

先进复合材料手册

赵渠森 主编
郭恩明 主审

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



先进复合材料手册

主编 赵渠森

主审 郭恩明



机械工业出版社

本手册是由百余名在研究单位、院校、工厂从事复合材料研制的专家、教授以及第一线的工程技术人员精心编纂而成的。它有以下五个特点：

(1) 实用性强 内容面向工程实际，重点介绍结构用先进复合材料，内容丰富、查阅方便。

(2) 先进性强 介绍国内先进复合材料研究、开发、生产已取得的丰硕成果，同时又突出了新技术的发展，不少数据是首次公开，反映了最新复合材料的进展。

(3) 系统全面 从材料基础到结构应用，介绍先进复合材料全过程；涉及到操作规程、检验标准、连接规范、修理指南。

(4) 突出了制造技术 制造是复合材料推广应用的关键，本手册在制造技术，特别是低成本制造技术方面占有一定篇幅。

(5) 军民结合 先进复合材料的增长点为民用工业，建筑、汽车将成为应用先进复合材料的主导产业，介绍民品开发是本手册的重点之一。

主要内容包括：树脂基体、增强体及辅助材料、添加剂；结构复合材料；新型复合材料；复合材料结构设计及性能；通用制造技术；各种制造技术；质量控制；复合材料在军品和民品中的应用。

本手册是从事复合材料研究、设计、制造、使用、修补、管理人员的必备工具书，也可供有关工程技术人员、大专院校师生查阅、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

先进复合材料手册 / 赵渠森主编. —北京: 机械工业出版社, 2003.5
ISBN 7-111-12085-X

I. 先... II. 赵... III. 复合材料-手册
IV. TB33-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 033602 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 张秀恩 王兴垣
封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳
北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行
2003 年 5 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm 1/16 · 119 印张·3 插页·3931 千字
0001—4000 册
定价: 198.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本书购书热线电话 (010) 68993821、88379646
[Http://www.machineinfo.gov.cn/book/](http://www.machineinfo.gov.cn/book/)

封面无防伪标均为盗版



赵渠森，1936年12月生于浙江湖州，1950年11月从湖州东吴附中参加军事干校入伍，1959年毕业于浙江化工学院，分配至北京航空工艺研究所(现称中航一集团北京航空制造工程研究所)，现任所科技委副主任。1969年组建碳纤维及其树脂基复合材料小组，从事纤维、树脂及航空结构研究至今。1988年被任命为自然科学研究员。出版过《高模量高强度碳纤维》(1973年)，《复合材料》(1979年)，《复合材料进展》(1984年)，《飞机结构件制造技术》(1989年)等专著；在国内外共发表论文48篇。由他负责的项目获国家科技进步二、三等奖各一项，获全国科学大会奖两项，航空部科技进步奖六项，立功两次，获专利两次。被授予航空复合材料专家称号，为我国复合材料技术的发展做出了突出贡献。



郭恩明，1956年10月生于辽宁鞍山，1978年毕业于华中工学院无线电技术专业，分配至北京航空制造工程研究所。现任所长兼党委书记、自然科学研究员。2001年毕业于北京航空航天大学管理工程专业，硕士。在所期间曾获国家科学技术进步三等奖一项；获部级科学技术进步二等奖五项、三等奖一项、荣立个人一等功一次、二等功一次、三等功两次；获光华科技基金三等奖。1997年1月被授予我国航空工业突出贡献专家称号。出版过《航空制造技术的发展及对策》、《我国航空制造技术的现状及发展趋势》、《航空制造技术的发展趋势及建议》、《复合材料无损检测技术现状与展望》等专著。

编 审 委 员 会

主编

赵渠森

副主编

谢富源 黎观生 岳红军

主审

郭恩明

副主审

刘善国 章贻宁 汪裕炳

常务编审委员

车 强 戴 棣 曹正华 杨鸿昌 梁宪珠 张佐光

李 野 李志强 胡建国 吴石民 杨乃宾 肖 军

秘书

赵攀峰 刘 洋

序

现代科学技术的发展牵引着工程材料向着复合化、高性能化、功能化、结构—功能一体化和智能化方向发展。先进复合材料正是这一材料发展历程的典型代表之一。

先进复合材料自半个世纪前问世以来，始终作为世界各工业发达国家关键新材料和现代材料科学技术研究发展的重点，并已成为高技术研究发展的重要物质基础。

航空、航天飞行器是高技术的结晶，其不断提高的性能需求有力地推动了先进复合材料的开发研究。至今，先进复合材料已在航天飞机、第四代战机（F—22、联合攻击战斗机 F—35、苏—47 前掠翼战斗机、欧洲战斗机 E—2000）及第三代直升机（RAH—66、虎）等机体结构上大量应用。复合材料所占机体结构重量百分比已成为衡量现代飞机先进性的重要标志之一。同时，先进复合材料也已进而推广应用于汽车、建筑、能源、体育、船舶等民生大众领域。

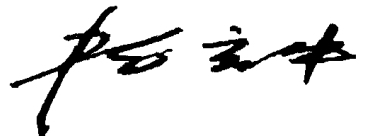
先进复合材料在我国已成功用于航空、航天飞行器的重要部件，并取得了研究开发与工程应用的宝贵实践经验；其聚合物基树脂体系也业已拥有了我国独立知识产权的品牌。

机械工业出版社是我国著名的大型出版社之一，实力雄厚、人才济济。时逢该社 50 年华诞之际，出自强烈的社会责任感，有鉴于复合材料在我国方兴未艾，其新技术的发展日新月异，尽管市场上已有了不少复合材料书籍，但国人还是迫切需要一本实用性强的最新复合材料技术工程手册，他们决定组织编辑出版《先进复合材料手册》以飨读者。这是一项极有意义的义举，必将对我国复合材料技术发展和工程应用起到积极推动作用，值得赞许。

本书的出版得到了复合材料界广大有识之士的大力支持，参加本书编写的作者百余名，北京航空制造工程研究所为本书编著的依托单位。该所是中国航空工业第一集团下属的重点科研单位，早在上世纪 60 年代末就在国内率先开展了碳纤维复合材料技术的研究，长期以来在先进复合材料技术的研究开发和工程应用方面都取得了好成绩，积累了丰富经验，该所的复合材料专家群体承担了本书中有关制造技术的大部分内容的编写任务。同时还聘请了大批所外从事复合材料技术的著名教授、研究员、专家及企业界工程人士参加了本书的编写工作，他们都长期奋斗在复合材料技术第一线，在各自的专业领域里有着深厚的学术造诣和丰富经验。正因为本书的作者群体拥有着强大的技术背景，确保了本书内容的新颖性和实用性。

