

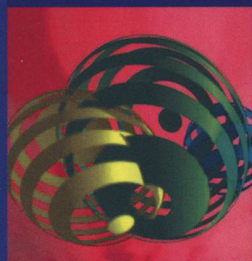


国际机械工程先进技术译丛

复合材料层合板 失效分析

Analysis of Failure in
Fiber Polymer Laminates
The Theory of Alfred Puck

(德) Martin Knops 著
李军向 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

关于本书

本书首先简要介绍了层合板失效分析及其发展历史，然后重点描述了Puck准则、其物理背景、数学推导及应用。Puck理论的另外一个核心部分是关于后失效分析的概念。同时，本书还描述了其物理背景和分析过程。

本书第二大部分则放在了实验验证方面，这部分工作在1990中期就已经成功完成了。结果证明Puck理论优于任何其他理论。

国际机械工程先进技术译丛

复合材料层合板失效分析

(德) Martin Knops 著
李军向 等译



机械工业出版社

本书从最基本的破坏原理出发,详细阐述了 Puck 准则的理论模型和复合材料失效过程及相关实验工作,书中内容详尽,分析透彻。

本书适合科研院所、高校、企业从事复合材料破坏机理研究,复合材料结构件及产品设计的研究人员、研究生、工程师学习及参考。

Translation from the English language edition;

Analysis of Failure in Fiber Polymer Laminates; The Theory of Alfred Puck.

By Martin Knops. ISBN: 978-3-540-75764-1.

© Springer New York 2008.

Springer New York is part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

图字 01-2011-6020

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料层合板失效分析/(德)科诺普斯(Knops, M.)著;李军向等译. —北京:机械工业出版社,2013.10

(国际机械工程先进技术译丛)

书名原文: Analysis of Failure in Fiber Polymer Laminates; The Theory of Alfred Puck

ISBN 978-7-111-44215-8

I. ①复… II. ①科…②李… III. ①复合材料层板-失效分析
IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 231536 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:牛新国 版式设计:常天培

责任校对:刘怡丹 封面设计:鞠 杨 责任印制:李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 9.75 印张 · 189 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-44215-8

定价:48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

在复合材料领域，失效分析方法一直是行业研究的热点课题，但从始至终没有一种可靠的分析方法和模型能和实际符合得较好。直到一个叫 Puck 的材料科学家建立了一种全新的模型，并迅速得到行业的认可，最终被全球权威的认证机构——德国 GL 选择作为复合材料失效分析方法，并称之为 Puck 准则。本书从最基本的破坏原理出发，详细阐述了 Puck 准则的理论模型、复合材料失效过程及相关实验工作，书中内容详尽，分析透彻，是一本极具参考价值的书籍。

本书的价值在于首次以英文版的形式详细阐述了 Puck 准则，是到目前为止在阐述复合材料层间、纤维间破坏原理最为详尽的书籍，且该理论模型被评为世界上非常可靠的理论模型，其模型与真实破坏形式最为接近，利用该理论对失效分析的模拟最为真实，同时为复合材料产品的优化设计提供了最为可靠的数据支持，而这些是在任何其他类似的书籍上看不到的，所以本书是一本非常有价值的科技书籍，非常适合科研院所、高校、企业从事复合材料破坏机理研究、复合材料结构件及产品设计的科研人员、研究生、工程师学习及参考。

本书翻译工作分为了两个阶段：

第一阶段翻译人员为李军向、薛亚鹏、李成良、张石强、朱小芹、王超、赵娜和王兴波。其中，李军向翻译了第 1、2 章；薛亚鹏翻译了第 3、5、7、8、9 章和附录；李成良、朱小芹、王超、赵娜联合翻译了第 4 章；张石强、王兴波联合翻译了第 6 章；美籍华人陈宇奇先生对全书进行了校对。

