

## 三、化工、冶金与材料工程

### 1 工程研究前沿

#### 1.1 Top12 工程研究前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判的 Top12 工程研究前沿见表 1.1.1，它们涉及新能源材料科学与工程、功能材料、复合材料与工程、材料物理与化学、催化等学科方向。其中，“开发新型燃料电池”“金属材料纳米化及高性能”“二氧化碳固定”“高效光催化太阳能转化、污染物降解和有机合成”“功能梯度纳米级材料”“超级电容器的设计以及制备”“高效电催化分解水”是传统研究的进一步深入；“石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”“以锂为代表的金属-空气电池”“卤

化物钙钛矿基高效太阳能电池、高性能发光材料和灵敏探测器”“新型荧光分子探针在生物成像中的应用”“金属-有机骨架材料的可控制备、功能导向性修饰及应用”是新兴的前沿。各个前沿所涉及的核心论文在 2012—2017 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

#### (1) 石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料

碳材料的种类繁多，包括木炭、炭黑、石墨、金刚石、线性碳、碳纤维、玻璃碳、石墨层间化合物、富勒烯、碳纳米管和石墨烯等。碳纳米管和石墨烯是近十年来研究最火热的材料，石墨烯纳米片是一种由碳原子  $sp^2$  杂化轨道组成的六角形呈蜂巢

表 1.1.1 化工、冶金与材料工程领域 Top12 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	常被引论文 占比	被专利引用的 文献占比
1	石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料	34	2040	60.00	2015.94	50.0%	0.00
2	开发新型燃料电池	49	1023	20.88	2016.31	49.0%	0.00
3	金属材料纳米化及高性能	1834	238 535	130.06	2014.00	—	—
4	二氧化碳固定	19	1195	62.89	2015.16	26.3%	0.00
5	以锂为代表的金属-空气电池	37	3019	81.59	2015.19	62.2%	0.00
6	高效光催化太阳能转化、污染物降解和有机合成	18	1184	65.78	2016.28	50.0%	0.00
7	功能梯度纳米级材料	40	2767	69.18	2015.20	67.5%	0.00
8	超级电容器的设计及制备	47	2903	61.77	2015.66	31.9%	0.00
9	高效电催化分解水	21	2455	116.90	2015.86	61.9%	0.00
10	卤化物钙钛矿基高效太阳能电池、高性能发光材料和灵敏探测器	130	13 521	104.01	2015.91	55.4%	0.00
11	新型荧光分子探针在生物成像中的应用	38	1139	29.97	2015.71	28.9%	0.00
12	金属-有机骨架材料的可控制备、功能导向性修饰及应用	31	2314	74.65	2015.23	41.9%	0.00

表 1.1.2 化工、冶金与材料工程领域 Top12 工程研究前沿核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料	2	1	4	1	8	18
2	开发新型燃料电池	0	1	0	6	18	24
3	金属材料纳米化及高性能	302	367	489	419	216	41
4	二氧化碳固定	1	0	3	9	3	3
5	以锂为代表的金属-空气电池	0	5	5	9	14	4
6	高效光催化太阳能转化、污染物降解和有机合成	0	0	0	1	11	6
7	功能梯度纳米级材料	0	1	4	21	14	0
8	超级电容器的设计及制备	1	4	5	10	7	20
9	高效电催化分解水	0	0	0	11	2	8
10	卤化物钙钛矿基高效太阳能电池、高性能发光材料和灵敏探测器	0	0	7	36	49	38
11	新型荧光分子探针在生物成像中的应用	0	0	0	17	15	6
12	金属-有机骨架材料的可控制备、功能导向性修饰及应用	1	3	4	6	14	3

状晶格的片状结构新材料，碳纳米管可以看成是石墨烯纳米片卷曲成的一维管状纳米结构碳材料，两者都具有高的机械热力学性能和电性能。然而，无论石墨烯还是碳纳米管，在制备相关复合材料时，由于其特有的小尺寸效应和表面效应以及强的范德华力，使其极易发生自身团聚而无法制备出均匀的复合材料；另一方面，由于两者表面的疏水、疏油性质及化学惰性，导致与其他材料的界面相容性比较差，所得复合材料的界面结合强度就比较低。这需要对其进行功能化改性，即在纳米碳材料的石墨晶格中或表面上引入杂原子或杂原子官能团。功能化改性可以达成修饰和调变石墨中碳原子电子结构的目的，从而改变其物理化学性质，进而提高纳米碳材料在制备复合材料时的可加工性。

### (2) 开发新型燃料电池

燃料电池是一种将化学能直接转换成电能的化学装置，是继火力发电、水力发电、核能发电之后的第四种发电技术。燃料电池是一种绿色能源技术，从节约能源和保护生态环境的角度来看，是最有发

展前途的发电技术。燃料电池中最常使用的燃料是氢气，它具有能量转化率高、低排放、能量和功率密度高等优点，然而全球 96% 的氢气来自不可再生能源，并且氢能存在运输和储存困难、配套的基础设施匮乏等问题，限制了燃料电池的大规模应用。因此发展新型燃料电池已经成为目前的研究重点，主要包括：寻找新型可替代燃料（乙二醇、乙炔二醇、甲酸等）并研究其电氧化机理；高性能、长寿命、低成本的新型电催化材料制备及改性的新方法；新型高能量、功率密度柔性燃料电池的设计及开发；利用燃料电池电催化反应生产高附加值化学品的机理及应用研究。

### (3) 金属材料纳米化及高性能

纳米金属材料的制备及其综合性能的提高将极大地促进工业的进一步飞速发展。金属材料的力学性能、电磁学和光学等性能与其晶粒尺寸密切相关，将晶粒纳米化是提高金属材料的综合性能的有效途径。纳米金属材料是由纳米尺寸晶粒组成，其研究主要包括金属材料选择、材料制备和材料性能评价。

目前,只在部分金属材料中实现了纳米化制备,但制备的纳米金属材料尺寸较小,材料内部存在较多缺陷,且制备工艺复杂。因此,研发能用于工业应用的纳米金属制备工艺将具有非常大的应用前景。

金属材料的纳米化及高性能仍然是未来研究的前沿,尤其是在制备大块体纳米材料方面,具有非常艰巨的任务和挑战。预计未来在制备高强度、超塑性以及电磁和化学性能方面,将有突破性的进展,将来的发展重点是制备表面纳米材料和大块体纳米材料并将其应用于工程的研究。

#### (4) 二氧化碳固定

CO<sub>2</sub>可转化为碳、醇、合成气、低碳烯烃、醛、酸、醚和酯等多种有工业价值的化合物。每年有约1.1亿吨CO<sub>2</sub>用于化学品的生产,主要是用在尿素、水杨酸、甲醇、环状碳酸酯和聚碳酸酯的工业生产当中,其他CO<sub>2</sub>的转化利用技术尚处于研究阶段。CO<sub>2</sub>和环氧化物合成环状碳酸酯及其聚合物是CO<sub>2</sub>固定转化的有效途径之一,碳酸亚乙酯、及双酚A型聚碳酸酯(bisphenol A polycarbonate)已实现工业生产。现已建立的催化剂体系包括金属配合物(Al, Zn, Co, Mg等)、有机胺类、金属氧化物等。许多均相催化剂可高效合成环碳酸酯,其难以回收利用限制了大规模工业应用。为了解决上述问题,发展高效多相催化剂体系已经成为研究前沿,这必将进一步推动环状碳酸酯生产的工业化进程。氨甲基化、氨甲酰化反应是转化CO<sub>2</sub>的另一途径。据报道,MeNH<sub>2</sub>、Me<sub>2</sub>NH和Me<sub>3</sub>N等甲基胺的市场价值已超过4000 EUR/t。因此,CO<sub>2</sub>参与的氨甲基化过程可创造新的附加值。CO<sub>2</sub>为C1原料也可参与羧化及羰基化反应,前者过程可利用亲核试剂活化CO<sub>2</sub>将其转化为羧化产物;后者包括了CO<sub>2</sub>原位还原为CO,进而羰基化两个过程。尽管,这两类CO<sub>2</sub>固定转化策略为生产羧基化、羧化产物提供了新思路,但是现有的催化体系还存在活性受限、条件苛刻等问题,所以研发高效催化剂是实现CO<sub>2</sub>固定转化的关键。

#### (5) 以锂空电池为代表的金属-空气电池

金属-空气电池是一类以金属为负极、空气中的氧气为正极活性物质的电化学能量储存/转换装置,其正极的氧气由空气提供而无需储存在电池内部,因此金属-空气电池具有较高的能量密度,在电动汽车动力电源,电网储能等领域具有广泛的应用前景,目前研究与开发的前沿体系有锂空电池、锌空电池、铝空电池、镁空电池等。

目前金属-空气电池主要的研究方向(以锂-空气电池为例)有:氧还原/氧析出双功能催化剂开发与反应机理研究、催化剂活性与稳定性衰减机制、正极结构设计、锂电极/电解质界面认识和锂枝晶问题、锂电极腐蚀与防护、电解质开发、电池结构设计与制造、系统集成等。

金属-空气电池未来发展趋势:采用原位表征方法揭示电极反应与离子传输机理,发展接近真实体系的理论模型与算法,开发可控的材料与电极制备方法,开发高效电池组装工艺与低能耗智能管理系统。

#### (6) 高效光催化太阳能转化、污染物降解和有机合成

光催化(包括粉末光催化和光电催化)利用吸收的光能,激发产生高反应活性的电子和空穴,或者激发态分子,一方面能够驱动热力学上的爬坡反应;另一方面能促进下坡反应快速进行,可广泛应用于光能转化、污染物降解处理和一些涉及氧化还原过程的有机化学品的合成。

