

表面质量控制及检测

钛合金螺旋铣孔切削工艺的正交优化与试验分析

盛敬峰, 于影霞, 何柏林

(华东交通大学 机电工程学院, 南昌 330013)

摘要: 目的 稳健设计螺旋铣孔对难加工材料钛合金加工件的切削参数(切削深度、每齿进给量和主轴旋转速度)。方法 用正交优化法制定一套试验方案并实施, 使用粗糙度量仪、三坐标、显微镜等对钛合金孔表面粗糙度(Ra)、孔径精度和出口端毛刺高度进行测量和分析; 在此基础上, 利用试验数据分析影响因素水平极差和贡献率, 优选出一组切削参数组合(主轴旋转速度 2000 r/min、每齿进给量为 0.07 mm 和切削深度 0.25 mm/r), 以此为基准, 对待加工钛合金工件表面粗糙度进行预测; 为进一步验证预测值满足孔表面质量标准, 然后对钛合金加工件试验分析。结果 结果表明, 孔表面粗糙度介于 0.55~0.75 μm , 孔径精度介于 H7~H9, 很好地达到了航天或汽车工业对钻孔粗糙度的技术要求。结论 由此可见, 使用该方法, 不仅可获得稳健设计切削参数, 还可改善钛合金螺旋铣孔切削工艺。

关键词: 钛合金; 螺旋铣孔; 切削参数; 正交试验

中图分类号: TG54; TG52 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)12-0192-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.031

Cutting Technology Optimization of Titanium Alloy Helical Milling Hole
Based on Orthogonal Experiment

SHENG Jing-feng, YU Ying-xia, HE Bo-lin

(School of Mechanical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: The work aims to soundly design cutting parameters of titanium alloy machined parts, including cutting depth, feed per tooth and spindle rotation speed in helical milled hole for difficult-to-cut materials. A set of testing program was formulated and carried out based on orthogonal optimization method. Roughness measuring instrument, coordinate measuring machine and microscope were used to measure and analyze surface roughness (Ra), diameter accuracy of titanium alloy hole and burr height at outlet end. On this basis, horizontal range and contribution rate of influencing factors were analyzed by combining with experimental data, and then a set of cutting parameters was selected (spindle rotation speed of 2000 r/min, feed per tooth of 0.07 mm and cutting depth of 0.25 mm/r). Then the surface roughness of titanium alloy workpiece to be machined was predicted. The titanium alloy machined part was tested and analyzed in order to verify if the predicted value conformed to surface quality standards of the hole. Surface roughness of helical milled hole ranged from 0.55 to 0.75 μm while diameter accuracy was within H7 and H9, well meeting the technical requirements for drill hle

收稿日期: 2016-03-22; 修订日期: 2016-04-26

Received: 2016-03-22; Revised: 2016-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(51265013); 江西省自然科学基金(20151BAB206007)

Fund: Supported by the National Natural Science Fund Project(51265013), and Jiangxi Province Natural Science Foundation Project(20151 BAB206007)

作者简介: 盛敬峰(1983—), 男, 硕士生, 主要研究工业工程。

Biography: SHENG Jing-feng (1983—), Male, Master, Research focus: industrial engineering.

通讯作者: 于影霞(1964—), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向为工业工程。

Corresponding author: YU Ying-xia (1964—), Female, Master, Professor, Research focus: industrial engineering.

roughness in aerospace or automobile industry. Therefore, not only cutting parameters in robust design are obtained by using this method, but also cutting technology of titanium alloy helical milled hole is improved.

KEY WORDS: titanium alloy; helical milled hole; cutting parameters; orthogonal experiment

