



第四章

化工、冶金与材料工程前沿

4.1 工程研究前沿

4.1.1 Top 11 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 11 工程研究前沿的核心论文情况见表 4.1 和表 4.2。其中“仿生电子皮肤与智能触觉感知系统构建”来自数据挖掘，其篇均被引频次达到 214.19 次。“人形机器人用超弹性多感知柔性材料”“光电催化高效精准合成高附加值化学品”和“新型材料限域空间物质传输与固化研究”则根据数据挖掘由专家研判而来。其他前沿则纯粹来自专家推荐。跟随航天航空科技的进步，“月表资源原位利用”研究得到广大专家的普遍认可，成为化工、冶金与材料工程领域的 Top 1。与之相关的“太空微重力环境冶金技术研究”则排名第六。与机器人和人工智能（AI）相关的研究前沿有 3 个入选，分别是“人形机器人用超弹性多感知柔性材料”“仿生电子皮肤与智能触觉感知系统构建”和“机器学习势函数驱动的分子智能设计与合成”。能源相关的基础研究仍然备受关注，“纳米储能材料与器件”核心论文被引频次达到 67 048 次。从篇均被引频次来看，研究周期长的冶金领域前沿和航天材料领域前沿，其篇均被引频次普遍不高。

（1）月表资源原位利用

月表资源原位利用（*in-situ* resource utilization, ISRU）是人类深空探索的重要前沿，目标是

表 4.1 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 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	月表资源原位利用	75	4 085	54.47	2020.8
2	人形机器人用超弹性多感知柔性材料	230	28 652	124.57	2021.0
3	光电催化高效精准合成高附加值化学品	170	26 111	153.59	2020.5
4	宽温域零膨胀航天器材料研究	101	6 238	61.76	2020.6
5	新型材料限域空间物质传输与固化研究	169	19 083	112.92	2020.6
6	太空微重力环境冶金技术研究	48	3 011	62.73	2020.7
7	仿生电子皮肤与智能触觉感知系统构建	85	18 206	214.19	2020.4
8	面向大宗化学品、高性能材料和能源生物制造的仿生细胞器精准构筑	118	12 852	108.92	2020.6
9	多源固体废物协同重构与闭环高值化利用	141	9 731	69.01	2020.6
10	纳米储能材料与器件	498	67 048	134.63	2020.6
11	机器学习势函数驱动的分子智能设计与合成	316	46 612	147.51	2021.0

表 4.2 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	月表资源原位利用	12	23	16	19	5	0
2	人形机器人用超弹性多感知柔性材料	39	67	37	46	28	13
3	光电催化高效精准合成高附加值化学品	50	50	31	24	12	3
4	宽温域零膨胀航天器材料研究	29	19	26	15	10	2
5	新型材料限域空间物质传输与固化研究	46	42	39	21	16	5
6	太空微重力环境冶金技术研究	11	11	12	10	4	0
7	仿生电子皮肤与智能触觉感知系统构建	35	14	17	9	8	2
8	面向大宗化学品、高性能材料和能源生物制造的仿生细胞器精准构筑	29	34	20	26	6	3
9	多源固体废物协同重构与闭环高值化利用	35	39	35	18	11	3
10	纳米储能材料与器件	149	120	100	74	44	11
11	机器学习势函数驱动分子智能设计与合成	45	78	86	57	35	15

在月壤和极区水冰等资源的基础上获取金属、氧气、水和建材，减少对地球补给的依赖，推动月球科研站和长期驻留的实现。其基本思路是结合月壤的物质组成和特殊环境条件，建立适合的资源转化方法，提高利用效率和可持续性。研究方向主要包括：① 月壤矿物的赋存形式与分离机理研究，包括明确氧在硅酸盐和氧化物中的存在方式，金属与挥发分在钛铁矿、硅酸盐、玻璃等物相中的分布特征等，为不同元素的提取提供依据；② 月壤原位建造与挥发分提取，探索利用烧结和增材制造等技术实现建材制备，同时开发水和其他挥发物的采集、分离和储存技术，为生命支持和推进剂提供条件；③ 月壤的冶金性质与月面冶炼工艺研究，利用月表真空等环境进行矿物热分解，降低反应能耗并释放氧气和挥发物；或结合还原工艺，构建氧气、金属与副产物循环利用的路径，研究低重力条件下金属熔融与气化的规律。其未来趋势是形成资源、能源与制造的耦合体系，以光伏和小型核能作为驱动力，并通过搭建模型和优化方法提升工艺的稳定性与规模化水平，使月表资源利用由实验探索走向工程应用，为深空可持续发展奠定物质基础。

(2) 人形机器人用超弹性多感知柔性材料

人形机器人作为智能化系统的前沿应用，其性能提升对触觉传感器提出了更高的要求。实现机器人在复杂环境中高效交互、精确感知与安全执行任务，依赖于柔性结构材料的创新。这些材料的关键任务是在力学、触觉、电学与热学等多模态感知之间实现高效协同，以满足机器人对环境的适应性和任务执行的多样化需求。面向未来智能机器人对拟人化皮肤与传感系统的迫切需求，设计与制备兼具超弹性、优异多模态感知性能以及力学稳定性的柔性材料，成为突破性技术的重要方向。实现这一目标的核心挑战在于如何通过多尺度结构设计，优化材料性能，确保其具备强大的力学稳定性和传感能力。这一挑战涉及从原子尺度到宏观尺度的多层次结构优化，涵盖材料设计、制造工艺、系统集成等多个领域。深入理解和调控这些复杂体系的性能，有助于突破传统材料的瓶颈，提升机器人感知能力，推动人形机器人在更加复杂的环境中安全高效地工作。目前，全球在这一领域的研究聚焦于以下方向：① 材料与结构设计，通过多尺

度结构优化,提升材料的力学性能、电导性及多模态感知能力;②多物理场耦合机制研究,探索力学、电学、热学等多领域之间的协同作用,以开发具有高灵敏度与超弹性的柔性材料;③系统集成与实际应用,将机器人与传感系统集成,推动其在典型人形机器人中的应用验证,实现从材料设计到系统集成的全链条创新。

(3) 光电催化高效精准合成高附加值化学品

绿色化工的核心目标之一是高效、高选择性地合成高附加值化学品。光电催化是实现太阳能向化学能转化的重要途径,可在温和条件下将资源分子高效转化为清洁燃料等高附加值化学品。其核心在于实现光子吸收、电荷分离传输、表界面催化、分子活化及传质等多过程的高效协同,涵盖光物理、光化学、能质传输与转化等多个环节,具有跨尺度、多过程耦合特征。深入理解并调控这一复杂体系,有助于突破能量转换效率瓶颈,提升反应选择性、体系稳定性,并实现应用拓展。当前研究重点集中于3个层面:一是材料与体系设计,通过能带调控、界面优化及多相/均相协同,提升光电催化性能;二是反应机制解析,通过先进的原位与时间分辨表征,揭示光电材料、电荷动力学、表面催化之间的构效关系;三是器件及工艺集成,围绕反应路径、性能优化和反应器设计,探索从单一产氢向二氧化碳还原、高附加值化学品合成等多元应用的拓展。未来光电催化将朝着定制化、高值化与系统化发展,通过材料、机制、反应工程协同,实现理性设计与高效调控,进一步与生物质转化、碳循环等过程耦合,构建太阳能驱动高附加值化学品的生产体系。

(4) 宽温域零膨胀航天器材料研究

宽温域零膨胀航天器材料是指在太空极端变温环境中,能保持微观尺寸近乎不变(热膨胀系数绝对值 $\leq 1 \text{ ppm/K}^1$)、主要用于航天器的关键功能材料。该类材料能够解决航天器精密部件(如光学系统、动力机构、大型天线结构等)因热胀冷缩引发形变与热应力而导致的失效问题,保证航天器在严苛热循环中的结构稳定性、精度及其长期服役可靠性。其应用还可扩展至超精密加工、灵敏传感探测等前沿技术,以及深海、深地、深空等极端环境。目前研究正从追求单一性能突破向多目标全局优化与多尺度协同设计转变。除追求宽温域近零膨胀系数外,还需考虑在太空应用的特殊要求,如轻质、抗辐照,以及优良的力学性能(强度、韧性)、光学性能(透明)、热/电学性能(导热/导电、热/电绝缘)等。未来研究前沿包括:①通过原子/电子多尺度精准调控,结合机器学习驱动的高通量计算,优化成分-工艺-性能,实现对热膨胀行为等多物性的智能调控;②探索提升零膨胀效应、拓宽零膨胀温度区间的精细结构调控和可控化学合成技术,利用化学元素替代、缺陷工程、界面应力效应和介观形貌调控等方法实现本征零膨胀幅度与温度区间的精准调控,以及提高材料的宏观化学热稳定性和力学性能等;③研究界面结构影响块体材料宏观零膨胀性能的作用机制,探索提升块体材料零膨胀幅度与温度区间的界面工程,利用界面的精细调控实现块体材料的零膨胀达到本征性能极限,并兼顾具体的力、热、光、电性能要求。面向未来深空探测、高轨卫星等对极端环境适应性的更高要求,该领域前沿正朝着超宽温域、智能响应、高效热管理等方向推进。从机理研究来说,依托大科学装置如中子衍射、同步辐射先进原位表征技术,解析材料微观结构、相变动力学、磁-弹/热-弹耦合及缺陷演化机制,为材料设

¹ $1 \text{ ppm/K} = 1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

计提供理论依据。从材料性能来说,应聚焦轻质化(如先进铝基、钛基复合材料)、高强度/刚度、抗辐照、宽温域稳定性与良好导热性等多功能一体化,为走向实际应用奠定基础。

(5) 新型材料限域空间物质传输与固化研究

新型材料限域空间物质传输与固化研究是当前材料科学、化学工程及纳米技术交叉领域的前沿核心议题,旨在探索并调控物质在微米至纳米尺度的受限空间(如多孔材料、层状结构、人工纳米通道)内的独特行为。其核心内涵是研究在此极限维度下,物质传输(如离子、分子、流体的输运)和相变固化(如聚合、结晶、凝胶化)的物理化学规律,其完全不同于宏观体相,而是显著地受到表界面效应和量子限域效应的影响。研究关键点主要涉及4个方面:① 限域空间内的传输机制与调控。阐明传输物质与限域壁面之间的复杂相互作用(如静电、配位作用),研究导致离子/分子选择性筛分、超快输运等现象的机理。通过精确调控孔道尺寸、表界面化学和结构有序性,实现对传输速率和选择性的按需定制。② 受限环境下的固化动力学与微结构演化。限域条件会显著改变固化反应的路径、速率以及最终产物的微观结构。通过研究界面如何诱导成核、空间阻碍如何影响分子链排列以及如何控制固化收缩与应力分布,以期获得结构均匀、缺陷少、性能优异(如高强度、高韧性)的固体材料。③ 传输-固化过程的动态耦合与协同调控。首先要理解并协调传输与固化这两个相继或同步发生的过程,确保反应前驱体能够充分、快速地传输至反应区域,同时要保证固化过程不会过早地堵塞传输通道;然后借助外场(热、光、电)进行时空精准的智能调控。④ 多尺度模拟与原位表征技术的融合。通过理论模拟(从分子动力学到有限元分析)与先进原位表征技术(如原位电镜、光谱、X射线散射)结合,揭示微观机理、验证假设和预测材料性能,加速新材料的设计与开发进程。

