http://pmse.scu.edu.cn

惯性约束聚变靶用毫米级聚苯乙烯-聚乙烯醇双层空心微球的制备

严 琳, 刘梅芳, 刘 豪, 李 洁, 陈 强, 杨小雨, 周宇航, 杜 凯
(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 随着惯性约束聚变(ICF)物理实验对聚苯乙烯-聚乙烯醇(PS-PVA)双层空心微球的直径要求逐渐增大,针对传统乳液封装法难以制备毫米级(>1000 μm)双层微球的问题,文中基于平面旋涂提出了三维旋涂方法,设计搭建了三维旋涂成型装置,在毫米级高精度单分散 PS 微球(直径约 1500 μm)表面采用溶剂挥发法原位生成 PVA 薄膜。通过氧气(O_2)等离子体处理 PS 微球表面,提高其与高醇解度 PVA 之间的相互作用,实现了 PVA 溶液在 PS 微球表面的铺展浸润,结合旋涂关键参数优化,实现了 PVA 液膜形态和厚度的在线控制,提高了 PVA 薄膜层均匀性,获得了毫米级 PS-PVA 双层空心微球。

关键词: 惯性约束聚变;双层空心微球;聚苯乙烯;聚乙烯醇;旋涂
中图分类号: TQ322 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)01-0110-08

惯性约束聚变(Inertial confinement fusion, ICF)是有望实现可控核聚变的研究方向之一,目前已实现聚变点火[1~3]。靶丸,作为热核燃料容器,是这类 ICF 物理实验中必不可少的物质基础[4]。因兼顾聚苯乙烯(PS)良好的力学强度和聚乙烯醇(PVA)优良的阻气性能,PS-PVA 双层空心微球可以作为高压燃料气体的容器[5,6],是 ICF 分解物理实验中常用的一类靶丸。随着 ICF 研究的深入,高功率物理实验亟需毫米级大直径 PS-PVA 双层空心微球。

PS-PVA 双层微球采用“两步法”制备,即先制备出 PS 空心微球,再在其表面原位生成 PVA 薄膜层。PS 空心微球是决定双层微球尺寸和尺寸分布的主要因素,一般采用微流控方法制备。PVA 薄膜层的制备方法主要有炉内涂层法[7]、乳液微封装法[8]、界面缩聚法[9]、浸涂法[10]。其中,乳液微封装法应用最广泛,此方法依靠流场相互作用将 PVA 液膜包覆在 PS 微球表面,形成固-水-油三相复合液滴。去除 PVA 液膜的溶剂后可得到 PS-PVA 双层微球。目前采用该方法已实现数百微米 PS-PVA 双层微球的制备。然而,由于固体内核与液膜的形变能力差距极大,PS 微球表面的 PVA 液膜受流场内强黏滞曳力作用,极易出现 PVA 液膜从 PS 微球表面脱离的现象,这种现象随 PS 微球增大愈发显著,采用该方法很难制备毫米级大直径双层球[11]。

旋涂法利用离心作用将溶液均匀分散,是制备较小尺寸平面薄膜的常用方法[12]。本文在其作用原理的基础上设计了一种三维旋涂装置,采用氧气等离子处理提高 PS 与高醇解度 PVA 之间的相互作用强度,优化旋涂实验设置,初步建立了大直径 PS-PVA 双层微球旋涂制备方法,获得了毫米级 PS-PVA 双层空心微球。该三维旋涂法对微球直径、壁厚和种类无限制,对 ICF 靶用微球制备技术的发展具有重要意义。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0005
收稿日期: 2024-11-06
基金项目: 国家自然科学基金项目面上项目(52073264)
通讯联系人: 杜凯, 主要从事功能高分子材料及跨尺度微纳加工技术研究, E-mail: icf802@163.com

1　实验部分

1.1　试剂与仪器

聚苯乙烯(Polystyrene, PS, $\overline{M}_W = 3.5\times10^5$)、氟苯(Fluorobenzene, FB)、聚乙烯醇(Poly(vinyl alcohol),PVA,$\overline{M}_W = 8.8\times10^4$,醇解度 88%;$\overline{M}_W = 1.46\times10^5 \sim 1.86\times10^5$,醇解度 99+%)、异丙醇(Isopropanol, IPA):上海麦克林生化科技股份有限公司。

接触角测量仪:OSA 100 型,宁波新边界科学仪器有限公司;三目透反射偏光显微镜:WYP-65C 型,天津微仪光学仪器有限公司;真空等离子清洗机:深圳纳恩科技有限公司;扫描电子显微镜:SEM 2000 型,国仪量子。

