

三、化工、冶金与材料工程领域

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

化工、冶金与材料工程领域组研判的 Top10 工程研究热点分别属于化工、冶金与材料工程学科，见表 1.1.1，各热点逐年发表的核心论文情况见表 1.1.2。在筛选出来的 10 个研究热点中，热点“NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”“复合吸附剂在废水处理中的应用”“功能梯度材料的制备与应用”“多孔表面的制备与强化传热应用”“超疏水表面的构筑与应用”和“储氢合金”研究的核心在于获得合适的材料；热点“原位电子显微镜”和“硫化氢传感器”主要涉及分析和检测领域；而“碳-氢键活化”则更多地与化学合成的研究有关。这些热点的核心论文数都接近 50 篇；其中热点“NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”和“硫化氢

传感器”的核心论文篇均被引频次超过了 100；热点“复合吸附剂在废水处理中的应用”“功能梯度材料的制备与应用”和“碳-氢键活化”的核心论文平均出版年为 2014 年；热点“NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”和“复合吸附剂在废水处理中的应用”的常被引论文占比超过了 50%。从发展趋势来看，热点“原位电子显微镜”“硫化氢传感器”“功能梯度材料的制备与应用”“碳-氢键活化”和“储氢合金”的核心论文相对来说在持续增长（表 1.1.2）。部分专家的观点认为，“原位电子显微镜”“硫化氢传感器”和“储氢合金”相对来说是新兴的研究热点，其他的则是传统研究的进一步深入；热点“复合吸附剂在废水处理中的应用”中的高灵敏度可视化检测技术、“原位电子显微镜”中的在原子尺度下实时观察和控制反应的进行和“碳-氢键活化”中的使用简单和非功能化底物直接获得高附加值的功能化手性化合物等研究可能产生颠覆性的技术。

表 1.1.1 化工、冶金与材料工程领域 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	NiCo ₂ O ₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用	48	7395	154.06	2012.96	66.70%	0
2	气体分离膜	49	2154	43.96	2013.51	12.20%	1
3	复合吸附剂在废水处理中的应用	48	1756	36.58	2014.04	52.10%	0
4	原位电子显微镜	49	2419	49.37	2013.69	8.20%	2
5	功能梯度材料的制备与应用	47	2091	44.49	2014.77	44.70%	1
6	多孔表面的制备与强化传热应用	50	4095	81.90	2013.06	28.00%	2
7	碳-氢键活化	48	2349	48.94	2014.48	35.40%	0
8	超疏水表面的构筑与应用	48	2409	50.19	2013.27	10.40%	2
9	硫化氢传感器	49	5262	107.39	2012.59	40.80%	0
10	储氢合金	49	1249	25.49	2013.76	6.10%	0

表 1.1.2 化工、冶金与材料工程领域 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	NiCo ₂ O ₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用	7	6	20	12	3	0
2	气体分离膜	6	8	7	14	11	3
3	复合吸附剂在废水处理中的应用	3	2	10	13	15	5
4	原位电子显微镜	3	9	6	15	14	2
5	功能梯度材料的制备与应用	1	1	4	7	23	11
6	多孔表面的制备与强化传热应用	8	9	16	7	9	1
7	碳-氢键活化	0	0	7	16	20	5
8	超疏水表面的构筑与应用	6	8	16	5	11	2
9	硫化氢传感器	8	17	15	6	2	1
10	储氢合金	8	3	7	12	13	6

(1) NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用

钴酸镍 (NiCo₂O₄) 是一种复合过渡金属氧化物, 具有典型的尖晶石结构, 通常通过在材料体相中和表面发生氧化还原反应来储存能量, 被广泛应用于电催化和能量储存等领域, 一直都是超级电容器电极材料研究的重点。NiCo₂O₄ 具有优良的导电性、高催化活性和电化学活性及特殊磁性等特性, 为 NiCo₂O₄ 作为超级电容器电极材料的应用提供了条件, 受到研究者的关注。虽然 NiCo₂O₄ 具有较大的比表面积, 但与绝大多数过渡金属氧化物一样, NiCo₂O₄ 较差的电子离子电导率导致其电极材料的循环稳定性较差, 这是亟待解决的关键问题。其中一种有效的解决方法就是通过不同的制备方法得到纳米化结构, 如纳米棒、纳米片、纳米环、分级多孔纳米花和中空纳米球等。纳米化结构增大了电极材料的表面积, 并有利于离子的传输, 从而提高活性物质的利用率和高倍率性能。目前, 超级电容器电极材料的薄膜化阵列化是一个新的发展趋势, 在导电基底上直接制备纳米多孔阵列薄膜, 这样不仅可以避免粘接剂的影响, 使界面的接触电阻变得更小, 材料表面利用率更高, 而且具有阵列结构的薄膜具有更强

的抵抗体积变化的能力, 大大提升了材料的稳定性和循环寿命。

(2) 气体分离膜

气体分离膜技术以其高效、节能和绿色等特点, 在化工分离领域具有重要应用前景。传统的气体分离膜材料的渗透系数往往很低, 难以满足大处理量的应用需求。开发同时具有高渗透性和高选择性的膜材料成为膜领域的重要研究方向。自具微孔聚合物 (polymer of intrinsic microporosity, PIM) 是近年来出现的一种新型有机微孔材料, 微孔结构由刚性扭曲分子链的非有效折叠产生, 具有比表面积大、物理化学稳定性强和微孔结构可控等显著优点。设计开发新型高性能的 PIM 膜对气体分离膜的可持续发展具有重大和深远的意义。

(3) 复合吸附剂在废水处理中的应用

现代工业和偶然突发事件 (如核电站的核泄漏事件) 造成环境污染和自然资源污染日益严重, 尤其是水资源被磷酸盐、重金属离子和放射性元素等污染。为此, 研究可视化检测水中污染金属元素并高效吸附去除具有特别重要的意义。其中, 利用颜色变化将污染元素检测变为可视化检测, 能快速、灵敏地用肉眼观察鉴定污染金属元素越来越受到研究者关注。为了实现对污染金属元素的高效吸附去

除，需要研究开发新型高效复合吸附剂，而且要求吸附处理后，该复合吸附剂应该能够回收再利用，不对环境造成二次污染。尤其是对饮用水中痕量有毒离子的吸附，以及应用于废存在干扰离子的水体系，这就需要更加高效的吸附剂。这些需求促使应用于水处理的复合吸附剂和可视化检测材料成为当今研究的热点。

(4) 原位电子显微镜

原位电子显微镜用于实时观测和记录位于电镜内部样品对不同外部激励信号的动态响应过程。原位电子显微分析方法是当前物质结构表征科学中最具发展空间的研究领域之一。该方法继承常规电子显微镜所具有的高空间分辨率和高能量分辨率的优点，并在电子显微镜内部引入力、热、电、磁和化学反应等外部激励，实现了物质在外部激励下的微结构响应行为的反应动态、定量定性的实时原位观测。原位电子显微镜在材料合成、化学催化、生命科学和能源材料领域有着重要的应用，可以通过在原子尺度下实时观察和控制气相反应和液相反应的进行，研究反应的本质机理。目前的研究重点包括：

提高原位电子显微镜的图像分辨率和成像速率，研究纳米材料结构的转变过程，观察化学反应过程中的中间体； 与其他技术的联用，如与光谱、气相色谱和高效液相色谱等联用； 在原位电子显微镜的观察过程中，如何处理产生的热效应； 原位研究生物材料的对比度较低，液体池的散射效应极大影响了生物材料图像的分辨率，如何解决这些问题。

(5) 功能梯度材料的制备与应用

功能梯度材料 (FGM) 是一种新型非均质复合材料，一般通过连续或准连续地改变复合材料中两种材料的结构、密度和组成等因素，使内部的界面逐渐减少乃至消失，从而实现由于组成与结构的变化引起的性能的渐变。FGM 的研究包括材料设计、材料制备和材料性能评价，其中材料的设计与制备是核心，而关键技术为材料性能评价。建立基于模

拟实际工作环境的标准化测试实验方法，将为梯度材料的优化设计和制备提供数据依据。FGM 与传统意义上的均质复合材料不同，也无法采用常规测试手段来表征其性能。目前，国内外还没有统一的评价标准，研究主要是针对 FGM 的隔热性能评价、热疲劳性能评价、热冲击性能评价、等热性能和机械性能的实验测定工作。由于 FGM 的性能评价涉及多个学科，如热力学、传热学、材料力学和材料工程等，所以只有通过多领域通力协作才能建立一整套标准化实验方法，以此来准确评价 FGM 的性能。此外，对 FGM 材料的热学性能、力学性能、电学性能、物理和化学性能的研究也将会更好地促进 FGM 的发展与实际应用。

(6) 多孔表面的制备与强化传热应用

多孔表面通常具有很好的传热性能，其制造方法主要有多孔覆盖表面和开孔表面。一方面，可在换热表面上铺覆一层多孔覆盖物，如铜、铝、不锈钢或其他合金材料，通过烧结金属粉末、电镀、火焰喷涂和覆盖金属丝网等方法制备获得；另一方面，开孔多孔表面一般是利用机械加工法、激光加工法和电化学腐蚀法等，在换热材料表面上直接加工出所需的内凹穴。制备高质量的多孔表面关键在于精确控制孔的大小、均匀分布和孔隙率，高的孔隙率会影响材料的强度，另外需要考虑实际应用中表面孔的长期重复性和可靠性。多孔表面的材料特性、多孔结构的尺寸参数和沸腾换热工质的特性都会对沸腾过程中液体的流动与换热能力产生很大影响。现有的各种假设及理论模型尚不够完善，仍需深入开展对多孔表面沸腾换热机理和数学模型的研究。此外，多孔表面构筑与其他强化传热措施的联合也是今后强化沸腾换热技术研究的重要内容。

