

# 铝合金受剪螺栓连接孔壁承压强度

郭小农<sup>1</sup>, 邱丽秋<sup>1</sup>, 徐 晗<sup>2</sup>, 罗永峰<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中天建设集团浙江钢构有限公司, 浙江 杭州 310008)

**摘要:** 分析了我国《铝合金结构设计规范》中孔壁承压强度的来源, 完成了 15 个铝合金受剪螺栓连接试验及大量的数值模拟分析. 研究表明, 我国规范给定的孔壁承压强度取值过于保守. 根据试验和数值模拟的结果, 提出了铝合金受剪螺栓连接的孔壁承压失效准则; 基于该准则, 分析了螺栓杆直径、连接板厚度及螺栓孔端距等几何参数对螺栓孔壁承压承载力的影响, 推导了孔壁承压强度的计算公式, 并验证了其合理性和准确性.

**关键词:** 铝合金结构; 受剪螺栓连接; 孔壁承压强度; 失效准则

**中图分类号:** TU395

**文献标志码:** A

## Bearing Strength at Bolt Holes of Aluminum Alloy

GUO Xiaonong<sup>1</sup>, QIU Liqiu<sup>1</sup>, XU Han<sup>2</sup>, LUO Yongfeng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Zhongtian Construction Group Zhejiang Steel Structure Co. Ltd., Hangzhou 310008, China)

**Abstract:** The basic theory and the calculation method of "Code for Design of Aluminum Structures" about the bolts-joints against shear force were analyzed. 15 tests of shear bolt connections and numerical simulation studies were carried out. The research results show that the value of bearing strength at bolt holes given by "Code for Design of Aluminum Structures" is too conservative. According to the failure phenomena from the experiments and numerical simulation, the deformation failure criterion was proposed. And based on this criterion, numerical studies on the effect of bolt diameter, plate thickness and end distance on the bearing strength at bolt holes were undertaken, and the calculation formula of bolt bearing strength were derived and verified.

**Key words:** aluminum alloy structures; shearing bolt connections; bearing strength at bolt holes; failure criteria

铝合金因其外形美观、耐腐蚀性强等优点而被广泛应用于空间网格结构. 目前, 在国内已建成的铝合金空间网格结构中, 节点形式大多为板式节点. 这类节点主要通过螺栓受剪连接来传递杆端力. 在我国的《铝合金结构设计规范》(GB50429—2007)<sup>[1]</sup>中, 螺栓孔壁承压承载力的计算公式沿用了《钢结构设计规范》(GB50017—2003)<sup>[2]</sup>中螺栓孔壁承压承载力的计算公式的形式, 公式中铝合金螺栓连接的孔壁承压强度设计值是根据欧洲规范 EC9<sup>[3]</sup>换算得到的, 其性能仍需进一步的研究.

螺栓孔壁承压承载力需要同时考虑强度准则和变形准则. 考虑到正常使用的要求, Kim 等<sup>[4-6]</sup>提出当螺栓孔变形达到孔径的 30% 时, 认为螺栓连接不再适合继续承载而达到了极限状态, EC9 和美国钢结构规范<sup>[7]</sup>也采用了这一限值规定. 国内石永久等<sup>[8-9]</sup>在研究铝合金螺栓受剪连接的孔壁承压强度时也借鉴了该准则.

本文通过铝合金受剪螺栓连接的试验研究发现, 规范 GB50429 中孔壁承压强度与实验结果相差较大, 取值过于保守, 因而有待改进.

## 1 铝合金受剪螺栓连接试验研究

### 1.1 试验简介

本文共进行了 5 组铝合金螺栓抗剪连接试验, 研究铝合金连接件的抗剪连接性能及其变形失效过程. 同组试验的试件名义尺寸相同, 每组试件数量均为 3 个. 试验所采用的不锈钢螺栓材质均为 A2-70, 保证应力为 700 MPa. 各组试验的预期破坏形式及试件名义尺寸列于表 1 (同组试件以 A、B、C 编号区分). 图 1 为各组试件试验前的照片, 图 2 为各组试件的加工图.

收稿日期: 2013-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(50908168)

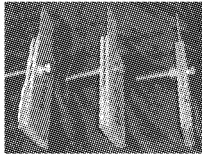
第一作者: 郭小农(1977—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为铝合金结构. E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

通讯作者: 徐 晗(1984—), 男, 工学博士, 主要研究方向为铝合金结构. E-mail: xuhan84@sohu.com

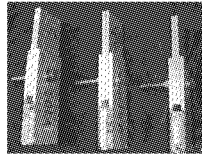
表 1 铝合金构件螺栓受剪连接试件汇总表(单位:mm)

Tab.1 The main information of each aluminum alloy shear bolt specimen

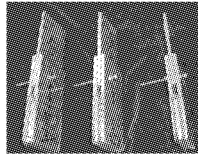
试件组号	预期破坏形式	螺栓数量/个	螺栓直径/mm	夹板截面 (mm×mm)	芯板截面 (mm×mm)	中距/mm	端距/mm
SLJ-001	首先孔壁承压屈服,然后连接板拉断	1	22	100×10	75×5		60
SLJ-002	首先孔壁承压屈服,然后连接板端部破坏	1	22	100×10	75×5		25
SLJ-003	螺杆剪断	1	20	100×10	100×20		60
SLJ-004	螺杆剪断	1	12	100×10	100×10		40
SLJ-005	螺杆剪断	2	12	100×10	100×10	60	40