1.2　实验过程

1.2.1　PS 空心微球制备及表面处理:PS 空心微球采用微流控技术制备。如 Fig.1 所示,搭建同轴流动型乳粒发生器,制备油包水(W1/O/W2)复合乳粒。其中,内水相(W1 相)为纯水,油相(O 相)为质量分数 8% PS/氟苯溶液,外水相(W2 相)为质量分数 2% PVA($\overline{M}_W = 8.8\times10^4$,醇解度 88%)水溶液,W1 相,O 相和 W2 相流体分别由 3 个独立的精密注射泵控制注入乳粒发生器的各相流道中,调节三相流速使其以液滴流流型生成复合乳粒并精准调控乳粒尺寸。盛有 W2 相溶液的平底柱形旋蒸瓶在外水相管道末端收集乳粒,然后在 40 ℃恒温水浴中横向匀速旋转,O 相溶剂 FB 迁移至气相中,O 相逐渐固化,得到含纯水的 PS 微球,干燥后制得 PS 空心微球,具体方法参考课题组前期研究[13~15]。

PS 空心微球在真空等离子清洗机中用氧气等离子体进行表面处理,氧气流量 200 mL/min,激发功率为 400 W。

1.2.2　PVA 薄膜层制备:如 Fig.2 所示,采用可水平旋转的垂直真空吸附臂控制外径约 1500 μm 的空心 PS 微球,将微球下 2/3 部分浸入到质量分数 5% PVA($\overline{M}_W = 1.46\times10^5 \sim 1.86\times10^5$,醇解度 99+%)水溶液中,以沿 z 轴水平旋转(速度 r_1)状态浸润 2 min,

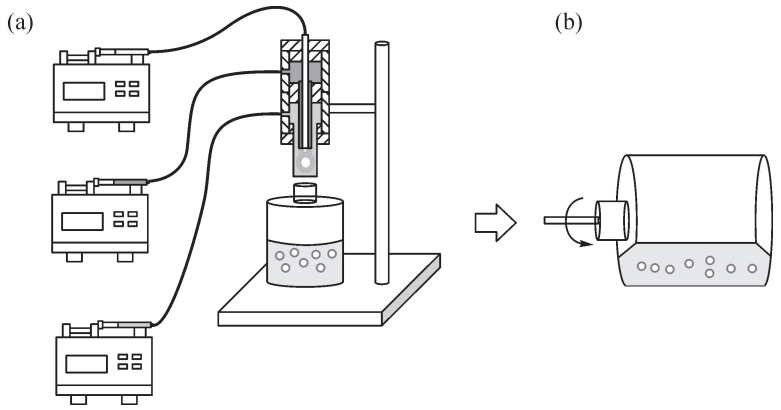


Fig. 1　Preparation of PS microspheres: (a) generation of W1/O/W2 compound droplets by a triple orifice droplet generator; (b) solidification of W1/O droplets in W2 phase with a rotating cylindrical flask

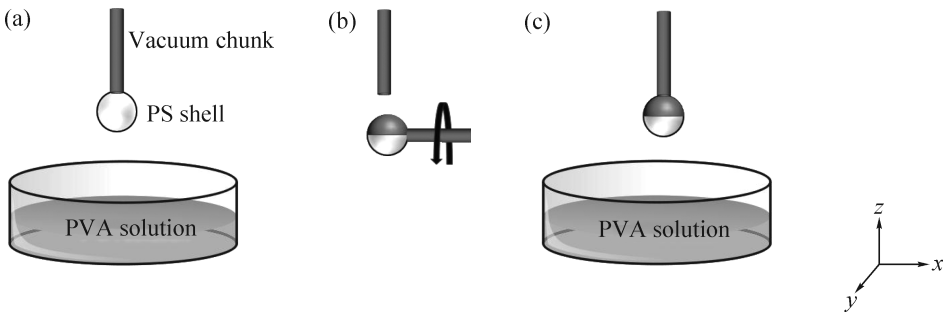


Fig. 2　Schematic diagram of PVA coating by dip-spin-flip technique

(a) dip, spin, dry; (b) switch to another side; (c) dip, spin, dry again

然后以相同转速提升(垂直线速度为 v),PVA 溶液吸附到 PS 微球表面形成液膜,微球-液膜两相复合体系在常温常压下悬空高速水平旋转(转速 r_2),液膜在离心作用下均匀分布于 PS 微球表面,溶剂充分挥发后得到一定厚度的半球面形 PVA 膜,固化干燥完全后采用水平吸附臂将 PS 微球沿 x 轴旋转 180°,重复前述浸入-旋转-干燥(Dip-spin-dry, D-S-D)过程,得到完整球形 PVA 薄膜层,样品编号及参数设置如 Tab.1 所示。通过调节真空度和吸附臂直径,可实现任意尺寸双层球的制备。

Tab. 1 Parameter setting of dip-spin-dry process

Sample code	r_1/(r·min^{-1})	v/(cm·s^{-1})	r_2/(r·min^{-1})
1#	0	2	1000
2#	300	2	1000
3#	500	2	1000
4#	700	2	1000
5#	1000	2	1000
6#	1000	5	1000
7#	1000	8	1000
8#	1000	10	1000
9#	1000	20	1000
10#	1000	10	100
11#	1000	10	500

