

聚合物基 复合材料手册

陈祥宝 主编



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

聚合物基复合材料手册

陈祥宝 主编



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

聚合物基复合材料手册/陈祥宝主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 5

ISBN 7-5025-5526-9

I. 聚… II. 陈… III. 高聚物-基质(生物学)-
复合材料-手册 IV. TB33-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 043835 号

聚合物基复合材料手册

陈祥宝 主编

责任编辑: 周伟斌 王苏平

文字编辑: 谢蓉蓉

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社
材料科学与工程出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 41¼ 字数 1011 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5526-9/TQ·1983

定 价: 90.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

先进材料技术对科学技术和国民经济的发展具有重要推动作用。在现代社会中，新材料已经成为各工程领域的共性关键技术之一，是高技术的重要组成部分，也是最重要和发展最快的学科之一。聚合物基复合材料在先进材料领域具有极其重要的地位，自20世纪60年代问世以来，始终作为世界各国家重点研究开发的关键新材料之一，近年来更是备受青睐与重视。

树脂基复合材料具有优异的使用性能，其比强度高、比刚度高、耐腐蚀、抗疲劳性能好、可设计性强、便于大面积整体成型等独特优点使其应用日益广泛，在世界各国的军用、民用领域起到了至关重要的作用。近期欧洲空客集团在其超大型客机A380上、美国波音飞机公司在其超效率飞机B7E7的主承力结构上均将大量采用复合材料的事实，更进一步向人们展示了其令人鼓舞的发展前景。此外先进复合材料在基础设施、沿海油气田、风力发电、汽车和体育用品等民用工业领域的广泛应用也向人们昭示了其蓬勃发展的未来。

先进复合材料发展应用已有三十多年的历史。三十多年来，积累了大量的设计使用经验和性能数据，逐渐向规范化、文件化、成熟化发展，要求形成设计和鉴定的统一指南，以改善最终产品的一致性、减小风险、降低成本。为了适应这一发展形势的需求，我们组织国内复合材料领域有实际经验的部分专家，历时三年编写了《聚合物基复合材料手册》。该手册吸取了国外的先进经验，汇总了国内最新的研发成果，旨在向国内提供一本较全面和系统以及具有工程应用价值的手册，为我国复合材料事业的研究发展竭尽棉帛。

手册包括了聚合物基复合材料性能表征与试验技术、性能数据、材料使用与设计分析等几大部分，详尽地给出了纤维、树脂、预浸料和各种层压板的性能表征方法和相关的实验技术，收集汇总了国内外140多种复合材料体系的性能数据，提供了设计分析的基本要点技术和积木验证方法，以及使用保障和环境管理等较新的知识，反映了国内外最新的研究成果、技术、观点和进展。手册内容系统全面，数据表达规范，结构编排合理，力求具有技术先进性和工程实用性，可供复合材料领域材料研究、工程制造、设计应用等军用、民用部门参考使用。

由于时间匆促，水平有限，错漏之处在所难免，敬请读者批评指出。

陈祥宝
2004年2月

术语及符号

术 语

为方便使用和查询，名词术语基本上按分类顺序给出，其分类大致为材料、工艺、性能、设计等。同时，在名词术语后的括号中给出了对应的英文名称。

复合材料 (composites, composite materials)——具有两相或两相以上结构的材料，各相材料基本上保持其各自原有的物理和化学性质。

先进复合材料 (advanced composites)——专指可用于主承力结构或次承力结构、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碳纤维、碳纤维和芳纶等增强的复合材料。

