

文章编号:1674-8190(2013)02-193-06

多工况下复合材料层合板开口补强优化设计

张伟¹,甘健²,王志瑾¹

(1.南京航空航天大学 航空宇航学院,南京 210016)

(2.中国航空工业集团公司 成都飞机设计研究所,成都 610091)

摘要: 复合材料层合板广泛应用于航空航天结构,其开口补强问题一直备受关注。以含大开口的复合材料层合板为研究对象,针对拉伸、剪切、压缩三种不同工况,分别采用不同材料和不同补强型式进行补强结构优化设计。以补强结构重量为目标函数,采用多级优化方法,对补强结构参数进行优化设计。对不同补强型式,不同补强材料下的重量特性进行对比分析。结果表明:在不同工况下,相较于螺栓补强和共固化补强,插层补强型式较优,结构重量增加较小。

关键词: 复合材料;层合板;开口补强;优化;多级优化;响应面

中图分类号: TB33

文献标识码: A

Optimization of Reinforcing Structure for Composite Laminates with Cutout Subject to Different Load Cases

Zhang Wei¹, Gan Jian², Wang Zhijin¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610091, China)

Abstract: Composite laminates has been received a wide application in aerospace structures, thus the reinforcement of its cutout has very much been concerned. Composite laminates with large opening under three different load cases, tension, shear and compress are investigated. The optimization design of different types of reinforcement with different materials is also conducted. The parameters of reinforced structure are optimized to satisfy the objective weight function, and the multi-level optimization method is adopted during the optimization process. The weight characteristics of reinforced structure are also compared and analyzed. The results show that under different load cases, compared with bolt connection reinforcement and co-curing reinforcement, intercalation reinforcement is better with the minimum weight increase.

Key words: composite; laminates; reinforcement; optimization; multi-level optimization; response surface

0 引言

飞机复合材料层合板的承力结构件在实际情况下常常不可避免地需要开口,而开口会带来开口区应力集中,使结构件承载能力大为降低。因此,

在飞机设计过程中,开口补强是需要考虑的问题。由于飞机结构重量的敏感性,对不同工况作用下,复合材料层合板开口件采用何种补强型式的研究具有重要意义。

国内外对复合材料层合板结构开口补强进行了理论和试验研究^[1-3],比较了各种补强材料的对称补强效果。但是在实际应用中,由于结构的局限性,对称补强常常不被采用。寇长河等^[4]对层合板对称及非对称补强进行了理论与试验研究,但仅局

收稿日期:2012-10-29; 修回日期:2012-12-06

通信作者:张伟,jsjy Zhangwei@126.com

限于插层补强一种型式。Ali Al-Mansour 等^[6]对单面贴补修理后层合板的拉伸性能进行了试验研究。上述研究多针对单一的补强型式或者单一的补强材料,并未对不同补强型式之间的差异和优劣进行比较。

本文针对拉伸、剪切、压缩三种不同工况下的复合材料层合板,采用不同补强材料(钛合金、复合材料层合板)以及不同补强型式(螺接、共固化、插层)进行模型建立与简化,并采用多级优化方法对复合材料层合板开口补强进行优化设计。

1 结构简介

1.1 研究对象

复合材料层合板的几何尺寸如图 1 所示,长度为 600 mm,宽度为 400 mm,板中心含 150 mm×130 mm 的矩形开口,开口圆角半径为 25 mm。层合板单层厚度为 0.125 mm,材料为 T700/QY9611,其基本力学性能参数如表 1 所示。层合板母板铺层顺序为 [45/0/-45/90/0/-45/45/0/-45/0/0/45/0/90/-45/0],总厚度为 4 mm。图 1 中阴影部分区域为补强范围, l 为补强区域的长度, b 为补强区域的宽度。板受 x 方向的拉伸、压缩载荷或 xy 方向的剪切载荷。

