

# 复合材料层压板连接强度分析参数化建模与试验验证

刘湘云\*

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**摘 要:** 采用 Python 语言开发了复合材料层压板连接快速建模程序, 通过人机交互实现自动建模, 参数化建模程序可以对层压板单层厚度、铺层顺序、铺层角度、螺栓直径及排列形式、螺栓边距端距等参数进行设计分析。讨论有限元软件 ABAQUS 与 Python 语言的接口及命令调用方式, 通过 RSG 编写 GUI 界面, 从而大大简化用户的操作过程。通过 Fortran 语言开发了用户自定义材料子程序, 实现材料失效判据及刚度退化的二次开发, 并嵌入快速建模程序中, 实现复合材料层压板连接强度分析参数化建模。有限元分析与试验验证相结合, 对比分析失效模式及破坏载荷, 误差在 10% 以内, 工程上认为误差可接受, 表明模型建立的合理性。本文的工作为复合材料层压板连接强度分析有限元前处理建模提供了有价值的参考。

**关键词:** 复合材料; 连接强度; ABAQUS; Python

中图分类号: V214.8

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

飞机结构中存在大量的机械连接接头, 需要通过大量试验来确保结构的安全, 如连接许用值试验、典型连接试验等等, 试验矩阵非常庞大, 尤其涉及到复合材料结构的连接, 由于复合材料的铺层可设计性、失效模式多样性等复杂因素, 试验矩阵的变量会成倍增加。为降低成本同时保证安全, 一般会采用先进的有限元分析软件对复合材料连接结构进行详细的仿真分析, 得到初步的结论, 并对试验矩阵进行筛选, 从而达到缩减成本的目的。

但由于复合材料的可设计性, 优化分析时需考虑的连接参数较多, 如复合材料层压板单层材料参数、铺层顺序、铺层比例、铺层数量、层压板单层厚度、紧固件直径、紧固件端距、紧固件边距、紧固件行列距、紧固件排列方式、载荷施加形式等等, 若手动建模进行参数化分析则效率比较低<sup>[1-3]</sup>。

本文在 ABAQUS 前处理二次开发的基础

上<sup>[4-5]</sup>, 通过 Python 语言编写内核文件<sup>[6]</sup>, 建立网格, 赋予材料属性、铺层角度、连接属性、边界条件等, 通过 RSG (Really Simple GUI) 编写 GUI (Graphical User Interface) 界面<sup>[7]</sup>, 得到复合材料层压板连接参数化建模插件, 并分析实例, 与试验结果进行对比, 验证模型的可靠性, 可以大大缩减试验费用和研究成本。

## 1 ABAQUS 内核脚本开发

ABAQUS 模型对象结构如图 1 所示, 模型包含部件几何体、材料属性、截面属性、装配方式、分析步控制、接触面属性、边界定义、载荷定义等, 部件几何体包括单元、集合、材料属性、节点等, 单元信息包括编号、类型及单元所在的实体名称, 节点信息包括编号、坐标及节点所在的实体名称。复合材料层压板紧固件连接建模步骤如下<sup>[8]</sup>: 1) 建立层压板几何模型, 对紧固件的位置进行定位, 将层压板进行划分; 2) 建立层压板材料属性, 包括材料刚度性能及强度

\* 通信作者: E-mail: liuxiangyun@comac.cc

**引用格式:** 刘湘云. 复合材料层压板连接强度分析参数化建模与试验验证[J]. 民用飞机设计与研究, 2022(1):167-173. LIU X Y. Parametric modeling and experiment analysis of composite laminate joints[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2022(1):167-173(in Chinese).

性能;3)给层压板赋予材料属性,选择材料失效准则,并创建铺层信息;4)将两个层压板或层压板与金属板进行装配,建立紧固件模型,赋予紧固件截面属性,并定义紧固件与被连接件之间的接触属性;5)创建分析步,设置分析步增量及所需的输出变量;6)划分单元,指定单元类型,在紧固件周围将网格密度细化;7)提交分析。

