

基于萤火虫算法的CFRP材料铣削刀具结构优化

李 锋¹ 曹一凡¹ 刘维伟² 李文科³ 杜崇辉³

(1 西安航空学院, 西安 710089)

(2 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

(3 西安航空发动机(集团)有限公司, 西安 710021)

文 摘 为了提高CFRP零件的加工表面质量和刀具寿命, 针对其铣削加工的刀具结构进行了优化。设计了刀具结构参数与CFRP材料铣削加工表面粗糙度、后刀面磨损量之间的正交试验。应用极差分析法分析了刀具结构参数对CFRP材料加工表面粗糙度、后刀面磨损量的影响规律, 并应用多元线性回归法建立了刀具结构参数与表面粗糙度、后刀面磨损量之间的数学模型。基于此模型, 采用FA萤火虫算法, 优化了刀具的结构参数, 并进行了实验验证。结果表明: 在试验参数范围内, 刀具结构参数对于CFRP工件铣削表面粗糙度的影响程度依次为: 后角、螺旋角、前角。当刀具的后角、螺旋角和前角增大时, 工件的表面粗糙度都呈减小趋势, 但减小的快慢程度不同; 刀具结构参数对于后刀面磨损影响程度依次为: 后角、螺旋角、前角。当刀具后角增大时, 后刀面磨损量迅速上升, 当螺旋角增大时, 后刀面磨损量减小, 当刀具的前角增大时, 后刀面磨损量先减小后增大。采用FA萤火虫算法优化后的刀具结构对CFRP材料进行铣削实验, 实验结果值与建立的模型预测值误差较小, 表面粗糙度的误差率为3%, 刀具后刀面磨损量的误差率为7.6%。

关键词 刀具结构参数, 碳纤维/树脂基复合材料, 铣削, 表面粗糙度, 刀具磨损, 萤火虫算法

中图分类号: TG147

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2019.01.004

Optimization of Tool Geometric Parameters in Milling of CFRP Based on Firefly Algorithm

LI Feng¹ CAO Yifan¹ LIU Weiwei² LI Wenke³ DU Chonghui³

(1 Xi'an Aviation College, Xi'an 710089)

(2 The Key Lab. of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(3 Xi'an Aero Engine(Group) LTD., Xi'an 710021)

Abstract In order to improve the machined surface quality of CFRP parts and the tool life, the tool structure was optimized. The orthogonal experiment between the tool structure parameters and the machined surface roughness of CFRP parts and the wear of the tool flank were designed. The influence of the tool structure parameters on the surface roughness of CFRP and the tool flank wear were analyzed by the extreme difference analysis. The mathematical models between the tool structure parameters and the surface roughness of CFRP and the tool flank wear were established by the multiple linear regression method. Based on this model, the tool structure parameters were optimized by using firefly algorithm and the verification experiment was carried out. The results show that the influence sequence of the tool structure parameters on the surface roughness of the CFRP workpiece is as follow: the rear angle, the helix angle, the front angle. Within the range of the test parameters, when the rear angle, the helix angle and the front angle increase, the surface roughness decrease, but the degree of reduction are different. The influence sequence of the tool structure parameters on the tool flank wear is in turn: the rear angle, the helix angle, the front angle. When the rear angle of the tool increases, the tool flank wear increases rapidly, and when the helix angle increases, the tool flank wear decreases. When the front angle of the tool increases, the tool flank wear decreases firstly and then increases. The tool structure optimized by firefly algorithm is used to milling the CFRP. The error value

收稿日期: 2018-04-03

基金项目: 西安航空学院基金(2016KY1207); 大学生创新创业项目(DCX2017040)

第一作者简介: 李锋, 1982年出生, 讲师, 主要研究方向为高速高效切削技术。E-mail: li-feng1982@163.com

between the experiment and the prediction is small. The error value of the surface roughness is only 3%, and the error value of tool flank wear is 7.6%.

