三、化工、冶金与材料工程

1 工程研究前沿

1.1 Top 12 工程研究前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判得到的 Top 12 工程研究前沿的核心论文情况见表 1.1.1 和表 1.1.2。其中，“催化剂表面活性位点精准构筑”“新一代高能量密度动力锂电池正极研究”“绿色能源驱动光 / 电过程高效固氮”和“化学工业大数据的自主推理”是基于数据挖掘而来；其他前沿则是由专家推荐而来。数据挖掘得到的前沿，篇均被引频次相对较高，其中 3 个前沿超过了 150 次。其中，“催化剂表面活性位点精准构筑”和“绿色能源驱动光 / 电过程高效固氮”的核心论文数总体呈现逐年增加的趋势（表 1.1.2）。

（1）高性能超导储能材料研究

随着人类社会能源需求增加及化石能源危机的威胁，可再生能源快速得到发展，特别是在中国政府“双碳”目标牵引下，可再生能源的应用规模与比例势必大幅提升。风电和光伏等可再生能源具有波动性与随机性，无法像传统化石能源那样稳定发电，需要超导储能技术缓解其间歇性带来的负面影响，从而改善电力质量，提升电网稳定性，满足新型电力系统电压和频率快速支撑的需求。目前，超导储能应用的主要形式为超导储能（superconducting magnetic energy storage，SMES）。超导磁储能是唯一可将电能直接存储为电流的技术，原理是利用超导材料绕制成超导线圈，以串、并联相结合的方式做成能量存储单元，利用超导线圈存储电磁能。早期 SMES 采用液氦浸泡冷却的低温超导磁体，复杂昂贵的低温制冷系统极大地限制了该类装置的推广应用。基于高温超导材料的 SMES 可以运行于 20 K（−253.15 ℃）以上温区，制冷系统的运行效率和稳定性大幅提升，使得 SMES 的应用重新获得关注。由于高温超导材料性能偏低、制备成本较高、规模化制备能力不足，导致目前高温超导 SMES 尚

表 1.1.1 化工、冶金与材料工程领域 Top 12 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	高性能超导储能材料研究	92	5 972	64.91	2017.7
2	绿色低碳高炉炼铁技术研究	31	1 416	45.68	2018.4
3	催化剂表面活性位点精准构筑	110	17 290	157.18	2018.3
4	CO_2 捕集用高性能气体分离膜	93	8 349	89.77	2017.3
5	新一代高能量密度动力锂电池正极研究	144	23 395	162.47	2017.5
6	绿色能源驱动光 / 电过程高效固氮	111	23 781	214.24	2018.6
7	化学工业大数据的自主推理	61	4 748	77.84	2018.4
8	复杂极端使役环境的材料实验模拟研究	51	2 176	42.67	2017.5
9	多维梯度超材料的构筑与应用	81	7 997	98.73	2017.5
10	新型植入类生物材料在全生命周期生物适配的研究	97	10 186	105.01	2017.5
11	深海海洋工程用钢铁材料研究	25	763	30.52	2017.7
12	关键金属的超常富集和超纯制备	94	7 831	83.31	2017.7

表 1.1.2　化工、冶金与材料工程领域 Top 12 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	高性能超导储能材料研究	17	28	23	16	7	1
2	绿色低碳高炉炼铁技术研究	5	6	4	8	5	3
3	催化剂表面活性位点精准构筑	14	20	24	29	20	3
4	CO_2 捕集用高性能气体分离膜	31	24	21	12	5	0
5	新一代高能量密度动力锂电池正极研究	39	40	36	21	6	2
6	绿色能源驱动光 / 电过程高效固氮	1	16	29	50	14	1
7	化学工业大数据的自主推理	6	6	19	17	12	1
8	复杂极端使役环境的材料实验模拟研究	14	16	7	8	5	1
9	多维梯度超材料的构筑与应用	22	18	23	13	4	1
10	新型植入类生物材料在全生命周期生物适配的研究	27	25	21	16	5	3
11	深海海洋工程用钢铁材料研究	6	4	9	4	2	0
12	关键金属的超常富集和超纯制备	20	28	18	20	6	2

未突破 10 MJ 级的实用化门槛，未能获得大规模工业应用。高性能超导储能材料要获得发展，未来需要解决以下问题：提升超导材料在高场条件下的载流能力、机械与电磁性能；实现高性能高温超导材料的批量化制备；突破高温超导电缆的成缆关键技术，实现高温超导缆线的批量化制备，为储能超导磁体批量制备奠定材料基础。

（2）绿色低碳高炉炼铁技术研究

高炉炼铁–转炉炼钢（blast furnace-basic oxygen furnace，BF-BOF）流程工艺成熟，是现代钢铁生产的主要形式。高炉炼铁工序是钢铁制造流程中资源和能源消耗的大户，其碳排放量约占整个钢铁制造过程的 66%。在全球积极推进碳减排和碳中和的背景下，探索研究基于高炉的绿色低碳炼铁技术成为世界各国钢铁企业技术研究的重要方向，如日本钢铁企业的 COURSE50 氢还原炼铁研究、德国蒂森克虏伯公司的高炉喷吹氢气试验、中国宝武钢铁集团有限公司（以下简称“中国宝武”）的富氢碳循环高炉技术研究等。探索和开发绿色低碳高炉炼铁技术，实施减量化发展战略，控制合理的产能规模，是现在和未来高炉炼铁技术生存与发展的基础。目前，国内外的研究探索主要集中在以下几个方面：开发新型低碳造块工艺优化炉料结构，持续推进高风温、富氧喷煤、炉顶煤气循环 / 喷吹、高富氧冶炼、高炉长寿命、全流程智能化等关键共性技术研究，降低铁前工序和炼铁全流程的碳素消耗与污染物排放；探索研究氢冶金，碳捕获、利用与封存（carbon capture，utilization and storage，CCUS）等前沿技术，开展高炉喷吹天然气、焦炉煤气、氢气等富氢或纯氢气体试验研究，实现以氢代替碳，推进高炉炼铁过程废气二氧化碳 CCUS 技术研究，实现高炉炼铁近零碳排放。

（3）催化剂表面活性位点精准构筑

在人类面临的能源问题和社会发展需求的双重驱动下，科学技术需要逐渐走向精准化。精准的本质是选择性，在催化领域，目标产物原子经济性的精准合成是未来的发展方向。利用催化剂可以有效降低化学合成能耗，但目前催化剂的开发却存在一定程度的盲目性和偶然性。通过精准构筑催化剂的表面活性位点，可实现对于催化反应效率的精准调控。目前对于催化剂表面活性位点的精准构筑研究主要集中在以下几个方面：精确调控反应环境使催化剂表面结构发生演变；利用反应过程中反应物或中间产物等诱导催化剂表面发生重构；利用自组装

等手段原位构筑催化剂表面活性位点。在未来，想要实现精准构筑催化剂表面活性位点，首先需要精确地观测和识别催化剂结构，发展原位实验技术，注重学科交叉；在此基础上，深化理解构效关系，优化实际操作与反应活性的相关性，切实达到提升反应效率的目标；此外，还需要注重精准构筑活性位点的智能化，借助机器学习等手段加速精确构筑效率，实现理性设计；在操作方法上，应注重原位构筑和调控催化剂表面活性位点，使合成过程也实现精准化。

（4）CO_2 捕集用高性能气体分离膜

高效 CO_2 分离是碳捕集与能源气体纯化的共性关键技术，可为“双碳”目标的实现做出重要贡献。与传统吸收法 CO_2 分离相比，膜分离法具有无溶剂挥发、占地面积小、适用于各种处理规模等优点，应用前景广阔。目前碳捕集膜技术链条中的各个阶段尚有很多科学问题待深化研究。该方向的研究主要集中于以下几方面。① 高性能膜材料及分离膜研究。深入研究膜材料与分离膜间的构效关系，通过多功能基团与多重选择机制协同作用，从分子层次设计高性能 CO_2 分离膜材料，进而综合调控多层次膜结构，制备出高通量、高分离因子的 CO_2 分离膜。② 无缺陷分离膜规模化制备。在现有基础上进一步优化制膜工艺、提高制膜设备精度，工业规模制备出符合技术经济性的高性能无缺陷 CO_2 分离膜。③ 高性能膜组件设计。通过探明组件复杂流道内的流体力学状态和传质行为，开发低浓差极化、低压力降、高装填密度的高性能膜组件制备技术。④ 针对不同应用场景开展大规模示范。根据不同领域气源特点和捕集要求，探明复杂膜分离系统多因素耦合影响规律，亟须开发高效、节能的大型膜分离系统集成工艺和成套装备构建技术。

（5）新一代高能量密度动力锂电池正极研究

随着新能源汽车行业的快速发展，开发兼具高能量密度、高功率、长寿命、低成本的动力电池成为新能源汽车行业的必然选择。在锂电池正极材料方面，现有的氧化物正极材料受限于其较低的理论容量，无法满足未来动力电池的性能要求，为了获得更高的能量密度，需发展具有更高容量的正极材料。目前，下一代动力电池正极研发主要集中于高电压钴酸锂、高镍三元（镍钴锰酸锂、镍钴铝酸锂）和富锂锰基等高单位容量正极材料上。对于高电压钴酸锂材料，需通过多元素掺杂技术突破钴酸锂脱嵌锂的电压上限，提升钴酸锂的放电能量与循环稳定性；对于高镍三元材料，通常通过元素掺杂、表面包覆、晶面优化（单晶）等协同手段，提升高镍三元正极材料（镍含量大于或等于 0.8）的比容量和循环稳定性；对于富锂锰基材料，则需要深入探测其充放电过程机理，通过元素掺杂、晶型优化（O_2 或 O_3）、表面包覆、浓度梯度设计等协同手段，抑制充电时氧气释放和过渡金属位点迁移，保证高比容量和长寿命。在解决上述问题的同时，还需解决相关材料的稳定性、材料与电解质界面稳定性等问题。同时，由于新型正极材料的充电截止电压已超过传统液态电解质电压窗口的上限，还需要现有电解质的改性或逐步过渡到固态电解质上。

（6）绿色能源驱动光 / 电过程高效固氮

光 / 电化学过程高效固氮是一种采用可再生能源驱动氮还原合成氨的绿色工艺，反应原料为 H_2O 和 N_2。氨在现代农业中起着重要作用，因具有可压缩性、高能量密度和零碳排放的特点，其有潜力成为未来能源格局中的中心分子。光催化和电催化产生高能电子，可以预活化 N_2，极大地降低活化能，实现在温和条件下氨的高效合成，具有重要的科学意义和实用价值。然而，由于 N_2 分子具有较高的键能和较弱的配位能力，使得 N_2 在催化剂表面的化学吸附非常困难，这极大地限制了固氮效率。当前研究主要集中在：提高催化剂的本征活性，促进 N_2 在催化剂表面的吸附，打破电子分布的对称性，削弱 N≡N 键，增强质子亲和力。目前研究了多种催化剂设计策略（如界面控制、表面工程和化学修饰），用于优化光 / 电催化剂的本征反应活性。尽

管取得了显著的进展和成果，但是光 / 电化学固氮的效率低和机理不明确仍然是阻碍其发展的主要障碍。为加快该领域的发展，需要在以下方面进行更多的研究，以进一步突破光 / 电催化的应用瓶颈：不同反应体系高效催化材料的理性设计和可控合成，实现优异的催化性能；研究与开发光 / 电催化固氮反应体系原位表征手段，以捕获和监测实际反应过程中间物种变化状态和催化结构的演变；对不同反应体系中反应器进行合理设计和结构优化，提升反应效率。

