DOI: 10.3901/JME.2020.03.169

基于流变原理的柔性接触抛光材料去除模型综述*

袁巨龙 邵 琦 吕冰海 赵 萍 王金虎
(浙江工业大学超精密加工研究中心 杭州 310023)

摘要: 基于流变原理的柔性接触抛光是通过辅助场控制智能材料转变相态形成柔性抛光头进行加工的一类抛光, 能够满足复杂形面零件所需的高形状精度和高表面完整性要求。材料去除函数能直观地反应抛光后工件表面轮廓, 是实现工件材料确定性去除的关键。对当前具有代表性的柔性接触抛光方法如磁流变抛光、电流变抛光、磁射流抛光、剪切增稠抛光进行综述, 阐述了基于不同理论建立的材料去除模型, 分析了各个模型的主要影响参数, 比较了各个模型的特点。对柔性接触抛光方法及其材料去除模型研究趋势进行预测。

关键词: 流变原理; 智能材料; 柔性接触; 抛光方法; 去除模型; 研究趋势

中图分类号: TG580

Review on Material Removal Model of Flexible Contact Polishing Based on Rheological Principle

YUAN Julong SHAO Qi LÜ Binghai ZHAO Ping WANG Jinhu

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract: Flexible contact polishing methods based on rheological principle, which can transform phase to form flexible polishing heads by controlling the auxiliary field conditions, are ‘gentle’ polishing processes. They can meet the high shape precision and surface integrity required for complex shaped products. The material removal function can visually describe the surface profile of the polished workpiece and is the key to the deterministic material removal. The current representative flexible contact polishing methods such as magnetorheological finishing, electrorheological polishing, magnetorheological jet polishing and shear thickening polishing are reviewed. The material removal models based on different theories are reviewed. The main influencing parameters of each model are analyzed and the characteristics of each model are compared. The probable further research trend of flexible contact polishing method and its material removal model is forecasted.

Key words: rheological principle; intelligent materials; flexible contact; polishing method; removal model; research trend

0 前言

抛光作为超精密加工技术手段之一, 能够满足低损伤、高完整性工件表面的加工要求^[1]。随着光学、精密机械、信息电子等领域产品零件形面趋于复杂化, 以及零件表面精度要求的进一步提高, 高精度、高质量、高效率的抛光技术成为重要的研究方向。

柔性接触抛光是通过新型柔性抛光工具或者智能材料柔性抛光头对工件表面进行加工的一类抛光

方法, 与传统的接触式抛光方法相比^[2], 具有抛光效率高、表面损伤小、表面形状适应性强和材料去除过程“选择性”好等优势^[3]。随着材料技术的发展, 国内外学者研发了应用智能材料的流变原理进行抛光的柔性抛光方法, 即通过辅助场作用改变智能材料的流变特性, 使其相态发生转而变形成柔性抛光头进行抛光^[4], 磁流变抛光和电流变抛光等就是这一类抛光方法的典型代表。

材料去除函数/模型即单位时间内抛光工具驻留在某一固定点时材料的去除量分布, 能够直观地反应抛光工具对材料的去除能力。基于准确的材料去除模型控制抛光工具驻留时间, 能够精确控制工件材料去除量, 实现抛光工件表面轮廓的可预测性, 得到高轮廓精度、高表面质量的工件。因此, 探究

* 浙江省自然科学基金杰出青年基金(LR17E050002)、国家自然科学基金(51775508, 51805484)和大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室开放基金(JMTZ201803)资助项目。20190319 收到初稿, 20190812 收到修改稿

得出有效的去除函数/模型对于实现确定性抛光,提高工件面形精度十分关键。

对当前具有代表性的基于流变原理的柔性接触抛光技术进行综述,主要阐述了磁流变抛光、电流变抛光、磁射流抛光、剪切增稠抛光的加工原理和材料去除模型,并分析了不同去除模型的主要影响参数,以实现高效、高精度、低损伤为目标,对柔性接触抛光及其去除函数的后续研究进行了展望。

1 磁流变抛光

磁流变抛光(Magnetorheological finishing, MRF)技术于 1988 年由白俄罗斯 KORDONSKI 等学者提出^[5],其加工原理如图 1 所示。磁流变液在高强度梯度磁场下转变成具有黏塑性的 Bingham 介质,构成柔性磨具,抛光过程中柔性磨具与工件表面的相对运动会使工件受到较大的剪切力,通过控制工件表面与具有流变性抛光液的相对运动速率及驻留时间,可实现工件表面材料的确定性去除^[4]。MRF 通过磁场控制磁流变液的黏度及流变特性,可实现复杂曲面零件的高精度、高效率 and 低损伤抛光加工。

图 1 磁流变加工原理

1. 电磁铁 2. 磁场 3. 磁流变液传送带 4. 磁流变液 5. 工件
6. 抛光区域

1.1 基于试验研究的唯象模型

LAMBROPOULOS 等^[6]探究了工件材料性能及磨粒尺寸对 MRF 中工件材料去除影响,得出相同工艺参数下材料体积去除效率 MRR_{vol} 与被加工材料的弹性模量 E_B 成正比,与断裂韧性系数 K_c 及努氏硬度 H_k 成反比,关系式如式(1)所示。

$$MMR_{vol} \propto \frac{E_B^{7/6}}{K_c \cdot H_k^{23/12}} \quad (1)$$

GROOTE 等^[7-8]结合 LAMBROPOULOS、SHOREY 等^[6, 9-11]的研究工作,通过纳米金刚石磨粒对 FCD-1, EFDS-1 和 BK-7 等玻璃材料的抛光试验,分析不同因素对材料去除的影响,总结出唯象模型如式(2)所示。材料去除率与工件本身物理参数、抛

光磨粒大小及浓度、材料化学耐久性、单个原子键的结合强度成线性关系。

$$MRR_{peak} \propto \left[\frac{E_s}{K_c \cdot H_s^2} \right] \cdot \left[\frac{F_d}{A} \cdot v \right] \cdot \left[B_{nd} \cdot \phi_{nd}^{-1/3} \cdot C_{nd}^{1/3} + B_{cl} \cdot \phi_{cl}^{4/3} \cdot C_{cl} \right] \cdot \left[D_s (\text{pH}_{MRF})^{3/10} \right] \cdot \left[e^{-sbs/bRT} \right] \quad (2)$$

