

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.023

多钉连接的载荷分配及影响因素

吴后仁,刘小群,陈 虎

(江西工业工程职业技术学院,江西 萍乡 337055)

摘要:采用有限元法对多钉连接载荷分配及影响因素进行了研究.结果表明:多钉连接中钉载分配呈不对称‘浴盆’形,浴盆的形状取决于两连接件的拉伸刚度比和钉的个数.两连接板的轴向刚度比不等于 1 时,靠近刚度较大板端头的钉受载最大.轴向刚度比愈趋近于 1 时,钉载分配愈均匀,且趋于对称分布.增加两连接件搭接区域宽度对均化钉载分配比例有利,而增加两连接件搭接区域长度对均化钉载分配比例不利.

关键词:多钉连接 载荷分配 有限元法

中图分类号:TU312+.1 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2008)06-0833-05

在金属构件中,螺栓和铆接是传递载荷的重要方式.由于钉孔的存在,这种连接方式容易引起应力集中,并导致构件破坏.目前,国内外对单钉连接研究较多,对多钉接头的研究相对较少.在金属多钉连接分析中,钉载计算采用钉元配以 $P-\delta$ 曲线.但复合材料由于其各向异性特性,问题要复杂一些^[1-3].对各种铺层形式和受力方向,用试验测定类似于金属 $P-\delta$ 曲线的刚度常数常常是不可能的.利用接触有限元法计算钉载及孔边应力分布^[4],虽可较好地模拟每个钉的受力状态,但由于需要划分非常细的网格,对大型多钉接头很难运用于实际工程中.利用解析法求解多钉载荷分配^[5],一般需假定一定接触压力分布形式,因而较难适应板厚变化等一般工程情况.近年来,多钉连接的复合材料板在实际工程中应用较为广泛^[6].在复合材料连接设计时,需要对孔洞区域进行细致的应力分析,然而,影响螺栓连接带孔板应力分布的因素很多,如板的厚度、孔的形状和方位、螺栓的材料等^[7-10],因此分析时要逐个考虑各因素对复合材料板应力的影响,了解其影响规律,才能为设计工作提供指导.本文通过试验和有限元法计算对各种情况下的多钉连接情况进行分析,探索多钉连接载荷分配及影响因素.

1 研究方法

1.1 计算模型

考虑如图 1 所示的 1 排 3 钉两连接件结构,上层为复合材料层合板(T300/648),层合板铺层参数为 $[\pm 45^\circ/90^\circ_2/\pm 45^\circ/90^\circ_2/\pm 45^\circ]_s$,厚度为 2.5 mm;下层为铝板,铝板厚度为 8 mm.连接件结构几何参数分别为:板长 195 mm,孔径 5 mm,钉间距 40 mm.层合板性能参数如下:纵向和横向杨氏模量分别为 131.0 MPa 和 81.1 MPa,纵向和横向拉伸极限应力分别为 11.7 MPa 和 2.4 MPa,纵向和横向压缩极限应力分别为 8.6 MPa 和 1.4 MPa,剪切极限应力为 0.6 MPa,剪切模量为 36.6 MPa,泊松比为 3.4.采用弹簧元和两板一梁加 GAP 元 2 种模型对图 1 所示的连接件结构进行有限元建模与钉载比例计算,板元性质取其实际的几何尺寸和力学特性,两板上、下位置为各板几何中面位置.计算成果见表 1.

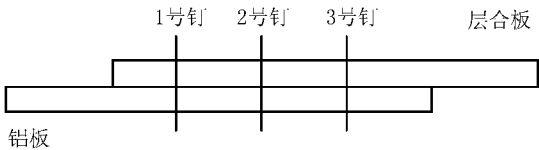


图 1 多钉连接件结构

Fig.1 Structure multi-nail joints

表 1 计算结果与试验结果对比

Table 1 Comparison between computed and test results

方 法	钉载分配比例/%			计算值与试验值的相对误差/%		
	1 号钉	2 号钉	3 号钉	1 号钉	2 号钉	3 号钉
弹簧元法	14.7	19.0	66.3	8.89	1.11	1.92
GAP 元法	14.4	18.3	67.3	6.67	3.17	0.44
试 验	13.5	18.9	67.6			

1.2 试验模型

试验是在 LJ-5000 型机械式拉力实验机上进行的,试验模型仍采用图 1 所示结构,只是为了消除弯矩,连接方式采用双搭接.在铝板与层合板之间加垫片以便引出应变片导线,并采用 YJD-17 型静态电阻应变仪和 PZOR-17 型预调平衡箱测量应变,从而得到各钉的承载比例.为便于与计算值比较,试验成果也列于表 2 中.由表 2 看出,采用两板一梁加 GAP 元模型计算的多钉载荷分配与试验值相当吻合,二者相对误差不大于 6.67%.因此在以下多钉载荷分配计算中,如无特别说明,均采用两板一梁加 GAP 元模型计算.

