

ساخت و بررسی مشخصات ساختاری میکروبالن‌های پلیمری برای گداخت هسته‌ای

رضازاده آذری، فهیمه - ولی اقبال، مرضیه - فرهبد، امیرحسین*

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای

* afarahbod@aeoi.org.ir

چکیده:

برای دستیابی به شرایط گداخت به روش محصورسازی اینرسی (ICF)، باریکه‌های نور لیزر به طور یکنواخت بر روی هدفی کرومی تابانده می‌شوند. بدین منظور لازم است هدف‌های ساخته شده به لحاظ ساختاری کاملاً کروی، متقارن، یکنواخت و همگن باشند تا حد امکان از بروز ناپایداری‌های ریلی-تیلور طی فرآیند فشردن هدف جلوگیری شود. در این مقاله مراحل ساخت میکروبالن‌های پلیمری با قطر متوسط ۷۵۰ و ضخامت دیواره ۳۰-۲۵ میکرون به روش ریزکپسول‌سازی ارائه شده است. همچنین به منظور تعیین ضخامت و میزان یکنواختی سطح میکروبالن‌های پلیمری ساخته شده از روش تصویربرداری دیجیتال بر پایه تداخل‌سنجی استفاده شده است.

کلمات کلیدی: گداخت محصورسازی اینرسی (ICF)، ریزکپسول‌سازی (MEC)، تداخل‌سنجی.

مقدمه:

گداخت به روش محصورسازی اینرسی^۱ غالباً مبتنی بر بکارگیری تابش‌های پراثرژی لیزر، جهت متراکم نمودن میکروبالن‌های کرومی (معمولاً پلیمری) است. لایه بیرونی این میکروبالن‌ها از جنس عناصری با عدد اتمی پایین مانند کربن و یا عناصر سبکتر از آن است که سوخت دوتریم-تریتم را در دمایی پایین‌تر از نقطه سه‌گانه در برمی‌گیرد و قابلیت نفوذ کمی در برابر نیتروژن و اکسیژن دارد. به این دلیل، هدف‌هایی با عدد اتمی میانگین پایین، از جنس پلیمر ساخته می‌شوند که به دلیل تولید الکترون‌های داغ کمتر، برای نگهداری سوخت، گزینه‌های مناسبی هستند. همچنین نفوذپذیری بیشتر هدف‌های پلیمری سبب کاهش زمان سوخت-رسانی به هدف می‌شود. یک هدف ایده‌آل برای این منظور الزاماً باید از کرویت بالا، متحدالمرکز بودن لایه‌ها، همواری و یکنواختی سطح مطلوبی برخوردار باشد تا ناپایداری ریلی-تیلور طی فرآیند فشردن آن به حداقل کاهش یابد. برای ساخت این هدف با کیفیت مذکور، از روش‌های گوناگونی از جمله برج سقوط تولید ریزکره (کوره گرمایی)^۲، روش ریزکپسول‌سازی^۳ و روش قالب با قابلیت دیپلمریزه شدن^۴ استفاده می‌شود [۱]. برای مشخصه‌یابی میکروبالن‌های مذکور روش‌های گوناگونی وجود دارد. از میان روش‌های موجود روش‌های اپتیکی مقرون به صرفه بوده و تصاویری با کیفیت بالا ارائه می‌دهند. از این رو در این

¹ Inertial Confinement Fusion

² Drop Tower

³ Microencapsulation

⁴ Depolymerizable mandrel (PAMS-GDP)

تحقیق از روش تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی با پیکربندی تداخل سنج ماخ-زندر بهره گرفته شده است. شایان ذکر است که تکنیک تمام‌نگاری در این پژوهش بر پایه هولوگرافی می‌باشد.