(6) 太空微重力环境冶金技术研究

太空微重力环境冶金是指在近地轨道或深空等微重力条件下进行金属冶炼与材料制备。该技术通过消除地球重力导致的沉降、对流等干扰,使材料制备过程转由界面力主导,从而克服地面冶炼中难以避免的成分偏析和缺陷形成。借此可制备出成分极度均匀的复合合金、结构可控的多孔金属、高纯度单晶及特殊非晶材料等传统方法无法获得的高性能材料。实验表明,太空制备的合金性能可提升10倍以上。该领域的研究方向集中在以下方向:① 无容器冶金技术,采用电磁悬浮等手段避免器壁污染,以制备高纯度特种合金(如航空发动机用钛合金单晶体);② 异种金属均匀融合,解决地面因密度差异导致的分层问题;③ 新型功能材料开发,包括缺陷密度极低的半导体晶体、自修复聚合物、结构可控的泡沫金属等;④ 天地协同智能控制算法构建,通过融合天基平台与地面系统的多源数据,构建联合智能控制模型,实现对微重力冶金过程的自主实时调控与参数优化;⑤ 原位资源利用(ISRU)闭环技术,在太空环境中直接提取并转化地外资源,构建“资源开采—转化—利用—回收”的自持循环系统,支撑太空冶金的可持续运行。

(7) 仿生电子皮肤与智能触觉感知系统构建

仿生电子皮肤是通过柔性敏感材料、微纳结构设计与多功能传感单元的集成,模拟人类皮肤的多模态感知能力,实现压力、应变、摩擦、温度和湿度等信息的实时采集与反馈。智能触觉感知系统则在此基础上进一步构建“信号采集—传输—分析—反馈”全链路系统,从而赋予人工器

件类人甚至超越人类的触觉认知能力。当前，国内外研究主要集中在3个方面：一是新型柔性传感材料与器件结构设计，以提升传感性能和环境适应性；二是多功能集成与信号解耦，探索力-热-湿度等多模态协同感知，同时引入可拉伸、自愈合等特性，以接近生物组织性能；三是智能感知与数据融合，利用机器学习等方法实现信号的高效处理与智能反馈。仿生电子皮肤与智能触觉感知系统作为多学科交叉的战略方向，未来将聚焦以下核心方向：①性能层面，推动“超仿生”与“高可靠”协同发展，突破生物皮肤感知极限，实现多模态信号精准捕获，提升柔性器件耐用性与可靠性；②功能层面，重点突破自供电与生物兼容瓶颈，拓展其在全时健康监测、智能假肢、植入式医疗等领域的应用潜力；③系统层面，构建智能触觉网络，结合人工智能技术实现多模态融合与环境自适，推动从“感知”到“认知”的跨越。

（8）面向大宗化学品、高性能材料和能源生物制造的仿生细胞器精准构筑

仿生细胞器是具有类细胞器结构与功能的人工亚细胞单元，可用于生物制造细胞工厂中，实现代谢途径的空间组织与高效催化。该类系统能够有效克服传统微生物细胞中酶分子分散、代谢中间体扩散损失及途径竞争等问题，显著提升目标产物的合成效率与产量，是大宗化学品、高性能材料与能源生物制造过程中的关键赋能技术。目前，研究主要集中于以下方面：①复杂多变细胞环境下仿生细胞器的高精度组装，揭示生物大分子自组装的“分子语言”，推动从经验试错向理性设计的范式转变；②发展细胞器原位表征技术，解析仿生细胞器微环境（pH、离子强度、分子拥挤度等）对酶促反应动力学的影响机制，建立结构-功能关系模型，并深入阐释酶分子在细胞器内的协同机制；③开发刺激响应型智能细胞器，通过整合光、热、pH等感应元件，实现代谢途径的时空调控与自适应优化；④提升仿生细胞器的生物兼容性与鲁棒性，增强其在多种工业底盘细胞中的适配性，推动从实验室概念向产业化应用的跨越，助力化工、能源与材料产业的绿色转型与升级。未来，该领域将深度融合人工智能、超分辨成像和合成生物学技术，实现仿生细胞器的高通量设计、实时监测与动态调控，在碳中和背景下的绿色生物经济中发挥关键作用。

（9）多源固体废物协同重构与闭环高值化利用

多源固体废物协同重构与闭环高值化利用是对冶金、化工等领域产生的冶金渣、粉煤灰、退役动力电池等多品类、多组分固体废物，利用跨行业协同调度与多尺度结构重构技术，实现“固体废物—资源—高值产品—再生资源”全生命周期闭环利用的前沿交叉领域。该技术突破传统单一固体废物“低附加值处置”模式，破解成分互补性差、有害组分协同控制难等瓶颈，解决全球固体废物堆存问题，以及缓解矿产短缺问题，其应用可延伸至绿色基建、新能源材料、高端装备制造等战略领域。该领域的研究聚焦三大方向：①多源固体废物成分-结构-性能耦合机制解析，依托多尺度表征与机器学习，建立跨品类固体废物协同调配模型，实现“以废定产”的智能设计，破解成分波动导致的产品质量不稳定难题；②多尺度协同重构技术创新，开发高温熔体重组、低温水热晶化、界面改性调控等技术，实现固体废物中硅、铝、钙、锂等元素的定向分离与高值化转化，制备高端陶瓷、新型胶凝材料、新能源正极材料等产品；③闭环产业链构建与系统优化，结合区域固体废物分布特征，设计“收集—预处理—转化—再生”全链条技术体系，耦合碳捕集

与污染物协同控制，实现环境效益与经济效益的统一。面向全球资源与生态挑战，该领域向跨区域协同调度、全组分零废弃、高值产品定制化推进，需深化固体废物转化过程热力学与动力学规律，突破大型化装备与智能化控制技术，为全球固体废物资源化利用提供可推广的技术范式。

(10) 纳米储能材料与器件

纳米储能材料与器件，特别是一维纳米线结构体系，是突破传统电化学储能器件能量密度与功率密度瓶颈、赋能高性能储能技术发展的关键平台。通过在纳米尺度上设计储能材料的几何构型与界面特性，可以为揭示载流子输运机制、优化反应动力学提供理想模型，有望从根本上解决储能中的容量衰减、倍率性能和安全性问题。当前研究正从单一材料优化转向多物理场耦合与多粒子协同的深入探索，重点包括：发展基于单纳米线的原位表征技术，实时解析电化学过程中电子、离子、声子等相互作用，进而推动界面工程设计，开发场效应储能、界面催化储能等新型器件。然而，该领域仍面临多场耦合机制不明、多粒子协同理论缺失、跨尺度集成失配等挑战。纳米储能材料与器件的全球研发趋势集中在以下方面：① 多场耦合理论与原位表征技术，揭示力-热-电-光多场环境下材料的本征储能行为；② 多粒子协同输运建模与仿生设计，实现电子-离子输运动态匹配与界面副反应抑制；③ 跨维度制造工艺，实现储能、传感、计算等功能一体化集成；④ 数据驱动的 AI 研发范式，构建“设计-集成-应用”全链条创新，加速产业化进程。

(11) 机器学习势函数驱动分子智能设计与合成

机器学习势函数通过数据驱动原子间相互作用建模，实现了精度与效率协同提升。过去 20 年，机器学习势函数实现了跨越式发展，近年涌现的高阶等变消息传递神经网络 (MPNN) 通过嵌入空间对称性约束，突破了传统模型在复杂体系中的精度瓶颈。当前，机器学习势函数聚焦两大核心挑战：一是提升模型泛化能力与拟合精度，通过机理模型耦合与预训练模型微调等方式，打破模型对特定体系的依赖；二是革新数据范式，开发高质量势能面数据，利用主动学习与自适应采样技术降低数据成本，从根本上解决“数据饥渴”难题。未来，机器学习势函数将沿着“通用化-专用化”双轨并行发展：通用性模型用于实现跨元素、相态普适性；专用模型则聚焦特定化学问题（如催化反应路径、生物分子构象），定制化架构实现量子级精度。随着技术成熟，机器学习势函数应用将深度渗透至分子智能设计全链条，助力反应网络探索高效遍历万亿级反应路径，实现动力学与热力学多尺度性质精准预测，推动分子设计与合成智能化转型。

4.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

4.1.2.1 月表资源原位利用

月表资源原位利用 (ISRU) 被认为是人类深空探索进入长期驻留阶段的关键环节。其核心思路是直接利用月球表层土壤、水冰和其他挥发性物质，获取氧气、水、金属与建材，以支撑科研设施和居住模块运行，从而摆脱对地球频繁补给的依赖。这一理念的提出意味着探索模式的转变——从“地球依赖”逐步走向“外星自给”，为建设月球科研站和更远深空的任务奠定物质与

技术基础。20 世纪，阿波罗计划首次带回月壤样品，揭示了月球表面的成分特征，也为资源利用的设想提供了起点。进入 21 世纪，美国在“阿尔忒弥斯计划”、中国在“国际月球科研站”建设方案中均将 ISRU 作为重点方向，欧洲航天局和部分新兴航天国家也展开相关部署。研究已经从早期的概念层面和实验室尝试逐渐过渡到工艺探索与系统验证。

从全球学术产出的核心论文来看，中国（29 篇，38.67%）与美国（27 篇，36.00%）处于领先地位，英国、德国、荷兰、加拿大和意大利等国也保持活跃贡献（表 4.3）。中国科学院、中国地质大学、美国国家航空航天局（NASA）、中国空间技术研究院和北京航空航天大学是主要力量，其中中国科学院的篇均被引频次超过 70，显示出其在国际学界的影响力（表 4.4）。合作网络显示，中美之间交流最为紧密，同时中欧之间也建立起较强的互动（图 4.1 和图 4.2）。施引核心论文的数据表明，中国和美国在推动知识传播方面占据主导位置，英国、德国和意大利则发挥补充作用（表 4.5 和表 4.6）。

表 4.3 “月表资源原位利用”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	29	38.67	1 728	59.59	2021.0
2	美国	27	36.00	1 457	53.96	2020.9
3	英国	11	14.67	567	51.55	2020.5
4	德国	9	12.00	497	55.22	2020.4
5	荷兰	5	6.67	204	40.80	2020.8
6	加拿大	4	5.33	180	45.00	2020.0
7	意大利	4	5.33	174	43.50	2022.0
8	澳大利亚	3	4.00	145	48.33	2021.7
9	韩国	3	4.00	127	42.33	2020.7
10	印度	3	4.00	118	39.33	2021.3

表 4.4 “月表资源原位利用”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	11	14.67	772	70.18	2020.4
2	中国地质大学	6	8.00	356	59.33	2021.0
3	美国国家航空航天局	5	6.67	315	63.00	2020.0
4	中国空间技术研究院	5	6.67	219	43.80	2021.4
5	北京航空航天大学	4	5.33	290	72.50	2021.2
6	澳门科技大学	4	5.33	210	52.50	2020.2
7	夏威夷大学马诺阿分校	4	5.33	180	45.00	2021.0
8	华中科技大学	4	5.33	167	41.75	2020.0
9	同济大学	3	4.00	275	91.67	2021.3
10	中佛罗里达大学	3	4.00	262	87.33	2020.7

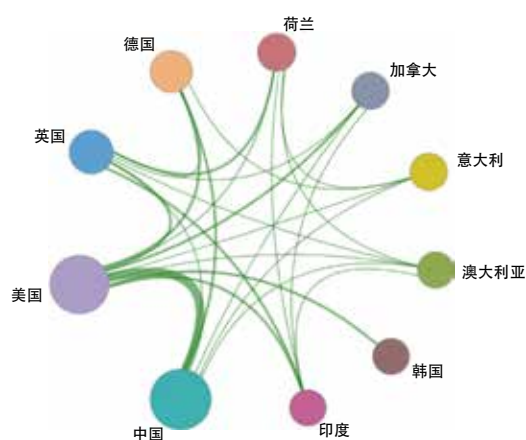


图 4.1 “月表资源原位利用”工程研究前沿主要国家间的合作网络

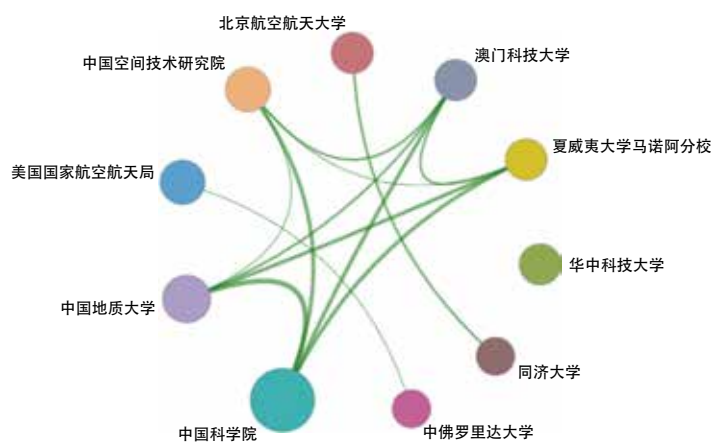


图 4.2 “月表资源原位利用”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 4.5 “月表资源原位利用”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	1 012	39.01	2023.0
2	美国	600	23.13	2022.9
3	英国	207	7.98	2022.8
4	德国	178	6.86	2022.7
5	意大利	124	4.78	2023.1
6	澳大利亚	93	3.59	2023.0
7	印度	90	3.47	2023.3
8	法国	79	3.05	2022.6
9	沙特阿拉伯	73	2.81	2023.3
10	日本	71	2.74	2023.1

