Kong Polytech Univ 和 Univ Tehran 的施引核心论文比例超过 5%。通过以上数据分析可知，中国在混合可再生系统研究方面的核心论文产出及施引数量处在世界前列，但主要产出机构为中国香港高校，中国内地机构的论文数量与中国香港高校及其他国外机构仍存在差距。

1.2.3 极端条件下的流动、传热传质和燃烧研究

(1) 概念阐述

该焦点主要包括四个分支，分别为蒸发和凝结、沸腾换热、传热优化以及燃烧；其应用场景涉及高温、高压和高热流密度等极端工况。沸腾、蒸发和凝结是气液相变的主要形式，在日常生活中可以时

表 1.2.7 “混合可再生能源系统研究及优化”工程研究焦点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	India	8	17.39%	2015.38
2	Iran	6	13.04%	2014.33
3	China	5	10.87%	2014.40
4	Indonesia	3	6.52%	2014.00
5	Malaysia	3	6.52%	2014.00
6	USA	2	4.35%	2014.50
7	Canada	2	4.35%	2014.00
8	Greece	2	4.35%	2013.00
9	Korea	2	4.35%	2014.50
10	Algeria	2	4.35%	2014.50

表 1.2.8 “混合可再生能源系统研究及优化”工程研究焦点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	Hong Kong Polytech Univ	4	6.56%	2014.25
2	Univ Tehran	4	6.56%	2014.25
3	Indian Inst Technol	3	4.92%	2016.00
4	Univ Malaya	3	4.92%	2014.00
5	Grad Univ Adv Technol	2	3.28%	2015.00
6	Indian Inst Technol Roorkee	2	3.28%	2016.00
7	Natl Inst Technol	2	3.28%	2015.00
8	Syiah Kuala Univ	2	3.28%	2013.50
9	Univ Ontario	2	3.28%	2014.00
10	Univ Tenaga Nas	2	3.28%	2013.50

刻观察到。蒸发和凝结在电子器件的热管理、海水淡化、燃烧过程起着非常重要的作用。当燃油液滴喷入内燃机等具有高温和壁面接触等复杂极端环境时的相变过程将直接影响到实际的燃烧效率。沸腾换热在高热流密度电子器件 / 航天器散热领域应用潜力巨大。传热优化是指通过改变换热器（散热器）的类型、结构、表面、流体等，使得在固定换热器（散热器）换热面积等约束下，实现高温高压、含尘含灰、高热流密度等条件下传热能力的最大化。该概念广泛应用于余热利用等工业过程中的换热器设计和系统优化。燃烧是指一种可燃物与氧气进行快速放热和发光的强烈氧化反应。作为目前产生动力的主要途径，其广泛地应用于燃气轮机、内燃机和工业炉等众多领域。同时由于燃烧过程直接决定设备的动力、稳定性、排放和燃料的转换效率，所以针对不同动力设备，在宽广的工况条件下组织高效、稳定、清洁的燃烧方式是当前相关技术研究团队的首要目标。其中微尺度燃烧作为影响燃烧宏观形态的基本单元日益受到广泛关注。

（2）拟解决的关键技术和各国发展重点

蒸发和凝结分别是指液体汽化和气体遇冷而形成液体的过程。蒸发和凝结的机理成为研究热点的一个重要原因是这两个现象与燃烧过程密切相关。在研究中，一个核心问题是各种工况下蒸发速率的

实验测量和理论建模。这些工况包括多组分、液滴流动变形、液滴几何尺寸、液滴与壁面相互作用以及液体和气体间的不同温差等。研究方法包括基于物理过程建立理论模型并与 CFD 计算结合，以及采用 PIV 和高速相机等可视化方法进行测量。发展的趋势包括液滴在纳米表面上的凝结机理以及从分子模拟和统计力学角度确定蒸发系数等方向。国际上对蒸发和凝结的研究比较集中于欧洲和亚洲。欧洲团队，包括俄罗斯和英国的多个团队，对液滴的蒸发进行了比较多的研究。亚洲研究者，如中国学者和巴基斯坦学者，着重研究直接接触凝结。

沸腾传热是指加热壁面温度超过液体饱和温度，在液体内部发生剧烈汽化时，液体和固体壁面发生热量交换的传热方式。由于生成的气泡可以带走大量的汽化潜热，沸腾是一种高效的换热方式。改变固体换热表面的形貌和润湿特性，通过添加纳米颗粒和表面活性剂改变液体的物性，能有效提高沸腾传热系数和临界热流密度，可以满足高热流密度电子器件 / 航天器的散热需求，是沸腾传热研究的发展趋势。在中国，沸腾传热研究主要以实验手段为主，数值模拟手段为辅。实验研究侧重于改变换热表面的形貌和流体性质（添加表面活性剂和纳米颗粒）等，而数值模拟研究侧重于借助 LBM 方法模拟气相的生长过程和空间分布。在中国，关于

沸腾传热的研究主要集中在清华大学、上海交通大学、西安交通大学、华北电力大学和中国科学院工程热物理研究所等单位。韩国的沸腾传热研究以实验为主，通过分析实验结果解释沸腾传热的本质。在日本，京都大学和东京大学在沸腾传热研究方向做了大量的系统性工作。美国的普渡大学、麻省理工大学和斯坦福大学等高校，研究重点在于大空间池沸腾和微通道内沸腾。

传热优化在近几十年来针对不同的问题发展出了众多基础理论，代表性的有：有限时间热力学、熵产最小理论、构形理论、火积理论、场协同原理等。由于换热器表面翅片结构形式众多，同时涉及对流换热，因此进一步拓展相关基础理论来指导极端条件下的换热器优化设计是目前研究的焦点。这些优化方法应用于钢铁生产、余热回收、热功转换和换热器的优化等。目前，中国在传热优化方面的理论研究以火积耗散极值原理和场协同理论为主，并且将火积耗散理论同构形理论相结合的传热优化研究日益增多，而以美国为主的欧美国家在传热优化理论方面的研究是以熵产最小化原理和构形理论为主。

燃烧是一系列微尺度层面上的链式反应叠加的产物。在微观尺度上发生的物理或化学过程稍有变化，累加并反映在宏观层面的燃烧特性可能大相径庭。所以目前为了深入了解并掌握不同条件下燃烧特性区别的原因，揭示其内在的变化规律，即微尺度下的燃烧机理，是目前国内外相关工程研究领域的焦点之一。近十年来，由于非接触式可视化手段的快速发展和 CFD 模拟仿真能力的巨大提升，为微尺度下燃烧特性及机理的研究提供了强大的基础。同时基于实验与仿真研究，微尺度燃烧的理论体系不断完善，并形成了一个较完整的体系。目前实验及仿真的研究对象主要是小尺寸的微观液滴（代表液体燃料）、煤颗粒（代表固体燃料）和水煤浆（代表液固燃料）。研究过程包括液体燃料的二次雾化破碎形成液滴的过程，小尺度悬挂或表面

液滴（颗粒）气化、与周围空气混合、点燃（自燃）以及燃烧过程。实验研究手段包括高速摄影、PIV 和 LIF，仿真研究手段则主要是基于自开发的程序建立不同过程的准确模型。目前微尺度燃烧领域的论文主要来自亚洲和欧洲，其中中国和俄罗斯的实验研究相对较多，而仿真研究主要在英国、芬兰及伊朗等国家进行。

（3）目前发展现状与未来发展趋势

在蒸发和凝结方面，由于涉及众多影响因素，包括气液温差、气体流动、液滴变形以及液滴与壁面相互作用等，不同的研究团队针对特定的问题进行了研究。目前主要的研究手段包括可视化实验和数值计算。可视化实验研究中，高速相机直接成像目前被广泛使用，该方法满足从整体上研究传质过程的需求。进一步，则可以使用激光粒子测速技术测量颗粒内部的流体运动，使用激光阴影法研究液滴沉降到表面过程中的热重力和热毛细对流现象，利用远红外热成像技术非接触测量液滴的热现象。在数值计算中，需要处理两相流动，多采用欧拉两相和欧拉-拉格朗日等方法。针对多组分流体，当组分分数较少时有离散组分模型，对于组分分数较多时采用蒸馏曲线模型和连续热力学方法。未来的发展趋势包括准确确定蒸发凝结速率，这些关键的参数直接影响到燃烧的基础科学问题。在理论建模方面，可能采取的方法包括分子动力学计算和统计力学建模等。在实验测量中，通过 PIV 等手段测量接触线的移动来获得质量通量的变化，从而实现局部蒸发凝结速率的测量；或者通过红外相机测量局部热流来得到局部蒸发系数。另外，对于液滴的凝结现象，在传热的研究中，希望使液滴可以及时脱离壁面来强化换热。为此，研究者已经制备出具有纳米结构的超疏水表面，通过利用超疏水表面的低附着力及液滴弹跳现象，可以在一定程度上增强换热。但是，如何进一步优化壁面的性能仍是一个长久的课题。

在沸腾传热方面，目前研究热点包括液体 / 多孔介质内气泡的生长特性、固体表面亲疏水特性和

形貌对气泡脱离及传热系数的影响机理。研究工具主要是红外热像仪和高速摄像机等实验仪器和格子玻尔兹曼等模拟方法。总体而言，沸腾传热的研究手段仍是实验多于理论。随着航空航天和电子工业的发展，航天器和电子器件的热流密度越来越高，从宏观尺度传热传质研究过渡到微尺度传热研究沸腾传热机理越来越受到重视。此外，如何将高效的沸腾传热技术应用到工程实践中去，开发出更好的换热产品，也是沸腾传热研究的一个重要发展方向。

在传热优化方面，为满足实际工程的需求，多种理论均有了进一步的发展。有限时间热力学将热力学、传热学和流体力学融合在一起，用于有限尺寸和有限时间约束下实际过程和装置的优化。构形理论在热科学领域被称为“非平衡系统构形问题的热力学”，为统一解释自然组织流动结构的生成和设计各种流动结构提供了理论基础。熵产最小理论是以熵产生最小为优化目标对换热器性能进行分析和优化，但在其优化设计中出现了换热器熵产最小与其效能最大并不对应的“熵产悖论”。针对“熵产悖论”，一些学者基于熵产定义了各种修正目标试图解决这一问题。为了反映传热的本质属性，过增元等提出了描述物体所具有的热量传递的总能力的新物理量“火积”和新的传热优化评判标准“火积耗散极值原理”，为传热优化开辟了新的方向，解决了以传统的热阻和熵产评价传热性能优劣的局限性和不准确性。将不同换热优化方法进行有机结合是未来发展的一个趋势。

在燃烧方面，由于针对微尺度层面，所以影响因素众多，主要包括燃料物性、组分掺混、环境压力及温度、气流运动、液滴形态和液滴与壁面相互作用等，世界各国团队在其擅长的领域进行了大量研究。目前主要的研究手段是可视化实验研究和数值模拟。在可视化研究中，高速显微摄影应用最为广泛，通过观察分析液滴在微尺度下的变化过程可以获得不同条件参数对其影响，通过 PIV 技术可

以获得流场特性对微尺度条件下燃烧的影响，通过 LIF 可以研究浓度和掺混特性对微尺度燃烧的影响。对于数值模拟，大部分研究均是考虑模拟实际的工况条件，采用自行开发的多种仿真手段，考虑尽可能详细的仿真模型来预测微尺度燃烧特性，包括液滴的蒸发与自燃，同时通过与实验对比来不断完善相关模型。关于微尺度燃烧的相关研究，中国和俄罗斯在实验研究方面做出了较为突出的贡献，其中西安交通大学和俄罗斯国立托木斯克理工大学两个机构在此前沿领域进展较快。在仿真方面，欧洲和亚洲区域在相关领域的进展较为突出，其中英国布莱顿大学、芬兰拉彭兰塔科技大学和伊朗科技大学近年来的研究最受关注，且已初步建立了微尺度液滴的蒸发和燃烧模型。

（4）重点研究国家或地区和机构的对比及其合作情况分析

从表 1.2.9 可以看出，中国、伊朗和美国在相关研究中核心论文的产出量、核心论文比例、被引频次、被引频次比例和常被引论文数均位居世界前三位。这一方面说明这 3 个国家的相关研究能力或投入较多，另一方面也说明相关的需求十分突出。但值得注意的是，中国的篇均被引频次只有 16.08，甚至跌出了相关研究世界排名前十的榜单，而日本、美国和新加坡分列前三位。由此可以明显看出中国在此焦点上的研究已达到量变，但还尚未达到质变，这也是今后需要继续加强的地方。由图 1.2.5 可以看出，美国和中国与其他国家合作研究关系的建立最为频繁，不同的是美国与其他国家合作研究数量相对较为均衡，而中国则主要与新加坡合作。

从表 1.2.10 可以看出，马来亚大学（Univ Malaysia）、新加坡南洋理工大学（Nanyang Technol Univ）、伊朗马什哈德菲尔多西大学（Ferdowsi Univ Mashhad）、中国的海军工程大学和华中科技大学，这 5 所学校的核心论文数不相上下。而在被引频次、被引频次比例和均篇被引频次上，新加坡

表 1.2.9 “极端条件下的流动、传热传质和燃烧研究”工程研究焦点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	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	China	83	39.15%	1335	31.21%	16.08	14	0
2	Iran	37	17.45%	808	18.89%	21.84	7	0
3	USA	36	16.98%	1076	25.15%	29.89	5	1
4	Singapore	20	9.43%	458	10.71%	22.90	2	0
5	Malaysia	20	9.43%	347	8.11%	17.35	0	0
6	Korea	16	7.55%	282	6.59%	17.63	1	0
7	Russia	16	7.55%	262	6.12%	16.38	1	1
8	England	8	3.77%	170	3.97%	21.25	0	1
9	Japan	7	3.30%	385	9.00%	55.00	1	0
10	India	7	3.30%	160	3.74%	22.86	2	0

