

国家自然科学基金燃料电池领域项目 资助情况研究

丹 英¹, 范旭辉², 王晓丽¹, 刘 华¹, 高 楠¹, 傅智杰³

(1. 中国科学技术信息研究所, 北京 100038;

2. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088;

3. 中国工程院, 北京 100088)

摘 要: 国家自然科学基金对技术领域发展具有引领作用, 其资助项目在一定程度上可反映相关领域的技术发展态势和研究热点。以中国国家自然科学基金资助的燃料电池项目为研究对象, 采用文献计量学和主题聚类方法, 从资助项目数量与金额、资助格局、资助来源、受资助区域和受资助机构等维度进行了计量分析, 从资助热点主题、主要结构组件以及产业链等维度进行了主题挖掘, 以期为该领域科研人员把握技术发展态势和基金项目申报提供参考, 同时对这一学科领域今后的资助方向提出建议。

关键词: 燃料电池; 国家自然科学基金; 资助热点; 科学计量

中图分类号: G311; TM911 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2023.06.004

燃料电池是将燃料与氧化剂的化学能通过电化学反应直接转换成电能的发电装置^[1], 又称电化学发电机, 是继水力发电、热能发电和原子能发电之后的第 4 种发电技术^[2]。与传统的发电方式相比, 燃料电池能量转换效率高、发电过程环境友好, 在航天航空、电动车辆、移动通信、移动电源与分布电站等多个领域具有广阔的应用前景, 被视为 21 世纪最理想的发电技术之一^[3]。燃料电池作为能源发展战略的重点领域, 获得了大量的政策支持。2016 年 3 月, 国家发展改革委和国家能源局印发了《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》, 将氢能与燃料电池技术创新、先进储能技术创新等列为 15 项重点创新任务^[4]。2020 年, 科技部启动了国家重点研发计划“可再生能源与氢能技术”重点专项, 将重点突破质子交换膜、气体扩散层碳纸和车用燃料电池催化剂批量制备等共性关键技术^[5]。2022 年 3 月

国家发展改革委和国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》, 明确要加快推进质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)技术创新, 支持新型燃料电池等技术发展^[6]。

国家自然科学基金作为中国支持基础研究的主渠道之一, 促进了燃料电池领域的基础研究、可持续发展以及自主创新能力的提升。基于国家自然科学基金资助项目数据视角, 开展燃料电池研究分析, 更具有政策引导性和基础科学前瞻性。本文采用文献计量学和主题聚类方法, 从资助项目数量与金额、资助格局、资助来源、受资助区域和受资助机构等维度进行了计量分析, 从资助热点主题、主要结构组件以及产业链等维度进行了主题挖掘, 以期为该领域科研人员把握技术发展态势和基金项目申报提供参考, 为中国燃料电池技术发展助力。

第一作者简介: 丹英(1976—), 女, 硕士, 馆员, 主要研究方向为用户服务、数据分析。

通信作者简介: 范旭辉(1989—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为信息管理、数据分析、知识服务。

项目来源: 国家科技图书文献中心专项任务“重点领域信息门户建设与服务”(2022XM41)。

收稿日期: 2023-03-27

本文中所有分析数据来源于中国工程科技知识中心和中国科学技术信息研究所构建的“全球科研项目数据库”。以“燃料电池”为检索词,在项目名称、项目关键词和项目摘要3个字段中分别进行检索,检索时间范围为1990—2019年,共检索出资助项目1770项,通过人工判读,剔除不相关项目后保留1635项,并对燃料电池的种类、技术体系等字段进行了二次标引,深度揭示项目内容,形成分析数据集。为保证分析结果的完整性和准确性,本文还对数据进行了数据补充、数据清洗和人工标引等处理,利用VOSviewer等分析工具进行数据可视化展示。

1 总体资助态势

1.1 资助项目数量与金额

科研经费是技术创新能力提升的保障之一,国家自然科学基金在燃料电池领域给予了大量的经费资助,有效地促进了该领域的技术发展。1990—2019年,国家自然科学基金共资助项目1635项,总资助金额达到78226.04万元,项目的平均资助强度为47.84万元/项。资助项目的数量与金额分布情况如图1所示,可以看出,在“十一五”和“十二五”期间,资助项目数量与金额均进入快速增长阶段,“十三五”期间,资助项目数量与金额则有所下降,