(7) 碳-氢键活化

碳-氢键活化反应通常是指在金属催化剂存在的条件下选择性地断裂某特定位置的碳-氢键，并将其转化为碳-杂原子键，或碳-碳键的过程。碳-氢键活化反应能高效地构筑功能有机化分子，具有

良好的原子经济性，因而在学术和工业界受到广泛关注，是目前有机化学领域的研究热点之一。碳-氢键活化反应通常需要定位基团，使得产物结构受限。近年来，一些可移除的双齿螯合辅助基团的引入，如 2-(吡啶-2-基)-异丙胺和 8-氨基喹啉等，有效地解决了这一问题，拓展了碳-氢键活化反应的应用范围。碳-氢键活化反应通常使用钯、铑等贵金属化合物为催化剂。近期研究发现镍、铜，甚至铁等廉价过渡金属化合物也可以有效催化碳-氢键活化反应。利用手性配体诱导的不对称碳-氢键活化合成手性化合物的研究也取得了突破性进展，这使简单和非功能化底物可以直接转化为高附加值的功能化手性分子，是一种极具吸引力的现代合成策略。碳-氢键活化通常经历金属杂环状中间体，金属中心对碳-氢键的氧化加成过程通常被认为是速率决定步骤。然而，金属催化的碳-氢键活化反应机理尚有待进一步研究，催化剂效率有待进一步提高。在未来，随着新螯合辅助基团的发现和催化剂效率的提高，碳-氢键活化反应在化学合成领域将有更广阔的应用。

(8) 超疏水表面的构筑与应用

超疏水表面泛指静态接触角大于 150° 的固体表面。根据对水黏附力的大小可分为“花瓣效应”和“荷叶效应”超疏水表面，其在油水分离、自清洁、防雾防雪、防腐抗阻、微流体芯片和无损液体输出等方面都表现出了极为诱人的应用前景。固体表面超疏水性取决于其表面的化学成分和微观几何结构。常规制备途径主要依据两个基本原则：表面构筑多级结构和对低表面能材料进行修饰。超疏水表面的研究已有数十年，相关理论研究和方法制备也取得了重要的进展，但是超疏水表面特性是一个涉及多参数的综合性科学问题，尤其是一些新的表面特性对传统的理论和概念也带来了新的挑战，因此仍需要继续深入研究和探索以促进超疏水表面的工业化应用。目前，复杂的工艺流程、特殊设备、环境污染，高成本和小尺寸等因素严重制约了超疏

水表面的实际应用。因此，开发简单可行、环保经济和大规模的制备方法是需要解决的问题之一。此外，超疏水表面的机械耐用性对其在苛刻条件下的实际应用仍是一个巨大的挑战。因此，应进一步研究基本理论及概念，并朝着制备耐磨损、耐环境老化、大规模应用的方向继续发展，研究和开发具有特殊表面的超疏水表面对拓展材料的应用范围和提高材料的使用性能等有着非常重要的意义。

(9) 硫化氢传感器

硫化氢传感器是指在特定场合实现对硫化氢浓度进行快速检测及分析的传感器。在生物、化工和环境等诸多领域都需要针对硫化氢的浓度进行测定，尤其是痕量硫化氢测定。痕量硫化氢测定的传统方法包括红外、电化学、催化和半导体等多种传感器。针对硫化氢传感器，不同场合对其要求也不尽相同，但一般要求高精度、高灵敏度、线性范围宽、抗干扰能力强、稳定性和可重复性能好。目前的研究热点也主要是围绕这几个方面展开，集中在荧光检测传感器和电化学检测传感器两个方面，其主要关键技术是找到或合成出能选择性地对硫化氢做出特殊响应的物质或材料，利用这些物质与硫化氢接触后的某些物理性质（如光谱性质或电化学性质）的强度变化来测定硫化氢的浓度；在不同的场合，与硫化氢共存的其他物质都可能成为硫化氢传感器的干扰物质，因此针对不同的使用场合，需要使用和研制不同类型的传感器，以达到对硫化氢的快速、准确检测。

(10) 储氢合金

储氢材料能很好地解决绿色能源氢的储存和运输问题，其中镁基储氢材料由于其储氢量高、密度小、资源丰富和价格低廉等一系列优点，被一致认为是最具有开发前景的储氢材料之一。然而其也存在着吸放氢条件比较苛刻、生成的氢化物过于稳定、吸氢动力学性能差和合金循环寿命短等缺点。Mg-Ni 系合金是一类重要的镁基储氢材料，而元素的取代是 Mg-Ni 系合金改性的主要方法。一般以

主族金属元素部分取代 Mg，而且取代成分往往不如 Mg 易于氢化；以其他过渡金属元素取代 Ni，应选择易于稳定原化合物的成分。元素取代对镁基合金性能的改善主要是两方面：一是提高镁基合金气固相吸放氢的热力学和动力学性能，二是提高合金电极的电化学性能。还可以通过制备方法来改善合金储氢性能：采用机械合金化法制备可使循环寿命显著延长；采用机械球磨与固相烧结法制备，最大吸放氢量明显提高。

1.2 工程研究焦点解读

1.2.1 NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用

具有功率密度高、充放电速率快和循环寿命长的超级电容器制备研究属于化学储能领域。超级电容器的安全性能甚至高于锂离子电池，在能源、电网和电动汽车等领域具有诱人前景，但其储能密度相对较低仍是限制其应用的短板。超级电容器中的电极材料是关键，电极材料的质量决定了电容器的主要性能指标。超级电容器的电极材料应同时具备高的比容量和低的内电阻，这样才能满足电容器中大电流快速充放电的要求。此外，电极材料还需具有优良的化学和力学稳定性，以及良好的电子、离子输运特性。H₂SO₄ 水溶液与 RuO₂ 体系是目前金属氧化物基电容器中研究最成功的，但是 Ru 的成

本太高导致其不适于商业化。因此，其他廉价过渡金属氧化物，如 Co₃O₄、MnO₂ 和 NiO 等，以及金属氧化物的混合物成为新的研究热点。未来超级电容器电极材料的制备工艺及结构优化将是研究重点，同时在新材料的开发与高性能材料的规模化制备的基础上发展低成本、高性能、稳定性好的移动电源技术，以此来满足市场的广泛需求。

2011 年以来，“NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”焦点中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。其中，中国、新加坡和美国相关的核心论文产出位列前三名，中国的核心论文数量高于表 1.2.1 中所列其他国家或地区的总和，这说明 NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的研究在中国成为研究的热点。中国有多家机构对此热点课题进行研究，而新加坡的研究较为集中，南洋理工大学 (Nanyang Technol Univ) 是相关核心论文产出最多的机构。中国是施引核心论文产出最多的国家，南洋理工大学则是施引核心论文产出最多的机构。

“NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”焦点近期研究内容主要包括 NiCo₂O₄ 材料的可控微观形貌研究、与碳材料复合的研究和与导电基体结合定向生长的研究，今后将

表 1.2.1 “NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”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	35	72.92%	4358	63.33%	124.51	2	0
2	Singapore	11	22.92%	3561	51.75%	323.73	0	0
3	USA	4	8.33%	841	12.22%	210.25	0	0
4	Taiwan of China	3	6.25%	130	1.89%	43.33	0	0
5	Korea	1	2.08%	74	1.08%	74.00	0	0
6	England	1	2.08%	53	0.77%	53.00	0	0

表 1.2.2 “NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”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	Nanyang Technol Univ	10	20.83%	3506	50.95%	350.60	0	0
2	Cent S Univ	6	12.50%	274	3.98%	45.67	1	0
3	Tum Create Ctr Electromobil	4	8.33%	1070	15.55%	267.50	0	0
4	Anhui Univ Technol	4	8.33%	691	10.04%	172.75	0	0
5	Nanjing Univ Aeronaut & Astronaut	4	8.33%	691	10.04%	172.75	0	0
6	Zhejiang Univ	3	6.25%	733	10.65%	244.33	0	0
7	Harbin Inst Technol	3	6.25%	131	1.90%	43.67	0	0
8	“Tsing Hua Univ”, Taiwan of China	3	6.25%	130	1.89%	43.33	0	0
9	Georgia Inst Technol	2	4.17%	374	5.44%	187.00	0	0
10	Chinese Acad Sci	2	4.17%	294	4.27%	147.00	0	0

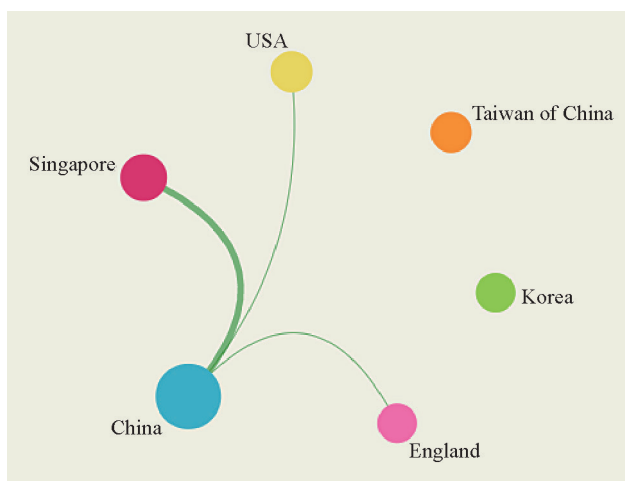


图 1.2.1 “NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络¹

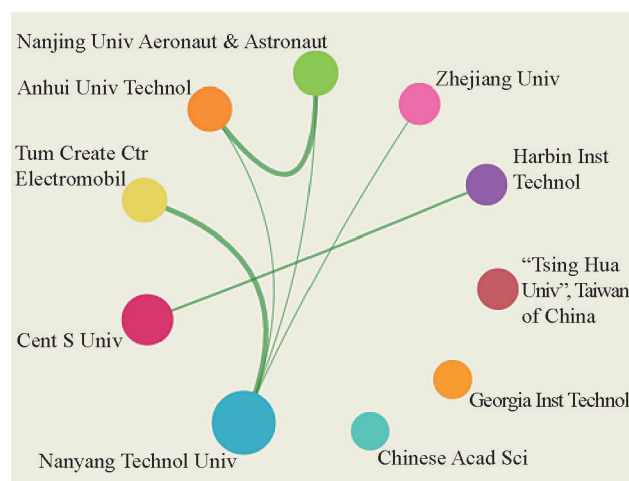


图 1.2.2 “NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”工程研究焦点主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”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	32	68.09%	2013.34
2	Singapore	10	21.28%	2012.50
3	USA	3	6.38%	2013.00
4	England	1	2.13%	2014.00
5	Taiwan of China	1	2.13%	2013.00

