

精密加工中顶尖、中心孔形状误差对工件圆度的影响及其作用机理*

何汉辉 王世民

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘要 对于轴类零件精密、超精密车削和磨削加工,顶尖夹持是最常见的夹持方式。本文分析了精密加工中顶尖夹持误差对工件圆度的影响,通过分析工件回转轴线的轨迹变化及夹持的径向接触刚度与顶尖、中心孔圆度误差的各阶谱成份之间的关系,论述了顶尖、中心孔形状误差对工件圆度的影响及其作用机理。探讨了顶尖夹持方式下提高工件圆度的有效途径。

关键词 顶尖,中心孔,形状误差,接触刚度,工件圆度,谱分析,影响,作用机理
分类号 TH161.12

The Effect of Geometrial Deviations of Cone Centres and Centre Holes on Roundness of Workpiece in Precision Machining and Its Mechanism

He Hanhui Wang Shiming

(Department Mechatronics Engineering and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract In precision and ultraprecision cylindrical turning or grinding it is customary to support the workpiece with dead centres. In this paper, the effect of abnormal supporting conditions on roundness of workpiece in precision machining is discussed. Through an analysis of the relationship between the locus of the central point of the centre hole profile and frequency spectra of the out-of-roundness of centre and centre hole, the effect of geometrial deviations of centres and centre holes on roundness of workpiece the mechanism is described. An available avenue to improve the accuracy in precision and ultraprecision cylindrical turning or grinding by centres is presented in this pa-

* 国家自然科学基金资助项目
1995年7月21日收稿

per.

Key words: effect, mechanism, cone-centre, centre-hole, geometrical deviations, contact stiffness, roundness of workpiece, Fourier analysis

在精密加工中, 工件装夹误差是影响加工精度的一个显著因素, 由它带来的加工误差通常达到微米级。对于轴类零件的精密、超精密车削和磨削加工, 顶尖夹持是最常见的夹持方式, 特别是在加工中需要重复装夹的场合(例如惯性仪表中浮子组件的加工)。在加工过程中, 很多因素及其综合作用都可能造成夹持状况的恶化, 从而导致加工误差。

1 工件圆度与顶尖夹持误差

在两端死顶尖夹持方式下(其它条件正常)对工件外圆进行超精车、磨加工, 通常, 因为切削力较小、精密机床的刀架及夹具系统本体的刚度好, 且对于工件某一截面的加工时间很短, 故工件圆度误差产生的主要原因不外乎以下两个方面:

- (1) 工件回转过程中无切削力作用时工件回转轴线相对于顶尖的位置的变动;
- (2) 在径向切削力作用下顶尖夹持的径向接触刚度。

造成夹持误差的因素很多, 就顶尖夹持而言, 直接影响工件圆度的主要因素是顶尖、中心孔的形状误差和头顶尖主轴的回转误差, 其它因素的影响是间接的, 或是较小的。例如, 机床两顶尖之间的同轴度和工件两中心孔之间的同轴度对工件圆度的影响很小^[9]; 夹持的松紧状况主要通过影响夹持的接触刚度作用于加工过程, 其影响可以在再次装夹甚至工步之间通过调整消除; 顶尖与中心孔之间的接触磨损会导致顶尖与中心孔的形状误差, 但通常不会造成中心孔形状精度状况的明显恶化(跑合作用, 且作用时间短), 故其主要后果是造成顶尖形状精度的逐步丧失。

如上所述, 顶尖夹持方式下直接影响工件圆度的主要因素是头顶尖主轴的回转精度和顶尖、中心孔的形状精度。头顶尖主轴的回转精度与机床精度有关, 它对工件圆度的影响比较直接, 作用机理简单, 影响程度视机床精度而不同。对于精密级机床, 头顶尖主轴的回转误差对工件圆度的影响通常在 $0.5\mu\text{m}$ 以内; 与之相比, 顶尖、中心孔的形状误差对工件圆度的影响及其作用机理要复杂一些, 而且通常对工件圆度的影响要显著一些。