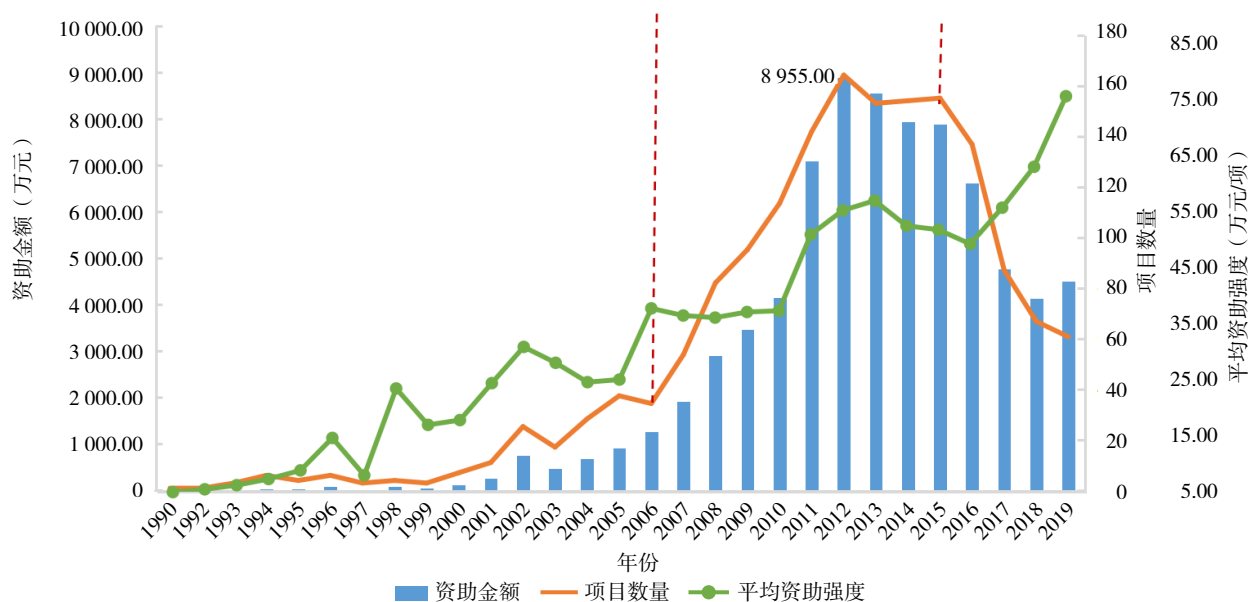


图1 1990—2019年国家自然科学基金资助项目数量与资助金额年度分布

但其平均资助强度整体呈现出大幅增长的趋势。

1.2 资助格局分布

为了适应基础研究资助管理的阶段性发展需求,统筹基础研究的关键要素,国家自然科学基金在其“十三五”发展规划中提出将资助格局调整为探索、人才、工具和融合四大系列^[7]。其在燃料电池领域的资助格局分布(按金额统计)如图2所示,可以看出,国家自然科学基金在燃料电池领域的资助重心是探索系列和人才系列。探索系列涉及的资助项目数量与金额最多,资助项目数量为845项,资助金额为51633.04万元,占比66.00%。此外,国家自然科学基金在2017年增加了工具系列的资

助,批准了一项国家重大科研仪器研制项目“大功率氢燃料电池电堆综合测试仪的研制”,使燃料电池领域的资助计划得到了系统性完善。

就具体的项目类型而言,不论是资助项目的数量,还是资助金额,面上项目均位列第一,资助项目数量为757项,资助金额达40837.20万元,占比52.20%;其次是青年科学基金,资助项目数量为645项,资助金额达14591.90万元,占比18.65%。联合基金作为国家自然科学基金吸引多元化投入的主要方式,取得了积极效果,促进了科学研究产学研合作和科研成果应用转化^[8]。联合基金共资助燃料电池项目4713万元,在其发布的“2019年项目指南”

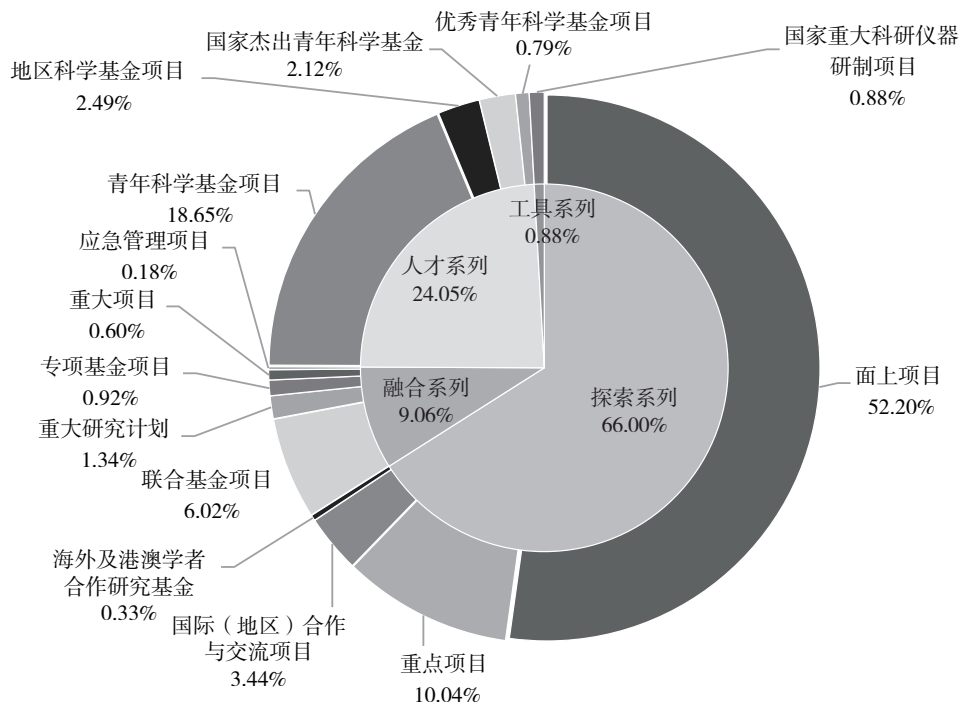


图2 1990—2019年国家自然科学基金资助项目的总体格局分布

联合基金项目中, 下属“中国汽车产业创新发展联合基金”项目确认接收电动化、轻量化和智能化三大方向的重点支持项目申请。直接费用资助强度为250万元/项, 资助期限为4年。其中在电动化方向的8项细分项目中有2项涉及燃料电池, 占据细分项目申报总数的1/4^[9]。

