

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307010

复杂内孔结构磨粒流加工的检测评价与优化*

龚 灯¹ 赵伦武² 倪 帅¹ 韩 刚³

(1. 安徽国防科技职业学院机械技术学院 六安 237005; 2. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009;
3. 皖西学院机械与车辆工程学院 六安 237012)

摘要:为提高军工零件的内孔加工的可靠性和加工质量,通过正交试验法,分析磨粒流加工中,磨料粒度、磨料质量分数、磨粒流工作压力和循环加工次数对阶梯内孔倒圆角半径、材料去除率、内孔表面粗糙度的影响规律,磨粒流工作压力是内孔倒圆角半径的首要影响因素,较为显著,材料去除率的首要影响因素是磨料质量分数,而内孔表面粗糙度的首要影响因素是循环加工次数,通过非线性回归分析建立了复杂内孔磨粒流加工效果评价的模型。以改进的带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行多目标工艺参数寻优,得到了综合平衡权重下的最佳工艺方案(磨料粒度1 000#,磨料质量分数为50%,工作压力为7.5 MPa,循环加工次数为30次),验证试验表明优化结果和实际加工效果具有较好的一致性。

关键词: 磨粒流;去毛刺工艺;正交试验;加工质量;多目标优化

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.3030

Evaluation and optimization of complex inner hole structure in abrasive flow machining

Gong Deng¹ Zhao Lunwu² Ni Shuai¹ Han Gang³

(1. School of Mechanical Technology, Anhui Vocational College of Defense Technology, Lu'an 237005, China;
2. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
3. School of Mechanical and Vehicle Engineering, West Anhui University, Lu'an 237012, China)

Abstract: To improve the reliability and machining quality of deburring process for inner holes of projectile components, an evaluation index for the quality of inner hole abrasive flow machining (AFM) is established based on the inverted fillet radius, material removal rate, and surface roughness. An orthogonal test was designed and completed, with abrasive particle size, abrasive mass fraction, abrasive flow working pressure, and cycle numbers as the control factors. Results indicate that all process parameters can ensure good deburring effect. The working pressure of AFM is the primary and significant influencing factor on the inverted filler radius. The primary influencing factor on the material removal rate is the abrasive mass fraction. And for surface roughness, it is cycle numbers. Furthermore, A prediction model for process parameters and machining quality evaluation indexes was established through nonlinear regression analysis. Multi-objective optimization was performed using the fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). The optimized parameters (The abrasive grain size is 1 000#, the mass fraction of abrasive is 40%, the pressure is 7.5 MPa, and cycles times is 30) were verified and the optimized results are consistent with the actual machining.

Keywords: abrasive flow machining; deburring process; orthogonal test; machining quality; multi-objective optimization

0 引言

很多军工零件,如身管、喷筒、弹体等,由于功能的需

要,往往具有复杂的内孔结构。以火炮弹体为例,其内孔结构起到了容纳引信及战斗部、引导弹体旋转、改善弹道飞行稳定性等作用,而这些特征,如截面突变、螺纹、内孔退刀槽、交叉内孔等,在加工制造过程中难免残留一

些微小的毛刺。这不仅对零件的公差和配合有负面影响,还会降低弹药勤务性能,甚至引发严重后果^[1]。传统的去毛刺方法多采用手工方式,如刮锉、电动打磨等,适合于简单零件,但对于复杂内孔结构,还需要同时确保配合精度和勤务性能时,采用手工法劳动强度大、效率低、质量不稳定,还容易损伤重要配合面。

磨粒流加工 (abrasive flow machining, AFM)^[2] 是通过挤压含有游离磨粒的粘性介质对内表面进行表面抛光和去毛刺处理的加工方法,特别适合于内孔、型腔、流道等各种难以直接从外部进行加工的部位。国内外学者和工程技术人员对磨粒流抛光加工复杂内孔进行了大量研究和应用。曾盛等^[3] 采用了磨粒流方法加工了深内孔、螺旋副等结构,有效去除了常规工作难以到达位置的尖边、毛刺及内孔锈迹等多余物,效率提升明显。左敦稳等^[4] 优化分析了航空零件壳体的磨粒流加工工艺,实现了壳体内部交叉孔位置毛刺的去除,提高了工件的加工质量与产品性能。王磊等^[5] 则系统地分析了磨粒流技术在增材制造航空件内孔精整加工中的应用和挑战,磨粒流抛光技术在内流道加工上具有较好的适应性,但是也存在容易过抛、浪费磨粒、加工效率低等问题,需要寻找出适应性好的加工工艺,如磨粒的粒径、浓度、介质的粘性、抛光时间、重复次数等。如高航等^[6] 采用正交实验法研究了工艺参数对去毛刺效果的影响,所得到的优化的工艺能够高效地完成去毛刺加工,同时避免了过度加工导致的刀具刃口的“过顿”现象。王海全等^[7] 则针对航空发动机叶片的加工需求,建立了磨粒流工艺和表面粗糙度的预测模型,能够有效地甄选合理的磨抛工艺。

