

文章编号:1673-2049(2016)05-0044-06

不同螺栓距离的连接板静力性能对比分析

徐忠根¹, 李志钢¹, 李磊强¹, 邓长根²

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:针对中国《钢结构设计规范》中对螺栓最小容许距离的规定与德国规范不同,选择普通螺栓连接的连接板作为研究对象,对比两国规范规定的效果差异;选择多种栓距进行拉伸对比分析,利用大型通用软件 ANSYS 对两国规范容许的最小距离即 3 倍和 3.5 倍螺栓孔径栓距的试件进行对比,分析两者的应力分布规律,并对两国容许栓距范围内的栓距进行研究。结果表明:栓距增大,试件的弹性极限和屈服极限承载力有所提高,在德国规范下试件承载力有所提高,结构更加稳定。

关键词:螺栓距离;连接板;静力性能;承载力;应力

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Comparative Analysis of Static Performance of Connecting Plates with Different Bolt Distances

XU Zhong-gen¹, LI Zhi-gang¹, LI Lei-qiang¹, DENG Chang-gen²

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

2. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the difference of minimum allowable bolt distance in *Code for Design of Steel Structures* of China and German specification, the connecting plate which was connected with common bolts was selected as object, and the effect differences of the two specifications were compared. Tension comparative analysis was carried out with various bolt distances. The minimum allowable distances of the two specifications which was 3 times and 3.5 times of the diameter of bolt hole were compared using the large general software ANSYS, and the stress distribution law was analyzed. The allowable bolt distances of the two specifications were studied. The results show that the elastic limit and yield limit of specimen increase with the increase of bolt distance. Under German specification, the bearing capacity of component is improved and the structure is more stable.

Key words: bolt distance; connection plate; static performance; bearing capacity; stress

0 引言

近年来,建筑、汽车、机械等各个生产行业的快速发展对紧固件螺栓临界性能提出了更高的要求。普通螺栓和高强度螺栓的应用很广泛^[1-20],在进行螺栓安装的构件中对于螺栓群各螺栓的距离中国

《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)^[21]都有明确要求,即中心距离以及中心到构件边缘距离的规定,明确了各自的最大容许距离和最小容许距离。德国规范^[22]和中国规范对普通螺栓群连接中螺栓最大和最小容许距离的规定存在一定差异,因此本文从最小容许距离着手,选择一种类型的普通螺栓连接

收稿日期:2016-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51478330)

作者简介:徐忠根(1965-),男,浙江金华人,研究员,工学博士,E-mail:xuzhonggen@263.net。

进行对比分析。

1 有限元模型

螺栓板件如图 1 所示,其中, e 为栓距,即在承受轴力的螺栓连接中沿内力方向螺栓的中心间距, g 为垂直内力方向的间距, c 为螺栓连接时的边距, f 为螺栓连接时的端距。中国规范的螺栓最小容许距离为 $3d_0$ (d_0 为螺栓孔径), e 和 g 的最小容许距离均为 $3d_0$,德国规范中螺栓最小容许距离则不同,对 e 规定的最小容许距离为 $3.5d_0$,对 g 规定的为 $3d_0$,比较分析 2 种最小容许距离所产生的受力性能,且在此基础上对构件作相应的分析。

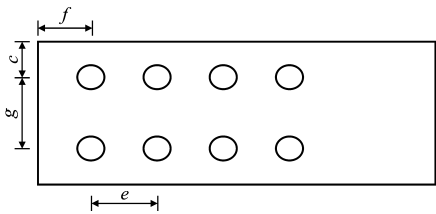


图 1 螺栓板件
Fig. 1 Arrange of Plate Bolts

在中国规范 $3d_0$ 和德国规范 $3.5d_0$ 两个最小容许距离基础上再选取 $3.1d_0, 3.2d_0, 3.3d_0, 3.4d_0$ 四个值,共 6 个试件模型,对它们的螺栓连接板进行对比分析。

图 2 为连接板的有限元模型,连接板采用 8 颗螺栓的螺栓群连接模型,数字为螺栓编号。

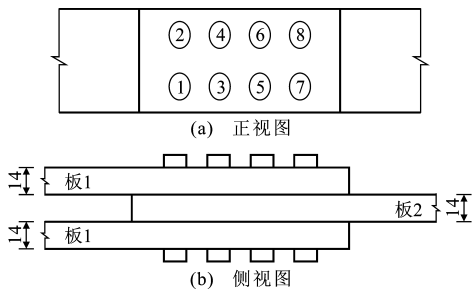


图 2 连接板的有限元模型(单位:mm)
Fig. 2 Finite Element Model of Connection Plate (Unit:mm)

