

文章编号 1004-924X(2012)11-2485-07

电磁流变效应微磨头加工的电磁耦合协同作用机理实验

路家斌*, 阎秋生, 潘继生, 高伟强

(广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:采用正交试验方法比较了锥形工具旋转和工作台旋转两种状态下的定点加工效果,实验研究了微磨头加工过程中的电磁耦合协同作用机理。在电磁耦合场中,固相粒子被极化形成电偶极子。当锥形工具旋转时,旋转的电偶极子由于洛伦兹力引起的自旋力偶的作用发生原位振动,对工件表面产生有规律的冲击,促进了材料去除,相对于工作台旋转模式其材料去除深度明显加大;但在电磁场较弱的微磨头外围,原位振动会对链串结构造成破坏,从而减小材料去除范围。电磁场耦合方式对电磁流变协同效应有很大影响,磁场励磁电压对材料去除的影响程度最大,其次是电场电压和旋转速度。在本文试验条件下,当锥形工具旋转且励磁电压较低(5 V)时具有较好的电磁流变协同加工效果。

关键词:电磁流变液;协同效应;微磨头加工;电磁耦合场;材料去除

中图分类号:TG580.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2485

Experiments of synergistic effect of electro-magnetically coupled field in EMR finishing

LU Jia-bin*, YAN Qiu-sheng, PAN Ji-sheng, GAO Wei-qiang

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

* Corresponding author, E-mail: lujiabin@gdut.edu.cn

Abstract: Orthogonal tests in two rotational modes (the rotational tool mode and the rotational worktable mode) are conducted to confirm the synergistic effect mechanism of an electro-magnetically coupled field in the Electro-Magneto-Rheological(EMR) effect-based tiny-grinding wheel finishing. Under the electro-magnetically coupled field, the EMR polarized particles of the rotational tiny-grinding wheel generate the Lorentz force and the spin couple, then the in situ vibration of the EMR particles due to the spin couple can impact regularly on the workpiece surface and promote material removal, so the material removal depth in the rotational tool mode is larger than that in the rotational worktable mode. However, if the interaction force of the particle chains is weak, the in situ vibration will break the particle chains and reduce the material removal. The couple mode of electric and magnetic field has a significant influence on the machining efficiency of the EMR finishing. It shows a good synergistic effect of the EMR finishing in the voltage of electric field of 1 kV and the excitation voltage of magnetic field of 5 V in the rotational tool mode.

收稿日期:2012-07-14;**修订日期:**2012-08-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 508750505, U1034006);广东省自然科学基金重点资助项目(No. 9251009001000009)

Key words: Electro-magneto-rheological (EMR) fluid; synergistic effect; tiny-grinding wheel finishing; electro-magnetically coupled field; materiel removal

1 引言

随着机电系统的进一步发展,对微尺寸零件的需求迅速增加,硬脆材料微结构的精细加工要求越来越高。电、磁流变液均属于智能材料,在外场作用下会产生流变效应,其黏度和屈服应力会急剧增大,表现为类似固体的力学性质。由于材料流变过程具有可逆性和可控性,因此,利用电、磁流变液的流变特性进行硬脆材料的加工已成为先进加工技术研究的热点之一,其中磁流变抛光方法已成为光学曲面抛光的主要方法之一^[1-2]。针对微型光学曲面抛光和微细结构加工对亚毫米直径微磨头的需求,基于电、磁流变效应分别提出的电流变效应微磨头和磁流变效应微磨头的加工方法,实现了硬脆材料的局部抛光和微细加工^[3-6],但材料去除效率较低。