但是对于军工零件中复杂内孔结构,如螺纹孔、交叉孔等,如果磨粒流中磨粒的粒度过小,需要增加抛光次数,延长加工时间,不能实现去毛刺和抛光的高效处理,但如果加工效率过高,又会造成内螺纹尺寸偏差和间隙的增大,降低螺纹精度,引起螺纹可旋合性、连接可靠性以及螺纹结合气密性问题^[8-9]。所以需要寻找优化的工艺组合,提高加工质量逐渐成为研究的热点。如计时鸣等^[10] 利用超声波的空化作用,提高磨粒流加工的效能,从而起到同时提高切削效率和提高表面质量的效果。王志勇等^[11] 设计了一种磨粒参数模糊优选模型,能够兼顾各工艺参数对抛光质量和抛光效率的综合影响,降低了综合成本。但是由于内孔特征的复杂性和特殊性,磨粒流加工工艺的选择仍以试错的方法为主,难以适应批量化生产的低成本、高质量、高效率的需求。

本文针对某型号弹体零件,检测分析其内孔阶梯处倒圆角半径、内孔尺寸和表面粗糙度 R_a 的变化规律,采用正交试验方法优化磨粒流去毛刺加工工艺参数,研究磨粒粒度、质量分数、工作压力和循环加工次数对倒圆角半径、磨抛材料去除率和内孔表面质量的影响,为相关

类型内孔结构的工艺选择提供了一定的理论依据。

1 磨粒流去毛刺抛光试验

1.1 零件结构分析

图 1 为某型号火炮弹体的零件,材料为 30CrMnSiA,其内部具有螺纹孔、内部阶梯和退刀槽。零件的外形和内孔均有着较高的尺寸公差、表面粗糙度和形位公差要求。当对其进行采用磨粒流去毛刺加工时,需要同时保证去毛刺处理加工效率和内螺纹精度。

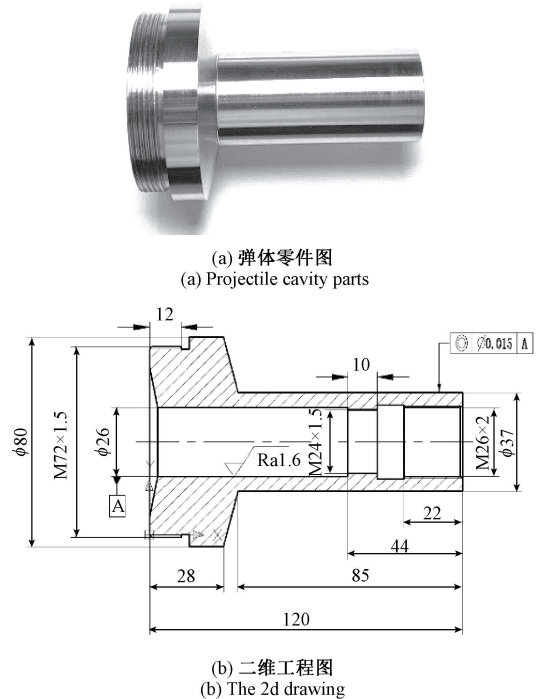


图 1 火炮弹体零件结构图

Fig. 1 Structure diagram of projectile component

为实现零件的定位和夹紧,并合理引导和限制磨料流向,通过专用夹具将零件安装在磨粒流加工设备中,如图 2 所示。磨料在上下活塞的推动下,沿着零件内孔往复流动,实现对零件内表面的去毛刺和抛光处理。

1.2 试验方案

本研究采用的实验设备为 SPS AFM-100 型磨粒流抛光机,磨粒最大工作压力 10 MPa,试验参数如表 1 所示,其中采用的磨粒是黑色碳化硅,磨粒流的基体介质为丁苯橡胶,添加一定的甲基硅油和环烷油调节磨粒流的粘弹性。在实验过程中,保持其他初始条件相同,取磨料粒度、磨料质量分数、磨粒流工作压力和循环加工次数作为工艺影响因素,研究磨粒流加工工艺对内孔倒角和抛光的影响。

