

## 脉冲敲击技术对 PI 微球表面粗糙度的影响

曹洪<sup>1)2)</sup> 黄勇<sup>2)</sup> 陈素芬<sup>2)</sup> 张占文<sup>1)†</sup> 韦建军<sup>2)</sup>

1) (中国工程物理研究院, 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (四川大学原子与分子物理研究所, 成都 610065)

(2013 年 5 月 8 日收到; 2013 年 6 月 10 日收到修改稿)

作为点火靶重要候选靶丸之一, 聚酰亚胺 (PI) 空心微球采用降解芯轴技术结合双单体气相沉积聚合法 (VDP) 制备. 在 PI 涂层过程中微球碰撞对表面质量影响较大, 为了减小碰撞提高表面质量, 选用筛网盘做样品盘, 激励方式由压电振动模式改为脉冲敲击模式进行对比. 实验数据表明微球运动过程中碰撞是引起表面质量变差的原因, 通过理论分析确认了筛网盘通过减少接触点可以减少微球与微球间、微球与样品盘间的碰撞, 并且将压电振动模式改为脉冲敲击模式可以减小微球碰撞次数. 脉冲敲击模式与压电振动模式相比, 其可控性、微球弹跳幅度、消除静电等方面均优于压电振动. 对于微球壁厚均匀性而言, 压电振动略好于脉冲敲击, 但相差较小. 单个微球的壁厚最大偏差前者为  $0.68\ \mu\text{m}$ , 优于后者的  $0.73\ \mu\text{m}$ ; 单个微球壁厚平均值在同一批次内的最大起伏, 前者为  $0.26\ \mu\text{m}$ , 优于后者  $0.57\ \mu\text{m}$ . 白光干涉仪数据显示脉冲敲击起到了提高微球表面质量的作用, 其表面粗糙度  $Rq$  值由  $52\text{--}93\ \text{nm}$  减小到  $28\text{--}44\ \text{nm}$ .

**关键词:** 脉冲敲击技术, 聚酰亚胺靶丸, 表面粗糙度, 壁厚均匀性

**PACS:** 68.37.-d, 68.37.Yz, 78.20.Mg, 81.15.Gh **DOI:** 10.7498/aps.62.196801

## 1 引言

采用气相沉积法在微球表面上制备涂层, 由于兼具厚度可控性、易掺杂和壁厚相对较均匀等优点, 该方法已经广泛应用于惯性约束聚变 (ICF) 靶丸制备, 如低压等离子体辉光放电聚合法制备 CH 靶丸和气相沉积聚合 (VDP) 法制备聚酰亚胺 (PI) 靶丸<sup>[1-4]</sup>. VDP 法制备 PI 靶丸分为两个步骤, 第一步先将两种单体均苯四甲酸二酐 (PMDA) 和二胺基二苯醚 (ODA) 加热沉积到聚- $\alpha$ -甲基苯乙烯 (PAMS) 芯轴微球上形成聚酰胺酸 (PAA) 涂层, 第二步再将 PAMS/PAA 微球加热去除芯轴, 同时 PAA 转化为 PI, 形成空心的 PI 微球. 自 1995 年利弗莫尔实验室 (LLNL) 和罗彻斯特大学激光能量实验室 (LLE) 开始研制 PI 点火靶丸, 截止 2004 年已经制备出基本满足 ICF 要求的 PI 靶丸<sup>[5-7]</sup>. 目前美国点火实验碰到难题, 专家们正在积极寻找解决途径, 其中靶丸重新设计及提高质量也是重要研究内容

之一.