电磁流变液综合了电流变液、磁流变液的优点,在电场和磁场同时作用时能够产生相互促进作用的“协同效应”,形成的屈服应力高于电场或磁场单独作用下的屈服应力甚至高于其总和^[7-8],可以更有效地对流变行为进行控制。为提高电、磁流变效应微磨头的加工效率,作者提出了基于电磁流变协同效应的微磨头加工方法^[9-10],将磨料混入电磁流变液中形成抛光工作液,用导电和导磁材料制作锥形工具,在锥形工具和工件之间同时形成高压电场和磁场,在电磁耦合场的作用下锥形工具端部形成电磁流变效应微磨头。利用电磁流变液的协同效应控制电磁流变效应微磨头的性能可以提高加工效率,实现硬脆材料的局部高效抛光和微细加工。通过试验研究了电场强度、磁场强度、磨粒特性、加工初始间隙、加工时间、工具基体材料等参数对加工过程的影响^[9-12],实现了光学玻璃等硬脆材料的微量塑性去除,得到了比较理想的微沟槽形状^[10]和较好的抛光效果^[12]。针对电磁耦合场的试验研究结果,提出了电磁流变效应微磨头加工中的电磁协同作用机理,建立了电磁流变效应微磨头分散粒子的力学模型,固相粒子产生的原位振动会直接影响微磨

头的材料去除效率^[13]。本文设计了锥形工具旋转和工作台旋转 2 种模式的试验装置,采用正交试验方法比较了 2 种旋转模式下的定点加工效果,进一步研究了电磁耦合协同作用机理。

2 实验部分

2.1 试验原理

根据电磁流变协同效应微磨头加工过程中电磁耦合协同作用机理^[13],在高压电场的作用下固相粒子被极化,形成一端带有正电荷、另一端带有负电荷的电偶极子,当电磁流变效应微磨头处于旋转运动状态时,电偶极子旋转产生切割磁力线运动,从而在电偶极子两端产生大小相同、方向相反的洛伦兹力,形成自旋力偶,使固相粒子绕本身心发生自旋,其受力模型如图 1 所示。但由于固相粒子极化和磁化的方向性,固相粒子间的电、磁场力会阻止固相粒子发生自旋,这样,固相粒子在自旋力偶产生的自旋转和外场作用力产生的阻止旋转的共同作用下努力寻求平衡,最终导致了固相粒子在链串位置附近做微小振动。固相粒子的微小原位振动对电磁流变效应微磨头加工有两种作用,当自旋力偶较小或外场强度较大时,自旋力偶引起的微小原位振动不足以破坏链串结构的稳定性,会对工件表面产生高频率的冲击,类似超声波振动辅助加工^[14]的作用,增加了抛光压力,促进了材料去

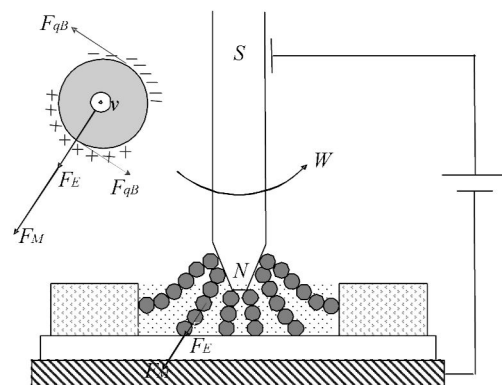


图 1 电磁耦合协同作用机理

Fig. 1 Mechanism of electromagnetic synergistic coupling

除;当自旋力偶太大或者外场强度较小时,固相粒子的原位振动会对链串造成破坏,影响电磁流变效应微磨头的稳定性及其性能,从而降低微磨头的材料去除能力。

由此可见,导致链串微小原位振动的根本原因是由于微磨头旋转而产生的电偶极子切割磁力线运动。当微磨头不旋转时,微磨头的链串不会切割磁力线,就不会产生自旋力偶,也就不会产生链串振动。为验证这一假设,需要对比研究锥形工具旋转和工作台旋转 2 种状况下的材料去除效果。