1.3 测试与表征

1.3.1 *接触角测试*:使用接触角测量仪,将 PS 薄膜水平放置在仪器样品台上,由进样程序控制精密注射泵推动 1 mL 注射器内的 PVA 溶液,利用高速相机捕捉薄膜表面的 PVA 液滴轮廓,拟合计算得到固液表面静态接触角。同一薄膜任取 3 点做平行测试,最终结果取中间稳定值。

1.3.2 *PVA 液膜干燥过程追踪*:利用平面旋涂模拟三维旋涂中微球表面 PVA 溶液的干燥过程,在洁净载玻片表面均匀薄涂 PVA 溶液,液膜厚度控制在 90 μm 左右,常温常压下在精密天平(精度±1×10^{-5} g)上称量液膜在一定时间内的质量变化直至恒定,最终统计结果归一化处理。

1.3.3 *微球形貌与尺寸表征*:利用光学显微镜观测 W1/O/W2 复合乳液、PS 空心微球及 PS-PVA 双层微球的形貌。复合乳粒和单层微球的直径由显微镜配套软件测量获得,采用直径分布系数(CV)定量分析乳粒和微球的单分散性。通过自搭建三维旋涂设备上搭载图像传感器(CCD)模块在线表征旋涂过程中液膜的演变。借助扫描电子显微镜表征双层球微观结构及各层厚度,样品在液氮中冷却并脆断,断面喷金,在 3 kV 加速电压下拍摄 SEM 照片,壁厚由配套软件测量。

2 结果与讨论

2.1 同轴乳粒发生器制备 PS 空心微球及尺寸调控

PS 空心微球是 PS-PVA 双层球的基础,是双层球尺寸及尺寸单分散性的主要决定因素,而复合乳粒的粒径和单分散性直接影响 PS 空心微球尺寸,进而影响最终双层微球尺寸。为了制备单分散性良好的 PS 空心微球,本文采用结构简便且流动干扰较小的同轴三维乳粒发生器(如 Fig.1(a)所示)[16]。如 Fig.3(a)和 Fig.3(b)所示,通过精确调控三相流速,得到了平均外径约 1900 μm,外径分布系数 0.27% 的 W1/O/W2 复合乳粒,满足单分散条件。利用沿横向轴旋转的圆柱形旋蒸瓶固化复合乳粒,使 W1/O/W2 复合乳粒均匀分布在 W2 相中无规运动,O 相内 PS 浓度随着溶剂迁移不断增加,直至完全成型为 Fig.3(c)所示的 PS 空心微球[15]。固化后 PS 空心微球外径约 1500 μm,直径分布系数 0.31%(Fig.3(d)),具有较好的单分散性,为双层球制备奠定了基础。

2.2 改善 PVA 溶液在 PS 微球表面的浸润性

将制备的 PS 微球直接用于旋涂时,PS 微球浸入 PVA 溶液中,溶液呈凹液面;PS 微球离开后,PVA 溶液迅速回缩至 PS 微球底部,形成悬挂液滴,无法形成均匀的半球形液膜覆盖 PS 微球(Fig.4(a)和 Fig.4(b)),导致 PVA 薄膜层难以完全包覆 PS 微球(如 Fig.4(c)所示)。接触角测试结果显示(Fig.4(d)),质量分数 5% PVA 水溶液在 PS 薄膜表面接触角为 81.7°,说明 PVA 溶液不易浸润 PS 微球表面,这可归因于聚苯乙烯分子链较低的极性,而高醇解度 PVA 分子链中含大量羟基,分子链极性较强,导致两者相容性差。因此,增强 PS 与 PVA 相互作用对于提高 PVA 溶液在 PS 微球表面的浸润性具有重要意义。