ICF 实验过程中, 为了使靶丸能均匀烧蚀和压缩, 必须将靶丸壁厚偏差和表面粗糙度均方根值 ( $Rq$ ) 严格控制在一定范围以内, 这对微球表面粗糙度、球形度和壁厚均匀性等参数有较高的技术要求. 一般要求靶丸的球形度优于 99%, 壁厚均匀性优于 95%,  $Rq$  值不超过  $10\text{--}30\ \text{nm}$ <sup>[8]</sup>. PI 微球制备过程中, 表面质量受多方面因素影响, 包括芯轴的表面质量、单体的化学配比、促使芯轴运动的激励方式、PI 热环化及去除 PAMS 芯轴过程等<sup>[9]</sup>. 单体气相沉积, 气体流动过程具有一定的方向性, 为了保证微球表面涂层的均匀性, 需使微球在一定激励方式下随机运动, 激励芯轴跳动必不可少. 现阶段采用的激励方式主要有压电振动、玻璃盘滚动、脉冲敲击等<sup>[10]</sup>. 国内 PI 靶丸研究才刚刚起步, 姚洪等人研究了 VDP 法制备 PI 平面薄膜以及改进装置提高了薄膜表面质量, 黄勇等人研究了 PAA/PAMS 复合微球制备以及弹跳性能, 张宝玲等人研究了芯轴跳动使得辉光放电聚合物 (GDP) 涂

† 通讯作者. E-mail: bjzzw1973@163.com

层表面质量的影响<sup>[8-13]</sup>. 为了最优化 PI 微球的表面质量, 本文重点研究不同激励方式对 PAA/PAMS 微球复合微球的表面粗糙度及壁厚均匀性的影响.

## 2 实验

### 2.1 PAMS/PAA 复合微球制备

选取直径约 800—1000  $\mu\text{m}$ , 壁厚约 10—15  $\mu\text{m}$ , 数量为 10—30 个 PAMS 芯轴微球置于匀速转动样品盘内. 采用 VDP 法在真空度为  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  Pa 的条件下, PMDA 和 ODA 沉积聚合到 PAMS 微球上形成 PAA/PAMS 复合微球. 在线膜厚测量仪监测沉积速率, 通过调整单体沉积速率保证沉积在微球表面的单体化学计量比接近 1:1. 同时, 以一定激励方式使微球做随机运动, 保证涂层均匀性<sup>[14]</sup>.

### 2.2 样品测试

采用美国 Veeco 公司 WYKO-NT1100 型白光干涉仪测量得到微球表面  $R_q$  值, 美国牛津公司 XTF-5011 型 X 射线机测量得到 PAA/PAMS 复合微球的壁厚及壁厚均匀性信息.

## 3 结果及讨论

### 3.1 微球碰撞对表面的影响

涂层过程中, 微球在一定激励方式下做随机运动, 微球与微球、微球与样品盘间的碰撞难以避免<sup>[15]</sup>. 为了研究该过程对微球表面的影响, 选取数量和质量相同的 PAMS 微球, 制备条件为 PMDA 130  $^{\circ}\text{C}$ , ODA 95  $^{\circ}\text{C}$ . 分别在静止和运动两种情况下制备 PAA/PAMS 复合微球, 得到其光学图片 (如图 1). 图 1(a) 中的微球表面较为光滑 (仅为涂层面), 白光干涉仪测其  $R_q$  值波动在 27 nm 左右与芯轴微球接近. 相反, 图 1(b) 中微球表面有较多黑斑, 测得其  $R_q$  值波动在 55 nm 左右. 该实验说明, 在制备 PAA/PAMS 复合微球时, 除去芯轴本身的影响外, 碰撞使微球表面质量变差.

### 3.2 激励方式对微球表面质量及壁厚均匀性影响

#### 3.2.1 不同激励方式下微球的表面粗糙度分析

选取数量相同, 直径约为 800—1000  $\mu\text{m}$  的 PAMS 微球, 放入筛网盘中. 随后, 将其固定在基底位置, 分别用压电振动和脉冲敲击两种激励方式, 来制备 PAA/PAMS 复合微球, 装置示意图如图 2.

