

文章编号 1004-924X(2009)12-3022-06

四轴球体研磨机的研磨均匀性

程相文^{1,2}, 林福严¹, 孙新民²

(1. 中国矿业大学, 北京 100083; 2. 河北理工大学, 河北 唐山 063009)

摘要: 为了分析四轴球体研磨机的研磨去除量, 建立了四轴球体加工时的力学模型, 分析了四研具在空间位置的几何关系和加工球与四研具之间的运动关系, 给出了研具上的一点相对加工球的速度矢量。在 Preston 方程基础上, 建立了四轴球体研磨机实现球面均匀研磨的分析模型, 并应用 Matlab 软件对单位时间去除量进行仿真分析。以离散化的旋转角为变量, 间距取 0.01° , 采用方差为指标评价研磨去除量的均匀性。分析结果显示, 研磨去除量与角速度成线性关系, 研具改变转向的相位角为 90° 时方差最小, 研磨过程中不断改变四个研具的旋转方向, 可获得好的研磨均匀性。实验结果表明, 四轴球体研磨机是高精度加工非常有效的方法。

关键词: 四轴球体研磨机; 均匀性; 仿真

中图分类号: TG749 **文献标识码:** A

Lapping uniformity of four-shaft-ball lapping machine

Cheng Xiang-wen^{1,2}, Lin Fu-yan¹, Sun Xin-min²(1. *China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;**2. Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China)*

Abstract: In order to analyze the lapping quantity of four-shaft-ball lapping machines, a mechanical model was developed when the machine was in operation, and the geometric relation of the four lapping cups in space positions and the movement relation between the machining sphere and the four lapping cups were analyzed. Then, the velocity vector of relative machining sphere at one point of the lapping cups was obtained. An analyzing model for the lapping machine to realize uniform lapping on a ball surface was set up based on the Preston equation. And the Matlab software was used to conduct the simulation analysis of the lapping quantity on the unit time. By taking a discretized revolution angle as the variable and setting its intervals for 0.01° , the lapping uniformity was evaluated with the variance. The analyzed results show that the lapping uniformity has linear relationship with the angle speed. When the cups change the phase angle of the turning direction as 90° , the variance is the smallest. It suggests that by changing the running direction of four cups continuously, a excellent lapping uniformity can be obtained. Using the four-shaft-ball lapping machine is a quite effective method in high-precision machining.

Key words: four-shaft-ball lapping machine; uniformity; simulation

收稿日期: 2008-12-14; 修订日期: 2009-03-30.

基金项目: 国防科工委十一五预研课题资助项目 (No. 51309050202)

1 引言

铍转子是静电陀螺仪的核心元件,它的品质优劣和精密程度是直接影响静电陀螺整体精度的重要因素^[1-10]。铍转子的高精密,是指转子在高速旋转(24 000 r/min 甚至更高)的工作状态下能保证有较小的球度误差和质量不平衡量。转子在加工过程中,由于内表面形状的不对称、加工误差、材料组织的不均匀、真空扩散焊时的误差及加工内应力与热应力产生的变形等因素的作用和影响,最终会导致转子质心相对于形心有一定偏差以及转子外表面不是理想球面而产生漂移。影响静电陀螺仪精度的主要误差之一是漂移误差,漂移误差主要来源于静电支承干扰力矩,而静电支承干扰力矩产生于转子的球度误差。因此,要减小静电支承干扰力矩就必须减小转子的球度误差。铍转子一般要求是:球度误差在 0.02~0.05 μm 以下,表面粗糙度在 0.025 μm 以下。

四轴球体研磨机是球体超精密加工的最佳方法之一,文献[2]论述了实现球体均匀研磨所需的压力和速度条件,对四轴球体研磨机的结构参数和运动参数进行了解析和图解分析,建立了实现球体均匀研磨的充分必要条件。文献[3-4]论述了球体加工的力学模型,并分析了球体与四研头之间的运动关系,研具直径与加工覆盖面之间的关系和球体研磨机理。文献[5]研究了平面研磨均匀性,在双自转研磨盘研磨方式下,下研磨盘外盘转速保持恒定,下研磨盘内盘转速连续变化时,内外下盘转速之比(转速比函数)对球研磨均匀性的影响。文献[10]使用超精密平面研磨机及锡磨盘进行超光滑表面的抛光研究,基于 Preston 方程,建立了在定偏心抛光条件下,被加工材料的去除模型。对锡磨盘的抛光中工件表面材料的去除偏差进行了计算机模拟。有关球面的研磨均匀性报道较少,而有关四轴球体研磨均匀性的文献未见公开发表。因此,研究四轴球体研磨均匀性的评价方法和影响均匀性的参数很有必要,本文从理论上研究了四轴球体研磨机理以及研磨均匀性的描述方法。

