

【简讯与热点】

国际晶质石墨研究态势文献计量分析与启示

柴新夏, 卢小莉, 张宇彤, 李璐, 吕鹏, 向锂, 蔡秀华, 洪敬兰, 张孟伯

(中国地质图书馆, 中国地质调查局地质文献中心, 北京 100083)

Bibliometric analysis and inspiration of international research situation of crystalline graphite

CHAI Xinxia, LU Xiaoli, ZHANG Yutong, LI Lu, LÜ Peng, XIANG Li, CAI Xiuhua, HONG Jinglan, ZHANG Mengbo

(National Geological library of China, Geoscience Documentation Center, CGS, Beijing 100083, China)

晶质石墨(鳞片石墨)广泛应用于现代工业与新能源、新材料领域,已成为支撑高新技术发展的战略性矿产之一,相关的资源勘查、矿产开发、矿物加工与综合利用研究受到世界主要经济体的重视,涌现出许多研究成果。本文依托科睿唯安的 Web of Science 数据库(核心合集),共检出 2003 年 1 月 1 日—2024 年 11 月 11 日发表的晶质石墨相关论文 716 篇,从发文趋势、国际对比、学科领域、期刊分布、高产机构、被引频次、研究主题等维度开展

文献计量分析,展示国际晶质石墨研究发展变化与前沿热点,为相关研究的进一步开展提供参考。

1 论文增长趋势

2003 年至今国际晶质石墨相关的研究论文总体呈增长态势(图 1)。2004—2010 年间发文量有一定起伏,2011 年后稳步增加,2016 年开始明显增长,截至 2024 年 11 月 11 日年发文量已增长到 70 篇,相当于 2003 年的 6.36 倍,年均增长率为 9.21%。

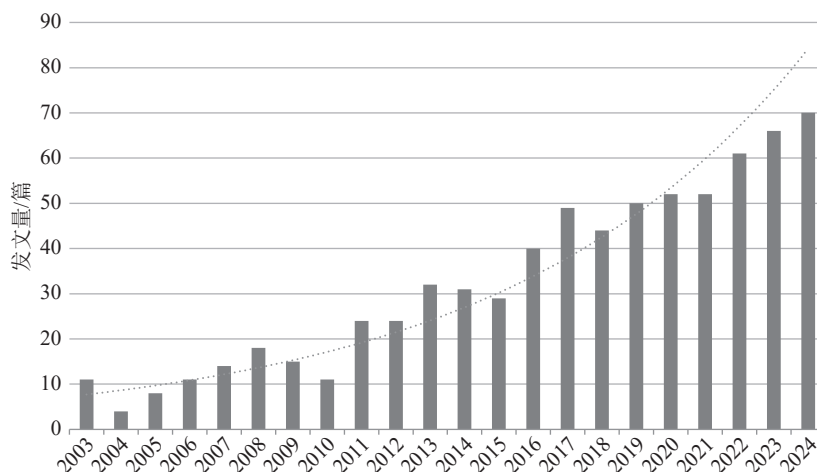


图 1 2003—2024 年国际晶质石墨论文增长趋势

2 发文国家对比

对发文作者所属的国家和地区进行统计,获得发文量(参与创作)排名前 15 者(图 2),中国以 459 篇居首,占总发文量的 64.11%,美国(73 篇)次

之。排名前 5 国家的发文趋势(图 3)显示,中国的发文连续性较好,且发文量在 2011 年、2016 年和 2022 年出现过 3 次显著的增长,这与中国近年来对战略性新兴产业相关矿产开发利用的政策助推密切相关。2010 年国务院下发《国务院关于加强培育

