

表面质量控制及检测

# 机构运动形式对圆柱面表面形貌影响的实验研究

程仲点, 姚蔚峰, 郑斌, 陈芝向, 袁巨龙

(浙江工业大学 超精密加工研究中心, 杭州 310014)

**摘要:** **目的** 在自行研制的双平面方式圆柱外圆加工设备, 分析不同运动形式对圆柱面表面形貌的影响, 以提高其工作性能, 延长其工作寿命。 **方法** 在上研磨盘、下研磨盘、偏心轮和外齿圈的转速大小恒定的条件下, 对不同的运动形式进行研究, 观察加工前后圆柱面的宏观形貌和微观形貌, 并进行比较。 **结果** 当上研磨盘、下研磨盘、偏心轮和外齿圈同时转动时, 加工后的圆柱面宏观形貌没有明显的划痕和加工纹路, 表面形貌最好, 表面粗糙度为  $0.124 \mu\text{m}$ ; 当偏心轮和外齿圈转动, 其他不转动时, 加工后的圆柱面存在最明显的条纹状加工纹路和划痕, 表面形貌最差, 表面粗糙度为  $0.171 \mu\text{m}$ 。 **结论** 在运动形式和转速组合的设计时, 应使加工轨迹均匀分布, 尽量增加圆柱面圆周方向的材料去除, 减少圆柱面轴线方向的材料去除, 选择合理的比例有助于改善圆柱面的表面质量。

**关键词:** 双平面研磨; 表面形貌; 运动学; 圆柱滚子; 轴承

**中图分类号:** TG707; TG74<sup>+</sup>8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)10-0117-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.10.020

## Effect of Motion Types on Cylindrical Surface Topography

CHENG Zhong-dian, YAO Wei-feng, ZHENG Bin, CHEN Zhi-xiang, YUAN Ju-long

(Ultra-precision Machining Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**ABSTRACT: Objective** The effect of different motion types on the cylindrical surface topography was analyzed on the self-developed both-sides lapping machine to improve the work performance and extend its working life. **Methods** Under conditions of the given rotation speeds of the upper and lower plates, the eccentric wheel and the outer ring gear, the different motion types were studied, and the macroscopic and microscopic cylindrical surface topography was observed and compared. **Results** When the upper and lower plates, the eccentric wheel and outer ring gear rotated simultaneously, there were no obvious scratches and processing traces on cylindrical surface topography after processing, and the best surface topography was obtained, with the surface roughness

收稿日期: 2015-06-22; 修订日期: 2015-08-12

Received: 2015-06-22; Revised: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(51175468); 浙江省自然科学基金重点项目(Z1110794)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51175468) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China(Z1110794)

作者简介: 程仲点(1989—), 男, 湖北人, 硕士研究生, 主要研究超精密加工技术。

Biography: CHENG Zhong-dian(1989—), Male, from Hubei, Master graduate student, Research focus: ultra-precision machining technology.

通讯作者: 袁巨龙(1962—), 男, 浙江人, 教授, 博士生导师, 主要研究超精密加工技术及装备。

Corresponding author: YUAN Ju-long(1962—), Male, from Zhejiang, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: ultra-precision machining technology and equipment.

$Ra$  being  $0.124 \mu\text{m}$ . When the eccentric wheel and the outer ring gear rotated, but the others not, the most obvious scratches and processing traces were observed on cylindrical surface topography after processing, and the worst surface topography was obtained, with the surface roughness  $Ra$  being  $0.171 \mu\text{m}$ . **Conclusion** When designing motion types and speeds combination, the processing trajectory should be adjusted to distribute uniformly on the cylindrical surface, and the material removal in the circumferential direction of the cylindrical surface should be maximized, while the material removal in the axial direction should be minimized. A reasonable proportion between them can improve the cylindrical surface quality.

**KEY WORDS:** double-sides lapping; surface topography; kinematics; cylindrical roller; bearing

轴承是精密机械、仪器设备中的关键基础件,被誉为装备制造的“心脏”部件,其精度对装备的总体性能有重大影响。圆柱滚子作为轴承的关键零件也是最薄弱的零件,其圆柱面与轴承套圈滚道呈线接触,是轴承承受载荷的主要部位。大约 60%~70% 的轴承失效都是由于滚动体产生不同程度的疲劳破坏所致<sup>[1]</sup>。圆柱滚子的外圆轮廓拥有较好的表面质量,有助于提高轴承的工作性能,延长工作寿命<sup>[2]</sup>,因此研究圆柱滚子外圆轮廓的超精加工技术极为必要。