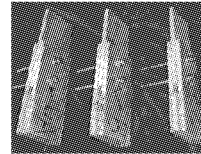
a SLJ-001



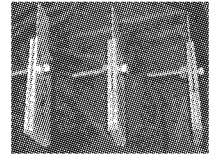
b SLJ-002



c SLJ-003



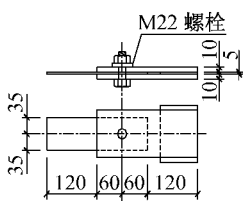
d SLJ-004



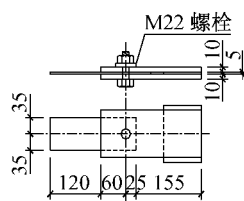
e SLJ-005

图 1 试验前各组试件照片

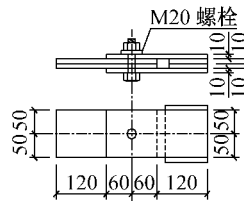
Fig.1 Photos of specimens before the test



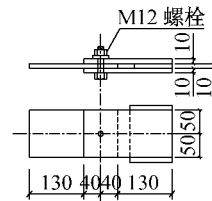
a SLJ-001



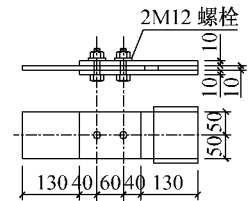
b SLJ-002



c SLJ-003



d SLJ-004



e SLJ-005

图 2 试件加工图

Fig.2 Manuscripts of specimens

正式试验前,从连接件试件相同批次的板材上取样制作了 6 个拉伸试件,通过拉伸试验得到铝合金的弹性模量  $E$ 、名义屈服强度  $f_{0.2}$ 、抗拉强度  $f_u$ 、延伸率  $\delta$ ,其实测平均值见表 2;并对相同批次的三个 A2-70 不锈钢螺栓进行了拉伸试验,得到的 M12 的不锈钢螺栓抗拉强度实测平均值为 776 MPa。对于 M20 和 M22 螺栓,未进行单根螺栓的拉伸试验。

表 2 铝合金连接件拉伸试验结果

Tab.2 Test results of aluminum alloy plates

试样指标	$E$ /MPa	$f_{0.2}$ /MPa	$f_u$ /MPa	$\delta$ /%
平均值	65 600	259.47	284.32	8

## 1.2 试验结果

总体上,各组试件都发生了预期的破坏,各组试

件的基本破坏情况及实测承载力列于表 3,其中典型的孔壁变形照片如图 3 所示。

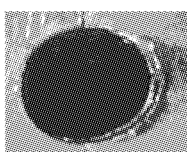
## 2 实验分析

### 2.1 现行规范计算公式

在欧洲的《铝合金设计规范》(EC9)<sup>[3]</sup>中,连接件孔壁承压承载力设计值计算公式为

$$F_{b,Rd} = dt \frac{2.5\alpha}{\gamma_{Mb}} f_u \quad (1)$$

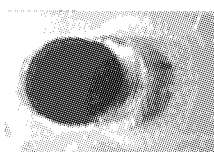
式中: $F_{b,Rd}$ 为连接件孔壁承压承载力设计值; $t$ 为连接件厚度; $d$ 为螺杆直径; $f_u$ 为连接件的抗拉强度; $\gamma_{Mb}$ 为螺栓连接抗力分项系数,EC9中规定取 1.25;



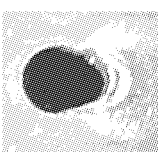
a SLJ-001



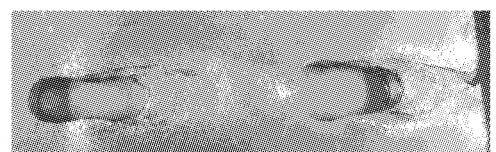
b SLJ-002



c SLJ-003



d SLJ-004



e SLJ-005

图 3 各组试件的芯板孔壁变形

Fig.3 Hole deformation of the specimens after test

表 3 抗剪连接试件破坏情况概述

Tab.3 Description of the failure mode of the shearing bolt connections

组号	试件	实测极限承载力/kN		破坏形式	破坏情况概述
		实测承载力	平均承载力		
SLJ-001	A	74.83	73.64	芯板净截面破坏	螺栓基本没有变形;芯板上螺栓孔壁有明显的塑性挤压变形;破坏时,芯板净截面拉断。
	B	72.13			
	C	73.95			
SLJ-002	A	32.92	38.20	芯板端部破坏	螺栓基本没有变形;试件芯板螺栓孔壁的挤压变形较小;破坏时,芯板端部开裂。
	B	39.88			
	C	41.78			
SLJ-003	A	281.69	280.11	螺栓剪坏	芯板和夹板上螺栓孔的塑性挤压变形都较为明显,螺栓弯曲明显;破坏时,螺栓断裂。
	B	276.32			
	C	282.33			
SLJ-004	A	105.40	102.76	螺栓剪坏	芯板和夹板上螺栓孔的塑性挤压变形都较为明显,螺栓弯曲明显;破坏时,螺栓断裂。
	B	99.38			
	C	103.50			
SLJ-005	A	207.62	202.24	芯板端部破坏	芯板和夹板上螺栓孔的塑性挤压变形都较为明显,其中芯板上的变形较大;破坏时靠近端部的螺栓断裂,而另一根螺栓未断裂,同时芯板端部破坏。
	B	207.62			
	C	191.48			

