

国内外石墨烯复合材料研究态势可视化对比分析^{*}

马丹丹¹, 郭敏¹, 段庆锋²

(1. 中北大学 经济与管理学院, 山西 太原 030051; 2. 山西财经大学 管理科学与工程学院, 山西 太原 030006)

摘 要:对比分析国内外石墨烯复合材料领域的研究动态和发展趋势,追踪国内外研究前沿与热点,探究未来石墨烯复合材料领域的研究趋势。以 Web of Science 和 CNKI 数据库中 2006—2017 年石墨烯复合材料相关文献为研究对象,借助 EXCEL 绘图功能和信息可视化软件 CiteSpace,结合国家五年规划发展阶段从研究现状、热点和前沿方面进行计量和可视化对比分析。研究发现国内以外文平台为研究“阵地”,国内外研究热点和前沿基本一致却各有侧重。氧化石墨烯、碳纳米管和电极研发为热点主流,国外偏向石墨烯复合材料的中端应用研究,国内研究则看好新型功能材料这一未来领域;石墨烯分散性、电化学性能为国际前沿,偏向在功能化复合材料应用,而国内相关产业布局尚处于初期阶段,应注重突破下游企业应用研究。

关键词:石墨烯;复合材料;文献计量;知识图谱

中图分类号:TQ050.4⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2018)05-0020-08

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.05.003

Visualization Analysis of the Graphene Composite Materials Research Situation at Home and Abroad

MA Dandan¹, GUO Min¹, DUAN Qingfeng²

(1. College of Economics and Management, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. School of Management Science and Engineering, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The research trends of graphene composites at home and abroad are compared and analyzed, and the research frontiers and hot spots at home and abroad are traced to explore the research trends of graphene composites in the future. Based on the literature related to graphene composites from 2006 to 2017 in Web of Science and CNKI database, this paper makes quantitative and visual comparative analysis on the research status, hot spots and frontiers of graphene composites with the help of EXCEL drawing function and information visualization software CiteSpace. The research finds that the domestic and foreign platforms are the research “position”, while the domestic and foreign research hotspots and frontiers are basically the same, but each has its own emphasis. Graphene oxide, carbon nanotubes and electrodes have become the mainstream of research and development, and the mid-end applications of graphene-biased composites are preferred in foreign countries. Domestic research looks forward to the new functional materials as a future field. Graphene dispersity and electrochemical properties are the international frontier, and tend to be used in functional composite materials. However, the domestic industrial layout is still in its infancy, so it is necessary to break through the application of downstream enterprises.

Key words: graphene; composite materials; bibliometrics; knowledge map

* 收稿日期:2018-09-07

基金项目:山西省高等学校哲学社会科学研究基地项目“山西省煤基低碳产业创新链技术预测研究”(2016325)

作者简介:马丹丹(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为数据挖掘、创新管理,E-mail:madandanjackson100@163.com。

通信作者:郭敏(1969-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为物流与供应链管理、创新管理,E-mail:guomin_like@si-na.com.cn。

石墨烯是目前自然界最薄、强度最高的纳米材料,各国针对石墨烯的研究成果不断更新,尤其2011年以后,关于石墨烯研究的文献基本每年达万篇以上,技术发展由石墨烯制备向石墨烯复合应用发展。我国的政策支持力度也在不断加大,在2015年国务院发布的《中国制造2025》中,石墨烯已经被纳入《新材料产业“十三五”发展规划》。但石墨烯很难作为单一原料生产某种产品,而主要是利用其突出特性与其它材料体系进行复合,从而获得具有优异性能的新型复合材料。“石墨烯+复合材料”在储能、传感器、散热、导电等领域都具有良好的应用前景,已成为研究前沿和热点之一,然而石墨烯资源开发利用率较低,技术发展还有待提高,了解及预测研发态势至关重要^[1-5]。

