

# 超声砂带研抛的实验研究

王先逵 邹保昌

(清华大学, 北京 100084)

**摘要** 超声砂带研抛是在开式砂带研抛中叠加超声振动而形成的一种复合加工工艺。文中阐述了超声砂带研抛的工作方式、基本原理和系统设计,对砂带振动状态进行了测试和分析,并对比了超声砂带研抛和普通砂带研抛后的工件表面糙度及其加工效率。

**关键词:** 研抛; 超声振动; 砂带

## 1 前言

超声砂带研抛是在开式砂带研抛中<sup>[1]</sup>叠加超声振动而形成的一种复合加工工艺方法。在我国,砂带磨削和砂带研抛是在八十年代才逐渐兴起,它具有独特的工艺性能、应用范围广泛、加工成本低、加工效率高等特点,因此受到了重视。当前,在机械制造中加工精度和表面质量的要求愈来愈高,同时诸如不锈钢、耐热钢、钛合金等各种难加工材料的制品也越来越多,因此寻求和开发新的加工方法是当务之急。由于超声振动加工和处理技术是利用高强度超声波来改变物质的状态、性质或加速变化过程的技术,取得了较好的技术经济效益,因此将超声振动引入砂带研抛,在提高精度、表面质量和加工效率等方面取得了显著的效果,是一种很有前途的超精密加工方法。

## 2 超声振动砂带研抛工作原理

砂带研抛可分为闭式砂带与开式砂带两大类,对精密加工和超精密加工来说,采用开式砂带研抛较好。加工时,卷状砂带通过卷带轮而缓慢移动,为一次性使用,可保持相同的加工状态,总是不断地有新磨粒参加工作,效果较好。从砂带与工件的接触方式来看,砂带研抛又可分为接触轮式、接触板式和自由式三种,考虑到主要进行外圆和平面加工,故选用接触轮式。这样,超声振动砂带研抛就是在开环接触轮式砂带研抛的基础上来叠加超声振动的,如图1所示。

实现超声振动和砂带研抛的叠加是一个关键问题,不仅要考虑超声波本身的物理特性,如

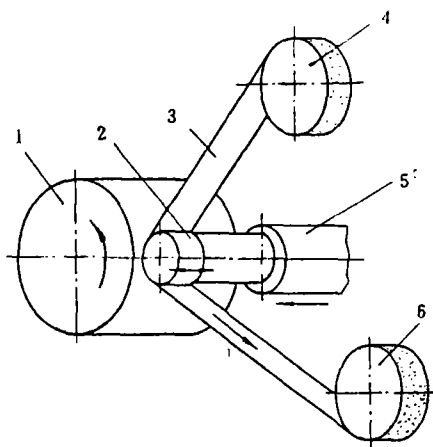


图1 超声振动砂带研抛工作原理 1—工件；2—接触轮；3—砂带；4—砂带轮；  
5—超声振动振幅放大杆；6—卷带轮

反射与折射、空化现象、波的干涉与共振等，而且要考虑叠加结构和叠加方向。其中叠加结构主要是将超声振动加在何处，有工件、砂带、接触轮三种方案，由于工件是变化的，振动功率要求大，结构较复杂，故不宜采用；将超声振动直接加工砂带上是比较困难的，通过接触轮再传动砂带上的可能性较大，因此采用将超声振动加在接触轮上的方案，这时超声波加工工具头就是接触轮。在砂带研抛过程中，接触轮是可以自由转动的，要实现接触轮超声振动并带动砂带一起振动，则要求接触轮与砂带之间有较强的摩擦力，接触轮转动部分的结构制造精度要求很高；若接触轮不转动，则结构要简单得多，这时，砂带和接触轮间有相对滑动，因此要求其间的摩擦力不能太大，所以采用了接触轮不转动的方案。在叠加方向上有接触轮轴向振动、径向前后振动和径向上下振动三种情况，考虑到接触轮轴向振动对表面质量、加工效率的效果最好，虽然实现它有相当难度，还是选择了这一方案，并获得成功。