复合材料是多学科交叉、相互渗透促进的产物，要求材料科学与工程应用相结合，它需要各行业间的大力协同和配合，才能迅速地协调发展。本书的出版将有利于国人掌握先进复合材料技术的新动态；有利于推广国内复合材料技术的研究与应用经验；有利于推动各行业间的交流与合作。我衷心祝贺本书的出版，并深信本书将不负广大读者的厚望，为加速我国复合材料技术发展、缩小与国外工业发达国家差距发挥积极作用。

中国航空研究院院长



2003 年 3 月

前 言

先进复合材料现今已在航空航天工程、交通运输、高层建筑、机电工业、化学工业、竞技体育等领域获得了广泛的应用，并显示出其不可取代的重要地位。先进复合材料不仅是新材料研制的典范，而且也是 21 世纪多功能、高性能、智能化新材料研究的重点方向。

先进复合材料在美欧虽已商品化，但它一直是各国重点研究项目之一。我国先进复合材料研究开发已走过了 30 余年的艰苦奋斗历程，基本上完成了从样件到生产件、从单件试制到小批量生产、从次承力结构件到主承力结构件、从单一功能到多功能、从等代设计到按复合材料特点进行设计、从军品到民品的多项转变，在树脂、纤维、制造、测试、结构分析、设计诸多领域都已有相当的技术积累。许多环氧、双马来酰亚胺、聚酰亚胺树脂品种持有我国自主的知识产权；在制造方面，热压罐成形、缠绕成形、搓卷成形方法已有成熟的经验；复合材料性能测试已建立了百余项国内标准；结构分析程序已基本上能满足大型复杂型面结构的计算；在设计方面，已实现气动弹性、强度、最小重量等综合优化铺层剪裁设计；就飞机结构而言，先进复合材料已成功应用到机翼、前机身、鸭翼、垂直安定面、水平安定面、方向舵、减速板、进气道侧壁等重要部位。

先进复合材料与金属材料相比有三个显著的不同之处。

- (1) 结构设计已从各向同性的金属材料设计转入正交异性的铺层优化设计。
- (2) 结构件成形与材料成形同时完成，制造起着重要作用。
- (3) 材料性能受环境因素（湿/热，冲击）影响显著，破坏模式多样化。

就复合材料而言，设计是意念，材料是物质，制造是途径，应用是目的；本手册力图正确描述以上四者之间的关系，以便正确认识、理解掌握和应用先进复合材料。

机械工业出版社愿为推动我国先进复合材料的发展尽己之责，决定出版《先进复合材料手册》，并且得到了北京航空制造工程研究所的大力支持。本人有幸应邀担任该书的主编。本手册有五大特点：(1) 实用性强 内容面向工程实际，重点介绍结构用先进复合材料，内容丰富、查阅方便；(2) 先进性强 介绍国内外先进复合材料研究、开发、生产已取得的丰硕成果，同时又突出了新技术的发展，不少数据是首次公开，反映了最新复合材料的进展；(3) 系统全面 从材料基础到结构应用，介绍先进复合材料全过程，涉及到操作规程、检验标准、连接规范、修理指南；(4) 突出了制造技术 制造是复合材料推广应用的关键，本手册在制造技术，特别是低成本制造技术方面占有一定篇幅；(5) 军民结合 先进复合材料的增长点是民用工业，建筑、汽车将成为应用先进复合材料的主导产业，介绍民品开发是本手册的重点之一。

百余名编写人员分布在研究单位、学校、工厂、企业的军、民两个领域，他们中绝大多数是在第一线从事科学研究、工程开发和生产制造的技术人员、系统工程指挥员、专业领头人和飞机型号结构主管总设计师和总工程师，有较深的造诣和较丰富的经验。

本手册 2001 年 4 月在机械工业出版社立项，时间相当紧迫。幸好得到了诸位编写人员的鼎力相助，不少编写人员的本职工作十分繁忙，不得不利用平时的休息时间，甚至是春节假期乃至身带病痛，坚持完成编写工作。这种负责、奉献的精神令人敬佩，借此向诸位同仁表示诚挚的感谢！

由于时间仓促、水平所限，本手册错谬之处在所难免，敬请原谅，也请读者给予批评指正。

主 编
2002 年 8 月 1 日

名词术语与符号

为了便于读者、作者查阅，特汇编了以下名词术语与符号，并在括号内附上对应的英文词。

一、名词术语

复合材料 (Composites, Composite Material) 由两种或两种以上组份材料组成的材料，各组份材料基本上仍保持其固有的物理和化学性能，彼此间有明显的界面。

先进复合材料 (Advanced Composites) 专指可用于加工主承力结构和次承力结构、其刚度和强度性能相当于或超过铝合金的复合材料。目前主要指有较高强度和模量的硼纤维、碳纤维和芳纶等增强的复合材料。

热固性复合材料 (Thermosetting Plastic) 以热固性树脂为基体的复合材料。

热塑性复合材料 (Thermoplastic Plastic) 以热塑性树脂为基体的复合材料。

碳纤维复合材料 (Carbon Fibre Composite; CF Composite) 以碳纤维或石墨纤维作增强材料的复合材料。其比刚度、比强度兼优，综合性能好，是应用最广泛的一种先进复合材料。

碳/碳复合材料 (Carbon-Carbon Composite) 由碳纤维织物或石墨纤维埋入碳或石墨基体组成的一种复合材料。

芳纶复合材料 (AFRP) 以芳纶为增强材料的树脂基复合材料。

玻璃纤维复合材料 (GFRP) 以玻璃纤维为增强材料的树脂基复合材料。

凯芙拉纤维复合材料 (Kevlar Composites) 以 Kevlar 纤维为增强体的复合材料，其拉伸强度和模量都比玻璃纤维增强的复合材料高、压缩强度略为降低。

硼纤维复合材料 (BFRP) 以硼纤维为增强材料的树脂基复合材料。

混杂纤维复合材料 (Hybrid Composites) 由两种或两种以上纤维增强同一种基体的复合材料。

短切纤维复合材料 (Short Cut Fiber Composites) 以短切纤维而非连续纤维作为增强材料的复合材料。

粒状模塑料 (Granular Molding Compound) 颗粒较小而又均匀的模塑料。

片状模塑料 (Sheet Moulding Compound) 树脂

糊浸渍纤维或毡片所制成的片状混合物。

增强材料 (Reinforcement) 置于基体中能使所形成的复合材料力学性能显著提高的增强相组份材料，如：各种高强度、高模量纤维等。

碳布 (Carbon Cloth) 碳纤维织物由预氧化的聚丙烯腈纤维织物经碳化或碳纤维纺织而成。

硼纤维 (Boron Fibre) 用化学蒸气镀层法将硼沉积到载体（如钨丝）纤维上制得的丝状物。其密度与铝相当 ($2.5\sim 2.6\text{g/cm}^3$)，比强度、比模量分别为常用金属材料的 5.5~9 倍，可用于增强树脂、铝或钛等制得性能优异的复合材料。