其负载在三维网状导电基体上进行改性将是研究重点，但同时需要进一步深入研究材料结构性能的

相关性，建立实际应用中的统一评价标准，以便使其在超级电容器中得到更好的应用。

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 “NiCo₂O₄ 基纳米阵列化材料的制备及在超级电容器中的应用”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	Nanyang Technol Univ	9	12.50%	2012.33
2	Cent S Univ	6	8.33%	2014.00
3	Tum Create Ctr Electromobil	4	5.56%	2012.75
4	Anhui Univ Technol	4	5.56%	2012.50
5	Nanjing Univ Aeronaut & Astronaut	4	5.56%	2012.50
6	Harbin Inst Technol	3	4.17%	2014.00
7	Zhejiang Univ	3	4.17%	2012.67
8	Donghua Univ	2	2.78%	2013.50
9	Georgia Inst Technol	2	2.78%	2013.00
10	Huazhong Univ Sci & Technol	2	2.78%	2013.50

1.2.2 气体分离膜

气体分离膜在分离混合气体时不涉及相变过程而且可以在常温下进行，与传统的吸附、吸收、深冷分离等分离技术相比具有经济和环保方面的竞争优势，因此在全球范围内得到了高度的重视。气体分离膜技术的核心是膜材料，但传统的膜材料往往都有一个共同的缺点：渗透系数大的膜，其选择系数低；选择系数高的膜，其渗透系数小。PIM 膜在一定程度上克服了这一缺点，它同时具有良好的渗透性和选择性。热重排是制备 PIM 膜的最常用手段之一。热重排聚合物是一种玻璃态微孔聚合物，热稳定性与物理化学稳定性优良，热重排聚合物膜（TR 膜）在气体分离中具有很好的应用潜力。TR 膜通常具有较大的自由体积分率和狭窄的自由体积空穴分布，因而表现出较高的气体渗透选择性。热重排过程是对聚合物进行修饰改性的重要手段，可将前体聚合物转变为其他刚性结构聚合物的热反应过程，针对特定的分离体系，可通过前体聚合物分子结构的设计实现对自由体积空穴大小及其分布的调控。

PIM 膜和 TR 膜的制备过程主要涉及高分子材料科学与工程领域，膜在气体分离中的应用过程主要涉及化学工程领域。PIM 膜在某种程度上可以视

为“有机分子筛膜”，分离机理遵循“分子筛分机理”“溶解扩散机理”和“促进传递机理”。PIM 膜和 TR 膜在气体分离中的应用有望解决渗透性和选择性之间的相互制约关系，目前 PIM 气体分离膜拟解决的关键技术主要集中于 PIM 的结构调控和改性。PIM 的结构调控主要是通过改变苯环连接结构的刚性、调整转角大小及相邻转角之间的距离和引入不同侧链取代基等途径实现，目的是有效改变气体分子在 PIM 膜内的扩散和溶解性能。PIM 的改性主要有化学交联改性和物理共混改性。需要指出的是，用于 PIM 膜和 TR 膜制备的材料还比较有限，需要进一步开发刚性强度高、对某些气体具有高溶解性的单体，并寻找更多简便、可控的改性方法，制备出具有更高气体分离性能的 PIM 膜。PIM 膜和 TR 膜由于研究历史尚短，需要在膜材料种类、制备方法、结构调控、构效关系和性能强化等方面开展全链条设计与创新。期望通过上述贯通式研究工作的开展，使 PIM 膜和 TR 膜的气体分离性能得到很大提升，在能源、环境和资源等多个领域发挥越来越大的作用。

2011 年以来，“气体分离膜”焦点核心论文主要产出国家或地区及机构见表 1.2.5 和表 1.2.6，主要国家或地区及机构的合作情况分别见图 1.2.3

和图 1.2.4，施引核心论文的主要产出国家或地区及机构分别见表 1.2.7 和表 1.2.8。其中，韩国、美国、意大利、沙特阿拉伯在核心论文产出方面位列前 4；除沙特阿拉伯外，核心论文产出量排名前 10 的其他 9 个国家或地区之间都有合作，中国与韩国合作较多。韩国的汉阳大学（Hanyang Univ）发表的核心论文数最多，中国的研究机构以中国科学院为主。施引核心论文的主要产出国家或地区及机构的排名与核心论文的主要产出国家或地区及机构的排名差异不大。

1.2.3 复合吸附剂在废水处理中的应用

复合吸附剂使用两种或两种以上不同性质的材料，通过物理或化学的方法使之形成具有新性能的吸附剂。这种复合吸附剂中的不同材料在性能上能够相互取长补短，产生协同效应，使其综合性能明显提高而满足各种不同的要求。在污水处理方面，主要研究重点集中在对重金属离子 Hg (II)、Cu (II)、Zn (II)、Pb (II)、As (V)、Co (II)，镧系元素如 Ce (III)、Eu (III)、Sm (III)、Nd (III)、Yb (III)，放射性元素 Cs (137)，贵金属 Au (III)、

表 1.2.5 “气体分离膜”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	Korea	19	38.78%	785	40.19%	41.32	1	1
2	USA	11	22.45%	340	17.41%	30.91	1	0
3	Italy	9	18.37%	497	25.45%	55.22	0	0
4	Saudi Arabia	9	18.37%	271	13.88%	30.11	0	0
5	China	9	18.37%	182	9.32%	20.22	0	0
6	Wales	6	12.24%	490	25.09%	81.67	0	0
7	Australia	4	8.16%	120	6.14%	30.00	0	0
8	Scotland	4	8.16%	92	4.71%	23.00	0	0
9	Spain	4	8.16%	91	4.66%	22.75	0	0
10	England	3	6.12%	77	3.94%	25.67	0	0

表 1.2.6 “气体分离膜”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	Hanyang Univ	19	38.78%	785	40.19%	41.32	1	1
2	Univ Calabria	9	18.37%	497	25.45%	55.22	0	0
3	Cardiff Univ	8	16.33%	529	27.09%	66.13	0	0
4	King Abdullah Univ Sci & Technol	8	16.33%	259	13.26%	32.38	0	0
5	Univ Texas Austin	8	16.33%	232	11.88%	29.00	1	0
6	Univ Notre Dame	5	10.20%	176	9.01%	35.20	0	0
7	Chinese Acad Sci	5	10.20%	110	5.63%	22.00	0	0
8	Hunan Univ Arts & Sci	4	8.16%	122	6.25%	30.50	1	0
9	Univ Edinburgh	4	8.16%	92	4.71%	23.00	0	0
10	Spanish Nat Res Coun	4	8.16%	91	4.66%	22.75	0	0

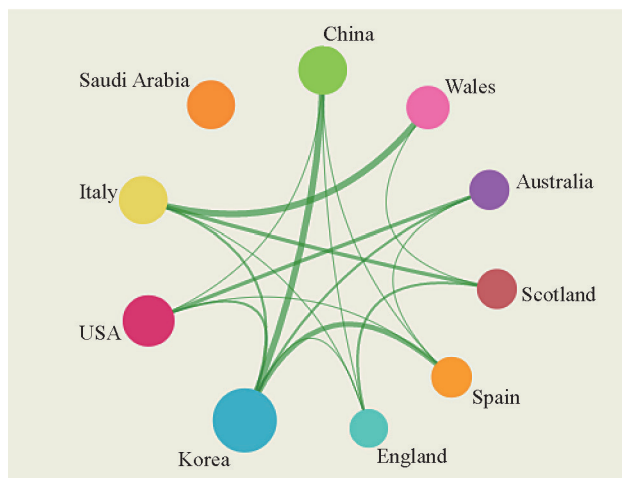


图 1.2.3 “气体分离膜”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络

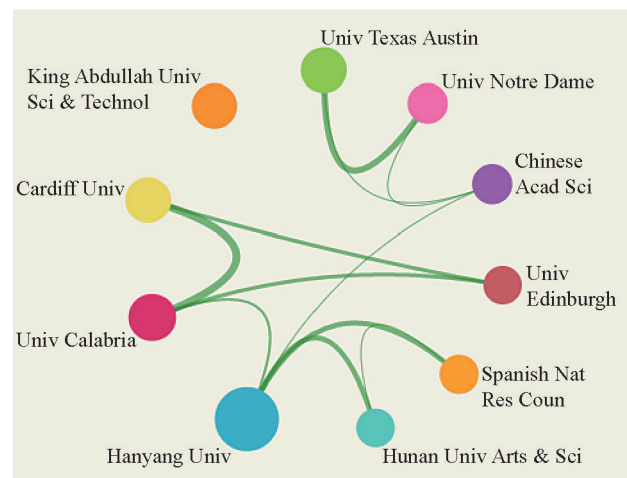


图 1.2.4 “气体分离膜”工程研究焦点主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “气体分离膜”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	Korea	16	21.62%	2013.88
2	Italy	9	12.16%	2013.89
3	China	9	12.16%	2014.56
4	Saudi Arabia	8	10.81%	2014.13
5	USA	8	10.81%	2014.00
6	Wales	5	6.76%	2013.20
7	Scotland	4	5.41%	2014.25
8	Spain	4	5.41%	2013.50
9	England	3	4.05%	2013.67
10	Australia	3	4.05%	2013.00