我国石墨烯相关科技论文研究已进入“高度外流”后半警戒时期,主要发表平台集中于高端研究所^[6]。Yang, C等^[7]提出了一种以主体-行动-对象(SAO)网络为基础的方法来分析石墨烯技术发展趋势。近年来,国内平台也开始进行先进研究成果转移,在外文文献研究的基础上进行研究分析。王丽、潘云涛^[8]利用TDA分析软件及EXCET对石墨烯相关论文研究进行统计分析并进行国家状况对比;王丽等^[9]基于LDA主题模型进行关联分析,可视化分析各方面研究差异。关于石墨烯复合材料的文本挖掘相关分析较少。鲍芳芳、徐劲松^[10]以技术生命周期、专利申请人和专利IPC分类三个层面进行专利态势分析;陈松丛等^[11]从氧化石墨烯的国家、机构和技术领域等角度形成竞争态势分析报告,目前研究未对具体复合材料热点和前沿领域进行详细介绍,且未涉及国内外发展阶段对比,呈现方式上也有所不足。本文强调随着国家五年规划的不断推进,通过挖掘中外文献信息,运用计量分析、共现分析、burst检测的方法,可视化呈现石墨烯复合材料领域技术热点和前沿的阶段性变化,并就石墨烯与不同复合材料结合的研究进程进行分析,预测我国“十三五”规划发展态势和方向,为石墨烯复合材料发展提供一定的参考。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

通过对石墨烯复合材料发展的研究及分析,发现其文献相关研究基本始于我国“十一五”规划之初。为获得“十一五”规划至今的阶段性成果,并保证数据

的完整性,选择检索年限均为2006—2017年。国际数据来源于Web of Science,选择WOSTM核心合集数据库,以“Graphene AND (technology OR technique OR skill) AND (composite OR composite material OR Compound material)”为检索词进行“主题”检索,得到4 685篇文献作为外文数据。国内中文数据以CNKI系列全文数据库为数据源,检索式为“SU=(‘石墨烯’*‘技术’*‘复合材料’)OR KY=(‘石墨烯’*‘技术’*‘复合材料’)”进行专业检索,筛选出有效文献1 259篇作为中文数据。

1.2 方法

本研究借助陈超美教授开发的基于Java平台的文献信息分析及可视化软件CiteSpace III和EXCEL绘图功能进行文献数据挖掘,通过文献计量分析、关键词共现分析、burst突变检测,形成可视化知识图谱,结合五年规划进行阶段对比分析,挖掘聚类组群信息,发现技术热点和前沿。

2 石墨烯复合材料领域研究现状

2.1 年度发文量对比分析

2006—2017年国际和国内平台年度发文量均总体呈现上升趋势(如图1),石墨烯复合材料领域的技术成果也主要集中于外文国际平台研究。我国“十一五”规划期间,石墨烯复合材料技术发展处于萌芽期,国际和国内平台文献数量都较少;“十二五”规划期间,外文文献开始有所探索,主要集中于石墨烯制备和化合物的研究,中外文研究差距也逐渐拉大;之后石墨烯复合材料研究进入快速发展期,仅“十三五”规划期间前两年文献数量就超过前期总量,其中外文文献数量直线上升,产业化进程不断推进,中文文献研究还处于缓慢上升阶段^[12]。

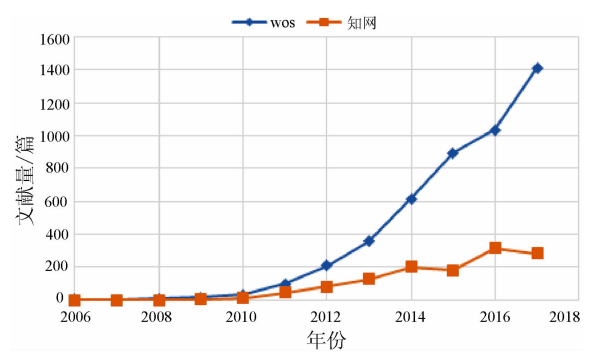


图1 年度文献数量对比
Fig.1 Volume comparison of annual literature

通过进一步对中外文文献的挖掘分析,得到中外文文献差距的不断拉大,并不代表国内石墨烯复合材料研究发展缓慢,而是国内学者研究交流大多是外文。表 1 为对国际平台的文献研究分析后得到的国家(或地区)发文量情况。从数量上看,中国稳居第一的位置,其发文量约占全球发文量 40%,印度和美国远随其后。而从合作交流的角度来说,中国的中心度为 0.11,处于中等水平,韩国和德国中心度最高,美国的突变权重最高。