顶尖与中心孔的形状精度主要包括锥度及圆度, 前者通过减小夹持接触刚度影响加工精度, 但理论计算和实验都表明^[4]其影响较小; 后者则主要影响工件的回转精度, 影响方式有两种: 一种是直接影响工件的回转精度; 另一种是在径向切削力的作用下, 通过显著影响夹持的径向接触刚度而间接影响工件的回转精度。

2 顶尖及中心孔廓线形状与圆度

研究表明^[1], 机床顶尖圆度误差中椭圆成份(2阶谱)最为主要, 通常占其圆度误差的 $85\% \sim 95\%$, 其次是3阶谱或4阶谱, 其它阶谱所占的比重很小。顶尖的圆度误差范围通常为 $0.2 \sim 1.8\mu\text{m}$ 。

用中心孔钻加工出来的中心孔的圆度误差的谱成份较复杂。研究表明^[2], 3阶谱与2

阶谱占主导,其次是7阶谱、5阶谱及4阶谱等,且低阶的奇次谱成份较显著。其圆度误差通常在5~25 μm 。

3 顶尖、中心孔廓线形状及圆度对工件圆度的影响

针对锥顶尖及中心孔圆度误差的典型特征,我们可以分析探讨它们对工件圆度误差形成的影响。以下讨论不考虑头顶尖主轴回转误差,且假设顶尖锥角为60°,中心孔为A型(符合GB145—85),润滑及其它条件正常。

3.1 中心孔形状误差的谱成份为单一的2阶谱

3.1.1 工件回转过程中无切削力作用时工件回转轴线的变动

由于锥顶尖圆度误差中2阶谱成份最为显著,所以讨论仅限于这种情形,即此时顶尖和中心孔接触截面上的廓线形状均为椭圆。在工件回转过程中,顶尖与中心孔接触截面上相接触的区域在不断变化。当顶尖廓线椭圆长轴与中心孔廓线椭圆短轴重合时,其接触应变最大,轴向夹持力亦最大;而当顶尖廓线椭圆长轴与中心孔廓线椭圆长轴重合时,其接触应变最小,也可能不存在接触应变,即发生夹持脱开现象。如果工件在回转过程中始终未发生夹持脱开现象,则顶尖与中心孔接触截面上相接触的区域将始终对称于顶尖廓线椭圆中心,无切削力作用时工件在回转过程中其回转轴线的位置相对于顶尖中心将不会变动。所以问题在于工件在回转过程中是否会发生夹持脱开现象。下文将分析计算顶尖和中心孔在轴向夹持力的作用下的径向接触应变,并由此考察无切削力作用时正常夹紧的工件在回转过程中是否会发生夹持脱开现象。

当圆柱体与内孔表面接触时,若存在法向挤压力作用则将产生赫兹接触应变,应变的半宽度 b 由下式确定^[8]:

$$b^2 = \frac{4F}{\pi l} \times \frac{(1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2}{(1/r_1) - (1/r_2)} \quad (1)$$

其中 μ_1 、 μ_2 为泊松比, E_1 、 E_2 为弹性模量, l 为轴向接触长度, r_1 、 r_2 分别为圆柱体和内孔在接触点的曲率半径。接触应变深度 δ 为

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 = (r_1 - \sqrt{r_1^2 - b^2}) - (r_2 - \sqrt{r_2^2 - b^2}) \quad (2)$$

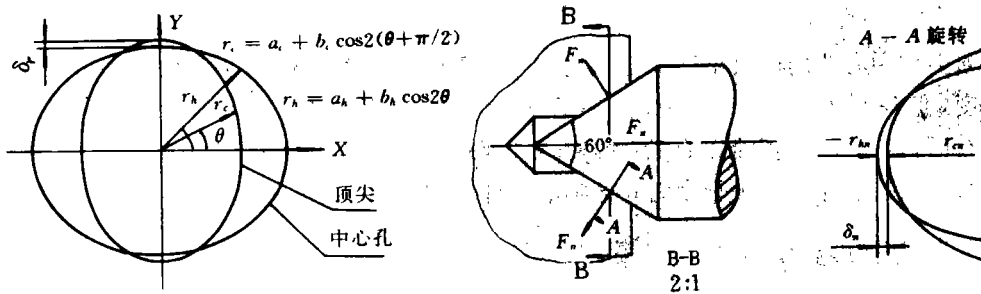


图1 工件受力示意图

在轴向夹紧力 F_a 的作用下,其接触可近似视为圆柱体与内孔表面的接触。如图1所示,当顶尖截面椭圆长轴与中心孔截面椭圆短轴重合时(假设无轴向夹紧力以外的作用力),其接触应变最大。设接触中心截面上顶尖和中心孔的轮廓曲线如图所示,则有

