

文章编号 1004-924X(2014)12-3324-08

磨粒流精密光整加工的微切削机理

丁金福*, 刘润之, 张克华, 鄂世举
(浙江师范大学 工学院 浙江 金华 321004)

摘要: 利用磨粒流的流变特性, 通过对应力张量的分析, 研究了磨粒流加工中的微切削力。提出了磨粒流加工是兼挤压与微去除方式为一体的复合加工, 微切削动力主要来自于磨粒挤压力、磨粒的犁削力及磨料介质的剪切力。建立了磨粒流动力学模型, 通过改变磨粒流流道的加工条件和测试加工过程的接触区压力、去除量及表面粗糙度等参数, 用量化的方式揭示了磨粒流加工中抽象微切削力的变化规律。最后, 结合 COMSOL Multiphysics 软件的 CFD 模块数值仿真了剪切力。结果显示: 基于加模芯的方法有效地提高了磨粒流加工的微切削力, 滑块 4 经 15 次循环后表面粗糙度由加工前的 $2.918 \mu\text{m}$ 下降为 $1.027 \mu\text{m}$, 而去除量下降了 0.09 g 。实验表明, 磨粒流加工中去除量确有变化, 但随着加工次数增加去除作用迅速削弱, 而表面粗糙度在挤压力的作用下仍有所降低。

关键词: 磨粒流; 精密加工; 去除机理; 应力张量; 挤压; 微切削力

中图分类号: TG669; TH161 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3324

Micro cutting mechanism of abrasive flow precision machining

DING Jin-fu*, LIU Run-zhi, ZHANG Ke-hua, E Shi-ju

(Institute of Precision Machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

* Corresponding author, E-mail: zsdif@zjnu.cn

Abstract: On the basis of rheological behaviors of abrasive flow, the stress tensor was analyzed to explore the micro-cutting force of the Abrasive Flow Machining (AFW) process. It points out that the abrasive flow precision machining is a combined machining method made by extrusion and micro-removal, and the micro-cutting force of the AFW is come from a combination of medium share force, squeezing force and plowing force. The dynamics model was established and general change law of the micro-cutting force in AFW processing were revealed quantitatively by changing processing conditions and processing parameters, such as the pressure of contact region, removal amounts and surface roughness. Finally, the shear force was simulated numerically by using the CFD module of COMSOL multiphysics software. The experiment results show that the mold core is conducive to increasing the micro-cutting force, the surface roughness R_a of the solider (number four) has decreased from $2.918 \mu\text{m}$ to $1.027 \mu\text{m}$ and the removal is 0.09 g after 15 processing cycles. The results demonstrate that the removal is changed in the abrasive flow machining process, however, the removal action is quick

收稿日期: 2014-04-10; 修订日期: 2014-05-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51005216); 浙江省自然科学基金资助项目 (No. Y1110934); 浙江省科技厅公益项目 (No. 2011C21037)

weakened with the increase of the times of extrusion and the surface roughness is still improved.

Key words: abrasive flow; precision machining; cutting mechanism; stress tensor; extrusion processing; micro removal

1 引言

在机械加工领域中精密光整加工方法很多,除传统的机械方法外,还有超声波抛光、化学抛光、电化学抛光及电化学机械复合加工等^[1-2]。磨粒流加工作为迅速发展起来的精密光整加工方法之一,已在航空军工、纺织机械、汽轮机、模具及液压等机械行业中得到了广泛应用^[3-4]。磨粒流为含磨粒的黏稠性磨料,适宜内腔加工,因其无固定形态决定了加工机理的复杂性。目前,国内外学者主要从磨粒流的黏度、工作压力、磨粒等因素对磨粒流的加工方法进行研究。M. Ravi 等认为磨粒流的切削力、磨料介质的稠密度对加工工件表面粗糙度起决定性作用^[5]; Rhoades 等认为磨粒的切削效果取决于挤压压力、磨粒的尺寸、相对硬度和形状^[6]; Williams 等认为磨料介质黏度对金属去除量,表面粗糙度具有重要影响,挤压力对降低表面粗糙度有着较大影响^[7-9]。虽然这些研究对磨粒流的加工起到了重要作用,但都难以确切地表明磨粒流的加工本质,主要是未很好地从磨粒流内在动力因素研究其加工实质是挤压方式还是微去除的加工方式以及去除量如何变化等问题。基于上述原因,本文从内力的角度,通过对磨粒流加工表面微元体的应力分析和整个加工区的受力状况来探究其微切削内在动力因素。

