

新型功能碳材料的高压截获

吕超凡^{1 2 3} 臧金浩¹ 杨西贵¹ 单崇新¹

(1. 郑州大学物理学院(微电子学院), 郑州 450052; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 高性能功能材料在诸多领域具有广泛的应用前景, 是人们一直关注的研究热点。高压可以有效地改变物质的原子间距和成键方式, 是获得新型功能材料的重要途径。在碳材料的高压研究中, 许多有趣的功能碳材料, 如光学透明碳、高强度弹性碳和超硬非晶碳等, 已经通过不同的碳前驱体合成。本文简要介绍了作者近年来在低维碳基纳米复合材料高压研究中取得的进展, 基于设计不同低维碳前驱体, 高压下截获了具有超硬特性、新型压致共价聚合及发光增强的碳材料。

关键词: 高压; 富勒烯; 碳链; 碳点; 压致聚合; 荧光增强; 卸压保留; 功能材料

中图分类号: TQ127.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-985X(2022)05-0875-06

DOI:10.16553/j.cnki.issn1000-985x.20220428.004

Retention of New Functional Carbon Materials under High Pressure

LYU Chaofan^{1 2 3}, ZANG Jinhao¹, YANG Xigui¹, SHAN Chongxin¹

(1. School of Physics and Microelectronics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Functional materials with highly desirable properties have been highly pursued for a long time due to their potential applications in many fields. High pressure can effectively reduce the interatomic distances and modulate the bonding patterns of materials without changing their chemical compositions, which has been considered as a powerful and important approach to design new functional materials with desired structures and properties. Many interesting types of functional carbon materials, such as optical transparent carbon, super strong and elastic carbon, and ultrahard bulk amorphous carbon have been obtained from different carbon precursors under high pressure. Recent progress on the high pressure research of low dimensional carbon composite materials are introduced. Based on the predesigned carbon-based precursors, new carbon materials with superhard properties, covalent polymerization and anomalous photoluminescence enhancement by the application of high pressure have been obtained.

Key words: high pressure; fullerene; carbon chain; carbon dot; polymerization; luminescence enhancement; ambient retention; functional material

0 引言

碳原子具有丰富的成键方式, 能够形成多种结构和性质迥异的同素异形体。其中, 金刚石具有最高的硬度、最高的热导率、大的禁带宽度和良好的化学稳定性等优点, 在机械加工、光电器件和光学窗口等领域展现出巨大的应用前景^[1-5]。设计合成出新型功能碳材料一直是人们关注的前沿课题。压力作为独立于温度和组分的基本变量, 可以连续有效地缩短原子/分子间距离, 从而调控材料的晶体结构和电子构型以及成键类型, 获得常规条件下难以得到的新材料, 具有不同于常压相的新结构和新性质, 是发现新现象、产生新物质的

收稿日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(12174348); 河南省自然科学基金(212300410410)

作者简介: 吕超凡(1996—), 男, 河南省人, 博士研究生。E-mail: lvchaofan20@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 杨西贵, 副教授。E-mail: yangxg@zzu.edu.cn

