

磨料射流铣削工艺参数优化

张文超, 武美萍, 宋磊

(江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: **目的** 对表面粗糙度和材料去除率作为输出参数的磨料水射流铣削 45[#]钢过程进行研究, 旨在寻找最优加工参数。**方法** 对射流去除材料机理进行了分析, 设计并进行了以磨料粒度、射流压力、横向进给距离、靶距为加工工艺参数的田氏正交实验。采用 Minitab 对不同实验参数组合下磨料水射流加工 45[#]钢的表面粗糙度、材料去除效率进行了数据分析, 并从材料去除机理方面, 对 4 种加工工艺参数对于铣削表面质量和材料去除效率的影响程度和影响趋势, 以及各因素之间的交互作用进行了分析。**结果** 对射流铣削表面粗糙度影响较显著的因素是横向进给距离, 射流压力次之; 对于材料去除效率, 磨料粒径的影响最显著, 横向进给距离次之。**结论** 综合材料去除效率和表面粗糙度值, 选出最优加工参数: 磨料粒径 2000 目, 射流压力 120~160 MPa, 喷嘴横移距离 1.0~1.5 mm, 靶距约 30 mm。

关键词: 磨料水射流; 铣削; 工艺参数; 正交实验; 表面粗糙度; 材料去除效率

中图分类号: TG580.699 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0190-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.026

Process Parameters Optimization for Abrasive Jet Milling

ZHANG Wen-chao, WU Mei-ping, SONG Lei

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology,
Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to find optimal machining parameters by studying the process of milling 45[#] steel with abrasive water jet which takes surface roughness and material removal rate as output parameters. Material removal mechanism was analyzed, Tian orthogonal experiment with abrasive particle size, jet pressure, transverse feed velocity, target distance as machining process parameters was designed and performed. Minitab was used to analyze surface roughness and material removal efficiency of 45[#] steel subject to abrasive water jet machining in different experimental parameter combinations, impact and impact trend of the 4 machining process parameters on milled surface quality and material removal efficiency from the aspect of material removal mechanism, and interaction among different factors. Transverse feed distance had the most significant effect on jet milled surface roughness, jet pressure took the second place. Abrasive particle size had the most significant effect on material removal efficiency, transverse feed distance took the second place. The optimal machining parameters are selected as follows by allowing for material removal efficiency and surface roughness: abrasive particle size of 2000[#], jet pressure of 120~160 MPa,

收稿日期: 2017-06-11; 修订日期: 2017-09-29

Received: 2017-06-11; Revised: 2017-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51575237)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51575237)

作者简介: 张文超 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事先进制造和射流制造技术的研究。

Biography: ZHANG Wen-chao (1990—), Male, Master, Research focus: advanced manufacturing and jet manufacturing technology.

通讯作者: 武美萍 (1970—), 女, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为数字化设计与制造、复杂装备智能化制造。

Corresponding author: WU Mei-ping (1970—), Female, Ph. D., Professor, Doctoral, Research focus: digital design and manufacturing, intelligent manufacturing equipment complex.

nozzle sideways distance of 1.0~1.5 mm and target distance of about 30 mm.

KEY WORDS: abrasive water jet; milling; process parameters; orthogonal experiment; surface roughness; material removal rate

随着材料科学的发展,对于金属材料加工的要求日益提高,特别是传统机床热加工容易产生热变形、应力集中和刀具磨损等问题,这大大限制了高精度金属材料加工制造的要求^[1-2]。磨料水射流铣削^[3]作为一种冷加工技术,利用混有磨粒的铣削液进行加工,磨粒高速碰撞工件表面而去除材料。射流采用水和磨料混合液作为切割刀具,不会产生脆性裂痕、应力集中及刀具磨损,还具有加工柔性高、范围广等优点,成为金属高精度加工的优异方法。通过对 45[#] 钢的铣削加工研究,探索磨料水射流铣削加工工艺参数对于铣削面质量和材料去除效率的影响,并选出最优加工工艺参数组合范围,为其他新型材料加工提供借鉴。

在磨料水射流铣削加工方面,国内外研究较少。刘丽等^[4]基于人工神经网络理论,对几种加工工艺参数进行了研究,建立了表面粗糙度的 BP 神经网络模型。Francois Cenac 等人^[5]针对水射流铣削 2024-T3 航空铝合金进行了研究,研究了射流压力、磨料流量、孔口直径对切削深度和进给速率的影响规律,并建立了相关数学模型。A. Alberdi 等^[6]建立了磨料射流铣削槽相关剖切面的数学模型。冯衍霞等^[7]对磨料水射流铣削氧化铝陶瓷的铣削表面形状进行了试验研究,并分析了铣削工艺参数对铣削表面形状的影响。彭家强等^[8]对磨料水射流铣削对金属材料的去除力和去除模型进行了研究,为金属的铣削加工和切削去除分析提供了理论借鉴。

