DOI: 10.3901/JME.2014.11.170

软固结磨粒群气压砂轮的力学特性分析*

曾 晰 计时鸣 金明生 谭大鹏 李珏辉 曾文韬

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室 杭州 310014)

摘要: 提出以软固结磨粒群(Softness consolidation abrasives, SCA)气压砂轮为工具的加工方法,对磨粒群密集颗粒系统的力学特性进行分析,用于解决激光强化后局部高硬度区域难以高效光整的问题。引入软球接触模型建立磨粒软固结形态下的微观接触力模型,引入全局阻尼系数得出了磨粒蠕变时的位移和速度公式。通过 PFC3D 仿真,验证了接触力计算公式,建立了颗粒系统的接触力网。对单颗磨粒在 z 轴方向上的速度进行跟踪研究,证实了 SCA 在加工时的存在蠕变现象。结合修正的 Preston 的方程,针对激光强化自由表面进行加工试验。试验结果表明:在相同加工时间内,SCA 累积高出游离磨粒近 34.35% 的材料去除量,且避免了刚性砂轮面向曲面加工时产生的划痕,SCA 加工可大幅提升面向高硬度曲面的光整效率。

关键词: 气压砂轮;蠕变效应;材料去除率;软固结磨粒群

中图分类号: TG580

Mechanical Characteristic Analysis of Softness Consolidation Abrasives Pneumatic Wheel

ZENG Xi JI Shiming JIN Mingsheng TANG Dapeng LI Juehui ZENG Wentao

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract: A pneumatic wheel tool based on softness-consolidation abrasives (SCA) is presented. Mechanical characteristic of SCA is analysed for improving the efficiency of finishing proces when it faced with the laser hardening surface. The normal and shear microstress is established by the analysis of the soft ball model. According to the global damp coefficient, the formulas of displacement and velocity of SCA are given in the process of creep deformation of SCA, which is proved out by the PFC3D. The stress net of SCA is also simulated. The creep deformation of SCA is confirmed in accordance with the analysis of v_z of the single particle. Combined with the modified Preston formula, the experiments about the material removal are carried out to the laser hardening freeform surface. The results show that the material removal rate of SCA is higher than the free abrasive's by 34.35%. And it also can avoid the deep scratches which are always produced by the grinding with the rigid wheel on the freeform surface. SCA is certified to improve the efficiency of the finishing process to the laser hardening freeform surface.

Key words: pneumatic wheel; creep deformation; materials removal rate; softness consolidation abrasives

0 前言

在模具行业,采用表面激光强化可大幅改善模具使用性能和使用寿命^[1-5],但这些优势也为后续的表面加工带来以下困难:① 现有光整方法一般使用游离磨粒加工,难以对高硬度、高耐磨性表面形成有效的切削;② 面向自由曲面时,刚性研磨工具难以与曲面形成良好面接触;③ 面向局部改性表面时,目前主要以手工加工为主,不但质量不稳定且

加工效率很低^[6-7]。

计时鸣等^[8-11]提出了以下加工方法:砂带磨削拥有良好的加工效率,但其结构上的缺陷限制了曲面的各个方向的仿形能力,且经过磨削后的工件仍需经过研磨,抛光等方法才能达到精度要求;研磨加工只有在研具精度与曲面有很好匹配时才能获得理想的加工效果;抛光则主要采用柔性工具配合游离磨粒进行加工,材料去除能力很小,难以适应激光强化表面高效加工。此外 TOH 等^[12-17]提出采用磨粒流,磨液射流等方式对异形曲面进行加工,但往往难以构建有效的流道或控制流体形态以适用经局部激光强化后的模具表面。

* 国家自然科学基金(51175471, 50575208)和浙江省自然科学基金(M503099)资助项目。20130531 收到初稿,20140121 收到修改稿

气囊抛光方法虽然面向自由曲面可以具备镜面级的加工效果, 但其低材料去除能力难以运用于激光强化后的高硬度表面。针对上述难点, 在气囊抛光基础上研究了一种软固结磨粒 (Softness consolidation abrasives, SCA) 气压砂轮的加工方法。以实现模具表面精度在较短时间内 R_a 从 0.4~0.6 迅速降至 0.06 μm ~0.09 μm , 以利于进一步的镜面级加工, 从而提高整个光整阶段的自动化水平和加工效率。