（7）化学工业大数据的自主推理

在“双碳”目标的要求下，化工行业的绿色低碳发展势在必行。数字化和智能化发展将是传统化工厂快速实现碳减排和提升经济效益的有效途径，其核心在于对工业生产过程产生的大数据进行挖掘。目前，欧美国家和中国均制定了对应的发展战略规划。《中国制造 2025》中指出，要将信息化与工业深度融合作为化工行业发展的重点，明确了工业大数据的战略地位。但如何从高维、高噪声的化学工业大数据中挖掘出有效信息，即自主推理出隐含决定工业复杂系统行为的动态机制，是学界亟须解决的一个关键问题。一方面需要开发新的数据驱动算法，对不同工艺变量的时空动态特性进行建模，完成变量间的因果推断，进而确定信息传递机制，构建隐藏反应网络；另一方面，需要将已知的反应机理知识和专家经验融合到数据驱动模型中，开发出可解释且鲁棒性的模型，最终实现工业大数据自主推理，为工业系统的自主优化和决策奠定基础。

（8）复杂极端使役环境的材料实验模拟研究

在诸如核反应堆、航空发动机、武器装备等复杂极端使役环境中，对于材料组织结构演变和物性表现很难进行准确观测，材料研究及选用是一个很大的挑战。一是极端环境下实时原位观测很难实施，二是无法在实验室中再现这些极端环境。仅凭实验研究开发复杂极端使役环境用材料难度很大，因此针对材料这些使役环境进行实验模拟是解决该难题的有效方法。目前，针对复杂极端使役环境中材料微结构与物性演变的材料实验模拟研究引起了较多的关注。该方向的研究主要集中于以下几个方面。① 材料的中子辐照与氢氦损伤效应。在裂变堆中，主要是针对堆芯结构件、核燃料、核废料处理过程中由于中子辐照引发的材料组织结构演变和损伤等问题进行研究；在聚变堆中，主要是针对第一壁、偏滤器由于中子辐照和氢氦效应引发的材料组织结构演变与损伤问题进行研究。研究内容主要包括材料组织结构演变、损伤的高通量跨尺度计算、数据的汇集与数据库的建立等。② 冲击载荷下的材料高应变率效应。主要包括武器装备所用各类材料在动载高应变率下的本构关系、强塑性、断裂失效，与组织演变、材料相变耦合相关的高通量跨尺度计算，以及相关数据的汇集与数据库的建立等。③ 材料的高温超重力效应。主要通过高通量跨尺度计算模拟评估，例如航空发动机处于高温、高速旋转状态时，高温与超重力协同作用下的材料疲劳及蠕变特性，收集相关数据并建立数据库等。④ 极低温、强磁场、超高压下材料的凝聚态物理规律。通过高通量跨尺度计算分析研究不同极端条件下材料可能发生的变化，揭示这些条件下材料展示出的新聚态物理规律，为相关新材料研发打下基础。

（9）多维梯度超材料的构筑与应用

梯度超材料是一种具有特定几何形状的基本单元空间梯度排列而构成的新型人工复合结构或复合材料，呈现出天然材料所不具备的超常物理性质。这不仅与构成材料的本征特性相关，更取决于结构单元的空间组合排列。这种新型人工复合结构材料可实现对光、声、电磁和热的灵活调控。多维度梯度的组合以及相关超材料的设计构筑可产生更复杂的功能，如在上述空间梯度超材料的基础上引入频率梯度可获得新的自由度，实现对电磁波束更有力的柔性操纵，可有效应用于智能蒙皮、雷达天线、

电子对抗等领域。目前，多维梯度超材料的研究聚焦在介质超材料中梯度结构和性能的耦合作用、高阶的光学非线性理论、超宽带完美吸波材料（如电磁黑洞）等。未来将进一步实现全波段和多维度控制，完善新型梯度超材料的理论模型构建、结构设计及性能优化策略，突破新型、大规模、高精度的超材料制造技术，并大力推动多维梯度超材料的应用和产业化发展。

（10）新型植入类生物材料在全生命周期生物适配的研究

生物适配是在生物安全和生物相容的基础上，对生物材料更高层次的要求和更全面的理论诠释。其内涵是，当材料植入体内后，在满足生物安全性和相容性的基础上，主动适应和作用人体不同组织、不同器官、不同部位的生理环境（组织学、力学、化学等环境），促进病损组织与器官的有效修复，或恢复、重建其生理功能。生物适配主要包括组织适配、降解适配和力学适配 3 个方面，其未来发展趋势是精准生物适配，强调材料的力学、降解行为应在时间和空间维度上与组织修复生理过程精准适配，提出对植入材料全生命周期的适配要求。生物适配理论指导下设计的新型生物材料其主要特点包括智能化、精准化、生命化和多功能化。

（11）深海海洋工程用钢铁材料研究

在海洋的开发由近到远、由浅到深、由洋到极的过程中，海洋工程装备材料性能研究至关重要。钢铁作为海洋工程装备的关键性结构材料，广泛应用于海洋平台、海洋能源设备以及海底管道等。海洋工程用钢主要种类可分为海洋油气开发装备、舰船用钢、桥梁基础设施用钢、海洋特殊装备（包括深潜器、海水淡化、深海资源勘探）用钢等。由于海洋环境的复杂性和特殊性，海洋工程用钢普遍要求大厚规格、高强度、高韧性、高服役安全性，以及易加工和易焊接性能。随着深海科研和极地海空探索的快速发展，亟须解决性能稳定、规格尺寸、适应极端服役环境等关键问题。690 MPa 以上级别的超高强度、耐 −60 ℃及以下低温的高韧性、大厚度海洋平台用钢将是今后研发的重点。未来主要发展趋势包括：① 开发高强度、高韧性的海洋平台用钢，适应低温环境要求并大幅降低平台的建造和安装成本；② 研发低成本高附加值产品，降低 Ni、Mo 等贵重合金元素的添加，满足未来深海和极地海洋平台对超高强钢安全性能的需求；③ 开发低屈强比的海洋平台钢，确保塑性失效前有足够的延展性来防止发生灾难性的脆性断裂；④ 提高钢材的止裂性能，防止结构件断裂事故的发生。

（12）关键金属的超常富集和超纯制备

关键金属是基于国际政治与国家战略提出的新概念，意指用于新能源、电子信息等高技术产业，国家安全保障风险突出，须采取特殊措施保障的稀有稀贵金属基础原材料。关键金属多为稀有稀散元素，且以共伴生或类质同象赋存，因而冶金提取反应必须千倍、万倍“超常富集”。而关键金属的应用领域又往往以 ppm（10^{-6}）级杂质的高纯金属或化合物为基础，使得“超纯制备”成为冶金领域的研究前沿。区别于传统大宗金属冶金的三高一强（高温、高压、高浓度、强烈搅拌）过程，关键金属冶金的特点要求“强选择性”，往往是一个从原料端 ppm 级元素稀有分散状态，到产出 ppm 级杂质含量的冶金产品的过程。由化学过程的“反应性 – 选择性原理”可知，只有在弱的冶金反应性体系中，才能实现关键金属的高选择性富集和分离。关键金属冶金的核心问题主要包括：关键金属元素稀有稀散赋存与超常富集机制，元素相似性及其选择性分离动力学，以及关键金属纯化杂质迁移行为与过程调控。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 高性能超导储能材料研究

超导磁储能是目前唯一能够将电能直接存储为电流的技术，可将电能以直流电流的形式存储于超

导磁体，几乎实现了电流零损耗。超导磁储能功率密度高，可达 500~2 000 W/kg，典型的额定功率为 1~10 MW，储能效率高（97% 以上），响应速度快（μs 级）。储能技术发展较为缓慢，主要受限于超导材料和实现低温强磁场系统的成本过高。目前，具备实用化价值的 SMES 用高温超导材料主要包括 MgB_2、Bi 系（Bi-2223 和 Bi-2212）、YBCO（钇钡铜氧）等。高温超导材料经过近 40 年的发展，目前以 Bi 系线带材和 YBCO 涂层导体等为代表的实用化超导材料已经开始进入产业化阶段，并开始应用于电力、交通、大科学装置等领域，近年来成为新材料领域的研究热点。美国、欧盟和日本等国家和地区相继开展了大规模研究和示范应用计划，投入了大量的人力物力，取得了很好的研究成果。未来面向超导磁储能应用的材料需求，开展高温超导材料和缆线关键技术研究与开发和大规模生产势在必行。

近年来，“高性能超导储能材料研究”工程研究前沿的核心论文主要产出国家及机构分别见表 1.2.1 和表 1.2.2。核心论文主要产出国家中，中国位居第一，核心论文 41 篇，占比达 44.57%，远高于美国、英国、日本等国家。核心论文主要产出机构中，中国科学院位居第一，巴斯大学和华中科技大学次之。主要国家及机构间的合作情况分别见

表 1.2.1　“高性能超导储能材料研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	41	44.57	2 828	68.98	2017.7
2	美国	18	19.57	1 848	102.67	2017.8
3	印度	13	14.13	539	41.46	2017.8
4	英国	10	10.87	647	64.70	2017.3
5	日本	8	8.70	617	77.12	2017.2
6	澳大利亚	6	6.52	430	71.67	2018.7
7	德国	4	4.35	201	50.25	2018.8
8	埃及	4	4.35	156	39.00	2017.8
9	法国	4	4.35	151	37.75	2018.2
10	新加坡	3	3.26	180	60.00	2018.3

表 1.2.2　“高性能超导储能材料研究”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	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	9	9.78	549	61.00	2017.4
2	巴斯大学	8	8.70	449	56.12	2017.1
3	华中科技大学	7	7.61	350	50.00	2018.3
4	北京大学	6	6.52	390	65.00	2017.3
5	四川大学	6	6.52	170	28.33	2018.0
6	武汉大学	5	5.43	474	94.80	2017.6
7	马里兰大学	4	4.35	432	108.00	2018.5
8	北京理工大学	4	4.35	275	68.75	2019.0
9	清华大学	4	4.35	231	57.75	2019.0
10	印度国立技术学院	4	4.35	192	48.00	2017.8

图 1.2.1 和图 1.2.2。中国与美国的合作较多，中国 – 英国、美国 – 日本也有密切合作。机构之间的合作在国家内部更为紧密，如中国科学院与北京大学、华中科技大学与武汉大学之间的合作。由表 1.2.3 可知，施引核心论文数前三名的国家分别是中国、美国和印度，其中，中国施引核心论文比例达到 44.21%，说明中国学者对该前沿的研究动态保持密切的关注。施引核心论文的主要产出机构多为中国机构，包括中国科学院、吉林大学、清华大学等（表 1.2.4）。

超导磁储能系统利用超导线圈存储电磁能，具有响应速度快和有功、无功灵活可调等优点。由于高温超导材料性能偏低、制备成本较高，导致目前高温超导 SMES 尚未突破 10 MJ 级的实用化门槛。存在的主要问题包括：① 高温超导材料应用需要有较低的交流损耗、较好的热力学和磁学稳定性；② 批量化制备的高温超导材料的超导性能水平和批次稳定性距离实际应用还有一定提升空间；③ 高温超导线材的长度和制备规模比较小，满足不了应用单位的需求，影响了超导材料应用的发展；④ 目前高温超导材料的价格还是比较高，导致超导材料应用的领域比较少，没有开展一定规模的应用示范。因此，未来必须突破高性能 MgB_2、Bi 系和 YBCO 材料的批量化制备技术难题，这不

