

# 北京大学攻读硕士学位研究生选题报告审核表

(本表先由硕士生在校内门户填写有关内容后打印,由指导教师、考评小组签署意见后,一式一份存学校档案)

院、系:工学院

专 业:固体力学

姓 名:储鹏程

导师姓名:励争

学 号:1501214644

选题报告完成时间: 2018年03月20日

拟定学位论文题目: 大开口复合材料层合板的渐进失效分析

|       |  |
|-------|--|
| 本人陈述: | (选题来源、研究意义、国内外研究状况、主要研究内容、拟采取的研究方法、预期研究结果和论文写作计划等) |
|-------|--|

## 1、研究意义

复合材料是由两种或多种不同性质的材料用物理和化学方法在宏观尺度上组成的具有新性能的材料。一般复合材料的性能优于其组分材料的性能,并且有些性能是原来组分材料所没有的,复合材料改善了组份材料的刚度、强度、热学等性能。由于复合材料同时具备比强度高、比模量高、可设计性、高温性能好等优点,它最先被应用于飞机制造方面,后来逐步应用船舶工程和车辆制造等其他方面。同时,含孔的复合材料层合板在工程中也有比较广泛的应用,比如在使用复合材料层合板制成的航空发动机机匣上要开观察孔和放气孔,同时在机匣筒体还要开一定的数量的孔以配合机匣的安装,还有许多被设计为大开孔层合板,比如飞机的舱门和舷窗等。

尽管复合材料实际工程中得到了日益广泛的应用,但是它的失效和破坏也是不可避免的。与金属材料不同,复合材料由纤维和基体等不同组分材料不均匀地组成,并具有各向异性,其破坏过程非常复杂。复合材料从制造到使用,可能存在各种局部缺陷和损伤。此外,对于大开孔的复合材料层合板来说,其内部的应力状态更加复杂,同时由于应力集中现象以及开孔处纤维的连续性遭到了破坏,使损伤的发展以及失效的模式更加复杂化。损伤的存在对复合材料的机械特性会产生影响,进而影响到复合材料的响应,所以能够准确的预测大开孔的复合材料层合板的损伤起始状态以及极限载荷,并且弄清其中的破坏机理,对于复合材料使用的安全性和可靠性来说是至关重要的。

## 2、国内外研究现状

在复合材料的实际工程应用中,有很多含有孔洞的结构,比如飞机的舱门以及螺栓孔等等。由于孔洞的存在使得层合板出现应力集中的现象,从而造成了结构整体刚度和强度的降低,另一方面,由于应力状态更加复杂,导致我们更加难以掌握其破坏的形式。有些适用于无孔层合板的理论可能并不能直接适用于开口的层合板,所以针对于开口层合板有一些针对性的理论。

一种是用基于断裂力学的方法预测层合板的失效,这种方法已经成功地预测了层合板在有应力集中的情况下的失效,并且还精确地模拟了层合板的孔径尺寸效应。这种基于断裂力学的方法需要大量的实验数据,然而,由于现实中的大多数复合材料结构都是具有应力集中的,所以这种基于断裂力学的方法研究也是很有必要的。Whitney 和 Nuismer基于应力分布,利用特征尺度提出了两种计算复合材料层合板的拉伸强度的方法:点应力法和平均应力法。在点应力法中,假设当距离开孔 $d_0$ 处的点在加载方向的正应力大于等于无孔材料拉伸强度的时候,整个层合板都发生失效。而平均应力法则认为,当从开孔的边缘到距离开孔 $a_0$ 处这一段的平均应力大于等于无孔材料拉伸强度的时候,层合板才会发生失效。而这些距离都被视为材料的一个性能参数。这种方法的局限性在于它只适用于小孔径的情况下,一旦层合板开孔的尺寸增加后,许多断裂力学的假设不再成立,那么这种方法就无法再进行计算。

第二种方法是使用损伤区域模型,在这种模型中,将孔洞周围的损伤用一个等效裂纹来表征,在这些裂纹表面都有内聚力的作用。这些裂纹代表了拉伸情况下的基体断裂和分层以及压缩情况下的纤维微屈曲和分层。由于随着载荷的增加破坏也会增加,在这个模型中可以假设聚合应力和裂纹张开成线性递减的关系,在裂纹尖端的应力被视为等于无孔层合板的拉伸强度。

第三种方法就是使用渐进损伤模型,这是一种数值破坏理论。大量的实验数据表明,复合材料层合板的失效通常都是一个渐进的过程,因此我们可以将单层刚度的渐进式的衰减看成是破坏模式的一个函数。Ochoa和Reddy的研究中向我们完整地展示了对复合材料进行渐进失效分析的基本步骤。这类的方法通常分为四个主要的步骤:(I)单层板中的应变和应力分析,这里的关键问题是本构方程的建立,通常我们借助有限元来进行这一步的计算;(II)使用复合材料的失效准则来判断单层板是否已经失效,不同的学者已经提出了许多不同的失效准则,比较著名的有最大应力准则,Tsai-Wu准则,Hashin-Rotem准则以及puck准则等等。如果判断出材料没有失效,则继续增加载荷,如果出现了失效则进行下一步;(III)材料已经失效后的渐进破坏,在这一步中,通常对已经失效的单层板进行材料刚度的衰减,通常使用的衰减有层折减法以及连续损伤力学的方法。具体情况将在下文进行介绍。(IV)最后一步是对层合板整体失效的判断。Camanho等认为当层合板的纤维失效扩展到其边界上时,此层合板彻底

