

文章编号 1004-924X(2000)01-0046-05

四轴球体研磨机超精密研磨的机理及试验

孙新民¹, 李树文², 王永梁²

(1. 河北理工学院机械系, 河北 唐山 063009;

2. 清华大学精密仪器与机械系, 北京 100084)

摘要: 根据四轴球体研磨机弹簧加压和高点切削作用, 运用创成性加工原理和误差均匀化效应对四轴球体研磨机实现球体超精密研磨的机理作了深入地探讨, 解释了该机“以粗干精”的特性, 提出了实现球体超精密研磨的基本工艺方法。并以此作指导, 对小型静电陀螺仪球形转子的研磨进行了验证。

关键词: 球体研磨; 创成性加工; 误差均匀化效应

中图分类号: TQ 171.684 **文献标识码:** A

1 引言

精密球体是精密仪器及设备中的重要零件, 它可作为静电陀螺仪转子、精密轴承的滚动体、圆度仪的测量基准等。它的精度指标有“三度之称”, 即尺寸精度、圆度和表面粗糙度, 其中最为困难的是保证圆度精度($10^{-1}\mu\text{m} \sim 10^{-2}\mu\text{m}$)。目前能保证达到这一精度级别的球体加工方法一般是研磨。在众多的球体研磨技术中, 效果较为突出且成本较低的手段是四轴球体研磨机。

四轴球体研磨机及球体研磨技术最早由美国学者 W. Angle 在 1980 年提出, 他对该机的工作原理、结构组成、研磨石英球体精度、工艺环境条件等作了介绍^[1]。此后, 清华大学章燕申、雷田玉教授等人对四轴球体研磨机进行改进研制, 并在该机上研磨出直径 $\Phi 38\text{mm}$ 的光学玻璃球, 其圆度精度优于 $0.025\mu\text{m}$ ^[5]。上述研究成果使得古老而传统的研磨工艺走向机械化和自动化的道路, 也使得该项技术在当今精密加工乃至超精密加工领域占有一席之地。

但是, 由于上述研究对四轴球体研磨机“以粗干精”(四轴球体研磨机制造精度为微米级, 被研磨球体精度达亚微米级)的特性从机理上未作出解释, 致使这种精密加工方法尚缺乏系统的基础理论作指导, 乃至造成球体的精密研磨一直处于依靠加工者的经验和费时费工的摸索。为此, 笔者

从四轴球体研磨机的球体研磨原理和力学模型入手, 应用研磨过程中的创成性加工原理和误差均匀化效应, 深入阐述了球体研磨的误差趋小化机理, 亦即四轴球体研磨机“以粗干精”的特性, 并结合小型静电陀螺仪球形转子的研磨试验, 提出了如何实现球体超精密研磨的基本工艺方法。

2 球体的研磨原理

四轴球体研磨机的研磨装置简图如图 1 所示。图中四研磨轴 I、II、III、IV 分别由四个伺服电机通过同步齿形带降速驱动(图中未示出), 浮动联结在各轴前端的圆筒式研具在随轴转动的同时, 可沿轴移动和摆动, 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, 并摩擦驱动球体绕瞬时轴线 $W-W$ 转动, 通过有序定时改变两研具正转两研具反转组合, 使球体回转轴

4

线 $W-W$ 有序定时变化 ($\omega = \sum_{i=1}^4 \omega_i$, 且 $\omega_i = 0$ 和 $\omega_i = k\omega$ ($i = 1, 2, 3, 4$))。因四轴 I、II、III、IV 在空间相互对称布置(任意两轴间夹角 $\varphi = 109.4712^\circ$), 而且四研具把球体包容在中间并与球体的接触线为球面圆, 所以当四研具的半径、角速度值和压力值相等, 且两研具正转两研具反转摩擦驱动被研球体旋转时, 可实现四研具对球坯的球面成型和均匀研磨^{[1][2][5]}。