式中, K_c 为断裂韧性系数; E_s 为弹性模量; H_k 为努氏硬度; F_d 为磁流变流体对工件的拉力; A 为去除作用接触面积; ϕ_{nd} 和 C_{nd} 为纳米式金刚石颗粒的平均粒径和浓度; ϕ_{cl} 和 C_{cl} 为(微米级羰基铁粉)CI 的平均粒径和浓度; B_{nd} 和 B_{cl} 为经验系数; $D_s (\text{pH}_{MRF})$ 为 MR 流体 pH 值的函数(由化学耐久性测试确定); sbs 为平均原子单键强度; b 为量纲一系数; R 为通用气体常数; T 为以开尔文为单位的室温。

纳米金刚石浓度的增加会提高材料去除率,但当其浓度达到饱和点之后材料去除率将不再提高;抛光液 pH 值主要起到化学辅助作用,对工件材料去除效果的影响具有差异性;工件材料平均原子键能越低工件材料的去除率越高。LAMBROPOULOS 和 GROOTE 的研究为后续研究奠定了基础。

1.2 基于 Preston 方程的材料去除模型

Preston 方程是广泛应用于表达抛光加工工件材料去除率的经验公式。在 KORDONSKI 对抛光过程中磨粒作用分析的基础上^[12], SHOREY^[9]基于 Preston 方程和流体润滑理论得出了 MRF 材料去除率与拉力、剪切力的关系表达式(式(3))。去除函数中, ds/dt 由抛光轮与工件表面的相对速度确定,通过试验得出材料去除效率与工件所受剪切应力成正比,屈服应力大小由磁场强度决定,因此抛光区域的形状大小与磁场大小成正相关。MIAO 等^[13]结合 MRF 过程中材料力学性能和剪切应力,分析磨料浓度、磁场强度和转轮速度对工件材料去除率的影响,同样得出工件材料的去除率与工件所受的剪切应力成正比。

$$\frac{dz}{dt} = C_p \frac{F_d}{A} \frac{ds}{dt} = C_p \tau \frac{ds}{dt} \quad (3)$$

式中, C_p 为修正后的 Preston 方程系数; F_d 为磁流变流体对工件的拉力; A 为去除作用接触面积; τ 为剪切应力。

SHOREY 采用压力传感器测得整个抛光区的压力分布,用式(3)表示工件材料的去除与剪切力的正比关系,但是未具体分析辅助场参数对材料去除的影响。

张峰等^[14-16]基于 Preston 方程,进一步对抛光过程中工件受力与材料去除的关系函数进行了研究,通过推导流体动压力 P_d 以及磁化压力 P_m 的数学表达式,得到去除函数如式(4)所示。基于去除函数中磁场强度、磁导率等变量参数对抛光压力的影响,通过 K9 光学玻璃的单因素抛光试验得出:运动盘的速度越大、工件与运动盘的间隙越小、磁场强度越大都会使得 MRF 材料去除率越大。

$$\text{MRR} = K(P_d + P_m)V = \left[\frac{-2\eta_0 Ux}{(h_{m0} + x^2/2R^2)} + 3\phi\mu_0\mu_f \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} \int_0^H H dH \right] \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{R} KU \quad (4)$$

式中, μ_0 为真空磁导率; H 为磁场强度; η_0 为磁流变抛光液初始黏度; U 为抛光轮线速度; x 为抛光区域大小; h_{m0} 为抛光轮与工件之间的最小间隙; μ_f 为磁流变抛光液的磁导率; μ_p 为磁性微粒的磁导率; ϕ 为磁流变抛光液中磁性微粒的体积比浓度; R 为抛光轮半径。

石峰等^[17]基于文献[14]中的去除函数,采用纳米金刚石磨料磁流变抛光液对 CVD-SiC 抛光,得到峰值去除率稳定在 $\pm 0.3\%$ 以内,体积去除率稳定在 $\pm 0.5\%$ 以内。对 HIP-SiC 平面镜粗抛(30 h)和精抛(9 h)后,面形误差 PV 值 $0.13 \mu\text{m}$, RMS 值 $0.012 \mu\text{m}$,表面粗糙度 RMS 值 2.439 nm 。

张云等^[18]在张峰研究的基础上,结合刚性流体润滑理论,对抛光区域内磁化压力和流体动压力分布规律进行了分析,得到 K9 玻璃抛光试验实际去除函数与理论值的对比如图 2^[17]所示,误差主要是由于忽略了工件和非剪切磁流变液弹性变形造成的。

图2 材料去除的理论值与试验值

尹韶辉等^[19-20]同样分析了 MRF 过程中的流体动压力和磁化压力,并基于 Preston 方程建立了适用于小口径非球面斜轴磁流变抛光材料去除率模型,如式(5)所示。基于该模型分析结果,进行加

工试验,加工过程中为避免抛光头与工件发生干涉,需要建立干涉模型,加工过程对轴的运动精度及定位精度具有非常高的要求,最终得到了 PV 值 $0.272 \mu\text{m}$ 、表面粗糙度 R_a 0.7 nm 的碳化钨非球表面,以及 PV 值 $0.187 \mu\text{m}$ 、表面粗糙度 R_a 0.7 nm 的不锈钢非球表面。

$$R(x,y) = K \left[\frac{-2\eta_0 U(x,y)}{h^2} + \frac{3\phi\mu_0(\mu_p - \mu_0)}{\mu_p + 2\mu_0} \int_0^H H dH \right] \sqrt{(V_w + V_p \sin 45^\circ)^2 + (V_f + V_p \cos 45^\circ)^2} \quad (5)$$

式中, K 为 Preston 系数; V_w 为工件线速度; V_p 为抛光头在抛光点处的线速度; V_f 为抛光工具头的进给速度。

彭小强^[21]的研究认为抛光过程中的剪切力对工件材料去除起到主要作用,基于 Preston 方程及脂润滑轴承 Bingham 介质雷诺方程,得到了 MRF 区域的流体动压力分布并得出材料去除的三维模型(式(6))。通过对 BK7 平面玻璃镜的抛光试验得出磁场强度越大,抛光区域内工件所受到压力越大,材料去除率也就越大。各个抛光参数对去除率影响的程度为抛光盘转速>磁场强度>磨粒浓度>抛光盘与工件间隙,对表面粗糙度影响的程度为磁场强度>抛光盘与工件的间隙>抛光盘转速>磨粒浓度。

$$\text{MRR} = Kp_x \left(z^2 - \frac{B(x)^2}{4} \right) U \quad 2|z| \leq B(x) \quad (6)$$

$$B(x) = 2\sqrt{\frac{h_0 + \frac{x^2}{2R} - b}{a}}$$

式中, $B(x)$ 为工件表面与“柔性抛光模”接触的宽度; p_x 为 $z=0$ 上表面压力分布; h_0 为刚性“核心”高度; R 为抛光轮半径, a 、 b 为拟合系数。

