

# 材料科学研究热点与前沿挖掘——以富勒烯为例

曾硕勋<sup>1, 2</sup>, 冯敏<sup>3</sup>, 姜玲<sup>1, 2</sup>

- (1. 甘肃省科技情报研究所, 甘肃 兰州 730000)  
(2. 甘肃省科技评价监测重点实验室, 甘肃 兰州 730000)  
(3. 庆阳市农业科学研究院, 甘肃 庆阳 745000)

**摘要:** 富勒烯奇特物理结构使其具有许多特殊的物理化学性能, 造就了其在物理、化学、生物等各领域研究和应用的非凡可能性, 剖析该领域的研究热点、前沿及潜在研究具有一定理论和现实意义。基于 2007~2017 年 SCI 数据库富勒烯及其相关研究领域的原始文献数据, 借助文献计量学基本原理, 以及 Bibexcel、CiteSpace、VOSviewer、UCinet 等软件的联合应用, 形成了富勒烯及其相关研究领域可视化知识图谱, 进而分析富勒烯领域的研究热点、前沿及潜在研究。结果表明: 研究最热点为富勒烯的光伏电池; 研究前沿包括非富勒烯聚合物、富勒烯太阳能光电转换效率、富勒烯聚合物添加剂、富勒烯材料热检测、富勒烯医药抗癌; 潜在(关联)研究为用于制造石墨烯的碳纳米管。

**关键词:** 富勒烯; 研究热点; 研究前沿; 潜在研究; 文献计量

中图分类号: O631.71; G353.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2019)02-0161-06

## Research Hot Spots and Fronts Mining of Material Science: A Case Study of Fullerene

ZENG Shuoxun<sup>1, 2</sup>, FENG Min<sup>3</sup>, JIANG Ling<sup>1, 2</sup>

- (1. Institute of Sciences and Technology Information of Gansu, Lanzhou 730000, China)  
(2. Key Laboratory of Scientific & Technical Evaluation and Monitoring of Gansu, Lanzhou 730000, China)  
(3. Qingyang Agricultural Scientific Research Institute, Qingyang 745000, China)

**Abstract:** The peculiar physical structure of fullerenes creates the extraordinary possibilities of research and application in physics, chemistry, biology and other fields, therefore, it is of theoretical and practical significance to analyze the research hotspots, fronts and potential research in this field. Basing on the original data on fullerenes and related research fields in SCI database from 2007 to 2017 and combining with the softs of Bibexcel, CiteSpace, VOSviewer and UCinet, Visualization Knowledge Mapping about fullerene is obtained, and then the research hot spots, fronts and potential research of fullerenes are analyzed. The results show: fullerene-based photovoltaic cells are the hottest research hotspot; research fronts include non-fullerene polymers, fullerene solar photoelectric conversion efficiency, fullerene polymer additives, thermal detection with fullerene materials and the fullerene medicine anticancer; the potential study is the graphene production coming from carbon nanotubes.

**Key words:** fullerene; hot spots; front; potential study; bibliometrics

## 1 前言

1985 年英国化学家哈罗德·沃特尔·克罗托博士和美国科学家理查德·斯莫利(1996 年诺贝尔化学奖获得者)制得碳原子簇结构分子  $C_{60}$ <sup>[1]</sup>, 至今, 富勒烯经历了从发现、规模合成, 到应用研究, 以及富勒烯衍生物的合成与应用。富勒烯家族的诸多物理化学特性, 尤其是

$C_{60}$ 独特的性质, 已经在诸多领域如有机化学、无机化学、生命科学、材料科学、高分子科学、催化化学、电化学、超导体与铁磁体等展现出其优越性质。Friedman 等在 1993 年发表的文章中认为  $C_{60}$  的体积与 HIV 病毒活性中心的空穴大小相匹配, 有可能堵住洞口, 切断病毒的营养供给<sup>[2]</sup>。1999 年 Serdar Sariciftci 认为共轭高分子材料由于同时具有良好的加工性和柔韧性及掺杂后优良的导电性, 以及价格低廉、可大面积成膜等优点, 因此在光电转换领域具有巨大的潜在应用价值<sup>[3]</sup>。2014 年莫斯科理工学院、俄罗斯超硬和新型碳材料技术研究所(FSBI TISNCM)和密西根大学的研究人员采用一种新方