内孔特征加工采用正交试验设计,工艺参数分别为

磨料粒度(因素 A)、磨料质量分数(因素 B)、磨粒流工作压力(因素 C)和循环加工次数(因素 D),研究各参数对加工质量的影响。各因素水平取值如表 1 所示,共设计 9 组实验,为避免出现偶然性因素,每组实验重复 3 次。

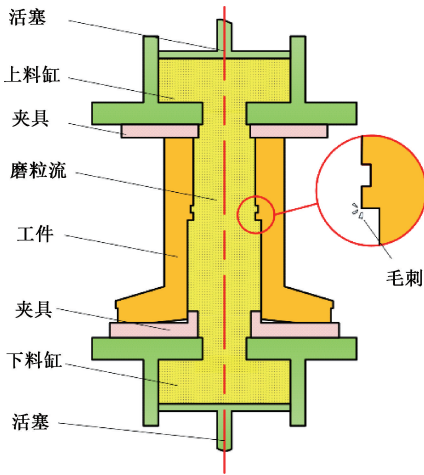


图 2 零件内孔磨粒流加工示意图

Fig. 2 Schematic diagram of AFM.

表 1 磨粒流加工正交实验工艺因素和水平

Table 1 Process parameters of orthogonal test in AFM

因素	工艺	水平		
A	磨料粒度(目数)	300#	500#	1000#
B	磨料质量分数/%	40	50	60
C	磨粒流工作压力/MPa	5	7.5	10
D	循环加工次数	10	30	50

1.3 检测评价方法

1) 去毛刺效果的检测与评价

目前,机械行业还未制定出统一的毛刺去除质量定量评价标准^[12-13]。本文采用阶梯孔处倒圆角的半径来评价去毛刺效果,待零件完成尺寸加工和检测后,通过线切割方法将零件剖开,并对其进行清洗,采用体视显微镜进行拍照,测量相交孔部位倒圆角半径 r 。

2) 材料去除率的检测与评价

该零件内孔有 M28 和 M26 两种细牙螺纹,由于螺纹在径配合时都留有间隙,磨粒流加工不影响其互换性,但随着磨粒流的加工,会造成内螺纹的中径过大,削弱联接强度和气密性。本文通过采用内径千分尺测量 $\phi 26$ 通孔的尺寸公差,间接反映螺纹中径的变化,以此表征磨粒流加工的材料去除效果,材料去除率 R_{MR} 的公式:

$$R_{AM} = \frac{\pi L}{4t}(D_2^2 - D_1^2) \quad (1)$$

式中: D_1 是加工前实际尺寸, D_2 是加工后的实际尺寸, L 为内孔深度, t 为加工时间。由于磨粒流加工的去除量非常微小,采用内径千分尺测量孔的直径。为减少测量误

差,每次重复测量 5 次,取其均值作为最终的尺寸。

3) 内孔表面粗糙度的测量与评价

采用 Mahr XR20 型表面粗糙度仪测量 $\phi 26$ 内孔的轮廓算术评价偏差 R_a ,采样长度为 5 mm,每次测量重复 3 次,以平均值作为最终的表面粗糙度值。

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

正交试验结果如表 2 所示。在所有工艺组合中,方案 9(磨料粒度 1000#、磨料质量分数 60%、磨粒流工作压力 7.5 MPa 和循环加工 10 次)对应的倒圆角半径最小,而方案 3(磨料粒度 300#、磨料质量分数 60%、磨粒流工作压力 10 MPa 和循环加工 50 次)的材料去除率最大,加工效率最高,而内孔表面粗糙度则是方案 7(磨料粒度 1 000#、磨料质量分数 40%、磨粒流工作压力 10 MPa 和循环加工 30 次)最小,内孔加工后的表面质量最高。本文采用极差分析法和方差分析法,以分析各因素对加工效果的具体影响。

表 2 磨粒流加工正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal test

编号	A	B	C	D	$r/$	$R_{MR}/$	$R_a/$
					mm	($\mu\text{m}^3/\text{min}$)	μm
1	300#	40%	5	10	0.257	3.467 4	1.325
2	300#	50%	7.5	30	0.154	5.282 45	1.214
3	300#	60%	10	50	0.117	6.646 53	1.384
4	500#	40%	7.5	50	0.382	2.837 62	1.296
5	500#	50%	10	10	0.123	4.456 71	1.148
6	500#	60%	5	30	0.290	5.927 14	1.315
7	1000#	40%	10	30	0.189	2.713 98	1.021
8	1000#	50%	5	50	0.437	4.616 75	1.421
9	1000#	60%	7.5	10	0.068	5.738 71	1.238