Key words Tool geometric parameters, Carbon/epoxy composite, Milling, Surface roughness, Tool wear, Firefly algorithm

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具有质量轻、强度高、耐高温、耐腐蚀、疲劳性能优越、可设计性强等优点,广泛应用于航空航天制造领域。CFRP构件通常是通过热压近净成形,但为了保证其装配尺寸,脱模后还要通过机械加工的方式对其进行二次切削^[1-2]。CFRP材料的切削与金属材料不同,切削过程中始终伴随着纤维的断裂和基体的破碎,切屑的形成是一个极为复杂的过程,切削用的刀具承受着十分恶劣的工况。因此,CFRP材料切削过程中容易出现刀具磨损严重、加工表面质量差、加工效率低下等问题^[3]。

为了解决CFRP材料切削过程中的诸多问题,国内外学者应用新型刀具和不同切削方法对CFRP材料进行了大量的切削试验。S.Han^[4]采用不同类型的刀具对CFRP材料进行切削,研究发现金刚石涂层多齿刀具比AlTiN涂层多齿刀具和交错齿刀具更适合加工CFRP材料;J.R.Ferreira等^[5]采用硬质合金、陶瓷、PCBN、PCD刀具对CFRP材料进行了切削试验,分析了刀具材料对刀具自身耐用度的影响规律。南京理工大学的魏良耀等^[6]通过实验研究了不同刀具涂层对CFRP钻削力的影响规律;哈尔滨理工大学的苗光^[7]应用交错齿PCD立铣刀对CFRP进行了铣削试验,分析了铣削参数、纤维切削角对切削力和加工表面粗糙度的影响规律;沈飞的唐臣升^[8]应用“鱼鳞”铣刀对CFRP材料进行铣削试验,通过对正交试验数据的分析优选了刀具结构。

一般情况下,在机床、装夹、振动等工艺因素确定时,可以通过改善刀具的结构提高加工质量,减少加工缺陷,这是因为刀具结构的改善可以大大地降低切削热的产生^[9-10]。而上述的研究中,大部分只分析了刀具材料、刀具涂层、铣削参数、纤维切削角等对CFRP材料切削的影响规律,却没有考虑刀具结构参数对CFRP材料切削质量的影响规律。本文基于切削试验,主要研究了刀具结构参数对CFRP材料铣削表面粗糙度和刀具后刀面磨损量的影响规律,并应用数学算法对CFRP材料铣削刀具进行结构优化。研究结果拟为改善CFRP材料加工表面质量、延长刀

具寿命提供理论依据,为刀具结构优化提供切实可行的思路与方法。

1 试验

1.1 试验条件

采用10 mm厚的层合板状碳纤维增强树脂基复合材料(T300/阻燃环氧树脂),几何尺寸为245 mm×70 mm×10 mm,纤维方向0°,单层预浸料约为0.12 mm,84层;试验机床选用JOHNFORD YHVT850Z型三坐标立式数控加工中心,最大转速8 000 r/min,功率11 kW;刀具选用整体硬质合金刀具, Φ 12 mm,12刃立铣刀,牌号K44,其中刀具参数的选择区间为:前角 γ 为 $[8^\circ, 20^\circ]$,后角 α 为 $[10^\circ, 16^\circ]$,螺旋角 β 为 $[15^\circ, 30^\circ]$;表面粗糙度和刀具后刀面磨损的铣削方式均采用干铣削(顺铣);试件的表面粗糙度采用Mahr XCR20型粗糙度轮廓仪进行测量;刀具磨损量采用ALICONA公司的非接触式三维表面形貌仪测量。

1.2 试验方案

采用三因素四水平正交试验方案,三因素分别为刀具的前角 γ 、后角 α 、螺旋角 β ,每个因素的水平值及试验方案如表1所示。为了排除切削参数对试验结果的影响,试验中的切削参数根据实际加工经验统一选取,分别为:切深 $a_p=5$ mm,切宽 $a_e=1$ mm,线速率 $v_c=75$ m/min,每齿进给量 $f_z=0.02$ mm/z。刀具磨损量的测量是对每组试验参数的刀具每切削1 m后拆下铣刀,对后刀面磨损量进行测量,然后再将铣刀装回工作台,继续用相同部位进行切削,直至16组试验中有刀具达到磨钝标准时即停止试验。表面粗糙度的测量是在每组磨损试验加工后的试件表面选取平行于刀具进给方向进行测量,每一组试验测5次,求平均值作为最终测量值。每组试验一把刀具,共16把刀具。

2 结果及分析

2.1 极差分析

为了分析刀具的三个结构参数对CFRP材料铣削表面粗糙度和刀具后刀面磨损量的影响主次关系,利用极差分析法处理表1中 S_q 和 V_B 的试验数据,如表2所示。其中 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 分别为各因素同一水平之和, M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 分别为每一水平的平均表面粗