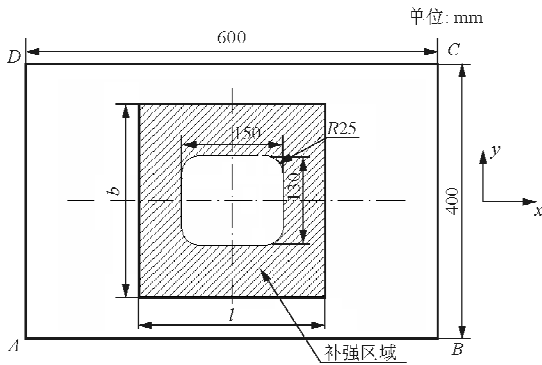


图 1 层合板几何尺寸示意图
Fig. 1 Geometry size of the laminates

表 1 T700/QY9611 材料基本力学性能参数
Table 1 Basic mechanical performance parameters for material T700/QY9611

材料参数	数值	材料参数	数值
E_{1t}/GPa	125	E_{2c}/GPa	10.20
E_{1c}/GPa	120	G_{12}/GPa	6.00
E_{2t}/GPa	10.1	ν_{12}	0.29

1.2 补强方案

本文对复合材料层合板三种不同的补强型式进行研究。三种不同补强型式分别为:钛合金板螺栓连接补强、复合材料层合板共固化补强和复合材料层合板插层补强。三种补强型式的示意图如图 2~图 4 所示,图中 d 为补强板的厚度。

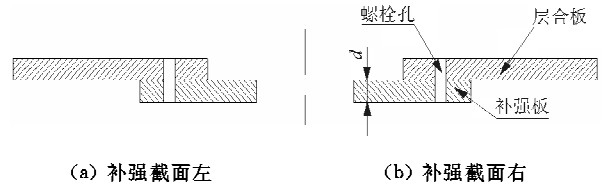


图 2 钛合金板螺栓连接补强示意图
Fig. 2 Bolted reinforcement of titanium alloy

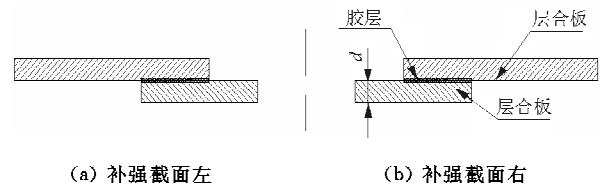


图 3 复合材料层合板共固化补强示意图
Fig. 3 Co-curing reinforcement of composite laminates

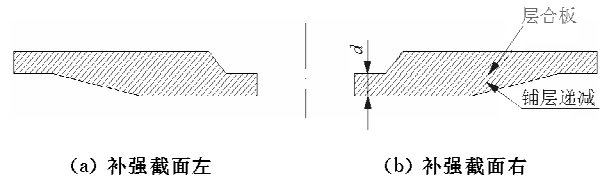


图 4 复合材料层合板插层补强示意图
Fig. 4 Intercalation reinforcement of composite laminates

三种补强方案各有其优缺点:①钛合金板螺栓连接补强,结构简单、施工快捷、装拆方便、利于检修,可以增加预紧力防止松动,但是母板与补强板需要单独钻孔,增加了加工难度;②复合材料层合板共固化补强,母板与补强片可以单独加工,从而降低了加工难度,但是由于是二次固化,母板与补强片结合处强度有限;③复合材料层合板插层补强,补强后强度恢复较好,但是加工复杂、难度大、成本较高。

工程运用中需要根据实际情况,综合考虑成本、工艺、重量等要求,选择合适的补强型式。

1.3 补强数学模型

补强后层合板恢复至未开口层合板承载能力

的 80%。分析不同补强型式的设计变量、约束条件、目标函数,建立层合板补强数学模型。

$$\begin{cases} W=f(d,b,l) \\ \epsilon=g(d,b,l) \end{cases} \quad (1)$$

式中: d 为补强钛板或补强层合板厚度; l 、 b 分别为补强区域的长和宽; W 为补强后结构重量; ϵ 为应变。

目标函数: $W=f(d,b,l) \rightarrow \min$;

约束条件: $\epsilon \leq 4\ 000\ \mu\epsilon$ (拉伸); $\epsilon \leq 3\ 500\ \mu\epsilon$ (压缩); $\epsilon \leq 4\ 500\ \mu\epsilon$ (剪切)。

由于 $g(x)$ 为隐函数,故应变函数 $\epsilon=g(d,b,l)$ 没有明确的表达式,此处采用代理模型来构建这一关系,并应用多级优化方法来优化所有参数。

