

铺层顺序对碳纤维复合材料钻削分层制孔的影响

王共冬^{1,2}, 种强¹, 周丽¹, 熊需海²

(1. 沈阳航空航天大学航空航天工程学部, 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点实验室, 沈阳 110136)

[摘要] 在碳纤维环氧树脂基复合材料的钻削制孔加工过程中会产生很多种类的缺陷, 其中分层损伤是最难以控制的缺陷, 严重影响机械连接的有效性和材料的使用性能。将铺层规则尤其是防分层规则应用于层合板铺层顺序优化中, 使用 Memetic 算法得出防止碳纤维板分层的铺层顺序, 并设计 CFRP 制孔试验加以论证。试验结果表明, 复合材料铺层角度对分层缺陷有重要影响, 优化后的碳纤维复合材料可有效减少分层、毛刺缺陷。

关键词: 碳纤维增强复合材料; Memetic 算法; 分层损伤; 防分层规则

Effect of Stacking Sequence on Layer Defect of Carbon Fiber-Reinforced Plastics

WANG Gongdong^{1,2}, ZHONG Qiang¹, ZHOU Li¹, XIONG Xuhai²

(1. Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] In the process of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) drilling, layer is the most important class of defect, which seriously affects the connection performance of the holes and the service life of materials. Rule especially anti-layer rule is used for optimization design of laminated composite plate structures. The stacking sequence of composite laminate is optimized by applying Memetic algorithm, and drilling experiment of carbon fiber reinforced plastics is made to check the validity. The result indicates that the stacking sequence has great influence on layer, and the optimized composite laminate can effectively restrain layer and burrs.

Keywords: CFRP; Memetic algorithm; Layer defect; Anti-layer rule

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.07.101

在碳纤维复合材料钻孔过程中, 最难以操控的缺陷是分层损伤, 它不但会降低机械连接时的公差, 还会降低材料结构的力学性能^[1]。其中, 钻削轴向力和温度是引发分层损伤的两大因素。Tan 和 Nuismer^[2]提出了一个能预测复合材料在载荷作用下不断扩张的理论模型, 该模型在原有模型的基础上考虑了残余应力的影响, 更贴近于试验结果。此后, 常福清^[3]提出层合板失效的临界轴向力公式, 并根据能量守恒公式推导出腹板的屈曲强度。朱菊芬^[4]、梁斌^[5]利用双分层损伤有限元模型给出了压屈载荷的等值曲线图, 分析结果描绘了不同分层位置的载荷分布。然而, 这些研究只注重计算模型方面, 设计相关试验进行辩证分析的报道相对较少。

在设计碳纤维复合材料铺层顺序时, 每一层的方向都可以是不同角度, 因此可以按照一定规则进行优化以满足复合材料的强度、刚度等要求。国内, 唐文艳等^[6]利用整数编码、非常规解码的形式设计不同铺层角度。

冯消冰等^[7]利用整数编码方法, 同时结合特定的层合板铺层规则优化出满足不同复合材料强度要求的碳纤维复合材料铺层顺序。而王共冬^[8]、晏飞^[9]、何林涛等^[10]分别把优化后的遗传算法应用在复合材料铺层规则上, 不同程度地提高了遗传算法的收敛速度。Fzlzon 等^[11]提出层合板在受载过程中稳定性对层合板强度的影响起关键作用, 并结合屈服准则与其优化后的算法设计出具有高强度的碳纤维层合板。Carrera 等^[12]研究了不同边界条件, 不同力学性能的碳纤维层合板在剪切力下的变形理论, 并采用标准遗传算法建立了层合板铺层顺序规则库。Seresta 等^[13]提出一个高效简单的遗传算法框架, 采用该框架优化出的叠层顺序可显著降低层合板翘曲缺陷。Matsuzaki 等^[14]采用分支界定法和响应面法, 利用几何因子和屈曲载荷为优化目标, 优化了非对称的碳纤维层合板铺层顺序。