$\alpha$  为  $\frac{e_1}{3d_0}$ ;  $\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ ;  $\frac{f_u^b}{f_u}$  和 1.0 中的较小值,其中,  $e_1$  为螺栓孔端距,  $d_0$  为螺栓孔直径,  $p_1$  为螺栓孔中心间距,  $f_u^b$  为螺栓的抗拉强度. 由式(1)可知,在 EC9 中孔壁承压承载力的计算考虑了螺栓孔端距与孔径比值、中距与孔径比值、螺栓抗拉强度与连接件抗拉强度比值等参数的影响.

在我国现行的《铝合金结构规范》(GB 50429—2007)<sup>[1]</sup>中,螺栓孔壁承压承载力的计算公式沿用了《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)<sup>[2]</sup>中螺栓孔壁承压承载力的计算公式的形式,即

$$N_c^b = d t f_c^b \quad (2)$$

其中,连接件的孔壁承压强度设计值  $f_c^b$  根据 EC9 的公式换算得到,即

$$f_c^b = \frac{2.5\alpha}{\gamma_{Mb}} f_u \quad (3)$$

考虑到 EC9 中规定螺栓孔的最小端距为  $2d_0$ ,中距为  $2.5d_0$ ,且通常情况下  $f_u^b$  与  $f_u$  的比值总大于 1.0,则由式(3)可得

$$f_c^b = \frac{2.5\alpha}{\gamma_{Mb}} f_u = \left[ 2.5 \min \left( \frac{2}{3}; \frac{2.5}{3} - \frac{1}{4} \right) / 1.25 \right] f_u = 1.16 f_u \quad (4)$$

对于牌号为 6061-T6 的铝合金材料,其抗拉强度  $f_u$  为 265 MPa<sup>[10]</sup>;根据式(4),我国《铝合金结构规范》(GB 50429—2007)将孔壁承压强度设计值取为 305 MPa;又根据规范中规定的连接的抗力分项系数为 1.30,则相应的孔壁承压强度标准值为 396.5 MPa.

2.2 承载力对比与分析

表 4 给出了试件实测极限承载力平均值  $N_u$ 、根据规范 GB 50429—2007<sup>[1]</sup>和 EC9<sup>[3]</sup>计算得到的螺栓受剪连接的承载力标准值  $N_{GBk}$ ,  $N_{Eck}$ . 表中  $f_{c,EC}^b$  和  $f_{c,GB}^b$  分别为将试件的实测抗拉强度  $f_u$  (见表 2)代入式(3)和(4)得到的孔壁承压强度设计值,  $f_{ck,GB}^b$  和  $f_{ck,EC}^b$  为根据 GB 50429—2007 和 EC9 规定的材料分项系数换算得到的孔壁承压强度标准值,  $N_{ck}^b$  为孔壁承压承载力标准值,  $N_{vk}^b$  为螺栓抗剪承载力标准值,  $N_{GBk}$  和  $N_{Eck}$  为  $N_{ck}^b$  和  $N_{vk}^b$  中的较小值.

表 4 试件极限承载力汇总

Tab.4 Ultimate bearing capacity of the specimens

试件组号	实测极限承载力平均值 $N_u$	GB50429					EC9					承载力比较	
		$f_{c,GB}^b$ /MPa	$f_{ck,GB}^b$ /MPa	$N_{ck}^b$ /kN	$N_{vk}^b$ /kN	$N_{GBk}$ /kN	$f_{c,EC}^b$ /MPa	$f_{ck,EC}^b$ /MPa	$N_{ck}^b$ /kN	$N_{vk}^b$ /kN	$N_{Eck}$ /kN	$\frac{N_{GBk}}{N_u}/\%$	$\frac{N_{Eck}}{N_u}/\%$
SLJ-001	73.64	329.81	428.75	47.16	280.09	47.16	505.46	631.82	69.50	353.80	69.50	64.0	94.4
SLJ-002	38.19	329.81	428.75	47.16	280.09	47.16	210.61	263.26	28.95	353.80	28.95	123.5	75.8
SLJ-003	280.11	329.81	428.75	171.50	231.48	171.50	511.57	693.46	277.39	292.40	277.39	61.2	99.0
SLJ-004	102.76	329.81	428.75	51.45	83.33	51.45	568.64	710.80	85.30	105.24	85.30	50.1	83.0
SLJ-005	202.24	329.81	428.75	102.90	166.29	102.90	568.64	710.80	170.59	210.48	170.59	50.9	84.4

分析表 4 可知,用欧洲规范 EC9 求得的孔壁承压承载力与试验实测的极限承载力贴合程度较好,

其中只有试件组 SLJ-002 的  $N_{Eck}/N_u$  值小于 80%,这是由于试件组 SLJ-002 的螺栓孔端距小于 EC9 中

的最小限值,式(1)已不再适用. 中国规范 GB 50429 求得的孔壁承压承载力与试验实测的极限承载力相差较大,其中 4 组试件的  $N_{GBk}/N_u$  值均小于 65%, 而试件组 SLJ-002 的  $N_{GBk}/N_u$  值大于 100%. 这是由于规范 GB 50429 中的孔壁承压强度设计值  $f_c^b$  是将螺栓孔的最小端距和最小中距代入规范 EC9 中计算得到,不能考虑螺栓孔端距等因素的影响;因而当螺栓孔端距较大时,会偏于保守.

