



·惯性约束聚变物理与技术·综述·

惯性约束聚变用低密度聚合物泡沫掺杂研究现状

石宝龙, 周秀文, 晏良宏, 王维仁, 张海军

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 在惯性约束聚变(ICF)实验中,可通过在低密度聚合物泡沫中引入氯、氩、锗、铜等元素来调控辐射不透明度、改善流体力学稳定性及实现温度、密度示踪诊断。本文综述了掺杂聚合物泡沫的制备研究现状,分析了当前掺杂过程中存在的问题,并展望了未来面向高重复频率、高掺杂精度需求的技术发展趋势。该综述可为 ICF 实验靶材料的设计与制备提供参考。

关键词: 惯性约束聚变;靶材;聚合物泡沫;元素掺杂;均匀性

中图分类号: TB324

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202638.250403

Research status of doped low-density polymer foams for inertial confinement fusion

Shi Baolong, Zhou Xiuwen, Yan Lianghong, Wang Weiren, Zhang Haijun

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper focuses on the element doping technology of low-density polymer foams for inertial confinement fusion (ICF) experiments and summarizes their research status and development trends. As key target materials for ICF, low-density polymer foams can optimize radiation transport, suppress hydrodynamic instability, and achieve diagnostic functions by introducing doping elements such as chlorine, argon, and germanium. The paper systematically analyzes the principles, advantages, disadvantages, and application bottlenecks of two major types of doping technologies: physical doping (particle dispersion, physical vapor deposition) and chemical doping (copolymerization, monomer functionalization, polymer substitution), with an emphasis on core issues such as uniformity control and doping precision. Finally, it discusses cutting-edge directions including composite doping, two-photon polymerization, and ion implantation, providing technical references for the high-performance and precise preparation of ICF target materials and facilitating the development of high-repetition-rate ICF experiments.

Key words: inertial confinement fusion (ICF), target material, polymer foam, element doping, uniformity

在惯性约束聚变(ICF)实验中,低密度聚合物泡沫($< 50 \text{ mg/cm}^3$)因具有高孔隙率、低密度和可控的微观结构等特性,被广泛用作靶材料,如填充介质、燃料支撑层及诊断载体^[1-5]。为进一步优化靶材料的辐射输运性能、抑制流体力学不稳定性或实现温度、密度示踪诊断,需向聚合物泡沫中引入氯、碘、铜、铁、钛、锗等掺杂元素^[2,4-11]。其中,氩、氯等低 Z 元素在靶材被压缩形成等离子体时,会发射特征 X 射线谱线,而谱线的强度、波长等参数与等离子体温度、密度强相关,通过分析谱线即可反推等离子体状态^[12-13];锗作为高 Z 元素,能够调整磁化套筒的径向辐射温度,减小磁场能斯特对流速度,进而减少燃料边界磁通损失,搭配碳氢(CH)掺杂还可平衡辐射损失与燃烧效率,最终实现聚变产额的提升^[14-16];铜的原子序数适中,光谱特征易与其他元素区分,将其制成成分渐变壳层后,可通过监测其光谱分布,追踪靶材壳层与燃料的混合过程^[17];钛、铁等中高 Z 元素则可用于诊断靶丸压缩状态,在靶丸被高压压缩过程中,钛会产生发射光谱,铁会产生吸收光谱,通过分析这些光谱的相关参数,便能判断靶丸的压缩程度和状态^[18];碘作为高 Z 掺杂元素,可改变靶丸烧蚀前沿的密度梯度,并借助自身质量和惯性为靶体界面提供额外阻尼,从而抑制流体力学不稳定性^[19]。

* 收稿日期:2025-11-01; 修订日期:2026-01-08
基金项目:国家自然科学基金项目(52372238)
联系方式:石宝龙, shibaolong24@gscaep.ac.cn.
通信作者:张海军, Luckynavyboy@163.com.

聚合物泡沫掺杂需要解决的关键问题包括掺杂量的精确添加(原子分数通常为1%~3%)^[20]、元素分布的均匀性控制、微观结构(低密度、高孔隙率)稳定性及力学性能(可加工性)的保持或提升^[1-3]。目前,ICF实验中使用的低密度聚合物基质主要包括聚-4-甲基-1-戊烯(PMP)、聚苯乙烯(PS)、聚双环戊二烯(PDCPD)及聚二乙烯基苯(DVB)等^[6,21-28]。

从掺杂剂与聚合物基质的相互作用本质来看,现有制备技术可划分为物理掺杂与化学掺杂两大类,两类技术在原理、性能与适用场景上存在显著差异。物理掺杂的核心优势在于操作简便、元素选择灵活,但需解决颗粒沉降与团聚问题;化学掺杂通过共价键或配位键将掺杂元素引入聚合物分子链,稳定性远优于物理掺杂,但合成难度较高且元素选择受限于化学反应活性。本文通过系统梳理近年来各类掺杂聚合物泡沫的制备方法、最优参数及性能优劣,总结了当前两类掺杂技术面临的瓶颈(物理掺杂均匀性不足、化学掺杂合成效率低、泡沫激光耐受性差)及未来的发展趋势,为高性能靶材料的开发提供技术参考。