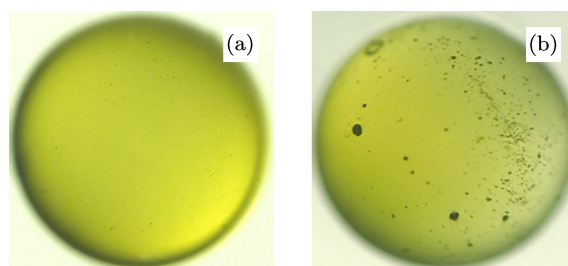


图 1 不同运动模式下微球图片 (a) 静止微球; (b) 跳动微球

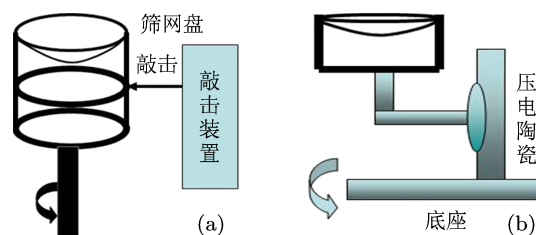


图 2 两种激励方式示意图 (a) 脉冲敲击装置图; (b) 压电振动装置图

同样选取制备条件为 PMDA 130  $^{\circ}\text{C}$ , ODA 95  $^{\circ}\text{C}$ , 沉积时间为 1 h. 为了使微球弹跳较好, 调节压电振动模式输出波形为正弦波, 电压为 0.49 V, 频率 900 Hz, 占空比为 50%. 脉冲敲击模式下调节敲击频率为 0.5 s, 敲击头离样品盘间距离为 1 mm 左右. 将 PAMS 芯轴微球编号为 a, 压电振动所得微球编号为 b, 脉冲敲击所得微球编号为 c, 分别选取代表性微球, 用 keyence 光学显微镜拍摄得到光学图片 (如图 3).

从图 3 可以看出, 图 3(b) 中微球的表面较为光滑, 少许黑点和水印是由于本身 PAMS 芯轴所残留, 无明显磨损. 然而, 图 3(c) 中微球表面有较多黑斑, 这是由于微球运动过程中与筛网以及其他微球间摩擦较为频繁所致<sup>[13]</sup>.

为了进一步了解两种模式下微球的表面质量, 选用白光干涉仪测量对其  $R_q$  值做初步测量, 筛选出其中明显变形和污染的数据, 可得到微球表面的白光干涉仪测量结果如图 4 和表 1.

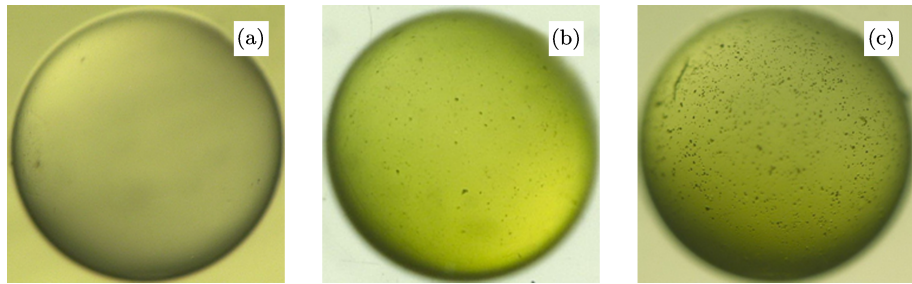


图3 不同微球的光学图片 (a) PAMS 芯轴, (b) 脉冲敲击, (c) 压电振动

表1 芯轴及不同弹跳模式下 PAA/PAMS 复合微球的  $R_q$  值/nm

	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$
PAMS 芯轴	28.9	27.1	29.7	22.6	26.6	29.2
压电振动	79.9	92.4	71.6	62.4	52.4	71.2
脉冲敲击	34.9	28.2	41.6	43.1	34.7	36.2

结合表 1 和图 4 中可以看出: 脉冲敲击所制备的 PAA/PAMS 复合微球的表面质量较好, 与芯轴微球接近,  $R_q$  值在 28—44 nm 之间. 反之, 压电振动所得微球表面质量较差且波动较大,  $R_q$  值波动在 52—93 nm 之间. 由以上分析可知, 在实验参数和其

他实验条件不变的情况下, 将压电振动模式改为脉冲弱力敲击可以有效的改善 PAA/PAMS 复合微球的表面质量.

### 3.2.2 激励装置的改进对微球碰撞的影响理论分析

从实验数据可以看出脉冲敲击模式下制备所得复合微球表面质量较好, 为了探究产生这种现象的原因, 对其做理论分析. 一般的激励系统主要包括样品盘和激励方式, 首先样品盘选择筛网盘, 可对比分析微球在平面盘内和筛网盘内运动情况及其对碰撞影响, 示意图如图 5.