糙度和平均后刀面磨损量, R 为极差。从表 2 的极差统计结果可以看出: 在所选择的刀具结构参数范围内, 刀具的三个结构参数对铣削表面粗糙度 S_q 的影响主次为: 刀具后角 ($R=0.3514$) > 刀具螺旋角 ($R=0.2074$) > 刀具前角 ($R=0.1361$); 对刀具后刀面磨损量 V_B 的影响主次为: 刀具后角 ($R=27.38$) > 刀具螺旋角 ($R=15.84$) > 刀具前角 ($R=13.06$)。

表 1 试验方案及结果
Tab.1 Test schemes and results

序号	前角 $\gamma/(\circ)$	后角 $\alpha/(\circ)$	螺旋角 $\beta/(\circ)$	表面粗糙度 $S_q/\mu\text{m}$	后刀面磨 损量 $V_B/\mu\text{m}$
1	8	10	15	1.9548	97.59
2	8	12	20	1.6866	101.48
3	8	14	25	1.4956	105.30
4	8	16	30	1.3513	108.97
5	12	10	20	1.7526	87.10
6	12	12	15	1.7290	102.86
7	12	14	30	1.4743	96.93
8	12	16	25	1.3517	108.77
9	16	10	25	1.6148	91.40
10	16	12	30	1.4278	97.30
11	16	14	15	1.5675	121.84
12	16	16	20	1.3819	123.62
13	20	10	30	1.6121	90.69
14	20	12	25	1.4556	103.96
15	20	14	20	1.4323	118.33
16	20	16	15	1.4438	134.94

表 2 S_q 、 V_B 的极差统计
Tab.2 Range analysis of S_q and V_B

因素	前角 γ		后角 α		螺旋角 β	
	S_q	V_B	S_q	V_B	S_q	V_B
K_1	6.4883	413.34	6.9343	366.78	6.6951	457.23
K_2	6.3076	395.66	6.2990	405.60	6.2534	430.53
K_3	5.9920	434.16	5.9697	442.40	5.9177	419.43
K_4	5.9438	447.92	5.5287	476.30	5.8655	393.89
M_1	1.6221	103.34	1.7336	91.70	1.6738	114.31
M_2	1.5769	98.92	1.5748	101.40	1.5634	107.63
M_3	1.4980	108.54	1.4924	110.60	1.4794	104.86
M_4	1.4860	111.98	1.3822	119.08	1.4664	98.47
R	0.1361	13.06	0.3514	27.38	0.2074	15.84

根据极差统计结果, 可以做出铣削表面粗糙度 S_q 和刀具后刀面磨损量 V_B 随刀具各结构参数的直观分析图, 图 1 是刀具各结构参数对 CFRP 铣削表面粗

糙度 S_q 的影响规律, 图 2 是刀具各结构参数对刀具后刀面磨损量 V_B 的影响规律。

由图 1 可以看出, 随着刀具前角 γ 、后角 α 和螺旋角 β 的增加, 工件表面粗糙度总体上是减小的。这是因为在切削过程中, 随着前角的增大会使切削刃变得锋利, 强度较高的纤维更容易切断, 切屑的挤压变形也会减小, 进而刀面和切屑的摩擦和切削热量也减少, 所以加工表面质量得以提高; 后角的增大会使后刀面与切削表面的接触面减少, 进而降低了摩擦力, 对工件表面的破坏也减少^[12]。由图 2 可以看出, 随着刀具前角的增加, V_B 呈现先减小后增大的趋势; 当后角增大时, V_B 迅速上升, 这是因为后角的增大导致刀刃更薄更脆, 刀刃的强度降低从而磨损量增大; 当螺旋角增大时, 后刀面磨损量一直减小, 这是因为增大的螺旋角使实际前角变大, 刀具刃口更加锋利, 切向阻力减小。螺旋角增大也使切削刃的总长度变大, 但实际切削的材料量不变, 所以单位长度切削刃上所承受的切削力降低, 使刀具的实际磨损降低^[13]。

