DOI: 10.3901/JME.2020.07.193

CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化方法*

刘书暖 夏文强 王 宁 宋 晔 骆 彬 张开富
(西北工业大学机电学院 西安 710072)

摘要: 碳纤维增强复合材料/钛合金(CFRP/Ti)叠层构件以其优异性能广泛应用于航空航天领域。为保证孔同轴度和加工效率,通常采用同一参数对 CFRP/Ti 叠层构件进行一体钻孔。而 CFRP 和钛合金的材料属性和切削性能各异,一体钻孔会出现不同程度的 CFRP 撕裂、钛合金出口毛刺、孔径偏差等多种质量缺陷。由于工艺参数对各个质量缺陷的影响不同,甚至存在矛盾,难以找到合适的参数使得各质量缺陷均达到最小。为得到最优工艺参数,提高钻孔综合质量,对 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化方法进行了研究。根据实际工艺情况建立了 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型;结合钻孔工艺参数离散化的特点,基于帕累托占优原理构建了帕累托最优工艺参数集穷举搜索算法,并基于宽容分层序列法构建最优工艺参数决策算法;以 T700-TDE85/Ti-6Al-4V 叠层构件为对象,得到了最优工艺参数,验证了方法的可行性和有效性。

关键词: CFRP/Ti 叠层;多目标优化;工艺参数;帕累托最优;宽容分层序列法

中图分类号: TH16

Multi-objective Drilling Parameters Optimization Method for CFRP/Ti Stacks

LIU Shunuan XIA Wenqiang WANG Ning SONG Ye LUO Bin ZHANG Kaifu
(School of Mechanical Engineering, NorthWestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Carbon fiber reinforced plastics and titanium (CFRP/Ti) stacks are widely used in aerospace field because of their excellent performance. In order to ensure the coaxiality of the hole and processing efficiency, the same parameters are usually used to drill CFRP/Ti stacks. The material properties and cutting properties of CFRP and titanium alloys are different. There are many quality defects in the integrated drilling, such as CFRP tearing, burr at the exit of titanium alloys, hole diameter deviation and so on. It is difficult to find the appropriate parameters to minimize the quality defects due to the different influence of process parameters on each quality defect or even the contradiction. In order to obtain the optimum drilling parameters and improve the comprehensive quality of drilling, the multi-objective optimization method of drilling parameters for CFRP/Ti stacks is studied. A multi-objective optimization model for drilling parameters of CFRP/Ti stacks is established according to the actual process conditions. Combining the characteristics of discretization of drilling parameters, an exhaustive search algorithm for Pareto optimal process parameters set is constructed based on Pareto dominance principle, and an optimal process parameters decision algorithm is constructed based on forbearing stratified sequencing method. Taking T700-TDE85/Ti-6Al-4V stacks as the object, satisfactory optimal process parameters are obtained, and the feasibility and validity of the method are verified.

Key words: CFRP/Ti stacks; multi-objective optimization; process parameters; pareto optimization; forbearing stratified sequencing method

0 前言

碳纤维增强型复合材料(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)和钛合金具有比强度和比模量高、

重量轻、抗腐蚀好等优点,因此兼具了 CFRP 和钛合金优异特性的 CFRP/Ti 叠层构件广泛应用于航空航天领域^[1-2]。实际生产中,CFRP/Ti 叠层构件主要采用螺栓或铆钉连接,因此连接孔的质量极大地影响着装配质量^[3]。

CFRP 和钛合金的材料属性和切削性能各异,CFRP 是由纤维和基体组成的多相结构,具有非匀

* 国家自然科学基金(51475379)和陕西省重点研发计划(2017GY-101)资助项目。20190812 收到初稿,20191213 收到修改稿

质性、各向异性、硬度高等特点, 钻孔参数一般采用高转速和小进给量; 钛合金强度高、热导率低、高温化学活性高, 钻孔参数一般采用低转速和适量的进给量^[4-5]。针对 CFRP/Ti 叠层结构, 变参数钻削工艺可分别以合适的参数钻削 CFRP 和钛合金。在变参数工艺条件下, 间歇式钻削相比连续式钻削, 取得的钻削质量更好^[6]。不变参数钻削工艺也可获得同等的加工质量, 同时具有更高的加工效率^[7]。另外, 不变参数工艺适用范围更广, 对设备的要求较低, 可使用取风钻、数控机床、制孔机器人等设备。目前, 工程实践中主要采用不变参数的工艺。因此, 有必要进行不变参数钻孔工艺的研究。

CFRP/Ti 叠层构件同一参数一体钻孔往往会出现不同程度的 CFRP 撕裂、钛合金出口毛刺、孔径偏差等多种质量缺陷^[8-9]。由于工艺参数对各个质量缺陷的影响趋势不同, 通常改变工艺参数会使得某些质量缺陷得到抑制, 但某些质量缺陷却变得更差, 难以找到合适的参数使得各质量缺陷均达到最小^[10]。

