

湿式主轴式滚磨光整加工中铝合金试件的材料去除行为研究

王程伟^{1,2}, 李秀红^{1,2}, 李文辉^{1,2}, 王娜^{1,2}, 曹波^{1,2}

(1.太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024; 2.精密加工山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: **目的** 针对湿式主轴式滚磨光整加工工艺, 提出适用于铝合金试件光整加工的材料去除模型。**方法** 通过 FLUENT 两相流模块模拟不同参数下 $p-v$ 值, 用响应曲面法拟合 4 个主要参数和 $p-v$ 的多元回归模型, 在此基础上, 基于 Preston 方程建立修正的材料去除模型, 进行加工实验, 探究工件的 MRR、加工后 R_a 和表面形貌之间的关系。**结果** 方差分析中, 工件轴心距筒壁距离和滚筒转速项的 $P < 0.05$, 两者对 MRR 影响显著, 且前者与 MRR 负相关, 后者与 MRR 正相关。对模型进行加工实验验证, 工件 MRR_{th} 和 MRR_{ex} 的平均相对误差仅为 6.32%, 证明模型的有效性。随工件 MRR 的递增, 加工后 R_a 值先减后增, MRR 值为 21 mg/h 时, R_a 为 0.816 μm , 工件刀纹仍很明显; MRR 值为 59 mg/h 时, R_a 达到最低值 0.472 μm , 工件刀纹完全去除, 表面纹理细致平整, 加工效果最佳; 当 MRR 达极值时, R_a 为 0.693 μm , 表面纹理变得粗糙不平, 由于滚抛磨块的加工能力过强, 导致加工效果较差。**结论** 建立了以工艺参数为自变量的材料去除模型, 为选择参数提供一定的理论依据, 且实验研究得出, 加工能力与加工效果之间不存在正向相关性。

关键词: 滚磨光整加工; 湿式; 主轴式; 铝合金; 材料去除模型; 数值模拟; 响应曲面法

中图分类号: TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)09-0307-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.09.037

Material Removal Behavior of Aluminum Alloy Workpiece in Wet Spindle Barrel Finishing Process

WANG Cheng-wei^{1,2}, LI Xiu-hong^{1,2}, LI Wen-hui^{1,2}, WANG Na^{1,2}, CAO Bo^{1,2}

(1.School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2.Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a material removal model suitable for finishing of aluminum alloy workpiece during the wet spindle-type barrel finishing. The FLUENT two-phase flow module was used to simulate the $p-v$ value under different parameters, and the response surface method was used to fit the multiple regression model of four main parameters and $p-v$. Based on this, a modified material removal model was established based on the Preston equation to perform processing

收稿日期: 2018-11-17; 修订日期: 2019-02-20

Received: 2018-11-17; Revised: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51875389); 山西省自然科学基金 (201701D121073, 201801D111002)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51875389), Shanxi Natural Science Foundation (201701D121073, 201801D111002)

作者简介: 王程伟 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为零件表面精密加工。

Biography: WANG Cheng-wei (1992—), Male, Master, Research focus: finishing technology of the precision surface.

通讯作者: 李秀红 (1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为零件表面精密加工。邮箱: xhli7489@sina.com

Corresponding author: LI Xiu-hong (1972—), Female, Doctor, Professor, Research focus: finishing technology of the precision surface. E-mail: xhli7489@sina.com

experiments and investigate the relationship between MRR, R_a after processing and surface topography of the workpiece. P value of the workpiece axial distance from the wall and the drum speed term was <0.05 in the analysis of variance and had significant influence on MRR (the former was negatively correlated with MRR and the latter was positively correlated with MRR). The model was verified by experiment. The average relative error of workpiece's MRR_{th} and MRR_{ex} was only 6.32%, thus proving the validity of the model. With the increase of MRR, R_a after processing firstly decreased and then increased. MRR was 21 mg/h, R_a was 0.816 μm and the knife was still very obvious. When MRR value was 59 mg/h, the lowest value of R_a was 0.472 μm , the knife was completely removed, the surface texture was smooth and the processing effect was the best. When MRR reached the extreme value, R_a was 0.693 μm , the surface texture became rough and uneven, and the processing effect was poor due to excessive processing ability of the abrasive block. A material removal model with process parameters as independent variables is established to provide theoretical basis for selecting parameters; and experimental research shows that there is no positive correlation between processing capacity and effect.

KEY WORDS: barrel finishing; wet type; spindle-type; aluminum alloy; material removal model; numerical simulation; response surface methodology

随着高端装备发展,对零部件的表面质量和表层性能提出越来越高的要求。滚磨光整加工作为一种典型的自由磨具光整加工方法,是提高表面物理力学性能、改善表面完整性的主要途径,因其加工成本低、效率高、易于自动化等优点而被广泛应用^[1-2]。

