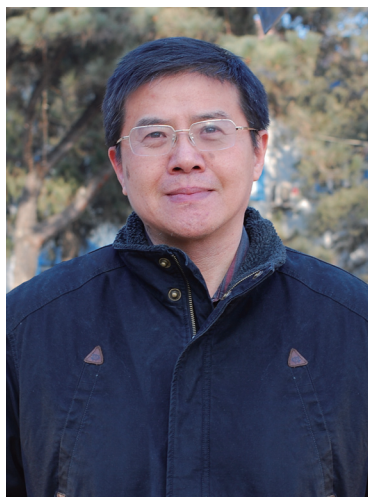


# 计算机模拟与复合材料整体化结构的接头设计

## Computer Simulation and Joint Design of Composites Integral Structure

中航工业北京航空制造工程研究所 戴 棣 胡孝才



戴 棣  
博士, 中航工业北京航空制造工程研究所研究员, 从事飞机复合材料结构和制造技术方面的研究工作。

将计算机模拟技术用于复合材料整体化结构的接头设计, 如将预期功效定位于结构参数变化对结构行为的影响作用, 可以起到很好的实际辅助作用。需要特别强调的是, 具体的应用背景会对结构参数的形式和变化范围提出具体的要求或限制范围。因此, 相关的模型和算法只有在与结构设计人员的反复互动过程中才能得到反复的完善, 从而获得真正符合设计人员需求的使用效益。

内应力, 但由于复合材料对层间应力的敏感性, 破坏则往往由此开始产生(图2)。层间应力导致的破坏模式是整体化结构接头的一个重要力学行为特点。有关接头承载能力的评估需给予特殊关注。

接头结构方案的合理与否, 取决于对相关结构参数影响作用的认知程度。这些参数既涉及接头的几何特征(如突缘的长度、填充区半径等), 同时包括接头各部位铺层的构成(如主铺层的数量、角度, 插层的数

航空复合材料结构中, 不同结构组分可通过共固化或胶接共固化途径结为一体, 以取代紧固件连接方式。此状态下, 在共固化或胶接共固化界面周边, 形成一个特殊的接头区。所谓复合材料整体化结构, 即为内含此类接头的复合材料结构型式, 图1给出了典型接头及其载荷示意。

在整体化结构接头内部, 由于载荷传递路径的特殊性, 有可能形成不容忽视的层间应力区(包括层间正应力和层间剪切应力)。该区层间应力在量值上可能小于结构承受的面

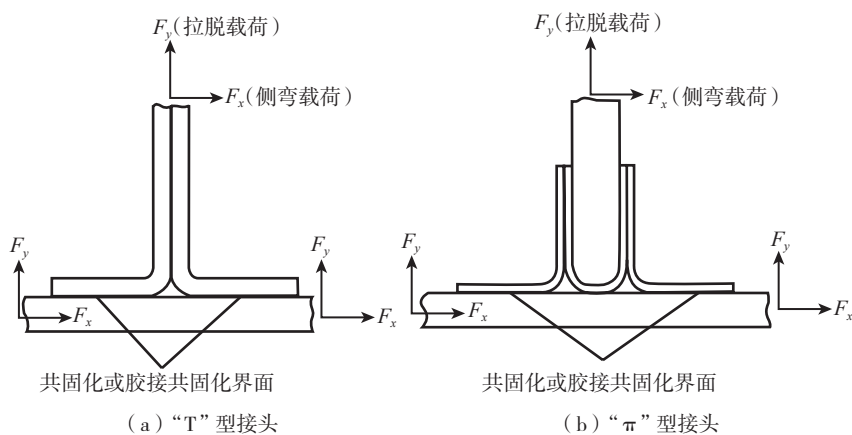


图1 典型的复合材料整体化结构接头示意

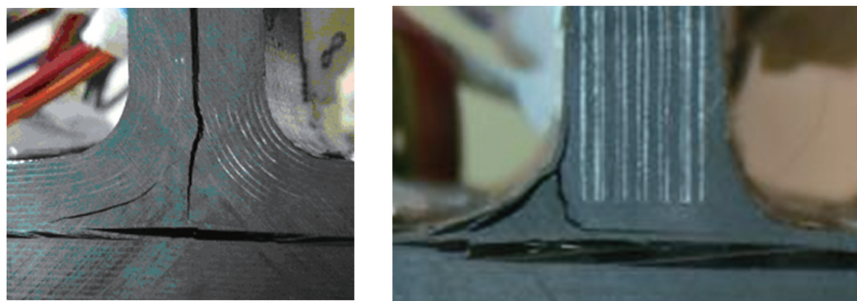


图2 接头部位因层间应力导致的破坏模式

量、角度、插入位置等)。一定载荷条件下,不同的参数组合方式会导致不同的应力分布状态。在设计给定的限制范围内,如何调配结构参数的组合以尽可能缓解层间应力水平,是提升接头承载能力的关键所在。

