

# 高粘弹性流体磨料光整加工的材料去除率模型

董志国, 轧刚, 李元宗

(太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 基于磨料流加工介质的高粘弹性, 在分析磨粒所受法向力和参与切削的磨粒数的基础上, 建立了高粘弹性流体磨料光整加工的材料去除率模型。定义了材料去除率模型的切削深度系数, 提出了一种用圆管工件测定切削深度系数的方法; 并用圆管试件测定了 I 号流体磨料加工 45<sup>#</sup> 钢、T8 钢和 Q235-A 材料时的切削深度系数。结果表明: 材料去除率与流体磨料对工件的壁面压力、壁滑速度和切削深度系数成正比关系; 决定切削深度系数的因素主要有磨粒的粒度、磨粒与载体的混合比和流体磨料的弹性及工件的硬度和表面粗糙度; 在流体磨料粘性较高、加工流量较大条件下, 可用流体磨料的过流长度和压力来测定切削深度系数。

**关键词:** 机械制造工艺与设备; 高粘弹性流体磨料; 材料去除率模型; 切削深度系数; 磨料流加工

**中图分类号:** TG580      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2013)12-1555-07

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.12.010

## Material Removal Rate Model of High Viscoelastic Fluid Abrasive Finishing

DONG Zhi-guo, YA Gang, LI Yuan-zong

(College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** Based on the high viscoelasticity nature of abrasive flow machining media and through the analysis of the normal forces and the number of cutting abrasive particles, a material removal rate model for finishing processing of high viscoelastic fluid abrasive is established. The definition and test method of cutting depth of material removal model is given. The tests of cutting depth coefficients of No I fluid abrasive for 45 steel, T8 steel and Q235-A material are determined by tubular specimen. The results show that the material removal rate is positive propotional to wall pressure, wall slip speed and the cutting-depth coefficient. The abrasive particle size, abrasive and carrier mixing ratio, the elasticity of the fluid abrasive, the hardness and surface roughness of the work-piece are the determinative factors influencing cutting depth coefficient. And the cutting depth coefficient can be measured by the length and pressure of fluid abrasive flowing on a work-piece surface under the conditions of relatively high viscosity and large flow capacity.

**Key words:** machinofature technique and equipment; high viscoelastic fluid abrasive; material removal rate model; cutting-depth coefficient; abrasive flow machining

## 0 引言

磨料流加工为一种微量切削的特种光整加工方

法, 可对小孔、窄缝、交叉孔道、异形曲面等几何形状复杂的表面和钛、钨合金及陶瓷等硬脆材料进行快速有效地光整加工<sup>[1-2]</sup>。与其他表面光整加工方法

收稿日期: 2012-09-07

基金项目: 山西省自然科学基金项目(2005-1051)

作者简介: 董志国(1975—), 男, 讲师。E-mail: dong\_zhiguo@126.com;

轧刚(1958—), 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: yagang1@163.com

相比,由于磨料流加工具有光整效率高、加工材料范围广且在抛光同时可完成去毛刺和倒圆角的独特优点,在航空航天、模具、纺织机械、液压元件、发动机等制造领域有着广泛应用<sup>[3]</sup>。

从磨料流加工技术出现以来,国内外学者对该技术的加工机理进行了大量研究。Jain 等<sup>[4-6]</sup>建立了可测定磨料流加工过程中单位体积能量消耗和加工面上切向力的模型,并通过此模型分别讨论了被加工工件硬度、法向压力、磨粒的平均粒度、推挤压力对单位体积能量消耗的影响;通过建立 BP 神经网络模型分析了磨料流加工中材料去除率和表面粗糙度的变化,并利用网络模型对加工参数进行了优化;还发现工件表面的材料去除率随流体磨料粘度的增加而增大。上述研究对磨料流加工时的材料去除率均进行了一定的试验观察,通过分析得出了一些定性结论,但未能较准确地描述磨料流加工中的材料去除特性。