张飞虎研究团队^[22]在磁流变抛光技术和超声波抛光技术基础上,提出超声波磁流变复合抛光(Ultrasonic-magnetorheological compound finishing, UMCF)。UMCF 通过超声辅助作用增强磁流变抛光的去除效率,抛光中采用小直径的抛光头,能够对小曲率半径的凹曲面和自由曲面光学元件进行超精密抛光。张飞虎等^[22-23]研究了抛光过程中超声对磁场及材料去除的作用。基于 Preston 方程建立了工件静止时、工件自转时、抛光工具头倾斜时的材料去除模型分别如式(7)~(10)所示。根据去除模型对光学玻璃材料进行抛光试验,当抛光头倾斜 20° 时,得到 V 型抛光轮廓,且工件表面优于抛光头无倾斜时的 W 型抛光表面。

$$\text{MRR}_1 = K_1 (P_u + P_m + P_d) V_r T + Z \quad (7)$$

$$\text{MRR}_2 = K_1 (P_u + P_m + P_{rd}) V_{rr} T + Z \quad (8)$$

$$\text{MRR}_3 = K_1 (P_{ou} + P_m + P_{od}) V_{or} T + \frac{Z P_u (P_{ou} + P_m + P_{od})}{P_{ou} P} \quad (9)$$

$$Z = K_2 \rho^{-0.2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_1^2}{E_2} \right)^{0.2} D \cdot \left(\frac{4 f \rho_0 V_0 A_0 e^{-\alpha h}}{V_1} \right)^{0.4} \frac{(P_u + P_m + P_d)}{P_u} T \quad (10)$$

式中, K_1 、 K_2 为 Preston 系数; P_u 、 P_{ou} 为超声振动产生的压力; P_m 为梯度磁场产生的压力; P_d 、 P_{rd} 、 P_{od} 为流体动压力; V_r 、 V_{rr} 、 V_{or} 为切向线速度, T 为抛光时间; E_1 、 E_2 分别为氧化铈颗粒和光学玻璃的弹性模量; ν_1 、 ν_2 分别为氧化铈颗粒和光学玻璃的泊松比; α 为衰减系数; h 为抛光工具头到抛光颗粒之间的距离; D 为氧化铈颗粒的直径; V_0 为超声波在抛光工具头中的传播速度; V_1 为超声波在施加磁场作用的磁流变液中的传播速度; f 为超声振动频率; ρ_0 为抛光头材料密度; A_0 为抛光头振幅。

文献[24]在文献[23]研究的基础上得出去除函数, 如式(11)所示, 具体参数的推导过程可见文献[24]。根据模型中参数进行模型仿真并对 K9 玻璃进行抛光试验, 抛光后材料最大去除深度为 30.25 μm , 模型计算的材料最大去除深度为 29.28 μm , 误差仅为 3.3%。此外, 文献[24]对抛光过程中的驻留时间进行了深入的研究, 对平面和球面光学元件进行面形误差修正, 为获得高精度的光学表面建立了理论基础。

$$\text{MRR} = K (P_u + P_m + P_d) V_r \quad (11)$$

去除函数式(4)能较精确地反映实际的加工后工件的表面轮廓, 但在靠近抛光边缘区域, 理论去除模型与实际抛光的去除模型有一定的差异; 当抛光速度不同时, 需要重新通过试验来确定 Preston 系数 K 。去除函数式(5)在式(4)的基础上, 为小口径非球面斜轴磁流变抛光工艺的优化提供理论基础。去除函数式(6)能够较好地描述抛光后表面的三维轮廓, 但是由于建模过程中忽略了磁性力、抛光液的黏滞力和重力, 以及抛光过程中存在抛光液成分损失, 导致工件材料去除模型的理论值与试验值存在微小误差。文献[23]和文献[24]中建立了不同工作状态下 UMCF 光学玻璃材料去除率的数学模型, 一定程度上能够准确反映实际加工情况, 但是建模过程中忽略了磁流变抛光液的重力、惯性力

及自由边界问题, 造成了一定的误差。综上, 充分掌握磁流变液的流变理论、磁流变液的流变特性和产生屈服应力的规律是得到精确材料去除模型的基础。

1.3 基于磨粒作用力的材料去除模型

通过磨粒施加在工件表面的作用力是材料去除的直接影响因素, 因此研究人员对磨粒作用力与材料去除关系进行了分析。KORDONSIKI 等^[12]基于悬浮液中颗粒动量守恒原理, 得到磨粒的连续作用力 G_p 如式(12)所示。根据模型, 采用合理的抛光参数对光学玻璃进行抛光得到材料去除率曲线如图 3^[12]所示, 工件表面的压力分布曲线采用 Tekscan 超薄触觉传感器获得。

$$G_p = K \frac{\pi}{4} \rho_p d_p^4 \gamma^2 \quad (12)$$

式中, K 为(与颗粒的浓度, 机械性质, 载体流体阻尼性质, 流动几何形状等有关的)量纲一系数; ρ_p 为磨粒密度; d_p 为磨粒直径; γ 为剪切率。

图 3 理论压力曲线与试验去除速率曲线和压力分布的比较

图 3 中所示的结果说明所计算的磨粒作用力与材料去除率成正相关, 但试验过程中的测量误差导致理论与触觉传感器获得的流体法向应力之间存在一定误差。

1.4 基于仿真的材料去除模型

石峰等^[25]对抛光区域磁流变液在梯度磁场作用下的成核状态进行了理论分析与数值计算, 通过仿真计算出抛光区域剪切力与压力的数值分布, 根据实际材料去除机理拟合出剪切力与压力对材料去除的影响因子曲面 $K(x, z)$ 如图 4^[25]所示, 建立了

(a) 理论去除函数

图 4 理论与实际去除函数对比图

MRF 的材料去除三维数学模型, 如式(13)所示。并对口径为 100 mm 的 BK7 平面镜样片进行试验并对去除结果进行分析, 其中峰值去除效率的偏差为 3.36%, 体积去除效率偏差为 8.83%。

$$r(x, z) = cK(x, z) \quad (13)$$

式中, c 为材料去除效率常数, 可采用试验的方法确定。

文献[25]在仿真过程中未考虑次要因素以及系统计算误差导致仿真与试验结果存在一定误差。

磁流变材料去除模型的建模主要通过去除机理分析、理论推导、试验仿真及试验验证, 充分考虑磁流变抛光区域磁场、流场、力场相互耦合情况是精确建立 MRF 去除模型的基础。但是推导过程中存在抛光液黏滞力、重力、惯性力等误差, 导致去除模型不够精确。由于 MRF 区域无固定刚性边界, 即属于自由边界, 因此后期研究有必要对抛光区域边界的流体形态及剪切力进一步分析。此外, 需要避免加工过程抛光液成分损失而导致的剪切应力变化。

