引用格式：陈张伟，罗鑫，胡青云，等. 核聚变产氚锂陶瓷制造研究进展[J]. 材料工程，2026，54(8)：42-52.
CHEN Zhangwei，LUO Xin，HU Qingyun，et al. Research progress in production of tritium breeding lithium ceramics for nuclear fusion[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：42-52.

核聚变产氚锂陶瓷制造研究进展

陈张伟*，罗　鑫，胡青云，叶泽标，ARSHAD　Qumail，ALI　Umair，李　菁
（深圳大学，广东 深圳 518060）

摘要：锂陶瓷材料如Li_4SiO_4、Li_2TiO_3等作为聚变堆氚增殖剂的核心材料，具备高锂密度、优异热稳定性和辐照性能。传统制造方法如挤出滚圆、熔融喷雾等存在微球粒径均匀性差、压碎载荷低、结构单一等问题。3D打印作为一种前沿制造技术，为核聚变堆产氚锂陶瓷材料的精密成形提供了创新解决方案。基于光固化的3D打印技术能够实现蜂窝结构、多孔框架等复杂形状产氚单元的一体化制造，显著提升结构精度、力学性能及氚释放效率。本文系统综述了产氚锂陶瓷的材料特性、粉体制备工艺、传统成形技术的局限性，重点探讨了光固化3D打印在锂陶瓷结构“形-性协同”制造中的技术优势与应用前景，并简述了基于多组分前驱体材料的“创形创材”锂陶瓷部件制造方法。最后针对当前技术挑战提出未来发展方向。

关键词：核聚变；产氚锂陶瓷；成形技术；3D打印
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2026.000071　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2026.000071
中图分类号：TQ131.1$^+$1；O572.35$^+$2　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)08-0042-11

Research progress in production of tritium breeding lithium ceramics for nuclear fusion

CHEN Zhangwei*，LUO Xin，HU Qingyun，YE Zebiao，ARSHAD Qumail，ALI Umair，LI Jing
（Shenzhen University，Shenzhen 518060，Guangdong，China）

Abstract：Lithium ceramics (*e.g.*，Li_4SiO_4，Li_2TiO_3)，as core tritium breeder materials，possess high lithium density，excellent thermal stability，and irradiation resistance. Traditional manufacturing methods such as extrusion-spheronization and melt-spraying face challenges including poor particle size uniformity，low crush load，and structural simplicity. As an advanced manufacturing technology，3D printing offers innovative solutions for the precision forming of lithium-based tritium breeding ceramics in nuclear fusion reactors. Vat photopolymerization-based 3D printing enables the integrated fabrication of complex tritium breeding units (*e. g.*，honeycomb structures，porous frameworks)，significantly improving structural precision，mechanical properties，and tritium release efficiency. This article systematically reviews the material properties，powder preparation processes，and limitations of conventional forming techniques for lithium ceramics，with a focus on the technical advantages and application prospects of vat photopolymerization 3D printing in achieving "structure-property synergy" manufacturing，as well as the multi-precursor-based generative shaping and material-forming method. Finally，future research directions are also proposed to address current technical challenges.

Key words：nuclear fusion；tritium breeding lithium ceramic；forming technology；3D printing

核聚变能具有燃料来源丰富、提取和保存容易、运行安全、无污染及不产生高放射性废料等优点，被认为是有效解决人类能源短缺的终极途径之一，因此获得世界各国的广泛关注与研究[1]。核聚变原理是由两个相对质量较轻的原子在外部作用下通过原子核融合的核反应方式产生一个相对质量较重的原子核并释放巨大的能量。当前研究最多的核聚变反应是氘-氚(即D-T)反应(图1)[2]，使用气态的氘(D)和氚

(T)作为燃料。其中氘可从海水中提取,储量丰富,但氚在自然界中储量极少。如何有效获取氚进行核聚变反应是目前聚变工程堆一直在研究的核心关键技术,且是聚变能最终实现商业应用之前需要解决的三大难题之一[3]。解决此问题的关键在于氚的自持。目前比较可行的解决方案是通过堆芯中氘-氚聚变反应产生的中子轰击锂基材料发生核反应来产生氚并使之自持。而产氚材料单元的制造则为氚的自持提供先决条件和物质基础,对其研究的必要性和重要性不言而喻。

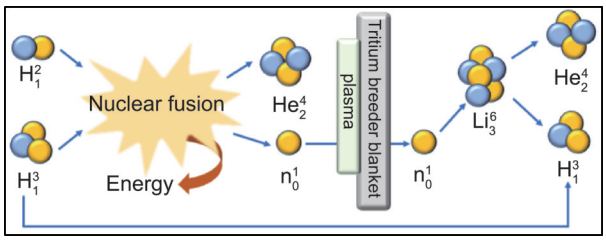


图 1　氘-氚反应示意图[2]

Fig.1　D-T reaction schematic[2]

在聚变堆中,根据功能的不同,包层可以分为屏蔽包层和产氚包层两类。产氚包层集氚增殖、能量提取与转换等功能为一体,是聚变堆的关键核心模块之一(图 2)[1]。作为包层中最主要的功能材料组件,产氚陶瓷单元就是被用来实现氚增殖和释放的循环自持。目前国际上普遍采用锂陶瓷粉制造成直径为 1 mm 左右的陶瓷微球,并以球床形式密集堆积在包层模块中的氚增殖区内作为产氚单元。

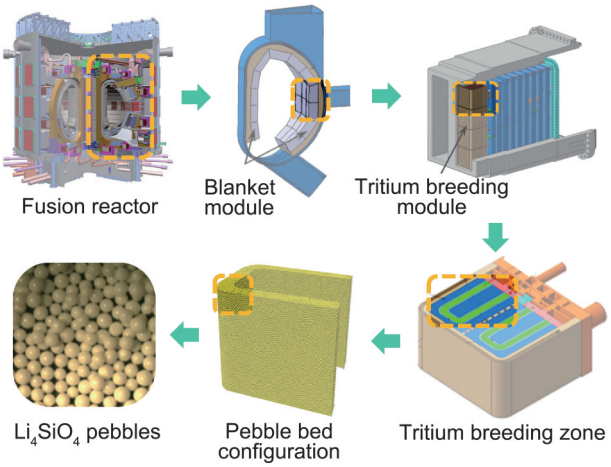


图 2　聚变堆固态产氚包层与产氚陶瓷单元球床构造示意[4]

Fig.2　Configuration of solid tritium breeding blanket and ceramic unit in nuclear fusion reactor[4]

产氚单元材料、性能和制造对固态产氚包层技术具有关键影响。锂陶瓷材料中,Li_2O、$LiAlO_2$、Li_4SiO_4、Li_2TiO_3和Li_2ZrO_3作为候选材料被广泛研究。经过几十年的发展,Li_4SiO_4和Li_2TiO_3以其合适的锂密度,良好的化学性能和热稳定性,优异的释氚性能和中子辐照下的低放射活性被公认为两种最好的固态产氚材料[3],也是中国聚变堆工程实验堆(CFETR)的首选产氚材料。

