

全球碳纤维技术发展分析及其 对我国的启示^{*}

田雅娟¹ 张志强^{*,1} 陶 诚² 杨 明² 巴 金³ 陈云伟¹

(1. 中国科学院成都文献情报中心 科学计量与科技评价研究中心(SERC), 成都 610041;

2. 中国科学院发展规划局, 北京 100864; 3. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京, 100094)

摘 要:碳纤维是一种含碳量在95%以上, 高强度、高模量纤维的新型高分子无机纤维材料, 力学性能优异, 被广泛应用于航空航天、轨道交通、车辆制造、武器装备等领域。碳纤维研发已被我国列为国家战略性新兴产业。本文简明概述了碳纤维技术领域主要研发国家/地区的研发态势, 分析了美、日、欧、韩等碳纤维技术先进国家/地区的发展经验; 基于文献计量学分析方法, 对2010年以来全球碳纤维研究的论文和专利产出年度趋势、领先研发机构、研究热点等进行分析, 以反映碳纤维技术主要研发国家/地区、机构的竞争态势; 扫描了2015年以来碳纤维技术研发最新动态和技术进展, 以揭示前沿研发趋势。论文最后针对我国碳纤维技术研发提出了几点建议, 为我国碳纤维技术未来研发决策布局提供咨询建议。

关键词:新材料; 碳纤维; 文献计量; 研究热点; 领先机构

中图分类号: N99

文献标识码: A

doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2018.08.001

Analysis of Global Carbon Fiber Technology Development and Its Enlightenment to China^{*}

TIAN Yajuan¹ ZHANG Zhiqiang^{*,1} TAO Cheng² YANG Ming²
BA Jin³ CHEN Yunwei¹

(1. Scientometrics & Evaluation Research Center (SERC), Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Bureau of Development Planning, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

3. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Carbon fiber is a new high-strength and high-modulus inorganic fiber material that contain more than 95% carbon. The excellent mechanical properties enable the carbon fiber widely used in aerospace, rail transit, vehicles, weapons and other fields. The research and development of carbon fiber have been listed as an emerging national strategic industry. This paper briefly summarizes the R&D situation of the main countries in the field of carbon fiber technology, and analyzes the development experience of the advanced countries/regions in carbon fiber technology, such as the United States, Japan, Eu-

2018-07-14 收稿, 2018-08-14 接受, 2018-08-17 网络发表

^{*} 中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项(GHJ-ZLZX-2017-31)资助

^{**} 通讯作者, E-mail: zhangzq@clas.ac.cn

rope countries and Korea. Based on the bibliometric analysis method, the papers and patents of carbon fiber research of the world since 2010 is analyzed, with the annual trend, hotspots and the advanced institutions of carbon fiber research discussed. As a result, the competition situation of the main countries/regions and major institutions of carbon fiber technology is illustrated. Also, the latest development trends and technological progress of carbon fiber technology since 2015 are scanned, in order to reveal the trend of research and development. Finally, the article gives some suggestions on the development of carbon fiber in China, which will provide key information and guidance to carbon fiber technology development in future in our country.

Key words: carbon fiber; new material; bibliometric analysis; research hotspots; advanced institutions

1 引言

碳纤维是含碳量高于 95% 的无机高分子纤维无机新材料,具有低密度、高强度、耐高温、高化学稳定性、抗疲劳、耐摩擦等优异的基本物理及化学性能,并有高振动衰减性,良好的导电导热性能、电磁屏蔽性能以及较低的热膨胀系数等特性。这些优异的性能使得碳纤维被广泛应用于航空航天、轨道交通、车辆制造、武器装备、工程机械、基础设施建设、海洋工程、石油工程、风力能源、体育用品等领域。

碳纤维主要核心技术工艺、产能等主要被日本、美国以及欧洲少数发达国家和地区把控,并且,由于其高技术含量、高利润回报,西方国家长期对我国实行严格的技术封锁。基于碳纤维材料的国家战略需求以及国际技术封锁的紧迫形势,我国已将其列为重点支持的新兴产业的核心技术之一。在国家“十二五”科技规划中,高性能碳纤维的制备和应用技术是国家重点支持的战略性新兴产业核心技术之一。2015 年 5 月,国务院正式发布《中国制造 2025》,把新材料作为重点领域之一进行大力推动和发展,其中高性能结构材料、先进复合材料是新材料领域的发展重点。2015 年 10 月,工信部正式公布了《中国制造 2025 重点领域技术路线图》,将“高性能纤维及其复合材料”作为关键战略材料,2020 年的目标为“国产碳纤维复合材料满足大飞机等重要装备的技术要

求”。2016 年 11 月,国务院印发《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》,明确指出加强新材料产业上下游协作配套,在碳纤维复合材料等领域开展协同应用试点示范,搭建协同应用平台。2017 年 1 月,工信部、发改委、科技部、财政部联合制定《新材料产业发展指南》,提出到 2020 年,“在碳纤维复合材料、高品质特殊钢、先进轻合金材料等领域实现 70 种以上重点新材料产业化及应用,建成与我国新材料产业发展水平相匹配的工艺装备保障体系。”

由于碳纤维及其复合材料在国防和民生中都要重要作用,许多专家都聚焦于其发展情况和研究趋势的分析。周宏^[1-3]综述了美国科学家在高性能碳纤维技术发展初期所做的科学技术贡献,并对碳纤维的 16 个主要应用领域及近期技术进展进行了扫描和报道;韦鑫等^[4]对聚丙烯腈基碳纤维的生产工艺、性能及应用及目前技术发展状况进行了综述,并针对国内碳纤维发展中存在的问题提出了意见。另外,也有学者针对碳纤维及其复合材料领域的论文和专利开展计量学分析,例如马祥林等^[5]从计量学角度对 1998—2017 年碳纤维中国专利的专利权人分布和应用领域进行了分析;杨思思等^[6]对全球碳纤维布专利进行统计,从专利的年度发展趋势、专利权人、专利技术热点和核心专利等角度进行了分析。

