

# 基于灰色关联分析的CFRP/Ti6Al4V叠层材料螺旋铣孔工艺参数优化\*

高延峰, 蒲景威, 方向恩

(南昌航空大学航空制造工程学院, 南昌 330063)

**[摘要]** 采用田口法设计了 CFRP/ 钛合金叠层材料铣削试验, 以转速、进给量、螺距为设计变量, 以复合材料的孔径误差、表面粗糙度及损伤因子为输出特性指标分析铣削试验。在田口试验的基础上运用灰色关联及主成分分析对叠层材料的复合材料加工进行多目标优化, 先后计算出输出特性指标的信噪比、主成分及灰色关联度, 最后分析了铣削参数对灰色关联度信噪比、均值响应的影响。铣削 CFRP/ 钛合金叠层材料复合材料时最优加工参数是转速 2000r/min、进给量 0.02mm/r、螺距 0.15mm。

**关键词:** 碳纤维复合材料; 田口法; 螺旋铣削; 灰色关联分析; 多目标优化; 最优加工参数

## Multi-Objective Optimization of Helical Milling Process for CFRP/Titanium Alloy Stacks Based on Taguchi Grey Relational Analysis

GAO Yanfeng, PU Jingwei, FANG Xiang'en

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**[ABSTRACT]** To improve the hole-making quality for CFRP/Ti6Al4V stacks and optimize the helical milling process parameters, experiments were designed and implemented based on the Taguchi method. The spindle rotation speed, feed rate and pitch were taken as the design variables in the experiments. The hole diameter error, surface roughness and damage factor in the composite material layer were taken as the output indicators of the Taguchi model. Based on the Taguchi experimental results, the grey relational analysis and principal components analysis were adopted to optimize the helical milling process parameters. The influences of helical milling parameters on the signal noise ratios, principal components and the grey correlation degrees of output indicators were analyzed. The experiment results show that the optimal helical milling parameters are spindle speed 2000r/min, feed rate 0.02mm/r, and pitch 0.15mm.

**Keywords:** Carbon fiber-reinforced polymer; Taguchi method; Helical milling; Grey relational analysis; Multi-objective optimization; Optimal parameter

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.14.090

在飞机制造过程中,碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber-Reinforced Polymer, CFRP)经常和钛合金材料通过铆钉或螺栓连接装配在一起。为了减小加工误差,提高连接孔的位置精度,通常将具有装配关系的零件预先装夹在一起,然后一次性钻孔<sup>[1]</sup>。然而,由于CFRP和钛合金具有截然不同的材料属性,钻孔过程中CFRP材料极易出现纤维撕裂分层、树脂材料的烧伤、出口毛刺等缺陷<sup>[2]</sup>。因此,如何提高叠层材料装配制孔的质量成

为当前生产中急需解决的难题。

螺旋铣孔由于轴向力小、孔壁表面质量好,近年来被越来越多地用于CFRP/钛合金叠层材料的钻孔中。单以才等<sup>[2]</sup>采用大螺距螺旋铣孔方法对CFRP/Ti6Al4V叠层材料进行了制孔试验,结果表明,相比普通钻孔,螺旋铣孔方法可以提高孔径精度及孔壁质量,但是仍存在CFRP壁面被Ti6Al4V合金的高温切屑烧伤的情况。王海艳等<sup>[3]</sup>开展了CFRP/Ti6Al4V叠层材料螺旋铣孔试验,发现CFRP的高硬度造成了刀具的严重磨损,导致叠层情况下钛合金层切削力明显大于单层钛合金的

\* 基金项目: 航空科学基金项目(2018ZE56013); 江西省重点研发计划项目(20171BBE50011); 江西省自然科学基金项目(20171BAB206033)。

切削力,且底层钛合金排屑困难,影响制孔质量。何改云等<sup>[4]</sup>通过比较两种工艺参数,指出在加工复合材料层和钛合金层时选用不同的加工参数比采用相同的参数加工精度更高。陆翠等<sup>[5]</sup>采用遗传算法对CFRP/钛合金螺旋铣孔工艺参数进行了优化,得出叠层螺旋铣加工应优先从复合材料侧切入。然而,叠层材料制孔时因涉及到两种不同材料的加工,且孔加工质量的表征量有孔径误差、纤维撕裂、孔壁表面粗糙度等多种参数,给其加工参数优化带来了很大难度。因此,目前对其加工质量进行多目标优化研究的文献相对较少。

本文提出采用田口试验法构建叠层材料螺旋铣孔模型,研究主轴转速、进给量、螺距等加工参数对CFRP层孔壁表面粗糙度、损伤因子和孔径误差度的影响规律,基于灰色关联和主成分分析方法对叠层材料铣孔工艺参数进行多目标优化。

