

DOI:10.11918/202003086

高强钢板组合螺栓抗拉性能有限元分析

段留省,夏瑞林,周天华

(长安大学 建筑工程学院,西安 710061)

摘 要: 高强钢板钻孔攻丝后替代螺母,与高强螺杆组合成一种新的单边螺栓连接副,可用于钢管柱框架节点. 为研究钢板组合螺栓抗拉承载力和破坏机理,在本组试验研究的基础上对 4 类钢板组合螺栓共 64 个试件进行单调拉伸数值模拟,以板厚和螺杆直径为研究变量,包括 Q345B、45 号钢、Q460C 和 Q690D 四种钢材和 10.9 级 M16、M20、M24、M27 和 M30 五种规格高强螺栓. 结果表明:Q345B、Q460C 和 Q690D 均可作为 45 号钢的替代材料;钢板组合螺栓在锚固可靠的条件下,可按螺杆螺纹极限抗拉荷载的 70% 作为其抗拉设计值;钢板较薄时,发生钢板螺纹滑牙破坏,螺栓拔出,螺杆最大应力位于锚固区,钢板向外凸起,凸起量大于支点间距的 1/200;钢板较厚时,发生螺杆拉断破坏,螺杆最大应力位于构造区,两种破坏模式中钢板的最大应力均位于钢板螺纹第一扣处. 为保证钢板组合螺栓不发生钢板螺纹滑牙破坏,建议 Q345B 钢板厚度不宜低于 1.15*d*;Q460C 钢板厚度不宜低于 1.10*d*;Q690D 钢板厚度不宜低于 0.95*d*,根据弹性力学和螺纹传力机理推导高强钢板组合螺栓抗拉承载力公式,公式计算结果与有限元结果吻合良好,研究成果可为钢板组合螺栓的设计提供参考.

关键词: 单边螺栓;钢板攻丝;应力分布;厚径比;破坏模式;螺纹

中图分类号: TU393.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)10-0102-09

Finite element analysis on tensile performance of high-strength steel plate composite bolt

DUAN Liusheng, XIA Ruilin, ZHOU Tianhua

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Drilled and tapped high-strength steel plates are possible replacements of nuts and can be combined with high-strength bolts to form new assemblies that are used as blind bolts for steel tube column frame joints. In order to study the tensile capacity and failure mechanism of steel plate composite bolts, on the basis of our experimental research results, 64 specimens were tested under monotonic tensile load by ABAQUS software. The thicknesses of four types of steel plates (i. e. , Q345B, 45#, Q460C, and Q690D) and the diameters of five specifications of high-strength bolts (i. e. , M16, M20, M24, M27, and M30) in grade 10.9 were investigated. Results show that the Q345B, Q460C, and Q690D steel plates can replace the 45# steel plate. The tensile value of the steel plate composite bolts can be designed as 70% of the ultimate tensile load of the screw thread under reliable anchored. For thin steel plates, the bolt was pulled out, the steel plate thread experienced shear failure, the out-of-plane deformation of the steel plate was larger than 1/200 of the support distance, and the screw maximum stress located in the anchoring area. For thick steel plates, the bolt experienced tensile fracture, and the screw maximum stress located in the structural area. The positions of the maximum stress of the steel plates in the two failure modes were both at the first thread. In order to avoid the steel plate thread failure in the steel plate composite bolt, it is suggested that the thicknesses of Q345B, Q460C, and Q690D steel plates should be no less than 1.15*d*, 1.10*d*, and 0.95*d*, respectively. Based on the elastic mechanics and thread-related research, the formula for tensile capacity of high-strength steel plate composite bolts was derived. The calculated results were in good agreement with the finite element results. The research results can provide a reference for the design of high-strength steel plate composite bolts.

Keywords: blind bolt; steel plate drilling and tapping; stress distribution; thickness to diameter ratio; failure mode; thread

收稿日期: 2020-03-24
基金项目: 国家自然科学基金(51708038);
 陕西省自然科学基金(2018JQ5016);
 中央高校基本科研业务费项目(300102288102)
作者简介: 段留省(1985—),男,高级工程师,硕士生导师
通信作者: 段留省,duanliusheng@126.com

高强钢板组合螺栓由开设丝孔的高强钢板和常规高强螺栓组成. 钢板钻孔攻丝后替代螺母,中心丝孔与螺栓配合,四周孔设置构造螺栓,形成一种新的连接副. 安装时先将钢板置于钢管柱内,高强螺栓穿钢管柱壁板并拧入钢板丝孔,完成连接.

目前研究多集中在自成型锚固单边螺栓,关于这种高强钢板组合螺栓研究较少. Wang 等^[1] 方管柱单边螺栓连接试件进行拉伸试验,提出一种用于预测极限强度和屈服强度的分析模型. 传统单边螺栓存在锚固不足的缺陷^[2],为提高单边螺栓抗拔能力,Yao 等^[3]提出带扩大端单边螺栓,Pokharel 等^[4]提出双头锚定单边螺栓,抗拉试验表明混凝土强度对锚固效果影响显著^[5-6]. 何明胜等^[7]提出将钢板贴焊于钢管柱外侧,钻孔攻丝后再与高强螺栓连接,存在钢板变形和螺纹脱扣的问题,原因可能是钢板抗拉强度与螺栓不匹配. 丁娟等^[8]提出当加大钢板厚度并降低螺栓强度等级时,钢板螺纹脱扣现象消失并能达到刚接. 吴琼尧等^[9]建立了螺栓球节点有限元精细化模型,考虑了螺纹啮合传力,但未能模拟螺栓连接破坏现象. 陈绍蕃^[10]建议高强螺栓抗拉承载力为螺栓有效拉力的 0.7 倍,但需试验验证. 刘秀丽等^[11]通过数值模拟提出考虑撬力的高强螺栓抗拉承载力计算公式. 田振山等^[12]以最后一圈螺纹牙被剪断建立螺栓拉力极限承载力公式,但是以压力

加载且假设两板之间受力连续,有待验证.

为深入研究这种螺栓的抗拉性能和螺栓连接的破坏机理,采用 ABAQUS 有限元软件对 M16、M20、M24、M27、M30 五种高强钢板组合螺栓进行抗拉数值模拟,探讨不同板厚和高强螺栓直径对连接副力学性能影响规律. 通过极限承载力、变形能力、应力云图分析,获得高强钢板与螺栓的最优配合参数,并通过理论分析,推导抗拉承载力计算公式.

1 模拟方案

设计 64 组高强钢板组合螺栓试件,选取 Q345B、45 号钢、Q460C 和 Q690D 共 4 种钢材和 10.9 级 M16、M20、M24、M27、M30 共 5 种高强螺栓进行组合,钢板厚度按“略薄、标准、略厚”的原则选取^[13],试件编号见表 1,其中 45-M16-16 表示钢材牌号为 45 号钢,螺栓为 M16,钢板厚度为 16 mm,以此类推. 采用双折线本构模型,切线模量为 0.02 倍的初始弹性模量^[9],材料参数见表 2,部分材料本构关系见图 1.

