

复合材料层合板沉头螺栓 连接研究进展*

Research on Development of Composites Laminate Countersunk Bolt Joint

北京航空航天大学航空科学与工程学院 孙永波 程小全 张纪奎



孙永波

北京航空航天大学飞行器设计专业硕士研究生,研究方向为复合材料连接结构分析与设计技术。

复合材料由于其具有比强度高、比刚度大以及可设计性强等优点,在航空航天以及其他工业领域中得到了越来越广泛的应用。作为现代飞行器结构主要材料之一,无论是对于民用还是军用飞行器来说,复合材料

随着复合材料在航空航天等领域的广泛应用,复合材料沉头螺栓连接研究受到了工程界的关注,但是在实际工程中仅通过数值方法或试验方法难以给出有效的结果。而通过将数值模拟技术与试验方法相结合,可以有效地分析出沉头螺栓连接各因素对载荷分布和力学性能的影响。这对于实际工程中提高复合材料沉头螺栓连接的结构效率有着非常重要的意义。

在飞行器结构上的用量已成为衡量飞行器结构先进性的一个重要指标。国际上最新研制的大型客机复合材料用量已经突破了 50%,如波音 787 的复合材料用量在 50% 以上,空客 A350XWB 的复合材料用量预计为 52%。

机械连接具有安全、可靠、传递载荷大等突出优点,在飞行器复合材料主要受力结构中有很大的应用。由于先进复合材料自身的脆性与力学性能各向异性等特点,使传统的凸头多钉连接从开始加载到极限载荷的整个过程中,各钉的载荷一直存在分配不均的情形。相对承载较大的钉孔或螺栓首先发生破坏,连接层合

板的力学性能无法充分发挥出来,因此大大降低了结构的连接效率。其次,对于飞机结构的某些部位,如蒙皮等,传统的凸头连接难以满足气动外形光滑度的要求。而复合材料结构沉头螺栓连接不仅可以保持飞行器结构表面的气动外形,而且由于钉头的压紧作用可以改善多钉载荷分配的不均匀性,消除边缘螺钉(或螺栓)载荷过大的现象,提高连接的承载能力^[1]。因此,研究和掌握复合材料结构沉头螺栓连接的承载方式、载荷分配特点及其影响因素,对于提高连接结构的承载能力,降低结构成本与重量,充分发挥复合材料的优势具有重要的工程意义。

* 北航凡舟基金青年基金(20090506)项目资助。

试验研究

航空飞行器结构的破坏大都发生在开口及连接部位,因此结构连接设计通常是飞行器结构设计重点与难点所在。单搭连接是飞行器结构连接最常用的机械连接形式。单搭连接结构在面内载荷作用下,由于载荷作用在不同平面上,因而导致该接头产生附加弯矩和面外变形,即次弯曲。图1为附加弯矩引起试验件产生次弯曲示意图。次弯曲是单搭连接结构的固有属性,它会改变接头局部应力、应变场,影响连接结构的强度。因此,单搭连接比双搭连接结构的力学性为更复杂,更具有工程实际意义。

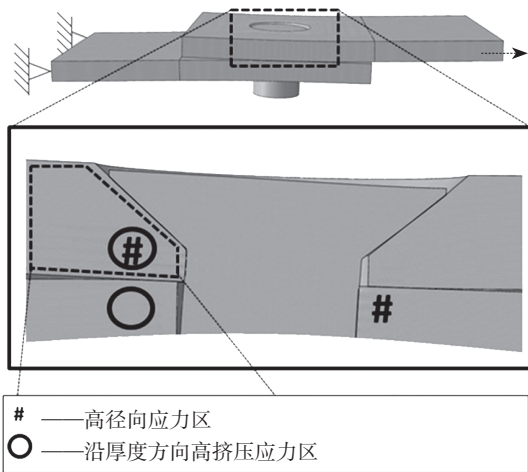


图1 某沉头螺栓连接试验件附加弯矩引起次弯曲示意图

研究复合材料沉头螺栓连接主要有3种方法:解析法、试验法和数值模拟法。其中解析法应用较少,多用于计算分析应力集中区应力峰值或铺层承载特点,通常只能解决简单连接问题^[2]。由于该方法工程实用价值不大,故在此不予讨论。