$$a_h - b_h = a_c + b_c - \delta_r = a_c + b_c - \delta_n / \cos 30^\circ \quad (3)$$

此时在接触法平面上, 顶尖和中心孔接触中心点的曲率半径(即法向曲率半径)分别为

$$r_{hn} = \frac{2\cos^2 \frac{\pi}{6}}{3\cos \frac{\pi}{6} - 2\sqrt{\sin \frac{\pi}{6}}} \times \frac{(a_c + b_c)^2}{(a_c + 5b_c)} \quad (4)$$

$$r_{hn} = \frac{2\cos^2 \frac{\pi}{6}}{3\cos \frac{\pi}{6} - 2\sqrt{\sin \frac{\pi}{6}}} \times \frac{(a_h - b_h)^2}{(a_h - 5b_h)} \quad (5)$$

此时法向挤压力 $F_n = F_r$, 取轴向最大夹紧力 $F_a > 250\text{N}$; 根据上文关于顶尖及中心孔廓线形状与圆度的分析, 顶尖廓线圆度误差最大时可取 $b_c = 0.7 \times 10^{-6}\text{m}$, 中心孔圆度误差中 2 阶谱平均幅值 $b_h = 2 \times 10^{-6}\text{m}$; 取 $a_c = 3 \times 10^{-3}\text{m}$, 当量接触长度 $l = 1 \times 10^{-3}\text{m}$; 设 $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$, $E_1 = E_2 = 2 \times 10^{11}\text{Pa}$, 又令 $\delta = \delta_n$, $r_1 = r_{cn}$, $r_2 = r_{hn}$, $F = F_n$ 代入上述(1)~(5)式, 利用数学软件包 Mathematica 进行迭代计算, 结果表明, 其径向接触应变 $\delta_r > 1.8 \mu\text{m}$ 。

由上述分析知, 当顶尖和中心孔形状误差均为单一的 2 阶谱时, 在正常轴向夹持力的作用下, 其径向接触最大应变通常大于顶尖廓线形状误差中 2 阶谱的幅值的两倍, 由此表明在工件回转过程中顶尖和中心孔始终未发生夹持脱开现象, 亦即工件回转轴线位置相对于顶尖没有变动。故此时顶尖夹持的径向接触刚度通常是影响工件圆度误差的唯一原因。

3.1.2 在径向切削力作用下顶尖夹持的径向接触刚度

精确描述顶尖夹持的径向接触刚度很困难。由于中心孔廓线的椭圆度是实际顶尖(尤其是精密顶尖)的廓线的椭圆度的数倍, 故在进行其径向接触刚度的分析时可将顶尖廓线形状视为正圆。在工件回转过程中, 顶尖夹持在径向切削力 F_r 的方向上的接触刚度大小与中心孔廓线椭圆的方向有关。当中心孔廓线椭圆短轴方向与径向切削力的方向一致时, 其径向接触刚度最大; 当二者方向相差 90° 时, 其径向接触刚度最小。假设轴向夹紧力正常, 对有关几何参数合理选取后推导计算(过程从略)的结果表明, 当径向切削力 $F_r = 50\text{N}$ 时, 工件径向位移 δ 最大, 可达 $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 。可见, 当中心孔形状误差为单一的 2 阶谱时, 顶尖夹持的径向接触刚度较小。在径向切削力作用下, 工件将产生显著的径向位移, 从而导致工件形状误差(椭圆状)。

