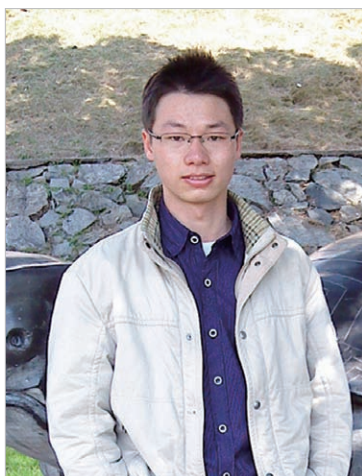


复合材料机械连接数值模拟技术

Numerical Simulation Technology of Mechanical Bonding for Composites

西北工业大学机电学院 张岐良 曹增强
中航工业成都飞机设计研究所 杨 军



张岐良

西北工业大学机电学院博士研究生,主要从事大型飞机制造中复合材料机械连接技术的研究工作。

复合材料可改善结构性能,具有显著的减重效益,在航空航天结构中已由次承力件发展为主承力件,且应用面逐步扩大。整体化和大型化是航空航天复合材料结构件的发展趋势。但目前而言,复材结构的连接问题仍然存在。机械连接安全可靠并可传递大载荷,所以在复材结构中应用广泛。然而孔的加工工艺会引起不可预测的初始损伤,破坏材料的连

由于复合材料的脆性、弹性和强度等性能参数的各向异性的特性,使得其无论是静载分析还是疲劳分析均比金属材料的分析复杂;层合板的层间特性和疲劳分析中材料性能的退化,更是加剧了问题的复杂性。应力分析的准确性、失效准则的合理性及材料性能退化准则的客观性,为数值模拟方法的可行性及其结果的可信性奠定了基础。

续性,对结构的完整性和承载能力带来不利影响;由于复合材料是脆性的各项异性材料,其孔周应力集中比金属严重得多。因此,连接部位通常是复材结构强度的薄弱环节。实验对复合材料机械连接进行全面可靠地分析,周期长、成本高;解析法只能处理简单的问题,对复杂结构的分析却无能为力。相比较而言,数值模拟方法可靠、成本低、效率高,还可考虑各种结构形式、载荷及边界条件非常适合于工程应用。本课题总结了数值模拟中的有限元法在复合材料机械连接中的应用。

影响因素

影响复材板机械连接接头力学行为的因素很多,有限元研究方面

主要有以下几点:(1)材料力学参数:单向层板的弹性和强度参数、铺层角及叠放次序、不同角度层的比例、复材性能的分散性、紧固件材料性能;(2)结构形式:搭接形式、开孔布局、端距或边距、搭接长度等几何尺寸;(3)紧固件:紧固件类型及尺寸、螺栓预紧力;(4)接触:钉孔间隙或干涉量、摩擦;(5)工作环境:温度、湿度等。

搭接形式

机械连接包括铆接、螺栓连接和销钉连接等。按板的搭接形式一般可以分为单搭接和双搭接。螺接的主要优点是易于拆卸、方便结构维护和适宜于传递大载荷的情形。紧固件(包括销钉、铆钉、螺钉或螺栓等)

的倾斜和弯曲、预紧力和板的次弯曲等因素,使得接头中的应力应变场呈三维分布,钉孔接触应力在板厚方向分布极不均匀,且存在很大的应力集中^[1-2]。复合材料是一种弹脆性材料,不像金属材料那样具有明显的塑性阶段,因此,应力集中对复合材料开孔处的影响更加明显。孔边的层间应力使其附近应力场三维效应更加明显,在很大程度上影响到接头的失效模式^[2]。

单搭、双搭接头是美国 ASTM 标准中关于复材机械连接性能测试的两种标准配置形式^[3],广泛应用于各种实验和数值模拟研究。由于飞机结构的大多危险部位均位于单搭接头,因此研究单搭接头比双搭接头更具代表性。然而,在单搭接头的两端施加拉伸载荷时,由于载荷的偏心,接头中产生附加弯矩,该弯矩使板发生面外变形,这就是所谓的“次弯曲”(Secondary Bending)效应^[4-6]。次弯曲是单搭接头的固有属性,不仅改变接头的局部应变场,还会降低连接板纵向刚度,影响其总体响应。

失效模式

由于材料性能的各向异性及接头所承载荷的复杂性等原因,复材层合板的失效模式极为复杂。相对来说,单向层合板的失效模式比较简单,也是最基本的,对复合材料结构的失效分析很有帮助^[7]。对于承受单向拉伸载荷的单层板,其层合板常见失效模式如图 1 所示^[3]。