收稿日期: 2017-05-18 修回日期: 2017-07-26

第一作者: 曾硕勋, 男, 1981 年生, 助理研究员,

Email: zsx@gsinfo.net.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2019.02.11

法合成了超硬富勒烯材料,硬度为 150~300 GPa,超过钻石的物理强度<sup>[4]</sup>。此外,来自中国科学院和中国科学院大学的 Zhao 团队在国际期刊 JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY (2017 年期刊影响因子为 14.357)发表一篇重要文献(被引超过 900 次),实验研究得到一种新的非富勒烯受体材料 IT-4F,该材料与聚合物给体材料 PBDB-T-SF 共混制备有机太阳能电池,取得了超过 13%的能量转换效率<sup>[5]</sup>。上述一系列不断涌出的富勒烯研究成果,进一步推进了富勒烯领域的研究与应用发展,并在诸多领域展现出其巨大的社会经济价值。

为此,挖掘国际富勒烯领域研究的热点和前沿,将为富勒烯的学科交叉研究,以及发现可能的延伸领域研究,带来可能的线索。与此同时,对文献计量理论、重要文献比较、可视化展示等手段的应用实例,为材料科学等自然科学领域的科研人员,把握学科热点和学科前沿提供借鉴。

## 2 数据来源与处理

考虑到数据源的国际性、有效性、权威性和易得性,选择汤森路透公司开发的 Web of Science 核心合集中的 SCI (Science Citation Index Expanded) 网络数据库,通过检索词:“Fullerene”、“C<sub>60</sub>”、“C-60”,检索式:Fullerene or C<sub>60</sub> or C-60,选择检索字段:“标题”,检索时间段:2007 至 2017,检索时间为 2017 年 4 月 1 日,结果共检索到 10 205 条数据。采取“全记录与引用的参考文献”的“纯文本”格式导出,形成分析的原始数据。

由于各期刊要求格式不完全一致,原始数据存在数据格式软件无法识别,作者姓名全称简称不一,关键词大小写、单复数等诸多问题,导致后续分析数据的遗漏、重复等情况。为此,有必要对数据进行规范化处理,主要采取了软件与人工相结合的方式,确保数据尽量规范有效。

## 3 研究方法 with 工具

共词分析 (co-word analysis) 最早被文献记录出现在 20 世纪 70 年代后期,属文献计量领域,主要是对一组词语(数据)进行统计,筛选出较高频次字段的文献,研究相同字段共同出现在若干文献中的频次。在此基础上,主要通过聚类手段,得出文献中词语(研究主题)之间的密切联系程度,从而判断出学科研究领域的变化情况<sup>[6-9]</sup>。

随着期刊文献的标准化格式出版,为计算机共词分析统计带来了诸多便捷,也为了解学科领域发展变化提供了更为直观可视的手段。当前可进行共词分析的工具

较多,如汤森路透公司开发的 Thomson Data Analyzer、olle Persson 开发的 Bibexcel、陈超美等开发的 CiteSpace、Excel 等工具均可进行共词分析。Thomson Data Analyzer 与 Web of Science 均由汤森路透公司开发,一次导出数据可实现无缝结合,但使用成本较高;Bibexcel 共词分析相对较为繁琐,但数据打开便捷,也方便后续的可视化展示,且为免费工具;CiteSpace 历经多年多版本的更新升级,在引文分析及可视化方面为当前热点工具,尤其在前沿文献获取优势明显;Excel 也可通过数据透视表等功能实现共词分析,但与后续的多角度共词分析和可视化分析衔接较为不便。综合上述软件特点,本文采用 Bibexcel、CiteSpace V 进行了一系列的共词分析,并结合 VOSviewer、UCinet 软件进行可视化数据处理和展示。

