

四轴球体研磨机球体研磨 圆度误差均匀化效应的机理分析*

孙新民

(河北理工学院机械系 唐山 063009)

李树文 王永梁

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

摘要 从建立四轴球体研磨机弹簧加压球体研磨的力学模型入手,运用高点切削作用机制和误差均匀化效应,解释了球体圆度误差趋小化研磨机理。根据四研具对球面研磨的包络原理,提出了未包络研磨区是产生残存圆度误差的主要因素,并探讨了未包络研磨区、四研具初始压力误差、研具磨损不均匀性产生的原因和对研磨残存圆度误差的影响及解决措施。为进一步改善研磨工艺和提高球体研磨圆度提供了参考。

关键词 球体研磨 研磨机理 误差均匀化

1 引言

四轴球体研磨机被公认为是精密球体加工的最佳手段之一,也是以粗干精的典型设备之一。据笔者所知,目前国内外除介绍它的研磨原理、结构布置、运动控制、研磨精度外^[1,2],对该机以粗干精的机理分析颇为少见。为此,文中从建立球体研磨力学模型入手,运用高点切削作用机制和误差均匀化效应,探讨了弹簧加压球体研磨的圆度误差趋小化机理。

2 球体研磨原理

四轴球体研磨原理如图1所示。图中 X , Y , Z 轴在空间相互对称布置,任意二轴间的夹角为 Φ ($\Phi = 109.4712^\circ$),四轴线汇交于球心 O 。其中 Z 轴垂直布置, X , Y 轴与水平面呈

* 国防科工委九五预研项目子课题;小型静电陀螺仪转子研磨工艺及设备研究

收稿日期:1998-05-12

修稿日期:1998-09-02

β ($\beta = 19.4712^\circ$) 角布置, 它们在水平面投影后相互间夹角为 Ψ ($\Psi = 120^\circ$)。装在四轴前端的圆筒式研具把球体包容在中间。研磨时, 四研具分别绕各自轴线作定轴转动, 依靠背部弹簧维持与球体接触施加压力, 并由该压力产生的摩擦力矩驱动球体绕转动轴 W 转动 (理论上 W 轴与四轴中任意轴间夹角为 $\Phi/2$)。通过有序变换四轴的二轴正转二轴反转组合 (共有六种组合, 其它组合形式不满足球面研磨成形条件^[1,2], 使球体回转轴位置不断改变, 从而研磨出整个球面。

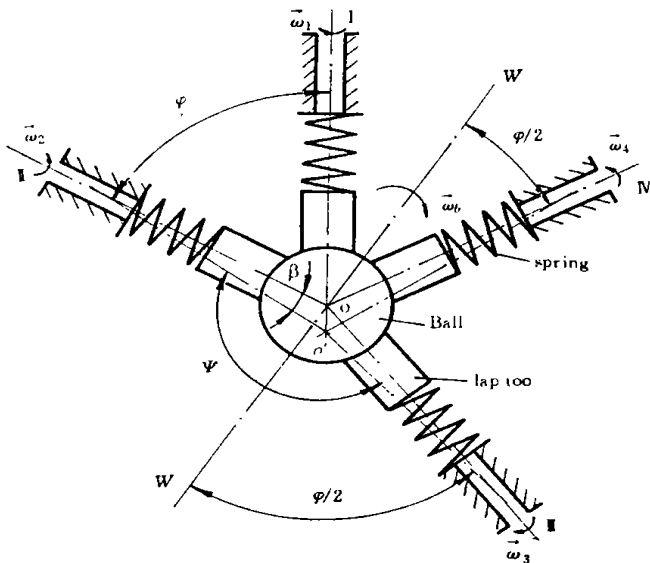


Fig. 1 The sketch of ball lapping

3 球体研磨力学模型

由研磨工艺原理知, 研磨是靠研具与球体间的游离磨料、压力和相对运动来实现的。在磨料和研磨速度一定条件下, 研具对球体的研磨作用 (研磨量) 仅决定于研磨压力。由图 1 知该研磨压力产生于弹簧, 若研磨过程中只考虑弹簧压力 (因球体重量与压力之比一般很小, 故可略去球体重量对弹簧压力的影响) 对非圆球体作用, 则可建立图 2 所示的力学模型。