钛合金是一种难加工材料, 由于材质强度高、热传导率低、高温条件下化学活性高等特性。钛合金在钻孔过程中易出现加工问题和质量缺陷, 如出口毛刺、刀具磨损、切削力大以及孔表面粗糙等。其中, 工件孔表面粗糙性是常见的质量缺陷, 尽管如此, 因其独特的抗腐蚀性、耐温、轻质、韧性、原材料丰富等优点, 被广泛用于航空航天、舰艇船舶、汽车、发动机等领域^[1]。螺旋铣孔 (HMH) 作为一种新型精湛工艺, 广泛用于高端制造业, 尤其对于钛合金等难加工材料是一种工艺利器, 最早在 1994 年由 Tonshoff 教授提出, 一般分为便捷式和自动 HMH 装置 2 类^[2]。对于 HMH 切削技术, 国外学者有较深入的研究。Whinnem E 等^[3]对 HMH 技术进行了阐述并实证在波音飞机上的应用; Wangyang Ni 等^[4]基于 HMH 加工机理提出在动力学方面的研究; Denkena 等^[5]面向钛合金叠层结构研究了 HMH 工艺参数对切削力及孔的尺寸精度影响规律。Fangmann 等^[6]通过大量实验, 发现 HMH 技术对于传统切削具有切削力小、切削温度低及毛刺少等优点。在国内, 当前也有学者或高等院校对其进行了实证研究, 江跃东等^[7]对 HMH 工艺参数对 TC4 钛合金孔壁表面完整性的影响规律进行了研究; 王丰超等^[8]研究了 HMH 工艺参数对于孔加工质量的影响; 张硕等^[9]针对飞机制造装配中加工大孔径连接孔问题, 研究了碳纤维复合材料对螺旋铣孔出口处缺陷分析; 吉春晖等^[10]提出钛合金螺旋铣孔参数对表面粗糙度影响研究。张云鹏等^[11]运用人工神经网络进行建模, 解决了电火花铣削钛合金参数选择的难题。文中针对钛合金切削试验展开研究, 主要考虑切削参数对 Ra 质量影响, 引入正交试验法对主轴转速、每齿进给量、切削深度等工艺参数优化, 为钛合金 Ra 的质量控制提供数据依据。

1 试验及方法

1.1 螺旋铣孔切削原理

螺旋铣孔 (HMH) 切削工艺采用偏心加工方

式, 刀具中心轨迹走螺旋线而不是直线, 加工过程由“自转运动、公转运动和沿轴向下进给运动”三部分共同作用完成一个切削过程见图 1。对于 HMH 而言, 上述三者运动并非独立, 而是有一定的内在关联, 图 1 中 a_p 为刀具公转轴向下切深, 简称切削深度; n_z 为刀具主轴自转; n_g 为刀具绕中心轴线公转; D_T 为刀具直径; D_H 为孔直径; D_T 和 D_H 之差为刀具中心偏移量, 由于主要有加工要求确定, 因此在文中不作变量考虑。当刀具直径 D_T 一定时, HMH 切削工艺运动由切削深度 a_p 、主轴旋转速度 v_b 、每齿进给量 f_c 三参数确定。 T 为实验指标, 上述三变量内在关系为 $T=(T_1, T_2, T_3)=(a_p, v_b, f_c)$ 。HMH 在切削工艺优势, 若刀具因摩擦出现韧性降低时, 可通过调节偏心对孔径进行偏差补偿, 这样可减少换刀次数, 延长刀具使用寿命, 以此提高加工效率。

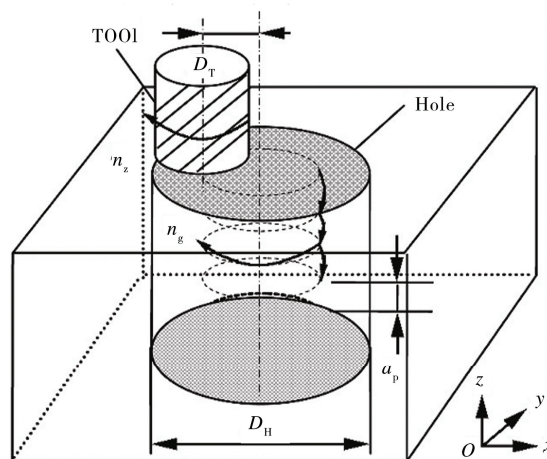


图 1 HMH 切削过程示意

Fig.1 HMH cutting process schematic diagram

1.2 方法及流程

文中依据正交优化试验法 (OOE) 相关理论^[12], 针对钛合金切削工艺参数进行筛选优化; 以 Ra 和 SNR 为试验指标, 运用正交表安排影响切削的工艺参数组成 27 个水平组合, 然后测量孔径 Ra 和计算 SNR、水平和均值、极差、贡献率等, 最后以

