

# 高精密轴承球研磨方式的研究

高梅, 郭红燕

(南京工业职业技术学院, 江苏 南京 210016)

## The Research of High-precision Bearing Ball Methods

GAO Mei, GUO Hong-yan

(Nanjing Institute of Industry Technology, Nanjing 210016, China)

**摘要:** 论述了轴承球研磨的原理及成球机理;并对现有的各种研磨方式的研磨原理、研磨精度、研磨效率等进行了较为全面的比较。最后又提出了一种新的研磨装置,并对它进行了简单的介绍。

**关键字:** 球度;研磨原理;研磨方式;效率

**中图分类号:** TH16 **文献标识码:** A

**Abstract:** This paper explains the principle of bearing ball lapping and forming sphere. It compares the precision and efficiency of several precision lapping methods. In the end it puts forward a new lapping equipment and simply introduces it.

**Key words:** ball roundness; lapping principle; lapping method; efficiency

## 1 引言

现代制造技术的内涵相当广泛,主要有精密和超精密加工技术、高度自动化技术以及特种加工技术。其中精密和超精密加工技术是现代制造技术的前沿,它为我国发展尖端技术提供了技术支持和保障。例如,精密陀螺、激光核聚变的反射镜、人造卫星的仪表轴承、计算机磁盘、复印机磁鼓和激光打印机的多面棱镜等都需要进行超精密加工。同时,超精密加工技术的发展也促进了机械、液压、电子、半导体、传感器和测量技术及材料科学的发展。可以说超精密加工担负着支持最新科学进步的使命,也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。

轴承球是滚动轴承(球轴承)的重要零件,其制造精度对轴承的性能特别是动态性能(振动、噪声等)有极重要的影响。轴承球在精密设备和精密加工中具有十分重要的地位。高精密轴承球的精度指标有尺寸精度、圆度、粗糙度。其中最为困难的是保证圆度精度。目前能保证达到这一精度级别的球体加工方法一般是采用研磨加工。

## 2 研磨原理及成球机理

### 2.1 研磨原理

研磨时,研具在一定的压力下与加工面作复杂的相对运动。研具和工件之间的磨粒和研磨剂在相对运动中,分别起机械切削作用和物理、化学作用,使磨粒能从工件表面上切去极微薄的一层材料。从而得到极高尺寸精度的表面。

研磨时,有大量磨粒在工件表面上浮动,它们在一定压力下的滚动、刮擦和挤压,起着切除细微金属层的作用。当研磨脆性材料时,磨粒在压力作用下,首先使加工面产生裂纹,随着磨粒运动的进行,裂纹不断地扩大、交错,以致形成了碎片,最后脱离工件。

### 2.2 成球机理

球坯在研磨过程中,一方面随研磨盘作公转运动,一方面又连续自转,球表面与盘的接触表面产生相对滑动和滚动。由于接触表面各点的压力不同,球坯、研磨盘和研磨液三者之间存在相互作用;①利用磨粒刮削球面以去除余量;②利用磨粒的滚动作用加工球面;③利用磨粒切削刃挤压球坯进行加工。这就使球坯受到挤压、摩擦等作用,去除球坯表面的加工余量,从而达到减小球径,提高圆度和降低表面粗糙度的目的。达到上述研磨效果的先决条件是使

收稿日期:2005-05-05

作者简介:高梅 南京工业职业技术学院机械系讲师 硕士学历;  
郭红燕 硕士研究生在读。

球在研磨盘接触表面上产生滑动。滑动程度愈大，研磨效果愈佳。表征球滑动程度大小的数学量为球的自旋角。故为了提高研磨效率，应使研磨装置保证球有较大的自旋角。

### 3 研磨方式

由于精密轴承球在现代制造业中的重要地位，精密轴承球的研磨加工技术已引起了众多学者的关注，提出了各种不同的研磨方式。

#### 3.1 研磨盘研磨方式

采用有导向槽的上下研磨盘对球坯进行研磨加工，球坯在压力作用下，受转动的研磨盘的摩擦力以及研磨液的粘滞力作用沿研磨盘上的导向槽运动。除了传统的V形槽研磨法(同轴两盘研磨方式)，还有锥形研磨法(同轴两盘研磨方式)，自旋回转控制研磨法(同轴三盘研磨方式)等。