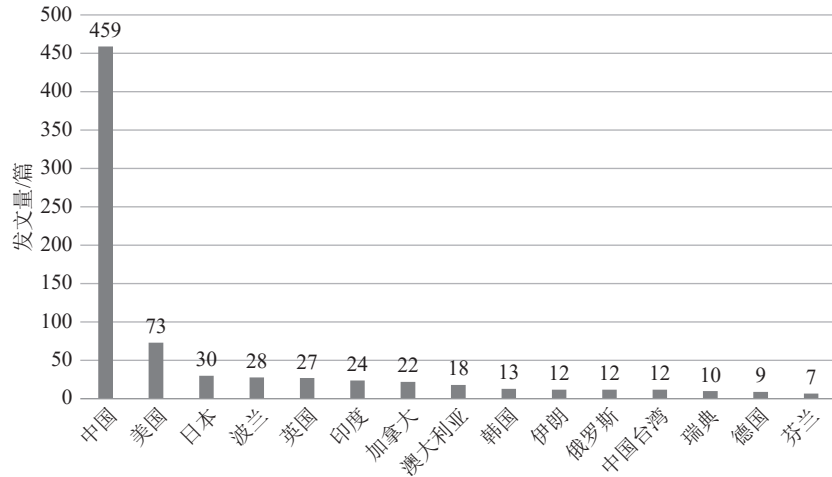


图 2 2003—2024 年国际晶质石墨发文量排名前 15 的国家和地区

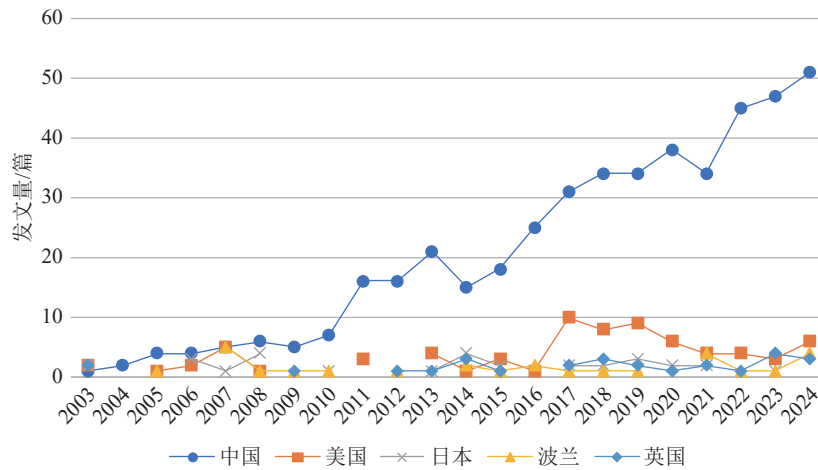


图 3 发文量排名前 5 国家的论文增长趋势对比

和发展战略性新兴产业的决定》，将新能源、新材料产业、高端装备制造等大量需求晶质石墨的产业作为重点培育和发展对象；2012 年工信部发布《石墨行业准入条件》，开始引导石墨资源综合利用与可持续发展；2016 年原国土资源部发布《全国矿产资源规划（2016—2020 年）》，明确了晶质石墨在新兴产业发展中的重要地位；2020 年工信部发布了《石墨行业规范条件》，为石墨产业的进一步健康发展提供了政策依据。

3 研究领域与期刊分布

对国际晶质石墨论文的研究领域进行统计，可知 716 篇论文分布于 35 个研究领域，其中论文数量不少于 10 篇的领域有 17 个（表 1），涉及材料科学的论文数量最多，其次为化学、工程、冶金与冶金

工程、物理。各国主攻的研究领域有一定区别，中国、美国、英国主要涉及材料科学，波兰主要涉及冶金与冶金工程，日本在上述两个领域皆有建树。

对国际晶质石墨论文的来源期刊进行统计，716 篇论文刊登在 290 种刊物上，其中载文量排名前 15 的期刊见表 2，共刊载 195 篇论文，占论文总量的 27.23%。载文最多的期刊是 *Ceramics International*，以材料科学和硅酸盐综合研究为主；其次为 *Carbon*，以材料科学综合研究为主。

4 高产机构及科研人员

对国际晶质石墨论文的发文机构进行统计，可知共有 773 家机构参与了 716 篇论文的创作，其中发文量不少于 10 篇的机构共 15 家（表 3），绝大部分为高等院校。中国科学院以 52 篇居发文量首