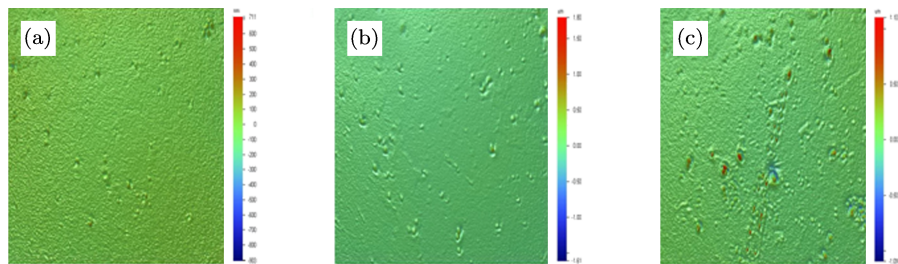


图4 不同敲击模式下微球表面展平后白光干涉图像 (a) PAMS 芯轴; (b) 脉冲敲击; (c) 压电振动

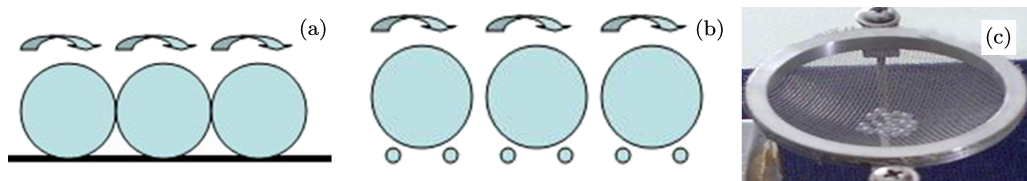


图5 不同样品盘内微球运动情况 (a) 固体平面盘内; (b) 筛网盘内; (c) 筛网盘实物图

图 5(a) 中显示微球与固体平面盘接触处为一个面, 当基板转动和受到外力作用时, 微球与微球、微球与基底盘的接触线就会连续的呈现出来, 碰撞频率增加, 致使微球表面质量变差. 相反, 从图 5(b) 中可以看出微球与筛网基底盘接触点仅为 3 到 4 个, 接触点较少, 有效的减小微球与微球、微球与基底盘的接触, 基底旋转和受到外力作用微球可从

一个孔跳到另一个孔, 碰撞频率大大减小<sup>[16]</sup>. 另外为了最小化接触点一般选择网孔直径约为微球直径的 60%, 细丝直径约为微球直径的 20%—23%, 相关文献已有所叙述<sup>[9]</sup>.

表 1 实验数据表明激励方式的改变, 对微球碰撞也有较大影响, 为了探究两种模式的不同, 分别对其原理和对微球碰撞的影响进行分析. 压电振动

采用压电陶瓷薄片作为振动源, 选用水平振动方式, 该过程可简化为周界固定的圆形薄板的弯曲振动, 平面微球受迫做简谐振振动, 其挠度

$$\omega_1 = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (A_1 \cos(m\varphi) + A_2 \sin(m\varphi)) + \left[ J_m \left( \frac{\beta_{mn} \pi r}{\alpha} \right) - \frac{J_m(\pi \beta_{mn})}{I_m(\pi \beta_{mn})} I_m \left( \frac{\pi \beta_{mn} r}{a} \right) \times e^{i\omega_{mn} t} \right]. \quad (1)$$

频率

$$f_{mn} = \frac{\pi d}{2\sqrt{12}a^2} \sqrt{\frac{Y}{\rho(1-\sigma^2)}} (\beta_{mn})^2, \quad (2)$$

其中  $J_m$  为  $m$  阶贝塞尔函数,  $I_m$  为虚宗量贝塞尔函数,  $m, n, A_1$  和  $A_2$  为常数,  $a$  为晶振片半径,  $Y$  为导纳,  $d$  为晶振片厚度,  $f_{mn}$  为谐振频率,  $\rho$  为晶振片材质密度,  $\sigma$  为晶振片材质常数,  $t$  为时间, 球坐标系内  $r$  为半径,  $\varphi$  和  $\beta$  分别为  $x$  和  $y$  轴方向的偏转角<sup>[17]</sup>. 小球平面内做简谐振振动, 其运动方程为  $X = A \cos(\omega_2 t + \varphi)$  联立可知可通过调节挠度和频率来调节小球运动的位移, 其中  $A = \omega_1$ ,  $f_{mn} = \omega_2/2\pi$ . 脉冲敲击模式为可调时间的脉冲信号发生器控制电磁继电器, 从而带动敲击头周期性撞击样品盘达到微球弹跳的目的. 敲击过程可简化为弹簧的受迫敲击, 当电磁继电器中通电线圈, 接通电源后吸住敲击头压缩弹簧, 切断电源后弹簧恢复原状产生弹力  $F = kx$ , 周期性的吸附和释放, 敲击样品盘迫使微球运动.