芳香族聚酰胺纤维 (芳纶) (Aromatic Polyamide Fibre) 分子结构主链上的重复链节只含芳香环和酰胺键的合成纤维。

聚乙烯纤维 (Dyneema Fibre) 为 DSM 公司开发的一种超高强度新型复合材料增强体纤维。

凯芙拉纤维 (Kevlar Fibre) 为杜邦公司命名的高强度、高模量、低密度芳香族聚酰胺纤维。

陶瓷纤维 (Ceramic Fibre) 指以耐火氧化物、碳化物、氮化物制成的增强纤维。陶瓷纤维经过化学蒸气沉积、熔融拉丝、纺丝并挤出而制成。其主要优点是具有高强度和高模量。

晶须 (Whiskers) 对近似完全的单晶纤维的一种俗称。晶须是在控制条件下由无机物合成制得的。

长丝 (Filament) 具有一定连续长度的纤维。

纤维束 (Tow, Yarn) 多根纤维组成的丝束，一个纤维束可含有 1000、3000、6000 或 12000 根等不同数量的单丝。

单向带 (Tape) 以长纤维为径向而在纬向加少量且更细的纤维纺织加工成不同宽度的带。它经浸胶后叫“预浸单向带”。

织物 (Fabric) 由长纤维按径向、纬向等方向编织而成的一种织物。

预浸料 (Prepreg) 将树脂基体浸涂在纤维织物上，通过一定的处理后贮存备用的中间材料。

无捻粗纱 (Roving) 由多股平行的原丝或平行的单丝不加捻络合的集束体（多股原丝无捻粗纱），或有一次拉制的多根单丝集束而成的粗纱（单股无捻粗纱），拼合时没有有意加捻。

稀松的平纹棉织物 (Scrim) 一种开网状结构的

增强编制物,用于无纬带和其他 B 阶段材料的加工,以便于处理。

经线 (Warp) 在织物中沿纵向取向的线,垂直于纬线。

纬纱 (Pick) 在一种织物中单独的纬线或粗纱。

纤维长径比 (Ratio of Length to Diameter of Fibre) 纤维长度与其等效直径之比,用 l_f/d_f 表示。

纤维特征参数 (Fibre Characteristic Parameter) 是纤维的体积含量和纤维长径比的乘积,即 $\lambda_f = V_f (l_f/d_f)$ 。

纤维有效系数 (Efficiency Factor of Fibres) 指纤维中的平均应力与纤维极限拉伸之比。

基体 (Matrix) 将增强材料敛集粘合在一起,从而形成复合材料的组份相材料。

树脂 (Resin) 一种具有高分子量不溶于水的有机材料,无确定的熔点和结晶的趋势。

双马来酰亚胺 (Bismaleimide) 一种可通过加成反应来固化的聚酰亚胺。由马来酸酐与芳香二胺反应得到的产物。因其两端含有不饱和双键,打开后可以进行诸多反应,形成均聚物、共聚物、三元共聚物的双马来酰亚胺树脂体系。该树脂有较高的反应活性,其固化产物具有高的机械强度和刚度,热稳定性和耐蚀性优于环氧树脂体系。

环氧树脂 (Epoxy Resin) 由环氧化合物聚合而成的、含有两个或多个环氧基团的一类热固性树脂。

酚醛树脂 (Phenolics) 由酚、酚的同系物和衍生物与醛类或酮类聚合而成的一类树脂。

组份材料 (Constituent Materials) 组成复合材料的单独材料。例如碳和环氧是碳/环氧复合材料的组份材料。

胶粘剂 (Adhesive) 可将两个表面粘接固定在一起的材料。

脱模剂 (Mold Release Agent) 为使复合材料制品易与模具分离,而涂于模具表面或添加到树脂里的物质。

胶衣树脂 (Gelcoat) 一种快速凝固、起着改善制品的表面性能作用的树脂,模具型面上涂完脱模剂之后才涂它。

偶联剂 (Coupling Agent) 在树脂基体与增强材料的界面上,促进或建立较强结合的物质。

可剥保护层 (Peel Ply) 为保持制品表面清洁完整,而置于待胶接表面的织物层,固化前将它剥掉。

热压罐 (Autoclave) 为了树脂基复合材料成形,按要求进行加热、加压固化的设备。

模具 (Mold, Tooling) 一种保证制品成形的工具。

坝 (Dam) 包围模具的隆起部分,以防止在固化过程中树脂流出。

真空袋 (Vacuum Bag) 一种为复合材料制品固化提供的外罩,密封后可抽成真空的袋子。通常用柔软的聚酰胺、聚酯或弹性薄膜等制成。

透气材料 (Breather) 一种固化时用于排出气体、使用时不接触制品的多孔材料。

吸胶布 (Bleeder Cloth) 固化过程中为吸出制品多余的树脂,而放在制品表面上的特制玻璃布。

固化 (Cure) 通过热、光、辐射或化学添加剂等的作用,使热固性树脂经不可逆的化学反应,完成交联的过程。

共固化 (Cocure) 指不同的复合材料制品在一次固化中,同时完成固化和胶接过程的工艺方法。

后固化 (Post Cure) 在初始的固化后对温度的附加暴露。后固化的温度可比固化温度更高。

胶接 (Adhesive Bonding) 用胶粘剂使相同或不同的固体表面结合为一牢固整体的方法。

二次胶接 (Secondary Bonding) 指已固化的不同复合材料制品,通过胶粘剂再次进行胶接固化过程。

真空辅助渗透成形 (Vacuum Assisted Resin Infusion, VARI) 一种适用于大型制品的、高效、低成本的成形工艺。

热压罐成形 (Autoclave Moulding) 在热压罐中利用电、蒸气或其他介质加热、加压固化的一种袋压成形方法。

袋压成形 (Bag Moulding) 是成形增强塑料的方法之一。通过柔韧袋(例如橡胶袋、尼龙袋等)在袋中产生均匀真空,以热压罐内充入的气压或压机压力使置于刚硬模具上(或模具内)的材料压实成形。当使用热压罐时称为热压罐成形。