表 1 国际平台国家发文量(前 13)

Table 1 International platform state dispatch volume (first 13)

序号	发文量	突变权重	中心度	国家(或地区)
1	2 092		0.11	中国
2	636		0.07	印度
3	545	14.21	0.12	美国
4	411	4.87	0.24	韩国
5	267		0.08	伊朗
6	179		0.07	澳大利亚
7	127		0.17	新英格兰
8	122		0.01	沙特阿拉伯
9	110		0.01	台湾
10	107		0.04	马来西亚
11	106		0.08	日本
12	95		0.01	新加坡
13	93		0.21	德国

以国内外情况综合对比来看:国内石墨烯研发起步相对较晚,但“十二五”规划后发展迅速,整体接近国外先进水平,部分领域实现了领先;基础技术研究方面,权威交流研究在欧美,亚洲发展迅速但缺少合作开发,权威带动;国内学者发表的论文数量大,但集中于外文研究平台,依赖于国外交流环境。为此,我国出台《中国制造 2025》,将石墨烯材料作为前沿新材料领域的发展重点,引导成立了中国石墨烯产业技术创新战略联盟,开始对外文文献研究成果进行转移并自主研发,加强国内学者的交流和权威人物的带动^[13]。

2.2 作者现状对比分析

通过作者合作分析,有助于了解石墨烯复合材料领域研究人员的合作关系。利用 Citespace 进行中外相关文献的网络分析,由图 2 和图 3 可知,国际平台中网络中心作者包括:WANG Y、LIU Y、WANG J、WANG L、CHEN SM、LI L 等,大多为国内作者;中文

平台高产作者主要是钱伯章,作者之间合作交流较少。进一步分析知,国际研究作者已形成中心网络,合作关系紧密,研究深度较高,而国内作者之间尚未形成网络;通过对国际核心作者进行了解,发现国内作者期刊发文量很大,并发挥着重要作用。

通过剖析国际平台中各国作者,进行国内外对比可得:国内外作者交流频繁,尤其在外文平台内,国内学者文献研究贡献较大;国内学者在数量上占优势,但国外学者从中心度和交流合作上,较国内权威,起着带头作用;国内平台交流甚少,合作交流程度明显弱^[14]。为此,我国应把握外文平台研发优势,加快转移国外成果和自主研发,推动支持权威学者的发展及带动。

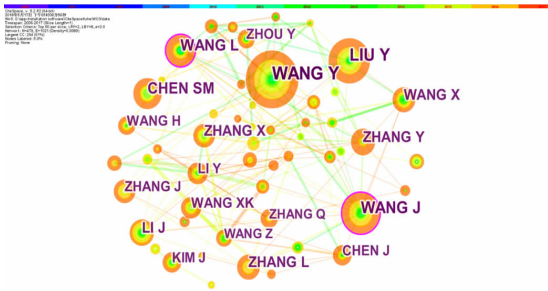


图 2 国际平台作者合作网络图谱
Fig.2 Collaboration network map of international platform authors

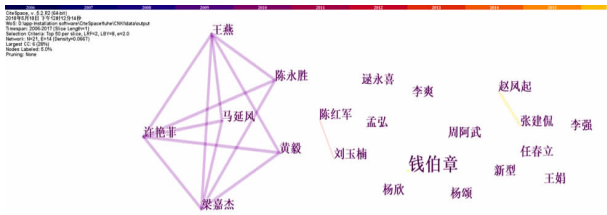


图 3 国内平台作者合作网络图谱
Fig.3 Collaboration network map of domestic platform authors

2.3 研究机构现状对比分析

Citespace 可视化软件的机构合作分析功能能够得出石墨烯复合材料领域中的研究力量分布,进行国际、国内平台研究领域对比。由图 4 和图 5 可知,外文平台研究机构交流频繁,而中文平台研究机构主要集中于 9 个,其中研究机构全国石油化工信息总站发文最多,其次为中国科学技术发展研究院。值得注意的是,中国科学院(Chinese Acad Sci)在外文平台研究机构中处于中心位置,国内石墨烯复合材料领域相关论文发表的主要“阵地”是在国际平台。