第二阶段，在第一阶段基础上，由陈文光、丁蕊对全书重新进行了翻译。其中，丁蕊翻译了第 1~3 章；陈文光翻译了第 4~9 章；丁蕊校对了陈文光翻译的第 4~9 章，陈文光校对了丁蕊翻译的第 1~3 章；李军向对全书进行了校对整理；薛忠民先生最后审阅定稿。

序 言

1948 年我在汉堡工程学院学习机械工程时，对于复合材料部件设计普遍的观点是，那是一门艺术而非科学。但此后，这种看法发生了很大的变化，人们相信复合材料部件设计不仅需要大量实验和一定的艺术，同时需要对基本原理有着很好的理解。不幸的是，仍然有一些人认为理论离实践过于遥远。就我个人而言，我认同一些伟大科学家的观点，比如著名化学家 A. L. Lavoisier (1743—1794) 和德国空气动力学家，教师 L. Prandtl (1875—1953)。L. Prandtl 认为“除了好的理论，没有什么比实践更重要的了”。这被认为是更早的 Lavoisier 论述的修正：“除了好的假设，没有什么比实践更重要的了！”

FRP 层合板是一种复杂的，经过巧妙设计的多铺层各向异性结构。而这种结构的失效过程分析，需要理论来基本正确描述不同的失效机理。我使用由 Otto Mohr (1835—1918) 创建的“假设”：“材料的失效极限由发生在断裂面上的应力水平决定”。经常会有人建议将这种假设应用到脆性复合材料中。其中最强有力的支持者是 Hashin [Hashin 1980]，但时机还未成熟，即计算能力不足以验证断裂面方向的正确性。

首先需通过实验来研究修正后的 Mohr 假设能否用于单向铺层复合材料结构。我在创建理论方法的同时，从亚琛理工大学的博士那里得到其对测试工作的重要帮助。我经常和这些年轻的大学生讲述我的观点，现在有过多的理论，但却缺乏足够可靠的实验结果。不幸的是，到如今实验工作仍然没有获得其应有的地位。不过，在我的建议下，亚琛理工大学年轻的大学生选择了实验项目作为他们的博士论文课题，通过实验对我的理论进行验证。我很感谢他们，在此列出他们的名字：Dirk Huybrechts (1996)、Jochen Kopp (2000)、Martin Knops (2003) (即本书作者)、Oliver Fischer (2003)、Martin Mannigel (2007) 和 Erik Kuhnel (2008)[⊖]。

我的理论已经运用到实际中。规范 VDI (Verein Deutscher Ingenieure, 德国工程师协会) 2014 和 GL 标准，以及 Det Norske Veritas 都采用了我的理论。对于 VDI 2014 的读者而言，规范第三部分“纤维增强塑料部件的开发，分析”是非常有帮助的补充，由英文和德文两种语言书写。VDI 2014 之所以采用我的理论，并用于指导实践，主要原因在于我和 Günther Lutz 先生富有成效的合作，而

⊖ 括号中的年份是指论文发表的年份 (本书中参考文献均如此)。

Günther Lutz 先生在复合材料连接和大型快艇中的复合材料传动轴设计与开发方面具有丰富的实际经验。

在未来，复合材料技术将在节能型汽车开发以及环保、气候方面发挥重要作用。本书作者目前就在该领域工作，致力于大型风机叶片开发。如今，设计工程师在使用复合材料进行设计时，尤其是客户为满足某特定需求而指定材料体系时已有很大的自由度，这是一件很有意思的事。但这种自由度不能阻止我们继续研究产品使用的极限。我们可以发现很多现代武器系统用到了复合材料，比如洲际弹道导弹。但我们的目标不是开发更多的武器并使这些武器效率更高。我们面临的问题是：“在人人拥有这些武器之前如何消除它们”。

希望 Martin Knops 的这本书能满足很多感兴趣和专业的读者的需求。我很有信心读者读了这本书会有如此的心情：“啊哈哈……实验”。对我而言希望能有那么一些时间依然能很荣幸地和年轻的复合材料工程师们保持联系，和它们一起研讨学习。很久以前我就知道：现代复合材料犹如一个黑箱，不容易看透，但它们不是“巫术”！如果我们思考其内部结构的话，是可以理解它们的。然而只有思考还不够，实验同样重要。

