

易碎 Be 靶丸表面精密抛光技术与理论分析

李文琦^a, 张建波^a, 李恺^{a,b}, 马小军^a, 罗炳池^{a,b},
蒋晓东^a, 吴卫东^{a,b}, 戴亚平^a

(中国工程物理研究院 a.激光聚变研究中心, b.等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: **目的** 建立一种新的易碎空心微球抛光机模型, 并研制出该样机, 用于空心 Be 微球的精密抛光。**方法** 采用限位孔设计解决微球低应力夹持问题, 添加不同数量的配重球, 用于调整待抛球的滑动摩擦力大小和防止其飞出限位孔。上下盘偏心放置, 实现微球无规运动。采用白光干涉仪分析抛光后 Be 微球的表面粗糙度。**结果** 抛光机模型计算表明, 待抛球一直在做周期性的变速和变加速运动, 其周期大小由上盘转动频率决定, 变加速运动增加了微球的滑动摩擦成分, 有利于提高微球抛光效率。此外, 待抛球表面抛光轨迹呈现无规行走, 这有利于抛光的均匀性。使用该原理抛光机, 在 24 h 内能够将直径 1.2 mm、均方根表面粗糙度 510 nm 的易碎铍(Be)靶丸抛光至 85 nm。**结论** 理论和实验共同验证了易碎微球抛光机模型的合理性和可行性, 上下盘放置方式、限位孔大小设计和配重球数量等关系着易碎微球的抛光均匀性和抛光效率。**关键词:** 精密抛光; 无规行走; 表面粗糙度; 铍靶丸

中图分类号: TG356 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)05-0286-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.040

Surface Precision Polishing Technique and Theory Analysis for Fragile Be Capsule

LI Wen-qi^a, ZHANG Jian-bo^a, LI Kai^{a,b}, MA Xiao-jun^a, LUO Bing-chi^{a,b},
JIANG Xiao-dong^a, WU Wei-dong^{a,b}, DAI Ya-ping^a

(a.Research Center of Laser Fusion, b.Science and Technology on Plasma Physics Laboratory,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: To establish a new model of polishing machine for friable hollow capsule (invention patent ZL201510335040.6), and develop a prototype for the precise polishing of hollow Be capsules. The restriction hole design was used to solve the problem of low stress clamping of sphere. Different numbers of counterweight spheres were added to adjust the sliding friction force and prevent the spheres from flying out of the restriction hole. The upper and lower grinding pans were placed eccentrically to achieve random movement of the spheres. The surface roughness of the polished Be capsules was analyzed by white light interferometer. The model calculation shows that the unpolished spheres always roll periodically in the mode of variable speed and variable acceleration. The periodicity is determined by the rotation frequency of the top pan. The spheres of variable acceleration

收稿日期: 2018-08-31; 修订日期: 2018-11-07

Received: 2018-08-31; Revised: 2018-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(11805176); 中物院超精密加工技术重点实验室基金(ZZ15011)

Fund: National Natural Science Foundation of China (11805176) and Laboratory of Precision Manufacturing Technology, CAEP (ZZ15011).

作者简介: 李文琦(1992—), 男, 初级工程师, 主要研究方向为真空镀膜和表面处理。

Biography: LI Wen-qi (1992—), Male, Junior engineer, Research focus: vacuum coating and surface treatment.

通讯作者: 罗炳池(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为铍材料制备。邮箱: luobingchi@sina.com.

Corresponding author: LUO Bing-chi (1978—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: beryllium material preparation. E-mail: luobingchi@sina.com.

motion increase the sliding friction components and are beneficial to improving the polishing efficiency. In addition, the surface polishing trajectory presents random walk, which can ensure the polishing uniformity. The fragile beryllium (Be) capsule with a diameter of 1.2 mm and a root mean square surface roughness of 510 nm can be polished to 85 nm in 24 hours by this polishing machine. The rationality and feasibility of the fragile sphere polishing machine model are verified by both theory and experiment. The polishing uniformity and polishing efficiency of fragile spheres are closely related to the placement mode of upper and lower grinding pans, the size of restriction hole and the number of counterweight spheres.