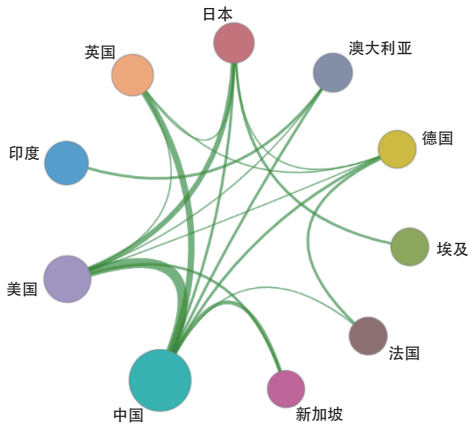

图 1.2.1 “高性能超导储能材料研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

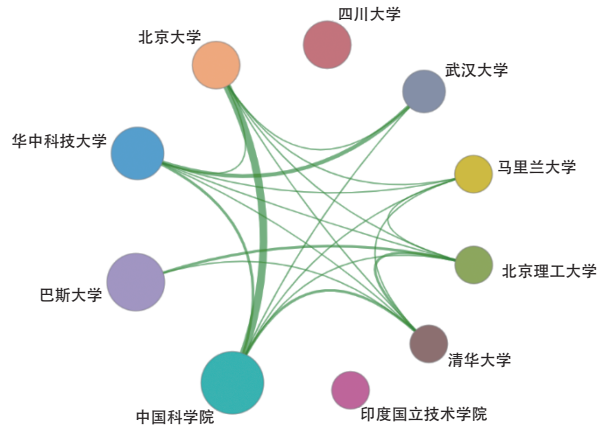

图 1.2.2 “高性能超导储能材料研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “高性能超导储能材料研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	2 453	44.21	2019.9
2	美国	873	15.73	2019.6
3	印度	515	9.28	2020.0
4	英国	298	5.37	2019.7
5	德国	267	4.81	2019.9
6	澳大利亚	251	4.52	2020.0
7	日本	220	3.96	2019.7
8	韩国	206	3.71	2020.0
9	伊朗	166	2.99	2020.1
10	加拿大	152	2.74	2019.8

仅能极大地促进 SMES 技术的发展，也能为高场 MRI、核磁共振、磁约束核聚变、粒子加速器等重大装备的研制提供核心材料保障。建议从以下几方面开展工作：① MgB_2 和 Bi 系超导线材陶瓷粉末 / 金属多芯复合体均匀塑性变形控制方法，突破超导线材的高压热处理技术；② YBCO 长带涂层结构优化等技术研究，提升超导带材高磁场条件下的综合性能；③ 高温超导缆线成缆技术研究，实现批量化制备。“高性能超导储能材料研究”工程研究前沿的发展路线见图 1.2.3。

1.2.2　绿色低碳高炉炼铁技术研究

高炉炼铁技术的本质是铁的还原过程，即煤炭作燃料和还原剂，在高温下将铁矿石或含铁原料的铁，从氧化物或矿物状态还原为液态生铁。现代高炉炼铁技术经过近 200 年的发展，技术相对成熟，生产成本较低，是目前炼铁生产的主要方法，其产量占世界生铁总产量的 91% 以上。中国作为世界上最大的钢铁生产国和消费国，钢铁制造流程中高炉 + 转炉的“长流程”工艺结构占主导地位，2021 年高炉生铁产量达到 8.69 亿 t，电炉粗钢产量仅占约 10%。

高炉炼铁工序是钢铁制造流程中资源和能源消耗的大户，目前钢铁行业的二氧化碳排放量约占全球二氧化碳排放总量的 7%，钢铁制造过程中约 66% 的碳排放来自高炉炼铁过程。在全球积极推进碳减

表 1.2.4　“高性能超导储能材料研究”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	中国科学院	318	27.94	2019.6
2	吉林大学	116	10.19	2019.8
3	清华大学	112	9.84	2019.7
4	北京大学	100	8.79	2019.4
5	天津大学	90	7.91	2020.2
6	华中科技大学	89	7.82	2019.7
7	南洋理工大学	64	5.62	2019.5
8	劳伦斯伯克利国家实验室	63	5.54	2019.0
9	湖南大学	63	5.54	2020.1
10	中国科技大学	62	5.45	2019.6

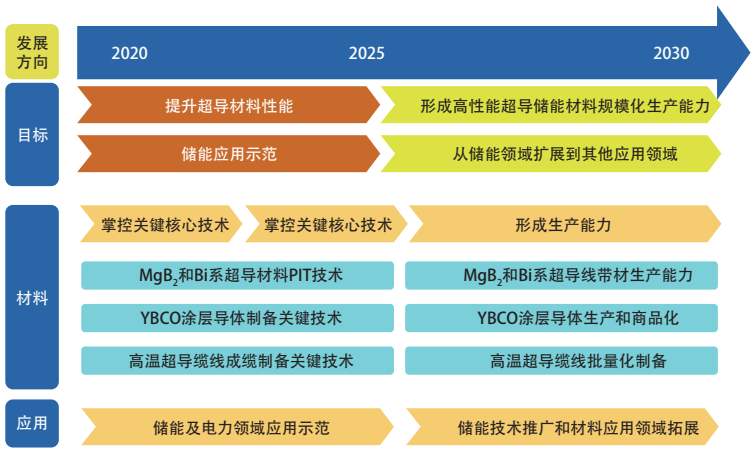

图 1.2.3　“高性能超导储能材料研究”工程研究前沿的发展路线

排和碳中和的背景下，实现高炉炼铁的绿色低碳发展是中国和全球钢铁工业面临的重要挑战。当前全球主要钢铁企业都提出了低碳发展战略目标和技术路线，绿色低碳高炉炼铁技术成为各企业探索研发的重要技术方向。日本钢铁企业正在开展的减少二氧化碳排放的 COURSE50 氢还原炼铁项目，计划在 2030 年实现第一座高炉的氢还原制铁技术实用化，在 2050 年实现该技术在日本全国高炉中的普及。德国蒂森克虏伯公司 2019 年开展了高炉喷吹氢气试验，使用氢气代替煤炭，以减少二氧化碳的排放。中国宝武 2020 年在新疆八一钢铁股份有限公司探索低碳冶金新工艺，开展富氢碳循环高炉技术研究，进行超高富氧乃至全氧高炉的工业化生产试验。

2016 年以来，“绿色低碳高炉炼铁技术研究”工程研究前沿核心论文的主要产出国家及机构分别见表 1.2.5 和表 1.2.6，主要国家及机构间的合作情况分别见图 1.2.4 和图 1.2.5，施引核心论文的主要产出国家及机构分别见表 1.2.7 和表 1.2.8。该领域核心论文主要产出国家前四名分别为中国、马来西亚、英国和法国。其中，中国产出核心论文占比为 41.94%，遥遥领先于其他国家。马来西亚和孟加拉国之间的合作最多，其他国家之间也开展了广泛的合作。施引核心论文产生最多的国家是中国，施引核心论文比例达到 44.66%。英国以施引核心论文

表 1.2.5　“绿色低碳高炉炼铁技术研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	13	41.94	483	37.15	2019.0
2	马来西亚	5	16.13	230	46.00	2017.8
3	英国	4	12.90	186	46.50	2018.8
4	法国	3	9.68	118	39.33	2017.3
5	瑞典	2	6.45	203	101.50	2017.5
6	孟加拉国	2	6.45	124	62.00	2016.0
7	沙特阿拉伯	2	6.45	81	40.50	2021.0
8	美国	2	6.45	78	39.00	2020.5
9	芬兰	2	6.45	73	36.50	2019.5
10	澳大利亚	2	6.45	65	32.50	2019.0

表 1.2.6　“绿色低碳高炉炼铁技术研究”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	篇均被引频次	平均出版年
1	马来亚大学	3	9.68	156	52.00	2016.3
2	洛林大学	3	9.68	118	39.33	2017.3
3	国油科技大学	2	6.45	77	38.50	2019.0
4	北京科技大学	2	6.45	77	38.50	2018.5
5	清华大学	2	6.45	69	34.50	2019.5
6	麦考瑞大学	2	6.45	65	32.50	2019.0
7	四川大学	2	6.45	64	32.00	2019.5
8	埃及中央冶金研发院	1	3.23	158	158.00	2016.0
9	瑞典国家冶金研究院	1	3.23	158	158.00	2016.0
10	伊斯兰科技大学	1	3.23	95	95.00	2016.0

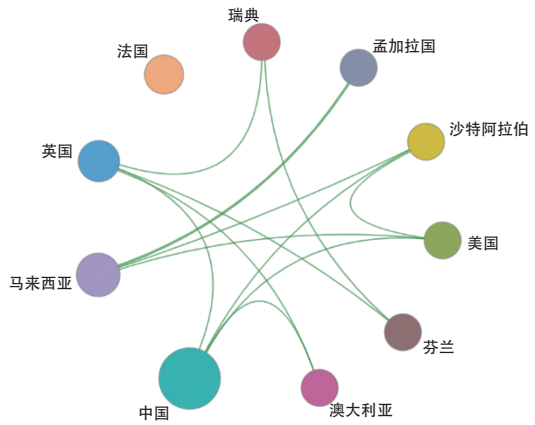

图 1.2.4　“绿色低碳高炉炼铁技术研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

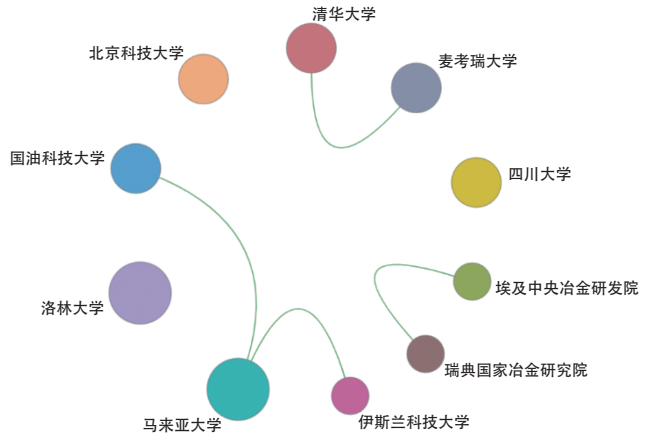

图 1.2.5　“绿色低碳高炉炼铁技术研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7　“绿色低碳高炉炼铁技术研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	523	44.66	2020.2
2	英国	99	8.45	2020.1
3	德国	76	6.49	2019.9
4	美国	76	6.49	2020.4
5	澳大利亚	75	6.40	2020.2
6	瑞典	58	4.95	2019.9
7	韩国	56	4.78	2020.0
8	加拿大	55	4.70	2020.5
9	印度	55	4.70	2020.6
10	马来西亚	50	4.27	2020.4

表 1.2.8　“绿色低碳高炉炼铁技术研究”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	北京科技大学	74	21.14	2020.3
2	东北大学	56	16.00	2020.2
3	重庆大学	37	10.57	2020.8
4	中国科学院	34	9.71	2019.8
5	四川大学	24	6.86	2020.0
6	山东大学	24	6.86	2020.2
7	萨塔姆·本·阿卜杜勒阿齐兹王子大学	22	6.29	2021.0
8	亚琛工业大学	20	5.71	2019.8
9	清华大学	20	5.71	2020.2
10	远东联邦大学	20	5.71	2021.0

比例 8.45% 排在第二位，德国、美国、澳大利亚的施引核心论文比例分别为 6.49%、6.49% 和 6.40%。中国的核心论文数和施引核心论文数均排名第一，说明中国学者对该前沿的研究处于领先地位，对该前沿的动态保持密切的关注和跟踪。施引核心论文产出最多的国内机构是北京科技大学，施引核心论文比例达到 21.14%；其次是东北大学、重庆大学，施引核心论文比例均超过 10%。