铺贴(又称:手糊)(Layup) 制造复合材料制品过程中用手工或机械,按一定方向和顺序,逐层铺放预浸料的过程。

长丝缠绕 (Filament Winding) 在控制张力和预定线形的条件下,将连续纤维束(或单向带)浸胶后,以一定的形式缠绕在芯模或模具上,达到成形复合材料制品目的的工艺。

湿法缠绕 (Wet Winding) 绕丝恰好在接触芯模之前用树脂加以浸渍的纤维缠绕的方法。

架桥 (Bridging) 一层或多层铺层在跨越圆角或台阶等处时,与其他铺层之间未完全接触的情况。

压实 (Debulk) 通过施加压力来减薄叠层板厚度,去除铺层间残余空气、蒸汽和挥发物达到压实。

脱胶 (Debond) 由于各种因素引起的铺层内、层间或胶接接头间产生分离的现象。

分层 (Delamination) 由于层间应力或制造缺陷等引起的复合材料铺层之间脱胶破坏的现象。

胶接接头 (Adhesive Bonding Joint) 两个被胶接物在其间用胶粘剂胶接到一起的地方。有搭接接头、斜接接头和梯形接头之分。

修理 (复合材料) (Repair (Composite)) 在 (复合材料) 结构中整修孔和裂纹之类的损伤。

均压板 (Caul Plate) 表面平滑的金属板, 固化前置于层合板上, 以便在固化过程中使温度、压力传递均匀, 并使固化后的层合板表面平滑。

层合板 (Laminate) 由单向或多向铺层压制而成的复合材料板。

双向层合板 (Bi-Directional Laminate) 一种在层合板平面内铺放两个不同方向纤维的复合材料层合板。

对称层合板 (Symmetric Laminate) 全部铺层及其各种特性和参数相对于板的几何中面对称的层合板。

非对称层合板 (Unsymmetric Laminate) 没有中面对称性的层合板。

均衡层合板 (Balanced Laminate) 铺层的各种特性和参数相同, 铺层角为 $+\theta$ 与 $-\theta$ 的层数相等的层合板

均衡对称层合板 (Balanced Symmetric Laminate) 既均衡又对称的层合板。

正交层合板 (Cross-Ply Laminate) 只含有 0° 和 90° 铺层的双向层合板。

斜交层合板 (Ang-ply Laminate) 只含有 $+0^\circ$ 角和 -0° 角铺层的双向层合板。

准各向同性板 (Quasi-Isotropy Laminate) 面内各个方向的弹性模量相同的对称层合板。

层合板族 (Laminate family) 一些具有相同铺层数和铺层角度, 但各种角度铺层的铺层比不同的层合板。

子层合板 (Sub-Laminate) 在层合板内一个可多次重复的多向铺层组合。

加筋板 (Stiffend Panel) 在各种形式的筋条 (型材) 增强的平板或曲板。筋条有纵、横之分。

随炉件 (Processing Control Panel) 与制件的材料工艺过程相同, 并在同一炉固化成形的一种层合板。将它切成试样后, 可测试某些基本性能, 鉴定制件质量, 以便对工艺进行监控。

面板 (Face) 叠层板的外部铺层。

夹层板 (Sandwich Panel) 将两块薄面板粘接到一块厚且轻的蜂窝芯或泡沫芯上面形成。也可粘接到正弦波的帽形或格栅形的夹芯上。

样板 (Template) 用作定向切割和敷设铺层的型板。

模压合成板 (Sheet Molding Compound) (SMC) 一种短纤维增强的复合材料。

压板 (Platen) 一个安装压板, 模具组件连于其上。

最佳层合板 (Optimum Laminate) 单位质量或费用具有最高刚度或强度的层合板。

形状比 (Aspect Ratio) 一块矩形板的长—宽比, 不连续纤维的长—径比或一束平行纤维的长—束比。

反对称 (Antisymmetry) 在非对角线分量间, 符号改变的特殊对称性。例如一种非对称的斜交铺层叠层板。

夹层结构 (Sandwich Construction) 以面板 (蒙皮) 与轻质芯材组成的一种层状复合材料。按其芯材形式或材料的不同通常有蜂窝、波纹和泡沫塑料夹层结构。

试样 (Coup) 一种小型的层合板试验件, 用于测定基本铺层、层合板或通用结构 (如: 胶接或机械连接接头) 的特性。

单向复合材料 (Unidirectional Composite) 仅在一个方向有平行纤维的复合材料。

元件 (Element) 一种复杂结构上的通用构件, 如: 蒙皮、长桁、承接板或接头等。

细节件 (Detail) 一种复杂结构上的非通用构件。

组合件 (Subcomponent) 一种较大的三维结构, 可能是全结构的一部分, 提供完整的结构代表, 如: 梁段、盒段、壁板、翼肋、框架等。

部件 (Component) 飞机骨架结构的一个主要部分, 如: 机翼、机身、垂尾、平尾等。它可作为一个完整的单元进行试验, 从而鉴定该种结构。

芯子 (Core) 用于夹层板内部的重量轻的材料。金属的或复合材料的面板被粘接到芯子上以构成夹层板。

蜂窝芯 (Honey Comb Core) 由金属和非金属材料制成且在与面板一起胶接时形成夹层结构。假设芯子在夹层结构板的平面内没有刚度而垂直于板具有无限的刚度。

