

超声辅助磨削在轴承磨削加工中的研究与应用

■ 河南机电职业学院 (郑州 451191) 李 琦

■ 洛阳轴研科技股份有限公司 (河南 471039) 张 旭 马 磊 孟鸿超

摘要: 通过理论分析与研究, 介绍超声辅助磨削在轴承磨削加工中的应用。该加工方法可微分切削轨迹、细化轴承磨削加工表面, 降低表面粗糙度值, 改善表面质量, 同时能够降低磨削力, 减少磨削热的产生, 从而减轻或避免轴承表面烧伤。

1. 超声振动辅助磨削加工的优势

利用ZYS-3M143磨床对材料为9Cr18Mo的61905外圈沟道进行精磨, 通过表面轮廓测试仪对沟道的形状进行检测发现: 若沟道表面粗糙度值较大, 将严重影响沟形。同时, 对轴承进行酸洗检查, 发现轴承滚道烧伤较为严重。调整磨削工艺参数, 如增大工件转速, 可避免轴承的表面烧伤, 但同时将增大工艺系统的振动, 使沟道表面粗糙度值大, 影响沟形。通过不断调整工艺参数, 在满足轴承无烧伤的前提下, 尽量使滚道表面有较低的表面粗糙度值, 以保证轴承具有良好的沟形, 但这是一个较为复杂的过程。即使在较为理想的参数下进行精磨沟时, 发现机床稳定性差, 产品合格率低, 严重影响轴承的生产效率。

由于9Cr18Mo粘性大, 磨削产生的磨屑粘附于砂轮表面, 使砂轮磨粒间的微孔堵塞, 使砂轮失去切削作用, 增大了砂轮与磨削表面间的摩擦, 使加工表面质量恶化; 9Cr18Mo变形抗力大, 磨削加工需较大的磨削力, 且导热性差, 使磨削热量集中在被磨轴承工件的表层, 使磨削温度升高, 造成轴承沟道表面烧伤龟裂, 影响轴承的使用性能。

超声振动辅助磨削加工是在普通磨削加工中施加超声振动于工件或砂轮上。通过理论分析可知, 超声振动辅助磨削可减小工件表面粗糙度值, 提高表面质量, 同时可以降低磨削力, 提高切削系统的稳定

性, 减少磨削热的产生, 减轻或避免磨削过程中的工件表面烧伤问题。超声振动辅助磨削可减轻砂轮堵塞, 能够有效保持磨粒的锋利性, 提高砂轮的切削性能, 减轻砂轮损耗并提高磨削效率。因此, 利用超声辅助磨削加工轴承, 必将得到不同于普通磨削加工的加工效果, 降低轴承工件表面粗糙度值, 提高轴承表面质量, 减弱或避免轴承表面烧伤现象。

2. 超声振动辅助磨削对提高工件表面质量的分析

在轴向超声振动辅助磨削加工过程中, 砂轮上单颗磨粒的运动包括: 以线速度 V_w 绕砂轮中心轴的旋转运动; 以速度 V_w 沿砂轮切线方向的匀速平移; 以频率 f 和振幅 A 沿砂轮轴线方向的高频振动。在轴向超声振动辅助磨削加工过程中, 砂轮上单颗磨粒的运动轨迹将发生改变, 如图1所示。

单颗磨粒相对于工件的运动方程为

$$\begin{cases} x = V_w t + \frac{d_s}{2} \sin(\omega_s t) \\ y = \frac{d_s}{2} - \frac{d_s}{2} \cos(\omega_s t) \\ z = A \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_s 为砂轮的旋转角速度; V_w 为工件进给速度; d_s 为砂轮直径; A 为振幅; ω 为超声振动的角频率, $\omega = 2\pi f$; f 为频率; φ 为超声振动的初始相位。

普通磨削中, 轴向没有超声振动, 则单颗粒的

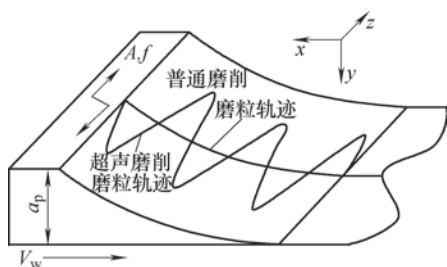


图1 轴向超声振动辅助磨削单颗磨粒运动轨迹示意图

运动方程为

$$\begin{cases} x = V_w t + \frac{d_s}{2} \sin(\omega_s t) \\ y = \frac{d_s}{2} - \frac{d_s}{2} \cos(\omega_s t) \end{cases} \quad (2)$$

由分析可知，轴向超声振动辅助磨削是在轴向方向（即 z 方向）给磨粒施加有规律、可控的高频振动，超声振动的引入使磨削加工过程中砂轮上的磨粒与工件的相对运动发生改变，从而改变了磨削加工过程中磨粒的运动特性，使加工过程中的磨削速度或进给量等工艺参数按某种规律变化，从而形成一种本质上新颖的加工方法。