1 物理掺杂

物理掺杂是通过物理手段,如机械混合(颗粒分散)或气相沉积将掺杂剂引入聚合物泡沫中,不改变聚合物的化学结构。该技术的核心优势是操作简单、掺杂元素选择范围广,但存在两大问题:一是均匀性难于精准控制,物理掺杂的掺杂剂与聚合物基质无化学键结合,容易出现团聚或沉降,即使通过工艺优化实现初始均匀分布,在后续工艺中(如干燥、切割),仍可能因热运动或外力作用下出现掺杂剂迁移(如颗粒沉降、气相掺杂剂脱附),稳定性远低于化学掺杂;二是掺杂量的高精度调控难度大,物理掺杂的掺杂量主要依赖颗粒添加量、吸附时间等宏观参数控制,难以实现高精度调控(如原子分数0.1%以下的微量掺杂或掺杂量的准控制)。物理掺杂主要包括颗粒分散掺杂技术和(物理)气相沉积掺杂技术两种方法。

1.1 颗粒分散掺杂

颗粒分散掺杂是将纳米/微米级掺杂剂颗粒(如 Au、W、SnO₂)混入聚合物前驱体(单体溶液、凝胶等),前驱体经聚合和干燥形成低密度泡沫。该方法是最常用的物理掺杂方式,其核心难点在于颗粒团聚与沉降控制——高表面能的纳米/微米颗粒易因范德华力聚集形成大尺寸团聚体,且高密度颗粒(如 W)与低密度前驱体(如 PMP 溶液)存在显著密度差,易在制备过程中沉降,导致泡沫内掺杂元素分布不均。针对颗粒团聚与沉降问题,目前已形成四类较成熟的解决方案,分为直接分散、表面改性法、粘度调控法和共同凝胶法,其原理如图 1 所示。

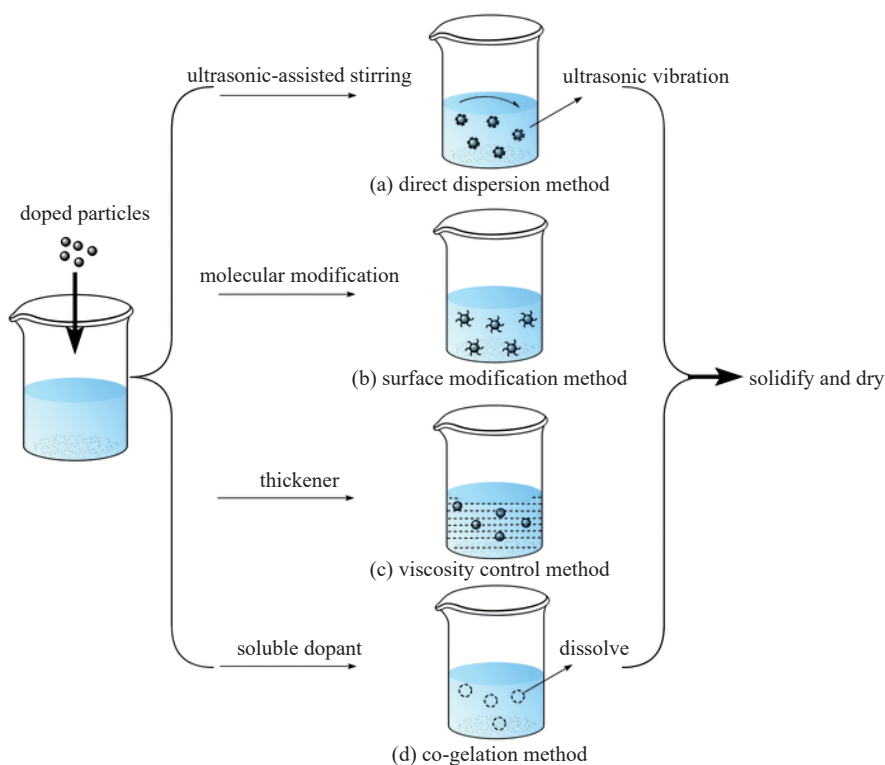


Fig. 1 Schematic diagrams of particle dispersion methods

图 1 颗粒分散法示意图

直接分散法: 通过超声振动或机械搅拌等外力打破颗粒团聚体, 将颗粒直接混入单体溶液。该方法工艺最简单, 适用于低掺杂浓度泡沫制备, 但无法适用于高浓度、高密度颗粒掺杂。Steckle 等^[29] 将 85 nm Au 颗粒(原子分数 2.0%)超声分散到苯乙烯-DVB 乳液中, 成功制备出密度为 30.0 mg/cm³ 的 Au 掺杂聚苯乙烯泡沫, Au 颗粒分布均匀性达 90%, 满足低浓度掺杂实验需求。当原子分数大于 5.0%, 外力分散不足以对抗颗粒间的团聚时, 仍然会出现尺寸 > 1 μm 的掺杂颗粒团聚问题; 当颗粒与前驱体密度差大于 5.0 mg/cm³ 时, 沉降率大于 15%。