1 铣削加工机理

1.1 表面质量

磨料水射流铣削面表面质量评测主要针对工件表面结构进行。表面结构主要指加工表面的波度、表面粗糙度、切口锥度等,这些指数主要与材料的性能参数直接相关。本文主要以表面粗糙度为目标,对铣削加工工艺参数水平组合优劣进行评判。

表面粗糙度值与射流交叉冲蚀时表面重叠形成的表面残余高度(垂直高度)直接相关。表面残余高度主要由射流冲蚀采用线性或极坐标路径扫描时相邻两次扫描射流路径重叠形成,射流加工表面残余高度示意图如图 1—2。

采用磨料水射流进行冲蚀切削或者铣削、抛光时,选择的加工工艺参数不同,导致射流加工工件的

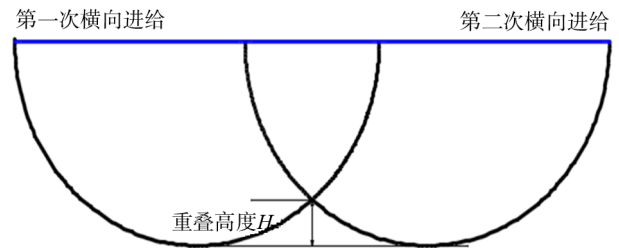


图 1 表面残余高度示意

Fig.1 Sketch map of surface residual height

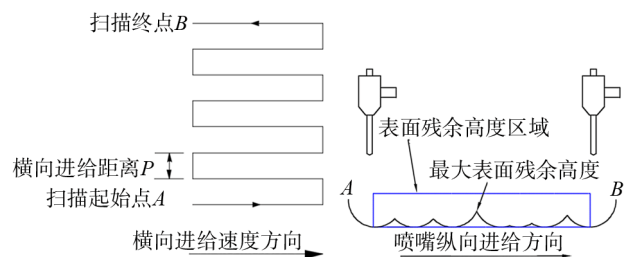


图 2 线性铣削路径下表面残余高度形成示意

Fig.2 Sketch map of the surface residual height under the linear milling path

过程存在差异,进而导致加工工件表面质量和切削冲蚀深度存在一定的差异,尤以铣削、抛光加工时横向进给距离选择最显著。若横向进给距离选择适当,射流加工时,相邻两次冲蚀加工后的残余高度较小;反之,若所选择的横向进给距离过大时,两次射流相交的区域较小,两次扫描路径间的残余材料较多,表面残余高度较大,形成 W 型铣削面型分布^[9]。

1.2 材料去除机理

磨料水射流以一定角度冲蚀工件时,磨粒对工件存在剪切力 p_t 和压应力 p_n 共同作用,水平分力 p_t 对工件表面较高处进行消除,垂直分力 p_n 挤压工件表面,使工件表面产生冷硬作用。

当具有一定动能磨料颗粒冲蚀工件时,剪切应力和压应力共同作用,弹性变形产生,随着磨料作用时间的增长,材料变形区的变形增大,当作用力导致的变形量超过材料屈服极限时,接触区产生塑性变形,塑性变形区外围为弹性变形,弹塑性变形交接面处,材料应力由压应力变为拉应力。随磨料作用时间的增长,弹塑性变形交界处的拉应力最大,拉应力超过材料抗拉强度后,就会产生垂直冲蚀表面的径向/中位裂纹并持续发展。工件随冲蚀作用的持续,弹性变形减小直至消失,塑性变形残留,径向裂纹不再发展,

平行于工件表面的横向裂纹产生并向工件表面扩展，最终实现材料的脆性剥落^[10]（如图 3）。本文中所涉

及的材料去除效率指单位时间内磨料射流去除材料的体积。

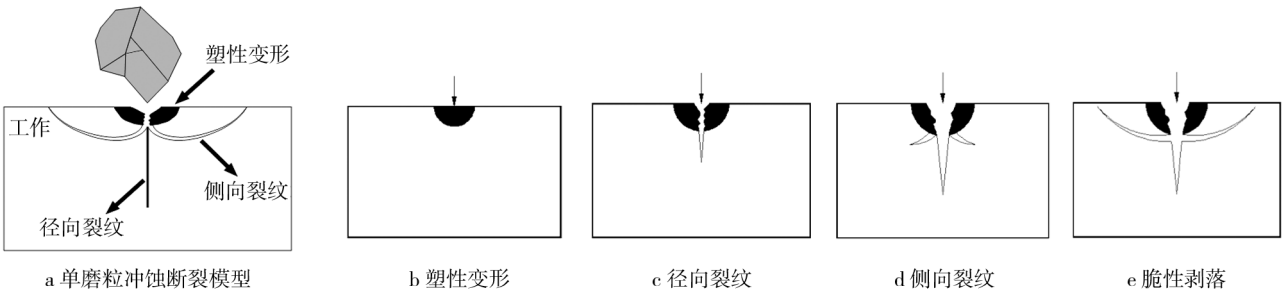


图 3 单磨粒冲蚀断裂过程及模型

Fig.3 Erosion process and model of single abrasive particle: (a) single abrasive erosion fracture model, (b) plastic deformation, (c) radial crack, (d) lateral crack, (e) brittle denudation