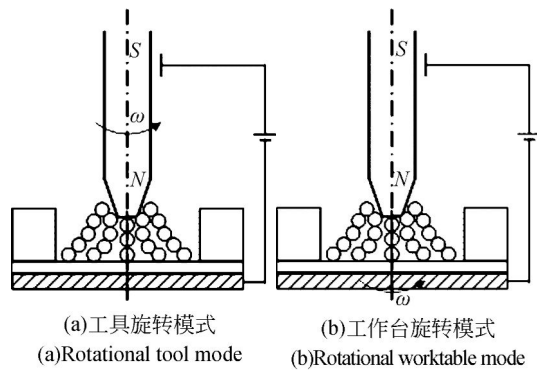


图 2 锥形工具及工作台旋转时微磨头工作原理图
Fig. 2 Machining principles of two rotational modes

2.2 试验装置

锥形工具旋转和工作台旋转时的加工原理图分别如图 2(a)、2(b)所示。在所研制的电磁流变效应微磨头加工试验装置^[6]基础上分别设计了 2 种旋转方式的电磁流变协同效应微磨头加工装置(如图 3 所示),通过电机分别控制锥形工具和工作台的旋转以实现 2 种旋转模式加工方式。驱动锥形工具和工作台旋转的微型电机相同,型号为 RK-370CA-10800,工作电压是 12~30 V,无负载最大转速为 5 100 r/min,最大功率输出时转速为 4 310

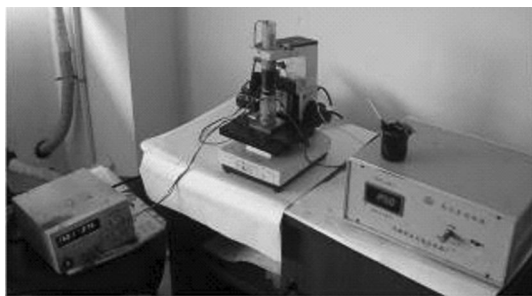


图 3 电磁流变协同效应微磨头加工试验装置
Fig. 3 Experimental device of EMR processing

r/min,通过改变电机的工作电压可以改变电机的转速。磁场由锥形工具外围的通电电磁线圈产生,漆包线直径为 0.25 mm,电磁线圈匝数为 2 400匝,线圈截面积为 330 mm²,高压直流电源的正负极分别与锥形工具和工作台相连来产生电场。

2.3 试验设计

根据前期研究^[9-13],影响电磁流变协同作用效果的主要参数是电场强度、磁场强度和旋转速度,为研究这些参数对电磁流变协同效应的影响程度以进行优化,采用正交试验法进行 2 种旋转模式下的试验。如表 1 所示,影响因素选择控制外场强度的电场电压、磁场励磁电压及旋转速度,不考虑各因素的交互作用,每个因素进行 5 个水平的试验,选用 L25(5⁶)正交试验表分别进行锥形工具旋转(工作台不旋转)、工作台旋转(锥形工具不旋转)2 种状态下的正交试验,每种状态下进行 25 组试验,每组试验进行 3 次,取其平均值作为该组合的试验结果。试验时对普通玻璃工件进行定点加工,利用 Taylor Hobson 轮廓仪测量圆形加工痕迹的轮廓曲线,根据轮廓曲线获得材料最大去除深度和最大直径来评价加工效果。具体的试验条件如下:加工时间为 10 min,锥形工具尖端与工件表面的初始间隙为 10 μm,采用的电磁流变液组分为:硅油 33.84%、Fe₃O₄ 粒子 57.34%、甘油 3%、金刚石 3%及少量稳定剂。

表 1 正交试验因素和水平表
Tab. 1 Factor and level of orthogonal test

因素	水平				
	1	2	3	4	5
高压电场电压(kV)	0	0.5	1.0	2.0	3.0
磁场励磁电压(V)	0	5	10	20	30
旋转速度/r·min ⁻¹	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000

3 试验结果与讨论

3.1 正交试验结果

在锥形工具旋转、工作台旋转 2 种模式下电磁流变效应微磨头加工的正交试验结果如表 2 所示。其中 K_h、K_d 分别表示各影响因素同一水平下同一评价指标(材料去除最大深度、最大直径)之和, R_h、R_d 则表示各影响因素的极差。

比较表 2 各影响因素的极差 R。对于最大加

工痕迹深度方面,无论是锥形工具旋转模式,还是工作台旋转模式,磁场励磁电压对试验结果的影响都最大,其次是电场电压,对试验结果影响最小的是旋转转速,并且电场电压和旋转速度的影响程度相差不大,而磁场励磁电压的影响要显著很多。比较 2 种旋转模式,锥形工具旋转时磁场励磁电压对试验结果的影响更大,通过对 K 值的比较发现,锥形工具旋转时,磁场励磁电压为 5 V 时

