

复合材料结构凸头多钉连接钉载分配研究进展*

Research Progress of Load Distribution in Multi-Bolt Composites Protruding-Head Joint

北京航空航天大学航空科学与工程学院 吕光全 程小全 张纪奎

[摘要] 连接部位通常是复合材料结构强度的薄弱环节,复合材料的多钉连接更是由于存在钉载分配不均匀性而大大降低了其连接的强度。通过研究复合材料连接结构钉载分配,找出钉载分配规律及其影响因素,合理设计连接结构而使载荷分配均匀化,对于提高多钉连接结构的效率有着重大的工程意义。

关键词: 复合材料 凸头连接 多钉连接 钉载分配

[ABSTRACT] The strength of joint is usually the weak point of composites structure. Up to multi-bolt composites joint, the strength of joint is greatly reduced due to the unequally load distribution. Research of load distribution in multi-bolt composites joints is carried out in order to identify the influence factors of load distribution. Reasonably designed joint structure can contribute to even load distribution, which has a great engineering significance for improving the efficiency of multi-bolt joint structure.

Keywords: Composites Protruding-head joint Multi-bolt joint Load distribution

随着飞机的更新换代,复合材料在飞机结构中的应用比重得到了稳步的增加。复合材料最初只应用在飞机非受力构件和次要受力结构中,现在复合材料越来越多地应用在主要受力构件中。相对金属结构,复合材料虽然具有提高结构整体性的优越条件,但是由于设计、工艺和使用维护等方面的需要或限制,还是必须安排一定的设计和工艺分离面、维护口盖和多种外挂接口等,这些部位的载荷传递必须有相应的连接方式来解决。

机械连接是最常用的一种连接形式,它有着传递载荷大,连可靠,工艺简单,可拆卸等诸多优点。工程中为了传递大的载荷,经常使用多个钉来连接构件。通常情况下,连接结构间由于材料、尺寸等参

数的不对称会导致多钉连接时各钉的载荷分配不均匀。在金属材料多钉连接中,承担大载荷的钉孔会先出现塑性区,使各钉载荷重新分配,各孔的承载趋于均匀;而在复合料连接中,由于复合材料本身是一种脆性材料,试验发现,它基本不存在塑性区,这样就使得在复合材料多钉连接时,各钉载荷不会随着总载荷的增加而重新配,而出现钉载分配严重不均匀性。载荷分配的不均匀性将会导致承载较大的钉孔已经出现损伤甚至破坏时承载较小的钉孔还远远没有达到损伤状态,因而严重降低了连接结构的传载效率。通过研究复合材料多钉连接的钉载分配,找出钉载分配规律,合理设计连接结构以达到最大的载荷传递效率,对于提高复合材料连接结构的承载效率,充分发挥复合材料的优势有着重大的意义。

1 试验研究

复合材料机械连接主要有 2 种:沉头螺栓连接和凸头螺栓连接。其中沉头螺栓连接所涉及的接触问题更为复杂,关于沉头螺栓多钉连接的研究也相对较少^[1],本文中只讨论凸头螺栓连接的情况。

研究复合材料多钉连接的载荷分配主要有 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,并且通常只能解决简单问题,在此不予讨论。

复合材料多钉连接载荷分配问题的试验研究通常是在试验机上等速加载多钉连接结构,观察其变形并记录载荷-位移曲线和破坏强度,除此之外还需要在关键位置测量应变以确定钉载分布。如图 1 所示为某复合

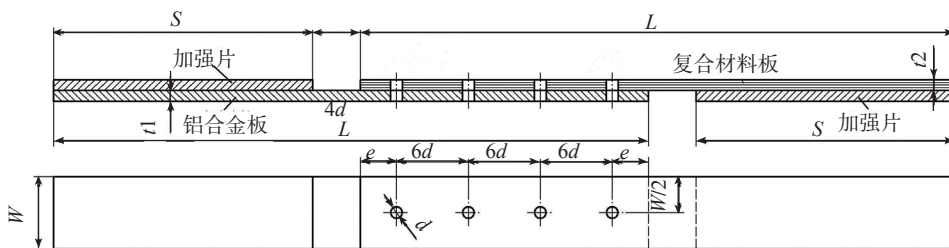


图 1 某 4 钉连接试验件示意图

Fig.1 Diagram for a four bolts joint test piece

材料与铝板四钉连接单搭接试验件示意图,该试验的难点为确定钉载分布,现有技术手段通常只能测量试验件

* 北航凡舟基金青年基金项目(20090506)资助。

表层应变分布,而试验件沿厚度方向上的应变分布通常都是不均匀的,因此很难计算出每个钉所传递的载荷。除此之外,试验研究成本高,耗时长,对试验件的加工要求严格,难以对影响钉载分配和强度的众多因素进行系统的分析^[2]。因此单独依靠试验研究很难得出可信的结论,多数研究者都是把试验结果作为验证数值结果的手段,然后通过数值研究分析钉载分配的规律。