2.2 极差分析

根据正交试验结果,分别计算各因素对 3 个评价指标的影响,极差分析结果如表 3 所示。其中 K_i 表示任一列上水平号为 i 所对应的试验结果之和, R 是极差,用来描述数据波动的程度。

从表 3 可知,影响倒圆角半径的各因素的主次关系为磨粒流工作压力>循环加工次数>磨料质量分数>磨料粒度,最优试验方案组合为磨粒流工作压力为 10 MPa,循环加工 10 次,磨料质量分数 60%,磨料粒度 300#。影响材料去除率的主次关系为磨料质量分数>磨料粒度>循环加工次数>磨粒流工作压力,最佳试验方案组合为磨料质量分数 60%,磨料粒度 300#,循环加工 50 次,磨粒流工作压力 5 MPa。对内孔粗糙度影响最大的主次关系

为循环加工次数>工作压力>磨料质量分数>磨料粒度,最佳试验方案组合为循环加工 30 次,磨粒流工作压力 10 MPa,磨料质量分数 40%,磨料粒度 1 000#。

表 3 各因素对磨粒流加工质量影响的极差分析

Table 3 Range analysis for influence of the parameters in AFM

指标	项目	磨料粒度 (因素 A)	磨料质量分数 (因素 B)	磨粒流工作压 力(因素 C)	循环加工次数 (因素 D)
倒圆角 半径	K_1	0.528	0.828	0.984	0.448
	K_2	0.795	0.714	0.604	0.633
	K_3	0.694	0.475	0.429	0.936
	极差	0.267	0.353	0.555	0.488
	排序	4	3	1	2
材料去 除率	K_1	15.396	9.019	14.011	13.662 82
	K_2	13.221	14.355	13.858	13.923 57
	K_3	13.069	18.312	13.817	14.100 9
	极差	2.326 94	9.293 8	0.194 0	0.438 08
	排序	2	1	4	3
表面粗 糙度	K_1	3.923	3.642	4.061	3.711
	K_2	3.759	3.783	3.748	3.55
	K_3	3.680	3.937	3.553	4.101
	极差	0.243	0.295	0.508	0.551
	排序	4	3	2	1

对倒圆角半径来说,各工艺参数均能保证较好的去毛刺效果。其中,工作压力是最主要影响因素,而磨料粒度最次要影响因素,这说明在本次实验条件下工作压力、加工循环加工次数、磨料质量分数和磨料粒度对倒圆角的影响逐渐降低。对材料去除率来说,磨粒的质量分数的影响明显大于其他因素,这说明磨粒的质量分数是决定加工效率的主要因素,其重要性远大于其他因素。对内孔粗糙度来说,首要影响因素是磨粒加工的循环加工次数,明显循环加工次数越多,内孔表面的粗糙度越好,加工循环加工次数是决定内孔表面质量的首要因素。

综合来看,从去毛刺效果来看,应优先考虑磨粒流工作压力最大,即工作压力 10 MPa;从加工效率来看,应当选择磨料质量分数最高,即磨粒的质量分数为 50%;从内孔粗糙度来看,应选择循环加工次数为 30 次。均衡各方面因素,最优工艺参数组合为磨料粒度为 300#、质量分数为 60%、工作压力为 10 MPa、循环加工 30 次。

2.3 方差分析

为了准确评估各因素对加工质量的显著性影响,对试验结果进行方差分析如表 4 所示。

表 4 中分析 F 检验的标准是与临界值的比较。通过查表可得 $F_{0.01}(2, 18) = 6.013$, $F_{0.05}(2, 18) = 3.55$, $F_{0.1}(2, 18) = 2.62^{[14]}$,从方差分析的结果可以看出,磨粒流工作压力对倒圆角半径的影响较为显著,循环加工次数有一定的影响,而磨料粒度和质量分数对倒圆角半径

表 4 各因素对磨粒流加工质量影响的方差分析

Table 4 Variance analysis results for the effects of factors on in AFM

指标	因素	自由度	偏差平方和	偏差均方	F 值	显著性
倒圆角 半径	磨料粒度	2	0.012 1	0.006 05	0.852	
	磨料质量分数	2	0.021 6	0.010 8	1.522	
	磨粒流工作压力	2	0.053 6	0.026 8	3.777	*
	循环加工次数	2	0.040 4	0.020 2	2.847	(*)
	误差	18	0.127	0.007 1		
材料去 除率	磨料粒度	2	1.129	0.564	0.648	
	磨料质量分数	2	14.500	7.250	8.328	**
	磨粒流工作压力	2	0.006 9	0.003 48	0.003 9	
	循环加工次数	2	0.032 3	0.016 1	0.018 5	
	误差	18	41.687	0.870		
内孔粗 糙度	磨料粒度	2	0.010 2	0.005 1	0.755	
	磨料质量分数	2	0.014 5	0.007 2	1.070	
	磨粒流工作压力	2	0.043 7	0.021 8	3.228	(*)
	循环加工次数	2	0.535	0.026 7	3.945	*
	误差	18	0.122	0.006 78		