在滚磨光整加工领域,国内外学者依据多种评价指标,对所达到的加工效果进行分析论证。LI Xiuhong 等^[3]使用 CCD 激光位移传感器测试速度,并绘制主轴式滚磨光整加工中滚抛磨块速度的概率分布曲线,指导工件选择适当的加工位置。Boschetto A 等^[4-5]在滚磨光整加工中,基于无塑性变形和峰值切割发生的假设,建立能够反映加工效果的粗糙度预测模型。李秀红等^[6]使用滚磨光整工艺加工钛合金 TC4 工件,主要研究工艺参数对显微硬度、残余应力之间的影响规律,并分析提高抗疲劳性能的机理。材料去除率 (Material removal rate, MRR) 作为其中一个评价加工效果的重要指标,人们以其为依据对滚磨光整加工工艺进行了大量研究。LI Xiuhong 等^[7]在铝合金轮毂的滚磨光整加工中,获得了聚氨酯介质的材料去除模型。Li Wenhui 等^[8]分析在一种新的半固态磁性介质加工下, MRR 与磁压和加工速度间的函数关系。Misra A 等^[9]通过研究磨料颗粒的运动规律和材料去除,将精加工总材料去除归为稳态和瞬态两个独立现象。Kitajima K 等^[10]在干式离心式滚磨光整加工中,研究在不同滚筒转速下,材料去除等指标的变化规律。Buj-Corral I 等^[11]得到立方氮化硼磨料光整加工钢瓶时, MRR 主要取决于晶粒尺寸、加工压力和磨料切向速度。邵新智^[12]研究了在离心式滚磨光整加工中,滚筒转速和磨块直径对 MC 尼龙组合试件单面材料去除的影响。但以上研究都集中在具体的加工条件和加工方式对工件 MRR 的影响,并没有系统地建立 MRR 和工艺参数的关系模型,不能实现加工精度的有效控制,无法将研究成果广泛地应用于生

产实际。

传统光整加工中常采用试错法确定工艺参数,需花大量时间。为优化工艺参数,文中针对湿式主轴式滚磨光整加工,应用 FLUENT 固液两相流模拟在不同工艺参数下 $p-v$ 值,根据响应曲面法拟合工艺参数和 $p-v$ 的多元回归模型,基于 Preston 方程,利用实验求解在湿式主轴式滚磨光整加工中,介质流场作用下特定的 Preston 系数,建立以工艺参数为自变量的材料去除模型,并通过加工实验,对建立的材料去除模型进行验证和对比分析。

1 主轴式滚磨光整加工方法

主轴式滚磨光整加工原理如图 1 所示,加工设备结构参数如表 1 所示。主轴式滚磨光整加工设备是由交流电动机作为驱动器,产生的扭矩源通过 V 带传动机构 (主动带轮、传动带和从动带轮) 传动到旋转轴,旋转轴连接承载平台,滚筒在承载平台上旋转,夹具固定于三角卡盘并把一端伸入筒中,设备的滚筒转速可以通过变频驱动器进行调整。

加工时,滚筒内装入加工介质 (成分为滚抛磨块和液体介质),工件固定在夹具上,加工介质在离心力作用下产生强制流动层,形成旋转流场,介质流场和工件表面之间发生相对运动、碰撞和滑擦,使工件达到材料去除和抛光效果。

滚磨光整加工中加入液体介质的必要性: ①加工过程中,工件表面由磨削作用去除材料杂质,液体介质起到及时清洗的作用,防止划痕,提高工件的表面质量; ②在工件的微观表面,液体介质包覆在单颗磨粒上起缓冲、润滑作用,使加工后工件表面的波峰、波谷趋于平缓,得到更小的表面粗糙度值; ③滚抛磨块和液体介质形成固液两相湍流场,使加工介质的运动规律更复杂,提高工件表面的加工均匀性。

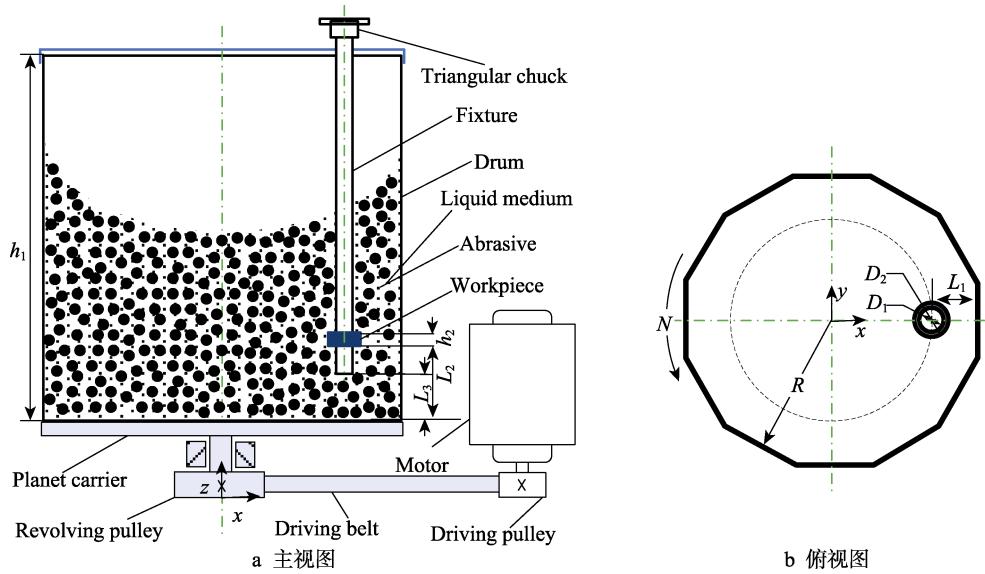


图 1 主轴式滚磨光整加工原理简图
Fig.1 Schematic diagram of spindle barrel finishing process: a) front view; b) vertical view