表 1.2.10 “极端条件下的流动、传热传质和燃烧研究”工程研究焦点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	常被引 论文数	专利引 用 篇数
1	Univ Malaya	17	8.02%	296	6.92%	17.41	0	0
2	Nanyang Technol Univ	16	7.55%	322	7.53%	20.13	1	0
3	Ferdowsi Univ Mashhad	16	7.55%	257	6.01%	16.06	1	0
4	Naval Univ Engn	16	7.55%	214	5.00%	13.38	3	0
5	Huazhong Univ Sci & Technol	14	6.60%	262	6.12%	18.71	4	0
6	Islamic Azad Univ	12	5.66%	285	6.66%	23.75	2	0
7	Shanghai Jiao Tong Univ	12	5.66%	228	5.33%	19.00	1	0
8	Xi'an Jiaotong Univ	10	4.72%	167	3.90%	16.70	3	0
9	Tomsk Polytech Univ	10	4.72%	139	3.25%	13.90	0	0
10	Natl Res Tomsk Polytech Univ	9	4.25%	133	3.11%	14.78	0	0

南洋理工大学更为突出。而在常被引论文数上，同在武汉的海军工程大学和华中科技大学较为突出，加上西安交通大学，三所院校的常被引论文数占到了前十研究机构的 67%，体现出三所院校相关研究的基础十分强劲。从图 1.2.6 可以看出，伊朗马什哈德菲尔多西大学、马来亚大学和伊斯兰自由大学（Islamic Azad Univ）三者有较多的合作，而其他科研单位的相互合作较少。

在凝结和蒸发方面，主要的研究者来自于俄罗斯、英国和中国等国家。其中俄罗斯团队与其他欧洲团队合作较多。美国学者对这方面的研究比较少。

在沸腾传热方面，马来西亚和印度的研究者比较少，中国、日本、韩国和美国有很多研究者。在国际合作方面，韩国和美国之间的合作比较多。在传热优化方面，构形理论由美国杜克大学教授 Bejan 提出，该理论目前在美国、欧洲甚至伊朗被广泛应用。火积耗散理论由中国清华大学过增元提出，在中国研究最多，近年来也受到其他国家的重视。在燃烧方面，微尺度条件下液体燃料的研究还是以欧洲为主导，近年来中国的部分研究机构也对其开展了深入研究。此外中国、伊朗和俄罗斯为主的国家在水煤等液固燃料的微尺度研究最多，且逐渐受到广泛关

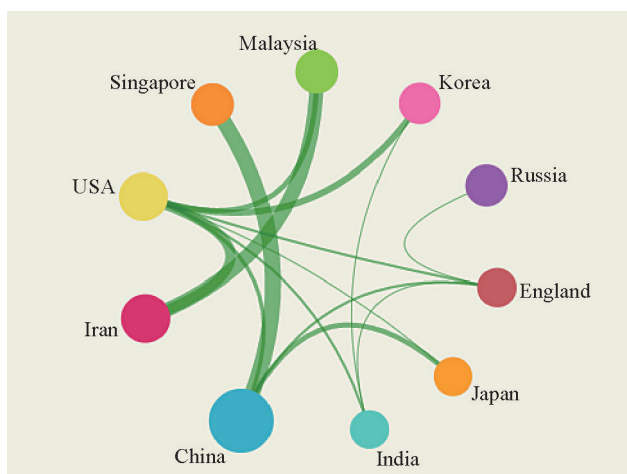


图 1.2.5 “极端条件下的流动、传热传质和燃烧研究”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络

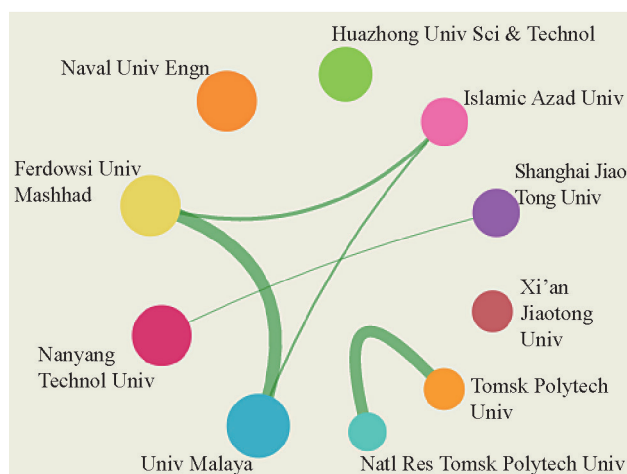


图 1.2.6 “极端条件下的流动、传热传质和燃烧研究”工程研究焦点主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “极端条件下的流动、传热传质和燃烧研究”工程研究焦点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	62	30.69%	2014.90
2	Iran	33	16.34%	2014.61
3	USA	22	10.89%	2014.23
4	Malaysia	22	10.89%	2014.73
5	Singapore	17	8.42%	2014.59
6	Russia	10	4.95%	2014.90
7	Korea	8	3.96%	2014.00
8	England	4	1.98%	2014.00
9	Finland	3	1.49%	2014.00
10	Japan	3	1.49%	2012.67

表 1.2.12 “极端条件下的流动、传热传质和燃烧研究”工程研究焦点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	Univ Malaya	19	7.17%	2014.79
2	Nanyang Technol Univ	15	5.66%	2014.67
3	Huazhong Univ Sci & Technol	14	5.28%	2014.64
4	Ferdowsi Univ Mashhad	14	5.28%	2015.07
5	Islamic Azad Univ	12	4.53%	2014.33
6	Naval Univ Engn	10	3.77%	2015.30
7	Amirkabir Univ Technol	8	3.02%	2013.75
8	Shanghai Jiao Tong Univ	8	3.02%	2014.38
9	Xi'an Jiaotong Univ	8	3.02%	2014.88
10	Natl Res Tomsk Polytech Univ	7	2.64%	2015.43

注。在国际合作方面，中国与新加坡合作较多，且主要国际间的合作均在亚洲范围内。

在蒸发凝结研究中，国内大学，如西安交通大学和北京化工大学，对直接凝结做了很多实验和理论研究，处于领跑水平；但是在液滴蒸发方面的研究较为稀少，可在今后投入一定的研究。在沸腾传热领域，中国的相关研究集中在实验层面，探寻换热系数的强化。近年来，清华大学、上海交通大学、西安交通大学和中国科学院等高校和科研机构的相关学者采用 LBM 方法构建气液相变模型，从理论角度揭示相变换热的机理，取得了较大的进展，在该研究领域属于领跑水平。建议继续系统地开展相关理论研究。在传热优化领域，早期的熵等优化概念是从国外引进的，但是目前国内有火积耗散理论，与构形理论共同形成了最新的理论基础，在该领域属于领跑水平。在燃烧方面，我国在固体及液固的微尺度燃烧方面有了多年的基础，且相关研究十分广泛，在该领域属于领跑水平。而在液体的微尺度燃烧研究方面起跑较晚，但目前处于快速追赶的过程，可在一段时间内跟跑并逐步进入

领跑梯队。

表 1.2.11 给出了“极端条件下的流动、传热传质和燃烧研究”工程研究焦点中施引核心论文的主要产出国家或地区，中国、伊朗和美国居于前三位；表 1.2.12 给出了该工程研究焦点中施引核心论文的主要产出机构，Univ Malaya、Nanyang Technol Univ 和 Huazhong Univ Sci & Technol 位于前三名。

2 工程开发热点及工程开发焦点解读

2.1 工程开发热点发展态势

能源与矿业工程领域研判的 Top12 工程开发热点见表 2.1.1。Top12 工程开发热点涉及了能源与电气科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程和核科学技术与工程各个学科的多个研究方向。其中“电动汽车电池（结构、材料、效率、热管理系统）”“新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂”“基于压裂与岩石特性参数的地质建模与模拟”“晶硅太阳能电池（包括限光、钝化、新型结构及其光伏组件安装和应用）”“生物质转

表 2.1.1 能源与矿业工程领域 Top12 工程开发热点

序号	工程开发热点	公开量	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	电动汽车电池（结构、材料、效率、热管理系统）	696	12 707	18.26	2011.89
2	深水油气开发装备与技术	162	1 382	8.53	2012.25
3	新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂	481	4 348	9.04	2012.49
4	核电装备：反应堆堆芯燃料组件、泵、阀门、容器、管道、安全壳	304	780	2.57	2012.43
5	非传统化石碳资源转化与利用	397	4 348	10.95	2012.07
6	共伴生能源精准开发及智能钻具成套装备关键技术	1 036	8 379	8.09	2012.44
7	先进混合动力发动机的开发及关键技术	427	6 097	14.28	2012.07
8	基于压裂与岩石特性参数的地质建模与模拟	56	326	5.82	2012.61
9	极端环境下高分子聚合物电缆鞘层研发	110	1 570	14.27	2012.89
10	晶硅太阳能电池（包括限光、钝化、新型结构及其光伏组件安装和应用）	240	4 322	18.01	2012.00
11	生物质转化及生物燃料制备	254	4 656	18.33	2012.15
12	风力发电机的装配、监测、控制技术	106	1 561	14.73	2011.55

表 2.1.2 能源与矿业工程领域 Top12 工程开发热点的逐年核心专利公开量

序号	工程开发热点	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1	电动汽车电池（结构、材料、效率、热管理系统）	329	196	116	34	14	7
2	深水油气开发装备与技术	50	58	31	13	6	4
3	新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂	114	151	118	70	19	9
4	核电装备：反应堆堆芯燃料组件、泵、阀门、容器、管道、安全壳	81	77	93	41	10	2
5	非传统化石碳资源转化与利用	151	127	84	22	3	10
6	共伴生能源精准开发及智能钻具成套装备关键技术	278	300	265	125	52	16
7	先进混合动力发动机的开发及关键技术	187	116	56	48	17	3
8	基于压裂与岩石特性参数的地质建模与模拟	11	16	15	12	2	0
9	极端环境下高分子聚合物电缆鞘层研发	21	26	22	27	13	1
10	晶硅太阳能电池（包括限光、钝化、新型结构及其光伏组件安装和应用）	106	61	49	16	6	2
11	生物质转化及生物燃料制备	98	70	40	42	3	1
12	风力发电机的装配、监测、控制技术	69	21	12	3	1	0

化及生物燃料制备”5个是新兴热点，“深水油气开发装备与技术”“核电装备：反应堆堆芯燃料组件、泵、阀门、容器、管道、安全壳”“非传统化石碳资源转化与利用”等是传统热点的深化和拓展。各个热点2011年至2016年的逐年核心专利公开量见表2.1.2。

（1）电动汽车电池（结构、材料、效率、热管理系统）

电池作为电动汽车的核心部件，对车辆的续航里程、安全性和成本密切相关。需重点解决高能量密度、高安全性、低温和高温环境适应性、长寿命、快速充电和低成本先进二次电池及电池成组、电池组管理等关键技术问题。可以通过研究开发纳米锂电池、锂空气电池、锂硫电池、石墨烯基锂离子电池、新型多元锂离子电池、固态电池和液流电池等，形成新一代的先进二次电池；通过热-机-电多场耦合结构优化设计、多目标动/静态一致性智能评价和检测、高强度轻质材料应用和结构轻量化等方法，以及电池模块化、智能制造和机器人拆装等技术，实现高效率、高性能的电池成组；通过空气、液体、相变材料等介质换热或复合介质换热，以及

利用外部电流脉冲激励或内置加热电路，利用电池自身能量的单体电池内部温度调节热管理技术、电池与整车综合热管理技术等，对电池进行外部散热、加热（也可通过电加热方式）或恒温等的主动或被动热管理；通过基于模型（尤其是面向控制的电化学机理模型）的电池状态估计、寿命预测、安全故障诊断预测、寿命优化充电管理、智能均衡控制、车-电池动态协调控制等，开发先进的电池智能管理系统，保证电池在电动汽车应用中的安全高效、可靠和长寿命耐久性。

（2）深水油气开发装备与技术

我国海洋油气资源十分丰富，勘探开发潜力巨大。据统计，我国南海海域石油地质资源量约为230亿~300亿吨，天然气总地质资源量为16万方，其中70%位于深水区，因此我国深水油气资源开发至关重要。深水油气开发具有高投入、高技术、高风险、高回报等特点，随着水深的增加，开发难度和投入呈几何倍数增加。随着我国深水油气开发的快速推进，在自主研发和国内外合作攻关的双重模式下，我国深水油气开发装备与技术得到了快速发展，如深水油气开发浮式结构、水

下智能机器人、深水钻井防喷器系统关键设备、海底隔离阀与安全阀、垂直单通道采油树系统、水下增压与处理设备发展较快。智能自动化技术、远程控制技术、井下监测技术、管柱设计控制技术等在海洋油气领域也得到了广泛应用，如智能化与全自动化水下生产系统、射频识别海底远程控制技术、多功能井下与井口监测技术、机器人深水监测技术等。

(3) 新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂

我国页岩气、煤层气、致密气等非常规油气资源非常丰富，勘探开发潜力巨大。以页岩气为例，我国页岩气可采资源量为 36.1 万亿方，位居世界第一。然而非常规油气储层具有低压、低孔、低渗、低产等特征，因此储层压裂是非常规油气商业化开发的必经之路。常规水力压裂应用于非常规油气开发成本较高，同时技术的适应性也较差。在此背景下，无限级压裂、定向水力射孔压裂技术、转向压裂、重复压裂等新型压裂技术应运而生，以 CO_2 、 N_2 、LPG 为代表的无水、清洁、高效压裂技术也得到了快速发展，其中 CO_2 （或超临界 CO_2 ）压裂可与 CO_2 捕集、油藏驱替、 CO_2 封存等技术结合起来，实现 CO_2 温室气体综合利用。这些新型的压裂技术在裂缝走向控制、压裂规模和效率提高等方面发挥了巨大作用。此外，新型压裂流体、支撑剂和相关添加剂技术也得到了快速发展，发明出一大批适合不同储层特征的新型材料。例如，近年来发展加快的纳米材料技术便在压裂液、支撑剂、添加剂等领域得到了广泛应用，如纳米减阻剂、纳米可控电解金属（CEM）压裂球等。