然而这些都只停留在对算法的研究和改进上, 很少

把铺层规则特别是防分层规则用于层合板铺层优化中, 并进行钻孔试验验证。本文将依据层合板防分层规则提出最优铺层顺序, 并设计 CFRP 制孔试验加以验证。

1 基于防分层规则层合板优化模型

1.1 防分层规则简介

在设计碳纤维复合材料铺层顺序时主要有 3 点要求: 第一, 应避免集中铺设同一角度方向的碳纤维层, 如必须如此放置时也不应超过 4 层; 第二, 避免层间应力过大, $\pm 45^\circ$ 层之间铺设 $0^\circ/90^\circ$ 层, $0^\circ/90^\circ$ 层之间放置 $\pm 45^\circ$ 层, 第三, 保护碳纤维板稳定性, 防止翘曲, 尽量采用对称铺设方式。综上, 层合板防分层规则可简单描述为:

- (1) 每一单层组中单层不超过 4 层;
- (2) 相邻层铺层角度不超过 45° 。

1.2 层合板优化模型

本文所使用的 Memetic 算法是在基本算法的循环过程中加入局部寻优算子。该算法兼并了全局算法和局部寻优算法的优点, 可使每次迭代产生的个体都是局部最优。这样就避免了全部算法完成后再进行全局搜索, 可在每个算法步骤中进行局部搜索, 能够很快地找到最优个体, 及时摒弃不良个体, 加快了求解速度。Memetic 算法^[15]的结构流程图如图 1 所示。

1.3 目标函数和约束条件

根据层合板理论^[16], 采用几何因子 V_k 表征碳纤维复合材料每一单层的铺层角度^[17]。其物理意义可描述

为在碳纤维层合板中引入不同的铺层角度以起到改变复合材料刚度的作用。

$$V_A = \begin{Bmatrix} V_{1A} \\ V_{2A} \\ V_{3A} \\ V_{4A} \end{Bmatrix} = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{n/2} \begin{Bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \\ \sin 2\theta_k \\ \sin 4\theta_k \end{Bmatrix};$$

$$V_D = \begin{Bmatrix} V_{1D} \\ V_{2D} \\ V_{3D} \\ V_{4D} \end{Bmatrix} = \frac{8}{n^3} \sum_{k=1}^{n/2} [k^3 - (k-1)^3] \begin{Bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \\ \sin 2\theta_k \\ \sin 4\theta_k \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中, n 代表层合板的铺层数, V_k 是层合板铺层顺序中不同方向之间的函数。其中, $k=A$ 时表示层压板层内几何因子, $k=D$ 代表层压板的弯曲几何因子。对于特定的碳纤维层压板, V_k 只是每一单层预浸料角度方向和碳纤维板厚度之间的函数, 与边界条件及受力状态无关。因此, 对于给定的 V_{ik}^0 ($i=1,2,3,4; k=A,D$), 以不同铺层角度为优化自变量, 可建立如式(2)所示的目标函数^[18]。

$$\min D(V_A, V_D) = \sigma \sum_{k=A,D} \sum_{i=1}^4 (V_{ik} - V_{ik}^0)^2 \quad (2)$$

其中, V_{iA}^0 、 V_{iD}^0 为层压板层内几何因子和层压板的弯曲几何因子, σ 为一常数, V_{iA} 、 V_{iD} 为一特定铺层方向的元素值。

1.4 数值算例

本例采用 Memetic 优化碳纤维板铺层角度。采用的规则算子为防分层规则, 优化结果为避免产生分层缺陷的最优碳纤维复合材料铺层顺序。表 1 显示了加入铺层规则 and 没有铺层规则的优化结果。其中强度由 Abaqus 软件计算得出, 计算页面如图 2、图 3 所示。图 4 为 Memetic 算法的遗传代数和适应度值函数。

在算法优化时没有加入规则算子的铺层优化顺序

表1 复合材料层合板铺层优化结果

	防分层规则	铺层顺序	进化代数	强度 /KPa
情况 1	✗	[0/0/0/0/0/0/0]s	44	296.66
情况 2	✓	[0/0/0/45/0/0/-45/0]s	34	307.16