Alfred Puck

2008 年 1 月于 Immenhausen

前 言

2003 年 Alfred Puck 鼓励我编写这本书，主要内容是他的失效模型和 Puck 失效准则。编写本书的动机是 Puck 在 1996 年用德文写他自己的书时没有包含其理论 1996 年后在有效性领域所取得的重大进步；同时，关于 Puck 的工作没有完整的英文介绍，一些人要求我将这些内容用英语写成书籍。

那时，我的博士论文已经定稿，论文主题是逐层失效过程研究，而 Alfred Puck 是我的导师。他认为我是最好的专家之一，也是写这本书的合适人选。这对我来说是很高的荣誉了，随后在 IKV (Institute for Plastic Processing, 塑料加工研究所) 的资助下我开始了本书的编写。

本书最初计划是在 2004 年出版，但通常这样的项目，按如此计划是过于乐观。2005 年年初，我从高校来到企业，同时组建了家庭，用于项目的时间变得有限。非常感谢 Springer 出版社的 Petra Jantzen，总是那么礼貌，同时又给我适当的压力，他给我确定了最后期限，并推动我工作。最后终于在最后期限前，将近年来的最新成果写进了本书，因此提升了整个项目的价值。遗憾的是，仍然有一些愿望没有实现。当然，应该进一步阐述 Puck 失效模型的应用，但现在是出版的时候了，就不再做介绍了。

这里要感谢一些人，他们为这本书的完成做出了贡献。首先是 Alfred Puck，他指导我多年，并校对了本书。Günther Lutz——VDI2014 中 FRP 部件开发作者之一——是文字主要修订者。除了这些，我还要感谢为 VDI2014 工作所获得的巨大收获。

额外的感谢要送给 Walter Michaeli 和 Ernst Schmachtenberg，我在 IKV 期间，他们鼓励我编写这本书。另外，非常感谢 Springer 出版社的 Dieter Merkle 和 Petra Jantzen。最后感谢我的妻子 Claudia，感谢她对我的理解和耐心。

同时将这本书送给我的孩子 Paula Liane 和 Peter Elias。

Martin Knops

2008 年 1 月于 Rendsburg

目 录

译者序

序言

前言

第 1 章 引言	1
第 2 章 层合板失效	5
2.1 层合板结构	5
2.2 微裂纹	6
2.3 纤维间失效	7
2.3.1 纤维间失效的不同形式	8
2.3.2 IFF 适用性	11
2.4 分层	12
2.5 纤维失效	13
2.6 层合板失效	15
2.7 本章小结	16
第 3 章 应力和强度分析：基础和定义	17
3.1 坐标系、应力和受力	17
3.1.1 单向纤维层合板的固有坐标系	17
3.1.2 层合板的坐标系	17
3.1.3 单向层的应力	18
3.1.4 单向纤维层合板的受力	19
3.1.5 破坏平面上的应力，适用坐标系	19
3.1.6 断裂主体可视化的坐标系	20
3.2 应力分析	22
3.3 强度分析	22
3.3.1 导言	22
3.3.2 断裂条件、断裂准则和术语“应力危险系数”	22
3.3.3 区分剩余和载荷确定的应力	25
3.3.4 复合材料结构的安全系数和保留系数	26
3.4 本章小结	27
第 4 章 Puck 作用面失效准则	28
4.1 纤维失效准则	28
4.2 纤维间失效准则	30