注:**表示高度显著,*代表显著,(*)代表一般显著。

的影响不显著;磨料质量分数对材料去除率的影响高度显著,另 3 个因素的影响都不显著。循环加工次数对内孔粗糙度影响显著,磨粒流工作压力对内孔粗糙度有一定影响,磨料粒度和质量分数对粗糙度的影响不显著。综上所述,为了保证较好的去毛刺效果和较高的加工效率和表面精度,在综合考虑使用成本的情况下,确定工艺条件为磨料粒度为 300#、质量分数为 60%、工作压力为 10 MPa、循环加工 30 次为最优方案,其分析结果与极差分析一致。

2.4 讨论

对于倒圆角效果来说,磨粒流的工作压力和循环加工次数才是影响倒圆角半径的主要因素,这应该是因为磨粒的动能来自于具有高度粘弹性的流体介质,流体的压力越高,在经过阶梯孔的拐角处的速度越高,产生大量的涡旋和湍流,大大提高了磨粒的动能,使其对尖角处的切削作用越明显,加工循环加工次数越多,时间越长,磨粒对尖角处的切削作用也越明显,而磨料粒度和质量分数不是显著性影响因素,这说明在本试验的参数范围,这两个因素对倒圆角的影响不大。

对于材料去除效率,磨粒的质量分数是影响加工效率的首要因素,这是因为本试验仅测量了 $\phi 26$ 段内孔的加工效果。在磨粒加工过程中,磨粒与工件表面的相互作用,流体受到了搅拌和剪切,形成了复杂的流场,但很显然磨粒的质量占比越大,壁面的磨削去除效果越明显,这可能是因为在该试验条件下,磨粒对工件表面的撞击、耕犁和切削作用是由磨粒的质量所主导的。

对于内孔粗糙度来说,循环加工次数和磨粒流工作压力是首要和次要的影响因素,这可能是因为较长的加

工时间可以有效地产生更多的磨削效果,去除表面的不均匀性,而工作压力可以更好的促进磨粒和工件表面的相互作用。

3 基于 NSGA-II 的多目标工艺优化

由于磨粒粒度、磨料质量分数、磨粒流工作压力和循环加工次数等工艺因素对弹体零件内孔加工质量和效率的影响规律各不相同,为了在给定的工艺范围内尽可能达到最佳的要求,需要采用合适的多目标寻优算法来确定最佳的工艺参数。

3.1 磨粒流加工效果评价模型

弹体零件内孔经过磨粒流加工后,内孔变截面处的倒圆角半径 r 是衡量加工效果的重要指标之一,为了构建倒圆角半径和工艺参数的非线性函数关系,采用指数模型建立倒圆角半径预测模型如下:

$$r = Cs^k w^l p^m c^n \tag{2}$$

式中: C 为常数项, s, w, p 和 c 分别表示磨料粒度、质量分数、工作压力和循环加工次数; k, l, m, n 分别表示磨料粒度、质量分数、工作压力和循环加工次数的影响指数。

为方便计算,进行线性化处理为:

$$\log r = \log C + k \log s + l \log w + m \log p + n \log c \tag{3}$$

对正交试验结果进行对数转化,通过多元线性回归分析,可以建立倒圆角半径预测模型如下:

$$r = 10^{-0.879 s - 0.0257 w - 1.695 p - 1.228 c} \cdot 0.450 \tag{4}$$

式中:磨料粒度因素 A 和循环加工次数因素 D 的影响均为正值,这说明这些因素对倒圆角具有正效应,而质量分数因素 B 和工作压力因素 C 为负值,说明因素 B 和 C 对倒圆角具有负效应。预测模型的相关系数 $R^2 = 0.885$,说明拟合程度良好,模型的精度较高,具有较高的可靠性。

采用同样的方法,建立材料去除率和内孔粗糙度的多元回归预测模型,如式(5)和(6)所示。

$$R_{MR} = 10^{1.642 s - 0.138 w - 1.768 p - 0.0797 c - 0.00525} \tag{5}$$

$$R_a = 10^{0.431 s - 0.0583 w - 0.205 p - 0.202 c - 0.0457} \tag{6}$$

以上评价指标预测模型是基于回归分析的拟合公式,通过相关系数 P 判断其精度,其相关系数分别为 0.968 和 0.679,说明采用该预测模型,能够较为准确地反应工艺参数和加工质量评价指标的关系。