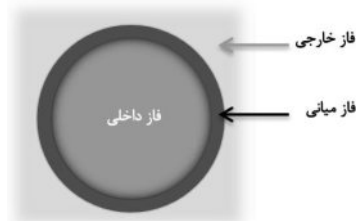
۱ مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای ساخت ریزکره‌های پلیمری از روش ریزکپسول‌سازی بهره گرفته شده است. ریزکپسول‌سازی فرآیندی است که طی آن، ذرات یا پوسته‌های کروی توخالی تولید می‌شود. از مشخصه‌های بارز این روش می‌توان به سادگی فناوری ساخت، امکان تولید انبوه محصول و مقرون به صرفه بودن اشاره کرد [۲]. روش ریزکپسول‌سازی مبتنی بر روش امولسیون چندتایی^۱ است [۳]. در این روش از سه فاز امتزاج ناپذیر برای آماده‌سازی ریزکره‌ها استفاده می‌شود، که دستیابی به پوسته‌های متحدالمرکز با کرویت بالا را از طریق تنظیم دانسیته امکان‌پذیر می‌سازد. سه فاز استفاده شده جهت ساخت و آماده‌سازی ریزکره‌ها که در شکل ۱ نشان داده شده است، عبارتند از:

فاز W_1 یا فاز داخلی: آب مقطر (آب بدون امولسیفایر)،

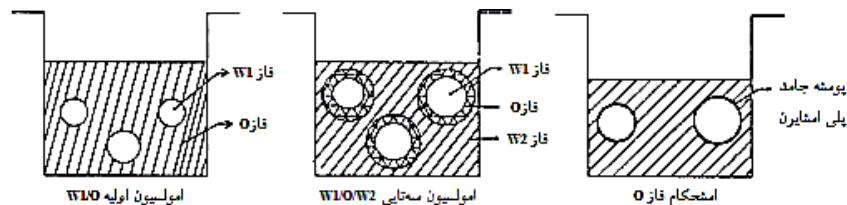
فاز O یا فاز میانی: محلول پلیمری (پلی استایرن محلول در بنزن و او ۲- دی کلرواتان)،

فاز W_2 یا فاز خارجی: آب مقطر و عامل تعلیق ساز (پلی وینیل الکل).



شکل ۱: نمایش ساختار سه فازی ریزکره پلیمری تهیه شده به روش ریزکپسول‌سازی [۱].

فاز W_1 به وسیله همزدن در فاز O پراکنده می‌شود تا امولسیون اولیه W_1/O تشکیل گردد. سپس مجموعه فوق به فاز W_2 افزوده شده که در نهایت محصول این فرایند تشکیل امولسیون سه‌تایی $W_1/O/W_2$ می‌باشد [۴]. مراحل تشکیل امولسیون سه‌گانه در شکل ۲ نمایش داده شده است.



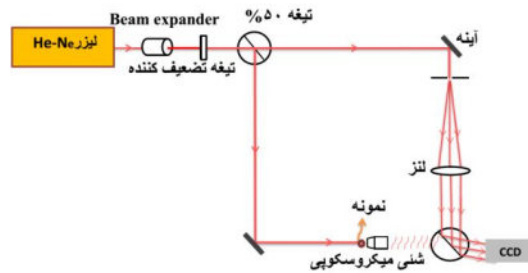
¹ Multi-emulsion

شکل ۲: طرح کلی تکنیک امولسیون با دانسیته تطبیق یافته در روش ریز کپسول‌سازی [۵].

مجموعه آزمایشگاهی مورد نیاز برای ساخت ریزکره‌های پلیمری به روش ریز کپسول‌سازی متشکل است از: راکتور (ظرف شیشه‌ای دو جداره)، حمام ترموستاتیک، همزن مکانیکی، همزن شیشه‌ای (دو تیغه)، هیتر-مگنت، ترازوی دیجیتال، محلول‌های مربوط به فازهای آلی (O) و آبی (W_1 و W_2)، تجهیزات شیشه‌ای، حلال‌ها (۱ و ۲- دی‌کلرواتان و بنزن). برای ساخت ریزکره‌ها پلی استایرنی به روش ریز کپسول‌سازی نیاز به تهیه دو محلول با ماهیت آبی و یک محلول با ماهیت آلی داریم.