本文对高粘弹性流体磨料加工时的材料去除率进行试验研究和分析。研究了磨料流加工中的材料去除量,反映了磨料流切削工件表面的真实过程,从而达到了控制磨料流加工的尺寸精度、提高光整加工的效果。

## 1 高粘弹性流体磨料

磨料流加工中,使用的高粘弹性流体磨料由高分子材料和磨粒均匀混合而成,将高分子材料称作磨粒的载体。由于载体具有较高的粘度和弹性,使得流体磨料也具有相同的特性,使用太原理工大学磨料流加工中心研制的 VLFA-I 型载体进行测试,由 Rheostress RS-75 转子流变仪测得的不同剪切速率下载体表现粘度随温度变化曲线如图 1 所示。

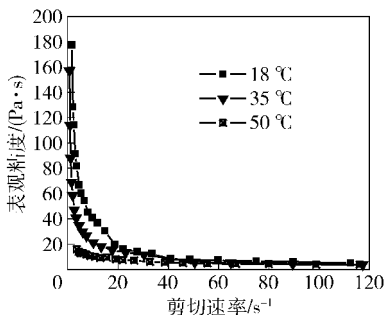


图 1 不同温度下载体的表现粘度随剪切率的变化曲线

Fig. 1 The apparent viscosity of the carrier vs. different shear rates at different temperatures

由图 1 可看出,剪切速率为 0 或很小时载体具有较高的粘度且粘度随剪切速率的增大、温度的升高而降低。与磨粒混合成流体磨料后,其表现粘度会变得更大。

流体磨料在流动过程中,会有挤出胀大效应和出口压力不为 0 的特性,表明流体磨料具有弹性。选用 VLFA-I 型载体,以与磨粒均为 1:1 的质量混合比配制 3 种流体磨料: I 号流体磨料的磨粒为 80 目, II 号流体磨料的磨粒为 100 目, III 号流体磨料的磨粒为 120 目。根据 Han 等<sup>[7]</sup>利用出口压力测流体法向应力差公式,通过圆管测试装置测量试件出口压力得到的 3 种不同流体磨料的第一法向应力差随剪切应力的变化曲线如图 2 所示。

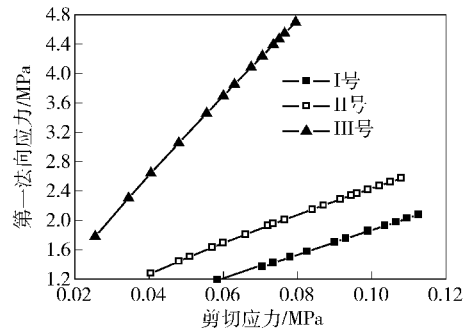


图 2 不同流体磨料的第一法向应力差

Fig. 2 The first normal-stress differences of different fluid abrasives

由图 2 可知:流体磨料具有较高弹性。剪切应力越大,第一法向应力差越大,弹性越高;对相同载体和载体与磨粒的质量混合比的流体磨料,随磨粒粒度  $d_p$  的减小流体磨料的弹性在增大。

## 2 磨粒的法向力及参与切削的磨粒数

### 2.1 磨粒的法向受力分析

取流体磨料中与工件壁面接触的单颗磨粒为研究对象,其所受的法向力如图 3 所示。

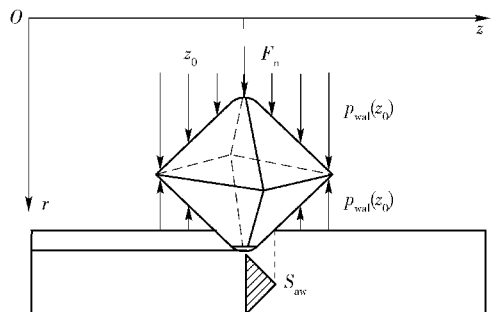


图 3 磨粒所受的法向力

Fig. 3 The normal force acting on abrasive particle

磨粒在竖直方向上受到载体法向力作用,切削过程中磨粒与工件的接触面积为  $S_{aw}$ 。由于流体磨料具有弹性,在与流体流动方向垂直的平面上法向应力并不相等<sup>[8]</sup>,而壁面处的法向应力等于  $z_0$  处压力传感器的表压。令壁面处载体的平均法向应力为  $p_{wal}$ 。