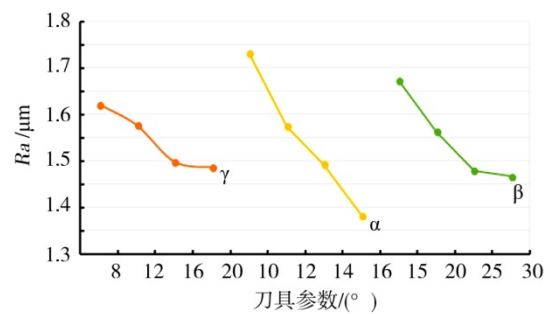


图 1 刀具参数对表面粗糙度的影响

Fig.1 Influence of tool geometric parameters on surface roughness

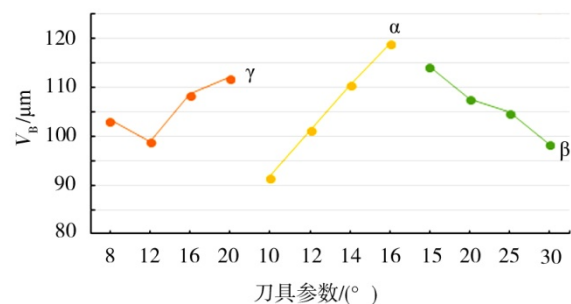


图 2 刀具参数对后刀面磨损量的影响

Fig.2 Influence of tool geometric parameters on tool wear

2.2 数学模型的建立

为了实现刀具结构的多目标优化, 必须首先建立表面粗糙度 S_q 和后刀面磨损量 V_B 与刀具几何参数之间的数学模型。采用基于实验的方法建立它们之间的数学模型, 复指形式是使用较多的一种形式。

以铣削表面粗糙度 S_q 为例,假设 S_q 与刀具几何参数 (γ, α, β) 之间的数学表达式为:

$$S_q = f(\gamma, \alpha, \beta) = C\gamma^a \beta^b \alpha^c \quad (1)$$

式中, C 为常数, a, b, c 分别为前角 γ , 螺旋角 β , 后角 α 的指数。对式(1)两边取对数得: $\lg S_q = \lg C + a \lg \gamma + b \lg \alpha + c \lg \beta$, 然后再令 $\lg S_q = y, \lg C = a_0, \lg \gamma = X_1, \lg \alpha = X_2, \lg \beta = X_3$, 则化简为: $y = a_0 + aX_1 + bX_2 + cX_3$ 。利用 SPSS 软件的多元线性回归分析函数, 结合表 1 中的试验数据, 就可以得到铣削表面粗糙度 S_q 与刀具几何参数之间的多元线性回归方程:

$$y = 1.061 - 0.094a - 0.461b - 0.193c \quad (2)$$

最终建立的经验数学模型如下:

$$S_q = 11.51\gamma^{-0.094} \alpha^{-0.461} \beta^{-0.193} \quad (3)$$

$$V_B = 38.90\gamma^{0.088} \alpha^{0.548} \beta^{-0.205} \quad (4)$$

为了确定经验数学模型(3)的可信程度, 还要对回归方程进行显著性检验^[14]。一般采用 F 值检验法, 检验结果如表 3 所示。 F 值为 111.145, 远远大于 $F_{0.01}(3, 16)$, 其中 3 为实验因素数, 16 为实验次数。也就是说回归方程十分显著, 建立的表面粗糙度 S_q 的经验数学模型与正交试验结果具有非常高的拟合度。利用同样的方法可以建立刀具后刀面磨损量 V_B 与刀具几何参数 (γ, α, β) 之间经验数学模型, 如式(4)。经过显著性检验, F 值为 50.683, 远远大于 $F_{0.01}(3, 16)$, 回归方程也十分显著, 建立的经验数学模型与正交试验结果具有非常高的拟合度。

表 3 方差分析表

Tab.3 Analysis of variance table

自由度	平方和	均分	F	显著性
3(回归)	0.030	0.010	111.145	十分显著
12(残差)	0.001	0.001		

3 基于萤火虫算法的刀具结构优化

3.1 萤火虫算法

萤火虫算法是受自然界中的萤火虫通过荧光进行信息交流这种群体行为的启发演变而来的一种新的仿生群智能优化算法。萤火虫算法的仿生学原理是: 用每只萤火虫来表示所选择的优化空间内的各个数据点, 借助它们之间彼此吸引产生的位置移动的特点来模拟算法的探索和优化过程。用萤火虫所在的位置向量来表征所要优化目标的具体数值信息, 从而整个种群迭代导致劣质基因的淘汰这一过程就是算法的探索和优化过程^[15]。萤火虫算法有两种: 一种称为 FA; 另一种称为 GSO。本文是利用 FA 的思想实现刀具结构的优化。萤火虫算法流程如图 3 所示。