### 3 孔壁承压强度的建议值

#### 3.1 孔壁承压失效准则

要获得合理的孔壁承压强度,首先需明确连接件的孔壁承压失效准则. 螺栓与孔壁的接触挤压过程综合了材料非线性、几何非线性和边界条件非线性,难以对其进行准确的数学描述. 国外在钢结构螺栓连接的早期研究中提出了螺栓孔壁承压的变形失效准则,认为螺栓孔的变形超过孔径的 30% 时,就不再满足正常使用的要求而达到极限状态,连接失效,EC9 和美国钢结构规范即采用了该准则. 国内石永久等 in 研究铝合金螺栓受剪连接的孔壁承压强度时也借鉴了该准则. 然而,铝合金的刚度、延性和强屈比都小于钢材,过大的变形会导致节点的刚度降低,并影响结构整体性能,简单地采用 30% 孔径变形作为失效准则不甚合理. 对此,本文做出如下假定以推导更加合理的失效准则:

(1) 忽略螺栓与孔壁之间的摩擦力,螺栓剪力完全通过孔壁承压来传递. 相对于孔壁正应力,孔壁

摩擦力对承载力的贡献很小,且由此计算的孔壁承压强度偏于安全;

(2) 孔壁接触应力沿壁厚均匀分布. 根据数值模拟结果,孔壁接触应力沿连接件厚度的分布形状是中间大、两端小. 但可以证明,孔壁承压承载力与连接件厚度呈比例关系,因此,计算孔壁承压承载力时,可以在厚度方向取接触应力的平均值以简化计算;

(3) 随着孔壁变形及塑性发展,接触应力不断增大,当某接触点附近一定范围的区域都进入塑性后,该点的接触应力达到极值. 当孔壁接触区的变形达一定程度后,附近材料发生塑性流动,接触应力随变形的增加极为有限.

基于上述假定,沿厚度方向取任意截面,螺杆逐渐嵌入孔壁的过程中,孔壁变形及接触正应力分布如图 4 所示. 图中,  $R$  为螺栓孔半径,  $r$  为螺栓半径,  $\Delta$  为孔壁的变形许可值.

在一定荷载下,螺杆与孔壁的接触区为弧线  $EE'$ . 接触面边缘到螺杆截面圆心的连线  $EO_1$  与  $x$  轴的夹角反映了螺杆嵌入连接件的情况,记为嵌入角  $\theta$ . 弧线  $EE'$  上任意点到螺杆圆心  $O_1$  的连线与  $x$  轴的夹角反映了该点在接触面上的位置,记为  $\gamma$ ,并记该点在厚度方向的孔壁平均应力为  $p_c(\gamma)$ . 总体上,  $p_c(\gamma)$  随嵌入角  $\theta$  的增加而逐渐增大,根据假定 3,其应力最终达到极值  $p_{cu}(\gamma)$ . 当孔壁发生一定的变形时,必存在一临界角  $\gamma_u$ ,在  $\gamma_u$  以内的接触面上孔壁的平均压应力达最大值  $p_{cu}(\gamma)$ . 在  $\gamma_u$  与  $\theta$  之间的接触面上,  $p_c(\gamma)$  尚未达到极值. 显然,临界角  $\gamma_u$  随  $\theta$  的增大而增大.

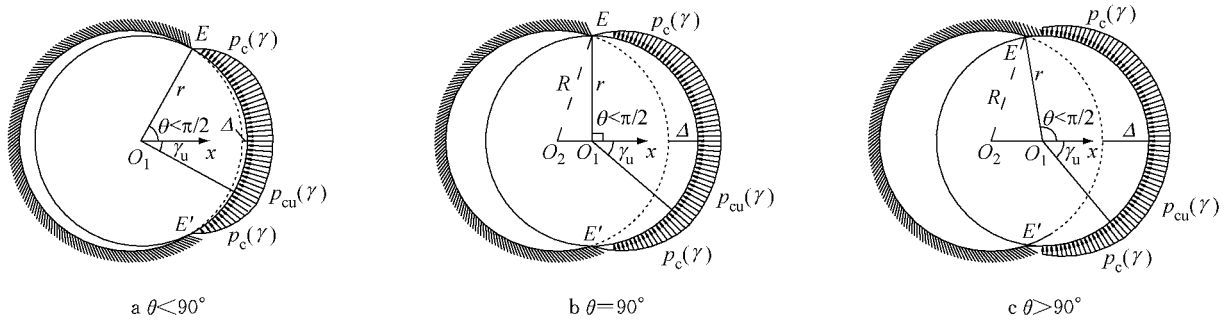


图 4 螺栓孔壁受力状态示意图

Fig. 4 Diagram of distribution of the stress at the bolt hole

当孔壁变形较小时,孔壁承压承载力  $N_c^b$  随  $\theta$  的增大而增大. 当  $\theta$  达 90 度时,孔壁接触面积达最大值. 此后,若继续增大荷载,接触面不再增大,仅  $\gamma_u$  增加. 但正应力增量与  $x$  轴夹角较大,对承载力贡献较小. 可见,嵌入角  $\theta$  达到 90 度时,连接件的孔壁承

压能力得以充分发挥,并留有一定的安全余量,且此时孔壁变形量不大. 因此,本文建议连接件的孔壁承压变形失效准则为嵌入角  $\theta$  达到 90 度.