光催化的效率取决于吸光效率、光生载流子分离效率和催化反应效率的乘积。为了提高对太阳光的利用效率,新型吸光材料尤其是宽光谱响应的氧化物、氮(氧)化物、硫属化物、卤(氧)化物半导体材料正成为研究前沿。对于光生载流子分离,研究提出多种分离机制,如异质结、异相结、施主-受主、晶面电荷分离等概念,并且正在进一步深化。而在催化反应方面,除了分解水制氢和污染物降解,一些新的反应如光催化还原二氧化碳、合成氨、高

附加值有机化学品制备正在成为新的热门方向，研究涉及半导体表面结构对反应的影响机制、助催化剂的作用以及新型助催化剂的开发。

### （7）功能梯度纳米级材料

过去 30 余年的研究表明，作为发展高强度材料的新手段，结构材料的纳米化因使其含有大量的晶界等界面，在强度、硬度等力学性能指标上远超过传统粗晶结构材料，然而随之带来的塑性与韧性显著降低、加工硬化能力消失、结构稳定性变差等都制约着纳米级材料的发展。针对以上问题，人们提出了功能梯度纳米级材料（functional gradient nanomaterials）概念。功能梯度纳米级材料是指组分、结构、物性参数和物理、化学、生物等单一或复合性能都呈连续变化，从而使材料性质和功能也呈梯度变化以适应不同环境，比如在大范围调控强度、扩散速率、化学反应活性变化等，实现某一特殊功能的新型功能性材料。目前的研究前沿主要聚集在功能梯度纳米级材料的制备方法上，其中具有代表性的有如下几种：简单、操作性强的粉末冶金法；纯度高、效率高的自蔓延高温合成法；适用范围广的激光熔覆法；可精确成型的气相沉积法；可引入大量缺陷的梯度塑性变形法等。

功能梯度纳米级材料为发展新材料和新的加工工艺带来了新挑战与新机遇。一方面，对功能梯度纳米级材料的结构-性能映射关系、梯度结构中各层次变形机制与均匀结构的差异及其热、机械与化学稳定性等更深层次的理解迫在眉睫；另一方面，其制备加工工艺的高效性、便捷性、成本控制对今后的应用和发展也至关重要。

### （8）超级容器的设计及制备

超级电容器是一种高功率密度的无源储能元件，具有充放电速度快、效率高、循环寿命长、工作温度范围宽、可靠性好等诸多优点，其优越性能和广阔的应用前景吸引了全世界的关注。电化学超级电容器是一种依靠双电层或法拉第准电容原理工作的储能器件，其最大的优点是具有优良的脉冲充

放电性能和快速充放电性能。超级电容器的研究现在主要分两个方向：用于可穿戴设备的柔性微型化超级电容器；面向大规模储能和移动电源的高能量密度超级电容器。柔性微型化电容器的发展还处于初级阶段，主要集中于柔性化电极材料、电解质的开发，同时由于电极材料的不同需要配套开发超级电容器的器件组装及封装技术；常规三明治型超级电容器，组装技术比较成熟，研究内容主要集中在高能量密度电极材料和高压电解质的开发方面。

### （9）高效电催化分解水

电催化分解水反应可作为重要能源载体——氢气的可持续来源，引起了研究的高度重视。电解水反应由水氧化产氧和水还原产氢两个半反应构成。虽然中性体系电解水产氢和产氧反应过电位较高，但由于温和性的优势，仍有一些研究关注，特别是利用某些缓冲（如磷酸盐和硼酸盐）可在一定程度上减小过电势。而在酸性体系和碱性体系中，低贵金属载量和非贵金属电催化剂的研究如火如荼。其中非贵金属电催化剂包括 Fe、Co、Ni 等金属的（氢）氧化物、硫属化物、氮族化物。一些非贵金属产氢催化剂活性接近贵金属催化剂，而碱性体系中的产氧催化剂已经超越贵金属催化剂。为了提高产氢和产氧电催化剂的活性，研究从两个方面开展：一是通过将粒子尺寸做小、晶面选择性暴露、形成核壳结构、三维多孔结构等手段提高分散度、增加活性位点暴露的数量；二是通过制备新的晶体结构、表面结构、金属元素协同作用、非金属元素调变作用等方法提高活性位点的本征活性。

### （10）卤化物钙钛矿基高效太阳能电池、高性能发光材料和灵敏探测器

卤化物钙钛矿以  $APbX_3$  为代表，其中 A 为甲铵、甲脒、铯等正离子，X 主要是 I，也可以是 Br 或 Cl，而 Pb 亦可替换为 Sn、Bi、Sb、Ag 等金属，也包括以钙钛矿为结构基础的非  $ABX_3$  型二维层状钙钛矿，如  $A_2PbX_4$ ， $A_3Bi_2X_9$ 。卤化物钙钛矿太阳



能电池具有效率高、成本低和制备简单等特点，是当前太阳能电池研究的炙手可热的方向。通过对卤化物钙钛矿结晶成膜的控制、缺陷的控制、电子传输和空穴传输界面的调变，不到十年时间卤化物钙钛矿基小面积电池效率提高到 22.7%。卤化物钙钛矿基高效太阳能电池的大面积化和稳定化是目前研究的重点。基于有机铅碘钙钛矿半导体材料的光电性质及相关结构材料元素的拓展，新型的卤化物钙钛矿材料被发现具有高发光性能或辐射响应灵敏度，亦成为新的热门方向。

### (11) 新型荧光分子探针在生物成像中的应用

荧光探针通过荧光信号的变化（波长、强度、寿命等）达到识别和标记目标分子的作用。随着细胞生物学、分子生物学和染料化学的发展，特别是荧光蛋白在生物中的广泛应用和重要性的推动，荧光探针研究集中在对目标分子更加精准的标记，包括使用蛋白标签、非天然氨基酸、生物相交反应（点击化学）等技术；荧光团性能的大幅度提高，包括荧光强度、光稳定性、多色波长、大斯托克斯位移等；新的荧光响应机制的出现和荧光信号的精确解析；多领域多用途的应用，包括突破衍射极限的空间分辨率，满足实时活体成像的时间分辨率，在生物样本的专一选择性响应，解决实际问题，如应用于荧光引导手术等。

### (12) 金属-有机骨架材料的可控制备、功能导向性修饰及应用

金属-有机骨架（metal-organic framework, MOF）材料是一类由金属离子或离子簇与有机配体配位连接而成的新型有机-无机杂化材料。MOF 材料化学组成丰富、孔道结构多样，具有传统无机多孔材料无法比拟的优势。近年来，关于 MOF 材料的研究呈爆发性增长态势，主要研究方向有：

MOF 材料的可控制备，包括材料组成、结构的计算模拟设计，高通量晶体合成与表征，形貌、尺寸可控合成。MOF 材料定向后修饰。包括金属及配体替换反应、共价枝接、限域负载、孔道调变、

材料复合、多级纳米结构组装。MOF 材料的应用。包括二氧化碳捕获、烃类化合物存储、吸附与膜分离、催化、传感器、药物传输、光电化学应用。未来，MOF 材料的合成将从探索试错向精准设计发展，包括功能导向型的微观结构设计优化、孔尺寸剪裁及次级结构单元修饰等。MOF 材料未来将在如下两方面展现出巨大的应用潜力：吸附剂与分离膜。未来发展趋势是基于 MOF 吸附剂与分离膜，探索一条能量集约、环境友好的可替代分离路线，力求实现氢气、二氧化碳、天然气、石油基平台化合物、生物质基平台化合物、生物医药中间体的高效分离，污染物脱除及水体去离子化。功能性器件。通过 MOF 材料与其他功能材料集成来发展微型医药、电子、光学器件及微反应器。

## 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料

石墨烯和碳纳米管是材料学及相关领域研究的前沿。研究表明石墨烯、碳纳米管及其复合材料在电子、信息、能源、材料和生物医药等领域具有广泛的应用前景，可望在 21 世纪掀起一场新的技术革命。

纳米碳复合材料主要包括碳/聚合物复合材料、碳/纳米粒子复合材料和碳/碳复合材料等。无论石墨烯还是碳纳米管，在制备相关复合材料时，由于其特有的小尺寸效应和表面效应以及强的范德华力，使其极易容易发生自身团聚而无法制备出均匀的复合材料；另一方面，由于两者表面的疏水、疏油性质及化学惰性，导致与其他材料的界面相容性比较差，所得复合材料的界面结合强度就比较低。这需要对其进行功能化改性，即在纳米碳材料的石墨晶格中或表面上引入杂原子或杂原子官能团。功能化改性可以达成修饰和调变石墨中碳原子电子结构的目的，从而改变其物理化学性质，进而提高纳

米碳材料在制备复合材料时的可加工性。目前石墨烯和碳纳米管复合材料制备研究的创新性不少是有关石墨烯或碳纳米管的改性的，通过对石墨烯或碳纳米管的改性，优化复合材料的结构，从而提高复合材料的性能。石墨烯的功能化的方法主要有共价键合法和非共价键合法。共价键合功能化主要是对碳材料进行氧化处理，从而在材料表面产生大量的环氧基、羰基、羟基和羧基等含氧基团，由于含氧基团反应活性较高，从而奠定了共价改性基础。然后采用异氰酸酯、硅烷偶联剂、有机胺等试剂与氧化处理后的材料反应，实现碳材料的表面功能化。非共价键合功能化是指通过对碳材料表面进行聚合物包裹或物理吸附等作用，来改变其表面特性，提高其在水或非极性溶液中的分散性。由于聚合物包裹法和物理吸附对石墨烯或碳纳米管的固有结构没有破坏作用，所以可以最大程度地保持它们的结构和性质。

石墨烯、碳纳米管等碳纳米复合材料具有优异的性能，且在多方面表现出了独特的应用优势。然而，目前其产业化应用还比较少见，主要原因在于目前相关复合材料的制备水平还有待进一步提高。当前复合材料的制备是碳材料学科发展面临的一大瓶颈，主要相关研究机构分布在中国、美国和印度