表 1 主轴式滚磨光整加工设备结构参数
Tab.1 Structural parameters of spindle barrel finishing process equipment

Parameters	Value
Inscribed circle radius of the drum R/mm	320
Effective depth of the drum h_1/mm	600
Workpiece height h_2/mm	20
Fixture diameter D_1/mm	34
Workpiece diameter D_2/mm	40
The distance between workpiece axis and drum wall L_1/mm	100
The distance between fixture bottom and drum bottom L_2/mm	100
The distance between workpiece bottom and drum bottom L_3/mm	190

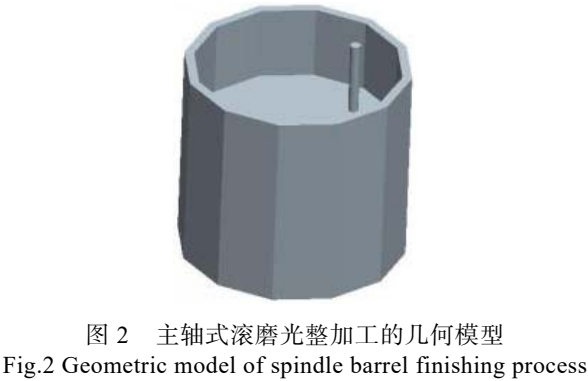


图 2 主轴式滚磨光整加工的几何模型
Fig.2 Geometric model of spindle barrel finishing process

2 主轴式滚磨光整加工模拟及实验

2.1 数值模拟

主轴式滚磨光整加工设备的几何模型见图 2，按照表 1 的结构参数建模，参照文献[13]，滚筒中加工介质装入量为 60%，由加工介质区域、工件表面和夹具表面组合构成计算区域，用 Mesh 模块将计算区域划分为四面体网格（如图 3 所示），在工件和夹具表面设定 5 层膨胀层进行加密，网格总数 92 074，网格质量达到 0.9 以上。压力出口的相对压强为 0 MPa，滚筒为旋转壁面，工件和夹具为固定无滑移壁面。

采用压力稳态求解器，Standard $k-\epsilon$ 湍流模型，由于加工介质包括滚抛磨块和液体介质，所以利用 Mixture 固液两相流模型模拟，其中固体相为球形颗粒，液体相为液态水，压力-速度耦合方式为 SIMPLE 算法，控制方程离散格式设为一阶迎风格式，收敛精度为 10^{-5} 。

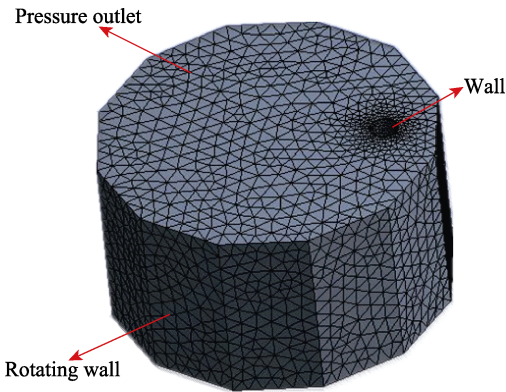


图 3 计算区域网格模型
Fig.3 Meshing model of compute area

2.2 加工实验与测试

自制研究的主轴式滚磨光整加工设备如图 4 所示，其结构参数如表 1。滚筒中加工介质（其中滚抛磨块选用球形棕刚玉材质，液体介质为水）装入量为 60%，工件为铝合金圆管（尺寸参数：外径 40 mm，内径 34 mm，长 20 mm），加工时间为 20 min。采用 Perthometer M2 表面粗糙度测量仪测试加工前后工件

表面的 R_a ，用 MP200A 电子天平测试加工前后工件质量，用 VHX-700FC 型超景深三维电控显微镜测得工件表面显微图。

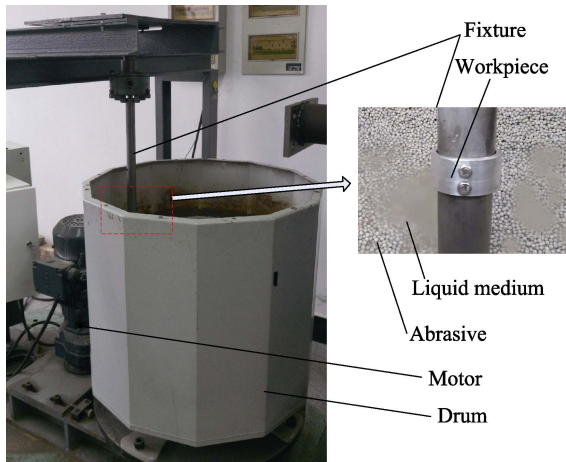


图 4 主轴式滚磨光整加工设备
Fig.4 Spindle barrel finishing process equipment

3 材料去除基本模型

Preston 方程是广泛应用于磨削加工中材料去除量计算的经验公式，其将磨块速度和磨块对工件表面压力之外所有因素归为一个比例常数 k 。由于滚抛磨块受液体介质湍流场的影响，其加工工件时的路径具有流场特性，传统的 Preston 方程很难准确地描述固液两相加工介质的材料去除机理，所以引入修正系数 $k_0^{[10]}$ ，依据 Preston 方程，湿式主轴式滚磨光整加工的 MRR 可描述为：