2 数值研究

复合材料多钉连接载荷分配问题的数值研究通常是通过对比试验与数值模型中连接结构的载荷-位移曲线以及表层应变分布等验证数值模型的有效性,然后分析数值模型得到试验中无法采集的数据。数值研究可以得到整个连接结构完整的应力应变分布和孔边关键位置的损伤情况等,并且能够直观看到危险部位,这些对于确定钉载分布都有很大的意义。如图2所示为某复合材料与铝板四钉连接单搭接有限元模型示意图。

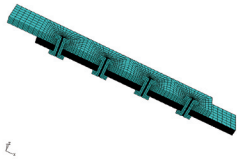


图2 某4钉连接三维有限元模型示意图

Fig.2 Diagram for a three dimensional finite element model of four bolts joint

复合材料多钉连接的有限元方法是与复合材料的单钉连接紧密联系的,理论上来说将单钉模型重复几次就可以得到一个基本的多钉连接模型。但是多钉连接将大大增加接触面的数量,限于现有计算机计算能力,还需要对模型进行相关简化处理。

不同的研究人员提出了不同的简化模型,有的研究者认为钉载分配主要发生在载荷较小时,不会涉及到损伤问题,因此去除了层合板的累积损伤模型。

有的研究者甚至直接将层合板简化为各项异性的均质材料,简化的材料属性如表1所示。表1中第一行为单向层合板的材料属性,第二行即为计算所用的等效各向异性均质材料的属性,该属性是根据一系列实验和经典层合板理论得出的^[3-4]。

有的研究者没有采用经典的三维实体模型,而是用壳单元、梁单元和刚体等模拟多钉连接。如图3示即某

表1 层合板材料属性简化表

单向层合板材料属性	E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	E_{33}/GPa	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
	140	10	10	5.2	5.2	3.9	0.3	0.3	0.5
等效均质材料属性	E_{xx}/GPa	E_{yy}/GPa	E_{zz}/GPa	G_{xy}/GPa	G_{xz}/GPa	G_{yz}/GPa	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}
	54.25	54.25	12.59	20.72	4.55	4.55	0.309	0.332	0.332

单钉连接简化模型,该模型采用壳单元模拟复合材料层合板,刚体包裹着的梁单元模拟螺栓,其中梁单元来模拟螺栓的弯曲刚度而刚体面来模拟螺栓与钉孔的接触。之所以采用刚体是因为刚体没有实体网格,可以大大减小计算量,并且有研究表明,螺栓的弹性模量对钉孔应力分布影响不大可以忽略。该模型没有螺帽与垫圈,而是通过额外施加的压力来模拟螺帽与垫圈对层合板的接触压强。同普通三维模型(如图2)相比,该模型不仅减少了网格数量,并且略去了螺帽、垫圈和层合板之间的接触,大大缩减了计算量。将图3中所示单钉模型重复即可扩展为3钉模型,该模型同普通三维模型结果符合的非常好,说明该简化模型是非常有效并且精确的^[5]。

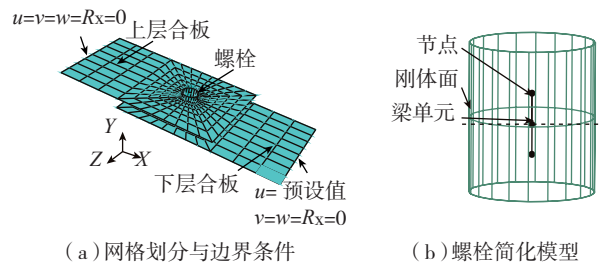


图3 某单钉简化模型示意图

Fig.3 Diagram for a three dimensional finite element model of four bolt joint

3 钉载分布的影响因素

总结试验和数值研究的结果可以发现,影响多钉连接载荷分布的主要因素有钉孔间隙、连接结构的尺寸和刚度、铺层比例、连接形式、预紧力和摩擦力等,其中钉孔间隙对钉载分布的影响最大,任何一点微小的改变都可能对钉载的分配产生巨大的影响。