有较大的加工深度,这与文献[13]的试验结果一致,而在工作台旋转时,磁场强度越大,加工深度越大。这说明当锥形工具旋转时,磁场励磁电压为 5 V 时有较强的协同抛光效果,而工作台旋转时没有出现很强的协同抛光效果,这也进一步证实了文献[13]提出的电磁流变效应微磨头加工的协同作用模型,即自旋力偶引起的链串振动会促进材料去除。

表 2 2 种旋转时的正交试验结果

Tab. 2 Results of orthogonal test in two rotational modes

试验号	影响因素				工具旋转时评价指标		工作台旋转时评价指标			
	电场电压	励磁电压	空列	转速	空列	空列	加工直径 (mm)	加工深度 (m)	加工直径 (mm)	加工深度 (m)
1	1	1	1	1	1	1	0.00	0.000	0.00	0.000
2	1	2	2	2	2	2	1.00	12.359	1.15	8.128
3	1	3	3	3	3	3	0.61	3.067	1.07	6.942
4	1	4	4	4	4	4	0.99	13.109	1.21	9.152
5	1	5	5	5	5	5	1.15	12.983	1.45	13.784
6	2	1	2	3	4	5	0.50	2.811	0.38	0.820
7	2	2	3	4	5	1	1.12	15.964	1.03	6.854
8	2	3	4	5	1	2	1.15	12.148	0.55	1.648
9	2	4	5	1	2	3	0.76	4.880	1.08	4.436
10	2	5	1	2	3	4	1.10	15.016	1.29	7.200
11	3	1	3	5	2	4	0.68	1.719	0.40	0.900
12	3	2	4	1	3	5	1.17	15.520	0.43	1.011
13	3	3	5	2	4	1	1.07	9.669	1.02	7.476
14	3	4	1	3	5	2	1.03	9.102	1.36	13.167
15	3	5	2	4	1	3	1.16	16.041	1.30	13.986
16	4	1	4	2	5	3	1.00	9.801	1.00	5.328
17	4	2	5	3	1	4	1.05	12.837	1.21	14.719
18	4	3	1	4	2	5	0.45	1.500	1.13	10.365
19	4	4	2	5	3	1	1.11	10.982	1.36	14.287
20	4	5	3	1	4	2	1.09	13.090	1.30	11.792
21	5	1	5	4	3	2	0.43	1.230	0.80	3.269
22	5	2	1	5	4	3	0.86	9.668	1.11	7.101
23	5	3	2	1	5	4	0.48	1.620	0.42	0.950
24	5	4	3	2	1	5	0.62	4.636	1.10	8.809
25	5	5	4	3	2	1	1.00	14.177	1.23	7.224
K_{d1}	3.74/4.88	2.60/2.58		3.50/3.23						
K_{d2}	4.64/4.33	5.20/4.93		4.80/5.57						
K_{d3}	5.10/4.51	3.76/4.19		4.18/5.25						
K_{d4}	4.69/6.00	4.50/6.12		4.14/5.45						
K_{d5}	3.39/4.67	5.50/6.57		4.95/4.87						
R_d	1.71/1.68	2.90/3.98		1.45/2.34						
K_{k1}	41.518/38.005	15.561/10.317		35.109/18.189						
K_{k2}	50.819/20.957	66.347/37.813		51.481/36.941						
K_{k3}	52.051/36.540	28.004/27.381		41.993/42.871						
K_{k4}	48.210/56.491	42.709/49.850		47.844/43.625						
K_{k5}	31.331/27.352	71.307/53.985		47.500/37.720						
R_k	20.720/35.533	55.746/43.669		16.372/25.437						

在加工痕迹直径方面,2种旋转模式下磁场励磁电压的影响程度也是最大,电场电压和旋转速度的影响程度接近,均比磁场励磁电压的影响要小得多。工具旋转模式时各因素影响顺序为:磁场励磁电压>电场电压>旋转速度;工作台旋转模式时各因素影响顺序与工具旋转时略有不同,为:磁场励磁电压>旋转速度>电场电压。并且,工作台旋转时励磁电压变化对加工痕迹直径的影响程度要比锥形工具旋转时大,这说明旋转状态的不同,会直接影响电磁流变协同效应微磨头的加工效率。