## 1 试验方案

### 1.1 试验设备与材料

采用XKA715A立式铣床,机床的转速范围20~8000r/min,主轴功率15kW。刀具选用整体硬质合金氮化硅(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)涂层四刃铣刀,刀具螺旋角为35°,直径为6mm,硬度92.4为HRC;复合材料选用东丽公司生产的型号为M21/T700的碳纤维复合材料;钛合金选用宝钛生产的Ti6Al4V合金板材,两种材料尺寸均为200mm×150mm×6mm。所有试验都是干式铣削,材料加工顺序为从CFRP层向Ti6Al4V层铣孔,试验采用偏心加工,偏心距e=2mm。为了找到影响螺旋铣孔质量的主要工艺参数,对CFRP层和钛合金层采用相同的参数进行加工。以主轴转速、进给量和螺距为加工参数,试验中每个参数选择3个水平,采用田口L<sub>27</sub>(3<sup>3</sup>)设计法,因素与水平如表1所示。

### 1.2 孔加工质量性能指标

在CFRP/Ti6Al4V叠层材料钻孔时,孔加工的缺陷主要发生在复合材料层,因此,主要对复合材料的螺旋铣孔进行多目标优化。以复合材料的表面粗糙度R<sub>a</sub>、孔径误差度E和碳纤维复合材料出口损伤因子λ为性能

评价指标。其中D=10mm,孔径误差度定义为:

$$E=|D_f-D| \quad (1)$$

其中,D<sub>f</sub>为测量直径;D为所设计的孔加工直径。

损伤因子λ定义为:

$$\lambda=\frac{S_f}{S} \quad (2)$$

其中,S<sub>f</sub>为损伤面积;S为所设计的标准孔面积,其损伤统计如图1所示。

## 2 试验结果与方差分析

为了试验顺序的安排更加科学,试验结果的分析更加全面,且准确估算各因子模型分辨率。试验按照田口正交表L<sub>27</sub>(3<sup>3</sup>)的统计学要求,共进行27组。对每组试验的孔径、表面粗糙度和损伤因子分别测量5次,测量结果求平均值,结果如表2所示。

对表2的试验结果进行方差分析,结果如表3~5所示。其中,F为方差分析中的检验值;P表示检验水平。由表3孔径误差度的方差分析可知:P<0.0001,表明孔径误差度模型差异极显著,其校正决定系数为0.9125,复相关系数为0.9327,模型分辨力为21.6>4,说明孔径误差度试验模型是有效的。由表4表面粗糙度的方差分析可知:P=0.0005,表明表面粗糙度模型差异极显著,其校正决定系数为0.5746,复相关系数为0.6728,模型分辨力为7.935>4,说明表面粗糙度试验模型是有效的。由表5碳纤维复合材料出口损伤因子的方差分析可知:P=0.0053,表明分层因子模型差异极显著,其校正决定系数为0.4416,复相关系数为0.5705,模型分辨力为7.618>4,说明损伤因子试验模型是有效的。

## 3 螺旋铣孔参数的多目标优化

孔质量的评价往往需要多个指标的测定,单一指标的优良不能代表制孔质量,在确保结果的有效性和真实

表1 田口L<sub>27</sub>(3<sup>3</sup>)设计试验因素与水平

Table 1 Factors and levels chosen for Taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>3</sup>) design

水平	因素		
	主轴转速 A/ (r·min <sup>-1</sup> )	进给量 B/ (mm·r <sup>-1</sup> )	螺距 C/mm
1	2000	0.02	0.10
2	2800	0.03	0.15
3	3600	0.04	0.20

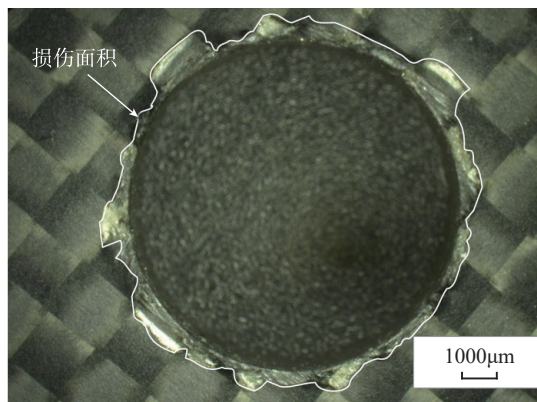


图1 出口损伤示意图

Fig.1 Schematic diagram of exit damage

表2 田口L<sub>27</sub>(3<sup>3</sup>)试验设计及试验结果  
Table 2 Experiment results of taguchi L<sub>27</sub>(3<sup>3</sup>) design

