

三、化工、冶金与材料工程

1 工程研究前沿

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 1.1.1 和表 1.1.2。其中，“低碳节能冶金反应器设计与流程优化”“用于高效电化学储能的集成式一体化电极研究”“超分散单原子合金催化材料的高效制备及催化机制”是专家推荐的前沿；其他前沿则是基于数据由专家研判而来。电催化、单原子催化和本征安全电池相关主题，一如既往，仍然是科研人员热衷的方向，篇均被引频次超过 200.00（表 1.1.1）。从核心论文逐年发表数量来看，所有入选的前沿均呈下降趋势（表 1.1.2）。

（1）可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料

可再生能源驱动生物固碳是利用光能、电能等可再生能源替代化学能作为生物固碳途径的能量和还原力来源，用于生产生物基化学品、清洁燃料以及生物绿色材料的过程，可以进一步发挥生物固碳的优势。现阶段的相关研究多着眼于光 / 电驱动的体外多酶固碳和光 / 电驱动的全细胞固碳，主要集中于：① 生物固碳新途径的开发；② 新型生物相容性光 / 电催化材料的制备；③ 生物催化模块与光 / 电催化模块的耦合适配工程。可再生能源驱动生物固碳具有原料绿色化、过程绿色化和产品绿色化的特征，然而该技术的总体能量效率不高，面向工业化应用时仍存在一些技术瓶颈。未来，应着重于以下几个方向：① 开发原位表征新技术，阐明生物催化剂与人工催化剂的能量交流机制，加深对二者耦合过程的认知；② 开发高效率、高适应性的优质生物催化剂，实现核心酶和核心菌种的技术自主化，提高产品的产量；③ 针对原料供给、

表 1.1.1 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	可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料	92	13 644	148.30	2018.9
2	冶金流场混沌非线性强化技术研究	120	9 337	77.81	2018.9
3	面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系	107	25 965	242.66	2018.8
4	反应条件下异相催化剂的分子 / 原子尺度原位表征	76	9 481	124.75	2018.7
5	低碳节能冶金反应器设计与流程优化	82	3 788	46.20	2018.5
6	极端低温环境用特种合金的理性设计与制备	148	13 642	92.18	2018.7
7	用于高效电化学储能的集成式一体化电极研究	109	14 356	131.71	2018.4
8	高强高韧低密度钢研究	59	3 246	55.02	2018.4
9	超分散单原子合金催化材料的高效制备及催化机制	61	13 127	215.20	2019.0
10	面向离子分离的选择性限域传质膜	81	9 394	115.98	2019.0
11	本征安全电池体系实现可再生能源存储	131	31 898	243.50	2018.6

表 1.1.2 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料	16	21	26	17	12	0
2	冶金流场混沌非线性强化技术研究	26	25	30	21	15	3
3	面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系	20	26	29	22	8	2
4	反应条件下异相催化剂的分子 / 原子尺度原位表征	20	18	17	12	6	3
5	低碳节能冶金反应器设计与流程优化	23	28	13	9	7	2
6	极端低温环境用特种合金的理性设计与制备	43	25	37	23	16	4
7	用于高效电化学储能的集成式一体化电极研究	37	21	28	16	7	0
8	高强高韧低密度钢研究	23	10	13	6	7	0
9	超分散单原子合金催化材料的高效制备及催化机制	8	13	17	14	9	0
10	面向离子分离的选择性限域传质膜	10	20	22	22	6	1
11	本征安全电池体系实现可再生能源存储	33	32	30	28	8	0

过程强化到产品分离工程，开发工业化高端反应器和分离介质，建立成熟的装备与技术体系。

(2) 冶金流场混沌非线性强化技术研究

冶金过程中流动-传递-反应蕴含着复杂的非线性动力学机制和多尺度时空特征，这些特征对冶金反应器的设计、优化和运行提出了严峻挑战。冶金流场混沌非线性强化技术结合了流体力学、混沌理论和非线性科学的知识，旨在揭示冶金反应器中流动-传递-反应耦合与放大规律，阐明流体混沌特性、介稳流场结构失稳与化学混沌强化的内在联系。该技术的研究主要通过构建混沌流与温度场-流场均匀性关联模型，精准描述混沌流与温度场-流场均匀性之间的关系；基于混沌混合特性与场均匀性的耦合机理，以及流场多尺度结构的形成、输运和转化过程，通过调控气泡群的混沌行为，实现对热质传递效率的提升。这一技术为冶金炉窑中复杂多相流型的拓扑耦合提供了新的调控思路，可高效解决冶金炉窑强化过程流场-温度场难以协同以及气泡群搅动热质传递的强化效果无法精确描述的难题。未来，该理论有待在极端及超常规冶金、装备大型化、智慧冶金等方面进一步发展。

(3) 面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系

在整个能源和环境体系中，二氧化碳(CO₂)绿色高效转化与利用是实现低碳能源高效转化的核心。其中，碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术已逐步成为目前应对气候变化，实现“碳达峰、碳中和”目标(简称“双碳”目标)的关键技术。目前，太阳能、风能等可再生能源提供的绿电驱动CO₂催化转化，不仅可以解决CO₂过度排放的问题，还可以实现间歇性电能直接转化为化学能，对实现碳平衡和优化能耗结构具有重要意义，受到广泛关注。CO₂电催化转化的研究主要集中在以下几个方面：①利用原位光谱技术监测CO₂还原反应(CO₂ reduction reaction, CO₂RR)中的关键中间产物，同时结合理论计算构建CO₂催化转化过程中的反应网络；②设计开发高性能电催化剂，调控优化催化剂结构，研究催化剂结构与CO₂RR性能之间的构效关系；③合理设计优化电极结构以及调节整个电解反应器来控制反应体系的运行，利用其模块化特点实现调控优化，使得各指标达到工业化应用要求。CO₂RR的进一步发展需要提高电催化剂的长期连续运行稳定性，并扩大CO₂电解槽的规模，此外，还需要确定其实际应用

的目标、产品的经济性和市场供需。最终的产品分离和过剩的 CO_2 原料气体与电解液的回收成本也需要进一步设计管理。

(4) 反应条件下异相催化剂的分子 / 原子尺度原位表征

催化剂结构以及表界面特性是催化研究的基本问题，直接关联催化剂性能，也为理论模拟和预测提供结构模型的直接依据。催化活性位点及其与周边环境（配位、外场）在化学反应中的时空动态演变规律是理解与设计原子精准新型催化剂的关键。而厘清这些规律的前提是对于物质表界面结构与化学在超高时空分辨率下的表征，尤其是在模拟反应条件下的原位表征。目前，对于反应条件下异相催化剂的分子 / 原子尺度原位表征技术包含原位电子 / 扫描探针显微技术、空间分辨的振动（红外 / 拉曼）原位光谱技术以及基于 X 射线的光电子能谱 / 吸收光谱等原位技术。其研究的主要内容包括：① 通过观测催化剂原子结构在活化以及反应过程中的动态变化，揭示与反应关联的结构活性位点，指导催化剂的精准设计与制备；② 在分子尺度揭示催化剂表界面反应物吸附和解离规律，确定中间产物物种与时空分布规律，厘清反应转化路径；③ 将多种原位技术联用并利用精准设计的模型催化剂进行性能关联，厘清关键化学反应过程中结构与化学活性位点。

(5) 低碳节能冶金反应器设计与流程优化

超大型 / 特种冶炼装备，在尺寸放大、结构调整、工艺选配等过程中，常常因缺少理论依据导致设备放大失真、工况多变条件下运行失稳、理论模型与实际装备的放大失配等问题，从而造成冶金反应器及冶炼流程能耗高。其运行过程涉及复杂的精矿 - 熔体 - 富氧射流等多相，电 - 磁 - 流 - 热 - 颗粒 - 组分等多场，微观反应 - 介观运动 - 宏观操作多尺度体系间的协同耦合，亟需低碳冶炼装备尺寸放大设计 / 工艺精细优化的动力学试验与模拟仿真方法。未来的相关研究方向包括：① 研究冷态模拟多相体系流场定量可视化表征新方法，针对基于相似性理论建立的大型装备冷态试验模型，采用流场特征高速动态记录、流场示踪粒子图像测速（particle image velocimetry, PIV）等可视化分析技术，结合图像解析处理、混合时间测定、混沌数学分析等定量测量技术，实现非线性流场混合程度的定量表征；② 研究气 - 液 - 固多相体系中电 - 磁 - 流 - 热 - 颗粒 - 组分多场耦合机制，包括实际冶金反应器内的各种传递过程和冶金化学反应规律，模拟和解析单一及多个关联反应器的协同耦合规律，从而实现优化完善既有流程，并开发新的低碳节能冶金工艺流程和反应器。

(6) 极端低温环境用特种合金的理性设计与制备

清洁能源、航空航天等装备的创新与发展是世界各国争相抢占的制高点。这些装备中的关键部件常面临极端低温服役环境，如磁约束核聚变堆的超导线圈（约 4 K）、航天液氧液氢发动机（约 20 K）、高雷诺数风洞（约 77 K）等，这对所涉及的特种合金的服役性能提出了异常严格的要求。目前，国内外极端低温环境用特种合金存在包括绝对性能不足、组织和性能调控机制不明、制备工艺不成熟等多个问题，在很大程度上限制了人类飞行器制造技术水平和清洁能源开发利用能力的提升。因此，极端低温环境用特种合金的理性设计与制备中的各个阶段尚有很多科学问题待深化研究，主要集中于以下几个方面：① 极端低温服役过程中相结构稳定性的精准调控，主要包括特种合金在极端低温服役条件下奥氏体层错能等的影响机制，获得有效调控相稳定性的手段，并阐明其对于不同低温服役性能的作用规律，进而指导合金成分设计与制备加工过程；② 极端低温特种合金冶炼 - 锻造 / 轧制 - 热处理 - 焊接一体化过程中的多相组织演变及强化机理，包括极端低温特种合金全流程制备条件下的正 / 逆相变原理、元素配分机制、析出过程调控