$$MRR = k_0 \cdot p \cdot v \quad (1)$$

式中： p 为工件表面与滚抛磨块所有接触点的瞬时平均载荷； v 为与工件表面接触的所有滚抛磨块的瞬时平均速度； k_0 为 Preston 系数，其在一定的加工工艺条件下为常数，受滚抛磨块硬度和被加工工件硬度、滚抛磨块作用力和工件表面角度、液体介质等因素的影响。

4 响应曲面法实验设计与结果分析

为建立不同工艺参数和 MMR 的数学模型，先得出 $p \cdot v$ 和不同参数间的关系至关重要。所以首先利用响应曲面法拟合出 $p \cdot v$ 和不同参数间的多元回归模型，为之后 MMR 数学模型的建立提供基础。

4.1 实验设计

采用中心复合设计，根据文献[1]，选取对主轴式滚磨光整加工效果具有一定影响的 4 个工艺参数（滚筒转速、工件轴心距筒壁距离、磨块直径和加工介质中滚抛磨块占比）为自变量 X ，分别以 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 表示，并选定 4 个工艺参数的水平范围，响应曲面模型的影响因子水平及编码如表 2 所示。

表 2 响应曲面模型的影响因子水平及编码

Tab.2 Impact factor level and code of response surface model

Factor code	Impact factor	Coding level				
		$-\alpha$	-1	0	1	α
X_1	Rotating velocity of barrel/(r·min ⁻¹)	50	60	70	80	90
X_2	Distance between workpiece axis and wall/mm	90	100	110	120	130
X_3	Abrasive diameter/mm	3	4	5	6	7
X_4	Abrasive ratio/%	50	55	60	65	70

4.2 结果分析

实验中心点为 7 个，在 FLUENT 中共进行 31 组加工过程的数值模拟，将每组模拟结果的 p （工件表面与滚抛磨块所有接触点的瞬时平均载荷）和 v （与工件表面接触的所有滚抛磨块的瞬时平均速度）分别提取出，相乘得到响应曲面法结果分析需要的 $p \cdot v$ 值。采用 Minitab 分析数据，中心复合设计与实验结果如表 3 所示。

表 3 中心复合设计与实验结果

Tab.3 Central composite design and experimental results

Standard sequence	Operation sequence	Rotating velocity of barrel/(r·min ⁻¹)	Distance between workpiece axis and wall/mm	Abrasive diameter/mm	Abrasive ratio/%	$p \cdot v(Y)/(\text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
27	1	70	110	5	60	23.7730
13	2	60	100	6	65	34.1615
10	3	80	100	4	65	95.3689
31	4	70	110	5	60	23.7730
22	5	70	110	7	60	23.2090
23	6	70	110	5	50	21.4010
11	7	60	120	4	65	19.5156
28	8	70	110	5	60	23.7730
17	9	50	110	5	60	8.2685
8	10	80	120	6	55	39.2292

续表 3

Standard sequence	Operation sequence	Rotating velocity of barrel/(r·min ⁻¹)	Distance between workpiece axis and wall/mm	Abrasive diameter/mm	Abrasive ratio/%	$p\cdot v(Y)$ /(MPa·m·s ⁻¹)
18	11	90	110	5	60	54.4806
26	12	70	110	5	60	23.7730
4	13	80	120	4	55	43.5808
1	14	60	100	4	55	31.3617
7	15	60	120	6	55	15.2576
21	16	70	110	3	60	26.9446
25	17	70	110	5	60	23.7730
16	18	80	120	6	65	44.5230
30	19	70	110	5	60	23.7730
5	20	60	100	6	55	26.8661
9	21	60	100	4	65	39.6705
2	22	80	100	4	55	75.2176
6	23	80	100	6	55	73.0779
20	24	70	130	5	60	23.8957
19	25	70	90	5	60	74.8796
29	26	70	110	5	60	23.7730
3	27	60	120	4	55	17.4010
24	28	70	110	5	70	26.6081
14	29	80	100	6	65	84.6012
12	30	80	120	4	65	51.3531
15	31	60	120	6	65	18.2048

根据表 4 可知, 预测模型 4 因素项的影响程度依次为: 工件轴心距筒壁距离>滚筒速度>滚抛磨块占比>磨块直径。其中有两个因素的 $P<0.05$, 对目标函数影响显著。所以要想得到不同的加工效果, 主要通过改变滚筒转速和工件轴心距筒壁距离来实现。模型 P 值为 0, 说明回归效果较好; 平方项 P 值为 0.001, 对 $p\cdot v$ 的影响作用十分显著; 双因子交互作用项 P 值为 0.272, 对 $p\cdot v$ 的影响不明显。

