

定偏心锡磨盘超精密平面 抛光均匀去除模拟计算()

张红霞 高宏刚* 吴明根

(超精密加工技术国防科技重点实验室 北京 100076)

(* 中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

摘要 定偏心平面抛光中, 工件表面各区域材料的均匀去除问题涉及工件加工后的面形。本文从理论上讨论了锡磨盘与工件的转速比、偏心距及转速对工件表面面形的影响, 以及工件边缘露出磨盘的情况下, 表面的不均匀去除程度。模拟计算结果表明当转速比为1, 工件不露出磨盘时, 可以实现工件材料的均匀去除。

关键词 锡 抛光 超精密加工 平面

1 引 言

超精密抛光是提高工件表面面形精度的有效手段。在机械式抛光中, 工件与磨盘的相对运动方式是影响工件面形的关键因素。在传统抛光中, 覆盖于磨盘之上的抛光模, 材料质地较软, 并且在抛光初期面形很差。通常的光学抛光机都是动摆式的, 即工件相对于磨盘既转动, 又沿一定弧线摆动; 工件在被抛光的同时也不断地修整抛光模。但是, 当抛光参数设定时, 工件和抛光模的面形始终处于非收敛的变化中, 即面形朝凹或凸的方向单调改变。为获得较高面形精度, 抛光中, 需不断检查工件面形, 并修改抛光参数。这对操作者的技术水平要求很高。

最新研制的超精密平面研磨机, 采用定偏心式运动方式, 即工件与磨盘保持固定的偏心距, 各绕自身轴线旋转, 而无相对摆动。我们使用此机床进行超精密平面抛光研究。采用金属锡制作抛光用高平面度的磨盘; 用抛光模的平面精度来保证工件面形; 无需抛光中工件对其修整。为获得较高面形精度, 要求工件表面与磨盘接触区域各点的材料去除均匀; 各点去除量一致, 才有可能使工件面形向理想平面收敛。

本文根据超精密平面抛光研究的实际情况, 在前人工作^[1-5]的基础上, 从理论上讨论工件

材料的去除量与其相对磨盘的运动方式的关系, 目的在于探索工件表面均匀去除的条件以及不均匀去除情况下的表面差异, 并藉此指导我们的平面抛光实验。

2 表面材料去除的数学模型

影响研磨和抛光的因素很多, 如压力、时间、速度、抛光液、温度等。到目前为止, 被人们普遍接受的表面材料去除的数学模型是 Preston 方程^[6,7]:

$$dR/dt = kpv \quad (1)$$

式中 k ——与被加工材料、工艺参数等有关的系数;

p ——表面上某一点在 t 瞬时与研具间的压力;

v ——该点在 t 瞬时与工具间的相对运动速度;

dR/dt : 是单位时间内材料去除量;

也就是说表面某一点单位时间内材料去除量同工件与研具间的相对运动速度、压力及系数 k 成正比。表面某一点 $A(x, y)$ 在抛光周期 T 内的材料去除量:

$$R(x, y) = k \int_0^T v(x, y, t) \cdot p(x, y, t) dt \quad (2)$$

3 材料去除量分析

3.1 基本假设

在定偏心抛光中, 抛光模所受工件压力变化很小, 因此可作如下假设: 材料的去除量仅由工件与抛光模的相互作用引起, 当二者表面吻合良好, 去除率较小的情况下, 压力 p 可以认为不变的。在 T 时间内材料去除量为:

$$R(x, y) = kp \int_0^T v(x, y, t) dt \quad (3)$$

工件材料是否均匀去除直接影响到研磨和抛光精度, 由上面的两条假设可知, 在压力 p 不变的情况下, 工件的相对运动速度、作用时间将影响材料的去除, 因此有必要对影响工件的相对运动速度、作用时间等因素进行讨论。