2 研究成果与分析

2.1 层合板铺层形式对载荷分配的影响

由于钉载分配比例与两连接件的拉伸刚度比有很大关系,而铺层参数和铺层比例的变化直接影响层合板的拉伸刚度,为了研究其影响,对一组不同铺层参数和铺层比例(表 2)的层合板与铝板的 1 排 3 钉连接件的钉载比例进行了分析与试验测试,所得结果见表 3.

表 2 层合板铺层参数及等效工程常数

Table 2 Parameters of composite laminations and equivalent engineering constant

层合板编号	铺层参数	铺层比例/%			等效工程常数/GPa			
		0°	90°	45°	E_x	E_y	G_{xy}	U_{xy}
Lam3	$[\pm 45^\circ/90^\circ_2/\pm 45^\circ/90^\circ_2/\pm 45^\circ]_s$	0	40	60	21.7	61.0	21.6	0.27
Lam5	$[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_s$	20	20	60	43.8	43.8	21.6	0.40
Lam9	$[\pm 45^\circ/0^\circ_2/90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ_2/90^\circ]_s$	40	20	40	65.7	42.6	15.7	0.32
Lam11	$[\pm 45^\circ/0^\circ_3/\pm 45^\circ/0^\circ_3]_s$	60	0	40	84.8	18.6	15.7	0.71
Lam12	$[\pm 45^\circ/0^\circ_3/90^\circ/0^\circ_3/90^\circ]_s$	60	20	20	86.9	38.4	9.7	0.22

表 3 不同层合板钉载分配比例

Table 3 Load distribution of different composite laminations

层合板编号	1 号钉				2 号钉				3 号钉			
	试验值/%		计算值/%		试验值/%		计算值/%		试验值/%		计算值/%	
	试验 1	试验 2	弹簧元法	GAP 元法	试验 1	试验 2	弹簧元法	GAP 元法	试验 1	试验 2	弹簧元法	GAP 元法
Lam3	11.0	16.0	11.0	14.7	20.2	17.7	16.6	19.1	68.8	66.3	72.4	66.2
Lam5	16.2	14.3	17.7	18.1	19.7	24.9	19.7	21.5	64.1	60.8	62.6	60.4
Lam9	20.1	20.4	22.5	20.1	30.2	31.1	21.7	22.1	49.7	48.5	55.8	57.8
Lam11	28.6	21.2	25.6	18.8	22.9	24.8	23.2	23.5	48.5	54.0	51.2	57.7
Lam12	21.8	33.4	26.0	21.1	26.2	21.6	23.6	22.9	51.8	45.0	50.4	56.0

由表 3 可以看出 铺层形式对钉载分配有较大的影响.增加 0°层比例可使各钉受载趋于均匀,而 45°,90°铺层则相反.这主要是由于随着 0°层的增加,层合板的等效工程常数 E_x 基本保持增加趋势,两连接件的拉伸刚度趋向接近,钉载分配也就逐渐趋于均匀化.当然,这是单就钉载分配而言,当考虑其他因素时,0°层比例也不能太高.当 0°层比例较高时,容易产生板端头劈裂破坏.另一方面,层合板铺层形式不同,直接影响到两连接板的轴向刚度比,两连接板的轴向刚度比不等于 1 时,靠近刚度较大板端头的钉承受的载荷最大,则两连接件轴向拉伸刚度愈趋近,钉载分配愈均匀,且趋于对称分布.设计时,从钉载均匀化考虑应使两连接件刚度尽可能接近,这有利于减轻接头重量,提高连接强度.

2.2 钉的数量对载荷分配的影响

两连接件中各钉的间距相同时,钉的数量增加,搭接长度也相应增加,如图 2 所示.在 1 排 3 钉计算成果

的基础上,对 1 排 4 钉和 1 排 5 钉的钉载分配进行计算,以分析钉的数量对载荷分配的影响,计算成果见表 4 和表 5. 由表 4 和表 5 可以看出,多钉连接中钉载并不是平均分配的,而是呈不对称‘浴盆’形,浴盆的形状取决于两连接件的拉伸刚度比和钉的个数. 随着钉数的增加,即搭接长度的增加,对最大钉载比值的减少并不明显,反而增大了钉载分配的不均匀程度. 这说明由于复合材料的延展性差,沿载荷方向上的各钉载荷分配不均匀,钉数愈多不均匀性愈严重.