表 4.6 “月表资源原位利用”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	349	37.85	2022.5
2	美国国家航空航天局	82	8.89	2022.5
3	澳门科技大学	74	8.03	2021.9
4	中国地质大学	71	7.70	2022.5
5	哈尔滨工业大学	60	6.51	2023.2
6	加州理工学院	59	6.40	2022.6
7	同济大学	51	5.53	2023.2
8	山东大学	48	5.21	2022.6
9	中山大学	44	4.77	2022.4
10	北京航空航天大学	42	4.56	2023.1

研究工作目前集中在 3 个方向：① 月壤矿物赋存状态与分离机理，目标是阐明氧、金属与挥发分在硅酸盐、钛铁矿和玻璃等物相中的存在方式与分布特征，以此作为分离提取的理论依据；② 原位建材制备与挥发物利用，通过烧结和 3D 打印等工艺，探索在月面直接制造结构构件，并发展采冰、气体分离和储存技术，为科研设施和生命维持系统提供条件；③ 月面冶金工艺与循环利用，借助真空和低重力环境，开展低能耗热分解与还原工艺研究，实现氧气与金属的协同获取，并构建资源闭环利用模式。

结合上述方向，未来 5~10 年的发展趋势（图 4.3）主要体现在 3 个方面：① 在矿物分离机制方面，研究正从宏观定性逐步转向微观定量。随着样品返回和原位探测手段的进步，有望建立系统的矿物数据库与工艺模拟平台，为大规模提取提供方法论基础。② 在建材与挥发物利用方面，发展路径是由单点工艺实验过渡到集成化示范。建材制造、冰资源采集与气体储存技术将被整合，形成“建材-水-气体”一体化的应用系统，直接面向科研站与居住舱需求。③ 在冶金工艺与循环利用方面，重点将放在开发连续化、低能耗的工艺链，实现氧气和金属的协同产出，并与光伏、小型核能等能源系统结合，推动“资源-能源-材料”的闭环运行。

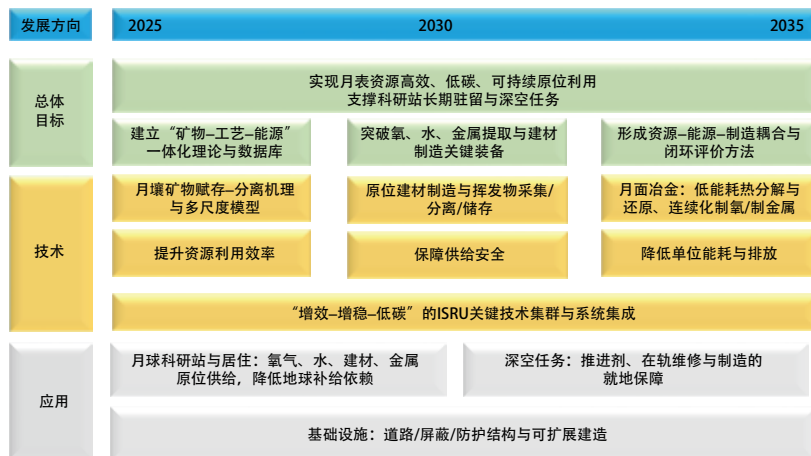


图 4.3 “月表资源原位利用”工程研究前沿的发展路线

可以预期，月表资源原位利用正在进入由基础研究迈向工程应用的过渡期。其价值不仅在于降低深空任务的经济成本，更在于为建立可自持续的空间活动体系提供可行路径。随着国际合作的深入和关键技术的突破，未来 10 年有望见到月面示范性应用的落地，这将为火星乃至更远行星的资源利用提供直接经验与技术借鉴。

4.1.2.2 人形机器人用超弹性多感知柔性材料

随着人形机器人向更高层次的智能化和类人功能进化，兼具超弹性与多感知功能的柔性结构材料在机器人触觉感知系统中扮演着至关重要的角色。然而，当前柔性材料的力触觉感知功能普遍存在灵敏度不足、感知功能单一、强度与导电性能之间相互制约等问题，这些瓶颈限制了其在复杂环境下的广泛应用。为此，基于复合材料多尺度结构优化与多功能结构一体化调控设计，突破传统材料的空间结构与性能局限，已经成为解决这一问题的关键技术路径。通过这种方法，有望实现柔性结构材料在垂直力、滑动力及温度等多种外部刺激下的高灵敏感知功能，满足未来人形机器人拟人类功能实现的需求。中国工业和信息化部发布的《人形机器人创新发展指导意见》中对传感器系统提出了前瞻性的技术方向，强调要面向复杂环境感知需求，开发集成高精度仿生眼与类脑处理算法的视觉传感器，实现对动态环境中目标识别、空间建模和深度估计等功能的融合；在触觉方面，聚焦高分辨率、具备多点接触检测能力的仿人电子皮肤的开发，使机器人具备对微小力变化和多点接触事件的实时响应能力，为机器人在真实环境中实现高效感知与自主决策奠定了技术基础。美国《智能机器人技术路线图》提出，未来 10 年内将加大对高性能、低能耗触觉传感器研发的投入，探索更精准、广泛的触觉感知系统，使机器人能够在复杂环境下与人类进行更加自然的互动。与此同时，美国还计划利用多种先进的材料技术，提高机器人触觉系统的灵敏度和可靠性，推动传感器技术的产业化进程。

从需求出发，柔性结构材料不仅需要具备高弹性和柔韧性，还应兼顾超高灵敏度、强度与导电性能之间的平衡。传统材料多采用金属基或聚合物基复合材料，但这些材料往往在力学性能与导电性能之间存在矛盾。为解决这一问题，多功能复合材料设计通过引入纳米材料、导电聚合物以及先进的二维材料（如石墨烯、MXene 等），在保证材料的柔性和韧性的同时，显著提升了材料的灵敏度与导电性。通过优化复合材料的微观结构，可以有效提高传感器对多种感知信号（如力、温度、湿度等）的反应速度与准确性。传统的触觉感知系统往往依赖单一的感知模式，无法同时处理多种感知信号。为了实现多感知功能的集成，研究者开始将力、温度、湿度等感知功能进行集成化设计，构建具有高度多功能性和协同响应能力的柔性传感器阵列。通过材料基因工程与高通量筛选技术，开发新型的柔性传感器材料，可以使其在应对复杂多变的环境条件时，保持高稳定性与高灵敏度，为人形机器人提供更准确、更全面的环境感知能力。

从核心论文的产出和引用来看（表 4.7 至表 4.10），中国和欧美发达国家对相关研究都非常重视，其中，中美之间的研究合作众多（图 4.4），清华大学与中国科学院和北京航空航天大学有密切合作（图 4.5）。

表 4.7 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”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	149	64.78	18 247	122.46	2021.2
2	美国	65	28.26	9 743	149.89	2020.8
3	新加坡	14	6.09	2 021	144.36	2020.9
4	德国	14	6.09	1 791	127.93	2021.6
5	英国	13	5.65	1 756	135.08	2020.3
6	韩国	11	4.78	1 429	129.91	2021.2
7	瑞士	10	4.35	1 016	101.60	2021.4
8	日本	9	3.91	1 485	165.00	2019.9
9	意大利	9	3.91	674	74.89	2020.6
10	加拿大	7	3.04	1 042	148.86	2020.9

表 4.8 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”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	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	29	12.61	4 111	141.76	2021.4
2	清华大学	17	7.39	2 267	133.35	2021.1
3	浙江大学	16	6.96	1 466	91.62	2020.6
4	新加坡国立大学	11	4.78	1 686	153.27	2020.8
5	北京理工大学	10	4.35	959	95.90	2021.4
6	北京航空航天大学	8	3.48	1 224	153.00	2020.9
7	东华大学	8	3.48	798	99.75	2022.1
8	香港城市大学	7	3.04	756	108.00	2021.0
9	苏黎世联邦理工学院	7	3.04	604	86.29	2022.0
10	天津大学	7	3.04	510	72.86	2022.0

表 4.9 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”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	14 618	58.17	2023.0
2	美国	3 162	12.58	2022.6
3	韩国	1 477	5.88	2022.9
4	英国	1 176	4.68	2022.7
5	印度	827	3.29	2023.1
6	日本	766	3.05	2022.6
7	德国	716	2.85	2022.7
8	新加坡	648	2.58	2022.9
9	意大利	600	2.39	2022.8
10	澳大利亚	589	2.34	2022.6

表 4.10 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”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	中国科学院	1 664	26.87	2022.8
2	浙江大学	658	10.63	2023.0
3	清华大学	591	9.54	2023.0
4	上海交通大学	478	7.72	2022.8
5	四川大学	466	7.53	2022.8
6	哈尔滨工业大学	463	7.48	2023.1
7	西安交通大学	409	6.61	2022.8
8	中国科学技术大学	386	6.23	2023.0
9	华南理工大学	384	6.20	2023.0
10	西北工业大学	350	5.65	2023.1

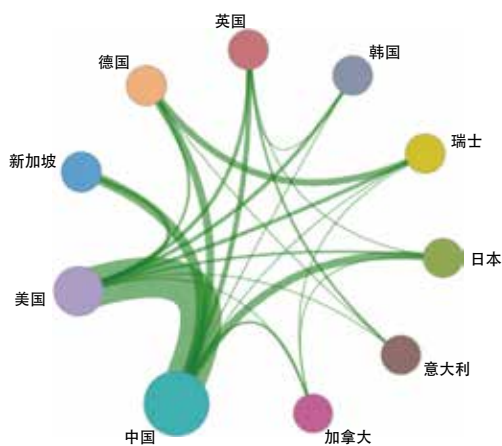


图 4.4 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”工程研究前沿主要国家间的合作网络

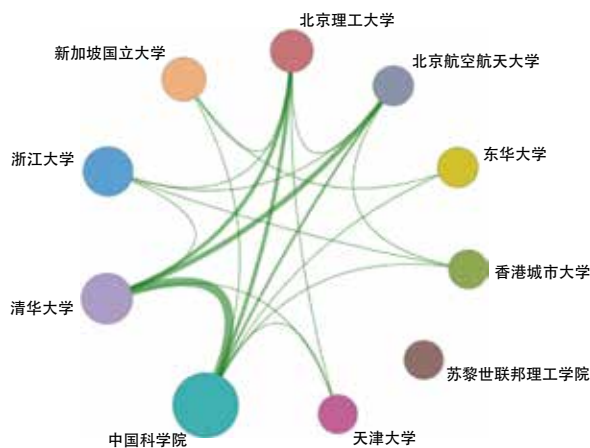


图 4.5 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

随着传感技术的不断进步，未来 5~10 年内，基于超弹性复合材料的柔性传感器系统将在结构微型化、材料智能化、传感器系统集成化等方面取得更为显著的进展（图 4.6）。首先，微纳制造技术与异质集成将推动柔性结构材料的集成化和多功能化，解决单一感知元件性能不足的问题，使传感器阵列在感知信号的精确度和响应速度上得到极大提升。其次，依托类脑神经网络算法，将推动多模态感知信息的融合推理与智能识别，提升机器人在动态、复杂环境下的自适应能力。最后，随着高性能、低能耗柔性材料的出现，绿色环保与智能可持续设计将成为未来柔性结构材料研究的重要方向，为人形机器人提供更加环保、经济的感知解决方案。超弹性多感知柔性材料的设计与制备，将在材料创新、传感技术集成及智能化算法等多方面展开深度突破，为实现人形机器人感知功能的提升奠定坚实的技术基础。通过技术集成与多学科协同创新，未来的柔性传感器材料将具备更加精准的感知能力和极高的可靠性，推动人形机器人从“模仿动作”向“理解环境”迈出关键一步，进而为智能机器人产业的快速发展提供强有力的支持。