表面改性法: 通过硫醇(如丁二酸硫醇)和聚合物分散剂(如聚[4-乙烯基苯酚], PVP)等修饰颗粒表面, 降低颗粒表面能并增强其与聚合物基质的相容性以抑制团聚。方瑜等^[30] 采用丁二酸硫醇包覆 Au 纳米颗粒, 使 Au 颗粒在 HIPE 水相中实现无明显团聚的均匀分散; 刘小林等^[31] 采用 PVP 调控 Au 颗粒在 DVB 乳液中的分散, 有效地减少了团聚现象。该方法虽然能显著提升颗粒分散稳定性, 但表面改性剂的选择需与聚合物基质匹配(如 PVP 仅适用于苯乙烯类单体), 且改性过程可能会引入微量杂质, 对部分高精度诊断实验(如离子输运测量)存在潜在干扰。

粘度调控法: 通过添加增稠剂(如超高分子量聚乙烯, UHWPE)提高前驱体粘度, 利用粘稠体系的阻力抑制颗粒沉降。张庆军等^[20] 在 W 掺杂 PMP 泡沫制备中, 添加质量分数 25% 的 UHWPE, 使 PMP 溶液粘度从 17 mPa/s 提升至 20.1 mPa/s, 不仅实现 W 颗粒在泡沫体内的均匀分布, 还将 W 掺杂质量分数最高提升至 60%, 解决了高密度 W 颗粒的沉降难题, 但需平衡溶胶粘度与泡沫微观结构性能。

共同凝胶法: 将易溶于溶剂的掺杂剂(如六溴苯)与聚合物(如 PMP)共同溶解后形成凝胶, 利用分子级溶解状态避免颗粒团聚与沉降。尹强^[32] 采用该方法制备 Br 掺杂的 PMP 泡沫, 六溴苯与 PMP 在溶剂中完全溶解, 凝胶干燥后 Br 元素均匀分布, 较完美地解决了传统颗粒掺杂的均匀性问题。但该方法仅适用于可溶性掺杂剂, 对 Au、W 等不溶性金属颗粒无效, 适用范围受限。

尽管上述颗粒分散掺杂方法有效地解决了低密度泡沫柱掺杂的部分问题, 但仍存在两大核心局限: 一是高浓度掺杂均匀性瓶颈, 当原子分数过高时, 即使结合表面改性与粘度调控, 仍可能出现局部团聚(如 Au 颗粒在原子分数 5.0% 以上时团聚率回升^[29]); 二是工艺兼容性不足, 粘度调控、表面改性等优化手段可能与特定泡沫的制备工艺冲突(如高粘度不利于微球泡沫成型), 需针对不同泡沫基质(PMP、PS、DVB 等)开发定制化方案。

1.2 物理气相沉积掺杂

物理气相沉积掺杂是将易挥发掺杂剂(如 I₂ 和 Br₂)以气相形式引入聚合物泡沫, 通过物理吸附附着在泡沫骨架表面, 如图 2 所示。该方法主要用于卤素元素掺杂, 其难点在于掺杂均匀性存在空间梯度问题——泡沫的高比表面积虽有利于吸附掺杂剂, 但掺杂剂蒸气的扩散依赖浓度梯度, 易导致“表面富集、内部匮乏”。泡沫表层因直接接触蒸气而快速达到饱和吸附, 内部则因扩散阻力大, 掺杂量远低于表层; 尤其当泡沫厚度 > 1 mm 时, 内外掺杂量差异可达 3~5 倍, 无法满足厚泡沫靶材(如 ICF 靶丸外壳, 厚度常为 1~2 mm)的均匀掺杂需求。

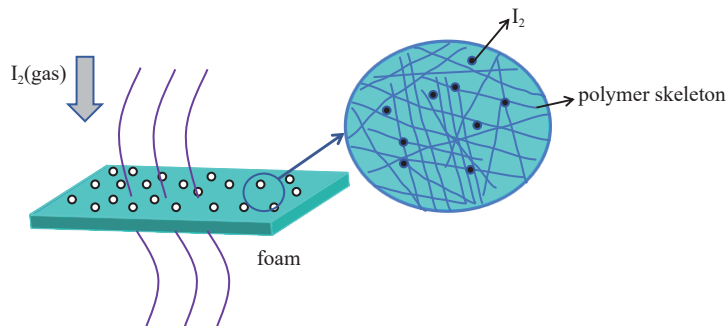


Fig. 2 Schematic diagram of physical vapor deposition doping

图 2 物理气相沉积掺杂示意图

目前, 主要通过工艺参数优化提升气相沉积掺杂的均匀性。一是控制掺杂温度与时间, 在低温(如 25 °C)下, 延长吸附时间(如 24 h), 减缓表层吸附速率, 为内部扩散提供更充足时间; 二是采用“分步吸附-脱附”循环, 通过多次吸附与轻度脱附, 平衡表层与内部的掺杂量。Kim 等^[2] 采用 25 °C 下 I₂ 蒸气吸附聚双环戊二烯(PDCPD)气凝胶 24 h, 使 I 元素原子分数达 1.9%。该方法的厚度适配性较差, 仅适用于薄膜状泡沫(厚度 < 1 mm), 厚泡沫的内部掺杂量仍显著不足; 另外, 该方法的掺杂稳定性较低, 气相吸附的掺杂剂仅通过分子间作用力附着在骨架表面, 在高温或激光辐照下易脱附流失, 导致实验过程中掺杂浓度下降, 影响辐射诊断的准确性。