目前,圆柱滚子外圆轮廓批量加工的主流技术是无心磨削加工方法<sup>[3-6]</sup>,它的最大优点是加工效率高,可适用于流水线生产<sup>[7]</sup>;但是随着市场对圆柱滚子加工质量的提升,无心磨削加工方法的局限性也越来越明显。在无心磨削加工过程中,圆柱滚子是被逐次加工的,而且加工过程中导辊、托板等工具持续磨损难以修整,这些都大大限制了圆柱滚子尺寸精度的提高。此外,无心磨削采用固着磨料的砂轮或超精油石作为加工工具,导致表面损失层大、缺陷多,极大限制了圆柱滚子外圆表面质量的提高<sup>[8-10]</sup>。

双平面加工方式可用于对圆柱滚子外圆轮廓进行超精研,可达到高形状精度和高表面质量。传统的双平面加工方式一般用于对平面零部件进行超精加工<sup>[11-12]</sup>,如硅片、石英晶片、蓝宝石片、精密量块、密封环等<sup>[13-16]</sup>。20世纪,美国 Peter Wolter 公司的 John Indge 将双平面加工方式应用于圆柱面的超精加工,开发了专用加工设备并商业化,直线度、圆度、表面粗糙度均达到了  $0.125 \mu\text{m}$ <sup>[17-18]</sup>。这种加工方法与无心磨削最大的不同在于,它可以轻易地获得纳米级高表面质量,损伤层大大减少,此外可以在圆柱面上获得相互交错、复杂的、几乎不重合的加工轨迹,有利于提高圆柱滚子的疲劳接触寿命。

本文基于双平面加工方式,自主研制了圆柱外圆加工装置<sup>[19-21]</sup>。相比 John Indge 的设备,该加工装置主要构件包括上研磨盘、下研磨盘、偏心轮和环形保持架,均可被电机独立主动驱动,可实现任意的转速组合和多种不同的机构运动形式,更便于实验研

究,以追求更高的加工精度和表面质量。

在应用双平面加工圆柱外圆轮廓的过程中,机构运动形式是影响圆柱面加工轨迹分布的重要因素,进而最终影响圆柱面的表面质量和形状精度。本文在自主研制的双平面加工方式圆柱外圆加工装置上,通过加工实验以探究不同的机构运动形式对圆柱面表面形貌和圆柱面成形的影响。

## 1 加工原理

采用双平面方式加工圆柱滚子外圆轮廓的基本原理如图 1 所示,将圆柱滚子有规则地排布在两块平行且平整的上、下磨盘之间,依靠两块磨盘和保持架的运动,驱动圆柱工件作滚动和平移,同时将磨料以特定方式填充在磨盘与工件圆柱面之间的接触区域,实现对工件圆柱面的材料去除。

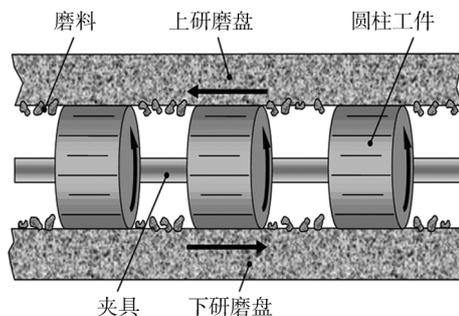


图 1 双平面方式圆柱加工方法的基本原理

Fig. 1 Basic principle of both-sides cylindrical lapping process

采用可实现保持架偏心转摆运动的双平面研磨机作为实验平台以加工圆柱滚子圆柱面,该加工装置的机构原理如图 2 所示,主要构件包括上研磨盘、下研磨盘、偏心轮、外齿圈和保持架,其中偏心轮转轴与研磨盘转轴同轴,偏心轮几何中心与研磨盘转轴存在一定偏心距,保持架套在偏心轮上,同时保持架与外齿圈啮合,这样保持架同时被偏心轮和外齿圈驱动,上下研磨盘、偏心轮和外齿圈分别由 4 个不同的电机独立驱动。

加工前,圆柱滚子放置在保持架上均匀分布的八角形槽孔中,夹在上下研磨盘之间。加压装置通过上盘对工件施加加载压力。加工时,圆柱滚子在上下研

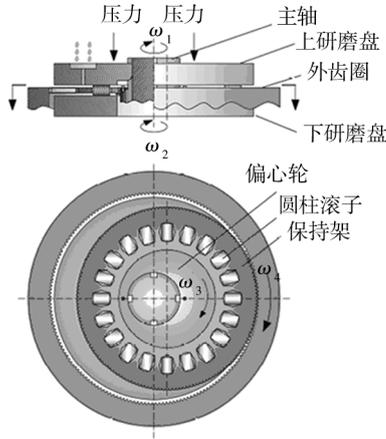


图2 双平面方式圆柱加工装置机构原理示意图  
Fig. 2 Schematic of both-sides cylindrical lapping device