取筛网盘内的小球为理想化模型, 数量为  $N$  个, 所占体积为  $V$ . 假设小球的直径为  $2R$ , 首先假设某个微球运动, 其他微球固定不动. 求该微球与其他微球在单位时间内的碰撞次数. 该微球的运动轨迹空间形成一个圆柱体, 圆柱直径为  $2R$ , 截面面积为  $2\pi RS$ , 其中  $S$  为微球运动的路程. 凡是出现在运动轨迹柱体内的微球都会与该微球相撞. 单位时间  $t(1s)$  内, 微球运动的路程为  $S = \bar{u} \times 1 s$ . 其中  $\bar{u}$  为微球运动的平均速度. 单位时间内轨迹圆柱体体积为  $V_c = \pi R^2 \bar{u}$ , 则单位体积的微球个数为  $\frac{N}{V}$ , 那么单位时间内该微球的碰撞次数为  $Z = N/V \pi R^2 \bar{u}$ <sup>[18]</sup>.

那么沉积时间  $t$  内, 对于压电振动而言, 假设某个微球运动, 由于其做简谐振振动, 运动一个周期内会与其他微球发生两次碰撞, 这时微球该微球的碰撞次数应为  $Z_1 = 2 N/V \pi R^2 \bar{u}_1 f_1 t$ ,  $\bar{u}_1 = S_1/kT_1$ , 对于

小球所运动的路程  $S_1 = n_1 D$ , 故而

$$Z_1 = 2 \frac{N}{V} \pi R^2 \frac{n_1 D}{kT_1} f_1 t,$$

即

$$Z_1 = \frac{N}{V} \pi \frac{n_1}{k} R^3 f_1^2 t, \quad (3)$$

其中  $D$  为微球直径,  $n_1$  和  $k$  为常数,  $f_1$  为微球运动频率, 实验发现  $1/T_1 = f_1 = 900 \text{ Hz}$  时微球跳动较好且保证每个微球都在跳动.

对于脉冲敲击而言, 微球受到敲击力后会沿一侧运动. 脉冲信号内运动一次, 理论上其碰撞次数  $Z_2 = \frac{N}{V} \pi R^2 \bar{u}_2 f_2 t$ , 其中  $\bar{u}_2 = S_2/kT_2$ , 小球所运动的路程为  $S_2 = n_2 D$ , 故而

$$Z_2 = \frac{N}{V} \pi R^2 \frac{n_2 D}{kT_2} f_2 t,$$

即

$$Z_2 = \frac{1}{2} \frac{N}{V} \pi \frac{n_2}{k} R^3 f_2^2 t, \quad (4)$$

其中  $D$  为微球直径,  $n_2$  为常数,  $f_2$  为微球在脉冲敲击模式下运动频率, 实验发现  $1/T_2 = f_2 = 2 \text{ Hz}$  时运动较好.

压电振动模式下小球运动为简谐运动, 而脉冲敲击只在敲击瞬间运动, 相同时间  $t$  内,  $S_1 \gg S_2$ ,  $f_1 \gg f_2$ , 故  $Z_1 \gg Z_2$ , 即脉冲敲击模式下微球运动次数小于压电振动模式, 两种模式下微球运动示意图如图 6.

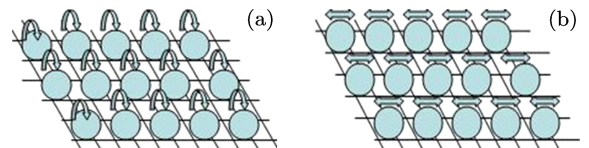


图 6 两种模式下微球的运动情况 (a) 脉冲敲击; (b) 压电振动

实验操作过程中, 两种激励方式性能对比 (如表 2).