试验研究通常是对复合材料层合板沉头螺栓连接结构等速加载,观察其损伤、变形情况,并记录载荷-位移(应变)曲线以及破坏强度。

对于多钉沉头螺栓连接试验还需要测量试验件某些部位的应变,以确定钉载分配。这项试验的难点在于沿试验件厚度方向上的应变分布通常是不均匀的,而现有的技术手段通常只能测量出试验件表层的应变分布,因此很难计算出每个螺栓所承受和传递的载荷。除此之外,试验研究成本高、耗时长、对实验件的加工要求严格,难以对影响钉载分配的众多因素进行系统分析。因此,多数研究者都是把试验测量的结果用于验证或修正数值模型,然后通过数值模拟分析研究复合材料层合板沉头螺栓连接的影响因素、破坏机理以及钉载分布。

数值模拟研究

复合材料层合板沉头螺栓连接结构数值模拟研究,通常首先通过对比试验与数值模拟所得到的连接结构的载荷-位移曲线以及层合板表层应变分布等结果验证数值模型的有效性。然后,根据数值模拟的结果,研究连接结构应力、应变分布以及被连接层合板孔边的损伤情况,并且能够直观地给出危险部位,得到试验中无法测量的数据或力学性能特征。进一步还可以分析复合材料沉头螺栓连接结构的影响因素,提出高效连接结构的设计方法。

图2为某复合材料层合板沉头螺栓连接单搭接有限元建模示意图。单元类型的选择和位移边界条件的定义,对于复合材料沉头螺栓连接结构有限元分析结果有着重要的影响。在选择单元类型时,必须要考虑计算量的大小和计算时间的长短^[2]。连续壳单元能够准确反映连接件的几何尺寸,因此非常适用于复合材料层合板连接结构有限元分析。另外,与三维实体单元相比,使用壳单元的有限元模型计算效率高,并能反映铺层面内损伤情况^[3]。试验中连接结构分层的位置主要发生在沉头孔起始处,所以这一位置的铺层要采用粘性层(Cohesive Element Layer)。对于螺栓和螺母一般按刚性处理,因为一般情况下螺栓和螺母不会发生破坏^[3]。

由于在接触模型中使用二次元素(Quadratic Elements)的不准确性,所以要选用线性元素(Linear Elements)。但是,在弯曲情况下,边缘上的线性元素不能反映材料的物理特性,并且会由于“剪切自锁(Shear Locking)”造成虚假的剪应力。剪切自锁还会使所建立的模型刚度过大^[4]。通过Abaqus创建的模型,模型本身的不协调性会增加自由端的角度,进而改善全积分线性单元(Fully-integrated Linear Elements)

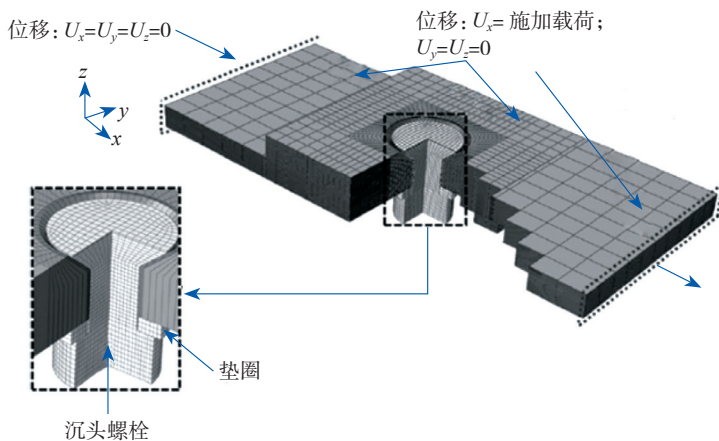


图2 某复合材料层合板沉头螺栓连接三维有限元模型示意图

的弯曲性能, 缩减积分线性单元 (Linear Elements With Reduced-Integration), 如 C3D8R, 还可以用于处理高强度问题, 但是单元没变形时会导致连接模型的网格畸变^[5]。所以 C3D8I 单元可以用在全部区域。而在高应力产生区使用协调模式下的全积分线性单元 C3D8I, 在别处则使用少量 C3D8R 单元^[5]。