等国家，引导相关研究工作者协同攻关，从不同角度解析制备过程中的相关规律，可望大大提高其制备水平，最终为石墨烯、碳纳米管等纳米碳复合材料的产业化应用乃至进入人们的日常生活打下基础。

基于 Web of Science 数据库的高影响力论文，“石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿的核心论文的主要产出国家或地区及机构分别见表 1.2.1 和表 1.2.2，主要国家或地区及机构间的合作情况分别见图 1.2.1 和图 1.2.2，施引核心论文的主要产出国家或地区及机构见表 1.2.3 和表 1.2.4。

### 1.2.2 开发新型燃料电池

燃料电池是继火电、水电和核电之后的第四代发电技术，曾被美国时代周刊列为 21 世纪十大高新科技之首，被誉为未来世界的新型动力源。燃料电池通过电池内部的电化学反应将化学能转化为电能，电池内部不存在机械传动装置，故工作时噪声低且可靠性高。理论上，只要不断的供给燃料和氧化剂，燃料电池就可以实现化学能到电能的持续转换。

氢能是燃料电池的理想燃料，具有能量转化率高、能量和功率密度高、电氧化速率快等优点，同

表 1.2.1 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	13	38.24%	356	17.45%	27.38
2	China	12	35.29%	367	17.99%	30.58
3	Australia	10	29.41%	1371	67.21%	137.10
4	India	5	14.71%	272	13.33%	54.40
5	South Korea	4	11.76%	377	18.48%	94.25
6	Italy	3	8.82%	72	3.53%	24.00
7	Germany	2	5.88%	23	1.13%	11.50
8	Spain	2	5.88%	24	1.18%	12.00
9	France	2	5.88%	22	1.08%	11.00
10	Israel	1	2.94%	16	0.78%	16.00

表 1.2.2 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Univ Tennessee	11	32.35%	334	16.37%	30.36
2	Univ Sydney	10	29.41%	1371	67.21%	137.10
3	Shandong Univ Sci & Technol	9	26.47%	251	12.30%	27.89
4	Univ Ulsan	4	11.76%	377	18.48%	94.25
5	Shandong Univ	3	8.82%	352	17.25%	117.33
6	Pusan Natl Univ	2	5.88%	227	11.13%	113.50
7	Humboldt Univ	2	5.88%	23	1.13%	11.50
8	Avanzare Innovac Tecnol SL	2	5.88%	24	1.18%	12.00
9	Ist Italiano Tecnol	2	5.88%	24	1.18%	12.00
10	Politecn Torino	2	5.88%	24	1.18%	12.00

表 1.2.3 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	409	49.34%	2016.8
2	India	102	12.30%	2016.8
3	USA	99	11.94%	2017.0
4	Iran	53	6.39%	2016.9
5	South Korea	50	6.03%	2016.1
6	Spain	26	3.14%	2016.4
7	Australia	25	3.02%	2016.4
8	Italy	25	3.02%	2016.0
9	UK	20	2.41%	2016.9
10	Turkey	20	2.41%	2017.0

表 1.2.4 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Univ Tennessee	41	20.20%	2017.2
2	Chinese Acad Sci	38	18.72%	2016.7
3	Shandong Univ Sci & Technol	28	13.79%	2017.3
4	Sichuan Univ	20	9.85%	2017.2
5	Harbin Inst Technol	16	7.88%	2016.9
6	Univ Sydney	13	6.40%	2015.9
7	Shandong Univ	13	6.40%	2017.2
8	Tsinghua Univ	12	5.91%	2016.8
9	Tianjin Univ	11	5.42%	2017.3
10	Indian Inst Technol	11	5.42%	2016.6

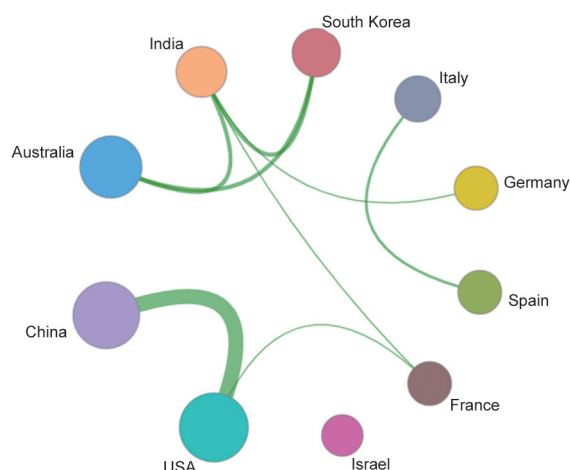


图 1.2.1 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

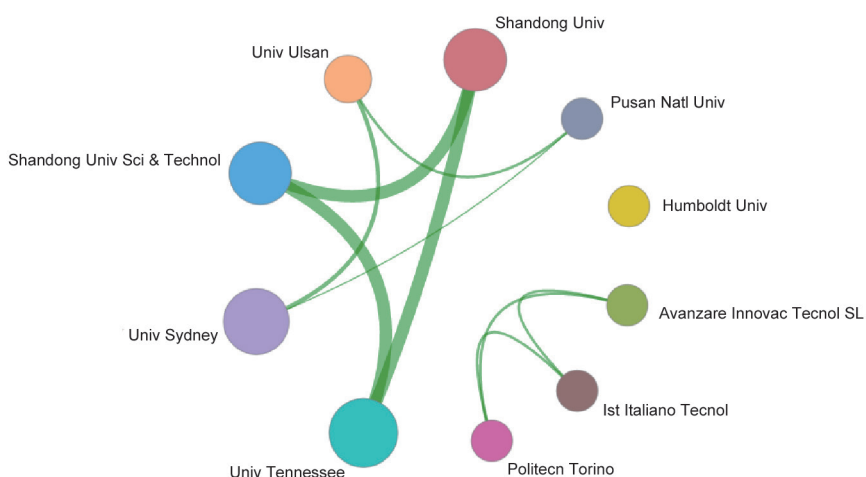


图 1.2.2 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

时产物只有水，堪称是最为清洁的燃料。然而全球 96% 的氢气均来自不可再生能源，并且氢能存在运输和储存困难、配套的基础设施匮乏等问题，极大地限制了氢燃料电池的应用推广和普及。因此，新型燃料的开发成为该领域的前沿研究方向。目前，丰田已经开始研发一种以天然气为燃料的燃料电池动力系统。天然气燃料电池工作时首先是将天然气分解成氢气和一氧化碳，随后压缩机将空气注入到混合物中，通过燃料电池堆的化学反应产生电能。此过程会产生部分氢气和一氧化碳的废气，这些废气会进入一台微型燃气轮机，燃烧产生更多的电

能。最后发电系统还会使用废热产生额外的电能。因此，预测该天然气燃料电池系统的发电效率会达到 65%。此外，乙二醇、乙炔二醇、甲酸等燃料作为氢燃料的可替代燃料也被广泛的应用和研究。

催化剂是燃料电池另外一个关键材料。作为燃料电池主要催化材料的铂存在两个致命问题，价格昂贵和容易中毒，因此迫切需要发展新型替代催化剂以推动燃料电池技术的发展。2017 年，日本日清纺控股公司通过用碳合金 (carbon alloy) 代替铂，可将燃料电池的材料成本削减至几千分之一左右，在全球首次成功实现了不使用铂催化剂燃料电池的



实用化。电催化氧化和还原是燃料电池进行能量转换的关键步骤，利用电催化开拓高附加值化学品的合成具有重要的研究意义。例如，电催化还原 CO<sub>2</sub> 制备化学品和能源物质可以实现 CO<sub>2</sub> 的资源化利用和洁净电能的有效存储。“开发新型燃料电池”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家和地区及机构见表 1.2.5 和表 1.2.6，施引核心论文的主要产出国家或地区及机构见表 1.2.7 和表 1.2.8。“开发新型燃料电池”工程研究前沿主要国家或地区及机构间的合作网络见图 1.2.3 和图 1.2.4。

当前，我国已连续发布多个政策明确支持发展燃料电池技术，如《中国制造 2025》《国家“十三五”发展规划》，国家发展和改革委员会、国家能源局

印发的《能源技术革命创新行动计划（2016—2030 年）》《能源技术革命重点创新行动路线图》等，都明确支持“氢能与燃料技术创新”，支持燃料电池发展等核心技术的工程化和产业化。

### 1.2.3 金属材料纳米化及高性能

制备更高性能的金属材料是满足不断发展的工业领域的需求。自 20 世纪 80 年代起，由于纳米金属材料奇异的性能和广阔的应用前景，逐渐引起了各国的重视，将可能成为下一世纪工业革命的核心。目前纳米金属材料的发展方向为金属表面纳米化和块体纳米材料制备，并逐渐开发出了一系列高性能金属材料。纳米金属材料研究的核心技术为金属材

表 1.2.5 “开发新型燃料电池”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	44	89.80%	914	89.35%	20.77
2	Japan	7	14.29%	63	6.16%	9.00
3	USA	5	10.20%	217	21.21%	43.40
4	India	2	4.08%	53	5.18%	26.50
5	Canada	2	4.08%	16	1.56%	8.00
6	Denmark	1	2.04%	13	1.27%	13.00
7	Spain	1	2.04%	15	1.47%	15.00

表 1.2.6 “开发新型燃料电池”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	Soochow Univ	22	44.90%	431	42.13%	19.59
2	Chinese Acad Sci	10	20.41%	227	22.19%	22.70
3	Univ Chinese Acad Sci	6	12.24%	146	14.27%	24.33
4	Taiyuan Univ Technol	5	10.20%	180	17.60%	36.00
5	Tokyo Univ Sci Yamaguchi	5	10.20%	41	4.01%	8.20
6	Zhejiang Normal Univ	4	8.16%	47	4.59%	11.75
7	Shandong Univ	4	8.16%	156	15.25%	39.00
8	Peking Univ	4	8.16%	156	15.25%	39.00
9	Xiamen Univ	2	4.08%	57	5.57%	28.50
10	SUNY Stony Brook	2	4.08%	98	9.58%	49.00