设四弹簧的刚度 $K_i = K$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 对研具的初始压力 (等于对球体的压力) $P_i = P_0$ ($i = 1, 2, 3, 4$) (安装静止状态)。研磨开始后在时刻 t , 弹簧压力变为:

$$P_i = P_0 - \Delta P_i = K(X_0 - \Delta X_i) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中 ΔP_i —— 弹簧压力变动量;

X_0 —— 弹簧初始变形量;

ΔX_i —— 弹簧变形变动量,

若研具半径 $r_i = r$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 且与球体表面初始接触点半径为 R_0 ($i = 1, 2, 3, 4$), 则有:

$$\Delta X_i = \sqrt{R_0^2 - r^2} - \sqrt{R_i^2 - r^2} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

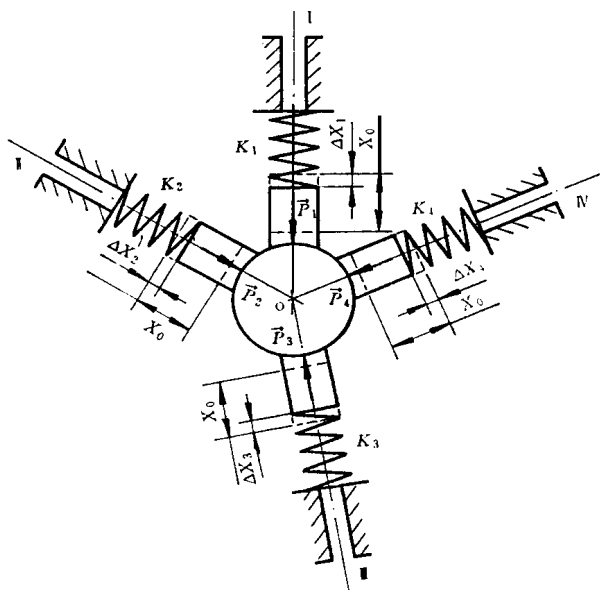


Fig. 2 Kinetic model of ball lapping

式中 R_i ——在时刻 t 球体表面与第 i 研具接触半径。

由于研具与球体对研的过程中, 研具始终与球体表面诸高点保持接触, 所以研磨作用为高点切削。

若被研非圆球体表面有 m 个高点, 且诸高点半径 $R_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 不等。当它们分别与四研具接触时, 引起的弹簧压力为:

$$P_{ji} = KX_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots; i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

式中: P_{ji}, X_{ji} 分别为高点 j 对研具 i 引起的弹簧压力和变形。

经 P_{ji} 作用的研具对诸高点切削后, 高点半径变为:

$$R_{ji} = R_j - \Delta R_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

式中: ΔR_{ji} 为高点 j 经研具 i 研磨后的半径减小量。

应当指出, 建立上述公式时未计入研具磨损、研具偏斜、弹簧刚度误差等因素。

4 球体圆度误差趋小化研磨机理和研磨圆度误差分析

根据上述的力学模型、高点切削作用机制及误差均匀化效应原理, 可做出下述球体圆度误差趋小化机理和影响研磨圆度误差主要因素的探讨。

1) 研磨时弹簧压力变动量的趋小化描述了高点半径的均化或圆度误差的趋小化。由公式(3)、(4)知, 在研磨过程中因研具对球体表面始终呈高点切削状态, 所以诸高点半径的不同将引起研具弹簧对球体压力 P_{ji} 的不同(接触压力与切削作用同时发生), 导致研具对诸高点切削作用的强弱不同。显然, 高点半径较大者引起较大的弹簧压力, 研具对高点的切削量 ΔR_{ji} (半径减小量) 较大, 反之亦然。因此, 表面诸高点经四研具依次研磨后, 其半径得到均化和减小(包括四研具对同一高点依次研磨的均化效应), 球体圆度误差也随之减小。由此, 随着研磨时间的延长, 旧的高点被切削掉, 新的高点(与研具未接触的高点)又冒出。所以, 研磨过程又是球体表面新旧高点的交替过程(也可称作迭代过程)。并且, 研磨初始阶段因旧高点间半径差大, 引起的压力差也大, 故有高点的半径均化效应也显著, 球体圆度误差也减小较快。随着新高点的半径和弹簧压力变动量的变小, 半径均化效应变弱, 球体的圆度误差趋小。

2) 研具对球面研磨的残存未包络区是决定残存圆度误差大小的主要因素。如图1所示的研磨原理知, 球体的成形是由研具与球体表面的接触圆族包络形成, 而被研球体的转动又靠研具与球体接触压力产生摩擦力驱动。因此, 要保持研具与球体间稳定的相对转动, 研具就必须对球体施加一定的压力(只考虑驱动), 而该压力又必须使研具对球面产生一定研磨量(该研磨量大小主要由压力、球体材料、磨料决定)。当高点被均化所剩无几和圆度误差趋小化停止时, 四研具对球体表面趋于均匀研磨状态, 但由于研具与球体摩擦传动存在着不确定性, 导致何时何位置四研具均匀包络研磨出整个球面的每一轮运动周期无法精确确定, 所以研磨停止时会存在球面研磨的未包络区, 该未包络区即为高点区。若不考虑高点均化剩余误差和研具磨损对圆度误差的影响, 则已研包络区与未包络区所形成的二包容同心圆半径差即为残存圆度误差。

3) 四研具与球体表面初始安装压力误差是决定高点均化剩余误差和研具磨损不均匀的主要因素。由公式(1)知, 因在安装时四研具对球体施加的初始压力相等, 但与球体表面接触高点半径不等, 而产生安装压力误差。该项误差必然引起研具对高点切削的附加作用, 从而导

致四研具磨损的不均匀性和淡化高点半径均化效应。显然, 与球体表面初始接触高点半径较大的研具对高点切削量小于高点均化所需切削量, 且磨损量也小, 与初始接触高点半径较小的研具对高点切削量大于高点所需切削量, 且磨损量也大。因此, 初始压力误差会使高点不能完全均化即产生高点均化剩余误差。该剩余误差和研具磨损的不均匀势必影响表面高点的均化程度和圆度误差趋小化程度, 也会导致残存圆度误差变大(与未研包络区误差迭加)。显然, 高点均化剩余误差和研具磨损不均匀度取决于球体材料和研磨前毛坯精度。

根据上述分析和笔者从事的研磨实践, 可以做出在研磨压力、速度和磨料粒度一定及一次安装条件下, 四轴球体研磨机球体研磨圆度误差趋小化随时间变化的线图, 如图 3 所示。从图中不难看出, 研磨时间 T_0 段为圆度误差均匀化效应有效时间, T_0 点之后时间段为圆度差均匀化效应无效时间段。显然当研磨时间 $t = T_0$ 时, 应停止研磨, 此时球体表面研磨处于瞬时未研包络区、研具磨损、初始压力误差总和作用时的均化效应消失或圆度误差趋小化停止状态。若要继续提高球体圆度, 则必须减小研磨压力(减小后的最小压力应保证研具能驱动球体