本文围绕以锂陶瓷微球等产氚陶瓷单元的材料与制造技术研究现状进行综述。从聚变堆与产氚材料性能、锂陶瓷粉体制备方法、锂陶瓷微球和单元的成形技术,以及最新的产氚陶瓷增材制造技术,特别是增材制造技术等多方面进行讨论和总结,并探讨了面临的部分问题、挑战和可行的解决方案,以期对该研究方向的发展和前景提供一定的参考与指导。

1　聚变堆及各类产氚材料选取

目前在聚变能源开发和利用领域的研究热点是磁约束核聚变[1]。磁约束核聚变是指用特殊形态的磁场将高温等离子体约束在真空腔体内,从而能让等离子体长期稳定燃烧。目前针对托卡马克磁约束核聚变装置的研究相对成熟。全球规模最大、影响最深远的国际科研合作项目之一——国际热核聚变实验堆 ITER,即是基于托卡马克装置进行受控热核聚变技术的可行性验证。我国基于能源长远需求,于 2006 年正式加入 ITER 计划,在吸收 ITER 先进科学技术和管理经验的基础上,也开始组织进行中国聚变工程实验堆 CFETR 的概念设计和工程设计。

在聚变堆中,固态产氚包层是实现氚自持和能量提取的重要部件,由产氚材料、中子倍增剂、结构材料以及冷却剂组成[3]。产氚材料为含锂材料,可分为液态和固态增殖剂,是包层中的核心功能材料之一。金属锂、锂铅合金和氟锂铍熔盐等为主要的液态产氚材料。但液态增殖剂因具有磁流体效应、化学活性大、腐蚀性大等缺点而逐渐被化学稳定性好、氚释放性能优异的固态产氚材料所取代。产氚单元的制造和性能对固态产氚包层技术具有关键影响。在固态产氚包层设计中,球形、片状、环状的增殖剂都曾考虑过。为了保证高效产氚,固态产氚材料需要具备密度高、强度大、晶粒小、相纯度高、杂质少以及氚释放性能优异等特点。由于球形结构装卸容易、表面积大、透气性及传热性能好、孔道较多有利于氚的扩散和释放与热传导等原因,目前国际上多采用制造陶瓷微球并堆积成球床作为产氚单元,其结构较单一,近年来无显著突破,导致填充率无法提高,限制了氚增殖和释放效率的进一步提升。

正硅酸锂 Li_4SiO_4、偏钛酸锂 Li_2TiO_3、锆酸锂 Li_2ZrO_3、铝酸锂 $LiAlO_2$ 和氧化锂 Li_2O 等是聚变堆产氚材料的可选材料，受到了广泛的关注[3,5-8]。$LiAlO_2$ 因只具备中等氚释放速率，产氚能力弱，Li_2ZrO_3 因辐照产物会长时间保持放射性，容易产生对环境有害的核废料，这两种材料已被逐渐淘汰。Li_2O 的锂密度高达 0.94 g/cm^3，其单位体积内锂核密度甚至比纯态金属锂还要高出近一倍，因此具有优秀的产氚能力。但是 Li_2O 中氚易被氧化形成大量氚氧化锂（LiOT）相结构，LiOT 相结构会阻止材料中的氚释放，影响释氚性，所以实际产氚能力并不突出。另外，Li_2O 易与水反应，化学性质不够稳定，可能会引发聚变堆安全问题。Li_4SiO_4 可以提供较高的锂原子密度（约为 0.55 g/cm^3），氚增殖率较高，同时在高温下也具有良好的物理和化学性能。Li_2TiO_3 和 Li_4SiO_4 因材料性质基本相似，均具有较高的锂密度、较高的热导率、较好的产氚和释氚性能以及力学性能被认为是最具有潜力的固态氚增殖材料。目前，国际热核实验堆 ITER 计划中的驱动包层已选用 Li_2TiO_3 为产氚材料。日本原子能研究机构的示范堆包层选择 Li_2O 为增殖剂（Li_2TiO_3 作为替补材料）。欧洲氦冷示范堆包层选用 Li_4SiO_4+SiO_2 作为氚增殖候选材料（Li_2TiO_3 作为替补材料）。中国氦冷固态实验包层模块方案中则选用 Li_4SiO_4 和 Li_2TiO_3 作为候选产氚材料。

2 锂陶瓷原材料粉体的制备方法

在产氚陶瓷微球成形前一般需要先制备作为原料的含锂陶瓷粉体。目前常见的粉体制备方法主要有固相法和湿化学法。固相法需要加热到高温，产物需要研磨成粉末。湿化学法或液相法则对干燥条件要求较高，其中以溶胶-凝胶法最具代表性，其具有较低温或温和条件合成的优势。

2.1 固相法

固相法是陶瓷粉体制备的一种传统方法，是通过烧结原料粉体使其在高温下发生反应得到目标粉体。通过固相之间相互接触扩散，从接触点反应扩散到固相内部，故反应需要外部热量加速这一过程。采用固相法进行正硅酸锂陶瓷的制备，一般硅源都会采用二氧化硅，而锂源多数采用氢氧化锂或者碳酸锂。在进行高温煅烧之前，需要将硅源跟锂源混合进行机械研磨，因为固相法的主要反应过程就是反应物里面的离子在高温中进行互相扩散的过程，所以为了使反应进行得更加充分，需要将反应物的粒径尽量降低，从而使反应物混合接触得更均匀，然后将两者的混合物进行高温煅烧，就可以得到所需的陶瓷产物。固相法是一种较为常用的制备氚增殖剂粉体的方法[9]。

利用固相法制备正硅酸锂粉体，首先采用无定形二氧化硅与碳酸锂粉体按一定计量比机械混和，而后在 700～900 ℃合成温度下反应一定时间，即可制得正硅酸锂粉体，所涉及的反应如式（1），（2）所示。

$$Li_2CO_3 + SiO_2 \rightarrow Li_2SiO_3 + CO_2\ (515\sim754\ ℃) \quad (1)$$

$$Li_2CO_3 + Li_2SiO_3 \rightarrow Li_4SiO_4 + CO_2\ (565\sim754\ ℃) \quad (2)$$

通过研究发现，当锂硅摩尔比小于 4 时，高温煅烧得到的产物大多为偏硅酸锂 Li_2SiO_3，而当摩尔比达到 4 时，可获得纯度高于 98% 的 Li_4SiO_4。西班牙国家核聚变实验室 NNFL 的 Carella 等[5]研究对比了各类硅酸锂陶瓷粉体方法，总结了煅烧温度过高导致 Li_4SiO_4 可能会分解为偏硅酸锂 Li_2SiO_3 和气态的 Li_2O，影响最终正硅酸锂的相纯度。因此通常会形成偏硅酸锂和正硅酸锂的混合物。所以合成纯相 Li_4SiO_4 需要优化反应温度和时间。类似的，北京科技大学 Hong 等[10]开展了以 TiO_2 与 Li_2CO_3 为原料的固相法制备 Li_2TiO_3 粉体研究。印度巴巴原子能研究中心 IBARC 的 Sonak 等[11]通过热重分析表明，烧结温度大概为 750～800 ℃。而 Mandal 等[12]进一步研究认为，在 700 ℃就开始生成了 Li_2TiO_3。