因此, 对单一质量指标的优化不足以满足实际工程需要, 同时优化多个质量指标的钻孔工艺参数多目标优化逐渐成为学者们的研究热点。KRISHNARAJ 等^[11]从钻孔轴向力和扭矩、CFRP 分层、孔径与圆度以及钛合金出口毛刺高度等方面对钛合金钻孔性能进行了评价, 并利用加权求和法, 将多目标转换为单目标后再进行钻孔质量最优化。KIM 等^[12]采用 HSS-Co 和硬质合金两种材料的刀具对 Gr/Bi-Ti 叠层构件进行了钻孔试验, 对孔径偏差、圆度、出口毛刺以及加工成本归一化处理后各自赋予权重, 再相加得到目标变量, 从而转换为单目标优化问题, 获得最优工艺参数。SHAHRAJABIAN 建立了以切削速度、进给速度和钻顶角为输入, 以分层因子、表面粗糙度和钻孔轴向力为输出的响应面模型, 并以分层因子、表面粗糙度和钻孔轴向力为约束条件, 以材料切削率为目标函数, 将多目标优化转变为多约束优化, 最后采用遗传算法进行优化^[13]。目前钻孔工艺参数多目标优化考虑的质量指标较少, 且往往通过加权组合法或多约束法将多目标问题转变为单目标问题, 得到的结果不是客观整体质量的最优, 而是某一主观组合目标变量的最优。为优化 CFRP/Ti 叠层构件钻孔整体质量, 给实际工程的工艺参数决策提供依据, 结合 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺特点, 提出 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化方法。

1 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型

多目标优化问题一般有三个要素, 即决策变量、目标函数和约束条件。为描述多目标优化问题, 常常采用数学模型来表示多目标优化问题, 其数学模型包含了以上三个要素, 不失一般性, 一个具有 n 个决策变量、 m 个目标函数的多目标优化问题的数学模型可表述如下^[14]

$$\begin{aligned} \min \quad & y = F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, q \\ & h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ & x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \subset \mathbf{R}^n \\ & y = (y_1, y_2, \dots, y_m) \in Y \subset \mathbf{R}^m \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $F(x)=(f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$ 为目标函数; $g_i(x) \leq 0$ 和 $h_j(x)=0$ 为约束条件; x 为决策变量; y 为目标函数值。

为了获得 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型, 以下根据实际工艺情况选择决策变量、目标函数、约束条件。

1.1 决策变量

CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型的决策变量即为钻孔工艺参数。实际生产中钻孔工艺参数有很多, 包括主轴转速、进给量、钻顶角、横刃长度、螺旋角、刀具材料及涂层等等, 但是在这些变量之中, 主轴转速、进给量和钻顶角这三个参数易于调整, 可操作性强。因此, 选择主轴转速、进给量和钻顶角作为 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型中的决策变量。根据航空行业相关标准^[15]和实践经验, 确定 CFRP/Ti 叠层构件钻孔的主轴转速 S 范围为 500~1 800 r/min, 进给量 f_r 范围为 0.01~0.2 mm/r, 钻顶角 ϕ 的范围为 90°~140°。

1.2 目标函数

CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型的目标函数即为优化目标与工艺参数的关联模型。为提高钻孔整体质量, 以降低各质量缺陷对应的质量指标为优化目标。在 CFRP/Ti 叠层构件钻孔会出现很多质量缺陷, 如 CFRP 撕裂、CFRP 分层、孔壁粗糙度、孔径偏差、钛合金出口毛刺等, 如图 1 所示。参照工程经验与航空行业标准^[15], 获取每种质量缺陷对应量化指标, 以衡量质量缺陷的程度。下面是对常见的 CFRP/Ti 叠层构件钻

孔质量缺陷的具体分析, 并得到对应的量化质量指标。

图1 CFRP/Ti 叠层构件钻孔质量缺陷

CFRP 撕裂是指在 CFRP 表面纤维层与基体发生脱落的现象。CFRP 撕裂不仅影响装配质量, 还容易导致应力集中现象。通常采用撕裂面积对 CFRP 撕裂缺陷进行表征, 如图 2 所示。

图2 CFRP 入口撕裂

根据 CFRP 制孔撕裂长度不长于孔径的 3 倍, 宽度不宽于 1.8 mm 的原则, 选择 $3D \times 1.8$ 作为撕裂缺陷的基准^[16], 故表征 CFRP/Ti 叠层构件钻孔的 CFRP 撕裂缺陷程度的撕裂因子 SL 为

$$SL = \frac{\sum A_s}{3D \times 1.8} \quad (2)$$

式中, $\sum A_s$ 为 CFRP 表面所有撕裂面积之和; D 为孔的公称直径。

CFRP 分层(图 3)是指碳纤维铺层之间发生的脱粘现象, 严重降低了结构的疲劳性, 是 CFRP 报废的主要原因, 采用修正分层因子 F_{da} 表示 CFRP 分层缺陷的程度^[17]。

图3 CFRP 分层示意图

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{\max}}{D} + \beta \frac{A_{\max}}{A_{\text{nom}}} \quad (3)$$

$$A_{\max} = \pi \frac{D_{\max}^2}{4} \quad (4)$$

$$A_{\text{nom}} = \pi \frac{D^2}{4} \quad (5)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (6)$$

$$\beta = \frac{A_{\text{del}}}{A_{\max} - A_{\text{nom}}} \quad (7)$$

式中, $D_{\max}$ 为最大分层直径; A_{del} 为实际分层面积; $A_{\max}$ 最大分层面积, 以 $D_{\max}$ 为直径计算; A_{nom} 为孔的公称面积, 以 D 为直径计算; α 、 β 为权重系数。