综合考虑加工痕迹深度、加工痕迹直径和工艺条件的实施难度,锥形工具旋转时较佳的工艺参数选择如下:电场电压为 1 kV,磁场励磁电压为 5 V,旋转速度为 2 500 r/min;而工作台旋转时:电场电压为 2 kV,磁场励磁电压为 30 V,旋转速度为 3 500 r/min。

3.2 加工痕迹深度变化

2种旋转状态下电磁流变效应微磨头的加工材料去除深度的变化趋势如图 4。从表 2 的极差分析和图 4 的变化趋势可以看出,在 2 种状态下,影响定点加工痕迹深度的主要因素是磁场励磁电压,其次是电场电压。

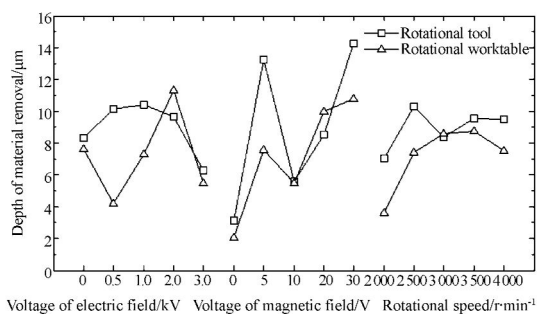


图 4 加工痕迹的深度变化

Fig. 4 Variations of maximal depths of material removal

2种旋转模式下提高励磁电压均可以增大加工痕迹深度。这时随着励磁电压的增加,磁场强度增大,电磁流变效应微磨头中各粒子间的连接力增大,导致微磨头对工件表面的抛光压力增大,材料去除效率提高,使得加工痕迹深度也随之增大。当励磁电压为 5 V 时,电磁流变效应出现明显的电磁协同效应,加工痕迹深度显著加深,而且在锥形工具旋转时加工痕迹深度要比工作台旋转时大很多。分析认为这是在电磁场协同作用下,固相粒子自旋

力偶产生的链串振动相当于在电磁流变效应微磨头加工中添加了振动模式,因此可以有效地提高材料去除能力。由文献[15]知,在磁性磨粒加工过程中,通过施加垂直方向(Z向)的振动能大幅度提高 304 不锈钢表面的抛光压力和材料去除效率,这与电磁流变效应微磨头加工中自旋力偶引起的链串振动有类似作用。理论上,工作台旋转、微磨头不旋转时,微磨头上的电偶极子不会做切割磁力线运动,故不会产生原位振动。但实际上,由于微磨头的链串与工件表面之间有抛光压力,当工件随着工作台旋转时,在抛光压力产生的摩擦力作用下链串会随着工件运动发生局部运动,从而造成链串的局部原位振动,但此时链串的运动比锥形工具旋转时要小得多,因此对加工效果的促进作用比工具旋转时要小得多。

随着电场电压的增大,在锥形工具旋转时材料去除深度先增大后减小,在电场电压为 1 kV 时出现峰值,此时加工痕迹的深度最大,在工作台旋转时电场电压在 2 kV 时出现最大深度,2种旋转状态下当电场电压达到 3 kV 时加工痕迹的深度均显著减小。

工具与工件相对旋转速度对加工痕迹深度的影响是先增大后略有减小,可以认为是运动速度增大有利于材料去除,但随着转速增大磨粒所受离心力也增大,这会使磨粒浓度下降最终导致微磨头对工件表面的抛光压力降低,材料去除效率减小。相同旋转速度时,锥形工具旋转时的加工痕迹深度均比工作台旋转时大,2种旋转状态下出现去除深度最大时的转速不同,锥形工具旋转时去除深度最大时的转速为 2 500 r/min,而工作台旋转式时则为 3 500 r/min,这进一步说明在锥形工具旋转时发生了链串振动,促进了材料去除。

3.3 加工痕迹直径变化

图 5 显示了在 2 种旋转状态下,电场电压、电磁场励磁电压和旋转速度对加工痕迹直径的影响程度和趋势。从表 2 的极差分析和图 5 的变化趋势可以看出,在 2 种状态下,影响加工痕迹直径的主要因素是磁场励磁电压,其次是电场电压和旋转速度。