未来高炉炼铁技术面临着直接还原、熔融还原等非高炉炼铁技术的竞争，同时也受到钢铁需求逐步减少，电炉废钢冶炼增加以及“碳达峰、碳中和”目标等的挑战。但是考虑到全球铁矿石、废钢等资源供给现状，在可预见的未来，高炉炼铁仍将是最主要的炼铁工艺。探索和开发绿色低碳高炉炼铁技术，实施减量化发展战略，控制合理的产能规模，是现在和未来高炉炼铁技术生存和发展的基础。当前及未来绿色低碳高炉炼铁技术发展方向主要包括碳素资源优化、能源效率提升和前沿技术突破等方面，主要研究技术包括：① 采用高效低碳造块工艺优化炉料结构，降低铁前工序和炼铁全流程的碳素消耗与污染物排放；② 持续推进高风温、富氧喷煤、炉顶煤气循环 / 喷吹、高富氧冶炼等关键共性技术研究，进一步降低高炉碳素燃料消耗；③ 开展生物质碳 / 煤粉混合喷吹技术、高炉喷吹天然气、焦炉煤气、氢气等富氢或纯氢气体试验研究，实现以氢代替碳；④ 在高炉强化冶炼条件下，开展高炉长寿技术研究，进一步延长高炉的使用寿命；⑤ 以高炉生产长期稳定顺行为基础，开展高炉炼铁系统全流程智能化研究；⑥ 开展高炉炼铁过程废气二氧化碳 CCUS 技术研究。“绿色低碳高炉技术炼铁研究”工程研究前沿的发展路线见图 1.2.6。

1.2.3 催化剂表面活性位点精准构筑

催化剂通过降低反应活化能使反应效率得以提升，从而降低输入能量生成所需的目标产物，这在能源问题日益严重并成为制约社会发展瓶颈的当下具有重要作用。但一直以来，催化剂的设计与开发主要通过试错或偶然的方法进行，需耗

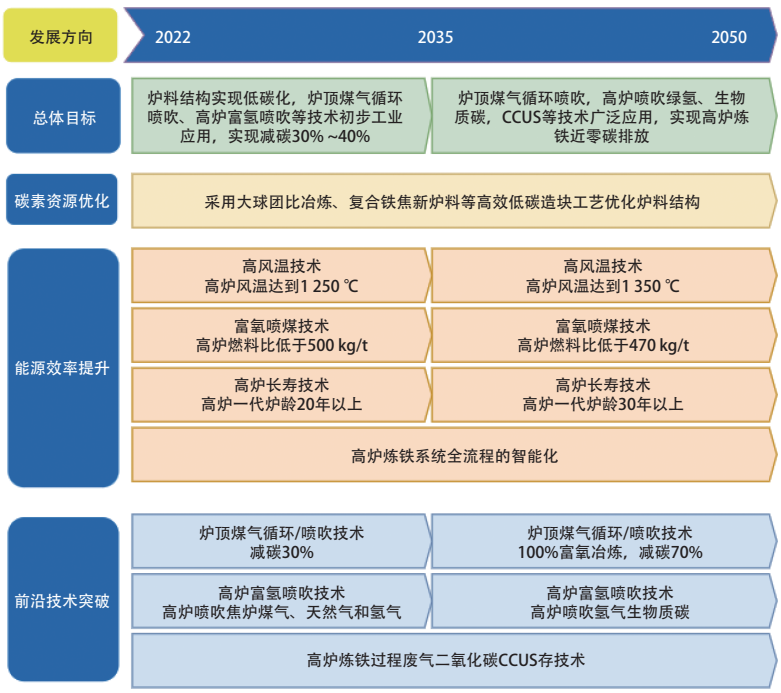

图 1.2.6 “绿色低碳高炉炼铁技术研究”工程研究前沿的发展路线

费巨大的人力、物力和资源。随着人类对化学合成认识的不断深入，研究如何通过精准构筑催化剂的表面活性位点而实现催化剂的高效理性设计具有重要意义。人类对于催化剂表面活性位点的认识由从物质、分子、原子到电子尺度逐渐发展，且主要集中于活性位点的静态结构。然而在真实反应条件下，催化剂表面的活性位点会随周围反应环境的变化而发生剧烈的动态演变，处于一种动态平衡中。因此，催化剂表面活性位点的精准构筑关键在于结合实验和模拟手段，精确地识别、测量和调控真实反应条件下的催化剂表面活性位点。鉴于催化剂表面活性位点与周围反应环境密切相关，最为直接构筑活性位点的方法为调控温度、压力等反应环境，以及借助反应物、活化气氛、中间体和产物等在反应过程中涉及的各种物质与催化剂表面的相互诱导作用来构筑反应活性位点。此外，利用自组装等策略也可以实现催化剂表面活性位点的原位精准构筑。

近年来，“催化剂表面活性位点精准构筑”研究前沿中核心论文的主要产出国家及机构分别见表 1.2.9 和表 1.2.10。其中，核心论文的主要产出国家中，中国占较大优势，论文比例为 86.36%，远高于美国和澳大利亚；中国科学院以 22 篇核心论文位居主要产出机构第一。主要国家及机构间的合作情况分别见图 1.2.7 和图 1.2.8。对于国家之间的合作，中国和美国的合作关系最多，和澳大利亚的合

表 1.2.9　“催化剂表面活性位点精准构筑”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	95	86.36	15 316	161.22	2018.3
2	美国	20	18.18	3 818	190.90	2017.8
3	澳大利亚	12	10.91	1 815	151.25	2018.2
4	日本	7	6.36	1 924	274.86	2018.0
5	德国	4	3.64	504	126.00	2017.5
6	新加坡	3	2.73	562	187.33	2018.7
7	加拿大	2	1.82	833	416.50	2018.0
8	沙特阿拉伯	2	1.82	215	107.50	2019.5
9	波兰	2	1.82	136	68.00	2016.5
10	瑞典	2	1.82	133	66.50	2017.5

表 1.2.10　“催化剂表面活性位点精准构筑”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	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	22	20.00	4 064	184.73	2017.9
2	中国科技大学	6	5.45	2 076	346.00	2017.7
3	天津大学	6	5.45	1 592	265.33	2018.3
4	苏州大学	6	5.45	618	103.00	2018.8
5	清华大学	5	4.55	1 777	355.40	2018.0
6	武汉科技大学	5	4.55	1 293	258.60	2018.6
7	北京化工大学	5	4.55	632	126.40	2019.2
8	阿贡国家实验室	5	4.55	570	114.00	2017.6
9	复旦大学	5	4.55	545	109.00	2019.2
10	西安交通大学	4	3.64	1 117	279.25	2018.0

作次之。对于机构之间的合作，中国科学院和中国科技大学之间的合作较为紧密。从论文的施引情况来看，中国施引核心论文数排名第一（表 1.2.11），占比高达 67.12%，说明中国学者对该领域的密切关注。中国机构中，施引核心论文产出最多的是中国科学院，占 34.32%，其次是中国科技大学和天津大学（表 1.2.12）。

到目前为止，有关催化剂表面活性位点精准构筑的研究仍有限，一方面受限于原位实验表征技术和多尺度模拟方法的发展，另外该研究方向涉及催化、材料和物理等多个学科的交叉领域，不同学科间的壁垒也亟须打破，促进学科融合。未来的研究需要首先集中于模型反应体系的催化剂，能够清楚揭示真实反应条件下催化剂表面活性位点后，再把研究目标放在真实复杂反应体系中，实现可控和精准合成催化剂，提升反应系统的催化效率。技术方面，首先实现精准测量和识别催化剂表面活性位点，进一步瞄准构效关系，实现催化反应的精准调控。研究过程中，不仅需要充分利用原位表征技术，借助多尺度模拟方法也有助于从本质上揭示催化剂表面活性位点结构和演变机制，而机器学习等方法可提供智能化方面的支持。最后，催化剂表面活性位点的精准构筑需要注重在反应过程中的原位合成方法，提高活性位点精准构筑程度和效率。“催化剂表面活性位点精准构筑”工程研究前沿的发展路线见图 1.2.9。

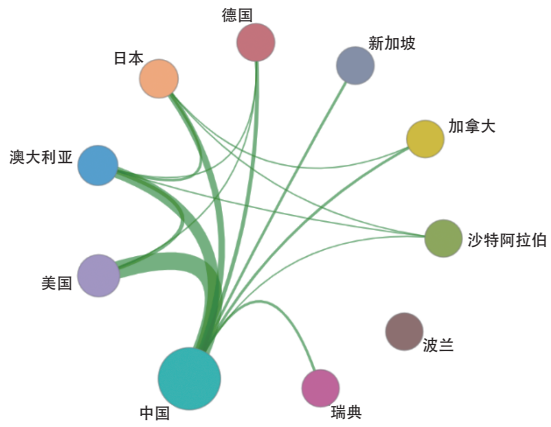

图 1.2.7 “催化剂表面活性位点精准构筑”工程研究前沿主要国家间的合作网络

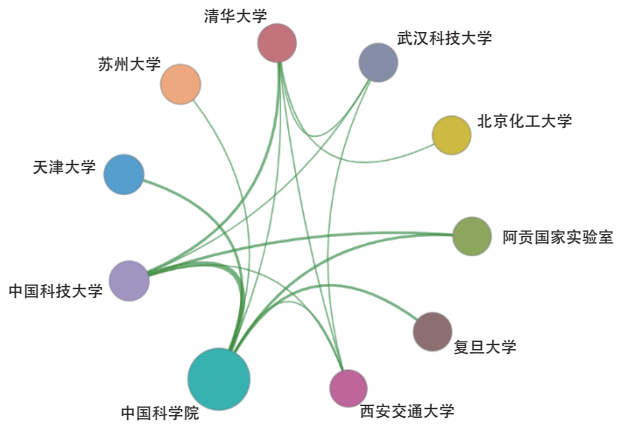

图 1.2.8 “催化剂表面活性位点精准构筑”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “催化剂表面活性位点精准构筑”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	11 566	67.12	2020.0
2	美国	1 495	8.68	2019.7
3	澳大利亚	736	4.27	2020.0
4	韩国	704	4.09	2020.0
5	印度	626	3.63	2020.1
6	日本	414	2.40	2019.9
7	德国	383	2.22	2020.1
8	新加坡	376	2.18	2019.8
9	英国	335	1.94	2020.1
10	加拿大	305	1.77	2020.1

表 1.2.12　“催化剂表面活性位点精准构筑”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	中国科学院	1 710	34.32	2020.0
2	中国科技大学	473	9.49	2019.9
3	天津大学	403	8.09	2020.0
4	郑州大学	383	7.69	2020.2
5	清华大学	375	7.53	2019.9
6	北京化工大学	317	6.36	2019.9
7	吉林大学	284	5.70	2020.0
8	浙江大学	281	5.64	2019.8
9	青岛科技大学	261	5.24	2020.0
10	华南理工大学	248	4.98	2019.7

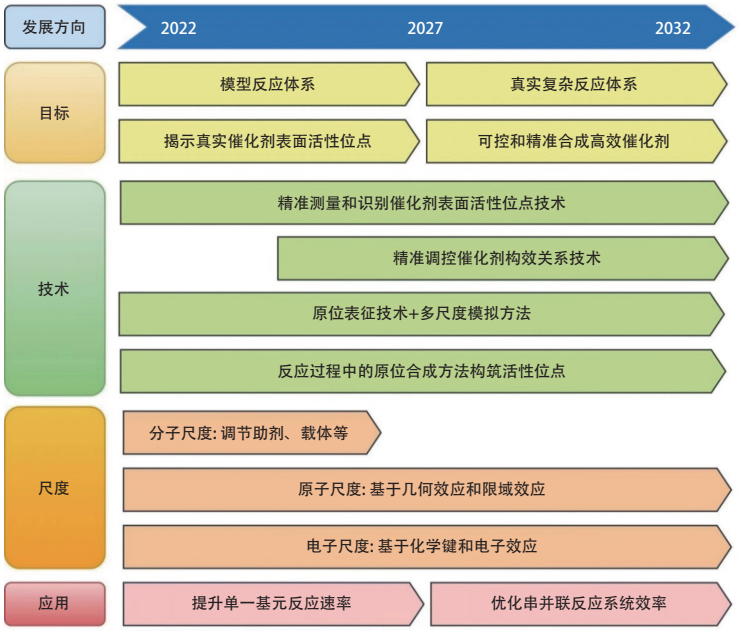

图 1.2.9　“催化剂表面活性位点精准构筑”工程研究前沿的发展路线

2　工程开发前沿

2.1　Top 10 工程开发前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判得到的 Top 10 工程开发前沿见表 2.1.1。除了与能源和环境相关的研究或技术开发一直占据“前沿”的重要地位，与“柔性”相关的材料或器件在今年的前沿中也比较突出，包括了“新一代柔性显示玻璃材料与技术开发”和“柔性显示器件关键制备技术及应用”。2022 年入选的开发前沿，核心专利逐年公开量整体呈现增长趋势，尤其是“精细化学品与原料药连续制造过程”和“新一代柔性显示玻璃材料与技术开发”的增长速度较快（表 2.1.2）。