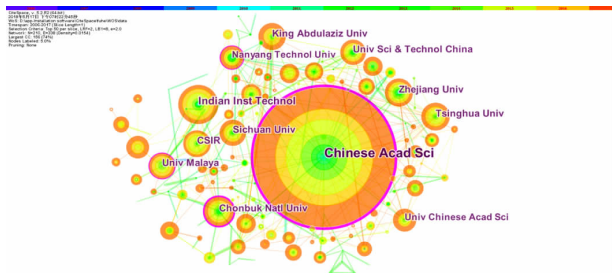


图 4 国际平台研究机构合作图谱

Fig. 4 Collaboration map of international platform research institutes

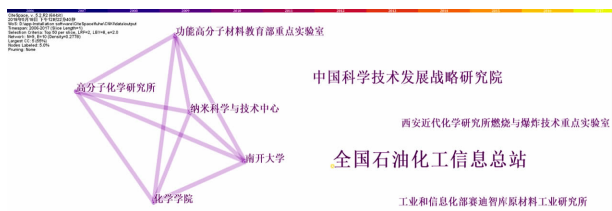


图 5 国内平台研究机构合作图谱

Fig. 5 Collaboration map of domestic platform research institutes

因此,通过对外文平台中各研究机构的合作情况以及发文量进行剖析,得表 2。发文量前 10 位中,国内研究机构占一半,且中国科学院远居第一,其次为印度理工学院 (Indian Inst Technol) 和韩国的国立全北大学 (Chonbuk Natl Univ);从中心度上看,中国科学院、韩国的国立全北大学和马来西亚的马来亚大学 (Univ Malaya) 研究合作交流频繁,发挥带动作用;中国科学院的突变权重明显。

表 2 国际平台研究机构发文量(前 10)				
Table 2 International platform research institutions (first 10)				
序号	发文量	突变权重	中心度	研究机构
1	275	3.4	0.54	Chinese Acad Sci
2	80		0.05	Indian Inst Technol
3	60		0.18	Chonbuk Natl Univ
4	60		0.12	Tsinghua Univ
5	58		0.07	Zhejiang Univ
6	56		0.08	CSIR
7	54		0.09	King Abdulaziz Univ
8	54		0.01	Sichuan Univ
9	52		0.02	Univ Sci & Technol China
10	51		0.14	Univ Malaya

结合国内外平台各研究机构具体情况,可知:中国研究机构发展迅速,研究覆盖面大,与国际机构合作交流丰富,尤其中国科学院越发在国际平台上发

挥带动作用;国外研究机构主要集中在有基础应用优势的国家,鼓励研发实力强劲的创新企业加入到石墨烯应用研究中,形成良好的研究互动关系,产业化进程逐渐形成^[15];但国内平台研究机构绝大多数都是高校和权威研究机构,可以说以研学为主,企业研究力量缺少,产业化进程还处于初期阶段。

3 基于内容关键词的研究热点比较

通过技术热点的比较,有利于分析国内外各个发展阶段研究重点,发现国内外研究阶段的关键问题。文献的关键词虽在文献中占比较少,但通常都是与内容有关的重要字眼,一定程度上能够反映出该领域的研究重点和研究方法,因此对文献的关键词进行聚类分析,频次高的关键词可被用来确定一个研究领域的技术热点^[16]。

将外文文献导入 Citespace 文献分析软件,利用关键词共现分析功能,设置合适的“Time Slicing”和“Thresholds”,使用“pathfinder”算法,以 Keyword 为节点进行可视化分析,得到图 6 所示的国际平台石墨烯复合材料研究热点领域图谱。