2 四轴球体研磨机的研磨原理及结构模型

四轴球体研磨机的研磨装置简图如图 1 所示^[3],图中 4 个研磨轴 I、II、III 和 IV 分别由 4 个直流调速电机通过同步齿形带降速驱动,浮动联结在各轴前端的圆筒式研具在随轴转动的同时,可沿轴向移动和径向微小摆动,依靠背部的砝码(I 轴)和弹簧(II、III、IV 轴)对球体施加研磨压力,并摩擦驱动球体绕球体回转轴线转动。四轴 I、II、III 和 IV 在空间相互对称布置,四研具把球体包容在中间,与球体的接触为球面圆^[3,6]。

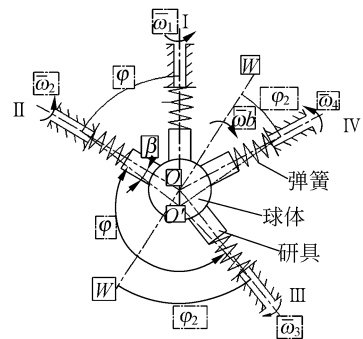


图 1 四轴球体研磨机简图

Fig. 1 Diagram of four-shaft ball lapping machine

四轴球体研磨系统可以用中心为 O 的正四面体 $ABCD$ 简化表示,如图 2 所示^[7]。被研磨球心和正四面体的型心 O 重合, AO 、 BO 、 CO 和 DO 分别是 4 个研具的轴线,四轴球体研磨系统的几何关系如图 2(a)所示,图 2(b)为 F 方向的视图,三个研具轴线投影间夹角均为 120° 。

所以,在 $\triangle PCD$ 中 $\angle PCD = \angle PDC = 30^\circ$,已知四面体边长为 a ,有:

$$\frac{PC}{\sin 30^\circ} = \frac{a}{\sin 120^\circ},$$

$$PC = \frac{\sin 30^\circ}{\sin 120^\circ} a = \frac{1}{\sqrt{3}} a, \quad (1)$$

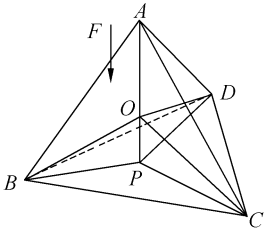
在 $\triangle APC$ 中有:

$$\frac{a}{\sin 90^\circ} = \frac{PC}{\sin \angle PAC},$$

所以

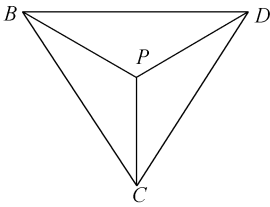
$$\sin \angle PAC = \frac{PC}{a} \sin 90^\circ = \frac{\sqrt{3}}{3}, \quad (2)$$

$$\angle PAC = 35.2644^\circ$$



(a)四轴球体研磨机的几何模型

(a)Geometrical model of four-shafts-ball lapping machine



(b)F 向视图

(b)F view

图 2 四轴球体研磨机的几何关系图

Fig. 2 Geometrical relation of four-shaft ball lapping machine

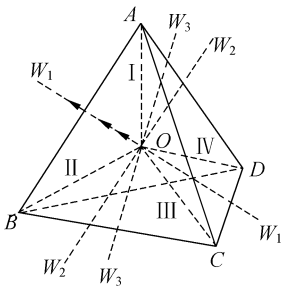


图 3 四轴空间位置图

Fig. 3 Space drawing of site of four-shaft

由图 3(a)可知

$$\angle PCA = 90^\circ - \angle PAC = 54.7356^\circ, \quad (3)$$

则可得:

$$\angle PCO = \angle PCA - \angle ACO, \quad (4)$$

又因

$$\angle ACO = \angle PAC,$$

所以

$$\begin{aligned} \angle PCO &= \angle PCA - \angle PAC = \\ 90^\circ - 2\angle PAC &= 19.4712^\circ. \end{aligned} \quad (5)$$