序号	主轴转速 A / (r·min <sup>-1</sup> )	进给量 B / (mm·r <sup>-1</sup> )	螺距 C /mm	E/mm	R <sub>a</sub> /μm	λ
1	1	1	1	0.0352	2.1820	1.2420
2	1	1	2	0.0392	2.7827	1.1459
3	1	1	3	0.0348	2.7800	1.2003
4	1	2	1	0.1538	3.3133	1.1758
5	1	2	2	0.1422	3.2657	1.2020
6	1	2	3	0.0922	3.3153	1.2064
7	1	3	1	0.2244	2.8623	1.2293
8	1	3	2	0.2954	2.8673	1.1101
9	1	3	3	0.2848	2.8397	1.2944
10	2	1	1	0.1646	2.6680	1.1873
11	2	1	2	0.1782	2.6733	1.1444
12	2	1	3	0.1756	2.6857	1.2063
13	2	2	1	0.3798	2.9240	1.1989
14	2	2	2	0.3668	2.9207	1.1198
15	2	2	3	0.3554	3.0177	1.1615
16	2	3	1	0.5538	3.1447	1.1820
17	2	3	2	0.5742	2.9980	1.2087
18	2	3	3	0.5596	3.0790	1.0790
19	3	1	1	0.1888	2.0677	1.1800
20	3	1	2	0.1760	2.0967	1.1168
21	3	1	3	0.1796	2.0453	1.1680
22	3	2	1	0.5270	2.5463	1.1025
23	3	2	2	0.5390	2.5376	1.1201
24	3	2	3	0.5298	2.5613	1.1497
25	3	3	1	0.6096	3.0277	1.1603
26	3	3	2	0.5828	3.0650	1.1102
27	3	3	3	0.5614	3.1330	1.1936

表3 孔径误差度方差分析  
Table 3 ANOVA for aperture error

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.95	6	0.16	46019	<0.0001
A	0.41	2	0.21	60.08	<0.0001
B	0.54	2	0.27	78.36	<0.0001
C	8.089E-004	2	4.045E-004	012	0.8890
差	0.068	20	3.417E-003	—	—
总和	1.02	26	—	—	—
R <sup>2</sup> =0.9327	Adj R <sup>2</sup> =0.9125		Adeq Precision=21.60		

表4 表面粗糙度方差分析  
Table 4 ANOVA for surface roughness

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2.11	6	0.36	6.85	0.0005
A	0.86	2	0.43	8.42	0.0022
B	1.24	2	0.62	12.12	0.0004
C	2.314E-003	2	1.157E-003	0.023	0.9777
残差	1.03	20	0.051	—	—
总和	3.13	26	—	—	—
R <sup>2</sup> =0.6728	Adj R <sup>2</sup> =0.5746		Adeq Precision=7.935		

表5 损伤因子方差分析  
Table 5 ANOVA for damage factor

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.030	6	50.77E-003	4.43	0.0053
A	0.014	2	7.094E-003	6.19	0.0081
B	2.698E-003	2	1.349E-003	1.18	0.3288
C	0.014	2	6.787E-003	5.92	0.0096
残差	0.023	20	1.147E-003	—	—
总和	0.053	26	—	—	—
R <sup>2</sup> =0.5705	Adj R <sup>2</sup> =0.4416		Adeq Precision=7.618		

性的基础上,选择科学合理的方法,对试验结果进行综合评估进而选择出更好的加工参数是很有必要的。因此本次试验以复合材料层的孔径误差度、表面粗糙度和出口损伤因子为性能指标,以主轴转速、进给速度和螺距为设计变量,采用基于灰色关联和主成分分析对叠层材料螺旋铣孔工艺进行多目标优化。

### 3.1 灰色关联分析

在田口试验中假设输出特性指标  $y_i$  为随机变量,其数学期望为  $\mu$ , 方差为  $\sigma^2$ , 信噪比可表示为:

$$\eta = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

信噪比  $\eta$  越大,说明输出特性越稳定<sup>[6]</sup>。由于方差与均值对输出值的稳健性有影响,因此在实际运算中经常把信噪比转换成 dB 值。由于表面粗糙度、孔径误差度和损伤因子均有望小特性,所以三者的信噪比依据式(4)计算 dB 值,结果如表 6 所示。

$$\eta_s = -10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

为了确保数据的等效性和同序性,需对信噪比 dB 值进行无量纲化处理,其计算公式为:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^{(o)}(k) - \min x_i^{(o)}(k)}{\max x_i^{(o)}(k) - \min x_i^{(o)}(k)} \quad (5)$$