本文运用流变学的原理及流体的幂律方程,研究了磨粒流加工中微元体的应力张量,将加工表面接触区域承受的压力与磨粒对接触区的挤压作用、磨料介质的剪切作用及磨粒产生的犁削作用相结合,采用模芯方法改变加工条件,用量化方法研究磨粒流加工中的微切削力、去除量及表面粗糙度之间的关系,找出了抽象化切削力变化的一般规律,为磨粒流加工提供了有益的参考。

2 磨粒流微切削动力分析

2.1 磨粒流加工原理

磨粒流是由高分子载体、磨粒和添加剂均匀

混合而成的一种黏性非牛顿流体。磨粒流的加工方法是上、下各有一组液压缸和磨料缸,在加工时利用内腔中半固态的磨料在上、下油缸的反复作用下,强迫其流经被加工表面,使被加工表面不断地受到含磨粒的磨粒流挤压作用,达到对各种型腔表面光整加工的目的^[10-11],如图 1 所示。

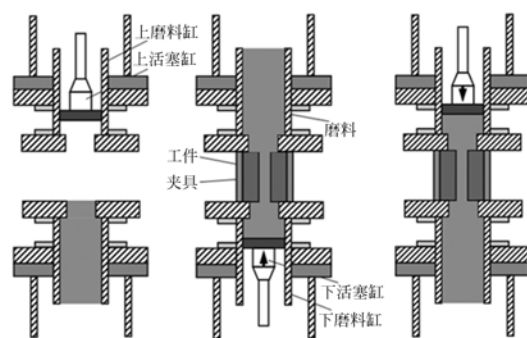


图 1 磨粒流加工原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of abrasive flow machining

首先,对磨粒流加工中流道内形成的剪切应力分布,用非牛顿流体的幂律方程进行描述。

层间的剪切速率及剪切应力分别为^[12]:

$$\gamma = -\frac{du}{dr}, \quad (1)$$

$$\tau = \mu \left[-\frac{du}{dr} \right]^n, \quad (2)$$

式中, τ 为剪切应力,单位为 Pa; μ 为流体稠度,单位 Pa·s; γ 为剪切速率,单位为 s^{-1} ; n 为流动指数, u 为流体在管道中任意半径处的流速。

2.2 磨粒流微切削动力建模

利用流变学理论进行分析,磨粒流加工中的流变特性主要由剪切应力和第一法向应力差体现^[13]。建立磨粒流的微元体动力模型如图 2 所示,沿 R 方向选取一个微元体,柱坐标 3 个方向应力张量的法向分量分别为 T_{11} 、 T_{22} 、 T_{33} ; T_{21} 为沿 Z 方向作用在面元 R 上的剪切分量。由此可得各方向上分量的表达式:

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} + \sigma_{ij}, \quad (3)$$

式中: p 为静压力; δ_{ij} 为单位张量; σ_{ij} 为作用于微

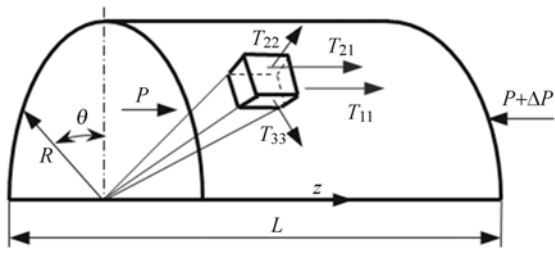


图 2 微元体应力张量

Fig. 2 Stress tensor of micro element

元体上的偏应力张量。则可得出：

$$T_{11} - T_{22} = \sigma_{11} - \sigma_{22} = N_1, \quad (4)$$

N_1 为第一法向力法差, 由 Tanner 公式可得：

$$N_1 = \sigma_{11} - \sigma_{22} = 2\tau_w [2(d_j/D)^6 - 2]^{1/2},$$

令： $k_1 = 2[2(d_j/D)^6 - 2]^{1/2}$, d_j 为挤出载体完全松弛后的直径, D 为圆管出口的直径, τ_w 为该微元壁面的剪切应力。对于管壁处的流体微元可得：

$$\begin{aligned} T_{22} &= T_{11} - k_1 \cdot \tau_w = -P - k_1 \cdot \tau_w, \\ p_w &= -T_{22} = p + k_1 \cdot \tau_w \end{aligned} \quad (5)$$