固相法一般工艺较为成熟，但是需要极高的烧结温度能耗较大、生产效率低。而且温度过高或合成温度过长容易造成粉体晶粒过大等问题，需要辅以大量的机械研磨来制造细粉。此外，目前部分报道的锂基陶瓷合成温度和合成时间不太一致，主要原因可能由于粉体原料混合不均匀且缺乏工艺优化，同时也导致制备的粉体纯度不高，生产的陶瓷样件精度低等缺点，不太适合制备精细的高纯度粉体。

2.2 湿化学法

湿化学法是指有液相参加的、通过化学反应来制备材料的方法统称。常见的湿化学法有沉淀法、溶胶-凝胶法、水热法、微乳法等。溶胶-凝胶法是制备粉体的一种常用湿化学法，其产物多为纳米级别粒子。主要原理为采用化学性质活泼的化合物作为前驱体反应物，在溶剂中均匀混合并与溶剂中的水进行水解和缩聚等反应形成透明的溶胶结构，溶胶在经过陈化和胶粒聚合的作用下形成了三维网络结构的溶胶-凝胶体系，在这些网格中溶质颗粒以纳米尺寸填充其中，最后以高温热处理得到目标粉体[13]。溶胶-凝胶法需要前驱体来生成溶胶-凝胶体系，常用的前驱体主要有有机金属醇盐和无机盐两种。目前有研究以无水乙

醇等为反应介质，采用硝酸、柠檬酸等作为络合剂或螯合剂，以 $Si(OC_2H_5)_4$、SiO_2 和 Li_2CO_3、LiOH 等分别作为硅源和锂源制备，用于制备 Li_4SiO_4 纳米粉体。Li_4SiO_4 等增殖剂材料的溶胶-凝胶法制备过程也得到了研究人员的关注[6]。国内中国科学院上海硅酸盐研究所 Wu 等[14]以 $LiNO_3$ 和 $Ti(C_6H_6O_7)_2$ 为原料以水为反应介质，在 773 K 的条件下合成了纳米尺度的 Li_2TiO_3 粉体，粒径仅有 40 nm 左右。北京科技大学 Hong 等[15]通过溶胶-凝胶法制备得到了具有高比表面积的高纯度纳米 Li_2TiO_3 粉体。

溶胶-凝胶法由于其得到产物粉体的粒径较小同时反应条件的要求更为宽松，是目前制备氚增殖剂材料粉体的主流方法。相比其他的粉体制备方法，溶胶-凝胶法制备的粉体由于前驱体在分子水平混合，因此形成的晶粒尺寸可以达到纳米级，且粒径均匀纯度也较高。在反应过程中不需要高温高压的反应条件，反应物的均匀混合性更好，获取的产物纯度和细度更高，设备成本低廉。但湿化学法对反应物的要求更加苛刻，如酸碱溶液环境，且参与反应的金属有机物价格昂贵，在反应后还会产生一系列废液。此外，湿化学方法通常会产生颗粒尺寸相对较小的软团聚陶瓷粉体。针对该问题，目前还开发了水热法和溶液燃烧法等多种湿化学方法来合成锂基陶瓷粉体，但是相关报道较少。

3　陶瓷微球和单元的成形技术

制备粒径均匀、球形度高的产氚陶瓷微球是其能够在聚变堆中应用的基本前提。锂基陶瓷球床的窄粒径分布、高球形度可确保在辐照和热环境中导热性，同时低表面粗糙度可以在一定程度减小应力，从而提升抗压碎能力[16]。国内外在开发粒径可控的产氚陶瓷微球通用制备工艺方面开展了广泛的研究，主要包括：挤出滚圆法[8,12,17-18]、滚球法[19-20]、熔融喷雾法[21-22]及湿法[7,23-25]等。研究单位有：日本原子能开发机构 JAEA、法国原子能委员会 CEA、德国卡尔斯鲁厄理工学院 KIT、印度巴巴原子研究中心 IBARC、意大利比萨大学 PU、中国科学院上海硅酸盐研究所 SICCAS、中国工程物理研究院 CAEP、北京科技大学 USTB、中核工业西南物理研究院 SWIP、四川大学 SCU 等。以下分别做详细的介绍。

3.1　挤出滚圆法

挤出滚圆法是从挤出设备中挤出由有机黏结剂和陶瓷粉混合而成的棒状半固态坯料，然后用滚圆机在摩擦作用下造粒。法国原子能委员会率先通过挤压滚圆烧结法制备 Li_2TiO_3 微球[17]，其直径为 0.9～1.1 mm，孔隙率小于 10%，最大压碎载荷为 66 N。印度巴巴原子研究中心的 Mandal 等开发了一种基于固相反应的改进挤出滚圆烧结工艺[8,18]，能够在一定程度上降低生产时间和成本。然而，微球的粒径与球形度的均匀性控制依然是亟待解决的困扰[19]。滚球法是一种改善的球化工艺，是从两个喷嘴分别将黏结剂包裹的陶瓷粉与有机溶液依次喷到低速旋转台上，在离心力作用下制备微球。但是该方法制备的陶瓷微球易造成压碎载荷较低，主要是由于造粒过程中引入了大量有机物，导致粉末颗粒的相对密度较低[19]。挤压滚圆法是造粒的传统方法，但在产氚微球的成形上还研究甚少，优势是能从实验室规模扩大到工业生产，但陶瓷粉末不易成形，在挤压过程中必须添加有机黏结剂，对孔隙的控制还需要进一步提升。

3.2　熔融喷雾法

熔融喷雾法是批量生产产氚陶瓷微球较为成熟的技术[22]。该方法是将陶瓷原料加热熔化，熔化的陶瓷液体在气流的作用下从喷嘴喷射出来，在下落过程中在表面张力的作用下产生球形液滴，最终冷却后形成微球。然而，该方法的主要缺点是微球的大小不可控，从而降低了原料利用率，并使后处理过程复杂化。同时由于在快速熔融/凝固过程中存在过大的残余应力，导致制备的微球容易产生大量微裂纹，因此压碎载荷较低。德国卡尔斯鲁厄理工学院采用熔融喷雾法制备 Li_4SiO_4 微球[21]，微球粒径范围大且压碎载荷低于 10 N。中核工业西南物理研究院使用熔融喷雾法制备的 Li_4SiO_4 微球仅有 7 N 的平均压碎载荷[22]，由于材料成分和热处理导致的样品压碎载荷小且差异较大，同时也易引入环境杂质。

3.3　湿化学法

湿化学法又称湿法，包括直接湿法和间接湿法。溶胶-凝胶法属于直接湿法，将前驱体粉末与有机溶剂混合后，经过溶胶、陈化、凝胶和烧结等一系列过程，制得陶瓷小球。中国科学院上海硅酸盐研究所 SICCAS 分别采用溶胶-凝胶法和挤出滚圆法制造 Li_4SiO_4 微球[25]，微球的粒径与球形度均匀性控制较差，致密度不够导致压碎载荷也较低，小于 18 N（图 3(a)，(b)）。四川大学分别采用滚球法和溶胶-凝胶-水热法制备 Li_2TiO_3[26]和 Li_4SiO_4[19]整体性能较好，但是真空烧结制备的 Li_2TiO_3 微球孔隙较多，导致压碎载荷低，而 Li_4SiO_4 微球的高温热循环稳定性有待进一步研究。