碳纤维复合材料 (CFRP)——以碳或石墨纤维为增强材料的复合材料。

芳纶复合材料 (KFRP)——以芳纶为增强材料的复合材料。

玻璃纤维复合材料 (GFRP)——以玻璃纤维为增强材料的复合材料。

碳纤维复合材料 (BFRP)——以碳纤维为增强材料的复合材料。

短切纤维复合材料 (short cut fiber composites)——以短切纤维作为增强材料的复合材料。

混杂复合材料 (hybrid composites)——由两种或两种以上的增强材料增强同一种基体的复合材料。

超混杂复合材料 (supper hybrid composites)——由纤维增强材料和金属薄板共同增强同一种树脂基体的复合材料。

芳纶增强铝合金层压板 (ARALL层板) (aramid reinforced alumimun laminate)——由芳纶/环氧树脂预浸料和铝合金薄板交替铺层并经加热加压固化而成的层间超混杂复合材料。

玻璃纤维增强铝合金层压板 (GLARE层板) (glass fiber reinforced alumimun laminate)——由玻璃纤维/环氧树脂预浸料和铝合金薄板交替铺层并经加热加压固化而成的层间超混杂复合材料。

碳纤维增强钛合金层压板 (carbon fiber reinforced titanium laminate)——由碳纤维/树脂预浸料和钛合金薄板交替铺层并经加热加压固化而成的层间超混杂复合材料。

纳米复合材料 (nano composites)——某一组分或某一组分的某一方面达到纳米尺度的复合材料。

智能复合材料 (smart composites)——在复合材料内部植入传感、驱动、控制元件，能对外界环境变化作出适时、灵敏和准确响应的复合材料。

结构复合材料 (structural composites)——以承受载荷为主要目的的复合材料。

功能复合材料 (functional composites)——具有某种特殊功能的复合材料。

烧蚀防热复合材料 (ablative composites)——利用材料在高温下产生裂解、汽化、熔融蒸发、升华、浸蚀、炭化等物理化学变化导致材料表面的质量迁移而带走大量的热量，从而达到保护内部结构的复合材料。