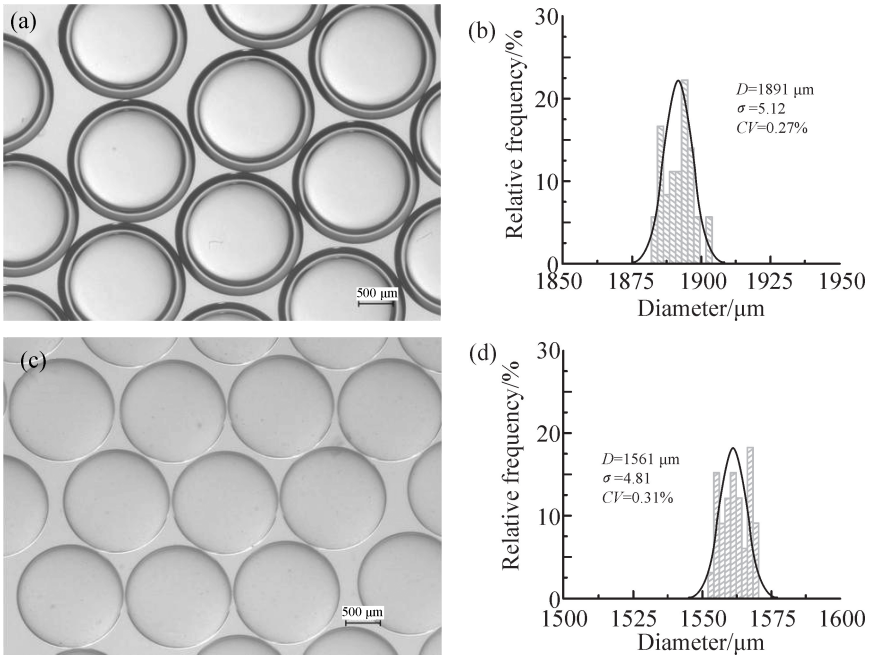


Fig. 3　(a) Optical micrograph of W1/O/W2 compound droplets; (b) outer diameter distribution of W1/O/W2 compound droplets; (c) optical micrograph of PS hollow microspheres; (d) diameter distribution of PS hollow microspheres. In figures (b) and (d), *D* represents the outer diameter of the droplet, σ denotes the statistical standard deviation of the outer diameter, and *CV* indicates the coefficient of variation of the outer diameter, which is used to characterize the uniformity of droplets

在 PVA 溶液中加入质量分数 30% IPA 后,PS 微球浸入溶液池时液面为平面,离开溶液池后下方形成较均匀的半球形液膜(Fig.4(e, f))。接触角测试证明,添加异丙醇后,PVA 溶液与 PS 薄膜之间的接触角减小为 41.75°,降低了近 50%,这与文献报道中 IPA 能显著降低水溶液的表面张力从而有利于其表面铺展的理论相符[17]。然而,如 Fig.4(g)所示,添加 IPA 的 PVA 薄膜干燥后表面粗糙度显著增大,无法满足 ICF 物理实验对靶丸表面光洁度的要求,这可能是异丙醇较大的饱和蒸汽压使得溶液干燥速度明显加快导致的(Fig.5(b))。

等离子处理方法是将气体激发为等离子态作用于样品表面,常用于精密器件表面处理[18,19],利用氧等离子对 PS 微球进行表面亲水处理,可以增强 PVA 溶液在 PS 微球表面的浸润性,且不降低双层球表面质量。结果表明,PS 微球经氧等离子处理 20 s 后,如 Fig.4(i, j)所示,微球浸没在质量分数 5% PVA 水溶液中时,溶液表现为凸液面,微球离开溶液池后,下方吸附的溶液铺展为均匀的半球形液膜,且相较于 PVA-IPA 溶液,微球表面液膜的高度明显增大,溶液量显著增多。由接触角测试可知,等离子处理 20 s 后的 PS 薄膜与 5% PVA 水溶液的接触角为 16.5°,相比未处理 PS 薄膜降低了约 80%,这可能是因为 PS 薄膜表面与氧等离子在真空反应腔内发生化学反应形成了极性较强的羰基和羟基[18],这些亲水官能团有利于 PVA 溶液在 PS 微球表面铺展浸润。干燥后,如 Fig.4(k)所示,PS-PVA 双层球中 PVA 薄膜层较均匀,表面光洁度较好,无明显缺陷,表明采用氧等离子处理 PS 微球可实现在不影响 PVA 膜表面质量的同时显著提高 PVA 溶液在 PS 表面的浸润性。

此外,等离子处理效率极高,处理 20 s,40 s 和 60 s 的 PS 薄膜与 PVA 溶液间接触角几乎相同,而过长的处理时间可能使聚苯乙烯中的化学键断裂过多,降低微球的力学性能,因此,后续实验中 PS 微球等离子处理时间均为 20 s。