图 4.6 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”工程研究前沿的发展路线

4.1.2.3 光电催化高效精准合成高附加值化学品

光电催化技术是当前太阳能研究的前沿方向，其核心目标是实现太阳能向化学能的高效转化。该技术模拟自然光合作用，利用半导体材料在光照下激发产生的电子-空穴对，在催化位点作用下实现氧化还原反应，将水、二氧化碳等资源分子转化为氢气、碳基燃料以及各类高附加值化学品。这一过程融合光电转换与催化反应优势，为人工光合成提供了有效路径。光电催化能够将太阳能以化学能形式存储于分子键中，实现高效转化、稳定存储与按需释放，有效解决太阳能间歇性和分散性带来的应用限制。从战略层面看，发展高效光电催化技术不仅具有科学研究的重要意义，更是构建未来清洁能源体系与绿色化工的重要途径。

光电催化研究可追溯至 20 世纪 70 年代本田-藤岛效应的发现。早期研究主要集中在水解制氢，材料以二氧化钛等宽禁带半导体为主，能量转化效率有限。随着纳米科学、表界面调控

和原位表征的发展,该领域取得显著进展,研究范围已从单一制氢扩展至二氧化碳还原、氮气固定、有机物合成等,材料体系也从金属氧化物拓展到硫化物、氮化物及有机框架材料等。然而,尽管实验室中的太阳能转化效率已有所提升,但整体仍面临效率、选择性与稳定性不足等挑战。

现阶段,全球科学家积极投入光电催化研究,重点探索电极材料设计与制备、电荷传输与分离机制以及高效合成应用。近年来,“光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家和机构分别见表 4.11 和表 4.12,60.59% 的核心论文来自中国,排名第一的机构为中国科学院。主要国家间和机构间的合作网络分别如图 4.7 和图 4.8 所示。全球科学家在该领域建立了广泛的合作,中国、美国和澳大利亚合作最为紧密。施引核心论文的主要产出国家和机构中,中国占比高达 56.59%,中国科学院的占比高达 33.13% (表 4.13 和表 4.14)。

表 4.11 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”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	103	60.59	14 871	144.38	2020.5
2	印度	24	14.12	3 580	149.17	2020.4
3	美国	21	12.35	3 912	186.29	2019.9
4	英国	17	10.00	3 647	214.53	2020.2
5	澳大利亚	16	9.41	2 618	163.62	2020.2
6	韩国	14	8.24	2 522	180.14	2020.5
7	法国	9	5.29	1 208	134.22	2022.0
8	新加坡	7	4.12	1 113	159.00	2020.3
9	日本	7	4.12	905	129.29	2021.3
10	巴基斯坦	7	4.12	782	111.71	2020.9

表 4.12 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”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	20	11.76	3 078	153.90	2020.6
2	北京化工大学	8	4.71	1 242	155.25	2020.1
3	剑桥大学	7	4.12	1 448	206.86	2020.6
4	郑州大学	7	4.12	587	83.86	2020.7
5	中山大学	6	3.53	839	139.83	2020.2
6	深圳大学	5	2.94	1 441	288.20	2020.2
7	湖南大学	5	2.94	934	186.80	2020.0
8	广州大学	4	2.35	1 635	408.75	2020.0
9	悉尼大学	4	2.35	811	202.75	2019.8
10	昆士兰科技大学	4	2.35	528	132.00	2020.8

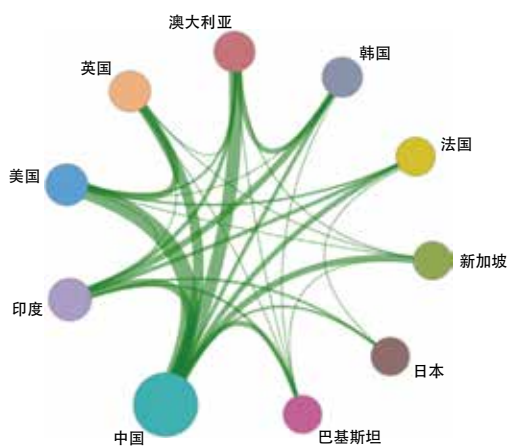


图 4.7 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿主要国家间的合作网络

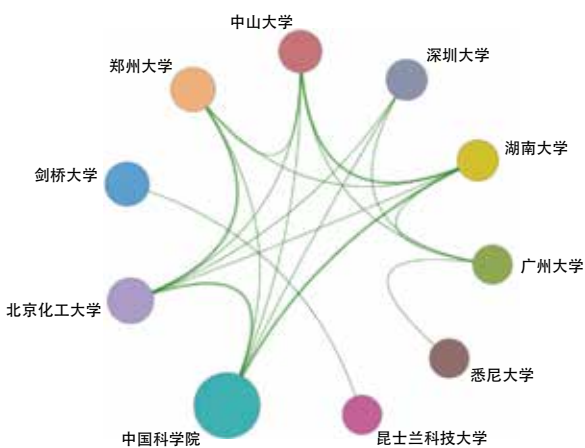


图 4.8 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 4.13 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”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	13 893	56.59	2022.7
2	印度	2 473	10.07	2022.8
3	美国	1 559	6.35	2022.3
4	韩国	1 338	5.45	2022.7
5	沙特阿拉伯	1 084	4.42	2023.0
6	澳大利亚	767	3.12	2022.4
7	日本	764	3.11	2022.5
8	德国	718	2.92	2022.5
9	英国	689	2.81	2022.5
10	伊朗	666	2.71	2022.6

表 4.14 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”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	1 482	33.13	2022.6
2	江苏大学	388	8.67	2022.6
3	郑州大学	350	7.82	2022.0
4	中国科学技术大学	324	7.24	2022.6
5	天津大学	295	6.60	2022.4
6	沙特国王大学	290	6.48	2023.1
7	福州大学	283	6.33	2022.6
8	湖南大学	275	6.15	2022.2
9	清华大学	268	5.99	2022.6
10	哈尔滨工业大学	261	5.84	2022.5

近年来，“光电催化高效精准合成高附加值化学品”研究发展迅速。未来5~10年，该领域将沿智能设计、精准合成、精细表征与系统集成方向拓展，基础研究更加深入，同时向应用和工程层面拓展（图4.9）。一方面，智能化材料设计将成为重要方向，借助机器学习与高通量计算实现半导体光电材料的理性设计与精准合成，构建材料基因库，实现光电催化材料的理性筛选与优化；另一方面，通过精准合成、表界面设计构建高效光电极及表面催化位点，依托先进表征揭示光电催化体系中的普适性原则，以指导材料与反应体系优化、规模化体系开发。在应用层面，工艺条件调控、新型反应器设计与能质管理将成为关键方向；聚焦多场耦合、多相与均相相融合、多模型协同催化，形成更高效的能量转化平台；通过器件化、模块化与集成化设计将推动实验室成果向规模化应用转化。基于绿色合成理念，光电催化可在温和条件下将资源分子高效转化为高附加值化学品，用于绿氢制备、碳资源升级、精细化工、有机化学品及功能材料的绿色合成，实现廉价资源向高附加值化学品的高效转化。通过跨学科、多尺度集成与智能化优化，光电催化技术有望成为绿色能源转换与化学品高值化生产的重要支撑平台，为可持续化工与碳中和目标提供关键技术保障。

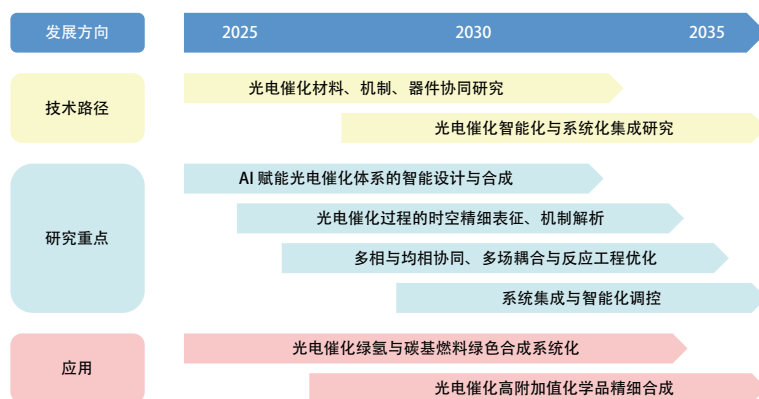


图 4.9 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿的发展路线

4.2 工程开发前沿

4.2.1 Top 11 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 11 工程开发前沿的专利公开情况见表 4.15 和表 4.16。其中“高效稳定离子电池关键材料研发与结构设计”来自专利地图挖掘，其平均被引数排名第一（26.93），但逐年公开量呈逐步下降趋势。“新能源动力电池绿色循环利用”和“高性能纤维增强复合材料跨尺度设计与集成开发”是基于数据由专家研判而来。其他前沿则是由专家推荐而来。化工与冶金领域的开发前沿体现了绿色低碳和资源利用，材料领域的开发前沿则体现在复合材料设计和极端环境应用等方面。

（1）绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备

实现煤炭清洁低碳转型、大规模消纳可再生能源、发展绿氢经济、推动工业深度脱碳是保障能源安全和培育新增长点的关键路径。绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备以绿氢耦合煤化工深度脱碳为核心攻关方向，聚焦可再生能源制氢与煤炭碳氢转化过程的耦合机制研究，通过多学科交叉融合创新突破碳-氢-氧元素定向重构的科学技术难题，着力突破高效、稳定且选择性可控的催化剂体系设计与规模化制备技术。① 开发高效稳定电解水制氢催化剂，提升电解槽在宽功率范围内的响应速度和效率稳定性，揭示动态负载下催化剂反应动力学的瞬态变化规律，突破绿电动态工况下的产氢效率和寿命瓶颈；② 开发动态自适应催化剂，提升催化剂耐晶格畸变和抗积碳能力，原位表征动态氢输入下催化剂活性位点的瞬态变化，建立非稳态反

表 4.15 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引数	平均被引数	平均公开年
1	绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备	1 016	5 792	5.70	2021.4
2	新能源动力电池绿色循环利用	944	8 340	8.83	2021.8
3	工业 CO ₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品	581	4 906	8.44	2021.4
4	高效稳定离子电池关键材料研发与结构设计	843	22 703	26.93	2020.7
5	关键工程结构材料长寿命安全服役加速评价方法与寿命预测	929	5 513	5.93	2021.7
6	高温复杂服役环境下辐射 / 热防护陶瓷涂层研发	351	924	2.63	2021.3
7	机器学习辅助新型聚合物材料发现与理性设计	445	2 027	4.56	2022.0
8	低品位锂资源绿色提取	337	1 285	3.81	2022.5
9	高性能纤维增强复合材料跨尺度设计与集成开发	517	2 084	4.03	2022.3
10	极端环境冶金过程强化技术	505	1 581	3.13	2021.8
11	甲烷高效减排及高附加值化学品转化	1 377	5 676	4.12	2021.8