4.2.1 动机	30
4.2.2 不同的 IFF 断裂模式	32
4.2.3 失效假设	33
4.2.4 作用面的抗断裂性	34
4.2.5 应力/强度的可视化问题	38
4.2.6 作用面相关的 IFF 准则的通用 3D 计算式	48
4.2.7 二维平面应力状态分析	59
4.3 IFF 准则延伸	61
4.3.1 在作用面相关的纤维间断裂准则中包含非断裂面上的应力	61
4.3.2 计算当残余应力存在时由载荷决定的应力的伸展因子 f_s^t	72
4.4 断裂体可视化	80
4.5 本章小结	85
第 5 章 渐进破坏过程的分析	86
5.1 模拟渐进失效过程的方法	87
5.2 分析渐进失效过程的 Puck 方法	89
5.2.1 由于 IFF^{ModeA} 产生的裂纹的退化过程	90
5.2.2 由于 IFF^{ModeB} 和 IFF^{ModeC} 产生的裂纹的退化过程	90
5.2.3 开始于 1969 年的 Puck 方法	91
5.2.4 “世界范围失效研究竞赛”中使用的退化方法	94
5.2.5 新的退化方法 (2007)	94
5.2.6 不健全的加载条件下的层合板	94
5.3 在软件中运用 Puck 理论进行渐进失效过程分析	96
5.4 本章小结	100
第 6 章 实验工作	101
6.1 断裂假定的验证和断裂体的标定	101
6.1.1 三维应力状态下的实验	101
6.1.2 面内应力 (σ_2, τ_{21}) 组合的实验	106
6.2 退化曲线的实验测定	111
6.2.1 断裂模式 A 下的 $E_{\perp}^t$ 和 $G_{\perp\parallel}$	112
6.2.2 断裂模式 B 的弹性模量和剪切模量的退化	116
6.2.3 泊松比 $\nu_{\perp\parallel}$ 和 $\nu_{\parallel\perp}$ 的折减	117
6.2.4 退化曲线的有效性	118
6.3 本章小结	124
第 7 章 在软件中的应用	126
第 8 章 Puck 的成果在工业中的应用	128
第 9 章 结论	129
附录	130
参考文献	142

第1章 引言

半个世纪前，第一批由玻璃纤维增强塑料（Glas Fiber Reinforced Plastic, GFRP）制成的滑翔机问世——50年后其中的一些仍在使用。问世之初，它们展现了纤维增强塑料（Fiber Reinforced Plastic, FRP）的巨大潜能（强度与尺寸的稳定性）；如今，它们还证明了这种材料的持久性。

20世纪50年代，设计人员与生产人员涉足这片未知领域，探索这种高承载的复杂结构。面对这种新材料，生产技术与人员的素质急需提高，设计过程也有待改进。20世纪中叶，FRP的断裂行为还是未知，也没有合适的失效分析方法存在。

如今，并不是著名的航空公司而是一群充满热情的工科学生设计并制造了第一架FRP飞机，这听上去真不可思议。Alfred Puck是这群先驱者中的一员，那时他在德国达姆施塔特科技大学工程力学专业学习，他成功地开发出设计流程、加入了当地滑翔研究小组并迷上了纤维增强塑料设计。于是，他将自己的学术生涯致力于FRP结构的材料行为发展的研究。在Bölkow公司从事商用飞行器工作后，Puck在接下来的10年中都在达姆施塔特的德国塑料研究院（German Plastic Institut, DKI）致力于高强GRP的强度和变形研究。在那里，他完成了博士论文，研究方向为高强玻纤/聚合物层合板的应力和强度分析。

接下来，Puck的事业在汽巴嘉基（诺华）公司（瑞士和美国）和卡塞尔大学展开。在汽巴嘉基的10年内，他实现了一系列复合材料的应用，特别是在高压设备方面；在卡塞尔大学，他是复合材料技术教授，专业方向是汽车工业高承载GRP部件研究。显而易见，Puck的职业经历让他在工业应用和学术研究上都累积了大量经验，这在如今几乎是独一无二的。

1989年退休后，领着退休金的Puck利用空闲时间从事更深入的研究工作。基于他的博士论文（对比[Puck 1969, Puck 和 Schneider 1969]）和Hashin的观点（[Hashin 1980]），Puck提出了一套革命性的断裂准则和准确的失效模式，与已有的准则和模式相比，Puck的这套模型有很多优越之处——Puck模型让设计工程师不仅能明确FRP中不同的断裂模式，还能将检测到的单层破坏对层合板的影响量化。另外，它现实地模拟了FRP的渐进失效过程。