间接湿法则利用陶瓷液滴和固化溶液之间的表面张力差异进行球化，能够成形粒径分布窄、球形度

好和压碎载荷高的陶瓷微球。一般来说，湿法制备过程简单方便，制备的微球具有良好的几何形貌和力学性能。中国工程物理研究院采用间接湿法工艺制备Li_4SiO_4微球[24]，整体性能较好，但是微球粒径分布较宽。北京科技大学在锂基陶瓷材料和微球制备成形方面开展了较多研究，开发了一种基于使用琼脂基间接湿法和石墨球床法制备模具的成形方法[27]，分别使用了Li_4SiO_4原粉或者前驱体粉末浆料制造微球，研究表明原粉制备的微球内部结构均匀性较差（图3(c)）。同时，其采用该方法还制备了具有较高压碎载荷的Li_2TiO_3-Li_4SiO_4核壳复相陶瓷微球[28]，经过1100 ℃烧结5 h后制备的50%Li_2TiO_3-50%Li_4SiO_4微球压碎载荷可达104.8 N。

除了上述方法外，日本原子能开发机构的Hoshino等[23]还对和间接湿法类似的乳化湿法开展研究。将Li_4SiO_4和Li_2TiO_3的悬浊液和油在T型管道内混合，形成凝胶小球，随后烧结成形了直径分别为1.5 mm和1.05 mm的Li_4SiO_4和Li_2TiO_3微球，烧结获得球度为1.07和1.02，抗压强度为59.3 N和37.2 N。德国卡尔斯鲁厄理工学院近年来采用乳化湿法制备了Li_4SiO_4+Li_2TiO_3复相微球来提高微球综合性能[7]。近年来，意大利比萨大学尝试开发滴铸法制造Li_4SiO_4微球[29-30]，但其球形度、微结构均匀性、表面粗糙度以及压碎载荷（最小只有7 N）均较差（图3(d)，(e)）。

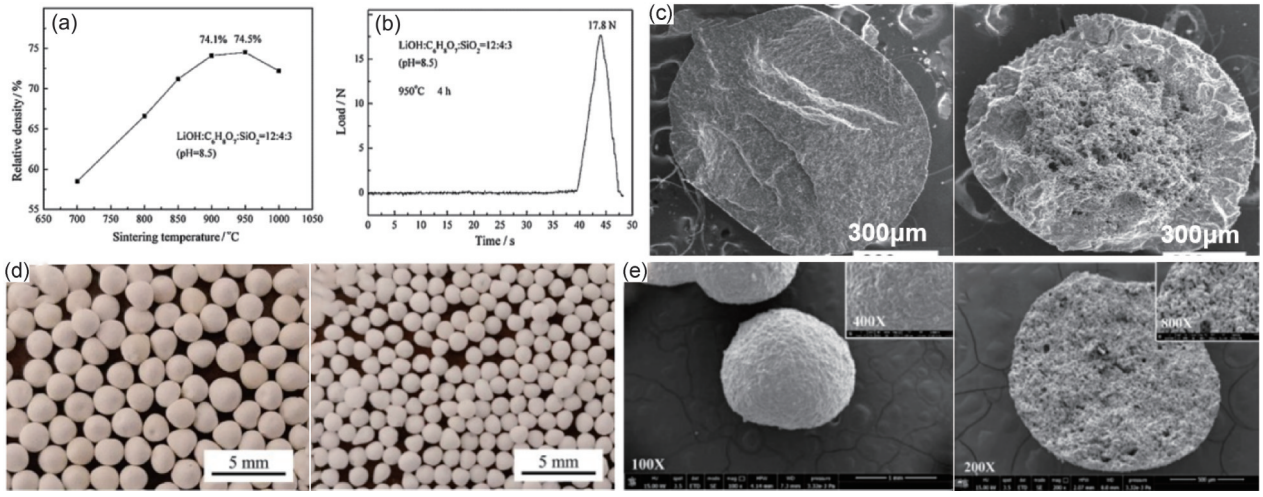


图3 传统工艺制备的锂陶瓷微球存在的问题

(a)相对密度低[25]；(b)压碎载荷低[25]；(c)微结构均匀性差[27]；(d)球形度差[29]；(e)表面粗糙[30]

Fig.3 Lithium ceramic pebbles prepared by traditional processes have problems

(a)low relative density[25]; (b)low crushing load[25]; (c)poor microstructure uniformity[27]; (d)poor sphericality[29]; (e)rough surface[30]

表1[8,17-31]总结了近年来开展的与产氚锂陶瓷微球等结构成形与基础性能相关的国内外主要研究进展。可见主要的问题都还是对微球粒径尺寸和球形度的均匀性及压碎载荷等性能的控制较差。

此外，对于传统的球床结构而言，微球本身的性质影响球床的整体宏观性能，因此在研究球床的整体性能之前有必要对微球材料和结构特性进行研究。微球的主要特性包括物理特性，即微球粒径分布、相对密度、压碎载荷以及物相纯度等[31]。除了前述微球制造和性能研究外，目前国内外对球床结构的研究主要集中在各类实验条件下对较为规则球床的压缩变形等力学和热机械性能上[32]，特别是偏重通过有限元等数值模拟方法进行仿真计算分析[33]。对于球床破碎及非规则球床的力学性能的实验研究报道较少。由于微球在球床中填充率较低（<64%），因此整体锂丰度较低，从而导致产氚效率和产氚量均较低。而且由于球床中每个微球表面都存在多个与相邻微球的接触点，导致微球产生多处局部应力，且应力分布非均匀性较大。此外这种随机堆积使得接触存在差异，状态也不同，导致不同微球之间的应力状况也存在着较大的差异性。如果因为应力集中导致微球开裂或破碎，碎屑堵塞氚提取通道，就会严重影响氚的释放，甚至威胁聚变堆的安全运行[34]。同时，球床微球材料还需要承受来自堆内的热载荷。微球之间以及微球与结构材料之间存在的热膨胀系数差异也会引发微球不同程度的破碎[34]，进而影响聚变堆包层有效热导率等核心功能。因此，非常有必要改进传统球床结构，开发具有高性能的新型产氚结构，从而有望取代传统的球床结构。

3.4 其他衍生制造方法

为缓解球床内部热应力，美国加州大学洛杉矶分校（UCLA）尝试新工艺使用溶体渗透法制备多孔

表 1　产氚锂陶瓷制备成形与基础性能国内外研究进展

Table 1　Research progress on the preparation, fabrication and basic properties of tritium-lithium ceramics