1.3 资助来源分布

为了更好地适应各学科发展的需要, 国家自然科学基金委员会共设置9个科学部^①, 负责各学科项目的资助与管理。燃料电池是一个跨学科多领域的系统, 因此, 也受到了国家自然科学基金委员会多个科学部的资助。图3展示了国家自然科学基金燃料电池研究的主要资助来源分布情况, 其中, 化学科学部和工程与材料科学部是资助燃料电池研究项目数量与金额最多的两个科学部, 金额占比分别达到51.03%和39.33%。

此外, 燃料电池的研究与其他学科也存在交叉。其中, 生命科学部、地球科学部和医学科学部的35项基金项目, 研究内容多集中在酶生物燃料电池和微生物燃料电池方向; 信息科学部的47项基金项目,

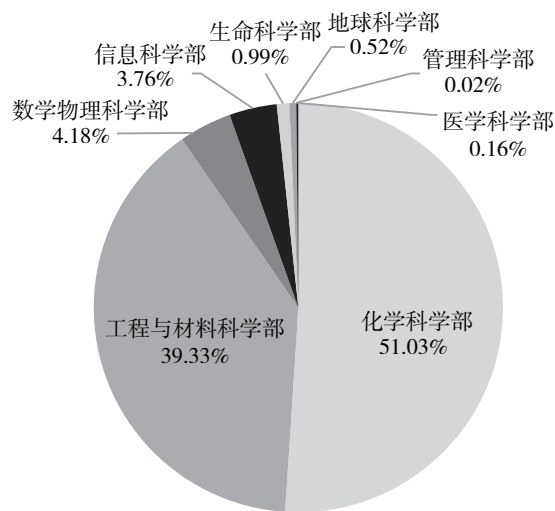


图3 1990—2019年国家自然科学基金燃料电池研究主要资助来源分布

研究内容多聚焦于燃料电池动力系统集成与优化。

1.4 受资助区域分布

国家自然科学基金资助区域分布在一定程度上也代表基础研究力量的地理分布。在燃料电池

① 由于国家自然科学基金(NSFC)交叉科学部成立于2020年11月, 故本次统计不涉及。

研究领域，各地区获得的资助项目数量与金额分布不均衡（见图4），国家自然科学基金的资助经费更多地流向了北京、上海等集聚了全国强大科技资源的区域。此外，由于中国科学院大连化学物理研究所、大连理工大学、武汉理工大学和华中科技大学等机构受到的资助较多，因此辽宁、湖北等区域排名靠前。资助占比高于5%的9个区域，占国家自然科学基金总资助金额的71.13%，资助力度相对集中，也体现出燃料电池研究力量的相对集中。

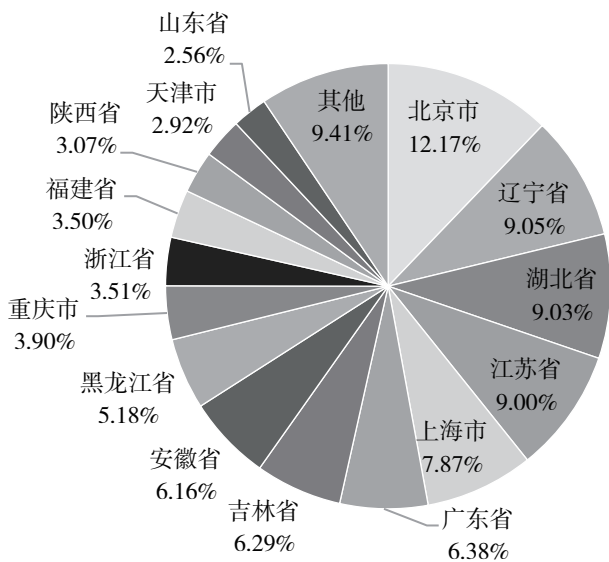


图4 1990—2019年国家自然科学基金受资助区域分布

1.5 受资助机构分布

在燃料电池领域，共有299个机构受到国家自然科学基金资助，其中包括255所高校，42家科研院所和2家企业，如表1所示。高校、科研院所及企业获得的资助项目数量与金额相差很大。其中，高校获得项目的数量与金额分别占总量的86.18%和85.64%，由此可见高校是燃料电池领域基础研究的主力军。科研院所类机构共有42家，中国科学院大连化学物理研究所承担项目71项，其中含4项重大研究计划项目和1项重大项目，金额达3628.80万元，位居第一，整体科研实力表现突出。受国家自然科学基金资助的企业仅有两家，分别为钢铁研究总院和北京有色金属研究总院，共获得3项项目资助，金额合计为135.00万元。从资助项目数量与金额来看，科研院所和企业受国家自然科学基金资助项目与金额较少，但就资助强度而言，高校、科研院所和企业之间相对均衡。