روش کار به این صورت است که، ابتدا فاز آبی W_1 را به مقدار معینی از فاز آلی افزوده و مدتی هم می‌زنیم تا امولسیون نسبتاً یکنواخت W_1/O تشکیل شود. سپس امولسیون حاصل را به فاز آبی W_2 که در دمای $25^\circ C$ درون راکتور توسط همزن مکانیکی همزده می‌شود، اضافه می‌کنیم. امولسیون سه‌تایی $W_1/O/W_2$ که در حقیقت شامل تعلیق قطره W_1/O در محلول آبی PVA (پلی وینیل الکل) می‌باشد، تشکیل می‌شود. بعد از پایداری نسبی امولسیون، دور همزن را بتدریج تا دور نهائی مورد نظر کاهش می‌دهیم و برنامه دمایی حمام ترموستاتیک آغاز می‌شود تا به دمای نهائی مطلوب برسد. پس از گذشت ۶ ساعت و اتمام فرآیند، ریزکره‌های تشکیل شده، جمع‌آوری و پس از شستشو اولیه با آب، برای شستشوی تکمیلی به بشر حاوی متانول منتقل می‌گردند. جایگزینی تدریجی حلال متانول با آب داخل ریزکره‌ها، از تخریب سطح ریزکره‌ها طی فرآیند خشک شدن آن‌ها جلوگیری می‌کند. پس از گذشت ۴۸-۲۴ ساعت، به منظور خشک‌سازی نهایی، نمونه‌ها در دمای محیط داخل کریستالیزور به دور از گرد و غبار و آلاینده‌های محیطی قرار می‌گیرند.

به منظور مشخصه‌یابی ریزکره‌های پلیمری ساخته شده، از روش تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی بهره گرفته شده است. چیدمان برپا شده برای تصویربرداری از ریزکره‌های پلی استایرنی، تداخل سنج ماخ-زندر عبوری است که در شکل ۳ نشان داده شده است. برای تشکیل طرح تداخلی، از باریکه لیزر پیوسته هلیوم-نئون غیرقطبیده به ترتیب با طول موج $632/8$ نانومتر و توان ۲ میلی‌وات استفاده شد. دوربین CCD مدل $DFK(1280 \times 960 HV)$ با اندازه پیکسل $4/56$ میکرومتر برای ثبت تصاویر بکار رفته است. باریکه لیزر توسط شکافنده پرتو به دو بخش تقسیم می‌شود، که امکان اجرای چیدمانی بر اساس ساختار تداخل سنج ماخ-زندر را فراهم می‌سازد. در بازوی جسم تداخل سنج یک شی می‌کروسکوپ در حالت عبور قرار دارد و طرح تداخلی دو جبهه موج مرجع و جسم که یک تمام‌نگار عبوری از نمونه است پس از ثبت بوسیله دوربین به رایانه منتقل می‌شود.



شکل ۳: چیدمان مورد استفاده برای تصویربرداری.

نتایج :

گزیده نتایج تجربی به دست آمده از آزمایش های صورت گرفته در راستای ساخت ریزکره های پلی استایرنی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول شماره (۱) داده های تجربی ساخت ریزکره های پلی استایرنی.

شماره آزمایش	میانگین قطر خارجی (μm)	دما ($^{\circ}\text{C}$)	دور نهایی همزن (rpm)
۱	۴۰۰-۵۰۰	۶۵	۹۰
۲	۴۰۰-۵۰۰	۷۰	۹۰
۳	۵۰۰-۷۰۰	۵۰	۸۰
۴	۵۰۰-۷۰۰	۴۵	۸۰
۵	۶۰۰-۷۰۰	۴۵	۶۰
۶	۶۰۰-۸۰۰	۴۵	۶۰
۷	۶۰۰-۸۰۰	۴۵	۵۵
۸	۷۰۰-۸۰۰	۴۵	۵۰

