第 18 卷　第 2 期　2018 年 1 月
1671—1815(2018)002-0232-05

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 2　Jan. 2018
© 2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:王鹏里, 董志国, 轧　刚, 等. 基于软性磨料流的 Preston 方程 k_p 参数的修正与测定[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 232—236
Wang Penli, Dong Zhiguo, Ya Gang, et al. Modification and determination of the Preston equation k_p parameter based on soft abrasive flow [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 232—236

机械、仪表工业

基于软性磨料流的 Preston 方程 k_p 参数的修正与测定

王鹏里　董志国*　轧　刚　段泽斌
(太原理工大学机械工程学院,精密加工山西省重点实验室,太原 030024)

摘　要　通过将流体磨料充满圆孔工件中,用活塞推动磨料在圆孔中流动,活塞挤压一个行程为一个循环。同一工件用同一种流体磨料循环加工,对同一点可测试其直径的变化量;并将此测量点的直径变化量代入修正过的基于软性磨料流加工微孔的 Preston 方程的 k_p 参数公式;并对不同质量分数下的软性磨料流基于 Preston 方程的 k_p 参数进行了测定与计算。通过分析不同质量分数下的软性磨料流的 k_p 参数,得出:随着磨料质量分数的提高,软性磨料 Preston 方程的 k_p 参数也随之不断增加,表现为对微孔表面的材料去除能力也越来越强。随着磨料质量分数的提高,软性磨粒流的材料去除率越大。

关键词　软性磨料流　　微型锥孔　　Preston 方程　　k_p 参数
中图法分类号　TH123;　　　**文献标志码**　A

随着科学技术的发展,大量装备及零部件朝着小型化、微型化及轻型化的方向发展,使得零部件的加工尺度越来越小。其中,微小锥形孔道在一些零部件上为满足一定的功能性要求被广泛使用,加工时对孔道的表面质量有较高的要求。由于传统光整加工方法在微小结构中的使用限制,促使人们将微细结构的光整加工技术转移到软性磨料流加工技术中[1—3]。

计时鸣等在 Navier-Stokes 方程的基础上,将软性固-液两相磨料流的流动状态归纳为湍流运动,通过运用流体多相流碰撞理论与通过加工参数控制流道内磨料流的湍流形态,提出一种利用 k-ε 模型与 DPM 模型相结合的方法,求解加工过程中流道压力、流速分布及湍流动能的数值分析方法;并利用 Fluent 流体分析软件对流道进口压力、速度进行了有限元仿真分析,经过数值计算结果与实际加工结果的对比分析,得出其仿真结果与选用的 Preston 方程描述的材料去除量一致[4—6]。李俊烨研究了不同黏度的流体磨料对微小孔的加工,在流动特性分析的基础上,利用软性磨料的固-液两相流的湍流特性,对软性磨料流通过微孔进行数值分析,得出了软性磨料的进口压力与流动速度的关系[7]。

为了定量分析软性磨料加工微型孔表面的材料去除量,就不可避免使用到 Preston 方程,而该方程主要完成分析黏弹性磨料流对零部件表面的材料去除量的分析计算,对软性磨料流加工微孔时的材料去除并不适用。要想利用 Preston 方程求解软性磨料中的 k_p 参数时,必须对 Preston 方程中的 k_p 参数进行修正。

1　软性磨料流加工 preston 方程 k_p 参数的测定

1.1　Preston 方程分析

Preston 方程[8]是广泛应用于磨削加工的经验公式,由 Preston 于 1927 年提出。在一定条件下,可以用 Preston 方程描述磨料流加工时工件的去除量与各种工艺参数以及磨粒特性的关系。在 Preston 方程中,将磨粒的速度和磨粒对壁面压力之外的所有因素的作用都归为一个比例常数 k_p,称为 Preston 常数。

$$\Delta z = \int_0^t k_p v P \mathrm{d}t \tag{1}$$

式(1)中,Δz 表示磨削去除量;v 表示磨粒在近壁面区域的相对速度;P 表示磨粒在近壁面区域的压力;k_p 表示包括了与磨粒本身相关的部分因素(如磨粒

2017 年 7 月 5 日收到　　　　国家自然科学基金(51575375)资助
第一作者简介:王鹏里(1991—),男,硕士研究生。研究方向:软性磨料流微型锥孔光整加工。E-mail:523315029@qq.com。
*通信作者简介:董志国,男,博士,副教授。E-mail:207285232@qq.com。