孔壁粗糙度与飞机装配配合性质、疲劳性能、等有密切关系, 对飞机结构的寿命和安全性有着极其重要的影响。本文选择轮廓算术平均偏差 Ra 为孔壁粗糙度的质量指标。在 CFRP/Ti 叠层构件中, CFRP 的孔壁粗糙度和钛合金的孔壁粗糙度通常相差较大, 应分别量化。故 CFRP/Ti 叠层构件的孔壁粗糙度的质量指标有 CFRP 孔壁粗糙度 Ra_{CFRP} 和钛合金孔壁粗糙度 Ra_{Ti} 。

CFRP/Ti 叠层构件钻孔的孔径偏差是影响连接部位服役性能的关键因素之一^[18]。可以采用孔径与公称直径的绝对差值来表示。为了描述 CFRP 的孔径偏差 ΔD_{CFRP} , 采用 CFRP 不同深度的孔径的平均值与公称直径的绝对差值作为 CFRP 的孔径偏差 ΔD_{CFRP} 。即

$$\Delta D_{\text{CFRP}} = \left| \left(\sum_{i=1}^n D_{\text{CFRP}}^i \right) / n - D \right| \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中, D_{CFRP}^i 为 CFRP 第 i 层的孔径; n 为 CFRP 孔径测量的总层数。

同理为了描述钛合金的孔径偏差 ΔD_{Ti} , 采用钛合金不同深度的孔径的平均值与公称直径的绝对差值作为钛合金的孔径偏差 ΔD_{Ti} , 表示为

$$\Delta D_{\text{Ti}} = \left| \left(\sum_{j=1}^m D_{\text{Ti}}^j \right) / m - D \right| \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

式中, D_{Ti}^j 为钛合金第 j 层的孔径; m 为钛合金孔径测量的总层数。

CFRP 不同深度上的孔径差距甚大, 其实际孔壁轮廓为上小下大的喇叭形, 或为上大下小的倒喇叭形, 或为上下小、中部大的鼓形, 如图 4 所示。当圆柱形连接件(螺栓、铆钉)与 CFRP 非圆柱孔壁接触时, 易引起应力集中现象, 对装配质量有很大影响, 因此需要对其进行优化。为对 CFRP 不同深度上孔径差距进行量化, 引入圆柱度误差 ΔR 来表征 CFRP 孔的形状精度。选取 CFRP 入口、中部和

出口三个位置,使用涨簧式内径千分尺分别测量每一横截面的直径,通过旋转千分尺测出直径最大值与最小值,即可表示出 CFRP 孔的圆柱度误差。表示为

$$\Delta R = (\max(D_{\text{cfp}}^i) - \min(D_{\text{cfp}}^i)) / 2 \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

图 4 CFRP 孔壁轮廓类型

由于 CFRP/Ti 叠层构件的特殊性,钻孔后的 CFRP 孔径和钛合金孔径往往差异较大,导致孔径不一致,影响装配质量,因此需要对其进行优化。为对 CFRP 和钛合金的孔径不一致性进行量化,引入新的质量指标,定义 CFRP 孔径平均值与钛合金孔径平均值的绝对差值为 CFRP/Ti 孔径差值 ΔD_{CT} 来描述 CFRP 和钛合金的孔径不一致性的程度。表示为

$$\Delta D_{\text{CT}} = \left| \left(\sum_{i=1}^n D_{\text{cfp}}^i \right) / n - \left(\sum_{j=1}^m D_{\text{Ti}}^j \right) / m \right| \quad (11)$$

钛合金出口毛刺是指钛合金钻孔出口的薄壁凸起,图 5 是 CFRP/Ti 叠层构件钻孔常见的质量缺陷。出口毛刺一旦达到一定高度就需要增加一道去毛刺工序,大大降低装配效率,并增加生产成本^[19]。一般采用出口毛刺高度来表示钛合金出口毛刺缺陷的程度,由于钛合金出口毛刺高度在不同的圆周位置上略有不同,因此采用多次测量的平均值作为钛合金出口毛刺高度的指标 H ,表示为

$$H = \left(\sum_{i=1}^n H_i \right) / k \quad (i=1,2,\dots,k) \quad (12)$$

图 5 钛合金出口毛刺

因此,CFRP/Ti 叠层构件钻孔需要优化的质量

指标有 9 项,如表 1 所示。通过实际叠层构件三因素多水平的钻孔试验可获得该叠层构件对应的 9 项质量指标的数据,对试验数据进行三因素方差分析,明确各工艺参数对各目标质量指标的显著性,以显著性工艺参数为变量,基于响应面函数拟合可得到各质量指标与工艺参数的关联模型,即可得到该叠层构件对应的目标函数。

表 1 CFRP/Ti 叠层构件钻孔质量指标及量化方法

质量指标	量化方法
CFRP 撕裂因子	$SL = \sum A_s / (3D \times 1.8)$
CFRP 分层因子	$F_{da} = \alpha \frac{D_{\text{max}}}{D} + \beta \frac{A_{\text{max}}}{A_{\text{nom}}}$
出口毛刺高度	$H = \left(\sum_{i=1}^n H_i \right) / k$
CFRP 孔径偏差	$\Delta D_{\text{cfp}} = \left \left(\sum_{i=1}^n D_{\text{cfp}}^i \right) / n - D \right $
CFRP 圆柱度误差	$\Delta R = (\max(D_{\text{cfp}}^i) - \min(D_{\text{cfp}}^i)) / 2$
钛合金孔径偏差	$\Delta D_{\text{Ti}} = \left \left(\sum_{j=1}^m D_{\text{Ti}}^j \right) / m - D \right $
CFRP/Ti 孔径差值	$\Delta D_{\text{CT}} = \left \left(\sum_{i=1}^n D_{\text{cfp}}^i \right) / n - \left(\sum_{j=1}^m D_{\text{Ti}}^j \right) / m \right $
CFRP 孔壁粗糙度	Ra_{cfp}
钛合金孔壁粗糙度	Ra_{Ti}