规格格栅加芯 (Regular Grid Core) 以具有预先定位的元件的格栅形式出现的夹层板芯子。

正弦波形夹芯 (Sinusoidally Corrugated Core) 正

弦波形状的夹层板芯。

纤维含量 (Fiber Content) 复合材料中纤维体积或质量所占的百分比。

树脂含量 (Resin Content) 复合材料中树脂体积或质量所占的百分比。

空隙 (Void) 制造过程中留在复合材料中的气体所占有的空间。

空隙率 (Porosity) 具有的空隙,即在固化后含有残余空气和气体的空穴。其测量和空隙含量一样。通常假定空隙率在叠层板各处稀疏地和均匀地分布。

空隙含量 (Void Content) 复合材料制件中空隙体积占该制件体积的百分比。

水分含量 (Moisture Content) 水分占复合材料质量的百分比。

夹杂物 (Inclusions) 制造过程中无意带进制件中的杂质,如:颗粒、芯片、薄膜等。

富树脂区 (Resin-Rich Area) 复合材料制件中局部树脂含量较该制件的平均树脂含量高出很多的区域。

贫树脂区 (Resin-Starved Area) 复合材料制件中局部树脂含量较该制件的平均树脂含量低很多的区域。

粘性 (Tack) 预浸料的胶粘性,一个重要的操作特性。

铺层 (Lamina, Ply) 复合材料制件中一层单向带或织物称为“一个铺层”,是复合材料制件中一个最基本单位。

铺层角 (Ply Orientation Angle) 每一铺层的纤维方向与制件的参考坐标 X 轴之间的夹角,由 X 轴到纤维方向逆时针旋转为正。

铺层组 (Ply Group) 一组具有相同铺层角的连续铺层。每一铺层的纤维方向与制件的参考坐标 X 轴之间的夹角,由 X 轴到纤维方向逆时针旋转为正。

铺层顺序 (Ply Stacking Sequence) 铺贴(手糊)中具有各种不同铺层角的铺层的排列次序。

铺层递降 (Ply Drop) 随载荷的变化在一段距离上相应地逐步减少某些铺层的现象。

栅条铺层 (Rib Laminae) 一种格栅加芯单独元件的铺层。

纬向 (Fill) 在编制物中取向与经向成直角的线。

成形后的余料 (Flash) 在部分的模板或模具外廓形成的剩余材料或由合模挤压出的剩余材料。

界面 (Interface) 不同组份相复合共存的系统,各组份相之间存在着的分界面。

贮存期 (Shelf Life) 在规定的条件下,材

料仍能满足规范要求而不失效的最长操作时间。

使用期 (Operate Life) 在正常施工条件下,材料仍能满足规范要求而不失效的最长操作时间。

老化 (Ageing) 材料在环境条件下随时间推移而产生的各种不可逆的化学变化,从而引起材料性能变坏的现象。

退化 (又称:降解) (Degradation) 由于老化、腐蚀、疲劳或应力引起的材料性能的降低。

龟裂 (Crazing) 在复合材料的基体内或材料的界面处出现的细微裂纹。

横向裂纹 (Transverse Crack) 在层合板等的单向铺层内,由于横向拉伸应力引起的基体或界面的开裂,它往往是最先一层破坏源。

吸湿 (Moisture Absorption) 复合材料在环境条件下吸进水分的一种行为。

玻璃化转变温度 (Glass Transition Temperature) 复合材料的刚度和强度开始急剧下降的温度,其值与材料的最高使用温度密切相关。

纤维表面处理 (Fiber Finishing) 为提高纤维与基体的粘接能力,对纤维表面进行物理或化学方法的处理,以改变纤维表面的状态。

纤维束强度 (Bundle Strength) 一束平行纤维的强度,通常用纤维强度试验代替繁杂的单丝试验。

尺寸稳定性 (Dimensional Stability) 复合材料制件在温度和湿度等环境条件变化的情况下,仍能保持原有形状和尺寸的特性。

B 阶段 (B-Stage) 热固性树脂未固化与完全固化的一个中间阶段,或称“预固化阶段”。

固化收缩 (Shrinkage) 固化成形期间或固化成形后,制件的尺寸收缩了的现象。

残余应力 (Residual Stress) 一般指复合材料制件内部由于固化后的降温和吸湿等引起的应力。

耐久性 (Durability) 指结构在规定期限内,抵抗开裂、应力腐蚀、腐蚀、热退化、脱层、磨损和外来物损伤的能力。

偏差 (Discrepancy) 一种允许的制造上的差异,可利用计划的检验方法检出,它可能产生于加工、制造或装配的过程中。

缺陷 (Flaw, Defect) 加工、制造或装配的过程中产生的异常(制造异常),在规定的标准内是允许的;在规定的标准外属“超差”,是不允许的。

损伤 (Damage) 制造或使用中引起的结构上的异常。通常因机械加工、紧固件安装或外来物撞击等引起。

冲击损伤 (Impact Damage) 专指因外来物撞击

引起的结构上的异常。

倍板 (Doublers) 局部形成的增强或修理。

造型 (Drape) 编制或非编制的复合材料要符合复杂的曲面的能力。

环境条件 (Ambient Conditions, Environment Conditions) 制件使用和存放的周围条件, 包括温度、湿度、紫外线照射、雷电、噪声、腐蚀、燃油浸泡等情况。

适航要求 (Airworthiness Requirements) 为保证飞机及其乘员在飞行中的安全而提出的要求, 一般以适航条例的形式给出, 如: 美国的联邦航空条例 FAR、中国的航空条例 CCAR 等。

适航鉴定 (Airworthiness Certification) 按适航条例的各项要求, 对已研制成的飞机或其他部件进行鉴定, 以便颁发型号合格证、生产许可证和适航证等。

无损检验 (Non-Destructive Inspection, NDI) 一种不破坏、不损伤原结构的质量检验方法, 如: 目视法、超声波探伤、C 扫描、X 射线、荧光渗透、涡流探伤等检验方法。

界面特性 (Interface Character) 指两相之间的过渡区特性。

模压机 (Block Press) 用于对层压片材加热加压使之胶合的一种压力机。

声发射检测 (Acoustic Emission Inspection) 利用对被检物体施加压力, 引起物体内部变化所诱发的应力波来检测材料或零件的内部缺陷。如检测复合材料的力学性能、疲劳损伤、分层、脱胶等。

极限载荷 (Limit Load) 结构在正常使用中可能出现的最大载荷, 在该载荷下结构不应产生残余变形。

相容性 (Compatibility) 两种或两种以上物质混合时具有的相互亲和的能力; 为满足有关要求, 在特定的条件下几个实体可在一起使用的能力。

自辐射照相束 (Autoradiography) 物体中的放射性材料所发射的射线的照相记录, 用这种方法来揭示该物体放射性的分布状态。

流程图 (Flow Chart) 可示出计算程序的主要步骤的图表。

工程常数 (Engineering Constants) 对单向或多向层合板进行单轴拉、压及纯剪试验直接测得的常数, 包括拉、压、剪切弹性模量和泊松比等。

不变量 (Invariant) 坐标变换中保持不变的量。

各向同性 (Isotropy) 材料性能与方向无关的一种特性。

各向异性 (Anisotropy) 材料性能因方向不同

而改变的一种特性。

正交各向异性 (Orthotropy) 材料具有三个互相垂直的弹性对称平面的特性。这些平面的垂直方向称为“材料的主方向”。

横向各向同性 (Transverse Isotropy) 具有正交各向异性特性的材料, 若有一个各向同性的平面时, 称其是具有“横向各向同性”。例如单向复合材料即具有此种特性。