表 1 试件编号
Tab. 1 Specimens numbering

编号	螺栓 型号	钢板厚 度/mm	编号	螺栓 型号	钢板厚 度/mm	编号	螺栓 型号	钢板厚 度/mm	编号	螺栓 型号	钢板厚 度/mm
345-M16-16	M16	16	45-M16-14	M16	14	460-M16-14	M16	14	690-M16-12	M16	12
345-M16-18	M16	18	45-M16-16	M16	16	460-M16-16	M16	16	690-M16-14	M16	14
345-M16-20	M16	20	45-M16-18	M16	18	460-M16-18	M16	18	690-M16-16	M16	16
345-M20-20	M20	20	45-M20-18	M20	18	460-M20-20	M20	20	690-M20-16	M20	16
345-M20-22	M20	22	45-M20-20	M20	20	460-M20-22	M20	22	690-M20-18	M20	18
345-M20-25	M20	25	45-M20-22	M20	22	460-M20-25	M20	25	690-M20-20	M20	20
345-M24-22	M24	22	45-M24-22	M24	22	460-M24-22	M24	22	690-M24-16	M24	16
345-M24-25	M24	25	45-M24-25	M24	25	460-M24-25	M24	25	690-M24-18	M24	18
345-M24-28	M24	28	45-M24-28	M24	28	460-M24-28	M24	28	690-M24-20	M24	20
345-M27-22	M27	22	45-M27-22	M27	22	460-M27-22	M27	22	690-M27-22	M27	22
345-M27-25	M27	25	45-M27-25	M27	25	460-M27-25	M27	25	690-M27-25	M27	25
345-M27-28	M27	28	45-M27-28	M27	28	460-M27-28	M27	28	690-M27-28	M27	28
345-M27-30	M27	30	45-M27-30	M27	30	460-M27-30	M27	30	690-M27-30	M27	30
345-M30-28	M30	28	45-M30-25	M30	25	460-M30-25	M30	25	690-M30-22	M30	22
345-M30-30	M30	30	45-M30-28	M30	28	460-M30-28	M30	28	690-M30-25	M30	25
345-M30-32	M30	32	45-M30-30	M30	30	460-M30-30	M30	30	690-M30-28	M30	28

表 2 材料参数
Tab. 2 Materials parameters

材料 类型	规格	f_y /MPa	f_u /MPa	E / 10 ⁵ MPa	切线模量/ MPa
钢板	Q345B	395.44	558.09	2.00	4 000
	45 号	375.28	668.01	2.05	4 100
	Q460C	484.25	611.57	2.02	4 040
	Q690D	786.30	832.00	2.06	4 120
螺栓	10.9S	1 040.00	1 240.00	2.10	4 200

2 有限元模型

2.1 模型建立与网格划分

高强钢板组合螺栓试件及试验装置^[14]见图 2 (a),用构造螺栓将钢板固定于 T 型连接件,将 10.9 级高强螺栓旋入攻丝孔内并穿出钢板外露 2~3 个丝扣,螺杆和 T 型件分别在万能试验机的上下夹头

处夹紧,完成安装.通过 ABAQUS 建模分析,试件精细化模型及网格划分见图 2(b),螺纹模型见图 2(c).螺栓螺纹尺寸^[15]见图 3,细部几何尺寸见表 3.采用围绕中心轴旋转 360°的平面齿形螺纹替代螺旋上升螺纹,二者最大计算误差仅 1%,可以接受^[16].

隐式方法 ABAQUS/Standard 分析程序中,材料的退化和失效常常导致严重的收敛困难,螺栓的受拉过程是材料失效的过程,材料刚度能够退化并且一直降低到零,在这段过程中单元从模型中被完全除掉.为真实模拟破坏过程,采用显式动力学进行求解.有限元建模装配时统一将螺栓穿出钢板外露 2 个丝扣,模型采用 8 节点缩减积分实体单元 C3D8R.螺栓螺纹与钢板螺纹采用通用接触^[17],切向采用罚摩擦公式,法向设置为硬接触.采用柔性损伤准则,断裂应变取材料本构模型的极限应变,见图 1(a).钢板构造螺栓几何中心处取耦合点完全固定,螺栓头部设置成刚体见图 3(a),采用位移控制加载,最大位移 20 mm.