表 1.2.7 “开发新型燃料电池”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	354	64.48%	2016.8
2	USA	66	12.02%	2016.8
3	Japan	25	4.55%	2016.6
4	India	20	3.64%	2016.9
5	South Korea	20	3.64%	2016.9
6	Iran	18	3.28%	2016.5
7	Canada	17	3.10%	2017.2
8	Australia	10	1.82%	2016.7
9	Germany	10	1.82%	2016.3
10	France	9	1.64%	2016.6

表 1.2.8 “开发新型燃料电池”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	Soochow Univ	52	22.81%	2017.0
2	Chinese Acad Sci	51	22.37%	2016.8
3	Univ Chinese Acad Sci	24	10.53%	2016.5
4	Zhejiang Normal Univ	19	8.33%	2017.1
5	Shandong Univ	19	8.33%	2016.5
6	Univ Sci & Technol China	15	6.58%	2017.0
7	Peking Univ	14	6.14%	2017.0
8	Xiamen Univ	12	5.26%	2016.8
9	Beijing Univ Chem Technol	11	4.82%	2017.2
10	Univ Toronto	11	4.82%	2017.3

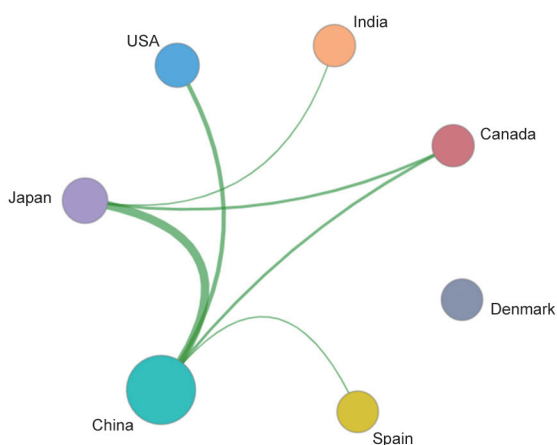


图 1.2.3 “开发新型燃料电池”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

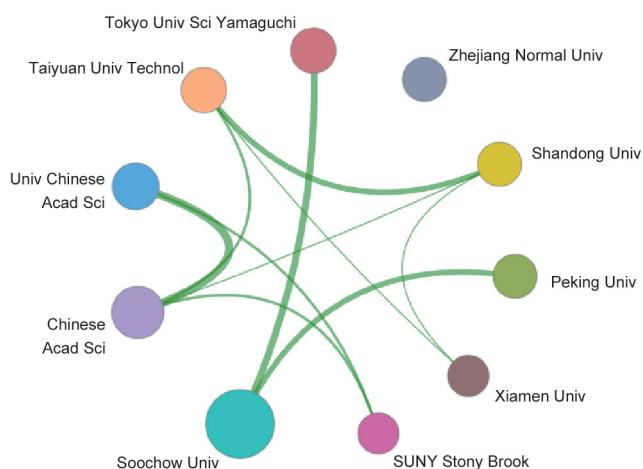


图 1.2.4 “开发新型燃料电池”工程研究前沿主要机构间的合作网络

料的纳米化制备,包括采用电解沉积、粉末冶金和机械加工(大塑性变形和喷丸等方式)等方法,但存在制备技术复杂或制备过程中容易产生缺陷的特点。当前金属材料表面纳米化(即梯度纳米金属材料)的研究较多,其在一定程度上改善了材料的力学、摩擦磨损和腐蚀等性能,但在制备大块体纳米金属材料的研究方面仍然存在不足,研发能用于工业应用的纳米金属制备工艺将具有非常大的应用前景。

2012年以来,“金属材料纳米化及高性能”前沿核心论文的主要产出国家或地区及机构分别

见表 1.2.9 和表 1.2.10,主要国家或地区及机构间的合作情况分别见图 1.2.5 和图 1.2.6,施引核心论文的主要产出国家或地区及机构见表 1.2.11 和表 1.2.12。其中,金属纳米材料的研究主要集中在金属材料表面的纳米化制备和性能,少部分研究了块体材料的纳米化,主要核心论文产出国家或地区前三名为中国、美国和新加坡。中国产出核心论文占比 48.80%,排名第二的美国核心论文占比为 28.90%。中国与美国之间的合作最多,其次新加坡、澳大利亚与中国,韩国、日本和美国相互也有合作。中国科学院的核心论文最多,其次是南洋理工大学。

表 1.2.9 “金属材料纳米化及高性能”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	895	48.80%	109 180	45.77%	121.99
2	USA	530	28.90%	76 486	32.06%	144.31
3	Singapore	139	7.58%	23 576	9.88%	169.61
4	South Korea	137	7.47%	18 388	7.71%	134.22
5	Australia	110	6.00%	14 207	5.96%	129.15
6	Germany	104	5.67%	17 550	7.36%	168.75
7	Japan	99	5.40%	13 131	5.50%	132.64
8	UK	77	4.20%	9967	4.18%	129.44
9	India	58	3.16%	5315	2.23%	91.64
10	Saudi Arabia	41	2.24%	4963	2.08%	121.05

表 1.2.10 “金属材料纳米化及高性能”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	164	8.94%	22 160	9.29%	135.12
2	Nanyang Technol Univ	97	5.29%	19 330	8.10%	199.28
3	Univ Sci & Technol China	53	2.89%	6653	2.79%	125.53
4	Tsinghua Univ	46	2.51%	6014	2.52%	130.74
5	Zhejiang Univ	38	2.07%	5182	2.17%	136.37
6	Natl Univ Singapore	37	2.02%	4158	1.74%	112.38
7	Fudan Univ	37	2.02%	3720	1.56%	100.54
8	Stanford Univ	35	1.91%	7042	2.95%	201.20
9	Argonne Natl Lab	33	1.80%	5248	2.20%	159.03
10	Univ Calif Berkeley	33	1.80%	4061	1.70%	123.06

表 1.2.11 “金属材料纳米化及高性能”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	24 269	45.61%	2015.7
2	USA	10 946	20.57%	2015.5
3	South Korea	4440	8.34%	2015.5
4	Germany	2459	4.62%	2015.6
5	Japan	2279	4.28%	2015.5
6	UK	1949	3.66%	2015.7
7	Australia	1931	3.63%	2015.7
8	Singapore	1927	3.62%	2015.4
9	India	1910	3.59%	2015.6
10	France	1102	2.07%	2015.5

表 1.2.12 “金属材料纳米化及高性能”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	4449	36.19%	2015.6
2	Univ Chinese Acad Sci	1174	9.55%	2015.9
3	Nanyang Technol Univ	1142	9.29%	2015.4
4	Tsinghua Univ	1028	8.36%	2015.7
5	Univ Sci & Technol China	820	6.67%	2015.7
6	Peking Univ	783	6.37%	2015.7
7	Zhejiang Univ	780	6.34%	2015.6
8	Soochow Univ	745	6.06%	2015.8
9	Huazhong Univ Sci & Technol	717	5.83%	2015.7
10	Natl Univ Singapore	657	5.34%	2015.5

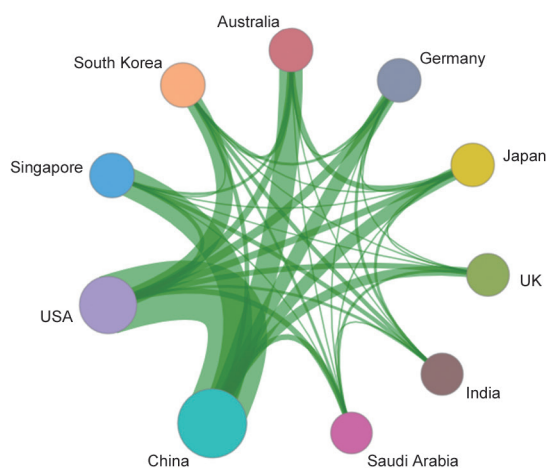


图 1.2.5 “金属材料纳米化及高性能”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络



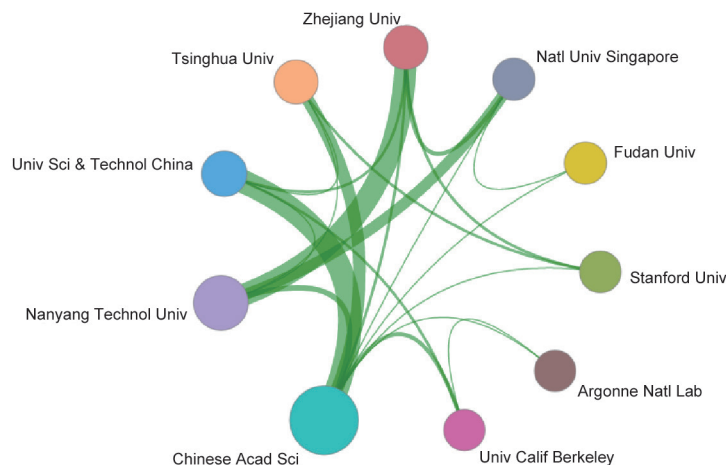


图 1.2.6 “金属材料纳米化及高性能”工程研究前沿主要机构间的合作网络

中国科学院和中国科技大学、清华大学合作较多，新加坡南洋理工大学和浙江大学、新加坡国立大学相互之间的合作也较多。施引核心论文的主要产出国家或地区和核心论文产出国家或地区，中国均排名第一。

