

## 无心外圆磨床的研究

《俄》С·Д·Ваїс 等著

李洪钢 译

(江苏锡山市钱桥金球大楼)

采用导轮的无心外圆磨床已被有效地采用在成批和大批量生产中,以高生产率制造着多品种的各种精度等级的制件。其中包括精密制件。

这种磨削方法的广泛推广,取决于一系列磨削过程的原则性特点。例如,在加工时工件的自定心,可达到精度比用两顶尖及用卡盘装夹内孔磨外圆时的高。摩擦转动装置可保证自由接近磨削区。可去除较多的余量,例如,由于在一次加工时工件可相对较大长度的砂轮切削表面移动。

近年来,由于建立了带多坐标 NC 系统的无心外圆磨床,无心磨床的工件性能得到显著扩大。这种无心外圆磨床可用来控制加工和修正磨轮及导轮,其磨削速度可达  $120\text{m/s}$ 。该过程可采用纳米加工工艺。

本文概述无心外圆磨床的现代化趋势,介绍前景研究科学的分析和实现该加工方法的新法研究有关的资料。这些资料一部分选自杂志 (Abrasives: Centerless grinding/coated abrasives) 和 INTS'2000 展览会(芝加哥)。

### 1 无心磨削的稳定性和安全性的保证

无心外圆磨削过程进行的稳定性大多取决于工件旋转的稳定性。旋转稳定性的破坏伴随着“打滑”(工件的圆周速度提高到砂轮的速度),从而导致工件从磨削区挤出,进而甚至会导致砂轮的破裂。另外,工件在加工过

程开始时不旋转,暂时扭矩未达到所需值,而造成在不转动的工件表面上形成切口,从而在横截面内工件的形状变坏。

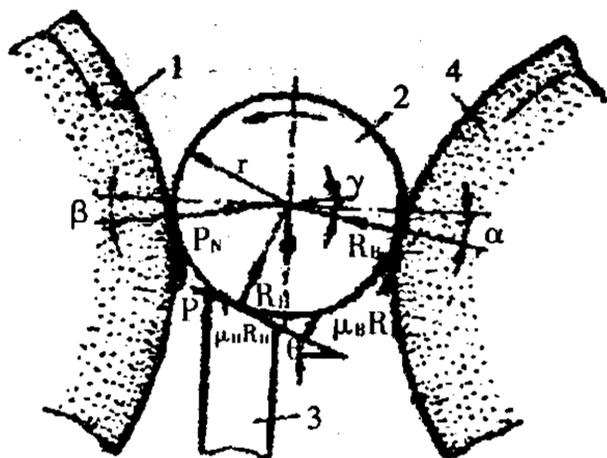


图1 有导轮的无心外圆磨削示意图

在分析传统无心磨削方式(图1)和借助计算机计算和实验研究的图表基础上,给出了可确定工件定位和磨削条件的参数远选择的实际推荐。工件在无心外圆磨床上旋转的稳定性与一系列参数有关,属于这些参数(见图1)的有托板的斜面角 $\theta$ ;表征半径为 $r$ 的工件轴线在加工过程中的配置角 $\gamma = \alpha + \beta$ ;法向切削分力 $P_N$ 和切向切削分力 $P_T$ ;在托板和导轮上的法向反力 $R_H$ 、 $R_B$ 和摩擦力 $\mu_H R_H$ 、 $\mu_B R_B$ ( $\mu_H$ 和 $\mu_B$ 为摩擦系数);工件的重量 $G$ 。

现已确定,影响工件旋转稳定性的恒参数是表征具体工件定位条件的 $\theta$ 角和 $\gamma$ 角(所谓无心外圆磨床的几何形状调整),而变参数是在托板和导轮上引起的切削分力和摩擦力。并且,在导轮上的摩擦力方向与加工条件有关,可能是不同的。

