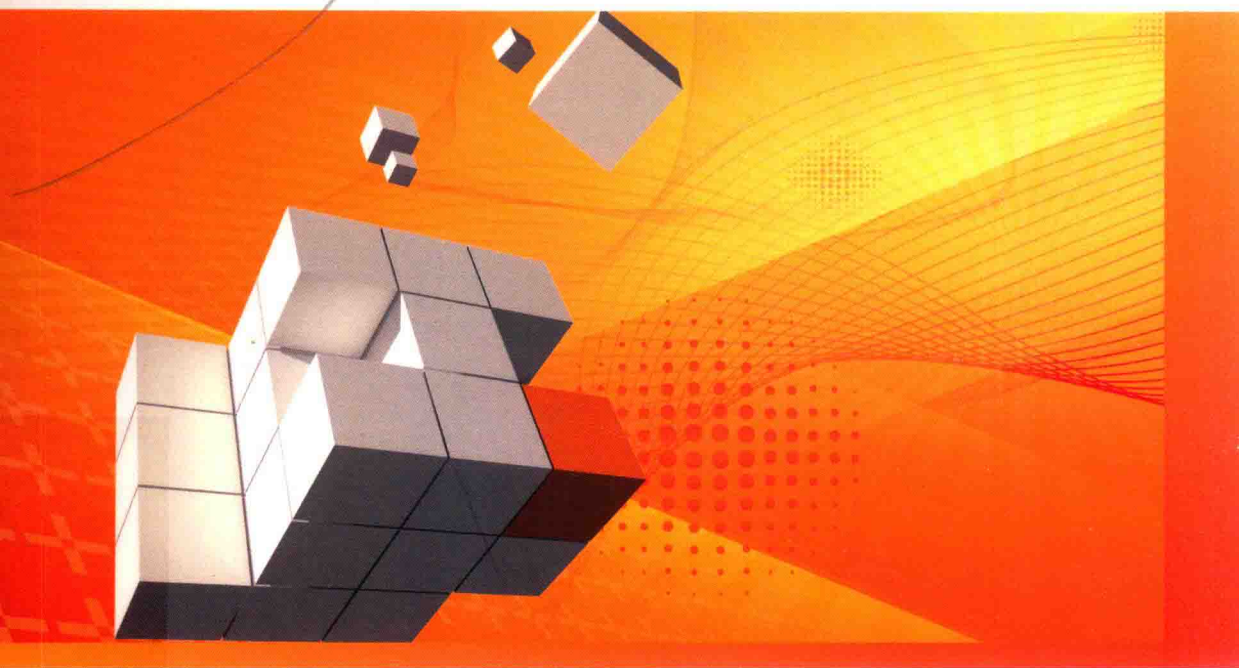
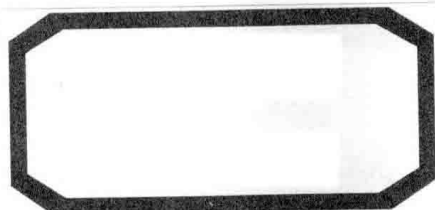


复合材料及其胶接结构的 逐渐损伤失效研究

杨银环 赵 伟 ◎ 著



哈尔滨商业大学博士科研启动基金资助项目(13DL008); 哈尔滨商业大学青年创新人才培养计划资助项目(2016QN061); 黑龙江省自然科学基金资助项目(E1016050)



复合材料及其胶接结构的 逐渐损伤失效研究

杨银环 赵 伟◎著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料及其胶接结构的逐渐损伤失效研究 / 杨银环, 赵伟著. —北京: 科学技术文献出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-5189-5080-5

I. ①复… II. ①杨… ②赵… III. ①复合材料—结构材料—胶接—力学性能—研究 IV. ①TB334

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 300248 号

复合材料及其胶接结构的逐渐损伤失效研究

策划编辑: 张 丹 责任编辑: 李 鑫 责任校对: 文 浩 责任出版: 张志平

出 版 者 科学技术文献出版社

地 址 北京市复兴路15号 邮编 100038

编 务 部 (010) 58882938, 58882087 (传真)