正方对称 (Square Symmetry) 指铺层面内对于两个互相垂直的主方向具有相等的刚度和强度的对称形式。

正轴 (On-Axis) 与材料主方向重合的参考坐标轴。

偏轴 (Off-Axis) 与材料主方向不重合, 有一个偏转角 θ 的参考坐标轴。

耦合 (Coupling) 一种外力引起与其不对应的变形的基本变形的效应称为“耦合”。

拉剪耦合 (Shear Coupling) 由正应力引起剪切应变的一种耦合, 是各向异性材料所特有的。

拉弯耦合 (Stretching-Bending Coupling) 由正应力引起弯曲应变的耦合, 也为各向异性材料所特有。

弯扭耦合 (Bending-Twisting Coupling) 由弯矩引起扭转应变的耦合, 也为各向异性材料所特有。

宏观力学 (Macromechanics) 在复合材料力学中采用层合板理论进行分析的力学。此时在每一铺层内纤维和基体作为一个整体而不再加以区分。

细观力学 (Micromechanics) 在复合材料力学中要分别考虑到纤维和基体的性能以及界面的情况, 研究它们的相互关系并进行分析的力学。

细观-宏观 (MIC-MAC) 综合考虑复合材料的细观力学和宏观力学进行分析的方法。

混合定律 (Rule of Mixtures) 表达复合材料的性能与对应的组份材料性能之间同体积含量有线性关系的法则。

失效准则 (Failure Criterion) 复杂应力-应变状态下, 材料失效的判据。

失效包线 (Failure Envelope) 复杂应力-应变状态下, 由失效准则确定的各极限值形成的包络线。

最先一层失效 (Failure-Ply-Failure) 在多向层合板中有一个铺层最早开始出现破坏时称“最先一层失效”。此时对应的载荷可作为设计中的使用载荷。

安全系数 (Factor of Safety) 设计载荷与使用载荷的比值称为“安全系数”。

许用值 (Allowables) 计算中允许采用的、由

一定的试验数据确定的材料性能值。

A 基准 (A-Basis) 是一个力学性能的限定值, 在 95% 的置信度下, 99% 的性能数值群的值高于此值。

B 基准 (B-Basis) 是一个力学性能的限定值, 在 95% 的置信度下, 90% 的性能数值群的值高于此值。

典型值 (Typical Value) 从至少 5 个试样作出的有效试验结果中, 得出的算术平均值。

强度比 (Strength Ratio) 材料的强度极限与结构所受对应应力之比, 也称为: “比强” 或 “强度—应力比”。

排序法 (Ranking) 层合板按强度、刚度或其他特性, 分类排列的一种优化方法。

毯式曲线 (Carpet Plot) 层合板的单轴或纯剪刚度和强度为 0° 、 90° 和 $\pm 45^\circ$ 铺层比函数的一种变化曲线, 又称: “卡比特曲线”。

湿热效应 (Hydrothermal Effect) 由于湿度和温度变化引起制件尺寸和材料性能改变的现象。

损伤容限 (Damage Tolerance) 指结构在规定的未修使用周期内, 抵抗因缺陷、裂纹或其他损伤而导致破坏的能力。

轴对称性 (Axisymmetry) 相对于轴的对称性, 即在垂直于轴的平面各向同性, 且这样的材料叫做横向各向同性材料。

弯曲力矩 (Bending Moment) 改变梁或板的曲率的应力偶。

双轴 (Bi-axial) 作用有两个互相垂直的应力或应变分量。

边界条件 (Boundary Conditions) 在边界处存在的加载和环境条件。要进行应力分析必须确定这些条件。

屈曲 (Buckling) 结构件的失稳侧向位移, 如由过度压缩和剪切引起的板的失稳侧向位移。轴压下复合材料中的纤维也可能产生微屈曲。

爆裂压力 (Burst Pressure) 对应于压力容器最终破坏的压力。

特征长度 (Characteristic Length) 在叠层板的开口和特征曲线之间测得的尺寸。

校直 (Collimated) 校正使之平行, 如在单向带中的纤维。

柔度 (Compliance) 与材料刚度相反的柔性的量。它是弹性模量的倒数或刚度矩阵的求逆。

长寿命曲线 (Constant Life Diagram) 用于疲劳分析的一簇曲线图, 其中的每一条曲线对应着与交变应力和平均应力有关的一个唯一的疲劳寿命。长寿命曲线通常由一簇 S-N 曲线获得。

简化表示法 (Contracted Notation) 对于应力、应变和像弹性模量与强度参数之类的材料常数的速记表示法。

计数 (Count) 每单位长度上经线和纬线的数目。例如以英制单位计编制物 24×26 , 意思是经向上每英寸 24 支纱, 纬向上每英寸 26 支纱。

裂纹密度 (Crack Density) 单位长度上明显裂纹的数目。

临界屈曲载荷 (Critical Buckling Loads) 出现屈曲的最低载荷。

曲率 (Curvature) 一个板的弯曲和扭转的几何量度。

变形 (Deformation) 由外部施加的压力、温度变化和吸潮所引起的物体尺寸和形状上的改变。在尺寸上的变形由法向应变分量量度, 在形状上的变形由剪切分量量度。

挠度 (Deflection) 诸如梁之类的结构位移。

暂停时间 (Dwell Time) 固化期中的一个时间段, 其间叠层板在加压前被保持在高温下。

弹性关系 (Elastic Relation) 完全可逆的, 唯一的应力—应变关系。加载和卸载遵循相同的路径, 无滞后现象或残余应变。尽管容许有非线性关系存在, 但是复合材料的关系基本上是线形的。

线端 (End) 单独的经纱、线、单丝或粗纱。对于玻璃纤维一端含有 206 支纱。

膨胀系数 (Expansion Coefficient) 复合材料由于温度改变和吸湿引起的增长或膨胀的量度。

自由膨胀 (Free Expansion) 没有外应力的热或湿膨胀。

疲劳寿命 (Fatigue Life) 在疲劳破坏时应力或应变循环的次数。

疲劳开口系数 (Fatigue Notch Factor) 在 N 循环下未开口试样的疲劳强度之比。

疲劳开口敏感性 (Fatigue Notch Sensitivity) 开口对疲劳强度或材料寿命影响的评价。其可表示为 $q = (k_f - 1) / (k_t - 1)$, 式中 k_f 是疲劳开口系数, 而 k_t 是静态理论上的应力集中系数。