其中,  $x_i^*(k)$  为无量纲化处理生成的数据序列;  $x_i^{(0)}(k)$  为原始数据序列,  $i=1,2, \dots, m; k=1,2, \dots, n$ ;  $\max x_i^{(0)}(k)$  为原始序列的最大值;  $\min x_i^{(0)}(k)$  为原始序列的最小值;  $x^{(0)}$  为望目特性目标值。

依据望小特性无量纲化处理公式(5)对原始序列进行处理,其结果如表6所示。在生成的比较序列中,序列值越大说明该性能指标越优<sup>[7]</sup>。

根据处理后的数据序列,可以计算偏差序列及灰色关联系数。

计算偏差序列公式:

$$\Delta_{oi}(k) = |x_o^*(k) - x_i^*(k)| \quad (6)$$

表6 信噪比及数据处理序列

Table 6 SNR and sequences date of pre-processing

序号	信噪比/dB			无量纲化处理后的数据序列		
	$E$	$R_a$	$\lambda$	$E$	$R_a$	$\lambda$
1	28.841	-8.9860	-1.8850	1.0000	0.3505	0
2	28.028	-8.9050	-1.1830	0.9669	0.3701	0.5740
3	28.775	-8.8890	-1.5870	0.9973	0.3740	0.2437
4	15.782	-10.425	-1.4090	0.4683	0.0012	0.3892
5	16.248	-10.285	-1.5990	0.4873	0.0352	0.2339
6	20.256	-10.430	-1.6300	0.6505	0	0.2085
7	12.490	-9.1410	-1.7930	0.3343	0.3129	0.0752
8	10.193	-9.1620	-0.9090	0.2407	0.3078	0.7980
9	10.422	-9.0660	-1.0590	0.2501	0.3311	0.6754
10	15.354	-8.5690	-1.4920	0.4509	0.4517	0.3213
11	14.624.5	-8.5630	-1.1720	0.4212	0.4532	0.5830
12	14.644	-8.6770	-1.6300	0.4220	0.4255	0.2085
13	8.3287	-9.3210	-1.5760	0.1648	0.2692	0.2527
14	8.4204	-9.3210	-0.9830	0.1686	0.2685	0.7375
15	8.7206	-9.6040	-1.3030	0.1808	0.2005	0.4759
16	4.9350	-9.9580	-1.4580	0.0267	0.1146	0.3491
17	4.6899	-9.4850	-1.6470	0.0167	0.2294	0.1946
18	4.8176	-9.7710	-0.6620	0.0219	0.1600	1.0000
19	14.319	-6.3100	-1.4380	0.4087	1.0000	0.3655
20	14.787	-6.4320	-0.9600	0.4278	0.9704	0.7563
21	14.584	-7.9760	-1.3490	0.4195	0.5956	0.4383
22	5.4098	-8.1670	-0.8480	0.0460	0.5493	0.8479
23	5.1578	-8.0940	-0.9860	0.0357	0.3728	0.7351
24	5.2893	-8.2430	-1.1230	0.0411	0.5308	0.5495
25	4.2802	-9.6670	-1.2960	0.0000	0.1852	0.4816
26	4.5921	-9.7330	-0.9090	0.0127	0.1692	0.7980
27	4.9793	-10.052	-1.8750	0.0285	0.0917	0.0082

灰色关联系数计算公式:

$$\gamma(x_o^*(k), x_i^*(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (7)$$

其中,  $\Delta_{\min} = \min_{\forall i} \min_{\forall k} \Delta_{oi}(k)$ ,  $\Delta_{\max} = \max_{\forall i} \max_{\forall k} \Delta_{oi}(k)$ ;  $x_o^*(k)$  为参考序列;  $\Delta_{oi}(k)$  为偏差序列;  $\xi$  为分辨系数,其值取0.5。

根据式(6)计算出偏差序列,其结果如表7所示,由表7偏差序列结果可知  $\Delta_{\min}=0$ 、 $\Delta_{\max}=1$ 。结合表7中偏差序列,根据式(7)可计算出灰色关联系数,其结果如表7所示。

在灰色关联分析中,因孔径误差度、表面粗糙度及

表7 偏差序列、灰色关联系数及灰色关联度

Table 7 Deviation sequences, grey relational coefficient and grey relational grade