发 行 部 (010) 58882868, 58882870 (传真)

邮 购 部 (010) 58882873

官方网址 www.stdp.com.cn

发 行 者 科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销

印 刷 者 北京虎彩文化传播有限公司

版 次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

开 本 710×1000 1/16

字 数 301千

印 张 16.5

书 号 ISBN 978-7-5189-5080-5

定 价 68.00元



版权所有 违法必究

购买本社图书, 凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

前 言

复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料通过物理或化学方法组合而成的一种多相材料,具有比强度高、比刚度高和可设计性强等优点。复合材料及其胶接结构以其诸多的优良性能,目前已广泛应用于航空航天、建筑、车辆、机械等领域。对复合材料及其胶接结构力学性能的研究是十分重要的,直接关系到工程结构的安全可靠性,由于复合材料结构的损伤破坏机制远比传统金属结构复杂,目前有关复合材料及其增强结构的力学性能的研究还不完善。本书在充分吸收国内外研究成果的基础上,对含孔复合材料层合板进行逐渐损伤扩展分析,针对层合板单搭胶接接头、Z-pins 增强复合材料单搭胶接接头及三维六向编织与层合复合材料单搭胶接接头,从破坏模式、失效机制、强度预测、逐渐损伤分析及应力分析等方面对其进行了实验及数值研究。本书主要研究内容如下。

第一,对复合材料层合板的逐渐损伤扩展研究现状及复合材料接头的国内外研究进展进行了综述,介绍了胶接接头的应力、强度及渐进损伤分析,以及 Z-pins 增强复合材料接头的力学性能方面的研究现状和已取得的一些重要结果,并对本书的研究目的及研究意义进行了阐述。

第二,采用逐渐损伤分析方法,研究了含有圆孔的复合材料层合板在压缩荷载作用下的逐渐损伤过程。逐渐损伤分析方法由应力计算、失效分析和材料性能退化三部分组成。采用 ANSYS 软件对不同铺层

的复合材料层合板的逐渐损伤过程进行数值模拟,分别采用不同的失效判断准则和材料性能退化准则的组合形式进行逐渐损伤分析,将得到的最终失效荷载与文献实验值相比较。对比发现,预报的失效荷载受选用的失效准则和退化准则组合形式的影响显著。得到了一种较好的判断准则与退化准则组合形式,它可以较准确地预报复合材料层合板在压缩荷载作用下的失效荷载。分析了层合板的逐渐损伤规律,并对数值模拟过程中存在的主要问题进行了讨论。

第三,对层合板单搭胶接接头在单向拉伸荷载作用下的力学行为进行了实验研究。阐述了各种接头试验件的制备工艺过程;实验研究了不同层合板厚度、胶层含缺陷及搭接区端部有胶溢出接头的失效行为;分析了其破坏模式及失效机制,并比较了这4种接头的失效强度。

第四,对层合板单搭胶接各类接头进行了强度预报、逐渐失效分析及应力分析。数值建模的基本思想:应用界面单元模拟接头的开裂,三维实体单元模拟胶层、复合材料板及 Z-pins 的应力场;考虑了基体拉伸破坏、纤维拉伸破坏、基体纤维剪切破坏、剥离分层、界面破坏及胶层破坏6种失效模式;采用能量失效准则判断界面元失效,应用 Shokrieh 等改进的三维 Hashin 失效准则分析层合板破坏,用最大应力准则分析胶层破坏,并采用材料性能突然退化模式。基于有限元软件 ANSYS 来完成数值分析,用 APDL 语言开发了相应的程序。建立的有限元分析模型能够有效地模拟从初始加载到最终失效过程中复合材料胶接接头的力学响应及损伤的萌生与扩展。将数值与实验结果进行了对比,验证了模型的有效性。分析了胶层中面及界面的应力分布,研究了参数(层合板厚度、搭接长度、胶层厚度、层合板铺设方式、缺陷及溢出胶)对沿胶层中面及界面中心线的剪应力和剥离应力的影响,并模拟了搭接区层合板各层间剪应力及剥离应力的分布。