根据该准则,孔壁的变形许可值  $\Delta$  可计算如下:

$$\Delta = \sqrt{R^2 - r^2} - (R - r) \quad (5)$$

螺栓孔隙通常为 1~2 mm, 根据 GB/T5782—2000<sup>[11]</sup> 及 GB/T3098. 6—2000<sup>[12]</sup> 给定的螺栓尺寸规格, M3~M24 规格螺栓的许可变形如图 5 所示. 图 5 同时给出了美国钢结构规范的许可变形用于比较. 可以看到, 本文采用的失效准则对孔壁的变形值控制更加严格, 这对于延性较差的铝合金结构较为合理.

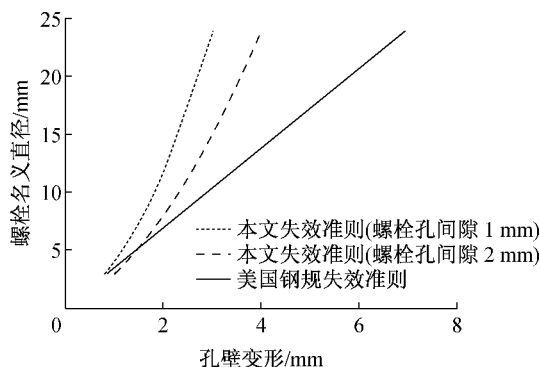


图 5 孔壁变形许可值比较

Fig. 5 Permissible value of hole deformation

### 3.2 孔壁承压承载力

根据假定(1), 当嵌入角  $\theta=90^\circ$  时, 孔壁承压承载力标准值为

$$N_{ck}^b = \int_t dt \cdot \int_s p_c(\gamma) \cos \gamma ds = \int_0^t \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} r p_c(\gamma) \cos \gamma d\gamma dt \quad (6)$$

考虑到假定(2)和假定(3), 且  $p_c(\gamma)$  为厚度方向的平均应力, 式(6)可写为

$$N_{ck}^b = dt f_u \int_0^{\frac{\pi}{2}} g(\gamma) \cos \gamma d\gamma \quad (7)$$

式中:  $g(\gamma)$  为未知分布函数.

$$p_c(\gamma) = f_u \cdot g(\gamma) \quad (8)$$

式(6)中, 积分部分取值主要由孔壁承压区的相对大小决定, 因此孔壁承压承载力计算公式可写成

$$N_{ck}^b = dt f_u \varphi(e/d_0) \quad (9)$$

式中:  $e$  为螺栓端距,  $d_0$  为螺栓孔直径; 函数  $\varphi(e/d_0)$  可通过数值模拟确定.

### 3.3 数值模拟

#### 3.3.1 有限元模型介绍与验证

本文采用有限元软件 ABAQUS 对铝合金双夹板连接进行了数值模拟分析. 分析中铝合金材料的本构关系采用 Ramberg-Osgood 模型, 连接件和不锈钢螺栓采用实体单元 C3D8R 模拟, 并考虑对称性取半边结构进行分析. 图 6 给出了螺栓连接处的模型及网格划分. 图 7 为试件组 SLJ-004 数值模拟求

得的荷载-位移曲线与试验结果比较, 图中的粗实线为修正后的数值模拟结果. 修正后的数值模拟荷载-位移曲线与实测曲线的斜率在线弹性阶段贴合较好. 在进入塑性阶段后, 由于数值模拟没有考虑螺栓与孔壁的摩擦力, 使得数值分析得到的承载力较实际偏低. 总体上, 在弹性阶段和塑性阶段初期, 数值模拟结果与试验实测结果吻合度较高. 之后, 两者偏差变大, 但数值模拟结果偏于安全. 因此, 本文的有限元建模分析方法较为合理, 结果准确可信.

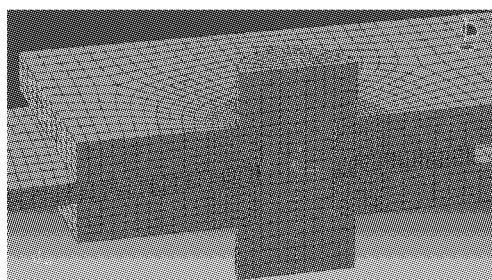


图 6 螺栓受剪连接数值模型网格划分

Fig. 6 Mesh division in numerical simulation

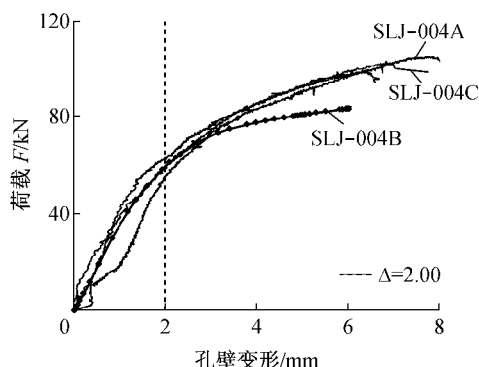


图 7 SLJ-004 数值模拟与实测荷载-位移曲线比较

Fig. 7 Comparison of force-displacement curves between numerical simulation and test results

#### 3.3.2 几何参数分析

本文建立了 6 个系列的铝合金构件螺栓受剪连接数值模型并进行了分析计算, 研究连接的几何参数对螺栓孔壁承压承载力的影响. 各模型均采用位移加载, 最终均为孔壁承压失效. 分析的几何参数包括芯板厚度  $t$ 、螺杆直径  $d$ 、芯板宽度  $B$  及螺栓端距  $e$ . 各系列模型几何尺寸列于表 5. 数值模型的孔径均为  $d_0=d+1$ . 各系列的荷载-变形曲线见图 8.