极差和贡献率为基准,分析实验结果,从而找出影响切削过程的最佳工艺参数组合,为分析工件孔表面质量提供数据依据。

2 试验设计

2.1 确定试验指标

在正交优化试验中(OOE)关键是试验评估指标的确定。在航空等尖端制造业,对于难加工材料钛合金,螺旋铣孔(HMH)主要用于结构件彼此相互间的铆接,属于关键质量特性(CTQ),所以孔径的加工精度必须要有质量保证。但是影响表面粗糙度(Ra)的因素很多,如主轴旋转速度、每齿进给量、轴向切深等因素不可忽略。从工艺标准分析, Ra 若控制在 $0.50 \sim 0.8 \mu\text{m}$,那么HMH镗孔精度等级应介于H7~H9,孔直径为10 mm左右;从结构件外观质量分析,毛刺是衡量孔径表面光滑的质量指标,毛刺数量及钻孔出口高度取决于加工工艺,毛刺越少,说明孔表面越光滑,工件加工质量越高,因此评价孔径的精度主要指标是孔表面粗糙度 Ra 。对于 Ra 测量工具,文中主要使用MITUTOYO SJ401 仪器度量工件孔径的表面粗糙度,测量标准不高于 $0.8 \mu\text{m}$ 。信噪比(SNR)^[12]表示抑制内外干扰因素所引起的质量波动的能力。在正交试验中用以度量产品质量特性的稳健性指标,判定质量是否稳定的一种尺度。综上,此次试验评估指标为:孔表面粗糙度和信噪比。

2.2 确定切削参数因素水平

正交优化试验不仅要考虑不可控噪声因素,还要全面考虑可控因素,即影响 Ra 质量波动的影响因素。为确定哪些工艺参数对切削质量有显著影响,在钛合金切削过程中,分别调整切削深度、主轴旋转速度和每齿进给量不同数值,可视为单因素实验设计,以此为基准,评估三因素对 Ra 的影响度。观察三因素与试验指标的逻辑关系,绘制图2,从图2a, b, c中可以可看出,三因素对 Ra 测量值有明显影响,其中图2a, b影响最显著,说明主轴速度、每齿进给量与 Ra 有较强的内在关联。对图2c也有影响,从曲线分析来看不是特别显著。此外,对三因素调整时,发现主轴速度越大,就会产生很多毛刺;每齿进给量越大,会产生孔径偏差和切削

表面残余高度;当切削进度稳定时,可以保证排屑空间,避免孔壁划伤,有利于质量保证。

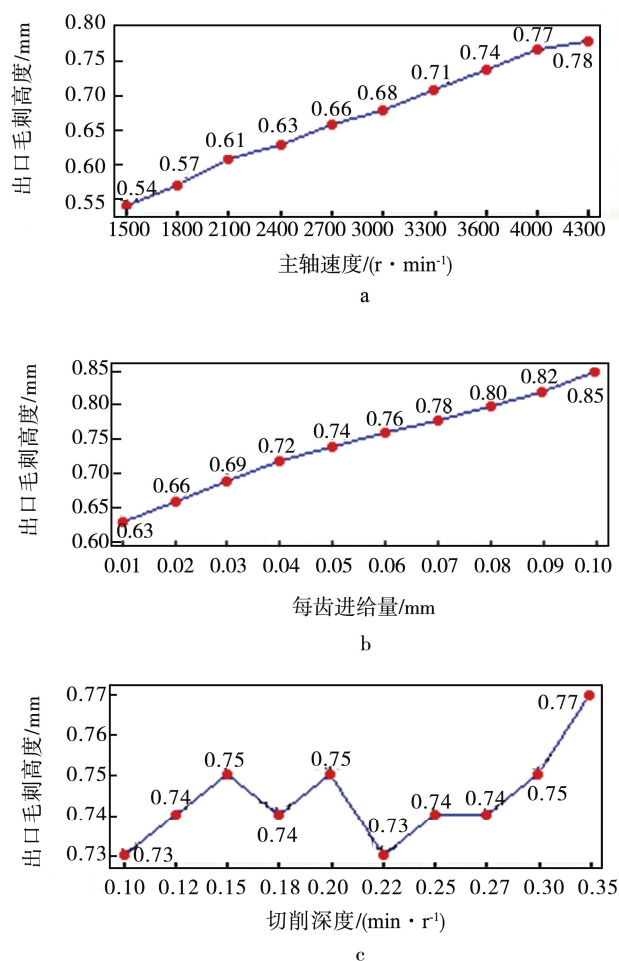


图2 切削参数对 Ra 影响

Fig.2 Cutting parameters have a impact on Ra

为了进一步验证上述三因素是否为关键影响要因,在此基础上,选择它们作为可控因素参与正交优化试验,根据试验经验,粗略确定各因素参数范围,见表1 切削参数及因素水平。

表1 切削参数因素水平表
Tab.1 Cutting parameter level factors

水 平	因素		
	A 切削深度 /(mm · r ⁻¹)	B 每齿进给 量/mm	C 主轴速度/ (r · min ⁻¹)
1	0.15	0.03	2000
2	0.25	0.05	3000
3	0.35	0.07	4000