Country	Method	Raw powder	Powder size/mm	Sphericity	Density (T.D.)/%	Crushing load/N	Disadvantage	Research unit and reference
China	Sol-get	Li_4SiO_4	0.8-2	1.1	70-75	10-18	Broad powder size; low crush load	SICCAS[25]
China, France	Extrusion-spheronisation	Li_4SiO_4	0.5-0.8	1.24	70-80		Small powder size	SICCAS[25] CAEP[24]
	Indirect wet method	Li_4SiO_4	0.5-1.0	1.04	＞85	＞40	Broad powder size	
	Melt spraying	Li_4SiO_4	1	1.01	94	10	Low crush load; prone to impurity	SWIP[22]
	Graphite bed	Li_4SiO_4	1	1.08	88.7	8-44	Poor mechanical performance; inhomogeneity of microstructure	USTB[27]
	Indirect wet method	Li_2TiO_3-Li_4SiO_4	0.93-1.04	1.03	82.5-90.2	23.5-104.8		USTB[28]
	Rolling ball	Li_2TiO_3	1.2	0.97	92.4	＜108		USTB[20]
	Sol-gel and hydrothermal	Li_4SiO_4	≈1	0.94	83.23	＜32.5	High-temperature heat cycling stability to be studied	SCU[26]
	Rolling	Li_2TiO_3			＜87	17-46	Porosity after vacuum sintering; low crush load	SCU[19]
	Extrusion-spheronisation	Li_2TiO_3	0.9-1.1		＞90	48-66	Weight loss after forming	CEA[17]
Germany	Melt spraying	Li_4SiO_4	0.25-0.63		97	9-10	Low crush load	KIT[21]
Japan	Emulsion	Li_4SiO_4	1.5	1.07	66.1	59.3	Low relative density	JAEA[23]
Japan, India	Emulsion	Li_2TiO_3	1.05	1.02	85	37.2		JAEA[23]
	Extrusion-spheronisation	Li_4SiO_4	1-1.2	1-1.6	85-90	20	Low crush load	IBARC[18]
India, Italy	Extrusion-spheronisation	Li_2TiO_3	1.15	0.95	75	25	Low relative density; low crush load	IBARC[8]
	Drip casting	Li_4SiO_4	1.32-1.44		72-88	＜29	Poor sphericity; low crush load	PU[29-30]
Requirement			≈1	＞0.95	＞80	＞20		[31]

Li_2ZrO_3单元[35]。首先制备出不同骨架尺寸的网状玻璃碳，将Li_2ZrO_3陶瓷材料加热到熔化并浇注进碳骨架中，待凝固后利用燃烧的方式将碳骨架移除，得到了多孔 Li_2ZrO_3材料。西北有色金属研究院(NIN)[31]采用挂浆烧结法制造类似的多孔Li_4SiO_4单元，过程如图 4 所示。该方法将钨粉与有机溶剂混合成浆料，以聚氨酯海绵为模板，通过挂浆烧结的工艺获得泡沫钨，随后以泡沫钨为骨架进行Li_4SiO_4的浇注，最终获得了块体多孔Li_4SiO_4单元。但是上述方法均无法精确设计、制造和控制陶瓷单元的宏微观结构，因而也无法很好地局部或全局调控各类物理性能，而且整个成形过程较为繁琐，材料利用率低。

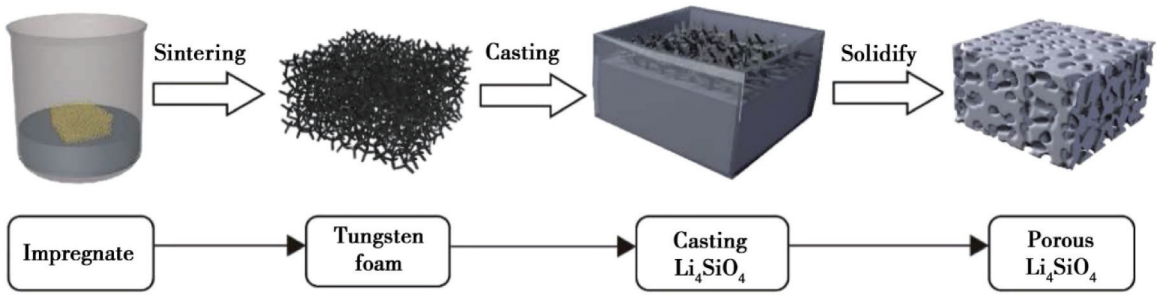


图 4　挂浆烧结法制造多孔Li_4SiO_4单元工艺流程[31]

Fig.4　Process flow for manufacturing porous Li_4SiO_4 units *via* slurry sintering method[31]

4 锂陶瓷产氚单元的增材制造方法

4.1 增材制造技术

近年来发展迅速的增材制造(即3D打印)技术,为制造产氚陶瓷结构提供了新思路。目前国内外研究较多的可用于陶瓷件制造的增材制造工艺[36]主要有选区激光烧结SLS、挤出直写成形DIW、黏结剂喷射BJ和光固化SL和DLP等。其中基于粉床的SLS虽无需制作支撑,但需要配备较为昂贵的高功率激光器,而且粉体用量较大、对宏微观孔洞结构的可控性较低,打印件表面质量较粗糙。另外由于陶瓷粉体流动性差堆积密度较低,导致样件孔隙较多强度较低,大大限制了SLS打印陶瓷的应用。尽管密实后处理工艺能够提高其致密度,但要用于制造精度较高的陶瓷件难度较大。因此SLS主要还是用来制造对尺寸精度、表面质量和致密度要求不太高的陶瓷件如生物陶瓷支架等[37]。值得一提的是金属打印首选的激光选区熔化技术SLM对于打印陶瓷来说效果还是不太理想,更容易引发热应力导致裂纹等缺陷且表面粗糙度较大[38],而且工艺要求比SLS工艺更高更复杂,限制了其在陶瓷领域的使用。DIW虽然设备经济、操作方便,但是挤出材料粗、层厚大且制件结构简单,无法打印高精度和复杂结构三维样件,一般在打印精度和粗糙度要求较低的组织工程支架等较有优势[39]。BJ基于喷射黏结剂粘接陶瓷粉,用料较多,且在精度和结构性能控制等方面也存在较大的局限。陶瓷件的微孔隙率更大、强度更低、表面质量较差,也需要进一步密实处理,因此其实用性也受到很大制约[40]。而光固化技术则能大幅提升对打印精度、粗糙度和孔结构的控制。与传统的扫描式立体光固化SL陶瓷打印相比,近年发展起来的数字光处理DLP面曝光光固化技术[36]具有效率更高、工艺相对经济、粉体用量较少且规格要求低等优势,因此国内外研究团队包括笔者所在的深圳大学,以及西安交通大学、华中科技大学、南京航空航天大学、北京理工大学、北京科技大学、广东工业大学等对传统氧化物陶瓷、生物陶瓷以及部分非氧化物陶瓷等开展打印材料、工艺和成形性能等方面的系列探索[41]。2012年以来,国外维也纳科技大学开发DLP陶瓷光固化3D打印设备并用于制造性能优异的复杂氧化物陶瓷结构,如热交换器和负泊松比结构等镂空陶瓷部件[42]。

以上各类陶瓷3D打印技术制造的样件效果如图5[37-40,42]所示。通过对比可以看出,DLP陶瓷光固化比其他3D打印技术在打印质量、精度、表面粗糙度、致密度、性能和结构控制等方面具有显著的优势。因此,在高性能复杂结构陶瓷制造领域的应用潜能日益凸显,被认为是最具前景的陶瓷3D打印技术,特别适合于具有不同形状的产氚锂陶瓷零部件的制造[36]。