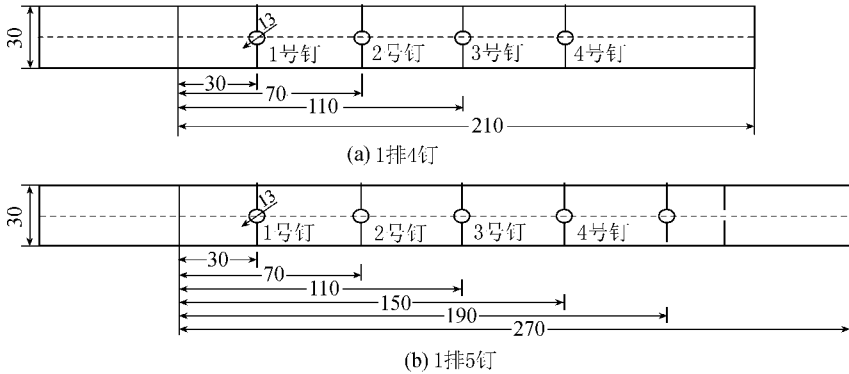


图 2 1 排多钉平面几何布置(单位 mm)

Fig.2 Layout of nails in a row with multi-nails(unit mm)

表 4 1 排 4 钉载荷分配

层合板 编号	钉载比例/%			
	1 号钉	2 号钉	3 号钉	4 号钉
Lam3	9.98	10.03	22.47	58.84
Lam5	15.34	14.88	22.84	47.32
Lam9	19.76	17.91	23.26	40.21
Lam11	21.24	19.04	23.97	36.78
Lam12	23.31	20.35	24.05	32.33

表 5 1 排 5 钉载荷分配

层合板 编号	钉载比例/%				
	1 号钉	2 号钉	3 号钉	4 号钉	5 号钉
Lam3	8.45	7.92	9.48	21.45	58.92
Lam5	12.23	9.78	13.32	21.58	47.67
Lam9	13.77	11.27	14.45	21.89	39.98
Lam11	15.79	13.56	16.67	22.12	35.45
Lam12	16.32	14.36	17.57	22.73	31.49

2.3 多钉排列形式对载荷分配的影响

为研究多排钉连接的钉载分配情况,对 2 排 5 钉、2 排 6 钉和 2 排 7 钉情况分别计算出不同复合材料层合板情况下的各钉钉载分配比例. 搭接区及钉的平面布置见图 3,计算成果分别见表 6~9. 多排钉连接反映出两连接件不同的搭接长度和宽度,由表 6~9 比较可知:(a)增加两连接件搭接区域宽度对钉载分配均匀化有利,而增加两连接件搭接区域长度对钉载分配均匀化不利. 对于多钉连接,随着钉数的增加,即搭接长度的

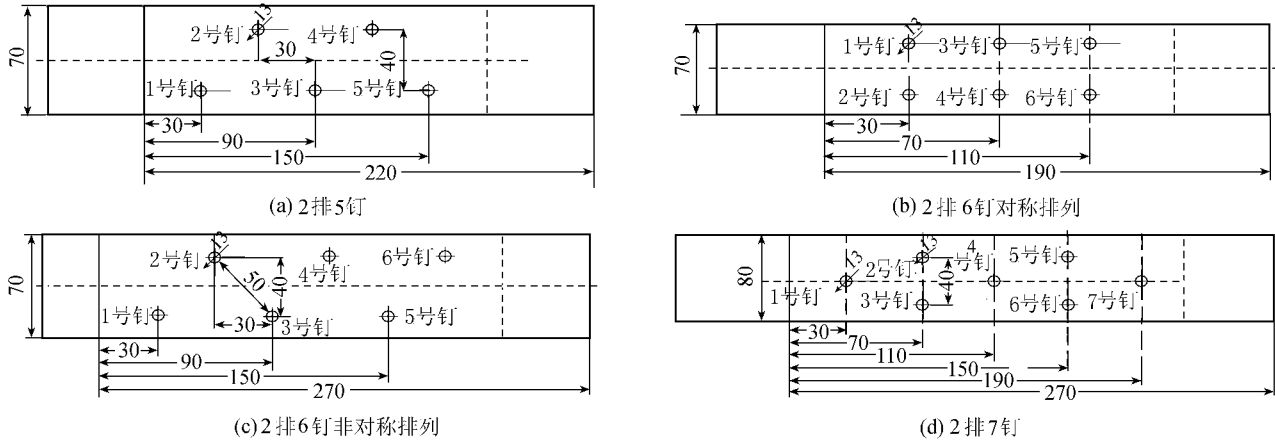


图 3 多钉排列形式(单位 mm)

Fig.3 Arrangement patterns of multi-nails(unit mm)

增加,对最大钉载比例的减少并不明显,反而增大了钉载分配的不均匀程度.(b)2排钉相互平行分布较2排钉相互交错分布的钉载分配更为均匀.