2.3 选择正交实验表

对钛合金 HMH 切削过程正交设计,由于切削

深度、主轴旋转速度、每齿进给量对切削精度有显著影响,即对孔径表面质量有较大影响,选用上述三因素作为研究对象。表 2 是三水平三因素的构成因素水平表,在不考虑交互作用,选用 $L_9(3^4)$ 正交

表设计试验方案比较合适,需要 9 次模拟试验,即:实验方案中包含 9 组模拟试验,即包含 27 个水平组合试验情况,见表 2 切削数正交试验表。

表 2 切削参数正交试验表
Tab.2 Cutting parameters orthogonal experiment table

试验 序号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	粗糙度/ μm	信噪比/dB
	A 切削深度/($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	B 每齿进给量/mm	C 主轴速度/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	空列		
1	1(0.15)	1(0.03)	1(2000)	1	0.77	0.23
2	1(0.15)	2(0.05)	2(300)	2	0.87	0.12
3	1(0.15)	3(0.07)	3(4000)	3	0.85	0.14
4	2(0.25)	1(0.03)	2(3000)	3	0.88	0.11
5	2(0.25)	2(0.05)	3(4000)	1	0.81	0.18
6	2(0.25)	3(0.07)	1(2000)	2	0.72	0.29
7	3(0.35)	1(0.03)	3(4000)	2	0.78	0.22
8	3(0.35)	2(0.05)	1(2000)	3	0.84	0.15
9	3(0.35)	3(0.07)	2(3000)	1	0.82	0.17

3 安排试验

3.1 计算粗糙度和信噪比

1) 为了获得更加准确的钛合金孔表面粗糙度值,使用 MITUTOYO SJ401 测量仪对每个钛合金孔测试 10 次,以其平均值作为最终测试结果,试验数据经整理输入表 2。工艺要求毛刺少,孔径表面光滑,所以 Ra 值越小越好。

2) 计算信噪比。信噪比 (SNR) 值越大表示产品质量越稳健^[12],计算公式见式(1)。试验期望得到质量特性最佳值,即要求质量特性值尽可能小,所以选择望小特征。

$$\eta=S/N=-10\times\lg(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^ny_i^2) \tag{1}$$

式中: n 为测量次数; y_i 为第 i 次测量的表面粗糙度值。此次试验中 Ra 测试 10 次,相应的 SNR 也计算 10 次,以其平均值最为最终结果,试验数据经整理输入表 2。

3.2 计算极差

极差 (R) 在数理统计中表示一组数据中极大值与极小值之差,在正交试验中,通常依据极差值决定各因素主次排名顺序,寻找最佳水平组合和判断各因素的对试验结果的影响度,即 R 值越大,该

因素对试验指标影响越有分量。试验的最佳切削参数组合就是依据极差分析得出的结论寻找各因素最佳水平组合,见式(1)―(2)。

$$K_{ij}=T_{ij}/r \tag{2}$$

$$R_j=K_{ij(\max)}-K_{ij(\min)} \tag{3}$$

式中: i 为水平数; j 为正交试验表中的因素数; r 为某个因素相同水平重复试验的次数; K_{ij} 为第 j 列第 i 水平试验平均值; T_{ij} 为第 j 列第 i 水平正交试验结果 y_i 之和; $K_{ij(\max)}$ 与 $K_{ij(\min)}$ 分别为第 j 列中最大或最小的 K_{ij} ; R_j 为第 j 列中的极差值。

3.3 计算贡献率

贡献率 (CR)^[12]在质量工程学中 CR_j 表示第 j 列 R_j 值与所有 j 列极差和的比值, CR 值越大,说明该因素对产品质量影响度越高,属于关键质量特性予以监控,见式(4)。

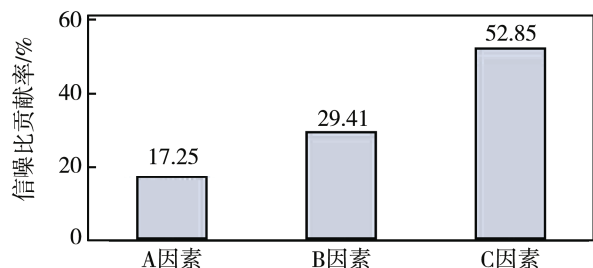
$$CR_j=(R_j/\sum_{j=1}^nR_j)\times100\% \tag{4}$$