1 加工方法的设计

气压砂轮表面呈为半球形, 磨粒由黏结剂固结在外层, 砂轮与工件接触示意图如图 1 所示。

图 1 气压砂轮与工件接触示意图

影响气压砂轮的主要因素如下: θ 为倾斜角度, R 为砂轮半径, d 为下压深度, h 为接触范围。图 2 所示为单颗磨粒微观状态下的自适应调控过程。

图 2 磨粒微切削过程中的自适应调控过程

黏结于气压砂轮表面的磨粒群宏观上不像游离磨粒那样可自由移动, 但是微观上每个磨粒均受到黏结剂在各个方向的弹性支撑。每颗磨粒受力后不但可局部微动, 并且可影响周边磨粒的受力状况而形成应力局部集中。图 3 所示为不同厚度磨粒层受挤压后的变形情况。

在相同的内层橡胶基体外侧分别黏结 d_1 和 d_2 ($d_1 < d_2$) 厚度的磨粒层, 保持填充物比例相同。若受到相同挤压应力 F 的作用, 则产生的黏结剂变形 $L_1 > L_2$ 。在 d_2 层引起的磨粒群聚效应将高于 d_1 层,

图 3 不同厚度磨粒层的挤压变形

切削应力 $F_1 < F_2$, 可提升材料去除率, 但 L_2 小于 L_1 使得面向曲面的仿形加工能力减弱。

上述内容从原理上阐述了 SCA 的特点, 解释了面向模具强化曲面实现高效光整的设计思路。

2 密集颗粒系统的特性分析

2.1 软固结磨粒群的力学行为

磨粒在软固结形态下通常呈现为密集的颗粒系统, 且颗粒间存在相互约束, 粒子间的接触力成为决定系统变形或流动的主要因素。故在分析过程中采用颗粒离散元中的软球模型, 从而获得颗粒间接触力变化的全部动态信息。图 4 所示为两磨粒的法向接触模型和切向接触模型^[18]。

图 4 磨粒间的接触模型

在图 4a 所示的法向接触模型中, 若两个发生接触的颗粒 i, j , 其法向接触力则可以表示为

$$F_{n,ij} = \begin{cases} -k_n \delta_{ij} n_{ij} - d_n v_{n,ij} & \delta_{ij} \geq 0 \\ 0 & \delta_{ij} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $F_{n,ij}$ ——法向接触力;

k_n ——法向接触刚度系数;

δ ——磨粒重叠厚度;

d_n ——法向阻尼系数;

$v_{n,ij}$ ——法向相对速度;

n_{ij} ——法向单位接触力。

而在切向接触模型图 4b 中, 由于在密集颗粒系统内, 若粒子间发生了持续的接触且存在运动趋势, 但相互间并没有产生相对滑动, 切向力也明显要小于滑动摩擦力。另外由于粒子间有摩擦存在, 在切线方向上也会产生能量的损耗, 在切向方向加入一个阻尼器来描述这种能量的损耗, 故可以将切向的接触力表达式修正如下

$$F_{t,ij} = \min(k_t \delta_t - d_t v_{t,ij}, \mu |F_{n,ij}| t_{ij}) \quad (2)$$

式中 $F_{t,ij}$ ——切向接触力;

k_t ——切向接触刚度系数;

$v_{t,ij}$ ——切向相对速度;

d_t ——切向阻尼系数;

t_{ij} ——切向单位接触力;

μ ——滑动摩擦因素。

通过对颗粒间法向和切削接触力的分析, 为磨粒群间接触力网研究建立了理论基础。

2.2 磨粒群的蠕变效应

软固结磨粒群体在未受力的情况下可以认为其处于松弛阶段一。在这个阶段, 磨粒之间通过高聚物黏结剂连接在一起, 构成了一个无压缩的磨粒层。当磨粒层受到挤压时, 原本未接触的磨粒产生“蠕变”, 并相互间产生接触, 挤压应力稳定时达到相对的平衡, 进入松弛状态二^[19]。第 i 颗磨粒在 t 时刻的运动方程如式(3)和式(5)所示

$$F_i(t) = m_i \frac{\dot{\mu}(t) - \dot{\mu}(t - \Delta t)}{\Delta t} + \beta \dot{\mu}(t) \quad (3)$$

式中 $F_i(t)$ ——第 i 颗磨粒在 t 时刻的受力;

β ——全局阻尼系统;

m ——颗粒质量;

I ——转动惯量;