磨盘和保持架的驱动下既作摆线平移运动又做滚动。研磨液从上盘均匀分布的流道输送到圆柱面和上下盘的接触区域,通过研磨液中的游离硬质磨粒对圆柱面实现材料去除。

## 2 机构运动形式实验

### 2.1 实验设计

上研磨盘、下研磨盘、偏心轮和保持架的转动和静止状态共有 15 种不同形式的机构运动,见表 1(0 表示静止,1 表示转动),其中 No. 1—No. 4 为 1 个构件转动时的实验, No. 5—No. 10 为 2 个构件同时独立转动时的实验, No. 11—No. 14 为 3 个构件同时独立转动时的实验, No. 15 为 4 个构件同时独立转动时的实验。

表 1 实验设计

Tab. 1 Experimental design

参数	实验序号														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
上盘	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
下盘	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1
偏心轮	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1
外齿圈	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1

### 2.2 实验条件

本研究实验装置如图 3 所示。



图 3 实验装置图

Fig. 3 Photograph of experimental setup

表面粗糙度测量采用日本 Mitutoyo 的 SJ-410 型号(精度为 0.1 nm,取样长度为 4 mm);工件表面微观形貌应用上海巴拓仪器公司的显微镜进行观察。

圆柱工件材料为 GCr15 轴承钢,尺寸为  $\phi 20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ,初始表面粗糙度约为 170 nm。

研磨液按照  $\alpha$  氧化铝磨料(平均粒径约 13  $\mu\text{m}$ )与去离子水按质量比为 0.3 : 1 混合配制,加工过程中研磨液的流量为 25 mL/min。按照实验设计,上研磨盘、下研磨盘、偏心轮、外齿圈转速分别为 -76, 84, 80, 48 r/min(负号表示从上往下看为逆时针旋转方向),每组实验的加工载荷一定,均为 10 N/滚子,每组加工时间为 15 min,每次加工工件个数为 10 个。

## 3 结果和讨论

### 3.1 工件初始表面形貌

工件初始微观表面形貌如图 4 所示。工件表面布满了近似平行的微细划痕,是无心超精研的加工痕迹。初始工件表面形貌很差,存在加工过程中大颗粒造成的大划痕(如图 4a 所示)和运输过程中的磕碰痕

迹(如图4b所示)。经测量,初始工件表面粗糙度约为170 nm。

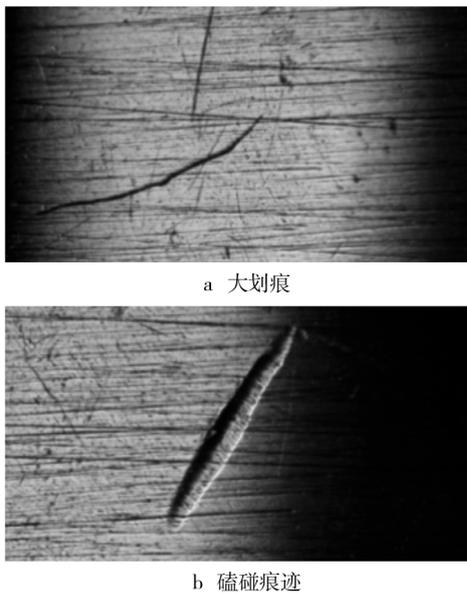


图4 工件初始微观表面形貌的缺陷

Fig.4 Defects on surface topography of the initial workpiece

### 3.2 加工后工件表面形貌

No. 1—No. 4 为1个构件转动的实验。No. 1 实验中,工件宏观和微观表面形貌分别如图5所示,经过研磨加工后,工件初始表面上的缺陷明显消除,只留下近似平行的细微划痕。本文加工方法的特点是加工轨迹相互交错,该图与此特点明显不符,因此推测这主要是由于加工时间不够,工件初始表面的无心磨削痕迹没有充分消除。No. 2 实验中,工件宏观和微观表面形貌如图6所示,工件表面形貌与 No. 1 实验最大的不同在于表面出现了大量的暗色细长平行条纹,这表明在该机构运动形式下,加工轨迹没有均匀分布在圆柱面上。结合图6a和图6b,宏观表面的暗色条纹与微观表面的暗色区域对应,微观加工痕迹没有无心磨削的近似平行划痕,推测这主要是加工轨迹过度集中,研磨加工过度去除所致。工件宏观表面的亮色区域与微观区域的亮色区域对应,微观加工痕迹有明显无心磨削的近似平行划痕,推测这主要是加工轨迹过度分散,研磨去除不足所致。No. 3 和 No. 4 两组实验显示,加工后工件宏观表面均存在暗色条纹,分布面积和数量少于 No. 2 但明显多于 No. 1。

No. 5—No. 10 为2个构件转动的实验。对比实验结果发现, No. 10 实验的工件表面形貌最好,工件宏观和微观表面形貌如图7所示,工件宏观表面没有类似 No. 2 实验中的暗色条纹,这表明在该机构运动