2 实验

2.1 实验准备

采用碳化硅磨料在各种参数水平组合下，利用学院已有水加工平台对 45[#]钢材料进行铣削实验。实验用工件材料为 45[#]钢，并利用手持粗糙度仪和白光干涉仪观察铣削前后表面形貌、表面粗糙度。磨粒材料性质、材料性质如表 1—2 所示。

表 1 磨粒参数
Tab.1 Parameters of abrasive grains

材料	密度/(g·cm ⁻³)	硬度(HRC)
45 [#] 钢	7.85	48~52

表 2 加工材料参数
Tab.2 Parameters of material

磨料	密度/(g·cm ⁻³)	熔点/℃	弹性模量/GPa	泊松比	硬度(莫氏)
碳化硅	7.85	2700 (气化)	400~470	0.21	9.2

2.2 正交试验设计

采用田氏正交实验方法对磨料粒径、喷嘴作用角度、射流压力、横向进给速度、靶距等因素进行研究。通过查阅正交实验设计资料^[11]，选定 L₁₆(4⁴)表格，对 45[#]钢进行 16 组铣削实验，各组实验参数水平组合和表面粗糙度值的具体实验参数及结果如表 3。实验后，利用高精度手持式粗糙度测量仪和白光干涉仪，对加工工件表面粗糙度和表面形貌进行读取和观测。

表 3 田氏正交实验表
Tab.3 Tian orthogonal table

序号	磨料粒径 (目)	射流压力/ MPa	横向进给 距离/mm	靶距/mm	表面粗 糙度/μm	材料去除效率/ (mm ³ ·min ⁻¹)
1	80	40	1	10	2.07	107.7
2	80	80	1.5	15	1.73	118.6
3	80	120	2.5	30	2.01	97.2
4	80	160	4	50	2.28	70.3
5	200	40	1.5	30	1.54	137.4
6	200	80	1	50	1.67	150.5
7	200	120	4	10	2.42	144.9
8	200	160	2.5	15	2.04	170.1
9	800	40	2.5	50	1.53	156.4
10	800	80	4	30	1.85	204.1
11	800	120	1	15	2.07	220.5
12	800	160	1.5	10	1.73	189
13	2000	40	4	15	2.01	150.4
14	2000	80	2.5	10	2.28	195.2
15	2000	120	1.5	50	1.54	208.8
16	2000	160	1	30	1.67	263.5

3 结果与分析

采用线性扫描的铣削加工方式进行了 16 次铣削加工实验，磨料射流铣削结果如图 4。铣削加工时，因加工工艺参数取值不同，铣削面的表面质量和材料去除效率存在显著差异。由图 4 可知，当铣削加工参数选择适合时，材料去除效率较高^[12]，表面粗糙度值较低。本节基于正交实验结果，采用 MiniTab 软件对铣削 45#钢表面粗糙度^[15]和材料去除效率进行分析，通过分析铣削加工实验输出参数的信噪比、均值等数值，研究各因素对输出参数影响的主次顺序，对抛光前后的表面形貌（图 5）进行观察，并对最优实验参数组合的取值范围进行预测。

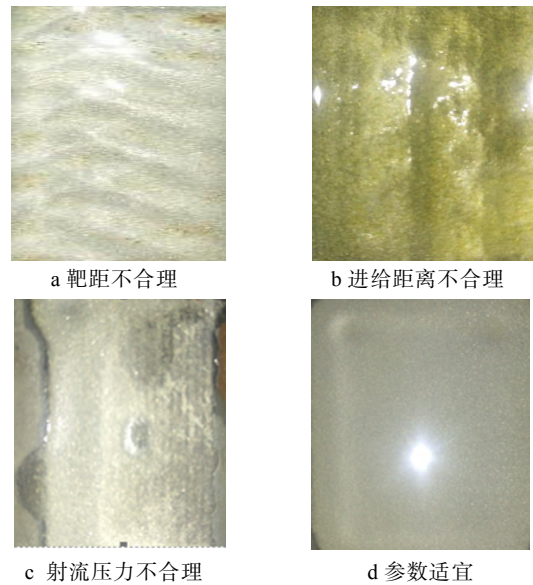


图 4 45#钢磨料水射流铣削实验图

Fig.4 45# milling experiment of steel abrasive water jet: (a) the target distance unreasonable, (b) feeding distance unreasonable, (c) jet pressure unreasonable, (d) suitable parameter