2 电流变抛光

WINSLOW 首先发现并提出电流变效应^[26]:

电流变液在高强度梯度电场下表现出 Bingham 介质特性, 且电场消失后流体状态可逆。日本学者 KURIYAGAWA^[27]将电流变效应应用于抛光加工中形成了电流变抛光(Electrorheological polishing, ERP)技术。ERP 能够通过调节外场来改变电流变液的黏度及外观形状, 形成具有自我更新能力的抛光头, 适用于各种金属及非金属材料的高表面质量、低亚表面损伤抛光加工。导电材料的 ERP 原理如图 5a^[28-29]所示, 工具与电源负极相连, 工件与电源正极相连, 通电后在工具与工件之间产生的非均匀梯度场^[28]使电流变液发生电流变效应。通过工具带动由磨粒构成的链状抛光刷与工件的相对运动实现工件材料去除。非导电材料的 ERP 原理图如图 5b 所示, 在工件安装位置添加一个与正极相连的辅助电极, 实现 ERP 抛光。为避免添加辅助电极, 张雷等^[29]

研制了一种无需辅助电极可对导体与非导体工件抛光的集成电极工具, 工具与工件之间的抛光间隙可达数毫米, 其原理图如图 5c 所示。

图 5 电流变抛光原理图

1. 导体工件 2. 高压电源 3. 工具电极 4. 磨粒 5. 电力线 6. 非导体工件 7. 辅助电极 8. 柔性抛光头 9. 绝缘棒 10. 铜片电极 11. 工件

2.1 基于试验研究的唯象模型

张雷等^[30]基于田口正交法和多变量线性回归试验, 分析了施加电压 U , 工具转速 n_t , 工件旋转速度 n_w , 抛光时间 T 和磨粒质量百分比 η 对工件材料去除的影响。得出用于计算 ERP 中工件材料最大材料去除深度 D_e 及表面粗糙度 R_y 的唯象模型, 如式(14)、(15)所示。通过碳化钨工件抛光试验结果与模型预测的比较发现, 最大材料去除深度随着施加电压、加工时间、磨粒质量百分比、工具和工件的旋转速度的增加而增加。工具或工件的旋转速度对工件表面粗糙度影响较小, 磨粒质量百分比越大, 表面粗糙度越小。该模型能预测抛光后最大材料深度以及表面粗糙度, 通过对加工参数的调整实现工件表面可控性加工要求, 为后期工艺优化研究打好了基础。

$$D_e = 96U^{0.093}n_t^{0.075}n_w^{0.1618}\eta^{0.5428}T^{0.6315} \quad (14)$$

$$R_y = \frac{51.76}{U^{0.0765}n_t^{0.0014}n_w^{0.0194}\eta^{0.1184}T^{0.2423}} \quad (15)$$

2.2 基于 Preston 方程的材料去除模型

赵王伟^[29]基于 Preston 方程, 通过分析 ERP 中由流体旋转产生的动压力 p_d 和电场产生的极化压力 p_f (浮力 p_g 忽略不计) 得到去除函数, 如式(16)所示。根据模型中的变量确定工艺参数对硬质合金工件进行抛光, 由试验结果可得到工件中心位置的材料去除量最小, 远离中心工件表面的材料去除量先增加后减少, 抛光实际的去除量与工件表面材料理论去除率曲线趋势一致。

$$MRR = Kr \left(2\rho_f \omega_0^2 r^2 + 3\varepsilon_0 \varepsilon_f \cdot \left[\phi_1 \left(\frac{\varepsilon_{ep} - \varepsilon_f}{\varepsilon_{ep} + 2\varepsilon_f} \right) + \phi_2 \left(\frac{\varepsilon_{ep} - \varepsilon_f}{\varepsilon_{ap} + 2\varepsilon_f} \right) \right] \int_0^E E dE \right) \quad (16)$$

式中, ρ_f 是电流变抛光液的密度; ω_0 是电极转速; r 为距离工件中心距离; ε_0 为真空中的相对介电系数; ε 为电流变流体的介电系数; E 为电场强度; ε_f 电流变液体基础液的相对介电系数; ε_{ep} 为淀粉颗粒的介电系数; ε_{ap} 为磨粒颗粒的介电系数。

LU 等^[31]对 ERP 进行了电场梯度的仿真, 仿真结果如图 6 所示, 针状抛光工具末端的场强和电场梯度最大, 离工具中心越远, 电场强度越低。材料去除率大小与外部电压成正比, 抛光间隙越大, 材料去除率越低。采用 Fe_3O_4 电流变液对光学玻璃进行抛光, 当外部电压从 0.3 kV 增加到 3 kV, 材料去除率从 0.03 mg 上升到 0.23 mg; 当加工间隙从 35 μm 缩短到 5 μm 时, 材料去除率从 0.13 mg 上升到 0.23 mg。

图6 电压分布和电场强度

研究得到电流变抛光过程中场强和电场梯度峰值均出现在针状抛光工具末端, 与抛光工具的距离越远, 电场强度越低^[29, 31]。此外, 赵云伟建立的去除函数模型详细地分析了硬质合金材料去除率与压力及抛光速度的关系, 为电流变抛光硬质合金材料去除规律研究奠定了基础。LU 初步定量分析了电压与去除率的变化规律, 但对于更精确的去除函数模型有待更进一步的研究。

电磁流变抛光 (Electro-magneto-rheological polishing, EMRP)^[32]是利用电磁流变液在同时添加电场和磁场时产生的“协同效应”的一种抛光方法。“协同效应”下电磁流变液形成的屈服应力高于电、磁场单独作用下的屈服应力, 大大提高了流变特性。LU 等^[33]在前人对电流变与磁流变的研究基础上提出电磁流变“协同效应”微磨头加工方法, 分析了 EMRP 机理。基于固相粒子的极化理论, 分析固相粒子及工件表面受力模型得到材料去除模型, 如式(17)所示。根据模型中微观粒子的受力情况, 控制电压、场强大小等参数, 对玻璃材料进行了不同参数下的定点抛光试验, 当外场场强增大、加工时间延长、初始间隙减小时, 电磁流变协同效