从研究发展轨迹看来,我国的碳纤维研究几

乎与世界同步启动,但发展缓慢,高性能碳纤维的生产规模和质量与国外相比都有差距,迫切需要加快研发进程,提前战略布局,抢占未来产业发展先机。因此,本文首先对各国在碳纤维研究领域的项目布局进行调研,以了解各国研发路线规划;其次,由于碳纤维的基础研究与应用研究对于碳纤维的技术研发来说都极为重要,因此,我们从 SCI 论文以及专利两个角度同时进行计量分析,以全面了解碳纤维领域的研发进展;并对近期的科研动态进行扫描,以窥测国际前沿研发进展。最后,基于以上研究结果,为我国碳纤维领域的研究发展路线提出了建议。

2 主要国家/地区碳纤维研究项目布局

碳纤维的主要生产国家/地区包括日本、美国、韩国、欧洲部分国家及中国台湾。技术先进国家在碳纤维技术发展初期已经意识到该材料的重要性,纷纷进行战略布局,大力推动碳纤维材料研发。

2.1 日本

日本是碳纤维技术最发达的国家。日本东丽、东邦和三菱丽阳 3 家企业的碳纤维产量约占全球 70% ~ 80% 的市场份额。尽管如此,日本依然非常重视保持在该领域的优势,尤其是高性能 PAN 基碳纤维以及能源和环境友好相关技术的研发,并给予人力、经费上的大力支持,在包括“能源基本计划”、“经济成长战略大纲”和“京都议定书”等多项基本政策中,均将此作为应当推进的战略项目。日本经济产业省基于国家能源和环境基本政策,提出了“节省能源技术研究开发方案”。在上述政策的支持下,日本碳纤维行业得以更加有效地集中各方资源,推动碳纤维产业

共性问题的解决。

“革新性新结构材料等技术开发”(2013—2022)是在日本“未来开拓研究计划”下实施的一个项目,以大幅实现运输工具的轻量化(汽车减重一半)为主要目标,进行必要的革新性结构材料技术和不同材料的结合技术的开发,并最终实现其实际应用。日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)于 2014 年接手该研究开发项目后,制定了几个子项目,其中碳纤维研究项目“革新碳纤维基础研究开发”的总体目标是:开发新型碳纤维前体化合物;阐明碳化结构形成机理;开发并标准化碳纤维的评估方法。该项目由东京大学主导,NEDO、东丽、帝人、东邦特耐克丝、三菱丽阳联合参与,已在 2016 年 1 月取得了重大进展,是日本继 1959 年发明“近藤方式”后,在 PAN 基碳纤维领域的又一重大突破^[7]。

2.2 美国

美国国防部高级研究计划局(DARPA)在 2006 年启动先进结构纤维项目,目的是召集全国优势科研力量,开发以碳纤维为主的下一代结构纤维。在此项目支持下,美国佐治亚理工学院在 2015 年突破了原丝制备技术,使其弹性模量提升了 30%,标志着美国具备了第三代碳纤维的研制能力。

2014 年,美国能源部(DOE)宣布为“针对非食用生物质糖类转化为丙烯腈的多步骤催化过程”、“研究和优化多通路生产生物质衍生的丙烯腈”两个项目提供 1130 万美元资助,以推进用农业残留物、木本生物质等可再生非食物基原料生产具有成本竞争力的可再生高性能碳纤维材料相关研究,并计划在 2020 年以前,将生物质可再生碳纤维的生产成本降至 5 美元/磅以下^[8]。

2017 年 3 月,美国能源部再次宣布提供 374

万美元资助由美国西部研究所(WRI)领导的“低成本碳纤维组件研发项目”,主要以煤和生物质等资源为原料,开发低成本的碳纤维部件。

2017 年 7 月,美国能源部宣布资助 1940 万美元用于支持先进高效车辆技术研发,其中 670 万美元用于资助利用计算材料工程制备低成本碳纤维,主要包括开发集成计算机技术的多尺度评价方法,用于评估新碳纤维前驱体的积极性,并利用先进分子动力学辅助的密度泛函理论、机器学习等工具来开发先进计算机工具,以提高低成本碳纤维原料的遴选效率^[9]。

2.3 欧洲

欧洲碳纤维产业在 20 世纪七八十年代紧随日本和美国发展起来,但因为技术以及资本等原因,许多单一生产碳纤维的企业没有坚持到 2000 年后的碳纤维需求高增长期就消失了,德国 SGL 公司是欧洲唯一一家在世界碳纤维市场上占据主要份额的公司。

2011 年 11 月,欧盟启动 EUCARBON 项目,致力于提升欧洲在航天用碳纤维和预浸渍材料方面的制造能力。项目历时 4 年,总投入 320 万欧元,并于 2017 年 5 月成功建立欧洲第一条面向卫星等航天领域用特种碳纤维生产线,从而使欧洲有望摆脱对该产品的进口依赖,确保材料供应安全^[10]。