机理，以及低温变形机制，最终建立典型工艺过程、多相组织构成与力学性能之间的构效关系；③针对复杂低温环境，需研究强腐蚀、宽温域、交变载荷等多场耦合服役条件下的损伤失效模式与机理，主要包括多重力学物理性能在低温下的相互匹配机理，明晰热力疲劳、磨损、腐蚀等耦合作用下的低温损伤失效模式机理，建立合金服役性能与失效模式机理之间的构效关系，并反馈指导特种合金设计与制备工艺优化。

(7) 用于高效电化学储能的集成式一体化电极研究

锂离子电池占据了电化学储能领域的绝大部分市场份额，但能量密度及功率密度亟须提高，以满足日益增长的社会发展需求。开发兼具高比能、高功率、高稳定、长寿命、高安全和低成本的新一代锂电池的关键不仅在于对电极材料电化学储能机制有清晰认知，还需在电芯组分以及电极整体结构层面进行系统设计。因此，具有多种组成与结构优势的集成式一体化电极的设计研制在近些年获得了广泛关注。这种新型电极不仅具有优异的离子-电子混合传导性，并可免除黏结剂等非活性组分的使用，适宜的孔隙结构还可以使其在充放电过程中保持高结构稳定性。目前，该方向的研究主要集中于以下几个方面：①先进的电极结构设计；②简单的电极合成策略；③集流体的设计、选择及与活性物质的复合；④活性物质面载量及体积密度的提升；⑤电极整体导电性的提升；⑥正、负电极的匹配即全电池的构筑；⑦柔性电极、厚电极等的开发；⑧电极的工作机制即电化学反应机制的揭示等。实现具有高活性物质载量的集成式一体化电极结构设计及其简单、高效制备是该领域研究亟须解决的技术瓶颈。

(8) 高强高韧低密度钢研究

低密度钢，又称轻质合金钢，是通过向钢中添加 Al、Mn、C 等轻质元素从而使合金密度降低的一种轻量化材料。研究表明，每加入 1% 的 Al，可使钢的密度降低 1.3%。低密度钢在车辆、船舶、航空航天及军事领域的轻量化与安全服役等方面有着广泛的应用前景。21 世纪初，德国马克斯·普朗克科学促进会研究指出，Fe-Mn-Al-C 体系高强高韧低密度钢具有优异的减重潜力，带动了汽车用高强高韧低密度钢的研究热潮。2015 年，韩国浦项公司对轧制低密度钢进行了工业化试制；2022 年，中国兴澄特种钢铁有限公司也开展了高强高韧低密度钢板的工业化试制；此外，日本 JFE 公司、制铁公司，德国蒂森克虏伯公司，中国宝武钢铁集团有限公司、鞍山钢铁集团有限公司等企业也开展了低密度钢的研究和试制工作。但是由于制造成本、表面质量、应用技术等方面的原因，制约了高强高韧低密度钢的进一步开发和应用。目前，国内外对高强高韧低密度钢的研究以 Fe-Mn-Al-C 体系低密度钢为主，主要研究方向包括单一铁素体钢、铁素体基双相钢、奥氏体基双相钢和奥氏体钢四大类，在 Fe-Mn-Al-C 体系低密度钢的成分设计、组织调控、服役性能等方面仍然存在很多科学问题有待深入研究。

(9) 超分散单原子合金催化材料的高效制备及催化机制

单原子合金催化剂属于单原子催化剂的子类，是将一种活性金属（常为贵金属）以单原子形式高度分散于第二金属中（常为非贵金属）制备得到的，此类催化剂具有极高的贵金属原子利用效率、高反应活性和选择性等独特优势，近年来备受关注。从 2012 年 Sykes 等提出了单原子合金 [Pd₁/Cu(111)] 这一概念开始，各国研究者探索了多种单原子合金催化剂制备方法，并将其逐步应用于燃料电池、电解水、选择性加氢以及 CO 氧化等催化反应中。目前，关于单原子合金催化剂的研究主要聚焦在三个方面：①探索简单有效、可控调节活性位和周围原子之间相互作用且能实现原子对高配对比例的方法；②结合原位精细结构表征分析方法和理论计算方法在原子水平上明确单原子合金结构与催化性能之间的构效关系及催化机理，为单原子合金催化剂的理性设计提供理论依据；③开发出贵金属载量可调的单原子合金催化剂宏量制备方法，搭

建其进行工业应用的关键桥梁。超分散单原子合金催化剂以其低贵金属载量、高催化活性、选择性和稳定性，将为工业催化发展提供重要引擎。

(10) 面向离子分离的选择性限域传质膜

离子选择性分离是膜分离技术的重要应用领域，其在盐湖提锂、盐水精制、高盐废水资源化和液流电池等领域均有一定程度的应用。传统聚合物膜材料性能受到“博弈效应”的制约，通量和选择性无法同时提升。限域传质膜因在亚纳米尺度上构建的人工通道具有独特的质量传输特性，在这一方向上有着可观的前景。目前，对于选择性离子限域传质膜的研究主要有两个方向：一是分离机理的基础性探究，尝试从通道几何结构及界面物理化学特性等方面探究微观尺度下传质动力学与选择性的影响因素，以助推膜的设计；二是从膜材料入手，通过设计诸如共价有机框架(COF)、金属有机框架(MOF)等具有不同尺寸、官能团、界面电荷的材料来实现高速传质。未来，将实现限域通道中的原位可视化表征，建立理想传质模型与实际分离膜性能间的有效连接，通过制造具有更高传质速率和选择性的限域传质膜，完成从实验室规格到规模化生产的过渡，实现产业化发展。

(11) 本征安全电池体系实现可再生能源存储

规模化储能电站对电池安全性要求严苛。本征安全电池是一种具有内在安全机制的电池技术，在电池内部结构和材料上实现安全性能的提升，能够有效预防和控制热失控、爆炸和漏液等危险情况。当前，本征安全电池研究领域正在不断进行技术创新和突破。研究者致力于开发新型材料、优化电池结构设计，以提高电池的本征安全性能和电化学性能。例如，设计添加阻燃剂以有效抑制电解质的燃烧，开发本征阻燃型聚合物电解质以提升固态电池安全性，抑制锂枝晶以提升锂金属负极安全性。本征安全电池的研究方向主要包括以下方面：一是提高电化学稳定性，防止在充放电过程中发生副反应、电解液分解或电极材料不稳定等问题；二是提高电池在高温环境的热安全性，包括开发不可燃(或阻燃)电池材料、升级电池热管理系统，防止过热引发电池失控、燃烧或爆炸等安全问题；三是提高电池的机械稳定性，抵抗外部冲击及电池内部应力，避免电池破裂或内部短路等安全隐患；四是采用固态电解质、水系电解液等替代传统的有机电解液，以提高电池的安全性和稳定性，并解决有机电解液存在的燃烧、泄漏等问题。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料

如今，世界各国相继颁布了针对绿色生物制造的国家发展战略。中国的《“十四五”生物经济发展规划》中指出，要推动能源产业与重要工业产品制造与生物技术深度融合，向绿色低碳、无毒低毒、可持续发展模式转型。美国公布的《美国生物技术和生物制造的明确目标》中计划在未来9年内通过生物转化实现千兆吨级的CO₂固定，每吨的成本将低于100美元。利用可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成生物基化学品、生物能源及材料能实现全流程低碳化，是未来生物制造的发展重点，将颠覆原有的产业格局，降低人类对化石能源的依赖，带动未来经济绿色发展。在“双碳”目标下，自2020年提出“第三代生物炼制”以来，以光/电催化耦合生物催化为代表的研究快速发展，多样的途径和机制得到了开发。生物催化剂既能直接利用光/电催化材料提供的电子实现固碳，也能利用甲酸、乙酸、甲醇等CO₂还原的初级产品进行发酵。另外，得益于合成生物学与酶技术的进步，可再生能源驱动生物固碳的产物谱系越来越丰富，包括

L-乳酸、二羟基丙酮、乙醇酸等原料化学品和聚乳酸（PLA）、聚羟基脂肪酸酯（PHA）等生物基可降解塑料在内的一系列产品，能够以 CO₂ 为唯一碳源被生产出来。然而，与传统化工固碳产业相比，可再生能源驱动生物固碳仍存在一定的效率瓶颈，主要解决办法包括：① 挖掘和改造高活性的酶和菌种，理性设计更加高效的固碳生物途径；② 提高可再生能源的利用率，开发生物亲和、低毒性的光/电催化材料；③ 优化光/电催化模块与生物催化模块的热力学和动力学适配，或将采用分离解耦策略，保证各模块的最佳效率。

近年来，“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”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 1.2.1 与表 1.2.2。其中，41.3% 的核心论文来源于中国（主要产出机构为中国科学院和天津大学），其次分别是美国、印度、韩国和德国，占比均在 10% 以上。图 1.2.1 和图 1.2.2 分别显示了主要国家和机构间的合作网络，全球科学家在该领域建立了广泛的合作，中国与美国合作最多。由表 1.2.3 和表 1.2.4 可以看出，施引核心论文的主要产出国家中，中国占比高达 52.02%；施引核心论文的

表 1.2.1 “可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”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	38	41.30	5 087	133.87	2019.0
2	美国	24	26.09	3 911	162.96	2018.7
3	印度	16	17.39	2 676	167.25	2019.3
4	韩国	10	10.87	1 708	170.80	2018.4
5	德国	10	10.87	1 114	111.40	2019.2
6	澳大利亚	9	9.78	1 480	164.44	2019.0
7	英国	8	8.70	922	115.25	2019.0
8	沙特阿拉伯	5	5.43	871	174.20	2019.0
9	以色列	4	4.35	635	158.75	2019.0
10	加拿大	4	4.35	538	134.50	2018.0