本文采用 Python 语言编写 ABAQUS 各个模块的内核脚本,并开发 GUI 界面,形成 ABAQUS 插件。<sup>[9]</sup>

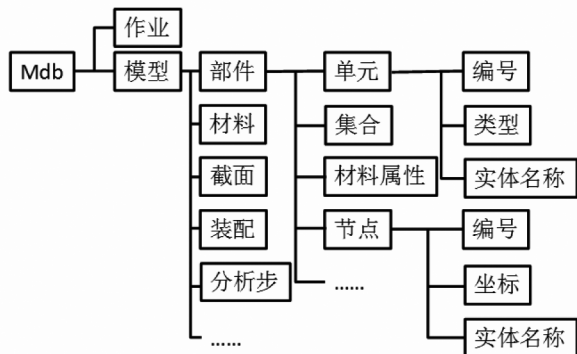


图1 Mdb 对象结构

块,一个是“GUI”,左侧为各式各样的控件,选择所需的控件并进行编辑,通过“Keyword”传递变量信息<sup>[10]</sup>;另一个是“Kernel”,即内核文件,一般不在模块里直接编写内核脚本,而是通过 py 文件编写后再导入<sup>[11]</sup>。

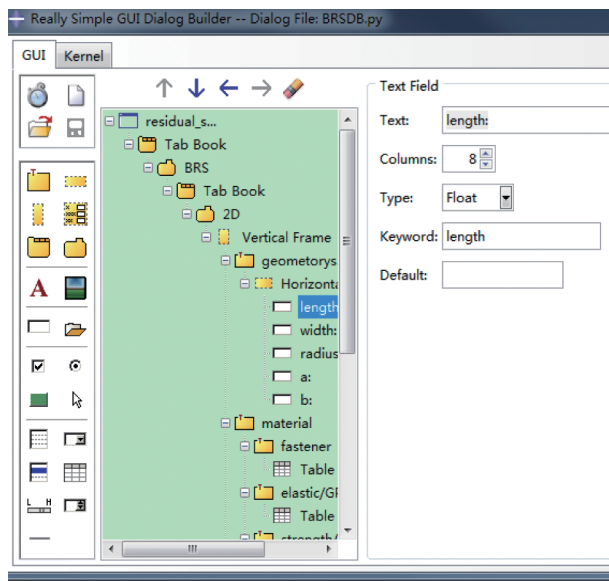


图2 RSG 对话框构造示意图

## 2 ABAQUS 交互界面 GUI 开发

通过 ABAQUS 人机交互界面 GUI,用户可进行直观操作,简单输入一些参数,如几何尺寸、材料数据等,即可通过执行 ABAQUS 内核命令实现模型的有限元前处理。

本文采用 RSG 工具创建 GUI 界面,与内核命令之间进行交互。RSG 是 ABAQUS 内嵌的 GUI 插件二次开发工具,界面如图 2 所示。RSG 包括两个模

## 3 复合材料层压板连接二次开发

自动建模流程图如图 3 所示,“GUI 操作”部分,用户输入参数,点击确定后,程序将 GUI 参数打包,向内核发送命令,内核执行发送来的命令,若执行失败则抛出异常,GUI 会捕捉异常,弹出信息对话框,若执行成功,则按顺序调用 ABAQUS 的“part”模块、“assembly”模块、“property”模块、“step”模块、“load”模块、“mesh”模块及“job”模块,完成建模。