表 4 $p\cdot v$ 的方差分析
Tab.4 Variance analysis of $p\cdot v$

Source	DOF	Adj SS	Adj MS	F value	P value
Model	14	13 890.2	992.16	14.15	0.000
Linear	4	10 976.9	2744.23	39.14	0.000
X_1	1	6565.0	6564.96	93.63	0.000
X_2	1	4088.0	4087.99	58.30	0.000
X_4	1	239.5	239.53	3.42	0.083
Square	4	2321.8	580.44	8.28	0.001
X_1^2	1	430.4	430.43	6.14	0.025
X_2^2	1	2009.6	2009.56	28.66	0.000
X_3^2	1	152.0	152.0	2.17	0.160
Two-factor interaction	6	591.5	98.59	1.41	0.272
X_1X_2	1	482.9	482.89	6.89	0.018
Error	16	1121.8	70.11		
Misfit	10	1121.8	112.18	*	*
Pure error	6	0	0		
Total	30	15 012.1			

图 5 为两个显著因素对 $p\cdot v$ 联合影响的等高线图

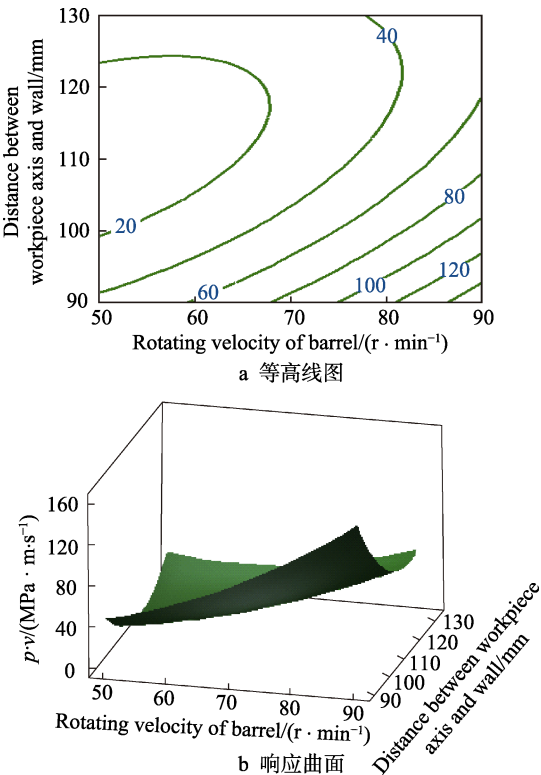


图 5 滚筒转速和工件轴心距筒壁距离
对 $p\cdot v$ 影响的等高线图和响应曲面

Fig.5 Contour map and response surface of $p\cdot v$ influenced by rotating velocity of barrel and distance between workpiece axis and wall: a) contour map; b) response surface

和响应曲面,随滚筒转速的升高及工件轴心距筒壁距离的缩小, $p \cdot v$ 值不断增大。特别是在滚筒转速 >60 r/min、工件轴心距筒壁距离 <120 mm的部分,图5a中 $p \cdot v$ 值对应的等高线变密,图5b中的响应曲面坡度变陡。这是由于滚抛磨块和工件表面的相对运动速度达到一定值时,滚抛磨块对工件作用的滑擦力显著增大,加工能力明显增强。在磨块直径为5 mm、滚抛磨块占比为60%的条件下,当滚筒转速 >81 r/min、工件轴心距筒壁距离 <97 mm时, $p \cdot v$ 值达到120 MPa·m/s以上。

5 建立材料去除模型

5.1 建立 $p \cdot v$ 的多元回归模型

应用响应曲面法并结合前文分析结果,以 $p \cdot v$ 作为响应值拟合数学模型,用 Y 代表 $p \cdot v$,建立模型如下:

$$Y = 1004 + 0.79X_1 - 13.97X_2 - 6.54X_4 + 0.0388X_1^2 + 0.0838X_2^2 + 2.31X_3^2 - 0.0549X_1X_2 \quad (2)$$

R^2 (相关系数 Determination coefficient) 值为92.53%,说明预测模型拟合程度高,且具有较好的预测能力,能够将模型运用于湿式主轴式滚磨光整加工中 $p \cdot v$ 值的预测。

5.2 k_0 值求解

通过加工实验获得 k_0 值,工艺参数选择:滚筒中加工介质装入量为60%,固定实验设计4因素中2个不显著因素(加工介质成分为滚抛磨块占比70%+液体介质30%,使用直径为3 mm的棕刚玉球形滚抛磨块),显著因素中工件轴心距筒壁距离固定为110 mm,滚筒转速为变量并取实验设计中各水平值进行实验。加工后测出MRR的实验值 MRR_{ex} ,各组工艺参数代入式(2)求得对应 $p \cdot v$ 值,把 MRR_{ex} 和 $p \cdot v$ 代入式(2)得到修正系数 k_0 (如表5),求解出平均修正系数 $\bar{k}_0 = 0.977$ 。建立材料去除模型:

$$MRR = 0.977(1004 + 0.79X_1 - 13.97X_2 - 6.54X_4 + 0.0388X_1^2 + 0.0838X_2^2 + 2.31X_3^2 - 0.0549X_1X_2) \quad (3)$$