表 1.2.2 “可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”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	苏里尼大学	5	5.43	707	141.40	2020.0
2	中国科学院	5	5.43	536	107.20	2019.4
3	哈佛大学	4	4.35	780	195.00	2018.5
4	加利福尼亚大学伯克利分校	4	4.35	635	158.75	2019.0
5	剑桥大学	4	4.35	520	130.00	2018.8
6	劳伦斯伯克利国家实验室	3	3.26	538	179.33	2018.7
7	韩国科学技术院	3	3.26	459	153.00	2018.0
8	建国大学	3	3.26	361	120.33	2018.3
9	天津大学	3	3.26	360	120.00	2018.7
10	弗吉尼亚理工学院	3	3.26	290	96.67	2019.0

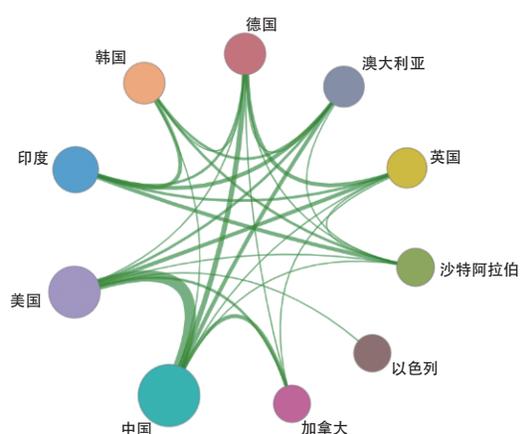


图 1.2.1 “可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿主要国家间的合作网络

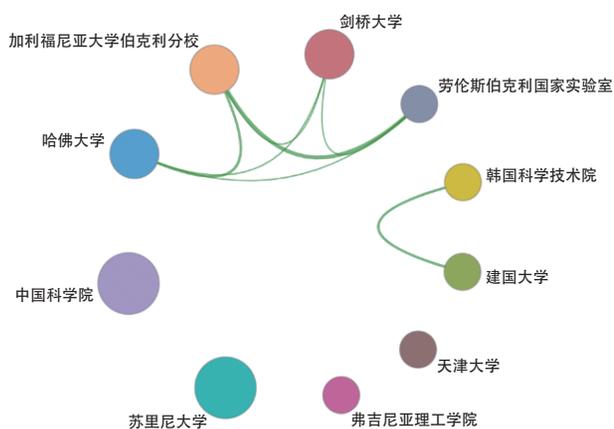


图 1.2.2 “可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”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	6 308	52.02	2021.0
2	美国	1 196	9.86	2020.7
3	印度	1 130	9.32	2021.1
4	韩国	695	5.73	2020.8
5	澳大利亚	481	3.97	2020.8
6	德国	476	3.93	2020.8
7	沙特阿拉伯	423	3.49	2021.1
8	英国	408	3.36	2020.9
9	伊朗	355	2.93	2020.8
10	西班牙	333	2.75	2020.8

主要产出机构中，除阿卜杜勒阿齐兹国王大学外，其他均为中国高校或研究所，包括中国科学院、江苏大学、清华大学等。

图 1.2.3 为“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿的发展路线。可再生能源驱动生物固碳的研究在近年来得到了迅猛发展。将转化可再生能源的人工器件与生物催化剂相耦合的关键问题在于耦合机制，在未来的研究中，首先应着重发展相应的表征技术，揭示人工器件与生物组分之间的物质和能量交流机制，并以此不断推动人工-生物高效互作新体系、新模型的开发。其次，生物催化剂是该过程的研究核心，工业酶和工业菌种的发掘与改良进程决定了可再生能源驱动生物固碳的产业化进程，需要借助学科交叉工具，将大数据和人工智能（AI）等计算机技术和前沿物理、化学技术应用

表 1.2.4 “可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”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	793	33.47	2021.0
2	江苏大学	202	8.53	2020.9
3	清华大学	193	8.15	2021.1
4	中国科技大学	185	7.81	2021.3
5	天津大学	178	7.51	2021.0
6	郑州大学	174	7.34	2021.2
7	湖南大学	157	6.63	2021.0
8	阿卜杜勒阿齐兹国王大学	132	5.57	2021.0
9	福州大学	121	5.11	2020.8
10	哈尔滨工业大学	120	5.07	2021.1



图 1.2.3 “可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿的发展路线

于工业酶、工业菌种的筛选、改造与创制，在未来几年内实现核心酶和核心菌种的技术自主化。最后，研究适用于可再生能源驱动生物固碳的高端工业反应器，实现从 CO_2 到各类燃料和化学品的实时监测、精确调控和高效分离，以适应不同的生产需求，打造有针对性的高效生产路线。

1.2.2 冶金流场混沌非线性强化技术研究

冶金反应器作为冶金工业领域的反应载体，在工业流程中发挥着十分关键的作用。冶金反应器是一个复杂多相混合反应体系，涉及气、固、液相的流动、混合、反应、传热和传质，是微观反应和宏观过程的统一体，其冶金流场作为能量和质量传递的载体，对三场协同及系统性能具有决定性作用。长期以来，对冶金反应系统的测量及数据采集技术的长足进步和在特定条件下对冶金流场的操作解析，有助于深化对其复杂化学反应过程的认识，但对其设计、优化和运行仍主要依赖于经验数据。冶金流场混沌非线性强化技术是近年来冶金科学和工程领域的前沿研究方向。该技术结合了流体力学、混沌理论和非线性科学的知识，旨在优化冶金过程中的流场行为，从而提高生产效率。

冶金多相流动为典型的远离平衡态的非线性过程，蕴含着诸多复杂的非线性动力学机制，呈现出时空跨尺度关联耦合的特征，导致冶金反应体系的混合传递与化学反应过程缺乏协同性，给有效调控强化和工程放大带来了挑战。该领域的核心研究方向是，冶金反应器多相体系中连续相和分散相拓扑结构时空演化的协同性、混沌流混合特性与多物理场的协同作用及其与传递性能的相关性。冶金流场混沌非线性强化的研究路径如下：首先，通过混沌理论对冶金过程中的多相非线性系统进行描述，采用混沌强化实现相间物质和能量的快速传输，以加快化学反向速率；进而实现流场、温度场、组分场的多物理场协同耦合，有效进行流场分布调控；接下来，通过强化流动-传递-反应的“协同性”和“均匀性”，实现高效均匀混合和强化热质传递，为冶金过程的强化和反应器的优化设计提供理论基础。

近年来，“冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家及机构分别见表 1.2.5 和表 1.2.6。主要产出国家中，中国位居第一，伊朗次之。主要产出机构中，伊斯兰阿扎德大学位居第一，中国的西安交通大学、上海交通大学、中国科学院三所机构上榜。主要国家及机构间的合作网络分别见图 1.2.4 与图 1.2.5。中国在该领域合作网络中处于核心地位，与多个国家形成合作关系，特别是与巴基斯坦的合作关系尤为突出。巴基斯坦在网络中也是一个重要的节点，与除英国和新加坡之外的所有国家都有合作。机构间的合作在亚洲内部紧密联系，其中伊斯兰阿扎德大学在该领域合作网络中处于核心地位，与多所机构有着合作关系。由表 1.2.7 可知，中国是施引核心论文数最多的国家，施引数为 2 490 篇，占比为 26.51%。中国的核心论文数和施引核心论文数均排名第一，说明中国学者在该领域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。

冶金流场混沌非线性强化技术利用混沌非线性理论，研究冶金过程多相流体混合机制，解析流场多尺度结构的形成、输运和转化。到目前为止，受限于实验测量技术和多尺度模拟方法的发展，有关混沌流在极端及超常规冶金、装备大型化方面的研究还有限；同时，该研究方向涉及冶金、流体和物理等多个学科的交叉领域。如图 1.2.6 所示，未来的研究方向包括：① 极端及超常规冶金反应流场的混沌流强化，突破电场-磁场-热应力场条件下极端超常规冶金过程混沌流强化，打破学科间壁垒，强化非线性混沌理论的系统性和普适性；② 超大型冶炼装备混沌流放大机制及准则，突破冶金流场混沌流型放大机制及准则，解决超大型冶炼装备放大过程理论缺乏导致的放大失真、运行失稳、工艺失配等问题；③ 基于机器学习

表 1.2.5 “冶金流场混沌非线性强化技术研究”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	40	33.33	3 192	79.80	2019.0
2	伊朗	26	21.67	2 411	92.73	2018.5
3	美国	20	16.67	1 632	81.60	2018.4
4	印度	20	16.67	1 529	76.45	2019.8
5	巴基斯坦	16	13.33	992	62.00	2019.9
6	沙特阿拉伯	13	10.83	1 099	84.54	2019.6
7	英国	8	6.67	872	109.00	2019.2
8	越南	8	6.67	540	67.50	2019.9
9	新加坡	7	5.83	454	64.86	2018.7
10	阿拉伯联合酋长国	6	5.00	393	65.50	2019.3

表 1.2.6 “冶金流场混沌非线性强化技术研究”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	伊斯兰阿扎德大学	10	8.33	893	89.30	2018.8
2	西安交通大学	8	6.67	499	62.38	2018.5
3	孙德胜大学	7	5.83	491	70.14	2019.7
4	南洋理工大学	6	5.00	410	68.33	2019.0
5	上海交通大学	4	3.33	453	113.25	2019.8
6	中国科学院	4	3.33	433	108.25	2017.8
7	法赫德国王石油与矿业大学	4	3.33	410	102.50	2020.2
8	伊朗科学技术大学	4	3.33	309	77.25	2019.0
9	印度理工学院	4	3.33	284	71.00	2019.0
10	伊斯兰堡通信卫星大学	4	3.33	229	57.25	2020.2