超声振动砂带研抛外圆表面时有以下五种运动，如图2所示。

1. 工件主轴的回转运动  $V_0$ 。

2. 砂带的走带运动  $V_i$ ：开式砂带研抛时，砂带总是作连续平稳缓慢的运动，以保证不断有新磨粒参与作用，走带速度太快则砂带不能充分利用，走带速度太慢将影响加工表面质量和效率。

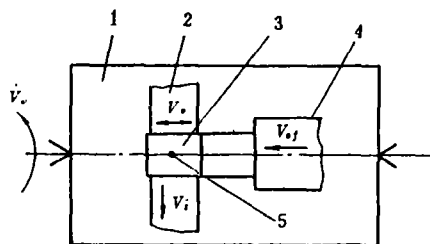


图2 超声砂带研抛外圆时的振动

1—工件；2—砂带；3—接触轮；4—振幅放大杆；5—砂粒

3. 研抛头架的径向进给运动  $V_{df}$ : 这个运动是使砂带趋近和退出工作位置, 并控制研抛深度

4. 研抛头架的轴向进给运动  $V_{of}$ : 这个运动是当采用窄砂带而要加工比砂带宽度更长的工件时所必须的。

5. 接触轮的轴向高频振动  $V_v$ : 其作用主要是提高表面质量和加工效率。

从以上运动可分析出超声砂带研抛外圆时的砂粒研抛轨迹。

$$V_{\omega} = R d\theta/dt = 2\pi R n_{\omega}/60 \quad (1)$$

$$\theta = 2\pi n_{\omega} t/60 \quad (2)$$

式中  $n_{\omega}$  —— 工件转速 (r/min);

$R$  —— 工作半径 (mm);

$t$  —— 时间 (s)

$$V_v = dS/dt = \mp 2\pi f A \sin 2\pi f t \quad (3)$$

$$S = S_0 \pm A \cos 2\pi f t \quad (4)$$

式中  $S$  —— 磨粒因砂带振动而产生的位移 (mm);

$S_0$  —— 磨粒在工件上的原始位置 (mm);

$A$  —— 砂带振动振幅 (mm);

$f$  —— 砂带振动频率 (Hz)。

由于砂带的走带速度  $v$ , 极其缓慢, 可以忽略, 则此时的砂粒研抛轨迹是一条沿工件圆周表面, 以  $S_0$  处周长为中性轴的简谐振动曲线。

由 (2) 式得  $t = 60\theta/2\pi n_{\omega}$  代入 (4) 式, 则得

$$S = S_0 \pm A \cos \frac{60f}{n_{\omega}} \theta \quad (5)$$

令  $B = 60f/n_{\omega}$ , 则

$$S = S_0 \pm A \cos B\theta \quad (6)$$

式中  $B$  —— 速比系数

速比系数  $B$  表示了振动速度与工件回转速度的比例关系, 只要选定  $f$  和  $n_{\omega}$  互为质数, 就可得到不重复的研抛轨迹。

再考虑研抛头架的轴向进给运动  $V_{of}$ , 由于  $V_{of}$  与  $V_{\omega}$  的合成形成螺旋线, 因此研抛轨迹是一条以螺旋线为中性轴的简谐振动曲线。

### 3 超声振动系统设计

超声振动系统是由超声波发生器、换能器、振幅放大杆和加工工具头所组成。超声波发生器的作用是将工频交流电转变为有一定功率输出的超声频电振荡, 以提供工具往复运动和除去被加工材料的能量。换能器的作用是将超声频电振荡转换为超声频机械振动。根据需要

选用了 250W 超声波发生器及相应的磁致伸缩换能器。振幅放大杆的作用是把能量集中在较小面积上使振幅放大，同时可起阻抗变换器作用，将能量有效地向负载传递。加工工具头在超声砂带研抛中就是接触轮。振幅放大杆和加工工具头要自行设计。