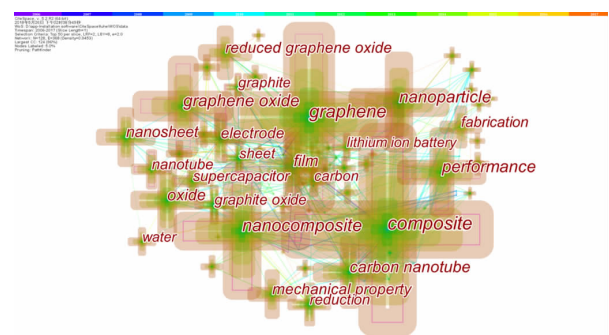


图 6 国际平台石墨烯复合材料研究热点领域图谱

Fig. 6 International platform graphene composites research hotspots

图中每个十字环代表一个关键词,环越大出现频次越多,可认为是石墨烯复合材料领域的研究热点,由图知外文国际平台研究热点主要有氧化石墨烯 (graphene oxide)、碳纳米管 (carbon nanotube)、电极 (electrode)、力学性能 (mechanical property) 等。

同样地,导入中文文献进行共现分析,得到国内平台石墨烯复合材料研究热点领域图谱,如图 7。由图中十字环的大小可得,中文国内平台研究热点有氧化石墨烯、光催化、碳纳米管、纳米复合材料、锂离子电池、传感器等。

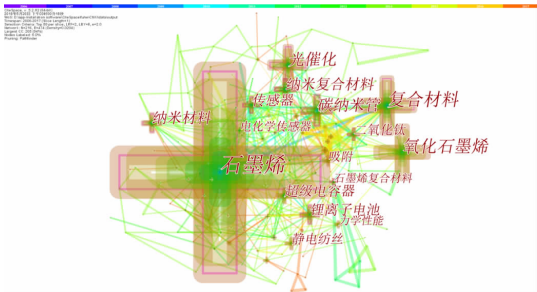


图7 国内平台石墨烯复合材料研究热点领域图谱
Fig.7 Research hotspots in domestic platform graphene composites

根据关键词出现年份、频次和中介中心性进行各节点信息统计,如表3所示。总体上国际和国内平台热点领域一致,国内平台热点词出现时间较国际晚且国际热点词频大于国内,而中介中心性则相反。

进一步将国际平台研究热点进行对比,且通过文献挖掘,结合国内研究成果在国际平台中的呈现,可以得出国内外研究情况:

(1)从时间上看,由于国外研究大多集中在

表3 国内外平台关键词统计表(前16)
Table 3 Domestic and international platform keyword statistics (first 16)

序号	国际				国外			
	出现年份	频次	中心度	关键词	出现年份	频次	中心度	关键词
1	2006	1 643	0.35	composite	2010	525	0.35	石墨烯
2	2008	1 467	0.17	graphene	2010	151	0.16	复合材料
3	2010	769	0.08	nanoparticle	2011	138	0.09	氧化石墨烯
4	2010	757	0.09	graphene oxide	2011	102	0.19	光催化
5	2010	680	0.11	performance	2010	87	0.29	碳纳米管
6	2009	581	0.08	oxide	2011	60	0.2	纳米复合材料
7	2006	580	0.04	carbon nanotube	2011	57	0.15	纳米材料
8	2006	560	0.1	film	2011	53	0.1	锂离子电池
9	2010	459	0.06	nanosheet	2011	52	0.19	传感器
10	2009	402	0.12	electrode	2012	48	0.09	超级电容器
11	2011	401	0.05	reduced graphene oxide	2013	38	0.03	静电纺丝
12	2010	381	0.08	mechanical property	2012	38	0.12	二氧化钛
13	2010	357	0.02	reduction	2014	30	0.01	吸附
14	2010	332	0.06	graphite oxide	2012	28	0.05	电化学传感器
15	2008	329	0.03	nanotube	2012	23	0.16	石墨烯复合材料
16	2011	325	0.06	fabrication	2014	22	0.02	力学性能

2006 年到 2010 年,研发较早,尤其英国和美国,而国内学者借外文平台建立了良好的技术基础;国内研究自 2010 年后,即“十二五”规划后发展迅速,大多以外文成果为基础开展研究,某些领域甚至达到国际先进水平;目前我国正处于“十三五”规划期间,技术实力强劲的企业不断涌现,产业化格局正逐渐形成。