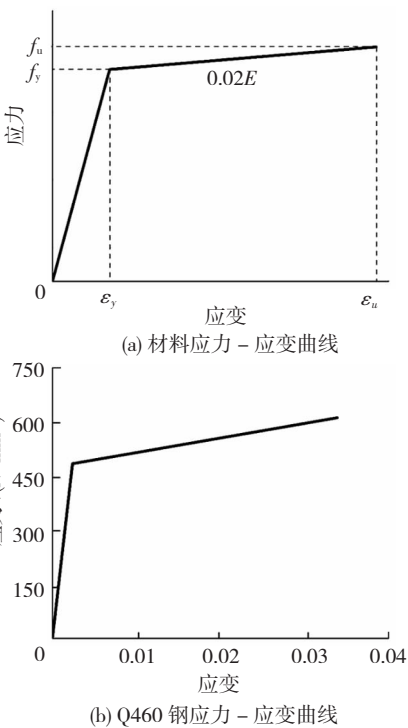


图 1 材料本构关系

Fig. 1 Constitutive relations of materials

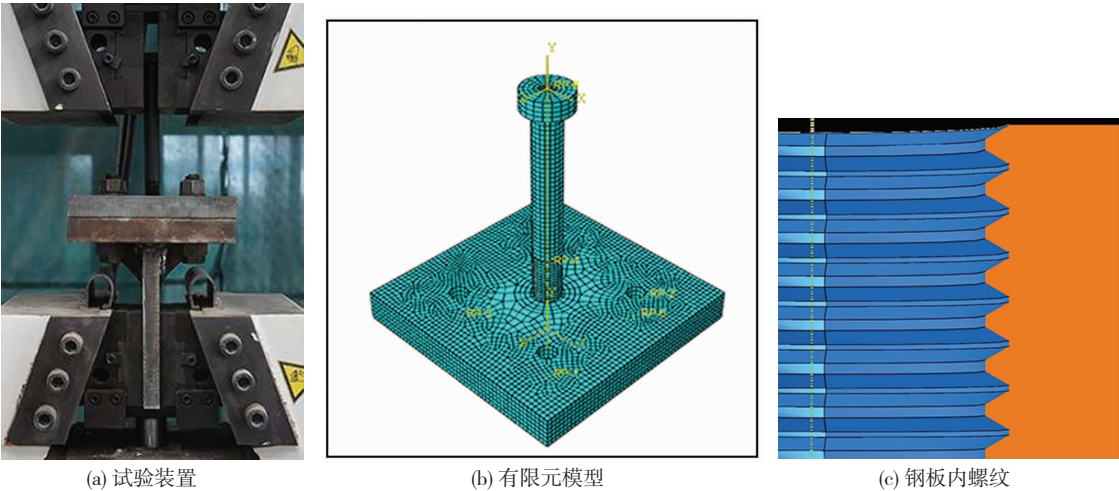


图 2 试验装置及有限元模型

Fig. 2 Experimental setup and finite element model

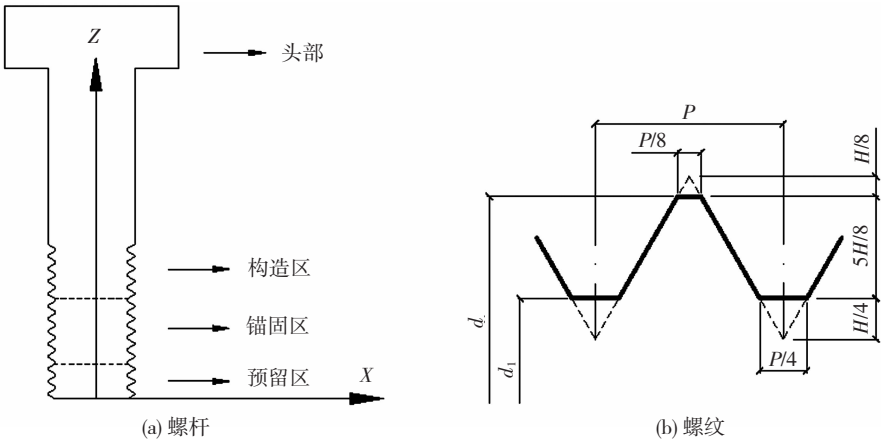


图 3 螺栓示意

Fig. 3 Schematic diagram of bolts

表 3 螺纹参数				
Tab. 3 Threads parameters				mm
螺栓型号 <i>D</i>	螺距 <i>P</i>	螺纹高度 <i>H</i>	小径 <i>d</i> ₁	大径 <i>d</i>
M16	2.0	1.732 1	13.835	16
M20	2.5	2.165 1	17.294	20
M24	3.0	2.598 1	20.752	24
M27	3.0	2.598 1	23.752	27
M30	3.5	3.031 1	27.727	30

2.2 模型验证

为验证有限元模型,选取 45 – M24 – 20 和 45 – M24 – 25 两组试件与本组试验结果对比,有限元试件极限承载力 P_e 和试验试件极限承载力 P_s [14] 的对比结果见表 4,最大误差为 5.73%;有限元试件45 –

M24 – 20 发生钢板滑牙破坏、45 – M24 – 25 发生螺杆拉断破坏,与试验结果吻合,见图 4. 选取 45 – M24 – 25 试件的试验与有限元模拟值得到的荷载 – 位移曲线进行对比见图 4(e). 加载初期试验值小于有限元分析值,后期两者数值基本吻合. 原因是试验试件有偏心,加载初期板件和夹具之间有缝隙. 以上证明有限元模型准确,可进行参数化分析.

表 4 有限元与试验极限承载力对比			
Tab. 4 Comparison of finite element and experimental ultimate capacity			
编号	P_e /kN	P_s /kN	$((P_e - P_s)/P_e)/\%$
45 – M24 – 20	279.56	264.05	5.55
45 – M24 – 25	396.77	374.02	5.73

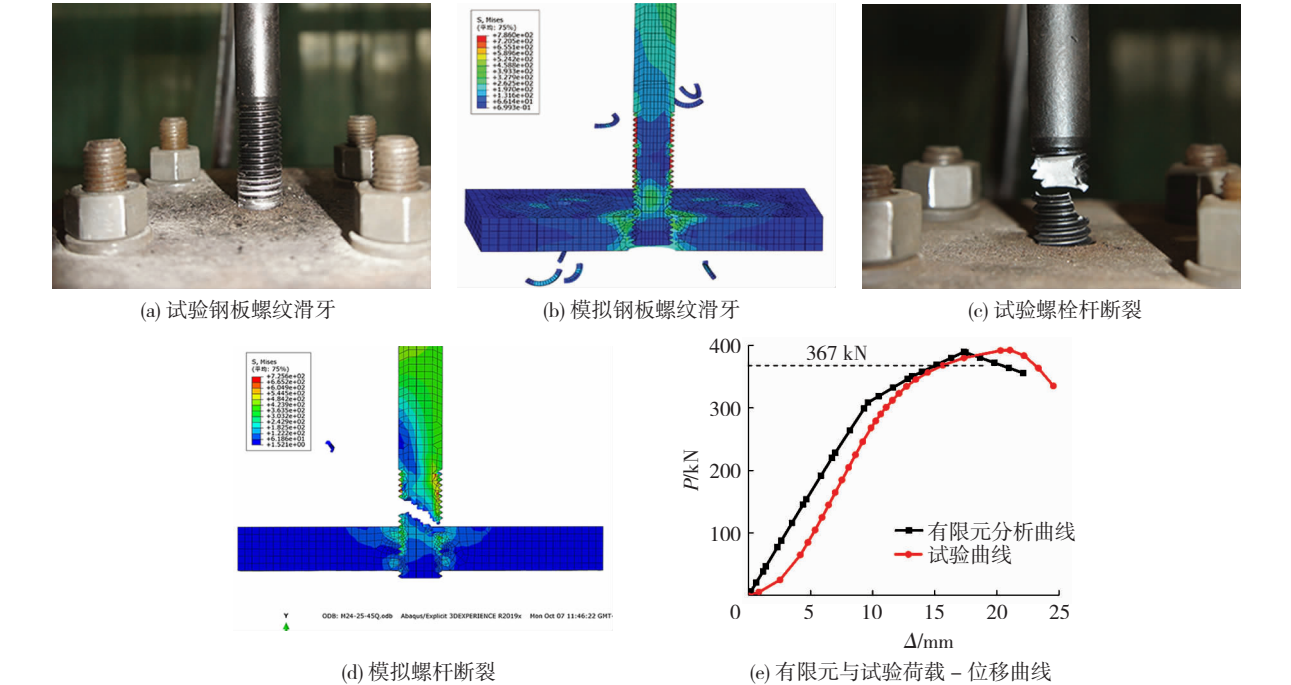


图 4 试验结果与模拟结果对比
Fig. 4 Comparison of experimental and simulation results

3 有限元结果分析

3.1 破坏模式分析

高强钢板组合螺栓连接副有 3 种破坏模式见图 4. 第一种是钢板板厚足够厚时螺杆拉断破坏,一般为斜 45°破坏面见图 5(a)、(b),螺栓拉断前存在明显变形,钢板螺纹完好,延性破坏. 第二种是钢板板厚不足时钢板螺纹滑牙破坏见图 5(c)、(d),构件破坏为钢板出现面外凸起变形,螺杆未被拉断,螺栓螺纹完好,脆性破坏. 第三种为螺杆拉断和钢板滑牙破坏同时发生,即钢板螺纹和螺栓螺纹均达到极限状态,是前两种破坏的临界状态,见图 5(e).