## 4 研究结果及分析

### 4.1 研究概况

1962 年“C-60”首次出现在文章标题中(“Problem of Autoinfection after Total Body Lethal Irradiation of Dogs with C-60”),但真正涉及到富勒烯领域的文章出现在 1985 年,题名为“C-60-Buckminsterfullerene”,之后富勒烯相关研究在学术界引起波动<sup>[1,10]</sup>。自 1991 年开始,有关富勒烯的文献出现井喷,1996 年年度发文到达 1188 篇,之后有关富勒烯领域的文献保持持续高发文量(图 1)。

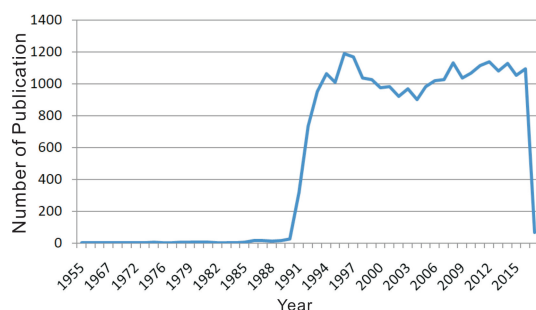


图 1 富勒烯领域历年发文量

Fig. 1 The number of annual publications of the field of fullerenes

### 4.2 研究热点

为充分发挥各种分析工具的优点、取长补短,凸显富勒烯研究热点可视化结果以及分析便捷,采用多方式联合可视化分析:借助 Bibexcel 关键词“DE”字段抽取,形成共词矩阵,联合 VOSviewer (Minimum total link strength of an item 参数为 5),形成富勒烯领域研究热度图(图 2);借助 Bibexcel 关键词“DE”字段抽取,形成共词矩阵,并导入 UCinet 形成富勒烯领域研究关键词共词图(图 3,选择显示共词参数不小于 5);采用 CiteSpace V (节点类型为 Keyword、主题词类型为 Noun Phrases,算法为 Pathfinder)得到富勒烯领域研究关键词(图 4 和表 1)。