根据本文建议的失效准则, 可得到图 8 中竖直线所示的孔壁变形许可值, 根据竖直线与各曲线的交点, 可得到螺栓孔壁承压承载力与各几何参数的关系曲线, 如图 9 所示. 图中,  $f_{cs}^b$  为当螺栓孔变形达到本文提出的孔壁变形许可值  $\Delta$  时, 所对应的有限

表5 各系列数值模型几何尺寸

Tab.5 Dimension of different series of numerical models

模型系列	几何参数			
	$t/\text{mm}$	螺栓规格	$B/d_0$	$e/d_0$
$B-d_0$	10	M20	3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0	2
T	3, 5, 7, 12, 15, 18	M20	3.75	3
D	5	M4, M12, M14, M16, M18, M20	$>4$	$>4$
$e-d_0$	M12	5	M12	6.2
	M16	5	M16	6.0
	M20	5	M20	6.0

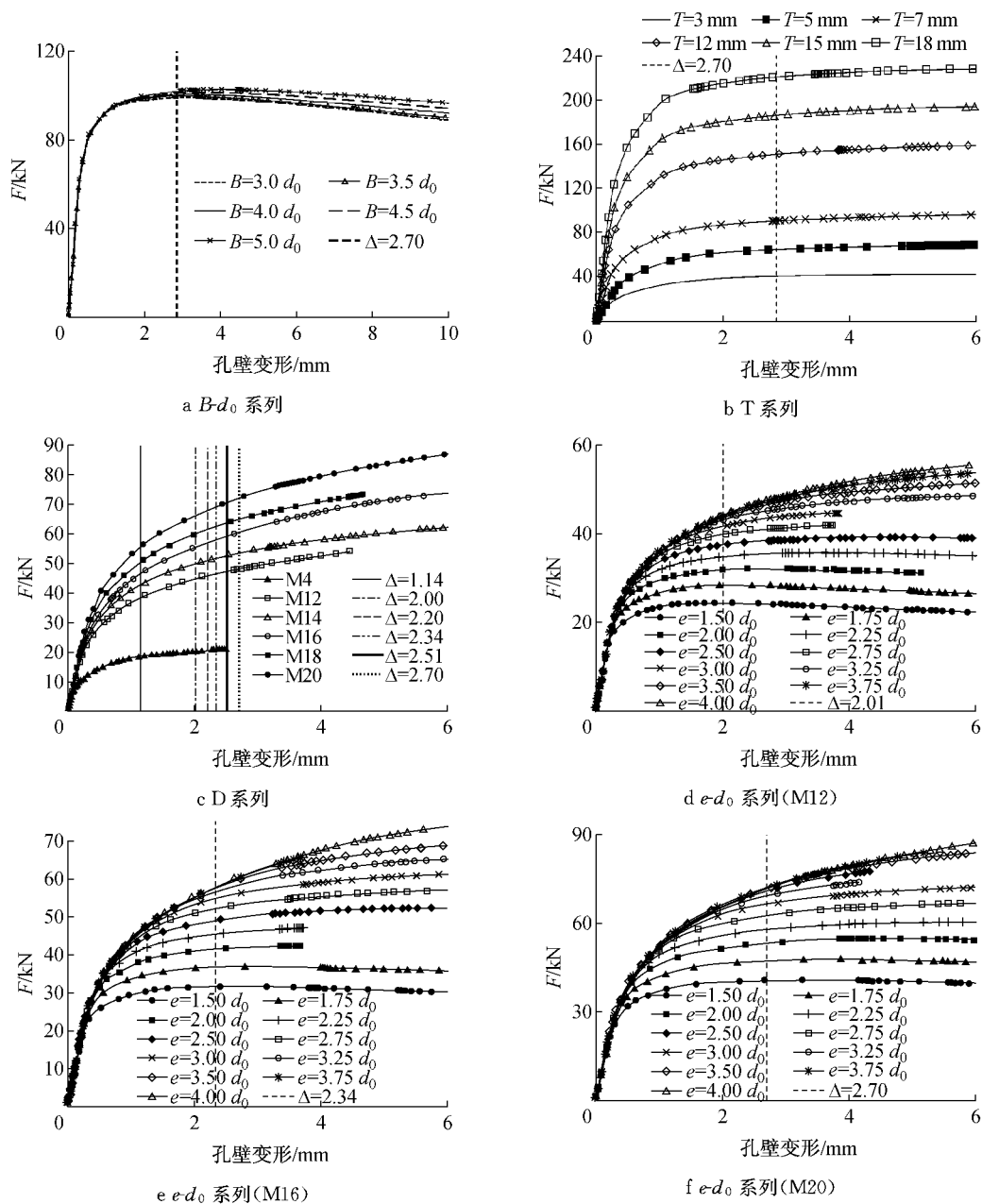


图8 各系列模型的荷载-变形曲线

Fig.8 Force-deformation curves of different series

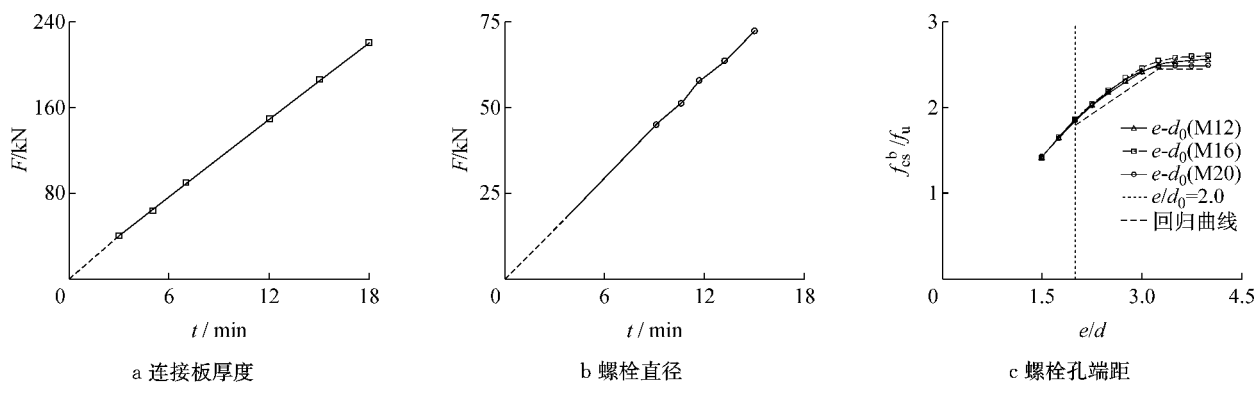


图 9 孔壁承压承载力随各几何参数的变化规律

Fig.9 Variation of bearing capacity at bolt hole against geometric parameters

元计算得到的强度. 图 9a 和图 9b 表明,孔壁承压承载力随芯板厚度、螺栓直径近似线性增大;图 9c 表明,当  $e/d_0$  小于 3.25 时,孔壁承压承载力随螺栓连接端距近似线性增大, $e/d_0$  大于 3.25 时,孔壁承压承载力逐渐趋于恒定.

3.4 孔壁承压强度的建议计算公式