当几何形状的调整给定时,工件旋转的

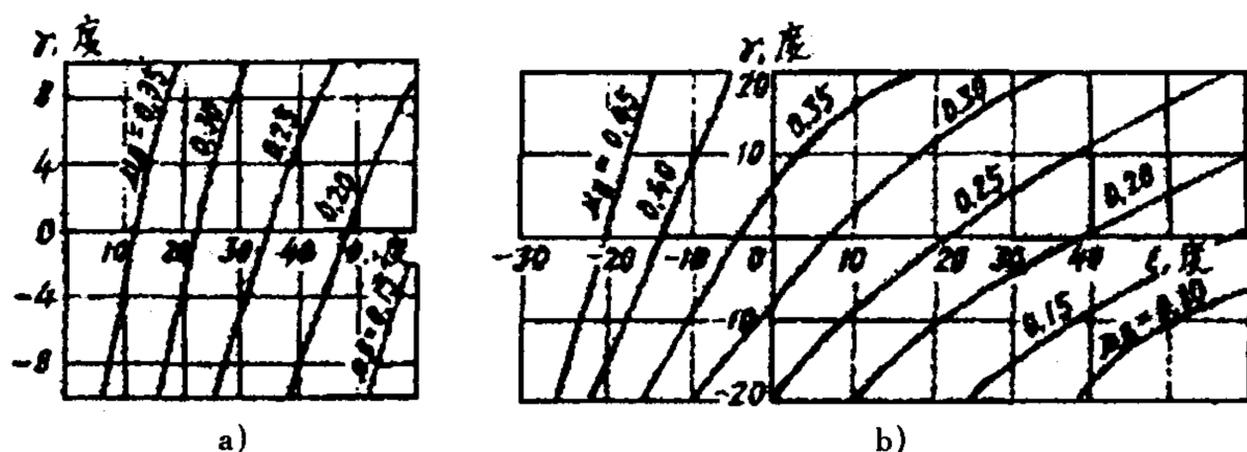


图2 评定工件旋转稳定性的计算图表 a—(k=0.2;  $\mu_B=0.15$ );  
b—(k=0.4;  $\mu_H=0.15$ ;  $\epsilon=\alpha+\theta$ )

稳定性条件取决于比值  $k = P_r/P_N$  和摩擦系数值  $\mu_H$ 、 $\mu_B$ 。从图 2a 中已表明, 当  $0.35 \geq \mu_B \geq 0.15$  时工件稳定旋转的界限随着摩擦系数  $\mu_B$  的减小 (例如在采用金属导轮时), 界限偏移到托板斜面角  $\theta$  较大值的区域。类似规律性 (见图 2b) 已被俄罗斯研究人员所揭示。

对图 1 所示方式, 现已确定在托板和导轮上摩擦系数之间的下列关系:

$$\mu_B = \frac{\mu_H \cos \alpha}{\sin \alpha - \mu_H (\cos \theta - \sin \alpha)}$$

遵守这关系可保证工件的旋转直到接近砂轮, 即可防止在被加工表面上形成切口。

在无心外圆磨床上常采用不同材料的导轮, 因此在每种具体情况必须从加工过程的稳定性观点预先评估导轮—工件摩擦副的功能条件。

在有关文献中描述了以无心外圆磨床为基础的试验台, 它可模拟工件被导轮摩擦传动。在该文献中还列出了在加工轴承钢和其它钢种工件时的摩擦试验和导致磨损试验的结果。导轮为钢质导轮和树脂、陶瓷、聚氨酯和橡胶结合剂导轮。在试验台上检测了在不断测量摩擦系数  $\mu_B$  时工件相对砂轮的滑动速度  $\Delta v$ 。

特别有趣的是当滑动速度的符号变化时, 摩擦系数呈跳跃式变化的实验数据 (见图 3)。当  $\Delta v = 0$  时没有滑动, 也就是产生工件沿导轮的滚动。  $\Delta v$  的正值符合工件“超前”导轮, 从而伴随着引起相对工件旋转方向的滑动摩擦力。  $\Delta v$  的负值符合工件的“滞后”, 这

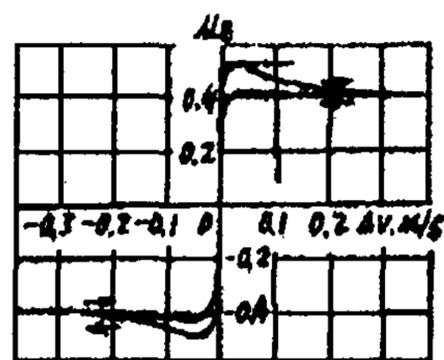


图3 在导轮上摩擦系数  $\mu_B$  对工件滑动速度  $\Delta v$  的变化

时滑动摩擦力沿工件旋转方向定向。从图 3 中可看出, 存在着决定工件相对导轮滑动速度的提高和下降特性之间的滞后现象。

同样已确定, 当无滑动时  $\mu_B$  值达到最大值, 因为导轮的磨粒被挤入工件的表面内, 从而伴随着引起最大的咬合力。

在有关文献中列出了根据一系列因素 (法向切削分力、工件材料、导轮的修整速度、导轮的材料和结合剂等) 实验确定导轮摩擦特性的结果。其中包括已确定, 有相同粒度的导轮在修整速度  $300\text{mm}/\text{min}$  时, 在陶瓷结合剂情况  $\mu_{B\max} = 0.4$ , 在橡胶结合剂情况  $\mu_{B\max} = 0.34$ , 在树脂结合剂时为  $0.25$ 。在聚氨酯结合剂时  $\mu_{B\max}$  实际上与导轮的粒度无关 ( $\mu_{B\max} = 0.2 \sim 0.3$ )。对钢导轮,  $\mu_{B\max} = 0.17$ 。