欧盟第七框架计划以 608 万欧元支持“利用具有成本效益和可调控性能的新型前驱体制备功能化碳纤维”(FIBRALSPEC)项目(2014—2017)。该项目为期 4 年,由希腊雅典国立技术大学主导,意大利、英国、乌克兰等多国公司联合参与,致力于创新和改进连续性制备聚丙烯腈基碳纤维的流程,实现连续 PAN 基碳纤维实验性生产。该项目已经成功完成了从可再生有机聚合物资源中生产

碳纤维以及强化复合技术的开发应用(如超级电容器、快速应急避难所,以及纳米纤维的原型机械电动旋涂机及生产线研制等)^[11]。

越来越多的工业领域(例如汽车、风能发电、造船业)需要轻量高性能复合材料,这对碳纤维产业来说是巨大的潜在市场。欧盟投资 596.8 万欧元启动 CARBOPREC 项目(2014—2017),其战略性目标是从广泛存在于欧洲的可再生材料中开发低成本前驱体,通过碳纳米管增强生产高性能碳纤维^[12]。

欧盟的 Clean Sky II 研究计划资助了一项“复合材料轮胎研发”项目(2017),由德国弗劳恩霍夫生产和系统可靠性研究所(LBF)负责,计划开发用于空客 A320 的碳纤维增强复合材料飞机前轮部件,目标是较传统金属材料减重 40%。项目经费约为 20 万欧元^[13]。

2.4 韩国

韩国的碳纤维研发与产业化起步较晚,研发始于 2006 年,2013 年开始正式进入实用化阶段,扭转了韩国碳纤维全部依赖进口的局面。以韩国本土的晓星集团和泰光事业为代表的行业先锋积极进行碳纤维领域行业布局,势头发展强劲。此外日本东丽在韩国建立的碳纤维生产基地也对韩国本土的碳纤维市场起到了促进作用。

韩国政府选择将晓星集团打造成碳纤维的创新产业聚集地。旨在形成碳纤维材料产业集群,促进全北地区创意经济生态系统的发展,最终目标形成碳纤维材料→零部件→成品一条龙产业链,建立可与美国硅谷比肩的碳纤维孵化集群,挖掘新市场,创造新的附加值,到 2020 年实现碳纤维相关产品出口额 100 亿美元(折合人民币约 552 亿元)的目标^[14]。

3 全球碳纤维研究科研产出分析

本节统计了 2010 年以来的碳纤维研究相关 SCI 论文和 DII 专利数据,分析全球碳纤维技术的研发进展。

数据来源:科睿唯安 (Clarivate Analytics) 出版的 Web of Science 数据库中的 SCIE 数据库和 Derwent Innovations Index 数据库;检索时间范围:2010—2017 年;检索日期:2018 年 2 月 1 日。

SCI 论文检索策略:Ts = ((carbonfibre * or carbonfiber * or (" carbon fiber * " not " carbon Fiberglass") or " carbon fibre * " or " carbon filament * " or ((polyacrylonitrile or pitch) and " precursor * " and fiber *) or (" graphite fiber * ")) not (" bamboo carbon")))。

Derwent 专利检索策略:Ti = ((carbonfibre * or carbonfiber * or (" carbon fiber * " not " carbon Fiberglass") or " carbon fibre * " or " carbon filament * " or ((polyacrylonitrile or pitch) and " precursor * " and fiber *) or (" graphite fiber * ")) not (" bamboo carbon")) or TS = ((carbonfibre * or carbonfiber * or (" carbon fiber * " not " carbon fiberglass") or " carbon fibre * " or " carbon filament * " or ((polyacrylonitrile or pitch) and " precursor * " and fiber *) or (" graphite fiber * ")) and IP = (D01F-009/12 or D01F-009/127 or D01F-009/133 or D01F-009/14 or D01F-009/145 or D01F-009/15 or D01F-009/155 or D01F-009/16 or D01F-009/17 or D01F-009/18 or D01F-009/20 or D01F-009/21 or D01F-009/22 or D01F-009/24 or D01F-009/26 or D01F-09/28 or D01F-009/30 or D01F-009/32 or C08K-007/02 or C08J-005/04 or C04B-035/83 or D06M-014/36

or D06M-101/40 or D21H-013/50 or H01H-001/027 or H01R-039/24))。

3.1 年度趋势

2010 年以来,全世界碳纤维研究共发表相关论文 16553 篇,申请发明专利 26390 项,均呈现出逐年稳步上升的态势(图 1)。

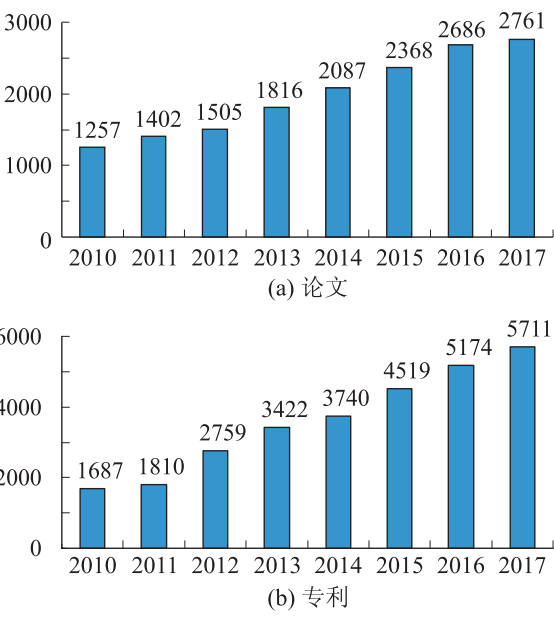


图 1 碳纤维论文与专利年度趋势(2010—2017)
Fig. 1 Annual trends of carbon fiber papers and patents(2010-2017)