失效。本文沿用这种判断方式来判定层合板最终的整体失效。

前面两种方法属于解析的破坏理论，对于大开口复合材料层合板这种应力状态比较复杂的结构往往不能适用，另一方面，这两种方法的局限性还在于它们都只能计算层合板的极限载荷，而无法模拟层合板的破坏的过程，要想弄清大开口复合材料层合板的破坏的机理，数值破坏理论显然是更加适用的。

3、主要研究内容

本课题主要通过实验以及数值计算两种方式对单向拉伸载荷下的多种铺层和孔径的大开孔复合材料层合板的损伤进行研究，通过实验和计算的对比，得到了层合板的损伤演化过程和破坏机理，也验证了模型的可靠性。具体研究内容如下：

（1）通过实验对不同铺层及不同孔径的复合材料层合板的破坏进行研究，在试验中，对层合板进行单向拉伸实验，同时使用电测法（应变片和应变仪）和光测法（DIC测试）两种方式对拉伸过程中的应变进行测量。

（2）使用ABAQUS软件，通过编写UMAT子程序将连续损伤模型与有限元结合对大开口复合材料层合板在拉伸载荷下的损伤进行数值模拟，在模拟中，使用线性退化和指数退化两种退化模型进行对比；

（3）在模拟计算中，考虑剪切非线性效应和就地强度效应这两种理论，通过就地强度效应，对不同铺层的材料参数进行修正，同时在本构方程中利用Ramberg-Osgood方程来定义层合板中的剪切非线性本构关系；

（4）将不同铺层和孔径的层合板的计算结果和实验结果进行对比，最终可以得到层合板的极限载荷以及损伤演化的机理和规律，同时也验证了本文计算方法的准确性和可靠性。

4、拟采用的研究方法

本课题旨通过实验以及数值计算两种方式对单向拉伸载荷下的多种铺层和孔径的大开孔复合材料层合板的损伤，最终可以得到层合板的极限载荷以及损伤演化的机理和规律，同时也验证了本文计算方法的准确性和可靠性。针对以上目标，我们拟采用的研究方法如下：

（1）实验方面，采用WDW-200试验机对层合板进行单向拉伸实验，为了夹持时间，我们设计了专门的端部穿孔加载装置。

（2）在实验过程中采用电测法及光测法两种方式：利用电阻应变片和TST3682应变仪测量拉伸过程中的应变，利用DIC设备测量整个层合板的应变分布；

（3）在计算方面我们使用Hashin失效准则来进行损伤的判断，并且使用连续损伤模型进行材料性能的退化，同时考虑剪切非线性效应和就地强度效应两种理论。

（4）为了和有限元结合，我们使用ABAQUS/Explicit分析模块进行计算，通过编写UMAT子程序实现理论模型，在程序中引用特征长度去除网格依赖性，同时考虑粘性系数以提高数值计算的收敛性。

5、预期研究结果

（1）通过实验研究以及数值计算两种方式对不同铺层和孔径的层合板的破坏机理进行研究，得到破坏和铺层方式以及孔径的关系；

（2）利用连续损伤模型与有限元结合对大开口复合材料层合板进行数值模拟，得到与实验相符的极限载荷以及损伤演化的计算结果；

（3）使用线性退化模型和指数退化模型进行对比，得到更加符合材料性质的退化模型；

（4）考虑材料的剪切非线性效应，得到了符合实验现象的加载曲线；考虑材料的剪切非线性效应，得到了符合实验现象的加载曲线。通过这两种理论，可以使计算模型更加的完善。

6、论文写作计划

2018年3月23日-2018年4月15日 进行大开口复合材料层合板的拉伸试验，得到实验数据；使用连续损伤模型，在ABAQUS中对进行各个铺层、孔径的层合板进行数值计算，模拟材料的失效过程；考虑剪切非线性以及就地强度效应，对模拟进行优化。

2018年4月15日-2018年4月29日 进一步整理并补充文献；完成毕业论文初稿

2018年5月1日-2018年6月8日 根据送审意见修改论文与答辩PPT，完成答辩。

本人签名： 年 月 日

指导教师对选题报告的意见：

指导教师签名： 年 月 日

| 选题报告<br>考评小组 | 姓名  | 职称  | 所在单位            | 签字 |
|--------------|-----|-----|-----------------|----|
| 成员 1         | 励争  | 教授  | 北京大学工学院力学与工程科学系 |    |
| 成员 2         | 李法新 | 研究员 | 北京大学工学院力学与工程科学系 |    |
| 成员 3         | 易新  | 研究员 | 北京大学工学院力学与工程科学系 |    |

考评小组意见：

考评小组成员签名： 年 月 日