2 化学掺杂

化学掺杂是通过化学反应将掺杂元素以共价键或配位键形式引入聚合物分子结构中,可实现掺杂剂的原子级均匀分布,稳定性远优于物理掺杂。化学掺杂的技术难点为元素兼容性存在局限、掺杂量难以精准控制和热稳定性与杂质残留矛盾。针对上述难点,研究人员通过工艺优化与技术创新,形成了共聚掺杂、单体功能化掺杂及聚合物取代掺杂三类方案,图3为三种掺杂方式原理示意图(图中涉及物质仅作举例说明使用,不代表实际应用)。

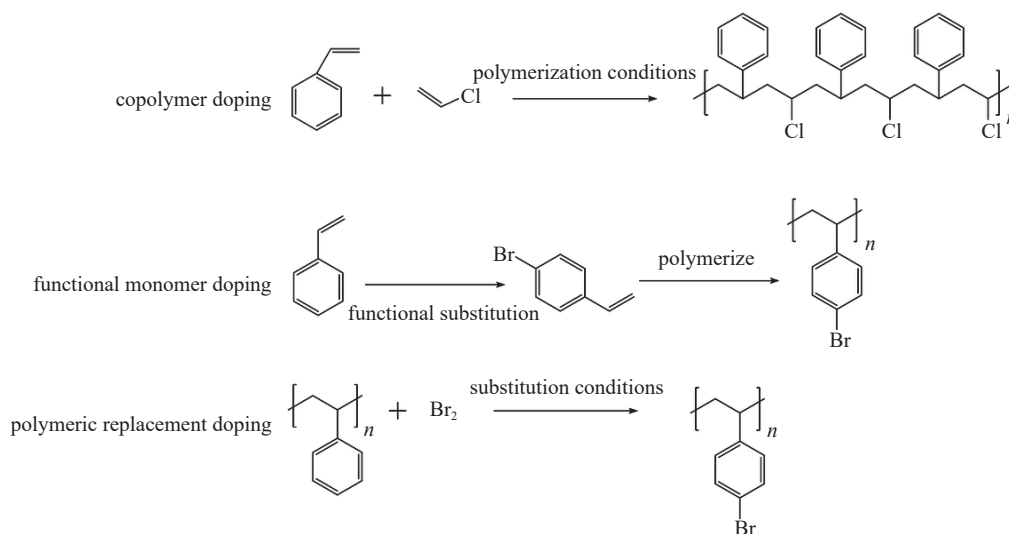


Fig. 3 Schematic diagram of the principle of chemical doping

图3 化学掺杂的原理示意图

2.1 共聚掺杂:精准调控掺杂量与分散性

化学掺杂反应过程中掺杂单体易发生团聚或副反应(如自由基捕获),导致实际掺杂量与理论值偏差较大。含金属的功能单体在共聚时,部分金属离子可能与引发剂结合,降低有效掺杂效率,需反复调试反应参数以缩小偏差。通过设计含掺杂元素的功能性单体(如含 Au、Sn 的苯乙烯衍生物),与主体单体(如 DVB、DCPD)通过特定聚合反应(自由基聚合、ROMP)形成共聚物,利用化学键束缚实现掺杂元素的分子级分散,同时通过控制功能性单体比例精准调控掺杂量。

自由基共聚适用于苯乙烯类体系, Croix 等^[10]合成含 Au 的苯乙烯衍生物(p-乙基苯基三乙基膦金),并将其与 DVB 在 60 °C 下共聚,制备出 Au 掺杂 DVB 泡沫,泡沫中 Au 含量达 31.0%,且无明显团聚,满足高浓度掺杂需求。ROMP 共聚(开环易位聚合)适用于环烯烃类单体,如图4所示。Kim 等^[2]采用 ROMP 法将含 Sn 的降冰片烯单体(NB-Sn)与双环戊二烯(DCPD)共聚,借助第一代 Grubbs 催化剂调控反应速率,使 Sn 原子分数精准控制在 0.068%(理论值 0.07%),偏差小于 3%,泡沫收缩率小于 2%,解决了低浓度精准掺杂难题。

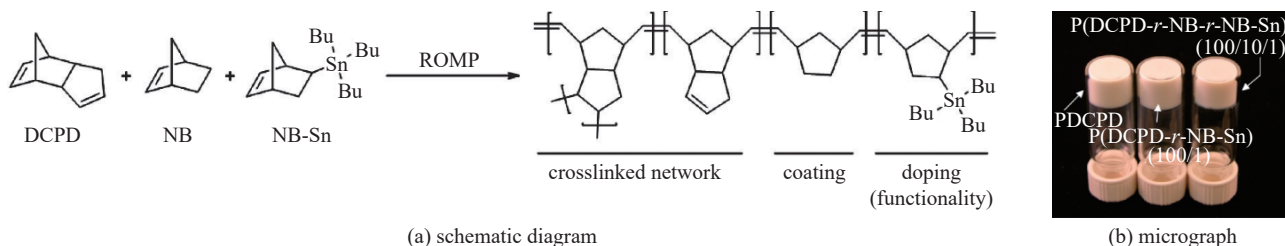


Fig. 4 Schematic diagram for the preparation of Sn-containing PDCPD aerogel and its micrograph^[2]