当研具沿 AO 轴线对被研磨球体施加压力 F

时,由于结构的对称性,另外 3 个研具沿轴线施加给被研磨球体的压力相等,设压力为 p,依据静力平衡方程有:

$$3p \sin \angle PCO = F, \quad (6)$$

$$3p \sin(90^\circ - 2\angle PAC) = F$$

$$3p \cos(2\angle PAC) = F$$

$$3p(1 - 2\sin^2 \angle PAC) = F$$

$$p = F. \quad (7)$$

因此,在平衡条件下,4 个研具施加给被研磨球体的压力相等。

在直角△APC 和直角△OPC 中

$$\angle AOC = 90^\circ + \angle PCO = 109.4712^\circ, \quad (8)$$

因此, AO 轴与其它 3 个轴之间夹角为 109.4712°。

在直角△OPC 中

$$\begin{aligned} OC &= \frac{PC}{\cos \angle PCO} = \frac{PC}{\cos(90^\circ - 2\angle PAC)} = \\ \frac{PC}{\sin(2\angle PAC)} &= \frac{PC}{2\sin \angle PAC \cos \angle PAC} = \frac{3a}{2\sqrt{6}}. \end{aligned} \quad (9)$$

在△COD 中,OC=OD,CD=a

$$\cos \angle COD = \frac{OC^2 + OD^2 - CD^2}{2 \times OC \times OD} = -\frac{1}{3}, \quad (10)$$

$$\angle COD = 109.4712^\circ.$$

所以,BO、CO、DO 3 个轴之间夹角为 109.4712°,因此,四轴球体研磨机 4 个轴之间的夹角均为 109.4712°。

每个研具都有正、反转两种状态,4 个研具共有 2⁴=16 种组合。只有球体转速 ω_b 不为 0 时,球才能旋转起来,否则球将保持静止状态。研具只能在球表面上磨出圆形凹痕;另外一种情况,当球体的旋转轴线与某一研具的轴线重合时,球体只能绕该轴的轴线旋转,也会在球面上磨出凹痕。

经过分析,能满足球体转速 ω_b 不为 0 时的 ω_i 正反转组合共有 6 种^[2,8],能使球分别绕 3 条相互垂直的轴线(见图 3)旋转。W₁W₁、W₂W₂、W₃W₃ 分别为∠AOB、∠AOD、∠AOC 的角平分线。

3 研磨均匀性分析模型

Preston 在玻璃抛光实验的基础上,将材料去除速率与抛光垫施加在工件被加工表面的切向摩擦力所做的功联系起来,描述抛光过程,Preston 方程形式为^[9-10]:

$$\frac{dH}{dt} = k \cdot p \cdot v, \quad (11)$$

式中: $\frac{dH}{dt}$ 为单位时间材料去除量; k 为与研磨材料、研具材料性能、磨料粒度及材质性能有关的参数; p 为研具与工件间的压强; v 为研具与工件间的相对运动速度。

四轴球体研磨机的位置关系具有对称性,任取一轴进行分析,如图 4(b)所示^[11],其中虚线代表轴线。

轴线与 Y 轴夹角为:

$$\theta = \frac{\angle AOB}{2} = \frac{1}{2} \arccos(1/3), \quad (12)$$

点 m 为研具端面上的一点, m' 为球体上与点 m 重合的点。在 XOY 中点 m' 的位置矢量为^[11]:

$$\mathbf{P} = x_m \mathbf{i} + y_m \mathbf{j} + z_m \mathbf{k}, \quad (13)$$

式中: $x_m = r \sin \alpha$,

$$y_m = \sqrt{(R^2 - r^2)/3} + \sqrt{2/3} r \sin \alpha, z_m = \sqrt{R^2 - x_m^2 - y_m^2}$$

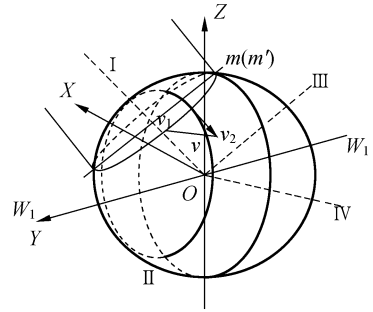
点 m 与 m' 的相对速度可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2 = & -(\omega_0 r \sin \alpha + \omega z_m) \mathbf{i} + \\ & \sqrt{\frac{2}{3}} \omega_0 r \cos \alpha \cdot \mathbf{j} + (\omega x_m - \frac{\omega_0 r \cos \alpha}{\sqrt{3}}) \mathbf{k}, \end{aligned} \quad (14)$$

式中: α 为 $X'O'Y'$ 中矢径轴 $O'M$ 与 $O'X'$ 的夹角; $\omega_0 = \pi n/30$ (rad/s); $\omega = 2\sqrt{2}\omega_0\sqrt{1+\cos(109.471^\circ)}$ 。