表 1.2.8 “气体分离膜”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	Hanyang Univ	16	16.67%	2013.88
2	Univ Calabria	9	9.38%	2013.89
3	Cardiff Univ	7	7.29%	2013.43
4	King Abdullah Univ Sci & Technol	7	7.29%	2014.00
5	Univ Texas Austin	6	6.25%	2014.17
6	Chinese Acad Sci	5	5.21%	2014.00
7	Spanish Nat Res Coun	4	4.17%	2013.50
8	Hunan Univ Arts & Sci	4	4.17%	2015.25
9	Univ Notre Dame	4	4.17%	2014.00
10	Univ Edinburgh	4	4.17%	2014.25

Pd (II) , 以及 Se (IV) 和磷酸盐等离子的可视化检测和吸附, 相应的复合吸附剂分为两类, 一类是离子交换树脂, 另外一类是有机物修饰的介孔二氧化硅复合材料。根据被吸附离子的特性, 采用相应的吸附材料和有机物复合技术。

在磷酸盐类含磷废水的吸附处理时, 采用弱碱性阴离子交换树脂纤维以及配体交换纤维状吸附剂, 如聚丙烯纤维经聚乙烯胺修饰的吸附材料, 能够实现高通量下选择性地吸附磷酸盐, 而不受其他离子干扰。

Hg(II)、Cu(II)、Zn(II)、Pb(II)、As(V)、Co(II) 等重金属离子的吸附, 需要可视化检测、高效吸附、低成本的吸附剂, 同时完成检测和吸附两种功能, 拟解决的关键问题是快速可视化检测并高效吸附水中重金属离子, 使其达到饮用水水平。目前, 这个研究领域大部分参考文献来自日本原子能研究院 (Japan Atomic Energy Agency) 完成的工作, 他们研究的重点是利用介孔二氧化硅为载体材料, 通过引入不同的有机物实现对重金属离子的选择性吸附功能, 而且对 pH 也有敏感性。其中, 所用有机化合物含有氮和氧元素的氮杂环、羧酸、氮碳双键和氮氮键等化学结构, 利用它们可以和金属离子形成螯合物, 从而实现吸附功能。吸附金属离子后, 利用酸洗即可回收金属离子, 同时实现吸附剂再生。

对放射性元素 Cs(137) 的吸附采用二苯并-18-

冠-6 醚修饰介孔二氧化硅片, 吸附效率高, 而且能够实现多次重复使用。镧系元素如 Ce(III)、Eu(III)、Sm(III)、Nd(III)、Yb(III) 的快速可视化检测和吸附研究通常采用 4-叔辛基-4-((苯基)二氮烯基)苯酚、4-十二烷基-6-((4-(己氧基)苯基)二氮烯基)苯-1,3-二醇、*N*-甲基-*N*-苯基-1,10-邻菲咯啉-2-羧胺等含有 N 和 O 配位原子的有机化合物修饰介孔二氧化硅材料, 这类复合吸附剂能够快速可视化检测水中的镧系元素, 而且对痕量级别的镧系元素也能实现高效吸附。

2011 年以来, “复合吸附剂在废水处理中的应用” 焦点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, 复合吸附剂的研究主要集中在有机吸附功能配体修饰无机介孔二氧化硅材料, 主要核心论文产出国家或地区仅有 8 个, 其中日本发表的核心论文数为 46 篇, 而排名第 2 的孟加拉国有 17 篇。日本与孟加拉国之间的合作最多, 其次是埃及、沙特阿拉伯和日本, 埃及、沙特阿拉伯和孟加拉国互相也有合作。日本原子能研究院的核心论文数最多, 其次是孟加拉国的沙希德齐亚拉赫曼医学院 (Shaheed Ziaur Rahman Med Coll), 这些机构主要与日本原子能研究院合作, 孟加拉国、沙特

表 1.2.9 “复合吸附剂在废水处理中的应用” 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	Japan	46	95.83%	1577	96.10%	34.28	10	0
2	Bangladesh	17	35.42%	510	31.08%	30.00	1	0
3	Egypt	10	20.83%	359	21.88%	35.90	2	0
4	Saudi Arabia	6	12.50%	141	8.59%	23.50	2	0
5	Australia	2	4.17%	44	2.68%	22.00	0	0
6	Korea	1	2.08%	69	4.20%	69.00	1	0
7	India	1	2.08%	33	2.01%	33.00	0	0
8	Taiwan of China	1	2.08%	31	1.89%	31.00	0	0

阿拉伯等国家或地区的机构之间的合作也较多。施引核心论文的主要产出国家或地区均为核心论文主要产出国家或地区的前 5 位，日本排名第一，施引

核心论文主要产出机构有 8 个来自核心论文主要产出机构。

复合吸附剂在废水处理中的应用研究将是持续

表 1.2.10 “复合吸附剂在废水处理中的应用”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	Japan Atom Energy Agcy	42	87.50%	1427	86.96%	33.98	9	0
2	Shaheed Ziaur Rahman Med Coll	12	25.00%	317	19.32%	26.42	1	0
3	Natl Inst Mat Sci	8	16.67%	405	24.68%	50.63	3	0
4	Independent Univ	8	16.67%	253	15.42%	31.63	1	0
5	Kumamoto Univ	6	12.50%	273	16.64%	45.50	2	0
6	King Saud Univ	6	12.50%	141	8.59%	23.50	2	0
7	Sohag Univ	4	8.33%	162	9.87%	40.50	2	0
8	Univ Dhaka	4	8.33%	159	9.69%	39.75	0	0
9	Suez Univ	4	8.33%	122	7.43%	30.50	0	0
10	Waseda Univ	3	6.25%	96	5.85%	32.00	0	0

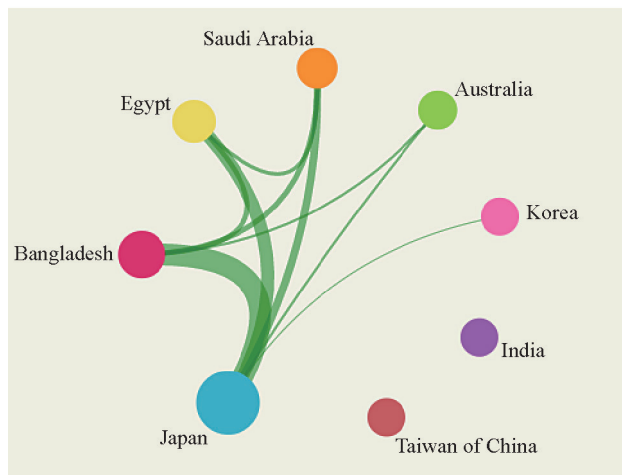


图 1.2.5 “复合吸附剂在废水处理中的应用”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络

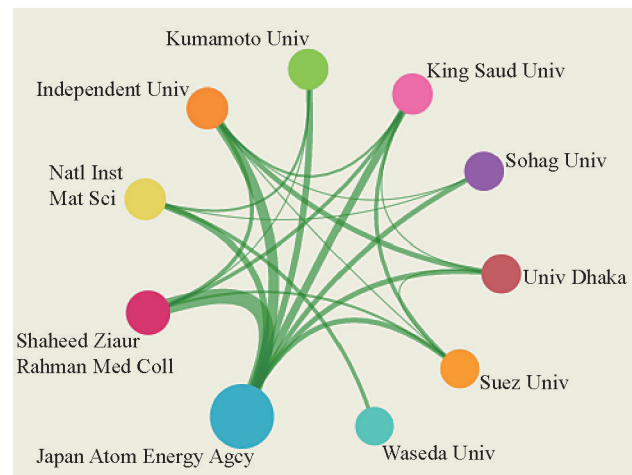


图 1.2.6 “复合吸附剂在废水处理中的应用”工程研究焦点主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “复合吸附剂在废水处理中的应用”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	Japan	41	53.95%	2014.37
2	Bangladesh	17	22.37%	2014.65
3	Egypt	10	13.16%	2014.00
4	Saudi Arabia	6	7.89%	2015.17
5	Australia	2	2.63%	2015.00

表 1.2.12 “复合吸附剂在废水处理中的应用”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	Japan Atom Energy Agcy	41	44.09%	2014.37
2	Shaheed Ziaur Rahman Med Coll	12	12.90%	2014.83
3	Independent Univ	8	8.60%	2014.75
4	King Saud Univ	6	6.45%	2015.17
5	Kumamoto Univ	4	4.30%	2013.25
6	Suez Univ	4	4.30%	2014.75
7	Univ Dhaka	4	4.30%	2014.25
8	Sohag Univ	3	3.23%	2014.00
9	Curtin Univ	2	2.15%	2015.00
10	Elec Power Res Inst	2	2.15%	2012.50

研究的热点，预计未来 10~20 年还会有非常多的研究工作，在探索高灵敏、可视化检测金属离子以及高效和专一吸附剂方面将有突破性研究进展，将来的研究和发重点是展重点是将实验室研究成果在应用领域的工程化研究。

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

化工、冶金与材料工程领域组研判的 9 个工程

开发热点属于化工、冶金及材料工程学科，见表 2.1.1，各开发热点逐年核心专利公开量见表 2.1.2。其中，热点“新型电化学储能材料及系统研制技术+动力锂离子电池及高性能储能材料”和“新能源技术开发及应用”是关于能源及其相关技术的，热点“新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用”“石墨烯的制备技术与性能”和“纳米材料制备及应用（冶金非相关）”也部分地涉及能源，彰显了能源问题在当今世界的重要性。各热点涉及的核心专利簇的平均被引频次均超过了 10 次，平均公开年均在 2012 年左右。部分专家的观点认为，