3.4 绘制试验结果图表

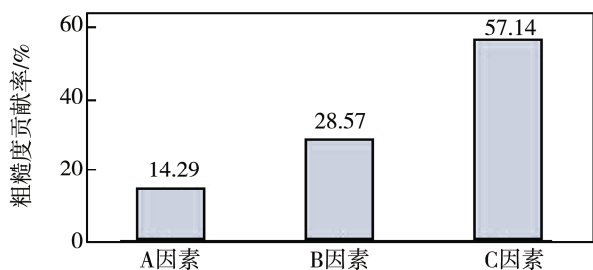
关于试验结果分析,目前有 2 种分析方法,直观分析方法 (极差-贡献分析法) 和方差分析法。试验采用直观分析法,步骤如下: 首先依据正交优化试验表 3,根据式(2)―(4),计算粗糙度和信噪比水平和、极差和贡献率;在此基础上绘制图 3 和图

4, 最后根据极差和贡献率, 判别各因素对试验结果的影响程度, 确定切削过程最佳水平组合。

1) 依据粗糙度和信噪比贡献率数据, 绘制贡献率见图3。



a 三因素信噪比贡献率对比

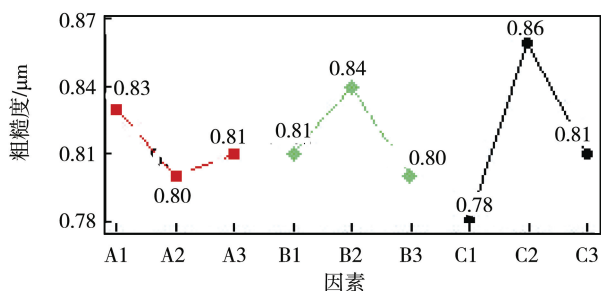


b 三因素粗糙度贡献率对比

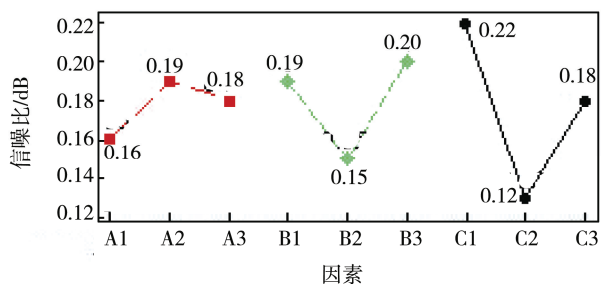
图3 切削参数 Ra 和 SNR 的贡献率

Fig.3 Cutting parameter contribution rate schematic diagram

2) 依据粗糙度和信噪比极差数据, 绘制效果图见图4。



a 三因素粗糙度效果



b 三因素信噪比效果

图4 切削参数 Ra 和 SNR 的效果

Fig.4 Cutting parameter effect schematic diagram

4 试验结果及分析

4.1 主要影响因素与最佳参数组合分析

1) 对于主要影响因素分析。其判断原则是极差-贡献率愈大, 所对应的因素愈重要; 由此可确定主、次要因素的排列顺序。根据贡献率数据绘制图3, 可以直观看出粗糙度贡献率, C因素影响度最大(57.14%), 其次是B因素贡献率(28.57%), 最后是A因素(14.29%); 信噪比贡献率, C因素最显著(52.85%), B因素次之(29.41%), 最后是A因素(17.25%)。综上分析, 可确定因素影响度主次择优顺序为: $C > B > A$ 。

2) 对于最佳参数组合分析。根据质量特性判别准则: 如果要求试验指标越小越好, 则最小的水平均值所对应的那个水平就是最佳水平; 如果要求指标愈大愈好, 则最大的水平均值所对应的那个水平就是最佳水平。根据极差数据绘制的各因素粗糙度、信噪比效果图4, 从中可见, 切削深度、主轴旋转速度和每齿进给量三因素合力对 Ra 和 SNR 有显著影响; 根据粗糙度试验评价指标: 工艺标准要求孔表面毛刺少且光滑, 所以粗糙度值越小越好, 由粗糙度效果图拐点对应的水平为最佳参数组合, 其次观察信噪比评价指标, 信噪比值越大, 表示质量越稳定, 由信噪比效果图拐点对应的水平为最佳参数。综上分析, 最佳的切削参数水平组合为: A2B3C1。