KEY WORDS: precision polishing; random walk; surface roughness; beryllium capsule

随着惯性约束聚变 (ICF) 和高能量密度科学 (HEDS) 的发展, 铍 (Be) 靶丸已成为一种重要的燃料容器。它直径在 1~2 mm, 壁厚 50~200 μm , 内部充有氘、氚燃料^[1-7], 用于热核聚变反应。为了抑制靶丸烧蚀期间 Rayleigh-Taylor 流体力学的不稳定性增长, 靶设计者对 Be 靶丸表面质量提出苛刻要求, 粗糙度要求达到纳米量级, 约 20 nm^[4-7]。即使最新的单点金刚石超精密切削技术, 也无法达到这些指标。故 Be 靶丸需要精密抛光处理, 提高其表面光洁度。为了保持靶丸内爆期间的对称压缩, 抛光过程中不能破坏其球形度, 要求靶丸表面被均匀抛光。由于铍材料脆性大, 薄壁的 Be 靶丸在夹持或抛光过程中易破裂。现有抛光技术, 如机械抛光、超声波抛光、化学抛光、粒子束抛光、电解抛光、流体抛光、磁流变抛光技术、激光抛光技术、纳米抛光等, 它们主要应用在机械加工面、平面薄膜和光学玻璃等的大尺寸平面物体的初抛和精抛, 很难拓展到毫米级尺寸、易碎、空心球体的精密抛光^[8-12]。

目前从事 ICF 空心微球抛光的主要有美国利弗莫尔国家实验室 (LLNL)、美国通用原子 (GA) 和洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL)。Hoppe 等^[13]采用机械抛光技术, 通过改进 V 型槽滚轴抛光机, 让空心微球在 V 型槽上随机滚动来实现抛光。该法优点是能适合于易碎的空心微球抛光, 但存在诸多缺点: 微球无夹持和限位, 转速太快, 易飞出 V 型槽; 靠自重来增加摩擦力, 无法施加或调节抛光压; 每次只能放入一个微球, 抛光效率极低。我国目前主要集中在精密滚轴抛光技术上, 均方根表面粗糙度在 100 nm 水平, 还无暇顾及 ICF 领域易碎空心微球的抛光。基于美国的空心微球抛光技术和金相抛光技术的启示, 文中提出一种新的、高效率、易碎的空心微球抛光模型, 并成功地研制出该抛光样机。利用研制出的易碎空心微球抛光机, 对空心 Be 靶丸进行了抛光研究。此外, 理论分析了微球的受力状态, 如速度和加速度, 以及表面抛光轨迹, 并对 Be 靶丸抛光效果进行解释。

1 实验

文中的易碎空心微球抛光机已经获发明专利 (ZL201510335040.6), 图 1 给出了该装置的示意图。

它是由底部粘有抛光布的旋转盘和顶部开有限位孔的逆向旋转盘构成, 限位孔解决了微球夹持应力问题, 光滑的配重球用于施加和调节抛光压。根据它的抛光原理和结构方式, 该微球抛光样机适用于各种空心金属微球表面抛光, 也能对各种材质的轴承进行精密抛光。

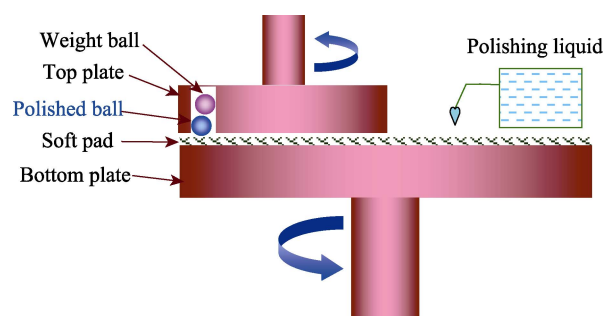


图 1 易碎空心微球抛光机
Fig.1 Schematic diagram of a polisher for friable hollow capsule

实验时首先将待磨微球放置于上盘的限位孔中, 然后调节上下盘间距。合适的盘间距不但确保抛光液的顺畅排除, 而且能够防止微球从盘间滑出。然后设置上下盘的旋转速度和方向进行抛光。抛光过程中需要不断滴入抛光液, 主要起到润滑和冷却效果, 防止微球表面因摩擦过大造成表面或亚表面损伤。此外, 摩擦产生的热能够使抛光球变形或熔化, 抛光液的添加能够起到冷却作用。实验中抛光液主要使用中性油基液体或者微米级氧化铝、氧化锆、金刚石等悬浮液。采用非接触式白光干涉仪测量微球表面的均方根粗糙度。