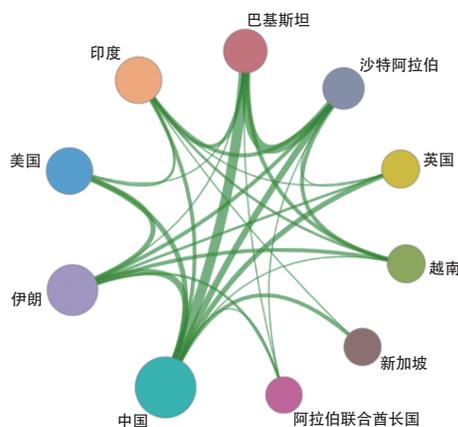


图 1.2.4 “冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

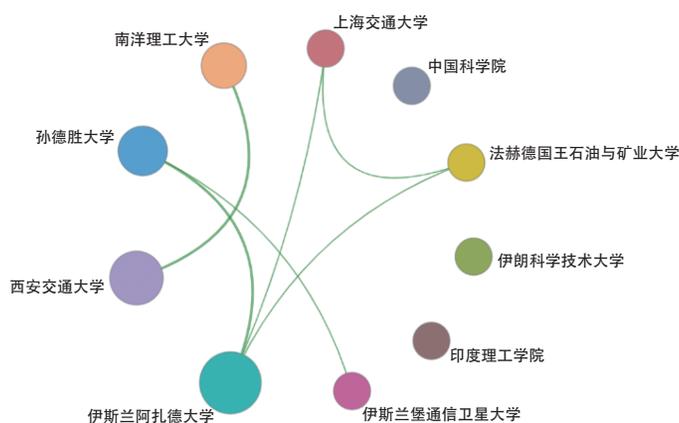


图 1.2.5 “冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “冶金流场混沌非线性强化技术研究”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	2 490	26.51	2021.0
2	沙特阿拉伯	1 327	14.13	2021.3
3	巴基斯坦	1 157	12.32	2021.1
4	印度	1 050	11.18	2021.2
5	伊朗	1 003	10.68	2020.5
6	美国	560	5.96	2020.8
7	埃及	458	4.88	2021.5
8	英国	366	3.90	2021.1
9	越南	351	3.74	2020.2
10	马来西亚	315	3.35	2021.0

表 1.2.8 “冶金流场混沌非线性强化技术研究”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	哈利德国王大学	360	14.84	2021.5
2	伊斯兰阿扎德大学	306	12.61	2020.5
3	阿卜杜勒阿齐兹国王大学	301	12.41	2021.2
4	孙德胜大学	279	11.50	2020.0
5	萨塔姆·本·阿卜杜勒阿齐兹王子大学	230	9.48	2021.6
6	西安交通大学	195	8.04	2020.9
7	中国医药大学	191	7.87	2021.5
8	伊斯兰堡通信卫星大学	169	6.97	2021.4
9	巴博勒理工大学	159	6.55	2019.4
10	维新大学	129	5.32	2020.5



图 1.2.6 “冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿的发展路线

的冶金流场混沌非线性强化技术，构建基于机器学习的冶金流场非线性强化模型，突破冶金过程多因素复杂耦合机制，加强冶金系统智能化的软、硬件建设。

1.2.3 面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系

利用可再生能源驱动电还原 CO_2 生成高附加值化学品为解决能源危机和环境问题提供了一种有效的方法。近年来，用于二氧化碳还原的电催化剂材料的研发在选择性、效率和反应速率方面取得了极大进展，并朝着实际应用的方向发展。 CO_2 可通过电还原制备各种化工产品，如甲酸、合成气、醇类和烯烃等，这些产品的生产规模较大，因此转向可再生能源驱动生产可以极大地减少 CO_2 的排放。

由于 CO_2 具有极高的热力学稳定性，导致其很难被活化。此外，通过 C-C 偶联生成高附加值 C_{2+} 产品也存在难度。近几十年来， CO_2RR 领域的研究在高活性或高选择性电催化剂的设计及 CO_2RR 机理方面取得了重大进展。目前的研究主要集中在以下几个方面：① 合理设计、可控制备高效电催化剂，通过晶面、形貌、表面电子结构调控等措施，提高其上的 CO_2RR 活性、选择性和稳定性；② 利用各种原位表征手段，如原位红外光谱、原位拉曼光谱、原位电镜等技术，对 CO_2RR 过程中的反应中间体和催化剂表面结构演变进行监测，从而揭示其上催化剂表面和电子结构对催化反应的调控作用及动力学机制；③ 合理设计电极结构，通过疏水性材料（如聚四氟乙烯等）改性，提高电极表面的疏水性能，从而避免长期运行过程中的液泛问题，使得电极稳定性得到提高。优化调节电解反应器的结构，增强反应传质和提高能量效率。

近年来，“面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程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。主要产出国家中，中国位居第一，核心论文 71 篇，占比达 66.36%，远高于美国、澳大利亚、加拿大等国家。主要产出机构中，中国科学院位居第一，中国科技大学和斯坦福大学次之。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。中国与美国的合作较多，中国与澳大利亚、加拿大和新加坡也有密切合作。由表 1.2.11 可知，施引核心论文数排名前三的国家是中国、

美国和澳大利亚,其中,中国施引核心论文占比达 57.95%,说明我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、中国科技大学、天津大学等(表 1.2.12)。

在温和条件下通过电催化将 CO_2 活化转化,进而合成社会经济发展所需化学品,这是发展绿色低碳能源技术的重要途径。 CO_2 电催化转化是一个复杂的多尺度过程,涉及 CO_2 分子吸附与转化、纳米尺度催化剂、微米尺度膜电极以及宏观尺度电解槽。目前的研究主要集中在寻找和改进高性能电催化剂,未来还需要结合各类原位表征手段在以下几个方面展开研究:电极形态演变、反应工艺条件优化、电极/电解质界面演变、传质运输优化、催化剂稳定性提高以及电解质/溶剂效应的影响等。此外,对于未来电催化还原 CO_2 技术的工业化应用,还需要考虑以下几点:确定实际应用目标、评估化学产品经济性和市场供需、扩大 CO_2 电解槽规模、提高电催化剂的长期连续运行稳定性、核算产品分离及原料回收的成本。图 1.2.9 为“面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.9 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”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	71	66.36	17 849	251.39	2019.0
2	美国	31	28.97	8 069	260.29	2018.8
3	澳大利亚	12	11.21	2 946	245.50	2018.9
4	加拿大	11	10.28	4 406	400.55	2019.1
5	韩国	9	8.41	1 429	158.78	2018.8
6	新加坡	7	6.54	2 569	367.00	2018.9
7	瑞士	4	3.74	764	191.00	2018.5
8	德国	4	3.74	686	171.50	2018.8
9	法国	4	3.74	681	170.25	2019.2
10	丹麦	3	2.80	749	249.67	2018.3

表 1.2.10 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”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	25	23.36	6 474	258.96	2019.1
2	中国科技大学	9	8.41	2 517	279.67	2019.4
3	斯坦福大学	7	6.54	1 813	259.00	2019.3
4	天津理工大学	6	5.61	1 616	269.33	2018.7
5	北京化工大学	6	5.61	1 260	210.00	2019.0
6	南洋理工大学	5	4.67	1 846	369.20	2019.0
7	SLAC 国家加速器实验室	5	4.67	1 032	206.40	2019.4
8	多伦多大学	4	3.74	2 155	538.75	2020.0
9	天津大学	4	3.74	2 082	520.50	2018.0
10	耶鲁大学	4	3.74	1 860	465.00	2017.5

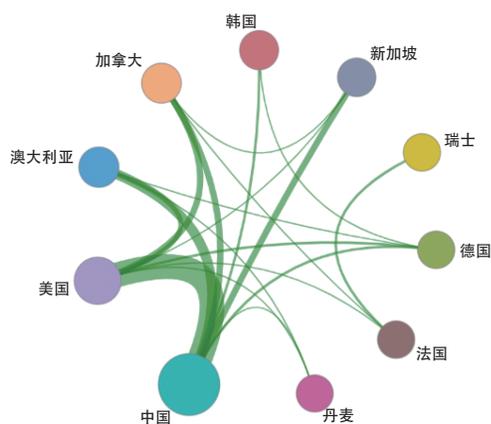


图 1.2.7 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿主要国家间的合作网络

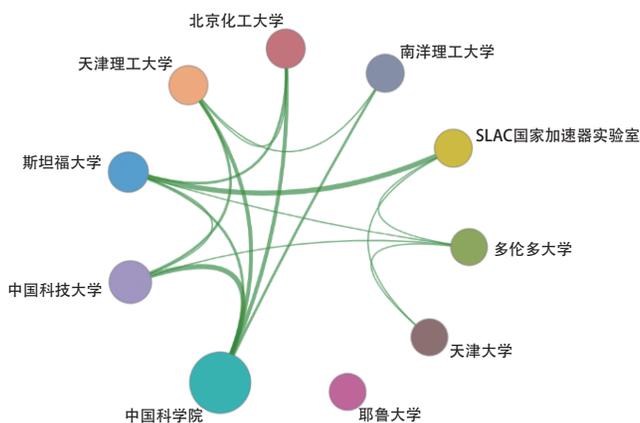


图 1.2.8 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”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	8 508	57.95	2021.0
2	美国	1 928	13.13	2020.6
3	澳大利亚	746	5.08	2020.8
4	韩国	612	4.17	2020.9
5	德国	524	3.57	2020.8
6	加拿大	521	3.55	2020.7
7	印度	424	2.89	2021.1
8	英国	407	2.77	2020.8
9	新加坡	405	2.76	2020.8
10	日本	386	2.63	2020.8