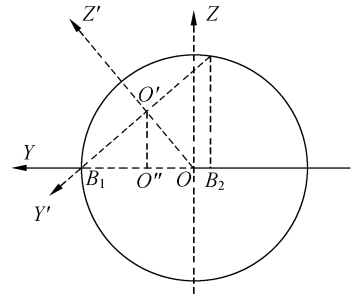
把这些参数代入 Preston 方程 (11),应用 Matlab 软件模拟分析,图 5 为研具角速度、压力为定值时单位时间去除量曲线,图 6 为压力为定值时、研具角速度变化时单位时间去除量三维曲面图。

从图 5 可以看出研磨去除量变化呈周期性,经计算去除量最小点位于旋转角为 90° 处。以单研具为例,应用 Matlab 软件模拟研磨去除量,以旋转角为变量,并对其进行离散化,间距取 0.01° ,



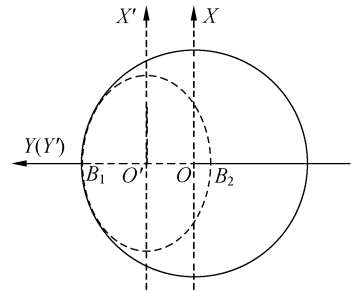
(a) 研具与球体空间位置图

(a) Space drawing of lapping cup and sphere



(b) 截面图

(b) Sectional view



(c) 在 XOY 平面内的投影

(c) Projection in XOY plane

图 4 研具与球体相对运动关系示意图

Fig. 4 Relative motion relations of lapping cup and sphere

采用方差指标 SS 评价研磨均匀性。表 1 为研具单向旋转研磨去除量,表 2 为研具反向旋转且与上一次研具旋转位置起点相差 90° 。表 3 和表 4 分别为相位差为 180° 和 360° 。

$$SS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}. \quad (15)$$

式中: H_i 为第 i 处研磨去除量; \bar{H} 为研磨去除量的均值。

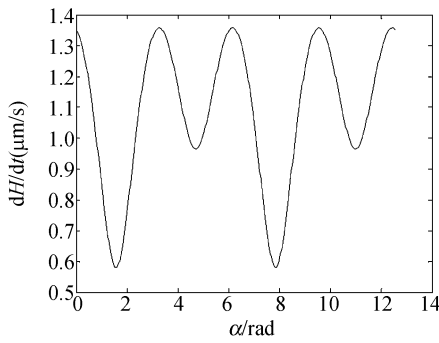


图 5 研具角速度为定值时单位时间的研磨量

Fig. 5 Lapping quantity of unit time when angular velocity of lapping cup is fixed

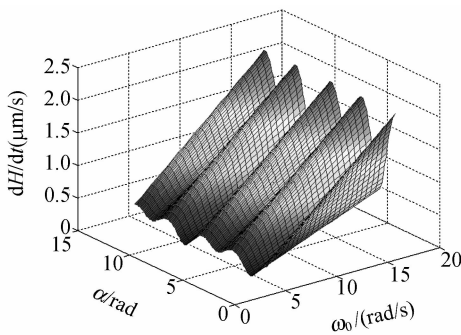


图 6 单位时间的研磨量与研具转速、研具转角的关系

Fig. 6 Relation between lapping quantity of unit time, and lapping cup velocity and its outer corner

表 1 研具单向旋转研磨数据

Tab. 1 Lapping data of lapping cup running in single direction

研具旋转周数	最大去除量 / μm	最小去除量 / μm	去除量方差
1	0.050 291 2	0.021 499 9	0.071 687 9
2	0.100 582 4	0.042 999 8	0.071 687 9

表 2 研具旋转反向研磨数据(相位差 90°)

Tab. 2 Lapping data of lapping cup of returning(phase difference of 90°)

研具旋转周数	最大去除量 / μm	最小去除量 / μm	去除量方差
2	0.017 784 3	0.014 274 8	0.021 846

表 3 研具旋转反向研磨数据(相位差 180°)

Tab. 3 Lapping data of lapping cup of returning(phase difference of 180°)

研具旋转周数	最大去除量 / μm	最小去除量 / μm	去除量方差
2	0.020 116 4	0.008 600 1	0.071 688

表 4 研具旋转反向研磨数据(相位差 360°)

Tab. 4 Lapping data of lapping cup of returning(phase difference of 360°)