2 结果与讨论

2.1 微球运动方程

微球的受力状态, 即运动速度与加速度是抛光机设计的关键参数, 它直接关系着微球抛光效果和效率。笔者团队设计研制的微球抛光机如图 2 所示, 由上下两直径不等的磨盘组成, 其中上盘直径为下盘的 2 倍, 它们作相对旋转。根据微球运动位置的几何关系, 可以给出其运动方程。

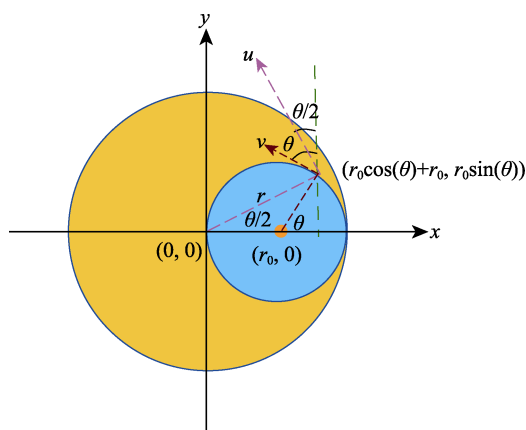


图2 微球运动速度分析
Fig.2 Analysis of sphere motion speed

上盘半径为 r_0 ，下盘半径为 R_0 ($R_0 = 2r_0$)，上盘圆周上任一点至圆心方向与 x 轴的夹角为 θ ，上盘转速为 n_0 ，下盘转速为 n_1 ，时间为 t ，上盘圆周上任一点至上盘圆心的距离为 r 。 $t=0$ 时， $\theta=0$ ，小球位于 $(2r_0, 0)$ 位置。不考虑微球与抛光布的相对滑动和微球垂直方向的跳动，经时间 t 后， θ 和 r 分别为：

$$\theta = 2\pi n_0 t \quad (1)$$

$$r = \sqrt{(r_0 \cos \theta + r_0)^2 + (r_0 \sin \theta)^2} = r_0 \sqrt{2 + 2 \cos \theta} \quad (2)$$

上盘旋转时，通过限位孔侧壁推小球，微球运动方向与上盘方向一致。 x 、 y 方向微球运动速度分别为 v_x 和 v_y ，表示为：

$$v_x = -2\pi n_0 r_0 \sin \theta \quad (3)$$

$$v_y = 2\pi n_0 r_0 \cos \theta \quad (4)$$

下盘旋转时，通过下盘表面对微球底部的摩擦带动微球运动，微球运动方向与下盘方向相反。假如微球与下盘无相对滑动， x 、 y 方向运动速度分别为 u_x 和 u_y ，表示为：

$$u_x = -2\pi n_1 r_0 \sqrt{2 + 2 \cos \theta} \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) = -2\pi n_1 r_0 \sin \theta \quad (5)$$

$$u_y = 2\pi n_1 r_0 \sqrt{2 + 2 \cos \theta} \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) = 2\pi n_1 r_0 (1 + \cos \theta) \quad (6)$$

根据矢量运算，两盘相反旋转时， x 、 y 方向合速度 V_x 和 V_y 分别为：

$$V_x = -2\pi n_0 r_0 \sin \theta - 2\pi n_1 r_0 \sin \theta \quad (7)$$

$$V_y = 2\pi n_0 r_0 \cos \theta + 2\pi n_1 r_0 (1 + \cos \theta) \quad (8)$$

对方程(7)、(8)速度求导，可以求出 x 、 y 方向的合加速度 a_x 和 a_y 分别为：

$$a_x = -4\pi^2 n_0^2 r_0 \cos \theta - 4\pi^2 n_1^2 r_0 \cos \theta \quad (9)$$

$$a_y = -4\pi^2 n_0^2 r_0 \sin \theta - 4\pi^2 n_1^2 r_0 \sin \theta \quad (10)$$