疲劳强度 (Fatigue Strength) 没遭受破坏时材料可承受的最大疲劳应力。

疲劳强度比 (Fatigue Strength Ratio) 疲劳强度与静态强度之比。

平面剪切强度 (Horizontal Shear Strength) 由短梁剪切试验估算。因为由简单梁理论计算的应力是不精确的, 所以短梁剪切试验是近似的。

费克方程 (Fick's Equation) 有关湿度转移的扩

散方程。其与热传导的傅里叶方程类似。

傅里叶方程 (Fourier's Equation) 通常与一个物体中的热传导相联系的扩散方程。费克方程是一个特殊情况,用于湿度的转换和积聚。

频率 (Frequency) 每秒钟疲劳循环的次数,用赫兹表示。

帽形波纹芯 (Hat Type Corrugated Core) 可重复的帽形截面的波纹板。

非均匀性 (Heterogeneity) 在微观程度上组份材料局部的变化。在宏观程度上材料或取向的逐层变化。

均匀性 (Homogeneity) 在物体内部材料的均匀性。在复合材料的机理上,通过处理实际存在的非均匀性可达到微观和宏观上的均匀性。

指数表示法 (Indicial Notation) 矩阵和张量的下标或上标表示法。

相互作用 (Interaction) 同耦合一样。例如由于横向应力的存在影响了纵向拉伸强度。在纵向屈曲应力和横向或剪切应力之间存在类似的相互作用。一般地说,复合材料的相互作用的影响大于常规各向同性材料。分析中应同时考虑所有可预料到的应力。

层合板理论 (Laminated Plate Theory) 复合材料层合板分析和设计的最普通方法。每一铺层或铺层组处理成准均质材料。假设沿板厚度应变是线形的,其也叫层合板理论。

线形关系 (Linear Relation) 变量间直线关系,即对于一个输入变量,输出变量是唯一的和线形的比例。

载荷 (Load) 力或广义的力,如面内应力或弯曲应力。

使用载荷 (Limit Load) 正常使用中可能出现的最大载荷,在该载荷下结构不产生残余变形。

设计载荷 (Ultimate Load) 设计中用来进行强度计算的载荷,通常由使用载荷乘以一个适当的安全系数(1.5~2)得到。在该载荷下结构刚开始或接近破坏。

机械载荷 (Mechanical Load) 机械外加载荷,不同于固化或环境引起的载荷。

单向载荷 (Single Load) 仅在一个方向上给物体施加的应力。

多向载荷 (Multiple Loads) 从许多方向作用到物体上的应力。

加载路径 (Loading Path) 应力或应变空间内增加载荷的轨迹。

加载速率 (Loading Rate) 力学试验中单位时间

载荷的变化。

纵向模量 (Longitudinal Modulus) 在单向复合材料中沿纤维方向的弹性常数。如纵向弹性模量(杨氏模量)和剪切模量。

材料利用率 (Material Use Efficiency) 定义为从强度观点定性研究材料的最优使用。

矩阵 (Matrix) 由数字的行和列组成的线形代数的整体。在二维情况下,应力和应变是 1×3 阶矩阵,而刚度和柔度是 3×3 阶矩阵。

基体减缩系数 (Matrix Degradation Factor (MDF)) 基体材料刚度降低的系数,包括铺层横向裂纹的影响。

矩阵求逆 (Matrix Inversion) 由刚度矩阵得到柔度矩阵的代数运算,或反之亦然。类似于求一个数的倒数。

中面 (Middle Plane) 将一块板在厚度方向平分成两半的平面。

中性面 (Neutral Plane) 不受伸缩的平面。

模量 (Modulus) 一般指像弹性模量(杨氏模量)、剪切模量或刚度模量那样的弹性常数。

莫尔圆 (Mohr's Circle) 由旋转坐标轴得到的应力和应变分量变化的图解法表示,也可进行材料性能的类型表示。例如复合材料叠层板的刚度和柔度。

吸潮分布 (Moisture Distribution) 随时间变化很慢的瞬态潮湿分布图。对于温度,在短时间内可达到稳定状态分布,而对于潮湿浓度,仅暴露表面的头几层随时间有明显的改变。对于内部铺层要使其发生变化,不是几年也要几个月的时间。在估算潮湿对复合材料性能的影响上必须考虑这种不均匀的分布。

力矩 (Moment) 引起板弯曲或扭转的应力偶。

多向的 (Multidirectional) 在叠层板中有多种铺层取向。

网络分析 (Netting Analysis) 将复合材料处理成没有基体的纤维,其不是一种力学分析且对复合材料不适用。

开口强度 (Notched Strength) 在有像孔、开口、裂纹等产生应力集中情况下板的有效强度。

开孔 (Open Hole) 穿过板厚的开孔,孔边没有约束。

平行移轴定理 (Parallel-axis Theorem) 相对于一个已移动了的参考坐标轴计算弹性模量的公式,类似于惯性矩的计算。

主方向 (Principal Direction) 特殊的坐标轴取向。此时对于法向分量应力和应变分量达到最大值和最小值,而对于剪切分量应力和应变为零。

重复指数 (Repeating Index) 用于叠层板的表示法中, 表示可重复的子叠层板数目。

剩余疲劳强度 (Residual Fatigue Strength) 在承受一个一定的疲劳载荷历程后, 保留的静强度。

正割模量 (Secant Modulus) 从原点到非线性应力-应变曲线上某一点间画出的正割线导出的理想化了的弹性模量。正切模量是从应力-应变曲线上正切线导出的另外的理想化了的弹性模量。

自毁 (Self-destruct) 没有外加应力而引起的破坏的温度和湿度水平。

剪切模量比 (Shear Modulus Ratio) 夹层梁的芯子材料的剪切模量与面板材料的剪切模量之比。

收缩 (Shrinkage) 在成形期间和成形后模压制品的收缩。

简支结构 (Simply Supported Structure) 一种给出零位移和零力矩支持的结构。

尺寸估算 (Sizing) 由设计来选定承受一组或多组外应力的叠层板的铺层数和角度。

S-N 曲线 (S-N Curve) 疲劳应力、疲劳应变或疲劳应力比相对于疲劳循环数的关系曲线。

正方对称 (Square-symmetry) 相对于两个互相垂直的轴具有相等的刚度或强度性能。

刚度 (Stiffness) 外加应力和所得应变之比。弹性模量是一种承受单轴向应力材料的刚度, 对剪切应力为剪切模量。对于复合材料, 刚度和其他性能是取决于材料取向的。

强度 (Strength) 材料能够承受的最大应力。

强度参数 (Strength Parameter) 应力或应变空间二次破坏准则的强度系数, 分别为张量 F 和 G 。

广义虎克定律 (Generalized Hooke's Law) 对于各向异性材料最普通的线弹性的应力-应变关系, 由该定律可导出各种对称形式的材料。

应力 (应变) 主方向 (Stress or Strain Principal Direction) 是一个特殊的坐标取向, 在该方向上剪应力 (或剪应变) 为零。对于二维应力状态, 在该坐标方向上的正应力 (或正应变) 为最大值或最小值。