基于本文建议的孔壁承压变形失效准则,根据数值分析结果,螺栓孔壁的承载力与螺栓直径和连接件厚度成比例关系,类似于 GB 50429 规范的公式(1),孔壁承压承载力标准值可以表达为

$$N_{ck} = dt \cdot f_{ck}^b \tag{10}$$

式中, $f_{ck}^b$ 为本文建议的孔壁承压强度标准值.

结合公式(9)和(10)有  $f_{ck}^b = \phi(e/d_0) f_u$ . 观察图 9c 的三条曲线的形状,函数  $\phi(e/d_0)$  可近似为双折线,偏于保守地采用三条曲线的下包络线作为近似拟合曲线,如图中的虚线所示. 考虑到规范 GB 50429 对螺栓连接端距的限制,可以得到相应的孔壁承压强度标准值  $f_{ck}^b$  计算公式为

$$f_{ck}^b = \varphi(e/d_0) f_u = \begin{cases} (0.52e/d_0 + 0.76) f_u, & 2.0 < e/d_0 \leq 3.25 \\ 2.45 f_u, & 3.25 < e/d_0 \end{cases} \tag{11}$$

相应的孔壁承压强度设计值  $f_c^b$  可计算如下:

$$f_c^b = f_{ck}^b / \gamma_m \tag{12}$$

其中, $\gamma_m$  为材料分项系数,可根据 GB50429 规范的建议取 1.30.

为验证公式(11)的准确性,对各组试件的孔壁承压强度理论值和实测值进行比较. 比较结果列于表 6. 其中, $f_{cu}^b$ 为根据实测极限承载力计算得到的强度; $f_{cn}^b$ 为有限元计算得到的强度; $f_{ck}^b$ 为按公式(11)计算得到的孔壁承压强度标准值. 由表 6 可知,理论公式计算结果  $f_{ck}^b$ 与孔壁承载强度实测结果  $f_{cu}^b$ 的平均比值为 0.846,最小值为 0.784,说明理论公式计算结果与实测值较为接近,且偏于安全;理论公式计算结果  $f_{ck}^b$ 与有限元计算结果  $f_{cn}^b$ 非常接近,其平均比值为 0.926,平均误差不超过 8%. 由此证明式(11)足够准确且安全.