结合式(7)~(10)和抛光设备参数，可以计算微球运动速度和加速度。若微球抛光机上盘半径为 $r_0 = 30$ mm，下盘半径 $R_0 = 60$ mm，上盘转速 $n_0 = 4$ r/s，下盘转速 $n_1 = 6$ r/s，那么在 1 s 内，微球的速度和加速度

分布如图 3 所示。

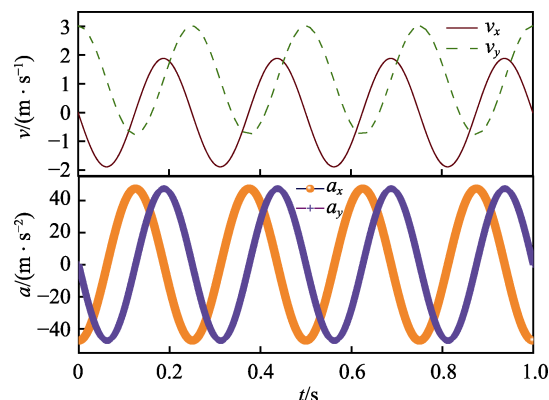


图3 微球运动速度和加速度随时间的变化
Fig.3 Both speed and acceleration of sphere motion change with time

在 1 s 内，微球运动速度在 x 和 y 方向均呈周期变化，它们周期相等，为 0.25 s。这主要取决于上盘运动频率，并与之保持一致。 x 方向分速度与 y 方向分速度分别用实线和虚线表示。两者似正余弦函数变化，只是初始相位和平衡位置不一致。在 0 时刻，微球位于 $(2r_0, 0)$ 位置，初速度为 $(0, 0)$ 。随着时间的增加，小球在 x 方向的速度呈现正弦函数变化，振幅为 1.88 m/s，平衡位置在 $y=0$ 。 y 方向速度呈现余弦函数变化，其平衡位置不在零点，最大速度为 3.00 m/s。

微球加速度与速度变化类似，呈现正余弦函数关系。在 x 和 y 方向变化周期相等，为 0.25 s，振幅为 47.36 m/s²，且平衡位置均在 $y=0$ 。在 0 时刻， x 方向加速度为 -47.36 m/s²，为该方向最大的加速度，而 y 方向加速度为 0。

对于运动的微球，所受的摩擦力有滚动摩擦和滑动摩擦力。通常金属与抛光线布的滚动摩擦系数 μ_r 和滑动摩擦系数 μ_s 相差较大。铍球与抛光线布的滚动摩擦系数约 0.03，而滑动摩擦系数为 0.22。显然，滑动摩擦系数比滚动摩擦系数大 7 倍^[14]。在抛光过程中，微球所受摩擦力 f 为：

$$f = mgu \quad (11)$$

式中： m 为微球质量； g 为重力加速度，取 9.8 N/kg； μ 为摩擦系数。

该摩擦力提供的加速度为 a_m ：

$$a_m = gu = 9.8\mu \quad (12)$$

显然，摩擦力产生的加速度与微球质量无关，仅与摩擦系数大小有关。由滚动和滑动提供的加速度分别为 0.294、2.156 m/s²。当微球加速度小于 0.294 m/s² 时，主要为滚动摩擦力；当微球加速度大于 2.156 m/s² 时，为滑动摩擦力；如果介于两者之间，既有滚动摩擦力，又有滑动摩擦力。由方程(9)、(10)式可知，选择不同的上下盘半径和转速，可以调节滑动摩擦和滚动摩擦力的比率。通常微球倾向于滚动运动，而滚动摩擦力极小，不利于表面切削，抛光效率较低，故亟

待增加微球的滑动摩擦成分。要使微球长期处于滑动摩擦占优和滚动摩擦的混合状态, 必须让微球一直做变加速运动, 且加速度要大于一定值。对于自行设计的易碎空心铍微球抛光机, 抛光微球加速度似正余弦变化, 增加铍微球与抛光布的滑动摩擦力成分, 使抛光效率得到提升。此外, 调整配重球的数量或质量, 也能改变微球与抛光布之间的摩擦力, 提高微球的抛光效率。