3.2 国家或地区分布

中国的碳纤维论文和发明专利申请数量(此处统计优先权国家)均最多,呈现领先的优势;论文数量排在 2~5 位的依次是美、日、英、韩;发明专利申请数量排在 2~5 位的国家依次是日、韩、美、德(图 2)。

3.3 机构分析

全球碳纤维研究论文产出最多的 10 个机构均来自中国,其中排在前 5 位的依次是:中国科学院、哈尔滨工业大学、西北工业大学、东华大学、北京航空航天大学。国外机构中,印度理工学院、东京大学、布里斯托大学、莫纳什大学、曼彻斯特大

学、佐治亚理工学院均排在第 10 ~ 20 名之间 (图 3)。

专利申请数量排名前 30 机构中,日本有 5 家,且其中 3 家位居前五,东丽公司排名第 1,其后依次为三菱丽阳(第 2)、帝人(第 4)、东邦(第 10)、日本东洋纺公司(第 24);中国机构有 21 家,中国石化集团公司专利量最多,排名第 3,其次是哈尔滨工业大学、河南科信电缆公司、东华大学、

中国上海石化、北京化工大学等,中科院山西煤化所申请发明专利 66 件,排名第 27 位;韩国机构有 2 家,其中晓星集团排名靠前,居第 8 位(图 4)。

从产出机构上看,论文产出主要来自于大学及科研机构,专利产出主要来自于企业,作为碳纤维研发产业发展的主体,企业都非常重视碳纤维研发技术的保护,尤其是日本的两家大公司,专利数量遥遥领先。

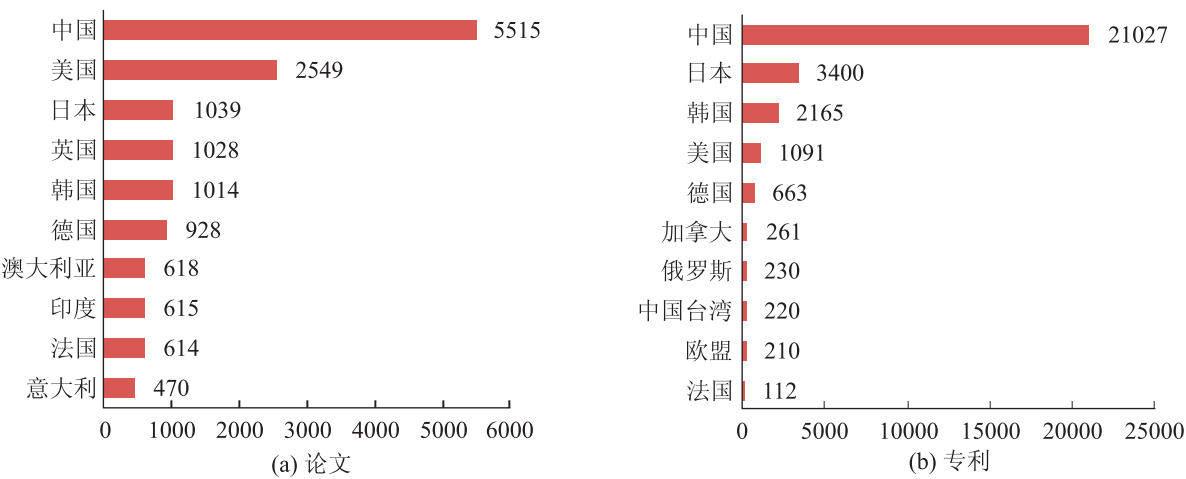


图 2 碳纤维论文与专利 Top10 国家或地区(2010—2017)

Fig. 2 Top10 countries/regions of carbon fiber(from the number of papers and patents) (2010-2017)

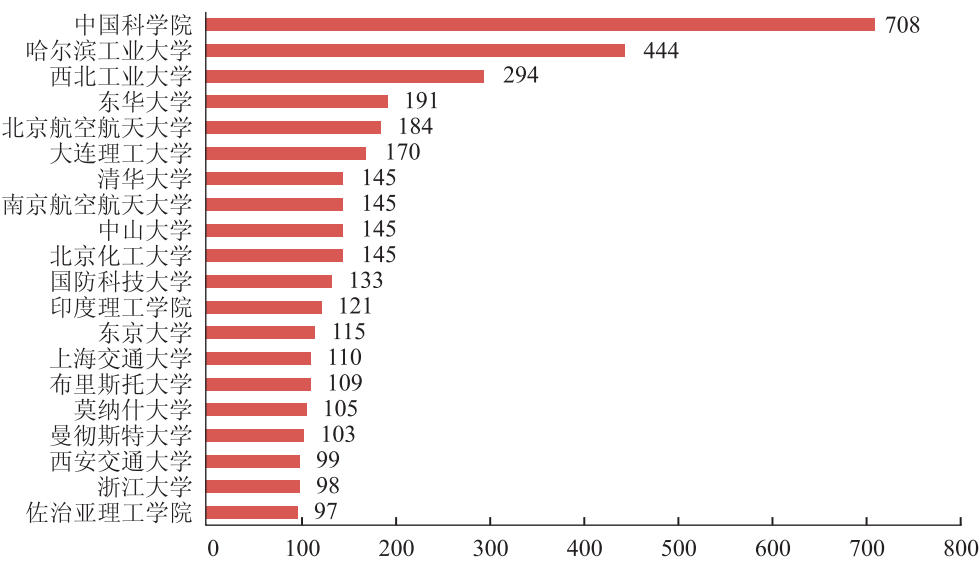


图 3 碳纤维论文数量 Top20 机构(2010—2017)