$\dot{\mu}(t)$ ——加速度;

$$\dot{\mu}(t) = \frac{1}{m_i + \beta \Delta t} \dot{\mu}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t F_i(t)}{m + \beta \Delta t};$$

$$M_i(t) = I_i \frac{\dot{\theta}_i(t) - \dot{\theta}_i(t - \Delta t)}{\Delta t} + \beta \dot{\theta}_i(t);$$

$M_i(t)$ ——第 i 颗磨粒在 t 时刻的转动惯量;

$\dot{\theta}_i(t)$ ——角加速度;

$$\dot{\theta}_i(t) = \frac{1}{I_i + \beta \Delta t} \dot{\theta}_i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t M_i(t)}{I_i + \beta \Delta t}。$$

平动位移和转动位移为可表示为

$$\mu(t) = \mu(t - \Delta t) + \dot{\mu}(t - \Delta t) \Delta t \quad (4)$$

$$\theta_i(t) = \theta_i(t - \Delta t) + \dot{\theta}_i(t - \Delta t) \Delta t \quad (5)$$

2.3 材料去除特性

在柔性基体供力环境下, 软固结磨粒群的材料

去除特性与刚性砂轮加工存在差异, 传统的 Preston 方程难以准确描述其材料去除特性。

针对软固结磨粒群的特性, 结合拉宾诺维奇(Rabinowicz)的磨损理论研究^[20], 通过建立修正的 Preston 方程来描述其材料去除率^[21]。其方程可表述为

$$M_r = K' p^{\frac{2}{3}} v \quad (6)$$

式中 M_r ——材料去除量;

p ——表面压强;

v ——磨粒群速度;

K' ——修正系数;

$$K' = \frac{D(d_p) H_p}{H_f};$$

$D(d_p)$ ——磨粒直径决定的系数;

H_p ——磨粒硬度;

H_f ——工件表面硬度。

通过修正的 Preston 方程可建立表面应力与材料去除量的关系, 从而验证软固结磨粒群力学分析的可靠性, 并进一步实现该加工方法的工艺参数优化。

3 软固结磨粒群的数值模拟

3.1 磨粒群的接触力网

建立一个磨粒群样本模拟加工过程中软固结磨粒群的微观形态, 参数设计如表 1 所示。采用 PFC3D 建立样本。

表 1 磨粒群样本参数

长度 L/mm	宽度 W/mm	高度 H/mm	直径 D/mm	数量 N	系数 μ
10	5	2	0.3	750	0.18

在软球接触模型下, 为了避免磨粒磨损产生的计算误差, 设定颗粒接触时的重叠厚度 $\delta_{\max} \leq 3\% D$ 。依照表 2 参数, 进行了接触力网的仿真, 并对单颗磨粒在软固结形态下的正向接触力和法向接触力进行了验证。

表 2 磨粒群样本参数

组数	法向刚度系数 $k_n/\times 10^8$	切向刚度系数 $k_t/\times 10^8$	法向阻尼系数 $d_n/\times 10^5$	切向阻尼系数 $d_t/\times 10^5$
A	1	1	0	0
B	1	1	1.5	1.5
C	1	1	3.5	3.5
D	1	1	5.0	5.0

设置 $d=1\text{ mm}$, 通过改变阻尼系数, 来描绘磨粒层黏结强度。图 5 所示为不同黏结强度下磨粒群的接触力网。

(a) B 组接触力网

(b) D 组接触力网

图 5 软固结磨粒群的接触力网

通过改变磨粒层的黏结强度(包括黏结剂体积分数, 黏结剂特性, 磨粒接触面积等), 形成不同的接触力网以适应加工需求。在应力传递过程中, 通常表现为阻尼系数越大接触力网分布越密集, 表层磨粒应力越大, 更适合高效加工。而游离形态的磨粒在下压过程中往往会出现磨粒丢失(无切削效果的磨粒), 应力不集中, 能量耗散等现象。

在上述试验条件下, 从磨粒群样本中选取单颗磨粒 Q 进行应力仿真。并依照式(1)和式(2)的进行计算, 对合力取平均值, 所得结果如表 3 所示。

表 3 磨粒 Q 的应力分析

组数	理论值 $F/\mu\text{N}$	仿真值 $F/\mu\text{N}$
B	14.2	13.5
C	50.3	49.8
D	120.3	119.6

通过上述对比可以发现, 仿真结果往往低于理论计算, 这是由于磨粒蠕变造成相对速度发生微变产生, 但最终计算误差可以控制在 1% 以内, 理论计算模型基本可以适用。