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top12 工程开发前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判的 Top12 工程开发前沿见表 2.1.1，它们涉及新能源材料科学与工程、功能材料、复合材料与工程、金属材料工程、催化工程、冶金工程、细胞生物学工程等学科方向。在此之中，“绿色化与智能化冶金制造流程”“铝、镁、钛、锆等轻金属合金制备及应用”“稀有稀贵金属先进制备加工技术”“化石资源和生物质催化转化新技术”“大规模储能技术及其关键材料”“超级电容器关键技术及材料”“新一代高比能锂硫电池、固态锂电池”“先进复合材料制备技术、结构连接及应用”是传统开发的进一步深入；“金属有机骨架材料的晶体工程与规模化应用”“石墨烯基功能材料的关键制备技术及其在储能领域的应用”“增材

制造(3D 打印)技术及应用”“细胞治疗”是新兴的前沿。各个开发前沿所涉及的专利在 2012—2017 年的逐年公开量见表 2.1.2。

#### (1) 大规模储能技术及其关键材料

目前大规模储能技术主要包括抽水蓄能、液流电池、压缩空气、锂离子电池、相变储能、铅酸电池、储热、超导、飞轮、超级电容、钠硫电池等。其中，抽水蓄能是目前唯一实现大规模利用的储能技术，但抽水蓄能受到地理条件的限制，与我国风能、太阳能资源存在地域错位，无法满足未来风能、太阳能大规模发展所需储能装机的需求，因此发展抽水蓄能外的其他储能技术势在必行。大规模储能技术需要满足三个条件：一是安全性高；二是生命周期的性价比高；三是生命周期的环境负荷低。然而，除抽水蓄能外，各种储能技术在在规模、成本、寿命等方面存在瓶颈。其中，液流电池、压缩空气、技术成熟度相对较高，成为目前大规模储能技术发展的重点，聚合物锂电池和相变储能具有能量密度高、易于管理、热电联合的优势，在区域供能方面有很好的应用需求。同时，随着世界能源需求的快速增长，全球各国也相继出台多项科技计划，发达国家已在储能技术方面走上了世界前列，比如液流电池寿命已达 10 年左右，压缩空气储能系统的

## 第二部分 领域报告：化工、冶金与材料工程

表 2.1.1 化工、冶金与材料工程领域领域 Top12 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	大规模储能技术及其关键材料	503	991	1.97	2014.68
2	化石资源和生物质催化转化新技术	154	310	2.01	2014.73
3	绿色化与智能化冶金制造流程	981	1103	1.12	2014.57
4	增材制造(3D 打印) 技术及应用	338	8417	24.90	2014.12
5	先进复合材料制备技术、结构连接及应用	196	6487	33.10	2013.91
6	超级电容器关键技术及材料	609	1573	2.58	2015.12
7	新一代高比能锂硫电池、固态锂电池	579	991	1.71	2015.67
8	石墨烯基功能材料的关键制备技术及其在储能领域的应用	853	1825	2.14	2015.33
9	铝、镁、钛、锆等轻金属合金制备及应用	165	2967	17.98	2013.52
10	金属有机骨架材料的晶体工程与规模化应用	590	1084	1.84	2015.67
11	稀有稀贵金属材料先进制备加工技术	170	333	1.96	2014.67
12	细胞治疗	237	398	1.68	2014.73

2.1.2 化工、冶金与材料工程领域 Top12 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	大规模储能技术及其关键材料	66	77	91	84	87	98
2	化石资源和生物质催化转化新技术	17	30	25	26	28	18
3	绿色化与智能化冶金制造流程	118	185	193	159	155	171
4	增材制造(3D 打印) 技术及应用	54	60	87	86	29	22
5	先进复合材料制备技术、结构连接及应用	43	42	32	49	28	2
6	超级电容器关键技术及材料	63	61	93	121	98	138
7	新一代高比能锂硫电池、固态锂电池	28	43	57	107	125	166
8	石墨烯基功能材料的关键制备技术及其在储能领域的应用	58	85	97	143	216	254
9	铝、镁、钛、锆等轻金属合金制备及应用	43	53	32	18	16	3
10	金属有机骨架材料的晶体工程与规模化应用	20	44	64	119	131	160
11	稀有稀贵金属材料先进制备加工技术	24	31	26	23	28	38
12	细胞治疗	32	39	28	40	58	40

规模大于 100 MW，飞轮和超级电容的寿命已超过 20 年，超导、储热和压缩空气储能系统的成本低于 1000 USD/kW，并且多种储能技术已进入工程示范和商业应用阶段。

### (2) 化石资源和生物质催化转化新技术

能源是国际社会普遍关注的问题，全球能源结

构呈现多元化的态势，预计到 2040 年，石油、天然气和煤炭仍将占据四分之三份额，可再生能源占比将快速增长。因此，石油、煤炭、天然气等化石能源以及生物质的清洁高效转化利用是当前能源领域发展的重要方向。现代煤化工技术的突破是煤炭清洁高效利用的关键；未来燃油市场受到新能源

推广的影响,开发原油转化直接制化学品技术以适应未来原油消费市场变化;生物质能源是可再生能源的重要部分,其大规模低成本高效转化利用将是未来的发展趋势。近年来,催化科学的快速发展为新技术的突破和现有工艺的改进发挥了重要作用。

### (3) 绿色化与智能化冶金制造流程

冶金工业由于规模大,能源消耗和污染物总量总体较大,发展面临的能源环境约束不断增强,推进冶金工业的绿色发展和智能制造,实现与社会的共融发展刻不容缓。绿色化与智能化冶金制造流程技术包含两大方向:绿色制造技术和智能制造技术。冶金工业的绿色制造是指按照循环经济的基本原则,以清洁生产为基础,围绕资源高效利用和节能减排,全面实现冶金产品制造、能源转换、废弃物处理消纳和再资源化等三个功能。绿色制造前沿技术包括:炉渣余热回收和资源化利用,复合铁焦新技术,钢铁厂物质流、能源流和信息流(大数据)协同优化技术,二氧化碳捕集、利用和储存技术等;冶金工业特别是钢铁工业是自动化程度较高的流程型行业之一,智能制造发展基础好、空间大,借助于“互联网+”、物联网等智能制造技术,推动钢铁生产方式的定制化、柔性化、绿色化、网络化、智能化,进而推动钢铁行业的转型升级。钢铁工业智能制造关键技术包括:基于工业大数据关键工艺装备智能控制专家系统,智能机器人应用技术,生产制造流程多目标实时优化在线运行技术,关键工艺装备智能故障诊断与维护大数据系统,冶金工业供应链智能优化技术,协作制造企业信息集成技术等。

### (4) 增材制造(3D打印)技术及应用

增材制造技术也称3D打印技术,是近30年快速发展的先进制造技术,其优势在于三维机构的快速的自由制造,被广泛用于新产品开发、单件小批量制造。该技术以合金粉末或丝材为原料,通过高功率激光原位冶金熔化/快速凝固逐层堆积。根

据材料在沉积时的不同状态可以分为两大类:金属材料在沉积过程中实时送入熔池,包括激光近净成型制造(laser engineered net shaping, LENS)、直接金属沉积(direct metal deposition, DMD)等;金属粉末在沉积前预先铺粉,包括直接金属激光烧结(direct metal laser-sintering, DMLS)、选区激光熔覆(selective laser melting, SLM)、熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)、选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS)等。总体来说,该技术具有:制造速度快,节省材料,降低成本;不需采用模具,使得制造成本降低15%~30%,生产周期节省45%~70%;可以生产用传统方法难以生产甚至不能生产的形状复杂的功能金属零件;可在零件不同部位形成不同成分和组织的梯度功能材料结构,不需反复成型和中间热处理等步骤;激光直接制造属于快速凝固过程,金属零件完全致密、组织细小,性能超过铸件;近成形件可直接使用或者仅需少量的后续机加工便可使用。该技术被誉为一种“变革性”的低成本、短周期、高性能、“控形/控性”一体化、绿色、数字制造技术,在未来航空、航天、核电、石油化工、船舶等高端重大装备制造中拥有巨大的发展潜力和广阔的发展前景,近20年来成为国际材料加工工程与先进制造技术学科交叉领域的前沿研究前沿方向之一,在世界范围内受到政府、工业界和学术界的高度关注。

### (5) 先进复合材料制备技术、结构连接及应用

以高性能纤维(如碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维等)为增强材料的先进复合材料具有密度低、高比强度、高比刚度、耐疲劳、减振、力学性能可设计等优点,是结构轻量化设计的首选材料,在航空航天、汽车工业、风力发电、机械制造和医学等领域有着广泛用途。先进复合材料研究关键在于复合结构优化设计、大面积整体成型技术、再生利用技术、复合连接技术、自愈合技术以及耦合机敏、隐身等功能的复合技术。先进复合材料的连接

方法主要有胶接、机械连接和混合连接。未来复合材料连接方式以采用机械连接、胶接为主，多种新型连接方式为辅的连接技术，总体趋势是通过优化设计连接结构，实现复合材料结构件的一体化，以实现连接部位稳定性与可靠性的统一。

### （6）超级电容器关键技术及材料

超级电容器，又叫电化学电容器、黄金电容、法拉电容，包括双电层电容器和赝电容器，通过极化电解质来储能。它是一种电化学元件，但在其储能的过程中并不发生化学反应，这种储能过程是可逆的，也正因为此超级电容器可以反复充放电数十万次。超级电容器以其大容量、高功率、长寿命、成本低廉、环境友好等优越的性能，可以部分或全部替代传统的化学电池，并且具有比传统的化学电池更加广泛的用途。超级电容的技术不断发展，推动其应用范围从最初的电子设备领域扩展到动力领域、储能领域。超级电容器技术核心在于如何在保持传统电容器高的功率密度、长的循环寿命、绿色环保的情况下制备出低成本、高能量密度的超级电容器，主要通过关键电极材料、相容性高的电容器隔膜、高压电解液的开发以及超级电容器的系统设计、优化与集成等相关技术来实现。