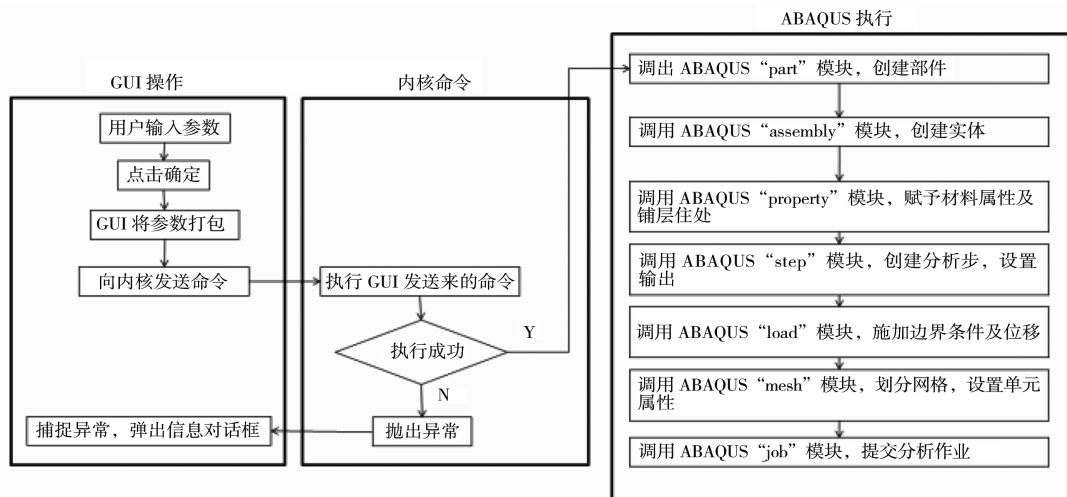


图3 程序流程图

图 4、图 5 分别为复合材料层压板紧固件连接、复合材料与金属结构紧固件连接强度分析快速建模界面,所需要输入的几何参数为试样长度、宽度、紧固件孔半径、端距、边距、行距、列距、紧固件行数、列数,螺母半径、高度。需要输入的材料参数为弹性模量及泊松比,由于复合材料层压板采用三维实体模型,ABAQUS 自带的复合材料失效准则仅适用于二维模型,所以材料的强度参数不在此处进行输入,而是通过 Fortran 语言编写用户自定义材料子程序来实现材料的失效判断及刚度退化。需要输入的铺层参数为单层厚度、层数、铺层顺序,其他需要输入的参数为施加的位移、模型名称、作业名称。

由于篇幅限制,本文仅列出部分主要代码及注释,如下:

```
from abaqus import * #此为固定格式
from abaqusConstants import *
def BRS (#此处定义用户输入的参数):
    BRSMModel = mdb. Model ( name = BRSMModelname ) #
    创建模型,并赋予用户定义模型名称
    BRSPanel = BRSMModel. Part ( name = 'brspanel' ) #
    创建部件,并赋予部件名称
```

```
BRSComp = BRSMModel. Material ( name = 'Composite' ) #创建材料,并赋予材料名称
#创建复合材料铺层,并赋予部件
i = 0
for i in range ( 0, brslayers ):
    compositeLayup. CompositePly ( plyName = 'Ply-' +
    str(i + 1), thickness = t)
else:
    print '完成铺层设置!'
#创建实体并进行装配
BRSPInstance = BRSPAssembly. Instance ( name = 'brspanelInstance' )
#创建分析步,并设置所需要的输出变量
BRSMModel. StaticStep ( name = 'Step-1' )
BRSMModel. fieldOutputRequests [ ' F-Output-1 ' ].
    setValues ( variables = ( 'U', 'S', 'RF', 'STATUS' ))
#为实体部件创建网格
BRSPanel. generateMesh ( )
#创建分析作业
jobName = BRSPjobname
BRSPJob = mdb. Job ( name = jobName, model =
    BRSMModelname )
```