表 1 2003—2024 年国际晶质石墨论文主要研究领域分布

序号	研究领域名称	研究领域中文名称	论文数量/篇	占比/%
1	Materials Science	材料科学	403	56.29
2	Chemistry	化学	205	28.63
3	Engineering	工程	132	18.44
4	Metallurgy & Metallurgical Engineering	冶金与冶金工程	130	18.16
5	Physics	物理	115	16.06
6	Science Technology - Other Topics	科学技术-其他主题	58	8.10
7	Energy Fuels	能源燃料	49	6.84
8	Electrochemistry	电化学	38	5.31
9	Polymer Science	高分子科学	38	5.31
10	Mineralogy	矿物学	18	2.51
11	Mining & Mineral Processing	采矿和矿物加工	18	2.51
12	Geology	地质学	16	2.24
13	Thermodynamics	热力学	16	2.24
14	Construction & Building Technology	建筑与建筑技术	15	2.10
15	Environmental Sciences & Ecology	环境科学与生态学	14	1.96
16	Geochemistry & Geophysics	地球化学与地球物理学	11	1.54
17	Mechanics	机械	10	1.40

表 2 2003—2024 年国际晶质石墨论文主要
载文期刊分布情况

序号	出版物名称	载文量/篇	占比/%
1	<i>Ceramics International</i>	28	3.911
2	<i>Carbon</i>	21	2.933
3	<i>Journal of Alloys and Compounds</i>	17	2.374
4	<i>New Carbon Materials</i>	16	2.235
5	<i>International Journal of Cast Metals Research</i>	14	1.955
6	<i>Materials</i>	11	1.536
7	<i>Materials Letters</i>	11	1.536
8	<i>Wear</i>	11	1.536
9	<i>Journal of The European Ceramic Society</i>	10	1.397
10	<i>Materials Design</i>	10	1.397
11	<i>Materials Transactions</i>	10	1.397
12	<i>Construction and Building Materials</i>	9	1.257
13	<i>International Journal of Metalcasting</i>	9	1.257
14	<i>Journal of Applied Polymer Science</i>	9	1.257
15	<i>Journal of Inorganic Materials</i>	9	1.257

表 3 2003—2024 年国际晶质石墨论文
主要发表机构分布情况

序号	机构名称	国家/地区	发文量/篇	占比/%
1	中国科学院	中国	52	7.26
2	武汉科技大学	中国	37	5.17
3	中南大学	中国	20	2.79
4	清华大学	中国	17	2.37
5	中国科学院大学	中国	16	2.24
6	克拉科夫AGH科技大学	波兰	15	2.10
7	武汉理工大学	中国	14	1.96
8	湖南大学	中国	13	1.82
9	河北师范大学	中国	12	1.68
10	北京科技大学	中国	12	1.68
11	中国矿业大学（北京）	中国	10	1.40
12	哈尔滨工业大学	中国	10	1.40
13	四川大学	中国	10	1.40
14	西南科技大学	中国	10	1.40
15	威斯康星大学	美国	10	1.40

位, 其次为武汉科技大学(37 篇)和中南大学(20 篇)。15 家机构中有 13 家中国机构, 共发文

233 篇, 其余两家为波兰克拉科夫 AGH 科技大学和美国威斯康星大学。

对参与国际晶质石墨论文创作的科研人员(所有作者)进行统计分析, 以人员姓名、机构名称和研究领域为数据去重标准, 参考 WoS 数据库的作者聚合信息, 可知共有 2986 名作者参与了 716 篇论文的创作, 篇均作者数量约 4 人。发文量不少于 8 篇的科研人员共 11 人(表 4), 主要来自中国和波兰的高等院校。

5 论文被引情况

对国际晶质石墨论文的被引频次进行统计, 可知 716 篇论文一共被引用 16662 次(2024 年 11 月 11 日检索, WoS 所有数据库), 篇均被引 23 次。被引频次与论文数量的分布情况见表 5。被引频次

表 4 2003—2024 年国际晶质石墨主要
发文科研人员分布情况

序号	姓名	所属机构	国家/地区	发文量/篇
1	邓承继	武汉科技大学	中国	17
2	丁军	武汉科技大学	中国	16
3	余超	武汉科技大学	中国	14
4	祝洪喜	武汉科技大学	中国	13
5	李冀辉	河北师范大学	中国	11
6	Marcin Górny	克拉科夫AGH科技大学	波兰	10
7	Edward Fraś	克拉科夫AGH科技大学	波兰	9
8	康飞宇	清华大学	中国	9
9	郭华军	中南大学	中国	8
10	孙红娟	西南科技大学	中国	8
11	邱杨率	武汉理工大学	中国	8