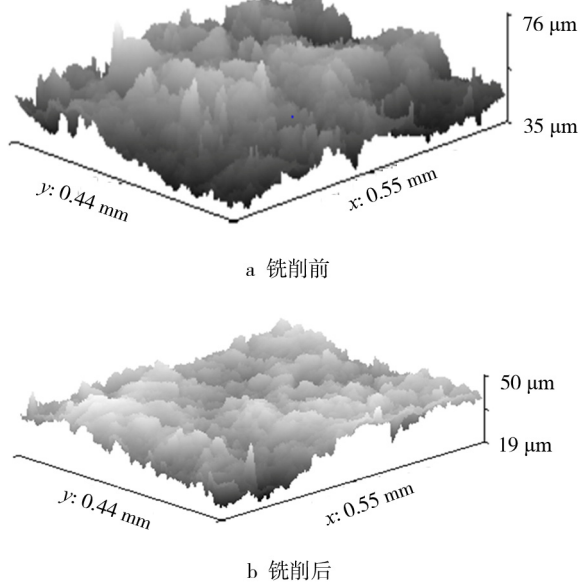


图 5 铣削前后表面三维形貌

Fig.5 3D surface topography before and after milling

3.1 表面粗糙度影响因素分析

3.1.1 影响因素主次分析

由表 4—5 可知，磨料粒径（因素 A）、射流压力（因素 B）、横向进给速度（因素 C）、靶距（因素 D）等 4 种因素中，影响铣削质量的主次顺序为：横向进给距离>射流压力>靶距>磨料粒径。

表 4 表面粗糙度信噪比响应表
Tab.4 Ra signal table to noise ratio (SNR)

水平	磨料粒径	射流压力	横向进给距离	靶距
1	-5.506	-6.468	-5.386	-5.904
2	-5.591	-5.639	-4.259	-4.898
3	-5.357	-4.541	-5.355	-5.597
4	-5.727	-5.532	-7.181	-5.782
Delta	0.37	1.927	2.921	1.006
排序	4	2	1	3

表 5 表面粗糙度均值响应表
Tab.5 Mean response table of Ra

水平	磨料粒径	射流压力	横向进给距离	靶距
1	1.92	2.115	1.873	1.982
2	1.908	1.937	1.64	1.793
3	1.875	1.7	1.86	1.918
4	1.96	1.91	2.29	1.97
Delta	0.085	0.415	0.65	0.19
排序	4	2	1	3

3.1.2 单因素分析

由图 6 知，磨料粒径越小，铣削加工面的表面粗糙度越小。磨料粒径越小，磨料在喷嘴加速过程中所获得的动能越大，喷出喷嘴时的磨粒速度越大，对于材料的去除能力越强。但由图 6b 可知，当磨料粒径达到一定大小时，加工面的表面光洁度提升不显著，这是由于磨粒粒径过小时，磨粒间、磨粒与喷嘴壁面发生碰撞摩擦，导致动能损耗。因磨粒间的相互碰撞导致动能损耗，故磨料铣削时所选的磨料粒径不宜过小。

射流压力对铣削面表面粗糙度的影响较显著，由于当射流压力过小时，磨粒在喷嘴中的加速能力有限，冲蚀去除能力较弱。随着压力的增大，射流中粒子被加速能力得到提升，切削去除能力增加，但当射流压力过大时，磨料射流冲蚀能力增强，由于射流末端具有发散特征，当射流冲蚀加工过程中产生不定向的二次射流，二次射流对工件亦存在材料随机去除作用，这导致磨料表面粗糙度增大，工件加工表面质量降低。

由图 7 可知，铣削加工时，喷嘴横移距离^[13-14]存在最佳值，使得加工表面的质量最优，表面残余高

度形成原理见图 8a。喷嘴横移距离较小, 射流对于材料的去除能力较大, 单位时间冲蚀去除深度较大, 相邻两次扫描路径间的重叠残余高度较小(图 8d); 当喷嘴横移距离过大时, 相邻路径间的重叠区域较

小, 导致材料的残余高度较大, 特别是射流的发散特点易产生“W”型面(图 8b); 当横移速度取值合理时, 相邻铣削路径间接近完全重叠, 残余表面高度近乎于零, 表面粗糙度值最小(图 8c)。