3.2 转速比的影响

假设工件与锡盘两表面处处吻合, 即在任一时刻工件表面不存在未与锡盘接触之点。当工件与锡盘作定轴同向回转时, 工件上各点的相对运动速度 v 是随其所在的圆周半径 r , 工件与锡盘的转速比 ω/ω_0 的变化而变化的。又因为 v 将直接影响该点的材料去除量, 所以工件与锡盘的转速比作为外在因素, 将是影响工件材料是否均匀去除, 工件面形质量的关键因素。工件以 ω_0 旋转(圆心为 O_2), 锡盘以 ω 同向旋转(圆心为 O_1), 偏心距为 e , A 为工件半径为 r 的圆周上的任意一点, 如图 1 所示, A 点的相对速度:

$$\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 \quad (4)$$

$$v_2 = \omega r \tag{5}$$

$$v_1 = \omega r_1 \tag{6}$$

(4), (5), (6) 联立,

$$v = (\omega^2 r_1^2 + \omega^2 r^2 - \omega \omega (r_1^2 + r^2 - e^2))^{(1/2)} \tag{7}$$

令

$$\omega = \omega / \omega, \quad r = r / e \tag{8}$$

在 $\Delta A O_1 O_2$ 中,

$$r_1 = (r^2 + e^2 + 2re \cos \alpha)^{(1/2)} \tag{9}$$

$$a = \omega t \tag{10}$$

把(8), (9), (10)代入(7), 则

$$v = \omega e [(\omega - 1)^2 r^2 + \omega^2 + 2(\omega^2 - \omega)r] \cos(\omega t)^{(1/2)} \tag{11}$$

假定整个工件落在锡盘上, 则半径为 r 的圆周上的 A 点, 在任意研抛周期内的去除量为

$$R(r) = k p_0 \omega e [(\omega - 1)^2 r^2 + \omega^2 + 2(\omega^2 - \omega)r \cos \omega t]^{(1/2)} dt \tag{12}$$

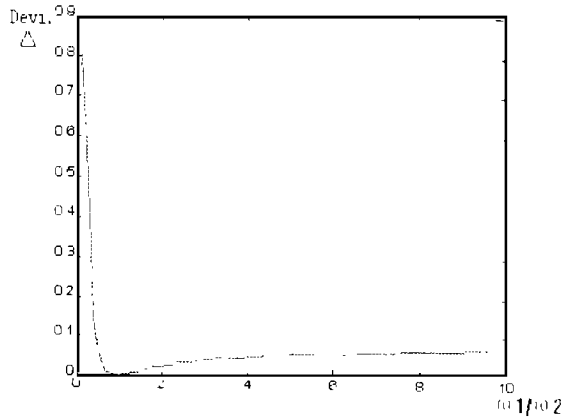
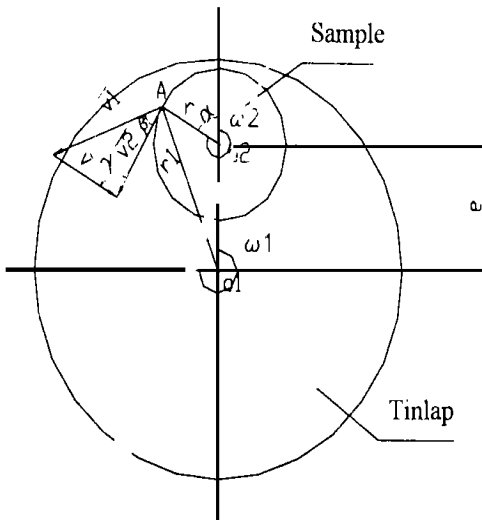


Fig. 1 Relationship of rotating velocities of sample and tinlap

Fig. 2 Surface deviation vs. rotating ratio

在 ω 一定情况下, 工件不同圆周上的去除量随半径不同而不同。以误差 Δ 表示工件上最大与最小去除量的相对差值, 图 2 给出不同 ω 所对应的 Δ 值。当 $\omega < 1$ 时, 随 ω 减少, 去除量不均匀性增加, 当 $\omega > 1$ 时, 随 ω 增加, 去除量不均匀性亦增加。在 $0.9 < \omega < 1.1$ 内寻找最优值, 发现 $\omega = 1$ 时为最好。