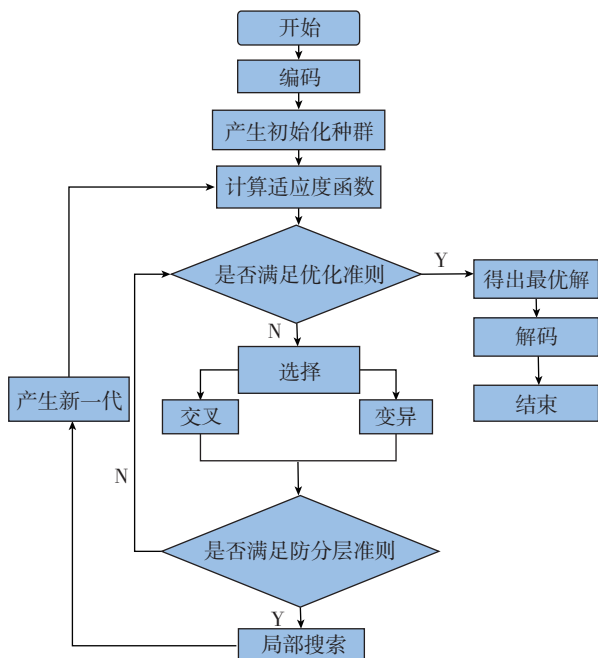


图1 Memetic算法流程图

Fig.1 Flow chart of Memetic algorithm

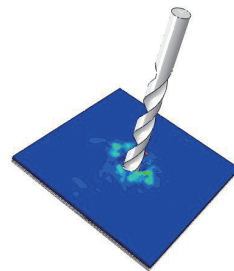
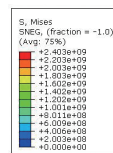


图2 [0/0/0/0/0/0/0]s碳纤维板强度计算

Fig.2 Intensity calculation of [0/0/0/0/0/0/0]s plate

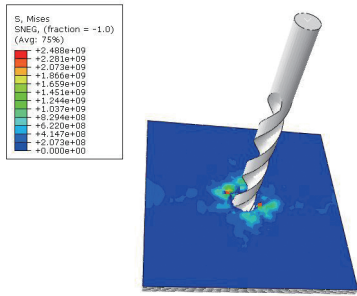


图3 [0/0/0/45/0/0/-45/0]_s碳纤维板强度计算
Fig.3 Intensity calculation of [0/0/0/45/0/0/-45/0]_s plate

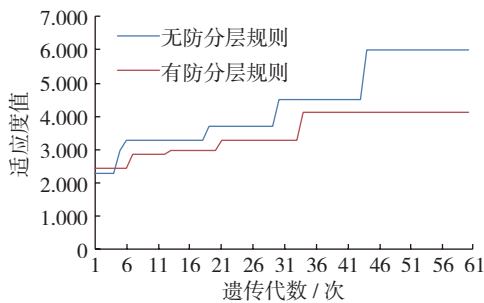


图4 Memetic算法适应度值
Fig.4 Memetic algorithm fitness values

是[0/0/0/0/0/0/0/0]_s,这是不符合实际需求的。在加入了防分层规则以后,最终优化后的层合板铺层顺序是[0/0/0/45/0/0/-45/0]_s,同一角度层最大为3层,不超过4层,相邻层角度不大于45°,可以有效防止层合板分层。

2 试验验证

2.1 试验材料

本文以USG05403碳纤维环氧树脂基为预浸料,单层厚度为0.09mm,采用热压罐成型工艺制备碳纤维复合材料试样,复合材料铺层数量为16层,铺层顺序为[0/0/0/45/0/0/-45/0]_s与[0/0/0/0/0/0/0/0]_s,试件几何尺寸为90mm×90mm。

2.2 试验准备

本文采用CFRP钻削测力试验平台研究铺层顺序对轴向力和钻孔质量的影响。钻削系统由给定的进给率、钻速等条件进行CFRP钻孔,由钻削测力仪记录钻孔过程中产生的轴向力信号,经电荷放大器、信号采集卡储存在电脑中。

试验采用了15种不同方案验证优化后的碳纤维板质量,进给率为8mm/min、10mm/min、12mm/min,主轴钻速分为440r/min、1000r/min、1440r/min、2000r/min和2440r/min 5种转速。图5为两种铺层顺序的碳纤维板制孔轴向力曲线。表2和表3显示了其中8种具有代表性的碳纤维出口质量图。