解决问题最直接的方法是设计一系列用以评估结构参数影响作用的试验。根据试验结果,确定最佳的结构参数组合方式。但面临的直接问题是试验工作量,其时间耗费和经济代价均不容小视。在此情形下,计算机模拟有可能成为解决问题的一条适宜途径。

### 接头力学行为分析模型的相关问题

由于接头形状的复杂性,其力学行为模拟的数值计算需通过有限元方法实现。因涉及层间应力问题,层合板理论和相应的层合板壳单元不再适用,建模的基础需回归到实体单元。

对层合复合材料结构进行三维分析,相对精确的处理方法是将各铺层假设为均匀的正交各向异性材料,网格的划分逐层进行。如此建模面临的一个主要技术问题是接头总体尺寸与单个铺层厚度之间的巨大差异。为控制每个单元各向尺寸的比例,不得不构建极为细密的网格,从而给网格划分计算和有限元求解造成一定麻烦。

针对上述问题,一种简化处理方法是多个铺层合并为一个在刚度

上等效的正交各向异性材料铺层,以此提升对单元尺寸起决定作用的铺层厚度,从而减少单元的总数量。但在采用这种方法时,需对两方面的问题作细致考虑。

(1)由多个不同取向正交各向异性铺层组成的叠层块的刚度行为,实际上无法与单一正交各向异性材料的刚度行为形成完全的等效。因此,即使仅就刚度而言,所谓“等效”也只是一种近似的替代。

(2)即便接受刚度等效引起的偏差,当将模型用于承载能力分析时,由于无法直接得到各铺层实际的应力分布,基于单层材料强度参数的破坏判据不能直接适用,从而不得不做相应补充工作。比如,结合理论计算和试验来形成等效材料的三维最大应变判据。或者,先通过对刚度等效模型的分析结果,确定一系列处于“危险”状态的单元。再基于“子模型”概念,对危险单元按其实际的铺层构成做进一步网格划分,并以刚度等效计算得到的节点位移为边界条件,求解各铺层的应力应变数据。经此处理后,可采用真实铺层的强度参数和相应破坏判据来对“危险”单元进行强度裕度评估,以此确定初始损伤单元和相应的载荷水平。

尽管存在上述简化处理方法,但在计算机硬件和计算时间允许的条件下,仍建议采用逐层网格划分的方法来进行分析模型构建,以尽可能保证数学模型与实际结构的近似性。

接头力学行为分析涉及的另一

个重要问题是破坏判据。实际上,很难建立一套单一的判据来对任何形式接头案例的破坏载荷实现精确预测。针对不同的接头类型和载荷形式,分门别类地形成相应的强度预测准则可能是提升预测准确度的唯一途径。但当上述条件不完备时,基于Hashin三维失效准则的破坏判据不失为承载能力预估的有效工具。但在分析结果的预期上,建议对以下因素加以考虑。

(1)当用于结构方案对比,或结构参数对接头承载能力影响作用分析时,所得预测结果可较好地反映真实的优劣状况或影响规律态势。当计算机模拟的目标定位于对结构参数影响作用的评估和对参数组合的优化时,采用按铺层细分的实体单元与Hashin三维失效准则相结合的方法,可得到有效的模拟或优化结果。

(2)就单个案例的计算结果而言,采用按铺层细分的实体单元与Hashin三维失效准则相结合的方法,所得到的破坏载荷预测值与试验值之间有可能很好拟合(差异小于10%),也有可能出现较大偏离(差异达到30%以上)。差异的原因一方面源于方法本身。比如,对厚度突变部位(如突缘端部)承载能力的预测值会低于实际情况。当初试破坏由该处应力主导时,接头的预测破坏载荷会相应偏低。另一方面,接头特殊的破坏模式和试验数量方面的局限,也可能成为导致差异的作用因素。接头的破坏多始于层间应力导致的脱粘或分层,这种破坏与结构局部的细观状态(如树脂含量、孔隙率、残余应力等)密切相关。相较于纤维破坏导致的结构失效,随机因素的影响作用显著突出。即便对于同一批试件,试验得到的破坏载荷数据也往往存在相当大的分散性。因此,合理评估算法对某一类接头案例评估的准确程度需基于大量试样的统计结果。单一试样的试验值与预测值的