其中拉伸失效、剪切失效以及挤压失效是因承受面内载荷而发生的;当承受面外载荷时,紧固件还可能从

接头中拉出,即所谓的“拉脱”。层板的拉伸失效与基体和纤维的拉伸失效有关,通常发生于宽径比很小,或者旁路载荷与紧固件承载比较大时。剪切破坏和挤压破坏则主要是由纤维和基体的压缩破坏引起的。拉伸破坏与剪切破坏是灾难性的,而挤压破坏则是随载荷和时间慢慢累积的,是结构局部的失效,不会带来结构的灾难性破坏^[8]。在以上几种破坏模式的基础上,随载荷及时间的变化,当结构挤压破坏后,还可能发生一系列后续的破坏^[9],如图 1 中的(d)和(e)所示。实际应用中复材接头可能存在多种破坏模式,发生混合破坏,使得接头设计和分析更加困难^[10]。

累积损伤分析

在有限元数值模拟中,将复合材料层合板的首层失效(First Ply Failure)作为其失效标准的分析偏于保守,因此,分析结构的最终失效(Last Ply Failure)对提高复材接头的使用效率具有更为重要的意义^[11]。累积损伤分析(Progressive Damage Analysis)通过采用材料参数退化模型能更加准确地反映接头的承载能力,而且还可模拟最终失效前初始损伤的产生及其扩展,是一种相对理想的模拟方法。累积损伤分析已广泛应用于复材层合板接头的各种受载分析中,如静强度^[12-14]、钉群连接钉载分配、蠕变、湿热效应、疲劳寿命预测及损伤失效^[15-16]、鲁棒优化分析^[17]等的研究中,为结构的合理设计提供了重要依据。应力分析、失效准则及材料性能退化准则的建立严重地影响累积损伤有限元模拟的结果。因

此,应力分析中应尽可能建立准确合理的模型,同时谨慎地选择失效准则和合乎实际的材料性能退化准则^[18]。

(1) 应力分析。

正确的应力分析是累积损伤分析的基础。由于复材性能的各向异性,不同方向角的铺层按一定顺序叠合在一起时会造成材料性能的不连续,数学上在板的自由边界处(包括孔边缘)存在应力奇异(Stress Singularity)^[19]。而材料强度是一定的,所以实验中的应力是有限值,不存在应力奇异。但是层间应力集中却是不可避免的^[20-21],显然,若计算偏差过大或应力集中处理不当(即应力分析不当),错误的失效判断使接头强度的预测也不准确^[22]。

(2) 失效准则。

复材的失效,无论是静载失效还是疲劳失效,大致上可分为由基体控制为主的失效或由纤维控制为主的失效两类,包括纤维拉伸、纤维压缩、纤维-基体剪切、基体拉伸、基体压缩、横向拉伸和横向压缩等^[18]。目前没有一个对于所有失效均可同时适用的失效表达式,一般对不同的失效机理需采用不同表达式作为其失效准则。经典的 Tsai-Wu 准则^[23]对判断首层失效是有效的,但无法识别失效模式;最大应力或应变准则可确定失效模式,但因未考虑各应力间相互作用而显得相对保守;Hashin 准则^[24]以二次多项式的形式,根据不同失效模式给出不同的失效表达式,在累积损伤分析中应用方便。另外,还有研究者将多准则混合使用,或者使用其他的或修正的失效准则^[25-27]。

(3) 材料性能退化准则。

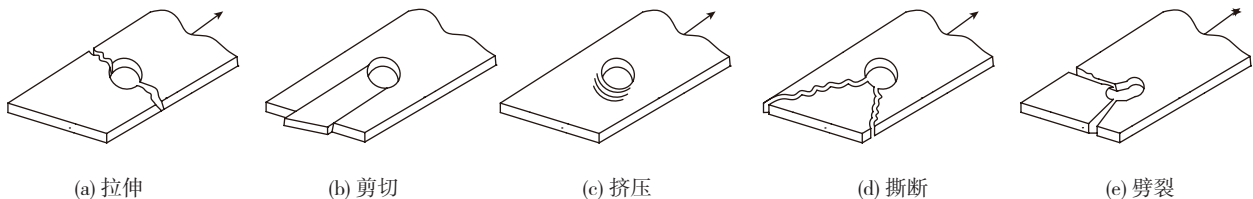


图1 承载试验失效模式

通过选取合适的失效准则判断出结构局部失效后,需适时地按照一系列材料性能退化准则(Material Property Degradation Rule)降低失效单元的材料性能,以使其对外部载荷做出与实际相符或足够接近的响应。静载和疲劳失效刚度退化的程度是不同的,层合板在最终失效之前,若使用静载失效准则,则不存在刚度退化的问题;若使用疲劳失效准则,则使用材料性能渐进退化(Gradual Material Property Degradation)方式。为便于说明,现考虑静载下的层合板,当载荷单调增至一定值时,若检测到某层失效,则失效区域的力学性能将发生突变,这是材料性能的骤变退化(Sudden Material Property Degradation)。对于承受疲劳载荷的层合板,当载荷循环次数少时,其疲劳强度高,不发生失效;随着循环次数的增加,材料性能逐渐降低,应对其渐进退化;循环次数继续增至一定值时,若检测到失效,则结构性能突变,应及时修改其力学参数^[18]。