对任意单颗磨粒在竖直方向上受的正压力为

$$F_n = c_n \cdot p_{wal}(z_0) \cdot S_{aw}, \quad (1)$$

式中:  $c_n$  为考虑流体磨料弹性和磨粒形状系数;  $p_{wal}(z_0)$  为壁面处  $z_0$  点载体的平均法向应力 (MPa);  $S_{aw}$  为磨粒与工件接触区的面积 ( $\text{mm}^2$ )。

## 2.2 流体磨料中参与切削的平均磨粒数

磨粒在载体中的分布如图 4 所示。

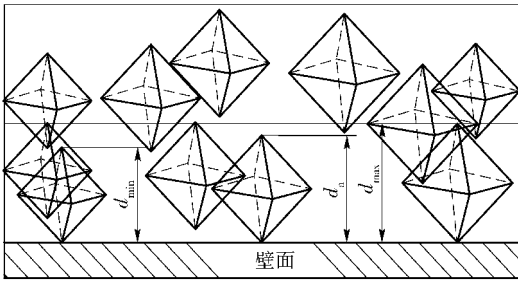


图 4 磨粒在载体中的分布图

Fig. 4 The distribution of abrasives in the carrier

假设磨粒在载体中均匀混合。磨粒在载体中均匀分布;磨粒的粒径互不相同,服从正态分布。单位面积上、 $d_{max}$  高的体积内,流体磨料所含的磨粒数

$$N_0 = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{\psi_a}{1 + \psi_a} \cdot \frac{\rho_{fa}}{\rho_a} \cdot \frac{d_{max}}{d_a^3}, \quad (2)$$

式中:  $d_a$  为磨粒平均直径 (mm);  $d_{max}$  为磨粒最大直径 (mm);  $\rho_{fa}$  为流体磨料密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\rho_a$  为磨粒密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

由于磨粒的粒径和磨粒在流动中的中心位置均为概率分布,因而在流体磨料加工过程中参与切削的磨粒数与工件表面边流层内的磨粒数并不相等。与工件接触的磨粒位于工件表面以内高  $d_{max}$  流体层内。工件表面单位面积内颗粒只有部分参与了切削。

令参与切削的磨粒比为  $k_a$ , 则参与切削的磨粒个数

$$N_a = k_a N_0, \quad (3)$$

式中:  $k_a$  为与磨粒粒径和分布相关的概率函数,始终有  $k_a < 1$ 。

## 3 流体磨料加工的材料去除率模型

### 3.1 单颗磨粒的材料去除量

若磨粒受到的法向和切向力足够大,工件表层则出现塑性变形产生耕犁或切削。在塑性变形区,由 Holm、Burwell 先后论证的粘着磨损模型和 Halling 的滑动磨损模型可知<sup>[9]</sup>,磨粒在微切削状态下的作用机理相同,切削中的体积磨损量  $W_v$  满足

$$W_v = K \cdot \frac{F_n}{H_w} \cdot l, \quad (4)$$

式中:  $K$  为与工件表面粗糙度凸峰的大小、分布情况及磨粒大小有关的系数;  $H_w$  为工件的表面硬度 (MPa);  $l$  为磨粒的切削路程 (mm)。

### 3.2 单位接触长度上的材料去除深度

单位接触长度上的材料去除深度  $d_{lm}$  定义为磨具与工件在单位接触长度上工件表面的材料去除深度也称为线性去除度。如图 5 所示工件表面的流体磨料边流层取一流体磨料微元体  $dx dy dz$ , 流体磨料宽  $dx$ 、长  $dz$ 。