序号	偏差			灰色关联系数			灰色关联度
	$\Delta_{oi}(1)$	$\Delta_{oi}(2)$	$\Delta_{oi}(3)$	$E$	$R_a$	$\lambda$	
1	0.0000	0.6495	1.0000	1.000	0.4350	0.3333	0.6475
2	0.0331	0.6299	0.4260	0.9379	0.4425	0.5400	0.7237
3	0.0027	0.9260	0.7563	0.9947	0.4441	0.3980	0.6781
4	0.5317	0.9988	0.6108	0.4846	0.3336	0.4501	0.4634
5	0.5127	0.9648	0.7661	0.4937	0.3413	0.3949	0.4398
6	0.3495	1.0000	0.7915	0.5886	0.3333	0.3872	0.4801
7	0.6657	0.6871	0.9248	0.4289	0.4212	0.3509	0.3891
8	0.7593	0.6922	0.2020	0.3971	0.4194	0.7123	0.5578
9	0.7499	0.6689	0.3246	0.4000	0.4278	0.6064	0.5056
10	0.5491	0.5483	0.6787	0.4766	0.4770	0.4242	0.4450
11	0.5788	0.5468	0.4170	0.4635	0.4777	0.5453	0.5054
12	0.5780	0.5745	0.7915	0.4638	0.4653	0.3872	0.4249
13	0.8352	0.7308	0.7473	0.3745	0.4062	0.4009	0.3887
14	0.8314	0.7315	0.2625	0.3755	0.4060	0.6557	0.5186
15	0.8192	0.7885	0.5241	0.3790	0.3881	0.4882	0.4347
16	0.9733	0.8854	0.6509	0.3394	0.3609	0.4344	0.3882
17	0.9833	0.7706	0.8054	0.3383	0.3935	0.3830	0.3624
18	0.9781	0.8400	0.0000	0.3386	0.3731	1.0000	0.6756
19	0.5913	0.0000	0.6345	0.4582	1.0000	0.4409	0.4626
20	0.5722	0.0296	0.2437	0.4663	0.9441	0.6723	0.5826
21	0.5805	0.4044	0.5617	0.4628	0.5529	0.4709	0.4691
22	0.9540	0.4507	0.1521	0.3439	0.5259	0.7668	0.5632
23	0.9643	0.6272	0.2649	0.3415	0.4436	0.6537	0.5026
24	0.9589	0.4692	0.4505	0.3427	0.5159	0.5260	0.4401
25	1.0000	0.8148	0.5184	0.3333	0.3803	0.4910	0.4146
26	0.9873	0.8308	0.2020	0.3362	0.3757	0.7123	0.5289
27	0.9715	0.9083	0.9918	0.3398	0.3550	0.3335	0.3370

损伤因子的相对重要性不一致,所以各输出特性指标的权值不能按平均权值进行计算。为了准确反映各输出特性指标的相对重要性,在灰色关联计算中其权重系数根据输出特性指标的主成分分析来确定。

### 3.2 主成分分析

主成分分析是对多变量数据进行最佳综合简化,也就是对高维变量空间进行降维处理<sup>[8]</sup>。主成分分析法的步骤如下:

(1) 对原始数据进行标准化处理。

假设主成分分析输出特性指标变量有  $m$  个,共有  $n$  个评价对象,其输出特性指标矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (8)$$

根据式(9)

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij} - \mu_j}{s_j} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

其中,  $\mu_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ij}$ ;  $s_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{ij} - \mu_j)^2}$ ;  $\mu_j, s_j$  为第  $j$  个指标的样本均值和样本方差。

对应的,  $\bar{x}_j = \frac{x_j - \mu_j}{s_j} (j=1, 2, \dots, m)$  为标准化指标

变量。因此可将各指标  $a_{ij}$  转换成标准  $\bar{a}_{ij}$ 。

(2) 计算相关系数矩阵  $R=(r_{ij})_{n \times m}$ 。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \bar{a}_{ki} \cdot \bar{a}_{kj}}{n-1} \quad (i, j=1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

(3) 计算特征值特征向量

$$(R - \lambda_m I_m) \mu_m = 0 \quad (11)$$

其中,  $\lambda_m$  为特征值;  $\mu_m$  为特征向量。

$\mu_j = [\mu_{1j}, \mu_{2j}, \dots, \mu_{mj}]^T$ , 由特征向量组成的  $m$  个新指标变量:

$$\begin{aligned} y_1 &= \mu_{11} \bar{x}_1 + \mu_{12} \bar{x}_2 + \cdots + \mu_{1m} \bar{x}_m, \\ y_2 &= \mu_{21} \bar{x}_1 + \mu_{22} \bar{x}_2 + \cdots + \mu_{2m} \bar{x}_m, \\ &\vdots \\ y_m &= \mu_{m1} \bar{x}_1 + \mu_{m2} \bar{x}_2 + \cdots + \mu_{mm} \bar{x}_m, \end{aligned}$$