隐身复合材料 (stealthy composites)——能够减少目标的雷达特征、红外特征、光电特征或目视特征等，达到隐身目的的复合材料。

透波复合材料 (wave transparent composites)——具有透过电磁波功能的复合材料。

阻尼复合材料 (damping composites)——能够吸收机械能并转化成其他能量形式，从而达到减小机械冲击和降低噪声等作用的复合材料。

梯度复合材料 (gradient composites)——构成材料的要素(组成和结构)沿厚度方向呈梯度变化的复合材料。

纺织复合材料 (textile composites)——由编织、机织、针织、缝纫等纺织技术制造增强材料预成形体，再经 RTM 等成型工艺制造的一类复合材料。

夹层结构 (sandwich structures)——在两层较薄的面板中夹有厚的轻质芯材层的一种结构。

芯材 (core)——夹层结构中夹在两层面板之间的轻质材料，它可以是金属蜂窝、非金属蜂窝或泡沫材料等。

面板 (faceplate)——在夹层结构中附于芯材之上，主要承受面内载荷、强度较高的薄板。

热固性树脂 (thermosetting resin)——具有网状交联分子结构，受热不熔融、不流动的有机高分子材料。

热固性复合材料 (thermosetting plastic)——以热固性树脂为基体的复合材料。

热塑性树脂 (thermoplastic resin)——具有线性或支链结构分子结构，受热熔融流动或软化、冷却后成为固体的有机高分子材料。

热塑性复合材料 (thermoplastic composites)——以热塑性树脂为基体的复合材料。

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分材料，如各种高强度、高模量纤维等。

基体 (matrix)——复合材料中在增强材料之间起传递载荷作用的粘接材料。

树脂体系 (resin system)——以树脂、固化剂为基本组成，同时添加增韧剂、促进剂、阻燃剂、稀释剂等其他必要成分所组成的复合材料基体。

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树脂。

酚醛树脂 (phenolics resin)——由酚、酚的同系物和衍生物与醛类或酮类缩聚而成的一类树脂。

双马来酰亚胺树脂 (bismaleimide resin)——由马来酸酐与二元胺合成的、以马来酰亚胺为活性端基的双官能团树脂。

氰酸酯树脂 (cyanate resin)——含有两个或两个以上氰酸酯官能团的酚衍生物树脂。

聚酰亚胺树脂 (polyimideresin)——分子链的重复结构单元中含有酰亚胺结构的聚合物。它包括热固性和热塑性聚酰亚胺树脂。

固化剂 (curing agent)——使树脂起交联反应的化合物。

促进剂 (accelerator)——在树脂固化过程中,能加快树脂固化反应速率、降低固化反应温度的物质。

稀释剂 (diluent)——在树脂体系中能降低树脂黏度,改善树脂工艺性能的化合物。稀释剂包括活性稀释剂和非活性稀释剂。

胶黏剂 (adhesive)——通过黏结作用使材料或结构结合成整体的材料。

胶膜 (adhesive film)——制成薄膜状的胶黏剂。

碳纤维 (carbon fiber)——含碳量不低于93%的纤维状材料。

石墨纤维 (graphited fiber)——分子结构已经石墨化,含碳量大于99%的碳纤维。

芳纶 (aramid fiber)——由芳香族聚酰胺制成的纤维或丝状物。

玻璃纤维 (glass fiber)——由硅酸盐熔体制成的纤维或丝状物。

石英纤维 (quartz fiber)——以高纯度天然石英(二氧化硅)为原料制备的一种玻璃纤维。

硼纤维 (boron fiber)——由非晶态或微晶态硼沉积在载体(如钨丝或碳丝)上制得的丝状物。

超高分子量聚乙烯纤维 (ultra-high molecular weight polyethylene fiber)——相对分子质量在 $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$ 之间的聚乙烯纤维。

聚对苯基苯并双噁唑纤维 (Poly-p-phenylene benzobisthiazole, PBO)——由聚对苯基苯并双噁唑纺制而成的具有高强度、高模量特征的一种有机纤维。俗称PBO纤维。

单向织物 (unidirectional fabric)——在一个方向(通常是经向)有大量的纤维束,而另一个方向只有少量细纱的织物,其性能呈现明显的单向性特征。

预浸料 (prepreg)——将树脂基体浸涂到纤维或织物上,通过一定的处理后贮存备用的中间材料。

热熔法预浸料 (melting prepared prepreg)——通过树脂基体加热熔融浸渍纤维束或织物制备的预浸料。

溶液法预浸料 (solution prepared prepreg)——通过树脂溶液浸渍纤维束或织物制备的预浸料。

粉末法预浸料 (powder prepared prepreg)——通过使树脂粉末吸附到加热的纤维束或织物上制备的预浸料。

预浸纱 (preimpregnated yarn)——将树脂基体浸涂到纤维上,通过一定的处理后贮存备用的中间材料。

织物预浸料 (fabric prepreg)——由织物浸渍树脂制备的预浸料。

单向预浸料 (unidirectional prepreg)——由并排纤维束浸渍树脂制备的预浸料。

单向带 (tape)——由相互平行的连续纤维或单向织物经浸渍树脂后形成的预浸料。

纤维束 (tow)——由多根单丝汇集成的一束纤维,单丝数从数十到数百万根不等。

示踪纱 (tracking yarn)——为识别织物的经纬向或纤维的方向,在预浸料或织物中植入的不同品种或颜色的纤维束。

织物 (fabric)——以纱线、长丝等为原材料,应用各种织造方法制造的片状物,它包括机织物、针织物、编织物及非织造布等。

三维多向编织物 (three dimensional multi-directional woven)——在三维空间由多向纤

维构成的织物。

纤维预制体 (fiber perform)——利用纺织技术制造的具有所需形状的纺织复合材料增强体。

纤维体积含量 (fiber volume content)——复合材料中纤维体积所占的百分数。

纤维质量含量 (fiber gravity content)——复合材料中纤维质量所占的百分数。

树脂体积含量 (resin volume content)——复合材料中树脂体积所占的百分数。

树脂质量含量 (resin mass content)——复合材料中树脂质量所占的百分数。

空隙 (void)——制造过程中留在复合材料制件中的气体所占的空间。

空隙率 (void content)——复合材料制件中空隙体积所占制件体积的百分数。

夹杂物 (inclusions)——制造过程中无意间带进制件中的杂质，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制件平均树脂含量高出较多的区域。它是复合材料的一种缺陷。