##### 3.1.1 V形槽研磨方式

在传统的V形槽研磨法(如图1所示)加工过程中，自旋角 $\theta$ 的值仅取决于球坯和研磨盘导向槽的直径，与研磨盘转速无关。实际只在 $0^\circ$ 附近取值，球坯只能作“不变相对方位”研磨运动。但理论和理论分析表明自旋角 $\theta$ 过小对球的研磨是不利的。由于自旋角 $\theta$ 在研磨过程中保持不变，球坯与研磨盘的接触点在球坯表面形成的研磨迹线是一组以球坯自转轴为轴的圆(如图2所示)，在球坯的同一研磨循环不同自转圈的研磨中，研磨盘沿着三接触点的三个同轴圆迹线对球坯进行“重复性”研磨，不利于球坯表面迅速获得均匀研磨。这种加工运动本身由于不能实现完整的成球运动，从而限制了被加工球体的球度的提高，而且由于自旋角很小，也不利于提高研磨效率。

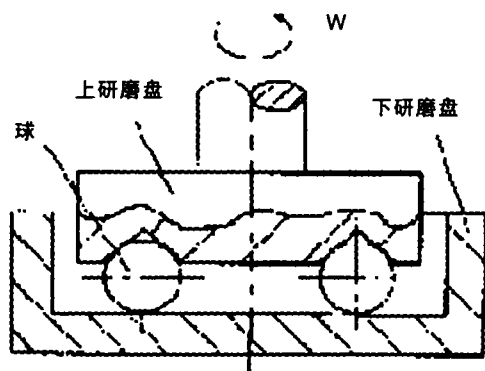


图1 V型槽研磨方式原理

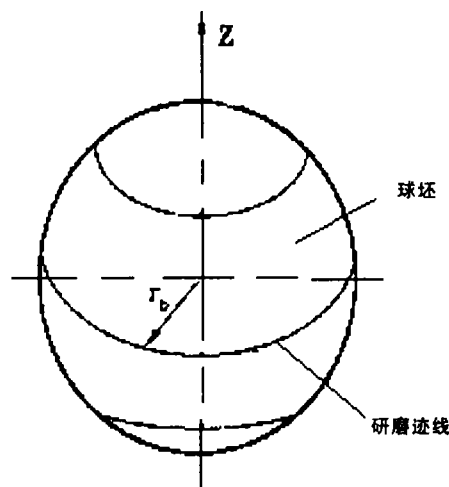


图2 球坯表面的研磨迹线

##### 3.1.2 锥形研磨方式(同轴两盘研磨方式)

实验结果表明， $\theta = 45^\circ \sim 70^\circ$ 时，研磨效率、精度及表面粗糙度的综合效果好，见图3。但这种研磨方式下的自旋角仅与研磨盘直径有关，也是一个固定值，其研磨迹线与V形槽研磨法类似，是一组同轴圆，限制了球度的提高。研究结果也表明，在这种