Fig. 3 Top20 organizations of carbon fiber papers (2010-2017)

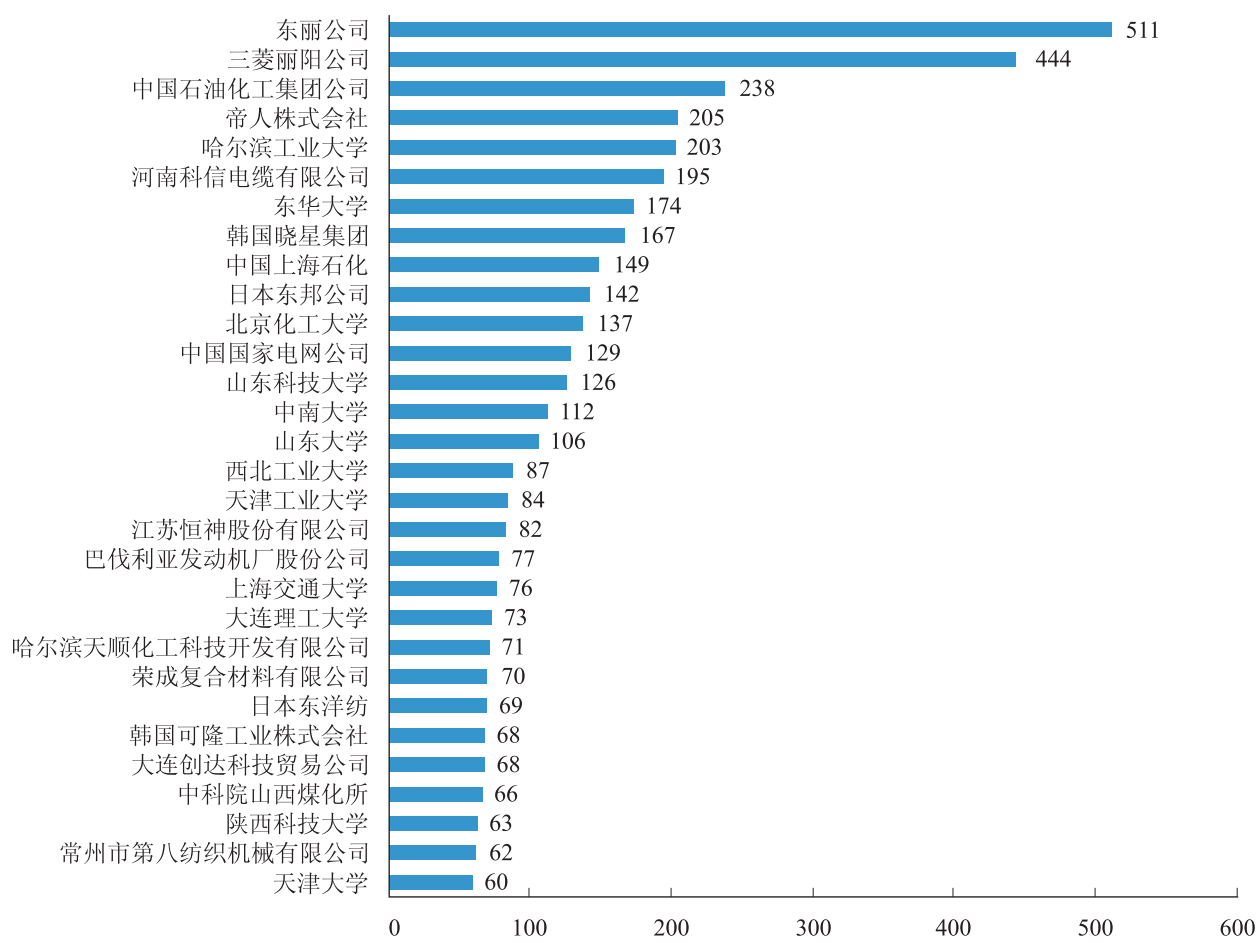


图 4 碳纤维专利数量 Top30 机构(2010—2017)

Fig. 4 Top30 organizations of carbon fiber patent quantity(2010-2017)

3.4 研究热点

我们对碳纤维论文与专利的研究主题词分别进行聚类分析,发现:

碳纤维研究论文涉及最多的研究主题是:碳纤维复合材料(包括碳纤维增强复合材料、聚合物基复合材料等)、机械性能研究、有限元分析、碳纳米管、脱层、加强、疲劳、微结构、静电纺丝、表面处理、吸附等。涉及这些关键词的论文占全部论文数量的 38.8%。

碳纤维发明专利涉及最多的主题是碳纤维的制备、生产设备及复合材料。其中,日本东丽、三菱丽阳、帝人等公司均在“用碳纤维增强高分子化合物”领域进行了重要技术布局,另外,东丽

和三菱丽阳在“聚丙烯腈制作碳纤维及生产设备”、“用不饱和腈,如聚丙烯腈、聚偏氰化物乙烯制作碳纤维”等技术上有较大比重的专利布局,而日本帝人公司在“碳纤维与含氧化合物复合材料”有较大比重的专利布局。

我国中石化集团、北京化工大学、中科院宁波材料所在“聚丙烯腈制作碳纤维及生产设备”上有较大比重的专利布局;另外,北京化工大学、中科院山西煤化所和中科院宁波材料所重点布局“用无机元素纤维作为配料的高分子化合物制备”技术有;哈尔滨工业大学重点布局“碳纤维的处理”、“碳纤维与含氧化合物复合材料”等技术。