3 球体研磨的创成性加工

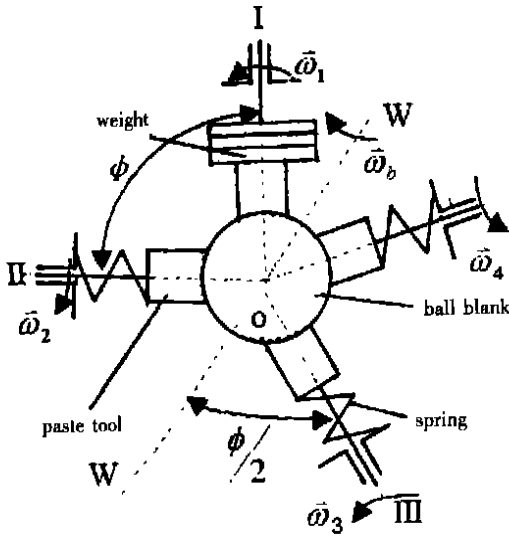


Fig. 1 The sketch of ball lapping

由研磨工艺原理^{[4][6]}知,研磨是依靠研具与球体间的游离磨料、压力和相对运动来实现的。从图 1 所示的球体研磨原理可知,由于四研具浮动且借助于砝码和弹簧的作用与球坯保持接触,所以研具对球坯的研磨属于非强制性加工,而且两者间的相互作用必发生在相互凸出的部位(也称作高点),其作用的结果为相互凸出的部位被磨掉,即高点切削。而且,当磨料粒度和研磨速度一定情况下,四研具对球坯的瞬时研磨量决定于接触部位的瞬时压力。

3.1 研磨过程的创成性加工机理

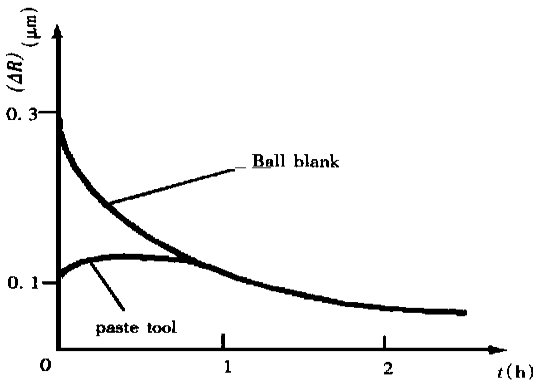


Fig. 2 The minimizing roundness process of the initiative lapping ball

如上所述,由于该研磨加工是一种选择压力作用点的加工方法,当在砝码和弹簧的作用下研具与工件浮动接触并对其施加压力后,会自动选

择相互凸出部位进行加工,所以仅磨掉相互承受压力处(高点处,称作误差点)的材料。因此,这种加工方法具有相互引导性,也称作对研。换句话说,当球坯误差(圆度误差和粗糙度误差)大于研具误差时,研具会引导被研磨球体误差减小,同时研具本身误差会增大,反大亦然。所以又称这种相互引导性切削为创成性(进化)研磨。特别是研具和球坯误差均在亚微米级,瞬时研磨量在纳米级(微细加工)时,研具与球坯间会分别随着对方引导而同时提高精度,从而可实现对球体的超精密研磨。图 2 示出了研具对球坯进行创成性研磨圆度误差(ΔR) 随时间(t) 趋小化过程。从图中可以看出,当球坯初始圆度误差大于研具初始圆度误差时,球坯圆度误差会随着研具的引导下而很快减小,而研具圆度误差在球坯的引导下会有所增大,但增大较慢(主要是四研具对球坯具有误差均匀化效应和研具硬度较高,精度的保持性较好)。当研具和球坯的圆度误差相等或接近相等时,在相互引导下研具和球坯的圆度误差会同时趋小化。由此可见,它与一般强制进给切削方法不同,其加工精度主要不决定于机床本身精度,而主要决定于研具与球体间的接触形态和相对运动轨迹、工艺参数配置、研磨剂配方等,所以四轴球体研磨机具有“以粗干精”的基本特性。

3.2 研磨过程中的误差均匀化效应

由图 1 所示的四轴研磨装置知,研磨过程中除存在上述研具对球坯创成性研磨效应外,同时还存在弹簧加压研具对球坯研磨的误差均匀化效应。因为在研磨速度和磨料粒度一定情况下,瞬时研磨量大小仅决定于研具与球体间的压力大小。因此,当研具对球坯表面呈高点切削状态时,球面诸高点半径的不同将引起弹簧压力的不同,从而可导致四研具对球体表面切削量大小的不同。显然,半径较大的高点与研具接触产生较大的研磨压力和半径切除量,反之亦然。这样,经过四研具依次对诸高点研磨量的不同,使诸高点间的半径差得到减小和均化,球坯的圆度误差也随之减小,亦即研具弹簧维持加载研磨存在圆度误差均匀化效应,尤其是当球坯表面诸高点半径差较大(如粗研球坯)时,其圆度误差均匀化效应尤为显著。

3.3 球体研磨试验

本试验对象为小型静电陀螺仪球形转子,转子直径 $\Phi 10\text{mm}$ 、材料为铝合金 LY12-CZ(应为铍材,但该材料有毒需特殊加工条件,故选择与之机械性能相近的材料),选择小样本转子数 10 个,转