2 多级优化方法

复合材料层合板开口补强问题的设计变量包括补强区域的长度 l 与宽度 b 以及补强板的厚度 d 。本文采用一种优化的层合板开口补强优化设计方法^[6],其总体思想是利用试验设计法在设计变量空间中选取样本点,利用 Patran 的 PCL 语言以及参数化模型方法建立相应的有限元模型,并调用 Nastran 软件进行分析,得到各样本点的重量响应;利用样本点和响应值建立重量的响应面模型;最后采用序列二次规划算法对响应面模型进行优化获得最优解。优化流程如图 5 所示。

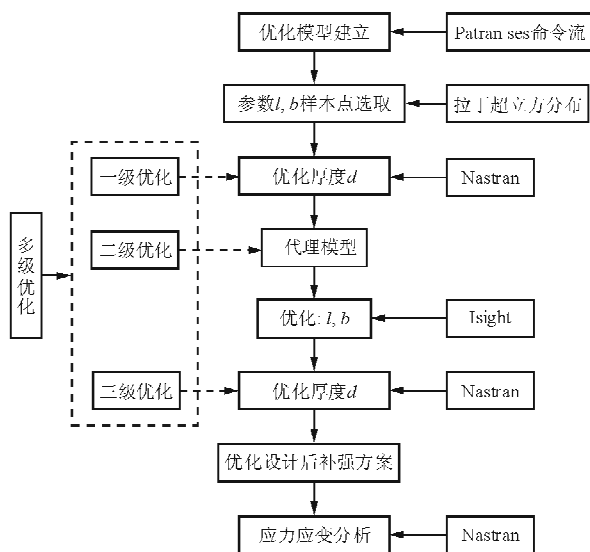


图 5 层合板开口补强优化流程图

Fig. 5 Flow chart for cutout reinforcement optimization process of composite laminates

2.1 试验设计方法

试验设计方法是有关如何合理安排试验的数学方法,是多学科设计优化代理模型的取样策略,决定了构造代理模型所需样本点的个数和其空间分布情况。本文采用拉丁超立方分布试验设计方法,它是一种修正的蒙特卡罗方法,是应用广泛的现代试验设计技术之一。该方法覆盖均匀,适用于影响因素较多的情况,可显著减少试验规模。

2.2 响应面模型

多学科设计优化的代理模型^[7]是利用已知点的响应信息来预测未知点响应值的一类模型,利用近似方法对离散数据进行拟合。这类模型在数学上可以通过拟合与插值来实现。

多项式响应面是多学科设计优化中最为常用的一种代理模型,其数学表达形式如下

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j \geq 1}^m \beta_{ij} \cdot x_i x_j + \dots \quad (2)$$

式中: x_i 是 m 维自变量 x 的第 i 个分量; β_0 、 β_i 、 β_{ij} 是未知参数,将其按照一定次序排列,构成列向量 β 。

2.3 二级优化算法

二级优化算法采用序列二次规划方法。二次规划是指目标函数为二次、约束函数为线性的非线性规划,可以从最优解的 K-T 条件出发构造有效的解法。

3 设计分析优化

3.1 有限元建模

本文采用 Patran 有限元软件构建复合材料层合板的分析计算模型。母板厚度与宽度之比为 1:100,母板可采用壳元模拟,网格采用 4 节点 Quad 单元划分。对于螺接补强,钛补强板采用壳元模拟,4 节点 Quad 单元划分网格;在螺栓处建立相应的螺栓孔,并使用 MPC 模拟螺栓紧固件连接。螺栓的排布遵循列距/孔径(S/D) ≥ 5 ,排距/孔径(P/D) ≥ 4 ,边距/孔径(S_w/D) ≥ 2.5 ,螺栓采用 RBE2 模拟,主节点为中央节点,从节点为螺栓