常用的振幅放大杆有阶梯形、锥形、指数函数形、傅立叶形等多种形状，考虑到超声振动砂带研抛要求振幅较大，而轴向振动阻力较小，所需功率不大，故选用阶梯形振幅放大杆。通常当换能器的尺寸确定后，就可进行振幅放大杆的设计，但是要用数学来精确求算是很困难的，因此计算时作如下简化：

(1) 振动在杆中以平面波传播，即在整个横截面上质点的应力和速度是常量；(2) 杆上没有横向压缩；(3) 杆的振动是谐和振动。

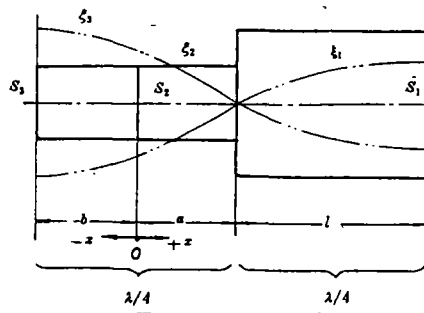


图 3 阶梯形振幅放大杆和接触轮

图 3 为设计出的阶梯形振幅放大杆和接触轮，为了满足共振要求，将接触轮和振幅放大杆的总长设计为半波长，而支点选在振动过程中的不动点，即波节点。接触轮与振幅放大杆之间用螺纹连接。图 3 中

$a$ —原点 0 至振幅放大杆波节点距离； $b$ —原点 0 至接触轮前端面距离； $l$ —超声波在杆材中传播波长  $\lambda$  的  $\frac{1}{4}$ ； $s_1$ —振幅放大杆大端横截面面积； $s_2$ —振幅放大杆小端横截面面积； $s_3$ —接触轮横截面面积。

根据纵向振动一般方程式

$$S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \quad (7)$$

其通解为：

$$\xi_1(x, t) = \left( A_1 \cos \frac{\omega}{c} x + B_1 \sin \frac{\omega}{c} x \right) \sin(\omega t + \varphi) \quad (a \leq x \leq a + l) \quad (8)$$

$$\xi_2(x, t) = \left( A_2 \cos \frac{\omega}{c} x + B_2 \sin \frac{\omega}{c} x \right) \sin(\omega t + \varphi) \quad (0 \leq x \leq a) \quad (9)$$

$$\xi_3(x, t) = \left( A_3 \cos \frac{\omega}{c} x + B_3 \sin \frac{\omega}{c} x \right) \sin(\omega t + \varphi) \quad (-b \leq x \leq 0) \quad (10)$$

边界条件：

$$x = a, \xi_2 = 0 \quad (11)$$

$$x = 0, \xi_2 = \xi_3, E S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} = E S_3 \frac{\partial \xi_3}{\partial x} \quad (12)$$

$$x = -b, \frac{\partial \xi_3}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

式中  $E$ ——弹性模量（取接触轮与振幅放大杆的材料相同）；

$\xi_1$ ——长度为  $l$  部分的振动位移；

$\xi_2$ ——长度为  $a$  部分的振动位移；

$\xi_3$ ——接触轮部分的振动位移；

$c$ ——超声波在材料中的传播速度。

由边界条件通过运算可得

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{c}a\right)\operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{c}b\right) = \frac{S_2}{S_3} \quad (14)$$

$$l = \frac{\pi c}{2\omega} = \frac{c}{4f} \quad (15)$$

从式 (14) 可求出与接触轮形状相适应的，横截面面积为  $S_2$  的振幅放大杆小端长度  $a$ 。从式 (15) 可求出大端长度  $l$

取  $l = \frac{1}{4}\lambda$ 、 $a + b = \frac{1}{4}\lambda$ 、 $S_2 = S_3$ ，由式 (12) 可得

$$\xi_2(x, t) = \xi_3(x, t) \quad (16)$$

边界条件：

$$x = a, \xi_1 = 0, E S_1 \frac{\partial \xi_1}{\partial x} = E S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} \quad (17)$$

$$x = a + l, \xi_1 = [A_1 \cos \frac{\omega}{c}(a + l) + B_1 \sin \frac{\omega}{c}(a + l)] \sin(\omega t + \varphi) \quad (18)$$

$$x = -b, \xi_3 = [A_3 \cos \frac{\omega}{c}(-b) + B_3 \sin \frac{\omega}{c}(-b)] \sin(\omega t + \varphi) \quad (19)$$