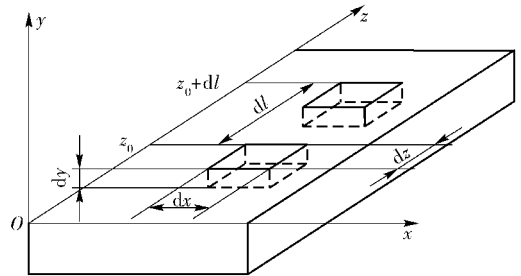


图 5 磨料流加工的材料去除示意图

Fig. 5 Schematic diagram of material removal in AFM

加工时,磨粒切削深度不等于在工件表面竖直压入时的切入深度,切削深度要小于压入时的切入深度<sup>[10]</sup>。且由于切削时参与切削磨粒数非常大,故不能简单地用单颗磨粒切入深度来表示切削时磨粒去除深度。但大量磨粒参与切削时,切削深度会有一个统计意义上的均值。故在图 5 模型中,可取  $dy$  为流体磨料切削深度,则由 (3) 式在微元体面积  $dx dz$  内参与切削的磨粒数  $dx dz N_a$ 。流体磨料微元体在工件表面由  $z_0$  流到  $z_0 + dl$  时,流过长度为  $dl$ 。在工件微长  $dl$  内,流体磨料微元中磨粒受到的法向压力  $F_n$  为一定值,则由 (4) 式可得流体磨料微元体对工件的材料去除量

$$W_{dv} = dx dz N_a \cdot K \cdot \frac{F_n}{H_w} \cdot dl. \quad (5)$$

在切削的过程中,微元体内材料不可能被全部

去除,仅与磨粒相接触区域被加工掉,在微元体表面留下粗糙不平的凸起。微元体中磨粒数量越多,被去除的材料越多,反之则越少。对同一粒径的流体磨料,材料去除量与磨粒质量混合比有关。单位体积内的材料去除系数

$$K_v = \frac{W_{dv}}{dx dy dl} \quad (6)$$

则(5)式可写为

$$W_{dv} = dx dy dl \cdot K_v \quad (7)$$

由(5)式和(7)式可得在实际的切削过程中长  $dz$  的流体磨料对长  $dl$  的工件表面切削深度,即线性去除度

$$d_{lin} = \frac{dy}{dz} = N_a \cdot \frac{K}{K_v} \cdot \frac{F_n}{H_w} \quad (8)$$

由(8)式可看出,  $d_{lin}$  的大小与所取的过流长度  $dl$  和接触宽度  $dx$  无关,而与切削点处的正压力  $F_n$ 、参与切削的磨粒数成正比,与工件表面切削点处硬度成反比。在磨料流加工中,  $d_{lin}$  的意义为流过工件表面同一点时,过流流体磨料中单位长度流体磨料对工件的去除深度。

### 3.3 单位时间内的材料去除深度

单位时间内工件表面的材料去除深度  $d_{tim}$  是指在切削的方向上,单位时间内工件表面的材料去除深度。设在切削过程中,流体磨料与工件表面的相对滑动速度为  $v_{rel}$ ,长  $dz$  的磨料流过工件表面时间为  $dt$ ,则有

$$dz = v_{rel} dt, \quad (9)$$

则由(8)式可得

$$d_{tim} = \frac{dy}{dt} = \frac{K}{K_v} \cdot \frac{N_a F_n}{H_w} \cdot v_{rel} \quad (10)$$