贫树脂区 (贫胶区) (resin-starved area)——复合材料制件中局部树脂含量较制件平均树脂含量低出较多的区域。它是复合材料的一种缺陷。

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，而引起材料性能下降现象。

退化 (degradation)——由老化、腐蚀、疲劳或应力等引起的材料性能下降。

龟裂 (crazing)——在复合材料的基体内或组分材料的界面处出现的细微裂纹。

横向裂纹 (transverse crack)——层压板中横向 (90°) 铺层内出现的基体或界面的开裂，该裂纹通常是最先一层破坏源。

吸湿 (moisture absorption)——材料在环境条件下吸进水分的一种行为。

吸湿率 (moisture content)——材料吸收的水分占其质量的百分数。

玻璃化转变温度 (glass transition temperature, T_g)——聚合物从玻璃态向高弹态转变 (或聚合物从高弹态向玻璃态转变) 的温度。在此温度下，复合材料的刚度和强度开始急剧变化。

界面 (interface)——复合材料中各独立的物理相之间的分界面。

脱胶 (debond)——由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)——由层间应力或制造缺陷等引起的复合材料铺层之间的脱胶破坏。

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存放时间。

纤维束强度 (bundle strength)——一束平行纤维的强度，通常用纤维束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。

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。

固化度 (curing degree)——表征树脂固化反应的程度，常用树脂中已经参与固化反应的官能团的摩尔数与树脂中应该反应的该官能团的总摩尔数之百分数表示。

固化时间 (curing time)——在固化成型过程中,使树脂在规定温度下完成固化所需的时间。

固化温度 (curing temperature)——在固化成型过程中,使树脂完成固化所需的温度。

成型温度 (moulding temperature)——固化成型复合材料制件所需的温度。

成型压力 (moulding pressure)——将复合材料坯件按照要求制成复合材料制件所必需的压力。

固化压力 (curing pressure)——在固化成型过程中,保证复合材料达到规定的技术要求所需的压力。

后固化 (postcure)——经固化基本定型的复合材料及其制件,为使其性能得到进一步提高而进行的的热处理。

共固化 (cocure)——复合材料不同制件在一次固化中同时完成固化和胶接过程的工艺方法。

二次胶接 (secondary bonding)——已固化的复合材料不同制件通过胶黏剂再次进行胶接固化使它们连接成一个制件的工艺过程。

B阶段 (B-stage)——热固性树脂处于未固化与完全固化状态之间的一个中间阶段,或称预固化阶段。

固化收缩 (shrinkage)——固化成型期间或固化成型后制件的尺寸收缩。

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或吸湿等引起的应力。

热压罐 (autoclave)——可按树脂基复合材料成型工艺规范要求加热、加压固化的设备。

真空袋 (vacuum bag)——一种为复合材料制件固化提供真空环境的外罩。通常由柔韧的聚酰胺、聚酯等薄膜或其他柔性材料制成。

透气材料 (breather)——一种纤维织物或纤维毡状辅助材料,用于复合材料固化成型时排出气体、保持真空袋内通路畅通。

吸胶布 (bleeder cloth)——固化过程中为吸出多余的树脂而放在制件表面上的特制玻璃布。