3.2 蠕变现象

软固结形态下的磨粒群宏观上运动状态保持一致, 但微观上黏结剂由于受拉或压的影响, 造成颗粒间位移产生微小变化, 形成磨粒的蠕变现象。

磨粒群的运动过程分为两个阶段: 一是磨粒群受压, 整个系统从松弛状态变为收紧状态; 二是磨粒群在加工表面以一定速度切削, 整个系统从原本

的静态平衡达到新的动态平衡。模拟磨粒群的加工过程, 设置气压砂轮的转速 $n=1\ 000\text{ r/min}$, 下压量 $d=1\text{ mm}$ 。为更好地观察蠕变状态, 以 x 轴, y 轴构成的平面作为加工平面, 以边缘区域的磨粒 P 在 z 轴方向上的速度作为研究目标。分别对游离磨粒群体和软固结磨粒群体进行了仿真, 如图 6 所示, 沿 z 轴正向运动速度符号为正。

(a) 游离磨粒的 z 轴方向速度 (b) 软固结磨粒的 z 轴方向速度

图 6 磨粒的速度分布

图 6a 为游离形态下磨粒 P 在 z 轴方向上的速度。在阶段一, v_z 产生了较大的变化并波动, 在阶段一末期重新进入稳态; 而进入阶段二时, v_z 随着磨粒群宏观位移的变化重新产生波动, 并在最终以一定的速度脱离系统。图 6b 为软固结形态下的磨粒速度, 其与上述的主要区别在于, 在进入阶段二后, 磨粒在 z 轴方向上的速度围绕着 0 值上下波动, 说明磨粒受邻域磨粒以及黏结剂变化的影响, 在微小范围内产生蠕变, 并未出现逃逸现象。

3.3 表面应力分析

游离磨粒群在加工中由于缺乏有效的约束,易产生逃逸的磨粒,这种现象将减弱表面切削应力,产生能量的耗散。软固结形态下的磨粒群则在高聚物的作用下,保证切削应力集中。颗粒运动存在蠕变现象,并对表层磨粒产生更为有效的挤压,有益于工件表面局部高硬度区的材料去除。

图 7 为两种形态下表面所受的应力变化曲线,纵坐标压强负号表明受力方向为 z 轴正方向。

(a) 游离磨粒群表面应力

(b) 软固结磨粒群表面应力

图 7 表面应力

在阶段一过程中,表面应力迅速提升,从而达到静态平衡。而进入阶段二后,应力少许回落,并稳定在一定范围,从而进入动态平衡。在上述试验条件下,游离磨粒加工表面压强最终稳定在 0.16 MPa 左右,而软固结磨粒加工表面压强最终稳定在 0.26 MPa 左右。

本节对不同形态磨粒群的进行了仿真,发现可通过改变磨粒层黏结强度来提升磨粒群的接触力

网,形成应力集中。并对单颗磨粒进行了力学分析,验证了理论模型分析的可靠性。通过对微观颗粒的运动分析以及宏观颗粒群的位移研究,验证了软固结磨粒群在加工过程中存在蠕变现象,其产生的表面应力将显著高于游离形态的磨粒。

4 试验及讨论

4.1 加工系统

加工系统设计如图 8 所示。将软固结磨粒群气压砂轮安装在机械臂上,采用 6 自由度工业机器人 MOTOMAN-HP20 实现位姿控制和轨迹规划。

图 8 加工系统构成图

1. 工作台 2. 空压机 3. 机械臂
4. 导气管 5. 气压砂轮 6. SCA

4.2 软固结磨粒气压砂轮的加工效果

以表 4 所示的参数作为试验条件,分别采用游离形态磨粒(气囊抛光)和 SCA 加工方法,面向硬度为 434 HV 的强化模具曲面进行定时加工。

表 4 加工参数设计

参数	游离磨粒	SCA
下压量 d/mm	1	1
倾角 $\theta/(\text{°})$	30	30
转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	1 000	1 000
直径 $D_p/\mu\text{m}$	75	75
黏结剂	—	硅酮胶

图 9 所示为在两种模式下定点加工 3 min 的材料去除量对比曲线。加工结果显示 SCA 较游离磨粒群有着更高的材料去除能力,三分钟的加工时间累积高出 34.35% 的材料去除量。SCA 由于黏结剂的作用,其微观运动主要呈现蠕变状态,游离磨粒群则产生大量磨粒逃逸,前者所形成的切削应力高于后者,试验结果与图 7 仿真结果相符。