由图 5 可见,磁场励磁电压对 2 种旋转状态下微磨头加工直径影响的变化趋势一致,提高励磁电压可以增大加工痕迹直径。分析认为随着励磁电压的增加,磁场强度增大,电磁流变协同效应微磨头中各粒子之间的连接力增大,微磨头直径变大,造成加工痕迹直径增大。但当励磁电压为 5 V 时

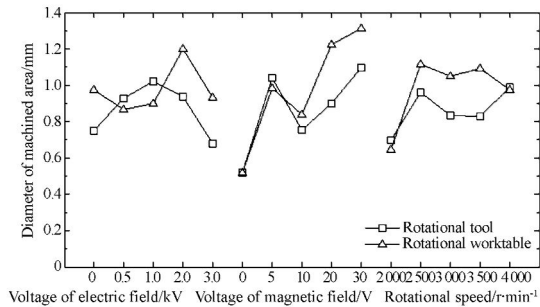


图 5 加工痕迹的直径变化

Fig. 5 Variations of material removal diameter

出现突变,是因为此时出现了明显的电磁流变协同效应,协同效应引起的链串振动会对工件表面产生冲击,提高了抛光压力,从而提高了材料去除直径。

比较 2 种旋转状态,工具旋转时的加工痕迹直径比工作台旋转时小。这是因为链串的原位振动对链串结构有双重作用,在链串连接强度高时,链串的振动不会破坏链串结构,在加工时链串振动对工件表面产生冲击,提高了材料去除范围;但在链串连接强度低的地方,链串的振动会破坏链串结构,促使链串断裂,因而减小材料去除范围。在锥形工具旋转时,电磁流变效应微磨头外围的外场强度低,链串中粒子间的连接力小,在离心力和链串振动的双重破坏作用下,链串容易断裂并从微磨头中脱离,造成微磨头直径变小,抛光范围变小,因而产生了工具旋转时的加工痕迹直径比工作台旋转时小的现象。

对于电场电压的影响,2 种旋转状态的变化趋势略有不同。锥形工具旋转时,电场电压达到 1 kV 时出现材料去除直径最大值;而在工作台旋转时电场电压为 2 kV 时出现最大值,电场电压继续增大,加工痕迹直径逐渐减小。比较 2 种旋转模式下的加工痕迹直径,电场电压在 0.5~1 kV 时,锥形工具旋转时的加工区域、直径反而比工作台旋转时的要大,这是由于锥形工具旋转时,电磁流变效应微磨头外围处的固相粒子产生的自旋力偶促使链串

振动,对材料去除有一定的加强作用。但当自旋力偶过大时,链串振动加剧,会导致链串断裂而脱离微磨头,反而不利于材料去除。

旋转速度对加工痕迹直径的影响是先增大、后减小,2 种旋转模式下均在转速 2 500 r/min 时达到最大,这说明适当的旋转速度对电磁流变效应微磨头加工有较好的效果。另外,由于微磨头外围固相粒子的离心力和链串振动的双重破坏作用,锥形工具旋转时的微磨头直径较小,导致加工痕迹直径比工作台旋转时的要小。

4 结 论

本文对电磁流变效应微磨头加工过程设计了锥形工具旋转和工作台旋转 2 种模式下的实验,并对每种模式进行了 3 种因素(电场电压、磁场励磁电压及旋转速度)的 5 个水平正交实验。由正交实验结果可知,电磁场耦合方式对电磁流变效应微磨头加工中的协同效应有决定性影响,其中,磁场励磁电压对加工效率的影响程度最大,其次是电场电压和旋转速度。当锥形工具旋转时,在电场电压为 1 kV、励磁电压为 5 V 条件下具有较好的电磁流变协同效应,微磨头的加工效率较高。

通过分析 3 种因素对加工痕迹深度和加工痕迹直径的影响,可知,2 种旋转模式下,在励磁电压为 5 V 时,加工痕迹深度和加工痕迹直径都显著增加,并且当锥形工具旋转时加工痕迹深度要较工作台旋转时更为显著,分析认为这是在电磁场协同作用下,固相粒子自旋力偶产生的链串振动相当于在加工中添加了振动模式,进一步证明了电磁流变效应微磨头加工中的电磁协同作用机理。同时,通过实验结果还可以看出,固相粒子的原位振动对微磨头链串结构有双重作用,在链串连接强度高时,固相粒子的原位振动不会破坏链串结构,反而对工件表面会产生有规律的冲击,能提高材料去除效果;但在链串连接强度低的地方,原位振动会对链串造成破坏,促使链串断裂,从而减小材料去除范围。