本文中普通螺栓连接板的有限元模型板件都采用 Q345 级钢。螺栓都使用规格为 M20 的 4.8 级螺栓,垫片只考虑其厚度影响,不进行单独模拟;螺杆使用圆柱体模拟,圆柱体直径取螺栓有效截面的直径,螺杆位于螺孔的几何中心。板与板、螺母与板、板与螺帽的表面都用接触问题来考虑分析。

本文以中国规范和德国规范栓距最小容许距离的差异为出发点,因此有限元分析中要建立的模型

惟一区别就是螺栓距离的不同。为了更加详细地对比分析,在这 2 个最小容许距离之间依次取 $3d_0, 3.1d_0, 3.2d_0, 3.3d_0, 3.4d_0, 3.5d_0$,分析各试件的受力情况。

在建立模型时,螺栓中心至构件边缘距离和螺栓中心距离相同,即图 1 中的 c, f, g 取值相同。由于出发点是最低容许距离,因此其他距离的取值也从最低容许距离出发,都取相对应的最低容许距离。根据文献[23],取外排螺栓中心距内力方向 $f = 2d_0$,距垂直内力方向 $c = 1.5d_0$,且 $g = 3d_0$,则 $f = 44\text{ mm}, c = 33\text{ mm}, g = 66\text{ mm}$ 。螺杆的直径 $d = 20\text{ mm}$,螺孔的直径 $d_0 = 22\text{ mm}$,3 块板采用相同尺寸,板宽 $a = 132\text{ mm}$,板长 $b = 440\text{ mm}$ 。

本文中只考虑 e 的变化,且取 3 块板板厚 14 mm 来研究。在模型中所用的材料以及材料规格、大小均相同,仅 e 不同,故有以下模型:

- (1)模型 bolt-1-01;栓距 $e = 3.0d_0 = 66.0\text{ mm}$ 。
- (2)模型 bolt-1-02;栓距 $e = 3.1d_0 = 68.2\text{ mm}$ 。
- (3)模型 bolt-1-03;栓距 $e = 3.2d_0 = 70.4\text{ mm}$ 。
- (4)模型 bolt-1-04;栓距 $e = 3.3d_0 = 72.6\text{ mm}$ 。
- (5)模型 bolt-1-05;栓距 $e = 3.4d_0 = 74.8\text{ mm}$ 。
- (6)模型 bolt-1-06;栓距 $e = 3.5d_0 = 77.0\text{ mm}$ 。

1.1 模型建立和材料参数设定

本文模型试件的钢材都选用 Q345 级钢,螺栓为 4.8 级,规格为 M20,螺杆、螺帽、垫圈都为 45 号钢制成。在模型建立中选取的材料弹性模量 $E = 2.00 \times 10^5\text{ MPa}$,泊松比为 0.3。采用 ANSYS 模拟分析几何和材料非线性。由于板件和螺栓的材质不同,所以选取各自对应的本构模型(图 3),采用弹塑性模型分析 2 种构件的受力性能。模型所遵循的屈服准则为 Von-Mises 屈服准则,且选定等向强化模型。

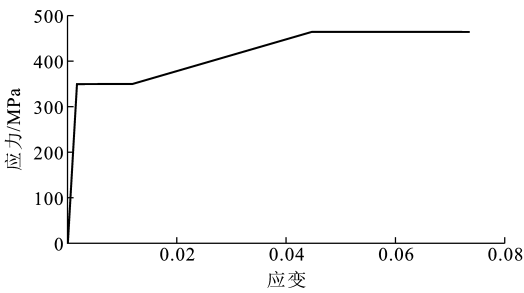


图 3 Q345 级钢的本构模型
Fig. 3 Constitutive Model of Steel Q345

本文主要对螺栓连接板及其对应的节点域受力情况进行分析,试件特征选用 3D 实体来建模,连接板涉及到的接触问题采用接触单元。在试件制作时

会施加预拉力,即扭紧螺栓的预紧力,建模时采用预应力单元。盖板和芯板选用空间八节点单元,螺杆采用圆柱体单元。

1.2 约束和荷载的施加

在建立有限元模型添加约束和荷载时,考虑构件在工程结构的实际情况中大多数螺栓连接板件的长度较长,本文模型给定了适合建模分析的板长。为合理建模分析和符合实际状况,连接板中 2 块盖板的左端施加 x,y,z 三向约束,对水平向右的均布荷载作用下的受力情况进行分析,且作用在芯板的右端,采用 60 子步缓慢加载并计算和分析。