表 2 两种激励方式性能对比

	可控性	跳动幅度	间隙时间	碰撞概率	消除静电效果
压电振动	差	大	连续性	大	差
脉冲敲击	好	小	间歇性	小	强

从表 2 中可以看出, 脉冲敲击技术在这些方面均优于压电振动技术, 这是由于脉冲敲击模式只须控制敲击频率和敲击力度来控制微球的运动, 跳动幅度可限定在一个很小的范围内. 同时, 微球只是受到敲击的瞬间运动, 其他时间是静止的, 只要盘



内微球数量适中,微球在运动的瞬间更容易做到不会或很少相互接触和碰撞,从而保证微球从一个筛网孔跳到另外一个,碰撞几率大大减小.同时瞬间冲击力,能消除微球间由于摩擦产生的静电作用.相反,压电振动模式需通过控制波频、电压和占空比等多方面因素,较为繁琐<sup>[8]</sup>.微球在一个频率下很难控制到一个合适弹跳幅度,多次验证发现其弹跳幅度仍然较大,同时微球运动过程为水平方向上做简谐运动(如图6),理论计算表明其碰撞次数较多.再者,微球自身无法消除运动过程反复摩擦产生的静电,随着时间的增加微球在筛网盘内起跳困难或者无法起跳<sup>[19]</sup>.

### 3.2.3 不同激励方式下微球的壁厚均匀性分析

激励方式改变对微球表面质量有较大影响,为了进一步了解其对微球壁厚均匀性的影响,选取两种模式下制备的PAA/PAMS复合微球做X射线分析,研究其对壁厚的影响<sup>[20]</sup>.图7为不同弹跳模式下复合微球以及芯轴微球的X射线照片,为了清晰的分辨涂层情况,只截取球的一部分照片作为对照.从X射线图片可以看出7(a)中芯轴微球只有一层,7(b)和(c)中复合微球的PAMS芯轴层和PAA涂层分界面较为清晰,其靶丸轮廓数据如表3.

表3 不同角度下单个PAA/PAMS复合微球壁厚(No.1—No.3:脉冲敲击, No.4—No.6:压电振动)

角度/(°)		0	60	120	180	240	300	平均值	单个偏差	平均值偏差
PAA 微球厚度/ $\mu\text{m}$	No.1	5.55	5.76	6.12	6.28	5.96	5.61	5.88	0.73	0.57
	No.2	5.02	5.42	5.62	5.35	5.23	5.26	5.31	0.60	
	No.3	4.90	5.36	5.30	5.45	5.62	5.78	5.40	0.72	
	No.4	5.24	5.62	5.36	5.48	5.92	5.31	5.48	0.68	0.26
	No.5	5.11	5.59	5.34	5.26	5.38	5.75	5.40	0.64	
	No.6	5.43	5.60	6.01	5.59	5.63	5.72	5.66	0.58	

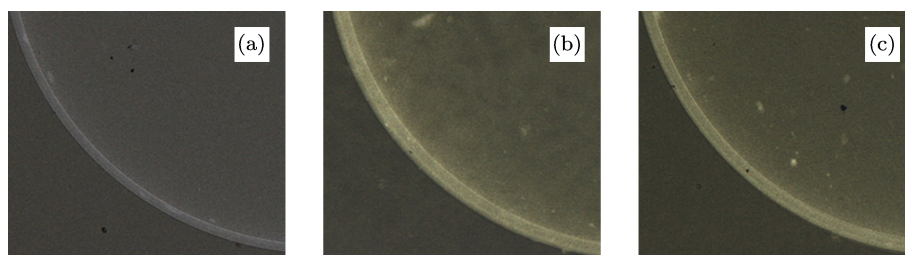


图7 微球的X射线图像 (a) PAMS芯轴; (b) 脉冲敲击; (c) 压电振动

结合表3和图7可以看出,对于不同角度下单个PAA/PAMS复合微球而言,压电振动模式下制备得到微球壁厚差波动在 $0.68\ \mu\text{m}$ 内;而脉冲敲击制备得到微球壁厚差 $0.73\ \mu\text{m}$ 内.单个微球壁厚平均值在同一批次内的最大起伏,压电振动为 $0.26\ \mu\text{m}$ ,而脉冲敲击模式为 $0.57\ \mu\text{m}$ .两种模式下微球壁厚相差较小,压电振动壁厚均匀性略好于脉冲敲击.由以上数据分析可知,在其他实验参数不变的情况下,压电振动制备得到PAA/PAMS复合微球壁厚均匀性略好于脉冲敲击,但相差较小,均在 $1\ \mu\text{m}$ 内.