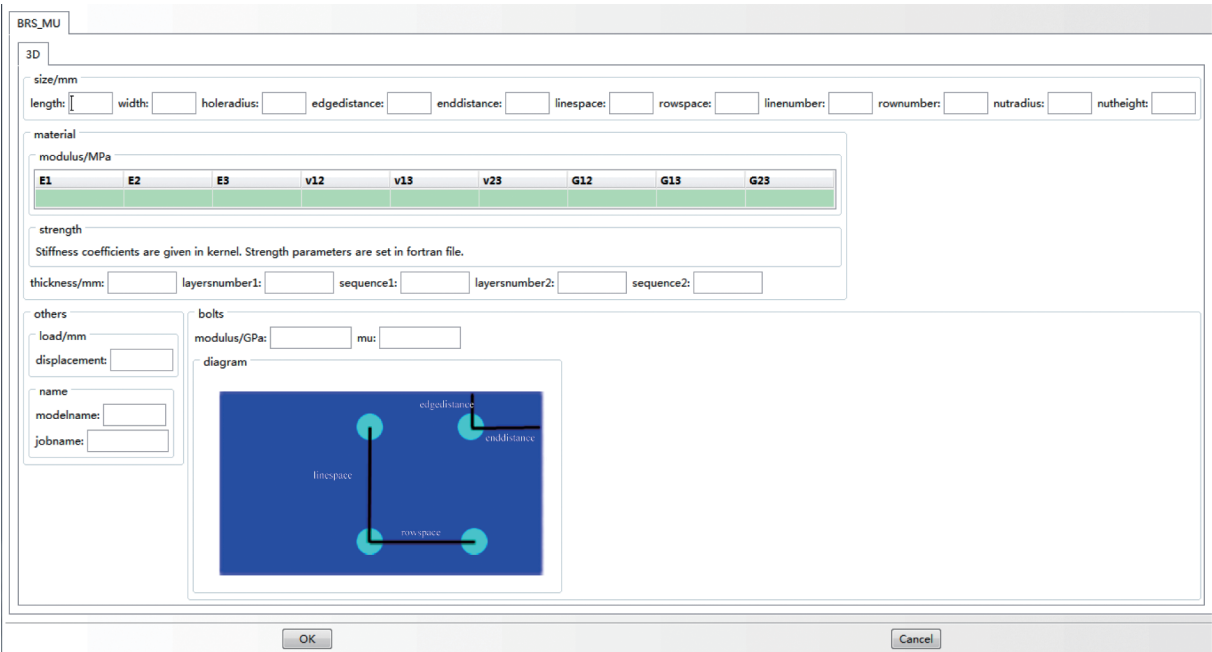


图 4 复合材料层压板紧固件连接强度分析快速建模界面

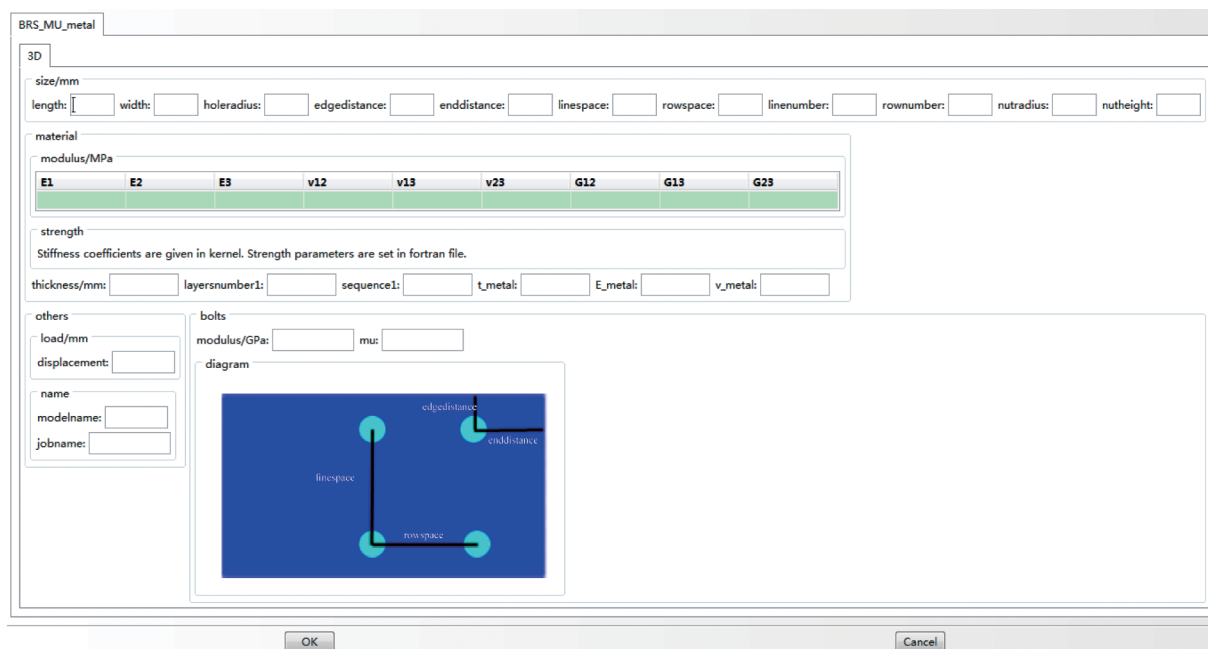


图 5 复合材料与金属结构紧固件连接强度分析快速建模界面

#### 4 用户自定义材料二次开发

复合材料的失效过程非常复杂,包括基体开裂、纤维断裂、层间分层等失效模式,且各种失效模式之间相互作用,一种形式的损伤可能会引起其他形式的损伤。复合材料的失效判据很多,为了相对准确的模拟实际情况,仿真分析必须选择合适的材料失效判据。本文采用三维 Hashin 失效准则来判断复合材料的损伤起始。