第五,对 Z-pins 增强复合材料单搭胶接接头在单向拉伸荷载作用

下的力学特性进行了实验研究和数值计算。阐述了3种接头试验件的制备工艺过程,并建立了对各种接头进行强度预报和逐渐失效分析的数值方法。对三排、二排及“工”字型排列的3种类型Z-pins增强单搭胶接接头结构进行了拉伸破坏实验,分析了Z-pins数量及排列方式不同的增强接头的破坏模式及失效机制,并将3种类型Z-pins增强接头与无Z-pins增强接头的失效强度进行了对比。对3种Z-pins增强接头进行了强度预报及逐渐失效分析,比较分析数值与实验结果,吻合较好。最后,模拟了胶层中面及界面的应力分布,研究了参数(Pins直径、Pins间距、Pins材料属性及层合板铺设方式)对胶层剪切及剥离应力的影响,并分析了搭接区层合板各层间剪切及剥离应力的分布。

第六,采用实验与数值相结合的方法,研究了三维六向编织与层合复合材料胶接接头的力学性能,分别比较了不同搭接长度、不同黏接体材料、不同胶粘剂类型及搭接区端部溢出胶接头的单向拉伸失效强度,并分析了10种接头的破坏模式及失效机制。另外,针对各类接头进行了强度预报及逐渐失效分析,考虑了基体拉伸破坏、纤维拉伸破坏、基体纤维剪切破坏、剥离分层、界面破坏、胶层破坏及编织复合材料基体拉伸破坏7种失效模式,应用Von Mises强度失效准则判断三维六向编织复合材料基体失效,并采用材料性能突然退化模式。将数值预报的接头失效模式及强度与实验结果进行了对比,吻合较好。同时,计算了胶层中面及界面的应力分布,讨论了参数(黏接体厚度、黏接体材料、搭接长度、溢出胶长度与厚度及编织角度)对胶接界面剪切及剥离应力的影响,并分析了搭接区层合板沿搭接长度方向各层间剪切及剥离应力的分布。

本书中第五章层合板单搭胶接接头的实验研究,第八章Z-pins增强单搭接层合板接头的实验研究,第十一章编织与层合复合材料胶接接头的实验研究,此三章内容由赵伟编写完成。

本书相关科研是在吴林志教授、周振功教授的悉心指导下完成的。博士生导师吴林志教授渊博的学识、勤奋的工作作风及务实的治学态度使我受益终生；副导师周振功教授在本书的写作过程中给予我多方面的关心，使我终生难忘。本书凝聚着吴老师和周老师的心血和汗水，他们言传身教、认真负责、治学严谨的态度使我受益终生。非常真诚大声地说一句：“老师，你们辛苦了！”在本书完成之际，对吴林志教授、周振功教授这些年来对我的培养和教诲表示崇高的敬意和深深的感谢。

本书的顺利完成还得到了马力教授、泮世东副教授、王兵副教授及熊健副教授的热心帮助，感谢他们在繁忙的工作中抽出时间给予的启发和建议。还要感谢求学期间的同窗好友，刘加一博士、唐玉玲博士、郭颖博士、殷莎博士、娄佳博士、张国旗博士、吴化平博士、李明博士、王志勇博士、于国才博士等各位师兄弟的热情帮助和支持，同时还要感谢师弟韩同行、张林和周宏亮等的热心帮助和鼓励。