4.2 预测钛合金待加工工件表面粗糙度和信噪比

根据试验结果可预测待加工工件螺旋铣孔切削后的 $Ra^{[13]}$ (计算公式见文献[12])。

Ra 质量特性均值预测:

$$R = \bar{R} + (R_{A2} - \bar{R}) + (R_{B3} - \bar{R}) + (R_{C1} - \bar{R}) = 0.74 \mu\text{m} \quad (5)$$

式中: \bar{R} 为粗糙度水平均值; R_{A2} , R_{B3} , R_{C1} 为 Ra 最优水平组合值。

SNB 质量特性均值预测:

$$\eta = \bar{\eta} + (\eta_{A2} - \bar{\eta}) + (\eta_{B3} - \bar{\eta}) + (\eta_{C1} - \bar{\eta}) = 0.25 \text{ dB} \quad (6)$$

式中: $\bar{\eta}$ 为信噪比水平均值; η_{A2} , η_{B3} , η_{C1} 为 SNB 最优水平组合值。

5 试验验证

对待加工钛合金工件表面粗糙度预测之后, 为了进一步验证预测值是否满足钻孔表面质量标准, 依据正交试验获得最佳参数组合 (主轴旋转速度 2000 r/min、每齿进给量 0.07 mm 和切削深度 0.25 mm/r), 对钛合金加工件实验验证。

螺旋铣孔 (HMH) 切削过程工艺参数优化, 其目的就是为结构件加工提供技术支持, 提高效率, 降低报废率, 保证加工质量。因此, 为进一步评估孔表面粗糙度和信噪比试验指标, 螺旋切削试验如下: 钛合金加工件在 NEXUS410B—HS MAZAK 数控加工中心上加工, 采用直径 6 mm D100CBN 硬质合金铣削专用刀具, 见图 5。加工对象, 钛合金板材, 尺寸为 200 mm × 120 mm × 15 mm, Ti-6Al-4NT4; 粗糙度测量仪器, 采用 MITUTOYO SJ401 型测量仪; 加工要求, 孔直径 10 mm, 孔深度 10 mm。检验标准: 粗糙度不高于 0.8 μm , 信噪比不低于 0.2 dB, 钻孔精度等级介于 H7 ~ H9。作业方式: 通过直线插补方式实现圆弧加工, 按照正交试验工艺参数优化结果, 主轴旋转速度 2000 r/min 每齿进给量 0.07 mm, 切削深度 0.25 mm/r。使用旋转铣切削技术有利于提高排屑空间; HMH 在切削过程中, 钛合金容易升温发热而影响加工质量, 为了提高切削的精度, 保持切削质量不受干扰和延长切削刀具, 保证加工系统的稳定性, 一般采用冷却液降低切削区域温, 润滑用量一般为 25 mL/h, 在距切削区域约 25 mm 处喷洒冷却液^[14—15]。

对于加工件, 钻孔 30 个, 经过测量, 试验结

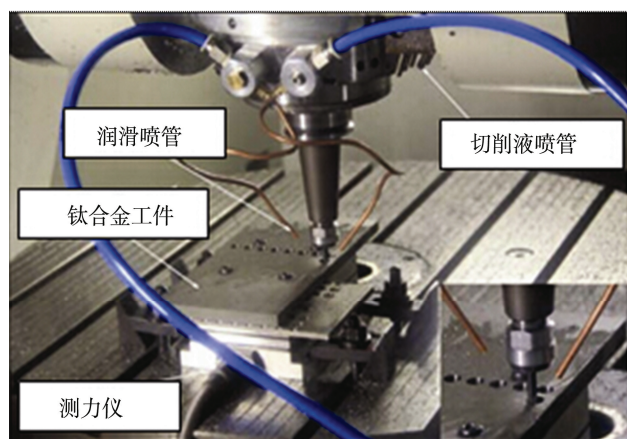


图 5 钛合金板材加工过程

Fig.5 Titanium alloy production process schematic diagram

果显示, R_a 值保持在 0.8 μm 之内, 值域大都分布在 0.55 ~ 0.75 μm 之间, 见图 6。信噪比与精度等级见控制见图 7, 信噪比值域介于 0.23 ~ 0.52 dB 之间, 从图中数据分析, 图 6 中所有测试点在上下控制线之间, 说明没有异常点出现, 可以判定信噪比质量特性处于稳态; 对于精度等级, 钛合金钻孔通过三坐标测量, 介于 H6.9 ~ H8.6 之间, 对比技术标准, 达到了期望要求。