表 2.1.1 化工、冶金与材料工程领域 Top9 工程开发热点

序号	工程开发热点	公开量	引用频次	平均被引频次	平均公开年
1	新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用	704	10 607	15.07	2012.22
2	石墨烯的制备技术与性能	43	1 181	27.47	2011.70
3	铝、镁、钛轻金属合金制备及应用	285	2 856	10.02	2012.51
4	可降解医用植入器械与人体健康监测	92	3 384	36.78	2012.48
5	新型电化学储能材料及系统研制技术+动力锂离子电池及高性能储能材料	258	4 435	17.19	2011.74
6	纳米材料制备及应用（冶金非相关）	172	1 954	11.36	2012.23
7	先进树脂基复合材料制造技术	169	3 194	18.90	2012.02
8	钢铁清洁化生产新技术及高性能钢开发	413	4 366	10.57	2012.17
9	新能源技术开发及应用	41	1 128	27.51	2011.85

表 2.1.2 化工、冶金与材料工程领域 Top9 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	新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用	276	186	121	63	45	13
2	石墨烯的制备技术与性能	26	6	9	2	0	0
3	铝、镁、钛轻金属合金制备及应用	74	68	85	43	12	3
4	可降解医用植入器械与人体健康监测	31	16	23	15	6	1
5	新型电化学储能材料及系统研制技术 + 动力锂离子电池及高性能储能材料	133	72	45	5	2	1
6	纳米材料制备及应用（冶金非相关）	59	40	50	21	1	1
7	先进树脂基复合材料制造技术	69	54	29	10	5	2
8	钢铁清洁化生产新技术及高性能钢开发	141	112	116	37	6	1
9	新能源技术开发及应用	21	11	5	2	2	0

热点“新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用”“石墨烯的制备技术与性能”“可降解医用植入器械与人体健康监测”和“纳米材料制备及应用（冶金非相关）”是新兴的开发热点，而热点“铝、镁、钛轻金属合金制备及应用”“新型电化学储能材料及系统研制技术 + 动力锂离子电池及高性能储能材料”“先进树脂基复合材料制造技术”“钢铁清洁化生产新技术及高性能钢开发”和“新能源技术开发及应用”是传统开发的进一步深入。

（1）新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用

随着半导体产业中器件的小型化、微型化和集成化发展，加之国防、航空航天、汽车、发动机以及国民经济各行各业对先进功能和结构薄膜材料的迫切需求，需要大力发展包括光学薄膜、磁性薄膜、硅薄膜、热电薄膜、压电薄膜、透明薄膜、超硬薄膜和有机薄膜等多种薄膜材料。通过优化薄膜的设计和沉积制备工艺（如化学气相沉积或物理气相沉积），协同先进的半导体微加工工艺，可实现微传感器、微执行器、微机械结构、微电源微能源、信号处理和电路的加工应用。薄膜材料与器件技术是一项关系到国家科技发展和国防安全的关键技术。

（2）石墨烯的制备技术与性能

石墨烯具有理想的单原子层二维晶体结构，由六边形晶格组成，石墨烯结构的特殊性也使其拥有了独特的力学、热学和电学等性能。目前，石墨烯材料展示出了广阔的应用前景，可将石墨烯用于太阳能电池电极材料、超级电容器、储氢材料、锂离子电池电极材料和光学材料等方面。作为当今新材料中的“明星”，石墨烯的研究已经进入快速发展阶段，世界各国纷纷将石墨烯的制备及其应用技术作为本国的长期战略发展方向，旨在新一轮产业革命中能够占据主动和先机。但在实际制备中，石墨烯存在不稳定且易于团聚的缺点，因此无法充分发挥石墨烯材料单片层结构的优异特性。制约石墨烯广泛应用的关键瓶颈技术是石墨烯的分散技术。氧化石墨烯是制备功能化的石墨烯材料的重要基础，是含氧官能团修饰的石墨烯，在制备过程中具有简单、低成本、易于进一步修饰的特点。高质量石墨烯材料的大规模制备是未来一切应用的基础，其中发展简单可控的化学方法来批量制备石墨烯材料是最为方便和可行的途径。

（3）铝、镁、钛轻金属合金制备及应用

随着航空航天、高铁、核电、汽车和生物医疗等高科技领域的快速发展，对高性能轻金属合金的需求越来越广泛。人们围绕铝、镁、钛等轻金属合

金开展了大量的开发工作，重点领域涉及：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；可降解生物医用镁合金；能源、医用钛合金材料等。由于原材料铜的价格因素，为了降低工业成本，开发导线用高性能铝合金受到极大的关注，高性能铝合金结构材料研发也一直是航空航天和汽车领域的重点。镁合金作为结构材料依然存在强度、韧性、耐蚀性不能满足应用的现状，因此针对高强、高韧、耐蚀性镁合金的开发仍需要长时间的投入。可降解生物医用镁合金之所以成为近年来的研究热点，是因为其可避免临床使用的不锈钢或钛合金等惰性医用金属材料植入后，作为异物长期留存在体内而带来的不利影响。生物医用镁合金的研发重点在于对合金的成分及组织进行调控，使合金具有良好的力学、腐蚀降解和生物学“三位一体”的综合性能，以满足临床应用的需要。

（4）可降解医用植入器械与人体健康监测

随着人口老龄化趋势和对医疗保健需求的迅速增长，发展新一代革命性的在体内可降解或可吸收的医用植入器械势在必行，可望解决目前永久植入器械临床上长期炎症和二次手术等缺陷和问题，从而显著提高疗效，减轻病患痛苦。可降解医用植入器械的研发主要包括新型可降解医用材料的计算开发和制备加工、器械结构的优化设计与精密加工、表面改性和功能化涂层设计与制备、体内外降解及安全性与功效性的研究和评价等，实现关键可降解医疗器械的可控降解、优异生物相容性和功能适配集成。此外，针对中国老龄化社会面临的心力衰竭、骨科等关键疾病，人体健康的监控与预测成为研究重点。以智能材料为核心，开展可穿戴快速监测设备、靶向定位治疗、药物载体和人工组织等关键智能材料与器件技术研究，可实现对关键疾病检测的小型化、多功能化和快速化。

（5）新型电化学储能材料及系统研制技术 + 动力锂离子电池及高性能储能材料

随着能源危机、雾霾和全球变暖等环境问题的

发展，新能源技术成了今后能源利用的重要发展趋势，其中储能器件作为新能源技术的重要组成部分成为重要的研究方向。对于具有高比容量、高比能量、长寿命、安全价廉的新型储能器件，市场对其具有迫切需求。有望满足上述需求的储能系统包括全固态锂离子电池、高压正极 - 金属锂负极电池、锂 - 硫电池、锂 - 空气电池、钠 - 硫电池和超级电容器等。而在储能器件中，材料是最重要的组成部分之一，也是决定性能的关键因素。储能材料相关的关键技术主要包括纳米结构电极材料的可控制备与电化学反应机理的研究，新型电解质材料的研发与其离子传导机制和界面稳定性研究，以及储能系统结构材料的轻量化与安全性的优化等。利用上述新材料可以构建出性能更加出色的储能器件，在新能源汽车、消费电子、家庭储能和可再生能源利用等方面具有广阔的应用前景。

（6）纳米材料制备及应用（冶金非相关）

纳米技术汇聚了现代多学科领域在纳米尺度的焦点科学问题，是全球范围内最大和最有竞争力的研究领域之一。而纳米材料是材料科学领域的焦点和前沿之一，目前大多数国家都将纳米材料制作及其技术发展作为重要的科研领域。在纳米尺度（1~100 nm）上研究物质在原子和分子水平的特性和相互作用，并利用这些特性进行多学科交叉，目标是利用原子、分子和物质在纳米尺度上表现出来的新颖的物理、化学和生物特性，制造出具有特定功能的产品，研究内容主要包括以下几个方面：

新型纳米材料制备与加工技术； 纳米表征与标准； 纳米生物医药； 纳米信息材料与器件； 能源纳米材料与技术； 环境纳米材料与技术。

纳米材料的应用领域非常广泛，纳米陶瓷材料、纳米半导体材料、纳米催化材料、纳米医药和纳米碳管等可谓是纳米材料的代表。通过从基础研究到应用研究的全链条一体化设计，有望在纳米科技重要应用领域取得重大突破。

（7）先进树脂基复合材料制造技术

先进树脂基复合材料是通过复合工艺制备的，它以有机高分子材料为基体，以高性能连续纤维为增强材料，是具有明显优于原组分性能的一类新型材料，在航空航天、国防军工、汽车、机械电器和医疗领域得到了广泛应用。航空航天方面，先进树脂基复合材料具有比强度和比刚度高、可设计性强、抗疲劳断裂性能好、耐腐蚀、结构尺寸稳定性和便于大面积整体成形等优点，现已发展成为继铝、钢、钛之后的第四大航空结构材料，主要应用于飞机和直升飞机的结构部件、机载雷达罩、人造卫星、太空站、航空密封和天地往返运输系统等方面。汽车制造方面，则广泛使用先进树脂基复合材料来提高汽车综合性能，如汽车内部构件和高性能汽车轮胎等。机械电器工业对先进树脂基复合材料的需求也非常广泛，如风机和工程机械等领域。此外，随着集成技术的快速发展，电子元器件的工作频率急剧增加，对界面的导热性和印制电路板的防水耐温性能等要求增多，这些对先进树脂基复合材料提出了新的要求。离子交换树脂等先进树脂基复合材料在医疗方面得到了广泛应用，可用于制造人工心脏、呼吸器和支架等。当前先进树脂基复合材料正向着高性能化方向发展，如采用高性能纤维和树脂等提高复合材料综合性能，提高减重效率，提升先进树脂基复合材料制造水平，实现智能化生产制备，以及发展低成本先进树脂基复合材料制备加工工艺等。