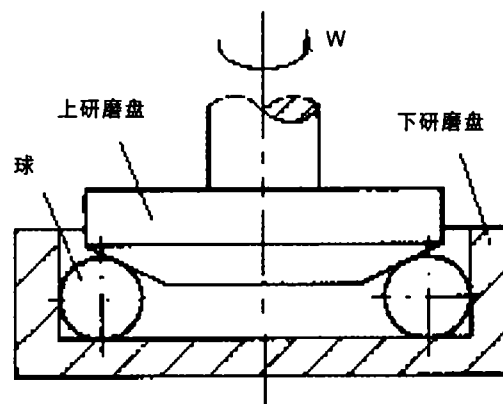


图3 锥形研磨方式原理

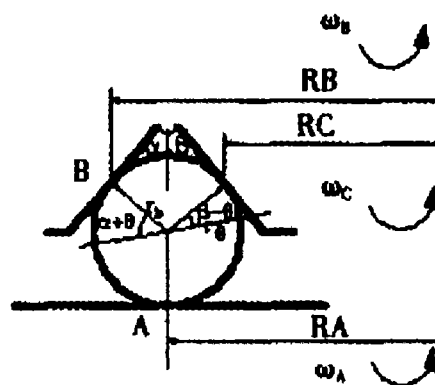


图4 同轴三盘研磨原理

加工方式下,需要依靠实际研磨过程中自旋角的缓慢变化来达到均匀研磨的目的,但这种自旋角的变化是随机、不可控的。

### 3.1.3 自旋回转控制研磨方式(同轴三盘研磨方式)

为提高精密球的研磨精度,日本金泽大学黑部

$$\theta = \arctan\left\{\frac{R_A R_B (\omega_B - \omega_A) \sin\beta - R_A R_C (\omega_C - \omega_A) \sin\alpha + R_B R_C (\omega_B - \omega_C)}{R_A R_B (\omega_B - \omega_A) \cos\beta + R_A R_C (\omega_C - \omega_A) \cos\alpha}\right\} \quad (1)$$

式中  $\alpha, \beta$ ——B、C 研磨盘与垂直方向的夹角

$\omega_A, \omega_B, \omega_C$ ——各研磨盘回转角速度

$R_A, R_B, R_C$ ——各研磨盘回转半径

### 3.2 四轴球面研磨方式

使用四轴自动球面研磨机对单颗球体进行精密研磨加工,通过四轴转动方向的不同组合,实现瞬时轴的不断变化(如下图 5 所示)。这种研磨方式虽然能获得较高的加工精度圆度可达到(圆度可达到  $0.05\mu\text{m}$ ),但一次只能对一颗球进行研磨,加工效率低。

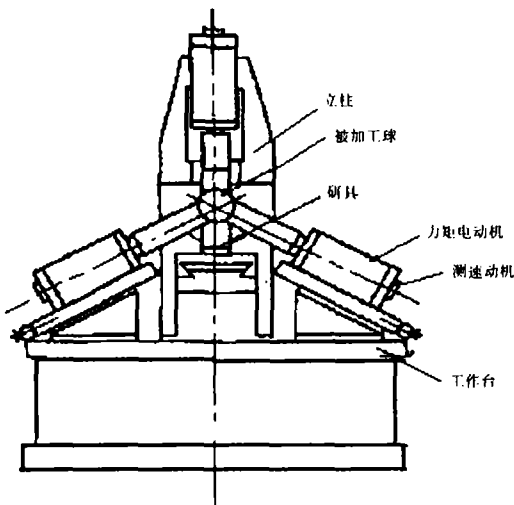


图 5 四轴自动球面研磨方式

### 3.3 磁力研磨方式

磁力研磨法采用磁流体技术实现对球坯进行高效研磨除了对球坯的加压方式不同外,其研磨运动方式同研磨盘研磨方式是基本相同的。该方法的研磨装置示意如下图 6 所示,基本原理是将一定比例的磨料等非磁性体添加到磁流体中形成混合液,在具有磁场梯度的特殊磁场中,磁性物质朝向强磁场方向聚积,而磨料等非磁性体则都被排斥到弱磁场一方,从而形成垂直方向的磁浮力和水平方向的保持力。在磁流体研磨试验装置中,磁场由条状强磁铁产生,尼龙浮板是非磁性体,在磁浮力作用下向上

利次等人提出了一种新的同轴三盘研磨方式。三块研磨盘可独立转动,可以通过控制研磨盘转速变化来调整球坯的自旋角  $\theta$ ,其运动原理如图 4 所示。利用该研磨装置来定量研究自旋角对研磨效率、精度及粗糙度的影响。在这种研磨方式下自旋角  $\theta$  为:

浮起形成加工压力,由高速驱动轴通过导向环和尼龙浮板的导向作用,带动被加工陶瓷球在磁流体和磨料的混合液中运动,从而实现陶瓷球的研磨加工。研磨试验结果表明,该研磨方式研磨效率很高,但所加工陶瓷球的球形圆度误差高,该装置的结构也较复杂。