(2)从研发领域上看,国际和国内平台研究热点均集中于氧化石墨烯、纳米复合材料、碳纳米管、电极等方面,这些领域是中外文研究的交集,代表最具热点的主流领域,也是国内学者在外文平台中选取的重点发展领域。国内平台研究中,碳纳米管和氧化石墨烯的中介中心性为 0.28 和 0.15,而国际平台研究仅为 0.04 和 0.07,也印证了这一点,表明

在国内平台研究网络中,这两个热点的“媒介”能力较强,迅速发展成为国内研究重点。通过文献追踪,石墨烯和碳纳米管作为一维(1D)和二维(2D)纳米材料的代表者,二者在组成和结构上紧密联系,性能上,石墨烯具有更优异的特性,这是国外研究重点,国内在此基础上的创新是受到国外研究成果启发而开展起来的。

除主流领域之外,国内平台研究侧重石墨烯光催化、传感器、吸附方面^[17];国际平台研究侧重石墨烯复合材料的力学性能研究^[18]。通过文献追踪,发现国外偏向石墨烯复合材料的中端应用研究,如储能;国内则看好新型功能材料这一未来领域,如智能穿戴,虽还未具有相关成熟的实际应用技术,但已显示出巨大的发展潜力。

chemical capacitor), 探究其所在文献, 发现二维结构的石墨烯具有很强的吸附性能, 实现石墨烯的均匀分散仍然是一个巨大的挑战, 为此开发一种简单的浆料复合方法, 制备高效分散石墨烯的复合材料成为研发热点^[23]; 基于不同碳纳米材料的复合来制备新型先进纳米结构, 以得到性能增强的储能器件, 引起了人们的广泛关注, 助推了石墨烯复合材料的电化学性能的研究^[24]; 根据石墨层将碳纳米管分为单壁和多壁碳纳米管, 其强大的力学性能、导热和电容性能使其成为复合材料领域理想的填料^[25]; 电化学电容器材料有着超大电容量, 它的功率密度比电池高近十倍, 使它们成为具有高功率需求应用的理想选择^[26]。通过分析石墨烯产业背景知, 国外已有了良好的基础理论环境, 偏向在功能化复合材料应用,

石墨烯聚合物复合材料成为迈向实际应用的一个重要途径。

4.2 国内研究前沿分析

同样地导入中文文献,得到国内平台石墨烯复

合材料领域研究前沿的突变词演进时区知识图谱,如图 9 所示。按照突变词权重进行排序,由于国内有关石墨烯的研究大多为外文,仅获取 3 个有关突变词,其权重及突变时间如表 5。

表 5 国内平台突变词权重
Table 5 Weight of mutation words in domestic platform

序号	关键词	出现年份	频次	权重	突变开始	突变结束	2006—2017 突变时间
1	碳纳米管	2006	87	3.818 5	2010	2011	
2	聚苯胺	2006	15	3.469 6	2013	2015	
3	石墨烯产业	2006	10	3.322 4	2015	2017	

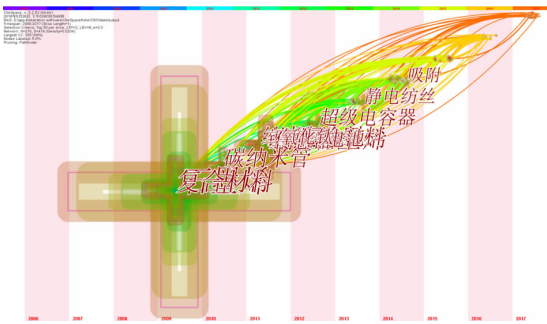


图 9 国内平台研究前沿时区演进图谱

Fig. 9 Evolution map of domestic platform research frontiers

考虑到国际研究机构分析中,中国极具优势,通过文献挖掘,结合上述研究结果分析得出我国石墨烯复合材料前沿发展趋势:

(1)从突变时间来看,国内研究热潮较国外研究上晚,基本在“十二五”规划后开展相关技术研究。“十三五”规划后明确要求“突破石墨烯产业化应用技术”,石墨烯复合材料产品制备和应用等项目也作为重点项目不断推进,此前都仅仅是提及石墨烯,未详细描述。国内关于石墨烯的研究大多集中在外文,“十三五”以后通过政策推动才将石墨烯相关研究向国内转移。