式中： p_w 为磨粒流在该微元体壁面的径向作用力(正压力)。由以上分析可知, 磨粒流加工的动力来自壁面的径向作用力与轴向作用力, 两方向的作用力均与该微单元的剪切应力密切相关。

3 磨粒流微切削机理

3.1 磨粒流微切削力分析

从应力张量分析可见, 磨粒流微切削的内在动力来自于径向力(正压力)与剪切应力。为此, 将加工过程中抽象化微切削力转化为加工表面承受的作用力, 即借助于加工表面的径向力与轴向力来衡量微切削力的大小, 如图 3 所示。

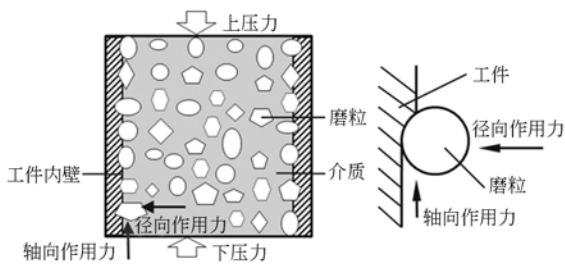


图 3 磨粒与工件内壁作用示意图

Fig. 3 Action schematic between abrasive and workpiece

由于磨粒占磨料质量的 40%~50%, 数量较大^[14]。因此, 磨粒流的微切削力是依靠紧贴于加工表面的磨粒实现传递。因此, 将磨粒视为球体, 微切削模型如图 4 所示。

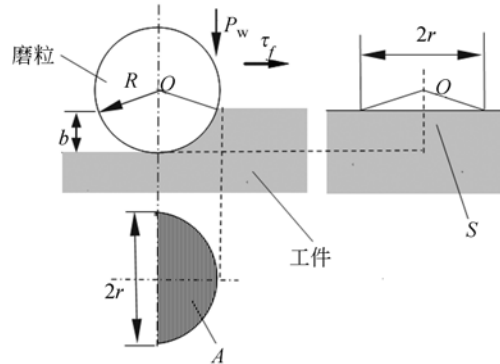


图 4 球形磨粒的微切削模型

Fig. 4 Micro cutting model of spherical grains

一方面, 依据 Bowden 理论^[13], 磨粒在巨大的正压力(径向力)作用下, 与加工表面的黏着和滑动交替, 在产生跃动过程中, 加工表面受压后产生塑性变形, 并在自变形的同时将突出波峰部分挤向前方的波谷内, 起到降低表面粗糙度的作用; 另一方面, 工件表面在正压力作用下, 磨粒的顶端产生了较大的接触应力, 使磨粒微凸部嵌入软表面形成犁削。假设磨粒嵌入工件表面深度为 b , 且滑动摩擦时只有球体前沿面与工件接触。于是可得犁削力 τ_p 及犁削因数 μ_p ^[15]：

$$\tau_p = S\sigma_p, \quad (6)$$

$$\mu_p = \frac{p_w}{\tau_p} = \frac{A}{S} = \frac{4r}{3\pi R}. \quad (7)$$

因此, 磨粒流的内在动力可归结为正压力起到挤压作用产生塑性变形与滑移; 轴向方向磨粒在较大的正压力作用下产生犁削, 同时还受磨料介质产生的剪切力在该方向的犁削与剪切, 两者共同起到微切削作用。接触区的微去除力可表示为：

$$\tau_t = \tau_p + \tau_w. \quad (8)$$

随着 r/R 值增大, μ_p 迅速增大, 球体压入表面越深, 犁削效果越明显。对磨粒流加工过程, 加工初期工件表面相对较粗糙, 表面波峰与波谷间差值大, 表明 r 值较大, 一方面在较大的正压力作用下挤压作用强, 加工表面产生塑性变形; 另一方面, r 值较大, 犁削因数高, 犁削及剪切作用明显, 去除量及表面粗糙度将迅速下降。加工次数增多

后,表面波峰与波谷间差值缩小, r 值变小,虽然磨粒流的剪切应力与犁削力都依然存在,但犁削及剪切作用弱,去除能力差,此时正压力仍起到挤压作用,表面粗糙度略有降低。