3.2 极限承载力分析

各试件极限承载力分析见表 5. 拾取钢板任意

一个构造螺栓几何中心耦合点,取反作用力最大值的 4 倍为有限元极限承载力 P_{max} , P_n 为螺栓最小拉力荷载 $P_n = A_s \times \sigma_{bmin}$, A_s 为螺纹的应力截面积, σ_{bmin} 为最小抗拉强度,本文所用 10.9 级高强螺栓 σ_{bmin} 取 1 040 N/mm², P_b 为螺栓极限荷载 [18]. 钢板组合螺栓抗拉承载力 $P_b = A_e f_{tb}$, 其中 A_e 为螺栓有效面积, f_{tb} 为螺栓极限抗拉强度. S 代表钢板螺纹滑牙破坏, F 代表螺杆拉断破坏, SF 代表两者同时发生. 由表 5 可知, Q345B、45 号钢、Q460C、Q690D 试件 P_{max}/P_b 螺杆拉断最小值分别为 88.12%、90.09%、90.92%、97.60%, 均大于 70%, 可知当钢板厚度符合抗滑牙条件时, 高强螺栓抗拉承载力设计值 N_e 可取螺栓有效拉力的 0.7 倍. 螺纹承载力随着钢板抗拉强度的提高而提高.

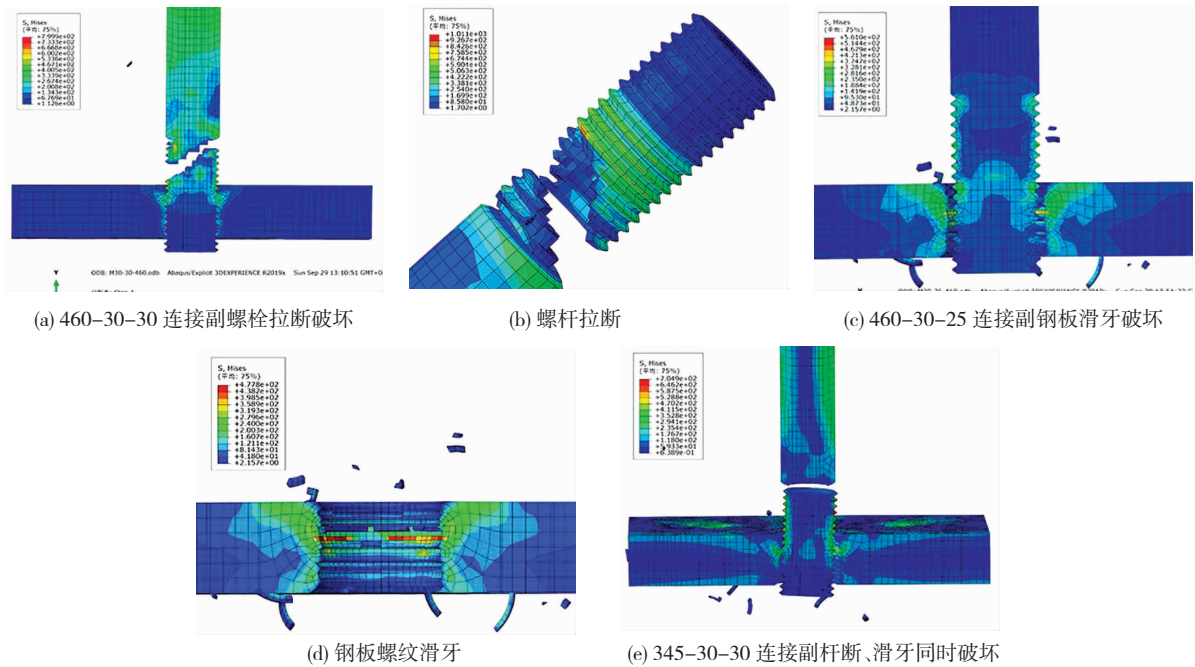


图 5 钢板组合螺栓抗拉模拟破坏现象

Fig.5 Failure modes of steel plate composite bolts in tensile simulation

表 5 有限元计算结果对比

Tab.5 Comparison of finite element calculation results

编号	$P_{\max}/\text{kN}$	$(P_{\max}/P_b)/\%$	破坏模式	编号	$P_{\max}/\text{kN}$	$(P_{\max}/P_b)/\%$	破坏模式	编号	$P_{\max}/\text{kN}$	$(P_{\max}/P_b)/\%$	破坏模式	编号	$P_{\max}/\text{kN}$	$(P_{\max}/P_b)/\%$	破坏模式
345-M16-16	142.19	82.57	S	45-M16-14	150.90	87.63	S	460-M16-14	153.83	89.33	S	690-M16-12	152.70	88.68	S
345-M16-18	166.27	96.56	F	45-M16-16	177.95	103.34	F	460-M16-16	181.39	105.34	F	690-M16-14	182.75	106.13	F
345-M16-20	171.15	99.39	F	45-M16-18	184.14	106.95	F	460-M16-18	193.83	112.56	F	690-M16-16	195.19	113.35	F
345-M20-20	255.62	86.86	S	45-M20-18	232.44	78.98	S	460-M20-20	264.05	89.72	S	690-M20-16	229.68	78.04	S
345-M20-22	265.14	90.09	F	45-M20-20	259.34	88.12	F	460-M20-22	267.59	90.92	F	690-M20-18	259.67	88.23	F
345-M20-25	289.26	98.29	F	45-M20-22	267.29	90.82	F	460-M20-25	271.06	92.10	F	690-M20-20	264.48	89.87	F
345-M24-22	334.55	84.25	S	45-M24-22	352.69	88.82	S	460-M24-22	365.91	92.15	S	690-M24-16	371.17	93.47	S
345-M24-25	368.16	92.71	S	45-M24-25	380.28	95.76	F	460-M24-25	374.02	94.19	F	690-M24-18	402.91	101.46	F
345-M24-28	395.05	99.48	F	45-M24-28	387.63	97.62	F	460-M24-28	378.60	95.34	F	690-M24-20	411.41	103.60	F
345-M27-22	443.97	85.98	S	45-M27-22	461.48	89.37	S	460-M27-22	481.71	93.29	S	690-M27-22	485.28	93.98	S
345-M27-25	497.85	96.41	S	45-M27-25	499.01	96.64	F	460-M27-25	512.58	99.27	F	690-M27-25	519.43	100.59	F
345-M27-28	529.37	102.52	F	45-M27-28	526.87	102.03	F	460-M27-28	536.27	103.85	F	690-M27-28	543.49	105.25	F
345-M27-30	528.15	102.28	F	45-M27-30	530.83	102.80	F	460-M27-30	534.89	103.59	F	690-M27-30	538.34	104.25	F
345-M30-28	611.22	96.85	S	45-M30-25	563.90	89.35	S	460-M30-25	593.98	94.11	S	690-M30-22	577.78	91.55	S
345-M30-30	640.18	101.43	SF	45-M30-28	624.20	98.90	F	460-M30-28	635.07	100.62	SF	690-M30-25	623.51	98.79	F
345-M30-32	658.10	104.27	F	45-M30-30	643.85	102.02	F	460-M30-30	656.15	103.96	F	690-M30-28	644.11	102.06	F