$\omega = \omega = \omega$ 时, 对半径为 r 圆周上的 A 点 (如图1所示) 进行分析: 由(4), (5), (6) 得:

$$v = \omega (r^2 + r_1^2 - 2rr_1 \cos \beta)^{1/2} \tag{13}$$

又

$$\cos \beta = \frac{r^2 + r_1^2 - e^2}{2rr_1} \quad (14)$$

(13), (14) 联立, 得

$$v = \omega e \quad (15)$$

由(4), (5), (15) 得:

$$\cos \gamma = \frac{r^2 + e^2 - r_1^2}{2re} \quad (16)$$

又

$$\cos \alpha = -\frac{r^2 + e^2 - r_1^2}{2re} \quad (17)$$

$$\gamma + \alpha = 180^\circ$$

工件上各点的相对运动速度是相同的, 其大小与 ωe 成正比, 其方向垂直于 O_1O_2 连线。当工件全部落在锡磨盘上时, 工件各区域内的点在任一研抛周期 T 内作用时间均为 T , 则工件半径为 r 的圆周上任意一点材料去除量为

$$R(r) = kp \omega e T \quad (18)$$

因此, 工件各点的材料去除量是均匀的, 工件的面形质量可能改善。

3.3 偏心距的影响

假设工件半径为 r_2 , 在任意抛光周期 T 内, 由(12) 知工件的平均去除量为

$$\bar{R} = \frac{kp}{r_2} \cdot \omega e \int_0^{r_2} \int_0^{T(r)} ((\omega - 1)^2 r^2 + \omega^2 + 2(\omega^2 - \omega)r \cos \omega t)^{(1/2)} dt dr \quad (19)$$

显然, $\omega = 1$ 时, 即 $\omega = 1$ 时,

$$\bar{R} = kp \omega e T \quad (20)$$

故, 在 ω 一定时, 工件在作一研抛周期内的平均去除量与转速 ω 偏心距 e 成正比, ωe 越大, 去除效率越高。但转速过高会使工件运动不平稳, 对抛光不利。偏心距过大会使工件露出磨盘, 造成不均匀材料去除; 这正是下面要讨论的。

3.4 工件露边时的去除量分析

当尺寸大于磨盘半径, 或偏心距过大时, 工件会露出磨盘, 即有一部分表面不能与抛光模始终接触。仍假定压力 p 不变。在 $\omega = 1$ 时, 相对运动速度 v 对于表面上各点都是相同的, 但作用时间随半径 r 的变化而改变, 有必要讨论作用时间与半径 r 的关系。如图 3 所示, r_1 为锡磨盘半径, r_2 为工件半径, e 为偏心距。

对于 $r_1 - e$ 圆域内的点, 在研磨(抛光) 周期内始终处于研磨(抛光) 状态, 故研抛周期 T 时间内的去除量为 $R(r) = kp \int_0^T v(r, t) dt$, 其中 $v = \omega e$;

对于 $r_1 - e < r < r_2$ 圆域内的点, 并不是始终处于研磨(抛光) 状态的, 只有 $T(r)$ 时间处于研磨状态, 即 $R(r) = kp \int_0^{T(r)} v(r, t) dt$, 其中 $v = \omega e$

$$T(r) = T * \frac{2\pi - 2\alpha}{2\pi}$$

$$\alpha = \arccos\left(-\frac{e^2 + r^2 - r_1^2}{2re}\right)$$

α 随半径 r 增加而增加, 故 $T(r)$ 随半径 r 增加而减小, 工件不同区域上的点的材料去除量 $R(r)$ 随半径 r 增加而减小, 如图 4 所示。显然, 工件露出锡磨盘区域面积越大, a 越大, 工件表面材料去除量的差异程度亦越大。当 $r_2 = 85\text{mm}$, $e = 160\text{mm}$, $r_1 = 235\text{mm}$ 时, 误差 $\Delta = 19.2\%$ 。