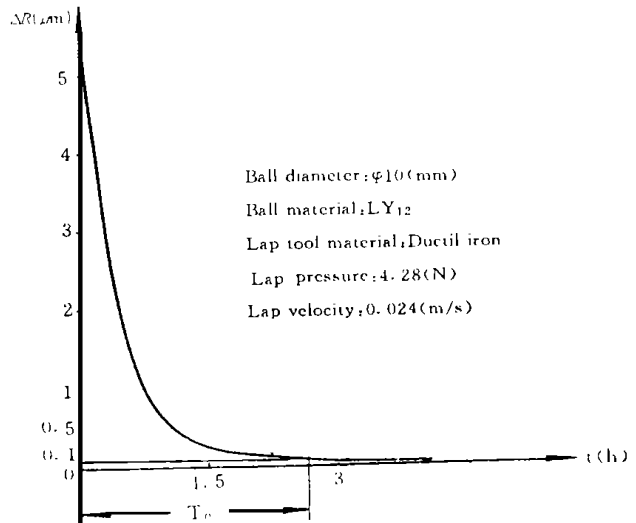


Fig. 3 The small tendency of roundness error

稳定运转)和修复或更换研具并重新安装后, 方可继续研磨以获得圆度误差进一步趋小化。但是, 由于受驱动所需最小压力、四研具均匀研磨包络出整个球面的运动周期无法精确确定(初始研磨压力误差引起的高点均化剩余误差随毛坯精度的提高而减小, 当误差为亚微米级时, 它对高点均化影响所剩无几, 因此可不考虑)以及研具表面磨损的不均匀性(使研具与球面接触为非圆曲线)的约制, 必须导致球面存在残存高点区, 而该高点区与非高点区二包容同心圆半径差即为圆度误差。

5 结 论

综上所述, 对四轴球体研磨机球面研磨圆度误差趋小化机理归纳如下:

1) 因四研具对球体表面的研磨压力为弹簧加载, 当高点半径不同时将引起弹簧压力的不同, 使研具对高点切削作用的强弱不同, 故有对高点半径的均化作用机制亦即圆度的趋小化机制。此外, 四研具对同一高点区具有分担均化作用, 所以同时还具有误差均匀化效应(与单研具研磨相比)。

2) 球体表面存在的未研包络区是决定残存圆度误差大小的主要因素, 未研包络区的高点引起的圆度误差大小取决于研具能驱动球体稳定运转所需的最小压力的大小(在研磨速度和磨料粒度一定条件下)。

3) 安装初始压力误差和研具磨损的不均匀也影响残存圆度误差的大小, 但随多次安装研

磨、高点与非高点半径差减小及修复或更换研具,该影响将被淡化。

参 考 文 献

- 1 Angele W. Finishing high precision quartz ball. *Precision Engineering*, 1980, (3): 119 ~ 122
- 2 王先逵编著. 机械制造工艺学(下册). 北京:清华大学出版社, 1989
- 3 付永启. 误差均匀化效应的机理分析. *光学精密工程*, 1997, 5(3): 31 ~ 33

Mechanism Analysis of Homogenization Ball Lapping Roundness Error for the Four Shafts Ball-lapping Machine

SUN Xin-Min

(*Department of Mechanical Engineering, Hebei Institute of Technology, Tangshan 063009*)

LI Shu-Wen, WANG Yong-Liang

(*Department of Precision Instrument and Mechanisms, Tsing Hua University, Beijing 100008*)

Abstract

This paper introduces the ball lapping model of spring-loading lap tools for the four shafts ball-lapping machine and explains the small tendency mechanism of the ball roundness error using the effects of cutting high points and homogenization lapping error. It advances that the non-lapping envelope region is a major fact of generating roundness errors, and inquires into the effects of ball roundness with non-lapping envelope region, preliminary pressure error and lap tool wear. It gives the measures of solving these problems and provides basis for improving the ball-lapping roundness.

Key words: Ball lapping, Lapping mechanism, Homogenization error

孙新民 男, 46岁, 河北理工学院机械系副教授。多年从事机械设计与制造的教学与科研工作, 负责研制的“数控混凝土空心板自动切割机”通过省级鉴定。近年来共发表论文 20 余篇。1996 年至今与清华大学精密系合作承担国防科工委 95 预研项目子课题“小型静电陀螺仪转子工艺及设备的研究”工作。