子的三度要求是: 尺寸精度为 $\pm 1\mu\text{m}$ 、圆度为 $0.08\mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $0.025\mu\text{m}$ (其中尤以圆度最难保证)。工序安排为粗研、半精研、精研、研抛, 粗研和半精研选用灰铸铁研具, 以提高研磨效率, 精研和研抛选用硬度很高的球墨铸铁研具(耐用度较高, 精度保持性较好), 以提高创成性研磨的精度。现以精研和研抛工序为例, 介绍如何按创成性加工机理进行球体超精密研磨的基本工艺方法。

铝合金LY12-CZ球体与球墨铸铁研具相比其硬度较低, 属于易切削材料(但不易获得高圆度和低粗糙度)。因在精研工序仅去除(8~12) μm (瞬时研磨量为(3~5) λ/s)和研抛工序仅去除(3~5) μm (瞬时研磨量为(1~2) λ/s)的研磨余量, 在研磨过程中对研具的磨损较轻, 所以研具对球坯具有良好地引导性。因此, 按上述研磨的创成性加工机理(研磨试验结果也已证明), 为保证高精度创成性研磨的连续性和继承性, 对同一球体的精研和研抛两工序使用相同的四研具即实现配研, 既能获得很高研磨精度, 又可显著提高研磨效率。现就精研和研抛的球坯和研具精度、试验步骤、工艺参数配置、研磨剂配方、试验结果归纳如下。

(1) 圆度要求: 半精研后球坯圆度误差应小于

$0.5\mu\text{m}$, 并按圆度误差从小到大编号, 研具初始圆度误差应小于 $0.2\mu\text{m}$ 。

(2) 试验步骤: 先对圆度误差最小的球坯进行精研, 当球坯圆度误差小于 $0.16\mu\text{m}$ 时, 更换研磨剂和调整工艺参数(四研具不换), 然后进行研抛。通过控制研磨时间, 使球体的三度达到统一, 即满足尺寸精度、圆度、表面粗糙度的要求。此后, 按球坯圆度误差从小到大编号依次重复上述工艺步骤进行精研和研抛, 直到圆度误差最大的球坯。

应当指出, 按上述步骤进行研磨, 不但可获得稳定地研磨精度, 而且还显著地提高了研磨效率, 做到了事半功倍。这是因为对第一个球坯研抛后, 在被研球体的精度达到或优于规定要求的同时, 研具的精度也将达到或优于球体研抛后的精度, 这样就可使以后球体精研工序的研具始终处于高精度状态, 研具对球坯研磨的创成性得以充分发挥, 从而可显著缩短精研工序的时间。

(3) 工艺参数配置: 为实现精研和研抛时的微量加工(特别是研抛), 应选用较低的研磨压力(因研具是依靠研磨压力产生的摩擦力来驱动球坯转动, 所以为保证球坯作正确稳定的转动, 其研磨压力不应过低)、较小的研磨速度和磨料粒度。经研磨试验摸索, 采用如表1所示的工艺参数配置。

Table 1 Technological parameter dispose of lapping alufer ball

Procedure	Parameter			
	Pressure (N)	Velocity (m/s)	Abrasive grain	Time (h)
Precision lapping	4~5	0.03~0.05	White boule (W5)	1.5~2
Finish lapping	2.5~3	0.03~0.05	Chromium oxide (W1)	1~1.5

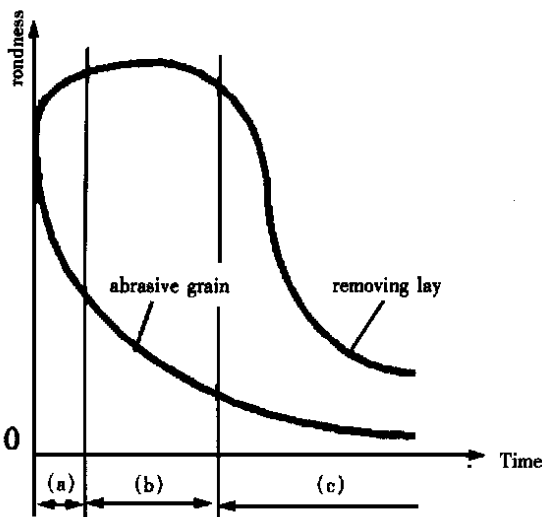


Fig 3 The sketch of lapping process

(4) 研磨剂的配方: 研磨剂由磨料和研磨液组成。由研磨工艺机理知^[6], 在研磨的过程中游离磨料一般经历三个阶段(从参与研磨开始到研磨作用淡化), 即磨粒破碎磨圆(如图3(a))、多磨粒均匀研磨(如图3(b))、研磨剂化学作用阶段(如图3(c))。从图中可知, 为在精研和研抛时获得极微的研磨量(每分钟几纳米至十几纳米), 除选用较小的磨料粒度和比重外, 还应延长它参与研磨的时间。因此, 研磨液应具有较高的粘附性, 以减少研磨过程中添加研磨剂的次数。经研磨试验证明, 表2中给出的研磨剂配方可在添加一次研磨剂的条件下, 能持续研磨两小时以上。