表5 修正系数 k_0
Tab.5 Correction factor k_0

Rotating velocity of barrel/(r·min ⁻¹)	50	60	70	80	90
$MRR_{ex}/(\text{mg} \cdot \text{h}^{-1})$	27	51	57	69	75
k_0	0.951	1.354	1.042	0.868	0.669

5.3 模型验证与讨论分析

2个显著因素中滚筒转速定为70 r/min,工件轴

心距筒壁距离为变量并取实验设计中各水平值,其他工艺参数同5.2节,对表面初始 R_a 值约为1.6 μm 、刀纹明显的工件进行加工实验。每个工件不同位置处的表面粗糙度进行3次测试,求均值得加工后 R_a 。加工前后工件质量分别测试3次,求均值得到 MRR_{ex} 。对加工前后工件表面形貌测试得超景深显微图。将各组工艺参数代入式(3),计算得出MRR的理论值 MRR_{th} 。根据式(4)求出 MRR_{th} 和 MRR_{ex} 的相对误差 θ (式(4))^[11],并结合 R_a 、 MRR_{ex} 和显微图对其间的影响关系进行对比分析。

$$\theta = \left| \frac{MRR_{th} - MRR_{ex}}{MRR_{ex}} \right| \times 100\% \quad (4)$$

图6为MRR理论值和实验值数据对比,两曲线数据点吻合较好,平均相对误差为6.32%,说明模型能够反映实际加工情况,介质流场加工作用下的材料去除模型具有一定有效性。其中只有距滚筒距离110、130 mm的 MRR_{th} 数据点超出平均相对误差范围,说明工件轴心距筒壁距离 <110 mm时,实验中MRR值更具规律性,模型在预测MRR值时更精准。

图7为实验中工件加工后 R_a 和MRR的变化趋势对比,图8为工件轴心距筒壁不同距离处表面形貌对

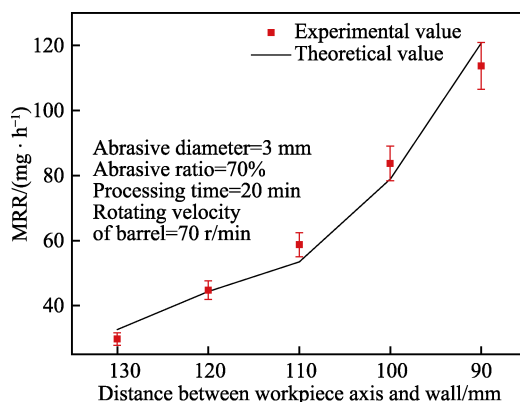


图6 MRR理论值和实验值数据对比
Fig.6 Comparison of the MRR theoretical and experimental data

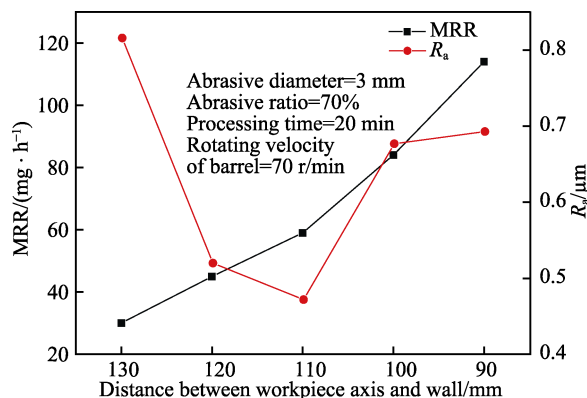


图7 工件加工后 R_a 和MRR的变化趋势对比
Fig.7 Comparison of variation trend R_a and MRR after processing

比。随着工件轴心接近筒壁, 工件 MRR 不断增加。结合加工后工件 R_a 值和表面形貌发现: 130 mm 位置处经光整加工后 R_a 值下降不大, 刀纹仍比较明显; 110 mm 处, 加工后工件 R_a 值大幅降低, 完全去除刀纹, 且表面纹理细致平整, 呈多项分布; 工件轴心进一步靠近筒壁至 90 mm 处, 工件 MRR 继续增大, 加

工后 R_a 值不降反升, 完全去除刀纹的同时, 由于加工作用力过大, 使表面纹理变得粗糙不平。这说明 130 mm 处介质流场加工能力很弱, 加工效果较差; 110 mm 处介质流场已具有较强的加工能力, 且加工效果较好; 90 mm 处介质流场的加工能力过强, 导致加工效果反而变差。