的大小、形状和硬度)、磨粒与壁面发生作用时的因素(如磨粒与壁面的撞击角度)以及被加工工件自身因素(如被加工工件的硬度)等。

1.2　Preston 常数 k_p 的计算

Preston 常数 k_p 在实际理论计算中很难得出准确的值,但是可以经过实验测定。将流体磨料充满圆孔工件中,用活塞推动磨料在圆孔中流动,活塞挤压一个行程为一个循环。同一工件用同一种流体磨料加工对此循环加工,对同一点可测试其直径的变化量:

第 1 个行程微孔入口直径变化为

$D_1 - D_0 = 2k_p v_1 P_1 t_1$;

第 2 个行程微孔入口直径变化为

$D_2 - D_1 = 2k_p v_2 P_2 t_2$;

……

第 i 个行程微孔入口直径变化为

$D_i - D_{i-1} = 2k_p v_i P_i t_i$;

……

第 n 个行程微孔入口直径变化为

$D_n - D_{n-1} = 2k_p v_n P_n t_n$。

当每次加工时间一致时(记 t_0),将以上 n 个式子叠加,得到:

$$D_n - D_0 = 2k_p \sum_{i=1}^{n} v_i P_i t_0 \tag{2}$$

经过 n 次循环加工,根据加工点处的直径变化,得到切削深度系数 k_p 的计算公式:

$$k_p = \frac{D_n - D_0}{2\sum_{i=1}^{n} v_i P_i t_0} \tag{3}$$

当在 n 次加工过程中压力与速度变化很小时,切削深度系数可简化为

$$k_p = \frac{D_n - D_0}{2\sum_{i=1}^{n} v_i P_i t_0} = \frac{D_n - D_0}{2n v_i P_i t_0} = \frac{D_n - D_0}{2n v_0 P_0 t_0} \tag{4}$$

由式(4)可知,在知道孔道某点处多次加工中的压强、速度大小,以及该点处加工初始与结束时的直径差,就可以求得该磨料的 Preston 参数 k_p。

1.3　Preston 方程 k_p 参数修正

软性磨料流微型锥孔光整成形中要实现对微孔锥度的控制,必须明确 Preston 方程中的 k_p 参数,由上文中提到的 k_{p} 参数测量公式:

$$k_p = \frac{D_n - D_0}{2n v_0 P_0 t_0} \tag{5}$$

式(5)中,D_n 为软性磨料流加工后微孔入口的直径,单位 m;D_0 为软性磨料流加工前微孔入口的直径,单位 m;n 表示磨料挤压次数;v_0 为软性磨料通过微孔近壁面处的磨粒速度,单位 m/s;P_0 为软性磨料中的磨粒对近壁面的压力,单位 Pa;t_0 为单击挤压时间,单位 s。

在实际加工中,软性磨料中磨粒对近壁面的压力 P_0 并不等于料缸中的压强 P,软性磨料通过微孔近壁面处的磨粒速度 v_0 也并不等于软性磨料通过微孔的平均速度 v,试验过程中只有料缸中的压强 P 和磨料通过微孔的平均速度 v 较容易得到,需要建立这两组压强与速度参数的关系,才能通过试验得到 k_p 的值。

通过对软性磨料流的微型锥孔加工数值分析可以发现:微孔近壁面入口处磨粒的速度为软性磨料流通过微孔时平均速度的 30% ~35%。在压强方面由于微孔的尺度效应,在微孔的轴线位置处的压强明显大于其他位置处的压强,在微孔的入口近壁面处压强近似等于料缸中软性磨料的压强,则有:

$$v_0 = (30\% \sim 35\%)\bar{v} \tag{6}$$

$$\bar{v} = \frac{Q}{5S_0} = \frac{Sv}{5S_0} = \frac{4.42\times10^{-3}\times\frac{n_N}{6}\times10^{-5}}{5\times3.14\times10^{-8}} = 4.68\times10^{-2} n_N \tag{7}$$

$$P_0 \approx P \tag{8}$$

式中,v_0 为软性磨料通过微孔近壁面处的磨粒速度;$\bar{v}$ 为软性磨料流通过微孔的平均速度;P_0 为软性磨料的磨粒对近壁面的压力;P 为料缸中的压强;Q 为总体流量;S 为活塞截面积,实验所用的活塞缸直径 $D = 75$ mm;S_0 为微孔截面积,实验试件微孔的直径 $D = 0.2$ mm;v 为活塞的挤压速度;n_N 为伺服电动机的转速。