可知在流体磨料的切削过程中,对工件表面上的一点,单位时间内的材料去除深度与该点处的法向压力成正比,与该点处流体磨料的流速成正比。

由(8)式和(10)式可得,  $d_{tim}$  与  $d_{lin}$  的关系为

$$d_{tim} = d_{lin} \cdot v_{rel} \quad (11)$$

令  $p$  为微元体  $dx dz$  中磨粒所受的法向压力,由(1)式可得  $F_n = c_n p S_{aw}$ ,则(10)式可简化为

$$d_{tim} = \frac{KN_a c_n S_{aw}}{K_v H_w} \cdot p v_{rel} \quad (12)$$

令  $K_{tot}$  为相对速度和压强以外所有因素的作用的相关因素,则(10)式可进一步简化为

$$d_{tim} = K_{tot} v p \quad (13)$$

(13)式即为著名的 Preston 模型<sup>[11]</sup>。在表面光整加工中 Preston 模型有着广泛应用,目前光整加工中所

用大多数材料去除模型均建立在 Preston 模型基础上。

### 3.4 高粘弹性流体磨料加工的切削深度系数

为简化计算,将与工件和流体磨料相关的因素全部归结起来,定义为流体磨料加工的切削深度系数

$$K_d = \frac{K_a N_a c_n S_{aw}}{K_v H_w} \quad (14)$$

可知  $K_d$  的影响因素为:

1) 流体磨料的影响因素。包括磨粒的粒度、磨粒与载体的混合比和流体磨料的弹性;

2) 工件的影响因素。包括工件的硬度和工件的表面粗糙度。

将  $N_a$ 、 $H_w$ 、 $c_n$  和  $S_{aw}$  也归到  $K_d$  中,只要通过所用的流体磨料和工件进行试验即可测定  $K_d$ 。

令  $p_{wal}$  为材料去除处的壁面压力,则(8)式、(12)式可分别写为

$$d_{lin} = K_d \cdot p_{wal}, \quad (15)$$

$$d_{tim} = K_d \cdot p_{wal} \cdot v_{rel}, \quad (16)$$

即为高粘弹性流体磨料光整加工的材料去除率模型。

## 4 切削深度系数的测定方法

### 4.1 磨料流加工中单个加工循环的材料去除率

磨料流加工中,对工件的加工一般按循环次数进行。一个循环又分为上推和下推 2 个行程。对单个行程,令料缸中流体磨料的有效切削体积(可全部挤到流道中的体积)为  $Q_T$ 。

如图 6 所示圆管的磨料流加工示意图。

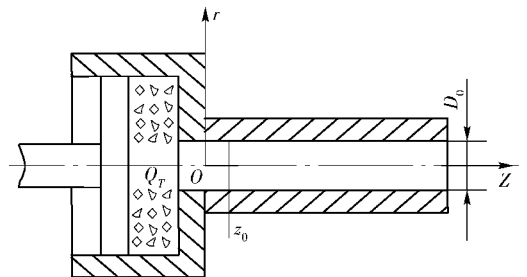


图 6 圆管的磨料流加工示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the pipe in AFM

在工件中  $z_0$  点处的流体磨料过流截面(等于流道的截面面积)  $A_z$  上,定义流体磨料的过流长度为  $L_{fa}$ ,即流过工件上一点的流体磨料的长度。高粘弹性流体磨料加工中,在流体磨料的粘度保持在非常高的值、用较大流量加工时,壁滑速度约等于流体磨

料平均流速,此时流体磨料相当于一个表面布满磨粒珩磨条一样,在流动区域每个地方都可实现对工件的切削加工<sup>[12]</sup>。此时,过流长度

$$L_{fa} = \frac{Q_T}{A_z} - z_0 \quad (17)$$

在圆管的加工中,令流体磨料加工前圆管的 $z_0$ 点处的直径为 $D_0$ ,则单行程加工后 $z_0$ 点处的直径为 $D_1$ ,则由(15)式该点处的直径变化量

$$D_1 - D_0 = 2K_d p_w(z_0) L_{fa} \quad (18)$$

#### 4.2 基于圆管工件的切削深度系数测定方法

如图 6 所示,取工件上任一点 $z_0$ ,由(17)式可求得 $L_{fa}$ 。用压力传感器测定加工过程中该点处的压力 $p$ ,同时测量加工点 $z_0$ 处加工前后的直径 $D_0$ 和 $D$ 。测定时将流体磨料加工中的一个循环分为上推和下推 2 次不同加工过程。因此,若有 2 个循环即有 4 个加工过程,依次类推。对同一工件用同种流体磨料加工时每一个加工过程,第 $i$ ( $i=1,2,\dots,n$ )个加工行程中

$$D_i - D_{i-1} = K_d \cdot 2p_i \cdot L_{fa_i} \quad (19)$$

经 $n$ 次加工后,加工点 $z_0$ 处的直径变化量

$$D_n - D_0 = 2K_d \cdot \sum_{i=1}^n p_i \cdot L_{fa_i} \quad (20)$$

从而可得

$$K_d = (D_n - D_0) / \left( 2 \cdot \sum_{i=1}^n p_i \cdot L_{fa_i} \right) \quad (21)$$