3.2 基于改进的 NSGA-II 的多目标寻优算法

在寻优问题中,NSGA-II 是结合了遗传算法和 Pareto 最优的优化方法^[15-19],其核心思想是将个体按照非支配排序进行分类,再利用拥挤距离来维持族群的多样性,引入了精英策略扩大了采样空间,能够更好地平衡多个目标之间的关系。该算法具有较高的效率和可行性,在多

目标优化问题中被广泛应用。

NSGA-II 算法的优化流程如图 3 所示,包括:1) 初始种群;2) 非支配排序;3) 评估个体的适应度值和拥挤距离;4) 遗传操作:包括交叉、变异和选择,生成新的个体;5) 采用精英策略,父代和子代融合,更新种群。6) 迭代计算直至寻优结束。

在 NSGA-II 算法中,交叉因子和变异概率是决定变异的重要参数,合适的参数能够避免算法陷入局部最优解,为了确定合适的交叉因子和变异概率,在迭代过程中,通过选择最佳交叉因子变异概率,可以提高计算效率、确保寻找到最优解。

在磨粒流加工中,为保证去毛刺效果,以倒圆角半径最小、材料去除率最大和内孔表面粗糙度最小为优化目标,约束条件为工艺参数的范围,建立多目标优化的数学模型如下:

$$\begin{cases} X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\} \\ F(X) = af_1(X) + bf_2(X) + cf_3(X) \\ s. t. x_i^l < x_i < x_i^u \end{cases} \tag{8}$$

式中: x_1, x_2, x_3, x_4 分别表示磨料粒度、磨料质量分数、磨粒流工作压力、循环加工次数; $f_1(X)$ 表示倒圆角半径预测函数, $f_2(X)$ 表示材料去除率预测函数, $f_3(X)$ 表示内孔表面粗糙度预测函数; a, b, c 是各自的权重系数; x_i^l 和 x_i^u 分别为各个工艺参数的下限和上限。

由于在实际生产中,磨料粒度、质量分数等参数并不是连续可调的,而是只能在一定的范围内调整,其选择空间是离散的,所以采用二进制编码方式对工艺参数进行编码。图 3 显示了工艺参数编码的典型染色体示例。

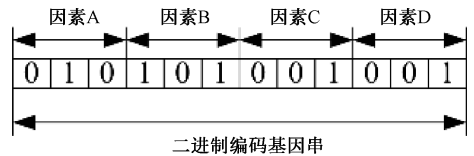


图 3 工艺参数的二进制染色体编码

Fig. 3 Binary encoding of chromosome process parameters

图 4 为改进的 NSGA-II 算法的实现过程图,首先通过正交实验获得复杂内孔结构磨粒流加工效果的评价模型,获得各工艺对评价指标的响应曲线;其次采用二进制编码方法对工艺参数进行分解,采用 NSGA-II 方法寻找最优工艺;最后采用网格搜索法对比不同的交叉因子和变异概率所对应的寻优结果,确定最合适的遗传变异参数,获得全局最优解。

在本文中,初始种群取 100,通过改进的 NSGA-II 遗传算法可以得到可行的多目标帕累托 (Pareto) 前沿解集如图 5 所示。

前沿解集式多目标优化问题的可行解,理论上可根

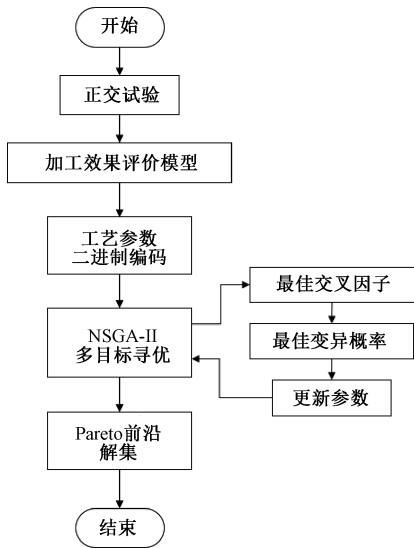


图 4 改进的 NSGA-II 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of improved NSGA-II algorithm