表 2.1.1　化工、冶金与材料工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	极端环境超高温结构陶瓷基复合材料研发与应用	308	631	2.05	2019.4
2	大型复杂炼化工厂智能制造技术	553	939	1.70	2019.0
3	退役动力电池的短流程再生利用技术	942	2 188	2.32	2019.4
4	废弃塑料绿色回收和再利用	888	930	1.05	2019.0
5	电网级大规模熔盐储能技术	428	534	1.25	2019.1
6	精细化学品与原料药连续制造过程	905	574	0.63	2019.4
7	钢铁流程 CO_2 回收循环利用技术	388	486	1.25	2018.8
8	先进核岛关键装备用钢开发与应用	138	289	2.09	2018.8
9	新一代柔性显示玻璃材料与技术开发	613	882	1.44	2019.5
10	柔性显示器件关键制备技术及应用	1 015	5 234	5.16	2018.7

表 2.1.2　化工、冶金与材料工程领域领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	极端环境超高温结构陶瓷基复合材料研发与应用	15	25	50	58	67	93
2	大型复杂炼化工厂智能制造技术	59	78	80	88	105	143
3	退役动力电池的短流程再生利用技术	50	69	136	184	243	260
4	废弃塑料绿色回收和再利用	72	111	176	168	150	211
5	电网级大规模熔盐储能技术	44	63	54	54	86	127
6	精细化学品与原料药连续制造过程	50	80	146	112	208	309
7	钢铁流程 CO_2 回收循环利用技术	47	60	73	45	60	103
8	先进核岛关键装备用钢开发与应用	13	24	20	29	20	32
9	新一代柔性显示玻璃材料与技术开发	43	61	58	90	126	235
10	柔性显示器件关键制备技术及应用	135	157	161	188	180	194

（1）极端环境超高温结构陶瓷基复合材料研发与应用

超高温陶瓷基复合材料是由纤维、界面和超高温陶瓷基体组成的多元结构，具有耐高温、抗氧化烧蚀、高强度等优异性能，同时表现出类似金属的非脆性断裂特征，应用可靠性高，是国际公认的适用于极端高温、力 – 热耦合服役环境的新型轻质结构材料，受到世界各国高度关注。针对超高温陶瓷基复合材料的研究始于 21 世纪初，历经近 20 年的发展，在材料制备和致密化行为、性能评价和氧化烧蚀机制以及应用技术开发等方面均取得了长足的进展，作为热结构 / 热防护材料已经逐步进入工程应用阶段。应用需求增大和愈加苛刻的服役环境对超高温陶瓷基复合材料技术提出了新的要求。在进一步明晰材料使役行为的基础上，设计开发低成本、短周期、规模化超高温陶瓷基复合材料制备新技术，研制耐极端高温（>2 500 ℃）、近零烧蚀、长时可重复使用的超高温陶瓷基复合材料，发展具有超高熔点的超高温陶瓷纤维及其复合材料，以及解决超高温陶瓷基复合材料规模化工程应用技术是重要发展方向。随着国际新型高速飞行器技术的发展和推进，高性能超高温陶瓷基复合材料及其构件在未来

几年内将呈现批量化需求趋势。

（2）大型复杂炼化工厂智能制造技术

炼化工厂智能制造技术主要借助自动化技术、通信技术、人工智能技术以及现代管理技术，从底层感知、全流程优化控制、顶层智慧决策等多角度，提升炼化企业产品质量、生产效率和经济社会效益。近年来，随着大数据、人工智能、5G通信等新一代信息技术的发展，炼化工厂智能化迎来新的发展契机。如何利用智能制造技术，解决长期以来制约炼化行业发展的高能耗、高碳排、高污染等问题，提升炼化工厂运维能力，推进炼化企业绿色可持续发展成为国内外研究的前沿课题。当前，炼化工厂智能制造技术前沿方向包括：复杂物料属性智能识别与实时感知；多场多相反应过程构效认知与模拟技术；开放环境下的全流程协同优化技术；安全风险智能管控技术；碳足迹溯源、监控与协同减碳技术。

（3）退役动力电池的短流程再生利用技术

随着新能源行业的快速发展，锂离子电池退役潮所引发的资源和环境问题在世界范围内受到广泛关注。退役动力电池结构复杂，成分多变，赋存多种高品位关键有价金属。传统的湿法冶金工艺流程长、能耗高、污染重、提取率低，无法适用于新型动力电池废料。如何针对退役电池种类的多样化、结构的复杂化、组成的差异化，发展以“短程”“高效”与“清洁”为核心的变革性退役电池再生利用新技术，实现短流程资源化利用，对于世界各国都有着至关重要的意义，也将为未来更复杂多样的新型新能源电池的再生利用提供借鉴意义。中国退役动力电池的资源化利用起步较早，在基础研究和工业应用方面发展较快，产业化规模大，处于世界引领地位。未来退役动力电池的短流程再生利用的研究重点应关注在基础理论创新、技术研发突破和数据平台建设3个方面。具体来看：首先，构建退役动力电池再生利用全产业链低碳、绿色、高效循环利用创新研究理论体系；其次，持续开发退役动力电池短程、安全、低碳循环利用关键技术，实现正负极材料短程再生；最后，构建全产业链碳足迹分析和再生利用过程系统评价方法，开发基于大数据的全过程物质代谢数据信息平台。

（4）废弃塑料绿色回收和再利用

近年来，伴随着世界经济的快速发展，全球塑料产量也呈指数级增长，现已达到每年约4亿t。而由于固有的难降解性或不可降解性，绝大多数商品塑料正在环境中积累并会永久地污染环境。因此，有效地处置废弃塑料意义重大。目前，世界上废弃塑料的处置方法主要是焚烧、填埋与回收。焚烧与填埋可以快速地处理掉大部分塑料废弃物，但通常会造成二次污染。回收不仅不会造成二次污染，还可实现废弃塑料的资源化再利用，因此备受关注。然而，传统塑料回收技术常存在实施温度高、选择性低、产品性能降级等问题，所以其工业化应用受限。未来，废弃塑料回收技术的发展主要聚焦于以下几个方面：从原料要求苛刻的机械回收向原料适应性广的化学回收发展；从高温热化学回收向高选择性的低温催化化学回收发展；从降级回收向保级甚至是升级回收发展；从间歇式小规模回收向连续化大规模回收发展。

（5）电网级大规模熔盐储能技术

随着世界各国能源转型的不断深入，以光伏与风电为代表的可再生能源在能源供应中的占比不断提高。在一些欧洲国家，可再生电力在电网中的占比已经接近或超过50%。这些波动性和间歇性的可再生电力的大量接入，需要电网级（GW·h级）大规模储能技术的支持来降低弃风弃光和电网瘫痪风险，提高新能源系统的经济性和安全性。熔盐储能是一种显热储热技术，利用无机盐材料在高温熔融状态下升温或降温过程中的温差来实现热能存储。作为目前全球装机储能总量仅次于抽水蓄能的熔盐储能，有不受地域限制、储能成本低、安全可靠等优点，在光热发电站（concentrated solar power，CSP）中已实现超过50 GW·h的装机

量。但目前大规模商业化的熔融硝酸盐（主要是$NaNO_3$-KNO_3混合盐）技术因为高温热分解的问题，最高运行温度限制在565 ℃左右，而且硝酸盐材料价格受肥料市场的影响不稳定。熔盐储能技术未来发展主要聚焦在以下两个方面。① 下一代氯盐熔盐储能技术。相对于目前商业化的硝酸盐技术，氯盐有更低的材料成本且资源丰富、更高的运行温度（最高可到800 ℃以上），与先进的动力循环系统（如超临界二氧化碳循环）结合，可将热电效率提高到55%以上，从而大大降低电站发电成本，如光热发电站。② 基于熔盐技术的电网级储电系统（如卡诺电池）。研究以熔盐储热技术为核心，结合熔盐电加热技术（或高温热泵技术）和先进动力循环系统技术，开发储电效率高（超过70%）、储电成本低（与抽水蓄能相当）且不受地域限制的卡诺电池技术。

（6）精细化学品与原料药连续制造过程

随着人民生活质量的逐步提高，对精细化学品与原料药的需求量显著增大，且对产品质量提出了更高的要求。制造连续化、多单元操作间耦合设计是实现高效、高质量生产的必然途径。当前，美国、英国、欧洲等均提出了各自的连续制造发展路线，深度布局精细化学品与原料药连续制造过程开发应用，并朝小型化、集成化、智能化不断迈进。近年来，中国也在不断推进连续制造过程转型发展，大力开展精细化学品与原料药集成过程技术开发，在电子级化学品ppm级纯化、小分子原料药连续结晶、集成过程智能化设计等连续制造关键技术开发上取得了一定进展，但仍面临制造过程稳定性差、设计准确性低等问题。未来精细化学品与原料药连续制造过程的开发和应用一方面需从过程控制入手，重点采用集成优化控制开展全流程、全生命周期的工艺流程和产品质量优化；另一方面需结合先进的人工智能手段，使精细化学品与原料药连续制造朝着数字化和智能化方向发展，最终实现从原料到商业产品的高度集成化、连续化、智能化的精细化学品与原料药连续制造过程的系统性应用。

（7）钢铁流程CO_2回收循环利用技术

钢铁工业作为能源消耗大户，直接对应巨量CO_2产出，但因缺少有效CO_2利用途径，只能任其排放。2021年，中国钢铁工业CO_2排放近18亿t，约占全国总排放量的16%。目前，世界各国积极推进钢铁工业CO_2循环利用前沿技术的开发，涉及钢铁–化工联产等方向。近年来，中国在不断探索和开发钢铁流程CO_2资源化利用技术方面走在了世界前列，在CO_2资源化用于转炉炼钢、电炉炼钢等关键工艺技术开发方面取得了重要进展，建成了“工业尾气→CO_2回收→炼钢转化→CO高质利用”示范产线，但仍存在一些技术瓶颈尚待突破。钢铁流程CO_2回收循环利用技术未来发展主要聚焦在以下三个方面：① 低成本、高效CO_2回收技术，开发适合钢铁工业烟气特性的CO_2回收技术和吸附剂，进一步降低CO_2回收的能源消耗和成本，并提高CO_2回收效率；② 钢铁流程CO_2资源化利用技术，将CO_2作为资源功能型介质拓展应用至钢铁冶金全流程，采用CO_2替代或协同其他气体共同完成生产任务，包括不锈钢冶炼、真空精炼、高炉炼铁等；③ 钢铁流程CO_2跨领域协同处理技术，回收钢铁工业烟气中CO_2应用于化工、农业等行业，开发钢铁–化工联产、钢铁–农业碳汇等降碳技术。

（8）先进核岛关键装备用钢开发与应用

核岛用钢是核电站的核心关键部位用钢，也是技术要求最高的部分，按照材质来分，主要包括碳钢、低合金钢、不锈钢、特殊钢、部分镍基合金、钛合金、锆合金等，其形状有板、管、丝、棒、带、铸件等。反应堆压力容器、蒸汽发生器等核岛主设备长期在高温、高压或辐照环境下服役，要求主设备的壳体材料具有良好的抗疲劳性能和强韧匹配性，足够的抗中子辐照脆化能力，以确保核电厂的长期安全、可靠运行。随着第四代核能技术的快速发展，对核电用钢尤其是核岛用钢提出了新的要求。