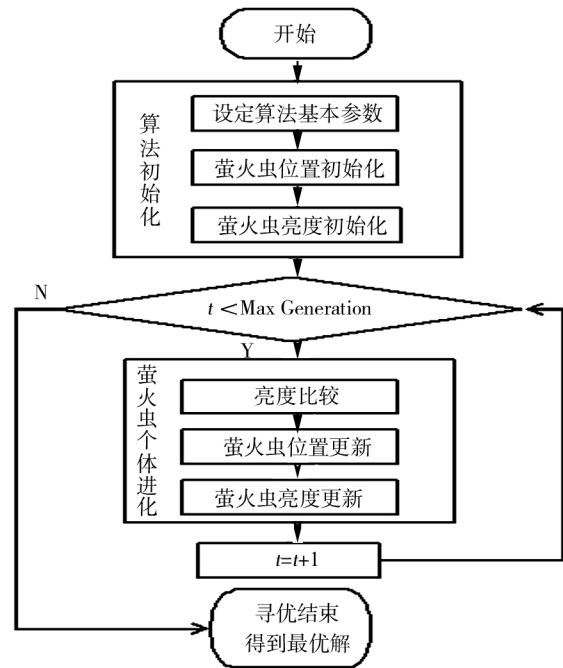


图 3 萤火虫算法流程图

Fig.3 Flow chart of the firefly algorithm optimization

3.2 基于萤火虫算法的刀具结构优化过程

CFRP 材料实际铣削时, 刀具结构参数的选择既要考虑刀具寿命又要考虑工件的加工表面质量, 属于多目标优化问题^[13]。多目标优化问题的求解可选择的方法有多种, 应用最广泛的是评价函数法, 它是将几个需要优化的目标函数通过分配权重的方式转化为单目标函数, 以方便求取最优解。其中的线性加权法是给多个目标函数中的每个子目标一个加权系数, 加权系数的值代表所对应子目标的重要性。本文的优化目标是寻找使加工表面粗糙度 $S_q(\gamma, \alpha, \beta)$ 和刀具后刀面磨损量 $V_B(\gamma, \alpha, \beta)$ 最小的刀具结构参数: γ, α, β 。设定表面粗糙度和刀具磨损的加权系数均为 0.5, 则总体优化目标函数可表示为:

$$F(\gamma, \alpha, \beta) = 0.5S_q(\gamma, \alpha, \beta) + 0.5V_B(\gamma, \alpha, \beta)$$

式中, 待优化的目标函数为表面粗糙度模型 $S_q(\gamma, \alpha, \beta)$ 和刀具后刀面磨损模型 $V_B(\gamma, \alpha, \beta)$, 它们都是以刀具结构参数 γ, α, β 作为变量的函数, 数学模型已在 2.2 中建立。

确定了目标函数以及加权系数就可以开始优化, 优化的过程分两步。第一步, 确定约束条件。建立 $S_q(\gamma, \alpha, \beta)$ 和 $V_B(\gamma, \alpha, \beta)$ 的预测模型时, γ, α, β 都是在一定范围内变化的, 模型在该范围内才能较为准确地进行预估计算。因此, 刀具结构参数优化的约束条件为与本文正交试验选用的刀具结构参数范围相同, 即: 前角 $\gamma = [8^\circ, 20^\circ]$, 后角 $\alpha = [10^\circ, 16^\circ]$, 螺旋角 $\beta = [15^\circ, 30^\circ]$ 。第二步, 优化算法求解。本文采用 FA 算法进行多目标参数优化, 在 FA 中, 亮度最强的

位置向量就是目标函数最小时所对应的刀具几何参数。经过大量程序测试,FA的主要参数选定为:种群规模为100,迭代次数为100,步长因子为0.2,光强吸收系数设为1,初始吸引度设为1,优化适应度曲线如图4所示,优化结果如表4所示。

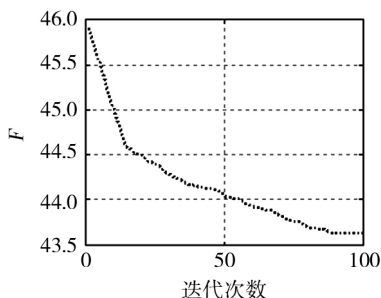


图4 优化适应度曲线

Fig.4 The optimized fitness curves

表4 多目标优化结果

Tab.4 Multi-objective optimization results

前角 $\gamma/(\circ)$	后角 $\alpha/(\circ)$	螺旋角 $\beta/(\circ)$	最大萤火虫 亮度 F	S_q 预测值 $/\mu\text{m}$	V_B 预测值 $/\mu\text{m}$
11.85	10.34	27.55	43.6463	1.49	90.39