参考文献:

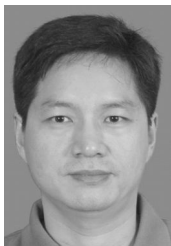
- [1] ZHONG Z W. Recent advances in polishing of advanced materials[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2008, 23(5): 449-456.
- [2] KORDONSKI W, GORODKIN S. Material removal

in magnetorheological finishing of optics[J]. *Applied Optics*, 2011, 50: 1984-1994.

- [3] TANAKA T. Polishing performance of electro-rheological fluid of polymerized liquid crystal contained abrasive grit [J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 404: 123-130.

- [4] ZHAO Y W, ZHANG L, YANG ZH. Investigation into normal pressure during electrorheological fluid-assisted polishing [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 503-504(4): 119-122.
- [5] LU J B, YAN Q SH, 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.
- [6] LU J B, YAN Q SH, YU J, *et al.*. 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.
- [7] 魏宸官. 电流变技术-机理·材料·工程应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.
WEI CH G. *Electrorheological Technology-Theroy Material Engineering Applications*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [8] KOYAMA K, MINAGAWA K, WATANABE T, *et al.*. Electro-magneto-rheological effects in parallel-field and crossed-field systems[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1995, 58(2-3): 195-206.
- [9] TIAN H, YAN Q SH, LU J B, *et al.*. Foundational study on micro machining with instantaneous tiny-grinding wheel based on electro-magneto-rheological effect[C]. In: *SPIE 2007 Proc 3rd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, Chengdu, China, July 08-12, 2007*, 6724: 7240-7248.
- [10] LIU Y, YAN Q SH, LU J B, *et al.*. Micro machining of three-dimensional microstructure with the tiny-grinding wheel based on the electro-magneto-rheological effect[J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 407-408: 363-367.
- [11] LIU Y, YAN Q SH, LU J B, *et al.*. Effect of tool cone angle on micro machining based on the EMR effect [J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 447-448: 198-202.
- [12] LU J B, YAN Q SH, TIAN H, *et al.*. Effect of abrasive on the machining performance of the EMR-effect-based tiny-grinding wheel [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 135: 24-29.
- [13] 路家斌, 阎秋生, 田虹, 等. 电磁流变效应微磨头抛光加工电磁协同作用机理[J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(2): 190-196.
LU J B, YAN Q SH, TIAN H, *et al.*. Synergistic effect of electro-magnetically coupled field in polishing with the EMR effect-based tiny-grinding wheel[J]. *Mocaxue Xuebao/Tribology*, 2010, 30(2): 190-196. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] YIN SH H, SHINMURA T. A comparative study: polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44(4): 383-390.

作者简介:



路家斌(1970—),男,湖北钟祥人,博士,副教授,1992年于天津科技大学获得学士学位,1995年于武汉理工大学获得硕士学位,2011年于广东工业大学获得博士学位,主要从事超精密加工、精密分切方向的研究。E-mail: lujiabin@gdut.edu.cn



阎秋生(1962—),男,山西襄汾人,博士,教授,博士生导师,1984年于天津大学获得学士学位,1990年于天津大学硕博连读获得博士学位,主要从事微纳加工、光电子/微电子材料磨粒加工、金属材料低碳节材加工等方面的研究。E-mail: qsyang@gdut.edu.cn



潘继生(1980—),男,广东罗定人,博士研究生,讲师,2004年、2007年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学材料超精密加工、机械传动装置与高性能传动系统等方面的研究。E-mail: panjisheng@gdut.edu.cn



高伟强(1964—),男,广东广州人,博士,副教授,1986年于广东工业大学获得学士学位,2003年于俄罗斯“斯坦金”国立莫斯科工业大学获得博士学位,主要从事光学材料超精密加工、数控系统装备等方面的研究。E-mail: wqgalt@139.com