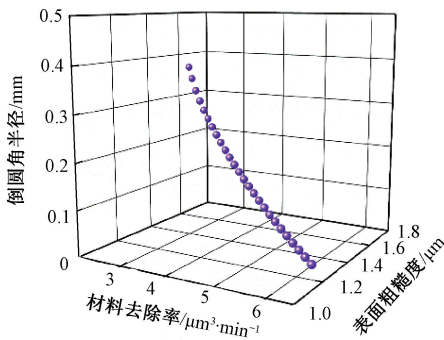


图 5 多目标优化 Pareto 前沿解集

Fig. 5 Pareto frontier diagram of the multi-objective optimization

据实际工况进行选择。由于无法找到一组最佳工艺使三者同时达到最佳,当权重系数 $a=1$, $b=-1$, $c=1$ 时,经综合平衡分析计算 Pareto 解集中的最佳工艺方案,此时,磨料粒度为 1 000#,磨料质量分数为 50%,工作压力为 7.5 MPa,循环加工次数为 30 次。

3.3 实例验证

由于最佳工艺并没有在正交试验中完成,为了验证 NSGA-II 算法对磨粒流加工工艺参数优化的有效性,将最佳工艺参数组合进行试验验证,试验值与预测值相结果如表 5 所示。

可以看出,倒圆角的最大相对误差为 5.3%,材料去除率的最大误差为 4.4%,表面粗糙度的误差为 3.5%,虽然多目标优化后的加工质量和试验结果有一定的误差,但是均在 5%左右,说明预测模型和试验结果具有较好的一致性,该优化算法具有较好的多目标优化能力,对工程应用有一定的指导意义。

表 5 优化预测值和试验结果对比

Table 5 Comparison of optimized prediction results and experimental results

	倒圆角半径/ mm	材料去除率/ ($\mu\text{m}^3/\text{min}$)	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
预测值	0.235	4.321	1.324
验证值	0.247	4.511	1.371
误差	5.1%	4.4%	3.5%

4 结论

本文介绍了磨粒流抛光去毛刺机理,开展了磨粒流对于复杂内孔结构去毛刺效果、材料去除率和内孔表面粗糙度的实验研究,分析了不同工艺因素对内孔进行磨粒流加工的影响,建立了加工质量的多目标工艺参数评价体系,主要结论如下:

1) 分析了复杂内孔零件去毛刺效果的评价方法,建立了以倒圆角半径、材料去除率、内孔表面粗糙度作为评价指标的加工质量的评价体系。

2) 正交试验表明各工艺参数均能保证较好的去毛刺效果,其中磨粒流的工作压力是对去毛刺加工时倒圆角半径的首要影响因素,较为显著,对材料去除率的首要影响因素是磨粒质量分数,对内孔粗糙度的首要影响因素是循环加工次数。

3) 采用回归分析,建立了多工艺因素与评价指标之间的非线性指数关系,构建了工艺参数和加工质量目标的预测模型。

4) 采用了改进的 NSGA-II 算法进行多目标工艺参数寻优,得到了综合权重的最佳工艺方案,验证试验表明优化算法具有较好的有效性。该优化结果可以为提高弹体内孔的加工质量和可靠性提供理论和试验依据。

参考文献

[1] 徐西鹏, 黄辉, 胡中伟, 等. 磨粒工具的研究现状及发展趋势, 机械工程学报, 2022, 58(15): 2-19.
 XU X P, HUANG H, HU ZH W, et al. Development of abrasive tools: State-of-the-art and prospective [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (15): 2-19.

[2] 李瑞光, 丁宇亭, 杨增辉, 等. 航天伺服阀阀套相交孔磨粒流工艺技术研究[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(7): 109-112.
 LI R G, DING Y T, YANG Z H, et al. Study on abrasive flow machining of aerospace servo valve sleeve intersecting holes [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2022, 42(7): 19-112.