在最近的“世界范围失效研究竞赛”中，Puck模型的优异性获得肯定。这次研究是由QinetiQ公司的Mike Hinton（在Sam Kaddour的协助下）和曼彻斯特理工大学的Peter Soden发起的。发起原因是现如今复合材料工程师有无数的失

效准则可以选择,但缺少这些准则的优劣信息,其实就是严重缺乏实验证明。

Hinton 和 Soden 组织失效分析领域的顶尖专家用自己的模型计算大量测试试样的应力/应变曲线和破坏极限,计算结果于 1998 年发表在一本合集“Composites Science and Technology (Soden 等人 1998)”上。之后组织者展示了所有测试的实验结果并组织参与者对计算和实验结果间的偏差进行评估。同时,组织者自行分析了结果并和参与者的评估与解释一同发表在另一本合集(Hinton 等人 2002)上。Puck 成为了此次研究竞赛的获胜者。

研究组织者在他们的总结评估中强调 Puck 模型不仅预测破坏极限最准确,更为重要的是对破坏现象的描述最切合实际。复合材料工程师使用 Puck 模型可以了解层合板的逐渐破坏过程并基于分析结果推算怎样提高层合板的设计性能。这一特性将 Puck 模型与其他现象或全局类模型,例如著名的 Tsai/Wu 模型(Tsai 和 Wu 1971; Liu 和 Tsai 1998)区别开来。

“世界范围失效研究竞赛”的另一结果是使用断裂力学的模型当今仅能解决很少的问题。在这次研究中,使用断裂力学的模型仅在有限的测试结果中适用且无法在当下作为设计者的有效工具(Hinton 等人 2002)。然而,这一领域正在经历重要的进步,情况可能在接下来的几十年发生改变。

当然,这次失效研究集中关注单调加载——加载一次后载荷大小以等速增至最大值。然而实际结构大多承受交变载荷,且破坏通常是由于振荡载荷下逐渐增加的损伤引起。

至今仍没有真正可信的寿命预测方法,所以费时且昂贵的部件测试不可避免,设计过程中的反复迭代循环,都是共同面对的问题。使用 Puck 模型进行足够的失效分析,可以将迭代次数降至最低,因为 Puck 模型可以区分不同的断裂模式并正确计算层合板首次承载后发生的逐渐破坏过程。

以此为基础,只要交变载荷下失效机理相同,就可以优化层合板在交变载荷下的响应。因此,通过首次加载分析可以大体上定量评估逐渐损坏的过程。当然,这一方法并不能准确预测破坏时的载荷循环次数。Puck 和 Garbe 在这一方面做了一些实验和理论的开拓性工作(Puck 和 Garbe 1993)。

在航空和汽车工业中,越来越多地将复合材料用于缓冲结构。著名的例子有一级方程式汽车赛中的单壳体赛车和现代直升机的底板。甚至一些商用汽车如宝马 M3 也已经使用复合材料制的碰撞盒(见图 1)。纤维增强塑料结构在缓冲应用中的最大优势是可以通过材料破坏吸收能量,然而最大的缺点是这一过程至今无法真实模拟,尤其是在汽车工业中无法模拟常常是作为一票否决的因素。这一点上,计算机硬件和冲击模拟软件的发展大大缩短了新汽车研发的时间周期。比起 10 年前,用于测试的原型机数量大大减少了。这种情况下,新材料的冲击行为可以有效模拟,就能用于汽车工业。事实就是,只要不能模拟,复合材料优越