应微磨头的去除效果增强, 并得出各参数对加工影响程度为磁场励磁电压>电场电压>相对速度, 抛光后得到的玻璃表面轮廓与去除模型一致。

$$\text{MRR} = k\omega r \left(F_{\text{Gep}} - F_{\text{Bep}} - \sum_{i=1}^5 F_{\text{EepiY}} - \sum_{i=1}^5 F_{\text{MepiY}} - \sum_{i=1}^3 F_{\text{Eap-epiY}} \right) \quad (17)$$

式中, F_{Gep} 为固相粒子受到的重力; F_{EepY} 为粒子的静电力; F_{MepY} 为粒子间电场力; $F_{\text{Eap-ep}}$ 为磨粒对固相粒子的电场吸引力; F_{Bep} 为固相粒子受到的浮力; ω 为抛光工具角速度; r 为抛光点到旋转中心的向径。

文献[33]中建立了协同效应下固相粒子的理论受力模型、抛光压力计算模型、材料去除模型, 但是抛光过程中总力的大小是通过 Matlab 软件计算分析, 因此工件所受到的实际压力分布模型还需进一步验证。后期研究过程中的抛光系统需要添加力的测量系统, 进一步对抛光压力分布模型的正确性和有效性进行验证。

2.3 基于粒子作用力的材料去除模型

KIM 等^[34-36]对 ERP 过程中粒子间相互作用力及结构模型进行了初步探究, 研究得到 ERP 过程电流变颗粒间存在较大的吸引力, 并在场线方向上将磨粒吸附在表面。SU 等^[37]进一步对 ERP 机理进行研究, 建立了以淀粉和二氧化铈粒子为基础的抛光液成分的体心四方结构模型如图 7 所示, 推导出粒子间的相互作用力关系如式(18)~(20)所示。采用有限元软件分析了抛光轮周围的电场分布, 得出与文献[31]类似的场强分布结果。采用不同的电压以及加工距离对工件进行抛光试验, 电源电压越大、与抛光轮距离越近, 颗粒间作用力越大而使得电流变液刚度增加, 材料去除效率更高。采用优化后的抛光参数对工件抛光, 得到粗糙度 R_a 约为 1.04 nm 的光滑表面。

图7 ERP 中粒子的结构示意图

$$F_{T-a} = \left[\left(\sum_{k=1}^4 F_k \cdot \sin \alpha_k + \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^L F_{jk} \cdot \cos \beta_{jk} \cdot \sin \alpha_{jk} + \sum_{j=1}^L F_j \cdot \cos \theta_j \right)^2 \right]$$

$$\left(\sum_{j=1}^L F_j \cdot \sin \theta_j + \sum_{j=1}^L F_{jk} \cdot \sin \beta_{jk} \right)^2 \Bigg]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$F_{a-s}^Z = \sum_{j=1}^L 4F_j \cdot \sin \theta_j \quad (19)$$

$$F_{total-s}^Z = \sum_{j=1}^L 4F_j \cdot \sin \theta_j + \sum_{j=1}^L F_j \quad (20)$$

式中, F_{jk} 是粒子 A 与不同层中其它磨粒之间的相互吸引力; F_j 是淀粉颗粒与第 j 颗磨粒之间的相互吸引力; β_{jk} 第 jk 个磨粒和原点的连线跟 XOY 平面的夹角; α_{jk} 是原点和第 jk 个磨粒连线的投影跟 Y 轴的夹角; R_j 为原点和第 j 个磨粒之间的距离; θ_j 是原点和第 j 磨粒的连线跟 X 轴的角度。

文献[37]中得出了淀粉与磨粒的微结构作用模型, 对抛光过程中微粒的相互作用力进行描述, 并得到力与去除效率的关系, 但更精确的去除函数还需进一步研究。

掌握不同距离下的电场强度和梯度变化规律是研究 ERP 去除模型的关键, 分析在不同电场下颗粒间相互作用力以及对工件的作用力, 基于 Preston 方程进行去除机理的分析以及去除函数的建立。现在普遍被接受的是电场下粒子沿电场方向有序定向排列, 磨粒均匀分布在固相粒子之间, 形成链状的抛光刷, 由于所形成的电场为非均匀梯度场, 因此电场线上的粒子结合力、所形成抛光液的黏度规律需要作进一步研究。

3 磁射流抛光

磁射流抛光(Magnetorheological jet polishing, MJP)技术是美国 QED 公司首先提出的一种磁场辅助稳定射流束的抛光方法, 在局部轴向磁场的作用下, 低黏度的磁流变液能在毫秒量级时间内快速地转化为黏塑性的 Bingham 流体, 增强了射流束的稳定性, 其抛光原理如图 8 所示。MJP 技术结合了射

图 8 磁射流抛光加工原理图

1. 容器 2. 磁流变液回收过滤 3. 电磁铁线圈 4. 磁射流
5. 工件 6. 喷嘴 7. 泵

流技术和磁流变技术, 有效地解决了射流抛光射流束受空气扰动造成的发散、不稳定的问题, 能够保持准直的硬化射流束进行相对远距离的确定性精密抛光, 其对比图如图 9^[38]所示, MJP 适用于凹形高陡度非球面如深凹曲面等复杂面形的抛光。

图 9 射流束与磁射流束稳定性对比

3.1 基于计算流体动力学(CFD)理论的材料去除模型

张学成等^[39]基于 CFD 分析 MJP 的材料去除机理, 得到材料去除率与功 W 的关系如式(21)所示, 对去除模型中磁流变液射流的径向扩展流动对工件表面剪切力及所做功进行研究, 得出工件材料去除的主要作用力为磁流变液射流在工件表面的径向扩展流动而产生的剪切力, 通过 CFD 能够对抛光区域的去除轮廓进行预测。LEE 等^[40]对磁射流产生的应力能量波 W 做了相关研究并得出与 W 抛光参数的表达式。KORDONSKI 等^[41]进一步对层流产生的能量进行分析, 认为工件材料去除率与剪切应力和流体速度的乘积成正比, 并得出去除模型, 如式(22)所示。采用不同的影响参数对工件进行抛光, 得到试验去除和理论去除的量纲一轮廓如图 10^[41]所示, 两者具有较好的相关性。

$$MRR = k \frac{\tau}{f} U = k \frac{W}{f} \quad (21)$$

$$MRR = K \left| \tau_x \cdot V \right| \quad (22)$$

图 10 试验去除和理论去除的量纲一轮廓

式中, k 为准 Preston 常数; τ 、 τ_x 为表面剪切应力; f 为摩擦因数; V 为矢量流体速度。

戴一帆等^[42]对垂直抛光时材料去除函数进行研究, 通过将中心具有最小去除量的环状抛光区绕

着横向偏移距离为 1 mm 的偏心轴旋转, 消除了中心的凹坑并得到类似高斯形状的去除模型如图 11 所示, 优化后的去除函数能够大幅度减小残余误差, 避免工件表面波纹的产生。