形式下,加工轨迹可均匀分布在圆柱面上,圆柱面被均匀去除。微观表面显示出纵横交错的密集的加工痕迹,并且没有明显的缺陷和划痕,这说明初始的无心磨削加工痕迹已被完全消除。No. 5 加工后实验结果最差,表面存在轴向条纹且周向存在划痕,工件宏观和微观表面形貌如图8所示,表面粗糙度为0.171  $\mu\text{m}$ ; No. 6 实验结果与 No. 10 实验结果大致近似,不同之处在于工件宏观表面会出现一定宽度的浅色环

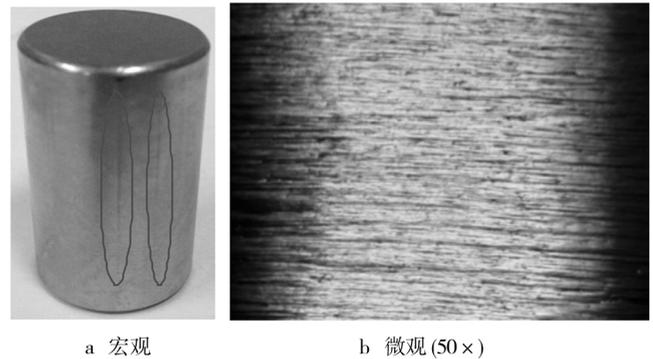


图5 No. 1 实验加工后的工件表面形貌

Fig.5 Surface topography of workpiece processed in No. 1 test

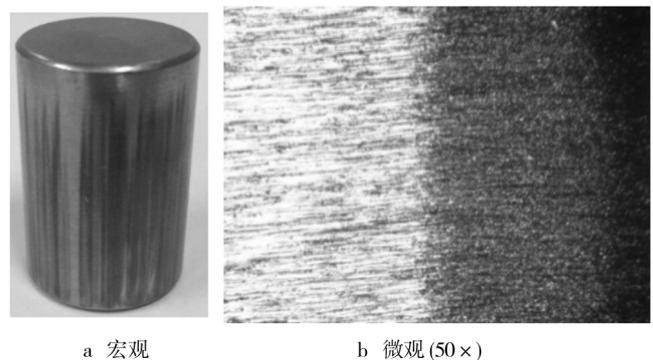


图6 No. 2 实验加工后的工件表面形貌

Fig.6 Surface topography of workpiece processed in No. 2 test

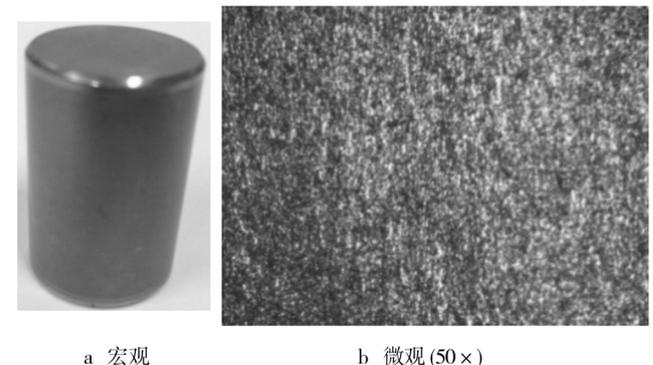


图7 No. 10 实验加工后的工件表面形貌

Fig.7 Surface topography of workpiece processed in No. 10 test

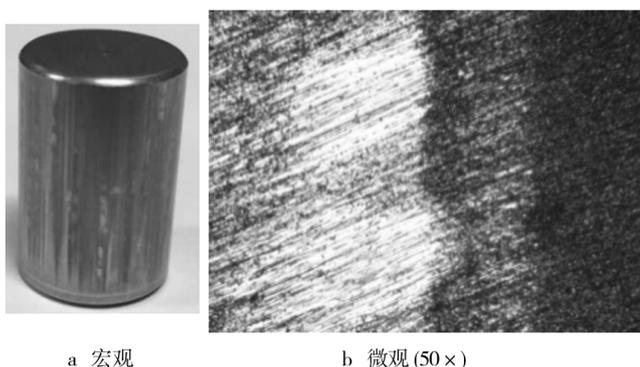


图8 No. 5 实验加工后的工件表面形貌

Fig. 8 Surface topography of workpiece processed in No. 5 test

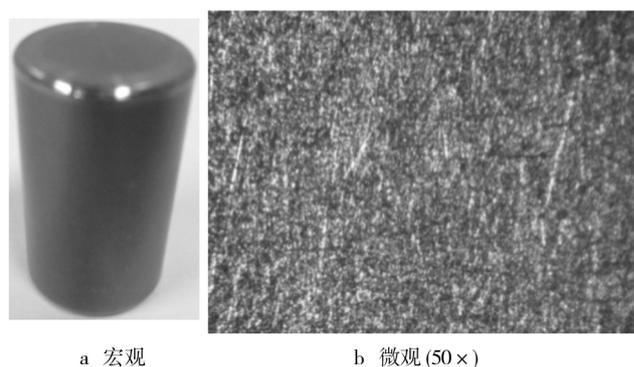


图9 No. 14 实验加工后的工件表面形貌

Fig. 9 Surface topography of workpiece processed in No. 14 test

带;No. 7—No. 9 的实验结果与 No. 2 实验结果近似,不同的是条纹宽度不一样。存在的上述缺陷是加工轨迹分布和材料去除不均匀的表现。