感谢我的父母、亲人及哈尔滨商业大学的领导和同事多年来对我的培养和关心，感谢我的儿子韩宗翰给予我精神上的理解与支持。

最后特别感谢我的师弟周宏亮为本书所做的大量科研工作。

杨银环

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.2 复合材料及其接头结构的研究现状	3
1.3 本书的主要研究内容	15
第二章 基于 ANSYS 软件的复合材料层合板分析	18
2.1 引言	18
2.2 ANSYS 层合单元介绍	18
2.3 本章小结	28
第三章 含孔复合材料层合板的力学性能分析	29
3.1 引言	29
3.2 经典层合板理论	29
3.3 三维层合板的受力特性分析	33
3.4 本章小结	37
第四章 含孔复合材料层合板逐渐损伤分析	38
4.1 引言	38
4.2 基于 ANSYS 软件的逐渐损伤分析及其步骤	38
4.3 复合材料层合板的基本参数及模型	39
4.4 失效准则	40
4.5 材料退化规律	43
4.6 总体判断准则	46
4.7 T300/976 含孔复合材料层合板的逐渐损伤分析	46
4.8 AS4/3502 含孔复合材料层合板逐渐损伤分析	56

4.9 应用 ANSYS 软件进行逐渐损伤分析存在问题的讨论	63
4.10 本章小结	64
第五章 层合板单搭胶接接头的实验研究	65
5.1 引言	65
5.2 试验件制备与实验方法	65
5.3 实验研究	67
5.4 本章小结	72
第六章 层合板单搭胶接接头的失效预报	74
6.1 引言	74
6.2 数值模型的建立	74
6.3 失效准则	77
6.4 材料性能退化模型	79
6.5 4 种接头的强度预报及逐渐失效分析	83
6.6 本章小结	91
第七章 层合板单搭胶接接头的应力分析	92
7.1 引言	92
7.2 胶层中面及界面三维应力分布	93
7.3 参数对界面应力的影响	94
7.4 接头搭接区层合板层间应力分布	102
7.5 本章小结	105
第八章 Z-pins 增强单搭接层合板接头的实验研究	107
8.1 引言	107
8.2 实验件制备	107
8.3 破坏模式及失效机制分析	108
8.4 本章小结	113
第九章 Z-pins 增强单搭接层合板接头的失效预报	114
9.1 引言	114
9.2 数值模型的建立	114
9.3 Pins 的拔出机制	116

9.4 3种接头的强度预报及渐进损伤扩展分析	116
9.5 本章小结	123
第十章 Z-pins 增强单搭接层合板接头的应力分析	124
10.1 引言	124
10.2 三排 Z-pins 增强接头的应力分布	125
10.3 二排 Z-pins 增强接头的应力分布	130
10.4 “工”字型排列 Z-pins 增强接头的应力分布	134
10.5 参数对胶层应力的影响	137
10.6 搭接区层合板层间应力分布	141
10.7 本章小结	143
第十一章 编织与层合复合材料胶接接头的实验研究	144
11.1 引言	144
11.2 试验件结构	144
11.3 破坏模式和失效强度分析	146
11.4 本章小结	151
第十二章 编织与层合复合材料胶接接头的失效预报	152
12.1 引言	152
12.2 分析模型	152
12.3 各种接头的强度预报及逐渐失效分析	155
12.4 本章小结	163
第十三章 编织与层合复合材料胶接接头的应力分析	164
13.1 引言	164
13.2 三维应力分布	164
13.3 参数对接头应力的影响分析	166
13.4 本章小结	173
第十四章 受面内拉压荷载的层合板的失效分析	174
14.1 引言	174
14.2 层合板在面内拉伸荷载下的失效分析	174
14.3 M40J/Ag80 层合板在面内压缩荷载下的失效分析	186