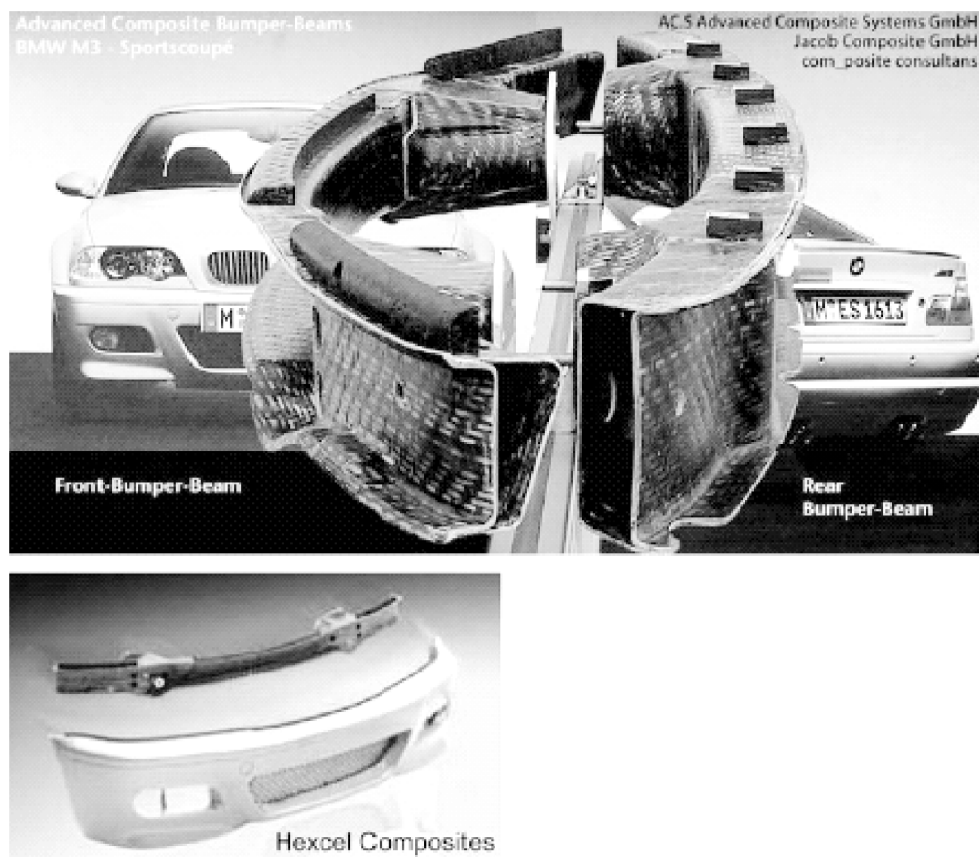


图1 宝马 M3 复合材料保险杠

的冲击性能就得不到证实。

目前造成这一缺点的原因，一是冲击条件下复杂的破坏过程是三维的，无法用二维壳单元计算，而二维壳单元是至今唯一在冲击模拟中使用的单元；然而更严重的是到目前为止并没有用于全面描述冲击状态下材料破坏的模型。这样 Puck 模型作为能模拟所有相关破坏模式的模型，是逐渐解决这一问题的有利基础。

以上的开场白主要是为了说明一种区分相关断裂机制失效模型的意义和必要性，从另一方面说这样的模型对设计师也很实用，因为当前的微观力学与断裂力学都无法做到这一点。

本书的前几章涵盖了基础知识，用于深入讨论失效模型。首先介绍了复合材料层合板中发生的断裂现象，之后是一些关于应力分析的评述，最后介绍了失效分析。简短地说，评估了失效准则的发展历程并展示了不同的失效准则。这些说

明为全面讨论复合材料的失效与 Puck 模型做了准备，包含力学背景、断裂准则的数学公式与后断裂模型，是本书重要的部分。此外，还详述了在德国亚琛塑料加工研究所（IKV）所做的实验验证与校核。这样系统性的论证在纤维增强塑料失效准则发展史上是独一无二的，也更证明了这一模型的成熟性。在后续的章节中描述了这一理论在软件中的应用。