分析 Q690D 荷载 - 位移 ($P-\Delta$) 曲线. 由图 6(a) 可知, 试件发生螺栓拉断破坏时, 连接副的抗拉极限承载力均大于 P_n , 表明连接副锚固可靠; 试件发生钢板螺纹滑牙破坏时, 部分构件的极限抗拉承载力小于 P_n . 由图 6(b) 可知, 随着板厚的增加, 构件的极限抗拉承载力明显上升, 构件由钢板滑牙的脆性破坏变成螺栓拉断的延性破坏, 但当连接副为螺栓拉断破坏时, 增加板厚并不能显著提升连接副极限承载力, 原因是螺栓已达到受拉极限状态. 由图 6(c) 可知, 随着螺栓直径的增加 $P_{\max}$ 显著提升, 原因是在发生螺栓拉

断破坏时, 材料相同的螺栓直径大的试件有着更大的拉伸区域. 由图 6(d) 可知, Q690D 和 Q460C 的破坏模式与 45 号钢一致, 发生螺栓拉断破坏, $P_{\max}$ 均大于 45 号钢, 且前者较后者无明显提升, 而 Q345B 则发生滑牙破坏, 由表 5 可知, 若增大板厚, 发生螺栓拉断破坏. 图中水平线为不同螺栓的 P_n 值.

3.3 应力分析

以 45-M24-20 钢板螺纹滑牙破坏和 45-M24-25 螺栓拉断破坏两种连接副为例, 对比分析其应力云图. 便于分析, 将螺栓螺纹化分为 3 个区

域:螺栓穿出钢板外露区域螺纹为预留区,钢板锚固区域螺纹为锚固区,其余区域螺纹为构造区(图 3(a)).45-M24-20 和 45-M24-25 连接副破坏时的整体应力云图见图 7(a)、(b).由图 7(c)、(d)可知,试件 45-M24-20 锚固区域的应力值最大,为 1 150 MPa;试件 45-M24-25 螺杆区域除钢板外

露丝扣均进入极限状态,螺杆构造区大部分螺纹应力值已超过其材料的屈服强度 1 040 MPa,最大值为 1 173 MPa位于构造区,而锚固区应力值则相对较小.由图 7(e)、(f)可知,两试件最大应力值均位于第一扣处,分别为 665.5、660.7 MPa,与文献[19-20]中螺纹荷载分布规律一致.