将式(6)、式(8)代入式(4)中,得到 k_{p} 参数的修正计算公式:

$$k_p = \frac{D_n - D_0}{2n v_0 P_0 t_0} = \frac{D_n - D_0}{2n(30\% \sim 35\%)\bar{v}Pt_0} = \frac{R_n - R_0}{n(30\% \sim 35\%)\bar{v}Pt_0} \tag{9}$$

式(9)即为 Preston 方程 k_p 参数的修正方程,式中的 R_0 与 R_n 为微孔磨料流加工前后入口半径。

1.4　k_p 参数的测定

将微孔的入口处作为微孔直径变化的测控点来测量 k_p 参数值,图(1)为测量设备 CSM—100 型电子扫描显微镜,通过 CSM—100 型电子扫描显微镜测试软性磨料流加工前后微孔入口轮廓直径,将测量结果代入式(8)中计算 k_p 参数。

表 1 为质量分数 25% 的软性磨料试验参数;表 2 为质量分数 30% 的软性磨料试验参数;表 3 为质量分数 35% 的软性磨料试验参数;表 4 为质量分数 40% 的软性磨料试验参数。图 2 ~ 图 5 分别为对应质量分数下软性磨料实验前后微孔入口半径的变化情况。

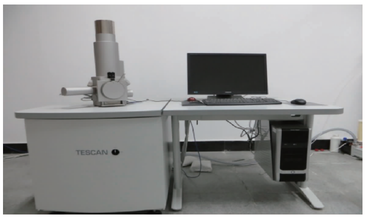


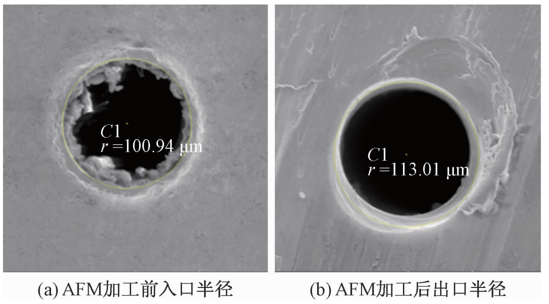
图 1 CSM—100 电子扫描显微镜

Fig. 1 CSM—100 electron scanning microscope

表 1 质量分数 25%的软性磨料试验参数

Table 1 Test parameters of soft abrasive with mass fraction of 25%

磨料质量分数	电动机转速/(r·min^{-1})	单次时间/s	次数	料缸挤压力/MPa
25%	240	62	10	3.0
AFM 加工前入口半径/10^{-6}m	AFM 加工后出口半径/10^{-6}m	半径变化量/10^{-6}m	室温/℃	黏度/(mm^2·s^{-1})
100.94	113.01	12.07	20	1.34



(a) AFM加工前入口半径 (b) AFM加工后出口半径

图 2 SEM 测试半径

Fig. 2 Radius tested by SEM

由式(7)可得

$$\bar{v} = 4.68 \times 10^{-2} n_N = 4.68 \times 10^{-2} \times 240 \text{ m/s} = 11.25 \text{ m/s}。$$

由式(9)得

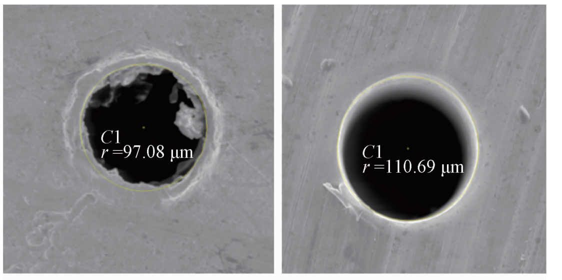
$$k_p = \frac{\Delta R}{n35\% \bar{v} P t_0} = \frac{12.07 \times 10^{-6}}{10 \times 0.35 \times 11.25 \times 3.0 \times 62} \text{MPa}^{-1} = 1.65 \times 10^{-9} \text{MPa}^{-1}。$$

得到质量分数为 25% 的软性磨料的 k_p 参数为 1.65×10^{-9} MPa^{-1}。

表 2 质量分数 30%的软性磨料试验参数

Table 2 Test parameters of soft abrasive with mass fraction of 30%

磨料质量分数	电动机转速/(r·min^{-1})	单次时间/s	次数	料缸挤压力/MPa
30%	226	48	10	3.0
AFM 加工前入口半径/10^{-6}m	AFM 加工后出口半径/10^{-6}m	半径变化量/10^{-6}m	室温/℃	黏度/(mm^2·s^{-1})
97.08	110.68	13.6	20	1.73