表2列出了燃料电池领域国家自然科学基金资助金额排名前10位的研究机构，可以看出，资助金额均在2000万元以上，机构类型多为“双一流”高校。从所获资助金额分布来看，资助金额排名前10位的研究机构获得了33.74%的科学基金项目经费，资助经费相对集中。从资助强度来看，中国科学院长春应用化学研究所排名第一位，这主要是因为其承担了重点项目、联合基金项目和国际（地区）合作交流项目各2项，资助金额较高。

表1 1990—2019年燃料电池领域受国家自然科学基金资助的机构类型分布

机构类型	金额 (万元)	金额占比 (%)	项目数量	项目数量占比 (%)	机构数量	机构数量占比 (%)	资助强度 (万元/项)
高校	66 994.14	85.64	1 409	86.18	255	85.28	47.55
科研院所	11 096.90	14.19	223	13.64	42	14.05	49.76
企业	135.00	0.17	3	0.18	2	0.67	45.00

表2 1990—2019年燃料电池领域国家自然科学基金资助金额排名前10位的研究机构

序号	机构	机构类型	金额 (万元)	金额占比(%)	项目数量	项目数量占比 (%)	资助强度 (万元/项)
1	中国科学院 大连化学物理研究所	科研院所	3 628.80	4.64	71	4.34	51.11
2	哈尔滨工业大学	高校	2 915.50	3.73	59	3.61	49.42
3	中国科学技术大学	高校	2 865.00	3.66	51	3.12	56.18

续表

序号	机构	机构类型	金额 (万元)	金额占比(%)	项目数量	项目数量占比 (%)	资助强度 (万元/项)
4	重庆大学	高校	2 804.00	3.58	37	2.26	75.78
5	华南理工大学	高校	2 547.50	3.26	42	2.57	60.65
6	清华大学	高校	2 460.10	3.14	48	2.94	51.25
7	华中科技大学	高校	2 317.00	2.96	38	2.32	60.97
8	武汉理工大学	高校	2 301.00	2.94	44	2.69	52.30
9	中国科学院 长春应用化学研究所	科研院所	2 296.00	2.94	27	1.65	85.04
10	上海交通大学	高校	2 261.00	2.89	49	3.00	46.14

2 燃料电池技术资助情况分析

2.1 燃料电池领域资助热点主题

2.1.1 研究热点

为体现国家自然科学基金对于燃料电池领域总体的资助热点,本文基于资助项目的标题和关键词进行主题聚类分析(见图5)。聚类结果体现在两个维度:

(1) 电池种类

目前受到资助的4种主要燃料电池类型为质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池、直接甲醇燃料电池和微生物燃料电池。研究热点主要集中在以下4个方面:①质子交换膜燃料电池。由于其启动快、操作温度低、结构紧凑和功率密度高,自2010年起成为研究热点。当前受资助项目的研究主要涉及高温质子交换膜、碱性阴离子交换膜和复合质子交换膜等内容,例如,西安交通大学申获的“车用质子交换膜燃料电池堆多尺度模拟方法及测试技术研究”、中国科学院长春应用化学研究所申获的“多组分协同团簇基新型PEMFC催化剂研究”等项目。②固体氧化物燃料电池。组成固体氧化物燃料电池单体的电解质、阳极和阴极,特别是钙钛矿阴极材料,都是目前资助项目的研究热点。固体氧化物燃料电池的优势在于分布式发电和热电联供,目前已进入商业化应用阶段^[10]。此外,学者也正在努力研究中低温固体氧化物燃料电池,使固体氧化物燃料电池有更为广泛的应用。③直接甲醇燃料电池。该类电池直接以甲醇为燃料,省去重整制氢过程,也是目前研究和开发的热点。在国家

自然科学基金资助项目中,膜电极和质子交换膜是两个主要的研究方向。④微生物燃料电池。该类电池以产电微生物作为催化剂,氧化有机物及无机物并产生电能,其在污水处理、与其他系统耦合等领域具有广阔应用前景^[11]。产电微生物如何在生物组分和电极之间进行有效的电子传递也是国家自然科学基金资助的重要内容之一。

(2) 关键技术

除了以上4类燃料电池,国家自然科学基金资助的另一个研究热点是氧还原反应及其催化剂,氧还原反应是燃料电池正极的核心反应,其动力学快慢很大程度上决定了整个电池的工作效率高低^[12]。相关资助主要体现在3个方面:①非铂类催化剂、非贵金属催化剂、石墨烯、纳米催化剂和钌基催化剂等的设计与开发;②杂原子掺杂碳材料在酸性介质(如甲酸)中的活性;③催化剂的组分(如铂基贵金属、非贵金属和非金属)、载体(如介孔碳)和结构因素(如共掺杂、氮掺杂)对于催化剂性能的影响。

2.1.2 变化趋势

为体现国家自然科学基金在燃料电池领域资助热点的变化,也考虑到其对于燃料电池领域的资助从2006年开始大幅增长,本文选取词频高于100次的8个关键词(“固体氧化物燃料电池”“质子交换膜燃料电池”“微生物燃料电池”“氧还原反应”“催化剂”“电催化”“石墨烯”和“直接甲醇燃料电池”),针对2006—2019年国家自然科学基金的资助热点进行词频统计,其年度变化趋势如图6所示。