表 4.16 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备	205	142	175	177	135	182
2	新能源动力电池绿色循环利用	120	108	161	181	183	191
3	工业 CO ₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品	102	93	104	120	77	85
4	高效稳定锂离子电池关键材料研发与结构设计	259	177	127	137	142	1
5	关键工程结构材料长寿命安全服役加速评价方法与寿命预测	74	147	164	252	168	124
6	高温复杂服役环境下辐射/热防护陶瓷涂层研发	64	54	74	76	43	40
7	机器学习辅助新型聚合物材料发现与理性设计	30	53	75	100	95	92
8	低品位锂资源绿色提取	26	25	37	41	73	135
9	高性能纤维增强复合材料跨尺度设计与集成开发	47	55	56	83	112	164
10	极端环境冶金过程强化技术	69	66	62	107	97	104
11	甲烷高效减排及高附加值化学品转化	231	205	154	192	255	340

应动力学模型，量化波动氢源对反应路径的影响机制，构建柔性化、低碳化的新一代绿色化工体系；③ 构建“绿电-绿氢-低碳化工”协同运行新模式，助推传统化工向“原料绿色化、过程低碳化、能效最大化”的现代产业形态转型升级。

(2) 新能源动力电池绿色循环利用

随着全球新能源汽车产业的飞速发展，动力电池的报废量逐年激增，预计到 2030 年，全球动力电池年退役量将突破 1 200 万吨。退役动力电池富含锂、镍、钴、铜等关键金属，同时其含有的有机电解液等毒害组分存在巨大的环境风险。动力电池的绿色循环利用是降低原生矿产资源消耗、支撑新能源产业绿色发展的关键环节。现有退役电池材料回收的主要方法包括火法冶金、湿法冶金和直接修复法，其中湿法冶金是产业化领域的主流方法。未来，新能源动力电池绿色循环利用的发展趋势将主要聚焦以下方面：① 基于人工智能与大数据技术，开发退役动力电池快速精准检测与智能化梯次利用技术；② 利用 AI 和机械臂联动控制技术，开发异构兼容的退役锂电池精准识别与智能拆解技术；攻克正负极精准分离、电解液绿色回收与高值化利用等关键技术；③ 在现有湿法工艺基础上，进一步开发废旧锂电材料全组分高效回收与新能源材料短流程制备技术，实现溶液体系循环与废水废渣零产出；④ 针对退役动力电池经精细分离后的正、负极废料，开发直接修复与升级再造技术，突破修复再生路线规模化应用的技术瓶颈。

(3) 工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品

电力和化工等行业每年排放大量以 CO₂ 为主要成分的工业废气，其资源化利用是实现“双碳”

目标的关键路径。然而，现有生物转化技术主要针对炼钢等过程产生的无氧、富含 CO/H₂ 的“资源型废气”，尚缺乏对体量更庞大、应用场景更广泛、含氧的以 CO₂ 为主的工业废气进行高效资源化利用的系统性解决方案，对于组分复杂的工业废气也缺少灵活的多模式生物利用策略。工业 CO₂ 废气多模式生物转化是一项旨在突破此瓶颈的战略技术。该技术通过多元化利用复杂组分的工业废气进行预处理和赋能，在拓宽原料来源的基础上，结合厌氧固碳途径（如 Wood-Ljungdahl 途径）和好氧固碳途径 [如 CBB 循环（Calvin-Benson-Bassham cycle）途径] 的固有特征和优势，最终目标是对于单一且价值较低的醇酸等大宗化学品实现产品矩阵的“高值化”升级。一方面，利用工业 CO₂ 废气高效合成可作为粮食补充的高价值生物蛋白；另一方面，通过复杂多样的微生物代谢途径，为医药和种植养殖行业等领域生产萜类等高价值化学品，构建真正具备经济竞争力的负碳工业新范式。

（4）高效稳定离子电池关键材料研发与结构设计

离子电池通过离子（Li⁺、Na⁺、K⁺ 等）在正负电极间的可逆脱嵌过程实现能量的转换与存储，是可再生能源和储能系统中高性能二次电池技术的重要研究方向。随着能源需求的增长，亟须研发高效稳定离子电池关键材料与结构，以提高能源利用率、储能性能、循环耐用性与安全性。目前，该方向的研究主要集中在以下方面：① 发展高离子电导率和高电化学稳定性的电解质材料；② 研究电极-电解质界面机理，开发长期稳定、高性能正负极材料，利用电极表面改性优化界面稳定性与循环性能；③ 建立精准的电-热耦合模型，优化电池内部传热，确保电池全生命周期内的可靠性；④ 通过集成的热管理系统监测离子电池使用过程，防止热量积累造成热失控爆炸，提高离子电池的安全性。未来的发展趋势将聚焦于开发高能量密度、长寿命、高安全性的新型材料体系（如固态电解质、高容量正负极），并结合 AI 驱动的智能制造，优化从材料制备到电池包集成的全流程，使电池系统具备预测性维护能力，从而大幅提升其性能、安全性和可靠性，加速其在新能源汽车、智能电网等领域的广泛应用和可持续发展。

（5）关键工程结构材料长寿命安全服役加速评价方法与寿命预测

重大工业装备、基础设施和尖端国防装备等是国民经济发展与国家安全的基石。其关键工程结构材料常因在力学载荷、焊接残余应力、化学介质侵蚀与热循环等多场耦合环境下服役，易发生局部快速腐蚀和环境断裂而过早失效。随着装备性能参数和材料强度的不断提升，此类问题愈发凸显，严重制约其服役寿命和可靠性。发展高效、科学的失效评测与寿命预测方法，是保障重大工程长周期安全运行、推动装备技术迭代的技术前沿。当前研发主要集中在 4 个方面：① 长周期环境断裂试验、失效机理研究与数据积累；② 复杂环境-载荷耦合作用下的失效理论与寿命建模；③ 多模式、跨尺度失效过程的数值模拟；④ 基于 AI 与多源异构数据的服役行为智能预测方法。现有方法仍严重依赖长周期试验，评测效率低、理论模型成熟度不足。未来的研究重点将聚焦于服役行为加速评价方法与全寿命预测理论的深度融合，构建融合高通量在线动态监测与数字孪生技术的智能评价体系，以实现关键材料与结构退变因素的快速识别、动态过程推演与智能预警，大幅提升寿命评估的效率与准确性。其将有力推动能源、

海洋工程、交通运输、智慧城市、国防设施等领域高品质制造与长寿命高可靠运行关键技术的发展。

(6) 高温复杂服役环境下辐射 / 热防护陶瓷涂层研发

高温复杂服役环境下辐射 / 热防护陶瓷涂层研发是支撑未来高超声速飞行器、新一代航空发动机与重型燃气轮机等大国重器性能跨越的核心材料技术，能在极端热-力-化耦合环境下实现高效隔热、热辐射屏蔽、多场环境（高温氧化、腐蚀、烧蚀等）防护，为金属、陶瓷基复合材料等热端部件防护涂层提供新材料体系，保障装备在高温 / 超高温环境下的服役可靠性。当前的研发主要聚焦3个方面：①发展 $>1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低热导率、低辐射透过率（辐射抑制）超高温复合陶瓷涂层，以解决传统涂层红外透过率高，透过的辐射能量直接加热基体致其超耐温极限的问题；②发展 $>2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高辐射型抗氧化烧蚀涂层，保障飞行器生存能力与武器打击精度；③发展高温红外辐射与屏蔽耦合热光学数据库以及智能涂层设计，构建新型高温涂层材料设计所需的关键“数据底座”和国际通用基准，提升工程适用性与国际竞争力。未来发展态势呈现出多学科深度交叉融合的特征：材料基因工程将加速新型低导热率、高熵、自愈合、光热调控功能涂层成分的发掘；人工智能与数字化将赋能涂层设计—制备—服役全周期的仿真与优化；极端环境原位测试与表征技术将成为验证与迭代的关键。

(7) 机器学习辅助新型聚合物材料发现与理性设计

机器学习辅助新型聚合物材料发现与理性设计正以数据驱动与机理融合为核心，推动材料研发范式发生根本性变革。近年来，基于神经网络和生成对抗网络的算法已能够高效建立聚合物“组成-结构-性能”的跨尺度映射关系，实现高性能分子的生成与逆向设计。当前该领域聚焦两大关键方向：一是提升模型的可解释性与泛化能力，融合物理先验知识与多模态数据，打破对特定聚合物体系的依赖；二是构建自动化闭环研发系统，集成机器人高通量实验、主动学习与自适应优化策略，显著降低实验成本并加速材料验证迭代。未来，机器学习驱动的高分子开发将沿“通用平台-专用模型”双路径演进：通用大模型致力于覆盖多类别聚合物性能预测；专用模型则深入嵌段共聚物自组装、生物医用材料降解机理等特定场景，实现功能定制化设计。随着生成算法与合成技术的深度融合，机器学习将全面赋能从单体筛选、聚合路径优化到材料应用全链条，推动高分子材料向智能设计新范式跨越。

(8) 低品位锂资源绿色提取

随着电动汽车渗透率的不断提高，制造动力电池所需的锂盐的市场需求快速增长。锂辉石、高品位盐湖卤水等常规优质锂资源储量有限，无法满足快速增长的锂盐市场需求。锂储量更大的低品位锂资源，如低品位盐湖、石油卤水、海水、锂云母、锂黏土、提锂尾渣、电解铝的电解渣等，具有重大的开发潜力。低品位锂资源锂含量低、赋存状态复杂、伴生杂质多，提锂难度大、成本高，对提锂技术提出更高的要求。针对固相锂资源，研究重点包括低能耗矿相转化技术、高选择性浸出以及尾渣利用技术；针对液相锂资源，研究重点包括新型分离介质开发（新型吸附剂、萃取剂、膜材料等）及其相应的配套工艺。未来的提锂技术，将朝着多技术耦合集成以及更加精准高效的方向发展，如吸附与电化学结合可能会取代单一的吸附或者膜分离技术，精准萃取提锂

一步反萃直接得到产品的技术有望取代需要多步转化的技术路线。这些新技术的发展将提高低品位锂资源提取效率，推动新能源产业不断升级。

(9) 高性能纤维增强复合材料跨尺度设计与集成开发

高性能纤维增强复合材料通过耦合微观（界面/材料）、介观（结构排布）和宏观（整体性能）各层级间的相互作用，实现性能与功能的协同优化，其开发旨在克服传统复合材料力学各向异性、功能单一及环境不可持续等局限，通过多尺度优化和集成工艺开发，在保持轻量化优势的同时，实现高韧性、功能化和可循环的协同突破，以满足复杂多变的应用需求。凭借其在航空航天、交通运输和民用工业等领域的广泛应用，高性能纤维增强复合材料已成为推动现代工业与科技发展的核心动力之一。目前，开发重点主要包括以下方面：① 发展多尺度建模与仿真技术，在设计域内对多种材料的分布进行优化，实现结构宏观拓扑、微观纤维方向和纤维疏密的并行优化设计；② 研究先进界面改性方法和精确制造工艺，以提升材料的韧性、功能性与可设计性；③ 开发纤维复合材料的低碳成型工艺，并深入理解损伤演化机制，实现材料性能与可持续性的协同突破。未来发展在于进一步实现智能化、多功能集成、极端环境适应性和全生命周期优化，以驱动材料在关键工程领域的颠覆性创新。

(10) 极端环境冶金过程强化技术

面对全球资源约束趋紧和“双碳”目标带来的严峻挑战，传统冶金工业高能耗、高物耗、高污染的发展模式已难以为继，亟需颠覆性技术变革。极端环境冶金过程强化技术，将不再局限于对现有工艺的优化，而是着力于创造全新冶金范式，通过引入超高温、超高压、强磁场、等离子体、超重力、微尺度等极端物理化学条件，从根本上改变物质反应热力学与动力学路径，旨在突破传统冶金工艺瓶颈，推动行业绿色可持续发展，成为革命性工程前沿。该领域重点研究方向包括：① 揭示极端物理场（如等离子体、超快变温等）下金属原子/分子的运动、传递与反应规律，建立极端环境冶金反应新理论；② 发展等离子体直接还原等非碳冶金新方法，摆脱对化石能源的依赖，从源头解决碳排放问题；③ 探索微流控、超重力等技术在湿法冶金及复杂物料分离中的应用，实现反应过程的超高效强化与微型化、集成化；④ 研究激光、微波等局部赋能的原生矿物精准解离技术，大幅降低选冶过程的能耗与物耗。极端环境冶金过程强化技术旨在颠覆传统火法/湿法及“造渣”的冶金理念，通过在原子/分子尺度上精准调控反应过程，并结合先进检测、数字孪生与人工智能等技术，实现从实验室工艺向工业化的可控放大，为构建绿色、低碳、高效的新一代冶金技术体系提供理论基础与核心技术支撑。