(a) AFM加工前入口半径 (b) AFM加工后出口半径

图 3 SEM 测试半径

Fig. 3 Radius tested by SEM

同理可得:

$$\bar{v} = 4.68 \times 10^{-2} n_N = 4.68 \times 10^{-2} \times 226 \text{ m/s} = 10.6 \text{ m/s};$$

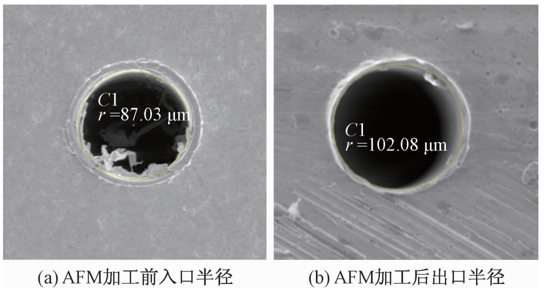
$$k_p = \frac{\Delta R}{n35\% \bar{v} P t_0} = \frac{13.6 \times 10^{-6}}{10 \times 0.35 \times 10.6 \times 3.0 \times 48} \text{ MPa}^{-1} = 2.55 \times 10^{-9} \text{ MPa}^{-1}。$$

得到质量分数为 30% 的软性磨料的 Preston 的 k_p 参数为 2.55×10^{-9} MPa^{-1}。

表 3 质量分数 35%的软性磨料试验参数

Table 3 Test parameters of soft abrasive with mass fraction of 35%

磨料质量分数	电动机转速/(r·min^{-1})	单次时间/s	次数	料缸挤压力/MPa
35%	215	42	10	3.0
AFM 加工前入口半径/10^{-6}m	AFM 加工后出口半径/10^{-6}m	半径变化量/10^{-6}m	室温/℃	黏度/(mm^2·s^{-1})
87.03	102.06	15.03	20	1.83



(a) AFM加工前入口半径 (b) AFM加工后出口半径

图 4 SEM 测试半径

Fig. 4 Radius tested by SEM

同理,由表 3 可得:

$$\bar{v} = 4.68 \times 10^{-2} n_N = 4.68 \times 10^{-2} \times 215 \text{ m/s} = 10.08 \text{ m/s};$$

$$k_p = \frac{\Delta R}{n35\% \bar{v} P t_0} = \frac{15.03 \times 10^{-6}}{10 \times 0.35 \times 10.8 \times 3.0 \times 42} \text{ MPa}^{-1} = 3.38 \times 10^{-9} \text{ MPa}^{-1}。$$

得到质量分数为 35% 的软性磨料的 Peston 方程的 k_p 参数为 $3.38 \times 10^{-9}\text{MPa}^{-1}$。

同理,由表 4 可得:

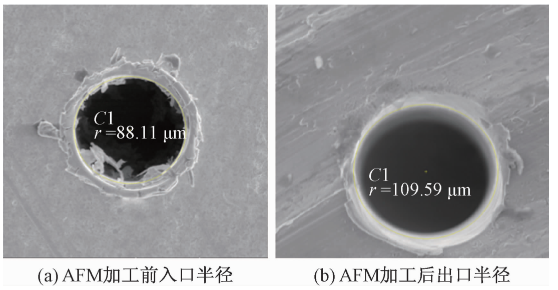
$$\bar{v} = 4.68 \times 10^{-2} n_N = 4.68 \times 10^{-2} \times 204\ \text{m/s} = 9.56\ \text{m/s};$$

$$k_p = \frac{\Delta R}{n35\% \bar{v} P t_0} = \frac{21.48 \times 10^{-6}}{10 \times 0.35 \times 9.56 \times 3.0 \times 48}\ \text{MPa}^{-1} = 4.46 \times 10^{-9}\ \text{MPa}^{-1}。$$

表 4　质量分数 40%的软性磨料试验参数

Table 4　Test parameters of soft abrasive with mass fraction of 40%

磨料质量分数	电动机转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	单次时间/s	次数	料缸挤压力/MPa
40%	204	48	10	3.0
AFM 加工前入口半径/10^{-6}m	AFM 加工后出口半径/10^{-6}m	半径变化量/10^{-6}m	室温/℃	黏度/($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
88.11	109.59	21.48	20	2.16