## 4 结论

采用气相沉积聚合法制备PI微球,沉积过程

中碰撞是引起表面质量变差的原因,静止和运动两种方式下,微球表面质量相差较大.前者 $Rq$ 值为 $27\ \text{nm}$ ,后者 $Rq$ 值为 $55\ \text{nm}$ .为了减少微球碰撞,本小组将选用网孔和细丝直径较为适中筛网盘,有效的减少了这种碰撞.同时将激励方式由压电振动改为脉冲敲击,其在可控性、减小微球碰撞概率、消除静电方面均有所提高,所制备的微球表面质量较好.白光干涉仪下测得脉冲敲击微球 $Rq$ 值波动在 $28\text{—}44\ \text{nm}$ 优于压电振动的 $52\text{—}93\ \text{nm}$ .而对于壁厚而言,压电振动略好于脉冲敲击,但相差较小.单个微球壁厚差前者为 $0.68\ \mu\text{m}$ 略优于后者的 $0.73\ \mu\text{m}$ ;单个微球壁厚平均值在同一批次内的最大起伏,前者为 $0.26\ \mu\text{m}$ 略优于后者的 $0.57\ \mu\text{m}$ ,实验表明,脉冲敲击技术能够有效提高微球表面质量,

且所得微球壁厚较为均匀, 为 PI 微球用于 ICF 实验提供了必要条件.

单从降低其表面粗糙度考虑, 目前脉冲敲击技术能够制备表面粗糙度  $Rq$  值在 50 nm 以下的空心

PI 微球. 表面粗糙度要求方面已经接近 ICF 实验要求, 但要最优化 PI 微球的表面光洁度, 还需在复合微球热环化、去除芯轴等方面做进一步研究.