孔周围单元。钛合金板螺栓连接补强有限元模型如图6所示。

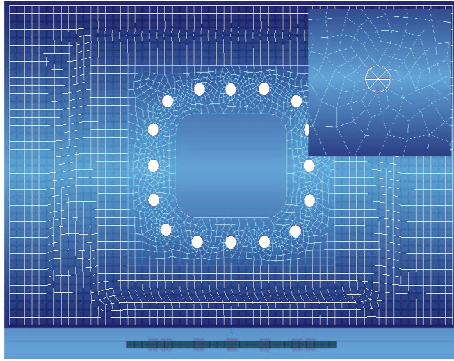


图6 钛合金板螺栓连接补强有限元模型

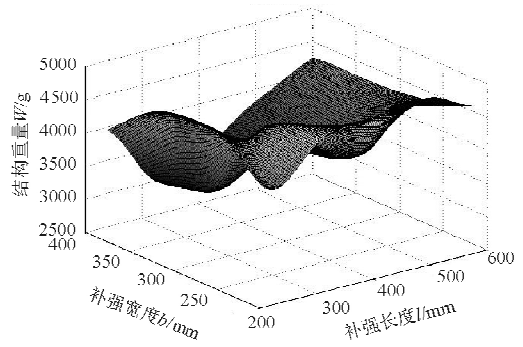
Fig. 6 Finite element model for bolted reinforcement of titanium alloy

共固化补强采用“三板模型”^[8-9]进行模拟。“三板模型”中采用中厚板元模拟胶层,母板与补片采用壳元模拟。共固化胶层厚度为0.15 mm。使用Patran的PCL进行参数化建模,对各种补强型式层合板进行拉伸、剪切、压缩载荷作用下的应力、应变分析,同时获得样本点的重量响应。该方法建模快捷,同时可以考虑胶层的弹塑性与粘弹性。

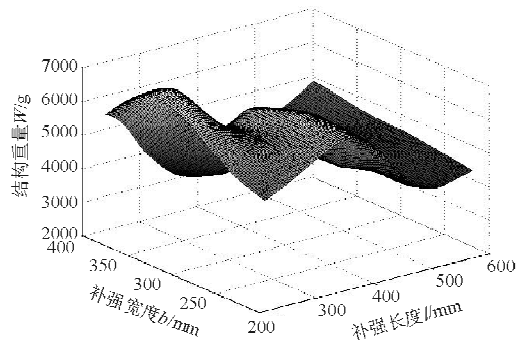
3.2 优化结果

由样本点和响应建立结构重量的响应面近似模型,然后运用序列二次规划算法对其进行优化,整个优化过程由多学科优化软件Isight实现。求得结构变量最优解后进行此变量下的结构有限元分析,得到结构最优解真值。

每种补强型式均取20个样本点进行单独分析,得到结构重量响应,并通过Isight拟合出二次响应面模型。螺接补强、共固化补强、插层补强的三维数据响应面示意图分别如图7~图9所示。



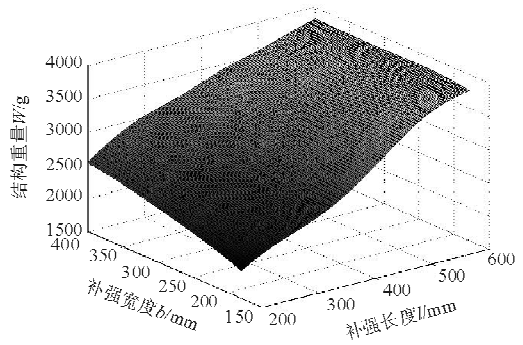
(b) 剪切工况



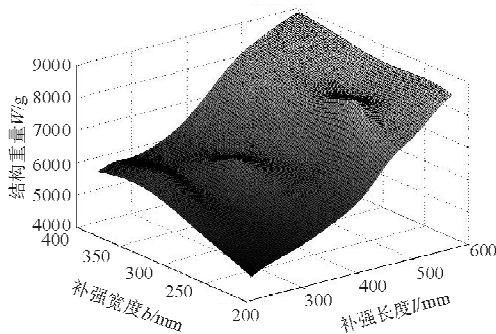
(c) 压缩工况

图7 螺接补强响应面

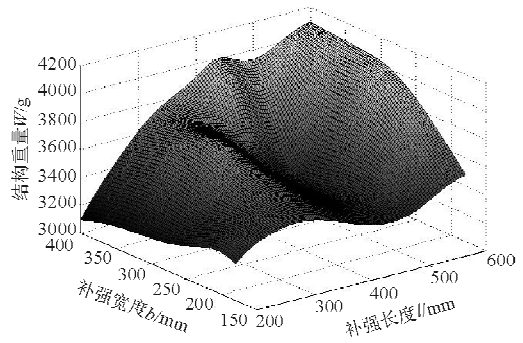
Fig. 7 Response surface for bolted reinforcement