图 5 1990—2019 年国家自然科学基金资助项目的主题聚类图

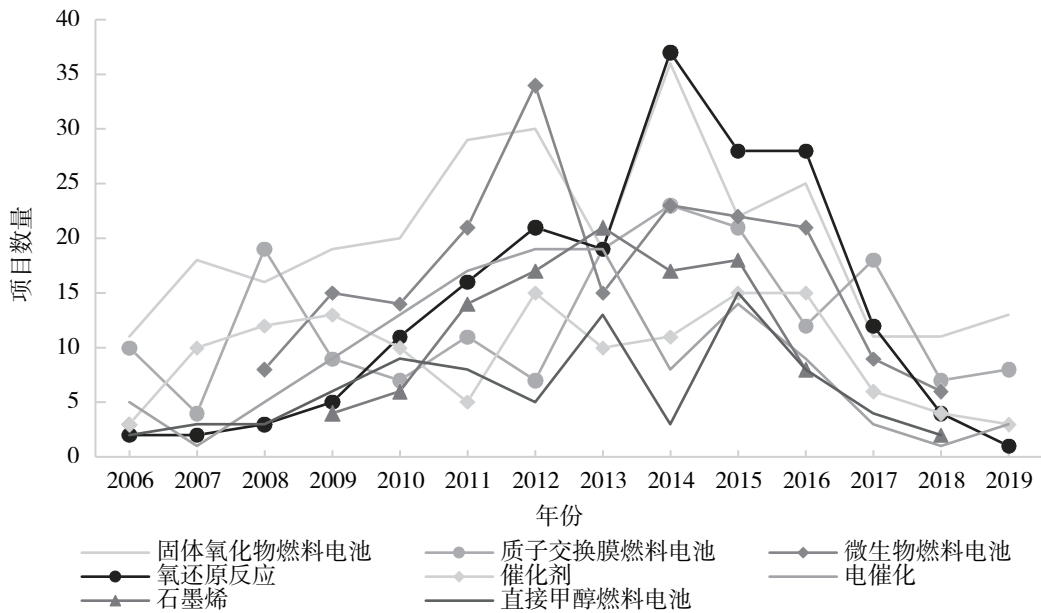


图 6 2006—2019 年国家自然科学基金资助热点的年度变化趋势

就燃料电池种类而言, 固体氧化物燃料电池自 2006 年以来受到了国家自然科学基金的持续资助, 资助项目数量较多, 只是在 2008 年、2012 年和 2017 年分别少于质子交换膜燃料电池和微生物燃料电池; 质子交换膜燃料电池也受到了国家自然科学基金的持续资助, 但起伏较大, 2013—2018 年受到资助的项目较多; 微生物燃料电池 2009—2016 年受到的资助项目较多, 在 2012 年达到顶峰, 高于固体氧化物燃料电池和质子交换膜燃料电池; 除了 2019 年, 直接甲醇燃料电池一直受到国家自然科学基金资助, 但整体数量不多。

就关键技术而言, 氧还原反应、催化剂和电催化自 2006 年以来受到了国家自然科学基金的持续资助, 但资助趋势各有不同。氧还原反应相关研究在 2010—2017 年受到国家自然科学基金资助的项目较多, 相对集中; 催化剂在各个年份受到国家自然科学基金资助的项目相对均衡, 数量不多; 而电催化在 2010—2015 年受到国家自然科学基金资助

的项目较多, 相对集中。石墨烯材料在燃料电池中的应用主要在 2009—2016 年受到国家自然科学基金的资助, 在 2011—2015 年受到资助的项目较多, 体现出阶段性资助的特点。

2.2 主要结构组件资助情况

燃料电池通常由形成离子导电体的电解质板和其两侧配置的燃料极(阳极)、空气极(阴极)及两侧气体流路构成^[13]。所涉及的核心组件主要包括双极板、电解质、扩散层和催化剂等。为了更全面地体现国家自然科学基金对各个结构组件的资助情况, 本文分别从资助项目数量与金额和主要结构组件的资助热点两个方面进行分析。

2.2.1 资助项目数量与金额分布

通过分析 1990—2019 年国家自然科学基金对燃料电池主要结构组件的资助情况可知(见表 3), 资助主要集中在催化剂、电极和电解质三大类, 其中燃料电池催化剂相关研究受到资助金额最多, 达到 31 526.90 万元, 占比 40.30%。

表 3 1990—2019 年国家自然科学基金对燃料电池主要结构组件的资助情况

主要结构组件	金额(万元)	金额占比(%)	项目数量	项目数量占比(%)	资助强度(万元/项)
催化剂	31 526.90	40.30	625	38.23	50.44
电极	20 532.80	26.25	463	28.32	44.35
电解质	8 392.70	10.73	197	12.05	42.60
膜电极	2 646.00	3.38	48	2.94	55.13
双极板	1 417.00	1.81	29	1.77	48.86
电堆	878.10	1.12	5	0.31	175.62
气体扩散层	209.00	0.27	8	0.49	4.13
其他	12 626.10	16.14	259	15.89	48.75