未来先进核岛关键装备用钢开发与应用主要技术方向包括：① 核岛结构材料开发，包括核用特种合金、核用材料制备技术及工艺等；② 核岛用钢的损伤机制研究，包括核岛用钢的应力腐蚀、腐蚀疲劳、流动加速腐蚀、辐照损伤与腐蚀的交互作用等；③ 核岛用钢部件的安全性能研究，包括安全评价和寿命预测、延寿方法等。

（9）新一代柔性显示玻璃材料与技术开发

近年来，柔性显示技术已成为显示领域的重要发展方向，柔性玻璃等关键原材料是制约产业发展的重要环节。柔性显示玻璃材料是指厚度小于 100 μm，可弯曲、可折叠的玻璃新材料，具有硬度高、耐高温、化学稳定好等优点，广泛应用于手机、车载、可穿戴设备、VR 显示等领域，是显示领域技术竞争的焦点。目前，柔性显示玻璃主要采用“两步法”制程：先用浮法、下拉等规模化工艺制备 100~200 μm 的玻璃原片；再将玻璃原片减薄至 70 μm 以下供终端使用。未来，柔性显示玻璃材料的技术发展方向主要包括以下四个方向：① 薄型化，通过开发一次成型工艺，量产 30~70 μm 的柔性玻璃，大幅度提升柔性玻璃质量，以满足高清显示需求；② 高强化，通过玻璃本体结构调控、表面复合增强等新技术的应用提升玻璃强度，以满足复杂、严苛的服役环境需求；③ 大尺寸化，不断扩大柔性显示玻璃尺寸，以满足柔性笔记本电脑、卷曲电视、3D 商显等大型柔性终端的发展需求；④ 精密化，通过飞秒激光切割、卷对卷工艺等新方法，推动玻璃制造流程工艺变革。

（10）柔性显示器件关制备技术及应用

新一代信息技术的快速发展对作为信息窗口的显示器件提出了轻薄、省电、可折叠卷曲、大尺寸等要求，由柔软基板、中间显示介质、封装层组成的柔性显示器件在弯折、扭曲、拉伸或卷绕下能有效保持原有显示功能，成为未来显示技术发展的必然选择。当前显示产业中多种技术竞相发展，如液晶显示（liquid crystal display，LCD）、有机发光二极管（organic light-emitting diode，OLED）显示、量子点（quantum dot，QD）显示、发光二极管（light emitting diode，LED）显示、电子纸（E-paper）显示、三维（3D）显示、激光显示（laser display）等。面向万物互联信息化发展中的柔性需求，印刷显示、微米发光二极管（micro-LED）显示、光场显示等成为新一代显示技术的代表。在市场化和大规模应用中，柔性显示器件瞄准未来超低能耗、超轻薄、多维度可变形的发展需求，不断聚焦关键材料和器件集成技术的突破，实现装备到整体制造技术的升级换代。伴随着柔性显示技术的快速发展和人机交互的深度拓展，柔性显示器件锚定在显示、通信和交互的多功能智能化道路上，与柔性传感器和柔性电路等进一步关联融合，共同系统化推进柔性智能显示模组新框架的构建。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　极端环境超高温结构陶瓷基复合材料研发与应用

21 世纪初，国际上首次报道将超高温陶瓷与纤维复合，设计和制造超高温陶瓷基复合材料的理念。随后，这一研究方向逐渐成为继碳化硅陶瓷基复合材料后高温结构材料领域的研究热点，各国的科研人员均对超高温陶瓷基复合材料开展了广泛研究。中国关于超高温陶瓷基复合材料的研究报道始于 2007—2008 年，在国际上属于最早开展该类材料研究的国家之一。由于超高温陶瓷基复合材料保持了超高温陶瓷的耐高温、高强度、抗氧化、抗烧蚀等优异性能，同时又具有非脆性断裂特征，有效避免了陶瓷材料的灾难性破坏，被视为适用于（超）高温、力 – 热耦合极端服役环境的理想材料，作为固体火箭发动机和新型高速飞行器热结构 / 热防护材料发挥着不可替代的作用，目前已经成为国际尖端材料，具有战略性工程应用价值。

早期关于超高温陶瓷基复合材料的研究主要集

中在材料的制备工艺、组元设计与优化和抗氧化烧蚀机理研究。美国 Ultramet 公司研发的反应熔渗超高温陶瓷基复合材料技术处于国际领先地位，先后采用反应熔渗（reactive melt infiltration，RMI）工艺成功制备了高性能 Cf/Zr(Hf)C、Cf/Zr(Hf)-SiC 等超高温陶瓷基复合材料及构件。其研制的超高温陶瓷基复合材料燃烧室经多次热试车（试车温度高达 2 399 ℃），燃烧室内壁仍保持完好。针对常规 RMI 方法制备超高温陶瓷基复合材料存在纤维 / 界面损伤、大尺寸金属残留等问题，中国科学院上海硅酸盐研究所的科研人员开发了基于溶胶 – 凝胶结构调控的超高温陶瓷基复合材料反应熔渗新路线，通过界面结构的调控，开发出高性能、低成本超高温陶瓷基复合材料技术。

关于超高温陶瓷基复合材料在工程应用方面，由于该类材料主要应用于新型高速飞行器热防护热结构，涉及领域比较敏感，国际上相关报道非常有限。意大利航空航天研究中心首次报道于 2011 年开展了连续纤维增强超高温陶瓷基复合材料的风洞试验，并于 2013 年对超高温陶瓷基复合材料构件进行了飞行试验，但未见后续报道。中国在超高温陶瓷基复合材料领域的研究起步较早，在前期完成材料设计并探明材料高温氧化烧蚀失效关键作用机制的基础上，近年来先后对超高温陶瓷基复合材料及相关构件进行了多次环境模拟验证，并装机试飞成功。各类构件的成功应用，表明上述超高温陶瓷基复合材料及相关制备技术可满足不同极端环境的使用需求，也标志着中国在超高温热防护领域取得了重大突破。总体来看，中国在超高温陶瓷基复合材料 / 构件关键制造技术与环境模拟技术方面已形成特色，在连续纤维增强陶瓷基复合材料的整体技术方面已跻身国际前列，并在一些重点工程中获得应用。

表 2.2.1 列出了“极端环境超高温结构陶瓷基复合材料研发与应用”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家。可以看出，主要产出国家以亚洲国家居多，其中中国的专利公开量和被引用的比例远远高于其他国家和地区。各主要产出国家间尚无合作。从表 2.2.2 来看，中国航天部门的研究机构高度重视极端服役环境超高温陶瓷基复合材料的研发，以航天特种材料及工艺技术研究所为代表，公开了大量的专利。从主要产出机构间的合作来看，仅中国科学院金属研究与苏州图纳新材料科技有限公司有合作（图 2.2.1）。这也从侧面说明超高温陶瓷基复合材料的重要地位，国际对相关技术实施封锁，抢占先机。

表 2.2.1　“极端环境超高温结构陶瓷基复合材料研发与应用”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	271	87.99	586	92.87	2.16
2	美国	16	5.19	26	4.12	1.62
3	韩国	7	2.27	1	0.16	0.14
4	俄罗斯	3	0.97	2	0.32	0.67
5	印度	3	0.97	0	0.00	0.00
6	法国	1	0.32	6	0.95	6.00
7	德国	1	0.32	5	0.79	5.00
8	英国	1	0.32	2	0.32	2.00
9	波兰	1	0.32	2	0.32	2.00
10	日本	1	0.32	1	0.16	1.00

表 2.2.2　“极端环境超高温结构陶瓷基复合材料研发与应用”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	航天特种材料及工艺技术研究所	33	10.71	84	13.31	2.55
2	西北工业大学	19	6.17	19	3.01	1.00
3	中国科学院金属研究所	15	4.87	53	8.40	3.53
4	中南大学	13	4.22	75	11.89	5.77
5	哈尔滨工业大学	9	2.92	26	4.12	2.89
6	广东工业大学	8	2.60	60	9.51	7.50
7	中国科学院上海硅酸盐研究所	8	2.60	27	4.28	3.38
8	中国人民解放军国防科技大学	8	2.60	12	1.90	1.50
9	中国建筑材料科学研究总院	6	1.95	9	1.43	1.50
10	苏州图纳新材料科技有限公司	4	1.30	17	2.69	4.25

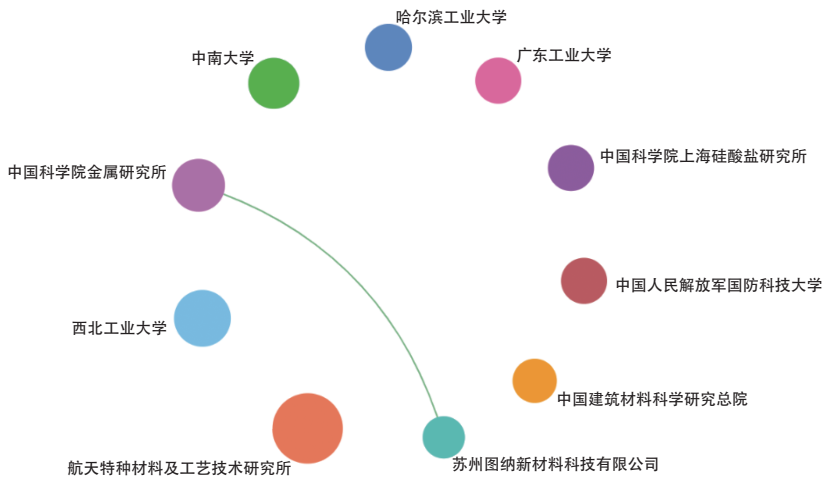

图 2.2.1　“极端环境超高温结构陶瓷基复合材料研发与应用”工程开发前沿主要机构间的合作网络

超高温陶瓷基复合材料以其优异的超高温性能，在固体火箭发动机和新型高速飞行器热防护结构中展现出良好的应用前景。采用多种工艺相结合研制的超高温陶瓷基复合材料及热结构件，目前基本能够满足现有高速飞行器的使用要求。但针对规模化工程应用，依然存在以下问题：① 超高温陶瓷基复合材料制备周期长、成本高；② 耐温极限一般在 2 200~2 500 ℃，难以满足更高温度条件的使用需求；③ 尚未形成批量制造能力等。因此，低成本、短周期、规模化超高温陶瓷基复合材料制备新技术，耐极端高温（>2 500 ℃）、近零烧蚀、长时可重复使用的超高温陶瓷基复合材料，具有超高熔点的超高温陶瓷纤维及其复合材料，以及超高温陶瓷基复合材料规模化工程应用技术是未来重要发展方向（图 2.2.2）。

2.2.2　大型复杂炼化工厂智能制造技术

炼化行业以化石能源为主，产业结构重型化，普遍存在生产规模大、链条长、时空跨度大、生产要素多、能耗高、碳排放大等问题，亟须通过智能制造技术来解决信息孤岛问题，建立多层次全流程的有效协同，提升智能工厂运维能力，推进炼化企