当砂轮线速度 $V_s = 2.6 \times 10^4 \text{ mm/s}$ ，工作台速度 $V_w = 100 \text{ mm/s}$ ，磨削进给深度 $a_p = 20 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ，超声振幅 $A = 10 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ，超声频率 $f = 20 \text{ kHz}$ 时，单颗磨粒在普通磨削和超声磨削时的运动轨迹如图2所示。在砂轮轴向施加的超声振动使得超声磨削中磨粒的运动轨迹变为正弦曲线，磨粒的实际切削长度相对于普通磨削有所增大，磨粒的实际切削宽度变宽，增大了材料的去除量，提高了生产效率。

单颗磨粒的运动轨迹为正弦曲线，那么在磨削过程中，相邻磨粒之间的运动轨迹相互交织干涉，致使磨削工件表面成网状结构。根据磨粒与工件的

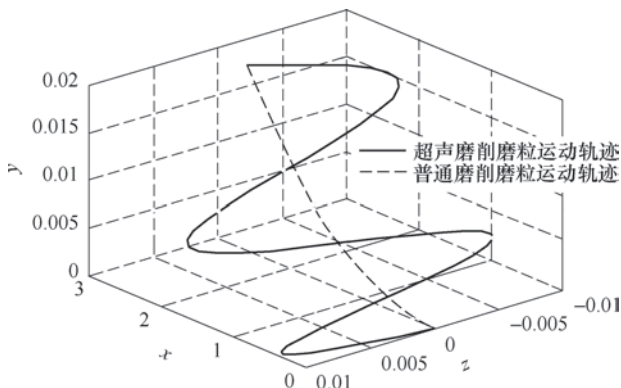
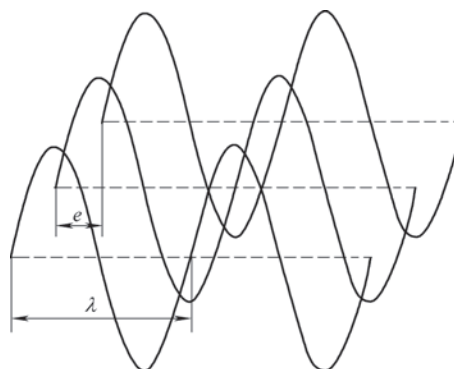
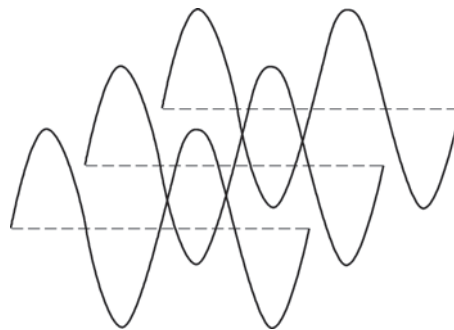


图2 单颗磨粒的运动轨迹

相对运动可知，磨粒运动轨迹的波长为： $\lambda = (V_s + V_w) / f$ ，当 V_s 、 V_w 和 f 取不同值时，磨粒运动轨迹的波长将不同。若砂轮表面不同圆周上磨粒之间的间距为 e ，那么在不同的参数下，磨粒运动轨迹之间的相互干涉情况将不一样，图3所示为 e 和 λ 在不同关系下磨粒轨迹之间的干涉情况。



(a) $\lambda = 4e$



(b) $\lambda = 2e$

图3 多颗磨粒的干涉情况

根据以上分析可知，在轴向超声振动辅助磨削过程中，若砂轮上磨粒与磨粒之间在轴线方向的间距小于超声振动的振幅 A ，并且 e 与 λ 不等，那么磨粒的运动轨迹就会相互交织，这种特性改变了磨削工件表面的形成机制，有助于提高工件表面质量。

3. 超声振动辅助磨削对降低磨削力的理论分析

在磨削加工过程中，磨削弧长是非常重要的参数之一，磨削力的大小与其有直接关系。根据磨粒在磨削过程中的位移方程能得到磨粒的速度方程，则普通磨削和轴向超声振动辅助磨削的磨粒速度方程分别为

$$\begin{cases} v_x = V_w + \frac{d_s}{2} \omega_s \cos(\omega_s t) \\ v_y = \frac{d_s}{2} \omega_s \sin(\omega_s t) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} v_x = V_w + \frac{d_s}{2} \omega_s \cos(\omega_s t) \\ v_y = \frac{d_s}{2} \omega_s \sin(\omega_s t) \\ v_z = A\omega \cos(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