图 11 优化前后的去除函数对比图

WANG 等^[43]基于流体冲击动力学理论, 对其偏心旋转运动方式分析如图 12 所示, 得出偏心旋转运动去除函数如式(23)所示, 针对去除函数中偏心距离对材料去除的影响, 通过设定趋向因子 F (越接近 1 即越趋向于高斯曲线), 模拟了采用不同偏心距离抛光后的表面轮廓形状, 当偏心距为 $0.8L$ 时, 得到具有最佳的去除分布。采用不同的偏心距离在光学玻璃上进行抛光试验, 当偏心距离约为 0.56 mm 时, 趋向因子 $F=0.969$, 得到类高斯的材料去除曲线, 能够更好地实现工件材料可控性去除。

图 12 偏心运动示意图

$$R_1(r_2) = \frac{1}{\omega} \cdot \int_{-\theta}^{\theta} R(d, \theta) d\theta_1$$

$$\begin{cases} \bar{\theta} = \arccos \left\{ \left[\frac{r_2^2 + e^2 - r^2}{(2r_2e)} \right] \right. \\ \left. \text{rect} \left[\frac{(r_2 - r)}{(2e)} \right] - \text{step}(r - e - r_2) \right\} \\ d = (e^2 + r^2 - 2er_2 \cos \theta_1)^{1/2} \quad 0 \leq r_2 \leq r + e \\ \theta = \arcsin \left(\frac{r_2 \sin \theta_1}{d} \right) \end{cases} \quad (23)$$

式中, e 为偏心距离; r 为偏心圆半径; r_1 为抛光区域的半径; r_2 为抛光区域中心点到偏心圆上一点的距离; θ 为 O_p 与 X 轴的夹角; θ_1 为 O_1P 与 X 轴的夹角。

YANG 等^[44]结合离散相模型(DPM)与 CFD, 进行不同磨粒浓度对材料去除的影响分析, 得到材料去除模型如式(24)所示。基于模型中压力、剪切力及抛光磨粒速度对去除函数的影响, 对工件进行抛光, 结果表明 45° 倾斜喷射可以产生类似斜面切割的抛光工具影响函数, 抛光后截面轮廓的 RMS 从 10.5 nm 下降到 1.4 nm , 没有产生新的边缘效应。

$$R(x, y) = \frac{d_z}{d_t} = \Gamma k \sum_{i=1}^n P |S \Delta v| \quad (24)$$

式中, Γ 为压力 P 和剪切力 S 的关系函数; k 为与加工参数相关的系数; Δv 为碰撞后单个磨粒的剪切速度变化。

文献[39]中只考虑了压力的切向作用, 而忽略抛光液冲击作用的影响, 导致试验得到的轮廓与去除模型存在误差。文献[42]基于文献[39]的研究, 通过偏心旋转抛光头修正工件材料的去除模型, 修正后的去除模型能够有效避免工件抛光过程中环状轮廓产生的高频误差, 达到了对工件表面较好地修型效果。WANG 等对偏心旋转的射流抛光做了进一步的研究, 通过仿真及试验得到了合理的偏心距离, 在该偏心距离下得到的去除模型比文献[42]更接近于高斯形状。

3.2 基于摩擦磨损理论的材料去除模型

KIM 等^[45]基于传统的磨损模型和颗粒流动理论, 对 MR 流体中磨粒的运动情况及工件表面上的应力进行分析, 并进一步研究射流抛光中的材料去除特性, 得到材料去除函数如式(25)~(27)所示。由于剪切速率、抛光液性质等抛光参数对去除函数影响较大, 因此采用不同浓度的 MR 流体、抛光速度对 BK7 玻璃样品进行定点抛光试验, 并分析每个抛光点的轮廓。在 10 m/s 的射流速度时, 摩擦应力在壁的子层中占主导地位, 材料去除速率与壁面剪切速率的平方成比例; 当射流速度增大至 30 m/s 时, 材料去除率与壁面剪切速率的三次幂成比例。

$$N = \frac{\lambda^{0.5} \rho_p D^2 \gamma}{\eta} \quad (25)$$

$$\frac{d_z}{d_t} = \frac{C_1}{H} \rho_p \lambda^2 D^3 \gamma^3 \quad N < 100 \quad (26)$$

$$\frac{d_z}{d_t} = \frac{C_2}{H} \lambda^{1.5} \eta D \gamma^2 \quad N > 100 \quad (27)$$

式中, C_1 、 C_2 为量纲一常数; H 为磨损表面硬度; ρ_p 为磨粒密度; λ 为粒子的线性浓度; γ 为剪切速率; D 为磨粒直径; η 为液体黏度; N 为表示两种流动方式的特征的量纲一 Bagnold 数, 即碰撞应力与黏性应力的比率。

MJP 所形成的工件表面具有 W 型轮廓特征, 采用偏心旋转的抛光方式能够有效改善工件表面波纹度, 得到类高斯型的去除函数, 有利于材料可控性去除。此外, 研究人员对于不同抛光角度下的材料去除模型进行了研究, 并能得到较好的工件表面质量, 但是对于不同角度下的去除函数以及最优入射角度下的去除模型有待作进一步的研究。

4 剪切增稠抛光

浙江工业大学吕冰海等^[46]提出了剪切增稠抛光(Shear thickening polishing, STP)。抛光原理如图 13 所示, 在具有剪切增稠特性的非牛顿流体中添加磨粒制备抛光液, 抛光时工件与抛光液产生相对运动, 工件和抛光液接触部分由于受到的剪切力作用而发生剪切增稠现象, 均匀分散在抛光液中的固体胶态粒子包裹磨粒形成粒子簇。接触区域抛光液的黏度急剧增大, 瞬间呈现固体特性, 增强了对磨粒的把持力, 在加工位置形成一个柔性“固着磨具”, 通过磨粒的微切削作用实现工件材料的高效、柔性加工。剪切增稠抛光液的流动特性能够针对不同曲率的曲面形成相对应形状的柔性“固着磨具”, 能够适用于复杂曲面的抛光^[47]。