(4) 特征曲线法。

结构发生初始破坏之后、最终破坏之前,在损伤累积及载荷重新分配过程中,包含多角度铺层的层合板一般仍具备继续承载的能力,也即初始损伤载荷低于极限载荷。由于孔边存在极大的应力集中,在预测接头的最终失效强度时,对所有单元进行失效评估的方式显得过于保守,为此,相关研究人员发展了特征曲线法(Characteristic Curve Method)。Waddoups等^[28]提出“等价缺陷”(Equivalent Flaw)的概念,利用线弹性破坏力学方法预测带应力集中的复材结构的最终失效,其模型考虑了结构最终失效前已存在非灾难性损伤,层板的强度由固有缺陷(Inherent Flaw)区域的长度 a 和无孔板纵向拉伸强度两个参数来评估。Whitney与Nuismer提出了两种替代模型^[29]:

· 点应力模型——距离孔边界

一定距离 r_{or} 的点的应力达到无孔板的强度 X_T^r 时发生最终失效;

· 平均应力模型——距孔边界一定距离 \bar{r}_{or} 范围内的平均应力达到无孔板的强度 X_T^r 时发生最终失效。

Chang等^[30]将Whitney与Nuismer的特征距离的概念应用到复材接头的强度预测当中,H.A. Whitworth等^[31]也将其应用到销钉连接复材接头的强度预测中。Jin-Hwe Kweon等^[32]则提出了一种利用有限元方法确定特征长度的方法,完全脱离了特征长度的测试试验,大大节约了分析成本和时间。利用特征曲线法预测结构强度时,首先根据应力分析确定拉伸和压缩特征长度,进而确定特征曲线,然后对特征曲线上的单元进行失效评估,检测到失效时的外载便是结构的失效载荷。特征曲线法在复材接头强度预测中具有很明显的优势,可以得到与试验接近的结果。

多钉连接载荷分配

为了传递更大的载荷,工程中常使用多排紧固件的接头。复材的脆性、力学性能的各向异性等特点,使得多钉接头从开始加载到加载至极限载荷的整个过程中,各钉排载荷分配一直严重不均匀。由于相对承载大的钉孔最先发生破坏,层合板的性能无法得到充分发挥,大大降低了连接效率^[33]。谢鸣九^[34]研究了2~10排钉连接的各钉排的承载比例,发现钉排数越多,中间的钉排承载越小,多于4排钉的连接对降低最严重钉排承载比例的作用很小;杨晓宇等^[35]研究了不同刚度板的连接,其钉载分配类似,但不再对称,载荷向刚度大的板一侧的螺栓上转移;P.J. Gray等^[5]研究了钉孔间隙对钉载分配的影响,发现只有当接头的钉孔间隙被消除后,间隙配合的孔才开始承

载,间隙量越大,其开始承载越滞后;Johan Ekh等^[6,36]研究了钉孔间隙、螺栓预紧力及摩擦等因素对钉载分配的影响,发现间隙量对钉载分配影响最大,任何微小的改变都将使载荷向间隙最小的紧固件上转移,还发现提高紧固件的刚度将使离其最近的紧固件上的一部分载荷向该钉上转移。鉴于间隙量对钉载分配的影响,当具有不同湿热膨胀性能的板相互连接时,温度、湿度对钉载分配也起着不可忽视的作用,复材连接钉载分配中的湿热效应还有待深入研究。

结束语

数值模拟技术是一种新且有效的求解各种工程问题的近似方法,研究人员已成功将该技术应用到了复材机械连接技术的相关分析中。由于复合材料的脆性、弹性和强度等性能参数的各向异性的特性,使得其无论是静载分析还是疲劳分析均比金属材料的分析复杂;层合板的层间特性和疲劳分析中材料性能的退化,更是加剧了问题的复杂性。应力分析的准确性、失效准则的合理性及材料性能退化准则的客观性,为数值模拟方法的可行性及其结果的可信性奠定了基础。

在后续的研究工作中,应该建立起可视化的、参数化的有限元分析软件包,以简化复材机械连接分析的过程。该软件包不但要为复材分析提供专门的良好交互式建模、后续处理的GUI界面、丰富的材料库、目前研究中常用的失效准则和材料性能退化准则,而且还应为用户自定义材料、失效准则和退化准则提供简单易行的接口,以降低对分析者的专业性的要求,避免分析准确度过度地依赖使用者的经验。

本文有参考文献36篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 三丰)