另外,从全球专利的技术年度分布统计中发

现,最近三年一些新的热点领域开始出现,例如:“由在主链中形成羧酸酰胺键合反应得到的聚酰胺的组合物”、“由主链中形成 1 个羧酸酯键反应得到的聚酯的组合物”、“以合成材料为主的机动车材料”、“环状多羧酸的含氧化合物作为配料的碳纤维复合材料”、“以三维形式固着或处理纺织材料的方法”、“不饱和醚、乙缩醛、半缩醛、酮或醛通过仅涉及碳—碳不饱和键的反应而制得的高分子化合物”、“绝热材料管子或电缆”、“以磷酸酯类有机物作为配料的碳纤维复合材料”等。

4 2015 年以来碳纤维技术研发动态

最近两年,碳纤维领域研发成果不断涌现,大部分突破性成果来自美国和日本。最新前沿技术不仅聚焦于碳纤维生产制备技术,也投射于汽车材料轻量化、3D 打印、发电材料等更广泛领域的应用。另外,碳纤维材料的回收循环利用、木质素基碳纤维制备等成果均有亮眼表现。代表性成果介绍如下:

1)美国佐治亚理工学院突破第三代碳纤维技术

2015 年 7 月,在 DARPA 资助下,佐治亚理工学院创新 PAN 基碳纤维凝胶纺丝技术,模量实现大幅提升,超过了目前在军机中广泛采用的赫氏 IM7 碳纤维,标志着美国继日本之后,成为世界上第二个掌握第三代碳纤维技术的国家^[15]。

2)日本研发出碳纤维量产新工艺

2016 年,日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)与东京大学、日本产业技术综合研究所、东丽等成功研发出生产效率提高至现行生产工艺 10 倍的碳纤维制造方法。该工艺无需进行防止熔化的准备工序,简化了生产环节^[16]。

3)美国研发出碳纤维回收新技术

2016 年 6 月,美国佐治亚理工学院将碳纤维浸泡在含有酒精的溶剂中,以溶解其中的环氧基树脂,分离后的纤维和环氧树脂都能被重新利用,成功实现了碳纤维的回收^[17]。

2017 年 7 月,华盛顿州立大学研发出一种碳纤维回收技术,用弱酸作为催化剂,使用液态乙醇在相对低温下对热固性材料进行分解,分解之后的碳纤维和树脂被分别保存,并可投入再生产^[18]。

4)美国 LLNL 实验室开发 3D 打印碳纤维墨水技术

2017 年 3 月,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)开发出第一个 3D 打印的高性能、航空级碳纤维复合材料。他们使用了一种直接墨水输写(DIW)的 3D 打印方法来制造复杂的三维结构,使加工速度大幅提高,适合用于汽车、航空航天、国防工业,以及摩托车竞赛和冲浪方面^[19]。

5)美、韩、中合作研发出发电碳纤维

2017 年 8 月,美国得克萨斯大学达拉斯校区、韩国汉阳大学、中国南开大学等机构合作研发出一种发电碳纤维纱线材料。这种纱线先在盐水等电解质溶液中浸泡,使电解质中的离子附着到碳纳米管表面,当纱线被拧紧或拉伸时,即可将机械能转化为电能。该材料可在任何有可靠动能的地方使用,适合为物联网传感器提供电能^[20]。

6)中、美分别取得木质素基碳纤维研究新进展

2017 年 3 月,中科院宁波材料技术与工程研究所特种纤维团队采用酯化和自由基共聚两步法改性技术制备了一种具有良好可纺性和热稳定性的木质素-丙烯腈共聚物。采用该共聚物和湿法纺丝工艺制得高质量的连续原丝,经热稳定

化和炭化处理后,得到结构致密的碳纤维^[21]。

2017 年 8 月,美国华盛顿大学 Birgitte Ahring 研究团队将木质素与聚丙烯腈以不同比例混合,再利用熔融纺丝技术将混合的聚合物转化成了碳纤维。研究发现,加入 20% ~ 30% 的木质素不会影响碳纤维的强度,有望用于生产成本更低的碳纤维材料汽车或飞机零部件^[22]。

2017 年底,美国国家可再生能源实验室(NREL)发布利用植物废弃部分(如玉米秸秆和小麦秸秆)制造丙烯腈的研究成果。他们先将植物材料分解成糖再转化成酸,并与廉价的催化剂结合生产出目标产品^[23]。

7)日本研发首个碳纤维增强热塑性复合材料汽车底盘

2017 年 10 月,日本新能源产业技术综合研发机构与名古屋大学国立复合材料研究中心成功研发出世界首个碳纤维增强热塑性复合材料汽车底盘。他们采用全自动长纤维增强热塑性复合材料直接在线成型工艺,将连续碳纤维与热塑性树脂颗粒进行混炼,制造纤维增强复合材料,再通过加热熔融连接,成功生产出热塑性 CFRP 汽车底盘^[24]。

5 对我国碳纤维技术研发的建议

5.1 前瞻布局,目标导向,聚焦突破第三代碳纤维技术

我国第二代碳纤维技术尚未全面突破,如不及时跟进第三代碳纤维的技术开发,会拉大我国与国外下一代航空武器装备性能之间的差距。我国应及早进行前瞻性布局,将我国的相关顶尖科研机构汇聚起来,集中攻克关键技术,聚焦第三代高性能碳纤维制备技术研发(即适用于航空航天的高强度、高模量碳纤维技术),以及碳纤维复合材料技术