2.2.2 主要结构组件的资助热点

鉴于催化剂、电极和电解质是受到资助最多的结构组件, 为了直观地体现资助热点, 本文针对这三大类, 分别绘制可视化聚类图, 并进行分析。

(1) 催化剂

催化剂是燃料电池的关键结构组件, 决定了燃料电池的工作性能。质子交换膜燃料电池多采用铂等贵金属作为催化剂, 甲醇燃料电池使用较多的是铂基负载型催化剂, 如 Pt/C 催化剂或 PtM/C 合金催化剂等^[14]。固体氧化物燃料电池、碱性燃料电池和熔融碳酸盐燃料电池可采用过渡金属镍、钴和

锰等非贵金属作为催化剂, 对于贵金属催化剂的依赖性较低^[15]。

金属铂是常用的催化剂, 但其资源短缺、价格昂贵、稳定性差且存在阳极毒化的问题, 成为制约燃料电池发展和应用的关键因素^[16]。因此, 开发性能优异、成本低廉的非贵金属氧还原催化剂已成为燃料电池进一步发展亟待解决的关键问题。对催化剂项目主题进行聚类分析(见图 7), 目前研究热点主要集中在提高铂基阴极氧还原催化剂的稳定性与利用率; 改进电极结构以降低铂负载量; 降低燃料电池成本和开发寻找完全可以替代铂、低成本

受国家自然科学基金资助 中国燃油油催 性能的影响因素在于触媒性能 电极材料与电极制

(2) 电极 融碳酸盐型燃料电池电解质一般为熔融态碳酸盐

电极分为阳极和阴极两部分。是燃料发生氧化。混合物^[22]。

反应与氧化剂发生还原反应的电化学反应场所,其性能的影响因素在于触媒性能、电极材料与电极制程工艺等^[20]。从图8可以看出,燃料电池电极研究内容集中在固体氧化物燃料电池、微生物燃料电池和质子交换膜燃料电池的电极材料和电催化性能等方向。

由解质是燃料由池的关键结构组件 在阴极

— 29 —

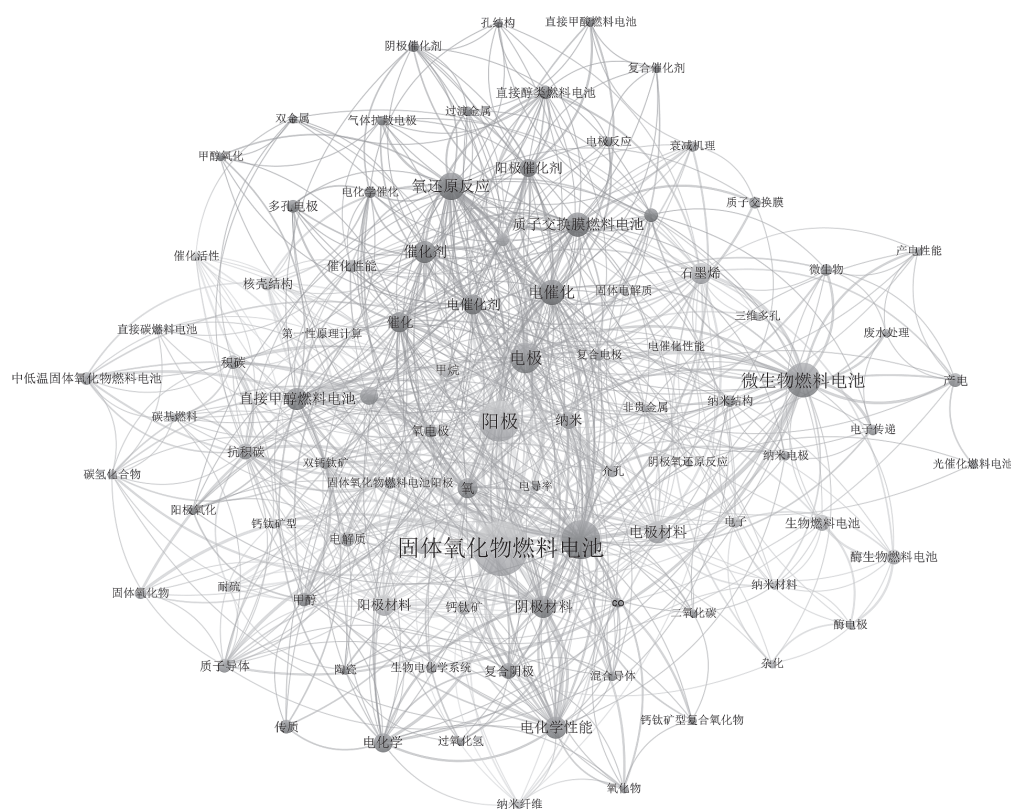


图8 1990—2019年国家自然科学基金资助的电极项目主题聚类图

从图9可以看出, 质子交换膜是目前燃料电池电解质的研究热点。质子交换膜为固态的高分子聚合物膜, 是质子交换膜燃料电池的核心结构组件, 对电池性能起关键作用, 除全氟磺酸膜外, 学者对多种磺化聚合物(如磺化聚酰亚胺、磺化聚芳醚)等在燃料电池中的应用也进行了相关研究。此外, 高温质子交换膜、碱性阴离子交换膜和自增湿功能复合膜等也是国家自然科学基金资助的研究热点^[3]。

受国家自然科学基金资助, 中国在燃料电池电解质研究方面取得了一系列重要进展。中国地质大学(武汉)吴艳团队、东南大学朱斌团队和湖北大学黄敏团队合作, 解决了半导体异质界面场诱导金属态限域质子传输破解燃料电池研究中的关键难题^[23]。中国地质大学程寒松教授团队制备了一种新型的基于磺化聚醚醚酮和溴化聚苯醚的复合质子交换膜^[24]。