第 2 章 层合板失效

2.1 层合板结构

轻质结构只承受单一方向载荷是很罕见的，通常载荷方向在使用过程中会发生变化，应力状态是二维或三维的。因此，设计中要考虑各种载荷情况，为了得到稳定的纤维结构，复合材料部件中的纤维通常设计为放置在至少 3 个方向。

在层合板中如果没有波纹式起伏，纤维的高强度可以得到最佳利用。因此，在航空或其他高端产品的应用中，最常使用单轴预浸料^㉑，这是一种由预先浸渍的平直纤维沿单一方向组成的半成品薄层板，纤维含量大于 60%，每层片厚度约 0.1 ~ 0.2mm^㉒。纤维方向一致的多层片组成一层^㉓。层合板通常由纤维方向不同的多层组成。

各层的纤维方向可以分别选择合并，层合板的固化通常在高压器皿中完成，例如在 180℃、6bar (1bar = 10⁵ Pa) 压强下。这一工艺保证了最优的产品质量和最高的力学性能，但是半成品预浸料和工艺本身都相当昂贵。

另一种选择，多层单向纤维层组成的无纺布可以通过模具成型工艺用基体浸润^㉔（见图 2）。无纺布可以用低很多的成本达到预浸工艺产品的约 90% 的刚度和强度。无纺布的最大缺陷是垂性差，无法成型复杂的几何形状，这也是为什么尽管纺织纤维由于纤维弯折强度低也仍有广泛的工业应用，主要以预浸形式。特殊的织造工艺提高了半成品的力学性能，高经纬比纤维纬纱弯折比较轻微。这样的纤维可以用于滑翔机机翼（见图 2），机翼外蒙皮需要保证足够的抗扭刚度，需用与展向成 ±45° 的纤维，即两层主要含纬纱的纤维交叉而不是单层普通经纬比一定的纤维。

对旋转对称的产品如压力瓶、管道和扭力弹簧的生产，使用的则是一种完全不同的工艺——纤维缠绕工艺。

㉑ 预先浸渍的纤维。

㉒ 厚的预浸料也有厚度达到 1mm 的。

㉓ 在数值模型（应力-、应变-和失效分析）中这样的一层被认为是均匀各向异性连续体，称为“薄层”。

㉔ 根据产品尺寸不同，这一工艺可以使用压强高达 6bar 的封闭模型（树脂传递模塑，RTM）或者真空辅助的开放模具（树脂灌注，RI）。

以上简介大体上说明了承载大的层合板几乎都是由单向纤维薄层组成,层与层间纤维方向不同,但纤维方向相同的层在其中均匀分布[⊖]。因此,将高强层合板模拟成一系列单向纤维层是合理的。

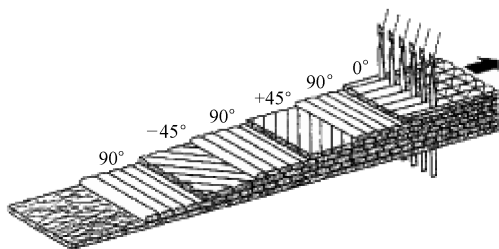


图2 无纺布

2.2 微裂纹

由于纤维与树脂热膨胀系数不同(且聚合过程中基体收缩),固化后在基体中存在较大的残余拉伸应力,可以造成基体的初始小裂纹及局部的纤维与基体开裂,当部件承载首次超过某一极限值就会进一步发展成微小的裂纹。纤维/基体尺寸级别的不可见裂纹,都称为微裂纹,如图3所示。

如果基体应力水平增加,裂纹的长度和数量都会增加,最终形成贯穿全层的宏观裂纹,这一宏观裂纹损伤称为纤维间失效(Inter Fiber Fracture, IFF),将在下一节讨论。