2.3 试验结果与分析

在CFRP钻孔过程中,钻头横刀刃一直与碳纤维层接触,沿进给率方向上碳纤维层会遇受到持续的压力。随着制孔的进行,未切削层厚度逐渐减小,碳纤维板的刚度逐渐降低。当钻头横刀刃接触到层合板外层纤维时,产生的推力向外挤压纤维,由于横刀刃不起切削作用,外侧层合板上的碳纤维不会被切削刃切断,当产生的推力大于层合板刚度时,就会产生分层缺陷。图5为两种不同铺层顺序的轴向力曲线,可以看出进给率为8mm/min时,铺层方向为[0/0/0/45/0/0/-45/0]_s的最大轴向力为26.98N,要明显小于[0/0/0/0/0/0/0/0]_s的最大轴

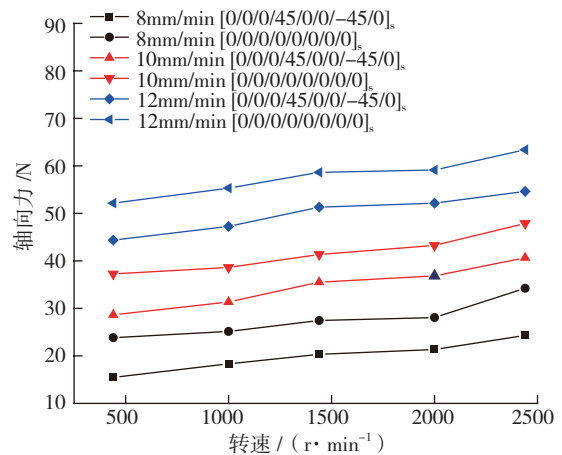


图5 两种不同铺层顺序的碳纤维板制孔轴向力曲线
Fig.5 Axial force with different stacking sequences of composite laminate

表2 进给率为8mm/min下碳纤维板出口质量扫描图

钻速 铺层顺序	2440r/min	440r/min
[0/0/0/45/0/0/-45/0] _s		
[0/0/0/0/0/0/0/0] _s		

表3 进给率为12mm/min下碳纤维板出口质量扫描图

钻速 铺层顺序	2440r/min	440r/min
[0/0/0/45/0/0/-45/0] _s		
[0/0/0/0/0/0/0/0] _s		

向力 37.89N,说明优化铺层顺序后的层合板各层间的压力较小,不足以撕开最外层纤维与基体的连接,避免了分层缺陷的产生。此外,无论进给率为 10mm/min 还是 12mm/min,5 种主轴转速下,优化铺层顺序后的碳纤维板临界轴向力均要小于未优化的碳纤维板,这可证明优化后的碳纤维板可有效减少分层缺陷。

此外,表 2 和表 3 显示了钻孔出口质量扫描图, [0/0/0/0/0/0/0/0] 的碳纤维板其毛刺数量明显多于 [0/0/0/45/0/0/-45/0] 的碳纤维板,且出口处的圆整度也要比铺层顺序为 [0/0/0/45/0/0/-45/0] 的碳纤维板低。表 2 和表 3 直观地说明了层合板铺层顺序对轴向力有较大影响,铺层顺序为 [0/0/0/45/0/0/-45/0] 的层合板可有效抑制分层、毛刺缺陷的产生。

3 结论

本文使用 Memetic 算法,结合铺层规则特别是防分层规则,优化算法得出避免产生分层缺陷的碳纤维板铺层顺序。并采用 CFRP 制孔试验,设计不同钻速条件下碳纤维复合材料铺层顺序试验加以验证。试验结果表明,铺层角度对碳纤维复合材料钻孔轴向力有较大影响,设计碳纤维复合材料不同铺层顺序可显著改变制孔过程中钻头产生的最大轴向力,采用防分层规则优化后的碳纤维增强复合材料层合板可有效抑制分层、毛刺等缺陷。

参考文献

[1] 樊芊,张谦. CFRP/Al 制孔分层临界轴向力研究[J]. 航空精密制造技术, 2015, 51(3): 20-25.
 FAN Qian, ZHANG Qian. Study of critical thrust force for delamination in drilling of CFRP/Al stacks[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2015, 51(3):20-25.

[2] TAN S C, NUISMER R J. A theory for progressive matrix cracking in composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 1989, 23(10): 1029-1047.