图 13 剪切增稠抛光原理图

李敏等^[48]基于 Preston 方程和流体动力学理论, 对剪切增稠抛光液本构方程及剪切边界层进行理论分析, 研究材料去除与抛光液流变特性和工艺参数

之间的关系, 得到 STP 的材料去除模型, 如式(28)所示。由模型可得材料去除率与抛光液的黏性及速度有关, 鉴于此, 对 GCr15 轴承钢圆柱工件进行抛光试验, 90 min 后工件表面粗糙度由 $R_a 105.95$ nm 降至 $R_a 5.99$ nm, MRR 达到 $2.1 \mu\text{m}/\text{h}$, 且 MRR 理论值与试验值之间的相对误差仅为 6.12%。抛光液的黏度越大, 剪切增稠效果越好, MRR 越高; 黏性参数值 n 、 K 一定时, MRR 随着 U 的增大呈现幂函数增长趋势。

$$MRR = k_0 \cdot \frac{3nKU^{n+1}}{R\delta^{n+1}} \cdot \left(\frac{\cos^{2n-1}\varphi}{2n} \sin\varphi - \frac{1}{2n} \sin\varphi \cos^{2n+1}\varphi + \frac{2n-1}{2n} \int \cos^{2n-2}\varphi d\varphi - \frac{2n+1}{2n+2} \int \cos^{2n}\varphi d\varphi \right) \quad (28)$$

式中, k_0 为准 Preston 系数; $\varphi = \arctan(x / \sqrt{2Rh_0})$; R 为工件曲率半径; δ 为剪切层厚度; U 为特征速度; n 为抛光液的黏性参数; K 为稠度系数; h_0 为剪切弹性层的最小厚度。

文献[48]中所得出的模型能有效预测工件材料去除率, 但是抛光过程中抛光液的性质变化对去除函数具有较大的影响, 对去除函数曲线与实际去除轮廓造成一定的误差, 因此需要进一步研究不同粒径的磨粒及固相粒子对抛光液的流变性能影响规律, 这样才能更好的对 n 、 K 进行表征。

5 展望

(1) 柔性抛光方法将更趋向于集多种抛光方法优点于一体的复合抛光。如结合了磁流变及射流抛光的磁射流抛光很大程度上改进了射流柱发散、对抛光距离敏感等缺点。电磁流变抛光能够使得电磁流变液产生电流变和磁流变的协同效应, 增强抛光液的刚度。利用剪切增稠抛光与电解氧化的协同作用能够实现难加工金属材料的高效抛光。通过辅助场辅助的抛光方法如声波辅助剪切增稠抛光、超声辅助磁流变抛光、磁流变化学抛光等有待进一步研究。

(2) 为得出更精确的材料去除函数, 需要深入研究具有流变效应抛光液特性, 解决抛光过程中抛光液成分浓度、流变特性的波动问题, 通过控制辅助场实现抛光液流变性能如黏度、硬度等的稳定性和可控性。基于理论及仿真试验对工件材料的去除机理做进一步研究, 针对不同材料的物理化学特性, 优化抛光液配置及抛光参数。提高抛光设备的执行精度, 保证抛光过程中智能化控制系统的稳定性与精确性, 结合在线监测技术, 对各种参数进行实时监控并及时做出调整反馈。

(3) 为达到产品零件的高形状精度和表面完整性加工要求,除了精确的材料去除函数/模型,还迫切需要提出更精确的抛光去除驻留时间算法与路径规划函数,实现点、线、面的可控性去除。提高抛光过程中工件检测精度,有效反应抛光过程中工件表面形貌及材料去除量变化,对加工区域材料去除量分布进行准确表征。

参 考 文 献

- [1] 袁巨龙. 功能陶瓷的超精密加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
YUAN Julong. Ultra-precision machining technology for functional ceramics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000.
- [2] 袁巨龙, 王志伟, 文东辉, 等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 35-48.
Yuan Julong, WANG Zhiwei, WENG Donghui, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 35-48.
- [3] 李标, 李军, 高平, 等. 游离磨料和固结磨料研磨后亚表面裂纹层深度研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7): 895-905.
LI Biao, LI Jun, GAO Ping, et al. Study on the depth of subsurface crack layer after grinding of free abrasive and fixed abrasive [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(7): 895-905.
- [4] 袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 167-177.
YUAN Julong, WU Zhe, LÜ Binghai, et al. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 167-177.
- [5] KORDONSKI W, GOLINI D. Progress update in magnetorheological finishing[J]. International Journal of Modern Physics B, 1999, 13(14n16): 2205-2212.
- [6] LAMBROPOULOS J C, SU X, TONG F. Constitutive law for the densification of fused silica, with applications in polishing and microgrinding[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 79(6): 1441-1452.
- [7] DEGROOTE J E. Surface interactions between nanodiamonds and glass in magnetorheological finishing (MRF)[D]. Cambridge: Harvard University, 2007.
- [8] DEGROOTE J E, MARINO A E, WILSON J P, et al. Removal rate model for magnetorheological finishing of glass[J]. Applied Optics, 2007, 46(32): 7927-41.
- [9] SHOREY A B. Mechanisms of material removal in magnetorheological finishing(MRF) of glass[D]. Cambridge: Harvard University, 2000.
- [10] MAHAJAN U, BIELMANN M, SINGH R K. Abrasive effects in oxide chemical mechanical polishing[J]. MRS Proceedings, 1999, 566: 27-32.
- [11] DUNKEN H. Surface chemistry of optical glasses[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1991, 129(1-3): 64-75.
- [12] KORDONSKI W, GORODKIN S. Material removal in magnetorheological finishing of optics[J]. Applied Optics, 2011, 50(14): 1984-1994.
- [13] MIAO C. Frictional forces in material removal for glasses and ceramics using magnetorheological finishing[J]. Dissertations & Theses - Gradworks, 2010, 71(6): 3734-3619.
- [14] 张峰, 潘守甫, 张学军, 等. 磁流变抛光材料去除的研究[J]. 光学技术, 2001, 27(6): 522-523.
ZHANG Feng, PAN Shoufu, ZHANG Xuejun, et al. Research on material removal of magnetorheological finishing[J]. Optical Technology, 2001, 27(6): 522-523.
- [15] 张峰, 张学军, 余景池, 等. 磁流变抛光数学模型的建立[J]. 光学技术, 2000, 26(2): 190-192.
ZHANG Feng, ZHANG Xuejun, YU Jingchi, et al. Foundation of mathematics model of magnetorheological finishing. [J]. Optical Technology, 2000, 26(2): 190-192.
- [16] ZHANG Feng. Research progress of magnetorheological finishing technology at CIOMP[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 092202.
- [17] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 纳米金刚石磨料磁流变抛光材料去除机理与工艺研究[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(4): 25-30.
SHI Feng, DAI Yifan, PENG Xiaoqiang, et al. Study on the mechanism and arts of magnetorheological finishing (MRF) by nano-sized diamond abrasives[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(4): 25-30.
- [18] 张云, 冯之敬, 赵广木. 磁流变抛光工具及其去除函数[J]. 清华大学学报, 2004, 44(2): 190-193.
ZHANG Yun, FENG Zhijing, ZHAO Guangmu. Magnetorheological finishing tool and removal function[J]. Journal of Tsinghua University, 2004, 44(2): 190-193.
- [19] 徐志强. 小口径非球面斜轴磁流变抛光关键技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
XU Zhiqiang. Study on key technology of inclined magnetorheological polishing for micro aspherical surface [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [20] YIN Shaohui, XU Zhiqiang, CHEN Fengjun, et al. Inclined axis magnetorheological finishing technology for small aspherical surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(17): 33-38.
- [21] 彭小强, 戴一帆, 李圣怡. 磁流变抛光材料去除数学模型[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 67-70.
PENG Xiaoqiang DAI Yifan, LI Shengyi. Mathematical