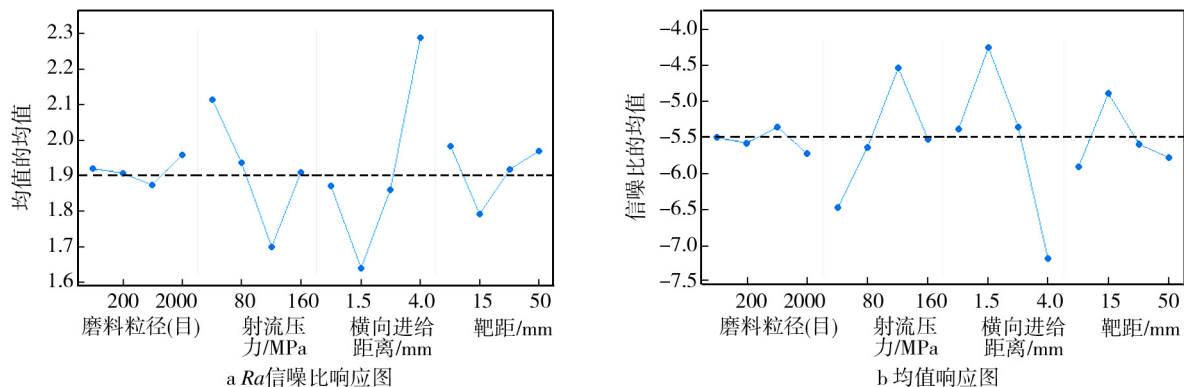


图 6 表面粗糙度响应图(值越小越好)

Fig.6 Surface roughness response table and response diagram (the smaller the better): (a) R_a signal diagram to noise ratio (SNR), (b) R_a mean response diagram

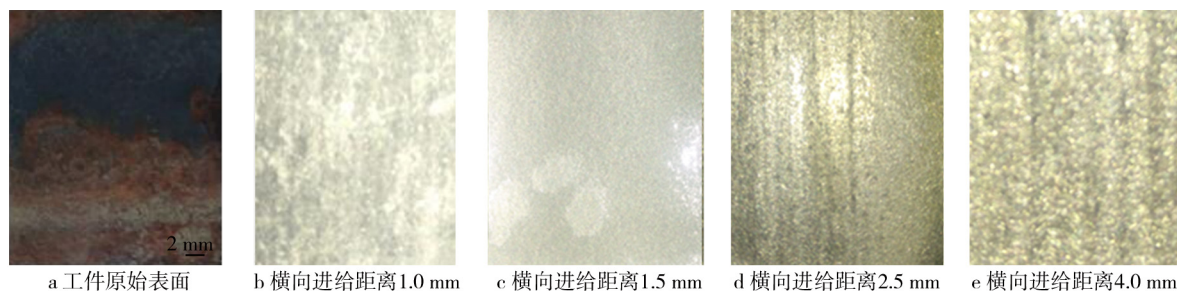


图 7 不同横向进给距离工件铣削形貌图(45#钢)

Fig.7 Workpiece profile of different transverse feed distance (45# steel): (a) the original surface of the workpiece, (b) transverse feed speed range 1.0 mm, (c) transverse feed distance 1.5 mm, (d) transverse feed distance of 2.5 mm, (e) transverse feed distance of 4 mm

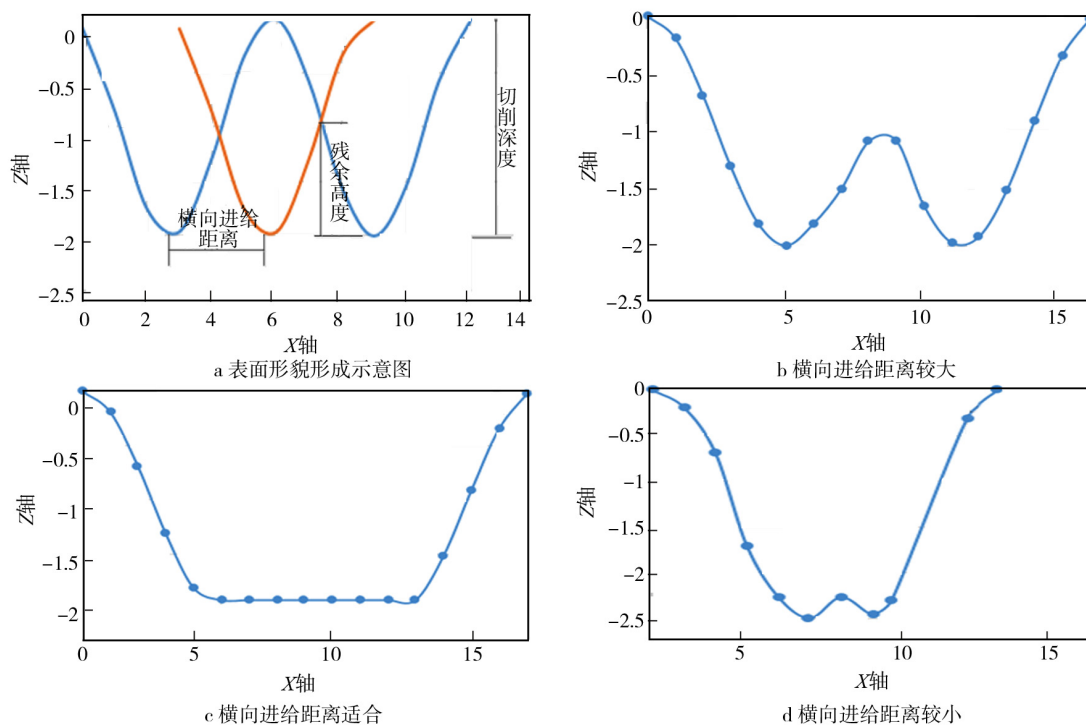


图 8 不同横向进给距离对应表面形貌形成原理

Fig.8 Schematic diagram of the surface morphology of different transverse feed distance: (a) a schematic diagram of the surface topography forming, (b) too large transverse feed distance, (c) suitable transverse feed distance, (d) a smaller transverse feed distance