1.3 约束条件

约束条件是优化目标和决策变量的限制条件,参考碳纤维复合材料构件制孔的行业标准^[15],直接或者间接得到 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型的约束条件,为各质量指标合格的最低要求,也就是各质量指标不超出上限。

CFRP 撕裂面积小于 CFRP 撕裂面积上限

$$SL < SL^{\text{up}} \quad (13)$$

CFRP 分层因子小于 CFRP 分层因子上限

$$F_{da} < F_{da}^{\text{up}} \quad (14)$$

CFRP 孔壁粗糙度小于 CFRP 孔壁粗糙度上限

$$Ra_{\text{cfp}} < Ra_{\text{cfp}}^{\text{up}} \quad (15)$$

钛合金孔壁粗糙度小于钛合金孔壁粗糙度上限

$$Ra_{\text{Ti}} < Ra_{\text{Ti}}^{\text{up}} \quad (16)$$

CFRP 孔径偏差小于 CFRP 孔径偏差上限

$$\Delta D_{\text{cfp}} < \Delta D_{\text{cfp}}^{\text{up}} \quad (17)$$

钛合金孔径偏差小于钛合金孔径偏差上限

$$\Delta D_{\text{Ti}} < \Delta D_{\text{Ti}}^{\text{up}} \quad (18)$$

CFRP/Ti 孔径差小于 CFRP/Ti 孔径差上限

$$\Delta D_{\text{CT}} < \Delta D_{\text{CT}}^{\text{up}} \quad (19)$$

CFRP 圆柱度误差小于 CFRP 圆柱度误差上限

$$\Delta R_{\text{cfp}} < \Delta R_{\text{cfp}}^{\text{up}} \quad (20)$$

钛合金出口毛刺高度小于钛合金出口毛刺高度上

$$H(x) < H^{\text{up}} \quad (21)$$

除以上 9 个容易量化的指标之外, CFRP/钛合金叠层构件钻孔过程中如果出现 CFRP 轴向钻削力过大或树脂玻璃化转变, 将影响钻孔质量。其中, CFRP 钻削轴向力过大会产生出口分层, 为避免 CFRP 出口分层产生, 约束 CFRP 的钻孔轴向力小于 CFRP 临界轴向力 $P^{[20]}$, CFRP 的钻孔轴向力 F_z 的约束条件表示为

$$F_z < P \quad (22)$$

由于 CFRP 导热性能差, 钻削热量会不断积累, 使得钻削温度过高, 进而影响基体性能和纤维-基体界面性能的退化, 造成已工表面质量的下降^[21-22], 所以需要约束 CFRP 钻削温度小于树脂玻璃化转变温度 T_g 。在 CFRP/Ti 叠层构件钻孔中很难测得 CFRP 钻削温度。由于在 CFRP/Ti 叠层构件钻孔过程中, 钻削温度会不断累积, 钛合金出口温度 θ 是整个钻孔过程中的最高钻削温度。因此, 若使得钛合金出口温度 θ 小于树脂玻璃化转变温度 T_g , 就能保证 CFRP 钻削温度也一直低于树脂玻璃化转变温度 T_g 。因此钛合金出口温度 θ 的约束条件表示为

$$\theta < T_g \quad (23)$$

因此, CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型中有 11 项约束条件。通过实际叠层构件的钻孔试验可获得该叠层构件对应的 9 项目标函数以及 CFRP 钻孔轴向力模型和出口模型, 引入实际指标上限值、临界轴向力和玻璃化转变温度即可得到对应的约束条件。

1.4 多目标优化模型

通过以上工作可以确定优化模型的数学表达式, 如式(24)所示。

CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型的文字描述如下: 在决策变量即主轴转速 S 、进给量 f_r 和钻顶角 ϕ 满足约束条件即各目标质量指标小于上限值、钻孔轴向力小于 CFRP 分层临界轴向力和钛合金出口温度小于树脂基体玻璃化转变温度的前提下, 使得目标质量指标即 CFRP 撕裂因子、CFRP 分层因子、CFRP 孔壁粗糙度、钛合金孔壁粗糙度、CFRP 孔径偏差、钛合金孔径偏差、CFRP 圆柱度误差、CFRP/Ti 孔径差值和钛合金出口毛刺高度综合达到最小。

$$\min y = F(x) = (SL(x), F_{\text{da}}(x), Ra_{\text{cfp}}(x), Ra_{\text{Ti}}(x), \dots$$