重要手段。在室温高压下,石墨和碳纳米管能够转变成碳高压相,具有与金刚石相比拟的硬度。然而,这两个碳高压相经卸压后发生可逆相变,不能保持到常压条件下^[6-7]。高温高压条件下,不同的碳前驱体能够转变成金刚石或者无定形碳结构。这些研究表明新型碳材料的形成与初始碳前驱体的选择以及施加温度、压力条件密切相关。设计合适的碳前驱体作为基本构筑单元,有望在高压下合成新型功能碳材料。在众多碳前驱体中,溶剂化富勒烯晶体因其结构多样性和可设计性,在超硬碳材料的高压合成中已取得了一些开创性的研究成果^[8-13]。例如,苯类溶剂分子掺杂的富勒烯单元在高压下发生非晶化转变,其非晶碳团簇结构单元能够构筑形成一种长程有序而短程无序的全新超硬碳结构,极大地丰富了人们对固体物质结构的认识^[8],形成了一个全新的碳材料研究领域。进一步研究发现,掺杂的溶剂分子结构和尺寸对富勒烯单元相互作用和结构转变起到了重要作用^[11],为设计获得新型碳结构提供了思路。碳纳米管因其理想的中空管道结构为其他物质的填充提供了理想的模板,能够形成具有奇异结构和特性的新型纳米复合材料。例如,将富勒烯 C_{60} 分子填充进入碳纳米管形成“豆荚状”复合结构,高压研究发现在较低的压力范围 C_{60} 分子可以形成二聚和一维链状聚合结构^[14]。低维碳材料如零维富勒烯、一维碳链等填充碳纳米管内形成的复合结构为高压下探索新型功能碳材料提供可能。近年来,研究人员设计合成了低维碳填充的碳纳米管和限域碳点复合材料,作为基本构筑单元,在压力下载获了系列具有超硬特性、新型聚合结构和反常荧光增强的碳材料。本文将介绍通过设计低维碳复合材料前驱体,利用高压手段在新型功能碳材料研究中取得的系列进展。

1 低维碳纳米材料高压研究

碳具有多种形态和结构不同的低维纳米材料,如零维富勒烯分子、一维碳纳米管、一维碳链和二维石墨烯等。对富勒烯晶体的室温高压研究发现,一定范围的压力下富勒烯分子会严重变形并发生坍塌,进一步增加压力(≥ 30 GPa)会转变成非晶碳材料^[15]。最近科研工作者在富勒烯 C_{60} 样品的高温高压研究上取得了重大突破,发现经过高温高压处理的富勒烯 C_{60} 可以转变成具有超高硬度、光学带隙可调的非晶碳块体材料^[16-18]。如图 1 所示,该高质量的非晶碳块体材料尺寸毫米级,近全 sp^3 杂化成键,具有优异的力、热、光学性能,其维氏硬度、热导率和杨氏模量均是目前发现的非晶材料中的最高值^[16]。此外,通过控制实验合成的温度和压力条件,能够实现对非晶碳 sp^3 含量与性能的精细调控,这为非晶碳块体材料的应用开辟了新的空间。对碳纳米管的高压研究发现,单壁碳纳米管截面发生由圆形向椭圆形最后塌陷的转变过程^[19],而多壁碳纳米管阵列在激光加热条件下能够形成金刚石/石墨纳米复合材料^[20]。以 sp 杂化方式成键的一维线型碳链由于极端的化学不稳定性以及相互之间容易产生交联反应,难以存在于常温常压下,实验上人们对碳链知之甚少。通过高压手段调控石墨烯的层间相互作用,人们在三层石墨烯样品的高压研究中观察到了半金属到半导体行为的转变。光学吸收光谱表明获得了 2.5 eV 的本征带隙值,且能够保留到一定的低压力下。然而该石墨烯的高压相结构并不清晰,其带隙的打开可能与压力下 sp^2 向 sp^3 键的转变有关。此外,作为碳家族的新兴成员,碳纳米点由于表面丰富的官能团和尺寸可调^[21],在高压下通常表现出压致变色的发光特性,但存在严重的聚集诱导荧光猝灭。

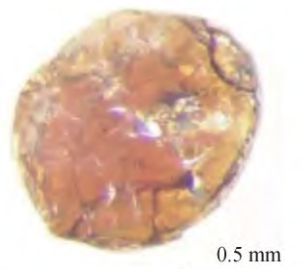


图 1 高质量非晶碳块体材料的光学照片^[16]
Fig. 1 Optical photograph of high-quality bulk amorphous carbon^[16]