2 有限元结果分析

2.1 荷载-位移曲线对比分析

结合试件 bolt-1-01,bolt-1-06 的荷载-位移曲线(图 4),可以看出 2 条曲线的走势相似,但在各阶段反映的参数值不同,具体参数对比如表 1 所示。由表 1 可以看出:从试件 bolt-1-01 到 bolt-1-06,弹性阶段的极限承载力从 201 kN 增加到 230 kN,增加了 29 kN,增长幅度较大;屈服极限承载力从 315 kN 增大到 331 kN,增加了 16 kN,增长幅度较小。6 个模型的破坏极限承载力变化不大,都在 393 kN 左右,且 6 个试件的屈服发生在 40 子步。芯板的最大应力值在 bolt-1-01~bolt-1-04 中变化不大,只有

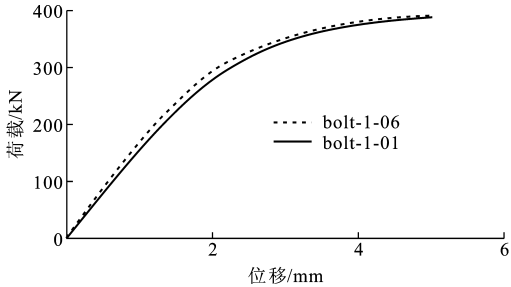


图 4 bolt-1-01 和 bolt-1-06 的荷载-位移曲线
Fig. 4 Load-displacement Curves of bolt-1-01 and bolt-1-06

bolt-1-2 略大一点,bolt-1-05 和 bolt-1-06 比其他 4 个试件有相应增大。螺栓孔内壁附近最大应力值的规律和芯板相似,同样是 bolt-1-05 和 bolt-1-06 比其他 4 个试件大,试件 bolt-1-01~bolt-1-04 应力集中更明显。从以上对比分析可知,试件 bolt-1-01~bolt-1-06 弹性阶段和屈服阶段的极限承载力得到一些提高,试件 bolt-1-06 更加稳定。

2.2 连接板应力对比分析

在 ANSYS 建模分析中,加载方式是采用 60 子步,分析 6 个试件各自的应力状态,取 10 子步为一个间隔,分 6 种子步对 bolt-1-01~bolt-1-06 的 6 个模型连接板应力状态进行对比分析,主要研究加载过程中应力发展情况,再评价其工作性能。试件的应力对比如表 2 所示。

表 1 试件参数对比

Tab. 1 Comparison of Parameters of Specimens

参数	bolt-1-01	bolt-1-02	bolt-1-03	bolt-1-04	bolt-1-05	bolt-1-06
弹性极限承载力/kN	201	206	213	220	226	230
屈服极限承载力/kN	315	320	322	324	328	331
破坏极限承载力/kN	390	390	392	392	393	395
芯板端部最大应力/MPa	224	232	226	229	240	238
螺栓孔内壁最大应力/MPa	406	410	406	411	429	423

先对 6 个模型试件连接的各自整个受力在盖板左端部和芯板右端部的应力分布规律进行分析。再在 6 种子步中对螺栓孔内壁和芯板右端部应力进行对比分析。

对于每个试件,上盖板左端部和芯板右端部的应力相比螺栓孔壁的都小,且盖板的最小,因此可以得出 6 种螺栓距离 e 对这 2 个位置的应力没有影响,这是因为连接的应力集中和破坏点不是这 2 个位置,而是在螺栓孔附近。

从 10 子步到 60 子步每个试件应力都是增加趋势,但当到 60 子步时,bolt-1-05 和 bolt-1-06 的应力都比其他的大,连接的螺栓附近区域承受更大的作

用力。对于芯板端部,每隔 10 子步它的应力都增加较大,但螺栓孔壁应力在 10 子步到 30 子步之间基本上没变化,而在 40 子步到 60 子步之间增长幅度很大。由此可知,连接在受力开始阶段芯板端部主要承受力的作用,当到达一定程度即 30 子步时,承受力的最主要部位是螺栓内壁及附近区域。

以芯板端部为参照点,从 10 子步到 60 子步的过程中试件 bolt-1-01~bolt-1-06 的应力增量分别为 177.7,177,176,179.8,186,182.6 MPa;以连接的螺栓孔内壁为参照点,从 10 子步到 60 子步的过程中试件 bolt-1-01~bolt-1-06 的应力增量分别为 188,182,183,193,209,202MPa。从这些数据可以