(11) 甲烷高效减排及高附加值化学品转化

甲烷是天然气的主要成分，既是全球能源体系中不可或缺的清洁高效能源载体，也是人为造成的仅次于二氧化碳的第二大温室气体，其20年全球升温潜势（GWP）为二氧化碳的82倍，对短期气候变暖的驱动作用尤为显著。随着全球气候变化加剧，甲烷减排已成为国际社会共识。开发甲烷梯级高效利用技术，有助于保障能源安全，推动工业领域绿色升级，实现高质量可持续发展。该领域未来的研究将聚焦以下方向：① 高效捕集技术——研发高效捕集材料（如功能性吸附剂、膜材料等），通过“材料性能优化-工艺参数耦合”的协同设计强化捕集效率，针对不

同场景的气源特性（如高浓度伴生气、煤矿瓦斯、生物沼气等）定制差异化的富集提纯方案，解决“低浓度甲烷难回收、高杂质甲烷难利用”的行业痛点；② 低成本高效催化剂——推动贵金属催化剂的减量化与性能强化（如单原子贵金属、合金催化剂等），在降低成本的同时提升催化活性；加速非贵金属催化剂（如稀土金属氧化物等）的研发与产业化，实现不同浓度甲烷混合气的高通量、低温、高选择性催化降解或转化；③ 新兴转化技术——发展生物转化（如嗜甲烷菌定向合成蛋白、生物甲烷制氢）、光催化转化、等离子体协同催化等新兴技术，进一步提升甲烷综合利用效率，推动技术从“实验室验证”向“工业化应用”跨越。

4.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

4.2.2.1 绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备

煤化工过程（如煤制甲醇、煤制烯烃等）依赖化石能源，碳排放强度高，亟需绿色转型。绿电（可再生能源电力）电解水制绿氢技术可实现零碳氢源供给，通过绿电-绿氢耦合煤化工，将绿氢作为原料或能源注入煤化工流程，替代传统煤焦气化或甲烷重整过程，可以从源头降低工艺碳排放。这一路径不仅是煤化工低碳化的核心解决方案，也是可再生能源消纳和氢能产业化的重要应用场景。实现绿电-绿氢-煤化工高效耦合的关键在于催化剂体系，其性能直接影响反应效率、产物选择性和过程经济性。由于绿氢引入将改变原料组成（如氢碳比）和工艺条件，可能导致传统催化剂活性下降或改变产物选择性，需重新设计适配绿氢体系的催化剂，实现绿氢高效利用与碳资源最大化转化。绿氢的间歇性、波动性会引起工况的频繁变换，对催化剂的动态工况耐久性和稳定性提出极高要求。因而，需要构建高效稳定的活性中心，分析其在复杂工况下的演变规律，建立非稳态反应动力学模型，创制动态自适应涉氢催化剂；针对波动特性与规律，建立进料气优化分配模型，动态调整氢碳比与流量，平抑剧烈波动。此外，攻克反应系统的柔性化与自适应控制，动态调节循环气量、分流比、反应温度及压力等关键参数，确保合成气组成始终维持在最佳催化反应区间，从而保护催化剂并维持高转化率，实现“绿电-绿氢-低碳化工”协同运行。

传统煤化工催化剂已发展数十年，以铜基甲醇合成催化剂、铁基费托催化剂等为代表，但均基于化石原料体系设计。随着绿氢概念的兴起，研究开始关注绿氢与煤化工的耦合潜力。从核心专利的主要产出国家来看，目前国内外进展主要集中在国内，远超美国、韩国、日本等（表 4.17）；因为技术竞争等因素，不同国家之间相互合作较少（图 4.10）。中国主要技术来源于中国神华煤制油化工有限公司、宁夏宝丰能源集团股份有限公司（以下简称宝丰能源）等（表 4.18），其中，宝丰能源的“太阳能电解水制氢耦合煤制烯烃”项目已实现部分绿氢替代，但催化剂仍沿用传统体系，未针对绿氢特性优化。因此，结合高通量计算与 AI 预测，加速催化剂组分筛选和构效关系解析，开发可响应 H_2/CO 比例变化的智能催化剂，通过结构自适应调控反应路径，实现特定产物高选择性成为目前研究趋势。主要机构间的合作网络如图 4.11 所示。

表 4.17 “绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备”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	750	73.82	1 505	25.98	2.01
2	美国	69	6.79	2 683	46.32	38.88
3	韩国	47	4.63	130	2.24	2.77
4	日本	32	3.15	125	2.16	3.91
5	德国	18	1.77	315	5.44	17.50
6	加拿大	11	1.08	196	3.38	17.82
7	印度	10	0.98	15	0.26	1.50
8	澳大利亚	8	0.79	189	3.26	23.62
9	英国	7	0.69	72	1.24	10.29
10	法国	7	0.69	65	1.12	9.29

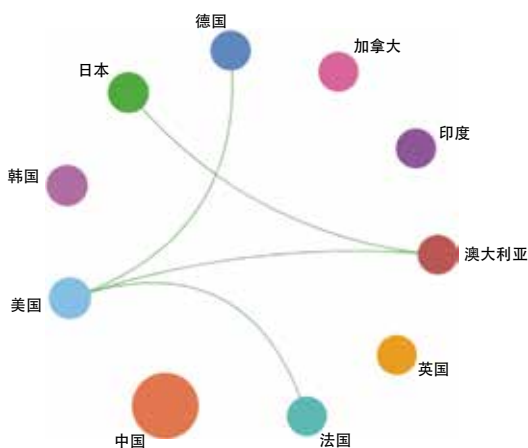


图 4.10 “绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 4.18 “绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备”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	中国神华煤制油化工有限公司	118	11.61	84	1.45	0.71
2	宁夏宝丰能源集团股份有限公司	41	4.04	50	0.86	1.22
3	国能包头煤化工有限责任公司	21	2.07	7	0.12	0.33
4	神华工程技术有限公司	20	1.97	6	0.10	0.30
5	中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司	19	1.87	74	1.28	3.89
6	神华集团有限责任公司	18	1.77	15	0.26	0.83
7	浙江天禄环境科技有限公司	18	1.77	7	0.12	0.39
8	中国石油化工股份有限公司	13	1.28	45	0.78	3.46
9	国家电网有限公司	10	0.98	6	0.10	0.60
10	中国科学院大连化学物理研究所	9	0.89	95	1.64	10.56

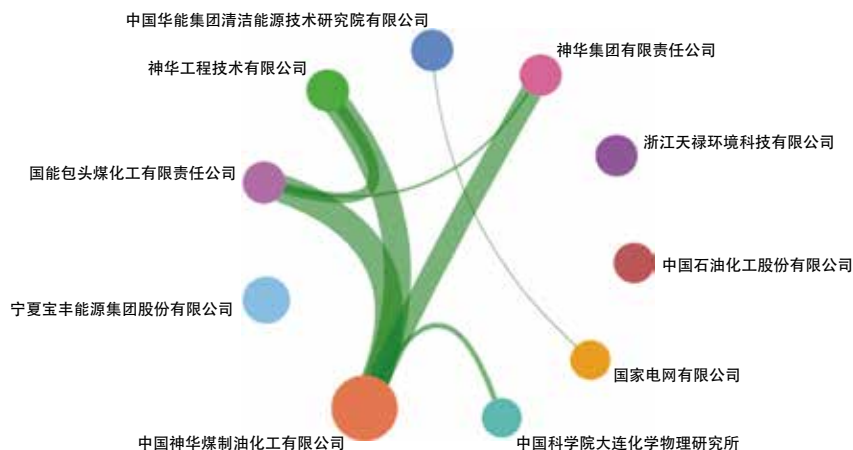


图 4.11 “绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备”工程开发前沿主要机构间的合作网络

绿电-绿氢耦合煤化工是重塑传统产业低碳竞争力的关键路径，而催化剂体系的设计与规模化制备是其中的技术制高点。当前需突破催化剂活性、选择性与稳定性的矛盾，并通过绿色、低成本的制备技术推动产业化落地。通过开发新型电极催化剂（如高熵合金、单原子催化剂等），提升电解槽在宽功率波动条件下的响应速度与效率稳定性，重点解决动态工况下电极催化剂的衰减问题，显著延长其使用寿命；同时研制金属-酸性双功能催化剂，实现煤分子中典型桥键的高选择性断裂，推动煤基资源向高附加值化学品和清洁燃料的定向转化，形成适用于规模化生产的氢-煤共转化工艺包，支撑“绿氢+煤化工”集成系统的稳定运行与工程示范。聚焦绿氢制取与资源高效加氢转化耦合技术体系构建，系统开展绿氢驱动、高效催化剂的开发和关键技术的攻关，深度融合系统优化和智能控制等多学科交叉优势，联合能源化工龙头企业，形成可复制推广的清洁能源化工转型解决方案，将为煤化工行业低碳变革提供关键技术支撑。

未来 5~10 年，绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备技术将聚焦于催化剂稳定性提升、催化效率优化及智能化系统融合，推动煤化工行业的低碳转型和绿色发展（图 4.12）。① 高熵合金材料通过多金属成分的合理组合，显著提高催化剂的活性位点和稳定性。未来，将结合电子缓冲机制，优化催化剂在动态工况下的稳定性和反应速度，突破现有催化剂在极端工况下的耐久性瓶颈，从而提升煤化工过程中的反应效率和稳定性。此举将为高效、稳定的煤化工催化剂体系奠定基础。② 通过金属-酸性双功能催化剂的协同作用，实现煤分子的定向重构与选择性断裂碳氢键。该技术将显著提高煤化工中煤资源的转化效率和选择性，推动煤化工过程向高效、低碳化方向转型。通过精确调控催化剂的金属与酸性位点的相互作用，实现煤分子在分子层面的高效转化和增值。③ 未来将实现绿电、绿氢与煤化工过程的协同运行，通过智能化控制系统实时调节反应条件，优化催化剂工作状态，提高能源利用效率并降低碳排放。通过系统优化，确保催化剂在不同工况下的高效运行，并推动煤化工产业向低碳化、智能化转型。智能化系统的融合将增强煤化工过程中绿色能源的有效应用，推动传统煤化工向绿色、智能化产业形态转型。此外，通过绿电驱动 CO₂ 资源化和高值化利用，将成为实现煤化工低碳转型的