当有限元应力分析得到的复合材料应力状态满足三维 Hashin 准则时,则材料发生破坏,刚度会大大削弱。不同的失效模式对应不同的刚度退化项及刚度折减系数。

Fortran 编写的用户自定义材料代码及注释如下:

```
SUBROUTINE UMAT ( STRESS, STATEV, DDSDE,
SSE, SPD, SCD, RPL, DDSDDT, DRPLDE, DRPLDT,
STRAN, DSTRAN, TIME, DTIME, TEMP, DTEMP,
PREDEF, DPRED, CMNAME, NDI, NSHR, NTENS,
NSTATV, PROPS, NPROPS, COORDS, DROT,
PNEWDT, CELENT, DFGRD0, DFGRD1, NOEL, NPT,
LAYER, KSPT, JSTEP, KINC) ! 此为固定格式
INCLUDE 'ABA_PARAM. INC'
CHARACTER * 80 CMNAME
DIMENSION STRESS ( NTENS ), STATEV ( NSTATV ),
DDSDE ( NTENS, NTENS ), DDSDDT ( NTENS ), DR-
```

```
PLDE ( NTENS ), STRAN ( NTENS ), DSTRAN ( NTENS ),
TIME ( 2 ), PREDEF ( 1 ), DPRED ( 1 ), PROPS
( NPROPS ), COORDS ( 3 ), DROT ( 3, 3 ), DFGRD0 ( 3,
3 ), DFGRD1 ( 3, 3 ), JSTEP ( 4 ) ! 定义变量
DIMENSION STRAND ( 6 ), C ( 6, 6 ), CD ( 6, 6 ), DCDE
( 6, 6 ), STRESS0 ( 6 ) ! 定义数组
PARAMETER ( ALPHA = 1000. 0, LAMBDA = 0. 0,
DMAX = 0. 9999, DRND = 3 ) ! 定义常量
E1 = PROPS ( 1 ) ! E1 为纤维方向杨氏模量
E2 = PROPS ( 2 ) ! E2 = E3, 分别为 2 方向、3 方向
杨氏模量, 即基体杨氏模量
XNU12 = PROPS ( 3 ) ! 12 方向的泊松比, XNU13
= XNU12
XNU21 = XNU12 * E2 / E1 ! 21 方向的泊松比,
XNU31 = XNU21
XNU23 = PROPS ( 4 ) ! 23 方向的泊松比, XNU32
= XNU23
G12 = PROPS ( 5 ) ! G12 = G13, 12 平面及 13 平面
内剪切模量
G23 = PROPS ( 6 ) ! G23, 23 平面内剪切模量
STH = PROPS ( 7 ) ! 1 方向失效应力, 即纤维方向
失效应力
RNU = 1 / ( 1 - 2 * XNU12 * XNU21 - XNU23 * * 2 - 2 *
XNU12 * XNU21 * XNU23 )
C = 0 ! 创建刚度矩阵 C ( 6, 6 )
```

```

C(1,1) = E1 * (1-XNU23 * * 2) * RNU
C(2,2) = E2 * (1-XNU12 * XNU21) * RNU
C(3,3) = C(2,2)
C(4,4) = G12
C(5,5) = G12
C(6,6) = G23
C(1,2) = E1 * (XNU21 + XNU21 * XNU23) * RNU
C(2,1) = C(1,2)
C(1,3) = C(1,2)
C(3,1) = C(1,2)
C(2,3) = E2 * (XNU23 + XNU12 * XNU21) * RNU
C(3,2) = C(2,3)T
DO I = 1, 6 ! 计算增量步结束时候的应变
STRAND(I) = STRAN(I) + DSTRAN(I)
ENDDO
STRANF = STH/E1! 计算失效系数
IF (STRAND(1) > 0) THEN ! 判断是否失效
F = STRAND(1)/STRANF
ELSE
F = 0
ENDIF
D = STATEV(1) ! 计算损伤变量 D
DDDE = 0
IF (F > 1) THEN
DV = 1-EXP( ALPHA * (1-F) )
IF (DV > D) THEN
D = D * LAMBDA/( LAMBDA + 1) + DV/( LAMB-
DA + 1)
DDDE = ALPHA * (1-DV)/STRANF/(1 + LAMB-
DA)
D = ANINT( D * 10 * * DRND)/10 * * DRND
DDDE = ANINT( DDDE * 10 * * DRND)/10 * *
DRND
ENDIF
ENDIF
IF (D > DMAX) THEN
D = DMAX
ENDIF
ENDIF
STATEV(1) = D ! 更新 D
CD = C ! 计算损伤后的刚度矩阵 CD(6,6)
CD(1,1) = (1-D) * C(1,1)
CD(1,2) = (1-D) * C(1,2)