脱模剂 (mold release agent)——为使复合材料制件易与模具分离而涂于模具表面或加入树脂基体中的物质。

可剥保护层 (peel ply)——为保持制件表面清洁完整而置于待胶接表面的织物层,固化前将其剥掉。

均压板 (caul plate)——表面平滑的金属板,固化前置于一层压板上,以便在固化过程中使温度、压力传递均匀,并使固化后的层压板表面光滑。

铺贴 (layout)——制造复合材料制件过程中,用手工或机械按一定方向和顺序逐层铺放预浸料的过程。

模具 (tooling)——一种保证制件成型的工具。

架桥 (bridging)——一个或多个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。

随炉件 (processing control panel)——与制件的材料工艺过程相同,并在同炉固化成

型的一种层压板或试样件，用于对工艺过程进行监控以鉴定制件质量。

热压罐成型 (autoclave process)——用真空袋封装复合材料坯件组合件放入热压罐中，在加热加压条件下固化成型复合材料制件的一种工艺方法。

袋压成型法 (bag moulding)——利用柔性袋传递流体压力，将铺放在刚性单面模具上的复合材料坯件固化成型的工艺方法。

真空袋成型 (vacuum bag moulding)——利用塑料薄膜或橡胶片等柔性材料将铺放在模具上的复合材料坯件密封，通过抽真空使坯件各处均匀受压，并在一定温度下固化成型复合材料制件的工艺方法。

树脂传递模塑成型 (resin transfer moulding, RTM)——将纤维或其预成型体预先装入模具中，再注入液态的基体树脂，经固化成型复合材料制件的复合材料制造方法。

树脂膜渗透成型 (resin film infusion, RFI)——将基体树脂膜和增强材料预成型体装入模具中，通过加热加压、抽真空使树脂膜熔融浸渗增强材料并固化成型的复合材料制造方法。

模压成型 (compression moulding)——将一定量的预混料或预浸料坯件装入闭合模具中，在一定温度、压力下预混料或预浸料充满模腔固化成型的方法。

缠绕成型 (filament winding)——在控制张力和预订线型的条件下，将连续的、浸有树脂的纤维束（或单向带）或织物以一定的形式缠绕到芯模或模具上用以成型复合材料制件的一种方法。

拉挤成型 (pultrusion)——在牵引设备的牵引下，将浸渍树脂的连续增强材料通过成型模加热使树脂固化，连续生产复合材料的成型工艺。

搓卷成型 (table rolling process)——利用上台面的移动将放在下台面上的预浸料缠绕在芯轴上，然后经加热并借助于热收缩膜施加压力而制造管状制件的成型方法。

铺层搭接 (overlap lay-up)——在进行铺层拼接时，相邻铺层件之间有一部分成重叠状态的拼接形式。

自动铺带技术 (automated tape laying, ATL)——利用自动铺带机将一定宽度的单向预浸料按照设计要求逐次铺放到模具上形成复合材料坯件的制造技术。

自动纤维铺放技术 (automated fiber placement, AFP)——利用自动纤维铺放机将纤维束按照设计要求逐次铺放到模具上形成复合材料坯件或预成型体的制造技术。

预吸胶 (pre-bleeding)——在固化成型之前，在一定温度下，利用真空压力使复合材料坯件中多余的树脂排出的一种工艺过程。

预固化 (pre-curing)——在共固化或二次胶接的工艺过程中，将其中一个或多个零件预先进行完全或部分固化的工艺过程。

辐射固化 (radiation curing)——利用电磁波辐射使树脂进行固化反应的固化方式。最常用的辐射固化包括：电子束固化、紫外光固化、微波固化等。

纤度 (fibre number)——衡量纤维或纤维束粗细的程度，用一定长度纤维的质量来表示，纤维愈细，纤度愈小。通常采用1000m长的纤维的质量来表示纤度，即特 (Tex)。