14.4 本章小结	193
第十五章 受面内拉压荷载的含开孔复合材料层合结构的失效分析	195
15.1 引言	195
15.2 面内拉伸荷载下含开孔复合材料层合结构失效分析	195
15.3 含开孔 M40J/Ag80 层合板拉伸失效分析	197
15.4 面内压缩荷载下含开孔复合材料层合结构失效分析	205
15.5 本章小结	211
第十六章 缺陷对单搭胶接接头胶层内应力的影响	213
16.1 引言	213
16.2 模型简介及建模过程	213
16.3 x 方向缺陷位置对单搭胶接接头胶层内应力的影响	218
16.4 y 方向缺陷位置对单搭胶接接头胶层内应力的影响	226
16.5 本章小结	235
参考文献	237
名词索引	253

第一章 绪论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料通过物理或化学方法组合而成的一种多相材料。复合材料将各组分材料性能取长补短，利用各组分材料的最好的性能。另外，复合材料具备各组分材料单独存在时所不具有的优良性能。组分材料分为基体相和增强相。基体相是一种连续相，它把增强相材料固结成一体，并起传递应力的作用；增强相主要起着承受应力和体现功能的作用。

复合材料按照增强相的几何形状及结构形式分为纤维复合材料、颗粒复合材料和层状复合材料三类。其中纤维增强复合材料尤其是先进纤维增强复合材料的比强度和比模量是传统金属材料的数倍，见表 1-1。另外，它还具有优良的化学稳定性、耐热、耐疲劳、成型工艺简单等性能。纤维增强复合材料是应用最广、用量最大的复合材料。它广泛应用于航空航天、航海、汽车工业、化纺机械、医学、体育运动器材、建筑等领域，如用于制造飞机机翼与前机身、太阳能电池翼与外壳、大型运载火箭的壳体、发动机壳体、航天飞机结构、汽车车身等。

表 1-1 常用结构材料的比强度及比模量

材料	比强度/[MPa/(g/cm ³)]	比模量/[GPa/(g/cm ³)]
铝合金	141.3	25.9
结构钢	152.6	26.3
钛合金	157.5	25.8
玻璃纤维/聚酯	623.0	24.1
有机纤维/环氧树脂	981.0	56.0
高强度碳纤维/环氧树脂	1014.0	94.7
高模量碳纤维/环氧树脂	656.0	146.9

复合材料层合结构是目前复合材料实际应用的主要结构形式。它将两层或多层单层黏合在一起形成一个整体结构。各铺层的材料可以相同,也可以不同。另外,纤维的铺设角度、叠层的顺序不同,使得设计的材料强度和刚度具有方向性,从而满足结构的荷载要求。

虽然采用复合材料结构能很大程度提高航空航天工程结构的整体性,但在多数工程应用中,不可能做到整个结构为一完整的个体,大部分结构需制造多个部件通过接头进行连接。对复合材料结构的连接方法,目前已有相当广泛的研究,胶接结构是复合材料结构中采用最广泛的一种连接形式。胶接具有应力分布均匀、抗疲劳与耐腐蚀性能好、重量轻、胶接工艺简便可缩短生产周期,以及适合不同材质、不同厚度、超薄规格和复杂构型构件的连接等特点,现已成为航天工艺中不可缺少的一种连接工艺技术。

胶接接头类型有很多种,主要有以下几种连接方式:单搭接、双搭接、阶梯形搭接、对接、管搭接和楔形搭接等。各种胶接接头的连接方式在工程实际中均有较广泛的应用,其中,单搭胶接接头由于具有结构简单的特性,是使用范围最普遍的黏接接头,在胶粘剂测试实验中也常被使用。另外,由于单搭胶接接头结构在荷载的作用下存在弯矩作用,应力状态更接近实际工况,因此单搭胶接接头的承载能力成为其在实际应用中必须要考虑的问题之一。