实验表明, 陶瓷和树脂结合剂的导轮的磨损量大于橡胶和聚氨酯结合剂导轮一个数量级。随着橡胶和聚氨酯结合剂的导轮的粒度增大, 它们的磨损量增加不大。由于强烈磨损, 不推荐采用陶瓷和树脂结合剂的导轮。

导轮的磨损量与法向磨削分力和滑动速度

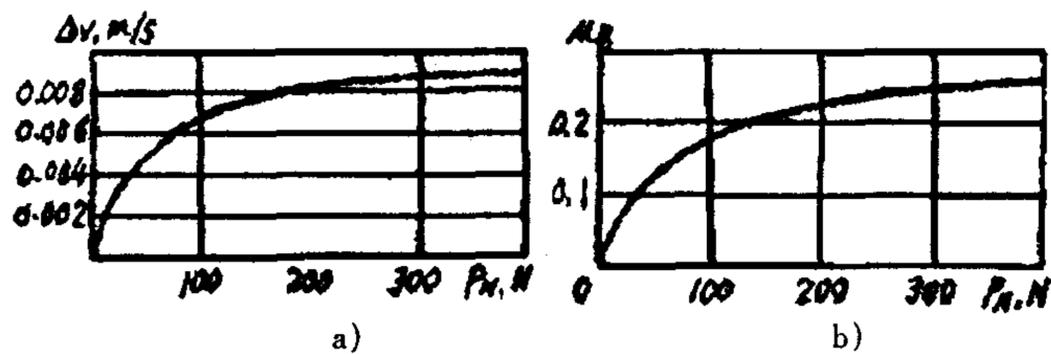


图4 在导轮上的滑动速度 $\Delta v$ (a)和摩擦系数 $\mu_B$ (b)对法向磨削分力 $P_N$ 的变化

显著有关。图4所示为橡胶结合剂的导轮的滑动速度和摩擦系数与法向磨削分力的关系。

利用关于带不同特性的导轮的摩擦系数值的实验数据,可保证图2示例的计算图表的实际应用,它可确定在无心外圆磨床上的安全工作区。

## 2 利用砂带的无心磨削

由于专门研究无心磨削的完善,提出了利用砂带替代砂轮。在图5所示的这种加工方式时,柱形工件2靠摩擦传动在托板6上旋转和移动。摩擦传动是靠导轮1的轴线偏转 $\psi$ 角实现的,砂带3靠接触轮5被压紧在柱形工件上,并借助滚轮4拉紧。利用砂带代替砂轮的磨削,其调整参数是 $\theta$ 角、 $\gamma$ 角、 $\psi$ 角以及导轮和砂带的圆周速度。

这种方式早先被采用初加工棒料和用来精磨和抛光小零件,现在广泛用来制造任意的制件,其中包括薄零件、高精密零件和对表面质量要求高的零件以及用来加工余量大的零件。由于采用现代化磨料、砂带工作表面新的涂层方法(包括通过有序配置磨粒)和采用

特殊的坚固结合剂,故达到很好的效果。

用砂带的无心磨削具有一系列优点。可提高机床使用的安全性。提高加工生产率,促使这点的不仅是砂带的速度高(达50m/s)和稳定,轴向进给速度显著高(达18m/min),而且砂粒还可有效的定向。无需修整工具。因为砂带与砂轮的区别是没有不平衡度,可显著减小振动水平,由于在高速切削时可较好的分散被散出的热量和降低单位负荷,故可减小热变形。所有这些可促使提高加工精度。

可控制加工表面的质量,并在一台无心外圆磨床上可采用一组不同的砂带。由于砂带和接触轮的更换简便,故无心外圆磨床易于重调。

在无心外圆磨床上的磨削速度的进一步提高,这趋势是由于采用新的工具材料实现的。例如,立方氮化硼砂轮速度可达12m/s工作。下面列出了用陶瓷结合剂砂轮传统无心磨削时(A)和用立方氮化硼砂轮高速磨削时(B)的结果比较数据,工序为粗磨凸轮轴的轴颈,余量为4mm:

加工方法	A	B
磨削速度, m/s	63	120
磨削时间, s	20	12
加工指标		
直径偏差, $\mu\text{m}$	20	20
圆度, $\mu\text{m}$	10	8
表面粗糙度(Rz), $\mu\text{m}$	8	40