3.1 钉孔间隙

钉孔间隙的存在会使该钉承载时间滞后,最终所承受的载荷也变小。当钉孔存在间隙时,该孔处的螺栓开始不会承载,当载荷慢慢增加时,间隙也慢慢缩小,直到螺栓与孔边接触之后该螺栓才开始传递载荷。不同钉孔间隙会使被连接层合板中的应力分布发生很大变化,通过调整钉孔间隙,可以调整不同螺栓传递的载荷,从而达到各钉平均承载,提高多钉连接的效率。

除此之外,有的研究发现,采用干涉配合对于改善钉载分配有很大的作用,干涉配合会明显增大单钉传递的载荷。但是干涉配合在安装时容易引起孔边初始损伤,应特别注意采取相应措施,或者严格控制干涉量。

3.2 连接结构尺寸和刚度

在拉伸作用下,外侧螺栓承受更多载荷,中间螺栓由于变形,传

递载荷较小;对于双搭连接来说,单排螺栓的钉载分配取决于被连接层合结构的相对拉伸刚度,载荷向刚度大的板的一侧转移,当拉伸刚度越接近时,螺栓的载荷分配越平衡;增加连接结构搭接的宽度能使各螺栓载荷更加平衡,而增加搭接的长度不利于载荷的平衡;随着螺栓间距的增加,螺栓载荷分配越不均匀,变化越剧烈。

3.3 连接形式

连接板的搭接形式一般分为单搭连接和双搭连接。工程实际结构中多数连接都是采用的单搭连接接头,因此单搭连接更具有工程实际意义。但是单搭连接加载时,由于载荷存在偏心距,被连接结构对接头产生附加弯矩,该弯矩会使连接结构产生面外变形。单搭连接接头附加弯矩的存在会改变连接结构的孔边应力场,使其载荷分配更加不均匀,降低结构的连接强度。

3.4 其他因素

铺层比例与顺序是层合结构设计的主要参数之一,不同的铺层比例与顺序都会对多钉连接的载荷分配产生影响。有研究表明 $\pm 45^\circ$ 方向铺层对载荷分配的影响突出,随着 $\pm 45^\circ$ 方向铺层比例的增加,螺栓的载荷分配更加不均匀,受载最严重的螺栓其载荷百分比随 $\pm 45^\circ$ 铺层增加呈上升趋势。除此之外,一定的预紧力和摩擦力能使载荷分配更加均匀,这也符合实际的机械装配条件。摩擦力和预紧力的存在使部分载荷可以通过被连接层合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。

4 钉载均匀化方法

研究复合材料多钉连接钉载分配的目的是为了能够使各螺栓承载均匀化,从而提高连接结构的载荷传递效率,得到更高的结构连接强度。在工程实际中,对于给定的连接结构,其材料与尺寸等参数通常都与整体结构联系密切,很难改动,不能通过调整这些因素来改变载荷分配。在影响钉载分配的各种因素中,钉孔间隙对其载荷分配影响最显著,微小的间隙改变都会对载荷分配产生巨大影响。因此通过调整钉孔间隙使各螺栓载荷分配均匀化是最可行的方法。

如图4所示为某三钉连接模型中各钉孔间隙为零时载荷分配情况。可以看出各钉载荷分配比较稳定,随加载时间的增加变化较小,其中c钉承载最多而a、b两钉承载较少。图5为调整间隙之后的载荷分配情况,可以看出调整间隙之后的载荷分配变化比较明显,在开始时主要是a、b号钉承载,随着加载时间增加,a、b号钉承载比例变小而c号钉承载比例变大,最终各钉承载比例趋于一致,实现各钉承载均匀化^[2]。但是应注意的是,间隙量的选取不能过大,有试验研究及有限元分析结果