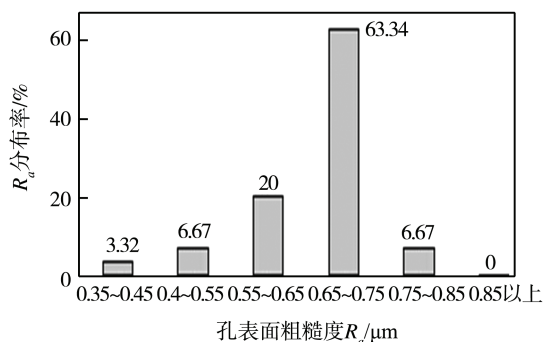


图 6 R_a 检测结果

Fig.6 R_a test result schematic diagram

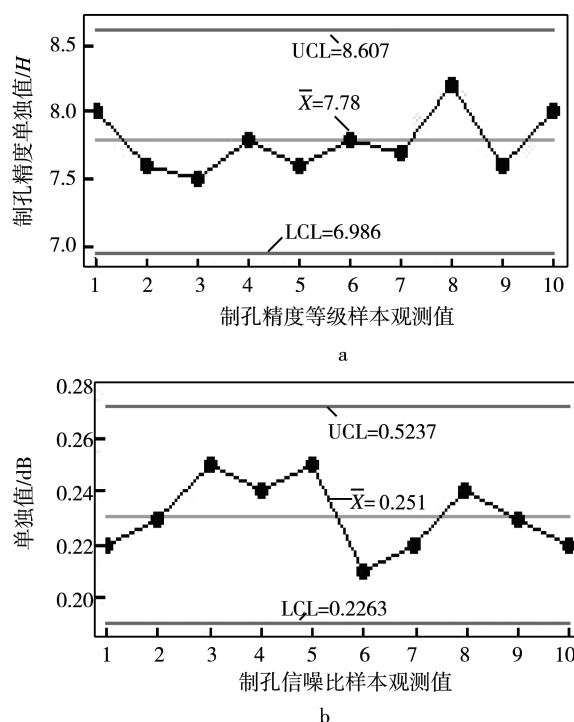


图 7 SNR 与钻孔精度等级控制

Fig.7 SNR and accuracy class control chart

综上所述, 实验结果基本达到切削技术要求; 此外, 钛合金板材是一种难加工材料, 在加工过程中, 不宜使用切削液, 否则随着钻孔数量增多, 孔表面质量可能有所下降, 因此, 为了提高钻孔质量和效率, 避免刀具长时间工作发生动态性磨损, 影响孔工表面粗糙度, 见图 5, 可采用微量润滑切削、

液氮切削或者喷雾冷却等抑制升温措施^[16], 以此改善切削过程中刀具因摩擦而磨损, 干扰信噪比和降低孔表面质量。

依据正交优化试验(OOE)最佳工艺水平组合, 对加工工件 Ra , SNR 展开预测, 将预测结果与钛合金试验结果对比分析, 实证显示(见图 6 与图 7 曲线分布), Ra , SNR 值都在 99% 预测置信区间内, 确认待加工工件的预测数值通过钛合金试验获得了验证并且钻孔精度也达到了技术标准。

6 结语

钛合金旋转铣孔切削参数稳健设计, 获得了最佳参数组合, 主轴旋转速度 2000 r/min, 每齿进给量 0.07 mm, 切削深度 0.25 mm/r。按照优化方案安排试验, 根据 R-CR 直观分析法得出了切削参数主、次影响因素: 主轴旋转速度对 Ra 和 SNB 试验指标影响最大, 每齿进给量和切削深度次之。依据最佳参数组合, 通过对钛合金加工件孔表面质量检验, 测量结果显示: 孔表面粗糙度介于 0.55 ~ 0.75 μm , 孔径精度介于 H7 ~ H9, 很好地达到了航天或汽车工业对钻孔粗糙度的技术要求。根据粗糙度和极差平均水平均值以及最优水平组合值, 对钛合金待加工工件 Ra 和 SNR 预测评估, 将预测值(Ra 值为 0.74 μm , SNR 值为 0.25 dB)与钛合金切削试验结果对比, 结果表明, 待加工工件的预测值获得了试验验证; 以此为基准, 将在更复杂的环境下, 融入润滑冷却技术, 考虑多目标影响因素并展开动力学研究。