- model for material removal of magnetorheological polishing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 67-70.
- [22] ZHANG Feihu, WANG Huijun, LUAN Dianrong, et al. Research on material removal of ultrasonic-magnetorheological compound finishing[J]. International Journal of Machining & Machinability of Materials, 2007, 2(1): 50-58.
- [23] ZHANG F H, WANG H J, LIU J F, et al. Study on the surface quality of optical glass in ultrasonic-magnetorheological compound finishing[J]. Key Engineering Materials, 2009, 389-390: 181-186.
- [24] ZHANG F H, YU X B, ZHANG Y. Analysis of tangential position error or removal function error in ultrasonic-magnetorheological combined finishing[J]. Key Engineering Materials, 2012, 516: 390-395.
- [25] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 磁流变抛光过程的材料去除三维模型[J]. 中国机械工程, 2009, 20(6): 644-648. SHI Feng, DAI Yifan, PENG Xiaoqiang, et al. Three-dimensional material removal model of magnetorheological finishing(MRF)[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(6): 644-648.
- [26] WINSLOW W M. Induced fibrillation of suspensions[J]. Journal of Applied Physics, 1949, 20(12): 1137-1140.
- [27] KURIYAGAWA T, SAEKI M, SYOJI K. Electrorheological fluid-assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts[J]. Precision Engineering, 2002, 26(4): 370-380.
- [28] 赵云伟. 电流变抛光硬质合金模具理论与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007. ZHAO Yunwei. Theoretical and experimental investigation into electrorheological polishing of WC molding dies[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [29] 张雷, 贺新升, 张莹, 等. 新型电流变抛光工具开发及其抛光试验[J]. 吉林大学学报, 2010, 40(4): 1009-1014. ZHANG Lei, HE Xinsheng, ZHANG Ying, et al. Development of new type ER fluid-assisted polishing tool and its polishing experiment[J]. Journal of Jilin University, 2010, 40(4): 1009-1014.
- [30] ZHANG L, KURIYAGAWA T, KAKU T, et al. Investigation into electrorheological fluid-assisted polishing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(12): 1461-1467.
- [31] LU J B, YAN Q S, TIAN H, et al. Polishing properties of tiny grinding wheel based on Fe_3O_4 , electrorheological fluid[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(11): 4954-4957.
- [32] KOYAMA K, MINAGAWA K, WATANABE T, et al. Electro-magneto-rheological effects in parallel-field and crossed-field systems[J]. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 1995, 58(2-3): 195-206.
- [33] LU J B. Parametric study of micro machining with instantaneous tiny-grinding wheel based on the magnetorheological effect of abrasive slurry[J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2008, 31(1): 113-124.
- [34] KIM W B, LEE S J, KIM Y J, et al. The electromechanical principle of electrorheological fluid-assisted polishing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(1): 81-88.
- [35] KIM W B, MIN B K, LEE S J. Development of a padless ultraprecision polishing method using electrorheological fluid[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2004, 155-156(1): 1293-1299.
- [36] KURIYAGAWA T, SAEKI M, SYOJI K. Electrorheological fluid-assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts[J]. Precision Engineering, 2002, 26(4): 370-380.
- [37] SU J, CHENG H, WEN Y, et al. Investigation into the mechanism for ultra smooth electrorheological finishing using wheel-like finishing tool[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 124-131.
- [38] TRICARD M, KORDONSKI W, SHOREY A, et al. Magnetorheological jet finishing of conformal, freeform and steep concave optics[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2006, 55(1): 309-312.
- [39] 张学成, 戴一帆, 李圣怡, 等. 基于 CFD 的磁射流抛光去除机理分析[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(4): 110-115. ZHANG Xuecheng, DAI Yifan, LI Shengyi, et al. Analysis of material removal mechanism in magnetorheological jet polishing by CFD[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(4): 110-115.
- [40] LEE J W, HA S J, CHO Y K, et al. Investigation of the polishing characteristics of metal materials and development of micro MR fluid jet polishing system for the ultra precision polishing of micro mold pattern[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2015, 29(5): 2205-2211.
- [41] KORDONSKI W, SHOREY A. Magnetorheological (MR) jet™ finishing technology[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2016, 18(12): 1127-1130.
- [42] 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.
- [43] WANG T, CHENG H B, DONG Z C, et al. Removal

- character of vertical jet polishing with eccentric rotation motion using magnetorheological fluid[J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2013, 213(9): 1532-1537.
- [44] YANG H, CHENG H, FENG Y, et al. Removal of millimeter-scale rolled edges using bevel-cut-like tool influence function in magnetorheological jet polishing[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(13): 3377-3384.
- [45] KIM W B, NAM E, MIN B K, et al. Material removal of glass by magnetorheological fluid jet[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2015, 16(4): 629-637.
- [46] LI M, LYU B, YUAN J, et al. Shear-thickening polishing method[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 94: 88-99.
- [47] 李敏, 袁巨龙, 吴喆, 等. 复杂曲面零件超精密加工方法的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(5): 178-191.
- LI Min, YUAN Julong, WU Zhe, et al. Progress in ultra-precision machining methods of complex curved parts[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(5): 178-191.
- [48] 李敏, 吕冰海, 袁巨龙, 等. 剪切增稠抛光材料去除数学模型[J]. *机械工程学报*, 2016, (07): 142-151.
- LI Min, LÜ Binghai, YUAN Julong, et al. Material removal mathematics model of shear thickening polishing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(7): 142-151.
-
- 作者简介:** 袁巨龙, 男, 1962 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密与超精密加工技术及装备。
E-mail: jlyuan@zjut.edu.cn
邵琦, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为精密与超精密加工技术及装备。
吕冰海(通信作者), 男, 1978 年出生, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为精密与超精密加工技术及装备。
E-mail: icewater7812@126.com