(a) AFM加工前入口半径　(b) AFM加工后出口半径

图 5　SEM 测试半径

Fig. 5　Radius tested by SEM

得到质量分数为 40% 的软性磨料的 Peston 方程的 k_p 参数为 $4.46 \times 10^{-9}\text{MPa}^{-1}$。不同质量分数下的 k_p 参数见表 5。由表 5 可以看出:随着磨料质量分数的提高,软性磨料 Peston 方程的 k_p 参数也随之不断增加,表现为对微孔表面的材料去除能力也越来越强。

表 5　不同质量分数下软性磨料的 k_p 参数表

Table 5　The k_p parameters of soft abrasive with different mass fraction

质量分数/%	25	30	35	40
k_p 参数/10^{-9}MPa^{-1}	1.65	2.55	3.38	4.46

2　结论

(1)通过试验确定软性固-液两相磨料流加工时 Preston 系数的计算公式与方法,修正了基于软性磨料流加工微孔的 Preston 方程的 k_p 参数公式,并对不同质量分数下的软性磨料流基于 Preston 方程的 k_p 参数进行了测定与计算。

(2)通过分析不同质量分数下的软性磨料流的 k_p 参数,得出:随着磨料质量分数的提高,软性磨料 Preston 方程的 k_p 参数也随之不断增加,表现为对微孔表面的材料去除能力也越来越强。随着磨料质量分数的提高,软性磨粒流的材料去除率越大。

参　考　文　献

1　李元宗, 闫慕良, 杨树国. 磨料流加工技术. 电子工艺技术,1987;(7):12—14 +35
Li Yuanzong, Yan Muliang, Yang Shuguo, Abrasive flow machining technology. Electronics Process Technology 1987;(7):12—14 +35

2　Rhoades L J. Abrasive flow machining. Nanostructures and Thin Films for Multifunctional Applications. Springer International Publishing, 2016:93—94

3　Li C, Ji S M, Tan D P. Softness abrasive flow method oriented to tiny scale mold structural surface. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012;61(9):975—987

4　计时鸣, 唐　波, 谭大鹏. 结构化表面软性磨粒流精密光整加工方法及其磨粒流动力学数值分析. 机械工程学报, 2010;46(15):178—184
Ji Shiming, Tang Bo, Tan Dapeng. Structured surface softness abrasive flow precision finish machining and its abrasive flow dynamic numerical analysis. Journal of Mechanical Engineering. 2010;46(15):178—184

5　孙树峰, 计时鸣, 谭大鹏. 低黏度液-固两相磨粒流湍流调控与结构化表面光整加工技术研究. 中国机械工程, 2011;22(19):2349—2353
Sun Shufeng, Ji Shiming, Tan Dapeng. Research on turbulence regulation of low viscosity liquid-solid two-phase abrasive flow and finishing technology of structural surfaces. China Mechanical Engineering. 2011;22(19):2349—2353

6　计时鸣,李　琛,谭大鹏. 基于 Preston 方程的软性磨粒流加工特性. 机械工程学报, 2011;47(17):156—163
Ji Shifeng, Li Chen, Tan Dapeng. Study on machinability of softness abrasive flow based on preston equation. Journal of Mechanical Engineering. 2011;47(17):156—163

7　李俊烨. 微小孔磨粒流抛光装置的研制与工艺研究. 长春:长春理工大学, 2011
Li Junye. Tiny hole of abrasive flow polishing device development and process research. Changchun: Changchun University of Technology. 2011

8　Preston F W, Glass technology. Journal of the Society of Glass technology, 1927;(11):277—281

Modification and Determination of the Preston Equation k_p Parameter Based on Soft Abrasive Flow

WANG Pen-li, DONG Zhi-guo*, YA Gang, DUAN Ze-bin

(School of Meachanical Engineering, Precision Machining of Shanxi Province Key Laboratory, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

[**Abstract**] The fluid is filled with round hole in the workpiece, the piston is used to push the abrasive flow in the circular hole, and the piston is squeezed by one stroke for one cycle. The same workpiece with the same fluid abrasive cycle processing, the same point can test the diameter of the amount of change. And the change of the diameter of the measuring point is substituted into the modified k_p parameter formula of the Preston equation based on the soft abrasive stream. The soft abrasive stream under different mass fraction is measured based on the k_p parameter of the Preston equation and Calculation. By analyzing the k_p parameters of the soft abrasive flow under different mass fractions, it is concluded that the k_p parameter of the Preston equation of the soft abrasive increases with the increase of the abrasive mass fraction, which shows the material removal ability on the microporous surface more and more strong. With the increase of the abrasive mass fraction, the removal rate of the soft abrasive grain is larger.

[**Key words**] soft abrasive flow miniature taper hole Preston equation k_p parameters