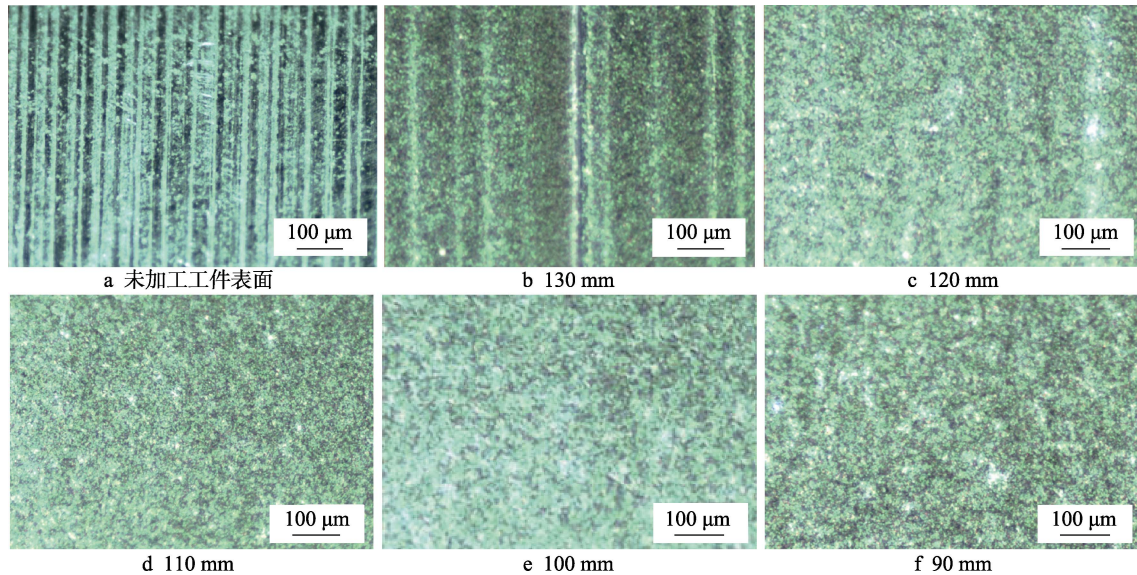


图 8 工件轴心距筒壁不同距离处表面形貌对比

Fig.8 Comparison of surface topography of workpiece axis with different distances from wall (fig.a Crude)

6 结论

1) 建立 4 个主要工艺参数和 $p \cdot v$ 的多元回归模型, 其中工件轴心距筒壁距离与滚筒转速两者的 $P < 0.05$, 为显著因素, 且前者与 $p \cdot v$ 负相关, 后者与 $p \cdot v$ 正相关。当磨块直径为 5 mm、加工介质中滚抛磨块占比为 60%、滚筒转速 $> 81 \text{ r/min}$ 、工件轴心和筒壁距离 $< 97 \text{ mm}$ 时, $p \cdot v$ 值达到 $120 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ 以上。

2) 通过介质流场对工件的加工实验获得 k_0 值, 建立以工艺参数为自变量、MRR 为因变量的材料去除模型。模型经过实验验证, MRR 理论值和实验值的平均相对误差仅为 6.32%, 证明模型的有效性。

3) 随工件轴心靠近筒壁, MRR 值递增, 加工后 R_a 值先减后增, 在工件轴心距筒壁 110 mm 处, MRR 值为 59 mg/h , R_a 达到最低值 $0.472 \mu\text{m}$, 工件刀纹完全去除, 表面纹理细致平整, 加工效果最佳。

参考文献:

- [1] 杨胜强, 李文辉, 陈红玲. 表面光整加工理论与新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
YANG S Q, LI W H, CHEN H L. Surface finishing theory and new technology[M]. Beijing: National defense industry press, 2011.
- [2] LI W H, YANG S Q, YANG S C, et al. Theoretic analysis and simulation on horizontal spindle barrel finishing[J]. Key engineering materials, 2009, 416: 332-336.
- [3] LI X H, WU F F, LI W H, et al. Kinematic characteristics of mass finishing process with the parallel spindle: Velocity measurement and analysis of the media[J]. Advances in mechanical engineering, 2017, 9(10): 1-12.
- [4] BOSCHETTO A, BOTTINI L. Roughness prediction in coupled operations of fused deposition modeling and barrel finishing[J]. Journal of materials processing tech, 2015, 219: 181-192.
- [5] BOSCHETTO A, BOTTINI L, VENIALI F. Microremoval modeling of surface roughness in barrel finishing[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 69(9-12): 2343-2354.
- [6] 李秀红, 李文辉, 王程伟. TC4 钛合金滚磨光整加工的表面完整性与抗疲劳性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 15-25.
LI X H, LI W H, WANG C W. Surface integrity and fatigue performance of titanium alloy TC4 by mass finishing[J]. China surface engineering, 2018, 31(1): 15-25.
- [7] LI X, LI W, YANG S, et al. Study on polyurethane media for mass finishing process: Dynamic characteristics and performance[J]. International journal of mechanical sciences, 2018, 138-139: 250-261.
- [8] LI W, LI X, YANG S, et al. A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: Material removal