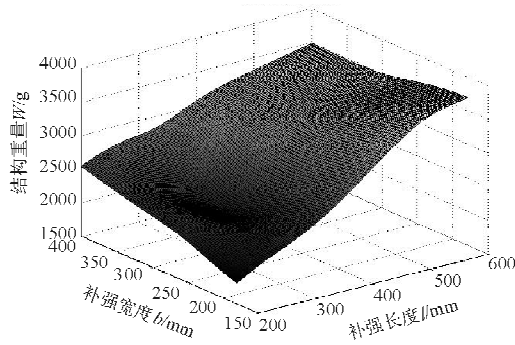
(a) 拉伸工况



(a) 拉伸工况



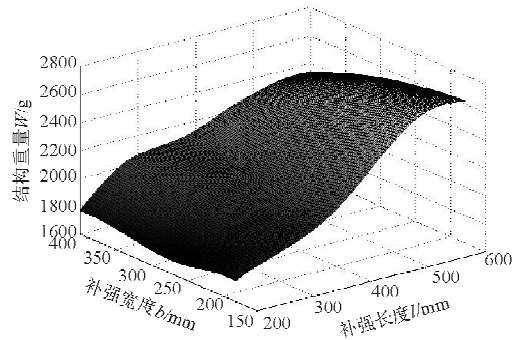
(b) 剪切工况



(c) 压缩工况

图 8 共固化补强响应面

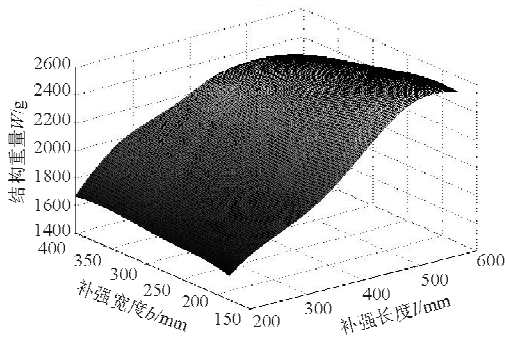
Fig. 8 Response surface for co-curing reinforcement



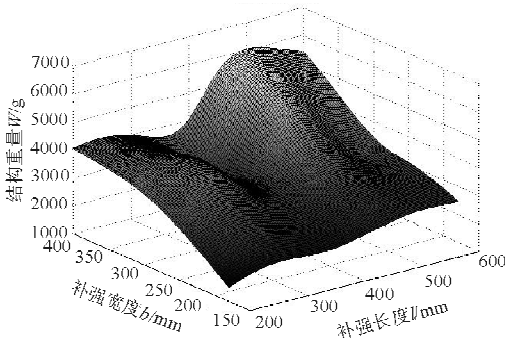
(c) 压缩工况

图 9 插层补强响应面

Fig. 9 Response surface for intercalation reinforcement



(a) 拉伸工况



(b) 剪切工况

从图 7~图 9 可以看出,补强后的结构重量随着补强长度 l 与补强宽度 b 的变化而变化,且 b 对 l 的变化较为敏感,即增加补强宽度对减轻重量不利。对于拉伸及压缩工况下的补强来说,结构重量最小值取在补强长度 l 为最小值时,因为在拉伸、压缩载荷作用下,应力在开口上下方出现最大值,而开口左右方的应力为最小值,所以增加补强的宽度对于应力的传递是有利的,响应面优化出来的结果也会使补强长度趋于零。对于剪切工况下的补强,结构重量最小值为补强宽度 b 取最小值时,由于层合板在剪切载荷作用下,开口左右两侧的应力水平较上下两侧应力水平大许多,为了恢复承载能力,补强长度 l 需要增加,以降低开口两侧的应力水平^[10]。但从图可以看出,补强长度并不需要取到最大值才能达到最低结构重量,即存在最优解。