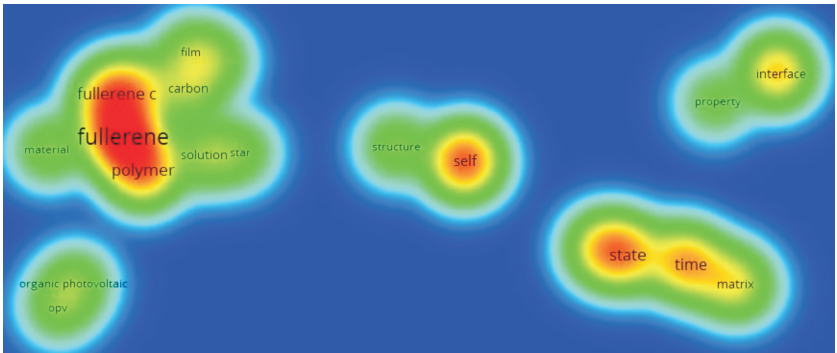


图 2 富勒烯领域研究热度

Fig. 2 The research hotspots of fullerene field

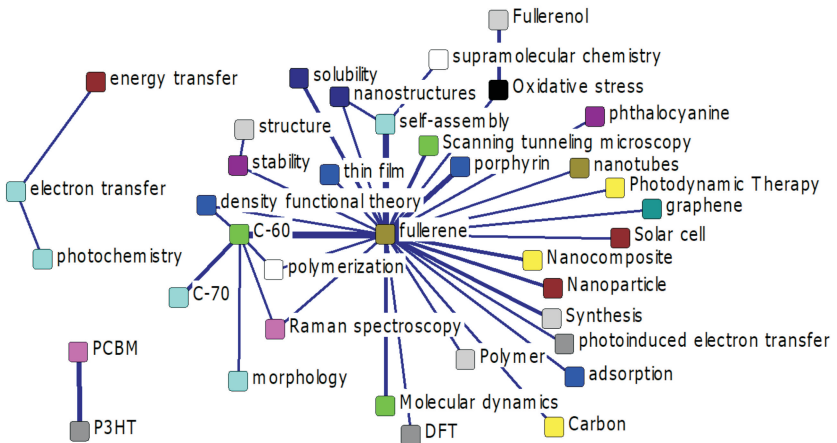


图 3 富勒烯领域研究关键词共词

Fig. 3 The co-words of key words of fullerene field

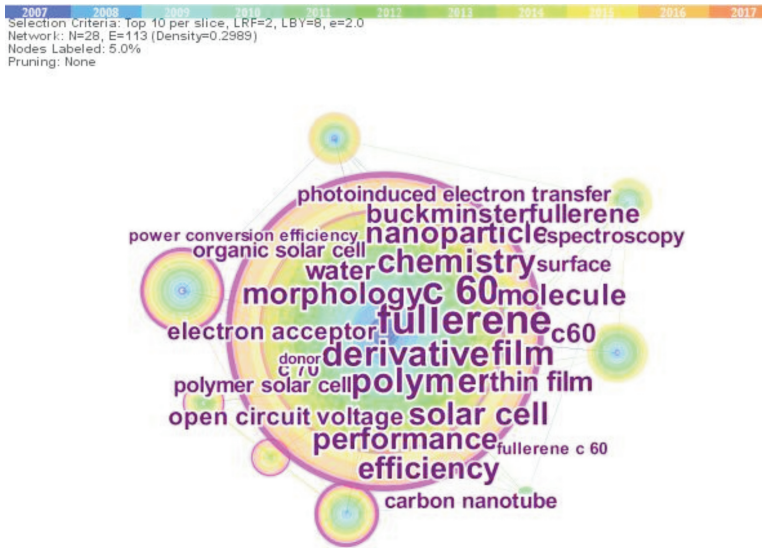


图 4 富勒烯领域研究关键词

Fig. 4 The key words of fullerene field

综合分析图 2 至图 4 以及表 1，发现与富勒烯相关的研究热点除富勒烯本身外主要有以下 3 个方面：C<sub>60</sub>，涉

及聚合物、光谱检测、形态结构、C<sub>70</sub>等，其中富勒烯聚合物的研究较热；self-assembly，涉及纳米、超分子等的

表 1 富勒烯领域研究关键词 top10

Table 1 The key words of top10 in fullerene field

Frequency	Centrality	Year	Cited references
2583	0.52	2007	fullerene
2046	0.32	2007	C <sub>60</sub>
755	0.22	2007	derivative
599	0.28	2007	polymer
578	0.09	2007	film
497	0.05	2007	chemistry
445	0.04	2008	solar cell
365	0.11	2011	morphology
345	0.18	2013	performance
283	0.01	2009	nanoparticle

结构，其中碳纳米管等研究较热；PCBM、P3HT、solar cell，涉及富勒烯在光伏电池领域的能量转换及其效率、聚合物材料、太阳能薄膜等研究。综合比较下，光伏电池是富勒烯领域最热的研究主题。

4.3 研究前沿

借助 CiteSpace V 的强大筛选过滤，选择每年 top5 的被引文献，其他为默认选择，获得 93 篇高被引经典文献的可视化图，再通过“K”聚类 and “LLR”算法抽取标识词，得到 20 个类簇（图 5）。

再通过 20 个类簇的节点“List CITing Papers to the Cluster”，获得施引 93 篇经典文献的各簇前沿文献。选择平均年份最近的簇，最终形成富勒烯最前沿的文献 13 篇（表 2）。