(4) 核电装备：反应堆堆芯燃料组件、泵、阀门、容器、管道、安全壳

反应堆燃料组件是反应堆堆芯的重要组成部分，是链式裂变反应及容纳放射性裂变产物的重要场所。处于强中子场中，经受高温、高压、高流速冷却剂的冲刷，同时承受裂变产物化学作用和复杂的机械载荷，工作条件十分苛刻。先进反应堆技术

的发展离不开先进燃料组件的开发，目前的研究热点包括：燃料元件包壳材料、燃料组件破损检测、腐蚀问题、提高热工裕度、可燃毒物利用等。

核电站的设备主要分为三类：核岛设备、常规岛设备、辅助系统。核岛设备是承担热核反应的主要部分，技术含量最高，对安全设计的要求也最高。尤其是一回路压力边界设备，包括压力容器、蒸发器、稳压器、核级泵、核级阀门、核级容器与管道等。主要研究热点在于核电装备的可靠性、安全性、完整性等，涉及到疲劳、蠕变、腐蚀、地震、冲击、辐照、LOCA、标准化等方面的问题。

(5) 非传统化石碳资源转化与利用

传统的化石碳资源（包括煤炭、石油和天然气）是用于能源和材料的原料，是社会的支撑基础，但终有枯竭之时，还带来环境问题。非传统化石碳资源作为化石资源的补充，可减轻对环境的影响，尤其可实现可持续化。主要的非化石碳资源包括生物质、页岩油和气、油砂、可燃冰、农作物及生活垃圾，还有 CO_2 等。转化方式包括热解、燃烧、气化、水解。获得的产品合成气、甲烷、生物柴油和其他含氧化学品等，涉及催化、热化学和生物化学及工程科学问题。

(6) 共生能源精准开发及智能钻具成套装备关键技术

智能钻井能大幅度降低钻井成本，提高钻井速度，减少事故的发生。智能钻井以井下智能钻具为依托，通过井下闭环系统实时获取井下流体、岩石、工具特性等参数，计算井眼轨迹、工具方位角、油层位置等，并将计算结果实时反馈给智能钻具进行相关钻井参数调整。代表性技术有旋转导向钻井系统、地质导向钻井系统、自动垂直钻井系统等。此外，智能钻头、智能钻杆钻井等井下配套工具与技术也能进一步提高钻探精度、降低钻井成本。

(7) 先进混合动力发动机的开发及关键技术

按照动力传输路线分类，混合动力汽车可分为

串联式、并联式和混联式三种。其中并联式和混联式机构均具备两套动力驱动系统：发动机驱动系统和电机驱动系统。两套驱动系统通过特定的动力耦合策略，实现车辆的驱动。同时通过电机系统实现以下功能：取消发动机怠速；调节发动机运行工况，减小或避免其中低负荷低效率工况区域运行的概率；制动能量的回收，来达到提高动力系统燃油经济性的目的。混合动力发动机的输出动力一方面可以用于驱动车辆，另一方面可以用于电池的充电，使车辆的续驶里程不再受到电池容量的限制。开发混合动力专用发动机，关键技术在于：Atkinson 循环燃烧系统开发、发动机的控制策略、发动机整机的多参数多目标优化、附件系统能损失的优化、整车匹配技术、动力电池及其管理系统开发。

（8）基于压裂与岩石特性参数的地质建模与模拟

地质建模能用于油藏的整体评价，为使地质模型更准确地应用于油田生产，需要充分利用地质参数。目前这一类的建模方法有基于地质统计学反演和储层分类的相控储层建模方法、基于多元地学信息的三维地质建模、基于多种地球物理技术的定量油藏描述等。而一些新的基于压裂与岩石特性参数的地质建模也有积极作用，如基于三维激光扫描技术的复杂三维地质体建模方法、基于 HPIM 技术的地形与地质建模等。

（9）极端环境下高分子聚合物电缆鞘层研发

对于专利热点词汇“电缆、涂层、导体”，目前的研究主要集中于制造能够用于电缆外包鞘层的复合材料。这些电缆主要是被用于极端的环境之下，例如，船上或深海平台上的电力电缆、直流输电电缆（因为直流输电需要更高的绝缘性）、飞行器或太空飞船上的电缆、用于人工升降装置上的电缆、钻井设备上的电缆、汽车控制用的电缆等。主要提高了 10 种不同的特性，分别为防水、耐高温、绝缘、

高阻燃性、防潮和防腐蚀、热塑性、低挥发性、防风雨、防冻和高拉伸性。可用作电缆涂层的材料主要由高分子聚合物构成，铝元素、铜元素和树脂也在其中有应用。

（10）晶硅太阳能电池（包括限光、钝化、新型结构及其光伏组件安装和应用）

晶体硅太阳能电池组件一直是太阳能光伏市场的主流（2015 年市场份额 93%，2016 年市场份额达到 95%），而且未来十年乃至更长时间还会是市场主流。太阳能电池产业界的开发热点是高效限光技术和钝化技术在晶体硅电池上的应用及新型结构（背接触和异质结）的普及。光伏组件端的热点则是组件清洗新方法、新技术，新型安装技术及光伏电站的规模化应用技术等。

（11）生物质转化及生物燃料制备

生物质具有资源分布广、可储存可运输的特点，且是唯一一种可再生的碳源。生物质转化是指通过生物化学或热化学等方法将原料转化为固体、液体或气体燃料以及化工产品，其中生物燃料具有能源品位高、用途广泛等特点。通过生物质转化制备生物燃料是当前研究的热点，主要针对反应过程及反应气氛、催化剂等参数的作用机制开展优化，开发生物燃料的清洁高效制备工艺，如生物降解、烘焙、热解、气化、精炼等。

（12）风力发电机的装配、监测、控制技术

随着新能源的不断开发，风力发电越来越多。其中，风力机的装置配备的研究是一个热门话题，例如转子叶片的叶尖、起降装置的升吊塔、风机塔基座的联接部分、部件运输以及自动传感系统等。关于海上风力发电机的研究主要集中在海面 - 可潜水的操作平台和减少水面振荡的控制器等。为了实现优化运行，需要基于实时数据控制风力发电机的输出功率、监测风速和叶片转速等因素。在进一步的研究中，混合发电系统具有很大前景，例如混合风机和太阳能系统构成的发电系统。

2.2 工程开发焦点解读

2.2.1 电动汽车电池（结构、材料、效率、热管理系统）

（1）电动汽车电池概念与由来

电动汽车是以电能驱动行驶的交通运输工具，因其“零排放”和“电驱动化”特点，是解决燃油汽车尾气污染的重要解决方案，是新能源汽车发展战略的重要组成部分。按照电驱动模式，国内外将电动汽车分成油电混合动力汽车（HEV）、插电式混合动力汽车（PHEV）、纯电动汽车（BEV）和燃料电池电动汽车（fuel cell electric vehicle，FCEV）四大类。电动汽车大规模推广与应用需要解决三大问题：第一，高性能、低成本长寿和低成本的电池；第二，完善的充电设施或加氢系统；第三，充足的原材料供应链。

电动汽车电池是指应用于新能源汽车的动力电池，可以分成两大类：其一是先进二次电池（advanced secondary battery），其二是燃料电池（fuel cell）。由于燃料电池与氢能利用紧密结合在一起，在本焦点中不作讨论。这里，电动汽车电池特指先进二次电池，俗称动力电池。

电动汽车电池工程开发的焦点集中在电池材料体系、电池结构设计与制造、电池测量与成组、电池管理系统和动力系统总成等工程技术。

（2）动力电池结构与材料体系

二次电池依赖正负极氧化与还原反应实现电池的充电与放电过程，根据电池材料化学体系，可以分为镍氢电池、锂离子电池、锂硫电池等。20世纪90年代，镍氢电池被认为是绿色的动力电池，国内外开展了多年的研发。日本丰田公司在非插电式混合动力汽车中应用已经成熟，其代表性产品就是“PRIUS 普锐斯”，在全球的销量已经超过百万辆。

锂离子电池是目前的电动汽车电池工程技术开发主流方向，其正极材料有锰酸锂、磷酸铁锂和三元材料三大类，负极材料是石墨。安全性、长寿命、

高比能、低成本是发展电动车用动力锂电池的四大要素。目前磷酸铁锂和三元材料已经占据电动汽车电池90%以上。磷酸铁锂电池因其安全、长寿命和低成本化优势，在电动汽车应用中占据重要地位，目前中国、美国和德国的电动车中广泛采用磷酸铁锂电池。而三元材料因其能量密度高而备受青睐，日本、美国和中国汽车生产商已经开始增加三元材料的应用，但是三元材料的安全性和原材料钴资源价格因素将会制约其发展。对于混合动力汽车应用，侧重发展功率型动力电池；而对于纯电动汽车应用，侧重发展高能量密度的动力电池。目前，动力锂电池生产的主要国家是中国、日本和韩国，几乎是三分天下。

目前，电动汽车电池工程开发焦点是如何提升磷酸铁锂动力电池的能量密度。通过引入磷酸铁锰锂正极活性物和硅基负极材料，改进电解液，使磷酸铁锂电池能量密度达到180 Wh/kg以上，满足续航里程更长电动汽车商业化要求。对于三元材料体系的电池需要解决其安全性和系统安全性问题。

电动汽车电池未来的工程开发焦点围绕单体电芯能量密度大于300 Wh/kg，系统能量密度达到260 Wh/kg以上新一代动力电池材料化学体系。开发重点是发展高镍含量的三元系正极材料或高电压正极材料、高比能硅负极材料以及相匹配的电解液。未来动力电池则向更高能量密度的全固态锂电池、锂硫电池以及锂空气电池。

（3）动力电池测量及热管理系统

从提供的600多项专利看，本工程开发的焦点更多的是聚焦在精确的电池测量技术和高效率的电池管理系统（battery management system，BMS）开发。精确的电池测量技术包括电池荷电状态（state of charge，SOC）、健康状态（state of health，SOH）、功率状态（state of power，SOP）及电池内阻等参数测量与估计。电池的SOC、SOH预测模型构建与计算方法开发是实现电池精确测量的基础，也是电池管理系统开发和动力系统控制的关键

技术。国际上很多电动汽车电池专利都十分关注这个方面。

电池成组和系统集成是电动汽车电池应用的重要工程技术。该分支技术涉及电池的分选、电池连接成组、系统电管理和热管理等关键技术。电动汽车生产商始终将电池成组和系统集成作为其核心技术，就像传统燃油汽车的内燃机系统一样。与系统集成相关的汽车电子技术是实现电动汽车自动化、智能化运行与操控的关键工程技术。

从表 2.2.1 和表 2.2.2 可以看出，电动汽车电池

的核心专利产出国家主要是美国、日本、中国、韩国和德国等国家。电动汽车电池工程应用的专利产出的机构主要是汽车生产商，其中日本丰田、美国福特汽车和美国通用汽车位居产出专利前三甲，特斯拉、马自达、三菱等企业也申请了一些相关专利。电池管理和电控方面的专利则有日本索尼、松下，韩国三星、LG 化学和德国博世。

中国在电动汽车电池工程开发方面已经有 20 年的历史，近年来中国对于新能源汽车发展的政策是国际上最好的。在国家“863”计划、“973”计

表 2.2.1 “电动汽车电池（结构、材料、效率、热管理系统）”工程开发焦点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	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	273	39.22%	6575	51.74%	24.08
2	Japan	203	29.17%	2815	22.15%	13.87
3	China	79	11.35%	1420	11.17%	17.97
4	Korea	70	10.06%	778	6.12%	11.11
5	Germany	56	8.05%	839	6.60%	14.98
6	France	8	1.15%	63	0.50%	7.88
7	Switzerland	6	0.86%	140	1.10%	23.33
8	Taiwan of China	6	0.86%	115	0.91%	19.17
9	Canada	5	0.72%	40	0.31%	8.00
10	Israel	5	0.72%	131	1.03%	26.20

表 2.2.2 “电动汽车电池（结构、材料、效率、热管理系统）”工程开发焦点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	TOYT	45	6.47%	600	4.72%	13.33
2	FORD	40	5.75%	801	6.30%	20.02
3	GENK	35	5.03%	472	3.71%	13.49
4	SAOL	35	5.03%	503	3.96%	14.37
5	SMSU	34	4.89%	429	3.38%	12.62
6	BOSC	26	3.74%	590	4.64%	22.69
7	GLDS	20	2.87%	138	1.09%	6.90
8	NPDE	19	2.73%	255	2.01%	13.42
9	SBLI	18	2.59%	248	1.95%	13.78
10	MATU	17	2.44%	278	2.19%	16.35

* 机构全称：TOYT 表示 Toyota Motor Corp.；FORD 表示 Ford Global Tech LLC；GENK 表示 GM Global Technology Operations Inc.；SAOL 表示 Sanyo Electric Co., Ltd.；SMSU 表示 Samsung Electronics Co., Ltd.；BOSC 表示 Robert Bosch GmbH；GLDS 表示 LG Electronics；NPDE 表示 Nippondenso Co., Ltd.；SBLI 表示 SB Limotive；MATU 表示 Matsushita Co., Ltd.。