树脂流动度 (resin follow)——在规定温度、时间和压力条件下，预浸料中树脂的流出量，以预浸料质量的百分数表示。

凝胶时间 (gel time)——树脂在一定反应温度下达到凝胶状态所需的时间。

适用期 (pot life, working life)——已经制备的树脂体系或预浸料保持其适用性的

时间。

铺覆性 (drape)——增强织物和预浸料对不规则形状模具的适应能力。

纤维面密度 (area weight of fiber)——单位面积预浸料的纤维质量。

浇铸体 (casting)——将树脂体系胶液倒入模腔中，按一定固化条件制得的树脂固化物。

加速老化试验 (accelerated aging test)——将试样置于比自然条件更加恶劣的人工环境中，快速测试其老化性能的试验。

黏性 (tack)——预浸料自身或与模具可粘贴的能力。

挥发分含量 (volatile content)——预浸料或预混料中可挥发物的质量百分数。

比模量 (specific modulus)——材料弹性模量（通常为拉伸弹性模量）与其密度之比。

黏温曲线 (viscosity-temperature curve of resin)——描述树脂体系的黏度与温度关系的曲线。

热变形温度 (heat distortion temperature, HDT)——聚合物在一定升温速率和规定载荷下，试样形变速率发生突变时的温度。

湿膨胀系数 (moisture expansion coefficient)——材料因吸收水分而产生的长度或体积膨胀量与原长度或体积的比值。

无损检测 (nondestructive testing, NDT)——在不损伤复合材料及其制件的情况下，为检测其内部缺陷所进行的试验。

剥离强度 (peel strength)——在剥离试验中，试样单位宽度上所承受的剥离力。

耐环境性 (environmental resistance)——复合材料抵抗其使用环境对其性能影响的能力。

耐化学药品性 (chemical resistance)——复合材料抵抗化学药品对其质量、尺寸和其他性能改变的能力。

工程常数 (engineering constants)——对单向及织物双向层压板进行单轴拉伸、压缩及纵横剪切试验直接测得的常数，包括拉伸、压缩、剪切强度和弹性模量，以及主泊松比。

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)——指铺层面内相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)——由正应力引起剪应变的一种耦合，是各向异性材料特有的。

拉弯耦合 (stretching-bending coupling)——由轴向力引起弯曲变形的耦合，也为各向

异性材料所特有。

弯扭耦合 (bending-twisting coupling)——由弯矩引起扭转变形的耦合, 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压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, 研究它们相互关系并进行分析的力学。

混合定律 (rule of mixtures)——表达复合材料性能与对应的组分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 (first-ply-failure)——多向层压板中有一个铺层最早开始出现破坏时的失效。此时对应的载荷可作为设计中的使用载荷。

层间应力 (interlaminar stresses)——层压板中与厚度方向相关的三个应力分量, 即 σ_z 、 τ_{zx} 、 τ_{zy} 。

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。

铺层 (lamina, ply)——复合材料制件中的一层单向带或织物, 是层压复合材料制件中一个最基本的单元。

铺层组 (ply group)——一组具有相同铺层角的连续铺层。

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。

铺层顺序 (ply stacking sequence)——铺贴中具有各种不同铺层角的铺层的排列次序。

铺层递减 (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情况。

层压板 (层合板) (laminate)——由单向或多向铺层压制而成的复合材料板。

对称层压板 (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压板。

均衡层压板 (balanced laminate)——铺层的各种特性和参数相同, 铺层角为 $+\theta$ 与 $-\theta$ 的铺层数相等的层压板。

均衡对称层压板 (balanced symmetric laminate)——既均衡又对称的层压板。

正交层压板 (cross-ply laminate)——只含有 0° 和 90° 铺层的双向层压板。

斜交层压板 (angle-ply laminate)——只含有 $+\theta$ 和 $-\theta$ 角铺层的双向层压板。

准各向同性板 (quasi-isotropy laminate)——面内各个方向的弹性常数相同的对称层压板。

层压板族 (laminate family)——一些具有相同铺层数和铺层角数, 但各种角度铺层的铺层比不同的层压板。

子层压板 (sub-laminate)——在层压板内一个可多次重复的多向铺层组合。

加筋板 (stiffened panel)——用各种形式的筋条 (型材) 增强的平板或曲板。筋条有

纵横之分。

使用载荷 (limit load)——正常使用中可能出现的最大载荷,在该载荷下结构不应产生残余变形。

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系数(一般取1.5~2)得到。在该载荷下结构刚开始或接近破坏。