### （7）新一代高比能锂硫电池、固态锂电池

锂硫电池是新一代高比能二次电池体系，其是以单质硫为正极，锂金属为负极的电化学反应体系。当前锂硫电池的实际比能量已经达到 600 Wh/kg，是锂离子电池的 3 倍。锂硫电池面临的挑战主要有：放电过程中正极产生的多硫化物穿梭至负极，造成电池循环稳定性差；循环过程中负极金属锂粉化以及形成枝晶。目前的主要技术方向有：优化正极的组成和结构，比如在正极中添加多硫化物锚定剂以抑制其穿梭；添加催化剂，催化多硫化物向硫化锂的转变；在负极金属锂表面构建人工固体电解质界面（SEI）膜，以及构建三维网络结构，使得锂离子的沉积更加均匀，从而提高锂硫电池的循环稳定性。

固态锂电池是用固态电解质取代液态电解质，且负极为金属锂的一种电池。由于固态电解质具有优异的机械性能，能够抑制锂枝晶的生成，且具有较高的熔沸点，因此，固态锂电池有望成为下一代高比能、高安全性电池体系。目前的主要技术方向为：制备具有较高室温离子电导率、与金属锂具有良好相容性的固态电解质；通过界面调控与修饰，优化固态电解质与正负极的界面，从而提高固态锂电池的电化学性能。

### （8）石墨烯基功能材料的关键制备技术及其在储能领域的应用

石墨烯 (graphene) 是一种由碳原子以  $sp^2$  杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的二维碳纳米材料。科学界对于石墨烯的研究已经具有十几年历程，石墨烯 2004 年被证明单独存在后，相关专利技术至 2010 年才急剧增加，每年有大量的发明人和技术涌现，可以预测在未来的几年中石墨烯技术的产业化应用将会进入快速发展期。石墨烯的重要研究方向将主要集中在石墨烯浆料或粉体、石墨烯宏观体（如石墨烯纤维、石墨烯膜、石墨烯气凝胶或泡沫等）及石墨烯复合材料的制备技术领域。石墨烯将被广泛的用于超级电容器和各类新型电池中，它的使用将逐渐脱离前期作为简单的导电剂使用，而将更多的作为活性储能介质使用。这需要对石墨烯进行功能化并制备适用的功能材料或复合材料，如可用于电容器或锂硫电池正极的三维石墨烯、石墨烯包覆硅的锂电池负极材料等。

### （9）铝、镁、钛、锆等轻金属合金制备及应用

随着航空航天、高速铁路、核电、汽车及生物医疗等高科技领域的快速发展，对高性能金属合金的需求越来越广泛。主要围绕铝、镁、钛、锆等合金开展大量开发工作，如：结构及导线用高性能铝合金；高强、高韧、耐磨及耐腐蚀镁合金；可降解及生物医疗用镁合金；能源、医用钛合金材料；高强度、高韧性锆基非晶态合金、陶瓷材料。



高性能铝合金则是通过微合金化来改善合金性能，当前该方面研究重点则是如何选择、控制元素种类及数量来充分发挥其作用。目前，针对镁合金的研究前沿则是实现镁合金的高强韧化，通过合金成分设计、制备工艺来提高和改进材料的使用性能。目前先进的高强铸造镁合金和铸造变形镁合金的室温拉伸抗拉强度分别在 400 MPa 以上或 550 MPa 以上。目前高强轻质合金的塑性和韧性提高是前沿之一，通过晶粒细化、新相、新结构(LPSO 结构)、界面优化、织构设计等改善高强轻质合金的塑性是各国发展重点。除了作为结构材料，医用镁合金尤其是可降解生物医疗用镁合金也是未来发展趋势。此外，提高镁合金的耐腐蚀性也是一研究重点。对于钛合金的研究正在成体系化发展，其较低的制备成本以及新型钛材料的开发可以进一步扩大其应用。锆基非晶态合金具有优异的力学性能、良好的耐腐蚀性能、高效的催化性能等，这些特性促使它在电子、军事等方面得到广泛的应用。

#### (10) 金属-有机骨架材料的晶体工程与规模化应用

MOF 拥有灵活多变的金属节点与配体，永久、规则的多孔网络，在气体存储、分离、催化及能源科技应用领域都展现出极大潜力。模拟与实验相结合的晶体工程手段是一种设计合成 MOF 材料的有效策略，主要技术方向有：MOF 晶体的高通量合成、筛选与表征；MOF 晶体成核与生长过程的系统研究；MOF 晶体材料的放大合成。从成本和环境角度而言，面临的挑战性难题便是如何提高 MOF 材料的时空收率，并且减少有机溶剂的使用。因此，开发高时空收率的水相甚至无溶剂合成方法便成为关键。另外，如何精确调控 MOF 晶体的成核和生长参数以获得粒径分布均一的 MOF 晶体材料，也是 MOF 材料放大合成过程中最为关心的问题之一。未来，MOF 材料的规模化应用将体现在如下两个方面，即吸附剂/分离膜与功能性器

件。基于 MOF 材料开发吸附剂与分离膜，有望探索出一条能量集约、环境友好的可替代分离路线。同时，技术手段的不断发展，加之化学、工程、医药、生物、电子、光学多个领域的交叉渗透，又将加快 MOF 微型器件的商业化。在推动 MOF 材料规模化应用的历程当中，MOF 的稳定性问题必将受到更多关注。尽管 MOF 材料是通过有机-无机结构单元之间较强的相互作用连接而成，但其在苛刻环境下的使用仍然面临挑战。因此，将 MOF 与其他保护性功能材料复合，或是对 MOF 做功能导向性的修饰以提高其稳定性，或将从根本上解决这一困扰。

#### (11) 稀有/稀贵金属先进制备加工技术

稀有/稀贵金属一般包括钛、锆、钨、钒、铌、钽、钼、钨等稀有难熔金属，锂、铷、铯等稀有轻金属，镓、铟、铊、铋、铪、铌、钽、铯、钷、铷、铯等稀有轻金属，镓、铟、铊、铋、铪、铌、钽、铯、钷、铷、铯等稀有轻金属，钪、钇、镧系等稀有稀土金属，钪、镧、钷、铷、铯、钷、铷、铯等稀有轻金属，金、银、铂族金属（钌、铑、钯、铱、铂）等贵金属。稀有/稀贵金属广泛应用于现代能源、冶金、石化、机械、交通、建材、纺织、航空航天、信息、海洋、生物医药等产业，是国民经济、社会发展和国防建设不可或缺的重要基础材料。稀有/稀贵金属在地壳中的丰度低，各具不同的理化性质，提取和加工难度大，发达国家非常重视稀有/稀贵金属的技术研发，几乎垄断了高端、高附加值产品的国际市场。长期以来，我国在部分稀有/稀贵金属高纯产品制备加工上缺乏自主知识产权的核心技术，制造成本高，未能实现规模化生产，制约了光电子等新兴产业的发展。随着稀有/稀贵金属在高端装备制造、战略性新兴产业以及重大工程等领域的需求不断上升，稀有/稀金属材料先进制备加工技术成为各国研发的前沿，关键技术包括：超高纯稀有/稀贵金属制备技术、高端功能元器件用大规格稀有/稀贵金属靶材制造技术、高端装备制造用大尺寸精深加工

高纯稀有金属材料制品生产技术、高品质稀贵金属粉末制备技术、多品种规格稀贵金属的焊接与联装导电材料制备等。

### （12）细胞治疗

细胞治疗指的是通过生物技术手段将一些具备特定功能的细胞，包括免疫、抗肿瘤和组织器官再生等注入或植入体内，进而提升免疫能力、修复损伤和组织器官再生，起到治疗疾病或减缓衰老的作用。尽管这一概念提出的历史超过 500 年，但直到现代的细胞培养、干细胞、组织工程和基因工程技术发展，才真正走向产业化。目前细胞治疗主要根据细胞宿主分为异体细胞治疗和自体细胞治疗，根据细胞来源或者靶向组织主要分为胚胎干细胞治疗、造血干细胞治疗、间充质干细胞治疗和神经干细胞治疗等几种。细胞治疗有望在免疫系统疾病、帕金森症、糖尿病的治疗以及损伤修复等领域发挥重要作用。

为了获得稳定的细胞指标效果和更广泛的应用，上述过程中细胞的定向分化、去分化和功能诱导等机制是相关基础研究的前沿，主要包括对表观遗传学的认识，信号通路和细胞、内外调控因子的相互作用等。

## 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 大规模储能技术及其关键材料

能源是经济和社会可持续发展的重要物质基础。随着社会的发展，人们对能源的需求量日益增加，造成化石能源日益匮乏和环境日趋恶化。推进能源结构调整，节约化石能源，大规模利用可再生能源，成为世界各国能源安全和经济可持续发展的重要战略。然而，风能、太阳能等可再生能源发电具有明显的不连续、不稳定性等非稳态特征，因此，配套高效的大规模储能技术是实现可再生能源大规模接入的必然选择，是能源结构调整的关键支撑技术。

在现有的大规模储能技术中，全钒液流电池储能技术、压缩空气储能技术、凝胶聚合物电池/相变储热储能技术等具有高安全、低成本、大容量、长寿命等特点，可切实满足实际需求。这些储能技术在基础研发、装置试制和小规模示范等方面已经取得重要阶段性进展，亟待开展多学科、建制化的攻关，实现从技术研究到工程应用的跨越。