（8）钢铁清洁化生产新技术及高性能钢开发

随着高铁、汽车、舰船和机械等行业对高强度钢需求的迅猛增加，近年来基于特种钢、洁净钢、海洋工程用耐蚀钢的开发工作，国际上开展了短流程、清洁化钢铁冶金新工艺的研发，包括钢液杂质净化工艺及装备和渣型优化等关键热点。在高性能钢开发方面，开发国家火电和核能等能源战略用先进钢，包括超临界耐热钢和 AP1000 锻件生产技术；开发高 / 低温、高压、复杂介质环境下能源、航空、

海洋用钢，包括开发高强高韧钢和耐腐蚀双金属复合材料，研究耐磨耐蚀耐高温钢双金属复合材料全轧制复合工艺与装备关键技术，制备高品质宽厚板和大型高洁净铸锻件等；研究特殊钢新型强韧化机制与高可靠长寿命机理，制备及服役过程微观组织演化，耐高温、应力、腐蚀等服役环境适应性的材料设计技术，特殊钢高洁净度冶炼、夹杂物精确控制、均质化与组织精细化控制、精确成型与加工等产品质量稳定控制技术，低成本制造及简化流程技术等。在炼钢和炼铁过程中则需要不断改进设计，使用清洁能源和原料，采用先进的工艺技术与设备，改善管理水平和资源综合利用等措施，降低环境污染，提高资源利用效率，实现钢铁清洁化生产。

（9）新能源技术开发及应用

随着人类进入后石油时代，能源安全和环境问题越来越突出，迫切需要开发新能源技术如煤气化、生物质裂解脱氧、劣质油和重油资源化、合成气甲烷化和核能等来解决这些问题。新能源技术的核心除催化剂开发外，由于所涉及的原料成分复杂、转化过程操作温度高，如何通过新设备、新工艺开发解决催化剂在线再生和废热的综合利用等问题，成为新能源技术能否实现商业化应用的关键。目前在新能源技术开发热点中，煤气化和合成气甲烷化技术已实现工业化，但供需缺口较大，达 40% 以上，而且目前运行成本较高；劣质油和重油资源化已在部分工业装置中应用，但技术成熟度有待进一步提高；生物质催化裂化及加氢脱氧等技术仍处于技术开发阶段。为此，新型汽化炉、焦化炉、生物质与石油原料裂解耦合、生物质催化裂化（加氢脱氧）等技术具有广阔的应用及推广前景。

2.2 工程开发焦点解读

2.2.1 新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用

随着器件小型化、薄膜化、多功能集成化的发

展，薄膜材料与器件及其加工技术影响范围极为广泛，包括大规模集成电路、平板显示器、电子元器件、信息记录与存储、微型传感器和薄膜太阳能电池等，涉及高新技术产业的各个领域。因此，薄膜材料与器件技术是一项关系到国家科技发展和国防安全的关键技术。当前科技发达国家已先后将发展薄膜技术与应用列入中长期开发计划，其中美国倾向于军事和航天领域的应用，日本在高科技利用方面居于世界领先地位，欧盟则着重小功率电源、传感器和运用纳米技术进行产品开发。我国在薄膜材料基础研究方面具有一定实力，但在新型薄膜材料及器件领域的研究跟国外存在较大差距，必须迅速加大开发力度，集约发展，尽快实现新型薄膜材料与器件技术产业化。

几个重要的分支工程技术如下：

(1) 光学太阳能薄膜材料：近些年太阳能光伏发电技术发展迅猛，薄膜太阳能电池因其独特的优势和逐渐成熟的工艺在光伏市场占据了一席之地，表现出很快的成长速度，但工艺和材料仍是规模化生产的最大瓶颈。我国薄膜太阳能电池的发展面临着很大的挑战，一方面对其中的物理科学问题理解不够充分，制备工艺与技术有待进一步创新改进，另一方面还需要新材料和新结构来替代贵材料和有毒材料，尤其是化合物薄膜电池，关键精密设备与工艺的集成度有待深入研究开发。

(2) 热电薄膜材料：热电材料是一种能实现热能与电能相互转换的半导体材料，常用于制备微型电源或电子芯片制冷器件。它既可以进行快速、高效的主动制冷，又可改变电流方向，实现致冷和加热转换，同时也可利用余热进行发电。高效热电转换器件可制成块状或薄膜，具有体积小、质量轻、无运动部件、可靠性高、无噪声、调节性能好、便于安装和不释放有害化学物质等特点，对很多应用而言，热电器件都是很好的选择。研究表明，热电器件的制冷功率密度和特征尺寸成反比，因此薄膜热电器件可以很好地提高制冷效率。如何提高现有

材料体系的热电品质因子 ZT 值一直是热电薄膜材料研究的重点。

(3) 透明导电薄膜材料：透明导电氧化物（transparent conductive oxide, TCO）薄膜是一种十分重要的光电材料，其特点是禁带宽、可见光谱区光透射率高和电阻率低。基于 TCO 薄膜优异的光电特性，其在包括太阳能电池、气体传感器和液晶显示器等多个领域得到广泛的应用，目前已发展成为一类高新技术产业。其中，金属薄膜中由于存在着自由电子，即使很薄的膜仍能呈现出很好的导电性，若选择其中对可见光吸收小的物质就可得到透明导电膜，但是透明性稍差。半导体薄膜和高分子电介质薄膜恰恰相反，存在导电性差，但透明度好的特点，多层膜系列的导电性与透明度都很好。如何协调薄膜导电性与透明度，并实现其大规模生产是制约透明导电薄膜发展的瓶颈。随着碳纳米材料和其他金属掺杂复合材料的发展，透明导电薄膜的性能将会得到更大的提高，应用会更加广阔。

(4) 薄膜器件的集成应用：薄膜集成电路是利用厚度在 $1\ \mu\text{m}$ 以下的不同种类与功能的薄膜材料，通过真空蒸发、磁控溅射和电镀等物理气相沉积的方法及互连技术制成的集成电路。薄膜电路中所制作的元件具有精度高、参数范围宽和温度频率特性好等优点，可以工作到毫米波段，并且集成度较高、尺寸较小，但是所用工艺设备比较昂贵，生产成本较高。薄膜混合集成电路适用于各种电路，特别是要求精度高、稳定性能好的模拟电路。与其他集成电路相比，其更适合于微波电路。在薄膜电路集成过程中，固态薄膜与衬底结构复合，读出集成电路（ROIC）的设计与结构兼容，微细加工方法与检测技术，大尺寸低缺陷薄膜生长等因素是集成薄膜器件的关键问题。与美国、日本等薄膜集成技术先进国家相比，我国在特定薄膜的规模生产方面取得了很大的进展，薄膜材料的生产达到了国际先进水平，但关键性薄膜元器件仍有赖于进口。虽然国外在薄膜元器件的集成方面走在了前列，但其

全力推进性的研究与生产也是近些年才开始的，创新空间还很大，我国应抓住这一发展机遇，设计和制造出各种集成结构的元器件、模块和组件。

目前，各国对薄膜材料及器件的研究都投入了大量的人力、物力，尤其是欧美、日本和韩国等发达国家和地区已经在薄膜材料与器件的研发和实现大规模产业化方面处于领先地位。我国虽然在某些薄膜材料的基础研究中处于国际领先地位，但是薄膜材料的大规模生产仍依赖于进口，薄膜材料与器件产业化所需设备的自主研发能力不足，整体工艺技术较不成熟。此外，功能薄膜是 21 世纪新材料的重要组成部分，在太阳光伏发电中的背板膜和 EVA 胶膜，在新能源电池中的锂离子和镍氢电池隔膜，在平板显示器中的扩散膜、棱镜膜、复合膜和光学膜等，以及电气绝缘、半导体和微电子用膜等，都是当前我国急需并得到广泛应用的新材料。目前功能薄膜的生产对外依存度较高，外企赚取了丰厚的利润。我国薄膜产业要取得长足发展，必须全力研发功能薄膜，中高端薄膜制造业是我国薄膜产业未来的发展方向。当前科技发达国家已先后将发展新型薄膜制备技术列入中长期能源开发计划。

2011 年以来，“新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用”焦点核心专利主要产出国家或地区及机构见表 2.2.1 和表 2.2.2，主要国家或

地区及机构间的合作情况见图 2.2.1 和图 2.2.2。其中，从薄膜材料及器件产业专利分布来看，实用型专利主要集中在欧美国家，虽然中国的核心专利数位居全球第三位，但核心专利数、核心专利被引频次和平均被引频次均与排名第一的美国差距较大。其中，公开的核心专利簇数最多的机构基本都集中在美国。而且美国核心专利的被引频次远高于其他国家，这说明美国在该产业的发展中得到了全球科研工作者的认可。我国在该领域的研究起步较晚，尽管我国还没有像西方发达工业国家那样的大强度支持，但对薄膜材料与器件的研究也开始活跃起来，各方面数据显示我们有望在该领域得到长足的进展，在世界上占有一席之地。但是我国在该领域的研究核心机构较弱，仍需要大力的扶持。

2.2.2 石墨烯的制备技术与性能

自 2004 年发现石墨烯以来，人们对石墨烯的科学研究从未中断过。这种具有单原子层厚度的二维结构碳纳米材料，拥有许多独特性能，如量子霍尔效应、室温下较高的载流子迁移率 ($\sim 10\,000\text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$)、较高的比表面积 ($2630\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)、良好的光透过率 ($\sim 97.7\%$)、较高的杨氏模量 ($\sim 1\text{ TPa}$) 和优异的导热性能 ($3000\sim 5000\text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)。这些特性决定了石墨烯在电池、超级电容器、燃料电池、

表 2.2.1 “新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用”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	304	43.18%	5320	50.16%	17.50
2	Japan	165	23.44%	2060	19.42%	12.48
3	China	85	12.07%	1015	9.57%	11.94
4	Korea	71	10.09%	1286	12.12%	18.11
5	The Netherlands	34	4.83%	591	5.57%	17.38
6	Germany	17	2.41%	141	1.33%	8.29
7	Taiwan of China	17	2.41%	205	1.93%	12.06
8	France	7	0.99%	27	0.25%	3.86
9	Belgium	6	0.85%	49	0.46%	8.17
10	UK	4	0.57%	40	0.38%	10.00