$$\Delta D_{\text{cfp}}(x), \Delta D_{\text{Ti}}(x), \Delta R_{\text{cfp}}(x), \Delta R_{\text{CT}}(x), H(x))$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} SL(x) - SL^{\text{up}} < 0 \\ F_{\text{da}}(x) - F_{\text{da}}^{\text{up}} < 0 \\ Ra_{\text{cfp}}(x) - Ra_{\text{cfp}}^{\text{up}} < 0 \\ Ra_{\text{Ti}}(x) - Ra_{\text{Ti}}^{\text{up}} < 0 \\ \Delta D_{\text{cfp}}(x) - \Delta D_{\text{cfp}}^{\text{up}} < 0 \\ \Delta D_{\text{Ti}}(x) - \Delta D_{\text{Ti}}^{\text{up}} < 0 \\ \Delta D_{\text{CT}}(x) - \Delta D_{\text{CT}}^{\text{up}} < 0 \\ \Delta R_{\text{cfp}}(x) - \Delta R_{\text{cfp}}^{\text{up}} < 0 \\ H(x) - H^{\text{up}} < 0 \\ F_z(x) - P < 0 \\ \theta(x) - T_g < 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$x = (S, f_r, \phi) \in \begin{cases} 500 \leq S \leq 1800 \\ 0.01 \leq f_r \leq 0.2 \\ 90 \leq \phi \leq 140 \end{cases} \in X \in \mathbf{R}^3$$

$$y = (SL(x), F_{\text{da}}(x), Ra_{\text{cfp}}(x), Ra_{\text{Ti}}(x), \dots$$

$$\Delta D_{\text{cfp}}(x), \Delta D_{\text{Ti}}(x), \Delta D_{\text{R}}(x), \Delta D_{\text{CT}}(x), \dots$$

$$H(x)) \in Y \in \mathbf{R}^9$$

2 最优工艺参数求解算法

CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型各目标质量指标之间处于相互竞争、相互冲突的状态, 一个质量指标的优化可能会引起另外一个或者另外几个质量指标降低, 因此引入帕累托最优的概念来进行理想质量指标的描述, 即不使任何质量指标变坏的情况下, 不可能再使某些质量指标变得更好。

结合 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数的实际使用组合数较少的特点, 基于帕累托最优基本概念, 提出帕累托最优工艺参数多目标优化方法。首先采用穷举搜索法得到帕累托最优工艺参数集, 然后结合决策者经验, 采用宽容分层序列法从帕累托最优工艺参数集中求得唯一最优解, 即最优工艺参数。该方法相比古典多目标优化方法, 克服了权重系数难以确定的困难, 相比基于进化算法的多目标优化方法, 过程简单, 求解结果唯一且稳定。

多目标优化模型最优工艺参数求解主要分两个步骤: 搜索和决策。搜索指优化过程, 即基于帕累托占优原理, 寻找帕累托最优工艺参数, 得到帕累托最优工艺参数集的过程。决策指选择过程, 即结合决策者经验, 基于宽容分层序列法从相互冲突的

帕累托最优工艺参数集中选择最佳工艺参数的过程。多目标优化模型求解步骤流程图如图 6 所示。因此,为求得多目标优化模型最优解,需要构建合适的搜索算法和决策算法。

图 6 多目标优化模型求解步骤流程图

图 7 帕累托最优工艺参数搜索算法流程

2.2 基于宽容分层序列法的最优工艺参数决策算法

通过穷举搜索算法可得到帕累托最优工艺参数集,其中帕累托最优工艺参数之间相互冲突,不可比较。为得到唯一最优工艺参数以用于实践生产中,可基于决策者经验,采用宽容分层序列法从帕累托最优工艺参数集中决策出唯一最优工艺参数。其主要分三个步骤:① 基于决策者经验对目标指标进行层次划分;② 基于目标指标层次建立决策模型;③ 基于合适的决策算法求解决策模型。

2.1 帕累托最优工艺参数穷举搜索算法

搜索帕累托最优工艺参数是 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型最优工艺参数求解的第一步。由于实际生产中工艺参数调整并非是无级的连续变化调整,而是按经验最小调整步距的有级调整。比如实践中主轴转速往往是以 10 r/min 为最小调整步距,进给量往往以 0.005 mm/r 为最小调整步距,钻顶角往往以 1° 为最小调整步距。因此决策空间应该是离散的,而非连续的,即主轴转速 S 、进给量 f_r 和钻顶角 ϕ 为离散变量,故工艺参数组合数量较少。由于搜索计算量并不大。因此选择穷举搜索法搜索,并基于 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型构建帕累托最优工艺参数穷举搜索算法。穷举搜索算法流程图如图 7 所示。

宽容分层序列法是一种将多目标优化问题转为多个有层次的单目标问题的方法。首先,决策者需要根据零件的使用工况来划分目标质量指标的层次。对使用性能影响大的质量指标划到高层次,对使用性能影响不大的质量指标划分到低层次,对使用性能影响程度接近,无法判断重要性高低的若干质量指标可划分到同一层次内。其次,在目标层次划分基础上,基于宽容分层序列法原理建立决策模型。最后,采用决策算法求解决策

模型, 得到唯一最优工艺参数。决策算法如图 8 所示。

图 8 宽容分层序列法决策模型的求解算法流程图

3 实例验证

为验证该多目标优化方法的有效性和可行性, 以 T700-TDE85/Ti-6Al-4V 叠层构件为对象, 通过钻孔试验获取实际数据, 应用该多目标优化方法得到 T700-TDE85/Ti-6Al-4V 叠层构件钻孔对应的最优工艺参数。