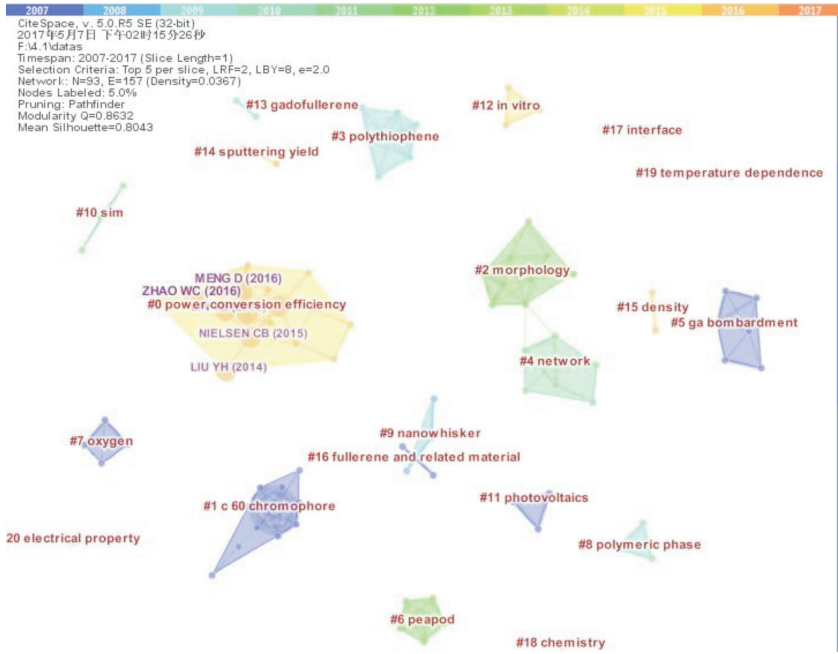


图 5 富勒烯前沿簇聚类  
Fig. 5 Fullerene frontier family clusterings

精读表 2 中所列的 13 篇文献，得到 5 个前沿研究方向：

- (1) 非富勒烯聚合物：4 篇文献进行了非富勒烯聚合物在太阳能电池方面的应用研究<sup>[11-14]</sup>。其中，来自中国科学院化学研究所和北京分子科学国家实验室的 Bin 等，研究的非富勒烯聚合物太阳能电池转换效率达到 11.4%<sup>[11]</sup>。
- (2) 富勒烯太阳能光电转换：3 篇文献进行了富勒烯聚合物、分子结构设计等提升太阳能光电转换效率的研究<sup>[15-17]</sup>。其中，来自韩国 Gwangju 科技研究所和 Heeger 先进材料技术中心的 Choi 等，研究优化的富勒烯太阳能电池转换效率达到 7.9%<sup>[17]</sup>。
- (3) 富勒烯聚合物添加剂：研究不同添加剂的比例

- 造成的富勒烯聚合物结构、性能的变化，主要用于改进富勒烯聚合物光电转换效率<sup>[18, 19]</sup>。
- (4) 富勒烯材料热检测：来自俄罗斯莫斯科国立大学的 Mikheev 等，应用富勒烯 C<sub>60</sub>、C<sub>70</sub> 的独特性能，研究了一种热散失测量方法<sup>[20]</sup>。
- (5) 富勒烯医药抗癌：来自乌克兰基辅塔拉斯舍甫琴科国立大学的 3 篇文献进行了富勒烯 C<sub>60</sub> 的医药领域探索研究<sup>[21-23]</sup>。Prylutsyy 等进行了富勒烯 C<sub>60</sub> 生理学研究，认为 C<sub>60</sub> 富勒烯可以作为拦截抗生素阿霉素（一种抗肿瘤药）手段。Grynyuk 等进行了富勒烯 C<sub>60</sub> 与白血病的研究，C<sub>60</sub> 联合治疗可使白血病 L1210 细胞在 24 h 内显著下降达 37%，且 48 h 观察无细胞毒副作用。Bychko 等研究了 C<sub>60</sub> 联合抗击宫颈癌细胞的作用机制。