3.2 中心孔形状误差谱成份为 3 阶谱或其它低阶奇次谱

如图 2, 当中心孔形状误差为 3 阶谱(图中为 3 阶谱)或其它低阶奇次谱时, 工件回转过程中无切削力作用时其回转轴线的运动轨迹与顶尖及中心孔轮廓形状之间存在确定的对应关系。当顶尖(或中心孔)的截面轮廓形状为正圆时, 工件回转轴线相对于顶尖的位置不变。随着顶尖截面轮廓形状的椭圆度(或中心孔圆度误差中奇次谱的幅值)的增大, 工件回转轴线相对于顶尖的位置的变化量将增大, 由此产生的工件形状误差中, 各阶谱成份的幅值的大小与顶尖椭圆度及中心孔形状误差中的各阶谱成份的幅值大小有关, 同时还与顶尖椭圆方向有关。其它条件不变, 则当顶尖椭圆长轴方向与刀具径向进给方向

一致时，工件形状误差中各阶谱成份的幅值最小；当顶尖椭圆长轴处于其它方向时，其幅值增大；当顶尖椭圆短轴方向与刀具径向进给方向一致时，其幅值最大。

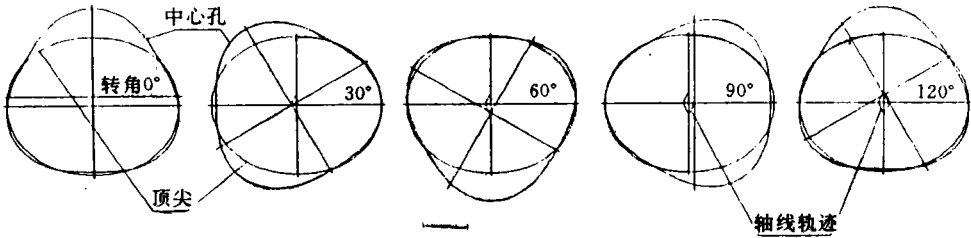


图2 工件回转过程中其轴线的变动

当中心孔圆度误差为3阶谱或其它低阶奇次谱时，顶尖夹持的径向接触刚度较大。计算结果表明，在正常轴向夹持力的作用下其值可达 $250\text{N}/\mu\text{m}$ 以上。故在精密加工中由于顶尖夹持的径向接触刚度而导致的工件形状误差可以忽略。工件回转过程中，无切削力作用时其回转轴线的运动轨迹的变化通常是导致工件形状误差的唯一原因。

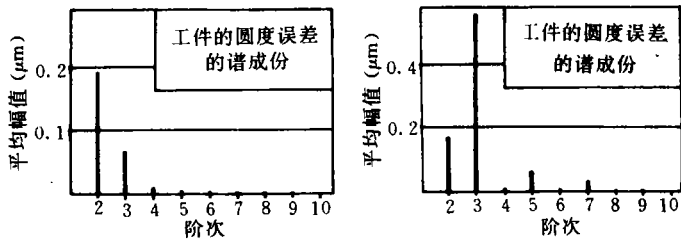
3.3 中心孔圆度误差谱成份为四阶及四阶以上低阶偶次谱

中心孔圆度误差谱成份为四阶及四阶以上低阶偶次谱时，在正常轴向夹持力的作用下，工件在回转过程中无切削力作用时其回转轴线相对于顶尖的位置不变。同时，在径向切削力作用下顶尖夹持的径向接触刚度也较大，可达到 $150\text{N}/\mu\text{m}$ 。此时由于顶尖夹持的径向接触刚度不是足够大，对工件形状误差会有一些影响，但影响很小。

4 结论

采用顶尖夹持方式对轴类工件进行精密、超精密车、磨加工时，影响工件圆度的主

要因素有：头顶尖主轴回转误差和顶尖、中心孔廓线形状及圆度。机床锥顶尖的圆度误差中2阶谱成份最为主要，通常占其圆度误差的85%以上，用中心孔钻加工出来的中心孔的形状误差的谱成份3阶谱与2阶谱占主导，其次