表6 2排5钉载荷分配

Table 6 Load distribution in two rows with 5 nails

层合板 编号	钉载比例/%				
	1号钉	2号钉	3号钉	4号钉	5号钉
Lam3	9.82	12.51	15.13	27.64	34.90
Lam5	13.43	16.32	16.23	25.41	28.60
Lam9	15.27	18.30	16.64	24.23	25.56
Lam11	16.36	19.46	16.86	23.66	23.67
Lam12	16.27	19.69	16.77	23.73	23.53

表7 2排6钉对称排列载荷分配

Table 7 Load distribution in two rows with 6 nails for symmetrical arrangement

层合板 编号	钉载比例/%					
	1号钉	2号钉	3号钉	4号钉	5号钉	6号钉
Lam3	8.87	8.87	12.84	12.84	28.31	28.28
Lam5	12.14	12.14	12.14	14.20	14.20	23.66
Lam9	13.80	13.81	14.76	14.75	21.44	21.44
Lam11	14.76	14.76	15.07	15.07	20.17	20.17
Lam12	14.79	14.79	15.05	15.05	20.16	20.16

表8 2排6钉非对称排列载荷分配

Table 8 Load distribution in two rows with 6 nails for asymmetrical arrangement

层合板 编号	钉载比例/%					
	1号钉	2号钉	3号钉	4号钉	5号钉	6号钉
Lam3	6.72	8.57	9.55	14.05	26.87	34.24
Lam5	10.41	11.82	12.01	14.67	23.63	27.46
Lam9	12.55	13.57	13.19	14.93	21.67	24.09
Lam11	13.85	14.59	13.91	15.00	20.61	22.04
Lam12	13.94	14.73	13.97	14.87	20.43	22.05

表9 2排7钉载荷分配

Table 9 Load distribution in two rows with 7 nails

层合板 编号	钉载比例/%						
	1号钉	2号钉	3号钉	4号钉	5号钉	6号钉	7号钉
Lam3	6.33	6.16	5.90	9.03	17.57	17.81	37.19
Lam5	9.63	8.96	8.72	10.55	16.84	16.84	28.45
Lam9	11.45	10.59	10.41	11.37	16.00	15.95	24.42
Lam11	12.43	11.54	11.40	11.75	15.50	15.61	21.77
Lam12	12.36	11.69	11.55	11.72	15.55	15.65	21.49

3 结 论

以1排3钉为例,通过有限元模型计算和试验结果对比,表明采用两板一梁加GAP元模型计算多钉连接中钉载分配是可行的.在此基础上,对不同铺层形式的层合板、钉的数量和排列方式下的钉载分配分别进行计算分析.计算结果表明,多钉连接中钉载分配呈不对称‘浴盆’形,浴盆的形状取决于两连接件的拉伸刚度比和钉的个数.在两连接板的轴向刚度比不等于1时,靠近刚度较大板端头的钉受载最大.轴向刚度比愈趋近于1时,钉载分配愈均匀,且趋于对称分布.增加两连接件搭接区域宽度对钉载分配均匀化有利,而增加两连接件搭接区域长度对钉载分配均匀化不利.

参考文献：

[1] TSAI S W. 复合材料设计[R]. 北京: 航空工业部第601研究所,1987.

[2] 王震鸣. 复合材料力学和复合材料结构力学[M]. 北京: 机械工业出版社,1991: 225.

[3] 航空航天工业部科学技术研究院. 复合材料设计手册[K]. 北京: 航空工业出版社,1990: 329.

[4] 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[J]. Composite Structures, 2005, 71(2): 140-158.

[5] PARK H J. Effects of stacking sequence and clamping force on the bearing strengths of mechanically fastened joints in composite laminates[J]. Composite Structures, 2001, 53(2): 213-221.

[6] 薛克兴, 周瑾. 复合材料结构连接件设计与强度[M]. 北京: 航空工业出版社, 1988: 314-315.