的研发,包括面向汽车、建筑修补等的轻量化、低成本大丝束碳纤维制备研究,碳纤维复合材料的增材制造技术、回收技术和快速成型技术等等。

5.2 统筹组织,强化支持,设立重大技术项目持续支持协同攻关

对于涉及国家安全和重大经济利益的关键核心技术,我国必须要掌握在自己手里,碳纤维技术就是其中之一。目前我国开展碳纤维研究的机构比较多,但是力量分散,缺乏有效协同攻关的统一研发组织机制和强有力的资助支持。从先进国家的发展经验来看,重大项目组织与布局对本技术领域的发展起着极大的推动作用。应集中我国优势研发力量,针对我国碳纤维突破性研发技术启动重大项目攻关,强化协同技术创新,不断推进我国碳纤维研究技术水平,争夺国际碳纤维及复合材料研发制高点。

5.3 完善技术成果应用效果导向的评价机制

从 SCI 论文计量学分析角度看,我国的碳纤维作为一种高强性能材料应用于各种领域的研究较多,而对于碳纤维生产制备技术,尤其是聚焦于降低成本、提高产效的研究较少。碳纤维生产工艺流程长、技术关键点多、生产壁垒高,是多学科、多技术的集成,需要突破的技术障碍很多,要高效推进“低成本、高性能”的核心制备技术研发,一方面,需要加强研究投入,另一方面,需要弱化本领域科研绩效评价的论文产出导向,强化技术成果应用效果评估导向,从注重论文发表的“数量型”评价转向成果价值的“质量型”评价。

5.4 加强尖端技术复合型人才培养

碳纤维技术的高技术属性决定了专业化人才的重要性,是否拥有尖端核心技术人才直接决定着—一个机构研发水平的高低。

由于碳纤维技术研发环节很多,应当注重复合型人才培养,以保证各环节研发的配合衔接。另

外,从我国碳纤维研究发展史看来,技术核心专家的流动往往成为影响一个研究机构研发水平的关键因素。在生产工艺、复合材料和主要产品上能够保持核心专家和研发团队的固定,对于不断实现技术升级十分重要。

应当继续加强本领域的专业化高技术人才培养和使用,完善对技术研发型人才的评价和待遇政策,加强对青年人才的培育,积极支持与国外先进研发机构的合作和交流,同时大力引进国外先进人才等等,这将对我国的碳纤维研究的发展起到极大的推动作用。

致谢:本文写作过程中得到了中国科学院福建物质结构研究所吴立新研究员、中国科学院化学研究所徐坚研究员的指导、审阅和修改,特致谢忱。

参考文献

- [1]周宏. 美国高性能碳纤维技术发展史研究[J]. 合成纤维,2017,46(2):16-21.
- ZHOU H. Development History of High Performance Carbon Fiber Technology in the United States [J]. Synthetic Fiber,2017,46(2):16-21.
- [2]周宏. 碳纤维的十六个主要应用领域及近期技术进展(一)[J]. 产业用纺织品,2017,35(1):1-6.
- ZHOU H. Sixteen Main Applications of Carbon Fiber and Its Recent Progress (1) [J]. Techniques Textiles,2017,35(1):1-6.
- [3]周宏. 碳纤维的十六个主要应用领域及近期技术进展(二)[J]. 产业用纺织品,2017,35(3):1-6.
- ZHOU H. Sixteen Main Applications of Carbon Fiber and Its Recent Progress (2) [J]. Techniques Textiles,2017,35(3):1-6.

- [4]韦鑫,沈兰萍. 聚丙烯腈基碳纤维的研究进展[J]. 成都纺织高等专科学校学报,2017,34(1):243-246.
- WEI X, SHEN L P. Research Progress on Polyacrylonitrile-based Carbon Fibers [J]. Journal of Textile Science & Engineering, 2017, 34 (1): 243-246.
- [5]马祥林,杨正宇. 碳纤维行业专利现状分析及建议[J]. 河南科技,2018(4):55-58.
- MA X L, YANG Z Y. Analysis and Suggestions on the Current Status of Carbon Fiber Industry Patent [J]. Henan Science and Technology, 2018 (4): 55-58.
- [6]杨思思,戴磊,汪一名. 基于 Innography 平台的碳纤维布专利分析及创新趋势研究[J]. 现代情报,2016,36(6):154-164,170.
- YANG S S, DAI L, WANG Y Y. Carbon fiber Cloth Patent Analysis Based on Innography and Innovation Trend Research [J]. Modern Information, 2016, 36(6): 154-164, 170.
- [7]绍闻迪康科技咨询. 日本碳纤维的研发现状[EB/OL]. (2017-1-16) [2018-07-19]. <http://www.qianyancailliao.com/index.php?s=/cms/index/detail/id/208/cid/8.html>.
- Shaowen Dikang Scientific and Technological Consultation. Research and Development of Carbon Fiber in Japan [EB/OL]. (2017-1-16) [2018-07-19]. <http://www.qianyancailliao.com/index.php?s=/cms/index/detail/id/208/cid/8.html>.
- [8]佚名. 美国能源部推进可再生碳纤维研究[J]. 工程塑料应用,2014(9):67-67.
- Anon. US Department of Energy Promotes Renewable Carbon Fiber Research [J]. Engineering Plastics Application, 2014 (9): 67-67.