```

```

CD(1,3) = CD(1,2)
CD(2,1) = CD(1,2)
CD(3,1) = CD(1,2)
CD(4,4) = (1-D) * C(4,4)
CD(5,5) = (1-D) * C(5,5)
DO I = 1, 6 ! 计算应力
STRESS0(I) = STRESS(I)
STRESS(I) = 0.0
DO J = 1, 6
STRESS(I) = STRESS(I) + CD(I,J) * STRAND
(J)
ENDDO
ENDDO
DO I = 1, NTENS ! 计算弹性应变能 SSE
SSE = SSE + 0.5 * ( STRESS0(I) + STRESS(I) ) *
DSTRAN(I)
ENDDO
DCDE = 0 ! 更新雅可比矩阵
DCDE(1,1) = -DDDE * CD(1,1)
DCDE(1,2) = -DDDE * CD(1,2)
DCDE(1,3) = DCDE(1,2)
DCDE(2,1) = DCDE(1,2)
DCDE(3,1) = DCDE(1,2)
DCDE(4,4) = -DDDE * CD(4,4)
DCDE(5,5) = -DDDE * CD(5,5)
DDSDDE = CD
DO I = 1, 6
DO J = 1, 6
ATEMP = DCDE(I,J) * STRAND(J)
ENDDO
DDSDDE(I,1) = DDSDDE(I,1) + ATEMP
ENDDO
RETURN
END

```

## 5 复合材料层压板连接实例分析

### 5.1 试验简介

复合材料层压板与金属单搭连接试验件外形尺寸如图 6 示,材料及铺层信息如表 1 所示。螺栓直径为 6 mm,材料为 TC4,  $E = 109 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.31$ 。金属板材料为 TC4,厚度为 2.5 mm。搭接面尺寸为 66 mm × 60 mm。

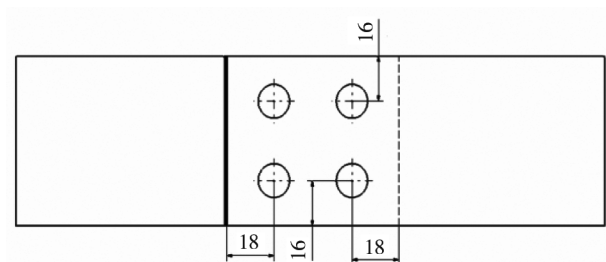


图 6 试验件尺寸

表 1 材料及铺层信息

材料弹性常数/GPa			泊松比	厚度/mm
$E_1$	$E_2$	$G_{12}$	$\nu$	$t$
138	9.36	4.69	0.303	0.125
材料强度参数/MPa				
$X_T$	$X_C$	$Y_T$	$Y_C$	$S_{12}$
1 805	1 338	55	204	130
铺层顺序				
[45/-45/0/-45/90/45/0/-45/0/0/45/0/45/0/-45/90]S				

## 5.2 计算与试验结果对比分析

输入各参数,点击“OK”,自动生成模型,检查网格质量后提交分析。有限元分析结果表明连接试验件的最终破坏模式为净面积拉伸破坏,如图 7 所示,试验结果如图 8 所示,两者一致。