边界条件如图 2 所示, 一端固支, 另一端沿 X 轴方向受拉。连接对称性不能用来减小模型尺寸, 偏轴铺层的存在会导致孔边接触压力不对称分布。因此不能采用对称方法减小模型尺寸和计算时间。

在材料属性选择当中, 层合板使用均质化准各向同性材料, 但对于沿厚度方向是变强度的层合板不能使用均质化准各向同性材料属性, 因为需要解决接触问题和给出单搭接沉头螺栓连接的力学特征。每个铺层使用正交各向异性材料和实体单元。均质化层合板性能通过使用有限元分析和层合板理论获取。

接触条件是通过一对相互作用接触面来定义的。定义的从表面不能侵入相对应的主表面。使用面到面离散化方法通常可以防止面侵入, 并且比使用节点到面离散化方法得到更准确的结果。一般来讲, 把强度较高的零件表面定义为主表面, 并且使用较大的网格。主表面与从表面的设定如图 3 所示^[2]。而模型运算中会遇到接触抖动。这种状况的出现是由于从表面上的节点在开与合

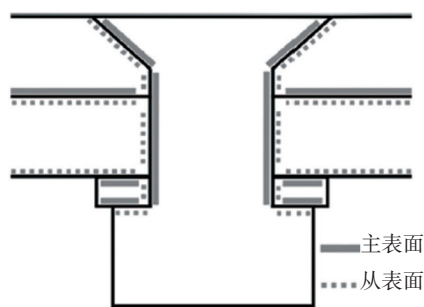


图3 沉头螺栓连接模型主从面的定义示意图

之间不断的改变, 导致相互作用严重中断, 引起不收敛。解决这一问题首先要考虑自动侵入容限, 然后通过使用非对称方式和稳定节点改善计算收敛性。而被选为稳定的节点粘性阻尼引起的能量损失可以忽略不计^[5]。

沉头连接的影响因素

总结试验和数值研究的结果可以发现, 影响沉头连接载荷分布的主要因素有钉孔间隙 CL 、螺栓沉头比 HT 、连接结构的尺寸和刚度、复合材料层合板的铺层、螺栓弯矩 BT 和上下板间摩擦力等。

(1) 钉孔间隙 CL 。

装配误差和加工精度等因素的影响, 会导致钉孔间隙的出现, 而钉孔间隙的存在会使螺栓承载时间滞后, 导致最终承受载荷变小。间隙增加会导致承压应力急剧减少, 明显降低极限应力, 引起上下板间接触面即剪切面附近的损伤, 并且损伤区会从边缘损伤区变为角度损失区, 这种损伤继续扩展即会引起分层。间隙的存在还会使试验件受载时在剪切面产生很高的应力区, 而且还会在相应应力区域沿厚度方向产生裂纹。但是随着间隙的增加, 远离孔边的损伤裂纹的长度会减少。

间隙的存在会使得中心截面的应力显著增大, 但是进一步增加间隙并不能使径向应力持续增加。而沉头孔边起始区应力却会降低, 使得剪切面应力进一步增大。这是剪切面损伤加剧的原因, 同时也是模型有无间隙时力学特征最大的区别^[6]。