2.2 微球抛光轨迹

微球表面是否被均匀地抛光, 需求解微球的抛光轨迹。根据微球运动方程, 它可分解成 x 方向和 y 方向的运动, 而在 z 方向速度为 0。因此, 微球表面被抛光点位置由绕 x 、 y 轴旋转的复合运动来决定, 如图 4 所示。

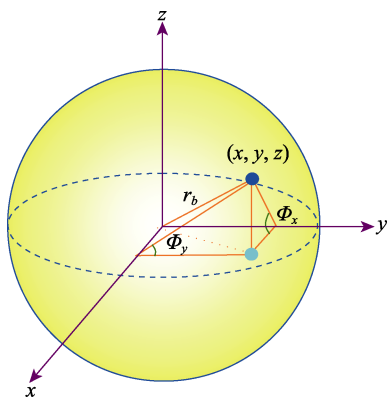


图 4 直角坐标下微球抛光轨迹
Fig.4 Schematic diagram of spherical polishing trace

微球沿 x 方向平动, 可以等效为微球绕 y 轴旋转, 旋转角度为 Φ_x 。同样地, 微球沿 y 方向平动, 可以视为它绕 x 轴旋转, 其旋转角度为 Φ_y 。若抛光微球半径为 r_b , x 、 y 方向的合速度分别为 V_x 和 V_y , 根据平动与转动关系可知:

$$\Phi_x = \int_0^t V_x dt / r_b \quad (13)$$

$$\Phi_y = \int_0^t V_y dt / r_b \quad (14)$$

根据图 4 的三角几何关系, 球面上任何一点都可以用参数 (r_b, Φ_x, Φ_y) 来表示, 微球抛光轨迹方程为:

$$x^2 = \frac{r_b^2 \left(\left(\frac{\sin(\Phi_x)}{\sin(\Phi_y)} \right)^2 - 1 \right)}{\left(\frac{\sin(\Phi_x) \tan(\Phi_x)}{\sin(\Phi_y) \tan(\Phi_y)} \right)^2 - 1} \quad (15)$$

$$y^2 = \frac{r_b^2 \frac{\tan(\Phi_x)}{\tan(\Phi_y)} \left(\left(\frac{\sin(\Phi_x)}{\sin(\Phi_y)} \right)^2 - 1 \right)}{\left(\frac{\sin(\Phi_x) \tan(\Phi_x)}{\sin(\Phi_y) \tan(\Phi_y)} \right)^2 - 1} \quad (16)$$

$$z^2 = \frac{r_b^2 \left(\left(\frac{\tan(\Phi_x)}{\tan(\Phi_y)} \right)^2 - \left(\frac{\sin(\Phi_x)}{\sin(\Phi_y)} \right)^2 \right)}{\left(\frac{\sin(\Phi_x) \tan(\Phi_x)}{\sin(\Phi_y) \tan(\Phi_y)} \right)^2 - 1} \quad (17)$$

根据方程(13)–(17)和旋转角度 Φ_x 、 Φ_y 的范围, 可以求出任意时刻微球表面被抛光的位置。若抛光机顶部上盘半径 $r_0=30$ mm, 下盘半径 $R_0=60$ mm, 上盘转速 $n_0=4$ r/s, 下盘转速 $n_1=6$ r/s, 待抛微球直径为 1.2 mm, 那么不同时刻微球的抛光轨迹如图 5 所示。

图 5 给出了不同时刻微球的抛光轨迹, 它似无规行走, 能够均匀地分布在微球表面, 该抛光轨迹不会破坏微球原有的球形度。理论模拟发现, 抛光轨迹开始在微球两极做摆线运动, 并逐渐包络整个微球。当抛光时间 10 ms 时, 能够清晰可见微球表面的抛光轨迹, 且迹线在两极有交点, 如图 5a 所示。当抛光时间为 50 ms 时, 已经很难分辨微球表面的抛光轨迹。此时迹线除了在两极相交之外, 其他位置也存在交点。当抛光时间增加至 200 ms, 微球表面已经覆盖 90% 以上。显然, 随着抛光时间的增加, 微球表面的抛光点覆盖率也逐渐增加。当抛光时间大于 0.6 s 时, 微球表面几乎全部被包覆, 看不见任何空白。实际上, 微球存在相对滑动和 z 轴的跳动。若将微小扰动引入方程组(13)–(17), 这样的模拟更接近实际。若扰动振幅为 1%, 计算结果如图 5e、f 所示。显然, 在相同的时间下, 有扰动的微球表面抛光点比没有扰动的多。加扰动后, 50 ms 的抛光轨迹与无扰动 200 ms 的抛光轨迹相似, 表面上绝大多数位置已经被抛光到。