2.3　旋涂过程对 PVA 膜的影响

2.3.1　PVA 液膜干燥过程追踪:旋涂法在 PS 微球表面制备完整 PVA 薄膜层由 2 个独立 D-S-D 过程组成。在 PS 微球翻转 180°旋涂另一面之前,须保证

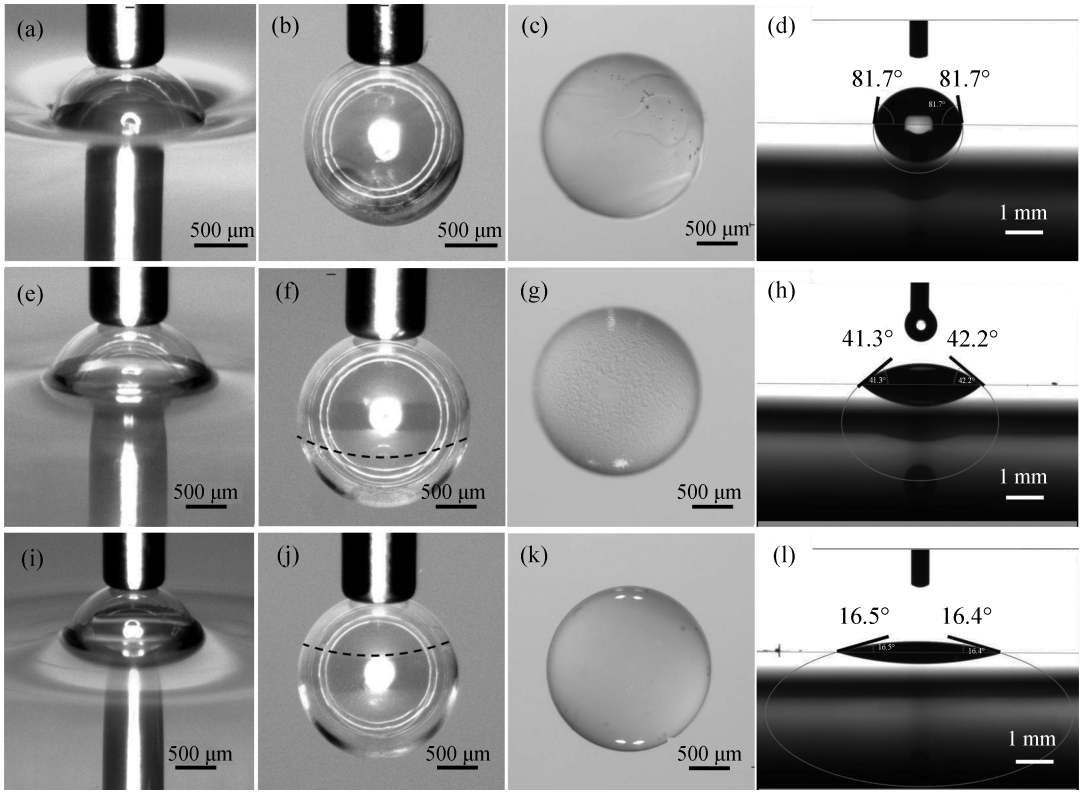


Fig. 4 (a, e) and (i) CCD photos taken when PS microspheres were immersed; (b, f) and (j) photographs taken at the moment when PS microspheres were lifted 3 cm from the PVA solution; (c, g) and (k) photomicrographs of PVA-PS bilayer microspheres; (d, h) and (k) contact angle of (d) PVA aqueous solution on the surface of untreated PS film, (h) addition of 40% IPA to the PVA solution on the untreated PS film, and (k) PVA aqueous solution on the PS film after O_2 plasma treatment for 20 s

PVA 薄膜完全干燥,否则易在表面留下 Fig.5(a)所示的真空吸附臂造成的圆形缺陷,严重影响 PS-PVA 双层球的表面光洁度。利用精密天平称量,对质量分数 5% PVA 液膜常温常压下的干燥过程做定量表征,结果如 Fig.5(b)所示。PVA 液膜质量在 1.5 h 后趋于恒定,IPA 的加入显著加快了 PVA 液膜的干燥速度,尤其是初期干燥速度,这直接影响了 PVA 膜的表面质量。两组溶液干燥后均失重约 94%,这是因为聚乙烯醇分子链极性强,薄膜中残留了少量水,需要在旋涂完成后进一步烘干。

2.3.2 旋涂过程对 PVA 膜厚度均一性的影响:基于 PVA 溶液在 PS 微球表面的浸润吸附,通过定量研究旋涂过程的变量,即微球提升离开 PVA 溶液池瞬间沿 z 轴的旋转速度,微球抬离 PVA 溶液池的垂直线

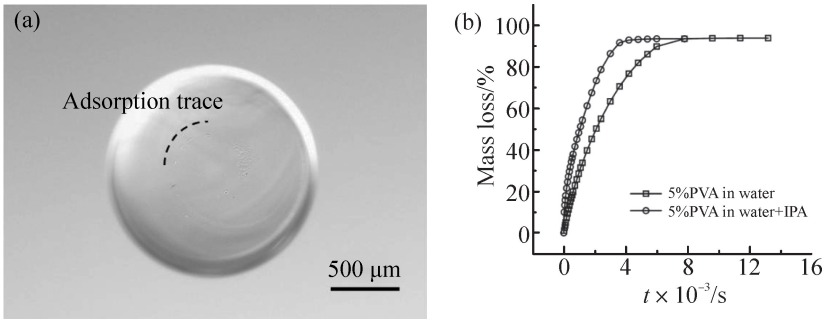


Fig. 5 (a) Adsorption trace on the double layer microsphere; (b) drying curves of PVA solution