3.1 钻孔试验与多目标优化模型建立

(1) 钻孔试验建立。

试验以 T700-TDE85/Ti-6Al-4V 叠层构件为钻孔对象, 其中 CFRP 板在上, 厚 4.5 mm, 钛合金板在下, 厚 3 mm; 钻头直径为 6 mm, 钻顶角设置 3 个水平, 分别为 100°、118°、135°, 如图 9 所示; 在决策空间内选择试验参数, 其中主轴转速设置 5 个水平, 分别为 500 r/min、750 r/min、1 000 r/min、1 250 r/min、1 500 r/min; 进给量设置 5 个水平, 分别为 0.02 mm/r、0.06 mm/r、0.10 mm/r、0.14 mm/r、0.18 mm/r; 为排除刀具磨损的影响, 每把钻头只钻一组参数。基于全因子试验设计思想设置试验参数组, 可得 75 组试验参数组。为减小试验偶然误差, 每组参数组重复试验 3 次。

图 9 刀具与工件

CFRP/Ti 叠层构件钻孔试验系统由机床、刀具、CFRP/Ti 叠层构件、温度传感器、垫块、测力仪、温度信号采集模块、电荷放大器以及数据采集仪等组成。CFRP 板、钛合金板和环形热电偶探头从上至下依次叠放, 通过底层支撑垫板及螺栓固定在工装上(热电偶测温探头只与钛合金接触)。试验系统如图 10 所示。在钻孔试验过程中, 同时测量钻孔轴向力和出口温度。

图 10 CFRP/Ti 叠层构件钻孔试验系统

(2) 质量指标测量。

试验后对各个试验孔的目标质量指标进行测量, 测量方法如下。CFRP 撕裂的测量通过 QJY-9001H 工业相机拍摄 CFRP 入口撕裂情况, 借助 S-EYE 图像处理软件进行撕裂面积测量, 最后根据式(2)计算每个孔的撕裂因子, 如图 11 所示; 对于 CFRP 分层则采用 SAM 302 HD2 型超声波扫描显微镜对 CFRP 分层缺陷进行无损检测, 获得超声波扫描透射图, 借助 ImageJ 图像处理软件测量分层面积与分层最大直径, 根据式(3)计算每个孔的修正分层因子。用到的设备以及处理效果图如图 12 所示。

孔壁粗糙度测量则采用 MarSurf M300C 型便携式表面粗糙度仪测量, 测量位置如图 13a 所示; 孔径的测量是通过胀簧式内径千分表来测量不同孔深位置的直径来获取, 采取多位置测量来减小误差,

如图 13b 所示;毛刺测量则是通过 InfiniteFocus IFM G4 型三维粗糙度轮廓仪获得毛刺不同位置的高低数据,如图 14 所示。以上指标的测量都是多位置多次测量后取均值。

图 11 工业显微镜及图像处理结果

图 12 分层因子测量

图 13 粗糙度与孔径偏差的测量方法

图 14 出口毛刺高度测量示意

(3) 试验指标显著性分析。

测量得到试验数据后,进三因素方差分析,明确各工艺参数的显著性,结果如表 2 所示。

表 2 方差分析显著性结果

指标	主轴转速		每转进给量		钻头角	
	P 值	显著性	P 值	显著性	P 值	显著性
CFRP 轴向力	0.034	*	0	**	0	**
出口温度	0	**	0	**	0.818	×
CFRP 入口撕裂	0	**	0	**	0.222	×
CFRP 入口分层	0	**	0	**	0	**
CFRP 孔壁粗糙度	0	**	0	**	0	**
钛合金孔壁粗糙度	0.583	×	0.032	*	0.847	×
CFRP 圆柱度误差	0	**	0	**	0.003	**
CFRP 孔径极差	0	**	0.001	**	0	**
钛合金孔径偏差	0	**	0	**	0	**
孔径一致性	0	**	0	**	0	**
出口毛刺高度	0	**	0	**	0.046	*

注:上述表中,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下具有显著性打一个“*”;在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 下具有显著性打两个“**”;不具有显著性打“×”。

以表 2 中显著性工艺参数为自变量,以 CFRP 钻孔轴向力、出口温度以及 9 个目标质量指标为因变量,分别建立响应面函数模型,得到目标函数以及约束条件函数,代入本文建立的 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型(式 24)中,得到 T700-TDE85/Ti-6Al-4V 叠层构件对应的多目标优化模型。

3.2 最优工艺参数求解

根据本文提出的帕累托最优工艺参数集搜索算法,采用 Matlab 语言编写求解程序,得到 425 组帕累托最优工艺参数,如图 15 所示。

图 15 帕累托最优工艺参数集

为了从 425 组帕累托最优工艺参数获得唯一最优工艺参数,采用宽容分层序列法来决策。假设某车间管理者根据零件的使用工况,认为各目标质量

指标的重要性分为 5 个层次, 如图 16 所示。

图 16 目标质量指标的重要性分层

对于一个层次内有且只有一个目标质量指标的情况, 该目标质量指标即为该层次的层次目标; 对于一个层次内有多个重要性相同的目标质量指标的情况, 为获得单个层次目标, 采用功效系数法将多个相同等级重要的目标质量指标转化为体现综合大小的总功效系数, 以总功效系数作为该层次的单层次目标。对于一个层次内的每个分目标函数 $f_i(x_k)$ 都可以转换为对应的功效系数, $f_i(x_k)$ 在 x_k 下的功效系数如式(25)所示。功效系数越大, 表明该质量指标越接近最小值。

$$\eta_i = \frac{f_{i\max}(x) - f_i(x_k)}{f_{i\max}(x) - f_{i\min}(x)} (0 \leq \eta_i \leq 1) \quad (25)$$