通过运算可求得振幅放大系数  $k$

$$k = \left| \frac{\xi_3}{\xi_1} \right| = \frac{S_1}{S_2} \quad (20)$$

换能器输出的振幅一般都在  $(2 \sim 4) \mu\text{m}$ ，考虑到磁致伸缩材料的特性、砂带研抛的要求，希望振幅尽量大些，故取放大系数  $k = 8$ 。

最后确定：大端直径  $D = 44\text{mm}$ ， $l = 65\text{mm}$ ；小端直径  $d = 16\text{mm}$ ， $a = 35\text{mm}$ ；接触轮直径  $d = 16\text{mm}$ ， $b = 30\text{mm}$ 。阶梯过渡圆角  $r = 10\text{mm}$ 。

图 4 表示了超声振动系统中换能器、振幅放大杆和接触轮的结构简图。

## 4 超声振动状态的测试

图 5 表示了超声振动砂带研抛系统，它是在一台普通车床上，将超声砂带研抛头架装在

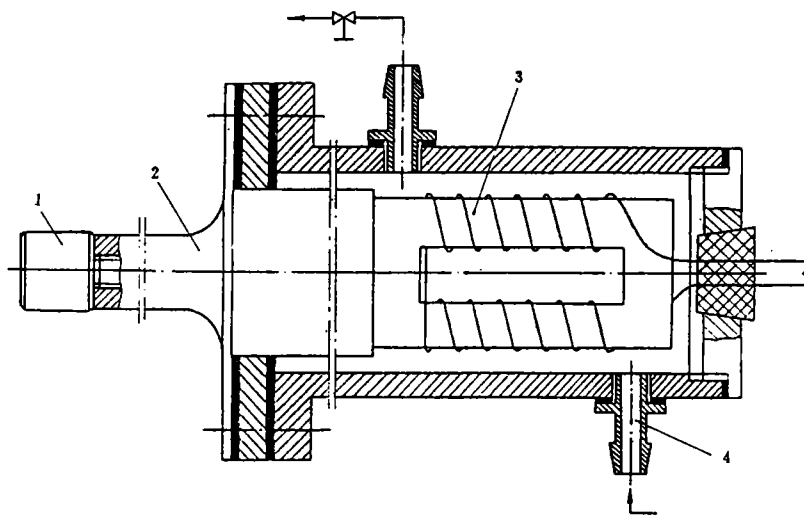


图4 超声振动系统结构简图

- 1—接触轮；2—振幅放大杆
- 3—换能器；4—冷却水系统

刀架的横滑板，拆去方刀架，利用车床原有的主运动、纵向进给运动和横向进给运动，就可进行超声砂带研抛。

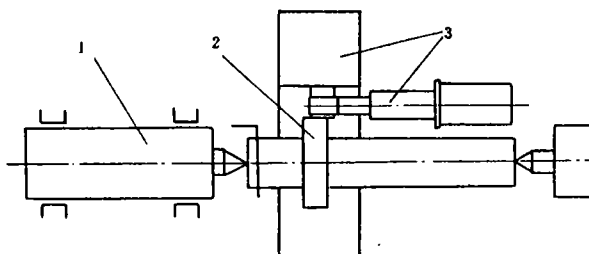


图5 超声振动砂带研抛系统

- 1—车床主轴；2—工件；3—超声砂带研抛头架及超声振动系统

为了充分发挥超声效果，通常都是将振动系统调至共振状态，因此接触轮的共振状态将直接影响研抛质量和工效，所以有必要对接触轮的共振状态进行测试，同时也为分析研究砂带振动提供可靠依据。限于测试条件，采用高频响的压电式加速度传感器来测定接触轮的共振频率和振动加速度幅值，然后再通过理论计算得到接触轮的振幅值。图6就是所测得的接触轮共振曲线，可知接触轮的共振频率  $f = 19.2\text{kHz}$ ，振幅  $A = 21.5\mu\text{m}$ ，和理论分析计算结果  $f = 20\text{kHz}$ ， $A \geq 16\mu\text{m}$  基本一致。