靶距对加工工件表面的粗糙度呈现“V”型影响趋势。磨料射流铣削加工时,靶距过小,磨料射流集束效应较强,仅部分射流发散雾化,射流与工件碰撞反射产生二次射流,二次射流具有不定向性,导致加工部分的材料去除量不均,加工表面的粗糙度较大;当靶距逐渐增大,射流冲蚀碰撞时反射量减少,能量主要集中于初次射流,当靶距达到 30 mm 时,射流反射基本消失,切削去除材料的为初次射流,此时材料去除较均匀,表面粗糙度值最小;当靶距超过 30 mm 时,射流切削去除能力逐渐减弱,直至射流不具有去除能力。

3.1.3 影响因素交互作用分析

射流压力、喷嘴横移距离、靶距等是影响表面粗糙度的主要因素,其与表面粗糙度的等值曲线如图 9,颜色越深区域表面粗糙度值最小,颜色越浅区域粗糙度值较大。从图 9 可知,铣削加工面的表面粗糙度最小值(即铣削加工面表面质量最佳)在磨料粒度、射流压力、横向进给距离、靶距等参数为“2000 目、120 MPa、1.5 mm、30 mm”水平组合附近取得。

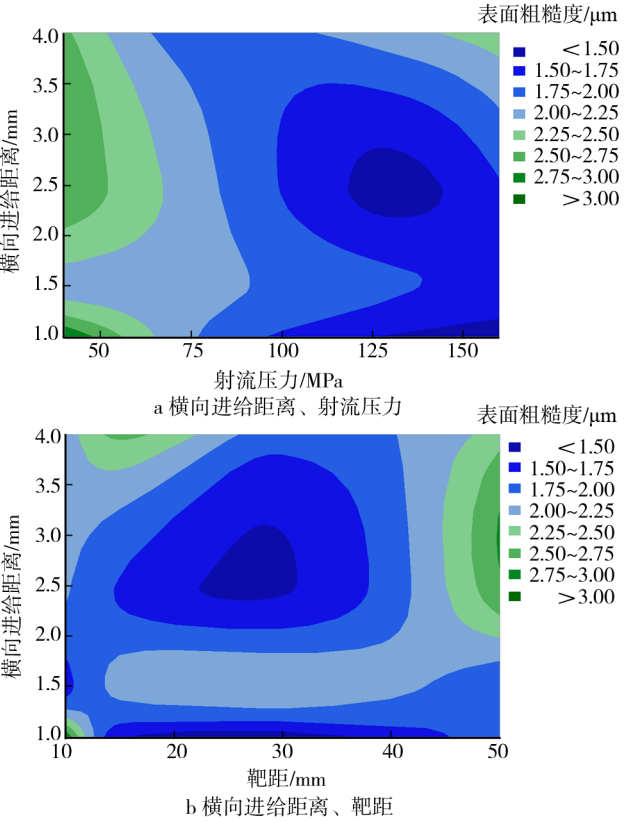


图 9 表面粗糙度等值线
Fig.9 Contour map of surface roughness: (a) transverse feed distance, jet pressure, (b) transverse feed distance, target distance

3.2 材料去除效率影响因素分析

3.2.1 影响因素主次分析

综合材料去除均值和信噪比响应表(表 6—7)

与响应图(图 10)可知,各因素对材料去除效率的影响的主次顺序为:磨料粒径>横向进给距离>射流压力>靶距。

表 6 材料去除效率信噪比响应表
Tab.6 Response table(SNR) of material removal efficiency

水平	磨料粒径	射流压力	横向进给速度	靶距
1	39.7	42.71	44.87	43.8
2	43.54	44.26	44.04	44.13
3	45.62	44.06	43.52	44.28
4	46.04	43.87	42.48	42.69
Delta	6.34	1.55	2.39	1.59
排序	1	4	2	3

表 7 材料去除效率均值响应表
Tab.7 Mean response table of material removal efficiency

水平	磨料粒径	射流压力	横向进给距离	靶距
1	98.45	137.97	185.55	159.2
2	150.72	167.1	163.45	164.9
3	192.5	167.85	154.73	175.55
4	204.48	173.22	142.42	146.5
Delta	106.03	35.35	43.13	29.05
排序	1	3	2	4