No. 11—No. 14 为 3 个构件转动的实验。对比发现, No. 14 实验的工件表面形貌最好,与 No. 10 实验结果近似,工件宏观和微观表面形貌分别如图 9 所示。No. 11—No. 13 实验中,工件微观表面形貌与 No. 14 实验近似,但是宏观表面形貌不如 No. 14 实验好。No. 11 实验的工件宏观表面如图 10a 所示,没有细长条纹,但是圆柱面中间段色泽阴暗,而两端位置明亮。No. 12 实验的工件宏观表面形貌如图 10b 所示,与 No. 2 实验结果相似,存在大量细长暗色条纹;与 No. 2 实验不同的是其分布比较均匀,且条纹较长,延伸至圆柱两端。No. 13 实验的工件宏观表面形貌与 No. 1 实验近似,只是细长条纹少些,如图 10c 所示。

No. 15 是 4 个构件同时转动的实验,其工件宏观和微观表面形貌如图 11 所示,工件宏观表面色泽均匀,没有细长条纹,微观表面也没有大划痕和磕碰等缺陷,加工轨迹密集且纵横交错,这说明工件表面材料去除均匀。

No. 1—No. 15 实验中, No. 10, No. 14 和 No. 15 实验的工件表面材料去除均匀,表面形貌较好且近似。为了进一步对比分析,测量了工件的表面粗糙度  $Ra$  分别为:0.124, 0.131, 0.140  $\mu\text{m}$ 。实际加工过程中,对于 No. 14 实验的工件,当加载压力大于 100 N 时,实验设备震动较大;对于 No. 10 实验的工件,加工后两端粗糙度相差较大,说明工件两端研磨效果不一。因此本文认为,上研磨盘、下研磨盘、偏心轮和保持架同时转动时,相比其他机构运动形式,可以获得更好的圆柱滚子外圆表面形貌。

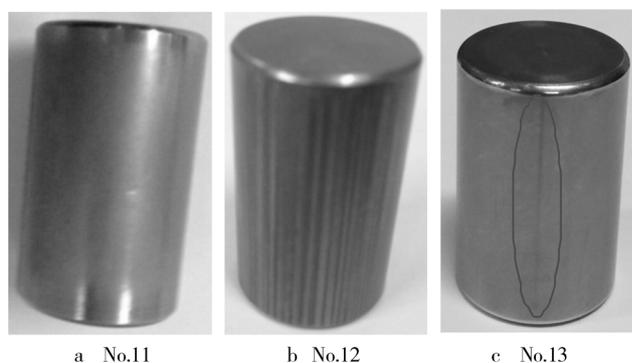


图10 No. 11—No. 13 实验加工后表面

Fig. 10 Surface topography of workpiece processed in tests of No. 11—No. 13

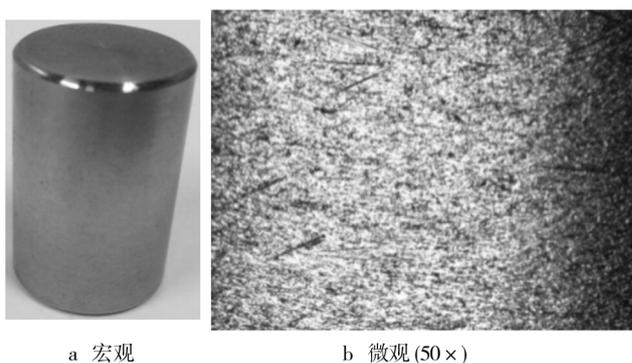


图11 No. 15 实验加工后的工件表面形貌

Fig. 11 Surface topography of workpiece processed in No. 15 test

## 4 理论对比分析和讨论

### 4.1 加工轨迹点坐标的计算

双平面方式圆柱外圆加工方法的工件几何运动学理论和加工轨迹的仿真已在文献<sup>[19]</sup>中进行了详细

的阐述,其中关键运动学参数——圆柱工件的滚动角速度  $\omega_{roll}$  随时间  $t$  的取值由下式得到<sup>[19]</sup>:

$$\omega_{roll} = \frac{v'_{Ar}}{r} \quad (1)$$

$$|v'_{Ar}| = \omega_{\alpha} \sqrt{L_{co}^2 + 2L_{co}L_{rc} \cos(\omega_{rc}t) + L_{rc}^2} \times \left[ \alpha + \omega_{rc}t - \arcsin \left( \frac{L_{rc} \sin(\omega_{rc}t)}{\sqrt{L_{co}^2 + L_{rc}^2 + 2L_{co}L_{rc} \cos(\omega_{rc}t)}} \right) \right] - \sqrt{(\omega_{co}L_{co})^2 + 2\omega_{co}L_{co}\omega_{rc}L_{rc} \cos(\omega_{rc}t) + (\omega_{rc}L_{rc})^2} \times \left[ \alpha + \omega_{rc}t - \arctan \left( \frac{L_{rc} \sin(\omega_{rc}t)}{\sqrt{\omega_{co}L_{co}^2 + \omega_{rc}L_{rc}^2 \cos(\omega_{rc}t)}} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $\omega_{co}$ 为保持架围绕研磨盘中心的公转角速度; $\omega_{rc}$ 为保持架围绕自身中心的旋转角速度; $\omega_{\alpha}$ 为下研磨盘转速; $\alpha$ 为圆柱轴线与夹具半径的夹角; $t$ 为加工时间。 $L_{co}$ 为保持架中心至研磨盘转轴中心距离 30 mm; $L_{rc}$ 为滚子质心至保持架中心距离 125.25 mm。

将研磨盘划分为等距的多个圆环,加工过程中这些圆环与工件圆柱面的接触点在圆柱面上生成的空间曲线即为加工轨迹,如图 12 所示。加工轨迹曲线分布的形态可以在一定程度上反映工件圆柱面的表面形貌。

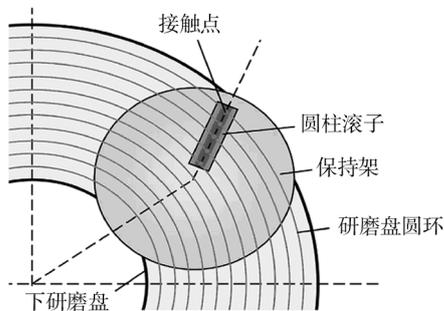


图 12 圆柱面加工轨迹生成示意图

Fig. 12 Schematic of trajectory generation on the cylindrical surface

在工件几何运动学理论的基础上,加工轨迹点在工件圆柱面上的坐标可由下式得到<sup>[19]</sup>:

$$X_r(t) = r \cos \left( -90^\circ + \int \omega_{roll}(t) dt \right) \quad (3)$$

$$Y_r(t) = L_{co} \cos(\pi - \omega_{rc}t) \pm \sqrt{L_{to}^2 - L_{co}^2 \sin^2(\pi - \omega_{rc}t)} - L_{rc} \quad (4)$$

$$Z_r(t) = r \sin \left( -90^\circ + \int \omega_{roll}(t) dt \right) \quad (5)$$

式中: $L_{to}$ 为上述所划分圆环半径与滚子接触时接触点到研磨盘中心的距离。

## 4.2 加工轨迹的仿真对比和讨论

根据式(1)至式(5)进行仿真,即可得到双平面加工方式下工件圆柱面上的加工轨迹。由之前实验对比分析可知, No. 15 转速组合条件下,获得的工件圆柱面表面形貌最好;而 No. 2 实验转速组合条件下,获得的工件圆柱面表面形貌最差。因此,为了从理论角度深入研究不同机构运动形式下,工件圆柱面表面形貌的特点和形成机理,对 No. 15 和 No. 2 实验条件下的工件圆柱面加工轨迹进行了仿真对比分析。仿真时间为 5 s,研磨盘内径为 75 mm,外径为 185 mm,圆环间隔为 2 mm。为方便分析加工轨迹,将圆柱面加工轨迹的三维图展开为二维矩形视图, MATLAB 软件的仿真结果如图 13 所示。