表 2 试件应力对比

Tab. 2 Comparison of Stresses of Specimens

		MPa					
试件编号	位置	10 子步	20 子步	30 子步	40 子步	50 子步	60 子步
bolt-1-01	芯板右端部	49.3	75.0	123.0	158.0	226.0	227.0
	螺栓孔壁区域	218	220	220	236	361	406
	上盖板左端部	25.2	49.4	75.0	80.0	106.0	137.0
bolt-1-02	芯板右端部	53	79	133	162	217	230
	螺栓孔壁区域	233	234	238	243	325	415
	上盖板左端部	27.4	54.0	78.0	82.0	109.0	143.0
bolt-1-03	芯板右端部	50	76	126	159	210	226
	螺栓孔壁区域	223	224	226	238	314	406
	上盖板左端部	26	51	77	80	106	136
bolt-1-04	芯板右端部	49.2	74.0	124.0	160.0	212.0	229.0
	螺栓孔壁区域	217	219	222	239	317	410
	上盖板左端部	25.1	49.9	75.0	81.0	107.0	138.0
bolt-1-05	芯板右端部	55	77	155	164	220	241
	螺栓孔壁区域	223	227	231	244	329	432
	上盖板左端部	25.5	52.0	78.0	83.0	111.0	145.0
bolt-1-06	芯板右端部	55.4	77.0	152.0	162.0	217.0	238.0
	螺栓孔壁区域	225	226	228	242	326	427
	上盖板左端部	26	52	77	82	109	144

看出,bolt-1-05 和 bolt-1-06 的受力性能比其他 4 个更好,其中 bolt-1-05 应力承受范围最大。由此可知,6 个试件的应力集中和破坏点都在螺栓孔附近区域,而区别在于每个试件的最大应力不同。孔壁附近出现的最大应力位于孔壁内的中心位置,而此位置是芯板的螺栓孔,可得出最大应力出现于芯板的螺栓孔壁区域,破坏点也在这个位置。通过对 6 种螺栓距离的对比分析可知,在其他连接试件规格相同的条件下,在屈服阶段 $e=3d_0$ 的试件 bolt-1-01 比 $e=3.5d_0$ 的试件 bolt-1-06 更不容易应力集中,但 $e=3.2d_0$ 的试件 bolt-1-03 应力状态最好,应力集中没有其他的强,不容易发生破坏。

2.3 上盖板螺栓节点域的应力对比分析

虽然最终应力集中和破坏点不在上盖板的螺栓节点域,但各试件这一区域的应力状态在各自的受力过程中有所不同,且在不同的子步中也有不同,故在本节作进一步分析。

本文所采用的试件具有对称性,且试件是受对称的均布力,按理论分析节点域中心线两边 2 排螺栓区域的受力和应力情况也是对称的。因此,取水平中心线以上的部分来分析,即上排螺栓 2,4,6,8 的附近区域,鉴于规范对螺栓中心至构件边缘距离的最小容许距离有规定,所以对螺栓中心到构件边缘的区域进行分析。构件的破坏点很可能发生在芯板的螺栓孔附近区域,所以本节对节点域作分析,以

得出对研究芯板有利的方法、建议和结论。

虽然 bolt-1-01~bolt-1-06 的螺栓距离不同会影响受力和应力状态,但所有试件在相同子步下其应力分布情况和规律相似,在不同子步下应力分布规律不同,下面分析 6 种子步各自的情况。

在 10 子步时,由于试件刚开始承受载荷,其应力呈对称分布,上盖板边缘四周的应力都大致相同,且是最小应力的分布区域,还有 2 排螺栓之间的中心线区域也分布着最小应力;最大应力分布在螺栓孔壁,且应力从孔壁圆孔边向附近的区域逐渐变小,在同一排螺栓与螺栓之间的区域应力都相等,应力介于最大值和最小值中间。

在 20 子步时,试件承受荷载有一段时间,应力分布就失去了对称性,上盖板右边绝大部分边缘的应力都大致相同,且是最小应力的分布区域,在螺栓 3~8 的下边缘区域都出现了最小应力,在螺栓 7,8 中间也出现了最小应力,而盖板左端部和螺栓 1,2 附近就没有这种情况,这和 10 子步下有很大区别,且最大应力也分布在螺栓孔壁,应力从孔壁圆孔边向附近区域逐渐变小。