在砂带研抛过程中，振动是通过接触轮上的左右台阶来传递给砂带的，这样，砂带沿宽度方向上各点的振动，实际上是两列同频率、同振幅、传播方向相反的脉冲纵波的叠加，因此产生“驻波”现象。

设两列频率相同、振幅相等、振动方向相同而传播方向相反的余弦波为

$$\xi_1(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_1) \tag{21}$$

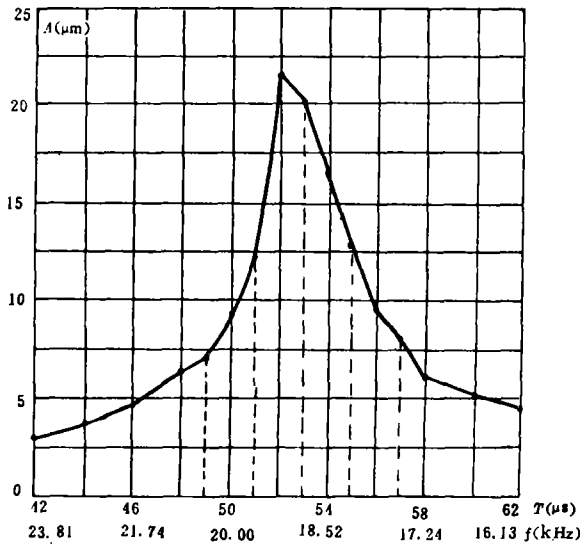


图6 接触轮的共振曲线

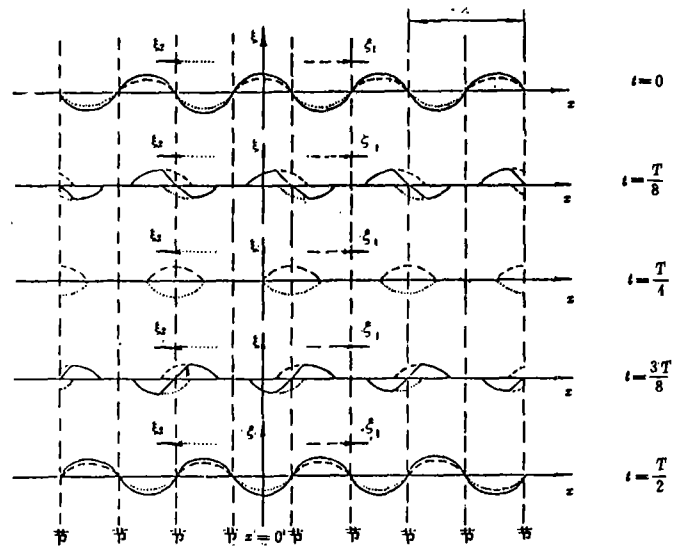


图7 砂带振动时的“驻波”现象

$$\xi_2(x, t) = A \cos(\omega t + kx + \varphi_2) \quad (22)$$

其中  $\omega/k = v$ ,  $v$  为波速, 适当选择坐标原点 ( $x=0$ ) 和时间零点, 可使  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  都为零, 两波叠加后可得

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = A \cos(\omega t - kx) + A \cos(\omega t + kx) \quad (23)$$

$$\xi(x, t) = 2A \cos kx \cos \omega t \quad (24)$$

上式说明, 叠加后的波各点都按同一频率作谐振动, 但各点的振幅  $|2A \cos kx|$  是位置的函数, 振幅在空间按余弦函数规律分布。对应  $|\cos kx| = 0$  的那些点, 振幅最大, 为波腹; 对应  $|\cos kx| = 1$  的那些点, 总是静止不动, 为波节, 因此出现了叠加波的“驻波”现象, 在实际