划“电动汽车”和“节能与新能源汽车”重大专项的支持下，催生了一批具有国际影响力的电动汽车电池生产企业。其中，比亚迪是我国申报电动汽车电池专利最多的公司。2016年比亚迪生产的新能源汽车销量全球第一，其K9系列纯电动大巴已经在美国、日本、英国等主流国家推广，搭载的磷酸铁锂动力电池系统通过国际上严格的安全测试。比亚迪开发的电池管理系统及动力系统总成技术，被德国奔驰公司采纳，并共同开发腾势电动汽车。比亚迪、时代新能源（CATL）已经成为国际有重要影响的动力锂电池供应商，CATL为德国宝马汽车公司配套提供动力锂电池。

产学研结合是中国电动汽车电池工程开发的一大特点。在中国的新能源汽车发展中，清华大学、上海交通大学、同济大学、北京理工大学及中国科学院积极与汽车、电池生产企业合作，有力地推动了电动汽车电池工程开发进步。中国在该领域申报的专利量迅速增加，近5年，中国电动汽车电池专利申报量稳居全球第一。比亚迪公司获得授权的电池相关发明专利已经超过2000件，其中获得授权的国际专利200多件。从跟跑逐步转向并跑，并在部分领域开始领跑世界。

在“十三五”期间，中国在国家重点研发计划、纳米专项中，对电动汽车电池工程开发做了新的布局，将努力发展安全性好、寿命长的车用动力电池和管理系统。中国科学院在“十二五”期间启动的战略性先导科技专项中，将“长续航动力锂电池研究”作为其重点项目之一，在锂硫电池、全固态锂电池等技术研发取得显著成绩，在锂电池与全固态锂电池的工程化应用及系统集成方面开始领跑世界。

2012年以来，随着我国新能源汽车推广应用热潮的兴起，电动汽车电池工程化开发进入高潮。国家和地方都将电动汽车电池作为战略新兴产业布局，造成了电动汽车电池产业链发展的“大跃进”。与电池有关的四大关键材料（正极、负极、电解质

和隔膜）以及动力电池生产企业急剧增加，产能过剩现象已经显现，重复投资、资源浪费现象严重。建议加强电动汽车电池产业布局，从电池材料、电池制造与电池管理系统等方面着手，聚焦高性能、长寿命和高安全性的动力电池工程化关键技术开发，并在新一代高能量密度动力电池的应用基础研究中继续走在国际前列。

表2.2.1和表2.2.2所列的电动汽车电池专利信息基本上集中在与电动汽车和电池两个关键词有关的电池性能测量方法、电池管理系统、电池系统成组、电动汽车动力系统总成，以及与电动汽车应用有关的充换电站技术。因此，专利产出的国家/地区和机构基本上是美国、日本、韩国和德国的汽车公司，我国传统四大汽车公司在电动汽车电池方面的专利申请很少，表明这些公司在新能源汽车核心技术上投入不足。只有比亚迪、清华大学有较多的相关专利。

图2.2.1给出了“电动汽车电池（结构、材料、效率、热管理系统）”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络；图2.2.2给出了该工程开发焦点主要机构间的合作网络情况。

2.2.2 深水油气开发装备与技术

（1）概念阐述

全球海洋油气资源丰富，储量占全球总资源量的34%，目前探明率为30%，尚处于勘探早期阶段，勘探开发前景广阔。我国的海洋油气资源也十分丰富，如我国南海海域，整个盆地群石油地质资源量在230亿吨至300亿吨之间，天然气总地质资源量约为16万亿立方米，占中国油气总资源量的1/3，其中70%蕴藏于深水区域。一般水深超过500米被称为深水，超过1500米被称为超深水。随着水深的增加，深水-超深水条件下的地球物理勘探、钻井及开发技术难度都随之增大。如风、浪、流、冰等自然及气候条件更为复杂；海水深度越深，孔隙压力和破裂压力之间的窗口越小，钻井控制难度

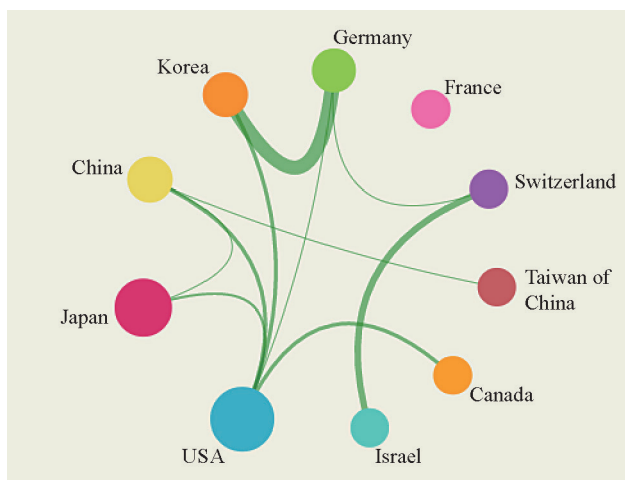


图 2.2.1 “电动汽车电池(结构、材料、效率、热管理系统)”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

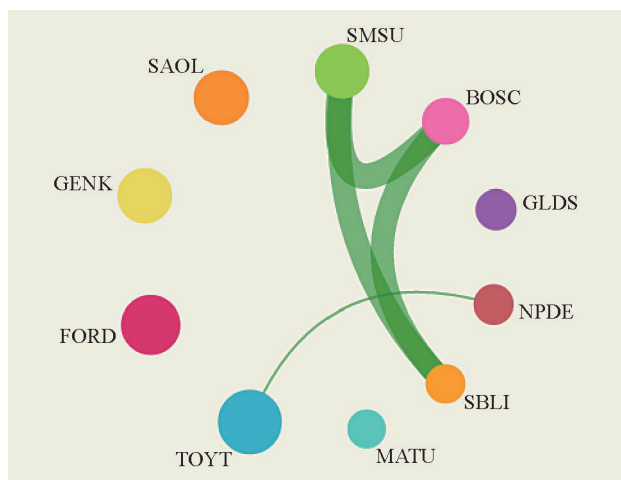


图 2.2.2 “电动汽车电池(结构、材料、效率、热管理系统)”工程开发焦点主要机构间的合作网络

就越大；水深增加温度降低，钻井液流变性变差、油气的流动控制更加困难。因此，深水油气开发装备与技术是世界各国油气技术创新的重要领域。深水油气开发是集信息技术、新材料技术、新能源技术及多学科于一体，多领域、多学科、复杂的系统工程，具有科技含量高、技术集成高、安全可靠性高的特点。我国深水油气开发起步较晚，目前技术水平较为落后。但伴随着我国“建设海洋强国、提高海洋资源开发能力”战略的部署，未来我国深水油气开发装备与技术将得到长足发展，这对提升我国能源安全水平，保证经济建设快速增长具有重要意义。

(2) 焦点各分支工程科学的概念阐述、拟解决的关键技术、发展趋势，以及各国发展重点

深水油气开发装备与技术主要工程技术有深水油气开发浮式结构、水下航行器、深水立管系统、水下生产系统、深水防喷器组控制系统、水下隔离阀系统、深水钻井井下溢流监测技术、深水流动安全保障新技术、深水油气勘探技术、长缆地震信号测量与分析技术、深水隐蔽油气藏勘探技术等。

• 深水油气钻井浮式结构

深水油气钻井浮式结构主要是钻井船和半潜式

钻井平台两种，钻井船主要组成有船体、锚泊或动力定位系统和自航行系统，具有机动性好、自航能力强、移动灵活和停泊简单等优点；半潜式钻井平台主要组成结构有圆形或方形截面的立柱与下部浮箱连接而成的主体支撑上部模块，具有水线面积小、抗风浪能力强、运动性能好、甲板面积和可变载荷大等特点，能解决水深超过 3000 米的区域钻井问题。深水油气开发安装阶段浮式结构主要是深水铺管船、深水多功能工程船 (MPV) 等。深水铺管船由船体、管道焊接系统、管道铺设系统、起重系统、动力系统和定位系统等组成，负责浮式平台安装、海管铺设、立管安装等任务。MPV 具有升沉补偿功能的绞车系统和多功能机械臂，有强大的单船作业能力，主要解决深水大型水下结构物 (采油树、水下管汇等) 的吊装和进行海底安装、海底深水柔性管铺设、ROV 作业支持、饱和潜水作业支持、海洋工程的综合检验和修理、深水锚处理和锚泊等多种作业生产，能解决 3000 米水深的复杂海况作业难题。深水油气开发的投产阶段，以张力腿式平台 (TLP)、立柱式平台 (SPAR)、浮式生产储油装置 (FPSO) 和半潜式生产平台为代表的浮式结构，主要进行油气的生产、储存、运输等工作。浮式结构主要解决的关键技术有概念设计、动力特

性预报、设计和建造、可服役性、耐久性和可维性、事故载荷和风险评估、环境及生态影响评估方法。浮式结构发展趋势有以 TrussSpar 复合结构为主的新型 FPSO，一种适应深水海域的轻型张力腿平台 (miniTLP) 概念，超大型浮式海洋结构物 (VLFS) 设计等。目前深水油气钻井浮式结构主要向模块化和更深的作业能力方向发展。

• 水下航行器

水下航行器主要包括载人潜水器 (HOV)、遥控潜水器 (ROV)、自治潜水器 (AUV)、深海拖曳系统 (DT)、水下滑翔器 (Glider) 和仿生潜水器等，主要功能为快速、精确地运载人员和设备到达各种深水环境，进行高效探查、作业。其中 HOV 下潜深度目前已超过 10 000 米，但其关键技术问题是 HOV 自身动力源不够持久，运行和维护成本高、风险高；ROV 和 AUV 作为无人水下航行器，可通过脐带缆连接水面母船而传输能源和信息，母船上的操作人员通过脐带缆遥控操纵 ROV 的机械手进行水下作业，其中 AUV 自身携带动力源依靠预先编制的程序指令进行自主控制作业，作业时间更长，作业能力更强。目前存在的关键技术问题是：强大的自身驱动动力、精确的定位技术、高清晰探测技术、超深水作业技术。水下航行器的发展趋势有立足于应用性兼顾经济性，舒适性的新型 HOV，实现载人与无人装备之间相互支持和协同作业的深海装备体系。

• 深水立管系统

深水立管系统涉及导管、钻井隔水管、送入管柱等三类管柱系统，其中深水钻井隔水管是连接浮式钻井平台与水下井口的重要设备，可提供钻井液循环通道、支持辅助管线、引导钻具、下放与回收防喷器组等。由于波流联合作用力的动态效应，深水钻井隔水管在服役期间会产生轴向拉伸、横向弯曲、耦合振动等一系列复杂力学行为，给深水钻井安全作业带来巨大挑战。目前存在的关键技术问题是深水钻井管柱力学与设计控制技术，其中主要关

键部分为水下井口的稳定性和安全可靠，另外还有合理的深水隔水管安装作业窗口设计，深水钻井隔水管的涡激振动和疲劳寿命评估，深水井筒完整性科学评价与设计控制问题，管柱力学模拟实验设计等。目前深水立管系统主要向轻量化、强度高、安装快捷、安全等方向发展。

• 水下生产系统

在深海油气开发过程中除了兴建大量的水面油气生产平台外，水下生产系统也已成为深海海洋工程技术的重要组成。水下生产系统按照功能可以分为采油树系统、管汇及连接系统、水下控制及脐带缆系统等。水下生产系统主要作用是在水下完成对生产流体的处理。水下生产系统避免了海面风、浪、流、冰等自然气候条件的影响，减少了海上事故的发生，使得海上油气生产更为安全可靠。目前，水下生产系统存在的主要关键技术问题包括水下长距离流动保障技术、水下电力输送与全电控制技术、水下安装技术、水下生产系统可靠性及完整性管理技术、极地水下生产技术等。目前水下生产系统的发展趋势主要是朝着智能化和全自动化方向发展。

• 深水钻井防喷器系统

深水钻井防喷器组通常由下部隔水管总成 (LMRP 系统)、中间连接器、下部防喷器组及防喷器组合框架等几大部分组成。深水钻井防喷器系统主要包括防喷器组和控制单元，其中深水钻井防喷器控制系统是具有集电液气一体化设计功能的多项控制技术的组合，不仅控制点多、系统构成复杂，而且要求系统可靠性高、控制元件灵敏快捷。目前存在的关键技术问题主要包括防喷器通道材料，深水钻井防喷器系统中控制单元的高度冗余的模块化集成技术，深水防喷器控制系统阀件设计、生产、测试技术。目前国内的研究单位大力开展深水防喷器组和控制系统及整体系统结构研究，包括理论分析与研究、标准的统一制定，现场系统配置反馈信息的收集、整理等。其发展趋势主要向着高系统压

力、三重冗余、高可靠性、智能化和绿色环保方向发展。

• 水下隔离阀系统

水下隔离阀系统 (subsea isolation valve, SSIV) 的设置能够实现对平台近端立管和海底管道的隔离, 以降低因泄漏引发的火灾爆炸后果, 但设置 SSIV 的投入成本较高, 是否值得设置是目前工程所面临的主要问题, 而且目前不论是在国外还是国内都缺乏一套专门的 SSIV 设置定量评估系统。关键问题是 SSIV 的投入成本太高, 因此对事故后果的准确量化、评估设置水下隔离阀系统所能够带来的收益具有极其重要的意义。目前国内已基于历史数据库研究海洋立管和海底管道的泄漏频率, 通过定量分析火灾爆炸后果, 建立 SSIV 效益评估系统, 实现对设置 SSIV 带来收益的准确评估。