参考文献

- [1] 何柏林, 张枝森. 加载环境对合金超高周疲劳行为的影响[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 51—57.
HE Bo-lin, ZHANG Zhi-sen. Influence of Loading Environment on Ultra-High-Cycle Fatigue of Alloy Material[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(4): 51—57.
- [2] TÖ H K, NSHOFF, SPINTIG W, et al. Machining of Holes Developments in Drilling Technology[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1994, 43(2): 551—561.
- [3] WHINNEM E, LIPCZYNSKI G, ERIKSSON I. Development of Orbital Drilling for the Boeing787[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2009, 1(1): 811—816.
- [4] WANGYANG N. Orbital Drilling Tames Aerospace Materials[J]. Manufacturing Engineering, 2012, 149(4): 34.
- [5] DENKENA B, BOEHNKE D, DEGE J H. Helical Milling of CFRP-titanium Layer Compounds[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008(1): 64—69.
- [6] FANGMANN S, MEYER I, BRINKSMEIER E. Extended Theory for Orbital Drilling(Helical Drill-Milling)[J]. Material Wissenschaftund Werkstofftech, 2011, 42(6): 506—518.
- [7] 江跃东, 何改云, 秦旭达, 等. TC4 钛合金螺旋铣孔工艺孔壁表面完整性研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 10(34): 1521—1524.
JIANG Yue-dong, HE Gai-yun, QIN Xu-da, et al. Study on Surface Integrity of Hole in Helical Milling Process of TC4 Titanium Alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 10(34): 1521—524.
- [8] 王丰超, 张硕, 姚振强, 等. 钛合金螺旋铣孔工艺参数对孔加工质量的影响[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(2): 101—104.
WANG Feng-chao, ZHANG Shuo, YAO Zhen-qiang, et al. The Effect of Process Conditions on the Hole Quality of Titanium Alloy by Orbital Drilling[J]. Machine Design and Research, 2015, 31(2): 101—104.
- [9] 张硕, 胡永祥, 姚振强, 等. 碳纤维复合材料螺旋铣孔出口缺陷试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014, 6(34): 98—103.
ZHANG Shuo, HU Yong-xiang, YAO Zhen-qiang. Experimental Investigation of the Defect on CFRP Hole Exit of Orbital Drilling[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014, 6(34): 98—103.
- [10] 吉春辉, 刘振旺, 秦旭达, 等. 钛合金螺旋铣孔参数对表面粗糙度影响研究[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(3): 225—231.
JI Chun-hui, LIU Zhen-wan, QIN Xu-da, et al. Study on the Influence of Helical Milling Parameters on Surface Roughness of Titanium Alloy[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(3): 225—231.
- [11] 张云鹏, 朱红钢, 孙广标, 等. 人工神经网络在电火花铣削钛合金中应用[J]. 电加工与模具, 2009, 12(6): 34—37.
ZHANG Yun-peng, ZHU Hong-gang. Artificial Neural Network Used in Edam Milling Titanium Alloy[J]. Electric Processing and Mould, 2009, 12(6): 34—37.
- [12] 田口玄一. 发开与设计阶段的质量工程学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.
TAGUCHI Xuan. One Open and Design Phase of the Quality Engineering[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1990.
- [13] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
REN Lu-quan. Experimental Optimization Design and Analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [14] 杨春梅, 刘睿, 任洪娥, 等. 竹材四面铣削三面剖分数控系统设计[J]. 包装工程, 2015, 36(13): 95—100.
YANG Chun-mei, LIU Rui, REN Hong-e, et al. Numerical Control System of Four-side Milling and Three-side Splitting of Bamboo[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(13): 95—100.
- [15] 王海艳, 秦旭达, 任成祖. 基于 Pareto 遗传算法的螺旋铣加工参数优化[J]. 中国机械工程, 2012, 23(17): 2058—2061.
WANG Hai-yan, QIN Xu-da, REN Cheng-zu. Optimization of Cutting Parameters in Helical Milling Process Based on Pareto Genetic Algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(17): 2058—2061.
- [16] DENKENA B, BOEHNKE D, DEGE J H. Helical Milling of CFRP-titanium Layer Compounds[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008(1): 64—69.