两种模式在材料去除过程中普遍出现材料去除能力呈下降趋势。主要原因在于游离磨粒随着逃逸的磨粒数量越多,切削能力下降。而软固结磨粒群则因为表层磨粒在一种运动形式下产生局部磨损所致。

图9 两种模式下的材料去除量对比

在上述试验基础上,进行了刚性砂轮磨削与SCA加工的对比如。设定加工时间为30 s,采用zygo进行观测,加工效果如图10所示。

(a) 初始表面粗糙度

(b) 经刚性砂轮加工后表面粗糙度

(c) 经SCA加工后表面粗糙度

图10 加工效果对比

图10a所示为工件初始表面,刚性砂轮由于磨粒群固着与砂轮表面,自身难以适应复杂表面曲率变化,导致磨粒对局部区域压入过深,对表面产生

损伤,如图10b所示。但在SCA加工方法中,由于内部气压柔性可控且表面磨粒存在蠕变效应,既可保证一定的加工效率,又可避免划痕过深而影响精度,如图10c所示。

4.3 颗粒粒度的影响

颗粒粒度的选取决定了最终的加工效果,同时也对材料去除率也有着重要的影响。以表5所示颗粒粒度制备软固结气压砂轮,并选用相同粒度的磨粒进行游离形态的加工。

表5 磨粒粒度的选取

试验组	直径 $D/\mu\text{m}$
A	15
B	38
C	75
D	124
E	150
F	178

经过3 min的加工发现,各组材料去除量存在差异,如图11所示。C组至F组的加工效果显示软固结磨粒群的材料去除量明显超出游离形态磨粒群的去除量。而B组去除效果体现不明显,A组则表现出两者材料去除能力相差无几。

图11 材料去除量对比

经过多次试验后总结得出,直径应处于60 μm至170 μm之间的磨粒固结后的加工效果优势明显,且直径越小加工效果越好。若高于170 μm,则单位面积内的材料去除量呈下降趋势,且易造成划痕过深,影响加工表面质量;若低于60 μm,则由于磨粒粒度过小而影响固结效果,磨粒在加工过程中易脱落,从而影响加工质量。

在表4和表5的试验条件下对初始表面粗糙度为0.643 μm的工件进行加工,并对加工后的表面精度进行了统计,如图12所示。

直径超过75 μm的磨粒群在两种模式下所能达到的粗糙度相近,但低于75 μm时,软固结磨粒群多为无效加工,如图13所示两种不同直径磨粒固结后的加工效果。

图12 表面粗糙度值 R_a (a) $D=38\ \mu\text{m}$ (b) $D=75\ \mu\text{m}$

图13 加工效果对比

图13b所示的加工效果(粒径 $D=75\ \mu\text{m}$)明显优于图13a所示的加工效果(粒径 $D=38\ \mu\text{m}$)。试验结果有悖于细小磨料有利于提升加工精度这一传统规则,其主要原因在于细小磨料降低了固结面积,使SCA易在运动过程中脱落,主接触区切削过程呈衰减趋势,若不补充磨料则无切削效果。

5 结论

(1) 在密集颗粒系统内部的力学传递过程中,通过引入颗粒的软球接触模型,并考虑了能量损耗,得到了法向与切向的微观接触力。并通过PFC3D进行了仿真,验证了软球接触模型下的应力计算公式。仿真结果表明磨粒层的阻尼系数对应力传递有着重要,SCA较游离磨粒群有着更为密集的接触力网,更易形成高效的材料去除效果。

(2) 描述了软固结环境下磨粒群的蠕变效应,引入全局阻尼系数得出了磨粒群的位移和速度公式。对单颗磨粒在 z 轴方向上的速度进行了跟踪,证实了SCA在加工时的蠕变现象,游离磨粒群则会在加工过程中产生局部磨粒逃逸。仿真结果表明SCA产生的加工应力大大超过了游离磨粒群。

(3) 针对激光强化自由表面进行了加工试验,试验结果表明:在相同加工时间内,SCA累积高出游离磨粒近34.35%的材料去除量,且避免了刚性砂轮面向曲面加工时产生的划痕。并通过磨粒粒度的对比试验表明,粒度较小的磨粒在加工过程中存在脱落现象,为了既保证磨粒黏结效果,又保证加工精度,在一定粒度范围内,SCA与游离磨粒群有着相同的加工精度,但前者却有着更高的材料去除能力。