用(21)式测 $K_d$ 时,在流体磨料的流量较大、平均流速接近壁滑速度时,无需测定流体磨料壁滑速度。

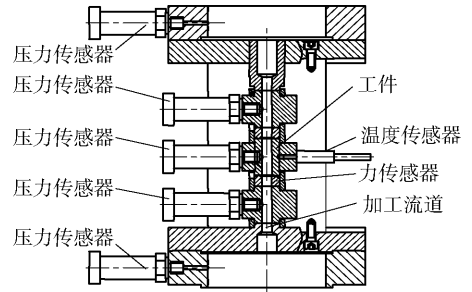
### 5 高粘弹性流体磨料的光整加工试验

#### 5.1 试验平台

如图 7 所示太原理工大学磨料流加工中心提供的高粘弹性流体磨料对圆管工件进行加工试验的试验装置。

将装置安装在 MB9211 磨料流机床上进行加工试验。流道长 $L=150$  mm,直径 $D_1=10$  mm。工件夹在流道的中部,用压力传感器测量流道中的压力变化,用热电偶监测测试过程中流体磨料温度的变化。试验时,选用工件的入口和出口作为 2 个测点对孔径和压力的变化进行测定。

为分析流体磨料对不同材料工件加工时的材料去除量,在 MB9211 机床上用 VLFA-I 型载体与 80 目磨粒为 1:1 的质量混合比配制的 I 号流体磨料对 3 种材料 T8 钢、45 钢、Q235-A 制成的圆管工件 1、



(a) 机械结构图

(a) Mechanical structure



(b) 实物图

(b) Physical photo

图 7 切削深度系数测试装置

Fig. 7 The test equipment for cutting-depth coefficients

工件 2 和工件 3 进行切削试验。加工时,为保证壁滑速度与流体平均流速相接近将温度控制在 $35$  °C 以内,对每种工件加工 4 次。因单个加工过程中,工件的孔径变化量较小、不易测量,故每次进行 3 个循环的加工,用游标卡尺测量孔径的变化量。流体磨料和机床的试验参数如表 1 所示。

表 1 试验参数

Tab. 1 Test parameters

I 号流体磨料参数(25 °C)			机床加工参数	
粘稠度系数	流动指数	第一法向应力差因素	入口压力/MPa	流量/(mm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
13 527	0.368 2	47.25	12	38 584

#### 5.2 试验结果及分析

##### 5.2.1 试验结果

工件 1 ~ 工件 3 加工过程中的孔径变化如图 8 ~ 图 10 所示。

可知,随加工次数的增加各工件的孔径均经切削变大。4 次加工后,工件 1 孔径变化量约 0.10 mm,工件 2 孔径变化量约 0.20 mm,工件 3 孔径变化量约 0.13 mm。如表 2 ~ 表 4 所示 3 个工件加工过程中测点处的参数变化。