其中,  $y_1$  为第 1 主成分;  $y_2$  为第 2 主成分;  $\cdots$ ;  $y_m$  为第  $m$  主成分。

第  $i$  个主成分的贡献率:

$$b_i = \frac{\lambda_j}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

前  $p$  个主成分的累计贡献率为:

$$a_p = \frac{\sum_{k=1}^p \lambda_k}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \quad (13)$$

当  $a_p$  达到 85%~95% 时,则选择前  $p$  个指标变量的主成分代替原始数据进行分析。

### 3.3 灰色关联度的计算

灰色关联度用来表示比较序列对参考序列的影响程度,灰色关联度为:

$$\Gamma(x_o^*, x_i^*) = \sum_{k=1}^n \beta_k (x_o^*(k), x_i^*(k)) \quad (14)$$

其中,  $\Gamma(x_o^*, x_i^*)$  代表  $x_i^*$  对  $x_o^*$  的灰色关联度;  $\beta_k$  为第  $k$  个输出特性的权重,  $\sum_{i=1}^n \beta_k = 1$ , 当比较序列与参考序列变化基本一致时两者关联度最大,此时  $\Gamma(x_o^*, x_i^*) = 1$ 。输出特性指标的权重为第 1 主成分各特征性量的平方<sup>[9]</sup>。因此在计算灰色关联度前先由表 7 的灰色关联系数根据主成分分析步骤依次计算出主成分分析对应的特征值及特征向量,结果如表 8、表 9 所示。

由表 9 主成分特征向量可知,在灰色关联分析中,孔径误差度、表面粗糙度及损伤因子的权重分别为 0.4675、0.0243、0.5082。

## 4 优化结果分析

CFRP/ 钛合金叠层材料的加工参数对 CFRP 灰色关联度均值响应如表 10 所示,可知,进给量对 CFRP 灰色关联度影响最大,其次是主轴转速和螺距。

图 2 为灰色关联度信噪比主效应图。可知,灰色关联度信噪比随转速与螺距变化呈现起伏现象,但随进给量的减小灰色关联度信噪比逐渐增大。

表8 主成分特征值及贡献率

Table 8 Eigen values and explained variation for principal components

主成分	特征值	贡献率
1	1.3362	0.4454
2	1.0143	0.3381
3	0.6494	0.2165

表9 主成分特征向量

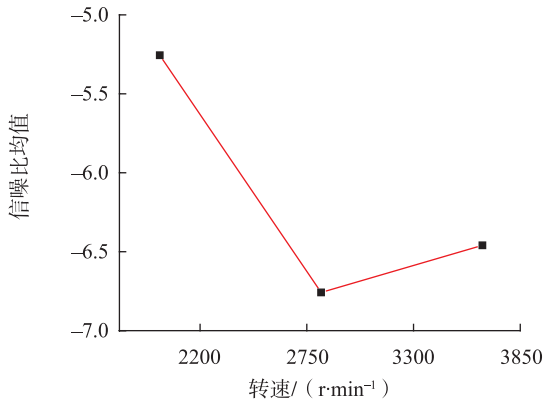
Table 9 Eigenvectors for principal components

输出特性指标	特征向量		
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
$E$	-0.6837	0.2844	0.6721
$R_a$	0.1558	0.9566	-0.2463
$\lambda$	0.7129	0.0637	0.6983