图4 含 Sn 的 PDCPD 气凝胶制备原理图与显微照片^[2]

2.2 单体功能化掺杂:突破元素兼容性瓶颈

掺杂元素需能通过化学反应(如配位、取代)与聚合物分子链结合,但仅有活泼金属(如 Au、Sn)或卤族元素(Cl、Br、I)可满足反应条件,高原子序数元素(如 W、Pt)因化学惰性难以接入分子链。在单体合成阶段,可通过亲电取代(如苯环溴代)或配位反应,将掺杂元素直接引入单体分子结构(如制备含 Ge 的苯乙烯单体 Ge-St),再进行聚合发泡,避免后续掺杂时元素与聚合物的反应惰性问题。黄传群等^[33]利用三甲基溴化锆和对溴代苯乙烯制备

Ge-St 单体, 聚合后 Ge 原子分数达 2.6%(理论值 3.6%), 成功将 Ge 元素(传统化学掺杂难兼容元素)引入聚合物链, 泡沫密度可在 32~74 mg/cm³ 范围内调控, 满足不同实验对靶材料密度的需求, 拓展了化学掺杂的元素适用范围。

2.3 聚合物取代掺杂: 平衡稳定性与杂质控制

为实现高效反应, 常需使用强氧化剂(如三氟乙酰氧基次碘酸)或催化剂(如 SnCl₄), 氧化剂或催化剂易在聚合物骨架中残留, 高温下(如 ICF 实验中的激光加热环境)易引发掺杂元素脱离, 残留杂质可能干扰等离子体诊断信号。通过选择反应活性较高的聚合物骨架(如 PS、PMP 等), 采用温和反应条件(如室温、弱催化剂)进行卤代或磺化反应, 可以减少氧化或催化试剂使用, 同时通过后续清洗工艺(如溶剂萃取)去除残留杂质, 可以提升热稳定性。尹强等^[34]在光照条件下, 将液溴与 PMP 的四氯化碳溶液反应, 通过烷烃氢原子的亲电取代引入 Br 原子, 制备的 Br 掺杂 PMP 泡沫在 150 °C 以下稳定, Br 原子分数可达 7.79%, 泡沫中无明显杂质残留。Overturf 等^[12]采用三氟乙酰氧基次碘酸(CF₃COOI)为碘代试剂, 在室温下对 PS 进行 15 h 自由基链式碘代, I 原子分数可控在 0.1~0.9%; 反应条件温和, 避免了高温对聚合物结构的破坏, 同时通过乙醇清洗去除残留试剂, 降低对诊断信号的干扰。

三种掺杂方案有效改善了化学掺杂性能, 但仍存在一些问题限制了化学掺杂泡沫在 ICF 实验中的应用。一是合成效率低, 难以规模化: 功能性单体(如含 Sn 的 NB-Sn)合成需多步反应(如单体修饰、纯化), 周期长达数周, 如 ROMP 共聚等反应需特定催化剂(如 Grubbs 催化剂), 且反应速率慢(单次反应需 24~48 h), 无法满足高重复频率实验对靶材料的批量需求; 二是低密度泡沫高温稳定性仍不足, 虽通过温和反应提升了常温稳定性, 但在 ICF 实验的极端高温环境中, 部分掺杂元素仍会脱离。

3 发展趋势

尽管当前聚合物泡沫掺杂技术已取得显著进展, 但在 HEDP 实验的高精度、高稳定性需求下, 需要进一步发展物理或化学泡沫掺杂技术以解决高均匀性、宽元素范围的掺杂、同一泡沫中实现梯度掺杂量和泡沫中实现定点局部掺杂等。针对这些问题, 国内外已有初步研究进展。

3.1 复合掺杂: 满足“高均匀性”与“宽元素范围”的需求

单一掺杂方式难以同时满足“高均匀性”与“宽元素范围”的需求, 而复合掺杂(如“化学掺杂+物理掺杂”)可实现优势互补, 拓展掺杂体系的应用场景。先通过化学掺杂引入原子级掺杂剂(如 Sn), 再通过物理掺杂引入颗粒级掺杂剂(如 Au), 形成“分子-颗粒”双掺杂体系。Moreau 等^[35]在 ICF 靶丸制备中, 先将含 Sn 的单体与 DVB 共聚(Sn 原子分数 0.1%), 再超声分散 Au 颗粒(质量分数 1.0%)。在双掺杂泡沫中, Sn 实现分子级分散(均匀性大于 98%), Au 颗粒团聚率小于 5%。该靶丸在激光驱动下可同时实现等离子体温度诊断(Sn 的 Kn 线)与界面成像(Au 的 M 壳层辐射), 靶丸的功能集成度显著提升。本课题组的王朝阳^[36]等曾将含 ZIF-67 结构的碳气凝胶微球与 Te 粉在氮气-氩气环境中进行反应, 使得碳气凝胶表面生长 CoTe₂ 纳米颗粒的同时在气凝胶内部引入 N 元素, 这种复合掺杂手段为有机泡沫的掺杂提供了参考。