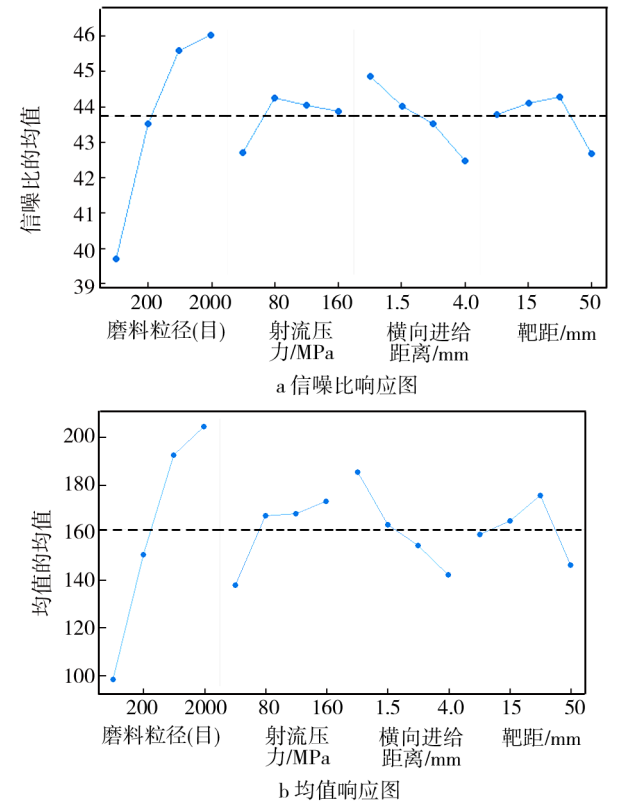


图 10 材料去除效率响应图(值越大越好)
Fig.10 Response diagram of material removal efficiency (the bigger the better): (a) response diagram(SNR), (b) average response diagram

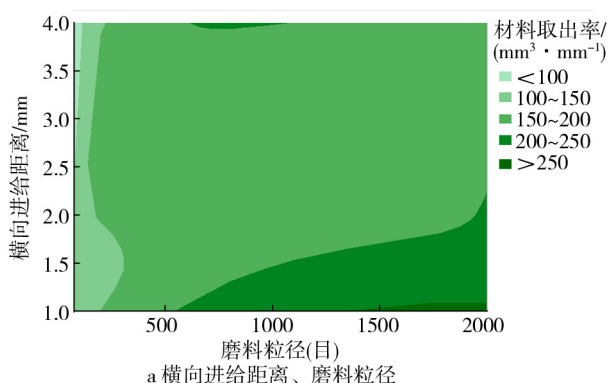
3.2.2 影响因素单因素分析

磨粒对于材料的去除率随着磨料粒径的减小而逐渐增大。材料粒径减小,单位体积磨料射流所含的有效切削材料的磨粒数增多。并且磨粒粒径较小时,射流对其加速能力较强,使得小粒径磨粒在喷出喷嘴后获得较大的速度,速度大则切削去除材料的能力较强。当磨料粒径小到一定程度时,由于磨粒间碰撞、与喷嘴壁面碰撞等,导致磨粒喷出速度降低,磨粒去除材料能力的增大不明显。

射流对材料去除率的影响表现为压力越大,材料去除效率越高。由于射流压力越大,射流束的集束能力愈强,其冲蚀工件时,对材料的冲蚀力和剪切力都较大,容易达到材料剥离所需的应力,从而促进材料的去除。

横向进给距离越小,材料去除深度越大;横向进给距离过大,射流冲蚀去除材料相邻路径的重叠区域较小,材料去除效率较低。因此横向进给距离越小,材料的去除效率越高。

由于二次射流的原因,在靶距到达 30 mm 时,



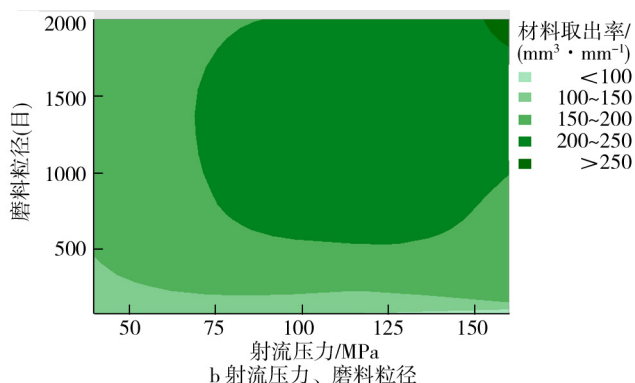
a 横向进给距离、磨料粒径

射流仅表现为初次射流可进行有效切削去除,此时材料的去除效率较高;当靶距过小时,射流分为初次射流和二次射流,二次射流的切削作用较弱,材料去除能力较低;当靶距过大时,射流与工件接触段为发散雾化段,基本不具备切削能力。