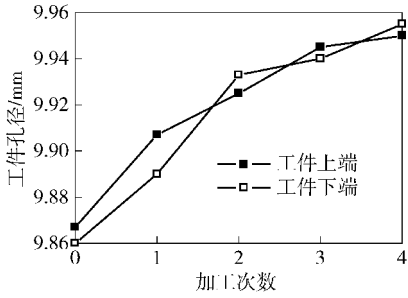


图 8 工件 1 的孔径变化

Fig. 8 The hole diameter changes of No 1 work-piece

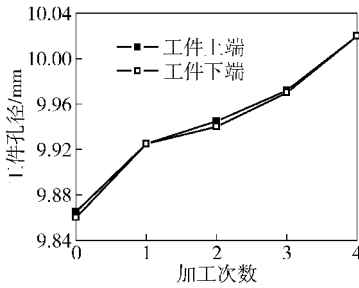


图 9 工件 2 的孔径变化

Fig. 9 The hole diameter changes of No 2 work-piece

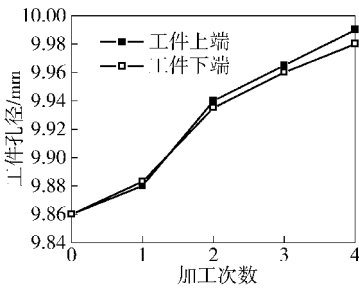


图 10 工件 3 的孔径变化

Fig. 10 The hole diameter changes of No 3 work-piece

5.2.2 切削深度系数的测定

由以上试验数据,用(21)式分别求得用 I 号流体磨料加工 3 种工件时的切削深度系数  $K_d$  分别如表 5 ~ 表 7 所示。

表 2 工件 1 测点处的参数

Tab.2 The parameters of No 1 work-piece at measuring points

参数	加工次数			
	1	2	3	4
$\Delta D_1/\text{mm}$	0.040	0.018	0.020	0.005
$\Delta D_2/\text{mm}$	0.030	0.043	0.007	0.015
$\Sigma p_1 \cdot L_{fa1}/(\text{MPa} \cdot \text{mm})$	318 628.8	301 266.3	335 992.0	300 606.6
$\Sigma p_2 \cdot L_{fa2}/(\text{MPa} \cdot \text{mm})$	333 939.7	306 479.7	347 871.4	303 640.9

表 3 工件 2 测点处的参数

Tab.3 The parameters of No 2 work-piece at measuring points

参数	加工次数			
	1	2	3	4
$\Delta D_1/\text{mm}$	0.060	0.020	0.027	0.048
$\Delta D_2/\text{mm}$	0.065	0.015	0.030	0.050
$\Sigma p_1 \cdot L_{fa1}/(\text{MPa} \cdot \text{mm})$	385 040.3	394 648.3	426 211.4	328 672.9
$\Sigma p_2 \cdot L_{fa2}/(\text{MPa} \cdot \text{mm})$	399 619.0	403 292.1	424 801.9	324 554.4

表 4 工件 3 测点处的参数

Tab.4 The parameters of No 3 work-piece at measuring points

参数	加工次数			
	1	2	3	4
$\Delta D_1/\text{mm}$	0.02	0.06	0.025	0.025
$\Delta D_2/\text{mm}$	0.023	0.052	0.025	0.02
$\Sigma p_1 \cdot L_{fa1}/(\text{MPa} \cdot \text{mm})$	290 871.4	256 295.6	270 750.5	240 538.0
$\Sigma p_2 \cdot L_{fa2}/(\text{MPa} \cdot \text{mm})$	296 763.4	269 756.9	277 768.9	251 124.8

表 5 工件 1 的切削深度系数

Tab.5 The cutting depth coefficients of No 1 work-piece

系数	加工次数			
	1	2	3	4
测点 1 $K_d/10^{-8} \text{MPa}^{-1}$	6.276 9	2.987 4	2.976 3	0.831 7
测点 2 $K_d/10^{-8} \text{MPa}^{-1}$	4.491 8	7.015 2	1.006 1	2.470 0
平均值 $K_d/10^{-8} \text{MPa}^{-1}$	3.506 9			

表 6 工件 2 的切削深度系数

Tab.6 The cutting depth coefficients of No 2 work-piece

系数	加工次数			
	1	2	3	4
测点 1 $K_d/10^{-8} \text{MPa}^{-1}$	7.791 4	2.533 9	3.167 4	7.302 1
测点 2 $K_d/10^{-8} \text{MPa}^{-1}$	8.132 8	1.859 7	3.531 1	7.702 9
平均值 $K_d/10^{-8} \text{MPa}^{-1}$	5.252 7			