研具旋转周数	最大去除量 / μm	最小去除量 / μm	去除量方差
2	0.020 017 1	0.011 456 8	0.053 286 9

4 结 论

在 preston 方程基础上,建立研磨机均匀性的分析模型。分析表明,研具转一周过程中去除量不均匀,研磨量最大差值为 $0.12 \mu\text{m}$,且呈周期性变化。图 6 表明研磨去除量与角速度呈线性关系。研具改变旋转方向的变相起点与前旋转起点相差 90° 时去除量方差与相差 0° 相比降低了 70%,四轴球体研磨机实际加工过程中球体 3 个自旋轴互相垂直,分析结果与实际相符,因此实际研磨过程要不断改变研具转速方向,达到均匀研磨的目的。

120. (in Chinese)

[2] 孙新民,李树文,王永梁. 四轴球体研磨机实现球体均匀研磨的充分必要条件[J]. 光学 精密工程, 1999,7(1):70-74.

SUN X M, LI SH W, WANG Y L. Full conditions of the uniform lap for the four shafts ball-lapping machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(1):70-74. (in Chinese)

[3] 孙新民,李树文,王永梁. 四轴球体研磨机超精密研

参考文献:

[1] 张军安,邱长华,颜明,等. 静电陀螺仪空心球转子变形分析[J]. 光学 精密工程, 2006,14(1):116-120.

ZHANG J A, QIU CH H, YAN M, *et al.*. Distortion analysis of electrostatic gyro hollow ball rotor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):116-

磨的机理及试验[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 46-50.

SUN X M, LI SH W, WANG Y L. Mechanism and experiment of superprecision ball lapping for the four shafts lapping machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1): 46-50. (in Chinese)

- [4] 孙新民, 李树文. 四轴球体研磨机的运动学分析[J]. 机械设计与制造, 2000(2): 65-67.

SUN X M, LI SH W. Kinematic analysis for the four shafts ball-lapping machine [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2000(2): 65-67. (in Chinese)

- [5] 赵文宏, 周兆忠, 文东辉, 等. 定偏心和不定偏心平面研磨均匀性的研究[J]. 金刚与磨料磨具工程, 2006(3): 46-49.

ZHAO W H, ZHOU ZH ZH, WEN D H, *et al.*. Research on the uniformity of certain and uncertain eccentricity plan lapping processes[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2006(3): 46-49. (in Chinese)

- [6] ANGLE W. Finishing high precision quartz Ball [J]. *Precision Engineering*, 1980(3): 119-122.

- [7] 张伯鹏. 加工精度自生成及其在超精球体研磨中的实现[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 75-79.

ZHANG B P. Investigation on self generation of machining precision and its realization in grinding of

solid balls with super precision[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(9): 75-79. (in Chinese).

- [8] 王大力. 四轴球面研磨中若干问题的理论分析[J]. 矿山机械, 2001(8): 50-52.

WANG D L. Theoretical analysis of several questions in four-axle spherical grinding[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2001(8): 50-52. (in Chinese)

- [9] PRESTON F. The theory and design of Plateglass Polishing machines[J]. *J soc Glas Teehnol*, 1927, 11: 214-256.

- [10] 高宏刚, 曹建林. 锡磨盘定偏心平面研抛中材料去除模拟[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(1): 83-85.

GAO H G, CAO J L. Simulation of stock removal uniformity during eccentric plane polishing by a tin lap[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrumen*, 2000, 21(1): 83-85. (in Chinese)

- [11] 余兴龙, 王友冰, 索忠堃. 四研头超精加工球机理分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(5): 632-635.

YU X L, WANG Y B, SUO ZH K. Mechanism analysis for super precision machining of small balls by a 4-cup type lapping machine [J]. *Tsinghua Univ(Sci&Tech)*, 2003, 43(5): 632-635. (in Chinese)

作者简介:

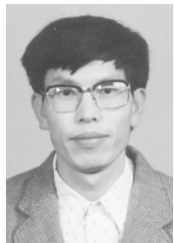


程相文(1963—),男,河北遵化人,博士研究生,教授,1990年于河北工业大学获硕士学位,主要从事精密加工技术的研究。E-mail: chxw1963@126.com



孙新民(1952—),男,河北曲阳人,教授,1975年于河北矿冶学院大学本科毕业,1984年于重庆大学研究生班毕业。主要从事静电陀螺仪转子技术的研究。E-mail: sxm@heut.edu.cn

导师简介:



林福严(1958—),男,河北献县人,工学博士,教授,博士生导师,1987年于中国矿业大学(北京)获博士学位。主要从事磨损理论与抗磨技术、CAD/CAM技术的研究。E-mail: Linfy@cumtb.edu.cn