- behavior and finishing performance[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 260: 20-29.
- [9] MISRA A, PANDEY P M, DIXIT U S. Modeling of material removal in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process[J]. International journal of mechanical sciences, 2017, 131-132: 853-867.
- [10] KITAJIMA K, YAMAMOTO A, IZAWA M. A try for improvement of performance in dry barrel finishing by centrifugal disc type[J]. Key engineering materials, 2007, 329: 279-284.
- [11] BUJ-CORRAL I, VIVANCOS-CALVET J, COBA-SALCEDO M. Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing[J]. Precision engineering, 2014, 38(1): 100-108.
- [12] 邵新智. 离心式滚磨光整加工工艺实验研究及表面粗糙度预测模型的建立[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- SHAO X Z. Experimental study on centrifugal barrel finishing process and establishment of surface roughness prediction model[D]. Taiyuan: Taiyuan university of technology, 2017.
- [13] 王程伟, 李秀红, 李文辉, 等. 主轴式滚磨光整加工中介质流场的数值模拟及作用机理分析[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 261-268.
- WANG C W, LI X H, LI W H, et al. Analysis on numerical simulation and mechanism of medium flow field in spindle barrel finishing process[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 261-268.
- [14] 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, 52(7): 142-151.
- LI M, LV B H, YUAN J L, et al. Material removal mathematics model of shear thickening polishing[J]. Journal of mechanical engineering, 2016, 52(7): 142-151.
- [15] TSAI K M, WANG P J. Comparisons of neural network models on material removal rate in electrical discharge machining[J]. Journal of materials processing technology, 2001, 117(1-2): 111-124.

(上接第 299 页)

- [6] ARICI M, NAZIR H, AKSU M L. Investigation of Sn-Zn electrodeposition from acidic bath on EQCM[J]. Journal of alloys and compounds, 2011, 5: 1534-1537.
- [7] SASSI W, DHOUIBI L, BERCOT P, et al. Study of the electroplating mechanism and physicochemical properties of deposited Ni-W silicate composite alloy[J]. Electrochimica acta, 2014, 117(4): 443-452.
- [8] RENATA V, KONSTANTINAS L, DALIA V, et al. EQCM study of anomalous Zn-Ni codeposition in acid sulfate electrolyte[J]. Chemija (vilnius), 2001, 12(4): 236-240.
- [9] 黄钊, 贾学恩, 谢青季, 等. 电化学石英晶体微天平研究碱性介质中单层级铂原子修饰的金电极上甲醇的电催化氧化[J]. 中国科学: 化学, 2010, 40(8): 1105-1113.
- HUANG Zhao, JIA Xue-en, XIE Qing-ji, et al. Electrochemical quartz crystal microbalance study on Au-supported Pt adlayers for electrocatalytic oxidation of methanol in alkaline solution[J]. Scientia sinica (chimica), 2010, 40(8): 1105-1113.
- [10] OLIVEIRA P R, SCHIBELBAIN A F, NEIVA E G C, et al. Nickel hexacyanoferrate supported at nickel nanoparticles for voltammetric determination of rifampicin[J]. Sensors and actuators B: Chemical, 2018, 260: 816-823.
- [11] TUNA K, KILIAN A, RESSLER T. EQCM and EIS characterization of electrochemical deposition of tin from aqueous solution containing pyrophosphate[J]. Electrochimica acta, 2019, 296: 224-234.
- [12] CHATENET M, OLIVIER Y S, CHAINET E, et al. Electrochemical quartz crystal microbalance determination of nickel formal partial charge number during nickel-underpotential deposition on platinum in sulphate media[J]. Electrochemistry communications, 2007, 9(7): 1463-1468.
- [13] XIE Qing-ji, XIANG Can-hui, YANG Xiao-hui, et al. Simultaneous impedance measurements of two one-face sealed resonating piezoelectric quartz crystals for in situ monitoring of electrochemical processes and solution properties[J]. Anal chim acta, 2005, 533: 213-224.
- [14] ZHOU Qing-mei, XIE Qing-ji, FU Ying-chun, et al. Electrodeposition of carbon nanotubes-chitosan-glucose oxidase biosensing composite films triggered by reduction of p-benzoquinone or H_2O_2 [J]. J phys chem B, 2007, 111(3): 11276-11284.
- [15] MECH K. Influence of organic ligands on electrodeposition and surface properties of nickel films[J]. Surface and coatings technology, 2017, 315: 232-239.
- [16] BUTTRY D A, WARD M D. Measurement of interfacial processes at electrode surfaces with the electrochemical quartz crystal microbalance[J]. Chemical reviews, 1992, 92(6): 1355-1379.
- [17] 谭月明, 谢青季, 黄金花, 等. 电化学石英晶体微天平研究普鲁士蓝薄膜的两电极系统伏安行为[J]. 中国科学: 化学, 2008, 38(7): 567-577.
- TAN Yue-ming, XIE Qing-ji, HUANG Jin-hua, et al. Electrochemical quartz crystal microbalance study on the two-electrode-system cyclic voltammetric behavior of prussian blue films[J]. Scientia sinica (chimica), 2008, 38(7): 567-577.
- [18] 陈国良, 周剑章, 林仲华, 等. 酸性介质中丙烯基硫脲对铜阳极溶出和阴极沉积过程影响的 EQCM 研究[J]. 高等学校化学学报, 2006, 27(9): 1699-1702.
- CHEN Guo-liang, ZHOU Jian-zhang, LIN Zhong-hua, et al. EQCM study of effect of allyl thiourea on anodic dissolution and cathodic deposition of Cu in acidic media[J]. Chemical journal of Chinese universities, 2006, 27(9): 1699-1702.