表 7 工件 3 的切削深度系数

Tab.7 The cutting depth coefficients of No 3 work-piece

系数	加工次数			
	1	2	3	4
测点 1 $K_d/10^{-8} \text{MPa}^{-1}$	3.438 0	11.705	4.616 8	5.196 7
测点 2 $K_d/10^{-8} \text{MPa}^{-1}$	3.875 1	9.638 3	4.500 1	3.982 1
平均值 $K_d/10^{-8} \text{MPa}^{-1}$	5.869 0			

由表中数据可知,对同一个工件用相同的方法

加工时,测点处  $K_d$  值变化范围较大,主要是由于材料的硬度分布不均匀以及孔径的测量精度不高造成的。但随着测量次数的增大,其统计平均值能够反映磨料切削工件的难易程度。3种试验材料中,T8钢硬度最大,45#钢次之,Q235-A硬度最小,但与45#钢较接近。由求得的  $K_d$  值可看出,随着工件硬度的增加, $K_d$  值在减小,说明材料的去除量越少,这种材料的工件越难加工。

## 6 结论

1) 材料去除率与磨料流的主要加工参数压力和流体磨料与工件表面的相对流速成正比变化关系,增加加工压力和壁滑速度可提高加工时的材料去除率。

2) 切削深度系数是影响材料去除率的关键因素,由流体磨料和工件的特性共同决定,主要取决于磨粒的粒度、磨粒与载体的混合比和流体磨料的弹性及工件的硬度和表面粗糙度。

3) 切削深度系数可通过圆管试件进行测定,在保持流体磨料具有较高粘弹性和较大加工流量条件下,用流体磨料的过流长度和压力来确定。

## 参考文献 (References)

- [1] Rhoades L. Abrasive flow machining: a case study[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1991, 28(1): 107 - 116.
- [2] Loveless T R, Williams R E, Rajurkar K P. A study of the effects of abrasive - flow finishing on various machined surfaces [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, 47(1): 133 - 151.
- [3] 武利生,李元宗. 磨料流加工研究进展[J]. *金刚石与磨料磨具*

工程,2005,(1):69 - 74.

WU Li-sheng, LI Yuan-zong. Progress of abrasive flow machining [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2005, (1): 69 - 74. (in Chinese)

- [4] Jain R K, Jain V K. Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(12): 1689 - 1704.
- [5] Jain R K, Jain V K, Kalra P K. Modeling of abrasive flow machining process: a neural network approach [J]. *Wear*, 1999, 231(2): 242 - 248.
- [6] Jain V K, Ranganatha C, Muralidhar K. Evaluation of rheological properties of medium for AFM process [J]. *Machining Science and Technology*, 2001, 5(2): 151 - 170.
- [7] Han C D, Kim K U, Siskovic N, et al. An appraisal of rheological models as applied to polymer melt flow [J]. *Rheologica Acta*, 1975, 14(6): 533 - 549.
- [8] Haan J J, Steif P S. Abrasive wear due to the slow flow of a concentrated suspension [J]. *Wear*, 1998, 219(2): 177 - 183.
- [9] 哈比希, Habig K H, 严立, 等. 材料的磨损与硬度 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- HA Bi-xi, Habing K H, YAN Li, et al. *Wear and hardness of material* [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. (in Chinese)
- [10] Atkins A G, Liu J H. Toughness and the transition between cutting and rubbing in abrasive contacts [J]. *Wear*, 2007, 262(1): 146 - 159.
- [11] Preston F W. Glass technology [J]. *Journal of the Society of Glass Technology*, 1927, (11): 277 - 281.
- [12] 董志国, 轧刚, 宋桂珍, 等. 磨料流加工中磨料黏弹性对磨削效果的影响分析 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2010, (6): 82 - 85.
- DONG Zhi-guo, YA Gang, SONG Gui-zhen, et al. Influence of viscoelasticity on grinding effect in abrasive flow machining [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2010, (6): 82 - 85. (in Chinese)