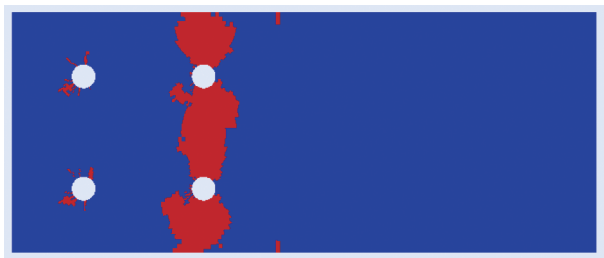


图 7 有限元预测螺栓连接破坏模式



图 8 螺栓连接试验破坏模式

有限元得到螺栓连接破坏载荷为 79.7 kN,载荷位移曲线如图 9 所示。试验破坏载荷为 85.50 kN,误差 7%。

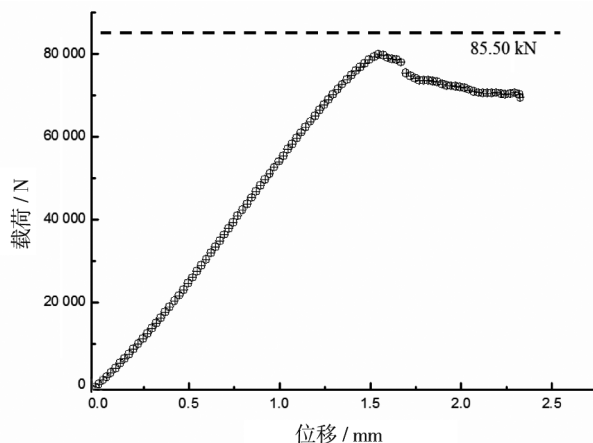


图 9 接头模型载荷位移曲线

## 6 结论

通过 Python 语言进行 ABAQUS 二次开发,研究针对复合材料层压板连接强度仿真分析的参数化建模程序,并用于连接强度及失效模式的快速建模分析,得出以下结论:

(1) 该参数化建模程序可以对层压板单层厚度、铺层顺序、铺层角度、螺栓直径及排列形式、螺栓边距端距等参数进行设计分析。

(2) 实例分析得到的失效模式与试验结果一致,连接强度误差小于 10%。

(3) 本文的参数化建模程序能够实现复合材料层压板连接仿真快速建模,为后续的试验提供前处理工具,缩减研究成本及试验成本。

## 参考文献:

- [1] 赵美英. 复合材料机械连接失效分析及强度影响因素研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
- [2] 王轶哲. 复合材料层合板螺栓连接接头的失效研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [3] 郑钰. 复合材料厚板单钉连接强度研究及失效区分分析[D]. 上海:上海交通大学,2011.
- [4] Hibbit, Karlsson&Sorensen, Inc. ABAQUS/Standard User's Manual[Z]. Version 6.7. Rhode Island, USA, 1998.
- [5] 王鹰宇. Abaqus 分析用户手册——分析卷[M]. 北京:机械工业出版社,2017.
- [6] LUTZ M, ASCHER D. Learning python[M]. 2nd ed. Queensland: O'Reilly, 2003:4-16.
- [7] 黄霖. Abaqus/CAE 二次开发功能与应用实例[J]. 计算机辅助工程,2011,20(4):96-100.

- [ 8 ] 顾亦磊. 复合材料机械连接强度分析及影响因素研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
- [ 9 ] 钟同圣,卫丰,王鸢,等. Python 语言和 ABAQUS 前处理二次开发[J]. 郑州大学学报(理学版), 2006, 38(1):60-64.
- [10] 赵焕卿,畅元江. 基于 Python 的 ABAQUS 后处理技术在隔水管静态分析中的应用[J]. 石油矿场机械, 2009,38(1):1-5.
- [11] 张震. 一种分析复合材料多螺栓连接件受力的数值解析方法[D]. 西安:西北工业大学, 2007.

#### 作者简介

刘湘云 女,工程师。主要研究方向:飞机设计强度。  
Email:liuxiangyun@comac.cc

## Parametric modeling and experiment analysis of composite laminate joints

LIU Xiangyun \*

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** A fast modeling program for composite laminate joints by Python was developed to realize auto-modeling. Parametric modeling program can design and analyze parameters such as single layer thickness of laminate, lay-up sequence, lay-up angle, bolt diameter and arrangement form, bolt edge distance and end distance. This paper discusses the interface between ABAQUS and Python and the method of calling the command order. GUI interface is written through RSG, which greatly simplifies the user's operation process. The user-defined material subroutine was developed by FORTRAN language to realize the secondary development of material failure criterion and stiffness degradation, and embedded in the fast modeling program to realize the parametric modeling of composite laminate joint strength analysis. The rationality of modeling method was proved by comparing the results of FEM and experiments. Comparative analysis of failure mode and damage load, the error is within 10%, the error is considered acceptable in engineering. This study can provide a reference for modeling the composite joints.

**Keywords:** composite laminate; joint strength; ABAQUS; Python

---

\* Corresponding author. E-mail: liuxiangyun@comac.cc