应变 (Strain) 变形的几何量度。

平面应变 (Plane Strain) 应力分析的二维简化, 可用于长圆柱的横截面。

广义平面应变 (Generalized Plane Strain) 在一种非零常应变垂直于含有该平面应变状态的平面情况下的一种修正了的平面应变状态。

最大应变准则 (Maximum Strain Criterion) 基于最大应变的破坏准则。

铺层应变 (Ply Strain) 铺层内的分量, 根据叠

层板理论其与叠层板中的分量相同。

应变不变量 (Strain Invariant) 应变分量的标量组合。

应变率 (Strain Rate) 力学试验中单位时间内应变的改变。

应力 (Stress) 物体内力的强度。

复合应力 (Combined Stresses) 由两种或两种以上的基本应力组合成的复杂应力状态。

最大应力准则 (Maximum Stress Criterion) 基于最大应力的破坏准则。

平均应力 (Mean Stress) 在一个疲劳加载循环内最大和最小应力的代数平均值。

平面应力 (Plane Stress) 应力分析的二维简化, 可用于薄均质板及叠层板。

正切应力 (Tangential Stress) 沿开口切向的法向应力。

剪切应力 (Shear Stress) 导致扭曲变形的分量。

最大疲劳应力 (Maximum Fatigue Stress) 一个循环内具有最大代数值的应力。

最小疲劳应力 (Minimum Fatigue Stress) 一个循环内具有最小代数值的应力。

疲劳应力 (Fatigue Stresses) 随时间按正弦波形式变化的应力。

疲劳应力比 (Fatigue Stress Ratio) 最小疲劳应力与最大疲劳应力之比, 通常用 R 表示。

铺层应力 (Ply Stress) 铺层内的分量, 随叠层板中的材料和角度的不同逐层变化。

层间应力 (Interlaminar Stresses) 除层合板的三个面内应力分量外, 指与厚度方向有关的另外三个应力分量, 即: σ_z 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 。

层间剪切 (Interlaminar Shear) 指层间应力分量中的两个应力分量, 即: τ_{xz} 、 τ_{yz} , 也称“横向剪切”。复合材料层间剪切强度较低, 是它的一个弱点。

组合应力 (Combined Stresses) 具有所有可能的有效分量的应力状态。在平面应力状态下, 存在全部三个分量。

应力集中 (Stress Concentration) 局部应力相对于平均应力的增加比。

应力-应变关系 (Stress-Strain Relation) 对于由应变计算应力或说由应变到应力, 通常假设为线形关系。

非机械应力 (Nonmechanical Stress) 由固化和湿热引起的应力。

逐次铺层破坏 (Successive Ply Failure) 由于增加载荷, 在多向叠层板中铺层的连续破坏。

膨胀 (Swelling) 由于升温或吸潮引起的体积上的增加。

材料的对称性 (Symmetry In Material) 可重复的材料特性。复合材料的四种普通对称性是正交各向异性、横向各向同性、正方对称性和基本地各向同性。

铺层铺贴的对称性 (Symmetry In Ply Stacking) 铺层铺叠或叠层板的铺贴中相对中面的对称性, 结果形成一种对称的叠层板。

性能转换的对称性 (Symmetry In Transformed Properties) 正交各向异性材料的转换刚度和柔度分量具有偶数和奇数的对称性。

热载 (Thermal Load) 湿热载荷的一个分量。对于对称叠层板由固化温度和使用温度之差引起面内热载, 对于非对称叠层板引起面内和弯曲热载。在固化后弯曲载荷的存在引起非对称叠层板的扭曲。

转换 (Transformation) 由于坐标转换或简单地参考坐标轴的旋转引起的刚度、强度、湿热膨胀、应力、应变和其他的变化。其转换遵循严格的数学方程。

无缺口强度 (Unnotched Strength) 没有开口的叠层板的强度。

容器性能效率 (Vessel Performance Efficiency) 定义为破坏压力和内部体积的乘积与容器重量之比, 量纲为长度。用于研究有关压力容器的性能。

体积百分率 (Volume Fraction) 以体积为依据的组份材料的百分率。

壁厚比 (Wall Thickness Ratio) 一个压力容器或一个圆筒的外径与内径之比。

韦伯参数 (Weibull Parameters) 对复合材料的静态和疲劳强度常常使用的统计量度。

潮湿 (Wet) 具有已吸收的湿气。

弹性模量 (杨氏模量) (Young's Modulus) 单轴试验下应力—应变曲线的斜率。

二、符号

G —剪切弹性模量, 应变空间中的强度参数

H (h) 距离, 厚度

I 惯性矩

$[J]$ 坐标转换矩阵

K 应力集中系数

k 曲率、扭率

L 长度、半波长

M 质量、力矩

m 质量、铺层组数、铺层角的余弦函数、纵向半波数

N 内力、疲劳破坏时的循环数

n 铺层数、节点数、铺层角的正弦函数、横向

半波数

P 外力、压力

Q 剪力

$[Q]$ 单向层合板主平面应力状态下的模量矩阵

q 剪流

R 半径、强度比

r 半径、子层合板的重复数

S 剪切强度、静矩

$[s]$ 单向层合板三维或平面应力状态下的柔量矩阵

T 温度

T_g 玻璃化转变温度

t 厚度、时间

U 线性组合、应变能

u 、 v 、 w 、 x 、 y 、 z 方向的位移

V 体积

W 宽度、间距、质量

X 纵向强度

Y 横向强度

α 角度, 坐标转换角, 热膨胀系数

$[\alpha]$ 层合板的内面柔度矩阵

β 角度, 湿膨胀系数

$[\beta]$ 层合板的耦合柔度矩阵

γ 角度, 剪应变

Δ 位移

δ 位移, 挠度

$[\delta]$ 层合板的弯曲柔度矩阵

ε 正应变

η 应力分配参数, 有效宽度修正系数

θ 铺层角

λ 波长, 椭圆形状比, 热导率

γ 泊松比

ρ 密度, 曲率半径, 电阻率

σ 正应力

σ_b 拉伸强度

$[\sigma]$ 许用正应力

τ 剪应力

τ_b 剪切强度

$[\tau]$ 许用剪应力

θ 角度

ψ 角度

Ω 面积

上角标符号:

* 正则化

' 新轴, 导数