- [1] Tsai F Y, Harding D R, Chen S H, Blanton T N 2003 *Polymer* **44** 995
- [2] Yan J C, He Z B, Yang Z L, Zhang Y, Tang Y J, Wei J J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 036501 (in Chinese) [闫建成, 何智兵, 阳志林, 张颖, 唐永健, 韦建军 2011 物理学报 **60** 036501]
- [3] Zhang Y, He Z B, Li P, Yan J C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 126501 (in Chinese) [张颖, 何智兵, 李萍, 闫建成 2011 物理学报 **60** 126501]
- [4] Yan J C, He Z B, Yang Z L, Chen Z M, Tang Y J, Wei J J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3290 (in Chinese) [闫建成, 何智兵, 阳志林, 陈志梅, 唐永健, 韦建军 2010 物理学报 **59** 3290]
- [5] Jordan A, Forbes P, Mark H, Jeff G, Bobby W 2006 *Fusion Science and Technology* **49** 832
- [6] Alfonso E L, Chen S H, Gram R Q 1998 *Fusion technology* **13** 2988
- [7] Liu J G, Yang S Y 2006 *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering* **26** 276 (in Chinese) [刘金刚, 杨士勇 2006 核科学与工程 **26** 276]
- [8] Yao H, Zhang Z W, Huang Y, Li S, Wang G X 2011 *Surface Technology* **6** 53 (in Chinese) [姚洪, 张占文, 黄勇, 李赛, 汪国秀 2011 表面技术 **6** 53]
- [9] Huang Y, Li B, Zhang Z W, Bai H, Chu Q M, Ma X J, Wei S, Shi T 2008 *High Power Laser and Particle Beam* **20** 1125 (in Chinese) [黄勇, 李波, 张占文, 白宏, 初巧妹, 马小军, 魏胜, 师涛 2008 强激光与粒子束 **20** 1125]
- [10] Huang Y, Zhang Z W, Liu Y Y, Li B, Chen S F, Qi X B 2011 *High Power Laser and Particle Beam* **23** 1527 (in Chinese) [黄勇, 张占文, 刘一扬, 李波, 陈素芬, 漆小波 2011 强激光与粒子束 **23** 1527]
- [11] Zhang Z W, Qi X B, Li B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 145204 (in Chinese) [张占文, 漆小波, 李波 2012 物理学报 **61** 145204]
- [12] Yao H, Zhang Z W, Huang Y, Li S, Li B 2011 *High Power Laser and Particle Beam* **7** 1861 (in Chinese) [姚洪, 张占文, 黄勇, 李赛, 李波 2011 强激光与粒子束 **7** 1861]
- [13] Zhang B L, He Z B, Wu W D, Liu X H, Yang X D, Ma X J, Yang M S, Lin H P 2008 *High Power Laser and Particle Beam* **20** 1109 (in Chinese) [张宝铃, 何智兵, 吴卫东, 刘兴华, 杨向东, 马小军, 杨蒙生, 林华平 2008 强激光与粒子束 **20** 1109]
- [14] Letts S A, Anthamatten M, Buckley S R 2004 *Fusion technology* **45** 180
- [15] Liang T, Makita Y, Kimura S 2001 *Polymer* **42** 4867
- [16] Chen K C, Nikroo A 2006 *Fusion science technology* **49** 721
- [17] Wang J F, Su W B, Wang C M, Gai Z G 2011 *Piezoelectric Vibration theory and application* (Vol. **1**) (Beijing: Science Press) p78 (in Chinese) [张矜奉, 苏文斌, 王春明, 盖志刚 2011 压电振动理论与应用 (第一版) (北京: 科学出版社) 第 78 页]
- [18] Qin Y H 1999 *Heat* (Vol. **2**) (Beijing: Higher Education Press) p131 (in Chinese) [秦允豪 1999 热学 (第二版) (北京: 高等教育出版社) 第 131 页]
- [19] Tsai F Y, Harding D R, Chen S H 2002 *Fusion technology* **60** 178
- [20] Zhao X S, Gao D Z, Ma X J, Tang Y J, Zhang L, Sun T, Dong S 2012 *Atomic Energy Science and Technology* **46** 447 (in Chinese) [赵学森, 高党忠, 马小军, 唐永建, 张林, 孙涛, 董申 2012 原子能与科学技术 **46** 447]

# Influence of pulse tapping technology on surface roughness of polyimide capsule

Cao Hong<sup>1)2)</sup> Huang Yong<sup>2)</sup> Chen Su-Fen<sup>2)</sup> Zhang Zhan-Wen<sup>1)†</sup> Wei Jian-Jun<sup>2)</sup>

1) (*Research Centre of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

(Received 8 May 2013; revised manuscript received 10 June 2013)

## Abstract

As one of the most important ignition capsules, the polyimide capsule was prepared by depolymerizable mandrels technique combined with vapor deposition polymerization method. Instead of the plane pan and piezoelectric vibration model, the mesh pan and pulse tapping was selected to reduce microsphere collision so that surface quality was improved in polyimide fabrication. Experimental and theoretical results show that the capsule surface becomes more rough because of collisions between microspheres and the pan. The mesh pan could reduce microsphere collisions, which was also reduced by changing piezoelectric vibration into pulse tapping. As a result, root-mean-square value ranges from 52—93 nm to 28—44 nm. There are many advantages with pulse tapping model, such as better controllability, lower bounce rate and less static; however piezoelectric vibration model is slightly better than the pulse tapping in wall thickness uniformity. Measurements of single microsphere show that the deviation of the former is 0.68  $\mu\text{m}$  which is better than that of the latter (0.73  $\mu\text{m}$ ). For the average value of microspheres in the same batch, the former has a value 0.26  $\mu\text{m}$  which also is better than the latter (0.57  $\mu\text{m}$ ).

**Keywords:** pulse tapping technology, polyimide capsule, surface roughness, wall thickness uniformity

**PACS:** 68.37.—d, 68.37.Yz, 78.20.Mg, 81.15.Gh

**DOI:** 10.7498/aps.62.196801

---

† Corresponding author. E-mail: bjzzw1973@163.com