2 低维碳纳米复合材料高压研究

2.1 新型 sp^3 超硬碳结构合成

金刚石作为自然界中硬度最高的物质,是石墨在高压下转变而成的高压亚稳相材料,具有优异的物理和化学性质。是否存在与金刚石硬度相媲美的其他 sp^3 杂化超硬碳材料是一个引人注目的重要课题^[22-23]。1991 年, Wataru 等^[24]对单晶的石墨样品进行室温加压(冷压),发现压力达到 18 GPa 石墨转变成光学透明状态,其透明高压相的结构并不清晰也无法保留到常压。直到 2003 年,研究人员通过冷压石墨和碳纳米管

前驱体^[6-7], 先后发现形成了未知结构的新型超硬高压碳相, 卸压后也不能截获到常压。构筑具有确定结构的、全 sp^3 超硬碳材料并截获到常压条件仍是一项挑战。

鉴于以上难题, 杨西贵和姚明光等以 C_{70} 富勒烯分子填充的单壁碳纳米管复合材料($C_{70}@SWNTs$)为初始前驱体开展了高压研究, 发现形成了常压可截获的新型单斜结构碳(V碳)^[25]。该碳相能够使金刚石表面产生压痕, 说明具有潜在的超硬特性, 并与理论预测的候选碳结构机械性质相吻合。 $C_{70}@SWNTs$ 材料的原位高压拉曼光谱表明随着压力的增加分别在拉曼低频和高频区出现新峰。卸压样品的同步辐射 X 射线衍射光谱出现清晰可辨的衍射峰, 与初始样品的衍射峰明显不同, 进一步证实了新相的形成。通过理论模拟转变过程, 碳纳米管和内部的 C_{70} 分子在压力的作用下塌缩, 随着压力的进一步增加, 内部 C_{70} 分子严重塌缩, 5 元碳环破坏伴随着 7 元碳环的形成, 促进了 C_{70} 分子和碳管结构通过 sp^3 键合重组, 最终导致 V 碳的产生(见图 2)。该研究利用高压手段, 创新性地选择包含 5 元碳环的碳纳米管限域 C_{70} 初始材料为基本构筑单元, 获得了常压可截获的、完全不同于金刚石相的全 sp^3 新型超硬碳结构。不同于前人实验中仅仅选用 6 元碳环组成的石墨、碳纳米管、富勒烯和玻璃碳等单体初始碳源, 该工作以自然含有 5 元碳环的 C_{70} 分子填充碳纳米管复合结构为基本构筑单元, 为新型超硬碳功能材料的制备提供了思路。

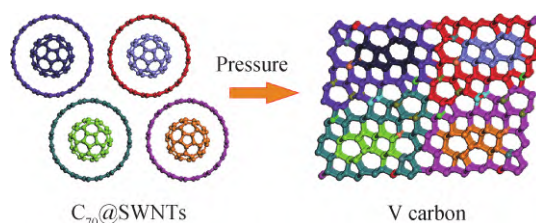


图 2 压力下 $C_{70}@SWNTs$ 转变为 V 碳结构的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phase transition of $C_{70}@SWNTs$ into V carbon under pressure

2.2 一维碳链高压下结构相变

线型碳链是由单个碳原子以 sp 方式杂化成键的真正的一维碳材料。由于特殊的几何结构和纳米尺度, 碳链被预测具有极高的机械强度和优异的光电性质, 在纳米光电器件中具有潜在的应用前景。然而, 由于碳链极端的化学不稳定性以及相互之间容易产生交联反应, 难以存在于常温常压下, 实验上人们对碳链的了解不多。研究表明决定碳链电子结构和振动性质的键长差值敏感于外部扰动, 因此可以对碳链进行有规律的调控。然而, 目前对碳链的研究主要集中在所制备样品长度的提高上, 压力作用下碳链的结构和光电性能之间的构效关系则鲜有报道。2016 年奥地利维也纳大学 Thomas 课题组在双壁碳纳米管中直接合成大量微米级别的线型碳链, 最长包含几千个碳原子, 被认为是有史以来最接近碳炔的样品^[26]。由于特异的一维几何构型和单原子尺寸直径, 碳链展现出链长、结构和端基依赖的力学、光学和电学性质。鉴于碳链与众不同的属性, 限域于双壁碳纳米管中的一维超长碳链为实验上深入理解线型碳链的高压行为提供了一个很好的模型。