表 5 2003—2024 年国际晶质石墨论文被引频次分布情况				
被引频次	论文数/篇	占比	累积论文数/篇	累积占比
0	83	11.59%	83	11.59%
1	38	5.31%	121	16.90%
2	39	5.45%	160	22.35%
3	30	4.19%	190	26.54%
4	37	5.17%	227	31.70%
5	27	3.77%	254	35.47%
6	22	3.07%	276	38.55%
7	28	3.91%	304	42.46%
8	20	2.79%	324	45.25%
9	15	2.09%	339	47.35%
10	20	2.79%	359	50.14%
>10	357	49.86%	716	100.00%

为 0 的论文共有 83 篇, 占论文总数的 11.59%; 被引频次不超过 10 的论文共有 359 篇, 占论文总数的 50.14%; 被引频次 ≥ 23 (篇均被引)的论文共 210 篇, 占论文总数的 29.33%, 这些论文一共被引用 13018 次, 占总被引频次的 78.13%。被引频次最高的 10 篇论文见表 6, 排名第 1 的论文为吴忠帅(中国科学院大学大连化学物理研究所/中国科学院大学)等于 2009 年在 *Carbon* 上发表的“Synthesis of high-quality graphene with a pre-determined number of layers”, 被引用 709 次。

表 6 2003—2024 年国际晶质石墨被引频次排名前 10 论文			
序号	论文标题	WoS 核心库	WoS 所有库
		被引频次	被引频次
1	Synthesis of high-quality graphene with a pre-determined number of layers	621	709
2	Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix	504	575
3	Preparation and characterization of graphite nanosheets from ultrasonic powdering technique	399	483
4	SiO _x Encapsulated in Graphene Bubble Film: An Ultrastable Li-Ion Battery Anode	253	261
5	Influence of graphite content on the dry sliding and oil impregnated sliding wear behavior of Al 2024-graphite composites produced by in situ powder metallurgy method	240	250
6	Study of Reduced Graphene Oxide Preparation by Hummers' Method and Related Characterization	226	237
7	The effects of flake graphite nanoparticles, phase change material, and film cooling on the solar still performance	206	210
8	Thermal properties of aluminum-graphite composites by powder metallurgy	185	206
9	Reinforcement of hydrogenated carboxylated nitrile-butadiene rubber with exfoliated graphene oxide	162	185
10	Highly hydrophobic and adhesive performance of graphene films	145	154

6 研究主题与热点

对国际晶质石墨论文中列出的作者关键词进行统计, 可知该领域的研究热点。表 7 列出了词频排名前 10 的关键词, 鳞片石墨(即片状石墨、晶质石墨)是用于检索的主题词, 也是该领域研究的核心对象, 石墨、石墨制品及其材料学特性是该领域研究的重点内容。通过文献计量软件 CiteSpace 分析得出 20 个突现关键词(表 8), 可以看出国际晶质石墨研究的热点随时间演化, 前期(2003—2016)主要关注各类具体石墨制品的制备工艺和检测手段, 后期(2016 至今)逐渐转变为对石墨制品性能及综合利用相关的研究。

7 启示

据美国地质调查局(USGS)发布的 *Mineral Commodity Summaries 2024*, 中国的天然石墨储量为 7800 万 t, 居世界首位。自然资源部 2024 年 10 月发布的《中国矿产资源报告(2024)》显示, 中国 2023 年的晶质石墨储量为 10040.1 万 t(矿物)。

丰富的石墨资源带动了相关的勘探、开采、选矿、加工制造与综合利用产业, 也促进了国内相关领域的科研与论文发表, 为精密电子元件、动力电池、航天材料与核工业等战略新兴领域的发展提质增速, 晶质石墨及其衍生产品的材料工程、工业应用和综合利用将是今后一段时间的研究热点。美欧日韩加澳等对晶质石墨材料需求较大的经济体是中国在该领域研究的主要合作伙伴与竞争对手。