طی فرآیند ساخت ابتدا ریزکره هایی در ابعاد بزرگ (۸۰۰ میکرون) نیز تشکیل می شوند اما این پوسته ها تا پایان کار به دلیل افزایش دما و دور بالای همزن، پایدار و سالم باقی نمی ماندند. بنابراین همانطور که از داده های تجربی جدول فوق مشخص است، کاهش دمای نهایی پخت بر پایداری و حفظ ریزکره های در ابعاد بزرگتر بسیار مؤثر است. بر اساس مشاهدات حاصله از آزمایش، دمای 45°C دمای بهینه جهت پخت می باشد. علیرغم آنکه دمای پایین تر برای این منظور مناسبتر به نظر می رسد، اما این کار موجب طولانی تر شدن زمان پخت و بروز مشکلات بیشتر می گردد. همچنین کاهش تدریجی دور اولیه همزن و پایین بودن مقدار دور نهایی آن، تأثیر بسزایی در جلوگیری از تخریب ریزکره ها و حفظ نمونه های بزرگتر دارد. لازم به ذکر است که کاهش بیشتر دور همزن منجر به تجمع پوسته ها بر روی هم و چسبندگی آن ها می شود که خود

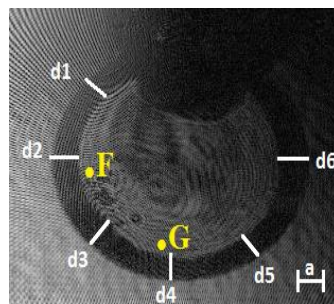
زمینه تخریب نمونه‌های ساخته شده را فراهم می‌آورد. به منظور تعیین ضخامت و یکنواختی سطح میکروبالن‌های ساخته شده، نمونه شماره ۸ به عنوان نمونه شاخص انتخاب شد.

فرایند بازیخت موجب افزایش استحکام پلی‌استیرین و بالابردن مقاومت میکروبالن‌ها در برابر فشار خارجی می‌شود. همچنین طی فرایند خشک‌سازی نهایی، ساختاری سفت و پایدار حاصل می‌گردد. در حالت کلی تحت شرایط استاندارد دما و فشار محیط آزمایشگاه، با رعایت شرایط بهینه از قبیل: نگهداری نمونه‌ها در ظروف شیشه‌ای دربسته، جلوگیری از انباشتگی و ایجاد ضربه روی سطح خارجی میکروبالن‌ها و جلوگیری از تماس نمونه‌ها با رطوبت و آلودگی‌های ناشی از گرد و غبار موجود در محیط، میکروبالن‌های پلی‌استیرینی تهیه شده به مدت حداقل ۱ سال قابل نگهداری می‌باشند.

در این راستا طرح تداخلی ثبت شده از طریق تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی در نرم افزار هولو ویژن^۱ به روش فرنل، بازسازی شده است. تصویر بازسازی شده نهایی در شکل ۴ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، ضخامت پوسته در تصویر بازسازی شده طرح تداخلی، قابل تشخیص است. از آنجایی که یکنواختی ضخامت پوسته میکروبالن حایز اهمیت است، پس از بازسازی تصویر، ضخامت پوسته در نقاط مختلف اندازه‌گیری شده است. به منظور مقایسه ضخامت نمونه در مکان‌های مختلف دیواره مقیاس $a = 18 \mu\text{m}$

تعریف شده است.

مقادیر به دست آمده و درصد نایکنواختی ضخامت پوسته در جدول ۲ آمده است. نتایج حاصل به طور متوسط حاکی از $22/83$ درصد نایکنواختی در ضخامت پوسته در نقاط مختلف است [۶].



شکل ۴: ضخامت پوسته در مکان‌های $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$ برحسب مقیاس $a = 18 \mu\text{m}$.

جدول ۲: ضخامت پوسته در شش مکان مشخص شده در شکل ۴.