在过载、环境变换及疲劳等因素的作用下,复合材料胶接接头在连接处会发生灾难性破坏的隐患,特别是受到面内拉伸荷载作用时,接头连接处受到剪应力集中的影响非常严重,可导致接头产生复合材料分层损伤等破坏形式。常用的几种提高复合材料胶接接头连接强度的方法包括机械连接、缝合和 Z-pins 等增强连接。其中,机械连接应用比较普遍,但机械紧固件孔边在拉伸及剪切荷载作用下产生的应力集中可能引起周围复合材料的局部损伤。缝合是在接头搭接区域采用高强度的纤维线提高接头拉伸强度及疲劳寿命,然而缝合技术不能抑制沿着连接处的分层断裂问题。Z-pins 增强法是一种新型的连接方法,通过复合材料插入纤细的柱状钉来增强接头的承载能力,具有低成本及容易制造等优点,并且 pins 可以是金属材料或者复合材料。Z-pins 增强技术可以较大地提高单搭接头的剪切强度、T 型接头的拔出强度等。因此,Z-pins 增强复合材料胶接接头的力学性能研究现已成为国内外研究的热点问题。

近年来,复合材料接头结构在航天领域的应用逐年增加,有很多成为航空航天结构中的承力部件,并且很多部件含有孔洞。例如,航空发动机机匣由圆

柱壳或圆锥壳及安装边组成,工作环境和受载情况十分复杂,为了便于检查和修理工作叶片等,在机匣上开了观察孔;在机匣上面,还有很多的放气孔;并且为了配合发动机附件系统安装和机匣本身的安装,机匣筒体上还要开一定数量的孔及连接剖分形式机匣的接头等。机匣上的孔边和接头处存在应力集中是结构强度薄弱部位。此外,还有很多含孔的复合材料层合板结构,如复合材料螺栓接头等,在飞机的机身、机翼、起落架舱门等很多部分复合材料层合板也有大量应用。结构的连接部位往往是整体结构承载的薄弱环节,因此复合材料接头结构的力学性能研究成为能否成功应用复合材料结构技术的关键技术之一。

复合材料层合板及其接头的强度预测和失效分析是设计复合材料结构时必须解决的关键问题,是安全经济有效的应用复合材料的前提。由于影响其强度的因素很多,失效形式多样性,如纤维断裂、基体开裂、基体纤维剪切破坏、分层等,使得强度预测变得比较复杂。另外,传统的设计、试验错误、再设计的方法将耗费大量的时间和费用。因此,运用有限元软件模拟复合材料层合板及其胶接结构和 Z-pins 增强结构的失效过程并预测最终失效强度具有很大的应用价值,是当前国际上复合材料领域的研究热点。

针对上述问题,本书应用实验手段、数值模拟和理论分析等方法,对工程中常用到的复合材料层合板及其胶接接头和 Z-pins 增强接头的强度、失效及其规律进行研究,本课题的研究可以为复合材料结构设计提供一定的依据,为复合材料的应用提供技术支持,具有重要的工程实际应用意义。

1.2 复合材料及其接头结构的研究现状

1.2.1 复合材料层合板的逐渐损伤研究现状分析

复合材料层合板是由多层单层板黏接而成。最初预测层合板强度的方法是通过计算各铺层的即时应力场,根据单层板的荷载响应来预测整个层合板的强度。一种方法认为,复合材料层合板的任何一个单层发生失效,则整个层合板发生失效,被称为首层失效方法(First ply failure);另一种方法认为,复合材料层合板某一层失效并不代表整个层板失效,部分层发生失效后,层合板仍能继续承受荷载,直到各个铺层全部失效,才认为整个层合板失效,这个方法被称

为最终失效方法(Last ply failure),对应的荷载称为极限荷载。最终失效方法虽然比较简单,但是没有考虑局部材料的响应,往往低估了层合板的强度。因为局部发生失效后,该区域的应力降低,层合板中的应力会重新分布。

纤维增强复合材料层合板的失效过程是复杂的逐渐失效的过程。在加载的初期,甚至制造过程中就存在某种形式的损伤,随着荷载的增加,损伤不断积累,直至整个层板失效。纤维增强复合材料层合板主要破坏形式有基体开裂、基纤剪切、分层破坏和纤维断裂等形式。对于含孔复合材料层合板,由于孔边存在应力集中,在较小荷载时就开始有破坏发生,随着加载损伤逐渐积累,最终导致整体失效。逐渐失效分析的方法通过材料性能退化模型考虑了局部损伤,是目前模拟复合材料失效过程及极限强度预测最常用的方法。该方法能更好地模拟复合材料层合板的破坏机制、损伤的相互作用及扩展过程和最终失效荷载。