(2) 螺栓沉头比 HT 。

螺栓沉头比 HT 即是沉头高度

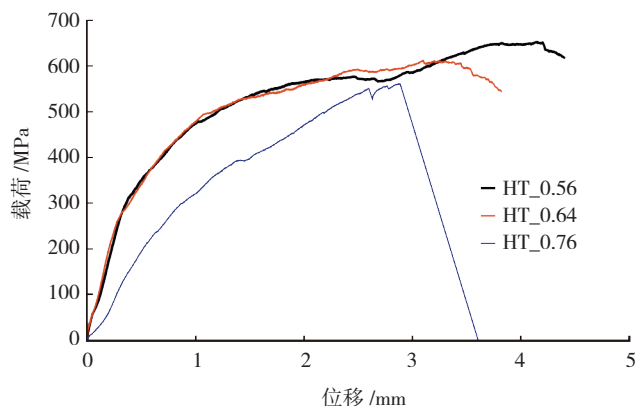


图4 不同螺栓沉头比下的载荷位移曲线

H 与层合板厚度 T 的比值。图 4 是不同螺栓沉头比下的载荷位移曲线示意图, 从图中可以看出当 HT 从 0.56 增加到 0.64 时, 对承压应力和破坏应力影响都很小, 但是增大到 0.76 时会使承压应力显著降低, 弯曲位移明显增加。原因在于产生偏心距的直边区域承载了主要的载荷^[3]。增加沉头比会加剧剪切面附近沿厚度方向的损伤, 并且上层板直边缘出现角度损伤, 但是不会产生分层。同时还可以看出, 增加沉头比会减缓因纤维拉伸破坏而引起的孔边剪切损伤的提前发生和加剧。增加螺栓沉头比使得沉头区径向应力成倍的增加, 也使得剪切引起的裂纹加密, 但是并不意味着沉头比对弯曲应力和极限应力具有敏感性^[6]。

(3) 螺栓弯矩 BT 。

在实际结构装配中, 会对螺栓施加预紧力, 而预紧力会转变成螺栓弯矩。提高预紧力会引起剪切应力的显著增加, 但是对极限应力影响很小。同时会减少上层板损伤区的长度, 增加下层板的损伤, 对于孔边附近的损伤影响不明显^[6-7]。图 5 是不同螺栓弯矩下的载荷位移曲线。从图中可以看出增加螺栓弯矩可以增加载荷位移曲线线性段的长度^[2]。

(4) 连接件尺寸与刚度。

连接件尺寸与刚度主要影响的是边界条件, 如果下层板是金属材料并且厚度较大, 那么螺栓近似处于固

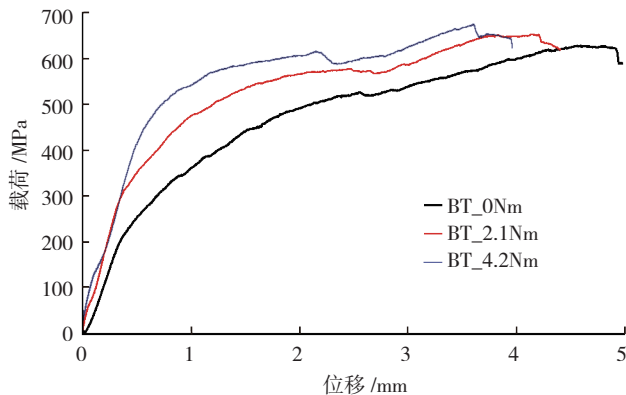


图5 不同螺栓弯矩下的载荷位移曲线

支状体,破坏形式为拉剪;如果下层板厚度较小,那么由于受载时会引起次弯矩,所以破坏形式为剪弯。

(5) 复合材料层合板铺层方向。

由于存有间隙,只有与螺栓发生接触的铺层才能传递载荷。其中 $\pm 45^\circ$ 铺层用来传递径向载荷, 0° 铺层随着轴向载荷线性增加,并且会产生最大应力峰值,对于传递轴向载荷十分有效^[8]。其中对于对称层合板,最大应力主要发生在第一个和最后一个 $\pm 45^\circ$ 铺层^[9]。