3.2 置入模芯的应力分析

为提高磨粒流的加工效率,除了采用增加推料缸的工作压力之外,也可采用模芯的方法来实现。依据流体力学理论,磨粒流在管道中形成的进出口压力降为:

$$\Delta p = \frac{R^2 u_m}{2L\mu}, \quad (9)$$

其中: u_m 为磨粒流的平均速度。

增设模芯后,依据流体在套管中的流体力学理论,设流道加工长度 L ,滑块加工处半径为 R , Δp 为滑块进出口的压力降, k 为模芯半径与流道半径比,置入模芯前、后在滑块的壁面剪切应力 τ 、 τ' 分别为^[12]:

$$\tau = \frac{\Delta p R}{L/2}, \quad (10)$$

$$\tau' = \frac{\Delta p' R}{L/2} \left[-1 + \frac{1-k^2}{2\ln(1/k)} \right]. \quad (11)$$

再依据式(9)置入模芯后滑块进出口压力降 $\Delta p'$ 为:

$$\Delta p' = \left[(1-k^4) - \frac{(1-k^2)^2}{\ln(1/k)} \right]^{-1} \Delta p. \quad (12)$$

经转换置入模芯后的壁剪切应力为:

$$\tau' = \tau \left[1 - \frac{1-k^2}{2\ln(1/k)} \right] \left[(1-k^4) - \frac{(1-k^2)^2}{\ln(1/k)} \right]^{-1}. \quad (13)$$

分别取 k 为0.4、0.5、0.6时,代入式(12)~(13),可得对应的 $\Delta p'$ 分别为4.89 Δp 、7.94 Δp 、14.58 Δp ,对应的 τ' 分别为2.65 τ 、3.64 τ 、4.03 τ 。由此可见,加芯后进出口的压力降及剪切应力均有增大,这为COMSOL软件数值模拟提供了依据。

4 剪切应力数值模拟

利用COMSOL Multiphysics软件的CFD模块来获取磨粒流的剪切率分布状况以及加工表面的剪切应力状况,分析加模芯前、后工件表面的剪切力变化。由于加工表面在微观上凹凸不平,加工过程存在一定的壁面滑移现象^[3]。为简化分析作如下假设:

(1) 因磨粒流是均匀调制的黏稠状流体,暂

不考虑受到磨料颗粒的影响,视其为单相流,且为不可压缩流体,并作稳定轴向层流流动;

(2) 不考虑黏性耗散和重力影响,不考虑末端效应^[12];

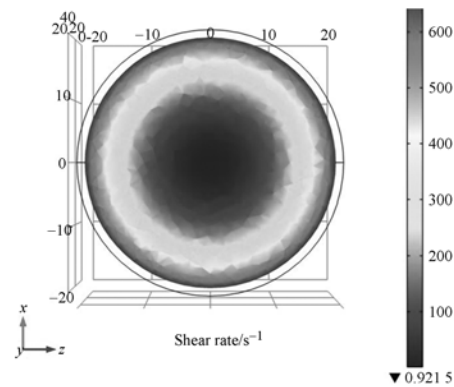
(3) 选择壁面滑移速度按磨粒流在无滑移时挤压速度的0.1系数进行取值。

依据磨粒流的配比,取流动指数 n 为0.3607。配制成的磨料介质工作参数如表1所示。

表1 磨料介质的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of abrasive media			
流体稠度 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	流动指数 n	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	粒径 (目)
1.57×10^4	0.3607	1841.8	20

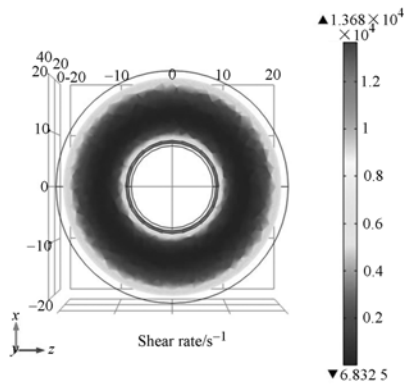
首先选择三维空间,再选择流体流动模块中单相流的层流子模块,并设定求解类型为稳态;其次在图形界面内选择类型流道的三维模型,设定层流模型为非牛顿幂律模型,依次输入磨料的稠度系数、密度及流动指数等参数。为体现加工过程中表面粗糙度的变化,边界条件取滑移速度系数0.1,再设置边界条件及物理参数设置,设定进口压力为流道入口处的压力,无模芯时的进口压力按0.8MPa输入,置入0.4、0.5、0.6 k 模芯后,分别按理论计算相应倍数,即分别为3.6、6.4、11.6MPa,出口压力均为大气压;最后,进行自由三角形画分网格后进行求解,分别获得相应状态下各流道的剪切速率分布,剪切率分布如图5所示。