2.3 产业链资助分布

在燃料电池产业链中, 上游是燃料生产与供应, 中游是燃料电池系统, 下游是燃料电池应用。为了解国家自然科学基金资助在整个燃料电池产业链上的分布情况, 本文对所有国家自然科学基金

金燃料电池项目的产业链进行了人工标注和分析, 相应的资助情况如图10所示。

从图10中可以看出, 国家自然科学基金对于燃料电池的资助重心在产业链的中游, 也就是燃料电池系统本身, 国家自然科学基金资助项目数量与金额占比分别为86.73%和85.89%, 这也基本契合了国家自然科学基金资助基础研究的定位。国家自然科学基金对于燃料电池的上游和下游也有所资助, 相对而言, 下游应用受到的资助要略高于上游, 其受到资助项目数量与金额约占10%, 涉及的应用主要包括: 废水处理、环境污染控制、分布式发电和能源动力等; 应用所涉及的领域主要是燃料电池汽车、医疗和燃气轮机等(见表4), 其中, 燃料电池汽车相关的项目数量与金额占比最高, 这与中国陆续发布的新能源汽车产业发展规划密不可分^[25]。

3 结论

本文基于“全球科研项目数据库”中国家自然科学基金项目信息, 分析了燃料电池领域受国家自然科学基金资助的力度, 从资助热点主题、主要结

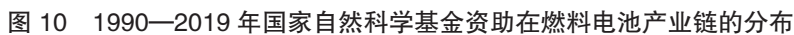
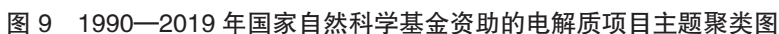


表 4 1990—2019 年国家自然科学基金资助燃料电池下游应用领域情况

下游应用领域	金额（万元）	金额占比（%）	项目数量	项目数量占比（%）
燃料电池汽车	3 259.44	38.27	41	25.47
废水处理	1 392.00	16.34	36	22.36
能源动力	1 094.00	12.84	17	10.56
分布式发电	996.00	11.69	22	13.66
环境污染控制	905.70	10.63	24	14.91
医疗	257.00	3.02	6	3.73

续表

下游应用领域	金额(万元)	金额占比(%)	项目数量	项目数量占比(%)
潜艇	163.00	1.91	2	1.24
无人机	126.00	1.48	2	1.24
燃气轮机	97.00	1.14	4	2.49
船舶	84.00	0.99	1	0.62
机器人	66.00	0.78	3	1.86
航天	47.00	0.55	2	1.24
火箭	31.00	0.36	1	0.62

构组件以及产业链等维度进行了主题挖掘,得出以下结论。

国家自然科学基金作为推动中国基础研究发展的重要机制,从1990年开始对燃料电池领域相关基础研究予以持续资助,在“十一五”和“十二五”期间,资助数量与金额均进入快速增长阶段,“十三五”期间,资助数量与金额则有所下降,但其平均资助强度整体呈现出大幅增长的趋势。

国家自然科学基金对于燃料电池领域的资助体现在多种不同的项目类型上,但以探索系列的面上项目和人才系列的青年科学基金项目为主,体现了其坚持将鼓励自由探索作为基本立足点、培育原始创新能力与服务创新驱动发展作为核心任务、发现培养科技才俊作为根本使命的总体思路。

从资助机构来看,国家自然科学基金对于燃料电池领域的资助主要集中在高校,这反映出高校是燃料电池基础研究的主力军。少数科研院所的燃料电池研究也受到了国家自然科学基金资助,中国科学院大连化学物理研究所和中国科学院长春应用化学研究所都承担了相当数量的项目,整体科研实力表现突出。

燃料电池领域的资助项目主要涵盖了两大类燃料电池,一类是氢氧燃料电池,另一类是生物燃料电池。就氢氧燃料电池而言,国家自然科学基金资助涵盖了从氢气的产生到燃料电池应用的整个产业链。就生物燃料电池而言,国家自然科学基金除了资助生物燃料电池的相关技术体系以外,对生物燃料电池在废水处理与环境污染控制方面的应用方面也进行了一定程度的资助,与燃料电池产业整体的发展进展较为契合。

就资助布局 and 广泛覆盖性而言,燃料电池技术的快速发展与国家自然科学基金长期持续的资

助密切相关。虽然燃料电池的许多技术,特别是氢燃料电池已经发展得相对成熟,并实现了产业化应用,但是燃料电池领域仍有许多关键技术需要进一步突破与创新,以及培育稳定的人才队伍。同时,国家自然科学基金在燃料电池领域仍需持续设立相关专项课题,以稳定的经费支持促进该领域的创新与发展。■

参考文献:

- [1] 《中国电力百科全书》编辑委员会,《中国电力百科全书》编辑部.中国电力百科全书(综合卷)[M/OL].北京:中国电力出版社,2001[2022-03-07].<https://xuewen.cnki.net/read-R2006072300000404.html>.
- [2] 王华文,齐国祯.燃料电池技术研究进展及产业化[J].高桥石化,2005,20(3):46-50.
- [3] 孙公权,衣宝廉.21世纪最理想的发电技术之一:燃料电池[J].中国科学(化学),2011,41(12):1775-1776.
- [4] 中华人民共和国发展和改革委员会.发展改革委能源局印发《能源技术革命创新行动计划(2016-2030年)》[EB/OL].[2022-01-25].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201606/t20160601_963080.html.
- [5] 刘应都,郭红霞,欧阳晓平.氢燃料电池技术发展现状及未来展望[J].中国工程科学,2021,23(4):162-171.
- [6] 中华人民共和国发展和改革委员会.《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》[EB/OL].[2023-03-20].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html?code=&state=123.
- [7] 国家自然科学基金委员会.国家自然科学基金“十三五”发展规划[EB/OL].[2022-03-23].<https://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/xxgk/043/info72249.htm>.
- [8] 唐福杰.促进国家自然科学基金多元化投入的建议[J].

- 中国科技论坛, 2020(9): 11-12.
- [9] 国家自然科学基金委员会. 中国汽车产业创新发展联合基金 [EB/OL]. [2022-03-20]. <https://www.nsfc.gov.cn/nsfc/cen/xmzn/2019xmzn/12/09.html>.
- [10] 乔婧, 高子涵. 燃料电池产业发展现状分析研究 [J]. 情报工程, 2015(1): 61-67.
- [11] 郑琳珊, 张秀玲, 李惠雨, 等. 微生物燃料电池技术及其影响因素研究进展 [J]. 精细化工, 2021, 38(1): 1-8.
- [12] 陈梁, 陈倩, 陈洋洋, 等. 燃料电池用氧还原反应催化剂的研究进展 [J]. 湖南理工学院学报 (自然科学版), 2022, 35(1): 47-50, 91.
- [13] 李雷明, 朱清峰, 曹涛. 燃料电池在通信领域应用的展望和分析 [J]. 邮电设计技术, 2016(12): 68-74.
- [14] 王鸿辉, 周亮, 高伟达, 等. 质子交换膜燃料电池催化剂研究进展 [J]. 电力学报, 2020(4): 344-354.
- [15] 陈诵英, 王琴. 燃料电池、氢能经济和催化 [J]. 石油化工, 2004, 33(增刊): 1220-1222.
- [16] 刘宪伟, 薛俊海, 朱威, 等. 非铂燃料电池催化剂研究进展 [J]. 太阳能学报, 2020(6): 286-294.
- [17] CHENG H, GUI R J, YU H, et al. Subsize Pt-based intermetallic compound enables long-term cyclic mass activity for fuel-cell oxygen reduction[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(35): e2104026118.
- [18] TIAN X L, ZHAO X, SU Y Q, et al. Engineering bunched Pt-Ni alloy nanocages for efficient oxygen reduction in practical fuel cells[J]. Science, 2019, 366(6467): 850-856.
- [19] ZHOU Y Y, XIE Z Y, JIANG J X, et al. Lattice-confined Ru clusters with high CO tolerance and activity for the hydrogen oxidation reaction[J]. Nature catalysis, 2023, 3(4): 454-462.
- [20] 肖雪. 直接过氧化氢燃料电池 (Fe、Ni、Co) 基催化电极的制备及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [21] 尚凤杰, 李沁兰, 石永敬, 等. 固体氧化物燃料电池电解质材料的研究进展 [J]. 功能材料, 2021, 52(6): 6076-6083, 6089.
- [22] 陆丁丁, 隋然. 燃料电池的研究进展及其应用 [J]. 中国化工贸易, 2015, 7(23): 315-317.
- [23] WU Y, ZHU B, HUANG M, et al. Proton transport enabled by a field-induced metallic state in a semiconductor heterostructure[J]. Science, 2020, 369(6500): 184-188.
- [24] LIU X P, ZHANG Y F, CHEN Y Z, et al. A superhydrophobic bromomethylated poly(phenylene oxide) as a multifunctional polymer filler in SPEEK membrane towards neat methanol operation of direct methanol fuel cells[J]. Journal of membrane science, 2017, 544: 58-67.
- [25] 侯明, 邵志刚, 俞红梅, 等. 2019 年氢燃料电池研发热点回眸 [J]. 科技导报, 2020, 38(1): 137-150.

Retrospective Analysis of NSFC-Funded Projects on Fuel Cells

DAN Ying¹, FAN Xuhui², WANG Xiaoli¹, LIU Hua¹, GAO Nan¹, FU Zhijie³

(1. Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038;

2. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088;

3. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088)

Abstract: The National Natural Science Foundation of China (NSFC) has been playing a leading role in the development of technical fields, and the NSFC-funded projects can reflect the trend and hotspots of technical development of the relevant fields to a certain extent. Taking the NSFC-funded projects on fuel cells as the research object, adopting the bibliometrics and topic clustering methods, this paper provided a quantitative analysis on the number and amount of funded projects, funding pattern, funding sources, funded regions and funded institutions, and presented the topic mining results from the perspectives of funding hotspots, the major structural components and industry chain of fuel cells, so as to provide reference for researchers in the field of fuel cells to master the technical development trend and apply for funding projects. Also, some recommendations were proposed on the future funding direction.

Keywords: fuel cell; National Natural Science Foundation of China; funding hotspots; scientometrics