[3] 常福清,李恒伟. 波纹腹板 H 型钢梁腹板的屈曲强度[J]. 机械强度, 1997, 19(1):42-44.
 CHANG Fuqing, LI Hengwei. Buckling strength of the web of whole corrugated web H-beam[J]. Mechanical Strength, 1997, 19(1): 42-44.

[4] 朱菊芬,郑罡. 双分层损伤层合板屈曲问题的有限元分析[J]. 航空学报, 1999, 20(6):562-566.
 ZHU Jufen, ZHENG Gang. FEM analysis of double delamination buckling of composite plates[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(6):562-566.

[5] 梁斌,乐金朝. 弹性圆柱壳的稳定性优化设计[J]. 机械强度, 2002, 24(3): 463-465.
 LIANG Bin, LE Jinchao. Optimum design of cylindrical shell on stability[J]. Mechanical Strength, 2002, 24(3): 463-465.

[6] 唐文艳,顾元宪,赵国忠. 复合材料层合板铺层顺序优化遗传算法[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(2): 186-189.
 TANG Wenyan, GU Yuanxian, ZHAO Guozhong. Stacking-sequence optimization of composite laminate plates by genetic algorithm[J]. Journal of

Dalian University of Technology, 2004, 44(2): 186-189.

[7] 冯消冰,黄海,王伟. 基于遗传算法的层压板强度优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012, 45(3): 7-13.
 FENG Xiaobing, HUANG Hai, WANG Wei. Strength optimization of laminate based on the genetic algorithm[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2012, 45(3):7-13.

[8] 王共冬,陈彦海. 基于启发式知识和自适用遗传算法的复合材料铺层优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(2): 3-6.
 WANG Gongdong, CHEN Yanhai. Stacking sequence optimization of composite laminate based on adaptive genetic algorithm and design heuristics[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(2): 3-6.

[9] 晏飞,李为吉. 基于自适应遗传算法的复合材料层合板铺层顺序优化设计[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19(1):156-159.
 YAN Fei, LI Weiji. A stacking sequence optimization method of composite laminated panel based on an adaptive genetic algorithm[J]. Northwestern Polytechnical University, 2001, 19(1): 156-159.

[10] 何林涛. 基于遗传算法的复合材料天线罩优化设计[J]. 机械与电子, 2010(3): 68-70.
 HE Liantao. Composite radome structure optimization based on genetic algorithm[J]. Machinery and Electronics, 2010(3): 68-70.

[11] FALZON B G, FAGGIANI A. The use of a genetic algorithm to improve the post buckling strength of stiffened composite panels susceptible to secondary instabilities[J]. Composite Structures, 2012, 94(3):883-895.

[12] CARRERA E, MIGLIORETTI F. Selection of appropriate multilayered plate theories by using a genetic like algorithm[J]. Composite Structures, 2012, 94(3): 1157-1186.

[13] SERESTA O, ABDALLA M, GURDAL Z. A genetic algorithm based blending scheme for design of multiple composite laminates[C]// AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2013.

[14] MATSUZAKI R, TODOROKI A. Stacking sequence optimization using fractal branch-and-bound method for unsymmetrical laminates[J]. Composite Structures, 2007, 78(4): 537-550.

[15] 王共冬,王军. 基于 Memetic 算法的复合材料层合板铺层顺序优化[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(2): 16-20.
 WANG Gongdong, WANG Jun. Stacking sequence optimization of composite laminate applying Memetic algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(2): 16-20.

[16] 白江波,熊峻江,程序. RTM 成型复合材料 T 型接头工艺参数优化与力学性能实验研究[J]. 复合材料学报, 2009, 26(3): 13-17.
 BAI Jianbo, XIONG Junjiang, CHENG Xu. Processing parameter optimization and experimental investigation on mechanical properties for RTM composite T-joint[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(3): 13-17.

[17] 金朋,宋笔锋. 基于几何因子的复合材料气动弹性剪裁设计[J]. 复合材料学报, 2014, 31(2):465-475.
 JIN Peng, SONG Bifeng. Composite aeroelastic tailoring design based on lamination parameters[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(2): 465-475.

[18] CHEN D F, LIU T H. An optimal controller design for amatrix converter based surface mounted PMSM drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(4): 1034-1046.

通讯作者: 种强, 硕士研究生, 主要研究方向为飞行器数字化制造, E-mail: 18040258877@163.com。

(责编 叶枫)