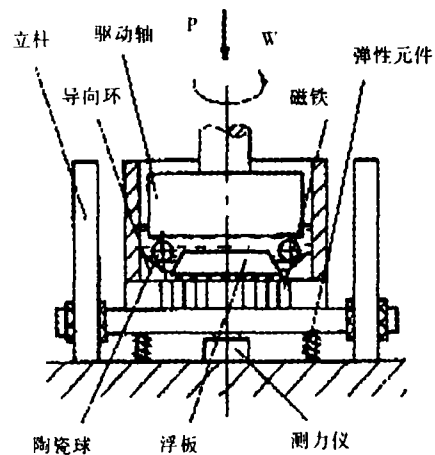


图 6 磁力研磨方式原理

综上所述,用锥形研磨方式对陶瓷球进行研磨,其综合效果较好,但这种研磨方式下的自旋角仅与研磨盘直径有关,是一个固定值,而研磨极小圆度偏差的球,必须使球在研磨工具中经常改变方向。

## 4 新型研磨装置

研磨装置对陶瓷球的研磨精度和研磨效率有重要影响。为了进一步提高陶瓷球的研磨精度和研磨效率,现介绍一种新的精密轴承球研磨装置(如图 7 所示)。这种研磨装置以直线电机作为驱动系统,采用新型的加工成球运动方式,通过采用固着磨料磨具实现以磨代研,可实现轴承球批量生产的高效精密加工。

直线电机是近年来迅速发展起来的新技术,直线电机直接驱动系统具有结构简单、动态响应快、速度和加速度大、精度高、振动和噪声小等一系列优

点,是现代机床设备的理想传动方式。此磨球装备采用直线电机直接驱动磨具(磨盘)可以达到简化结构,提高设备的精度保持性,降低维护成本的目的。采用固着磨料磨具实现以磨代研是一个重要的发展方向,可以保证轴承球加工过程的质量稳定性,提高加工效率,为未来的自动化加工打下良好的工艺技术基础。

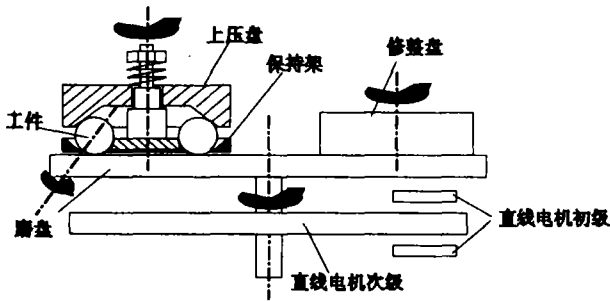


图7 新型研磨装置

这一新的研磨装置采用新型的加工成球运动方式,该方式具有如下特点:(1)轴承球驱动与夹持机构与固着磨料磨具有不同轴回转;(2)该机构中的保持架可以防止球体干涉与碰撞;(3)可实现固着磨料磨具的在线修整。通过采用固着磨料磨具实现以磨代研,可实现轴承球批量生产的高效精密加工。新的磨球装备可以作为轴承球研磨机的升级换代产品。

该磨球装备预期达到的主要技术经济指标如下:

- (1)磨盘采用固着磨料;

- (2)直线电机驱动,功率400W;
- (3)磨盘直径300mm;
- (4)磨盘转速10~200rpm无级调速;
- (5)可加工球直径5~20mm;
- (6)球度优于50nm,表面粗糙度 $R_z < 10\text{nm}$ ;
- (7)加工效率比游离磨料提高50%以上。

## 5 结束语

介绍和分析了轴承球的主要研磨方法,并在上述基础上提出了一种结构简单、研磨效率和研磨精度高的、加工精密轴承球的方式。对这一新型研磨装置的加工成球运动方式进行研究、运用仿真手段进行成球运动方式的分析和实现机构的设计等是下一步所要研究的方向和内容。

## 参考文献:

- [1] 黑布利次. 陶瓷球的超精密研磨. 国外轴承, 1992, (2):46~55.
- [2] 吴玉厚. 陶瓷球轴承磨削机理及相关技术研究. 东北大学博士论文, 1994.
- [3] Umehara N. Magnetic fluid grinding\_a new technique for finishing advanced ceramics. CIRP, 1994, 43 (1):126~130.
- [4] 孙新民, 李树文, 王永梁. 4轴球体研磨机超精度研磨的机理及实验[J]. 光学精密工程, 2002, 8, (1)46~50.
- [5] Robert T. High precision silicon nitride balls for bearing [J]. Ball Bearing Journal, 1993, 241.
- [6] 张永乾, 陈志军, 孙永安, 李县辉. 高精度陶瓷球研磨加工[J]轴承, 2002, (3):8~11.