根据磨粒的速度方程即可算出磨粒在磨削过程中的运动弧长, 普通磨削时磨粒的运动弧长为

$$\begin{aligned} l_p &= \int_0^M \sqrt{v_x^2 + v_y^2} dt \\ &= \int_0^M \sqrt{V_w^2 + V_s^2 + 2V_w V_s \cos(2V_s t / d_s)} dt \end{aligned} \quad (5)$$

轴向超声振动辅助磨削时磨粒的运动弧长为

$$\begin{aligned} l_a &= \int_0^M \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} dt \\ &= \int_0^M \sqrt{V_w^2 + V_s^2 + 2V_w V_s \cos(2V_s t / d_s) + A^2 \omega^2 \cos^2(\omega t + \varphi)} dt \end{aligned} \quad (6)$$

比较式(5)和式(6)可知, 在磨削参数相同的情况下, 由于超声振动的引入使得轴向超声振动辅助磨削的运动弧长大于普通磨削的运动弧长。

在磨削加工过程中, 若磨削进给深度为 a_p , 工作台进给速度为 V_w , 砂轮线速度为 V_s , 并且在普通磨削和轴向超声振动辅助磨削中, 这些参数都是相同的, 那么工件在单位时间内被去除的材料体积为 $V = a_p b V_w$ 。

如果砂轮表面单位面积上的有效磨刃数为 C , 那么在单位时间内通过磨削接触区的磨粒数表示为

$$N = Cb(V_s + V_w) \quad (7)$$

根据以上分析可得单位时间内单颗磨粒所磨除的工件材料体积为

$$V_g = \frac{V}{N} = \frac{a_p V_w}{C(V_s + V_w)} \quad (8)$$

根据式(6)和式(8), 可得在轴向超声振动辅助磨削过程中, 单颗磨粒的平均切屑断面面积 A_m 为

$$A_m = \frac{V_g}{l_a} = \frac{a_p V_w}{C(V_s + V_w)} \int_0^M \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} dt \quad (9)$$

而对于普通磨削, 单颗磨粒在磨削过程中产生的平均切屑断面面积为

$$A_m' = \frac{V_g}{l_p} = \frac{a_p V_w}{C(V_s + V_w)} \int_0^M \sqrt{v_x^2 + v_y^2} dt \quad (10)$$

由分析可知, 当加工变量(磨削进给深度、工作台进给速度及砂轮线速度等)和其他条件(如砂轮类型、工件材料等)相同时, 轴向超声振动辅助磨削

的切屑断面面积小于普通磨削, 即轴向超声磨削可以得到比普通磨削更细的切屑。基于单颗磨粒的磨削力与磨屑断面面积成正比的假设, 说明轴向超声磨削力相比于普通磨削力有降低。

以下通过磨削过程中的摩擦力分析说明超声具有降载效果。在轴向超声振动辅助磨削加工过程中, 超声振动垂直于磨粒的运动方向, 则磨粒与工件的相对滑动模型如图4所示。

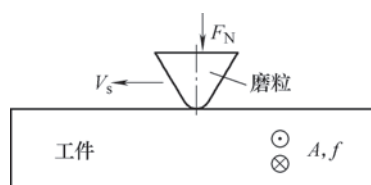


图4 磨粒与工件超声振动滑动模型

图4中, 磨粒所受的法向力为 F_N , 运动速度为 V_s , 而给工件附加垂直于磨粒运动方向的超声振动, 其速度为 $V_a = A\omega \cos(\omega t) = \hat{V}_a \cos(\omega t)$ 。在没有施加超声振动时, 磨粒受到的摩擦力和其滑动速度方向共线; 当施加超声振动后, 改变了工件和磨粒的相对滑动速度, 那么磨粒受到的摩擦力方向也将发生改变, 如图5所示。

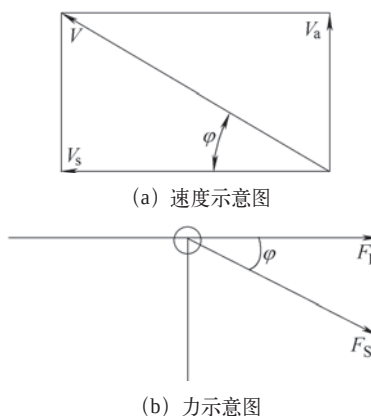


图5 超声振动时磨粒和工件的相对滑动速度和受力

在图5中, V_s 为磨粒相对工件的滑动速度, V_a 为工件超声振动速度, V 为两者的合速度, F_s 为磨粒和工件相对滑动产生的摩擦力, F_R 为磨粒在砂轮切线方向(即主切削方向)上的摩擦力。由图5可知, 超声振动的引入改变了磨粒与工件的相对运动速度, 使得磨粒与工件的相对滑动速度方向与砂轮切线方向产生一周期变化的夹角, 在此情况下, 磨粒在砂轮切线方向所受的摩擦力也将发生周期性变化。磨粒和工件相对滑动时的受力如图5b所示, F_s 是由于磨粒和工件相对滑动产生的摩擦力, $F_s = \mu F_N$; 而 F_R 为磨粒在