对比往往缺乏普遍性的评判意义。

以初始损伤载荷还是破坏载荷来表征接头的承载能力,也是接头力学行为模拟涉及的一个具体问题。对破坏载荷的预测不存在特殊的技术困难。实际上,描述复合材料破坏过程的各种算法模型在许多工作中得到应用。但时间耗费是破坏载荷计算的一个主要问题。当分析目标是一个给定的结构案例时,计算时间的影响作用并不凸现。但当分析目标是结构参数变化的影响作用评估或结构方案的优化时,由于涉及大量案例的反复计算,采用破坏载荷作为承载能力表征会使计算时间的耗费变得难以接受。在这种情况下,建议采用初始损伤载荷作为目标函数。初始损伤载荷和破坏载荷分别处于破坏过程两端,一般情况下两者之间会存在差异,差异的幅度也随结构参数和载荷条件的不同而变化。但就结构方案的比较而言,初始损伤载荷的计算值可以切实反映承载能力的优劣状况。图3给出一系列不同形式、不同参数、不同载荷形式的接头案例,由试验测得的破坏载荷与通过计算得到的初始损伤载荷。从图3可见,在案例承载能力的横向比较上,初始损伤载荷计算值和破坏载荷

实测值反映了基本一致的优劣态势。

### 接头结构参数影响作用的评估与结构方案的优化

接头结构参数影响作用的评估与结构方案的优化是计算机模拟用于接头设计可以发挥的主要作用所在。

接头结构参数影响作用评估提供下述模拟结果:对于给定的结构方案,在给定载荷方式下,当结构的某项参数(如突缘的长度、填充区半径、插层的增减、某一插层的端部位置等等)发生变化时,其承载能力的变化趋势。

接头结构参数优化提供下述模拟结果:在给定的设计限制条件下(通常为各项参数的变化范围及载荷形式),以承载能力为目标,给出较优的参数组合。

进行接头结构参数影响作用评估时,算法的总体框架比较简单。仅需对所分析参数设置合理的变化区间,并在该区间内对参数进行离散处理,形成对应的接头结构案例。对案例逐一计算承载能力,可得到描述结构参数影响作用的函数曲线。根据曲线各部位斜率,可给出影响作用的评估结论。

当工作目标为接头结构参数的

优化时,算法所涉及的问题相对复杂。在设计给定的参数限制范围内,如各项参数作离散化处理,计算对象即成为离散事件的组合最优化问题。将基于启发式方法的现代优化算法纳入计算过程,理论上不存在绝对无法解决的困难。但由于接头结构参数的多变量特点,以及目标函数计算过程的复杂性(对可行解的目标函数计算实际上等同于对一个结构案例的有限元分析计算),即便采用初始损伤载荷作为承载能力表征,时间代价仍可能成为一个不容忽视的负面因素。要对这方面进行改善,算法设计需要寻求其他途径。一个建议方向是将试验设计方法引入模拟过程。其基本思路是参照试验设计理论(如 Taguchi 方法等),规划一系列反映不同参数组合的试验案例,把对每个案例的有限元计算结果视为一次模拟试验结果,根据各项参数的因子反应分析,来得到一个较优的参数组合结果。由于减除了优化搜索涉及的计算工作量,计算时间可得到显著缩短。

无论是结构参数影响作用评估,还是结构参数的组合优化,其实现过程共同面临的一个技术问题是有限元模型的自动构建。计算过程会生成大量反映不同参数组合的计算案例,每个案例均需根据特定的结构参数组合方式构建相应的有限元模型。显然,即便在各种建模工具的充分支持下,通过人工来完成每个模型的构建,实际上也是难以实现的。因此,根据特定的结构参数组合方式,来完全自动地实现接头有限元模型构建的计算程序模块,是实现模拟工作目标不可或缺的基本技术支撑。

自动建模算法须能根据一系列给定的几何参数和铺层参数,为接头内每一铺层(包括插层)和每一填充区构建合理的分析网格,同时满足各铺层网格相互结合部的节点共有要求。此外,需能准确构建每个单元的