(6) 其他因素。

摩擦力的存在使部分载荷可以通过连接板之间的摩擦力来传递,这样就减少了螺栓所传递的载荷,有助于提高结构的连接强度。

总结与展望

随着复合材料在航空航天等领域的广泛应用,复合材料沉头螺栓连接研究受到了工程界的关注,但是在实际工程中仅通过数值方法或试验方法难以给出有效的结果。而通过将数值模拟技术与试验方法相结合,可以有效地分析出沉头螺栓连接各因素对载荷分布和力学性能的影响。这对于实际工程中提高复合材料沉头螺栓连接的结构效率有着非常重要的意义。现有的研究工作表明:

(1) 复合材料层合板中 $\pm 45^\circ$ 铺层主要用来传递径向载荷, 0° 铺层主要传递轴向载荷,所以增加

$\pm 45^\circ$ 和 0° 铺层的比例可以提高连接效率。铺层方式对称的层合板,最大应力主要发生在第一个和最后一个 $\pm 45^\circ$ 铺层。

(2) 在影响沉头连接载荷分布的因素中,钉孔间隙 CL 的影响最为显著,其次是螺栓沉头比 HT 和铺层方向,所以研究和选择恰当的钉孔间隙、螺栓沉头比和铺层对提高连接结构承载效率非常重要。而无论增加或减少螺栓弯矩对极限应力的影响并不明显,但是会显著影响剪切应力。摩擦力参与载荷传递,有利于提高连接结构的连接强度。

(3) 在整个试验件破坏过程中,分层主要发生在层合板沉头孔起始端,纤维基体脱离主要发生在层合板通孔起始端。数值模拟分析中,高正应力和剪切应力主要发生在沉头孔周围区域。

(4) 在满足强度要求前提下,由于钉头的压紧作用使得沉头螺栓比凸头螺栓承受更多的载荷,传递效率更高。

虽然国内外有关复合材料结构沉头螺栓连接的研究工作已经开展了一些(国内相对较少),但还有许多问题需要进一步研究解决。

(1) 间隙对载荷分布和力学性能影响显著,微小的钉孔间隙变化就会对载荷分配产生巨大影响。湿热环境会使连接结构发生膨胀或者收缩,对钉孔间隙的影响很大,所以研

究湿热环境对复合材料沉头螺栓连接的载荷分布及力学性能的影响还有待深入研究。

(2) 间隙的存在使得螺栓与孔之间的接触面积发生变化,对于疲劳性能的影响尚不清楚。

(3) 螺栓沉头角度对沉头面所受的径向应力影响很大,对载荷分布和力学性能的影响有待研究。

(4) 迄今为止,国外只对单钉沉头螺栓连接进行了研究,还没有多钉连接的研究结果。多钉连接结构的力学性能和钉载分配,以及影响它们的因素也需要开展进一步的研究。

参考文献

- [1] 王耀先. 复合材料结构设计. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [2] Egan B, McCarthy C H, McCarthy M A, et al. Stress analysis of single-bolt, single-lap, countersunk composite joints with variable bolt-hole clearance. *Composite Structures*, 2012, 94(3): 1038-1051.
- [3] Chisht M, Wang C H, Thomson R S, et al. Experimental investigation of damage progression and strength of countersunk composite joints. *Composite Structures*, 2011, 94(3): 865-873.
- [4] Huhne C, Zerbst AK, Kuhlmann G, et al. Progressive damage continuous degradation models. *Compus Struct*, 2010, 92: 189-200.
- [5] Abaqus-Inc. Abaqus user manual, Version 6.9 Dassault Systemes Simulia Corp, Providence, RI, USA, 2009.
- [6] Starikov R, Schon J. Quasi-static behavior of composite joints with countersunk composite and metal fasteners. *Composites*, 2001, 32: 410-411.
- [7] Chishti M, Wang C H, Thomson R S, et al. Numerical analysis of damage progression and strength of countersunk composite joints. *Composite Structures*, 2012, 94: 643-653.
- [8] Benchekchou B, White R G. Stresses around fasteners in composite structures in flexure and effects on fatigue damage initiation part 2: countersunk bolts. *Composite Structures*, 1995(95): 0263-8223.
- [9] Irman T. Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints. *Compus Struct*, 1998, 43: 195-216.

(责编 亦非)