[7] SWANSON S R. Anticlastic effects and the transition from narrow to wide behaviour in orthotropic beams[J]. Composite Structures, 2001, 53(1): 44-55.

[8] EKH J, SCHON J. Effect of secondary bending on strength prediction of composite single shear lap joints[J]. Composite Structures, 2005, 65(1): 953-965.

[9] 谢鸣九, 迟坚. 复合材料非均匀分布多钉连接强度研究[C]//毛天祥, 夏源明. 复合材料的现状与发展——第十一届全国复合材料学术会议论文集. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000: 287-293.

[10] 徐耀玲,张振先.多钉连接复合材料板钉转载荷的计算[J].燕山大学学报,2005(2) 87-90.

Load distribution of multi-nail joints and its influencing factors

WU Qi-ren, LIU Xiao-qun, CHEN Hu

(Jiangxi Polytechnic College, Pingxiang 337055, China)

Abstract : The load distribution of multi-nail joints and its influencing factors were studied by use of the FEM. The test results show that the load distribution in multi-nail joints is asymmetry in the shape of a bathtub. The shape of the bathtub depends on the tension and stiffness of the two jointed plates and the number of nails. When the ratio of the axial stiffness between the two joint plates is not equal to 1, the load of the nail close to the end of the plate with greater stiffness is the largest. When the ratio of the axial stiffness between the two joint plates tends to 1, the load distribution tends to be uniform and symmetrical. It is effective to homogenize the load distribution to raise the wideness of the connected region of the two plates, but it is disadvantageous to raise the length of the connected region of the two plates.

Key words : multi-nail joint ; load distribution ; FEM

·简讯·

第 2 届全国水工抗震防灾学术交流会将在成都召开

第 2 届全国水工抗震防灾学术会议将于 2009 年 5 月 12 ~ 14 日在成都市举行.汶川特大地震影响波及全国,震中及周边地区震灾十分严重,人民生命财产遭受了巨大损失,基础设施受到严重破坏.西部地区是我国水能资源最丰富的地区,主要集中在岷江、大渡河、雅砻江、金沙江、澜沧江、怒江等流域,这些地区处于新构造运动强烈、地质环境极不稳定的高山峡谷区,为强烈地震和地质灾害高发区.目前在建和拟建的一系列 200 ~ 300 m 级的高坝,规模巨大,地震烈度高,在这一地震高烈度区,抗震安全多为工程建设中的关键.

本届水工抗震防灾学术会议将结合汶川地震,就汶川地震震后水工建筑物震损调查、震害分析、灾害评估及修复加固、水工建筑物抗震分析与设计、水工结构现场检测与监测、健康诊断与鉴定、水库诱发地震监测、预测和预警、水电工程抗震措施、抗震安全评价体系及水工结构工程振动、爆炸与冲击等专题,进行广泛的学术交流.会议将安排震区考察.

会议由中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会主办,中国水电顾问集团公司成都勘测设计研究院、河海大学水工结构研究所、中国水利水电科学研究院工程抗震中心承办.

会议将邀请著名的水工抗震与地震工程院士、专家就本学科的研究与发展、汶川地震对水工结构的影响作特邀报告,并将对以下专题进行交流和研讨:(a)汶川地震震后水工建筑物震损调查、震害分析与灾害评估;(b)震损水工结构的安全度及修复加固技术;(c)高混凝土坝、高土石坝抗震性能和抗震安全;(d)水库诱(触)发地震的预测、监测及其影响研究;(e)水工建筑物抗震分析理论与方法、抗震设计标准;(f)水工建筑物抗震试验研究方法和技术;(g)水工建筑物场地地震动输入;(h)水工建筑物与地基材料动态特性;(i)水工结构工程振动、爆炸与冲击;(j)水工建筑物现场测试与动力性态检测、健康诊断与鉴定;(k)水电工程抗震防灾措施、风险评估及应急预案;(l)水工结构减震、隔震和控震技术.

本次会议录用的优秀论文将刊登在《水力发电学报》2009 第 3 期和《水力发电》2009 第 5 期,并由中国水利水电出版社正式出版论文集.论文(全文)最后截止日期为 2009 年 2 月 20 日.

会议电子文件请浏览网站:www.hydropower.org.cn(中国水力发电工程学会);www.hhu.edu.cn(河海大学);www.ches.org.cn(中国水利学会);www.checc.cn(中国水电工程顾问集团公司);www.iwhr.com(中国水利水电科学研究院);www.meeting.edu.cn(中国学术会议在线);www.meeting163.com(中国会议网).

(本刊编辑部供稿)