3.3 实验验证

刀具结构参数优化的目的是为了指导实际铣削加工,上面优化之后的刀具结构参数必须通过实验环节加以验证。由于刀具在制作过程中存在一定偏差,同时为了便于制作刀具,验证的刀具角度取上述优化结果的相近值:前角 $\gamma=12^\circ$,后角 $\alpha=10^\circ$,螺旋角 $\beta=28^\circ$ 。实验条件相同,加工完后的表面粗糙度、刀具后刀面磨损量测量结果为: $S_q=1.5345 \mu\text{m}$, $V_B=97.2607 \mu\text{m}$ 。可以发现, S_q 和 V_B 的实际测量值与预测结果较为接近, S_q 的误差率为3%, V_B 的误差率为7.6%。

4 结论

(1)CFRP材料铣削加工时,刀具结构参数对铣削表面粗糙度的影响程度依次为:后角、螺旋角、前角。当刀具的后角、螺旋角和前角增大时,工件的表面粗糙度都呈减小趋势。因此,要获得良好的加工表面质量,刀具结构参数宜选用较大的后角、螺旋角和前角。

(2)CFRP材料铣削加工时,刀具结构参数对后刀面磨损量的影响程度依次为:后角、螺旋角、前角。当刀具后角增大时,后刀面磨损量迅速上升,当螺旋角增大时,后刀面磨损量减小,当刀具的前角增大时,后刀面磨损量先减小后增大。因此,如果要求较长的刀具寿命,刀具结构参数宜选用较小的后角、前

角和较大的螺旋角。

(3)利用萤火虫算法优化后的刀具结构铣削CFRP材料,实验结果值与建立的模型预测值误差较小,表面粗糙度的误差率为3%,刀具后刀面磨损量的误差率为7.6%。

参考文献

- [1] MKADDEM A, DEMTRICI I, MANSOR M E. A micro - macro combined approach using FEM for modeling of machining of FRP composites: cutting forces analysis [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(15/16): 3123-3127.
- [2] 李锋, 李涌泉, 李文科, 等. 碳纤维/树脂基复合材料铣削表面粗糙度及表面形貌研究[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 264-269.
- [3] JAHROMI A S, BAHR B. An analytical method for predicting cutting forces in orthogonal machining of unidirectional composites [J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(16): 2290-2297.
- [4] HAN S, GONG Y H, YANG N h, et al. An experimental study on the cutting tool performance during milling of carbon fiber reinforced polymer [C]. Key Engineering Materials, 2014, 589: 179-183.
- [5] FERREIRA J R, COPPINI N L, NETO F L. Characteristics of carbon-carbon composite turning [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109(1/2): 65-71.
- [6] 魏良耀, 程寓. 涂层钻头钻削碳纤维复合材料的轴向力研究[J]. 制造技术与机床, 2013(1): 141-144.
- [7] 苗光. 交错PCD立铣刀铣削碳纤维复合材料试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [8] 唐臣升. 高效复合材料铣削刀具研制[J]. 工具技术, 2011(12): 54-57.
- [9] 吴志慧. 刀具结构对切削加工的影响研究及优化设计[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
- [10] 于凯强, 郭文亮, 贾涛. 金属切削刀具结构优化与仿真分析[J]. 工具技术, 2017, 51(6): 69-71.
- [11] HADDAD M, ZITOUNE R, EYMA F, et al. Machinability and surface quality during high speed trimming of multi directional CFRP [J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2013, 13(2/3): 289-310.
- [12] 林有希, 禹杰, 林华. 碳纤维/树脂基复合材料高速铣削的刀具磨损机理[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 138-145.
- [13] 胡安东, 陈燕, 傅玉灿, 等. 超声振动辅助铣磨加工对CFRP切削力和表面质量的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4): 788-796.
- [14] WANG D H, RAMULU M, AROLA D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(12): 1639-1648.
- [15] 刘长平, 叶春明. 一种新颖的仿生群智能优化算法: 萤火虫算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(9): 3295-3297.