(a) 用精密顶尖夹持的工件

(b) 用普通顶尖夹持的工件

图3

是其它低阶的奇次谱。顶尖、中心孔廓线形状及圆度对工件圆度的影响方式有：一是造成工件回转轴线的变动（无切削力作用时）；二是降低顶尖夹持的径向接触刚度。假设忽略头顶尖主轴回转误差的影响，则当中心孔形状误差谱成份为2阶谱时，导致工件形状误差的最主要的原因是顶尖夹持的径向接触刚度；当中心孔形状误差谱成份为3阶谱或其它低阶奇次谱时，导致工件形状误差的最主要的原因则是工件回转过程中无切削力作

用时其回转轴线的变动；中心孔形状误差谱成份中4阶谱以上（含4阶谱）的偶次成份对工件形状误差的影响很小。从工件圆度误差中各阶谱的成因来看，如果忽略头顶尖主轴回转误差的影响，则工件圆度误差中2阶谱误差源于中心孔形状误差中的2阶谱成份；工件圆度误差中3阶谱及其它低阶奇次谱误差，源于中心孔形状误差中相应的低阶奇次谱成份和顶尖形状误差中的2阶谱成份。图3是在顶尖夹持方式下精密磨削加工后的工件的圆度误差的谱分析结果。不难看出，采用精密顶尖夹持时，由于顶尖椭圆度小，工件圆度误差中以2阶谱成份为主。它源于中心孔形状误差中的2阶谱成份，由于夹持的径向接触刚度不足而导致了工件的圆度误差；而采用普通顶尖夹持时，由于顶尖椭圆度增大。故工件圆度误差中低阶奇次谱成份显著增大，它源于中心孔形状误差中的低阶奇次谱与顶尖形状误差中的2阶谱成份，由于工件回转过程中，其回转轴线相对于顶尖的位置不断变动而导致了工件的圆度误差中的低阶奇次谱成份。

上述分析结果表明，在顶尖夹持方式下提高工件圆度有两个途径，即提高头顶尖主轴的回转精度和顶尖、中心孔的圆度。要提高头顶尖主轴的回转精度通常只有改换机床，对此不再赘述。通过改善顶尖、中心孔的圆度的方法提高工件圆度比较现实可行，如选用精密顶尖，对中心孔进行精加工（磨、研），用精密而廉价的球顶尖夹持替代锥顶尖夹持^{[4][5][6]}等。此外，在精加工时采用较小的切削深度及其它减小径向切削力的措施对提高工件圆度也很有益处。

参 考 文 献

- 1 Kato H, Nakano Y & Saito T. Effect of Roundness of Centre on Roundness of Workpiece in Cylindrical Grinding. J. Jpn Soc Prec Eng. 1986, 52:1638
- 2 Kato H, Nakano Y & Kounosu K. Roundness of Drilled Center Hole. J. Jpn Soc Prec Eng. 1982, 47(6):723
- 3 Kato H, Nakano Y & Kounosu K. Effect of Roundness of Center Hole on Roundness of Cylindrical Ground Surface. J. Jpn Soc Prec Eng. 1980, 46(5):615
- 4 Oiwa T, Kyusojin A. Development of Precise Cylindrical Grinding by Ball Centres: Contact Stiffness Between Ball and Centre Hole. Prec Eng. 1990, 12(1):37
- 5 Oiwa T, Kyusojin A. Comparison of Cone Center and Ball Center for Roundness in Cylindrical Grinding. Prec Eng. 1986, 8(4):197
- 6 Oiwa T, Kyusojin A. Development of Precise Cylindrical Grinding by Ball Centers: Effect of Dynamic Stiffness on Work Profile. Prec Eng. 1992, 14(4):237
- 7 何汉辉, 王世民. 精密机床顶尖夹持状态监控系统的研究. 全国高等学校机械加工研究会中南分会1993年年会论文集, 广州:1993
- 8 [美] 希格利 J E. 机械工程设计. 北京: 人民教育出版社, 1981
- 9 Kato H, Nakano Y & Hosoya Y. Influence of Alignment Error of Centers and Center Holes on Rotation Accuracy of Workpiece. J. Jpn Soc Prec Eng. 1984, 50:568

(责任编辑 卢天贶)