使用温度 (service temperature)——复合材料结构在使用条件下,能保持其结构功能和使用功能的温度或温度范围。

安全系数 (factor of safety)——设计载荷与使用载荷的比值。

许用值 (allowables)——一个由试验数据经统计得出的允许使用的材料性能最大值。

A 基准值 (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 基准值 (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)——从大于5个或大于标准规定个数的试样做出的有效试验结果中得出的算术平均值。

平均值 (average value, mean value)——一组试样试验结果的算术平均值。

等代设计 (replacement design)——仅按强度、刚度要求等量代换原金属结构的一种设计方法,此法不能充分发挥复合材料的性能特点。

铺层设计 (layer design)——确定铺层数、铺层角、铺层顺序、各铺层角的铺层百分比以及铺层增减变化等的设计。

强度比 (strength ratio)——材料的强度极限与结构所受对应应力之比,有时也称为强度/应力比。

排序法 (ranking)——层压板按强度、刚度或其他特性分类排列的一种优化设计方法。

毯式曲线 (carpet plot)——层压板的单轴或纵横剪切刚度和强度为 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 (hygrothermal effect)——由吸湿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)——结构在规定的未修使用周期内,抵抗由缺陷、裂纹或其他损伤而导致破坏的能力。

损伤阻抗 (damage resistance)——材料和结构抵抗损伤的能力。

耐久性 (durability)——结构在规定时间期限内,抵抗开裂、应力、腐蚀、热退化、脱层、磨损和外来物损伤的能力。

偏差 (discrepancy)——一个允许的制造上的异常,可由计划的检测方法检出。偏差可能产生于加工、制造或装配的过程中。

缺陷 (flaw, defect)——加工、制造或装配过程中产生的制造上的异常。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。通常由机械加工、紧固件安装和外来物撞击等引起。

冲击损伤 (impact damage)——专指由外来物撞击引起的结构上的异常。

冲击后压缩强度 (compression strength after impact, CAI)——复合材料标准试验板

经规定能量冲击后进行压缩试验所测得的破坏强度值。

修理容限 (repair tolerance)——制件的缺陷或损伤需要与不需要修理, 能与不能修理的两个定量的界限。

使用保障 (supportability)——一个结构系统在结构寿命期内在规定环境条件下不受限制的使用所需要的综合量度, 其主要内容涉及可靠性、可检性和可维护性等。