表 1.2.12 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”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	1 705	36.28	2020.9
2	中国科技大学	525	11.17	2021.0
3	天津大学	405	8.62	2021.0
4	清华大学	374	7.96	2021.0
5	北京化工大学	303	6.45	2020.8
6	郑州大学	300	6.38	2021.2
7	苏州大学	260	5.53	2020.9
8	南洋理工大学	230	4.89	2020.7
9	浙江大学	209	4.45	2021.0
10	深圳大学	196	4.17	2021.1

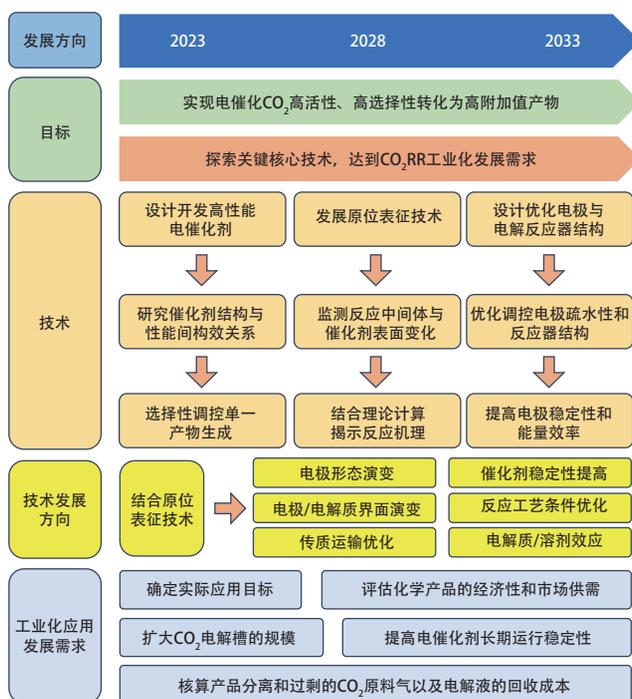


图 1.2.9 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿的发展路线

2 工程开发前沿

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 工程开发前沿见表 2.1.1。其中，“面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”“高效光伏器件的构建与规模化制造技术”“低温低压条件下绿氨宽负荷制

备技术”“富氢碳循环高炉炼铁技术”是专家推荐的前沿；其他前沿则是基于数据由专家研判而来。2023年入选的开发前沿，专利逐年公开量整体呈现出增长的趋势，尤其是“基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备”“面向能量密集型化工过程的高效节能分离新技术开发”“富氢碳循环高炉炼铁技术”的增长速度较快（表 2.1.2）。

（1）基于可再生能源的冶金低碳化利用

复杂金属物料的冶炼过程需要大量的电力消耗，并依赖化石燃料的还原特性及燃烧供热，这是制约冶金工业低碳可持续发展的关键。可再生能源可以提供清洁电能、生物质能和绿氢，同时具备了还原性和燃烧供热属性，其在冶金领域的高效应用，有望实现冶金工业绿色低碳转型。中国已经研发出了比较完整的

表 2.1.1 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	引用量	平均被引数	平均公开年
1	基于可再生能源的冶金低碳化利用	520	223	0.43	2020.4
2	基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备	482	1 354	2.81	2020.9
3	面向高温环境的金属基复合材料设计与制备	596	1 033	1.73	2019.7
4	面向能量密集型化工过程的高效节能分离新技术开发	697	774	1.11	2020.0
5	冶金炉窑混沌强化供热技术	775	501	0.65	2019.8
6	高效光伏器件的构建与规模化制造技术	705	1 066	1.51	2019.4
7	低温低压条件下绿氨宽负荷制备技术	540	890	1.65	2019.5
8	富氢碳循环高炉炼铁技术	353	582	1.65	2020.2
9	超高能量密度铝-空气电池的研发及应用	400	656	1.64	2019.7
10	高纯金属、合金及其材料关键制备技术及应用	358	335	0.94	2019.8
11	新型生物航空燃料的分子设计与规模化制备	208	464	2.23	2019.6

表 2.1.2 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	基于可再生能源的冶金低碳化利用	40	48	48	90	140	154
2	基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备	12	22	46	66	123	213
3	面向高温环境的金属基复合材料设计与制备	84	101	87	93	106	125
4	面向能量密集型化工过程的高效节能分离新技术开发	83	90	92	105	131	196
5	冶金炉窑混沌强化供热技术	97	113	109	132	157	167
6	高效光伏器件的构建与规模化制造技术	126	142	108	95	100	134
7	低温低压条件下绿氨宽负荷制备技术	101	76	93	81	86	103
8	富氢碳循环高炉炼铁技术	32	48	39	55	59	120
9	超高能量密度铝-空气电池的研发及应用	52	53	77	77	68	73
10	高纯金属、合金及其材料关键制备技术及应用	46	50	55	53	72	82
11	新型生物航空燃料的分子设计与规模化制备	32	37	32	28	36	43

钢铁氢冶金系统,并实现了百万吨以上规模氢冶金示范工程,水电硅、水电铝也在云南实现了产值超千亿元。但在有色金属火法冶炼产业的可再生能源燃烧与还原技术领域,尚有很多问题亟待深化研究。未来技术发展方向包括:① 构建多能互补与储能系统相结合的冶金用能体系,形成风-光-水-氢与冶金余热余能的互补清洁供能系统;② 开发生物质燃油旋流喷吹深度还原冶金熔渣新技术,以可再生能源替代化石能源还原剂;③ 开发生物质燃油旋流雾化强化燃烧技术,提高大分子、低热值的生物质燃油的燃烧供热效率,以可再生能源替代化石燃料,从而实现冶金用能结构清洁低碳化,从全生命周期和源头减碳角度提高冶炼用能水平、降低碳排强度。

(2) 基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备

化工新材料的开发周期长达15~25年,投入巨大,高度依赖专家经验。随着领域日益成熟,领域内数据呈现出总量海量但细分体系内稀疏的特点,依靠专家经验总结新材料规律愈发困难,亟需一场研究范式的变革。2023年初,ChatGPT横空出世,LiAMA、Claude、文心一言和悟道等紧随其后,拉开了大语言模型(以下简称大模型)的时代。大模型规模大,具有涌现性和通用性,有望应用于化工领域,以加速新材料的设计与制备。大模型能在文献信息提取、材料结构生成、材料性质预测、合成条件优化和智能化表征等环节全面加速新材料的开发。① 文献信息提取是整合化工材料数据的主要手段,大模型能够基于传统模型的结果进行精修,输出结构化的信息,从而提升数据质量。② 材料结构生成是逆向设计新材料的关键技术,大模型的涌现性有望突破人类的思维定式。③ 材料性质预测是高通量筛选的前提,大模型能整合领域内的各类小型模型,实现对各类材料性质的精准预测。④ 合成条件优化与智能化表征是摸索材料制备工艺的核心步骤,大模型挖掘规律的能力更强,能更快找到最优点。

(3) 面向高温环境的金属基复合材料设计与制备

金属基复合材料(metal matrix composite, MMC)是以金属或合金作为基体,与一种或多种增强相结合而成的多相材料。MMC兼具金属或合金基体和增强相的特性,具有高比强度、高比模量、低密度和良好的导电性及导热性等优异性能,在航空航天、汽车、电子信息、国防工业等领域得到了广泛应用。近年来,对于MMC的研究大多集中于改善材料的室温力学性能(尤其是强韧性),对于高温性能的研究相对较少。在高温和应力耦合的工况下,溶质原子具有相对更快的扩散速率,且更容易受到服役环境引起的氧化和腐蚀等不利影响,长期服役后往往以热疲劳或蠕变损伤的形式失效。与室温工况下服役的材料相比,高温工况下服役的材料往往具有相对更短的服役寿命,亟须对其组织结构进行设计以满足高温服役要求。目前,国内外的材料开发主要集中在以下方面:① 基于材料基因工程的复合材料高通量制备与表征技术;② 材料成型过程中构型与界面的精细化控制技术;③ 耐热铝基复合材料大尺寸构件短流程制造技术;④ 高温服役环境下复合材料演变规律、性能退化机理和控制技术。

(4) 面向能量密集型化工过程的高效节能分离新技术开发

化学工业能源消耗和碳排放量大,居工业领域前列,其中化工分离过程能耗约占化工产品加工总能耗的70%。目前,尽管部分行业的技术和装备有所提高,但整体技术水平仍然较低,我国全行业达到国际先进水平的技术装备占比较低,能源利用率比发达国家低15%左右,一些化工产品的单位能耗比发达国家高20%以上。开发和推广化工分离过程节能新工艺、新技术和新装备,降低化石能源消耗,提高能量利用效率,充分利用高新技术提升改造传统化学工业,才能提高生产效率,推进节能减排,促进产业升级。未来,面向能量密集型化工过程的分离技术发展将主要聚焦于以下两个方面:① 开发可替代的高效分离新方法,

如分子识别分离技术、分离过程耦合与强化技术等，针对不同待分离体系的特点选择合适的分离方法，进而提升分离过程能量利用效率；② 开发可再生的输入能源新形式（如太阳能、生物质能、绿氢、绿电等），降低分离过程中化石能源的使用比例，通过开发使用可再生能源的新型分离技术，向电气化方向发展，推进化工产业向绿色、可持续、高效化升级。