发展储能技术已成为各国政府关注和支持的前沿。截至 2016 年年底，全球投运储能项目累计装机规模为 168.7 GW，同比增长 2.4%，其中，电化学储能的累计装机位列第三，规模为 1769.9 MW，同比增长 56%。国际可再生能源署发布的第三版《Rethinking Energy 2017》报告指出，储能电池未来的使用量将大幅增多，预计到 2020 年，全球电池储能市值将跃增至 140 亿美元。美国长期支持和关注储能的发展，2016 年 6 月 16 日，美国召开了扩大智能电网领域可再生能源与储能峰会，奥巴马政府宣布了《联邦和私营部门扩大可再生能源和储能行动计划》。计划设定了未来五年内，美国超过 8 个州的储能需求和配置目标，投资者将为储能投入 1.3 亿美元的资助。德国政府正在实施一项宏大的能源转型战略，即到 2020 年使可再生能源供电的比例达到 35%，到 2030 年和 2050 年分别达到 50% 以上和 80% 以上，旨在使可再生能源成为德国未来电力供应的核心，而能源存储技术的快速发展则成为该战略的有效支撑。日本自 20 世纪 70 年代就开始对储能技术研发进行持续资助，近十年来先后投入 400 多亿日元（30 多亿人民币）用于储能技术研发，目前日本储能装机约占电力总装机的 11%，居世界首位。2012 年，韩国启动了《能源存储技术研发及产业化战略计划》，到 2020 年将投入 6.4 万亿韩元（约 320 亿元人民币）用于储能技术研发和应用。

我国政府对储能也愈来愈重视，在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》、《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》、

《“十三五”国家科技创新规划》等国家科技与能源战略规划中，都将储能技术作为重点发展方向之一。同时，在国家自然科学基金、973计划、863计划、国家重点研发计划等科技计划的支持下，我国多项储能技术在基础研究、关键技术研发、装置试制和小规模示范等方面取得了阶段性进展，但由于我国储能技术研究起步较晚，整体上特别是在系统集成、工程实现、能量系统综合管理等方面与世界先进水平还有相当大的差距。

基于德温特专利数据库，采用相关关键词检索生成专利地图，经多次循环筛选，利用所得相关专利，分析得到表 2.2.1 和表 2.2.2，及图 2.2.1 和图 2.2.2，分别是“大规模储能技术及其关键材料”工程开发前沿核心专利主要产出国家或地区及机构列表，主要国家或地区及机构合作网络图。

## 2.2.2 化石资源和生物质催化转化新技术

能源是国际社会普遍关注的问题，对我国经济

表 2.2.1 “大规模储能技术及其关键材料”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	149	29.62%	180	18.16%	1.21
2	Japan	110	21.87%	140	14.13%	1.27
3	USA	105	20.87%	409	41.27%	3.90
4	Germany	54	10.74%	100	10.09%	1.85
5	South Korea	52	10.34%	58	5.85%	1.12
6	Taiwan of China	8	1.59%	13	1.31%	1.63
7	France	6	1.19%	5	0.50%	0.83
8	India	5	0.99%	0	0.00%	0.00
9	Russia	3	0.60%	0	0.00%	0.00
10	Canada	2	0.40%	35	3.53%	17.50

表 2.2.2 “大规模储能技术及其关键材料”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	YUAS	日本	64	12.72%	53	5.35%	0.83
2	MATU	日本	24	4.77%	21	2.12%	0.88
3	BOSC	德国	17	3.38%	46	4.64%	2.71
4	SGCC	中国	17	3.38%	22	2.22%	1.29
5	BATT	美国	12	2.39%	111	11.20%	9.25
6	CHWE	中国	12	2.39%	21	2.12%	1.75
7	HITB	日本	11	2.19%	42	4.24%	3.82
8	LITE	德国	11	2.19%	16	1.61%	1.45
9	OCIO	韩国	10	1.99%	3	0.30%	0.30
10	MINN	美国	9	1.79%	4	0.40%	0.44

注：YUAS 表示 GS Yuasa Corp.; MATU 表示 Panasonic Corp; BOSC 表示 Bosch Gmbh Robert; SGCC 表示 State Grid Corp China; BATT 表示 Battelle Memorial Inst; CHWE 表示 Chilwee Power Co Ltd; HITB 表示 Hitachi Chem Co Ltd; LITE 表示 Li-Tec Battery GmbH; OCIO 表示 OCI Co Ltd; MINN 表示 3M Innovative Properties Co.

社会健康发展至关重要。据 BP 公司发布的《BP 世界能源展望（2018 年版）》，全球能源结构呈现多元化的态势，但预计到 2040 年，石油、天然气和煤炭仍将占据四分之三的份额。未来石油需求将持续增长，增长的主要来源是作为石化产品的原料。天然气将超过煤炭成为第二大能源来源。煤炭在一次能源中的占比将有所下降，但中国仍是最大煤炭市场，到 2040 年占据全球煤炭需求量的 40%。另外，中国可再生能源占比将快速增长。

创新技术应用于石油、煤炭、天然气以及生物质等的清洁高效转化利用，解决日益凸显的能源与

环境问题，成为当前能源发展的重要任务。特别是煤炭清洁高效利用对我国具有更加重要的意义。现代煤化工将是未来煤炭消费的主要突破口，煤制烯烃、煤制油、煤制乙二醇等大型煤化工示范工程的顺利实施，标志着我国煤炭清洁转化技术创新和产业化均走在了世界前列。煤制乙醇、合成气制烯烃等技术的突破标志着我国在该领域持续发挥引领作用。大型炼化一体化石油加工技术的发展使得油品、石化产品等生产过程更加高效，开发原油直接制备化学品技术以适应未来原油消费市场的变化。天然气催化转化技术的突破（如：甲烷直接转化制芳烃）为页岩气等非常规油气资源的开发利用提供重要的技术支撑。生物质转化方面，生物柴油、生物质热解油、发酵法制乙醇/丁醇、气化-合成气-费托合成、纤维素制乙二醇等方面已取得较大进展，大规模低成本高效转化制备化学品技术将是近期最有可能取得突破的方向。

在上述各种能源转化过程中，催化发挥了极其重要的作用。新工艺的突破得益于高性能催化剂的开发和新型催化材料的应用。反应通道和反应位点的精确控制在发挥传统催化材料（如分子筛）的优势并实现催化过程的高效经济等方面具有重要意义。催化剂制备方法的创新、制备过程

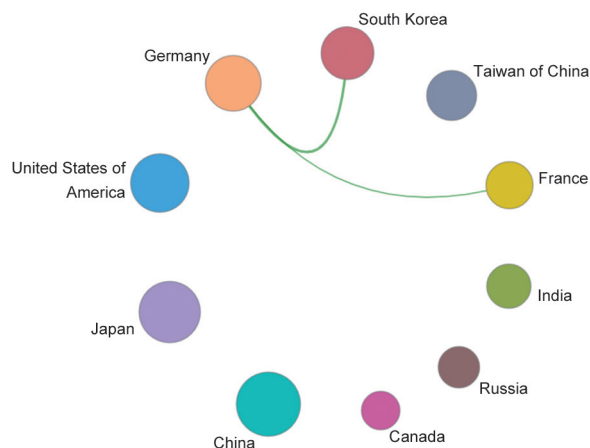


图 2.2.1 “大规模储能技术及其关键材料”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

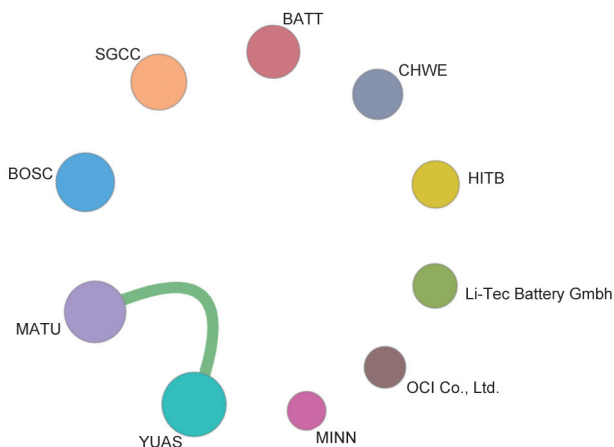


图 2.2.2 “大规模储能技术及其关键材料”工程开发前沿的主要机构间合作网络



绿色化和催化剂回收等仍是催化剂工程发展的重要方向。

基于德温特专利数据库,采用相关关键词检索生成专利地图,经多次循环筛选,利用所得相关专利,分析得到表 2.2.3 和表 2.2.4,及图 2.2.3 和图 2.2.4,分别是“化石资源和生物质催化转化新技术”工程开发前沿核心专利主要产出国家或地区及机构列表;主要国家或地区及机构合作网络图。

### 2.2.3 绿色化与智能化冶金制造流程

冶金工业是国民经济的重要基础产业,为社会发展提供了重要的原材料保障,有力支撑了相关产业的发展。随着全球气候变化和碳排放形势日益严峻,冶金工业发展面临的环境压力越来越大,特别是钢铁工业作为资源和能源的消耗大户,钢铁生产的环境问题日趋受到整个社会的关注,绿色化和智能化成为了钢铁行业发展的重要方向,成为行业转

表 2.2.3 “化石资源和生物质催化转化新技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	78	50.65%	258	83.23%	3.31
2	China	48	31.17%	63	20.32%	1.31
3	The Netherlands	10	6.49%	2	0.65%	0.20
4	South Korea	6	3.90%	7	2.26%	1.17
5	India	5	3.25%	2	0.65%	0.40
6	Saudi Arabia	5	3.25%	4	1.29%	0.80
7	Germany	4	2.60%	0	0.00%	0.00
8	France	3	1.95%	7	2.26%	2.33
9	Japan	3	1.95%	0	0.00%	0.00
10	Australia	1	0.65%	2	0.65%	2.00

表 2.2.4 “化石资源和生物质催化转化新技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	ESSO	美国	22	14.29%	111	35.81%	5.05
2	UNVO	美国	16	10.39%	8	2.58%	0.50
3	SNPC	中国	12	7.79%	16	5.16%	1.33
4	SABI	美国	10	6.49%	4	1.29%	0.40
5	SHEL	荷兰/美国	6	3.90%	24	7.74%	4.00
6	CACP	中国	5	3.25%	1	0.32%	0.20
7	LUMM	美国	5	3.25%	11	3.55%	2.20
8	CALI	美国	4	2.60%	4	1.29%	1.00
9	CELA	美国/中国	3	1.95%	28	9.03%	9.33
10	UNCZ	中国	3	1.95%	2	0.65%	0.67

注: ESSO 表示 Exxonmobil Chem Patents Inc; UNVO 表示 Universal Oil Prod Co; SNPC 表示 SINOPEC Corp; SABI 表示 SABIC Global Technologies BV; SHEL 表示 Shell Oil Co; CACP 表示 CAS Dalian Chem & Physical Inst; LUMM 表示 Lummus Technology Inc; CALI 表示 Chevron USA Inc; CELA 表示 Celanese Int Corp; UNCZ 表示 Univ Changzhou.