- [9] U. S. Department of Energy. Energy Department Announces \$19.4 Million Investment in Advanced Vehicle Technologies [EB/OL]. <https://energy.gov/eere/articles/energy-department-announces-194-million-investment-advanced-vehicle-technologies>.
- [10] 科技部. 欧盟研制成功航天专用特种碳纤维材料 [EB/OL]. (2017-5-23) [2018-07-19] http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201705/t20170523_132895.htm. MOST of P. R. C. EU successfully Developed a Special Carbon Fiber Materials for Space Applications [EB/OL]. (2017-5-23) [2018-07-19] http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201705/t20170523_132895.htm.
- [11] European Commission. Carbon Fibres from ‘Green’ Precursors and Optimized Processes [EB/OL]. (2018-5-30) [2018-07-19]. https://cordis.europa.eu/result/rcn/229060_en.html.
- [12] 绍闻迪康科技咨询. 欧洲碳纤维生产发展近况 [EB/OL]. (2017-1-16) [2018-07-19]. <http://qianyancailliao.com/index.php?s=/cms/index/detail/id/219/cid/8.html>. Shaowen Dikang Scientific and Technological Consultation. Recent Development of Carbon Fiber Production in Europe [EB/OL]. (2017-1-16) [2018-07-19]. <http://qianyancailliao.com/index.php?s=/cms/index/detail/id/219/cid/8.html>.
- [13] WACKER J D. Concept Development for an Aircraft Wheel Made of Fiber-Reinforced Plastic [EB/OL]. [2018-07-19]. <https://www.lbf-jahresbericht.de/en/services/lightweight-design/concept-development-for-an-aircraft-wheel-made-of-fiber-reinforced-plastic/>.
- [14] 绍闻迪康科技咨询. 韩国碳纤维的研发与应用 [EB/OL]. (2017-1-16) [2018-07-19]. <http://qianyancailliao.com/index.php?s=/cms/index/detail/id/213/cid/8.html>. Shaowen Dikang Scientific and Technological Consultation. Research and Development of Carbon Fiber in Korea [EB/OL]. (2017-1-16) [2018-07-19]. <http://qianyancailliao.com/index.php?s=/cms/index/detail/id/213/cid/8.html>.
- [15] 佚名. 日美竞相突破第三代碳纤维技术 [EB/OL]. (2016-3-11) [2018-07-19]. <http://www.cannews.com.cn/2016/0311/149727.shtml>. Anon. Japan and Us Have Broke through the Third Generation of Carbon Fiber Technology Respectively [EB/OL]. (2016-3-11) [2018-07-19]. <http://www.cannews.com.cn/2016/0311/149727.shtml>.
- [16] 佚名. 日本研发出速度快 10 倍的碳纤维量产新工艺 [EB/OL]. (2016-1-18) [2018-07-19]. <http://tech.huanqiu.com/original/2016-01/8398395.html>. Anon. Japan has Developed a New Technology of Carbon Fiber Production which is 10 Times Faster [EB/OL]. (2016-1-18) [2018-07-19]. <http://tech.huanqiu.com/original/2016-01/8398395.html>.
- [17] 佚名. 美国佐治亚理工学院开发碳纤维回收新方法 [J]. 新材料产业, 2017 (8): 88-88. Anon. New Method of Carbon Fiber Recovery Developed by Georgia Institute of Technology [J]. Development Guide to Building Materials, 2017 (8): 88-88.

- [18] 佚名. 美国华盛顿州立大学研发出高效回收碳纤维技术[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017 (5) : 112-112.
- Anon. Washington State University has Developed an Efficient Technology of Carbon Fiber Recovery [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017 (5) : 112-112.
- [19] 佚名. 美国 LLNL 实验室开发 3D 打印碳纤维墨水技术[EB/OL]. (2017-3-2) [2018-07-19]. <http://baijiahao.baidu.com/s?id=1560750186485627&wfr=spider&for=pc>.
- Anon. 3D Printing Carbon Fiber Ink Technology was Developed from LLNL Laboratory. [EB/OL]. (2017-3-2) [2018-07-19]. <http://baijiahao.baidu.com/s?id=1560750186485627&wfr=spider&for=pc>.
- [20] 张章. 南开大学等研发出发电碳纤维[EB/OL]. (2017-8-28) [2018-07-19]. <http://news.sciencenet.cn/htmlpaper/201782815135594744724.shtm>.
- ZHANG Z. Nankai University and Its Collaborator Developed a Power Generation Carbon Fiber [EB/OL]. (2017-8-28) [2018-07-19]. <http://news.sciencenet.cn/htmlpaper/201782815135594744724.shtm>.
- [21] 宁波材料技术与工程研究所. 宁波材料所在木质素基碳纤维研究方面取得进展[EB/OL]. (2017-3-23) [2018-07-19]. http://www.cas.cn/syky/201703/t20170322_4594298.shtml.
- Ningbo Institute of Industrial Technology. Progress in Lignin Based Carbon Fibers Research of Ningbo Institute of Industrial Technology. [EB/OL]. (2017-3-23) [2018-07-19]. http://www.cas.cn/syky/201703/t20170322_4594298.shtml.
- [22] COTTINGHAM K. Spinning Plant Waste into Carbon Fiber for Cars, Planes [EB/OL]. (2017-8-23) [2018-07-19]. https://www.acs.org/content/acs/en/pressroom/newsreleases/2017/august/spinning-plant-waste-into-carbon-fiber-for-cars-planes.html?_ga=2.51304993.969076112.1504062062-1012310282.1498616055.
- [23] ERIC M K, TODD R E, VIOLETA S I N, et al. Renewable Acrylonitrile Production[J]. Science, 2017, 358(6368) : 1307-1310.
- [24] 佚名. 日本成功研发世界首个碳纤维增强热塑性复合材料汽车底盘[EB/OL]. (2017-10-18) [2018-07-19]. http://www.sohu.com/a/198767885_281035.
- Anon. Japan Successfully Developed the First Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composite Chassis [EB/OL]. (2017-10-18) [2018-07-19]. http://www.sohu.com/a/198767885_281035.