晶质石墨等关键矿产资源的调查评价是中国地质调查局的主要职责之一, 相关论文发表情况是

表 7 2003—2024 年国际晶质石墨论文高频关键词			
序号	关键词	中文名称	词频
1	flake graphite	鳞片石墨(片状石墨)	108
2	performance	性能	90
3	mechanical property	力学性能	70
4	carbon	碳	59
5	thermal conductivity	热导率	53
6	behavior	行为	50
7	graphite	石墨	48
8	graphene	石墨烯	48
9	microstructure	微观结构	37
10	composites	复合材料	36

科研成果的重要体现。由于中国地质调查局及其直属机构所发英文论文只有 3 篇被 WoS 数据库核心合集收录,因此进一步在中文期刊上查找。以“(晶质石墨+鳞片石墨) AND(中国地质调查局+中国地质科学院)”检索式在中国知网(CNKI)期刊数据库获得 55 篇论文(时间范围为 2005—2024 年 11 月),其中中国地质调查局直属各机构(实验室、创新中心等科研平台并入独立法人机构统计)的发文量如表 9 所示,发文排名前 15 的中国地质调查

局科研人员如表 10 所示(发文量相同者以姓名汉语拼音排序)。可知中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所和中国地质科学院矿产资源研究所在晶质石墨研究领域发文较多,且发文量排名前 15 的科研人员中有 8 人属于这两个机构。综上所述,中国地质调查局的科研人员应继续稳步开展晶质石墨研究,强化国际合作,加大在国际学术出版平台的论文发表力度,提升科技成果的国际学术影响力,推动世界一流新型地质调查局建设事业高质量发展。

表 8 2003—2024 年国际晶质石墨论文关键词突现情况

关键词	中文关键词	起始	结束	时间范围 (2003—2024)
cast iron	铸铁	2003	2009	
exfoliated graphite	膨胀石墨	2003	2011	
ductile iron	球墨铸铁	2007	2016	
electron microscopy	电子显微镜	2007	2010	
expandable graphite	膨胀石墨	2010	2015	
carbon nanotubes	碳纳米管	2010	2012	
graphite oxide	氧化石墨	2011	2016	
fabrication	制备 (工艺)	2013	2018	
graphene oxide	氧化石墨烯	2014	2019	
conductivity	电导率	2016	2019	
nanoparticles	纳米粒子	2017	2019	
reduction	还原	2018	2020	
wear	磨损	2018	2019	
mechanism	机制 (机理)	2019	2021	
oxide	氧化物	2020	2022	
evolution	演化	2020	2024	
nanotubes	纳米管	2020	2021	
electrical conductivity	电导率	2022	2024	
recovery	回收 (率)	2022	2024	
mechanisms	机制 (机理)	2022	2024	

表 9 中国地质调查局与中国地质科学院晶质石墨发文情况 (CNKI)

序号	机构名称	发文量/篇
1	中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所	17
2	中国地质科学院矿产资源研究所	14
3	中国地质调查局沈阳地质调查中心	7
4	中国地质调查局西安地质调查中心	7
5	中国地质调查局发展研究中心	5
6	中国地质调查局成都地质调查中心	4
7	中国地质科学院	4
8	中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心	2
9	中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心	2
10	中国地质调查局国家地质实验测试中心	1
11	中国地质调查局南京地质调查中心	1
12	中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心	1
13	中国地质科学院成都矿产综合利用研究所	1

表 10 中国地质调查局晶质石墨发文量排名前 15 科研人员

序号	姓名	发文量/篇	所属机构
1	刘磊	11	中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所
2	孙莉	6	中国地质科学院矿产资源研究所
3	梁帅	4	中国地质调查局沈阳地质调查中心
4	夏锦胜	4	中国地质科学院矿产资源研究所
5	张艳飞	4	中国地质调查局沈阳地质调查中心
6	杜轶伦	3	中国地质调查局发展研究中心
7	郭理想	3	中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所
8	郭珍旭	3	中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所
9	罗茂金	3	中国地质调查局成都地质调查中心
10	马志鑫	3	中国地质调查局成都地质调查中心
11	孙华星	3	中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所
12	孙志明	3	中国地质调查局成都地质调查中心
13	张福良	3	中国地质调查局发展研究中心
14	张然	3	中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所
15	赵恒勤	3	中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所