表 6 孔壁承压强度理论值与实测值比较

Tab.6 Comparison of bearing strength at bolt hole between theoretical value and test results

试件	$f_{cu}^b$ /MPa	$f_{cn}^b$ /MPa	孔壁变形 许可值 $\Delta$ /mm	$f_{cs}^b$ /MPa	$f_{ck}^b$ /MPa	$f_{ck}^b/f_{cu}^b$	$f_{ck}^b/f_{cn}^b$	$f_{ck}^b/f_{cs}^b$
SLJ-001	669	667	2.85	635	602	0.890	0.902	0.948
SLJ-003	700	645	2.70	640	639	0.913	0.991	0.998
SLJ-004	856	754	2.00	734	671	0.784	0.900	0.914
SLJ-005	843	736	2.00	775	671	0.796	0.912	0.866
平均						0.846	0.926	0.932

根据 EC9 中对铝合金板件螺栓连接的构造要求,端距  $e \geq 2d_0$ . 表 7 列出了当端距  $e = 2d_0$  时各国规范的孔壁承压强度标准值  $f_{ck}^b$  (铝合金 6061-T6,抗拉强度  $f_u = 265$  MPa). 表中各公式符号统一为 GB50429 的相关符号, $\sigma_b = 2.5\alpha/\gamma_{mb}$ ,  $P_f$  为连接板件的最小保证应力. 其中用中国规范 GB 50429 求得的

$f_{ck}^b$ 明显偏小,这是由于规范 GB 50429 考虑了最小螺栓孔中心间距的不利影响,而在计算单螺栓孔孔壁承压强度时偏于保守. 表 7 中各规范的平均孔壁承压强度标准值约为 467 MPa,与本文公式的计算值 477 MPa 非常接近,这反映了本文公式的准确性及可靠性.

表7 各国规范中端距 $2d_0$ 螺栓孔壁承压强度标准值

Tab.7 Bearing strength at bolt hole when end distance equals to $2d_0$						MPa
	美国铝合金 设计手册 <sup>[13]</sup>	BS8118 <sup>[14]</sup>	EC9 <sup>[3]</sup>	GB50429 <sup>[1]</sup>	文献 <sup>[8]</sup>	本文
计算公式	$f_{ck}^b = 2f_u$	$f_{ck}^b = 2p_f$	$f_{ck}^b = 2.5\alpha_b f_u$	$f_{ck}^b = 1.16f_u \cdot \gamma_m$	$f_{ck}^b = 1.53f_u \cdot \gamma_m$	式(11)
标准值	530	435	441	400	527	477

考虑分项系数 1.30,对于端距为  $2d_0$  的情况,铝合金 6061-T6 的孔壁承压强度设计可取为  $f_c^b = f_{ck}^b / \gamma_m = 365$  MPa.

## 4 结论

我国《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)中,铝合金孔壁承压强度设计值  $f_c^b$  由 EC9 规范简单换算获得,取值过于保守. 本文完成了 15 个铝合金双夹板受剪连接的试验研究和数值模拟,根据试验和数值模拟结果,给出了铝合金受剪螺栓连接的孔壁承压变形失效准则;基于该失效准则,本文建议按照式(11)计算螺栓孔的孔壁承压强度. 对于端距  $2d_0$  的情况,本文建议 6061-T6 的孔壁承压强度标准值取为 477 MPa,设计值取为 365 MPa.

## 参考文献:

- [1] GB50429—2007 铝合金结构设计规范[S]. 北京:中国标准出版社,2007.  
GB50429—2007 Code for design of aluminum structures [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [2] GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.  
GB50017—2003 Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [3] ECCS. CEN/TC 250/SC9-PT9 Eurocode 9 part1.1 design of aluminum structures[S]. [S.1.]:ECCS,1997.
- [4] Kim H J, Yura J A. The effect of ultimate-to-yield ratio on the bearing strength of bolted connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 49(3): 255.
- [5] Mackerle J. Finite element analysis of fastening and joining: a bibliography (1990—2002) [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003, 80(4): 253.
- [6] Sheng N, Yam C H, Iu V P. Analytical investigation and the design of the compressive strength of steel gusset plate connections [J]. Journal of Constructional Steel Research 2002, 58: 1473.
- [7] AISC. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings[S]. [S.1.]: American Institute of Steel Construction, Inc., 2000.
- [8] 石永久,张贵祥,王元清. 铝合金结构螺栓连接的抗剪计算方法[J]. 建筑钢结构进展,2008,10(1):1.  
SHI Yongjiu, ZHANG Guixiang, WANG Yuanqing. Computational method on bolted joint for aluminum alloy sheets [J]. Journal of Building Structures, 2008, 10(1): 1.
- [9] 王元清,袁焕鑫,石永久,等. 铝合金板件螺栓连接承压强度试验与计算方法[J]. 四川大学学报:工程科学版,2011,9(43): 203.  
WANG Yuanqing, YUAN Huanxin, SHI Yongjiu, et al. Experiments and computational method on bearing capacity of bolted joint for aluminum alloy sheets[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 9(43): 203.
- [10] GB/T5237—2004 铝合金建筑型材质量标[S]. 北京:中国标准出版社,2004.  
GB/T5237—2004 Wrought aluminum alloy extruded profiles for architecture [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [11] GB/T 5782—2000 六角头螺栓[S]. 北京:中国标准出版社,2000.  
GB/T5782—2000 Hexagon-headed bolt [S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [12] GB/T 3098.6—2000 紧固件机械性能—不锈钢螺栓、螺钉和螺柱[S]. 北京:中国标准出版社,2000.  
GB/T3098.6—2000 Mechanical properties of fasteners-bolts, screws and studs made of stainless-steel [S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [13] The Aluminum Association. Aluminum design manual [S]. 8th ed. Washington D C: Aluminum Association, 2005.
- [14] European Committee for Standardization. BS 8118-91. Structural use of aluminum part 1: code of practice for design, part 2: specification for materials, workmanship and protection [S]. London:European Committee for Standardization, 1991.