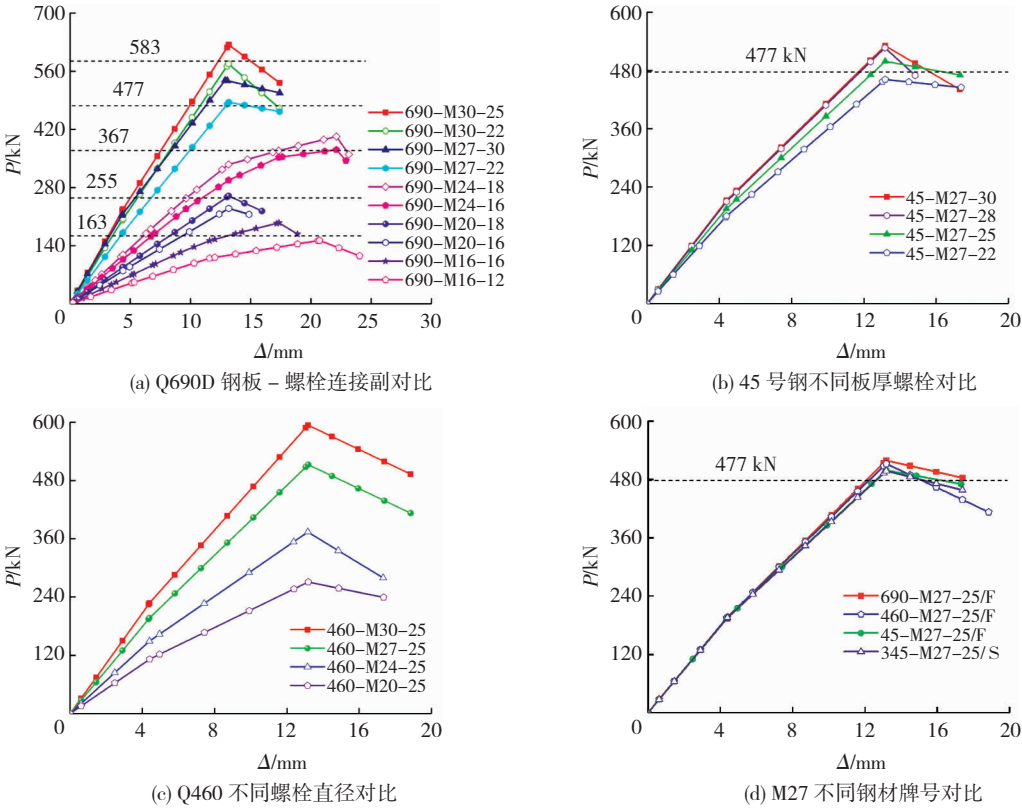


图 6 钢板组合螺栓 $P-\Delta$ 曲线
Fig. 6 $P-\Delta$ curves of steel plate composite bolts

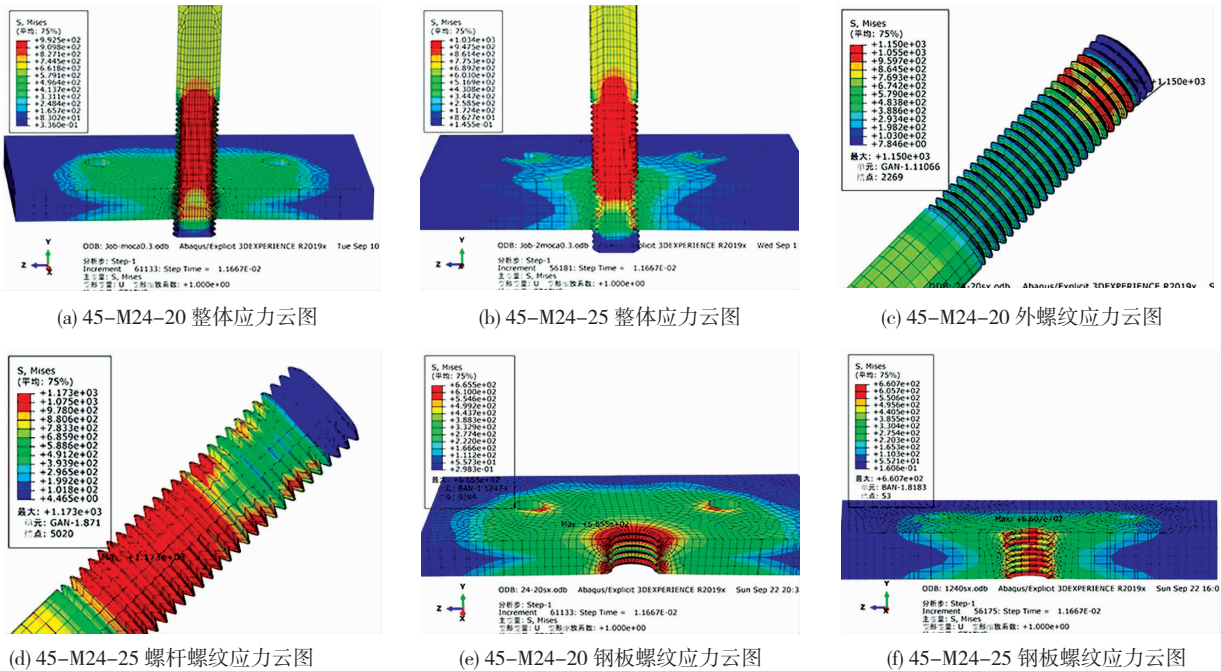


图 7 钢板组合螺栓模拟云图

Fig. 7 Simulation nephogram of steel plate composite bolts

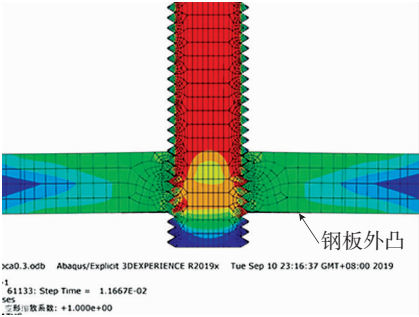
3.4 板厚与构造影响分析

试验和有限元模拟中均发现,当试件发生滑牙破坏时,钢板有明显的面外凸起现象见图 8. 以 M30 螺栓为例,外凸变形量 Δ_{out} 与荷载 P 的关系曲线见图 9. 由图可知,当试件发生钢板螺栓滑牙破坏时,外凸变形较大, Δ_{out} 均大于 0.5 mm,取同侧构造螺栓间距为支点间距 l_b 见图 8(a),最大凸起量 Δ_{out} 与支点间距 l_b 的比值大于 1/200;试件当发生另外两种破坏时,钢板凸起现象不明显, Δ_{out}/l_b 均小于 1/200.

钢板厚度是影响破坏模式主要因素. 当钢板较薄时,在拉力的作用下,钢板螺纹受剪外凸,最终在螺杆受拉屈服之前发生钢板螺纹受剪屈服破坏;钢板较厚时,发生螺杆受拉屈服破坏. 两种破坏模式中螺杆和钢板的最大应力值及钢板最大应力值所作用位置无明显差异,钢板螺纹滑牙破坏时,钢板螺纹产生了大面积塑性变形,失去承载能力,螺杆被拔出;螺杆拉断破坏时,螺杆预留区螺纹出现大面积塑性变形,先于钢板螺纹屈服,螺杆被拉断.



(a) 试验组合螺栓钢板外凸



(b) 模拟组合螺栓钢板外凸

图 8 组合螺栓钢板外凸变形对比

Fig. 8 Comparison of out-of-plane deformation of steel plate composite bolts

钢板组合螺栓承载力与钢板厚度的关系见图 10,图中采用钢板厚度 t 与螺栓直径 d 的比值,即厚径比 t/d 作为变量进行分析,厚度取保证不发生滑牙破坏所需要的最小板厚. 由图可知,Q345B 板厚不宜低于 1.15 d ,Q460C 钢不宜低于 1.10 d ,Q690D 钢不宜低于 0.95 d ;Q460C 与螺母常用材质 45 号钢最为接近.

探究外露丝扣数量对承载力的影响,选取 45 -

M24 - 25 试件,使得螺杆依次拧出 0 扣到 3 扣共 4 组,分析对比各组试件 P_{max} 值,见表 6 和图 11,发现当螺杆拧出钢板 2 ~ 3 扣时其抗拉承载力较平时时提升 2% 左右,对承载力影响很小.

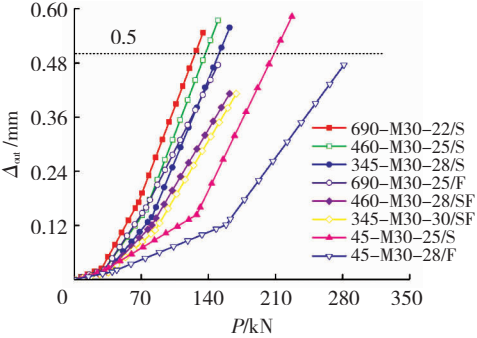


图 9 钢板组合螺栓 $P-\Delta_{out}$ 曲线

Fig. 9 $P-\Delta_{out}$ curves of steel plate composite bolts

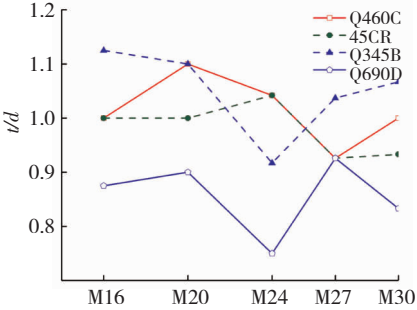


图 10 钢板组合螺栓承载力与钢板厚度关系曲线

Fig. 10 Relation between tensile capacity of steel plate composite bolts and steel plate thickness

表 6 拧出 0 ~ 3 扣螺纹抗拉承载力分析

Tab. 6 Analysis on tensile capacity of 0 - 3 threads

试件	P_{max}/kN	$(P_{max}/P_b)/\%$	增大比例/%
0 扣	371.94	93.66	0
1 扣	378.70	95.37	1.79
2 扣	380.28	95.76	2.24
3 扣	382.12	96.23	2.74