(a) 无模芯流道的剪切率分布

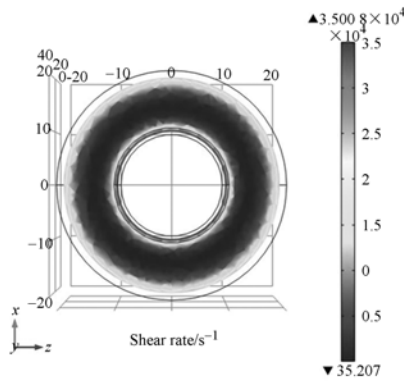
(a) Shear rate distribution of abrasive without mold core

由数值模拟可见,加模芯后剪切率明显高于无模芯时的剪切率,由幂律方程体现的剪切率与剪切



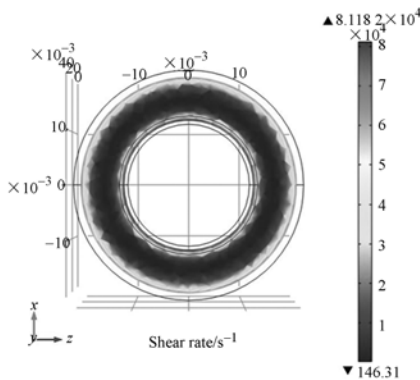
(b) $k=0.4$ 模芯流道的剪切率分布

(b) Shear rates of abrasive medium with mold core of $k=0.4$



(c) $k=0.5$ 模芯流道的剪切率分布

(c) Shear rates of abrasive medium with mold core of $k=0.5$



(d) $k=0.6$ 模芯流道的剪切率分布

(d) Shear rates of abrasive medium with mold core of $k=0.6$

图 5 流道的剪切率分布

Fig. 5 Shear rates of abrasive medium

应力关系表明了剪切应力呈增大趋势,这将有助于提高磨粒流的微切削动力,并为设计 T 型滑块测试压力实验方法奠定了理论基础。

5 实验测试

5.1 试验材料与设备

为测试壁面轴向力和径向力,设计了可微滑移的 T 型滑块装置,结构如图 6 所示,其中左边为直接挤压加工图,右侧为加模芯后的结构,磨粒流加工试验采用正火组织 45 钢,加工工件内孔为 $\varphi 40$ mm 的圆筒,工件长度为 50 mm,测试过程中,为了改变磨粒流在加工过程滑块的壁面压力变化,分别在圆筒内置入 $\varphi 16$ 、 $\varphi 20$ 和 $\varphi 24$ mm 的模芯,以测试磨粒流的挤压加工效果,在轴向及径向方向放置薄膜式压力传感器。

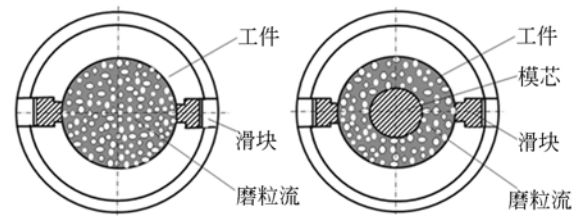


图 6 加工表面压力测试结构

Fig. 6 Wall pressure test structure

试验采用 20 目 SiC 磨粒调制的磨粒流,设定磨粒流加工过程油缸的工作压力为 10 MPa,工作行程为 120 mm,配制成的磨粒流工作参数与 CFD 模拟时相同。实验中采用单柱式磨粒流抛光机 AFD-100,并利用 JB-4C 精密粗糙度测试仪等仪器进行检测。