（5）冶金炉窑混沌强化供热技术

冶金炉窑节能增效的主要手段是对其供热过程进行强化。传统强化供热主要依靠增大供热量，导致冶金工业能耗和碳排放高、设备寿命短、产品质量不能满足高端使用等问题。冶金炉窑混沌强化供热技术引入混沌数学理论，通过创建混沌流强化系列数学模型，开辟调控混沌流流型来强化热质传递的新途径。目前，该技术已经在熔池熔炼炉和热处理用加热炉上实现了工业化应用，但炉窑热质传递强化机制和多场协同强化机理两大关键科学问题尚未解决，数学模型与实际应用的吻合度不够。该技术的发展方向主要集中于以下三方面：① 继续深入研究炉窑热过程非线性混沌强化基础理论及技术，进一步完善最低能耗强化供热法则及模型，解决供热不精准的问题；② 针对熔池熔炼炉喷溅严重、设备寿命短的问题，开发富氧旋流混沌搅拌供热技术，解决富氧利用不充分、自热不足能耗高的难题；③ 针对加热炉供热不精准、燃料燃烧不完全的问题，开发加热炉旋流混沌燃烧及强化供热制度调控技术，解决金属工件加热均匀性难以精准化的难题，保证加热质量、降低能耗，实现均匀精准加热。

（6）高效光伏器件的构建与规模化制造技术

发展光伏技术是可再生能源利用的重要举措。随着“双碳”目标的推进，分布式光伏扮演着越来越重要的角色。为了弥补传统硅晶电池的不足，一些新兴的薄膜光伏技术如碲化镉、铜铟镓硒、钙钛矿、聚合物太阳电池等应运而生。最近，这些光伏技术在能量转换效率和大规模制造技术方面都取得了长足的研究进展，这也是新兴光伏技术提升竞争力、走向商业化的关键。这些光伏技术的独特优势极大地拓展了光伏技术的应用领域，使其能够融入城市基础设施、消费电子等领域，如光伏建筑一体化、便携式可穿戴设备。未来，光伏技术发展需要关注以下四个方面：① 更好地融入新型能源电力系统，支撑智慧城市建设；② 与储能技术相结合，实现绿色能源的稳定供应和高效利用；③ 光伏组件的回收利用，推动行业绿色可持续发展；④ 对于新型光伏技术，降低成本、提高寿命、突破量产将是技术突破的关键。

（7）低温低压条件下绿氨宽负荷制备技术

氨在现代农业与工业中起着重要作用，年产量为 1.8 亿吨。因其具有易液化、高能量密度和零碳排放的特点，氨被称为“氢 2.0”，有望成为下一代清洁能源载体。工业上， N_2 与 H_2 反应合成 NH_3 是一个放热、体积变小的过程，低温、高压有利于反应的进行。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 在低温下难以活化。目前，合成氨工业是在高温、高压条件下窄负荷连续进行，不仅高能耗、高碳排放，而且与光伏、风电等清洁能源的波动性特点不匹配，难以进行绿色升级。未来，低温低压条件下绿氨宽负荷制备技术的发展主要聚焦于以下几个方面：① 开发具有高本征活性的催化剂，降低 N_2 在催化剂表面的吸附能垒，提升低温下 N_2 的活化能力；② 在传统的热催化反应器中引入变频的电、磁等外场，利用外场变化调节催化剂活性中心电子结构，打破吸附限制；③ 研制快速响应装置与系统，拓宽低温、低压条件下合成氨的负荷区间。

（8）富氢碳循环高炉炼铁技术

高炉炼铁是目前炼铁生产的主要方法，2022 年全球高炉生铁产量超过 13 亿吨，在未来相当长的一段

时间,高炉-转炉流程工艺仍将是钢铁生产的重要方式。钢铁制造过程中,约 2/3 的碳排放来自高炉炼铁过程,降低高炉炼铁过程中的碳排放是全球钢铁企业研发的热点。富氢碳循环高炉炼铁技术通过向高炉中喷吹富氢气源(如焦炉煤气),用含氢还原气替代传统高炉中焦炭和煤的作用,同时辅以炉顶煤气循环(top gas recycling, TGR)技术和 CCUS 技术,将高炉煤气中的 CO、H₂ 循环再利用,将 CO₂ 脱除后再利用,从而最大程度减少高炉炼铁过程中的碳排放。富氢碳循环高炉炼铁技术不改变现有高炉工艺流程结构或炉料结构,是当前传统高炉炼铁碳减排的首选技术。目前,日本制铁公司、德国蒂森克虏伯公司、中国宝武钢铁集团有限公司等企业都在积极开展富氢碳循环高炉炼铁技术开发和工业试验,并取得了阶段性的减碳成效。未来,富氢碳循环高炉炼铁技术开发的重点包括全氧炼铁、炉顶煤气 CO₂ 脱除后加热循环利用、富氢复合喷吹、富氢碳循环高炉全氧冶炼工况下的煤气自循环工艺等。

(9) 超高能量密度铝-空气电池的研发及应用

随着全球经济发展,世界各国对能源的需求急剧增加,能源问题已引起全人类的高度关注。目前常见的传统能源有铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池等,其在能量密度、安全性及生产成本等方面存在局限性,而铝-空气电池凭借高电压(理论值 2.7 V)、高比容量(2 980 mAh/g)、高比能量(8 100 Wh/kg)、高安全性、材料来源广泛、无污染等优点,已成为最具潜力的电化学储能体系之一。针对铝负极表面析氢副反应抑制的研究从 20 世纪末就已经开始,国内外研究人员在电池负极材料合金化、电解液添加剂改性以及有机电解质等关键技术领域均已取得长足的进步。但目前国际社会对能源需求和技术指标提出了新的目标,在进一步明晰电池反应机制的基础上,设计及开发适合大批量生产的超高能量密度、高安全性、高功率的铝-空气电池变得尤为重要。具体来看,未来铝-空气电池基础研究及工业应用方面需实现三大关键技术突破:① 电池改性技术手段(含负极合金化冶炼、电解液添加剂改性等)及相应表/界面反应机制机理;② 金属燃料电池各组件耦合模型及后续优化技术手段,简化电池结构,便于规模化应用;③ 持续开发铝-空气电池全流程低碳、安全、低成本的关键技术,并有效开发利用电池副产物,提升铝-空气电池应用带来的经济效益。

(10) 高纯金属、合金及其材料关键制备技术及应用

高纯金属、合金及其材料主要应用于半导体、无线电子、航空航天、军工等尖端科技领域。其制备方法包括化学提纯和物理提纯。化学提纯主要依托于化学反应过程的“反应性-选择性”原理,综合反应体系构建、反应条件控制、反应环境优化等手段,将材料中的杂质元素通过选择性化学反应除去;物理提纯主要利用不同元素的“相似性-差异性”物理特性,通过真空蒸馏、区域熔炼、电迁移等手段实现除杂的目的。欲获得高度纯化的材料,通常将化学提纯和物理提纯方法结合并合理运用。高纯金属、合金及其材料提纯制备需解决的核心问题主要包括:① 材料中杂质元素的稀散赋存与分布机制;② 元素相似性及其选择性分离动力学,需计算基体与杂质之间的相互作用力、吸脱附热以及动力学平衡参数等;③ 材料纯化过程杂质物相形态转变规律、迁移行为以及提纯过程参数调控。

(11) 新型生物航空燃料的分子设计与规模化制备

新型生物航空燃料分子是由生物质原料经化学键精准断链再定向合成的具有精确结构及特殊性能的燃料分子,在航空领域具有重要的发展潜力。目前关于新型生物航空燃料的研究主要聚焦于:① 生物燃料分子设计,深入研究燃料分子结构与理化性质之间的构效关系,建立高通量燃料分子理性设计及筛选方法,结合生物质原料分子结构特征快速获得目标分子结构库;② 高效合成方法,创建原子利用率高、温和高

效的合成路径，实现生物质原料到航空燃料的全流程高收率转化；③ 高活性低成本催化剂，深入解析催化反应机制，明确催化剂结构与生物质催化转化性能的构型关系，开发具有高活性和选择性的贵金属低载量超分散催化剂或非贵金属催化剂；④ 燃料规模化制备，在现有基础上持续改进催化剂和工艺，开发集成工艺，优化反应器结构，提高反应效率、降低能耗。面向航空领域碳减排的急迫需求，需要加快生物航空燃料的精细设计、高效合成及工程化放大研发步伐，突破可全组分替代石油基航煤的新型生物航空燃料制备技术。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 基于可再生能源的冶金低碳化利用

钢铁及有色冶金工业的采选、冶炼、热处理等全流程工艺过程都要直接消耗大量化石燃料，实施清洁能源替代成为解决碳排放问题的有效措施。实现绿色冶金产业发展思路，首先就要依托优势资源和清洁能源聚集地，重构冶金产业布局，鼓励冶金产能向风能、太阳能、水电等可再生能源富集区或金属资源/再生资源富集区转移。例如，结合产业链基地建设，可在核电企业附近布局铝电解等用电冶金产业。另外，制造工艺成熟但应用规模始终受限的生物质能作为唯一含碳的可再生能源，也是冶金燃料及还原剂的最佳绿色低碳替代。在此基础之上，探索可再生能源在冶金领域的高效应用是实现冶金工业绿色低碳转型的新路径。

从钢铁冶金领域来看，可再生能源利用近年来发展迅速，已经引入了氢能、太阳能、风能、水电、煤转气等清洁能源，突破了多能协同互补技术，提高了冶金行业清洁能源使用比例；发展了余热利用等能源回收新方法，通过优化关键工艺和装备改进，促进了跨工序、跨行业的能源回收利用。但可再生能源存在间断不稳定的问题，较难实现连续稳定供能的要求。目前，中国已经研发出了比较完整的钢铁氢冶金系统。以河北钢铁集团的 120 万吨规模氢冶金示范工程为例，该项目是全球首次使用焦炉煤气“自重整”方式制氢，用获得的氢气直接还原含铁原料，生产出高品质的直接还原铁。同时，有色冶金工业的绿色电力替代发展也非常迅速，如可再生能源丰富的云南省在引进硅项目的同时，还在加速吸引电解铝企业，其绿色铝、硅建成产能规模居全国前列，产值超千亿元。将高耗电的硅铝产业与清洁能源结合，可实现水电硅、水电铝材产业一体化绿色发展。但生物质能在冶金行业的燃烧和还原替代技术的研发与应用还在起步阶段，未来的减排潜力巨大。