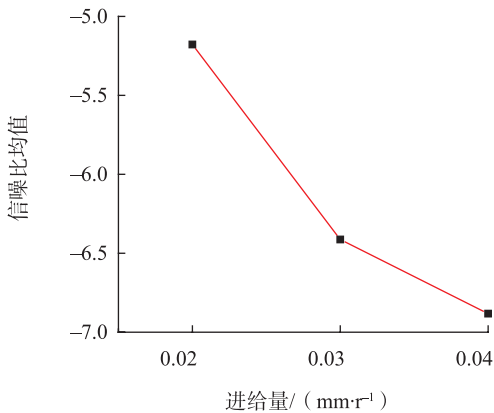
表10 关联度均值响应

Table 10 Mean effect response of grey relational grade

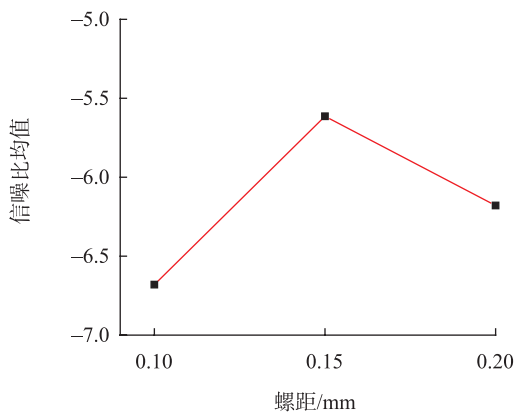
水平	因素		
	主轴转速 $A$ / (r·min <sup>-1</sup> )	进给量 $B$ / (mm·r <sup>-1</sup> )	螺距 $C$ /mm
1	0.5428	0.5488	0.4625
2	0.4604	0.4701	0.5246
3	0.4779	0.4621	0.4939
4	0.0824	0.0866	0.0622



(a) 转速对信噪比的影响



(b) 进给量对信噪比的影响



(c) 螺距对信噪比的影响

图2 铣削参数对灰色关联度信噪比的影响

Fig.2 SNR at different control levels of milling parameters for grey relational grade

在田口试验分析中始终需要信噪比最大,最大信噪比对应的输出特性指标最优<sup>[10]</sup>。因此根据这一原理在加工叠层材料时其参数最优的组合为 $A_1B_1C_2$ ,其对应加工参数是转速2000r/min、进给量0.02mm/r、螺距0.15mm,对应的输出特性指标孔径误差度为0.0392mm,表面粗糙度为2.7827 $\mu$ m,损伤因子为1.1459。图3为此参数下加工出的复合材料出口形貌。

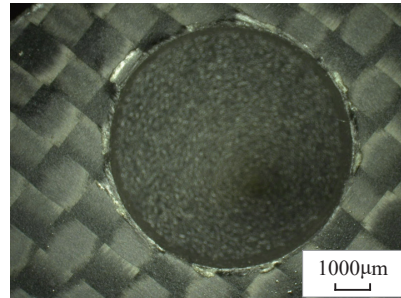


图3 最优参数下复合材料出口形貌

Fig.3 Exit morphology of composite materials under the optimal parameters

## 5 结论

(1) 采用田口法设计了CFRP/钛合金叠层材料铣削试验,以转速、进给量、螺距为设计变量,以复合材料的孔径误差度、表面粗糙度及损伤因子为输出特性指标分析铣削试验。

(2) 在田口试验的基础上运用灰色关联及主成分分析对叠层材料的复合材料加工进行多目标优化先后计算出输出特性指标的信噪比、主成分及灰色关联度,最后分析了铣削参数对灰色关联度的信噪比均值响应的影响,得出进给速度对CFRP灰色关联度的信噪比影响最大,其次是转速和螺距。

(3) 铣削CFRP/钛合金叠层材料复合材料时最优参数组合为 $A_1B_1C_2$ ,其对应加工参数是转速2000r/min、进给量0.02mm/r、螺距0.15mm,对应的输出特性指标孔径误差度为0.0392mm,表面粗糙度为2.7827 $\mu$ m,损伤因子为1.1459。

## 参考文献

[1] 李春奇,殷俊,傅玉灿,等.航空叠层材料制孔技术研究现状与发展趋势分析[J].机械制造与自动化,2015(3):24-26,35.  
 LI Chunqi, YIN Jun, FU Yucan, et al. Research status and trend analysis of hole machining technology of aeronautic stacked materials[J]. Machine Building & Automation, 2015(3): 24-26, 35.  
 [2] 单以才,何宁,杨吟飞. CFRP/Ti6Al4V 叠层构件大螺距螺旋铣孔试验研究[J].机械设计与制造,2015(5):103-106.  
 SHAN Yicai, HE Ning, YANG Yinfei. Experimental investigation on orbital drilling of CFRP/Ti6Al4V stacks with big pitch[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(5): 103-106.

(下转至第102页)

concentration factor of machined surfaces[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 923–930.

[25] 杨东. 基于长疲劳寿命的钛合金 Ti6Al4V 铣削加工表面完整性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.

YANG Dong. Milling induced surface integrity and its influence on fatigue life of the titanium alloy Ti-6Al-4V[D]. Jinan: Shandong University, 2017.

[26] AROLA D, WILLIAMS C L. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 923–930.

[27] 章刚. 表面粗糙度对表面应力集中系数和疲劳寿命影响分析 [J]. 机械强度, 2010, 32(1): 110–115.

ZHANG Gang. Effect of roughness on surface stress concentration factor and fatigue life[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(1): 110–115.

[28] NISHIDA S I, ZHOU C, HATTORI N, et al. Fatigue strength improvement of notched structural steels with work hardening[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 468–470: 176–183.