2015 年, Andrade 等^[27]对多壁碳纳米管限域的线型短碳链进行了高压结构相变研究, 发现经最高压力 10 GPa 后的碳链之间发生共价聚合。与之相反, Neves 等^[28]最近研究了双壁碳纳米管内的短碳链在高压下的结构演化, 证实碳链与碳管内径之间形成了不可逆 sp^3 键连结构。以上研究表明压力调控主客体间相互作用对内部碳链的结构转变产生影响, 但这两项研究的结果并不吻合, 关于碳链在高压下的形变过程和成键形式仍有争议。针对以上问题, 吕超凡和杨西贵等对碳纳米管中的一维超长碳链进行了高压研究^[29]。如图 3 所示, 碳链的特征拉曼振动峰随着压力的增加逐渐向低频方向移动, 这一现象归因于压力作用下增强的碳管与碳链相互作用从而导致碳链键长差值变化减小。前人的研究结果表明共振拉曼光谱下不同链长的碳链拉曼峰与其相应的带隙值存在线性关系。根据该方法, 给出了四种不同链长碳链的带隙随压力呈现近似线性变化的趋势。碳纳米管中的超长碳链包含上千个碳原子可以近似认为是碳炔, 说明碳炔在高压下的拉曼峰振动和带隙变化也遵循线性关系。利用不同压力条件下卸压样品的拉曼光谱可以判断碳链成键变化。低压条件下(< 13 GPa), 卸压样品同初始样品相同的拉曼光谱说明碳链经历了可逆相变。当压力超过 20 GPa, 归属碳链和碳管的特征拉曼峰向低波数移动, 说明经历了不可逆相变, 且能保持到常压条件下。结

合理理论模拟发现碳链在高压的作用下发生 sp -to- sp^2 的成键变化, 结构从一维线型向之字型转变, 更高压力下与双壁碳纳米管的内径形成 sp^3 共价键合。该研究结果为碳链在高压下的结构转变提供了新的物理图像, 澄清了前人关于碳链结构相变的争议。

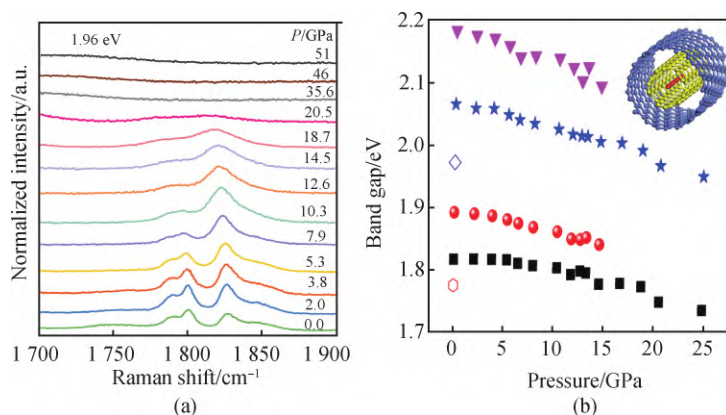


图 3 一维碳链拉曼峰 (a) 和带隙 (b) 在压力作用下的演化

Fig. 3 Evolution of Raman spectra (a) and band gap (b) for linear carbon chains under pressure