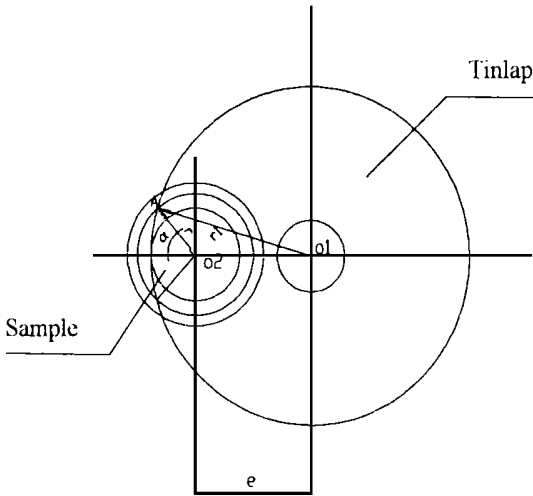


Fig. 3 Condition of sample edge out of tinlap

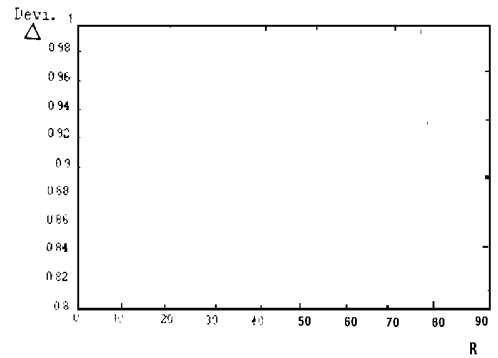


Fig. 4 Material removal deviation vs. sample radius

4 结 论

在定偏心抛光中, 当工件与磨盘吻合接触的条件下, 通过理论分析, 可以得出以下结论:

- (1) 当工件与研具以不同的转速作定轴同向回转时, 工件各区域材料的去除量是不均匀的。
- (2) 当工件与研具转速相同时, 工件材料去除量是均匀的, 并且与转速, 偏心距成正比。
- (3) 当工件有部分区域落在锡磨盘外时, 工件各区域材料去除量随半径的变化而改变, 而且工件表面材料去除的差异程度随工件露出区域的增加而增加。

致谢: 本文的计算和制图得到超精密加工技术国防科技重点实验室的殷伯华同志的帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 王长兴等. 平面高速精磨磨具分析设计计算. 长春光机学院学报, 1978, 创刊号: 46
- 2 李懋和. 平面光学研磨的轨迹方程与运动方程. 长春光机学院学报, 1979, (2): 72
- 3 查立豫. 平面光学零件加工中的相对线速度分布. 仪器制造, 1983, (3): 6
- 4 裴庆魁. 调偏心小摆幅平面金刚石精磨工艺. 光学机械, 1986, (4): 27 ~ 32
- 5 裴庆魁等. 平面高速精磨中的均匀磨削. 光学机械, 1991, (4): 27 ~ 31
- 6 曹天宁等. 光学零件制造工艺. 北京: 机械工业出版社, 1981
- 7 Pupp W. Feinwerktechnik, 1963, (8): 295

Simulation of Even Material Removal During Eccentric Plane Polishing by a Tin Polisher

ZHANG Hong-Xia, GAO Hong-Gang^{*}, WU Ming-Gen
(*China Institute of Aeronautical Precision Mechanics, Beijing 100076*)
(* *Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

Abstract

The even material removal in the contacting area between the surfaces of polisher and the samples being finished is important for the surface contour of the samples after polishing. This paper analyzes the differences of material removal of different positions on the sample surfaces theoretically as a function of rotating ratio of sample holder and main spindle, eccentric distance and rotating velocity. The edge effect when part of the sample surfaces do not keep in contact with the polisher continuously is discussed. The simulation shows that even material removal can be achieved while the rotating ratio is 1, and every position of sample surfaces keep touching the polisher during polishing.

Key words: Tin, Polishing, Precision manufacture, Plane

张红霞 女, 1973年出生。1996年毕业于河北理工学院机械系, 同年考入中国航空精密机械研究所攻读硕士学位。课题的主要方向是超精密平面研磨与抛光的机理研究与工艺试验, 以及球、圆柱面的超精密研磨工艺。