3.2 双光子聚合技术: 有望实现在同一泡沫结构中实现不同掺杂量

双光子聚合技术(2PP)在制备低密度泡沫方面具有精度高、密度控制灵活和可分层等多种优势。使用商业化的 2PP 系统和丙烯酸光敏树脂, 可以打印多种靶标结构, 包括管状结构、具有空间周期性的类瑞利-泰勒表面结构和低密度泡沫结构。Jiang 等^[37]利用 2PP 系统制备出具有垂直密度梯度的分级密度泡沫, 包含 12 个单独的层, 密度从 600 mg/cm³ 降至 80 mg/cm³, 如图 5 所示^[37]。利用该技术进行双组分打印, 利用每层不同组分分配比, 有望实现高效高精度制备不同掺杂浓度超轻聚合物泡沫。本所卫来^[38]等曾将膨胀石墨(EG)分散在改性聚硅氧烷树脂中, 并通过紫外-热场复助直写技术成功打印出具有悬挂特征的各种蜂窝结构, 为双组分 2PP 打印制备提供一定技术参考。

3.3 离子注入: 在泡沫中实现定点局部掺杂

离子束注入掺杂的原理是利用高能离子穿透泡沫孔隙并与聚合物骨架碰撞, 最终使离子以小尺寸颗粒的形式停留在指定深度(由离子能量决定), 形成窄分布的掺杂层, 该技术有望实现对低密度泡沫的精准局部掺杂。Hund 等^[39]将该技术用于 SiO₂ 气凝胶的掺杂, 通过控制离子剂量, 实现了 Au 掺杂的深度分布范围控制。在 SiO₂ 气凝胶中, 注入的 Au 元素以单原子或小团簇(<5 nm)形式存在, 无明显团聚。如图 6 所示^[39], SiO₂ 掺杂区域存在明显边界, 故对掺杂元素的范围精准控制具备可行性。Shin^[40]等利用该技术对 GDP 胶囊进行氩掺杂, 通过提高注入剂量可提高掺杂元素的留存率, 但辐射损失会导致胶囊的变形。该方法也可制备梯度掺杂泡沫, 满足 ICF 靶丸的分层诊断需求。离子束注入掺杂技术的另一个优势在于无团聚与污染, 离子注入直接将原子级掺杂剂引入泡沫, 避免颗粒团聚问题, 且无溶剂残留。该技术的缺点为设备成本高, 且高剂量注入可能破坏泡沫结构, 只能适用于小

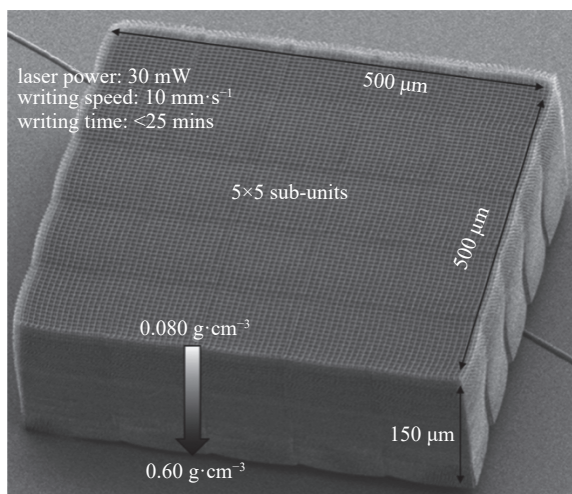


Fig. 5 A hierarchical density foam structure composed of 25 sub-blocks^[37]

图 5 由 25 个子块构成的层级密度泡沫^[37]

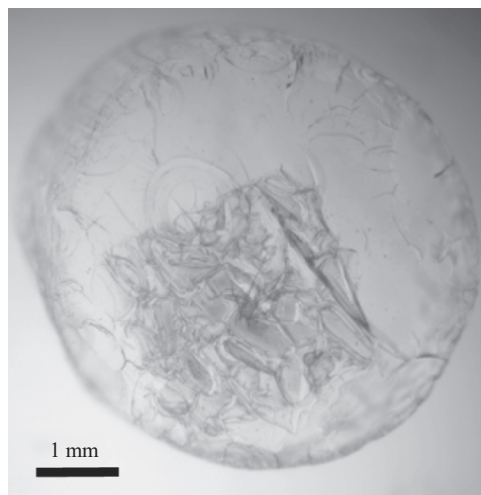


Fig. 6 Ion implanted silica aerogel cylinder^[39]

图 6 离子注入的 SiO₂ 气凝胶^[39]

尺寸靶材。

4 结 论

本文系统综述了惯性约束聚变(ICF)实验中低密度聚合物泡沫掺杂的研究现状,从物理掺杂与化学掺杂两大技术路径,剖析了各类掺杂技术的原理、优点、缺点以及未来的发展方向。分析认为,随着物理掺杂与化学掺杂的成熟与融合,有望突破“高均匀性-宽元素范围”协同调控,满足 ICF 实验对多元素精准掺杂的需求;实现掺杂量的空间梯度与局部定点控制,为 ICF 靶丸分层诊断提供关键材料支撑;提升泡沫的高温稳定性与批量制备效率,满足高重复频率实验的靶材供应需求,推动 ICF 领域靶材料设计与制备技术的发展。

参考文献:

- [1] Elliott N E, Mitchell M A. Characterization of density and metal content in low density foam targets for inertial confinement fusion[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1995, 362(1): 112-113.
- [2] Kim S H, Shin S J, Lenhardt J M, et al. Deterministic control over high-Z doping of polydicyclopentadiene-based aerogel coatings[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(16): 8111-8119.
- [3] Hamilton C E, Honnell D, Patterson B M, et al. Incorporation of tracer elements within aerogels and CH foams[J]. Fusion Science and Technology, 2011, 59(1): 194-198.
- [4] 王绍君. 激光惯性约束聚变压缩过程中激波相互作用的研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2023. (Wang Shaojun. Study of shock interactions during compression process in laser inertial confinement fusion[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Physics CAS), 2023)
- [5] 侯海乾. 激光聚变靶用 RF 气凝胶空心微球制备的研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2009. (Hou Haiqian. The research of preparation resorcinol-formaldehyde aerogel hollow microspheres used for laser fusion targets[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2009)
- [6] 张林, 王朝阳, 罗炫, 等. 热诱导倒相法超低密度 PMP 泡沫的研制[J]. 中国核科技报告, 2003(1): 131-144. (Zhang Lin, Wang Chaoyang, Luo Xuan, et al. Development on the fabrication of ultra-low density poly(4-methyl-1-pentene)(PMP) foams by thermal induced phase-inversion technique[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 2003(1): 131-144)
- [7] Zhang Qin, Li Keran, Li Jing. Superhydrophobic polystyrene foam with photothermal effect for continuous and long-term efficient oil-water separation[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 364: 132385.
- [8] Zhang Qin, Li Keran, Li Jing, et al. Fabrication of hierarchically porous superhydrophobic polystyrene foam for self-cleaning, oil absorbent, highly efficient oil-water separation[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 483: 149338.
- [9] 肖德龙, 丁宁, 王冠琼, 等. Z 箍缩聚变及高能密度应用研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 092005. (Xiao Delong, Ding Ning, Wang Guanqiong, et al. Review of Z-pinch driven fusion and high energy density physics applications[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 092005)
- [10] Croix C, Sauvage C E, Balland-Longeau A, et al. New gold-doped foams by copolymerization of organogold(I) monomers for inertial confinement fusion (ICF) targets[J]. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2008, 18(3): 334-343.
- [11] Cook R, Overturf G E, Buckley S R, et al. Production and characterization of doped mandrels for inertial-confinement fusion experiments[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1994, 12(4): 1275-1280.
- [12] 乔秀梅, 郑无敌, 高耀明, 等. 神光 II 间接驱动内爆实验 ArX 射线谱线模拟研究[J]. 物理学报, 2012, 61(17): 339-344. (Qiao Xiumei, Zheng Wudi, Gao Yaoming, et al. Simulation of spectrum of doped Ar in indirectly driven implosion target[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(17): 339-344)