一个层次内的所有分目标函数 $f_i(x_k)$ 的功效系数的几何平均为该层次的总功效系数, 表示如式(26)所示。总功效系数越大, 则表明综合质量指标越好。

$$\eta = \sqrt[q]{\eta_1 \eta_2 \cdots \eta_i \cdots \eta_q} (0 \leq \eta \leq 1) \quad (26)$$

式中, q 为该层次内包含的目标函数总数, η 为该层次内第 i 个目标函数的功效系数。

宽容分层序列法的核心思想是将上一步求得的优化目标值增加宽容值后, 作为新的目标约束加入到下一步的优化过程中, 使得最终迭代出的工艺参数值能满足多个目标同时最优。其中, 宽容值是各相应目标最优值的允许偏差, 这样在求后一个目标函数的最优值时, 对前一目标函数不严格限制在最优解内, 而是在前一目标函数最优值附近某一范围内进行优化, 避免了计算过程的中断。根据决策者经验确定各个目标质量指标的宽容值, 设各个目标质量指标的宽容值如表 3 所

示, 则基于宽容分层序列法的最优工艺参数决策模型可表示如下

第一层次 P_1

$$\begin{cases} \max F_1(x) = \sqrt{\eta_{SL} \cdot \eta_{da}} = M_1 \\ \eta_{SL} = \frac{SL_{\max}(x) - SL(x)}{SL_{\max}(x) - SL_{\min}(x)} \\ \eta_{F_{da}} = \frac{F_{damax}(x) - F_{da}(x)}{F_{damax}(x) - F_{damax}(x)} \end{cases}$$

第二层次 P_2

$$\begin{cases} \min F_2(x) = H(x) = M_2 \\ x \in D_2 \subset \{x | F_1(x) \geq M_1 - 0.3, x \in P_x^*\} \end{cases}$$

第三层次 P_3

$$\begin{cases} \max F_3(x) = \sqrt[4]{\eta_{\Delta D_{cfrp}} \cdot \eta_{\Delta R_{cfrp}} \cdot \eta_{\Delta D_{Ti}} \cdot \eta_{\Delta D_{CT}}} = M_3 \\ \eta_{\Delta D_{cfrp}} = \frac{\Delta D_{cfrp\max}(x) - \Delta D_{cfrp}(x)}{\Delta D_{cfrp\max}(x) - \Delta D_{cfrp\min}(x)} \\ \eta_{\Delta R_{cfrp}} = \frac{\Delta R_{cfrp\max}(x) - \Delta R_{cfrp}(x)}{\Delta R_{cfrp\max}(x) - \Delta R_{cfrp\min}(x)} \\ \eta_{\Delta D_{Ti}} = \frac{\Delta D_{Ti\max}(x) - \Delta D_{Ti}(x)}{\Delta D_{Ti\max}(x) - \Delta D_{Ti\min}(x)} \\ \eta_{\Delta D_{CT}} = \frac{\Delta D_{CT\max}(x) - \Delta D_{CT}(x)}{\Delta D_{CT\max}(x) - \Delta D_{CT\min}(x)} \\ x \in D_3 \subset \{x | F_2(x) \leq M_2 + 0.04, x \in D_2\} \end{cases}$$

第四层次 P_4

$$\begin{cases} \min F_4(x) = Ra_{cfrp}(x) = M_4 \\ x \in D_4 \subset \{x | F_3(x) \geq M_3 - 0.3, x \in D_3\} \end{cases}$$

第五层次 P_5

$$\begin{cases} \min F_5(x) = Ra_{Ti}(x) = M_5 \\ x \in D_5 \subset \{x | F_4(x) \leq M_4 + 0.3, x \in D_4\} \end{cases}$$

表 3 各层次的宽容值

层次	第一层次	第二层次	第三层次	第四层次
宽容值	0.3	0.04	0.3	0.3

根据图 5 所示的决策模型求解算法流程, 编写 Matlab 程序, 最终求得最优工艺参数为: 主轴转速: 500 r/min; 进给量: 0.015 mm/r; 钻顶角: 139°。

采用上述最优工艺参数进行验证实验, 得到的各质量指标对比结果如表 4 所示。其中, 试验所得实际值与计算所得理论值十分接近, 两者除在 CFRP 分层因子这一质量指标上均略小于上限值外, 其他质量指标均明显小于上限值, 如图 17 所示。实验结果的对比证明了该最优工艺参数的合理性与多目标优化方法的可行性。

表 4 最优工艺参数对应的质量指标最优值

质量指标	理论值	实际值	上限值
CFRP 撕裂因子	0.023 6	0.020 6	0.15
CFRP 分层因子	1.207 8	1.132 5	1.3
出口毛刺高度/mm	0.120 3	0.126 7	0.2
CFRP 孔径偏差/mm	0.026 9	0.024 1	0.1
CFRP 圆柱度误差/mm	0.007 2	0.008 4	0.05
钛合金孔径偏差/mm	0.026 7	0.023 3	0.1
CFRP/Ti 孔径差值/mm	0.019 0	0.017 1	0.1
CFRP 孔壁粗糙度/ μm	1.48	1.36	3.2
钛合金孔壁粗糙度/ μm	0.78	0.75	1.6

图 17 质量指标对比

4 结论

(1) 以 3 个工艺参数为决策变量, 9 个质量指标为优化目标, 各目标质量指标上限, CFRP 钻孔临界轴向力和 CFRP 树脂基体玻璃化转变温度为约束条件, 建立了 CFRP/Ti 叠层构件钻孔工艺参数多目标优化模型。