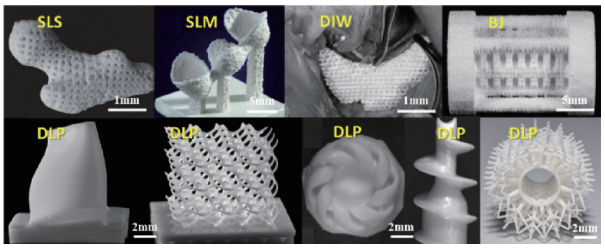


图5 各种3D打印技术所制备的陶瓷样件对比[37-40,42]

Fig.5 Comparison of ceramic parts prepared by various 3D printing techniques[37-40,42]

4.2 锂陶瓷微球的增材制造

然而,目前国内外光固化陶瓷3D打印使用材料种类也较为局限,以传统陶瓷如氧化铝、氧化锆等以及生物陶瓷如羟基磷灰石和部分非氧化陶瓷如碳化硅等陶瓷材料为主,有待进一步拓展。除了笔者团队自2019年开始光固化3D打印锂陶瓷产氚单元研究外。华中科技大学于2015年尝试采用选区激光烧结SLS方法直接使用事先合成的Li_2TiO_3原粉制造Li_2TiO_3微球[43](图6(a),(b)),但是该方法所制备的微球粒径较大,达到2 mm、致密度低,孔隙率过大过多而且微球表面较粗糙。而北京科技大学于2020年初步采用光固化DLP打印方法,亦直接使用事先合成的Li_2TiO_3原粉制造Li_2TiO_3微球[44]。制造的微球表面台阶效应严重,甚至出现烧结开裂和分层等问题(图6(c)),影响最终的应用。有研究表明[16],在相同的机械载荷下,球床的应变会随着微球摩擦因数增大而增加,微球破碎概率增大。因此减小微球表面粗糙度也有助于降低微球摩擦,从而减缓球床应力应变,降低微球破碎概率。而且市面上并无商品化的锂陶瓷原粉供购买使用,均需事先制粉,周期长,成本高,导致粉体资源匮乏,极大限制了其使用范围。

4.3 非微球结构锂陶瓷单元的增材制造

为了避免传统微球堆积而成的球床结构的固有缺陷,笔者团队提出一种基于正硅酸锂陶瓷原粉的蜂窝结构产氚单元一体化设计和制造的工艺。针对正硅酸锂陶瓷粉体对水蒸气和CO_2环境敏感的特点,提出了制备适合光固化3D打印工艺的陶瓷浆料的全流程措施,从而将上述影响降到最低。研究并配制具有较好分散性和流动性的锂陶瓷原粉浆料用于光固化3D打印制造了蜂窝结构产氚单元,并实现了具有高相

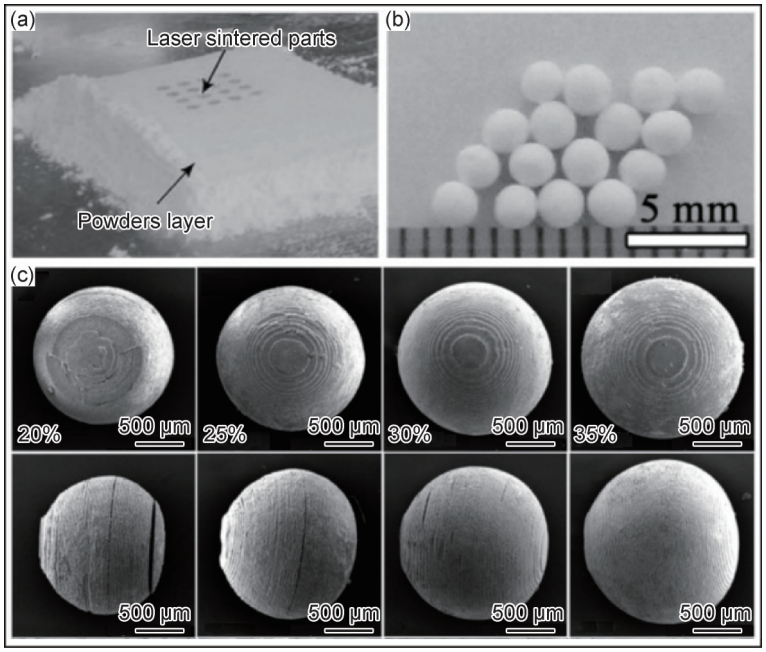


图 6　采用 SLS(a),(b)[43]和 DLP(c)[44]工艺直接使用事先合成的 Li_2TiO_3 原粉成形 Li_2TiO_3 微球

Fig.6　Pebbles prepared using Li_2TiO_3 and Li_2TiO_3 powders *via* SLS(a),(b)[43] and DLP(c)[44]techniques

纯度和无缺陷结构特征的锂陶瓷蜂窝结构,与传统球床结构相比,力学性能提升 1.5 倍,结构稳定性也获得显著改善(图 7(a))[4]。

此外,笔者团队还提出了基于“有机/无机”等多组分前驱体材料的“创形创材”方法,开发新材料并通过光固化 3D 打印进行结构创形,结合高温反应烧结生成目标材料进行创材。制备了碳酸锂与氧化硅混合和碳酸锂与硅树脂混合的无机/有机前驱体陶瓷浆料,并用于光固化 3D 打印,获得了一系列具有 45%～92% 填充率可调的多孔结构,突破了传统球床填充率限制(图 7(b))[45-47]。

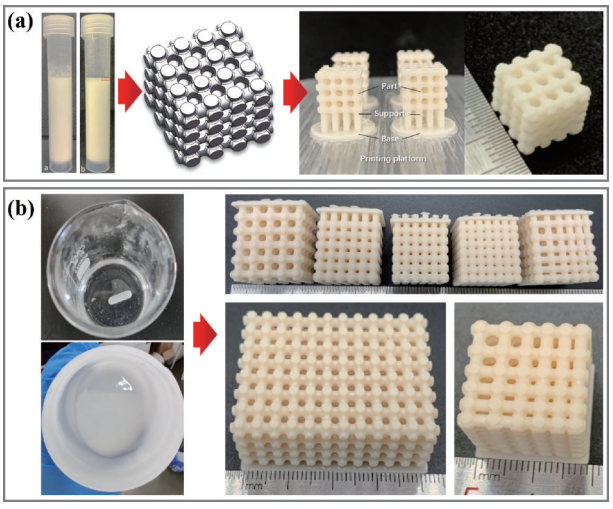


图 7　锂陶瓷原粉(a)[4]和前驱体浆料(b)[45-47]的开发与非微球结构产氚单元光固化 3D 打印

Fig.7　Development of slurries based on lithium ceramic powder (a)[4] and precursors(b)[45-47] and photopolymerization 3D printing of non-pebble tritium breeding units

5　问题、挑战与趋势

在产氚锂陶瓷原材料粉体和微球制造方面的研究,当前主要围绕锂陶瓷产氚单元领域的相关研究多集中于锂陶瓷粉体的制备,如采用固相法、溶胶-凝胶法、沉淀法等物理化学方法,随后采用挤出滚圆法、熔融喷雾法和湿法等工艺进行陶瓷微球的成形制造并堆积成球床进行结构和力学等研究。大部分成形效果、性能与稳定性差异较大。尤其是对微球粒径尺寸和球形度的均匀性以及压碎载荷等性能的控制较差。上述研究主要面临以下几个关键问题和挑战需要解决:

(1)目前国际上 Li_4SiO_4 和 Li_2TiO_3 等粉体的制备方法有固相法和湿化学法等,虽然工艺较为成熟,但是要么制备工艺比较繁琐,周期长且造粉设备较昂贵,要么对原材料的要求苛刻,在制备的过程中还会伴随着大量的废液。因此大多在科研单位以实验室制备供研究使用,市面上很少有商业化的粉体供购买使用。同时,Li_4SiO_4 等粉体对空气中的水蒸气具有一定的敏感活性,且易吸收水分和 CO_2 产生变质[48]。由于吸湿性的危害,在制备、存储及使用过程中都要采取预防措施,影响应用效果。整体而言,锂陶瓷粉体成本较高、满足要求的粉体产量较少,且粉体处理和

实验环境要求高，极大限制了相关研究的开展和应用推广。

(2)在锂陶瓷微球制造方面，陆续开发出如滚圆烧结法、熔融喷雾法以及湿法等成形工艺[5]。但大部分工序也较为复杂、周期长、能耗大。而且总体上尺寸均匀性和球形度不易控制。同时上述方法无法生产多曲面或者多孔隙的复杂零件，导致结构多样性受到了限制。此外，锂陶瓷微球本身存在致密度低导致压碎载荷较小的问题，可能会使得包层整体的机械强度下降，这是产氚材料所面临的主要问题[3]。而且球床中相邻的锂陶瓷微球存在多处点接触，在高温等产氚应用环境中易产生局部应力集中，且应力分布非均匀性较大，易引发开裂或破碎，进而影响产氚单元以及包层整体的结构稳定性、安全性和使用寿命。同时，对于单粒径微球球床来说，填充率具有几何极限(64%左右)，无法进一步提高，导致氚增殖和释放效率也存在瓶颈。

(3)当前，增材制造锂陶瓷微球方面的研究还相当匮乏，目前的报道多以直接采用事先合成的锂陶瓷原粉进行3D打印，易引发精度差、分层和开裂缺陷等问题。且由于市面上基本无商业粉体供购买使用，大都需要事先制备，耗时费力成本高。在非球床结构产氚陶瓷单元的一体化构性可控设计与增材制造研究方面，对于传统陶瓷微球和球床结构而言，尽管国内外制造工艺各有不同，但依然面临因应力集中导致易碎、综合性能差且可控性低等问题。因此仅改善微球制造和球床结构也许无法从根本上解决以上问题。而其他方法制造的多孔锂陶瓷单元则无法实现结构-性能的精确控制。

3D打印所具有的结构-功能一体化构性可控设计制造优势为以上问题提供了一种极具前景的解决方案。特别是新型一体化非球床产氚单元以及基于前驱体的“创形创材”增材制造方法在构性调控方面展现着巨大优势和前景，有望从结构设计与增材制造角度为产氚陶瓷单元综合性能的提升提供新方法。目前还未形成对目标材料和宏观结构的“整体化材料合成与结构制造”的系统性研究，因此仍需要大量的探索。未来，需要从“结构-性能”一体化构性可控设计制造角度出发，融合革新性制造工艺，实现控形控性制造。研究一体化构性可控设计和制造新型非球床产氚陶瓷结构，有望为产氚陶瓷单元的性能提升与应用开拓提供新的思路和途径。

参考文献

[1] Raffray A R, Merola M. Overview of the design and R&D of the ITER blanket system[J]. Fusion Engineering and Design, 2012, 87(5/6): 769-776.

[2] 罗鑫，李禹增，邢欢欢，等. 钛酸锂产氚陶瓷前驱体浆料制备及其光固化3D打印成形[J]. 精密成形工程，2024，16(12)：1-13.
Luo X, Li Y Z, Xing H H, et al. Preparation and photopolymerization 3D printing of Li_2TiO_3 tritium breeding ceramic precursor slurry[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(12): 1-13.

[3] Van der Laan J G, Reimann J, Fedorov A V. Ceramic breeder materials [M] //Comprehensive Nuclear Materials. Amsterdam: Elsevier, 2016: 114-175.

[4] Liu Y, Chen Z W, Li J J, et al. 3D printing of ceramic cellular structures for potential nuclear fusion application[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101348.

[5] Carella E, Hernandez M T. High lithium content silicates: a comparative study between four routes of synthesis[J]. Ceramics International, 2014, 40(7): 9499-9508.

[6] Yu X H, Yang M, Lu T C, et al. Fabrication of Li_4SiO_4 pebbles by wet method with modified powders synthesized via sol-gel process [J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 456: 455-460.

[7] Kolb M H H, Mukai K, Knitter R, et al. Li_4SiO_4 based breeder ceramics with Li_2TiO_3, $LiAlO_2$ and $Li_XLaYTiO_3$ additions, part Ⅰ: fabrication[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 115: 39-48.

[8] Mandal D, Ghuge N S, Jadeja M C. Development and demonstration of a semi-automatic system for the bulk production of lithium titanate (Li_2TiO_3) pebbles by solid state reaction process (SSRP) [J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 159: 111871.

[9] Zhukov A V, Chizhevskaya S V, Merkushkin A O. Solid-phase synthesis of Li_2TiO_3 [J]. Glass and Ceramics, 2016, 72(9/10): 327-330.

[10] Hong M, Zhang Y C, Mi Y Y, et al. Fabrication and characterization of Li_2TiO_3 core-shell pebbles with enhanced lithium density [J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 445(1/2/3): 111-116.

[11] Sonak S, Jain U, Sahu A K, et al. Thermogravimetric analysis and kinetic study of formation of lithium titanate by solid state route [J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 457: 88-93.

[12] Mandal D, Sathiyamoorthy D, Rao V G. Preparation and characterization of lithium-titanate pebbles by solid-state reaction extrusion and spherodization techniques for fusion reactor[J]. Fusion Engineering and Design, 2012, 87(1): 7-12.

[13] Lo Frano R, Puccini M. Preliminary investigation of Li_4SiO_4 pebbles structural performance[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, 167: 112388.

[14] Wu X W, Wen Z Y, Lin B, et al. Sol-gel synthesis and sintering of nano-size Li_2TiO_3 powder[J]. Materials Letters, 2008, 62(6/7): 837-839.

[15] Hong M, Zhang Y C, Mi Y Y, et al. Synthesis of Li_2TiO_3 by sol-gel combustion method and its gel-casting formation[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 455(1/2/3): 311-315.

[16] Wang S, Wang S, Zhang K F, et al. Effect of packing structure on

mechanical properties of the pebble beds and the probability of particle crushing [J]. Fusion Engineering and Design, 2021, 162: 112137.

[17] Lulewicz J D, Roux N. Fabrication of Li_2TiO_3 pebbles by the extrusion-spheronisation-sintering process [J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 307/308/309/310/311: 803-806.