在 30 子步时,由于试件承受荷载的时间增长,应力分布和 10 子步的不同,和 20 子步的相似,最小应力也是出现在盖板右端的边缘部分,且在螺栓 7,8 附近的局部区域出现,其他位置没有出现;最大应力分布在螺栓孔壁,且应力从孔壁圆孔边向附近区

域逐渐变小,但节点域左边部分的应力比右边部分大,且左边的应力分布较均匀。

在 40 子步时,由于试件承受荷载的时间增长,应力分布和 10,20 子步的不同,和 30 子步的相似,最小应力也是出现在盖板右端的边缘部分,且在螺栓 7,8 附近的局部区域出现,其他位置没有出现;最大应力分布在螺栓孔壁,且应力从孔壁圆孔边向附近区域逐渐变小,但节点域左边部分的应力比右边部分大,且左边应力不是在 30 子步时的均匀分布,在螺栓 1,2 向构件边缘出现几条应力较大的条纹分布区域,说明此时整个结构出现了明显的应力集中。

在 50 子步时,由于试件承受荷载较大,结构也处在屈服阶段,最小应力出现在盖板右端的边缘部分,且在螺栓 7,8 附近的局部区域出现,其他位置没有出现;最大应力分布在螺栓孔壁,且应力从孔壁圆孔边向附近区域逐渐变小,从左边到右边应力由大到小分布,没有出现条纹分布区域。

在 60 子步时,试件接近破坏状态,应力分布情况和 50 子步的相同,除了螺栓孔附近,其余区域的最大应力出现在螺栓 1,2 附近的边缘区域。

从节点域的应力分布规律来看,应力集中发展在芯板,通过螺栓传递给上盖板区域。对上盖板区域应力分布的分析方法可以用到芯板,从而更加确定应力集中应力出现的位置,以及判断会发生何种破坏。

3 结 语

(1)在螺栓孔径和其他条件相同下,随栓矩的增大,试件的弹性极限承载力和屈服极限承载力有所提高,螺栓距离 $e=3.5d_0$ 的试件 bolt-1-06 比 $e=3d_0$ 的试件 bolt-1-01 承载力更大,bolt-1-06 的弹性极限承载力提高 14.43%,屈服极限承载力提高 5.08%。因此,德国规范规定的最小容许距离更能确保结构的稳定和具有足够的承载力。

(2)由 6 个试件连接和节点域的应力情况可知,螺栓群连接最大应力出现在螺栓孔径区域,即中间板件芯板的螺栓孔径位置。由应力集中分析可知,试件破坏将发生在芯板处,且 $e=3.5d_0$ 的试件比 $e=3d_0$ 的试件应力集中稍微明显,在屈服阶段容易使结构发生破坏,而 $e=3.2d_0$ 的试件应力集中最不明显,综合来看 $e=3.5d_0$ 的试件工作性能更好。

参考文献:

References:

[1] 沈祖炎,陈扬骥,陈以一. 钢结构基本原理[J]. 2 版.

北京:中国建筑工业出版社,2005.

SHEN Zu-yan, CHEN Yang-ji, CHEN Yi-yi. Fundamental Theory of Steel Structure[J]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.

[2] 惠卫军,董瀚,翁宇庆. 高强度螺栓钢的发展动向[J]. 机械工程材料,2002,26(11):1-4,38.

HUI Wei-jun, DONG Han, WENG Yu-qing. Research and Development Trends of High Strength Steel for Bolts [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002,26(11):1-4,38.

[3] 王萌,石永久,王元清. 高强度螺栓连接抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(3):27-34.

WANG Meng, SHI Yong-jiu, WANG Yuan-qing. Analysis on Shear Behavior of High-strength Bolts Connection[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3):27-34.

[4] 石永久,潘斌,施刚,等. 高强度钢材螺栓连接抗剪性能试验研究[J]. 工业建筑,2012,42(1):56-61.

SHI Yong-jiu, PAN Bin, SHI Gang, et al. Experimental Study on High Strength Steel-plate-bolted Connections Under Shear Force[J]. Industrial Construction, 2012,42(1):56-61.

[5] 杨鹏宇. 钢结构高强螺栓连接施工[J]. 山西建筑,2006,32(16):140-141.

YANG Peng-yu. On Steel Structural High-strength Bolt Jointing Construction[J]. Shanxi Architecture, 2006,32(16):140-141.

[6] 刘瑞昌,刘祥斌,宋年秀,等. 螺栓连接有限元模拟方法的应用研究[J]. 制造业自动化,2013,35(12):5-7,21.