• 深水钻井井下溢流监测技术

深水钻井井下溢流监测技术根据海洋钻井特点和传感器安装位置的不同, 可将溢流方法分为平台 (井口) 监测法、海水段 (泥线附近) 监测法和井下随钻监测法。深水钻井井下溢流监测技术用于实现井下溢流监测, 还可用于井下压井和井筒压力精确控制过程的综合监控, 为深水钻井提供技术保障。平台 (井口) 监测法主要是指以井口返出情况、井口监测参数为依据的监测手段和方法, 又可分为常规监测法、非常规监测法和井口综合监测法三种; 海水段监测法是海洋钻井所独有的技术, 海底泥线附近是海水段监测溢流的最佳位置, 及早发现井下溢流对井控有着极其重要的作用, 尤其是气侵。井下随钻监测法有随钻环空压力测量 (APWD)、随钻测井 (LWD)、随钻地层测试 (FTWD)、井下微流量测量、随钻超声波流量测量等。目前深水钻井井下溢流监测技术存在的关键技术问题包括深水井下溢流监测需更及时, 关键技术有声波监测法、隔水管超声波监测法、压差监测法、水下机器人观察法等。目前深水井下溢流监测技术发展趋势是向更早发现方向发展, 主要是溢流综合监测和识别技

术, 并筒压力安全控制预警施工监测技术方向。

• 深水流动安全保障新技术

深水流动安全保障技术主要是为了解决深水油气开发时在流动过程中造成的海底管道堵塞、渗漏和安全问题, 保证流动无堵塞, 并将油气流动控制在一个稳定的范围内, 优化流动行为, 降低油气输送费用成本, 实现安全、经济输送的目的。目前拟解决的关键技术有多相流混输技术, 其中主要的研究内容是混输管道多相流流型确定, 多相流流动规律研究; 固相生成物生成与控制技术, 其中主要研究内容有天然气水合物、石蜡、天然气水合物和石蜡的协同作用; 严重段塞流预测与控制技术。目前深水流动安全保障新技术的发展趋势是油水管线主动加热技术, 采用海管主动加热技术能从根本上维持管道内流体输送温度始终高于原油析蜡点, 并且在操作压力下保证其温度在水合物生成温度之上, 有效抑制管道内石蜡的沉积和水合物的形成, 实现流动安全保障的目的。水下多相分离技术, 即在海底井口附近对产出液分离, 从而降低立管中的压力, 减少举升能量损失, 提高油气采收率, 从根本上消除严重段塞流, 同时在一定程度上, 减少油气混合物中含水量, 有效抑制水合物的生成, 延长输送距离。

• 深水油气勘探技术

深海油气资源的勘探开发是石油工业的一个重要的前沿阵地, 与大陆架和陆上勘探钻井作业相比, 深水作业的施工风险高, 需要分析考虑世界深海勘探开发的技术现状及在钻探开发技术、石油平台建造、自然灾害的预告与规避等诸多难题, 还需要面对特殊的海洋环境、复杂的油气储藏、安全高效的技术和装备支持及后勤保障等多种挑战。目前存在的关键技术问题有深海钻探涉及海上固定平台或深海浮动式平台的泊位、深水海床的不稳定地质因素、浮动状态下的深水井控问题以及有效的保护深海环境等。这些技术主要的难点有: 油气勘探中如何确定油气藏的精确位置,

深水钻井所需的高新技术集成等。这些对海洋勘探装备、后勤组织等提出了更高的要求。未来的深海勘探船将以半潜式钻井平台为主，钻井装备的自动化程度将更加完善，深水钻井配套技术和设备性能将有更进一步的提高，强度高、重量小的新型材料将得到广泛应用。

• 长缆地震信号测量与分析技术

长缆地震信号测量与分析技术与常规地震资料的处理区别是地震炮检距和记录长度的加大，它的主要特点是排列长，处理数据量大，工区范围广，水深变化大，多次波发育。根据海上作业的特点，受海流和涌浪的影响，随着排列长度的增加，电缆偏离设计位置很多，在做地震资料处理时，特别是做二维地震资料处理时，无法得到准确的反射点位置和偏移距，因而就得不到最佳的反射成像剖面，会造成畸变拉伸现象、AVO现象丢失，造成严重浪费。目前该技术存在的关键技术问题有长电缆资料远炮检距的动校异常校正的四阶动校正技术，利用地震反射波振幅随偏移距（即随入射角）的变化而变化的特性来判断岩性、预测油气藏的AVO分析地球物理技术。目前该技术发展趋势是超深水深距长排列的定位技术、地震合并和高阶校正技术、多种去噪处理技术等等。

• 深水隐蔽油气藏勘探技术

隐蔽油气藏在地质科学上的解释指的是非构造类型的，在沉积过程中形成的岩性油气藏。地层不整合或地层超覆油气藏以及古地貌油气藏等隐蔽油气藏都是与沉积岩性质、地层超覆不整合有密切的关系。由于沉积物质的分布是受古构造环境、古地貌以及古水流条件的制约，常常侧向变化快，多呈水平层理的原始状态，起伏平缓，故在物探的信息上不易检测，难以寻找。目前拟解决的关键技术有水下冲积扇油藏的勘探技术，浊流水道和深水扇油藏的勘探技术，浊积砂岩透镜体油藏的勘探技术、地震不整合油藏的勘探技术。目前该技术发展趋势是研究一种新的地震方法，利用反射振幅信息定量

解释储层厚度，提高地震资料的分辨率的地震子波，合成声波测井和地震模型技术。

世界各国发展重点：

中国：目前中国深水油气开发装备与技术的研究重点是：深水浮式结构设计，如钻井船、半潜式平台，大型储油设备FPSO设计等；海上起重铺管船；深水立管设计；深水海洋隔水管设计；以及在深水井下防喷器起重装置、海底防喷组及其控制系统、智能化集中监控井控系统。

欧洲国家：目前欧洲国家主要开发技术有研发的地质微生物油气探测技术（德国）、防喷器与IWOC功能技术、海底电子系统、可移动海底控制模块技术、水下变压器系统设备、海洋隔水管复合使用压电结构监测系统。

英国：目前英国OHM公司研制了四代电磁信号发射源，全称为深海活动式场源设备（DASI）用于遏制水下油气泄漏的装置和方法；防喷器蓄能器系统、水下隔水管液压控制系统、水下修井控制系统、软着陆系统技术、井口套管环形安全阀装置及方法、带浮阀的油气收集装置、水下油气收集系统、船舶精确位置动力定位系统等。

挪威：用于延长海上石油回收应用的采油树寿命的技术；深水油气开发浮式结构；液压驱动定位锚绞车；船舶精确定位动力定位系统。

美国：美国在深水海洋装备技术开发方面技术一直领先，其研究重点多、科技含量高。除了勘探技术外，在深水防喷器设置和井口压力控制方面有大量研究，更加注重海底井控安全，有可识别出泄油模式和死油区位置的海上4D地震技术、用于油田地震勘探和生产的一种极可靠的小型全光学传感器、海洋可控源电磁勘探技术、用于提高海底井口和主导体的强度和抗疲劳性的海底防喷器系统技术、油井井喷封堵装置设计、用于海底防喷器的紧急控制系统、海底测试树控制系统、深水容器系统及其使用方法背景技术、多部署海底堆叠系统、海底油泄漏防护装置及方法、防喷器运输和处理系统、

海底井口压力控制系统、用于控制深水钻井应急状况的激光辅助系统、井口压力测试工具和方法、可连接低压接收器的海底操作阀、海底流体接口设备连接系统、激光辅助防喷器技术、备用井口防喷系统及方法、降低机械能量井控制系统技术、防喷器总成处理器防喷器监控系统技术、海底激光模块及其改造技术、防喷器密封件设计等。

国际：目前国际上在深水油气开发装备与技术方面主要研究的有海底管道系统、井口防喷器系统、海上油井密封系统和方法、海底分散喷射系统和方法、深水混合立管系统、海底泵送方法和相关设备的装置、水下防喷器控制系统、海底系统噪音缓解方法、防喷器防井喷冲压组件及其使用方法、浮式钻井船、防喷器控制井喷监测系统、双梯度钻井增强系统、电缆设计技术等。

(3) 目前发展现状与未来发展趋势

深水油气开发项目是一个大的系统工程，是一门跨学科、跨部门、多领域的技术创新工程，具有高投入、高技术、高风险和高回报等特点。世界各国都在争夺海上丰富的油气资源，开发深水、超深水油气钻探与开发技术。2012年5月9日，“海洋石油981”在南海海域正式开钻，标志着我国海洋石油工业的深水战略迈出了实质性的步伐。目前我国在深水油气勘探开发领域积累了较为丰富的经

验，具有3000米水深作业能力。但与海上油气开发强国的美国、荷兰、挪威、加拿大等国相比还有一定的差距。当前深水和超深水开发面临的主要挑战是海洋环境恶劣（北极低温区）、深水钻井井控难度大、泥线浅层水合物地质灾害、系统作业安全等。未来深水油气勘探开发将围绕上述几个重要的问题，从深水浮式钻井平台、机器人钻井系统、无隔水管钻机、深水智能集输等几个大的方面取得突破，最终向海底工厂化方向发展，实现海底自动钻井、海底油气处理、海底动力供应和控制、海底生产装备及控制、海底维修与增产等，实现海洋油气勘探开发装备水下作业，降低海洋气候变化对油气勘探开发的影响。结合我国实际，在引进国外深水油气开发先进技术的同时要做到自主创新，不断提升我国深水油气开发水平，争取早日达到国际领先水平。

(4) 重点研究国家和机构以及之间的对比及合作情况分析

从表2.2.3“深水油气开发装备与技术”工程开发焦点中核心专利的主要产出国家或地区可以看出，在深水油气开发装备与技术方面，专利产出前三的国家分别是美国、英国和荷兰，且排名第一的美国专利产出占全世界的74.69%，而中国仅占3.70%，说明美国在深水油气开发方面处于世界领

表 2.2.3 “深水油气开发装备与技术”工程开发焦点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	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	121	74.69%	1168	84.52%	9.65
2	UK	12	7.41%	43	3.11%	3.58
3	The Netherlands	7	4.32%	14	1.01%	2.00
4	Norway	7	4.32%	64	4.63%	9.14
5	China	6	3.70%	20	1.45%	3.33
6	France	5	3.09%	4	0.29%	0.80
7	Canada	3	1.85%	2	0.14%	0.67
8	Germany	3	1.85%	25	1.81%	8.33
9	Singapore	3	1.85%	16	1.16%	5.33
10	Denmark	2	1.23%	7	0.51%	3.50

先地位，具有绝对优势，中国目前的研究还处于前期探索阶段，主要是跟跑式研究。

从表 2.2.4 “深水油气开发装备与技术”工程开发焦点中核心专利的主要产出机构中可以看出，专利产出前十名中美国占据 9 个席位，其余 1 个机构来自英国，没有看到中国机构出现。这也说明深水油气开发装备与技术领域的核心技术均掌握在美国的相关机构中，如斯伦贝谢、哈里伯顿、贝克休斯等大的油田技术服务公司。

从图 2.2.3 “深水油气开发装备与技术”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络可以看出，荷兰、法国、英国、加拿大、美国这五个国家互相有产学研合作，其中美国和英国产学研合作交流最多，其次是美国和荷兰。美国在深水油气开发装备与技术方面不仅技术领先，而且美国与其他国家之间的产学研合作交流更多，体现了美国在国际上深水油气开发技术方面的主导地位以及美国的产学研交流圈的广泛。

从图 2.2.4 “深水油气开发装备与技术”工程开发焦点主要机构间的合作网络可以看出，只有美国的 SLMB 和 PRAD 机构以及 HYDL 和 VETC 机

构互相有产学研合作，其中 SLMB 和 PRAD 机构产学研最为密切，其公开的核心专利量也是最多。这说明掌握深水油气开发装备与技术领域的核心技术的美国的相关机构之间产学研合作也很频繁，说明了美国研究机构良好的产学研合作交流氛围，其在深水油气开发装备与技术研究方面有着强大的企业机构合作基础。相比之下，中国掌握核心技术的机构较少，更需要加强彼此间的产学研合作交流。

(5) 我国发展现状及重大发展方向

随着中国深水油气资源的开发，当今中国深水油气开发装备与技术研究现状主要在以钻井、水下安装和投产这三个阶段为主。各类钻井装备、工程作业船和 underwater 航行器等装备也在不断更新换代。目前主要在浮式结构钻井船、水下航行器、深水立管系统和水下生产系统四个方向进行重点研究，未来深水领域的技术创新将持续十分活跃。总的来说深水油气开发装备技术趋势正朝着深水钻井和开发平台配备设施高度自动化、作业或生产设施海底化、深水技术和装备多功能化、深水高新技术革新性四个方向发展，技术创新与突破将逐步颠覆传统的勘探开发方式，大幅度降低深水油气勘探开发的成本

表 2.2.4 “深水油气开发装备与技术”工程开发焦点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	HYDL	15	9.26%	44	3.18%	2.93
2	VETC	14	8.64%	59	4.27%	4.21
3	COOI	11	6.79%	43	3.11%	3.91
4	BRPE	8	4.94%	86	6.22%	10.75
5	SLMB	8	4.94%	58	4.20%	7.25
6	PRAD	7	4.32%	56	4.05%	8.00
7	NAOV	6	3.70%	58	4.20%	9.67
8	Subsea IP Holdings LLC	6	3.70%	136	9.84%	22.67
9	CALI	5	3.09%	86	6.22%	17.20
10	SHEL	4	2.47%	11	0.80%	2.75

* 机构全称：HYDL 表示 Hydril Co.；VETC 表示 Vetco Gray Inc.；COOI 表示 Cooper Technologies Co.；BRPE 表示 BP Chem Co., Ltd.；SLMB 表示 Schlumberger Technology Corp.；PRAD 表示 Prad Res&Dev Corp.；NAOV 表示 Nat Oilwell Varco LP；CALI 表示 Chevron Usa Inc.；SHEL 表示 Shell Oil Co.。