2.3 微球抛光结果

实验方法: 使用标乐公司生产抛光液和抛光布, 其中抛光液为 Al_2O_3 悬浮液, 粒径为 0.5 μm , 而抛光织布为 w3-5 丝绒, 粒度相当于 10 μm 。抛光液添加速度为 0.5 mL/min, 配重球为 2 颗直径 1.2 mm 的不锈钢滚珠, 限位孔均布在圆周上, 孔径为 1.5 mm。上下盘旋转速度分别为 20 r/min, 下盘 100 r/min, 上下盘间距为 0.1 mm。

通过该抛光机, 对 Be 靶丸进行表面精密抛光处理, 抛光 24 h 后, 微球表面均方根粗糙度 R_q 从初始的 510 nm 降低至 85 nm, 抛光效果十分显著, 如图 6 所示。表面粗糙度 R_q 采用非接触式白光干涉仪进行测试, 测试区域大小为 92 $\mu m \times 121 \mu m$ 。

抛光前 Be 靶丸光泽较差, 表面粗糙, 呈现暗灰色, 如图 6a 所示。抛光后的 Be 靶丸表面光滑, 光泽性好, 像镜面一样可以反射照相光源, 如图 6b 所示。对于易碎空心铍微球抛光机, 理论证明了微球处于无规行走。在抛光过程中, 微球一直处于变加速运动, 其底部与抛光布以滑动摩擦力为主。因此, 在 24 h 就能将 Be 靶丸的 R_q 从初始的 510 nm 降低至 85 nm。显然, 微球抛光均匀性和抛光效率均得到实验验证。