表明,当间隙量大于4%时,钉与孔的接触面积会有明显减小,单钉连接时,相同载荷下其损伤区域明显增大,所以,间隙量的选取不能超过孔径的4%^[3,4,6]。

因此,在设计复合材料连接接头时,就应注意各因素对于多钉连接钉载分配的影响,将所设计连接结构载

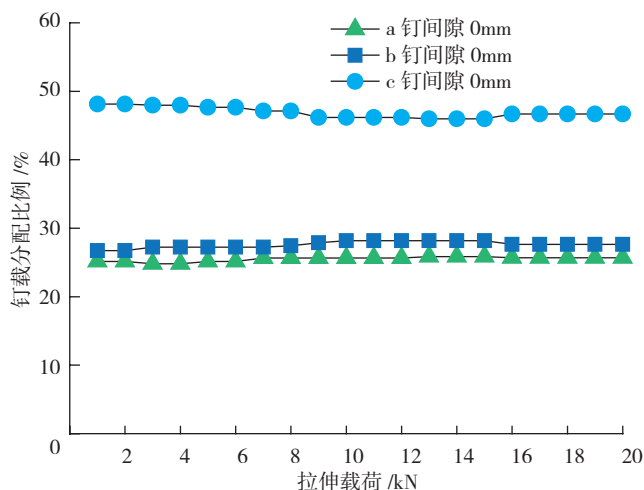


图4 无钉孔间隙时3钉连接钉载的分配^[2]

Fig.4 Load distribution of three bolts joint without clearance^[2]

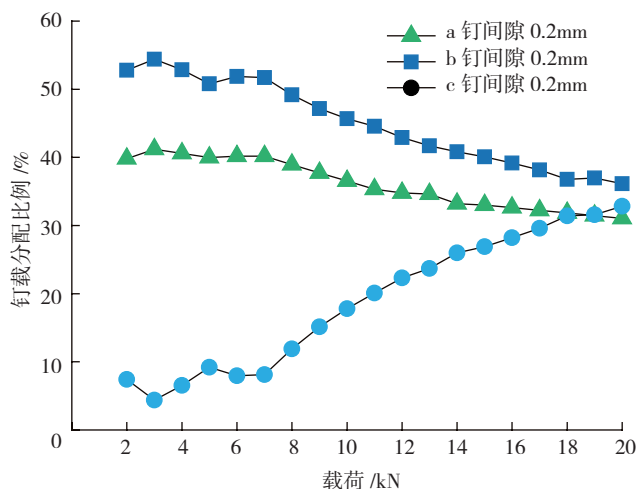


图5 调整钉孔间隙后3钉连接钉载的分配^[2]

Fig.5 Load distribution of three bolts joint after adjusting clearance^[2]

荷分配的不均匀度降至最低。例如,尽量使用刚度相近的层合板进行搭接;尽量增加连接结构搭接的宽度;尽量减小搭接长度和螺栓间距等。通过对连接结构进行合理设计和钉孔间隙调整,能够大大增加连接结构的连接强度,使其传递更大载荷,有效提高结构连接效率。

5 结束语

(1) 钉孔间隙对钉载分配影响显著,微小的钉孔间隙变化就会对载荷分配产生巨大影响。当连接结构处

(下转第76页)

生一个很大的变化,但可以通过相应的预滤波量测互协方差矩阵采用去权重的方法减小其影响。此外,Deeply coupled 模式的跟踪环路滤波器带宽可以适应滤波器所建模的任何对象,提高了跟踪环路的抗干扰能力。Deeply coupled 组合模式的另一个特点是对 Kalman 预滤波器没有严格的要求,然而传统的跟踪环对实时性要求较高。Kalman 预滤波器可以在一个主循环内接收所有的 I 、 Q 采样数据,并在下一个主循环时间内进行处理,因此可以采用更高级的处理算法。但是,在 SINS/GPS Deeply 组合模式中,传统的跟踪环路被最优滤波算法来替代,使接收机内部变化很大,实现较为复杂。

3 结束语

在 SINS/GPS 组合系统的各紧组合模式中, SINS/GPS Tightly coupled 组合模式将 GPS 作为一个单独系统, GPS 跟踪环路采用传统的二阶锁相环。由于弹载接收机的高动态影响,卫星与接收机间产生较大径向相对速度,从而引起接收机接收到的载波信号及伪码存在较大的多普勒频移,这就要求 GPS 跟踪环路采用大带宽,而大带宽使系统抗干扰能力较弱。因此,将 Tightly coupled 组合模式应用于高动态环境下,其可靠性较低,不能满足高精度、高可靠性的导航要求; Ultra-tightly 组合模式及 Deeply coupled 组合模式中利用 SINS 的速度信息辅助 GPS 的跟踪环路,使环路跟踪带宽大大增大;同时又使跟踪环路中滤波器的滤波带宽与未引入 SINS 速率辅助时相比减小了许多倍,从而更有效发挥滤波器滤除干扰噪声的功能,提高了跟踪环路抗干扰能力。但是,Deeply coupled 组合模式中 GPS 接收机的跟踪环路采用矢量跟踪模式,并由组合导航滤波器实现跟踪环路闭合,使接收机内部变化很大,实现起来较为复杂。因此,工程应用时应根据具体应用条件及应用环境,选择适当 SINS/GPS 组合模式。