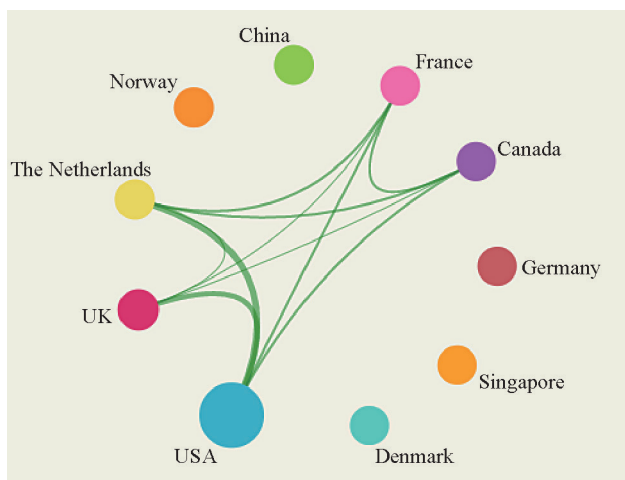


图 2.2.3 “深水油气开发装备与技术”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

和风险，并推动陆上油气勘探开发技术的突破与飞跃。深水油气产量有望占全球海上油气产量的 30% 以上，成为日益重要的战略接替区。

近年来，中国在海洋油气勘探开发领域投资逐年增加，参与研究的科研院所也越来越多，如中国石油大学（北京）、中国石油大学（华东）、中国海洋大学、上海交通大学、西南石油大学、大连理工大学、中国科学院海洋研究所、广州海洋地质调查局、中海油研究总院、中石油钻井院等单位。目前国家科技部、自然科学基金委等单位支持了多项深水油气开发类重大科研项目，如中国石油大学（华东）承担的“973”计划项目“海洋深水油气安全高效钻完井基础研究”，联合了中国石油集团钻井工程技术研究院、中海油研究总院、中国科学院海洋研究所、中国石油大学（北京）、上海交通大学、中海油田服务股份有限公司、中国石油集团海洋工程有限公司等多家优势单位联合攻关，采用产学研联合研究模式，旨在形成一套适合中国南海深水安全高效钻完井的基础理论体系，为实现中国深水油气开采技术的跨越式发展提供理论支撑。

中国已建成以 3000 米水深第 6 代深水钻井平台 HYSY981 和 S 形起重铺管船 HYSY201 等多类

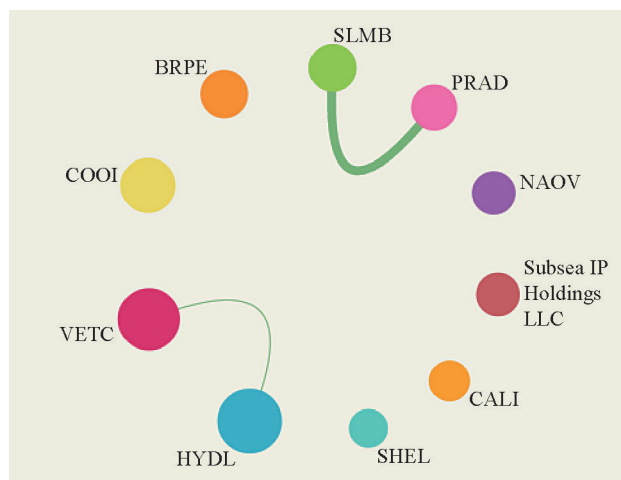


图 2.2.4 “深水油气开发装备与技术”工程开发焦点机构间的合作网络（涉及机构较多，但机构间合作较稀疏，机构显示不充分）

海洋油气开发装备，但配套设备国产化率不高，水下生产系统及深海安装、维修、救援作业装备技术仍需依靠国外。

针对目前中国深水油气开发装备与技术发展现状，我们提出以下建议：进一步优化科技资源配置，设立“深海油气钻探”专项基金，重点支持相关基础科学研究，突破深海油气开发相关技术瓶颈；大力研发深海油气工程技术装备，提升核心装备国产化率，形成系统深海作业能力，缩小与国外差距；积极稳步推进极地海洋油气钻探，提高中国极地油气钻探领域话语权；加快实施海洋油气开发人才战略，提升自主创新能力，建设具有国际化水平的深海油气开发队伍；加强国际合作，积极参与国际重大深海油气开发研究计划，提升中国深水油气勘探开发水平。

2.2.3 新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂

(1) 概念阐述

随着世界经济和社会的快速发展，油气资源的消耗量与日俱增，常规油气资源难以满足日益增长的能源需求。同时，随着油气开发和开采技术的快速进步，难以动用的非常规油气资源逐渐得以经济

开发。尤其是近十年来,非常规油气(如致密油气、页岩气、煤层气等)开发热潮逐渐兴起,已成为未来油气新的增长点。然而非常规油气的储层构造复杂,开发过程更加困难,开发投入也很大程度的增加。因此,如何找到更加合理、高效、节约成本的开发方式,是当前非常规油气开发利用过程中所遇到的难题。在非常规油气开发过程中,压裂是最基本的增产方法,目前常用的压裂方式是水基压裂,这种方式存在清水用量巨大、环境和储层污染、回收处理困难等问题。在此背景下,新型压裂方法与技术得到了快速发展,也是近年来各国非常规油气开发主要的研究方向。新型的混合压裂、无限级压裂、纤维压裂、通道压裂、无水压裂和液化石油气压裂技术等是近年来国内外研究的热点。新型压裂技术能够不同程度的解决常规压裂的现存问题,可大幅提高非常规油气产量和采收率,这些技术的研究和应用将对我国水资源匮乏、环境污染严重、设备运输困难等地区非常规油气商业开发发挥重要作用。

(2) 焦点各分支工程科学的概念阐述、拟解决的关键技术、发展趋势,以及各国发展重点

新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂研究发展迅速,目前主要集中在如下领域:

• 无限级压裂技术

非常规油气开发,尤其是页岩气开发采用长水平井多级压裂技术,水平段长度 1000~3000 m,或者更长,每 50 m 压裂一段则需要压裂 20~60 段,常规投球压裂由于油管内通径的限制,一般下一趟管柱压裂 15 段就达到了极限。为了缩短压裂工时和降低压裂成本,国内外不断向无限级压裂技术前进。连续管无限级滑套分段压裂技术是近几年发展起来的一种多级压裂技术,一趟管柱最多进行了 97 级压裂,单井最高压裂级数记录达到 104 级,压裂井的最大垂深为 4681 m,最大测量井深 6256 m。该技术采用新型无极差套管滑套,随套管下入井内后实施常规固井,再依托配套工具依次打开各

层滑套并进行分段压裂施工,以实现一趟管柱多层/多段压裂。目前,桥塞分段射孔压裂和投球滑套分段压裂是现场较为常用的两种多级压裂工艺。与普通的分级压裂不同,无限级压裂拟解决的关键技术是不受压裂段数限制,精确的压裂定位,如何让压裂液循环直达目的层,并实时监测压裂层段压力。

无限级压裂技术是一种新型的压裂工艺,是低渗透油气藏、薄油层、页岩气、煤层气等非常规油气资源储层增产改造的关键工具,在油田增产增效方面有较大的优势。目前的发展趋势是朝着一趟管柱更多压裂级数,单井压裂级数进一步增加,压裂井深进一步加深的目标迈进。

该技术由加拿大 NCS 能源公司研发,于 2014 年连续打破了单井压裂级数的世界纪录,并获得 2014 年美国石油工程师协会(SPE)加拿大地区技术奖和 2014 年世界石油最佳完井奖。目前该技术主要由 NCS 能源公司掌握,其他国家的应用都是由该公司提供技术服务。

• FracInsight 精确压裂技术

为了解决油藏开发中,很多水平井射孔段无油气产出的问题,哈里伯顿公司开发了一个全新的“压裂定位”模块 FracInsight,该模块可根据水平井段中的地层评价数据,来精确选择射孔和压裂位置。FracInsight 技术是可重复的解释工作流程,其本质是通过消除无用的射孔簇和压裂区域,来实施更具一致性的压裂作业,从而减少不一致的破裂和处理压力,使得产量最大化。该技术拟解决的技术关键是利用提供的生产指数和压裂指数两个参数,将其结合起来优化压裂段和射孔簇的布局,从而来实现精确压裂。目前,该项新技术已在北美应用,包括加拿大和墨西哥等国家,但是仅有数十名分析师可熟练掌握该技术。该技术的发展趋势是朝着怎样充分结合生产指数和压裂指数,来更精确的实现压裂,同时培养更多的分析师进一步提升该技术的方向发展。

该技术由哈里伯顿公司以 CYPHER2.0 地震 -

增产技术为基础，开发的一个全新的“压裂定位”模块 FracInsight。目前该项技术已在北美应用，包括加拿大和墨西哥等国家应用。

• StimMORE 压裂转向技术

该技术是斯伦贝谢公司研发的一项新技术，因为在进行压裂液转向过程中，凝胶和泡沫都是常用的转向剂，他们留下的残余物可能对储层的长期生产产生不利影响，StimMORE 技术采用了纤维负载转向液，该转向液成本低，封堵效果好且可以完全降解，不会对地层产生伤害，通过将纤维添加到砂浆中，使得裂缝上支撑剂和纤维形成桥堵。由于纤维密度较小，可以阻止其发生沉淀，从而使纤维能够被携带到预期的位置。纤维的形状能够使其横跨连通的孔道和裂缝，其固相含量比单纯颗粒的固相含量低很多，这种在泵入过程中形成的临时障碍使得井底压力增加，足以在地层其他地方压开裂缝，数日后纤维溶解，不会对储层造成伤害。拟解决的关键技术是如何实时监测转向剂的转向效果，以及如何进一步改进纤维负载转向液的性能，使其应用在超高温、超高压等更苛刻的地层条件下。该技术的发展趋势是朝着研究更加精准的监测装置，改进纤维负载转向液性能，使其更好更精确地应用于更加复杂的地层中，从而实现转向效果。

StimMORE 压裂转向技术由斯伦贝谢研发，同时与 StimMAP 实时微地震监测技术相结合，可以实时监测裂缝发育情况并及时调整泵送方案，最终实现降低完井费用、储层接触最大化的目的，该技术在各区块的应用都由斯伦贝谢公司指导。

• 混合压裂技术

虽然清水压裂排液容易，对裂缝导流能力伤害较小，但清水压裂携砂能力差，裂缝宽度难以维持，近井筒地带容易出现砂堵，如果采用小粒径支撑剂降低沉降速度则又容易使裂缝在高的地层压力下重新闭合，对清水压裂的改造效果影响很大。混合压裂的出现显著改善了清水压裂滤失高、黏度低和携砂能力差的缺陷，此方法可以实现泵入更大粒度的

支撑剂，增加裂缝宽度，降低储层伤害。

混合压裂技术是先泵入滑溜水，将清水的强造缝能力充分发挥，促使长裂缝产生，再泵入交联凝胶前置液，利用凝胶和一定粒径支撑剂的混合液在先前形成的长裂缝中发生黏滞指进，使得支撑剂沉降得到减缓，裂缝导流能力得到保证。通过对常规水力压裂和新型混合压裂的增产效果综合评价和对比，采用混合压裂生成的有效裂缝半长更长，可使裂缝显著增长，提高裂缝波及范围，且携砂能力更好，滤失更低，用水量得到显著节约。

混合压裂的技术相比普通清水压裂需要解决的技术关键是如何形成更长的有效裂缝，实现更好的携砂能力和较低的滤失。混合压裂对储层的伤害程度明显小于交联剂压裂，因此如何更大程度地减小储层伤害也是该技术需要解决的问题关键。

该技术朝着进一步增加裂缝半长，进一步减小地层污染的方向发展。目前混合压裂技术主要是美国阿纳达科石油公司和贝克休斯公司所主导，他们在美国多个页岩气开发区块应用此技术，并取得了显著的效果。

• 纤维压裂技术

清水压裂技术普遍存在不能使支撑剂合理充填于水力裂缝中，不能有效提高渗透率等问题。采用新型纤维基压裂液（FiberFRAC）作为压裂主剂，可有效地改善水力裂缝宽度不够、压裂液携砂能力不足、支撑剂快速沉降聚集在井周裂缝底部等问题。

纤维压裂技术的工艺原理是将纤维类物质加入到压裂液中，使得在压裂过程中，提高压裂液的视黏度，使支撑剂保持悬浮。有些纤维结构可在压裂结束后自动溶解，从而进一步提高改造缝的导流能力。该技术悬砂性能得到了提高，裂缝导流能力也得到很大程度的改善，且不需大型的设备，降低了施工成本，是一种有效的新型压裂技术。

可降解纤维压裂技术在合适的储层使用效果显著，如弱脆性、埋藏较浅的页岩储层，而且配合滑溜水基液和轻质支撑剂效果更好。

该技术的发展趋势是朝着进一步改进压裂液的性能,使其能够应用在更多地层,选择更加合适的支撑剂与之配伍的方向发展。

该项技术主要是以斯伦贝谢公司为主的一些公司中研发使用,在北美致密气藏开采中表现优异。墨西哥国家石油公司也拥有了此项技术,他们在开发 Burgos 盆地的致密砂岩气时,取得了较好的效果。

• 无水压裂技术

无水压裂技术主要包括:氮气压裂、CO₂ 压裂、液化石油气压裂等技术。

氮气压裂技术是利用氮气作为压裂基质,进行压裂造缝,提高储层渗透率,来达到增产目的的技术。压裂过程不含水和固体颗粒,既消除了常规压裂液由于含水带来的水敏、水锁伤害,又杜绝了固体颗粒堵塞孔喉、裂缝的现象。但由于氮气密度低造成携带支撑剂困难,压裂过程无支撑剂的使用,致使在生产一段时间后,已经压开的裂缝由于压力作用会慢慢闭合,进而影响压裂后期效果,经济效益降低。