(2)国内研究侧重碳纳米管、石墨烯聚合物复合材料的相关研究。进一步分析发现,石墨烯与碳纳米管复合可使其物理化学性能得到增强,应用领域更深入,也可维持电极稳定性,大幅度改善电极材料的导电性,成为研究前沿重点^[27-28];石墨烯易团聚与堆积,比电容减小,而聚苯胺也导电性差,但其复合材料弥补了两者不足,近年来受到广泛关注^[29-30]。然而,最终将复合材料转化为产品至关重要,因此未来重要发展前景在于实现石墨烯产业化应用,服务于日常生活^[31-32]。

5 结论与展望

近年来,《中国制造 2025》不断向前推进,石墨烯作为一种典型新材料,多处被提及,其复合材料可提高传统材料的工业开发价值,成为新材料领域的关注的重点。本文结合五年规划对比国际和国内研究现状发现:(1)2010 年之后国外石墨烯复合材料研究进入快速发展期,合作网络已形成,权威交流研究在欧美;而国内研究多以外文平台为研究发表“阵地”,研究机构集中于高校和科学院,企业研究力量缺少,产业化进程还处于初期阶段。目前,国内开始注重国外研究成果转移和基础创新研究,预计“十三五”规划期间国内研究将掀起高潮。(2)国内外研究热点较为一致,氧化石墨烯、纳米复合材料、碳纳米管、电极为主流领域。国外基础应用研究已发展成熟,偏向石墨烯复合材料的中端应用研究;国内研究侧重石墨烯光催化、传感器方面的复合材料研究,看好新型功能材料这一未来领域。(3)研究前沿方面,石墨烯分散性、电化学性能、碳纳米管壁为国外前沿领域;石墨烯聚合物复合材料研究为国内前沿重点。国外已形成良好的石墨烯复合材料技术研究环境,多注重产业布局,偏向在功能化复合材料应用;而国内石墨烯复合材料相关产业布局尚处于研发阶段,应继续深入开展应用研究,发展下游企业。

总体上来看,由于“十三五”规划和《中国制造 2025》的全面实施,石墨烯复合材料的研究不断深入,发展前景良好。而根据以上分析,本文认为我国石墨烯复合材料领域研究中需要注意以下几点:(1)借鉴国际研究方法,发展国内相关技术,形成国内平台研发网络。(2)加强机构间、作者间的合作

交流,注重国内产学研合作。(3)应加强石墨烯基础研究,避免产业盲目布局。

参考文献:

- [1] 黄澍,王玮,王康丽,等. 石墨烯在化学储能中的研究进展[J]. 储能科学与技术,2014,3(2):85-95.
- [2] 赵冬梅,李振伟,刘领弟,等. 石墨烯/碳纳米管复合材料的制备及应用进展[J]. 化学学报,2014,72(2):185-200.
- [3] 胡兴隆. 石墨烯复合材料的制备与传热性能研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [4] 沈宸,陆云. 石墨烯/导电聚合物复合材料在超级电容器电极材料方面的研究进展[J]. 高分子学报,2014(10):1328-1341.
- [5] 冯安生,张然,吕振福,等. 我国石墨资源开发利用“三率”调查与评价[J]. 矿产保护与利用,2016(5):36-39.
- [6] 洪凡. 基于知识图谱的国内石墨烯研究分析与对策[J]. 情报探索,2014(4):6-11.
- [7] C YANG, C HUANG, J SU. An improved SAO network - based method for technology trend analysis: A case study of graphene[J]. Journal of informetrics, 2018, 12.
- [8] 王丽,潘云涛. 石墨烯的研究前沿与中国发展态势分析[J]. 新型炭材料,2010,25(6):401-408.
- [9] 王丽,邹丽雪,刘细文. 基于 LDA 主题模型的文献关联分析及可视化研究[J]. 数据分析与知识发现,2018,2(3):98-106.
- [10] 鲍芳芳,徐劲松. 基于专利信息的我国石墨烯复合材料态势分析[J]. 中国科技信息,2018(6):16-19.
- [11] 陈松丛,陈春,马建霞,等. 氧化石墨烯专利研发态势分析[J]. 化工新型材料,2018,46(4):5-8,15.
- [12] 马哲,李建武,安彤. 中国石墨产业发展的机遇、问题与建议[J]. 矿产保护与利用, <https://doi.org/10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.05.034>.
- [13] 中国石墨烯产业技术创新战略联盟. 2017 年全球石墨烯产业研究报告[R]. 北京:中国石墨烯产业技术创新战略联盟,2017.
- [14] 钟玉姣,权桂英. 石墨烯复合光催化材料专利技术综述[J]. 中国科技信息,2018(5):18-20,15.
- [15] 杜轶伦,张福良. 我国石墨资源开发利用现状及供需分析[J]. 矿产保护与利用,2017(6):109-116.
- [16] Bailon M R, Jurado A E, Ruiz B R. Analysis of the field of physical chemistry of surfactants with the unified scientometric model fit of relational and activity indicators[J]. Scientometrics, 2005, 63(2):259-276.
- [17] 李珍,杨剑波,刘学琴,等. 石墨烯的制备及其在光催化材料中的应用[J]. 矿产保护与利用,2017(3):84-89.
- [18] 韩同伟,贺鹏飞,骆英,等. 石墨烯力学性能研究进展[J]. 力学进展,2011,41(3):279-293.
- [19] 侯海燕,刘则渊,刘悦,等. 当代国际科学学研究热点演进趋势知识图谱[J]. 科研管理,2006(3):90-96.
- [20] C. CHEN. Cite space II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. Journal of the China society for scientific & technical information, 2006, 57(3):359-377.
- [21] 杨林,王天华,易莎莎,等. 国内外石墨烯应用研究发展与展望[J]. 化学工程与装备,2015(9):164-165.
- [22] 杨曦,余翔,刘鑫. 基于专利情报的石墨烯产业技术竞争态势研究[J]. 情报杂志,2017,36(12):75-81,89.
- [23] Z YANG, Z XU, L ZHANG, et al. Dispersion of graphene in chlorosulfonated polyethylene by slurry compounding [J]. Composites science & technology, 2018.
- [24] Kshetri T, Thanh T D, Singh S B, et al. Hierarchical material of carbon nanotubes grown on carbon nanofibers for high performance electrochemical capacitor[J]. Chemical engineering journal, 2018, 345:39-47.
- [25] P LI, T LI, H YAN. Mechanical, tribological and heat resistant properties of fluorinated multi - walled carbon nanotube/bismaleimide/cyanate resin nanocomposites [J]. Journal of materials science & technology, 2017(10).
- [26] Fic K, Platek A, Piwek J, et al. Sustainable materials for electrochemical capacitors[J]. Materials today, 2018.
- [27] 赵冬梅,李振伟,刘领弟,等. 石墨烯/碳纳米管复合材料的制备及应用进展[J]. 化学学报,2014,72(2):185-200.
- [28] 赫文秀,于慧颖,张永强,等. $\text{Ni}(\text{OH})_2$ - 碳纳米管 - 还原氧化石墨烯复合材料的制备及电化学性能[J]. 复合材料学报,2018,35(7):1921-1929.
- [29] 袁冰清,郁黎明,盛雷梅,等. 石墨烯/聚苯胺复合材料的电磁屏蔽性能[J]. 复合材料学报,2013,30(1):22-26.
- [30] 张伟. 石墨烯/聚苯胺复合材料的制备及在超级电容器中的应用[D]. 北京:北京化工大学,2012.
- [31] 谈述战,郭金明,陈丽娜,等. 国内外石墨烯及其复合材料的产业化应用进展[J]. 新材料产业,2013(9):31-36.
- [32] 陈宽,阮殿波,傅冠生. 轨道交通用超级电容器研发概述[J]. 电池,2014,44(5):296-298.

引用格式:马丹丹,郭敏,段庆锋. 国内外石墨烯复合材料研究态势可视化对比分析[J]. 矿产保护与利用,2018(5):20-27.

MA Dandan, GUO Min, DUAN Qingfeng. Visualization analysis of the graphene composite materials research situation at home and abroad[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(5):20-27.