三种补强方案最优化的结构重量如表 2 所示。

表 2 三种补强方案优化结果比较

Table 2 Optimization results for the three programs of reinforcement

对比因素	螺接补强			共固化补强			插层补强		
	拉伸	压缩	剪切	拉伸	压缩	剪切	拉伸	压缩	剪切
未开口板重/g	1 388	1 388	1 388	1 388	1 388	1 388	1 388	1 388	1 388
开口补强构件重/g	2 638	2 854	2 427	1 980	2 270	1 684	1 590	1 855	1 600
增重比例/%	90.1	105.6	74.8	42.7	63.5	21.3	14.6	33.6	15.3

从表 2 可以看出,共固化补强和插层补强较螺接补强有较大的优势,因为航空领域主要关心的是补强带来的结构重量变化,因此大开口的层合板补

强应选择共固化补强或者插层补强。但在一些情况下,综合考虑成本、工艺等问题,钛合金板螺栓连接补强也可以采用。进一步比较还可以看出,插层

补强在这三种补强方案中带来的重量增加最少,整体结构重量只增加了20%左右,由于插层补强可以充分发挥复合材料层合板比强度高的优势,在选择补强方案时可以优先考虑。

同时,压缩工况下的补强所带来的结构重量增加最大。原因是在压缩载荷作用下,层合板许用压缩应变小于拉伸载荷下的许用应变,且层合板在压缩载荷作用下首先发生屈曲失效。

3 结 论

(1) 对于复合材料层合板开口补强优化设计,采用多级优化方法简单易行,近似模型可以很好地代替有限元计算。

(2) 通过分析补强长度 l 与补强宽度 b 对补强结构重量的影响,发现增加补强宽度 b 对剪切补强结构重量不利。

(3) 钛合金板螺接补强、共固化补强和插层补强均可以满足工程所需的补强要求。但是从重量上来考虑,插层补强有较大的优势,对结构重量的增加仅为20%左右。

(4) 对于拉伸、压缩、剪切三种工况下的补强,压缩工况带来的补强重量增加最多。

(5) 虽然钛合金板螺栓连接补强带来的重量代价最大,但是在某些情况下,综合考虑成本、工艺等要求,也可以选择该方法来进行结构补强。

参考文献

- [1] O'Neill, Gary Sean. Asymmetric reinforcements of a quasi-isotropic graphite epoxy plate containing a circular hole[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1982.
- [2] Pickett D H, Sullivan P. Analysis of symmetric reinforcement of quasi-isotropic graphite/epoxy plates with a circular cutout under uniaxial tension loading[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1983.
- [3] Lee J H, Mall S. Strength of composite laminate with reinforced hole[J]. Journal of Composite Materials, 1989, 23(4): 337-347.
- [4] 寇长河, 汪彤, 酆正能, 等. 复合材料层合板开口补强研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(4): 477-481.
- [5] Ali Al-Mansour, 程小全, 寇长河. 单面贴补修理后层合板的拉伸性能[J]. 复合材料学报, 2005, 22(3): 140-144.
- [6] 胡峪, 李为吉. 飞机多学科设计的分级优化方法[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19(1): 145-147.
- [7] 穆雪峰, 姚卫星, 余雄庆, 等. 多学科设计优化中常用代理模型的研究[J]. 计算力学学报, 2005, 22(5): 608-612.
- [8] Schubbe J J, Mall S. Modeling of cracked thick metallic structure with bonded composite patch repair using three-layer technique[J]. Composite Structures, 1999, 45(3): 185-193.
- [9] 程起有, 姚磊江, 董小燕, 等. 补片尺寸对复合材料胶接修理性能的影响[J]. 飞机设计, 2004(3): 31-33.
- [10] 袁伟, 王志瑾. 受剪复合材料层合板开口应力应变分析研究[J]. 飞机设计, 2010, 30(3): 11-17.

作者简介:

张伟(1988—),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构设计。

甘健(1981—),男,工程师。主要研究方向:复合材料结构设计。

王志瑾(1963—),女,教授,博导。主要研究方向:飞机结构设计技术、复合材料结构优化设计。

(编辑:马文静)