مکان	ضخامت پوسته ($a = 18 \mu\text{m}$)	درصد نایکنواختی ضخامت پوسته
d_1	1.13a	٪13

¹ Holovision

d ₂	1.39a	٪39
d ₃	1.21a	٪21
d ₄	0.96a	٪-4
d ₅	1.23a	٪23
d ₆	1.45a	٪45

بحث و نتیجه گیری :

با توجه به بررسی‌های انجام شده در زمینه ساخت ریزکره‌ها، ریزکپسول‌سازی از نظر کیفیت و مقرون به صرفه بودن جهت تولید انبوه، روشی کارآمد و مناسب است. در اکثر مقالات منتشر شده در زمینه ساخت ریزکره‌های پلیمری از ماده فعال سطحی (امولسیفایر) به منظور افزایش راندمان محصول بهره گرفته شده است [۷] و [۸]، که در این پژوهش حذف امولسیفایر و افزایش راندمان محصول از طریق بررسی پارامترهای تنظیم دور اولیه همزن و کاهش تدریجی آن و همچنین بهینه کردن دمای پخت نهایی و استفاده از همزن مکانیکی با پره‌های مناسب مورد نظر بوده است. یکی از نتایج به دست آمده، تأثیر آشکار کاهش دمای نهایی پخت بر پایداری ریزکره‌های در ابعاد بزرگتر بود که بر اساس مشاهدات حاصله از آزمایش، دمای ۴۵°C دمای بهینه جهت پخت بدست آمد. همچنین کاهش تدریجی دور اولیه همزن و پایین بودن مقدار دور نهایی آن، تأثیر بسزایی در جلوگیری از تخریب ریزکره‌ها و حفظ نمونه‌های بزرگتر دارد. پس از طی مراحل ساخت ریزکره، از روش تمام‌نگاری دیجیتال میکروسکوپی با چیدمان ماخ-زندر عبوری برای مشخصه‌یابی ریزکره‌های پلیمری استفاده شد. تمام‌نگار پس از ثبت در CCD توسط نرم‌افزار هولو ویژن بازسازی گردید. اندازه‌گیری ضخامت پوسته در نقاط مختلف تصویر بازسازی شده، به طور متوسط ۲۲/۸۳ درصد نایکنواختی در ضخامت پوسته را نشان می‌دهد.

مراجع :

- [1] T. P. Bernat, D. H. Darling, and J. J. Sanchez, "Applications of holographic interferometry to cryogenic ICF target characterization" J. Vac. Sci. Technol. A 20, 1362 (1982).
- [2] L. Zhang, Y. Dan, G. Dang-zhong, T. Yong-jian, Z. Young-ining, W. Shu-huai, "Fabrication of deuterated solid ICF target " High Power Laser and Particle Beams, 5 (1999).
- [3] T. D. Boone " Overview of modeling efforts in support of microencapsulated polymer mandrel formation" J. Moscow Phys. Soc., 8, 79 (1998).
- [4] D. Gabor "Microscopy by reconstructed wavefront", (1948).
- [5] K K. MISHRA, R K. KHARDEKAR, R. SINGH and H C. PANT, "Fabrication of polystyrene hollow microspheres as laser fusion targets by optimized density-matched emulsion technique and characterization" Pramana-J. Phys., 59, 1, 113 (2002).
- [۶] بهاره زارع فارسانی، مرضیه ولی اقبال، مصطفی ترکاشوند، امیر حسین فرهبد، بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و مهندسی اپتیک ایران، دانشگاه یزد، یزد (۱۳۹۴).
- [7] V. Micó, C. Ferreira, Z. Zalevsky and J. García, "Basic principles and applications of digital holographic microscopy" Microscopy: Science, Technology, Applications and Education, A. Méndez-Vilas and J. Díaz (Eds.) 1418 (2010).
- [8] Uichi Kubo, Hitoshi Nakano, and Hyo-gun Kim, "Fabrication of cross-linked polymer shells for inertial confinement fusion experiments" J. Vac. Sci. Technol. A 15, 3, 683 (1997).