砂轮切线方向上的摩擦力, $F_R = \mu F_N \cos \varphi$, 其中 $\tan \varphi = V_a/V_s$ 。由此可得磨粒在砂轮切线方向上的摩擦力为

$$F_R = \frac{\mu F_N}{\sqrt{1 + \left(\frac{\hat{V}_a}{V_s} \cos \omega t \right)^2}} \quad (11)$$

μF_N 是在磨粒没有施加超声振动时所受的摩擦力。若假设不施加超声振动和施加超声振动时磨粒所受的法向力相等, 则从式(11)可知, 超声振动的引入减小了磨粒在砂轮切线方向上的摩擦力。

上述分析是基于磨粒与工件的相对滑动速度方向的改变, 讨论了在轴向超声振动辅助磨削过程中, 由于超声振动的引入对磨粒在主切削方向上的摩擦力的影响。而在实际磨削过程中, 由于磨削速度较大, 砂轮上的磨粒与工件处于相对滑动速度较高的状态下, 有学者研究证明, 在相对滑动速度较高的情况下, 两物体之间的摩擦系数会随着相对运动速度的增大而减小。而在轴向超声磨削加工过程中, 由于超声振动的引入, 导致工件和磨粒的相对运动速度发生了变化。在普通磨削过程中, 工件和磨粒的相对运动速度为 $V_s \pm V_w$, 而在轴向超声振动辅助磨削时, 工件和磨粒的相对运动速度为 $V = \sqrt{(V_s \pm V_w)^2 + V_a^2}$, 比较分析可以发现其大于普通磨削时的相对运动速度, 进而可以说明在轴向超声磨削加工过程中, 磨粒与工件之间的摩擦系数小于普通磨削, 并且随着超声振动振幅和频率的增大, 超声振动的速度也会相应地增大, 那么磨粒和工件的相对运动速度就会增大, 它们之间的摩擦系数就会相应地减小。减小摩擦系数有利于磨削力的减小, 减少磨削热的生成, 所以, 利用超声辅助磨削技术加工轴承能够有效解决其表面烧伤问题。

4. 结语

(1)在超声振动辅助磨削中, 由于超声振动的引入, 微分切削轨迹、细化加工表面, 降低表面粗糙度值, 改善工件表面质量; 超声产生的高频振动能有效解决砂轮堵塞问题, 改善砂轮的切削性能。在普通磨削过程中产生振动, 使加工表面质量降低。而施加高频振动后, 改变了工艺系统的动态稳定性, 使工艺系统的不良振动现象得到消除和减弱, 因此可得到独特的超声磨削加工效果。

(2)施加超声振动后改变摩擦力方向, 减小外摩擦阻抗, 同时以其特有的脉冲特性, 使砂轮与工件

处于非完全接触的加工状态, 形成了独特的摩擦特性, 产生的摩擦力明显降低, 减少磨削热的产生。在超声磨削过程中, 超声振动的空化作用使切削液乳化为微粒, 使切削液直接渗透到砂轮与工件的接触表面, 充分地起冷却和润滑作用, 从而减轻或避免传统磨削过程中出现的工件表面烧伤问题。

(3)超声振动辅助磨削可以得到比普通磨削更细的切屑, 有利于提高轴承表面质量。超声振动磨削可减小摩擦系数, 磨粒主切削方向上的摩擦力小于普通磨削, 减少磨削热的产生, 减弱或避免轴承加工表面的烧伤。超声振动辅助磨削为轴承加工提供了一种新型的加工技术。

参考文献:

- [1] 张洪丽. 超声振动辅助磨削技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [2] 闫艳燕. 纳米复相陶瓷二维超声振动辅助磨削机理及其表面质量研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [3] 梁志强, 王西彬, 吴勇波, 等. 超声振动辅助磨削技术的现状与新进展 [J]. 兵工学报, 2010, 31 (11) : 1530-1535.
- [4] 李建中. 精密陶瓷的超声波振动磨削加工机理研究 [D]. 天津: 河北工学院, 1992.
- [5] 郭兰申. 超声波振动磨削工件表面粗糙度研究 [D]. 天津: 河北工学院, 1993.
- [6] 曲云霞, 关颖文. 超声振动磨削对工件表面粗糙度的影响 [J]. 河北工业大学学报, 1997, 26 (03) : 99-104.
- [7] 周雪钢. 氮化硅陶瓷超声振动磨削机理及表面质量研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

MW (收稿日期: 20150913)

专家点评

超声辅助磨削为轴承加工提供了一种新型的加工技术, 可微分切削轨迹、减轻轴承表面的烧伤问题。作者在理论分析中运用大量计算数据, 专业性较强。