[29] JOSEFSON B L, STIGH U, HJELM H E. A nonlinear kinematic hardening model for elastoplastic deformations in grey cast iron[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1995, 117(2): 145–150.

[30] XIE L, PALMER D, OTTO F, et al. Effect of surface hardening technique and case depth on rolling contact fatigue behavior of alloy steels[J]. Tribology Transactions, 2015, 58(2): 215–224.

[31] SUÁREZ A, VEIGA F, LÓPEZLACALLE L N, et al. Effects of ultrasonics-assisted face milling on surface integrity and fatigue life of Ni-Alloy 718[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2016, 25(11): 5076–5086.

[32] 刘彦臣, 庞思勤, 王西彬, 等. 表面完整性对高强度钢疲劳寿命影响的试验研究 [J]. 兵工学报, 2013, 34(6): 759–764.

LIU Yanchen, PANG Siqin, WANG Xibin, et al. Experimental study on effect of surface integrity on high-strength steel fatigue life[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(6): 759–764.

[33] HENRIKSEN E K. Residual stresses in machined surfaces [J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1951, 73: 69–76.

[34] CHOI Y. Influence of rake angle on surface integrity and fatigue performance of machined surfaces[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 94: 81–88.

[35] SURESH S. Fatigue of materials[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

[36] JAVIDI A, RIEGER U, EICHLSEDER W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(10–11): 2050–2055.

[37] SASAHARA H. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45% C steel[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(2): 131–136.

[38] KAWAGOISHI N, CHEN Q, KONDO E, et al. Influence of cubic boron nitride grinding on the fatigue strengths of carbon steels and a nickel-base superalloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1999, 8(2): 152–158.

[39] SOUTO-LEBEL A, GUILLEMOT N, LARTIGUE C, et al. Characterization and influence of defect size distribution induced by ball-end finishing milling on fatigue life[J]. Procedia Engineering, 2011,

19(1):343–348.

[40] ROSS A S, MORROW J D. Cycle-dependent stress relaxation of A-286 alloy[J]. Journal of Fluids Engineering, 1960, 82(3): 654–658.

[41] HOLZAPFEL H, SCHULZE V, VÖHRINGER O, et al. Residual stress relaxation in an AISI 4140 steel due to quasistatic and cyclic loading at higher temperatures[J]. Materials Science & Engineering A, 1998, 248(1–2): 9–18.

[42] KIM J C, CHEONG S K, NOGUCHI H. Residual stress relaxation and low- and high-cycle fatigue behavior of shot-peened medium-carbon steel[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 56: 114–122.

通讯作者: 李勋, 博士, 副教授, 研究方向为高性能材料先进加工技术及表面完整性, E-mail: lixun@buaa.edu.cn.

(责编 铃兰)

(上接第95页)

[3] 王海艳. 难加工材料螺旋铣孔动力学研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

WANG Haiyan. Study on dynamics in helical milling of difficult-to-cut materials[D]. Tianjing: Tianjing University, 2012.

[4] HE G Y, LI H, JING Y D. Helical milling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks with varying machining parameters[J]. Transactions of Tianjin University, 2015, 21(1): 56–63.

[5] 陆翠. CFRP/Ti-6Al-4V 叠层结构螺旋铣孔过程工艺优化研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

LU Cui. The optimization research on helical milling of CFRP/Ti6Al4V stacks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[6] KHAN Z A, KAMARUDDIN S, SIDDIQUEE A N. Feasibility study of use of recycled high density polyethylene and multi response optimization of injection moulding parameters using combined grey relational and principal component analyses[J]. Materials & Design, 2010, 31(6): 2925–2931.

[7] DENG J L. Control problems of grey systems[J]. Systems & Control Letters, 1982, 1(5): 288–294.

[8] AI H, PAN H. Research on application of grey relevance theory in teaching evaluation[C]// 3rd International Conference on Education, Management and Computing Technology (ICEMCT 2016). Paris: Atlantis Press, 2016.

[9] 张敏, 黎向锋, 左敦稳. 基于主成分分析的 BP 神经网络内螺纹冷挤压成形质量预测 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(1): 51–54.

ZHANG Min, LI Xiangfeng, ZUO Dunwen. Forming quality forecast for internal threads formed by cold extrusion based on principal component analysis and neural networks[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(1): 51–54.

[10] LU H S, CHANG C K, HWANG N C, ET AL. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3808–3817.

通讯作者: 高延峰, 博士, 副教授, 研究方向为焊接自动化, E-mail: gaoyf@nchu.edu.cn.

(责编 铃兰)