液氮压裂技术是近几年研究的热点,其利用液氮(195.8℃)作为压裂液来对储层进行压裂改造,其辅助裂缝起裂机理主要有以下两点:热冲击力,温度极低的液氮接触储层岩石时会产生热力冲击,在岩石断裂面形成热应力,超过岩石的抗拉强度使岩石断裂面破碎。

液态 CO₂ 压裂技术是利用液态 CO₂ 作为压裂介质注入储层,完成造缝、携砂、顶替等过程。与此同时,地层温度下液态 CO₂ 快速气化,混溶于原油中,大大降低原油粘度,增强原油的流动能力;CO₂ 与储层中的水反应生成碳酸,减少粘土矿物膨胀,解除裂缝堵塞,增加储层溶解气驱的能量,最终达到增产的目的。

近年来又有学者提出利用超临界 CO₂ 压裂的方法,当温度和压力超过 CO₂ 的临界温度 31.1℃ 和临界压力 7.38 MPa 时,它将处于超临界状态。超临界流体是不同于气体和液体的流体,基本性质

也不同。它的密度接近于液体,而黏度约为水黏度的 5%,接近于气体;它的表面张力很低,扩散系数较液体高,具有很强的渗透能力。

CO₂ 的临界压力和临界温度较低,所以在井内压裂改造的条件下很容易达到超临界状态,超临界 CO₂ 是目前应用较为广泛的超临界流体。当超临界 CO₂ 作为压裂液用于压裂改造时,它体现出了与滑溜水压裂和泡沫压裂等不同的优势:CO₂ 价格低、容易得到,超临界 CO₂ 不易燃易爆,无腐蚀性;

超临界 CO₂ 的黏度低,接近于气体,表面张力很低,接近于零,容易流动、摩阻系数低;超临界 CO₂ 流体不会导致储层中黏土膨胀,从根本上避免了水锁效应、岩石润湿性反转等危害的发生,有效保护储层不受损害;用超临界 CO₂ 进行压裂,返排迅速而彻底,是一种低伤害的清洁压裂液,还能缩短生产周期;相对于常规压裂液,超临界 CO₂ 压裂流体扩散能力强,渗透能力强,很容易渗入储层中的孔隙和微裂缝,有利于产生大量的微裂缝网络。

超临界 CO₂ 压裂拟解决的技术关键是超临界 CO₂ 携带固相的能力问题,以及压裂设备的进一步改造等问题。目前 CO₂ 压裂已经受到各国的关注,美国、中国等国都对 CO₂ 压裂有了很深入的研究。

• 新型纳米材料在压裂中的应用

传统的胍胶交联压裂液对地层伤害大,为了减少裂缝中残留的大量聚合物,人们研究了很多氧化剂、酶以及其它破胶剂,但油气生产效果仍然不理想,因此部分地区又重新开始使用清水压裂液,虽然成本低、现场效果较好,但滤失量较高。因此在如何减小对地层的伤害基础上实现增黏和降滤失成为研究的新方向。传统的弹性表面活性剂压裂液用于砾石充填和水力压裂已有二十多年的历史。这种体系中,表面活性剂能在盐水中自然排列形成线性胶束(TLM)结构。这种线性胶束与聚合物相似,通过胶束的重叠和缠绕来增黏。通常,线性胶束体系在多孔介质中会快速滤失,造缝效率很低,因此限制了线性胶束体系的应用。

对此，国外研制出一种纳米颗粒缔合的表面活性剂胶束压裂液，能够缔合线状胶束，形成三维网络结构，从而实现造壁、降滤失和提高液体效率。该体系胶束内部含有破胶剂，能够随着体系到达任意位置，保证体系完全破胶。纳米增强的表面活性剂压裂液能够用于更多类型的储层。与常规胍胶相比，能够获得更持久和更高的产量，尤其适用于导流能力伤害较敏感的井。此外，还开发了相对应配套的添加剂，如破胶剂等。

此外，纳米材料也在井下工具中得到了应用。如可控电解金属（CEM）材料，具有高强度、溶解速度可控和轻质等独特性质，是制造免修井作业井下工具的理想材料。它能实现流体控制功能，而且能够在井筒液体中溶解，确保每层压裂后流道畅通，从而提高产能。

纳米材料已在现代压裂技术中逐渐投入使用并发挥着越来越大的作用，今后逐渐向低成本和个性化（适用不同地层条件）方向发展。

• 新型支撑剂

支撑剂随压裂液注入地下，可使裂缝保持张开的状态，便于油气采出。增黏携砂技术出现之后，所用支撑剂从砂子、树脂覆砂、陶粒、玻璃微珠、胡桃壳、钢珠到高分子合成微球等逐渐演化，种类繁多。支撑剂要求耐闭合压力，一般地层闭合压力范围为 35~70 MPa。其种类、形状、强度、硬度、耐磨性、耐酸碱性、抗腐蚀性、韧性、粒度、填充密度、分布状态、导流能力等均会对压裂效果产生直接影响。

实际运移过程中，支撑剂容易堆积在裂缝中，出现“孤岛”、回流、成岩、压实、掩埋、溶解等现象，易堵塞或闭合裂缝，不利油气开采。因此，超高强、超低密度、自悬浮性、新型棒状、功能性等新型支撑剂近来得到广泛关注。理想支撑剂的特性是：高强、圆滑、具有化学惰性、低成本、低密度、方便实用、不易回流、不易掩埋。

但目前而言，即使效果最好的新型支撑剂也无

法具备所有的理想条件。这就希望该技术能够朝着支撑剂既能很好地被运移到地层指定位置，同时又能实现很好的压裂效果，并且保持其稳定性，朝着获得“一次作业长久获利”的效果等方向发展。

• 表面改性剂（surface-modification agent，SMA）包覆技术

该技术通过线型高分子薄层包覆支撑剂，使其互相粘连，从而增加支撑剂表面摩擦力。SMA 技术可以实现快速包覆，分子稳定性、耐酸碱性强，与压裂液相容性好；提高压裂液黏度，降低支撑剂沉降比和沉积率，改善流通性，防止回流现象。SMA 还可以在砂粒、陶粒表面包覆，通用性强。但 SMA 方法能否在不同压力段中保持良好性能，还有待进一步研究。SMA 难溶，会给设备清洗工作带来不便，哈里伯顿公司对此研发出一种可溶性水基表面改性剂 ASMA，绿色环保，对环境危害小，与压裂液相容性好。

表面改性剂的发展趋势是使其在不同的压力段中保持良好的性能，同时能够对压裂液起到增强效果的作用。

（3）目前发展现状与未来发展趋势

新型压裂技术及其相关材料的快速发展，得益于非常规油气的规模化开发，因此这些方法的出现也主要是针对非常规油气开发。非常规油气压裂技术的发展是逐渐革新的过程，从最初的凝胶、N₂ 压裂到广泛应用的清水压裂再到现在广泛研究的新型压裂，每次创新都给非常规油气开发带来了革命性突破。

目前，为了满足页岩气、煤层气等非常规油气的规模化商业开发，压裂技术已实现无限级压裂，裂缝扩展可在一定程度上得以控制。压裂转向技术已经大规模应用，混合压裂技术已进入现场应用阶段，纤维压裂和通道压裂技术也取得了现场成功试验。无水压裂技术以 LPG、N₂、CO₂ 压裂最具代表性，目前仍处在基础研究与现场局部试验阶段，美国、加拿大、中国等均在基础研究方面取得了一定

突破，尤其在 CO₂（或者超临界 CO₂）压裂方面，我国目前研究进展已处于世界领先地位；在压裂流体、支撑剂与添加剂研究方面，小分子低伤害胍胶研究得到了快速发展；此外，新型纳米材料在压裂中得到了广泛应用，如纳米颗粒缔合的表面活性剂，纳米井下工具等；支撑剂研究方面，其抗压强度越来越高，密度可选范围逐渐增大。

未来无论是常规水基压裂技术还是无水压裂技术，均逐渐向低成本、环保、高效的方向发展，来满足经济开发条件更为苛刻的非常规油气开发需求。

（4）重点研究国家和机构以及之间的对比及合作情况分析

从表 2.2.5 “新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂”工程开发焦点中核心专利的主要产出国家或地区可以看出，专利产出前三的国家分别是美国、中国和加拿大，且排名第一的美国专利产出占全世界的 78.59%，而中国仅占 11.43%，说明美国在深水油气开发方面处于世界领先地位，中国目前的研究还处于初步研究阶段，主要是跟跑式研究。

从表 2.2.6 “新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂”工程开发焦点中核心专利的主要产出机构中可以看出，专利产出前十名中美国占据 7 个席位，其余三个单位来自中国和俄罗斯，中国机构出现的

比例较小。这也说明新型压裂的核心技术均掌握在美国的相关机构中，美国具有绝对优势。而在美国的几个机构中，哈里伯顿、斯伦贝谢、贝克休斯等三大石油技术服务公司掌握了核心技术。由此看来，中国在该领域还处在跟跑研究阶段。

“新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂”工程开发焦点主要国家 / 地区间和机构间的合作网络见图 2.2.5 和图 2.2.6。

由图 2.2.5 可以看出，发明专利最多的美国与加拿大、英国、中国、法国之间的合作最多，美国、中国、加拿大、荷兰和法国是发明压裂相关专利的前五位国家，这五个国家之间的合作也是最多的。英国、维尔京群岛、俄罗斯等国相应的发明专利紧随其后，在压裂方向的研究也相对较多，这些国家之间的相互合作，共同促进新型压裂、流体、支撑剂与添加剂的前进方向与技术走向，是新技术的代表。

由图 2.2.6 可以看出，SLMB 和 PRAD 这两个机构所发明的专利数占有企业专利数的绝大部分，而且他们之间的合作也占有绝对的优势，其他机构发明的相关专利相对较少。由此可见，这两家机构处于创新和技术前沿，其他机构的研究较少或者说处于起步阶段。

目前，中国在新型压裂技术方面的研究处于初

表 2.2.5 “新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂”工程开发焦点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	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	378	78.59%	3686	84.77%	9.75
2	China	55	11.43%	390	8.97%	7.09
3	Canada	47	9.77%	220	5.06%	4.68
4	The Netherlands	35	7.28%	152	3.50%	4.34
5	France	34	7.07%	135	3.10%	3.97
6	UK	29	6.03%	107	2.46%	3.69
7	Virgin Islands	23	4.78%	93	2.14%	4.04
8	Russia	18	3.74%	40	0.92%	2.22
9	Germany	6	1.25%	32	0.74%	5.33
10	Saudi Arabia	5	1.04%	49	1.13%	9.80

表 2.2.6 “新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂”工程开发焦点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	HALL	200	41.58%	2226	51.20%	11.13
2	SLMB	73	15.18%	554	12.74%	7.59
3	PRAD	51	10.60%	299	6.88%	5.86
4	BAKO	34	7.07%	250	5.75%	7.35
5	CNPC	16	3.33%	121	2.78%	7.56
6	SNPC	9	1.87%	69	1.59%	7.67
7	Trican Well Service Ltd.	6	1.25%	38	0.87%	6.33
8	Carbo Ceramics Inc.	5	1.04%	64	1.47%	12.80
9	Self-Suspending Proppant LLC	5	1.04%	42	0.97%	8.40
10	Tatneft	5	1.04%	2	0.05%	0.40

* 机构全称：HALL 表示 Halliburton Energy Services Inc.；SLMB 表示 Schlumberger Technology Corp.；PRAD 表示 Prad Res&Dev Corp.；BAKO 表示 Baker Hughes；CNPC 表示 China Nat Petroleum Corp.；SNPC 表示 Sinopec Corp.。

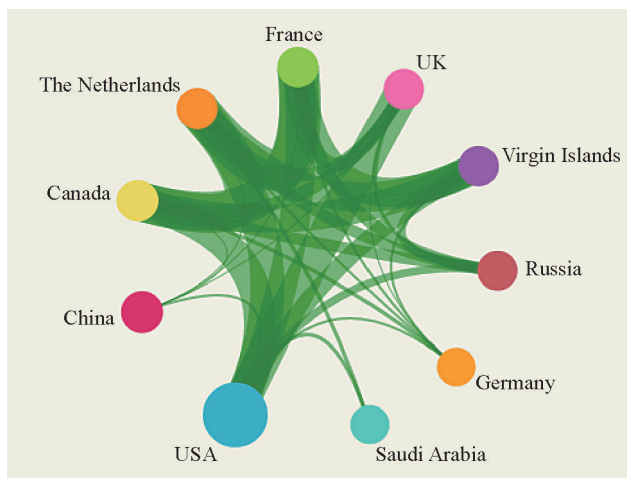


图 2.2.5 “新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂”工程开发焦点国家或地区间的合作网络

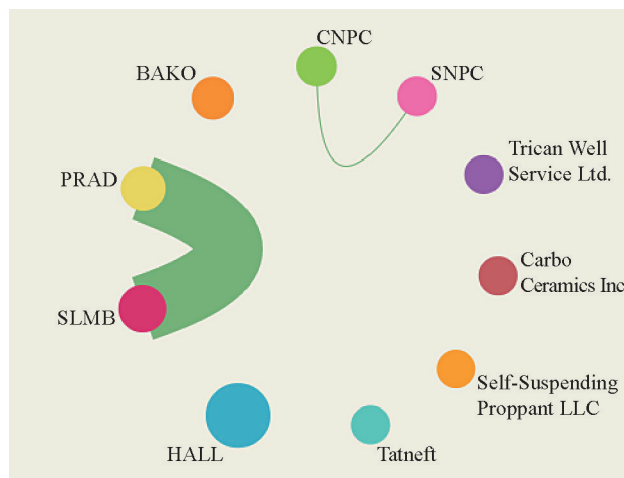


图 2.2.6 “新型压裂方法、流体、支撑剂与添加剂”工程开发焦点主要机构间的合作网络（涉及机构较多，但机构间合作较稀疏，机构显示不充分）

级阶段，大量的工艺技术都是学习或借鉴国外，我们在大部分技术中尚处于跟跑阶段。而新型压裂支撑剂的研究和使用也大都出现在国外，国内处于跟随阶段，发展速度缓慢的根本问题在于材料性能问题。