5.2 试验方法

将磨粒流的加工装置固定于机床工作台上,对滑块进行编号,分别以 1、2、3、4 # 表示直接挤压及置入 $\varphi 16$ 、 $\varphi 20$ 和 $\varphi 24$ mm 的模芯加工情况,把 2 条 Flexi force sensor A201-100bs 薄膜式压力传感器(感应直径 $\varphi 9.53$ mm)置于滑块的轴向与径向的合适位置,其中径向由调节螺钉进行调节,接入电导测量电路,再连接 NI PXI-1042Q 工控箱,组成信息采集系统,利用自编程序进行处理,分别测试出壁面所承受轴向和径向压力,测试方法如图 7 所示。

采用电导测量电路是利用压力传感器的压力与电导间对应关系,当 A201-100bs 传感器的敏感区受到的压力增大时其电阻值将降低,通过测

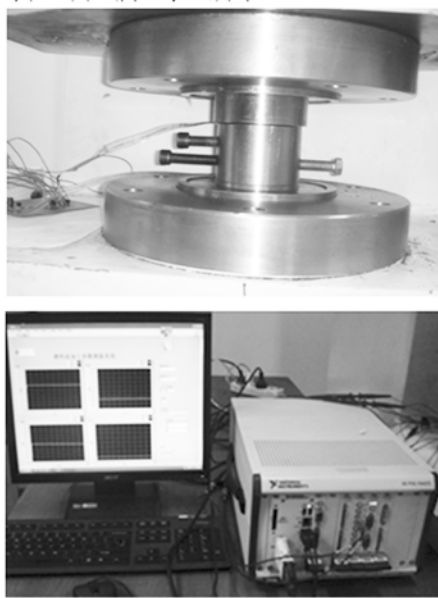


图 7 滑块的测试方法及信息处理系统

Fig. 7 Test Device and information processing system

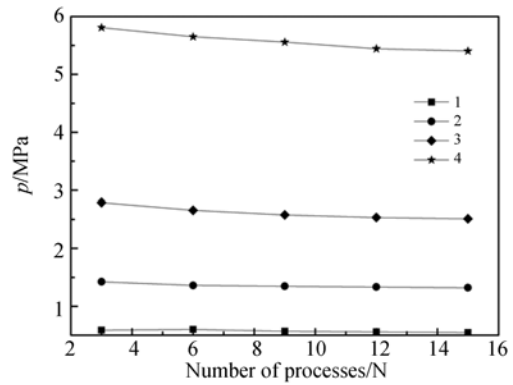
试压力传感器的电导转换成输出的压力曲线。采用 JB-4C 精密粗糙度测试仪测量各滑块的表面粗糙度,利用检测精度为 0.01 g 的 UTP-313 型电子台秤测量出相应条件下滑块的去除量。

5.3 结果分析

分别对 1~4 号进行试验加工,测量相应的轴向力与径向力,结果如图 8 所示。滑块 1、2、3、4 的平均轴向力分别为 0.569、1.55、3.11 和 5.57 MPa;滑块 1、2、3、4 的平均径向力分别为 17.01、30.80、55.24 和 73.91 MPa。实际测试滑块 2、3、4 的平均轴向力分别为滑块 1 的 2.72、5.47、9.8 倍;2、3、4 滑块的平均径向力分别为滑块 1 的 1.81、3.25 和 4.35 倍;由理论计算可得,2~4 滑块压力降比 1 的挤压分别提高了 4.89、7.94 和 14.59 倍,滑块壁面剪切应力分别提高了 2.64、3.64 和 5.45 倍。

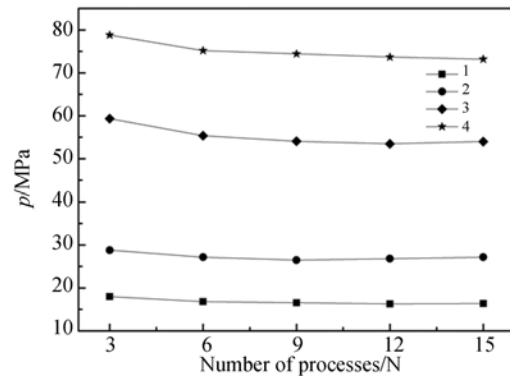
为进一步研究轴、径向力与加工表面质量之间的关系,同时测试相应滑块的去除量及表面粗糙度值,测试结果见图 9 及 10 所示。