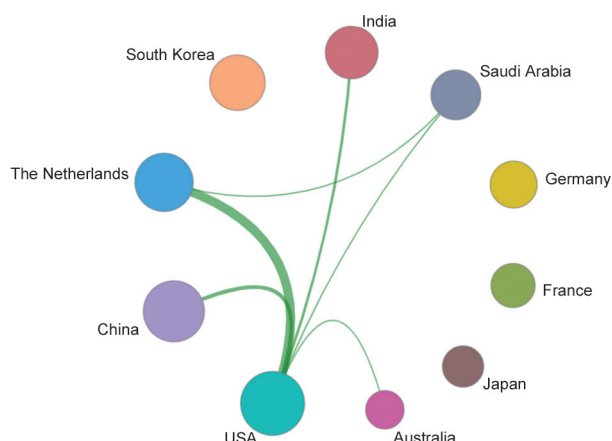


图 2.2.3 “化石资源和生物质催化转化新技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

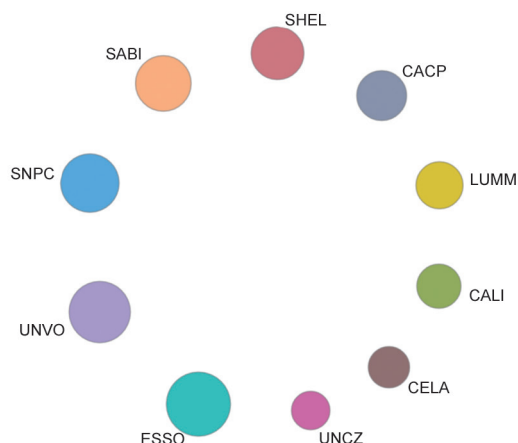


图 2.2.4 “化石资源和生物质催化转化新技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

型升级的关键所在。

推进制造流程的绿色化是钢铁行业绿色发展的主要内容，按照钢铁制造流程三个功能的定位：钢铁产品制造、能源转换和废弃物消纳处理，以“减量化、再利用、资源化”为原则，以零排放为目标，对制造过程产生的余热、余压、余气、废水、含铁物质和固体废弃物充分循环利用，最终实现清洁生产 and 整个制造流程的绿色化。近年来围绕钢铁制造流程的绿色化发展，重点开发应用了干法熄焦、高炉煤气干式除尘、转炉煤气干式除尘为代表的“三干”技术，水的综合利用、以副产煤气（焦炉、高炉、转炉）为代表的二次能源利用技术，以高炉渣、转炉渣为代表的固体废弃物综合利用技术。此外，炉渣余热回收和资源化利用，复合铁焦新技术，钢铁厂物质流、能源流和信息流（大数据）协同优化技术，二氧化碳捕集、利用和储存技术等前沿技术也成为了开发的前沿。

智能制造是制造业未来发展的重大趋势，也是钢铁工业转型升级、提质增效的重要途径。钢铁工业是自动化程度较高的流程型行业之一，智能制造发展基础好、空间大。借助于“互联网+”、物联网等智能制造技术，推动钢铁生产方式的定制化、

柔性化、绿色化、网络化、智能化，进而推动钢铁行业的转型升级。近年来，智能制造在钢铁生产制造、企业管理、物流配送、产品销售等方面的应用不断深化，围绕流程型智能制造、大规模个性化定制等方面试点建设了智能工厂或数字化车间，开展了人机智能交互、工业机器人、智能物流管理等技术和装备在生产过程中的应用，促进了钢铁制造工艺的仿真优化、数字化控制、状态信息实时监测和自适应控制等技术的应用。但是总体来看，钢铁工业的智能制造仍处于初级阶段，未来还需重点开发基于工业大数据关键工艺装备智能控制专家系统、智能机器人应用技术、生产制造流程多目标实时优化在线运行技术、关键工艺装备智能故障诊断与维护大数据系统、冶金工业供应链智能优化技术、协作制造企业信息集成技术等关键技术。

2012 年以来，“绿色化与智能化冶金制造流程”工程开发前沿核心专利主要产出国家或地区及机构分别见表 2.2.5 和表 2.2.6，主要国家或地区及机构间合作网络情况分别见图 2.2.5 和图 2.2.6。从专利分布来看，中国是“绿色化与智能化冶金制造流程”核心专利的主要产出国，占全球专利公开量的 93.17%，核心专利的被引次数、主要产出机构也都

主要集中在中国，说明我国在此领域的研究和发展处于全球非常重要的地位。从核心专利的平均被引次数来看，美国和日本高于中国，从一个侧面说明美国和日本在此技术的开发上获得了更多的关注和

认可，有更高的创新性。从国家或地区及机构合作网络情况来看，主要国家或地区之间以及机构之间合作较为稀疏，说明本领域企业间的合作研发较少，以独立研发为主。

表 2.2.5 “绿色化与智能化冶金制造流程” 工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	914	93.17%	1039	94.20%	1.14
2	Japan	20	2.04%	38	3.45%	1.90
3	Russia	10	1.02%	1	0.09%	0.10
4	USA	10	1.02%	21	1.90%	2.10
5	South Korea	8	0.82%	2	0.18%	0.25
6	India	3	0.31%	0	0.00%	0.00
7	Taiwan of China	3	0.31%	0	0.00%	0.00
8	Australia	2	0.20%	1	0.09%	0.50
9	UK	2	0.20%	0	0.00%	0.00
10	Poland	2	0.20%	0	0.00%	0.00

表 2.2.6 “绿色化与智能化冶金制造流程” 工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	CMEG	中国	59	6.01%	78	7.07%	1.32
2	BAOS	中国	21	2.14%	14	1.27%	0.67
3	SHGG	中国	19	1.94%	34	3.08%	1.79
4	ANSH	中国	13	1.33%	9	0.82%	0.69
5	JGJT	中国	12	1.22%	38	3.45%	3.17
6	HBIS	中国	10	1.02%	9	0.82%	0.9
7	BJSW	中国	9	0.92%	3	0.27%	0.33
8	UYDB	中国	9	0.92%	42	3.81%	4.67
9	JGHX	中国	8	0.82%	8	0.73%	1.00
10	WSGC	中国	8	0.82%	26	2.36%	3.25

注：CMEG 表示 Metallurgical Corp China; BAOS 表示 Baoshan Iron & Steel Co Ltd; SHGG 表示 Beijing Shougang Int Eng Technology Co; ANSH 表示 Angang Steel Co Ltd; JGJT 表示 Shandong Iron & Steel Co Ltd; HBIS 表示 Hebei Iron & Steel Co Ltd; BJSW 表示 Jiangsu Province Metallurgical Design; UYDB 表示 Univ Northeastern; JGHX 表示 Gansu Jiu Steel Group Hongxing Iron & Steel Co Ltd; WSGC 表示 Wuhan Iron Steel (Group) Corp.



图 2.2.5 “绿色化与智能化冶金制造流程”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

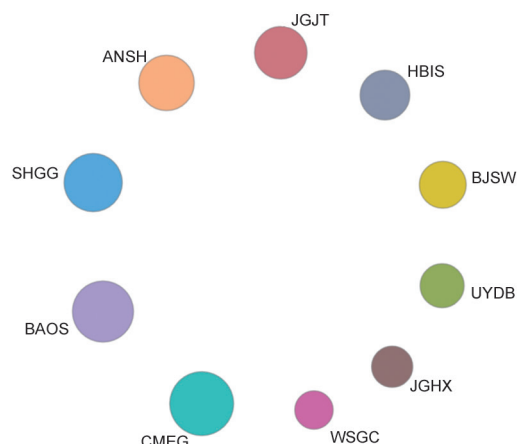


图 2.2.6 “绿色化与智能化冶金制造流程”工程开发前沿的主要机构间合作网络

## 领域课题组人员

课题组组长：王静康 薛群基

课题副组长：丁文江 刘中民 毛新平  
彭金辉 徐惠彬

工作组成员：

邓元 彭立明 叶茂 许磊 代林晴  
王静 吴玉娟 姚昌国 祝薇 黄耀东  
杨祖国 朱晓文

执笔组成员：

班宇杰 曹旭鹏 郭德才 黄耀东 李金哲  
荣倩 吴玉娟 熊锋强 姚昌国 周锋  
朱晓文

致谢人员：

天津大学

冯亚凯 姜浩锡 李艳妮 王富民 张雷  
张立

大连化学物理研究所

班宇杰 曹旭鹏 郭德才 李金哲 荣倩  
熊锋强 周锋

上海交通大学

陈娟 范根莲 郭芳威 衡相文 罗远航  
宿宁 张鹏 赵倩 郑飞燕

宝钢股份中央研究院武汉分院

牛琳霞 康斌 王媛

昆明理工大学

李存兄 李静 李世伟 王仕兴 薛秀珍  
俞小花

北京航空航天大学

冯静静 宋庆松