- [13] Barbeau Z, Raman K, Manuel M, et al. Design of a high energy density experiment to measure the suppression of hydrodynamic instability in an applied magnetic field[J]. *Physics of Plasmas*, 2022, 29: 012306.
- [14] 陈诗佳, 张华, 周沧涛, 等. 利用掺杂层研究磁化靶中的能斯特效应[J]. *强激光与粒子束*, 2024, 36: 092002. (Chen Shijia, Zhang Hua, Zhou Cangtao, et al. Nernst effects study using dopant layer on magnetized target[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 092002)
- [15] Regan S P, Epstein R, Hammel B A, et al. Hot-spot mix in ignition-scale implosions on the NIF[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19: 056307.
- [16] Dewald E L, Pino J E, Tipton R E, et al. Pushered single shell implosions for mix and radiation trapping studies using high-Z layers on National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 072705.
- [17] Hibbard R L, Bono M J, Amend P A, et al. Precision manufacturing of inertial confinement fusion double shell laser targets for OMEGA[J]. *Fusion Science and Technology*, 2004, 45(2): 117-123.
- [18] 刘才林, 唐永健, 李怀曾. 惯性约束聚变靶材料掺杂技术综述[J]. *原子能科学技术*, 1996, 30(1): 90-96. (Liu Cailin, Tang Yongjian, Li Huaizeng. The doping techniques of inertial confinement fusion target materials[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1996, 30(1): 90-96)
- [19] Xiong W, Yang X H, Zhang G B, et al. The effect of high-Z dopant on the ablation of carbon-hydrogen polymer target[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2024, 66: 095002.
- [20] 张庆军, 罗炫, 李泽甫, 等. μm 量级钨掺杂 PMP 泡沫制备[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(11): 2905-2908. (Zhang Qingjun, Luo Xuan, Li Zefu, et al. Preparation of tungsten-doped PMP foams in micron dimension[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(11): 2905-2908)
- [21] 方瑜, 罗炫, 张庆军. 低密度 PMP 聚合物泡沫成型控制[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(11): 2873-2876. (Fang Yu, Luo Xuan, Zhang Qingjun. Fabrication control of low density PMP foams[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(11): 2873-2876)
- [22] 罗炫, 张林, 杜凯, 等. 低密度对二乙烯基苯泡沫的优化制备[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(1): 63-67. (Luo Xuan, Zhang Lin, Du Kai, et al. Fabrication of low density p-divinylbenzene foams[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(1): 63-67)
- [23] 林润雄, 崔轶, 刘磊, 等. 低密度对二乙烯基苯泡沫的制备及成型[J]. *材料科学与工程学报*, 2010, 28(2): 222-225. (Lin Runxiong, Cui Yi, Liu Lei, et al. Fabrication and molding of low density divinylbenzene foams by ICF[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2010, 28(2): 222-225)
- [24] 崔轶, 范勇恒, 罗炫, 等. DVB 泡沫微胶囊的制备方法[J]. *高分子材料科学与工程*, 2010, 26(6): 130-133. (Cui Yi, Fan Yongheng, Luo Xuan, et al. A method to make divinylbenzene foam shells by ICF target[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2010, 26(6): 130-133)
- [25] 罗炫, 方瑜, 范勇恒, 等. 氘代对二乙烯基苯的合成[J]. *化学试剂*, 2009, 31(12): 974-976,984. (Luo Xuan, Fang Yu, Fan Yongheng, et al. Synthesis of deuterated p-divinylbenzene[J]. *Chemical Reagents*, 2009, 31(12): 974-976,984)
- [26] 罗炫, 方瑜, 范勇恒, 等. 低密度氘代对二乙烯基苯泡沫的研制[J]. *核化学与放射化学*, 2010, 32(2): 126-128. (Luo Xuan, Fang Yu, Fan Yongheng, et al. Fabrication of low-density perdeuterated p-divinylbenzene foams[J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2010, 32(2): 126-128)
- [27] 张林, 罗炫, 杜凯. ICF 靶低密度聚合物多孔材料研究进展[J]. *材料导报*, 2002, 16(6): 48-51. (Zhang Lin, Luo Xuan, Du Kai. Progress in research on low-density porous polymer for ICF targets[J]. *Materials Reports*, 2002, 16(6): 48-51)
- [28] 高莎莎, 吴小军, 何智兵, 等. 激光惯性约束聚变靶制备技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 032001. (Gao Shasha, Wu Xiaojun, He Zhibing, et al. Research progress of fabrication techniques for laser inertial confinement fusion target[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 032001)
- [29] Steckle Jr W P, Nobile Jr A. Low-density materials for use in inertial fusion targets[J]. *Fusion Science and Technology*, 2003, 43(3): 301-306.
- [30] 方瑜, 罗炫, 范勇恒, 等. 纳米金掺杂 DVB 聚合物泡沫的制备[J]. *原子能科学技术*, 2009, 43(11): 987-991. (Fang Yu, Luo Xuan, Fan Yongheng, et al. Fabrication of gold nanoparticles doped DVB foams[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, 43(11): 987-991)
- [31] 刘小林, 张庆军, 张勇, 等. 纳米金掺杂 DVB 泡沫微球的制备[J]. *功能材料*, 2021, 52(2): 2185-2190. (Liu Xiaolin, Zhang Qingjun, Zhang Yong, et al. Fabrication of gold nanoparticles doped DVB foam microspheres for inertial confinement fusion (ICF) target[J]. *Journal of Functional Materials*, 2021, 52(2): 2185-2190)
- [32] 尹强, 张林, 罗炫, 等. 溴掺杂低密度 PMP 泡沫的制备技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(5): 700-702. (Yin Qiang, Zhang Lin, Luo Xuan, et al. Synthesis of low-density bromine doped PMP foam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(5): 700-702)
- [33] 黄传群, 罗炫, 方瑜, 等. 锗掺杂聚合物及其泡沫的制备与表征[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3239-3242. (Huang Chuanqun, Luo Xuan, Fang Yu, et al. Fabrication and characterization of Ge-doped polymer and foam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3239-3242)
- [34] 尹强, 张林, 杜凯, 等. 溴掺杂聚-4-甲基-1-戊烯的合成研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(5): 627-629. (Yin Qiang, Zhang Lin, Du Kai, et al. Preparation and investigation of brominated poly-4-methyl-1-pentene as target material[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(5): 627-629)
- [35] Moreau L, Levassort C, Blondel B, et al. Recent advances in development of materials for laser target[J]. *Laser and Particle Beams*, 2009, 27(4): 537-544.
- [36] Han Wenjing, Li Jianying, Ju Hui, et al. Nitrogen-doped graphitic carbon-CoTe₂ decorated on carbon aerogel microspheres as a high-rate and ultra-stable electrode for efficient capacitive storage[J]. *ChemistrySelect*, 2024, 9: e202405427.
- [37] Jiang L J, Campbell J H, Lu Y F, et al. Direct writing target structures by two-photon polymerization[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 70(2): 295-309.
- [38] Wei Lai, Li Jing, Zhang Shuai, et al. Construction of EG/SiOC@C porous structure by direct ink writing and *in-situ* vapor self - Deposition to enhance microwave absorption[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(15): 25144-25155.
- [39] Hund J F, Paguio R R, Frederick C A, et al. Silica, metal oxide, and doped aerogel development for target applications[J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49(4): 669-675.
- [40] Shin S J, Lee J R I, Van Buuren T, et al. Ion implantation doping of inertial confinement fusion targets[J]. *Fusion Science and Technology*, 2018, 73(3): 467-473.