LIU Rui-chang, LIU Xiang-bin, SONG Nian-xiu, et al. A Study on the Finite Element Modeling for Bolted Connection Based on Hyperworks[J]. Manufacturing Automation, 2013,35(12):5-7,21.

[7] MAGGI Y I, GONCALVES R M, LEON R T, et al. Parametric Analysis of Steel Bolted End Plate Connections Using Finite Element Modeling[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(5):689-708.

[8] KIM J, YOON J C, KANG B S. Finite Element Analysis and Modeling of Structure with Bolted Joints[J]. Applied Mathematical Modeling, 2007, 31(5):895-911.

[9] FAELLA C, PILUSO V, RIZZANO G. Experimental Analysis of Bolted Connections; Snug Versus Preloaded Bolts[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(7):765-774.

[10] YANG J, DEWOLF J T. Mathematical Model for Re-

- laxation in High-Strength Bolted Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(8): 803-809.
- [11] 胡迎春, 刘庚武. 螺栓组件抗拉疲劳及防松性能分析[J]. 机械制造与自动化, 2007, 36(3): 34-35, 38.
HU Ying-chun, LIU Geng-wu. Analyze About the Performance of Tension Fatigue and Anti-loosen for Bolt Groupware[J]. Machine Building & Automation, 2007, 36(3): 34-35, 38.
- [12] 宋明志, 王 勇. 摩擦型高强度螺栓连接件滑移阶段工作性能研究[J]. 建筑科学, 2012, 28(9): 25-28.
SONG Ming-zhi, WANG Yong. Study on the Working Performance of Friction-typed High-strength Bolt Connectors in Sliding Stage[J]. Building Science, 2012, 28(9): 25-28.
- [13] SONG H W, DUAN Y Y, YANG J. Numerical Simulation on Bolted Rock Joint Shearing Performance[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(3): 460-465.
- [14] ARGHAVANI J, DERENNE M, MARCHAND L. Sealing Performance of Gasketed Bolted Flanged Joints: A Fuzzy Decision Support System Approach[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(1): 2-10.
- [15] ELKERSH I. Experimental Investigation of Bolted Cold Formed Steel Frame Apex Connections Under Pure Moment[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2010, 1(1): 11-20.
- [16] 李 雄. 螺栓连接的复合材料层板在弯曲载荷下的破坏形式与承载能力[J]. 航天工艺, 1992(5): 33-34, 37.
LI Xiong. Failure Mode and Carrying Capacity of Bolted Composite Laminates Under Bending[J]. Aerospace Technology, 1992(5): 33-34, 37.
- [17] 彭铁红, 侯兆欣, 文双玲, 等. 螺栓孔径与孔型对高强度螺栓摩擦型连接承载能力影响的试验[J]. 钢结构, 2007, 22(8): 30-34.
PENG Tie-hong, HOU Zhao-xin, WEN Shuang-ling, et al. Experiment of Effects of Hole Diameter and Hole Type on Bearing Capacity of High Strength Bolt Frictional Joints[J]. Steel Construction, 2007, 22(8): 30-34.
- [18] 宋福星, 熊作银. 正确认识抗剪型高强螺栓[J]. 煤矿机械, 2001, 23(2): 56-58.
SONG Fu-xing, XIONG Zuo-yin. Proper Cognition About Resisting Shear Type High Strength Bolt[J]. Coal Mine Machinery, 2001, 23(2): 56-58.
- [19] 刘秀丽, 王 燕. 外伸端板高强度螺栓抗拉连接设计方法研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(1): 29-36.
WANG Xiu-li, WANG Yan. Study on the Design Method of High Strength Bolts of Extended End-plate Tensile Connections[J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(1): 29-36.
- [20] 周建江, 刘 杏, 严 峻, 等. 高强度螺栓抗拉强度测量不确定度的评定[J]. 物理测试, 2008, 26(3): 43-46.
ZHOU Jian-jiang, LIU Xing, YAN Jun, et al. Uncertainty Evaluation for Tensile Strength of High Strength Bolts[J]. Physics Examination and Testing, 2008, 26(3): 43-46.
- [21] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
GB 50017—2003, Code for Design of Steel Structures [S].
- [22] DIN 18800-1: 2008, Steel Structures — Part 1: Design and Construction.
- [23] YAMAGUCHI T, KITADA T, NAKANO T. Deformation Capacity of Large Diameter High Strength Bolts with Waisted Shank Subjected to Axial Tensile Force[J]. Kou Kouzou Rombunshuu, 2001, 8(32): 1-8.