表 2 富勒烯前沿文献

Table 2 Frontier literatures of fullerenes

First author	Year	Title	Journal
Bin H J <sup>[11]</sup>	2016	11.4% Efficiency Non-Fullerene Polymer Solar Cells with Trialkylsilyl-Substituted 2D-Conjugated Polymer as Donor	NATURE COMMUNICATIONS
Liu F <sup>[12]</sup>	2016	A Thieno[3,4-b]thiophene-Based Non-fullerene Electron Acceptor for High-Performance Bulk-Heterojunction Organic Solar Cells	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY
Wang Y F <sup>[13]</sup>	2016	Semitransparent, Non-Fullerene and Flexible All-Plastic Solar Cells	POLYMER
Song K C <sup>[14]</sup>	2016	Propeller-Shaped Small Molecule Acceptors Containing a 9,9'-Spirobifluorene Core with Imide-Linked Perylene Diimides for Non-Fullerene Organic Solar Cells	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY C
Larson B W <sup>[15]</sup>	2016	Inter-Fullerene Electronic Coupling Controls the Efficiency of Photoinduced Charge Generation in Organic Bulk Heterojunctions	ADVANCED ENERGY MATERIALS
Kumano M <sup>[16]</sup>	2016	A Ternary Blend of a Polymer, Fullerene, and Insulating Self-Assembling Triptycene Molecules for Organic Photovoltaics	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A
Choi Y <sup>[17]</sup>	2016	Optimized Phase Separation in Low-Bandgap Polymer; Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells with Criteria of Solvent Additives	NANO ENERGY
Kakogianni S <sup>[18]</sup>	2016	Synthesis of Polythiophene-Fullerene Hybrid Additives as Potential Compatibilizers of BHJ Active Layers	POLYMER
Long Y <sup>[19]</sup>	2016	Effect of a High Boiling Point Additive on the Morphology of Solution-Processed P3HT-Fullerene Blends	SYNTHETIC METALS
Mikheev I V <sup>[20]</sup>	2016	Approach to the Assessment of Size-Dependent Thermal Properties of Disperse Solutions; Time-Resolved Photothermal Lensing of Aqueous Pristine Fullerenes C <sub>60</sub> and C <sub>70</sub>	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C
Prylutsky Y <sup>[21]</sup>	2016	Biophysical Characterization of the Complexation of C <sub>60</sub> Fullerene with Doxorubicin in a Prokaryotic Model	MATERIALWISSENSCHAFT UND WERKSTOFFTECHNIK
Grynyuk I I <sup>[22]</sup>	2016	Combined Action of C <sub>60</sub> Fullerene with Dimethyl-N-(benzoyl)amidophosphate or Dimethyl-N-(phenylsulfonyl)amidophosphate on Leukemia L1210 Cells <i>in Silico</i> and <i>in Vitro</i>	MATERIALWISSENSCHAFT UND WERKSTOFFTECHNIK
Bychko A <sup>[23]</sup>	2016	Interaction of C <sub>60</sub> Fullerene Complexed to Cisplatin with Model Bilipid Membranes and Its Uptake by HeLa Cells	MATERIALWISSENSCHAFT UND WERKSTOFFTECHNIK

4.4 潜在研究

进一步围绕富勒烯的研究深入挖掘潜在研究方向，采用在数据中剔除关键词“Fullerene”，再次形成共词矩阵，并形成可视化图 6(选择显示共词参数不小于 5)。

从图 6 发现，围绕富勒烯形成了两大潜在(关联)研究：(1)太阳能电池(solar cell)，即富勒烯聚合物的太阳能电池转换效率前沿研究，包括 3 个热点研究方向，一是太阳能电池的稳定性(stability)研究；二是电池聚合物共轭(conjugate)的研究；三是富勒烯衍生物(PCBM)和主要用于有机薄膜晶体管 and 有机太阳能电池的 3-己基噻吩的聚合物(P3HT)。(2)碳纳米管(carbon nanotube)，与富勒烯相关的碳纳米管研究主要集中在石墨烯(graphene)方面，也是近年来材料领域的研究热点。由于富勒烯太阳能电池已是当前研究热点，因

此富勒烯的主要潜在(关联)研究为用于制造石墨烯的碳纳米管。

5 结 语

文章采用 Bibexcel、CiteSpace、VOSviewer、UCinet 等软件完成富勒烯研究领域的热点和前沿方向挖掘，尤其是在研究热点寻找方面，多款软件的可视化联合应用互相取长补短，热点更加醒目和准确，同时结合 CiteSpace 的时间轴比较分析，可快速发现研究热点持续时间，为广大科研工作者探求相关领域的研究热点和前沿识别提供了借鉴实例。

通过上述分析，得出以下两点富勒烯可能的重点研究方向和热点：(1)富勒烯聚合物添加剂研究。能源尤其是清洁能源是未来社会经济发展的希望，富勒烯应用于太阳能电池光能转换效率提升的研究，为此提供了新