由图 9 可知,经第 1 次测试,滑块 2、3、4 表面的去除量明显快于滑块 1,滑块 2、3、4 表面的粗糙度下降速度也快于滑块 1,且以滑块 4 的去除效率最高;在第 3 次测试后,对照图 9 和图 10,2、3、4 滑块经 9 次循环加工后,滑块已无去除量产生,而滑块表面粗糙度仍有所降低。



(a) 滑块轴向压力

(a) Axial force of slider



(b) 滑块径向压力

(b) Radial force of slider

图 8 滑块的轴向及径向力

Fig. 8 Axial and radial forces of slider

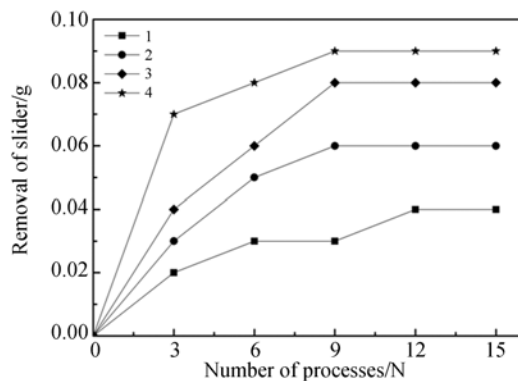


图 9 滑块加工过程的去除量

Fig. 9 Remove quantity of slider polishing

由图 8 可知,磨粒流加工中径向力远大于轴向力,这一结果与应力张量分析一致。由图 9 和图 10 也可证实,利用模芯后,去除量与表面粗糙度的下降明显;滑块 4 的去除量及表面粗糙度下

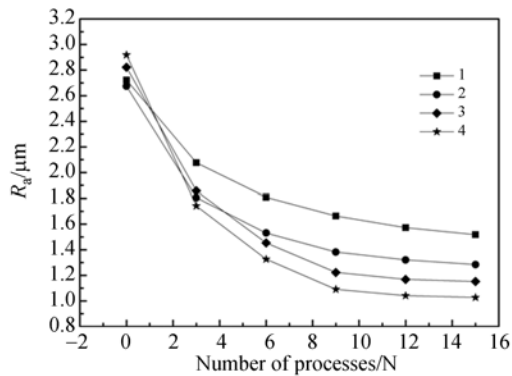


图 10 滑块加工中的表面粗糙度

Fig. 10 Surface rough of slider after polishing

降最快,表面粗糙度最低,经 15 次循环加工表面粗糙度由加工前的 $2.918 \mu\text{m}$ 下降到 $1.027 \mu\text{m}$,适当增大模芯有利于提高加工效率。

从磨粒流加工的过程来看,加工初期滑块表面相对粗糙,在较大径向力(正压力)作用下,挤压作用及微去作用明显,去除量下降快;随挤压次数增多,加工表面波峰与波谷的高度差迅速下降,虽然磨料介质的剪切力仍然存在,但去除作用削弱。由图 10 第 9 次挤压循环后的 2、3、4 滑块可知,此时无去除量产生,但表面粗糙度仍有不同程度的降低,说明挤压作用依然存在,并贯穿了整个磨粒流的加工过程。

参考文献:

- [1] 朱永伟,王成,徐俊,等. 固结磨料研磨垫孔隙结构对其加工性能的影响[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(4):911-917.
ZHU Y W, WANG CH, XU J, *et al.*. Influence of pore distribution of fixed abrasive pad on its machining performance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):911-917. (in Chinese)
- [2] 居志兰,朱永伟,王建彬,等. 抛光介质对固结磨料化学机械抛光水晶的影响[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(4):955-962.
JU ZH L, ZHU Y W, WANG J B, *et al.*. Effect of slurries on chemical mechanical polishing of decorative glasses by fixed- abrasive pad [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4):955-962. (in Chinese)
- [3] 计时鸣,唐波,谭大鹏,等. 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[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15):178-184.