“复合材料结构损伤”的概念最先是由美国 Reisfnider 教授于 1977 年在研究复合材料结构疲劳时提出的。尽管复合材料层合板出现损伤后能够继续承载,但绝大多数复合材料层合板还是表现出脆性失效,没有或只有很小的安全容限,所以了解复合材料层合板的逐渐损伤过程和准确预测失效荷载具有重要价值。而这种能力只有逐渐损伤方法具有,本书也采用该方法。通过逐渐损伤分析可以清楚地了解复合材料层合板内部产生损伤之后荷载的重新分布及损伤的相互作用和扩展过程,并可准确预报复合材料层合板的最终失效荷载。

对于复合材料损伤演化分析,更加复杂的情况是对于开孔复合材料的分析。为了满足布局和装配等方面的特殊要求,实际工程结构中需要在复合材料层合板上钻孔,必将造成开孔复合材料结构在承载过程中孔周形成应力集中,应力集中在某种程度上将影响复合材料结构在使用中的承载能力及服役寿命等。因此,对开孔复合材料层合板的损伤破坏机制进行分析,并对其强度进行预报具有十分重要的工程意义。

关于有损伤复合材料层合板的损伤扩展问题,国内外学者也做了大量研究, Lee 是较早用有限元来分析复合材料失效过程的学者。他通过自己的直接模型(Direct mode)失效准则来判断失效,通过单元中心的应力及单元界面中心的应力来进行失效判断,根据失效模式对失效单元的刚度矩阵进行修改。他开发的这套方法被用来分析含孔板在单轴和双轴荷载下的失效过程。

Reddy 和 Pandey 采用基于一阶剪切变形理论的有限元方法对受面内、横向荷载的复合材料层合板进行了首层失效分析。他们在单元积分点上分别采用最

大应力, 最大应变, Tsai-Hill、Tsai-Wu、Hoffman 失效准则来进行失效判断。分析表明层合板受面内荷载作用时, 所有的失效准则都能很好地预测首层失效; 当受横向荷载时, 采用 Tsai-Hill、最大应变准则所得出的失效位置和失效荷载的结果与采用其他失效准则的结果不同。

Reddy 开发了三维逐渐失效算法对层合板受单轴拉伸荷载进行了分析。该分析采用了最大应力, 最大应变, Tsai-Hill、Tsai-Wu、Hoffman 失效准则。材料属性的退化采用了两种方法, 一种方法认为每个应力分量引起的失效只影响对应的刚性性能; 另一种方法考虑单向拉压和剪切性能的相互作用。进行了参数化研究, 来分析面外材料性能、三维刚度退化模式、边界条件对单轴拉伸荷载下失效荷载及应变的影响。通过与实验结果比较, 说明逐渐失效分析方法能够精确地模拟失效荷载和应变。另外, 结果表明采用最大应力和最大应变失效准则会高估失效荷载, 而 Hoffman 和 Tsai-Wu 失效准则会低估失效荷载, Tsai-Hill 失效准则与实验结果不太一致。

Ochoa 和 Engblom 建立了基于高阶板理论的有限元模型, 对层合板在单轴拉伸荷载下进行了逐渐失效分析。采用 Hashin 失效准则来判别纤维和基体的失效, 用 Lee 的准则来判断分层破坏。