速度,以及微球悬空时沿 z 轴旋转的速度,探究旋涂过程对 PVA 薄膜层的影响。

测量微球抬离至距 PVA 溶液池 3 cm 处的瞬间其下方 PVA 液膜厚度(如 Fig.6(a)所示),以表征微球表面 PVA 溶液吸附量,由 Fig.6(b)可知,在提升速度恒定为 2 cm/s 时,r_1 对液膜厚度影响较小,均为 45 μm 左右。相对的,提升速度对 PVA 溶液量有显著影响,如 Fig.6(c)所示,r_1 为 1000 r/min,当 v 小于 8 cm/s 时,液膜厚度随 v 增大而增大,这可归因于溶液内 PVA 分子链间和 PVA 分子链与水分子之间存在的大量氢键,溶液体系内的相互作用力大于 PVA 与 PS 分子间引力,较慢的提升速度给予 PVA 分子链足够的弛豫时间返回溶液池,而提升速度较快时弛豫作用来不及发生,PVA 溶液出于惯性被 PS 微球带离溶液池[20],从而 PVA 溶液吸附量增大。然而,进一步增大提升速度后,液膜厚度趋于恒定,可能是由于微球浸入溶液中的深度较小,仅 1000 μm 左右,而真空吸附臂从启动到达到设定速度需要一定加速距离,较小的行程使得微球在离开液池时的实际速度低于设定值,因此液膜厚度几乎不变。此外,实验发现,v 值过大时旋涂体系处于不稳定状态,平行实验中液膜厚度波动较大。综合而言,为了兼顾 PVA 膜厚度和实验可重复性,后续实验中提升速度设置为 8 cm/s。

微球提升至悬空后,为防止 PS 微球表面吸附的 PVA 溶液在重力作用下聚集到微球底部,应迅速旋转提供离心作用使溶液在微球表面均匀分布。结果表明,在设备调节范围(0~1000 r/min)内,旋转速度越大,PVA 溶液厚度分布越均匀。如 Fig.7 所示,当 r_2 为 100 r/min 时,微球表面的 PVA 薄膜由赤道面至底面厚度梯度较大,出现了大范围清晰的环形干燥轨迹,随着转速提升,环形干燥痕的范围逐渐缩小,程度逐渐减轻,当 r_2 达到 1000 r/min 时,仅微球底部存在极少量程度极轻的环形干燥痕,表明旋转

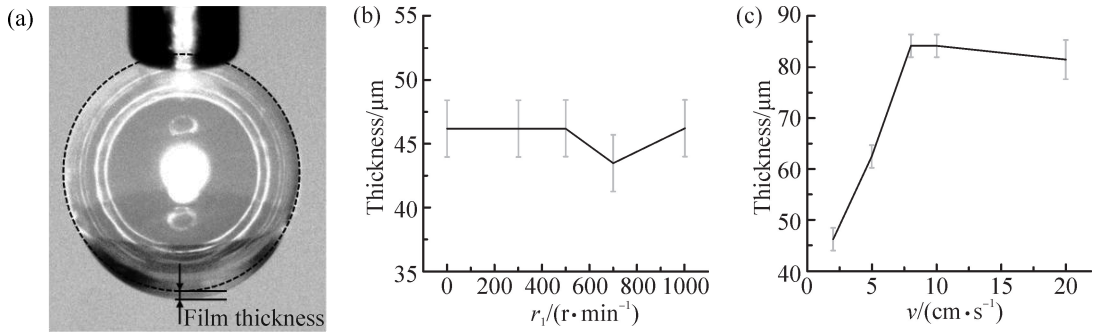


Fig. 6　(a) Measurement of the PVA liquid film thickness beneath the PS microsphere at the instant it was lifted to a distance of 3 cm above the PVA solution pool; (b) and (c) the variation in film thickness of the polyvinyl alcohol solution with respect to (b) the rotational speed (r_1) of the Z-axis (under constant draw-off speed v = 2 cm/s) and (c) the instantaneous perpendicular draw-off speed (v) of the polystyrene microspheres (under constant rotational speed r_1 = 1000 r/min)

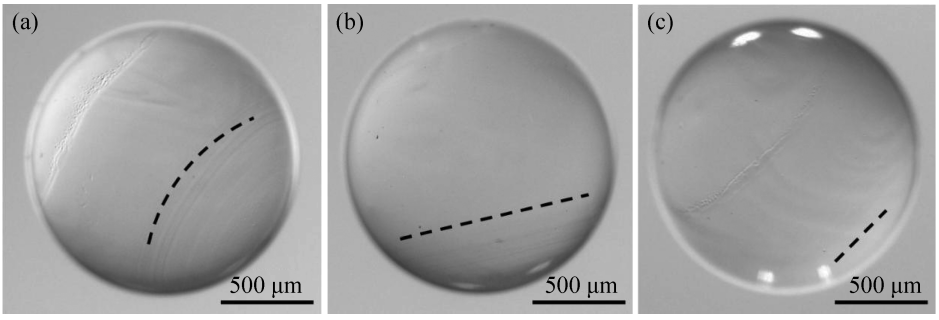


Fig. 7　Optical micrographs of PS-PVA double-layer microspheres, where the linear velocity (v) of the microspheres lifting off the PVA solution cell was 8 cm/s, and the microspheres were suspended and rotating at a speed(r_2) of (a) 100 r/min, (b) 500 r/min and (c) 1000 r/min