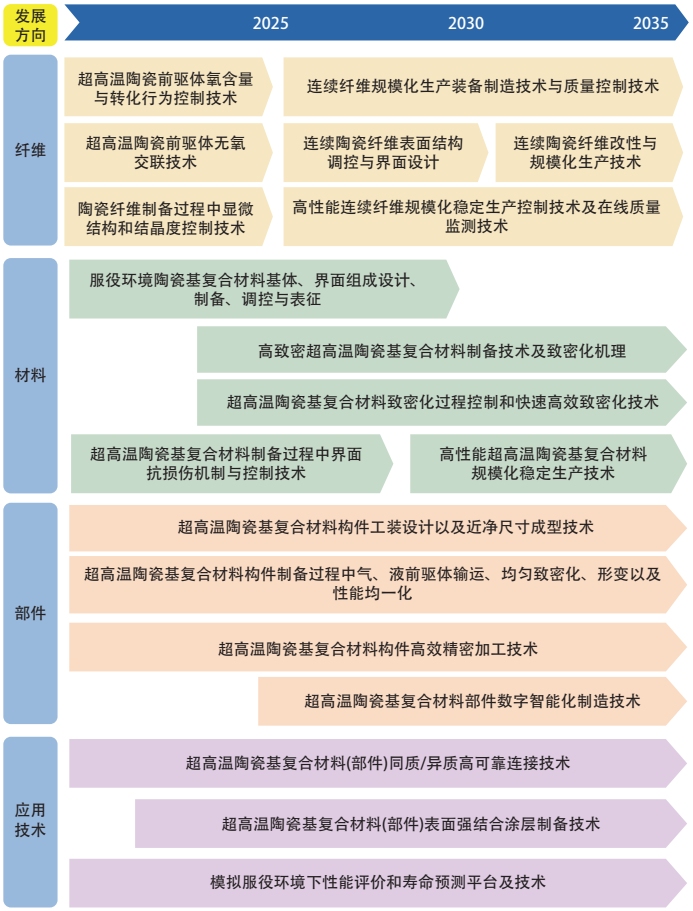

图 2.2.2　“极端环境超高温结构陶瓷基复合材料研发与应用”工程开发前沿的发展路线

业绿色可持续发展。近年来，随着大数据、人工智能、5G 通信等新一代信息技术的发展，德国、美国、日本等发达国家先后提出了“工业 4.0”“先进制造业国家战略计划”等智能制造发展战略。中国目前处于制造业数字化转型的关键时期，在“制造强国”“新一代人工智能发展规划”等重大国家战略的支持下，中国的炼化工业以转型升级、提质增效、节能环保为主线，正在从局部、粗放的生产模式向全流程、精细化的生产模式发展。

当前，在炼化工厂智能制造领域亟须发展的前沿方向主要有以下五个方面。① 复杂物料属性智能识别与实时感知技术：针对炼化过程原料组分复杂、待测性质多等问题，以多相态单分子属性为基础，结合基团贡献、最大熵等经典物理化学原理和大规模多目标智能优化方法与技术，研究炼化过程中关键反应物质的分子结构识别、物料分子结构及组成实时感知方法；研究原料成分、产品质量的在线检测方法和技术，为过程建模、在线优化控制与计划调度提供技术支撑。② 多场多相反应过程构效认知与模拟技术：针对炼化过程原料组分多、反应过程机理复杂等问题，面向催化、重整、加氢裂化等典型反应，基于机器学习技术，结合第一性原理，从分子水平上研究反应机理与规则，构建分子反应网络，建立动力学方程。以此为基础，构建耦合反应、流动和能量传递的装置、反应器、反应过程多尺度动态模拟技术。③ 开放环境下的全流程协同优化技术：针对炼化行业市场需求、原料价格和品质等具有较强不确定性，以及多装置强耦合等问题，基于

鲁棒优化及自适应优化策略，面向装置运行效率、能耗、安全环保等指标，研究开放环境下全流程协同优化方法，实现资源 / 能源的优化配置。④ 安全风险智能管控技术：针对炼化生产中涉及多种易燃、易爆、高风险反应物，环保安全风险高、难度大等问题，开展基于情景的生产风险动态评估技术，建立多源异构工艺数据与异常工况处置运行知识的融合方法与系统框架，开发大数据驱动的设备、仪表可靠性分析方法，知识图谱驱动的异常工况因果分析，深度学习和规则融合驱动的作业风险分析等多种工具，提升现场作业异常分析与风险管理能力，避免重特大事故的发生。⑤ 碳足迹溯源、监控与协同减碳技术：针对炼化行业能耗高、碳排基数大等问题，研究重大耗能设备的生产能耗与碳排放感知技术，建立开放环境下生产过程能耗与碳排放的智能预测方法，开展大数据驱动的全产业链碳足迹溯源与监控研究，形成能够综合效益 – 质量 – 碳排等指标的生产过程全流程协同减碳技术，为实现生产过程智能低碳高效运行奠定理论与技术基础。

在“大型复杂炼化工厂智能制造技术”领域，目前中国公开发表的核心专利数已处世界领先地位（表 2.2.3），多数专利来自中国石油化工股份有限公司、中国石油天然气股份有限公司等大型国有企业，以及中国石油大学等高等院校（表 2.2.4）。

表 2.2.3　“大型复杂炼化工厂智能制造技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	367	66.37	473	50.37	1.29
2	美国	78	14.10	184	19.60	2.36
3	沙特阿拉伯	34	6.15	215	22.90	6.32
4	韩国	20	3.62	3	0.32	0.15
5	加拿大	9	1.63	11	1.17	1.22
6	德国	8	1.45	26	2.77	3.25
7	印度	8	1.45	2	0.21	0.25
8	日本	6	1.08	4	0.43	0.67
9	英国	4	0.72	7	0.75	1.75
10	法国	3	0.54	13	1.38	4.33

表 2.2.4　“大型复杂炼化工厂智能制造技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国石油化工股份有限公司	46	8.32	61	6.50	1.33
2	中国石油天然气股份有限公司	42	7.59	25	2.66	0.60
3	沙特阿拉伯国家石油公司	34	6.15	215	22.90	6.32
4	中国石油大学 (北京)	23	4.16	50	5.32	2.17
5	西南石油大学	18	3.25	41	4.37	2.28
6	南京富岛信息工程有限公司	18	3.25	17	1.81	0.94
7	中国海洋石油集团有限公司	13	2.35	8	0.85	0.62
8	Phillips 66 石油有限公司	9	1.63	8	0.85	0.89
9	西安石油大学	8	1.45	35	3.73	4.38
10	华东理工大学	6	1.08	19	2.02	3.17

国际上，美国、德国、英国以及沙特阿拉伯的交流合作较为紧密（图 2.2.3）。在中国，中国石油大学与中国石油化工股份公司之间的合作较为紧密，其他校企合作有待进一步加强（图 2.2.4）。

如图 2.2.5 所示，未来 5 年，炼化工厂智能制造主要从装置层面的智能化发展到全流程的协同制造，包括原料属性的智能识别、在线检测技术、全流程的动态模拟及多目标协同优化技术；未来 10 年，智能制造技术将面向安全环保指标，应用于厂级的风险智能管控与碳溯源、监控及协同减碳等方面，为炼化企业的绿色可持续发展提供技术基础。

2.2.3 退役动力电池的短流程再生利用技术

锂离子电池是电动汽车的主要动力电源之一。中国是全球最大的锂离子动力电池生产国和消费国，同时拥有全球最高的动力电池装机量。动力电池的平均寿命为 8~10 年。2020 年，中国动力电池累计退役总量约 20 万 t，而到 2025 年，退役动力电池总量将升至约 78 万 t。中国长期处于缺钴贫锂少镍的现状（总体对外依存度 >80%），退役动力

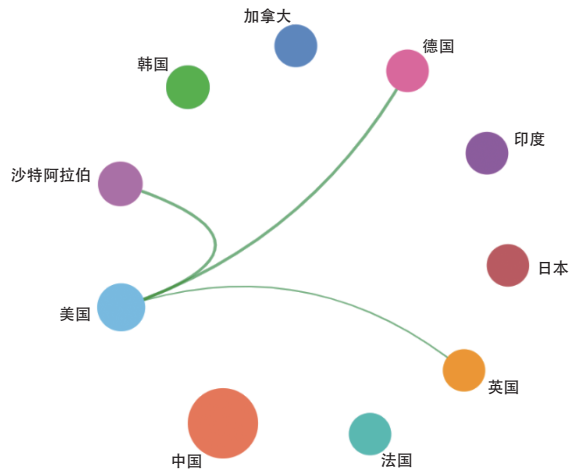

图 2.2.3 “大型复杂炼化工厂智能制造技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

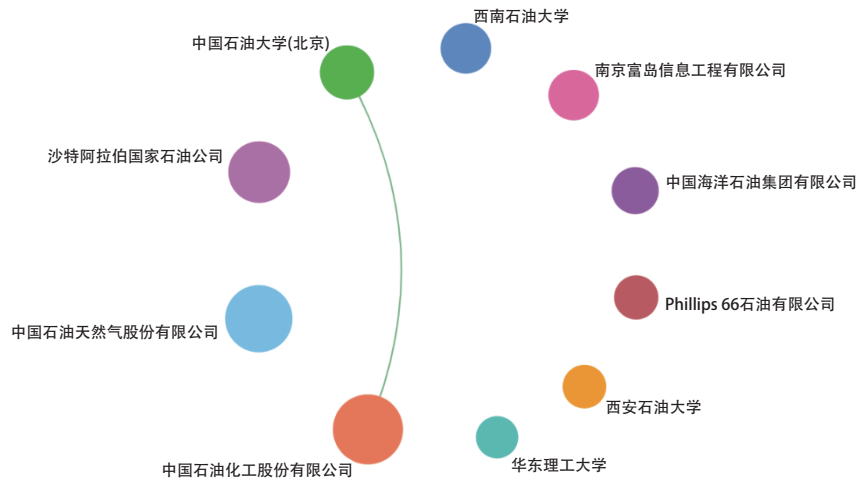

图 2.2.4 “大型复杂炼化工厂智能制造技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

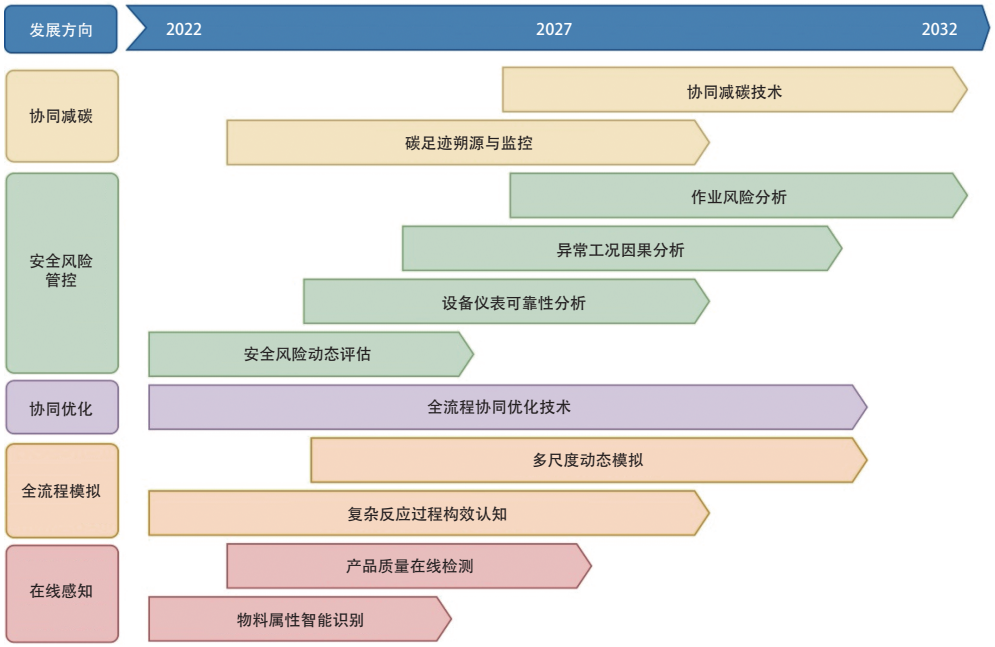

图 2.2.5　“大型复杂炼化工厂智能制造技术”工程开发前沿的发展路线

电池是赋存镍钴锰锂等关键金属的重要二次资源，因此迫切需要突破退役锂电的高值资源化技术瓶颈，保障资源供给安全，应对新能源行业可持续发展面临的巨大挑战。

退役动力电池结构复杂、成分多变，除含有上述有价金属外，还含有电解液等毒害物质和低值伴生元素。其循环利用过程流程长、复杂度高，具有显著的学科交叉特征。其中研究最广泛、关注度最高的是退役锂电的再生利用环节。目前退役电池资源化技术主要分为湿法冶金、火法冶金和直接再生。比利时的优美科采用火法冶金工艺进行金属的回收利用，无需预处理过程，但能耗高、易排放有毒有害气体，存在较大的环境风险。湿法冶金过程较为成熟，具有低能耗、高回收率等优点，在中国市场应用率高。目前，镍、钴等金属的回收率可达 98% 以上，而锂的回收利用仍存在回收率低、成本高的问题。