2.3 受限碳纳米点的反常压致荧光增强和常压保留

刺激响应发光材料在安全检测、信息存储、光电子器件和传感等领域有着重要的应用前景, 引起了人们越来越多的研究兴趣。目前, 多种发光材料包括有机物、金属配合物和钙钛矿量子点等在外界刺激(如机械研磨、剪切或静水压力等)作用下^[30-31], 会发生光致发光的强度和颜色变化。然而, 由于非辐射跃迁过程的影响, 大多数发光材料在压力的作用下会发生荧光猝灭现象。此外, 很少有材料在压力释放时还能保持其最佳性能, 限制了其实际应用。碳纳米点近年来因其荧光效率高、毒性低、合成方便以及生物相容性好等优点, 在生物医学、能量转换及光电子器件等领域受到人们的广泛关注^[32-35]。由于其丰富的表面官能团、可调的晶格尺寸和分子间相互作用, 人们已在常压下对其光致发光性能进行了调控, 这为设计具有优异发光性能的压致变色材料提供了重要基础。不同于其他碳材料在高压下的行为, 碳纳米点通常表现出压致变色的发光特性。然而, 目前报道的碳纳米点在压力的作用下也存在严重的聚集诱导荧光猝灭, 仅有个例报道了其压致荧光增强的现象, 但遗憾的是卸压后无法保留到常压条件下。因此, 发展一种有效的策略实现碳纳米点材料压致荧光增强并保留至常压仍是具有挑战的课题。

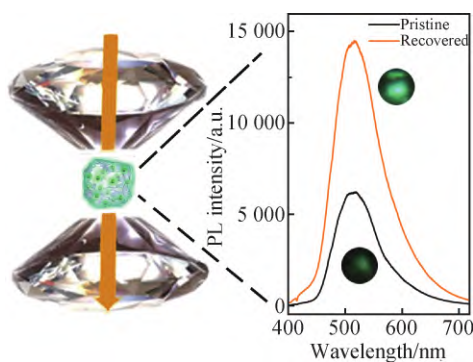


图 4 受限碳纳米点的压致荧光增强

Fig. 4 Enhanced photoluminescence of confined carbon dots under pressure

最近, 姜庆和杨西贵等通过将碳纳米点限域在氢氧化钠基质中^[36], 利用高压技术调控其相互作用, 实现了碳纳米点压致荧光增强并常压保留(见图4)。原位高压荧光实验表明, 随着压力的增加, 限域碳纳米点的荧光发射峰发生红移并伴随着明显的强度增强。在 1.4 GPa 的温和压力下, 其发光强度相比于初始样品可提高 1.6 倍。更引人注目的是, 在压力释放到常压条件后, 增强的荧光性能仍可保留。对比未限域的碳纳米

点,压力作用下表现出荧光猝灭现象。利用飞秒瞬态吸收光谱探测了碳纳米点受限前后激子的跃迁动力学过程。研究发现受限的碳纳米点样品基态漂白和受激发射信号与无限域的样品有显著差异,说明氢氧化钠基质的引入有效抑制了碳纳米点间的缺陷态和 π - π 堆积作用。理论模拟进一步表明,受限碳纳米点的振子强度在压力的作用下明显增加,导致发射峰强度增强,这与实验结果一致。因此,氢氧化钠基质的空间约束作用可以有效地分离碳纳米点并限制其分子振动,进而抑制其非辐射跃迁途径,从而导致光致发光强度增强。该研究结果提供了一种合理的策略来可调控碳纳米点发光性能,为设计构筑新型刺激响应发光材料开辟了一条途径。

3 结语与展望

通过将富勒烯和碳链分别填充进入碳纳米管中,高压作用下获得了常压可截获、具有超硬特性和共价聚合的新型碳结构。利用氢氧化钠基质对碳纳米点的空间限域作用,实现了压力诱导碳纳米点的荧光增强且常压下保留。这些研究结果表明,基于设计的碳基纳米复合前驱体,利用高压技术构筑了具有不同功能特性的新碳材料。此外,为了避免盲目的试错实验,有必要通过理论模拟设计合适的前驱体结构,研究极端条件下特定前驱体最有可能的反应路径和动力学过程,从而指导实验合成具有特定功能的新材料。