工作时可以观察到砂带振动时的这一现象,如图7所示。

由于“驻波”现象的存在,使得砂带上沿带宽各点的振幅大不相同,直接影响研抛表面质量。在加工中若有轴向进给运动,可有效克服这一影响;若为无轴向进给的横向研抛,则对表面加工质量影响较大。

## 5 超声砂带研抛实验分析

超声砂带研抛实验有单因素实验和多因素实验两种,现分别论述如下。

### 5.1 单因素实验

(1) 干研时超声振动对表面粗糙度的影响

用  $W_3$  氧化铝砂带研抛 45 号钢试件,砂带带基为聚脂薄膜,研抛速度  $v_w=30\text{m}/\text{min}$ ,走带速度  $v_t=40\text{mm}/\text{min}$ ,加工时间  $t=20\text{min}$ ,研抛结果如表 1 所示。

表 1 干研时超声振动对表面粗糙度的影响

表面粗糙度 $Ra$ ( $\mu\text{m}$ )							
普通砂带研抛				超声砂带研抛			
试件号	研抛前	研抛后	差值	试件号	研抛前	研抛后	差值
2	0.198	0.162	0.036	1	0.315	0.070	0.245
4	0.312	0.107	0.205	3	0.289	0.076	0.213
6	0.325	0.118	0.207	5	0.252	0.077	0.175
平均	0.278	0.129	0.149	平均	0.285	0.074	0.211

表 2 超声振动对表面粗糙度和加工效率的影响

表面粗糙度 $Ra$ ( $\mu\text{m}$ )															
普通砂带研抛							超声砂带研抛								
干 研				湿 研			干 研				湿 研				
试件号	研抛前	研抛后	时间 (min)	试件号	研抛前	研抛后	时间 (min)	试件号	研抛前	研抛后	时间 (min)	试件号	研抛前	研抛后	时间 (min)
8	0.272	0.067	40	14	0.734	0.082	40	1	0.315	0.070	20	7	0.537	0.039	20
10	0.320	0.078		16	0.615	0.057		3	0.289	0.076		9	0.606	0.040	
12	0.332	0.083		18	0.516	0.061		5	0.252	0.077		11	0.771	0.048	
平均	0.308	0.076		平均	0.622	0.067		平均	0.285	0.074		平均	0.638	0.042	

从表 1 可知,干研时超声砂带研抛与普通砂带研抛相比,明显地降低了表面粗糙度值,平均可达  $Ra0.055\mu\text{m}$ 。

(2) 湿研时超声振动对表面粗糙度的影响

用  $W_3$  氧化铝砂带研抛 45 号钢试件,砂带带基为聚脂薄膜,研抛速度  $v_w=30\text{m}/\text{min}$ ,走带

速度  $v_s = 40\text{mm/min}$ , 采用过滤煤油为冷润液, 研抛结果如表 2 所示。

从表 2 可知, 湿研时超声砂带研抛比干研时其表面粗糙度平均降低  $Ra 0.032\mu\text{m}$  而普通砂带研抛时  $Ra$  值降低甚少。

### (3) 超声振动对加工效率的影响

从表 2 还可以看出, 干研时, 表面粗糙度  $Ra$  值降低  $0.232\mu\text{m}$  用普通砂带研抛需要 40min, 而  $Ra$  值降低  $0.211\mu\text{m}$  超声砂带研抛只需 20min, 提高工效近一倍; 湿研时,  $Ra$  值降低  $0.555\mu\text{m}$  用普通砂带研抛需要 40min, 而  $Ra$  值降低  $0.596\mu\text{m}$  用超声砂带研抛只需 20min, 提高工效一倍多。可见湿式超声砂带研抛工效最好。