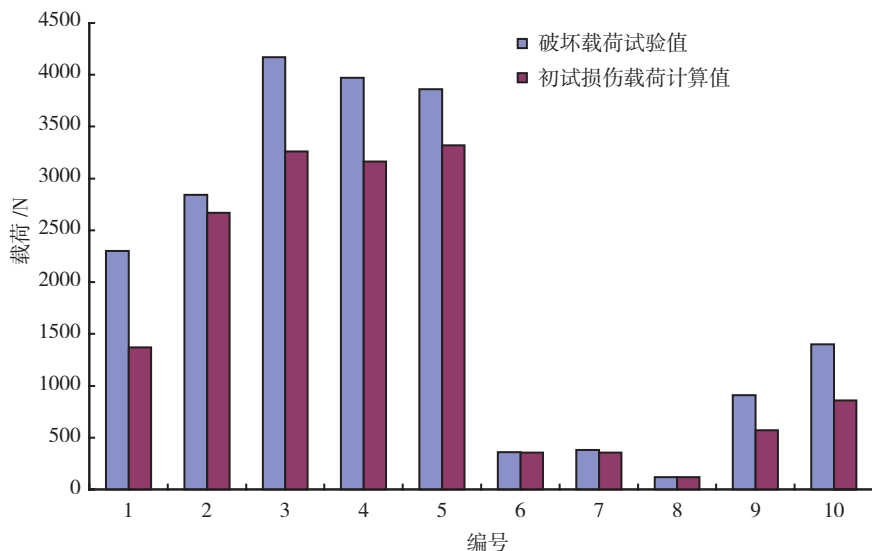


图3 10个不同接头安全的初始损伤载荷计算值与破坏载荷实测值

材料坐标系。图4给出通过专门设计的算法,在模拟接头突缘和突缘区底板内部增减插层对承载能力影响作用的计算过程中,自动生成了部分模型示意图。

应该指出的是,真实的结构应用场合中,在与图1平面垂直的方向上(以下简称为长度向),接头的长度一般会远大于如图4模型所示尺寸。图4所给模型实际上代表的是一个

从完整结构中截出的接头部分。通常,要对一个完整的接头结构(比如一个在长度向延伸2m的接头)进行模拟计算,从实用性角度看,相应的时间耗费很难被接受。因此,与结构元件试验相似,模拟计算希望借助一个与完整结构分离的元件模型来评估元件所反映的设计概念被用于完整结构的利弊得失。而在此状况下,如何根据完整结构的载荷状况来合

理设置模型各相关截面上的载荷或边界条件,是一个需要仔细斟酌的问题(比如,图4模型中与长度向垂直的前、后表面应施以何种边界条件?)。必要时,可通过对完整结构的粗略分析(如层合壳单元分析或尺寸相对较大的等效刚度实体单元分析)来得到每个相关截面上的节点位移状态,并将此作为元件模型的边界条件,以得到与实际应用环境更为相符的模拟和评估结果。

图5为一原始接头方案,在给定铺层比条件下增减其填充区周边突缘叠层厚度或底板叠层厚度,承载能力所受影响作用的模拟结果。可以看到,接头结构参数在一定范围内变化可对承载能力形成显著影响,并且影响作用会随载荷形式的不同而发生明显差异。由于本文的综述性质,此处不对影响作用的具体细节进行讨论,仅通过图例表明其复杂性。同时表明,对于接头的合理设计,模拟结果可提供方向性的参数修正依据。

## 结束语

将计算机模拟技术用于复合材料整体化结构的接头设计,如将预期功效定位于结构参数变化对结构行为的影响作用,可以起到很好的实际辅助作用。需要特别强调的是,具体的应用背景会对结构参数的形式和变化范围提出具体的要求或限制范围。因此,相关的模型和算法只有在与结构设计人员的反复互动过程中才能得到反复的完善,从而获得真正符合设计人员需求的使用效益。另一方面,如文中多次提及,计算时间的长短会非常显著地影响模拟方法的实用程度。对工程技术而言,“简捷”的重要性在许多场合并不亚于“精确”。两者虽往往不可兼得,但需时时兼顾。而对两者权衡的深思熟虑程度,有可能左右模拟方法或模拟工具在实际工程应用中的成败。

(责编 良辰)



图4 反映不同参数组合的一系列分析模型

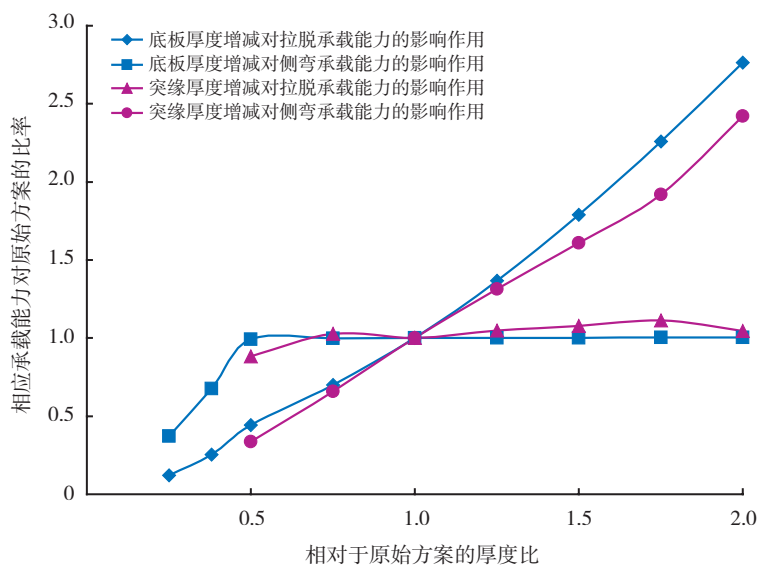


图5 一定铺层比条件下叠层厚度对接头承载能力的影响作用