近年来，锂离子电池的回收热度不断提高，相关研究机构和企业在技术方面取得众多进展。从资源提取角度，研究主要分为两个阶段：早期的金属元素全浸出和近期的优先提锂为核心的金属梯级提取。目前，中国科学院过程工程研究所开发了针对钴酸锂、三元锂、磷酸铁锂、锰酸锂等不同废料的选择性提锂技术路线，构成了基础—技术—装备的系统研究链条。通过优先提锂，可以显著缩短锂回收流程、提高锂的综合回收效率，从而缩短整个锂电池的回收流程，对过程减污降碳具有重要意义。从总体回收效率角度考虑，提高退役电芯预处理阶段的技术水平，实现更精细化分选是目前行业的发展方向。近期提出的梯级热解 – 精细分选的技术思路可规避预处理过程中大量毒害溶剂挥发等问题，提高黑粉解离效率和降低杂质元素含量，并可以实现正负极粉料的高效分选。另外，免放电破碎也受到目前行业的关注，但主要在磷酸铁锂电池等方面进行了尝试，在安全性、物料适应性以及经济性等方面仍在进行攻关推进。从减污降碳方面考虑，提高介质循环效率，推动氨氮、高盐、高化学需氧量（chemical oxygen demand，COD）废水处理及资源化利用具有重要意义；加强废盐、含重金属废渣、废石墨等利用也势在必行；同时需要关注所得产品

的碳足迹以及全过程的碳排放情况，进一步提高行业技术水平。

表 2.2.5 中列出了“退役动力电池的短流程再生利用技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家。其中，中国是专利产出最多的国家，且专利产出数量远高于其他国家。由图 2.2.6 可知，各主要国家之间的合作较为薄弱，仅中国与加拿大有合作。表 2.2.6 中列出了该领域核心专利的主要产出机构。科研院校和机构方面，中南大学、中国科学院过程工程研究所的专利产出数量处于前列；企业方面，日本的住友金属矿山株式会社以及中国的合肥国轩高科动力能源有限公司和广东邦普循环科技有限公司处于前列。各主要机构间还未有合作。

退役电池资源化技术已有较多的研究基础和积累，但仍有很多环节和问题需要加强与解决。在“双碳”政策背景下，动力电池全产业链面临新的挑战和需求，锂离子电池作为关键的动力和储能部件，其高值短程资源化利用至关重要，如何从资源安全保障、资源高效利用、过程零碳排放保障行业的可持续发展，需要新一代全产业链绿色制造技术。建议从如下方面进一步推进技术完善和应用（图 2.2.7）：退役锂电梯度热解–精准分选技术与装备；复杂镍钴锂废料低碳高值资源化利用技术；正/负极材料温和修复再生技术；锂电材料全产业链水–气–固优化集成技术；新能源金属资源利用全产业链特征数据库及标准体系的建立。

表 2.2.5 “退役动力电池的短流程再生利用技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	822	87.26	2 028	92.69	2.47
2	日本	64	6.79	84	3.84	1.31
3	韩国	20	2.12	13	0.59	0.65
4	德国	9	0.96	9	0.41	1.00
5	美国	8	0.85	7	0.32	0.88
6	印度	5	0.53	29	1.33	5.80
7	加拿大	4	0.42	16	0.73	4.00
8	以色列	3	0.32	1	0.05	0.33
9	比利时	2	0.21	1	0.05	0.50
10	波兰	2	0.21	0	0.00	0.00

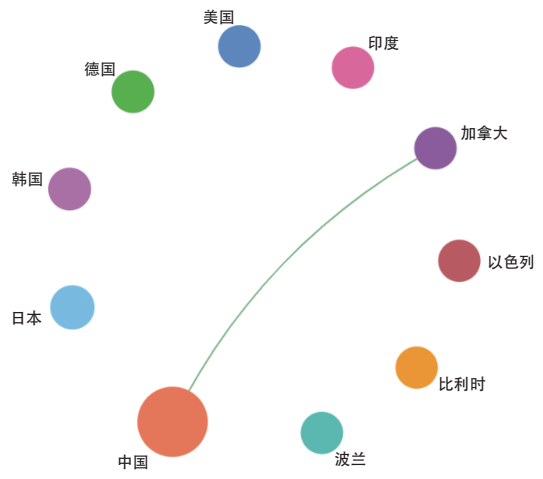

图 2.2.6 “退役动力电池的短流程再生利用技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.6　“退役动力电池的短流程再生利用技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中南大学	55	5.84	184	8.41	3.35
2	住友金属矿山株式会社	31	3.29	27	1.23	0.87
3	中国科学院过程工程研究所	29	3.08	102	4.66	3.52
4	合肥国轩高科动力能源有限公司	27	2.87	74	3.38	2.74
5	广东邦普循环科技有限公司	26	2.76	40	1.83	1.54
6	昆明理工大学	19	2.02	35	1.60	1.84
7	矿冶科技集团有限公司	17	1.80	64	2.93	3.76
8	国家电网有限公司	17	1.80	49	2.24	2.88
9	日本太平洋水泥株式会社	17	1.80	29	1.33	1.71
10	格林美股份有限公司	16	1.70	45	2.06	2.81

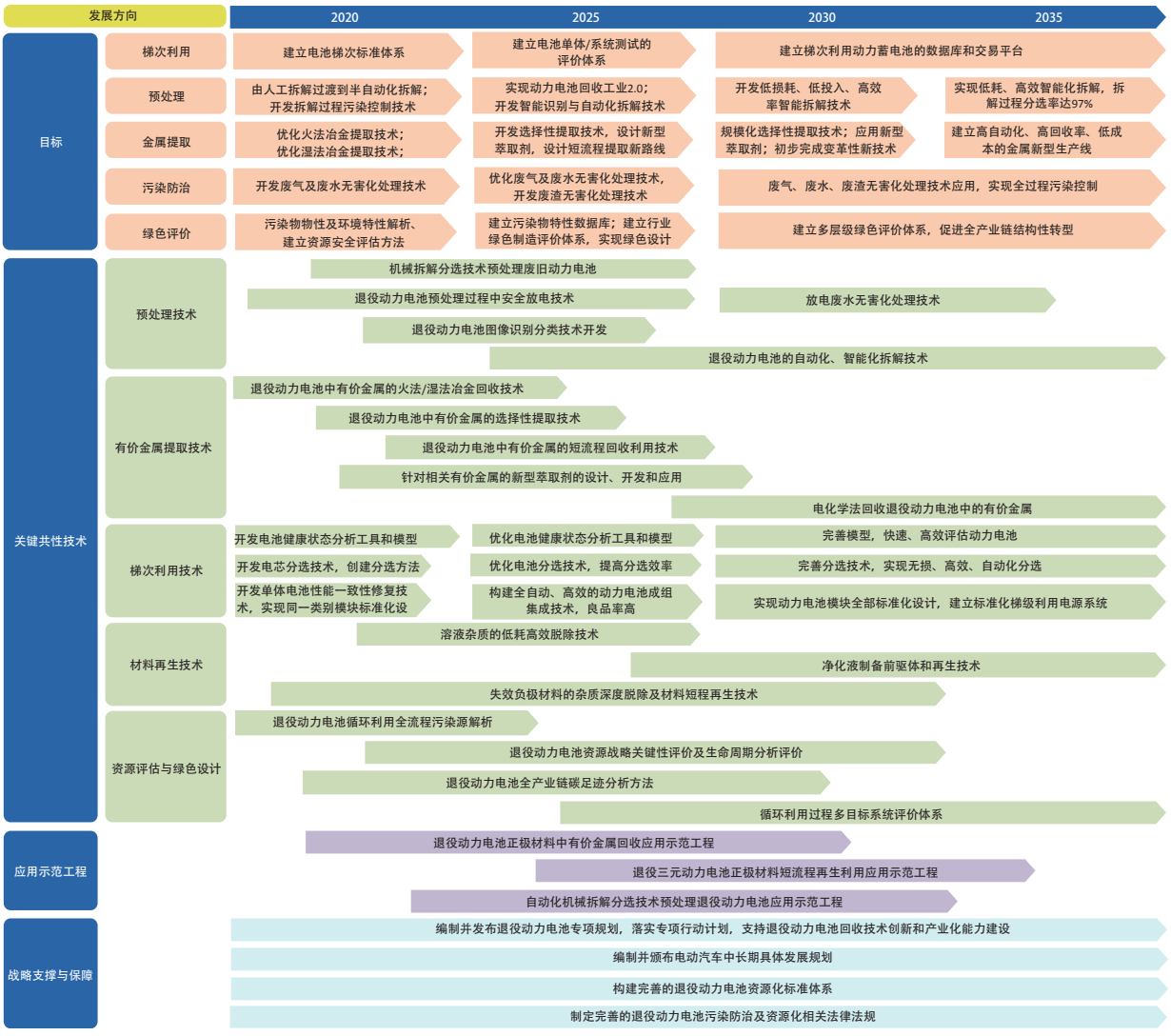

图 2.2.7　“退役动力电池的短流程再生利用技术”工程开发前沿的发展路线

领域课题组人员

课题组组长 / 副组长：

组　长：王静康　薛群基　刘炯天

副组长：李言荣　刘中民　毛新平　聂祚仁

谭天伟　周　玉　屈凌波　元英进

课题组成员：

陈必强　邓　元　马新宾　闫裔超　杨治华

叶　茂　蔡　的　李达鑫　王　静　王景涛

姚昌国　祝　薇　何朝辉　涂　璇　程路丽

黄耀东　李艳妮　朱晓文

执笔组成员：

曹　欣　丁文进　冯建情　龚俊波　韩　优

胡望宇　黄　远　阚艳梅　康国栋　雷天宇

卢静宜　年　瑶　孙　峙　王　朝　阎文艺

杨宇森　姚昌国　赵中伟　郑玉峰　周吉彬

朱　荣　祝　薇　朱晓文

致谢：

北京航空航天大学

包书聘　郭思铭　韩广宇　胡少雄　张青青

周　杰

北京化工大学

陈徽东　李国锋　申晓林　王　丹

北京科技大学

寇明银　魏光升　左海滨　刘　放　张宇航

电子科技大学

万中全

哈尔滨工业大学

贾德昌

华东理工大学

钱　峰　张萱妮　钟伟民

华南理工大学

卞钲淇　王迎军

昆明理工大学

刘建华　许　磊

上海大学

王　江

上海交通大学

潘云翔　彭　冲

天津大学

冯亚凯　高　鑫　胡文彬　刘国柱　汪怀远

王靖涛　张金利　张　雷　赵玉军　侯金健

黄新媛

武汉理工大学

孙　一　卢晨曦　汪　潇　张联盟

西北有色金属研究院

闫　果　张平祥

中国宝武中央研究院

辜海芳　王　媛

中国科学院大连化学物理研究所

路　芳　卢　锐　马现刚

中国科学院上海硅酸盐研究所

董绍明　靳喜海　谭　敏

中国科学院过程工程研究所

王　志　杨亚锋　吕伟光

中国建材集团有限公司

洪　伟　彭　寿　秦旭升

中南大学

刘旭恒