表 2.2.2 “新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用”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	Appl Material Ltd.	80	11.36%	1848	17.42%	23.10
2	Samsung	48	6.82%	1014	9.56%	21.13
3	ASM Int Corp	40	5.68%	849	8.00%	21.23
4	Novellus Systems Inc.	39	5.54%	979	9.23%	25.10
5	LAM Res Corp	26	3.69%	385	3.63%	14.81
6	Tokyo Elect Ltd.	26	3.69%	466	4.39%	17.92
7	FUJI Film Corp	15	2.13%	84	0.79%	5.60
8	IBM Corp	11	1.56%	127	1.20%	11.55
9	Konica Minolta Inc.	10	1.42%	119	1.12%	11.90
10	Nitto	9	1.28%	43	0.41%	4.78

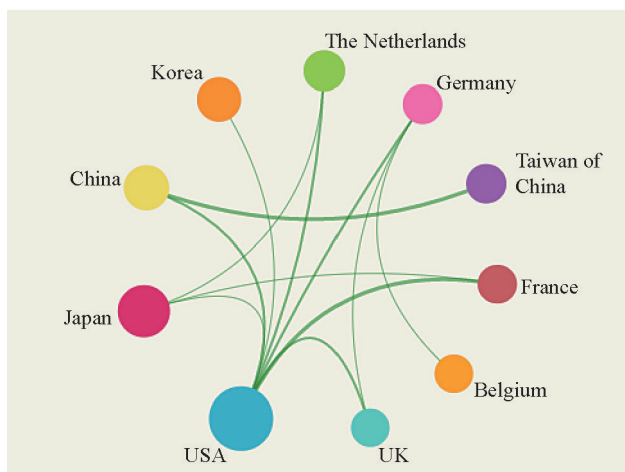


图 2.2.1 “新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

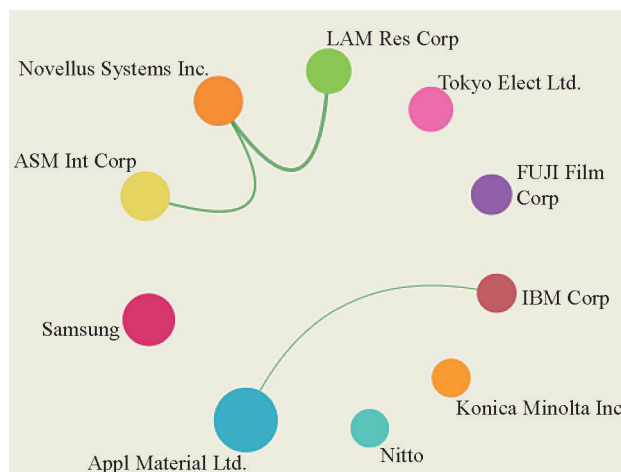


图 2.2.2 “新型薄膜材料与器件的优化设计、制备与集成应用”工程开发焦点主要机构间的合作网络

太阳能光伏设备、光催化、传感器和拉曼增强等方面有着良好的应用前景。石墨烯的研究已经进入快速发展阶段，成为当今新材料中的“明星”材料。为了在新一轮的产业革命中掌握主动和先机，世界各国纷纷将石墨烯材料的制备与应用技术作为国家的长期战略发展方向

但在实际制备中，制得的石墨烯存在易于团聚、无法稳定存在的缺点，导致无法充分发挥其单片层的优异特性。因此，石墨烯的分散技术成为制约其推广应用的关键技术瓶颈。石墨烯的制备方法主要

包括化学氧化还原法、物理剥离法、外延生长法和化学气相沉积法等。机械剥离法能够得到高质量的石墨烯，但也存在产量低、耗时长、难以精确控制石墨烯尺寸等缺点。化学氧化还原法能大量得到单层或少数几层石墨烯，但由于制备过程中，强氧化剂的作用在一定程度上破坏了石墨烯的 sp^2 共轭结构，使得石墨烯某些性能降低。化学气相沉积法和外延生长法可以制备高质量、大面积的石墨烯，但是高成本、复杂的工艺及苛刻的加工条件制约了石墨烯产业的发展。综上所述，高产率、低成本和高

质量的石墨烯的制备依然是一个挑战，这也大大限制了其在化学、储能和催化等方面的应用发展。

(1) 微机械剥离法：2004年，科学家首次成功剥离出单层石墨烯，他们主要利用微机械剥离技术从高定向的热裂解石墨上剥下并进行观测，从而也揭示了石墨烯二维晶体结构能够存在的原因。微机械剥离法目前只能用于实验室小规模制备，虽然制备的石墨烯质量较高，但存在产率低和成本高的缺点，不满足规模化工业生产的需求。

(2) 化学气相沉积法：化学气相沉积法(CVD)是指反应物质在气态条件下发生化学反应，生成固态物质沉积在加热的固态基体表面，进而制得固体材料的工艺技术。CVD首次在规模化制备石墨烯的问题上取得了新的突破，虽然可以实现规模化制备高质量石墨烯，但成本较高，工艺过程复杂。

(3) 氧化还原法：氧化还原法是制备石墨烯的最佳方法，不仅解决了石墨烯不易分散的问题，还可以制备稳定的石墨烯悬浮液。通过强酸和强氧化性物质与石墨反应生成氧化石墨(GO)，再利用超声分散得到氧化石墨烯，在此基础上加入还原剂可以有效去除氧化石墨表面的含氧基团，从而得到单层石墨烯。但是氧化还原法容易带来废液污染，制备的石墨烯存在一定缺陷，因此导致石墨烯部分电学性能的损失，限制了石墨烯的有效应用。

(4) 溶剂剥离法：将少量的石墨分散于溶剂中，利用超声波处理低浓度的分散液，通过破坏石墨层间的范德华力，使得石墨被层层剥离，从而制备得到石墨烯。此方法不会破坏石墨烯的结构，制备得到的石墨烯质量很高，但产率很低。

(5) 溶剂热法：溶剂热法因高温高压封闭体系下可制备高质量石墨烯的特点越来越受到科学家们的关注。溶剂热法解决了规模化制备石墨烯的问题，同时也带来了电导率很低的负面影响。溶剂热法和其他制备方法的结合将成为石墨烯制备的一个亮点。

近年来欧美各国及日本等国家都大力发展本国

石墨烯科研及其应用研究。美国重点关注石墨烯前沿应用，美国国防部高级研究计划署(DARPA)开发了超高速和超低能量应用的石墨烯基射频电路，美国国家自然科学基金会则资助了石墨烯基材料超电容应用项目及石墨烯和碳纳米管材料连续和大规模纳米制造项目。欧盟将石墨烯研究提升至战略高度，将其列为重点扶持的“未来新兴技术旗舰项目”，旨在让石墨烯真正从实验室走向社会，实现从材料生产到零部件再到系统集成的整个价值链全覆盖。英国主要是学院、企业联合研发。2011年，英国的《促进增长的创新与研究战略》明确将石墨烯确定为今后重点发展的4项新兴技术之一，对石墨烯研发和商业化应用研究进行重点支持，力图保持英国在石墨烯领域的领先地位，并使这种材料在未来几十年里从实验室进入生产线并最终走向市场。英国推进石墨烯的商业化进程将主要在英国国家石墨烯研究所(National Graphene Institute, NGI)的主持下进行。德国主攻石墨烯电子机械产品，德国科学基金会(DFG)宣布正式开展了石墨烯新兴前沿研究项目，目标就是提高对石墨烯性能的理解及操控，研发石墨烯基电子的新型产品。韩国组建了包括韩国科学技术院在内的41家研究机构及6家企业的石墨烯联盟，设置了专门扶持基金，重点协助企业实现石墨烯的应用产品与相关技术商业化。日本主要进行多元化方向发展，早在2007年就对石墨烯硅材料/器件的技术开发进行资助，开发先进的辅助开关器件(CGOS)和等离子共振赫兹器件(PRGOS)。随着石墨烯材料制备及其应用研究的不断深入，明星产品石墨烯的产业化序幕也逐渐拉开。

需要说明的是，石墨烯的应用非常广泛，本报告所提供的数据来自“材料领域”专利地图，数据量和所属领域都存在一定局限性。根据这些数据，具体分析如下：2011年以来，“石墨烯的制备技术与性能”焦点核心专利主要产出国家或地区及机构见表2.2.3和表2.2.4，主要国家或地区及机构合

作情况见图 2.2.3 和图 2.2.4。从石墨烯的制备技术产业专利分布来看，主要集中在中国与美国，中国在核心专利簇数上位居全球第一位，这在某种程度上可以说明中国在该产业的发展中位居世界前列。但平均被引频次却不及排名第二的美国，因此，中

国在石墨烯制备技术的开发方面应进一步注重加强基础技术的开发。

通过对石墨烯制备的关键问题的解决，未来石墨烯将有更广泛的应用，石墨烯甚至有望取代硅，一旦晶圆级别的石墨烯薄膜规模化制备取得有效进

表 2.2.3 “石墨烯的制备技术与性能”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	26	60.47%	689	58.34%	26.50
2	USA	9	20.93%	289	24.47%	32.11
3	Korea	3	6.98%	23	1.95%	7.67
4	Germany	2	4.65%	36	3.05%	18.00
5	Japan	1	2.33%	53	4.49%	53.00
6	Portugal	1	2.33%	22	1.86%	22.00
7	Saudi Arabia	1	2.33%	21	1.78%	21.00
8	Taiwan of China	1	2.33%	14	1.19%	14.00