Hwang 和 Sun 通过迭代三维有限单元的方法进行了层合板的失效分析。他们考虑了纤维断裂、基体开裂、分层 3 种失效模式, 采用改进的 Tsai-Wu 失效准则来进行判断。失效后根据失效模式将失效单层的刚度进行退化。对于纤维破坏, 只将刚度矩阵中对应的项设置为零; 对于基体失效, 只将相应的刚度矩阵中横向及剪切项设置为零; 当纤维、基体都失效, 将刚度矩阵中的所用项设置为零; 当发生分层破坏时, 将分层区域生成新的自由面, 将该区域的单元重新建模。他们根据上述的方法对受拉伸荷载的含开孔及不含孔的层合板进行了分析, 然而对于含开孔的角铺设层合板, 预测的结果比实验结果低。

Tolson 和 Zabaras 根据高阶剪切变形理论开发了 7 个自由度的二维板单元来预测层合板的失效。在该模型中采用了最大应力, Lee、Hashin、Hoffman 和 Tsai-Wu 失效准则。

Sleight 提出了基于二阶壳单元的逐渐失效分析模型。该模型考虑了几何非线性, 采用修正的 Newton-Raphson 算法进行应力分析。他比较了最大应变准则、Hashin 和 Christensen 失效准则及不同的材料性能退化模型对计算结果的影响。该模型中没有考虑分层失效模式。结果中部分试样预测的最终失效强度与实验

结果相差较大。

Padhi、Shenoi 等研究了四边固支的矩形板在横向荷载下的非线性行为,预测了首层失效及最终失效强度。该模型分别采用了最大应力, Tsai-Hill、Hoffman、Azzi-Tsai-Hill、Hashin 和 Tsai-Wu 失效准则来预测失效。他们还分析了层合板的长宽比对强度和刚度的影响。

Pal 和 Ray 采用八节点等参单元对层合板进行了逐渐失效分析,采用了考虑了剪切修正因子的一阶剪应变理论的单元,分别采用最大应力、最大应变、Hoffman 及 Tsai-Wu 失效准则。在此基础上,他们研究了板的层数、长宽比、纤维角度对最终失效强度的影响。

大量的研究工作表明,利用有限元模拟复合材料的渐进损伤过程是可行的, Mishnaevsky 利用有限元分析方法完成了有关复合材料损伤方面的一系列研究工作,包括存在微裂纹情况、损伤起始与演化过程、复合材料整体的优化分析等。

Chang 等最早应用渐进损伤分析方法研究了开孔复合材料层合板的拉伸强度,分析了各个铺层内的损伤形式。随后, Chang 和 Lessard 等改进了这种方法,对于纤维剪切失效时的材料刚度退化考虑纵向模量不被影响,并将这种改进的损伤分析方法用于开孔复合材料层合板的拉伸和压缩强度预报。之后, Tan 将该方法进行发展,对损伤的复合材料刚度衰减参数进行了研究。Tan 提出用于分析含开孔层合板受拉伸荷载的二维的逐渐失效模型。该模型考虑了纤维破坏和基体破坏两种破坏模式。他用自己提出的由铺层的纵向拉伸及压缩强度和纤维方向的应力构成的二次准则来预测纤维失效,用 Tsai-Wu 准则来判断裂纹开裂。材料性能退化是将材料性能乘以一个因子。但分析结果对因子的取值比较敏感。他们将大量基体失效作为最终失效准则是不合理的。

Gamble 等建立了开孔复合材料层合板的三维数值模型,并应用改进的 Hill 准则,分析了单层内的纤维断裂、基体开裂和分层等损伤模式。

王丹勇针对受面内静拉荷载的含中央开孔的纤维增强复合材料层合板,发展了三维逐渐损伤模型。该模型采用了三维 Hashin 失效准则考虑了基体拉伸(或压缩破坏)、纤维拉伸(或压缩破坏)、纤维基体剪切破坏、法向拉伸(或压缩破坏)。

Camanho 等和 Tserpes KI 等采用三维有限元模型对含孔复合材料层合板的逐渐损伤过程进行了分析研究。

可以看出,逐渐失效分析方法的发展是从二维到三维,简单到复杂的过程。