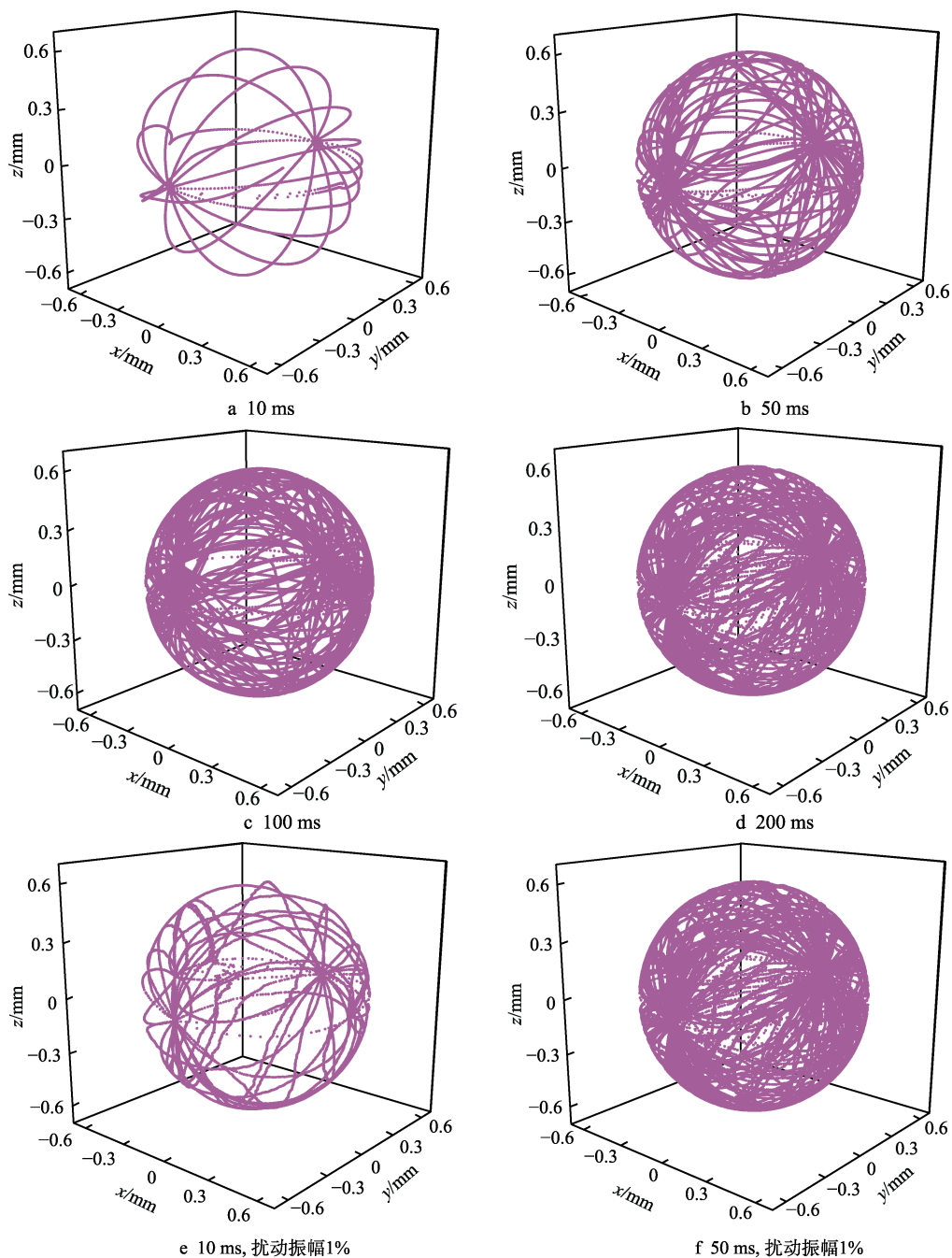
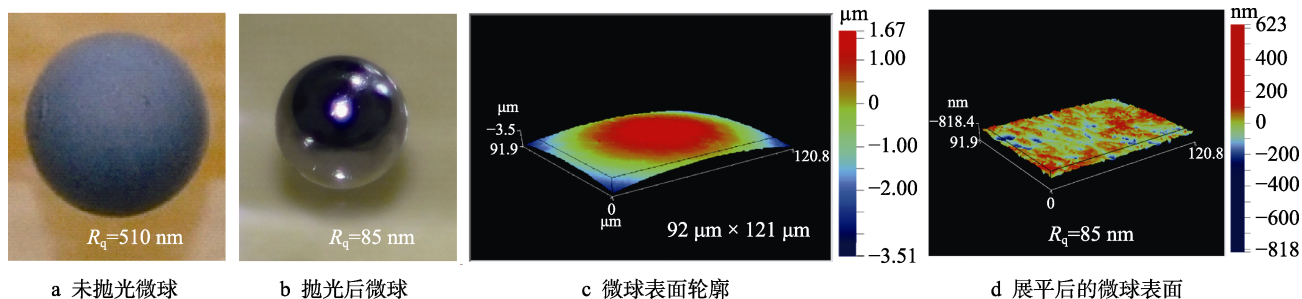


图5 不同时刻微球表面抛光轨迹

Fig.5 Polishing trajectory at different time: a) 10 ms; b) 50 ms; c) 100 ms; d) 200 ms; e) 10 ms coupling with 1% perturbation amplitude; f) 50ms coupling with 1% disturb



a 未抛光微球

b 抛光后微球

c 微球表面轮廓

d 展平后的微球表面

图6 抛光前后 Be 靶丸形貌与表面粗糙度测定结果

Fig.6 Be capsule image and surface roughness: a) unpolished Be capsule; b) polished Be capsule; c) surface profile; d) surface profile after evenness

3 结论

1) 自行设计和研制的微球抛光机, 其下盘摩擦力和上盘限位孔侧壁推力能使微球作 x 、 y 二维方向的旋转。限位孔让易碎微球免受夹持应力, 配重球能防止微球飞出和增加微球与抛光布的摩擦力。该装置成功用于易碎 Be 靶丸的抛光实验, 通过粒径 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 抛光液与 w3-5 抛光织布搭配, 抛光 24 h 能将表面均方根粗糙度 510nm 的空心铍微球降低至 85nm 。