由表 2.2.1 和表 2.2.2 可以看出，相关专利基本全部出自中国，符合世界第一冶金大国的产业发展需求。

表 2.2.1 “基于可再生能源的冶金低碳化利用”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	513	98.65	218	97.76	0.42
2	印度	2	0.38	0	0.00	0.00
3	韩国	2	0.38	0	0.00	0.00
4	荷兰	1	0.19	5	2.24	5.00
5	俄罗斯	1	0.19	0	0.00	0.00

而昆明理工大学拥有地区新能源资源和冶金科技研发能力的双重优势，在钢铁、有色冶金两个领域的专利数量和被引数均为第一。

未来 20 年，“可再生能源的冶金低碳化利用”工程开发前沿的发展路线如图 2.2.1 所示：技术前沿主要集中于构建多能互补与储能系统相结合的冶金用能体系，形成风-光-水-氢与冶金余热余能的互补清洁供能系统；开发生物质燃油旋流雾化强化燃烧技术，以可再生能源替代化石能源还原剂；开发生物质燃油旋流雾化强化燃烧技术，以可再生能源替代化石燃料，从而实现冶金用能结构清洁低碳化。总体目标：在未来 10 年实现从传统的“碳冶金”向颠覆性绿色低碳冶金的转变，在下一个 10 年实现从全生命周期和源头减碳角度提高冶炼用能水平、降低碳排强度，实现全冶金过程零排放。

表 2.2.2 “基于可再生能源的冶金低碳化利用”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	昆明理工大学	14	2.69	16	7.17	1.14
2	中冶赛迪工程技术股份有限公司	13	2.50	4	1.79	0.31
3	江苏省鑫钢铁集团有限公司	7	1.35	1	0.45	0.14
4	宝山钢铁股份有限公司	6	1.15	2	0.90	0.33
5	沧州中铁装备制造材料有限公司	5	0.96	2	0.90	0.40
6	云南德胜钢铁有限公司	4	0.77	1	0.45	0.25
7	乌海德晟煤焦化有限公司	4	0.77	0	0.00	0.00
8	青岛理工大学	3	0.58	6	2.69	2.00
9	新化县群华陶瓷科技有限公司	3	0.58	4	1.79	1.33
10	鞍钢股份有限公司	3	0.58	3	1.35	1.00

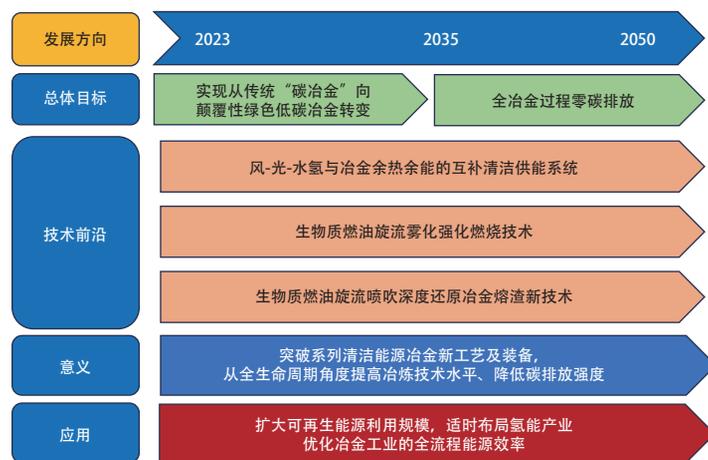


图 2.2.1 “基于可再生能源的冶金低碳化利用”工程开发前沿的发展路线

2.2.2 基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备

化工与材料行业是工业社会的支柱产业，是人类开发和改造物质世界的基石。每一种新材料的发现和量产，都是一次飞跃。然而依靠实验试错和人力总结规律的传统研发范式已经面临瓶颈，化工新材料的设计与制备速度趋缓，研究范式需要革新。在化工新材料领域，数据特点是总量大且分布稀疏，依靠人力或者传统模型无法有效地挖掘隐藏在海量数据背后的深层次规律，而大模型有望整合领域知识并结合具体材料体系微调，实现先“通”再“专”的技术路径，触类旁通，帮助科学家突破思维定式，加速材料开发。

早在 2011 年，美国就率先发起了“材料基因组”计划；我国也紧跟前沿，创办了独立自主的材料基因工程关键技术与支撑平台重点专项。随着 AI 的不断发展，面向化工新材料开发的专利数量逐年递增，呈现出一超一强、多头紧随的格局。由表 2.2.3 可以看出，中美两国在该领域的专利数量超过全球专利总数的七成，其余专利来源主要是发达国家。虽然中美专利数量接近，但被引用数差距较大，说明美国在该领域依然保有领先地位。表 2.2.4 说明，美国的主要产出机构既有高校又有企业，而我国的主要产出机构仅有高校，说明在产学研一体化上我们仍需追赶。此外，在该领域相关的国际合作与交流上，我国的开放程度不够，如图 2.2.2 所示，还需要进一步扩大相关领域的国际影响力。目前，这一领域已经成为国际热点，

表 2.2.3 “基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备”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	美国	180	37.34	877	64.77	4.87
2	中国	177	36.72	337	24.89	1.90
3	印度	33	6.85	0	0.00	0.00
4	韩国	24	4.98	33	2.44	1.38
5	日本	21	4.36	24	1.77	1.14
6	英国	11	2.28	28	2.07	2.55
7	德国	10	2.07	8	0.59	0.80
8	加拿大	8	1.66	13	0.96	1.62
9	澳大利亚	5	1.04	3	0.22	0.60
10	瑞士	3	0.62	13	0.96	4.33

表 2.2.4 “基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备”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	国际商业机器公司 (IBM)	14	2.90	34	2.51	2.43
2	英特尔公司	8	1.66	35	2.58	4.38
3	广州大学	8	1.66	2	0.15	0.25
4	美光科技公司	7	1.45	0	0.00	0.00
5	Peptilogics 公司	6	1.24	14	1.03	2.33
6	Freenome 公司	6	1.24	13	0.96	2.17
7	加利福尼亚大学	6	1.24	7	0.52	1.17
8	浙江大学	5	1.04	10	0.74	2.00
9	Ro5 公司	5	1.04	6	0.44	1.20
10	斯坦福大学	4	0.83	26	1.92	6.50

相关专利公开量逐年加速上升，平均被引数位居 Top 11 工程开发前沿之首（表 2.1.1 和表 2.1.2），但直接应用大模型进行材料开发的专利还是一片空白，领域仍处于起步阶段，发展空间广阔。

在未来 5 ~ 10 年（图 2.2.3），大模型将助力化工新材料行业的多个环节，从文献信息提取、材料结构生成、材料性质预测、合成条件优化、智能化表征等方面加速化工新材料的设计与制备。第一，文献信息提取是化工材料数据平台采集数据的主要途径。大模型能够精修传统模型的提取结果，输出高度结构化的信息，从而构建高质量的领域数据库。建立高质量的领域语料数据集，并借助领域知识进行微调，是实现大模型助力文献提取的关键步骤。第二，材料结构生成是逆向设计新材料的关键技术。大模型的涌现性有望突破人类的思维定式，挖掘数据背后的联系，提出合理的猜想。生成模型是 AI 领域内的难题，攻克这一问题是实现 AI 提出科学猜想的必经之路。第三，材料性质预测是高通量筛选的前提。大模型能整合领域内的各类小型模型，从而实现对各类材料性质的精准预测。大模型在集成小模型的基础上，可以学习小模型的参数，从模型中发现规律。第四，合成条件优化与智能化表征是摸索材料制备工艺的核心步骤。大模型挖掘规律的能力更强，能充分考虑各类影响因素，实现快速寻优。探索多层次主动学习并总结其在化工材料领域的通用框架具有重要意义。以聚烯烃催化剂为例，若按照目前的传统方法进行开发，单个配

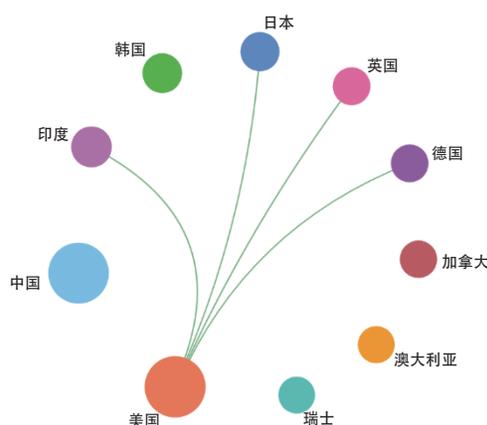


图 2.2.2 “基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备”工程开发前沿主要国家间的合作网络



图 2.2.3 “基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备”工程开发前沿的发展路线

方从设计、合成、表征到最后的聚合评价，往往需要数月时间，且这一过程中得到的催化剂大多无法满足最终需求。借助大模型学习预测能力，有望加速聚烯烃催化剂的开发速度，开发高效高端聚烯烃催化剂，可以进一步降低光伏行业封装胶膜关键材料 POE 的生产成本，加速国产 POE 材料工业化生产的进程。