参考文献

- [1] 周圣丰,戴晓琴,郑海忠. 激光熔覆与激光-感应复合熔覆 WC-Ni60A 涂层的结构与性能特征[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7): 114-118.
ZHOU Shengfeng, DAI Xiaoqin, ZHENG Haizhong. Characteristics on structure and properties of WC-Ni60A coatings by laser cladding and laser-induction hybrid cladding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(7): 114-118.
- [2] KWOK C T, LEONG K I, CHENG F T, et al. Microstructural and corrosion characteristics of laser surface-melted plastics mold steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 357(1-2): 94-103.
- [3] 洪永昌,王明辉. 激光重熔和时效处理的镍基合金热喷焊层组织和性能的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 75-81.
HONG Yongchang, WANG Minghui. Research of microstructure and properties of Ni-based alloy hot sprayed-welding layers by laser remelted and aging treatment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 75-81.
- [4] TORKAMANY M J, SABBAGHZADEH J, HAMEDIM J. Effect of laser welding mode on the microstructure and mechanical performance of dissimilar laser spot welds between low carbon and austenitic stainless steels[J]. Materials and Design, 2012, 34: 666-672.
- [5] KIM J D, LEE M H, LEE S J, et al. Laser transformation hardening on rod-shaped carbon steel by Gaussian beam[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19: 941-945.
- [6] 吴红兵,贾志欣,刘刚,等. 航空钛合金高速切削有限元建模[J]. 浙江大学学报, 2010, 44(5): 982-987.
WU Hongbing, JIA Zhixin, LIU Gang, et al. Finite element modeling of Ti6Al4V alloy high speed cutting[J]. Journal of Zhejiang University, 2010, 44(5): 982-987.
- [7] JIWANG Y, JUN M, TAKASHI O, et al. Investigation on

- shape transferability in ultraprecision glass moulding press for microgrooves[J]. Precision Engineering, 2011, 35: 2014-2023.
- [8] 计时鸣, 金明生, 张宪, 等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 2-6.
JI Shiming, JIN Mingsheng, ZHANG Xian, et al. Novel gasbag polishing technique for free-form mold [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 2-6.
- [9] 戴一帆, 张学成, 李圣怡, 等. 确定性磁射流抛光技术[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 171-176.
DAI Yifan, ZHANG Xuecheng, LI Shengyi, et al. Deterministic magnetorheological jet polishing technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 171-176.
- [10] DANDU V P R, NATARAJAN A, HEGDE S. Selective polishing of polysilicon during fabrication of microelectromechanical systems devices [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2009, 156(6): 487-494.
- [11] ZHANG Song, LI Jianfeng. Tool wear criterion, tool life, and surface roughness during high-speed end milling Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2010, 11: 587-595.
- [12] TOH C K. Design evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials[J]. Materials and Design, 2005, 26: 517-533.
- [13] 彭小强, 戴一帆, 李圣怡. 磁流变抛光的材料去除数学模型[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 67-70.
PENG Xiaoqiang, DAI Yifan, LI Shengyi. Material removal model of magnetorheological finishing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 67-70.
- [14] SUNIL J, JAIN V K. Rheological characterization of magnetorheological polishing fluid for MRAFF[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42: 656-668.
- [15] DAS M, JAIN V K. Ghoshdastidar PS. Analysis of magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 38: 613-621.
- [16] KURIYAGAWA T, SAEKI M, SYOJI K. Electrorheological fluid-assisted polishing for small three-dimensional parts [J]. Precision Engineering, 2002, 26: 370-380.
- [17] JI Shiming, XIAO Fengqing, TAN Dapeng, et al. Analytical method for softness abrasive flow field based on discrete phase model[J]. Science China Technology Sciences, 2010, 53(10): 2867-2877.
- [18] 计时鸣, 付有志, 谭大鹏. 软性磨粒流双入口约束流场数值分析及加工试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 177-185.
JI Shiming, FU Youzhi, TAN Dapeng. Numerical analysis and processing experiment of double-inlet restraint flow field in the soft abrasive flow machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 177-185.
- [19] WANG Dengming, ZHOU Youhe. Discrete element simulation of localized deformation in stochastic distributed granular materials [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2008, 51(9): 1403-1415.
- [20] 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 Shiming, LI Chen, TAN Dapeng, et al. Study on machinability of softness abrasive flow based on Preston equation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(17): 156-163.
- [21] 金明生. 模具自由曲面气囊抛光机理及工艺研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
JIN Mingsheng. Gasbag polishing mechanism and procession free-form surface mold[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.

作者简介: 曾晰, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要从事精密/超精密加工、数字化装备设计等方面研究。

E-mail: franckie@126.com