- [3] 曾盛,周磊,肖磊. 挤压珩磨技术代替手工去毛刺的应用[J]. 金属加工(冷加工), 2023, 861(4): 46-48.
ZENG SH, ZHOU L, XIAO L. Application of extrusion honing technology instead of manual deburring [J]. Metal Working (Metal Cutting), 2023, 861(4): 46-48.
- [4] 柯泰龙,孙玉利,汤张喆,等. 增材制造异形波导管内腔的磨粒流抛光方法研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(1/2): 86-91.
KET L, SUN Y L, TANG ZH ZH, et al. Research on abrasive flow polishing method of additive manufacturing irregular waveguide inner cavity [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(1/2): 86-91.
- [5] 王磊,邬宇梁,赵纪元,等. 增材制件内流道精整加工技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2023, 34(7): 757-769.
WANG L, WU Y L, ZHAO J Y. Research progresses of finishing technology for inner channel of additive manufacturing part [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(7): 757-769.
- [6] 高航,郭天博,彭灿,等. 丝锥刀具旋转磨粒流去毛刺和钝化抛光技术[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 299-307.
GAO H, GUO T B, PENG C, et al. Deburring and passivation polishing technology of tap tool with rotary abrasive flow [J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 299-307.
- [7] 王海全,付源政,高航,等. 磨粒流抛光粗糙度预测模型研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(15): 188-197.
WANG H Q, FU Y ZH, GAO H, et al. Study on prediction of surface roughness for abrasive flow machining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(15): 188-197.
- [8] 张健,任建荣,李艳飞. 某型舰炮弹药底火漏烟问题的分析及处理[J]. 科学技术创新, 2021, (10): 158-160.
ZHANG J, REN J R, LI Y F. Analysis and treatment of smoke leakage problem in a certain type of naval gun ammunition [J]. Science and Technology Innovation, 2021(10): 158-160.
- [9] 高东岳,徐颖珊,郭健,等. 基于超声导波的飞行器密封质量检测方法[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(2): 229-233.
GAO D Y, XU Y SH, GUO J, et al. Guided wave-based aircrafts seal quality inspection method [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(2): 229-233.
- [10] 计时鸣,陈凯,谭大鹏,等. 超声空化对软性磨粒流切削效率和质量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 82-90.
JI SH M, CHEN K, TAN D P, et al. Effect of ultrasonic cavitation on machining efficiency and quality of soft abrasive flow [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(12): 82-90.
- [11] 王志勇,郭保苏,冯东海,等. 磨粒流抛光工艺中的磨料模糊优选模型[J]. 制造技术与机床, 2018, 667(1): 96-100.
WANG ZH Y, GUO B S, FENG D H, et al. Fuzzy optimization model of abrasive parameters in abrasive flow polishing process [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018, 667(1): 96-100.
- [12] 姚燕生,周瑞根,张成林,等. 增材制造复杂金属构件表面抛光技术[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 525202.
YAO Y SH, ZHOU R G, ZHANG CH L, et al. Surface polishing technology for additive manufacturing complex metal components [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 525202.
- [13] 王贵成,洪泉,李钦奉,等. 精密零件棱边质量的标准[J]. 航空制造技术, 2006, (9): 82-85,97.
WANG G C H, HONG Q, LI Q F, et al. Standard for edge quality of precision part [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, (9): 82-85,97.
- [14] 张艺琳. 磨料水射流去除深孔及交叉孔毛刺的加工技术及机理研究[D]. 济南:山东大学, 2021.
ZHANG Y L. Machining technology and mechanism of abrasive water jet deburring deep hole and cross hole [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [15] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1986.
WANG R X. Mathematical Statistics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986.
- [16] 赵灿,吴磊,张帅. 大型装备航空运输装载规划优化方法[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(8): 35-40.
ZHAO C, WU L, ZHANG SH. Loading planning optimization methods of large equipment air transport [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(8): 35-40.
- [17] 孙鸣远,刘昕瑶,张皓,等. 基于NSGA-II的七叶侧斜螺旋桨多目标优化设计[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(12): 51-58.
SUN M Y, LIU X Y, ZHANG H, et al. Multi-objective optimization design of seven-blade oblique propellers based on NSGA-II [J]. Journal of Ordnance Equipment

Engineering, 2022, 43(12): 51-58.

- [18] 陈建, 王涛, 曹继平, 等. 基于 ABMS 和正交试验的防空作战效能评估及优化[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(6): 120-132.

CHEN J, WANG T, CAO J P, et al. Evaluation and optimization of air defense combat effectiveness based on ABMS and orthogonal tests [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(6): 120-132.

- [19] 付涛, 刘伟军, 赵吉宾. 基于 NSGA-II 算法的高强模具钢切削参数优化方法[J]. 机械工程材料, 2013, 37(12): 85-91.

FU T, LIU W J, ZHAO J B. Parameters optimization in cutting of high-strength mould steel based on NSGA-II[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37(12): 85-91.

作者简介



龚灯, 2008 年于陕西科技大学获得学士学位, 2011 年于北京化工大学获得硕士学位, 现为安徽国防科技职业学院副教授, 机械技术学院数控技术创新团队负责人, 主要研究方向为军工制造及其自动化。

E-mail: 35311259@acdt.edu.cn

Gong Deng received her B. Sc. degree in 2008 from Shannxi University of Science and Technology, received her M. Sc. degree in 2011 year from Beijing University of Chemical Technology. Now she is an associate professor at Anhui Vocational College of Defense Technology and the head of the numerical control Innovation Team in the School of Mechanical Technology. Her main research interests include military-industry manufacturing and its automation.