2.2.3 面向高温环境的金属基复合材料设计与制备

金属基复合材料(MMC)是指采用人工方法,将不同尺寸、不同形态(包括颗粒、纤维、晶须、纳米片等)的无机非金属(或金属)增强体添加到金属基体(铝、钛、镁、铜等)中制成的新型材料。相较于传统的均质金属,MMC 具有较高的强度、耐蚀、导电、导热等优秀的综合性能,在航空航天、国防军工、轨道交通、电子信息等领域有着广阔的应用前景。早在 20 世纪 80 年代,美国最早采用搅拌铸造法制备颗粒增强 MMC。我国也在 1981 年启动了 MMC 研究,并在多个重大工程的关键部件上得到了重要应用,该领域目前处于普及与快速发展阶段。以铝基体为例,对于需要在 300~400 °C 区间服役的构件,铝合金的室温高强度优势荡然无存。其主要原因在于,传统高强铝合金赖以强化的析出相在 200 °C 以上便将发生快速失稳粗化,导致材料丧失强化效果并快速软化失效。以航空航天广泛使用的 7075 铝合金为例,其在 200 °C 和 300 °C 的抗拉强度分别仅为室温下的约 30% 及 10%,使其无法有效推广到耐热结构部件的设计使用中。因此,对于当前航空航天领域最为关心的 300~400 °C 温度区间,铝合金服役时出现的力学性能急剧衰退成为大动力 / 大功率的服役条件下制约结构设计、影响服役安全的关键短板。

当前将金属与高性能的增强相复合制备 MMC 已经成为提高金属基材料热稳定性最具前景和可行性的策略之一。其热稳定强化原理主要是:利用高热稳定性的第二相颗粒钉扎晶界,有效阻碍晶界滑移,抑制晶界的移动,提高基体晶粒的稳定性,并且在高温下载荷通过界面传递到增强颗粒,硬度较高的增强颗粒能够承担更大的载荷,从而提高材料的热稳定性。例如,美国 Enrique J. Lavernia 等制备的 35% (体积分数) TiC 纳米颗粒增强铝基复材 300 °C 高温拉伸强度可达 220 MPa,断裂延伸率为 10%,但是随着增强相含量的进一步提高,其断裂延伸率也显著下降。澳大利亚吴鑫华团队开发了代号为 Al250C 的高强 3D 打印铝合金,其 300 °C 高温抗拉强度达 250 MPa,断裂延伸率为 9.5%,目前该合金成分、制粉和打印工艺处于严格保密状态。综上可知,相比于合金体系在高温下弥散析出相快速失稳粗化造成力学性能退化的设计局限,MMC 有望通过调控增强相颗粒的种类、尺寸、体积分数、增强相与基体的界面等途径,优化提升复合材料的热稳定性。然而,目前铝基复合材料 300 °C 高温拉伸强度普遍在 250 MPa 以下,材料塑韧性较纯铝基体显著降低。应用方面,在高温下,高强度 / 质量比的新材料的使用可以大大减少航天舱、重要构件和热保护系统的质量,如航空发动机中的活塞材料、叶片材料、耐热材料等。轻质高强多功能金属复合材料作为一种性能优异的候选材料,在许多领域都具有性能与技术上的优势,因此着力面向高温环境的 MMC 的设计与制备技术对于实现科技强国的战略目标具有重要意义。

表 2.2.5 列出了“面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”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数比例远超其他国家。各主要产出国家间,中国和美国存在一定的国际合作(图 2.2.4),其余国家之间尚未开展广泛合作。国际相关技术实施封锁,例如美国该领域的研究报道主要集中于国家实验室,核心技术尚未公开。从表 2.2.6 来看,中国主要的金属材料研究机构,如北京科技大学、哈尔滨工业大学、中国科学院金属研究所等均高度重视面向高温环境的 MMC 研发。企业方面,无锡市恒特力金属制品有限公司和安徽尼古拉电子科技有限公司

表 2.2.5 “面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”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	529	88.76	892	86.35	1.69
2	日本	24	4.03	23	2.23	0.96
3	韩国	23	3.86	53	5.13	2.30
4	美国	9	1.51	56	5.42	6.22
5	印度	4	0.67	1	0.10	0.25
6	俄罗斯	2	0.34	2	0.19	1.00
7	德国	2	0.34	0	0.00	0.00
8	新加坡	1	0.17	5	0.48	5.00
9	英国	1	0.17	4	0.39	4.00
10	奥地利	1	0.17	0	0.00	0.00

表 2.2.6 “面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”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	北京科技大学	7	1.17	39	3.78	5.57
2	哈尔滨工业大学	7	1.17	16	1.55	2.29
3	中国科学院金属研究所	6	1.01	23	2.23	3.83
4	无锡市恒特力金属制品有限公司	6	1.01	5	0.48	0.83
5	吉林大学	5	0.84	35	3.39	7.00
6	太原理工大学	5	0.84	11	1.06	2.20
7	安徽尼古拉电子科技有限公司	5	0.84	0	0.00	0.00
8	中国航空制造技术研究院	4	0.67	46	4.45	11.50
9	西安理工大学	4	0.67	23	2.23	5.75
10	浙江大学	4	0.67	19	1.84	4.75

等均位于前列，各主要机构间尚无合作。研究机构的分布广泛性也说明了耐热 MMC 具有重要的研究地位和价值。

面向高温环境的 MMC 产业面临着重要战略机遇期，未来 5~10 年有望拓展并广泛应用于民生领域装备。对于耐热 MMC 设计及其制备技术已有较多的研究基础和积累，但仍然有很多尚未解决的技术与科学问题。在装备换代和技术升级的大背景下，耐热 MMC 的研发产业链面临新的挑战和需求，如何进一步提升材料的耐热极限温度、提高材料制备的稳定性并降低成本、开发适用于耐热 MMC 的精密加工设备和评价体系等仍亟待突破。建议从如下方面进一步推进设计理论和技术完善与应用（图 2.2.5）。① 从微观结构与形态层面上进行仿生设计。从自然界中极端环境下生存的植物、动物的结构分析中获得灵感，进行从微观、介观到宏观的多尺度材料设计，并借助计算模拟开发相应的多尺度计算平台，进一步优化结构特征。② 转型材料基因工程的全新研究范式。挖掘金属的氧化物、碳化物、氮化物、硼化物、纳米碳材料等增强体的物理性能和化学性能，建立多维数据库，并结合基体成分、界面结构、增强相分布构型等的仿真计算，精细设计和优化工艺制备出耐热 MMC。③ 开发特殊近净成形制备与加工技术。针对 MMC 加工难的技术瓶颈，开发新工艺，进一步提高材料的利用率和成型精度；针对金属基复材界面和增强相构型的特点对技术原型进行进一步设计改进，开发形状复杂的 MMC 构件高效成型技术、缺陷检测技术和服役评价技术。④ 研究

和建立国家标准与行业标准体系。构建面向高温环境应用的 MMC 各类细分材料的高温性能评价方法、鉴定与验收标准等。

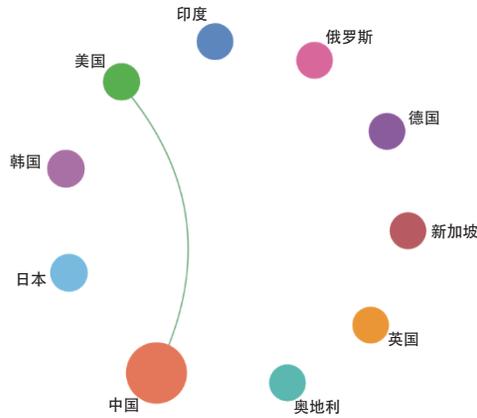


图 2.2.4 “面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”工程开发前沿主要国家间的合作网络

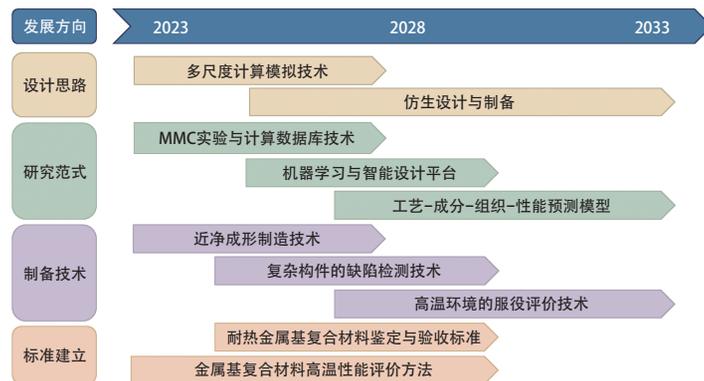


图 2.2.5 “面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：谭天伟 元英进

工作组成员：

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 李 莎 朱晓文

执笔成员：

高 鑫 何春年 胡文彬 吉科猛 刘永长 罗浪里 吕永琴 潘 伦 王仕博 王笑楠 魏永刚

吴 忠 徐浩元 杨春鹏 杨世亮 姚昌国 于一夫 张 生 张 翔 张志国 周凯歌

数据分析成员:

北京航空航天大学

邓 元 祝 薇 郭思铭 韩广宇 胡少雄 张青青 周 杰

北京化工大学

吕永琴 张志国 郭禹曼

电子科技大学

闫裔超

广西大学

聂双喜

哈尔滨工业大学

柯 华 李达鑫

华东理工大学

卢静宜 王义明

昆明理工大学

胡 途 祁先进 田国才 王 华 王仕博 王 勋 魏永刚 徐浩元 徐建新 许 磊 杨世亮

姚钦文 郑永兴 曾晓苑

清华大学

王笑楠 尹浩宇

四川大学

朱铎丞

天津大学

陈 星 崔春燕 丁 然 杜希文 费竹平 高 鑫 韩 优 何春年 何光伟 胡文彬 吉科猛

刘家臣 刘文广 刘永长 罗浪里 罗诗妮 潘 伦 裴春雷 任相魁 孙 哲 王 灿 王 颖

徐连勇 杨春鹏 杨永安 杨振文 于 涛 于一夫 张 宝 张 雷 张 鹏 张 生 张 翔

张育森 赵 雷 赵振宇 周凯歌 朱国瑞 陈 缘 种博洋 丁秋燕 况思宇 陆 淇

浙江大学

杨皓程

中国宝武中央研究院

辜海芳 王 媛 姚昌国

中国科学院文献情报中心

翁彦琴 杨绮文

中南大学

李 扬