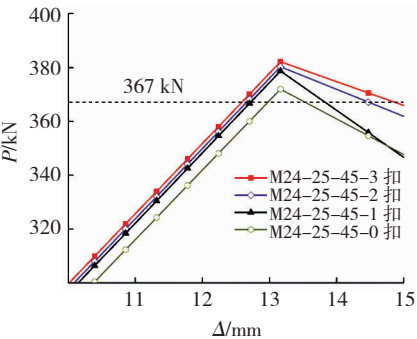


图 11 钢板组合螺栓 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 11 $P-\Delta$ curves of steel plate composite bolts

3.5 抗拉极限承载力理论分析

将螺纹牙简化成楔形体^[21]进行受力分析,螺纹牙体受力见图 12. 坐标轴见图 3(a),其中 $Q(z)$ 为 z 截面螺杆拉力或者螺母压力,将 $Q(z)$ 分解为平行于

斜面的应力 $Q_1(z)$ 和垂直于斜面的应力 $Q_2(z)$, 以及由 $Q(z)$ 引起的摩擦应力 $Q_3(z)$. 本文在计算螺纹牙表面应力分布时进行如下假设: 螺纹牙的变形在弹性范围内且钢板螺纹与螺栓螺纹变形量相等, 螺纹牙为三角形, 螺纹牙牙面荷载不考虑应力集中.

则:

$$\begin{aligned} Q_1(z) &= Q(z) \sin \beta, \\ Q_2(z) &= Q(z) \cos \beta, \\ Q_3(z) &= \mu Q(z) \sin \beta. \end{aligned}$$

根据应力叠加和第三强度理论及文献[13]得:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_x^2} = \sqrt{(\sigma_{\text{正}r} + \sigma_{\text{正}\theta=0} + \sigma_{\text{切}r} + \sigma_{\text{切}\theta=0} + \sigma_{\text{摩}r} + \sigma_{\text{摩}\theta=0})^2 + 4(\tau_{\text{切}\theta=0} + \tau_{\text{摩}\theta=0})^2},$$
$$\sigma_1 - \sigma_3 = Q(z)\omega \leq [\sigma],$$

$\omega =$

$$\sqrt{\left[\sin\alpha\left(\frac{3\sin\beta}{4(\sin\alpha - \alpha\cos\alpha)} - 2\right) + \frac{\mu\sin\beta + \cos\beta}{\sin2\alpha} - \frac{(\cos2\alpha - 1)(\cos\beta + \mu\sin\beta)[(\cos2\alpha - 1) + 2\alpha\sin2\alpha]}{\sin2\alpha(1 - \alpha\sin2\alpha - \cos2\alpha)}\right]^2 + 4[\cos\beta + 1]^2}.$$

式中: α 为螺纹牙体的顶角, β 为螺纹牙体的底角, μ 为螺杆螺纹牙与螺帽螺纹牙之间的摩擦系数, r 为螺纹牙顶和牙底圆弧半径, $[\sigma]$ 为螺纹牙的抗拉屈服强度.

根据螺栓变形协调条件, 在轴力的作用下, 螺杆和螺母的总变形量是相等的, 用沿着螺纹长度上轴向力分布密度来表明各螺圈间荷载的分布^[22]:

$$Q(z) = \frac{dQ(z)}{dz}, \tag{1}$$

求其微分方程考虑其边界条件, 式(1)的解有如下形式:

$$q(z) = \frac{Qm}{\text{sh}(mH)} \text{ch}(mz).$$

前三圈螺纹牙体被剪断时承载力:

$$Q(z) = \frac{2\sin\frac{\alpha}{2} \int_0^{3P} q(z) dz}{P\cos\frac{\alpha}{2}} \xi,$$

式中: P 为螺距; 钢板钻孔攻丝代替螺母时螺纹牙接触面的应力不均匀分布系数 $\xi = \frac{\lambda_\gamma^*}{\lambda_\gamma} \cdot \frac{E_\gamma}{E_\sigma} \cdot \frac{d_0}{t}$, 其中 t 为板厚, λ_γ^* 、 λ_σ^* 分别为螺纹连接方式的无量纲参数^[22], E_σ 、 E_γ 分别为螺母和螺杆的弹性模量; $m = \sqrt{\beta/\gamma}$, $\beta = \frac{1}{E_\sigma A_\sigma} + \frac{1}{E_\gamma A_\gamma}$ 为螺栓和螺母的柔度系数, A_σ 、 A_γ 分别为螺母螺杆的截面积, 螺母截面面积取板厚乘以支点间距 l_b , γ 为螺栓螺纹牙和螺母螺纹圈的柔度系数, $\gamma = \left(\frac{\lambda_\gamma^*}{E_\gamma} + \frac{\lambda_\sigma^*}{E_\sigma}\right) \frac{P^2}{f}$, f 为螺圈侧表面在垂直于 z 轴平面上的投影.

前三圈螺纹共承受 70% 荷载^[22]. 此类螺栓, 一般 $\alpha = \beta = 60^\circ$, $\mu = 0.5$, 则 $\omega = 3.521$. 当钢板为 Q345B 和 Q690D 时 m 取 0.019 9, Q460C 和 45 号钢

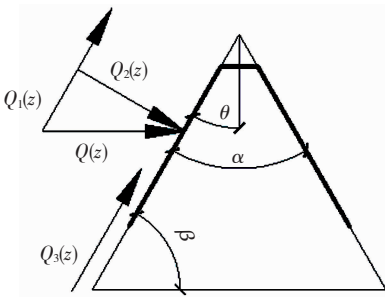


图 12 螺纹牙体受力图
Fig. 12 Screw thread body force

时 m 取 0.022, 可得

$$Q \leq 0.1722 \frac{[\sigma] P e^{m(t-3P)}}{\xi}. \tag{2}$$

螺栓连接副承载力对比分析见表 7, 可知所提出的高强钢板组合螺栓抗拉承载力公式计算值与有限元结果吻合良好, 可为钢板组合螺栓的设计提供参考.