参考文献

[1] Li W B, Liu S J, Zhou C H, et al. High dynamic carrier tracking using kalman filter aided phase-lock loop. IEEE, 1-4244-1312-5/07, 2007:673-676

[2] Diesel J W, Lu S. GPS/IRS AIME: Calculation of Thresholds and Protection Radius Using Chi-Square Methods. Proceedings of ION-NTM, Palm Springs, CA, Sep.1995:1959-1964.

[3] Mats B. Integrated GPS/inertial fault detection availability. Navigation, 1996,43(2): 339-358.

[4] 安东,崔中兴. 组合 INS/GPS 系统设计方法及其工程实现. 航空电子技术, 1997(2):8-22.

[5] 陈家斌,袁信. 伪距解除相关法在 GPS/SINS 紧组合系统中的应用研究. 航空学报, 1995, 16(6):707-710.

[6] 安东,任思聪,郑涛. GPS 的码跟踪误差检测器与伪距测量的预处理. 西北工业大学学报, 1994, 12(3):402-406.

[7] 高翔,刘兴堂. 超精密组合下 GPS/INS 跟踪回路的结构及性能分析. 战术导弹技术, 2007, 1(1): 67-70.

[8] 谢佳. 高精度捷联惯性 /GPS/ 图像匹配复合导航技术研究[D]. 北京,北京航空航天大学,2009.

[9] Alban S, Akos D, Rock S, et al. Performance Analysis and Architectures for INS-Aided GPS tracking loops. Institute of Navigation-NTM, Anaheim, CA,22-24 Jan.,2003: 611-622.

[10] Li D, Wang J L. Performance analysis of the ultra-tight GPS/INS integration based on an improved kalman filter design for tracking loops//International Global Navigation Satellite Systems Society IGSS Symposium 2006. Australia, 2006.

[11] Beser J, Alexander S, Crane R, et al. A Low-Cost Guidance/Navigation Unit Integrating a SAASM-Based GPS and MEMS IMU in a Deeply Coupled Mechanization// Proceedings of the ION-GPS 2002. Portland, 2002:545 - 555.

[12] Abbott A S, Lillo W E. GPS and inertial measuring unit ultratight coupling method: US 6516021B1.2003-02-04. (责编 三丰)

(上接第 69 页)

于湿热环境中时,环境的变化会使连接结构发生膨胀或者收缩,会影响连接结构的钉孔间隙,从而会对钉载分配产生不可忽视的影响。复合材料多钉连接钉载分配中湿热效应的影响还有待深入研究。

(2) 通过采用调整钉孔间隙的方法,可以使多钉连接结构承受静载荷的能力大幅提高,但是钉孔间隙的变化会使钉与孔之间接触面积也发生变化,这种配合方式对疲劳性能的影响尚未可知。

(3) 在数值模拟中通过调整钉孔间隙可以提高连接强度,但是在工程实际中由于制造与加工工艺的限制,没有办法准确控制每个钉与孔之间的间隙,因此在现有工艺水平下只能对工程实际给出方向性指导,不能使各钉载荷完全均匀。

参考文献

[1] McCarthy M A, Lawlor V P, Stanley W F, et al. Bolt-hole clearance effects and strength criteria in single-bolt, single-lap, composite bolted joints. Compos Sci Technol, 2002(62):1415-1431.

[2] 刘兴科,李亚智,刘向东,等. 金属和复合材料多钉连接钉载分配研究. 航空工程进展, 2011, 2(2):193-198.

[3] McCarthy M A, McCarthy C T, Lawlor V P, et al. Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: part I—model development and validation. Composite Structures, 2005(71):140-158.

[4] McCarthy C T, McCarthy M A. Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: Part II—effects of bolt-hole clearance. Composite Structures, 2005(71):159-175.

[5] Gray P J, McCarthy C T. A global bolted joint model for finite element analysis of load distributions in multi-bolt composite joints. Composites: Part B, 2010, 41:317-325.

[6] McCarthy M A, McCarthy C T, Padhi G S. A simple method for determining the effects of bolt-hole clearance on load distribution in single-column multi-bolt composite joints. Composite Structures, 2006(73): 78-87.

(责编 小城)