无心精磨时在采用有特殊涂层的陶瓷结合剂砂轮在一系列情况可保证速度的提高。

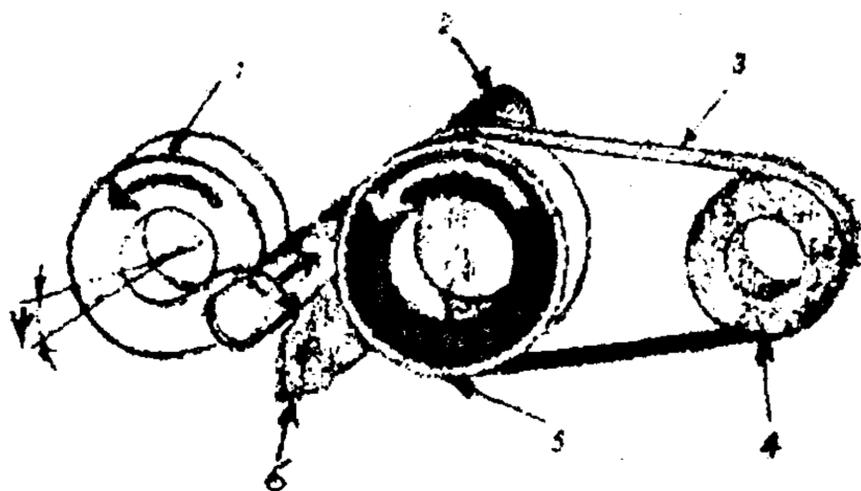


图5 利用砂带的无心磨削示意图

### 3 纳米工艺中的无心磨削

在机器制造业中,对专用来制造特别精密的轴承和光纤通信器材的元件的超精密无心外圆磨床的需求日益增长。这些零件所允许的圆度误差为10—35纳米范围。

为提高类似要求,在无心外圆磨床上应实现不连续的进给,并用纳米测量,从而借助传统的电机一丝杠定位系统是不可能达到的。必须有新的技术解决办法,其应保证无心外圆磨床的进给机构有超刚度无间隙的结构和定位系统所需的精度。

在有关文献中研究了以压电直线电机基础上的无心外圆磨床的超精密进给机构的结构,列出了它们的计算方法和实验研究试样的结果。对压电直线电机提出了紧凑性和高刚度、大轴向力相结合的要求,纳米精度应保证在所有的移动范围内。压电电机应消除负荷的突变,不经受剪应力和较大的拉力。目前建立的压电电机,其刚度为 $2190\text{N}/\mu\text{m}$ ,行程长度为 $30\mu\text{m}$ ,输出力为 $8\text{kN}$ 、定位精度为 $0.005\mu\text{m}(5\text{nm})$ 。

### 4 无心磨削时检测力的新手段

由于在无心外圆磨床上的加工精度高,故对检测手段提出更高的要求。符合这些要求的例如其作用基于声发射的高敏感性仪器。类似仪器应具有 $\sim 1\text{ms}$ 的快速动作,并可在宽广的频率范围内( $50\sim 950\text{kHz}$ )获得这样的信号,即其振幅大大超过在按传动功率测量磨削力时获得的信号。

新型仪器可用来处理在砂轮靠近工件时精密换向速度的命令;按切削力适应控制过程;控制循环,以在修整砂轮时保证最小去除磨料( $0.25\mu\text{m}$ 以下),从而对立方氮化硼砂轮的无心外圆磨床甚为迫切。

宽广的信号工件频率范围对用立方氮化硼砂轮高速磨削特别重要。它是靠用模拟程序装置控制的滤波器与复盖范围的结合实现了。磨削力检测系统的高敏感性可瞬时揭示砂轮单个磨粒与工件或砂轮与修整工具的初始接触。早先在加工时和修整砂轮时采用类似系统,因其价格高而受到限制,但近来由于完善了结构故它们的价格大大下降。

这种检测装置可内置在砂轮的平衡部件内。对粗磨和用单个金刚石修整砂轮的工序,可将系统的传感器安装在砂轮架壳体上或砂轮的修整机构上。当对加工质量的要求较高时,或用金刚石滚轮以较小去除磨料量修整砂轮时,传感器可直接安装在砂轮或金刚石导轮的主轴上。上述装置已被美国和英国公司有效采用在无心磨削轴承套圈时。

基于发射作用的检测和控制系统的采用,可大大提高在无心外圆磨床上的生产率和加工精度。

这样,可断定新的趋势出现,即高生产率的无心磨削工艺可采用在成批生产中和用来制造超高精度的零件。因此,在建立国产有竞争力的无心外圆磨床时,不仅必须注意早先生产的传统结构,而且还要建立新的基于本文研究的别的原理概念的结构。

译自《CTNH》2001(8)

丁叙生 校

(上接58页)

等时可成功地将原始误差(最优化时的初始接近)从 $112\mu\text{m}$ 减小到 $1.5\mu\text{m}$ 。但是,这时在水平面内的偏差减小不多。采用多参数最优化对给定加工过程的最好运动特性是必须的。

最后必须指出,上述理论原理已被萨拉

托夫轴承厂国有股份公司多年使用无心超精机床的经验所证实,该厂已采用了该研究的主要结果。

译自《CTNH》2001No9

丁叙生 校