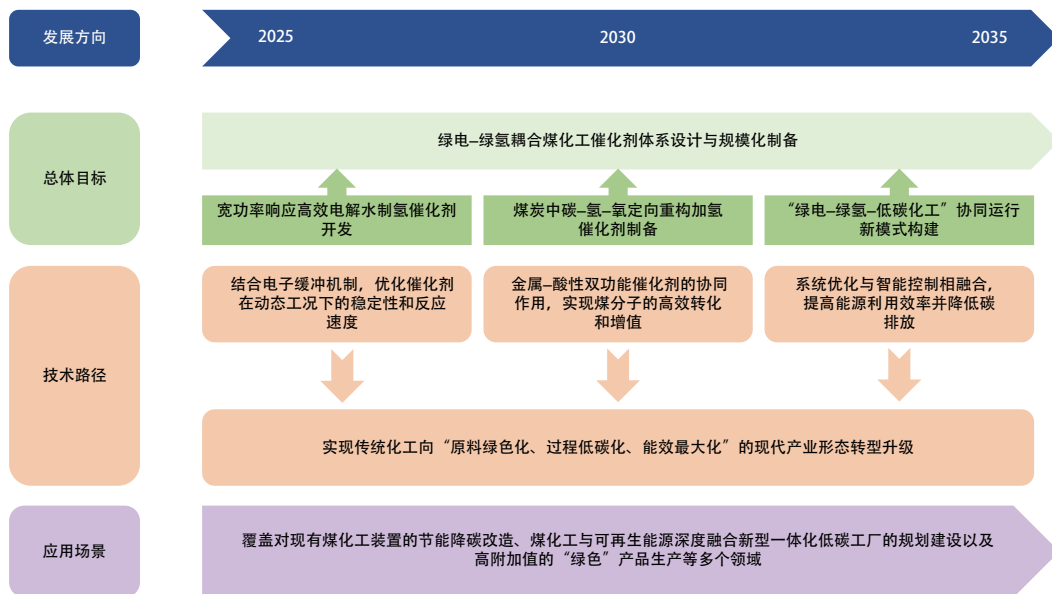


图 4.12 “绿电 – 绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备” 工程开发前沿的发展路线

关键路径。CO₂ 电解技术能够将二氧化碳转化为绿色合成气，进一步制备可持续航空燃料、甲醇、乙醇等液体燃料，这些燃料不仅可以替代传统石化燃料，还能显著减少碳排放，推动航空和运输行业的低碳化。CO₂ 电解还可用于制备高附加值氘代甲酸、氘代乙醇等化学品，这些产品在医药合成、同位素示踪和核磁共振分析等领域具有广泛应用。这些技术创新不仅能有效减少煤化工过程中 CO₂ 的排放，还能将其转化为高附加值的化学品和燃料，为实现碳中和目标、推动煤化工绿色转型提供强有力的技术支撑，同时为全球能源与化工产业的可持续发展提供重要保障。

4.2.2.2 新能源动力电池绿色循环利用

根据国际能源署的预测，到 2030 年，全球动力电池的保有量将达到 3 000 GW·h，同时全球动力电池的年退役量也将突破 1 200 万吨。退役动力电池中富含锂、镍、钴、铜等关键金属，其含量远高于原生矿产资源，相当于一座巨型的“城市矿山”。同时，相比于开采原生矿产，回收利用动力电池能有效减少碳排放。数据显示，再生镍、钴、锂的碳排放较原材料可分别降低 76%、84% 和 92%。此外，退役电池中还含有有机物、氟、磷等有毒物质，对环境的危害极为严重。因此，退役动力电池的绿色循环利用可有效降低原生矿产资源消耗、支撑新能源产业绿色发展，并助力“双碳”目标的实现。

近年来，退役新能源动力电池的回收受到全球范围内的广泛关注，中国政府高度重视退役动力电池的循环利用。2025 年 2 月，国务院常务会议审议通过《健全新能源动力电池回收利用体系行动方案》。会议指出，当前中国新能源汽车动力电池已进入规模化退役阶段，全面提升动力电池回收利用能力和水平尤为重要。美国 2021 年通过《基础设施投资与就业法案》，提供 1.92 亿美元专项资金支持电池回收技术研发。欧盟 2023 年实施的《电池与废电池法规》则对电池产

品中再生材料的比例以及全生命周期的碳足迹进行了严格的限定。

在全球范围内，动力电池绿色循环利用呈现东亚、北美、欧洲三足鼎立的技术创新格局，由表 4.19 可以看出，中国在新能源动力电池绿色循环利用领域的专利数量处于领先地位，其余专利由欧美、日本、韩国等发达国家和地区产出。表 4.20 则说明中国专利技术在校和企业均有产出，体现电池回收领域在产学研一体化上发展均衡。此外，中国积极参与全球技术交流，在以美国为核心的技术合作网络中占据一席之地，但仍需扩大国际影响力，国内外机构协作有待加强联结，进一步推动技术发展（图 4.13 和图 4.14）。

表 4.19 “新能源动力电池绿色循环利用”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	361	38.24	2 244	26.91	6.22
2	美国	241	25.53	3 014	36.14	12.51
3	日本	113	11.97	1 086	13.02	9.61
4	韩国	99	10.49	580	6.95	5.86
5	德国	29	3.07	340	4.08	11.72
6	加拿大	24	2.54	414	4.96	17.25
7	法国	18	1.91	75	0.90	4.17
8	英国	14	1.48	164	1.97	11.71
9	以色列	11	1.17	112	1.34	10.18
10	澳大利亚	6	0.64	40	0.48	6.67

表 4.20 “新能源动力电池绿色循环利用”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	LG 化学公司	36	3.81	213	2.55	5.92
2	广东邦普循环科技有限公司	30	3.18	227	2.72	7.57
3	丰田汽车公司	27	2.86	118	1.41	4.37
4	SK 创新公司	21	2.22	135	1.62	6.43
5	中南大学	13	1.38	101	1.21	7.77
6	伍斯特理工学院	12	1.27	244	2.93	20.33
7	艾森德元素公司	12	1.27	33	0.40	2.75
8	新日矿金属株式会社	11	1.17	270	3.24	24.55
9	通用汽车全球技术运营有限责任公司	11	1.17	100	1.20	9.09
10	巴斯夫欧洲公司	10	1.06	169	2.03	16.90

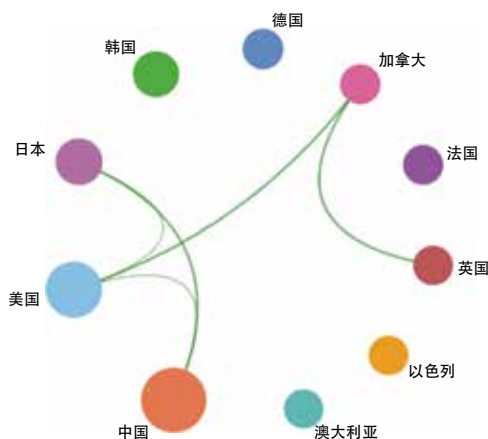


图 4.13 “新能源动力电池绿色循环利用”工程开发前沿主要国家间的合作网络

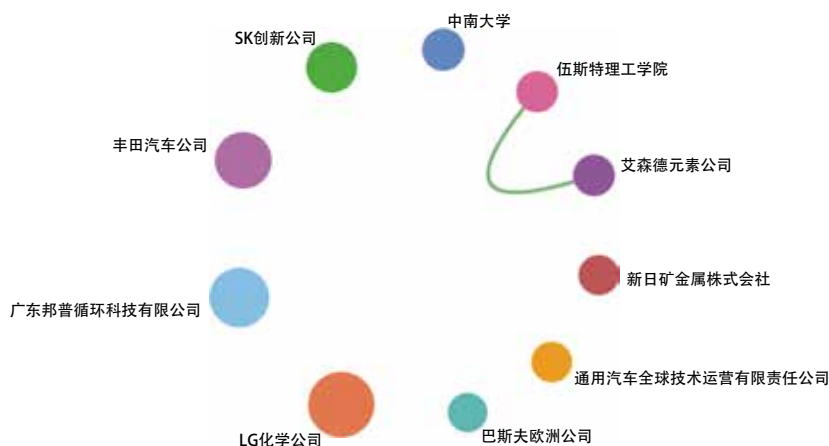


图 4.14 “新能源动力电池绿色循环利用”工程开发前沿主要机构间的合作网络

未来动力电池绿色循环利用产业将面临大规模技术更新和产能扩张。图 4.15 为“新能源动力电池绿色循环利用”工程开发前沿的发展路线，按各个技术环节具体为：① 基于人工智能与大数据技术，开发退役动力电池快速精准检测与智能化梯次利用技术，实现高精度、智能化、无损检测，提升梯次利用效率和安全性；② 利用 AI 与机械臂联动控制技术，开发异构兼容的退役锂电池精准识别与智能拆解技术；通过智能仿生机器人搭建图像识别控制系统，实现预处理工序全程无人化、自动化运行，达到拆解步骤精细化和筛分技术精准化，为后续湿法冶金或修复再生流程提供高纯度极粉；③ 现有的三元与磷酸铁锂黑粉的湿法工序均存在试剂消耗量大、流程冗长、废水产出量大等共性问题，需开发高选择性与可循环的浸出体系，并研发短流程制备电池前驱体、低浓度废液靶向提锂、硫酸钠高值转化消纳等技术；④ 精细化分选将大幅促进修复路线的发展，开发多源异构废料的均一化修复、石墨及硅碳材料的深度净化与低成本修复、升级再造制备高性能电池材料等技术，实现修复再生路线的大规模产业化应用；⑤ 研发钠离子电池、固态电池、锂硫电池等新型电池体系的循环利用技术。