参 考 文 献

- [1] LU Y J, LIN C N, SHAN C X. Optoelectronic diamond: growth, properties, and photodetection applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(20): 1800359.
- [2] QIN J X, YANG X G, LV C F, et al. Nanodiamonds: synthesis, properties, and applications in nanomedicine[J]. *Materials & Design*, 2021, 210: 110091.
- [3] LIN C N, LU Y J, TIAN Y Z, et al. Diamond based photodetectors for solar-blind communication[J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 29962–29971.
- [4] CHEN Y C, LU Y J, LIN C N, et al. Self-powered diamond/ β -Ga₂O₃ photodetectors for solar-blind imaging[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(21): 5727–5732.
- [5] ZHANG Z F, LIN C N, YANG X, et al. Solar-blind imaging based on 2-inch polycrystalline diamond photodetector linear array[J]. *Carbon*, 2021, 173: 427–432.
- [6] MAO W L, MAO H K, ENG P J, et al. Bonding changes in compressed superhard graphite[J]. *Science*, 2003, 302(5644): 425–427.
- [7] WANG Z W, ZHAO Y S, TAIT K, et al. A quenchable superhard carbon phase synthesized by cold compression of carbon nanotubes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(38): 13699–13702.
- [8] WANG L, LIU B B, LI H, et al. Long-range ordered carbon clusters: a crystalline material with amorphous building blocks[J]. *Science*, 2012, 337(6096): 825–828.
- [9] PEI C Y, FENG M N, YANG Z X, et al. Quasi 3D polymerization in C₆₀ bilayers in a fullerene solvate[J]. *Carbon*, 2017, 124: 499–505.
- [10] WANG L, LIU B B, YU S D, et al. Highly enhanced luminescence from single-crystalline C₆₀ • 1*m*-xylene nanorods[J]. *Chemistry of Materials*, 2006, 18(17): 4190–4194.
- [11] YAO M G, CUI W, DU M R, et al. Tailoring building blocks and their boundary interaction for the creation of new, potentially superhard, carbon materials[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(26): 3962–3968.
- [12] WANG L. Solvated fullerenes, a new class of carbon materials suitable for high-pressure studies: a review[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2015, 84: 85–95.
- [13] PEI C Y, WANG L. Recent progress on high-pressure and high-temperature studies of fullerenes and related materials[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2019, 4(2): 028201.
- [14] ZOU Y G, LIU B B, YAO M G, et al. Raman spectroscopy study of carbon nanotube peapods excited by near-IR laser under high pressure[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(19): 195417.
- [15] WANG L, LIU B B, LIU D D, et al. Synthesis and high pressure induced amorphization of C₆₀ nanosheets[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(10): 103112.
- [16] SHANG Y, LIU Z, DONG J, et al. Ultrahard bulk amorphous carbon from collapsed fullerene[J]. *Nature*, 2021, 599(7886): 599–604.
- [17] TANG H, YUAN X, CHENG Y, et al. Synthesis of paracrystalline diamond[J]. *Nature*, 2021, 599(7886): 605–610.
- [18] ZHANG S S, LI Z H, LUO K, et al. Discovery of carbon-based strongest and hardest amorphous material[J]. *National Science Review*, 2021, 9(1): nwab140.
- [19] YAO M G, WANG Z G, LIU B B, et al. Raman signature to identify the structural transition of single-wall carbon nanotubes under high pressure[J].