提供的离心作用有利于 PVA 溶液克服重力作用往赤道面迁移。但是,由于设备转速限制,无法实现 PVA 薄膜层厚度完全均一,从而形成环形干燥痕和薄膜边界(见 Fig.7(a)和 Fig.7(c)中微球上部)等缺陷,预计提升设备转速后可有效改善。

2.3.3 PVA 膜厚度分析:Fig.8 为 PS-PVA 双层微球壳层截面 SEM 照片。微球壳层为清晰明显的双层结构,内层为 PS 层,厚度约 13 μm;外层为 PVA 层,厚度约 1 μm。PVA 薄膜层厚度较均匀。PVA 薄膜层厚度直接影响双层微球保气性,为提高 PS-PVA 双层球保气性,后续还需进一步提高 PVA 层的质量和厚度。结合装置并行化与阵列化设计、工艺过程自动化与集成化及干燥工艺优化等途径,未来将在提高涂层质量的同时进行双层微球批量化与规模化制备研究,更好地满足 ICF 物理实验对高质量、大批量毫米级靶丸的迫切需求。

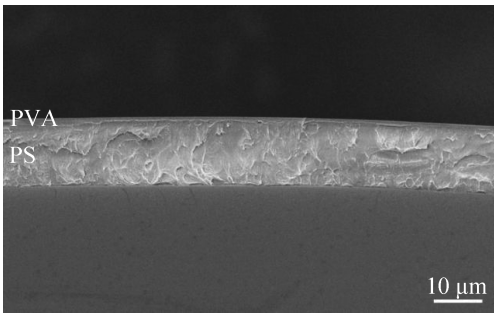


Fig. 8 SEM image of the double-layer microsphere where r_1 was 500 r/min, r_2 was 1000 r/min, and v was 8 cm/s

3 结论

本文设计搭建了一种三维旋涂装置,以微流控制备的毫米级单分散 PS 微球为基体,通过氧气等离子体处理 PS 微球表面,显著增强了其与高醇解度 PVA 之间的相互作用,提出了增强低极性基体与强极性涂层材料间界面相容性的可行路径,初步建立了毫米级双层聚合物微球三维旋涂方法。结果表明,在三维旋涂过程中,PS 微球提拉速度直接影响 PVA 液膜的初始吸附量,而高速旋转产生的离心力是克服重力,实现液膜均匀分布的关键。当提拉速度控制在 8 cm/s,悬空旋转速度达到 1000 r/min 时,可获得厚度均匀、表面光洁的 PVA 薄膜层,最终成功制备出直径约 1500 μm,结构完整的 PS-PVA 双层空心微球。本文突破了传统乳液微封装技术在大尺寸微球制备中的局限,设计了界面修饰与流场控制的协同机制,为多层微球表面弱相容功能涂层的均匀构筑提供了可借鉴的工艺路径与理论依据。

参考文献:

[1] Danson C N, Gizzi L A. Inertial confinement fusion ignition achieved at the national ignition facility-an editorial[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11: 1-3.

[2] Yan J, Li J, He X T, *et al*. Experimental confirmation of driving pressure boosting and smoothing for hybrid-drive inertial fusion at the 100-kJ laser facility[J]. Nature Communications, 2023, 14: 5782.

[3] Zylstra A B, Hurricane O A, Callahan D A, *et al*. Burning plasma achieved in inertial fusion[J]. Nature, 2022, 601: 542-548.

[4] Zhang S T, Li X M, Liu D J, *et al*. Vlasov-Fokker-Planck-Maxwell simulations for plasmas in inertial confinement fusion[J]. Computer Physics Communications, 2024, 294: 108932.

[5] Collins G W, Sanchez J J, Fearon E M. D-T and D2 retention in plastic shells[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1992, 10: 1158-1163.

[6] 张占文, 刘梅芳, 李婧, 等. 氖气在聚乙烯醇多层塑料球壳内的渗透性能[J]. 功能高分子学报, 2014, 27(2): 213-218.
Zhang Z W, Liu M F, Li J, *et al*. Neon permration in polyvinyl alcohol multilayer plastic capsules[J]. Journal of Functional Polymers, 2014, 27(2): 213-218.