表 7 螺栓抗拉承载力对比

Tab. 7 Comparison of tensile capacity of bolts			
编号	有限元值 $P_{\max}/\text{kN}$	公式(2)计算 值 P_{cal}/kN	$((P_{\text{cal}} - P_{\max})/P_{\max})/\%$
345 - M20 - 25	289.26	280.69	-3.27
345 - M20 - 22	265.14	232.19	-12.43
345 - M20 - 20	255.62	227.08	-11.16
45 - M16 - 18	184.14	193.51	5.09
45 - M16 - 16	177.95	149.67	-15.89
45 - M16 - 14	150.90	137.84	-8.65
460 - M24 - 22	365.91	309.01	-15.55
460 - M24 - 25	374.02	344.28	-7.95
460 - M24 - 28	378.60	411.90	8.80
690 - M27 - 22	485.28	444.98	-8.30
690 - M27 - 25	519.43	480.49	-7.50
690 - M27 - 28	543.49	571.26	5.11

4 结 论

- 1) 建立带有螺纹的高强钢板螺栓连接副精细化模型, 与本组试验对比表明, 模型能反映高强螺栓和 高强钢板之间的啮合传力规律、受力性能和破坏模式.
- 2) 钢板较薄时, 钢板螺纹受剪并向外凸起, 凸起量大于支点间距的 1/200, 螺栓拔出, 试件发生钢板 螺纹滑牙破坏, 螺杆最大应力值位于锚固区; 钢板较厚时, 发生螺杆拉断破坏, 螺杆最大应力值位于构造区, 两种破坏模式中钢板的最大应力及位置无明

显差异,均位于钢板螺栓第一扣处。

3)为保证钢板组合螺栓不发生钢板滑牙破坏,建议 Q345B、Q460C、Q690D 的钢板厚度不宜低于 $1.15d$ 、 $1.10d$ 、 $0.95d$, d 为螺栓直径。这 3 种钢材均可作为 45 号钢的替代材料。

4)高强钢板组合螺栓满足不发生滑牙的厚径比时,可按极限抗拉承载力的 70% 作为该连接副的拉力设计值。所提出的高强钢板组合螺栓抗拉承载力公式计算值与有限元结果吻合良好,可为钢板组合螺栓的设计提供参考。

参考文献

- [1] WANG Zhiyu, WANG Qingyuan. Yield and ultimate strengths determination of a blind bolted endplate connection to square hollow section column[J]. *Engineering Structures*, 2016, 111:345. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.058
- [2] KOROL R M, GHOBARAH A, MOURAD S. Blind bolting W-shape beams to HSS columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1993, 119(12):3463. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:12(3463)
- [3] YAO Huang, GOLDSWORTHY H, GAD E. Experimental and numerical investigation of the tensile behavior of blind-bolted T-stub connections to concrete-filled circular columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(2):198. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:2(198)
- [4] POKHAREL T, GOLDSWORTHY H M, GAD E F. Tensile behaviour of double headed anchored blind bolt in concrete filled square hollow section under cyclic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 200:146. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.089
- [5] PITRAKKOS T, TIZANI W. Experimental behaviour of a novel anchored blind-bolt in tension[J]. *Engineering Structures*, 2013, 49(2):905. DOI:10.1016/j.engstruct.2012.12.023
- [6] AGHESHLUI H, GOLDSWORTHY H, GAD E, et al. Tensile behavior of groups of anchored blind bolts within concrete-filled steel square hollow sections[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(2):04015125. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001388
- [7] 何明胜,李志强,贺泽峰. 新型单边螺栓承载力试验研究[J]. *兰州理工大学学报*, 2016, 42(2):118
HE Mingsheng, LI Zhiqiang, HE Zefeng. Experimental investigation of bearing capacity of new type unilateral bolts[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2016, 42(2):118. DOI:10.13295/j.cnki.jlut.2016.02.024
- [8] 丁娟,杨彬,李瑞峰,等. 采用钢板攻丝高强螺栓法兰连接的装配式钢框架柱受力性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(8):143
DING Juan, YANG Bin, LI Ruifeng, et al. Research on mechanical behavior of prefabricated steel frame columns using high-strength bolted flange connection with tapping steel plate[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(8):143. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.08.017
- [9] 吴琮尧,王化杰,钱宏亮,等. 拧入缺陷对螺栓球节点受力性能影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(12):53
WU Qiongyao, WANG Huajie, QIAN Hongliang, et al. Study on influence caused by bolt connection defect on mechanical properties of bolt ball joint[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(12):53. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201703115
- [10] 陈绍蕃. 论高强度螺栓连接的分类和抗拉连接的计算[J]. *建筑结构进展*, 2014, 16(3):1
CHEN Shaofan. On the classification of high-strength bolt connections and the calculation of connection subject to tension[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2014, 16(3):1. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2014.03.002
- [11] 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
LIU Xiuli, 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
- [12] 田振山,何明胜,郭坤,等. 新型螺栓受力特性理论分析[J]. *建筑钢结构进展*, 2014, 16(1):1
TIAN Zhenshan, HE Mingsheng, GUO Kun, et al. Theoretical analysis of mechanical characteristics for a new-type bolt [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2014, 16(1):1. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2014.01.001
- [13] 钢结构用高强度大六角头螺母:GB/T 1229—2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006
High strength large hexagon nuts for steel structures: GB/T 1229—2006[S]. Beijing: China Standards Press, 2006
- [14] 段留省,周天华,苏明周. 高强钢板-螺栓连接副抗拉性能试验研究[J]. *西安建筑科技大学(自然科学版)*, 2019, 51(5):704
DUAN Liusheng, ZHOU Tianhua, SU Mingzhou. Experimental study on tensile performance of the high strength steel plate-bolt assemblies [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 51(5):704. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2019.05.014
- [15] 普通螺纹基本尺寸:GB/T 196—2003[S]. 北京:中国建筑工程出版社, 2003
General purpose metric screw threads—basic dimensions: GB/T 196—2003[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003
- [16] 刘丽君. 螺栓球节点网架用高强螺栓的疲劳影响因素及缺口效应分析[D]. 太原:太原理工大学, 2003
LIU Lijun. Analysis on fatigue influencing factors and notch effect of high strength bolt used in grid structure with bolt-sphere joints [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003
- [17] WANG Zhiyu, TIZANI W, WANG Qingyuan. Strength and initial stiffness of a blind-bolt connection based on the T-stub model[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(9):2505. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.04.005
- [18] 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱:GB/T 3098.1—2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2011
Mechanical properties of fasteners bolts, screws and studs: GB/T 3098.1—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2011
- [19] 陈海平,曾攀,方刚,等. 螺栓副承载的分布规律[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(9):171
CHEN Haiping, ZENG Pan, FANG Gang, et al. Load distribution of bolted joint[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(9):171. DOI:10.3901/JME.2010.09.171
- [20] ZHAO Hua. A numerical method for load distribution in threaded connections[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1996, 118(2):274. DOI:10.1115/1.2826880
- [21] 王光钦. 弹性力学[M]. 北京:中国铁道出版社, 2008:89
WANG Guangqin. *Elastic mechanics*[M]. Beijing: China Railway Press, 2008:89
- [22] (苏)比尔格尔, (苏)绍尔苏比, (苏)约西列维奇. 机械零件强度计算手册[M]. 姚兆生, 译. 北京:机械工业出版社, 1987:60
БИРГЕР ИА, ШОРРБФ, ИОССИЛЕВИЦГБ. *Mechanical parts strength calculations manual*[M]. YAO Zhaosheng, trans. Beijing: China Machine Press, 1987:60