表 2.2.4 “石墨烯的制备技术与性能”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	Chinese Acad Sci	6	13.95%	159	13.46%	26.50
2	Nanotek	4	9.30%	133	11.26%	33.25
3	Univ China Petroleum	2	4.65%	77	6.52%	38.50
4	Nanjing Tech Univ	2	4.65%	38	3.22%	19.00
5	Shanghai Jiao Tong Univ	2	4.65%	53	4.49%	26.50

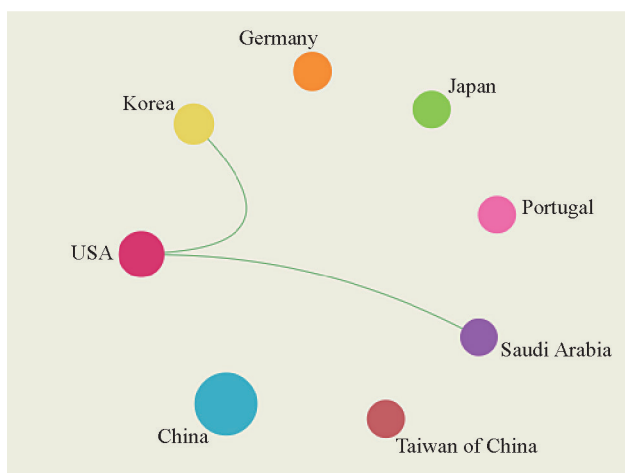


图 2.2.3 “石墨烯的制备技术与性能”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

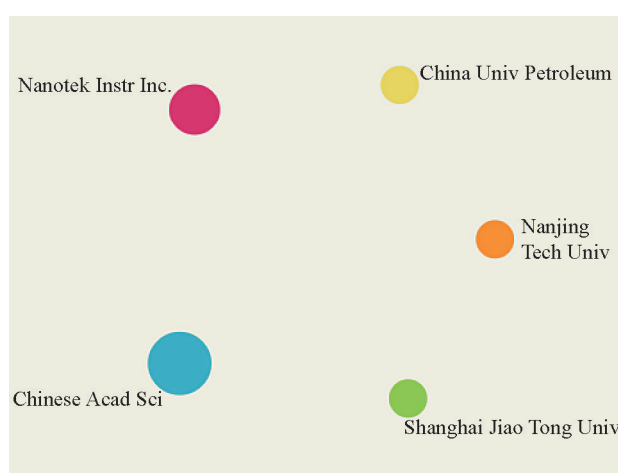


图 2.2.4 “石墨烯的制备技术与性能”工程开发焦点主要机构间的合作网络（涉及机构较多，但机构间合作较稀疏，机构显示不充分）

展，便将成为新一代半导体器件的核心材料，从而为电子信息与半导体技术带来革命。

2.2.3 铝、镁、钛轻金属合金制备及应用

铝、镁、钛轻金属合金制备拟解决的关键技术是如何精确地实现高性能铝、镁、钛轻金属合金在铸造和变形工艺制备中的控性和控形。为此，开发出高强、高韧、耐磨及耐腐蚀的铝、镁、钛镁合金是成功应用的关键。高强合金包括高强铸造合金与高强变形合金，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 500 MPa 以上级别。目前，提高高强轻质合金的韧性是热点之一，通过晶粒细化、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韧性是各国发展的重点。开发高强高韧阻燃镁合金并在航空航天、汽车轻量化领域使用是未来的发展趋势，针对高强高韧轻质合金的耐腐蚀性的提高也是重要议题之一。

镁合金除作为结构材料外，未来的发展趋势是在可降解生物医用镁合金和储氢功能材料方面的应用。可降解生物医用镁合金，由于可避免临床使用

的不锈钢、钛合金等惰性医用金属材料植入后，作为异物长期留存在体内而带来不利影响，成为了近年来的研究热点。其中，生物医用镁合金的研发主要在于对合金的成分及组织进行调控，使合金具有良好的力学、腐蚀降解及生物学“三位一体”的综合性能，以满足临床应用的需要。

2011 年以来，“铝、镁、钛轻金属合金制备及应用”焦点核心专利产出主要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合作情况分别见图 2.2.5 和图 2.2.6。其中，中国位居第一，公开量为 225 件，公开量比例占 78.95%，被引频次为 2479，被引频次比例为 86.8%，平均被引频次为 11.02。日本位居第二，公开量为 29 件，公开量比例占 10.18%，被引频次为 178，被引频次比例为 6.23%，平均被引频次为 6.14。美国位居第三，公开量为 14 件，公开量比例占 4.91%，被引频次为 122，被引频次比例为 4.27%，平均被引频次为 8.71。核心专利主要产出机构中，中国机构占据了 7 家，日本占据 3 家。从上述数据来看，中国在此领域的研究占据了绝对优势，但对于具体的研究方向还需要进一步深入调研。

表 2.2.5 “铝、镁、钛轻金属合金制备及应用”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	225	78.95%	2479	86.80%	11.02
2	Japan	29	10.18%	178	6.23%	6.14
3	USA	14	4.91%	122	4.27%	8.71
4	Korea	6	2.11%	19	0.67%	3.17
5	Germany	3	1.05%	12	0.42%	4.00
6	France	3	1.05%	4	0.14%	1.33
7	Canada	2	0.70%	14	0.49%	7.00
8	Austria	1	0.35%	4	0.14%	4.00
9	Australia	1	0.35%	14	0.49%	14.00
10	Belgium	1	0.35%	9	0.32%	9.00

表 2.2.6 “铝、镁、钛轻金属合金制备及应用”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	OBE Steel Ltd.	9	3.16%	44	1.54%	4.89
2	Furukawa Unic Corp	8	2.81%	57	2.00%	7.13
3	Beijing Non-Ferrous Metal Inst	7	2.46%	117	4.10%	16.71
4	China Aluminium Corp	6	2.11%	88	3.08%	14.67
5	Univ Beijing Sci & Technol	6	2.11%	47	1.65%	7.83
6	Cent South Univ	6	2.11%	61	2.14%	10.17
7	Alcoa	5	1.75%	33	1.16%	6.60
8	Anhui Xinyi Cable Co., Ltd.	5	1.75%	109	3.82%	21.80
9	UACJ Corp	5	1.75%	25	0.88%	5.00
10	Beijing Univ Technol	5	1.75%	59	2.07%	11.80

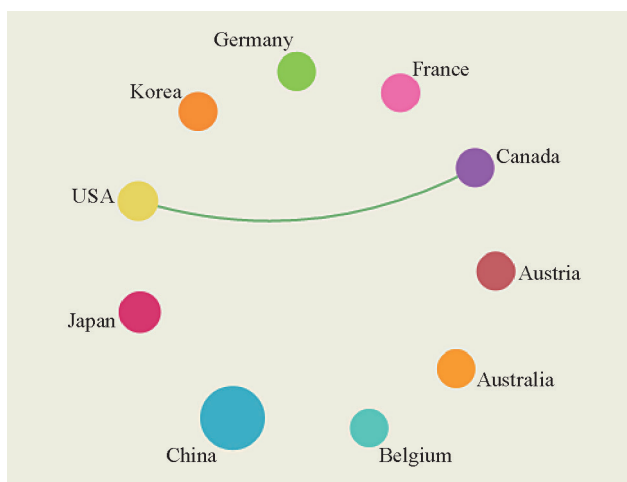


图 2.2.5 “铝、镁、钛轻金属合金制备及应用”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

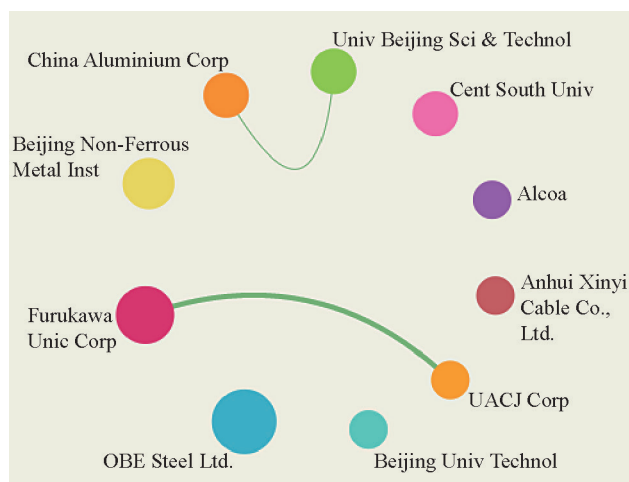


图 2.2.6 “铝、镁、钛轻金属合金制备及应用”工程开发焦点主要机构间的合作网络

项目参与人员

领域课题组人员

领域课题组专家

领域课题组组长：王静康 薛群基

领域课题组副组长：

丁文江 刘中民 毛新平 徐惠彬

其他专家：

邓元 冯亚凯 彭金辉 彭立明 叶茂 周桂峰

工作组成员

工程院化工、冶金与材料工程学部办公室：

刘元昕 王爱红

FCSE 期刊编辑部及合作院校：

程路丽 黄耀东 吴玉娟 许磊 杨祖国

张立 祝薇 朱晓文

报告执笔人员

冯亚凯 黄耀东 姜忠义 吴玉娟 许磊
祝薇 朱晓文

致谢人员

天津大学:

姜浩锡 李祥高 刘成 宋浩 王富民
王建辉 王庆法 尹秋响 杨全红 张雷
张敏华 张香文 周志江

昆明理工大学:

代林晴 韩朝辉 巨少华 李世伟 刘建华

罗浩莹 薛秀珍 张利华

北京航空航天大学:

曹丽莉 冯静静 海丰勋 何大龙 何霞
彭云成 申胜飞

大连化学物理研究所:

曹旭鹏 陈剑 郭鑫 荣倩 童演斯
王静 王全义 解华 徐兆超

上海交通大学:

段华南 蒋海燕 靳丽 李志强 裴佳
郑飞燕

武钢研究院:

汪水泽

华东理工大学:

吉久明