2) 微球运动速度和加速度随时间均呈现正余弦周期变化, 两者周期均为 0.25 s , 主要取决于上盘的转动频率, 与下盘转动频率无关。在一个周期内, 微球在 x 和 y 方向的加速度没有出现同时为 0 时刻, 微球一直处于变加速运动。这增加了微球的滑动摩擦成分, 有利于提高微球抛光效率。

3) 理论计算了微球的抛光轨迹, 呈无规行走, 使微球表面均匀抛光, 不破坏其球形度。当抛光时间大于 0.6 s 时, 微球表面几乎全被包覆。若考虑微球的相对滑动和跳动, 相同时间下微球表面抛光面积明显多于无相对滑动和跳动的情况, 扰动有利于微球抛光的均匀性。

参考文献:

- [1] 张占文, 漆小波, 李波. 惯性约束聚变点火靶候选靶丸特点及制备研究进展[J]. 物理学报, 2012, 61(14): 300-307.
ZHANG Zhan-wen, QI Xiao-bo, LI Bo. Properties and fabrication status of capsules for ignition targets in inertial confinement fusion experiments[J]. Acta physica sinica, 2012, 61(14): 300-307.
- [2] 罗炳池, 李恺, 何玉丹, 等. Be 靶丸的研制进展及其关键技术[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3259-3264.
LUO Bing-chi, LI Kai, HE Yu-dan, et al. Fabrication progress and key technologies of Be targets[J]. High power laser and particle Beams, 2013, 25(12): 3259-3264.
- [3] LUO B C, LI K, KANG X L, et al. Sputtering pressures influence on growth morphology, surface roughness and electrical resistivity for strong anisotropy beryllium films [J]. Chinese physics B, 2014, 23(6): 457-461.
- [4] HAAN S W, HERRMANN M C, AMENDT P A. Update on specifications for NIF ignition targets, and their rollout into an error budget[J]. Fusion science and technology, 2006, 49: 553-557.
- [5] XU H W, ALFORD C S, COOLEY J C, et al. Beryllium capsule coating development for NIF targets[J]. Fusion science and technology, 2007, 51(4): 547-552.
- [6] MORENO K A, EDDINGER S, FONG J. Overview of national ignition facility capsule metrology[J]. Fusion science and technology, 2009, 55(4): 349-355.
- [7] HANN S W, CALLAHAN D A, EDWARDS M J. Rev3 update of requirements for NIF ignition targets[J]. Fusion Science and Technology, 2009, 55(3): 227-232.
- [8] 赵兴科, 王中, 郑玉峰, 等. 抛光技术的现状[J]. 表面技术, 2000, 29(2): 6-7.
ZHAO Xing-ke, WANG Zhong, ZHENG Yu-feng, et al. The status of polishing technique[J]. Surface technology, 2000, 29(2): 6-7.
- [9] 林广川, 郭丹, 解国新, 等. 抛光液中离子浓度对化学机械抛光过程的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 54-61.
LIN Guang-chuan, GUO Dan, XIE Guo-xin, et al. Influence of ionic concentration of slurry on process of chemical mechanical polishing[J]. China surface engineering, 2015, 28(4): 54-61.
- [10] MING J, KOMANDURI R. On the finishing of Si_3N_4 spheres for bearing applications[J]. Wear, 1998, 215: 267-278.
- [11] WANG Xing, ZHANG Yong, ZHANG Fei-hu, et al. Preliminary investigation on nanoparticle colloid hydrodynamic cavitation jet polishing technology[J]. Nanotechnology and precision engineering, 2011, 9(6): 483-487.
- [12] 冯凯萍, 吕冰海, 邓乾发, 等. 氧化硅陶瓷球双平面抛光技术[J]. 轴承, 2013(3): 11-15.
FENG Kai-ping, LV Bing-hai, DENG Qian-fa, et al. Dual-plane polishing technology for silicon nitride ceramic[J]. Bearing, 2013(3): 11-15.
- [13] HOPPE M L, CASTILLO E. Polishing of beryllium capsules to meet NIF specifications[J]. Journal de physique IV, 2006, 133: 895-898.
- [14] GALE W F, TOTEMEIER T C. Smithells Metals Reference Book[M]. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann Ltd, 2004: 14.