根据正交实验结果分析及实验验证可知,铣削加工材料的去除效率最大时,磨料粒度、射流压力、横向进给距离、靶距等参数的最优水平组合为“2000 目、160 MPa、1 mm、30 mm”。

3.2.3 影响因素交互作用分析

磨料粒径、横向进给距离、射流压力等对材料去除效率的影响较显著。作磨料粒径、射流压力、喷嘴横移距离等关于材料去除效率的等值曲线图,由图 11 可知,颜色最深处对应参数值代表铣削材料去除率最大的因素水平,颜色越浅代表材料去除效率越低。从图 11 可知,铣削加工面的材料去除效率最大时,磨料粒度、射流压力、横向进给距离、靶距等参数在“2000 目、160 MPa、1.0 mm、30 mm”水平组合附近取值。



b 射流压力、磨料粒径

图 11 材料去除效率等值线图

Fig.11 Contour map of material removal efficiency: (a) transverse feed distance, abrasive particle size, (b) jet pressure, abrasive particle size

4 结论

磨料水射流铣削加工时需兼顾加工表面质量和材料去除效率两种评价指标。通过以上分析可知,磨料水射流铣削加工 45#钢时,材料去除效率和表面粗糙度两种实验指标综合评价下,射流铣削最优参数范围为:磨料粒径 2000 目,射流压力 120~160 MPa,喷嘴横移距离 1.0~1.5 mm,靶距约 30 mm。

参考文献:

- [1] 邓文英,郭晓鹏. 金属工艺学[M]. 第五版. 北京:高等教育出版社,2008.
DENG Wen-ying, GUO Xiao-peng. Metalworking Technology[M]. Fifth Edition. Beijing: Higher Education Press. 2008.
- [2] ELBESTAWI M A. Metal Cutting Theory and Practice[J]. Machining Science & Technology, 2004, 53(2): 619-642.
- [3] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 合肥:合肥工业大学出版社,2006.
XUE S X. High Pressure Water Jet Technology[M]. Hefei: Hefei University of Technology Press. 2006.
- [4] 刘丽,崔宣,万庆丰. 基于 BP 神经网络的磨料水射流铣削质量研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(5): 130-132.
LIU L, CUI X, WAN Q F. Study on Abrasive Water Jet Milling Quality by the BP Neural Network[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014 (5): 130-132.
- [5] CENAC F, ZITOUNE R, COLLOMBET F, et al. Abrasive Water-jet Milling of Aeronautical aluminum 2024-

- T3[J]. *Materials: Design and Applications*, 2015, 229(1): 29-37.
- [6] RIVERO A A. Effect of Process Parameter on the Kerf Geometry in Abrasive Water Jet Milling[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2010, 51: 467-480.
- [7] FENG Yan-xia, HUANG Chuan-zhen. A Study on the Surface Microstructural Integrity of Ceramics Milled with Abrasive Waterjet[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 135: 64-68.
- [8] 彭家强, 宋丹璐, 宗营营. 磨料水射流对金属材料去除力和去除模型研究[J]. *机械设计与制造*, 2012(2): 17-19.
- PENG J Q, SONG D L, ZONG Y Y. Research of Removing Force and Removing Model of the Abrasive Water Jet on Metal Material[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012(2): 17-19.
- [9] 李兆泽, 李圣怡. 磨料射流抛光中各工艺参数对材料去除效率及抛光区形貌的影响[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(21): 2532-2535.
- LI Z Z, LI S Y. Effects of Various Parameters on Material Removal Rate and the Footprint in Abrasive Jet Polishing Process[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(21): 2532-2535.
- [10] 张成光, 张勇. 磨料水射流加工去除模型研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(7): 189-196.
- ZHANG Cheng-guang, ZHANG Yong. Study on Removal Model of Abrasive Waterjet Machining[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(7): 189-196.
- [11] CARPENTER M R P, LYON M D H, HASDELL M T A. *Experimental Design and Data Analysis*[M]. US: Springer, 2000: 59-75.
- [12] YUVARAJ N, KUMAR M. Pradeep. Surface Integrity Studies on Abrasive Water Jet Cutting of AISI D2 Steel[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2017, 32(2): 162-170.
- [13] KHAKPOUR H, BIRGLEN L, TAHAN S A, et al. Uniform Scanning Path Generation for Abrasive Waterjet Polishing of Free-form Surfaces Modeled by Triangulated Meshes[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2015, 77: 1167-1176.
- [14] DRSHUKL M A. *Nontraditional Machining Processes*[M]. London: Springer, 2013.
- [15] DHANAWADE A, KUMAR S. An Experimental Study of Surface Roughness in Abrasive Water Jet Machining of Carbon Fiber Reinforced Polymer Using Orthogonal Array with Grey Relational Analysis[J]. *Journal of Manufacturing Engineering*, 2016, 11(1): 1-6.