- Physical Review B ,2008 ,78(20) : 205411.
- [20] YANG X G , DONG J J , YAO M G , et al. Diamond-graphite nanocomposite synthesized from multi-walled carbon nanotubes fibers [J]. Carbon , 2021 ,172: 138-143.
- [21] LIANG Y C , SHANG Y , LIU K K , et al. Water-induced ultralong room temperature phosphorescence by constructing hydrogen-bonded networks [J]. Nano Research ,2020 ,13(3) : 875-881.
- [22] YANG X G , LV C F , LIU S J , et al. Orthorhombic C_{14} carbon: a novel superhard sp^3 carbon allotrope [J]. Carbon ,2020 ,156: 309-312.
- [23] LV R Y , YANG X G , YANG D W , et al. Computational prediction of a novel superhard sp^3 trigonal carbon allotrope with bandgap larger than diamond [J]. Chinese Physics Letters ,2021 ,38(7) : 076101.
- [24] WATARU U , TAKEHIKO Y. Light-transparent phase formed by room-temperature compression of graphite [J]. Science ,1991 ,252(5012) : 1542-1544.
- [25] YANG X G , YAO M G , WU X Y , et al. Novel superhard sp^3 carbon allotrope from cold-compressed C_{70} peapods [J]. Physical Review Letters , 2017 ,118(24) : 245701.
- [26] SHI L , ROHRINGER P , SUENAGA K , et al. Confined linear carbon chains as a route to bulk carbyne [J]. Nature Materials ,2016 ,15(6) : 634-639.
- [27] ANDRADE N F , AGUIAR A L , KIM Y A , et al. Linear carbon chains under high-pressure conditions [J]. The Journal of Physical Chemistry C , 2015 ,119(19) : 10669-10676.
- [28] NEVES W Q , ALENCAR R S , FERREIRA R S , et al. Effects of pressure on the structural and electronic properties of linear carbon chains encapsulated in double wall carbon nanotubes [J]. Carbon ,2018 ,133: 446-456.
- [29] YANG X G , LV C F , YAO Z , et al. Band-gap engineering and structure evolution of confined long linear carbon chains@ double-walled carbon nanotubes under pressure [J]. Carbon ,2020 ,159: 266-272.
- [30] ZHAI C , YIN X , NIU S , et al. Molecular insertion regulates the donor-acceptor interactions in cocrystals for the design of piezochromic luminescent materials [J]. Nature Communications ,2021 ,12: 4084.
- [31] LV C F , YANG X G , SHI Z F , et al. Pressure-induced ultra-broad-band emission of a $Cs_2AgBiBr_6$ perovskite thin film [J]. The Journal of Physical Chemistry C ,2020 ,124(2) : 1732-1738.
- [32] LIU K K , SONG S Y , SUI L Z , et al. Efficient red/near-infrared-emissive carbon nanodots with multiphoton excited upconversion fluorescence [J]. Advanced Science ,2019 ,6(17) : 1900766.
- [33] LIANG Y C , GOU S S , LIU K K , et al. Ultralong and efficient phosphorescence from silica confined carbon nanodots in aqueous solution [J]. Nano Today ,2020 ,34: 100900.
- [34] SHEN C L , LOU Q , LIU K K , et al. Chemiluminescent carbon dots: synthesis , properties , and applications [J]. Nano Today ,2020 ,35: 100954.
- [35] LIANG Y C , LIU K K , WU X Y , et al. Lifetime-engineered carbon nanodots for time division duplexing [J]. Advanced Science ,2021 ,8(6) : 2003433.
- [36] LOU Q , YANG X G , LIU K K , et al. Pressure-induced photoluminescence enhancement and ambient retention in confined carbon dots [J]. Nano Research ,2022 ,15(3) : 2545-2551.



杨西贵 郑州大学副教授 九三学社社员 入选中国科协青年人才托举工程项目。主要从事金刚石光电材料与器件、高压物理研究 相关研究成果以第一/通讯作者在 *Phys Rev Lett*、*Nano Res*、*J Phys Chem Lett*、*Carbon* 等期刊发表学术论文 15 篇,申请国家发明专利 5 项,曾获吉林省优秀博士毕业论文,主持国家自然科学基金面上项目、青年项目及省部级课题等 6 项。