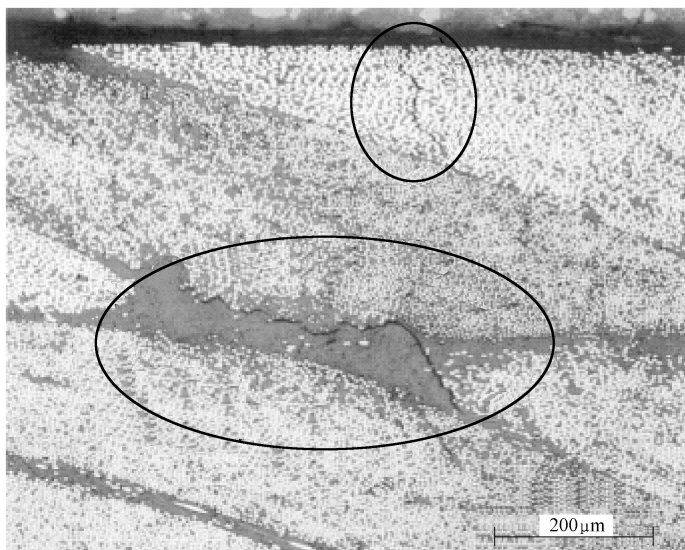


图3 微裂纹

⊖ 对主要承弯的层合板,承弯方向的纤维会在层合板外层(例如顶层和底层),对承扭的也是如此(承扭是考虑 $\pm 45^\circ$ 纤维)。

2.3 纤维间失效

图4展现了层合板中一单向纤维层的宏观裂纹，这样平行纤维方向贯穿整个单层厚度的裂纹被称为纤维间失效（IFF）。IFF这一失效包括基体裂纹和纤维/基体界面裂纹。

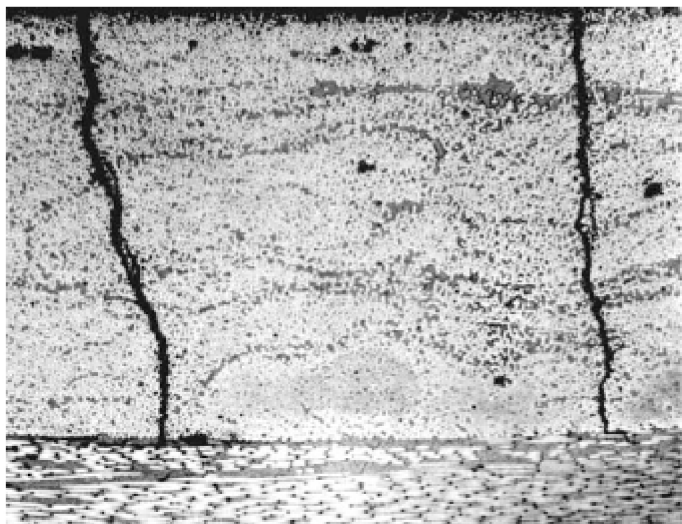


图4 纤维间失效

裂纹自身不会缓慢增长，但被动产生后会扩展至邻近纤维方向不同的层才停止。IFF裂纹端部可以观察到典型的小区域分层，破损处与相邻层间的连接局部受到影响，但层合板的整体性还是得以保证，不会像只含一个方向纤维的层合板似的分裂开来。

事实上，IFF导致了层合板中的受力重新分布，但不能错误地认为受损层（含IFF层）总体上就无法再承受垂直纤维方向的载荷。事实上，与裂纹相距一定距离处载荷仍能通过层间剪切应力传递至受损层（见图5）。因此，宏观上可以认为受损层是刚度有所下降〔垂直纤维方向的弹性模量（又称杨氏模量）和剪切模量〕的连续体。

如果在首次出现IFF后载荷继续增加，其他层会迅速出现进一步的IFF裂纹。理论上已有的裂纹间会形成一条新裂纹。事实上，不一定非要在最大应力处，哪怕由空隙或固化裂纹缺陷引起的IFF，都会发展成相当规律的裂纹分布。

最终，达到裂纹密度最高的特征损坏状态。图6展示了测试试样的几种CDS（Characteristic Damage State，特征损坏状态）图片。裂纹的平均间距基本与单层