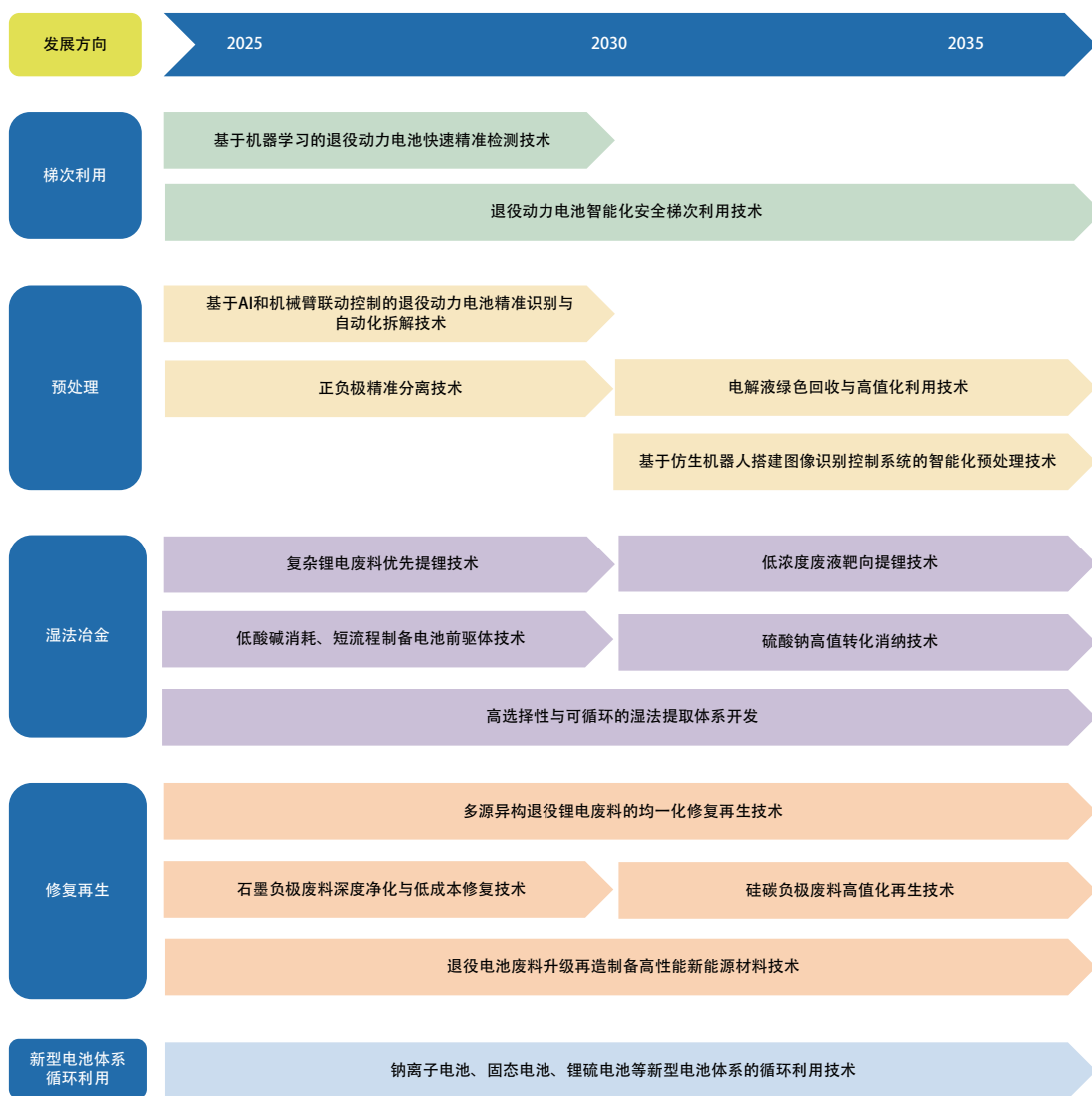


图 4.15 “新能源动力电池绿色循环利用”工程开发前沿的发展路线

4.2.2.3 工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品

在全球“双碳”战略背景下，工业 CO₂ 废气的资源化利用面临一个核心的结构性挑战。工业 CO₂ 废气主要可分为两类：一类是来自炼钢厂等高炉、转炉的富含 CO 和 H₂ 等高能量还原性组分且不含氧的工业 CO₂ 废气，是一种相对易于利用的“资源型尾气”；另一类是前一类气体经加氧燃烧处理后，或直接来自电厂烟道气的 CO/H₂ 含量极低、以 CO₂ 为主的含氧无价值废气。后者体量更大，占工业尾气总量的 60% 以上，区域分布广泛，现有研究中少有行之有效的处理技术。基于此，亟待提出超越单一技术路线、实现厌氧与好氧过程整合与协同的多模式生物转化的策略，综合利用这两类工业 CO₂ 废气，并匹配多元的需求和场景。厌氧模式是当前处理第一类“资源型尾气”的主流商业化技术。以朗泽科技（LanzaTech）及其在中国的合作伙伴首钢朗泽以及巨鹏生物等为代表，利用杨氏梭菌（*Clostridium ljungdahlii*）等厌氧微生物，已逐步实现万吨级

燃料乙醇和菌体蛋白的生产，显示了工业 CO₂ 废气生物转化的巨大潜力。而好氧模式主要是利用小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 等好氧或兼性光能异养微生物，直接在含氧环境下处理以 CO₂ 为主的工业废气。

在产品方面，以燃料乙醇为代表的大宗化学品，其市场价值难以完全覆盖高昂的固定资产投资和运营成本，极大地限制了技术路线的普适性和经济竞争力。多模式生物转化，其核心目标不仅在于实现对体量更庞大的工业 CO₂ 废气的利用，更在于驱动产品组合向高附加值转化的战略性升级。一方面利用 CO₂ 高效合成高价值蛋白，响应保障国家粮食安全的战略意义；另一方面通过多元化的微生物代谢途径生产更为复杂的高值化产品，以满足农业、食品、医药、种植养殖等领域对高品质原料的需求，推动相关产业的升级和附加值提升，为 CO₂ 的资源化利用构建真正可持续发展的商业模式。

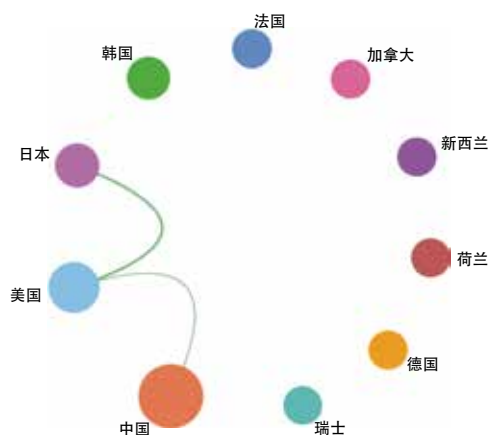
专利和创新生态的全球分布进一步映射出各国在该领域的竞争格局（表 4.21、表 4.22 和图 4.16）。中国以 266 件核心专利公开量（占比为 45.78%）位居全球首位，专利产出主要集中在高校、科研院所和新兴企业，显示出广泛的技术布局和政策推动力。然而，从专利平均被引数和技术原创性看，美国专利总数（131 件）虽不及中国，但以 3 073 次被引和 23.46 的平均被引数长期主导全球技术影响力。日本、加拿大、新西兰、荷兰等国家在部分细分方向上展现出高质量原创技术，尤其新西兰等国在少数高影响力专利上的突破尤为突出。机构层面，朗泽科技、基弗迪、吉诺马蒂卡等国际企业凭借高平均被引数和专利影响力成为技术与产业化主力，国际头部机构通过跨国合作和知识产权协同，加速了技术的全球扩散与落地。中国本土企业与高校科研院所等（如巨鹏生物、同济大学、大连理工大学）在专利数量上表现活跃，但整体影响力与国际龙头仍存在一定差距，在未来有较大的发展空间。未来，随着技术平台持续完善和应用场景不断拓展，跨区域、跨领域的协同创新将进一步提升多模式生物转化体系的工程化水平和全球影响力。

表 4.21 “工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品”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	266	45.78	561	11.43	2.11
2	美国	131	22.55	3 073	62.64	23.46
3	日本	62	10.67	523	10.66	8.44
4	韩国	47	8.09	97	1.98	2.06
5	法国	12	2.07	64	1.30	5.33
6	加拿大	10	1.72	190	3.87	19.00
7	新西兰	9	1.55	422	8.60	46.89
8	荷兰	8	1.38	108	2.20	13.50
9	德国	8	1.38	49	1.00	6.12
10	瑞士	4	0.69	18	0.37	4.50

表 4.22 “工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品”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	朗泽科技公司	33	5.68	937	19.10	28.39
2	基弗迪公司	13	2.24	563	11.48	43.31
3	积水化学工业株式会社	10	1.72	40	0.82	4.00
4	伊欧根公司	8	1.38	132	2.69	16.50
5	吉诺马蒂卡公司	7	1.20	722	14.72	103.14
6	巨鹏生物(香港)有限公司	5	0.86	147	3.00	29.40
7	健康生物株式会社	5	0.86	15	0.31	3.00
8	同济大学	5	0.86	13	0.26	2.60
9	韩国科学技术研究院	5	0.86	10	0.20	2.00
10	大连理工大学	5	0.86	7	0.14	1.40

图 4.16 “工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品”工程开发前沿主要国家间的合作网络

CO₂ 生物转化技术从实验室向大规模产业化过渡面临诸多挑战,包括气液传质效率低下、能量利用效率不高、产物合成效率偏低等问题。展望未来 5~10 年(图 4.17),解决这些问题对全面提升反应器产能、系统长期运行稳定性以及整体工业技术经济可行性至关重要。首先,通过优良微生物菌株的筛选与代谢工程改造,开发出性能稳定、效率优异的工业级生物催化剂。这一适应性工程需确保菌株能在工业生物反应器的苛刻环境中(具有高细胞密度、高剪切应力、高产物浓度等特征)实现高稳定性与高效率运行。在此基础上,工艺优化需转向微观尺度的气液传质强化以及生物转化过程的智能调控,这是解决传质与效率瓶颈的核心工程策略。通过反应器设计与过程强化技术,可为工程菌株营造最优操作环境,确保气态底物被高效捕获与利用。同时,采用先进的在线监测与智能控制系统,对整个复杂生物过程进行精准调控与动态优化,这对保障长期运行稳定性、提升反应器产能至关重要,也是让工程菌株的理论潜力在大规模工业装置中充分发挥的关键。最后,为进一步提高整体系统效率与经济性,采用“多模式策略”,即通过厌氧与好氧微生物的顺序分工及协同利用实现高效转化。这一策略类似于构建一条高效微生物生产线:不

同功能的微生物在各自最优环境中协作，共同分解复杂的合成任务。该系统集成策略不仅能有效提升能量利用效率与最终产物合成效率，还可构建灵活的产物升级矩阵。依托这一集成框架，反应器产能与长期运行稳定性得到系统性提升，最终通过推动高附加值产品生产及实现工业价值链的绿色转型，确保该技术具备整体工业经济可行性。随着技术的逐步成熟，应用场景将覆盖绿色化工、生物材料、食品蛋白、医药健康、农业生物肥料等多个领域，推动传统化工、能源、材料产业链的绿色升级。随着技术突破和产业链完善，以 CO₂ 为主的工业废气的多模式生物转化有望成为“负碳制造”与绿色循环经济的支撑力量，引领全球绿色制造和可持续发展新纪元。

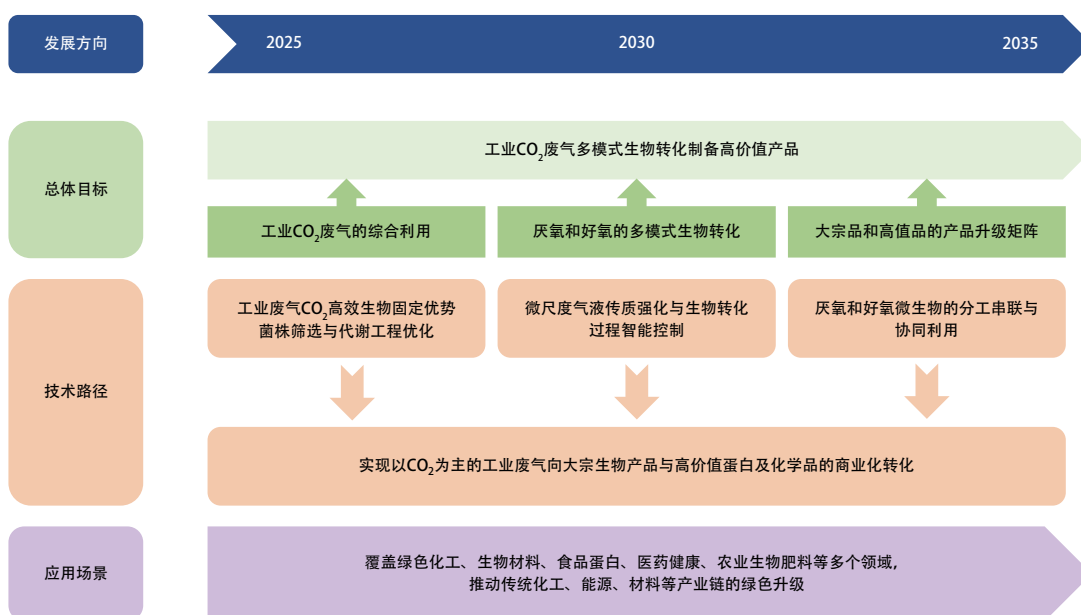


图 4.17 “工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品” 工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：谭天伟 元英进

工作组：

联络指导：马新宾 何朝辉 涂 璇

项目秘书：程路丽 黄耀东 李艳妮 朱晓文

执笔组：

陈 霄 程 驰 侯军刚 胡国平 胡平安 胡文吉豪 黄守莹 康 巍 李茂帅 李 政

李兴亚 刘东 刘付朋 刘智勇 麦立强 牛慧 王聪 王海鹰 王亚明 魏奎先
薛闯 颜旭 姚昌国 张家靛 张磊 张生 祝薇 朱晓文

数据分析组:

北京航空航天大学

邓元 王聪 祝薇 包书骋 胡少雄 黄悦 邱天 张青青 周曼

北京化工大学

高彦静

北京科技大学

刘智勇 张家靛

重庆大学

党杰

大连理工大学

陈霄 程驰 侯军刚 姜晓滨 康巍 牛慧 彭冲 薛闯 杨赫 于畅

张磊 张新富

哈尔滨工业大学

胡平安 李达鑫 李洋 王亚明 肖海英 周玉

江西理工大学

刘付朋

昆明理工大学

魏奎先

天津大学

柴立元 黄守莹 李茂帅 王娜 张生

郑州大学

李永立

中国宝武中央研究院

代铭玉 孙竹 王媛 姚昌国

中国科学技术大学

李兴亚 刘东

中国科学院赣江创新研究院

陈庆军 胡国平 王路 张绘

中国科学院过程工程研究所

李政 阎文艺

中南大学

胡文吉豪 刘恢 王海鹰 颜旭