Table 2 The paste agent formula

Precision lapping	White boule(W 5)30%	Kerosene30%	Stearic acid30%	Liquid petrolatum 30%
Finish lapping	Chromium oxide40%	Kerosene30%	Stearic acid30%	Liquid petrolatum 30%

(5) 研磨试验结果: 按上述工艺步骤、工艺参数配置、研磨剂配方对球体精研和研抛并用泰勒圆度仪进行测量, 可获得表 3 给出的球体圆度。

Table 3 Ball roundness of precision and finish lapping

Procedure	Ball number									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precision lapping (μm)	0.09	0.11	0.12	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16
Finish lapping (μm)	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08

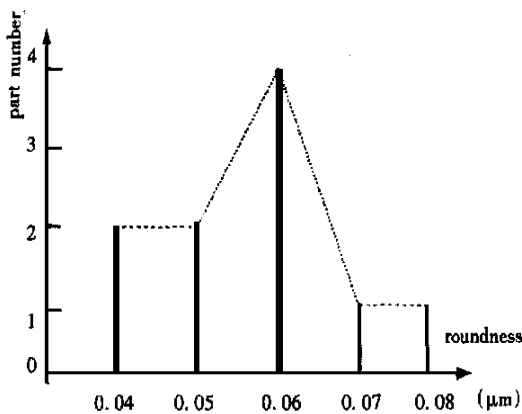


Fig. 4 The lapping roundness histogram

对表 3 数据进行统计分析, 可绘出研磨圆度误差的直方图, 如图 4 所示。

从图中不难看出, 尽管研磨试验球体个数(共 10 个)为小样本, 但其研抛后的球体圆度仍近似

服从正态分布。

4 结 论

将上述所讨论的问题进行归纳, 可作出如下几点结论。

(1) 应用创成性加工机理和误差匀化效应, 从本质上描述了四轴球体研磨机为什么能“以粗干精”的作用机制。

(2) 具有创成性加工机理和误差均匀化效应的研磨装置, 是实现球体精密加工乃至超精密加工的基本手段。

(3) 按照创成性加工机理和误差均匀化效应, 制定合理的工序安排、工艺步骤、工艺参数配置、研磨剂配方, 是实现球体精密加工乃至超精密加工的基本条件。

参考文献:

- [1] Anle W. Finishing high precision quartz ball[J]. Precision Engineering, 1980, (3): 119~ 122
- [2] 王先逵编著. 机械制造工艺学(下册)[M]. 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[J]. 光学 精密工程, 1997(3): 31~ 33
- [4] 何雅全, 吴明根编著. 超精密加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- [5] 章燕申, 雷田玉. 精密球形零件的工艺和计量. 中国惯性技术学会学报[J]. 1989, (1): 117~ 124
- [6] 机械工程手册编写组. 机械工程手册(8分册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996

Mechanism and experiment of superprecision ball lapping for the four shafts lapping machine

SUN Xin-min¹, LI Shu-wen², WANG Yong-liang²

(1. Department of Mechanical Engineering, Hebei Institute of Technology, Tangshan 063009, China;
2. Department of Precision Instrument and Mechanisms, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: According to the effects of spring exerting pressure and cutting high points, this paper studies in depth mechanism of ball superprecision lapping for the four shafts lapping machine, using initiative machining and homogenization error. By example of the total lapping experiment of small-sized electrostatic gyroscope, a basic lapping method for achieving ball superprecision lapping is introduced.

Key words: ball lapping; initiative machining; homogenization error

作者简介: 孙新民(1952-),男,河北曲阳县人,河北理工学院机械系副教授,主要从事机械设计与制造的教学和科研工作。主持研究的《数控混凝土空心板自动切割机的研制》课题,1996年通过省级鉴定,近几年来发表论文20余篇。现与清华大学精仪系合作开展国防科工委“九五”预研项目《小型静电陀螺仪的技术研究》工作。