(2) 结合钻孔工艺参数实际使用组合数较少的特点, 基于帕累托占优原理构建了帕累托最优工艺参数集穷举搜索算法。结合决策者经验, 采用宽容分层序列法, 建立最优工艺参数决策模型, 并构建了最优工艺参数决策算法。

(3) 以 T700-TDE85/Ti-6Al-4V 叠层构件为对象, 实施了 75 组工艺参数组下的钻孔试验, 建立了该叠层构件对应的多目标优化模型。基于帕累托最优工艺参数集搜索算法和宽容分层序列决策算法, 得到了满意的最优工艺参数: 主轴转速 500 r/min; 进给量 0.015 mm/r; 钻顶角 139°, 验证了该方法的可行性和有效性。

参 考 文 献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] 陈绍杰. 复合材料技术与大型飞机[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 605-610.
- [3] 曹增强. 应对我国大飞机研制的装配连接技术[J]. 航空制造技术, 2009(2): 88-91.
- [4] 于晓江, 曹增强, 蒋红宇, 等. 碳纤维复合材料与钛合金结构制孔工艺研究[J]. 航空制造技术, 2011, 375(3): 95-97.
- [5] 林伟, 涂俊翔. 高速钻削复合材料加工参数对粗糙度影响研究[J]. 合肥工业大学学报, 2015, 38(1): 11-14.
- [6] 冷小龙, 李鹏南, 邱新义, 等. 钻削工艺对复合材料/金属叠层板孔质量的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(1): 47-51.
- [7] XU J, MKADDEM A, EL MANSORI M. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review[J]. Composite Structures, 2016, 135(1): 316-338.
- [8] 南成根, 吴丹, 马信国, 等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层钻孔质量研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 177-185.
- [9] 焦锋, 王东. CFRP/钛合金叠层材料制孔技术的现状与

- 展望[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(6): 6-15.
- JIAO Feng, WANG Dong. Recent advances and prospects in hole-making for CFRP/Ti composite[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2018, 48(6): 6-15.
- [10] SHUNMUGESH K, PANNEERSELVAM K. Multi-response optimization in drilling of carbon fiber reinforced polymer using artificial neural network correlated to meta-heuristics algorithm[J]. *Procedia Technology*, 2016, 25: 955-962.
- [11] KRISHNARAJ V, PRABUKARTHI A, SANTHOSH M, et al. Optimization of machining parameters in CFRP/Ti stacks drilling[C]//ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Notre Dame, Indiana, USA, 2012.
- [12] KIM D, RAMULU M. Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks[J]. *Composite Structures*, 2004, 63(1): 101-114.
- [13] SHAHRAJABIAN H. Modeling and multi-constrained optimization in drilling process of carbon fiber reinforced epoxy composite[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2013, 14(10): 1829-1837.
- [14] 贺莉, 刘庆怀. 多目标优化理论与连续化方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- HE Li, LIU Qinghuai. Multi-objective optimization theory and continuation method[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [15] 中华人民共和国航空航天工业部. 碳纤维复合材料构件制孔工艺: HB/Z 189-91[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- Ministry of Aerospace Industry of the People's Republic of China. Hole-making technology of carbon fiber composite members: HB/Z 189-91[S]. Beijing: China Standard Press, 1991.
- [16] 温泉, 郭东明, 高航, 等. 碳纤维/环氧树脂复合材料制孔损伤综合评价方法[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(2): 265-272.
- WEN Quan, GUO Dongming, GAO Hang, et al. Comprehensive evaluation method for carbon/epoxy composite hole-making damages[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2016, 33(2): 265-272.
- [17] DAVIM J P, RUBIO J C, ABRAO A M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates[J]. *Composites Science & Technology*, 2007, 67(9): 1939-1945.
- [18] 栾皓童, 王奔, 徐勇增, 等. CFRP/钛合金叠层构件制孔孔径分布规律研究[J]. *工具技术*, 2017, 51(02): 46-49.
- LUAN Haotong, WANG Ben, XU Yongzeng, et al. Aperture geometry precision of CFRP/Titanium alloy laminated structure[J]. *Tool Engineering*, 2017, 51(522): 46-49.
- [19] 骆彬, 张开富, 李原, 等. 钛板刚度对钻削轴向力和出口毛刺的影响[J]. *航空学报*, 2016, 37(7): 2321-2330.
- LUO Bin, ZHANG Kaifu, LI Yuan, et al. Influence of stiffness on thrust force and exit burr in drilling titanium plates[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(7): 2321-2330.
- [20] QI Z, ZHANG K, LI Y, et al. Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks[J]. *Composite Structures*, 2014, 107: 604-609.
- [21] 王福吉, 殷俊伟, 贾振元, 等. CFRP 复合材料铣削力、温度及表层损伤分析[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(3): 186-195.
- WANG Fuji, YIN Junwei, JIA Zhenyuan, et al. Measurement and analysis of cutting force, temperature and cutting-induced top-layer damage in edge trimming of CFRPs[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(3): 186-195.
- [22] WANG H, ZHANG X, DUAN Y. Effects of drilling area temperature on drilling of carbon fiber reinforced polymer composites due to temperature-dependent properties[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, 96(1): 2943-2951.
-
- 作者简介: 刘书暖(通信作者), 女, 1979 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为难加工材料切削加工、数字化工艺设计、复合材料与结构切削加工工艺等。
E-mail: liusn@nwpu.edu.cn