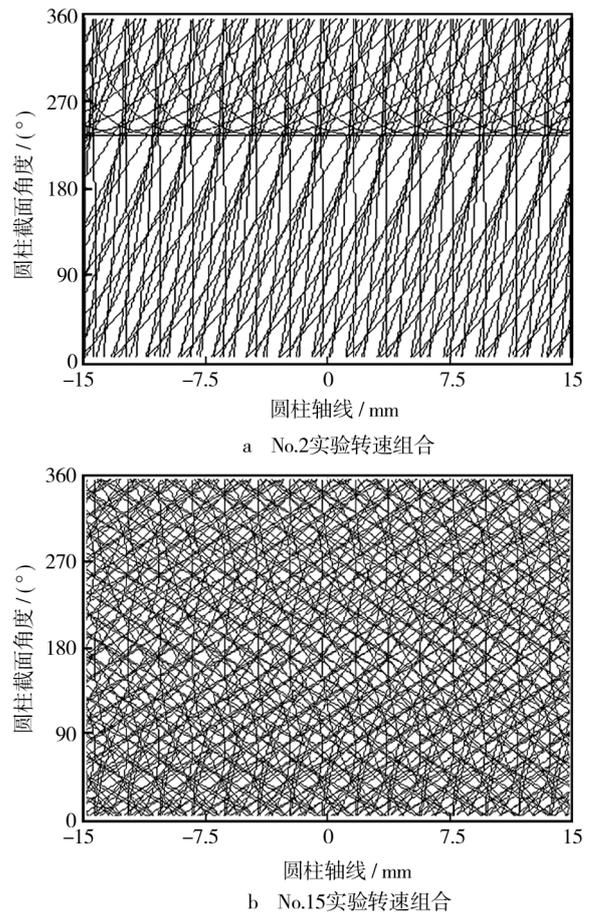


图 13 加工轨迹的仿真结果二维视图

Fig. 13 Simulation results of trajectory on cylindrical surface in 2D view

由图 13 可知, No. 15 实验转速组合的圆柱面加工轨迹分布明显比 No. 2 实验转速组合更均匀,这与实验对比分析结果正好一致。No. 2 实验转速组合条件下,加工轨迹仿真结果在角度范围内产生了明显的

具有一定带宽的轴向条纹,这与圆柱面分布大量轴向条纹的实验结果正好一致。

综合上述分析可知,在圆柱面加工过程中,加工轨迹与材料去除相关,加工轨迹分布均匀意味着圆柱面圆周方向的材料去除和轴线方向的材料去除分配合理(如 No. 15 实验转速组合),有利于获得较好的工件圆柱面表面形貌,反之则不利。尤其,当加工轨迹分布存在明显轴向条纹时(如 No. 2 实验转速组合),意味着圆柱面圆周方向的材料去除少而轴线方向的材料去除多,获得的工件圆柱面表面形貌较差。

## 5 结论

实验和理论分析均表明,当上研磨盘、下研磨盘、偏心轮和保持架同时转动时,可以获得最好的工件圆柱面表面形貌。对于双平面方式圆柱外圆加工方法,加工轨迹均匀分布有助于获得较好的工件圆柱面表面形貌,反之则不利,尤其应避免加工轨迹存在明显轴向条纹的情况。因此,在考虑机构运动形式和转速组合的设计时,应使加工轨迹均匀分布,尽量增加圆柱面圆周方向的材料去除,并减少圆柱面轴线方向的材料去除,两者之间的合理比例才有助于改善圆柱面的表面形貌。

## 参考文献

- [1] 邵明杰. 滚子制造工艺(1)[J]. 轴承,1985(2):60—62. SHAO Ming-jie. Roller Manufacturing Process (1)[J]. Bearing,1985(2):60—62.
- [2] 杨晓蔚,伍海云. 滚动轴承对滚动体的技术要求[J]. 轴承,2010(8):57—61. YANG Xiao-wei, WU Hai-yun. The Technical Requirements of the Rolling Elements for Rolling Bearing [J]. Bearing, 2010(8):57—61.
- [3] HASHIMOTO F, GALLEGO I. Advances in Centerless Grinding Technology[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2012,61(2):747—770.
- [4] ROHDE A. Roll Grinding Machine:US,5830044[P]. 1996-12-12.
- [5] GALLEGO I, LIZARRALDE R, BARRENETXEA D, et al. Precision, Stability and Productivity Increase in Throughfeed Centerless Grinding[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2006,55(1):351—354.
- [6] 许永庆. 无心磨削的新进展[J]. 世界制造技术与装备市场,1996(4):19—20.
- [7] 邵明杰. 滚子制造工艺(7)[J]. 轴承,1987(2):57—60. SHAO Ming-jie. Roller Manufacturing Process (7)[J]. Bearing,1987(2):57—60.
- [8] XU W, WEI Z, SUN J, et al. Surface Quality Prediction and Processing Parameter Determination in Electrochemical Mechanical Polishing of Bearing Rollers[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012,63(1—4):129—136.
- [9] 邵明杰. 滚子制造工艺(6)[J]. 轴承,1985(6):55—57. SHAO Ming-jie. Roller Manufacturing Process (6)[J]. Bearing,1985(6):55—57.
- [10] 高作斌,马伟,邓效忠. 圆锥滚子定姿态贯穿式超精研凸度形成机理分析[J]. 机械工程学报,2013,49(23):96—104. GAO Zuo-bin, MA Wei, DENG Xiao-zhong. Analysis of Crown Generating Mechanism in Fixed Posture Through-feed Superfinishing of Taper Rollers[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(23):96—104.
- [11] 闫雯,黄玉美,高峰. 变位自转式双平面研磨方法仿真研究及加工实验[J]. 机械科学与技术,2014,33(10). YAN Wen, HUANG Yu-mei, GAO Feng. The Simulation and Machining Experiment of the Doubleside Flatlapping Method of Displacementrotation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014,33(10).
- [12] 胡刚翔. 单晶硅双面抛光加工理论及工艺优化的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2007. HU Gang-xiang. Research on the Double-sided Polishing Mechanism and Process Optimization for Silicon Wafer [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2007.
- [13] 王庆仓. SiC 单晶片化学机械研磨试验研究[J]. 表面技术,2015,44(4):137—146. WANG Qing-cang. Experimental Study on Chemical Mechanical Lapping of SiC Single Crystal Wafer [J]. Surface Technology, 2015,44(4):137—146.
- [14] 熊伟,储向峰,白林山. GaN 基 LED 衬底材料化学机械抛光研究进展[J]. 表面技术,2014,43(1):125—130. XIONG Wei, CHU Xiang-feng, BAI Lin-shan. Research Progress of Chemical Mechanical Polishing of Substrates Used in GaN-based LED [J]. Surface Technology, 2014,43(1):125—130.
- [15] 王吉翠. 蓝宝石晶片机械化学研磨抛光新方法研究[J]. 表面技术,2011,40(5):101—103. WANG Ji-cui. A New Method of Research Sapphire Wafer Chemical Mechanical Polishing [J]. Surface Technology, 2011,40(5):101—103.