从单因素实验可以得出超声砂带振动研抛比普通砂带研抛在表面粗糙度上其  $Ra$  值可降低  $0.05\mu\text{m}$ , 在工效上可提高一倍。

## 5.2 多因素实验

采用正交实验方法就工件转速和接触压力进行二水平二因素试验, 其结果如表 3 所示。

表 3 超声砂带研抛正交实验

序号	因素	工件转速	接触压力	试件号	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$Ra$ 平均值 ( $\mu\text{m}$ )
1	I	1	1	7	0.039	0.039
				9	0.040	
2	I	1	2	19	0.054	0.053
				21	0.052	
3	II	2	1	23	0.092	0.097
				25	0.102	
4	II	2	2	27	0.126	0.120
				29	0.115	
I		0.092	0.136	总台 = I + II = 0.309		
II		0.217	0.173			
I/2		0.046	0.068			
II/2		0.109	0.087			
极差 R		0.063	0.019			

试验中, 工件转速分两级, 1 级为  $80\text{r/min}$ , 2 级为  $60\text{r/min}$ ; 接触压力分两级, 1 级为低接触压力, 2 级为高接触压力。

试验结果表明

(1) 因素重要性: 对表面粗糙度  $Ra$  值而言, 从极差  $R$  可知, 第一位为工件转速, 第二位为接触压力。

(2) 优化参数: 对表面粗糙度  $Ra$  而言, 显然是高工件转速和低接触压力为最优。

在超声砂带研抛中, 由于砂带在接触轮轴向有超声频振动, 为获得低表面粗糙度值的网纹加工表面, 提高加工效率, 工件转速的选择当然显得十分重要, 应选高工件转速为好。

从实验表明, 超声振动的作用是十分明显的, 分析超声振动的机制有以下几点:

- (1) 超声振动使摩擦系数降低。
- (2) 超声振动使剪切角增大, 切削力变小。
- (3) 超声振动时能量集中, 使被加工材料变形阻抗减小, 屈服应力下降, 产生“Blaha”效应。
- (4) 超声振动使实际切削速度提高。
- (5) 有超声振动时, 工艺系统的弹性系数  $k$  增加  $T/t_c$  倍 ( $T$  为脉冲状切削周期,  $t_c$  为一个周期内纯切削时间), 故使工艺系统“刚性化”。
- (6) 超声振动使加工过程冷态化。

## 6 结 论

(1) 在普通砂带研抛中在接触轮轴线方向叠加了超声振动, 形成超声砂带研抛, 它是一种新型精密和超精密加工复合工艺。

(2) 超声砂带研抛与普通砂带研抛相比, 表面粗糙度  $Ra$  值平均降低  $0.05\mu\text{m}$ , 加工效率平均提高一倍。

(3) 采用过滤煤油为冷润液时, 由于“空化”效应, 使加工表面质量和工效都有提高, 因此在超声砂带研抛时, 冷润液的作用较大。

(4) 超声砂带研抛时, 接触轮的共振频率  $f = 19.2\text{kHz}$ , 振幅  $A = 21.5\mu\text{m}$ , 砂带振动有“驻波”现象, 但沿工件轴向进给运动有效地克服了“驻波”振动带来的影响。

### 参 考 文 献

- [1] Xian-Kui Wang et al., Technology of Precision Vibration Polishing with Abrasive Tape, IXth ICPR, Vol. II, 1987.9
- [2] 王先逵、李洪斌, 超声砂带精密磨削技术, 电加工, 1988年, 第4期

## Experimental Investigation of the Ultrasonic Vibration Abrasive Tape Polishing

Wang Xiankui, Zou Baochang  
(Tsinghua University, Beijing 100084)

### Abstract

The ultrasonic vibration abrasive tape polishing is a compound machining method, based on the open-loop abrasive tape polishing add to the ultrasonic vibration. The paper describes the operation mode, basic principle and system design, testing and analyses of the vibration state, compared with the abrasive tape polishing in roughness and efficiency.

Key words: Polishing, Ultrasonic vibration, Abrasive tape