[18] Mandal D, Jadeja M C, Chougule B K. Synthesis of lithium orthosilicate and fabrication of pebbles by the solid-state reaction process[J]. Indian Chemical Engineer, 2017, 59(1): 21-30.

[19] Guo H, Wang H L, Chen R C, et al. Characterization of Li-rich Li_2TiO_3 ceramic pebbles prepared by rolling method sintered in air and vacuum [J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 546: 152786.

[20] Tan G F, Song S H, Hu X, et al. Efficient fabrication of high strength Li_2TiO_3 ceramic pebbles via improved rolling ball method assisted by sesbania gum binder [J]. Ceramics International, 2021, 47(19): 26978-26990.

[21] Knitter R, Reimann J, Risthaus P, et al. Fabrication and characterization of lithium orthosilicate pebbles using LiOH as a new raw material [C] //Proceedings of the Eleventh International Workshop On Ceramic Breeder Blanket Interactions. JAERI-Conf, 2004: 108-119.

[22] Feng Y J, Feng K M, Cao Q X, et al. Fabrication and characterization of Li_4SiO_4 pebbles by melt spraying method[J]. Fusion Engineering and Design, 2012, 87(5/6): 753-756.

[23] Hoshino T. Trial examination of direct pebble fabrication for advanced tritium breeders by the emulsion method[J]. Fusion Engineering and Design, 2014, 89(7/8): 1431-1435.

[24] Gao X L, Chen X J, Gu M, et al. Fabrication and characterization of Li_4SiO_4 ceramic pebbles by wet method[J]. Journal of Nuclear Materials, 2012, 424(1/2/3): 210-215.

[25] Wen Z Y, Wu X W, Xu X G, et al. Research on the preparation of ceramic tritium breeders in SICCAS[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85(7/8/9): 1551-1555.

[26] Gong Y C, Feng Y J, Yang M, et al. Preparation of fine-grained Li_4SiO_4 pebbles by a combined sol - gel and hydrothermal method and their thermal cycling behavior[J]. Journal of Nuclear Materials, 2019, 516: 118-124.

[27] Hong M, Zhang Y C, Xiang M Q, et al. Preparation and characterization of Li_4SiO_4 ceramic pebbles by graphite bed method[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 95: 72-78.

[28] Xiang M Q, Zhang Y C, Zhang Y, et al. Preparation of Li_2TiO_3 - Li_4SiO_4 core-shell ceramic pebbles with enhanced crush load by graphite bed process[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 466: 477-483.

[29] Lo Frano R, Stefanelli E, Puccini M. Feasibility of Li_4SiO_4 pebbles by drip casting and preliminary characterization[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 161: 111920.

[30] Stefanelli E, Puccini M, Pesetti A, et al. Lithium orthosilicate as nuclear fusion breeder material: optimization of the drip casting production technology [J]. Nuclear Materials and Energy, 2022, 30: 101131.

[31] 王昊,李广忠,葛渊,等.核聚变堆用氚增殖剂材料及其制备技术的研究进展与发展趋势[J].材料导报,2020,34(15):15075-15082.
Wang H, Li G Z, Ge Y, et al. Research progress and development trend of tritium breeder materials preparation technology for fusion reactors[J]. Materials Reports, 2020, 34(15): 15075-15082.

[32] Zhao S, Gan Y X, Kamlah M, et al. Influence of plate material on the contact strength of Li_4SiO_4 pebbles in crush tests and evaluation of the contact strength in pebble-pebble contact[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 100: 28-37.

[33] Wang J, Lei M Z, Yang H, et al. Study on the packing characteristics of a special "J" shape ceramic packed pebble bed based on discrete element modeling [J]. Powder Technology, 2021, 379: 362-372.

[34] Wang S, Wang S, Xu Q Q, et al. Crushed model and uniaxial compression analysis of random packed ceramic pebble bed by DEM [J]. Fusion Engineering and Design, 2018, 128: 53-57.

[35] Sharafat S, Williams B, Ghoniem N, et al. Development of a new cellular solid breeder for enhanced tritium production [J]. Fusion Engineering and Design, 2016, 109/110/111: 119-127.

[36] Chen Z W, Li Z Y, Li J J, et al. 3D printing of ceramics: a review [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39 (4): 661-687.

[37] Duan B, Wang M, Zhou W Y, et al. Three-dimensional nanocomposite scaffolds fabricated via selective laser sintering for bone tissue engineering[J]. Acta Biomaterialia, 2010, 6(12): 4495-4505.

[38] Yves-Christian H, Jan W, Wilhelm M, et al. Net shaped high performance oxide ceramic parts by selective laser melting[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 587-594.

[39] Lewis J A. Direct-write assembly of ceramics from colloidal inks [J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2002, 6 (3): 245-250.

[40] Butscher A, Bohner M, Doebelin N, et al. New depowdering-friendly designs for three-dimensional printing of calcium phosphate bone substitutes[J]. Acta Biomaterialia, 2013, 9(11): 9149-9158.

[41] 刘雨,陈张伟.陶瓷光固化3D打印技术研究进展[J].材料工程,2020,48(9):1-12.
Liu Y, Chen Z W. Research progress in photopolymerization-based 3D printing technology of ceramics[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(9): 1-12.

[42] Lantada A D, De Blas Romero A, Schwentenwein M, et al. Lithography-based ceramic manufacture (LCM) of auxetic structures: present capabilities and challenges[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(5): 054015.

[43] Zhou Q L, Gao Y, Liu K, et al. Fabrication of Li_2TiO_3 pebbles by a selective laser sintering process[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 100: 166-170.

[44] Cai L, Hu X, Tan G F, et al. Accurate and uniform fabrication of

Li_2TiO_3 pebbles with high properties based on Stereolithography technology[J].Journal of the European Ceramic Society,2021,41(3):2114-2123.

[45] Su F,Li Y Z,Xing H H,et al.Additive manufacturing of high-quality tritium breeding pebbles using ceramic precursors[J].Journal of the European Ceramic Society,2024,44(7):4719-4730.

[46] Su F,Liu Y,Zhang C,et al.Photopolymerization and reaction sintering enabled generative shaping and material-forming of complex ceramic structures with high performance[J].Additive Manufacturing,2022,51:102651.

[47] Su F,Su Z B,Liu Y,et al.Generative shaping and material-forming (GSM) enables structure engineering of complex-shaped Li_4SiO_4 ceramics based on 3D printing of ceramic/polymer precursors[J].Additive Manufacturing,2022,57:102963.

[48] Yanase I,Sato K,Kobayashi H,et al.CO_2 absorption property of Li_4SiO_4 in the presence of water vapor at room temperature[J].Chemical Engineering Journal,2019,356:81-90.

基金项目:国家自然科学基金(52475387);广东省教育厅创新团队项目(2025KCXTD038);广东省自然科学基金(2024A1515010049);深圳市科技计划(JCYJ20250604125759001,SGCX20250526143506009)

收稿日期:2026-01-30;**录用日期**:2026-03-06

通讯作者:陈张伟(1985—),男,博士,教授,博士生导师,从事增材制造研究,联系地址:深圳大学科技楼1010(518060),E-mail:chen@szu.edu.cn

(本文责编:解　宏)