可靠性 (reliability)——结构在规定的使用条件下或规定的寿命期内, 能承受载荷、环境并能正常工作的能力。

设计制造一体化 (design for manufacture, DFM)——利用信息与自动化技术, 将设计和制造技术融为一体的一种自动化设计与制造技术。

试样 (coupon)——一种小型的层压板试验件, 用于测定铺层、层压板或通用构件(如胶接或机械连接接头)的特性。

元件 (element)——一个复杂结构上的通用构件, 如蒙皮、长桁、承剪板或接头等。

细节件 (detail)——一个较复杂结构上的非通用构件。

次部件 (subcomponent)——一个较大的三维结构, 它可为全结构的一部分提供出完整的结构代表, 如梁段、盒段、壁板、翼肋、框架等。

部件 (component)——结构的一个主要部分, 如飞机的机翼、机身、垂尾、平尾等。它可作为一个完整的结构单元进行试验以鉴定该种结构。

适航性要求 (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。

符号说明

HT3 与 T300、AS4、HTA 性能相当的碳纤维

HT7S 与 T700、ST-3、TR40 性能相当的碳纤维

HT8 与 T800、M30SC、IM6、IM7 性能相当的碳纤维

HM4 与 M40、HM40 性能相当的碳纤维

HM4J 与 M40J、UM40 性能相当的碳纤维

A 面积、波幅

[A] 层压板的面内刚度矩阵

a 长度、裂纹长度、椭圆的长半径

[B] 层压板的耦合刚度矩阵

b 宽度、椭圆的短半径

C 夹层结构芯材的厚度

[C] 单向层压板中三维应力的模量矩阵

c 水分含量

D 直径

[D] 层压板的弯曲刚度矩阵

d 直径、距离
 $[d]$ 对称层压板的弯曲柔度矩阵
 E 弹性模量、第二类椭圆积分
 e 端距、湿热膨胀应变
 F 外力、应力空间中的强度参数，第一类椭圆积分
 f 挠度、频率
 G 剪切弹性模量、应变空间中的强度参数
 H 距离、厚度
 h 厚度、距离
 I 惯性矩、一阶不变量
 $[J]$ 坐标转换矩阵
 K 应力集中系数、屈曲载荷系数
 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
 p 压力
 Q 剪力
 $[Q]$ 单向层压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、子层压板的重复数
 S 剪切强度、静矩
 $[S]$ 单向层压板主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
 $[\alpha]$ 层压板的面内柔度矩阵
 β 角度、湿膨胀系数
 $[\beta]$ 层压板的耦合柔度矩阵

γ 角度、剪应变
 Δ 位移
 δ 位移、挠度
 $[\delta]$ 层压板的弯曲柔度矩阵
 ε 正应变、线应变
 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
 ν 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
 ϕ 角度
 Ψ 角度
 Ω 面积

上角标符号

$*$ 正则化
 $,$ 新轴、导数
 \circ 子层压板、面内、基本状态
 $+$ 顶面、正转换
 $-$ 底面、负转换
 T 矩阵转置
 m 机械
 n 非机械
 r 残余
 f 弯曲
 i 层间

下角标符号

x, y, z 分别为 x, y, z 方向
 $1, 2, \dots, i$ 分别为 $1, 2, \dots, i$ 方向或个数
 L 纵向
 T 横向
 cr 临界值
 max 最大

- min 最小
- t 拉伸
- c 压缩
- s 对称、面内剪切
- m 基体
- f 纤维、面板
- 0 单层

顶标符号

- 偏轴、矢量、等效

层压板的表示法

设计、研究和制造中常要用到层压板表示法，其规定应准确和简明，易于表达和理解，且方便图纸标注和生产制造。各种层压板的表示法详见下表。

层压板表示法

分 类	表示法	图 示	说 明					
一般层压板	[0/45/30/-45/90]	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">90</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">-45</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">30</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">45</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td></tr> </table>	90	-45	30	45	0	1. 每一铺层的方向用纤维与 x 轴的夹角示出,彼此间用“/”分开,全部铺层用“[]”括上; 2. 铺层按由下向上或由贴膜面向外的顺序写出
90								
-45								
30								
45								
0								
对称层压板	[0/90] _s	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">90</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">90</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td></tr> </table>	0	90	90	0	对称铺层只写出一半,括号外加写下标“s”,表示对称	
0								
90								
90								
0								
奇数层	[0/45/ <u>90</u>] _s	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">45</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">90</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">45</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td></tr> </table>	0	45	90	45	0	在对称中面的铺层上加顶标“-”,余同上
0								
45								
90								
45								
0								
具有连续重复铺层的层压板	[0/45 ₂ /90]	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">90</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">45</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">45</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td></tr> </table>	90	45	45	0	连续铺层的层数用数字下标示出	
90								
45								
45								
0								
具有连续正负铺层的层压板	[0/±45/90]	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">90</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">-45</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">45</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td></tr> </table>	90	-45	45	0	连续正负铺层以“±”号表示,上面的符号表示第一个铺层	
90								
-45								
45								
0								