6 结 论

本文利用磨粒流的流变特性,通过应力张量的分析,研究了磨粒流加工的内在动力,并运用 COMSOL 软件的数值模拟及实验验证,得出以下结论:(1)将磨粒流的应力张量分析扩展到磨粒流的整个加工表面,将工作区的径向力、轴向力与磨粒流的挤压力及磨料介质的剪切应力结合。磨粒流加工依靠磨粒的挤压力、磨粒的犁削力及磨料介质的剪切力实现为微切削的观点,经试验得以验证。(2)对不同滑块的去除量及表面粗糙度等测试结果可知:加工过程产生去除量,但随着加工次数增加,在无去除量的情况下,表面粗糙度仍有所下降,证实了磨粒流加工中确实存在挤压与微去除的加工方式。(3)通过轴向力与径向力测试,能较直观地反映磨粒流加工中微切削力的去除效果,适当增大模芯的直径有利于提高加工表面的作用力,以滑块 4 的去除量及表面粗糙度下降最快,经 15 次循环后表面粗糙度由加工前的 $2.918 \mu\text{m}$ 下降为 $1.027 \mu\text{m}$,去除量下降了 0.09g 。利用模芯的方法有效地提高磨粒流的加工效率,该方法为进一步研究磨粒流加工提供有益的参考。

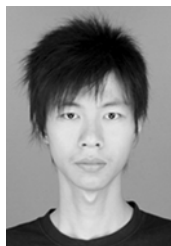
- JI SH M, TANG B, TAN D P, *et al.*. Structured surface softness abrasive flow precision finish machining and its abrasive flow dynamic numerical analysis [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(15):178-184. (in Chinese)
- [4] 计时鸣,李琛,谭大鹏,等. 基于 Preston 方程的软性磨粒流加工特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(17):156-163.
JI SH M, LI CH, TAN D P, *et al.*. Study on machinability of softness abrasive flow based on preston equation [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(17):156-163. (in Chinese)
- [5] RAVI SANKAR M, JAIN V K, RAMKUMA J, *et al.*. Rheological characterization of styrene-butadiene based medium and its finishing performance using rotational abrasive flow finishing process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51:947-957.
- [6] RHOADES L J. Abrasive flow machining: a case

- study [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 1991, 28:107-116.
- [7] 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 Material Processing Technology*, 1994, 47: 133-151.
- [8] WILLIAMS R E, RAJURKAR K P. Stochastic modeling and analysis of abrasive flow machining [J]. *Journal of Engineering for Industry(Transactions of the ASME)*, 1992, 114:74-81.
- [9] WILLIAMS R E. Acoustic emission characteristics of abrasive flow machining [J]. *Transactions of the ASME*120,1998,264-271.
- [10] 计时鸣,马宝丽,谭大鹏. 结构化表面环境下软磨粒流的流场数值分析[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9):2092-2099
JI SH M, MA B L, TAN D P, *et al.*. Numerical analysis of soft abrasive flow in structured restraint flow passage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2092-2099. (in Chinese)
- [11] 丁金福,张克华,许永超,等. 摆线泵内转子的磨粒流均匀化抛光方法及实验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31(7):45-53.
DING J F, ZHANG K H, XU Y CH, *et al.*. Abrasive flow homogenization polishing method and processing experiment for cycloidal pump Inner rotor [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(7): 45-53. (in Chinese)
- [12] 黄卫星,李建明,肖泽仪. *工程流体力学*[M]. 北京:化学工业出版社, 2011.
HUANG W X, LI J M, XIAO Z Y. *Engineering Fluid Mechanics*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 董志国,轧刚,李元宗. 磨粒流载体在圆管流动中的壁面滑动特性分析[J]. *太原理工大学学报*, 2011, 42(2):160-163.
DONG ZH G, YA G, LI Y Z. Analysis of wall sliding characteristics about abrasive flow carrier in pipe [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2011, 42(2):160-163. (in Chinese)
- [14] 董志国,轧刚,宋桂珍,等. 磨粒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, 30(6):82-85.
DONG ZH G, YA G, SONG G ZH, *et al.*. Influence of viscoelasticity on grinding effect in abrasive flow machining [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2010, 30(6):82-85. (in Chinese)
- [15] B. 布尚,葛世荣. *摩擦学导论*[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
BHARAT BHUSHAN, GE SH R. *Introduction of Tribology*[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007. (in Chinese)

作者简介:



丁金福(1965—),男,浙江义乌人,硕士,副教授,1987年于浙江工学院获得学士学位,2011年于兰州交通大学获得硕士学位,主要从事精密加工技术及装备的研究。E-mail: zsdif@zjnu.cn



刘润之(1990—),男,湖北荆门人,硕士研究生。2013年于浙江科技学院获学士学位,主要从事超精密加工技术及装备的研究。E-mail: lrz2kof@163.com