[7] 张占文, 黄勇, 唐永健, 等. 炉内成球技术制备 PS-PVA 双层球[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(3): 284-288.
Zhang Z W, Huang Y, Tang Y J, *et al*. Preparation of PS-PVA double layer microspheres using heated drop-tower technique[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(3): 284-288.

[8] Pan D, Liu X, Liu M, *et al*. Coating of solid particles with liquid layer by microfluidics[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 553: 652-659.

[9] 游丹, 李波, 张林, 等. 界面缩聚法 PS-PVA 双层聚合物空心微球的研制[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 463-466.
You D, Li B, Zhang L, *et al*. Preparation of PS-PVA double-layered polymer hollow microspheres by interface poly-condensation technique[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(4): 463-466.

[10] 苏琳, 陈素芬, 刘梅芳, 等. 塑料微球表面制备聚乙烯醇涂层研究进展[J]. 强激光与离子束, 2012, 24(7): 1517-1522.
Su L, Chen S F, Liu M F, *et al*. Research progress of fabricating polyvinyl alcohol coating on plastic microsphere[J].

High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1517-1522.

[11] 苏琳, 李婧, 李洁, 等. 臭氧改性及搅拌桨结构对大直径双层球制备的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3269-3273.
Su L, Li J, Li J, *et al*. Effects of surface modification by ozonization and structures of impeller on fabricating large-size double-layer hollow microspheres[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3269-3273.

[12] Safari G M, Parhizkar M, Asghari E. Investigation of the structural properties of Si^{4+}-doped HAP coatings on Ti-6Al-4V substrate as a corrosion barrier in biomedical media[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 699: 134742.

[13] Liu M, Zheng Y, Li J, *et al*. Effects of molecular weight of PVA on formation, stability and deformation of compound droplets for ICF polymer shells[J]. Nuclear Fusion, 2016, 57: 016018.

[14] Liu M, Liu Y, Li J, *et al*. Improvement of sphericity of thick-walled polystyrene shell[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 484: 463-470.

[15] Liu M, Chen S, Qi X B, *et al*. Improvement of wall thickness uniformity of thick-walled polystyrene shells by density matching[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 241: 466-476.

[16] Liu X, Wu L, Zhao Y, *et al*. Study of compound drop formation in axisymmetric microfluidic devices with different geometries[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 533: 87-98.

[17] 陈淑玲, 刘鹏飞, 朱志强, 等. 几种醇类水溶液表面张力的实验研究[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(1): 112-115.
Chen S L, Liu P F, Zhu Z Q, *et al*. Experimental study on surface tension of several alcohol aqueous solutions[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(1): 112-115.

[18] Slavomír S, Richard K, Zlata K T, *et al*. Atmospheric-pressure air plasma sources for cleaning and activation of float soda-lime glass: effects and comparison[J]. Surfaces and Interfaces, 2023, 40: 103080.

[19] 马良, 刘肖斌, 张志耀, 等. 离子清洗工艺在芯片键合前的应用[J]. 电子工艺技术, 2021, 42(3): 174-177.
Ma L, Liu X B, Zhang Z Y, *et al*. The application of plasma cleaning process before chip bonding[J]. Electronics Process Technology, 2021, 42(3): 174-177.

[20] Zhang Y, Yang J, Li B, *et al*. Density, viscosity, surface tension of 1, 3-propanediol + dimethyl sulfoxide mixed solutions and their intermolecular forces from spectra and computational chemistry[J]. Fluid Phase Equilibria, 2021, 534: 112965.

Preparation of Millimeter-Scale Polystyrene-Polyvinyl Alcohol Bilayer Hollow Microspheres for Inertial Confinement Fusion Targets

Lin Yan, Meifang Liu, Hao Liu, Jie Li, Qiang Chen, Xiaoyu Yang, Yuhang Zhou, Kai Du
(*Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China*)

ABSTRACT: In light of the increasing diameter requirements for polystyrene-polyvinyl alcohol (PS-PVA) bilayer hollow microspheres in inertial confinement fusion (ICF) physics experiments, a 3D spin-coating method based on planar spin-coating was proposed in this paper as a means of overcoming the limitation of the traditional emulsion encapsulation method in preparing microspheres of a millimeter scale and above. A three-dimensional spin-coating apparatus was devised and constructed for the generation of PVA films in situ on the surface of millimeter-scale (approximately 1500 μm) monodisperse PS microspheres through solvent evaporation. The interaction between the PS microsphere surface and the highly alcoholysis degree PVA was enhanced by oxygen (O_2) plasma treatment, which facilitated the spreading of PVA solution on the surface of PS microsphere. In combination with the optimization of the key parameters, the morphology and thickness of the PVA liquid film were effectively controlled online. The homogeneity of the PVA film layer was improved and the millimeter-scale PS-PVA bilayer hollow microspheres were obtained.

Keywords: inertial confinement fusion; bilayer hollow microspheres; polystyrene; poly(vinyl alcohol); dip-spin-coating