- Evaluation Length in Surface Roughness Measurement[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1999(7):28—30.
- [15] 罗五四. 汽车板表面粗糙度比对试验的评价判据研究[J]. 表面技术, 2015, 44(5):136—141.
- LUO Wu-si. Research on the Evaluating Criterion of the Surface Roughness Contrast Test for the Auto Sheet[J]. Surface Technology, 2015, 44(5):136—141.
- [16] 罗五四, 王屹然, 王生怀, 等. 对 DIN 10049 更改 ISO 4288 取样长度选用规则的检验试验[J]. 理化检验: 物理分册, 2014, 50(8):543—553.
- LUO Wu-si, WANG Yi-ran, WANG Sheng-huai, et al. Inspection Test on DIN 10049 Changing Sampling Length Selection Rule of ISO 4288[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2014, 50(8):543—553.
- [17] 蒋光锐, 滕华湘, 张浩, 等. 冷轧薄板表面波纹度评价标准研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5):112—115.
- JIANG Guang-rui, TENG Hua-xiang, ZHANG Hao, et al. Study on Measurement Standards of Waviness on Cold Rolled Sheet[J]. Surface Technology, 2013, 42(5):112—115.
- ~~~~~
- (上接第123页)
- [16] 胡晓珍, 李伟. 硅晶片抛光加工工艺的实验研究[J]. 机械设计与制造, 2009(4):139—141.
- HU Xiao-zhen, LI Wei. A study of Double Sided Polishing Processing Technic of Silicon Wafer[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(4):139—141.
- [17] JOHN H. The Nitty Gritty of Machining Ceramic[J]. Tooling & Production, 1990, 5(11)116—119.
- [18] TOSHIRO K. Handbook of Lapping and Polishing[M]. Florida: CRC Press, 2007.
- [19] YUAN J, YAO W, ZHAO P, et al. Kinematics and Trajectory of Both-sides Cylindrical Lapping Process in Planetary Motion Type[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015:60—71.
- [20] ZHOU W H, YAO W F, FENG M. The Polishing Process of Cylindrical Rollers by using a Doubleside Lapping Machine[J]. Key Engineering Materials, 2014, 589—590.
- [21] FENG M, YUAN J, et al. Experimental Research on Double-side Lapping of Cylindrical Roller by Taguchi Methods[J]. Key Engineering Materials, 2013(590):485—490.
- .....

## 《表面技术》杂志 2016 年征订启事

《表面技术》杂志由中国兵器工业第五九研究所主办, 创刊于 1972 年, 是全面介绍金属和非金属表面处理技术的中、高级专业技术刊物。

本刊为中文核心期刊(2014 版)、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、中国科学引文数据库来源期刊(CSCD)、中国期刊全文数据库全文收录期刊、《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、中国期刊网全文收录期刊等, 并被美国《Chemical Abstracts》、《剑桥科学文摘: 材料信息》(CSA: MI) 收录。主要报道: 材料腐蚀, 电镀、化学转化、薄膜、涂料涂装和其它防护技术, 相关测试分析, 三废治理及环保技术等方面的内容。

本刊从 2015 年开始栏目更新, 并改为月刊, 每月 20 日出版。定价 36.00 元/期, 全年定价 432.00 元。欢迎广大读者订阅。

连续出版物号: ISSN 1001-3660  
CN 50-1083/TG

订阅处: 本编辑部或全国各地邮局 邮发代号: 78-31

地址: 重庆市九龙坡区石桥铺渝州路 33 号《表面技术》编辑部(400039)

电话: 023-68792193 传真: 023-68792396

网址: www.surface-techj.com E-mail: wjqkbm@163.com