(5) 我国发展现状及重大发展方向

目前我国在新型压裂技术方面的研究处于起步阶段，大量的工艺技术都是学习或借鉴国外。根据我国在该方面公开的专利数量看，我们在大部分技

术中尚处于跟跑研究阶段。

目前较为前沿的压裂方法均为国外公司或机构提出，我国相关单位跟踪模仿研究，如无限级压裂技术、压裂转向技术等。但由于材料和加工制造等问题，关键核心技术仍不能取得突破，如可重复利用的橡胶封隔器，由于我国橡胶材料性能问题，国外进口产品能反复坐封十余次，而国产产品只能用两三次，影响了相关技术的整体发展。

为了研究适合我国非常规油气特点的开发方

法,目前我国多家机构开始了无水压裂技术研究,尤其在液氮和超临界 CO₂ 压裂方面,我国已取得了较大的优势,目前已进入现场试验阶段,预计未来五年将进行规模化应用。尤其是超临界 CO₂ 压裂方面,将与油气驱替、置换、埋存等结合,切实实现油气能源的绿色开发与利用。

当前我国针对页岩气压裂主要研究方向为:大规模水力喷射压裂技术、无限级压裂技术、通道压裂技术、无水压裂技术、新型纳米表面活性剂、新型压裂液以及超轻和超高强度支撑剂等。为了加快我国在新型压裂技术方面的发展,建议设立“非常规油气新型压裂技术”专项资助基金,重点支持相关基础科学研究,突破非常规油气开发相关技术瓶颈;整合优势资源,成立产学研多学科交叉研究团队,从理论设计、材料加工等基础问题出发,对当前技术研发中存在的的关键问题进行联合攻关;加强国际合作,积极参与国际重大非常规油气开发研究计划,提升中国非常规油气开发水平。

2.2.4 核电装备:反应堆堆芯燃料组件、泵、阀门、容器、管道、安全壳

核电装备技术是实现反应堆热工水力功能、保障核电厂经济安全运行的关键技术,包括设计、材料、加工制造、检验检测、安全评定、验收、运输、退役等多方面的技术。随着社会公众对核电安全的关注度的提高,对核电装备的安全性提出了越来越高的要求,包括更高的抗震等级、更持久的寿命、更稳定的运行、更可靠的非能动技术、更强的抗灾减灾能力等。目前世界上仅有美国、法国、俄罗斯具备完整的核电装备成套标准技术。我国的核电装备技术经过近些年的引进消化吸收再创新,利用国内核电装备市场的优势,已经具备了百万千瓦级核电装备自主设计、自主制造、自主创新的能力。

反应堆燃料组件是组成反应堆堆芯的核心部件,是发生链式裂变反应和包容裂变产物的唯一部件。反应堆泵阀是驱动反应堆冷却剂循环和实现反应堆

热工水力功能的重要设备。反应堆压力容器和管道是反应堆系统回路的重要压力边界,压力边界的完整性对于防止放射性物质泄漏起着关键作用。反应堆安全壳是反应堆最后一道安全屏障。上述核电装备不同于普通的能源装备,正常运行期间除了承受高温高压环境外,还受到强烈的来自裂变和衰变反应的辐照作用。核电安全要求核电装备在反应堆设计基准事故工况下保持一定的安全功能和结构完整性。随着具有更高安全概率的三代和四代先进反应堆堆型出现,包括海上浮动核电站和小型模块式反应堆的开发,对核电装备提出了更高的安全要求。

反应堆燃料组件主要有组合棒式燃料组件、球形燃料组件、液态熔盐式燃料组件等。燃料组件在反应堆中使用 3~5 年的时间,处于强中子场中,经受高温、高压、高流速冷却剂的冲刷,同时承受裂变产物化学作用和复杂的机械载荷,工作条件十分苛刻。目前国际上主流的压水堆均采用无盒 17 × 17 型棒状燃料组件,燃料组件由燃料棒、导向管、定位格架和上下管座组成。燃料棒内的燃料芯块是由 3%~5% 富集度的浓缩铀加工而成。燃料包壳是反应堆的第二道安全屏障,定位格架是支撑燃料组件的重要骨架。为了提高燃耗增加核电的经济效益,世界各国积极开发新型高性能燃料组件,他们的特点是:长循环、高燃耗、高可靠性安全性、运行的灵活性、减少乏燃料的贮存量、延长电厂寿命、降低燃料制造成本。AFA3G 是世界上目前投入商业运行的高性能燃料组件之一。

核电泵阀分核安全级和非核安全级两种,其中核安全级泵包括反应堆冷却剂泵、上冲泵、余热排出泵、安全壳喷淋泵等,核安全级阀门包括稳压器安全阀、比例喷雾阀、主蒸汽隔离阀、爆破阀等。其中反应堆冷却剂泵(简称核主泵)是驱动反应堆一回路冷却剂循环,实现堆芯热量导出的重要设备。反应堆冷却剂泵主要有轴封式和屏蔽式两种。反应堆冷却剂泵的关键技术包括高效水力模型开发、高可靠性水润滑轴承、高稳定性转子动力学、高转动

惯量飞轮及其完整性、屏蔽电机主泵复杂间隙流动特性、轴封式核主泵的三级动静压密封技术、屏蔽电机主泵的定转子屏蔽套加工安装技术、抗震技术等。基于法国核电技术主泵主要是轴封式，基于美国西屋公司的三代核电技术主要是屏蔽电机主泵。核电阀门的主要关键技术包括低流阻阀芯结构设计、阀门瞬态流动与阀杆受力、流致振动与噪声控制、大推力阀门驱动机构、阀芯磨损与寿命评估、阀门可靠性安全评价等。

反应堆压力容器主要是指反应堆本体结构的压力容器，是反应堆冷却剂压力边界的重要设备。其材料要求有高度完整性、适当的强度和韧性、低辐照敏感性、便于加工制造和成本低廉等。压力容器的寿命直接关系到核电站的寿命。压力容器的关键技术包括：大锻件制造技术、法兰密封及其检漏技术、事故工况下堆芯熔融物滞留技术、在役检查技术、法兰螺栓锁紧机构、辐照监督及其水下检修技术等。反应堆管道包括一回路主管道和二回路管道等，其关键技术主要是管道焊接技术以及防腐技术。

反应堆安全壳是构成压水反应堆最外围的建筑，用以容纳反应堆压力容器以及部分安全系统

（包括一回路主系统和设备、停堆冷却系统），将其与外部环境完全隔离，实现安全保护屏障的功能。安全壳是防止裂变产物释放到周围环境的最后一道屏障。安全壳一般是内衬钢板的预应力混凝土厚壁圆筒结构，顶部呈半球形。安全壳有多种形式，结构材料有钢结构、钢筋混凝土或预应力混凝土，也有既用钢也用钢筋混凝土或预应力混凝土的复合结构。三代核电的安全壳采用了可外部冷却的双层安全壳技术。

核电装备重点开发国家和机构包括：中国上海电气、东方电气、哈尔滨电气，美国西屋，日本三菱重工，韩国釜山重工，法国阿海珐，德国 KSB 等。

通过科技攻关和核电设备国产化基础设施建设，目前中国已基本具备二代改进型百万千瓦级核电装备成套制造与供应能力，在引进消化吸收 AP1000 等三代核电技术的基础上，通过核电国家重大专项开展，解决了具有中国自主知识产权的三代核电技术华龙一号和 CAP1400 等的关键核电装备设计制造技术。初步形成了包括铀矿开采、铀浓缩、燃料元件制造以及乏燃料后处理等的核燃料循环工业体系。

表 2.2.7 “核电装备：反应堆堆芯燃料组件、泵、阀门、容器、管道、安全壳”工程开发焦点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	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	97	31.91%	265	33.97%	2.73
2	Japan	79	25.99%	191	24.49%	2.42
3	USA	64	21.05%	211	27.05%	3.30
4	Korea	40	13.16%	92	11.79%	2.30
5	France	8	2.63%	6	0.77%	0.75
6	Russia	7	2.30%	8	1.03%	1.14
7	Canada	5	1.64%	1	0.13%	0.20
8	Sweden	3	0.99%	2	0.26%	0.67
9	Germany	2	0.66%	4	0.51%	2.00
10	UK	2	0.66%	1	0.13%	0.50

表 2.2.8 “核电装备：反应堆堆芯燃料组件、泵、阀门、容器、管道、安全壳”工程开发焦点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	CNNU	31	10.20%	93	11.92%	3.00
2	GENE	31	10.20%	98	12.56%	3.16
3	TOKE	25	8.22%	48	6.15%	1.92
4	KAER	21	6.91%	32	4.10%	1.52
5	CGNP	17	5.59%	53	6.79%	3.12
6	MITO	14	4.61%	18	2.31%	1.29
7	WESE	13	4.28%	43	5.51%	3.31
8	BABW	11	3.62%	57	7.31%	5.18
9	UYQI	11	3.62%	36	4.62%	3.27
10	KEPC	10	3.29%	17	2.18%	1.70

* 机构全称：CNNU 表示 China Nuclear & Power Eng Co., Ltd.；GENE 表示 General Electric Co.；TOKE 表示 Toshiba Co.；KAER 表示 Korea Atomic Energy Res；CGNP 表示 China Guangdong Nuclear Power Group Co.；MITO 表示 Mitsubishi Electric Corp.；WESE 表示 Westinghouse Electric Corp.；BABW 表示 Babcock & Wilcox Co.；UYQI 表示 Tsinghua Univ；KEPC 表示 Korea Electric Power Corp.。

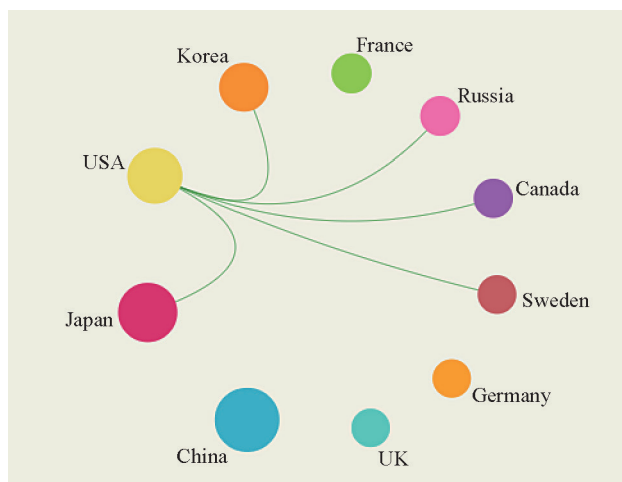


图 2.2.7 “核电装备：反应堆堆芯燃料组件、泵、阀门、容器、管道、安全壳”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

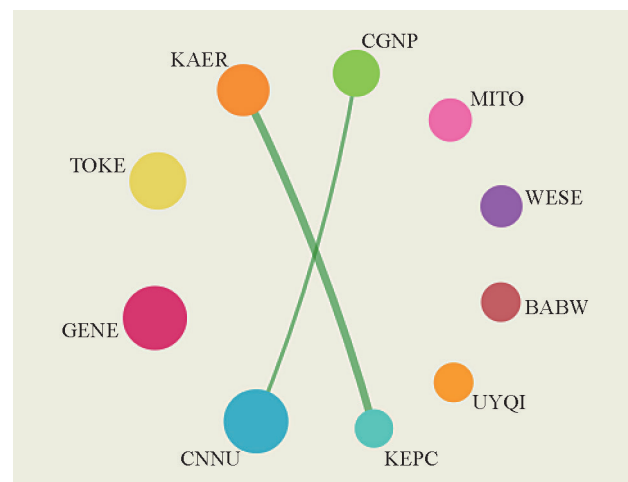


图 2.2.8 “核电装备：反应堆堆芯燃料组件、泵、阀门、容器、管道、安全壳”工程开发焦点主要机构间的合作网络（涉及机构较多，但机构间合作较稀疏，机构显示不充分）

国家核电上海核工程研究设计院与上海交通大学建立了产学研战略合作关系，在核级材料开发、核主泵关键技术、堆芯熔融物滞留试验、安全壳水膜冷却试验等方面开展了研究。国家核电与清华大学建立了联合研究院，开展三代核电非能动安全热工水力试验。大连理工大学与沈鼓集团建立联合研

究院，开展反应堆冷却泵和核二三级泵的开发。在核电装备的设计领域，通过引进消化吸收和再创新，虽然处于跟跑状态，但是已接近世界先进水平。在核电装备的制造领域，通过政府支持和企业自身升级改造，加强了与世界相同装备制造企业的竞争能力，目前已经处于领跑状态。

项目参与人员

领域课题组人员

领域课题组组长：翁史烈 倪维斗 彭苏萍

领域工作组组长：袁士义

领域课题组副组长：

黄 震 巨永林

院士专家（按照拼音排序）：

陈森玉 顾金才 何多慧 黄其励 李根生

李立涅 马永生 邱爱慈 苏义脑 谢克昌

薛禹胜 于俊崇 袁 亮 岳光溪 张玉卓

赵宪庚 周守为

工作人员：

王振海 宗玉生 张 宁 黄冬苹 刘瑞芹

陈天天 闫少云

报告执笔人名单

工程研究热点和焦点执笔人（按照拼音排序）：

丁小益 上官文峰 沈文忠 王 倩 翁一武

杨 波 杨 林 张武高 赵长颖

工程开发热点和焦点执笔人（按照拼音排序）：

曹学武 李根生 李军诗 罗永浩 吕兴才

马紫峰 沈文忠 王海柱 肖文德 严 正

张继革