

高强钢板-螺栓连接副抗拉性能试验研究

段留省¹, 周天华¹, 苏明周², 李 慧³

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 恒大地产集团西安有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:为解决现有单边螺栓锚固不足和安装复杂的问题,提出一种高强钢板-螺栓连接副。将高强钢板焊成芯筒置于钢管柱内并开孔攻丝,采用普通高强螺栓即可实现与钢梁连接节点的单边张紧。为研究攻丝高强钢板替代螺母的可行性,考察连接副的极限抗拉性能和破坏模式,探讨能够与高强螺栓配合的最优钢板厚度,对一系列不同钢板厚度和螺栓强度等级的钢板-螺栓连接副进行单调抗拉试验研究。试验中选取 Q460C、Q345B、45 号钢三种钢材和 M16、M20、M24 三种规格 10.9 级高强螺栓作为研究变量。结果表明, Q460C 和 Q345B 均可以作为 45 号钢的替代材料,同时满足高强螺栓的强度要求和钢结构的焊接要求,采用强度较高钢材可以减少连接副用量。为保证钢板-螺栓连接副不发生钢板螺纹滑牙破坏,建议 Q460C 钢板厚度不宜小于螺栓公称直径 d ; Q345B 钢板厚度不宜小于 $d+(1\sim 2)$ mm,不宜采用贴焊加厚的叠合钢板。

关键词: 高强钢; 单边螺栓; 螺栓连接副; 抗拉承载力; 破坏模式

中图分类号: TU391, TU317. 1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0704-06

Study on the tensile performance of high strength steel plate-bolt assemblies

DUAN Liusheng¹, ZHOU Tianhua¹, SU Mingzhou², LI Hui³

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. Evergrande Real Estate Group Co., Ltd. Xi'an Branch, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to solve the insufficient anchorage and complicated installation of blind bolts, the high strength steel plate-bolt assemblies are proposed. For tapping high strength steel core in the tubular column, the ordinary high strength bolts can be one side tightened in the steel tubular column and beam bolted connections. For the purpose of the feasibility of tapping high strength steel plate instead of the nuts, the steel plate-bolt assemblies with different steel plate thickness and bolt grades were studied under the monotonic tensile tests. After the tests, the ultimate tensile strength and the failure modes of the assemblies and the optimum thickness of the plates were also analyzed. The Q460C, Q345B and 45 grades steel plates and the M16, M20 and M24 grades bolts were the variation parameters in the studies. Result shows that the 45 grade steel plates can be replaced by the Q460C or Q345B grade steel plates. The high strength of the bolts and the welding requirements of the steel core can be satisfied simultaneously. In the steel plate-bolt assemblies, the steel consumption will be reduced by using the high strength steel plates. The thickness should not be less than the bolt diameter d for Q460C grade steel, and $d+(1\sim 2)$ mm for the Q345B grade steel. The steel plate should not be the composited plates that are connected by welding.

Key words: high strength steel; blind bolts; bolt assemblies; the ultimate tensile strength; failure modes

高强钢芯筒-螺栓连接副装配式钢管柱节点通过一种新型单边张紧高强螺栓连接副完成连接,该连接副由高强钢板和高强螺栓配合而成,钢板攻丝后替代螺母。装配时将钢板焊接成芯筒并攻丝,插入钢管柱节点位置,高强螺栓由外向内穿

过钢管柱壁板,旋入柱内的钢板丝孔并拧紧。关于这种新型单边连接副的研究较少,尤其是抗拉性能。传统单边螺栓可用于钢管柱螺栓连接,但存在锚固不足的缺陷^[1],为改善单边螺栓抗拔能力,有学者提出带扩大端单边螺栓^[2],抗拉试验表

收稿日期: 2018-09-29

修改稿日期: 2019-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178382, 51708038), 陕西省自然科学基金项目(2018JQ5016), 中央高校基本科研业务费项目(300102288102)

第一作者: 段留省(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事钢结构稳定、抗震与新型钢结构体系的研究. E-mail: duanliusheng@126.com

明混凝土强度对锚固效果影响显著^[3-4]。也有学者将钢板贴焊于钢管柱外侧, 开孔攻丝后再与高强螺栓连接, 试验表明这种连接方式容易出现钢板变形、螺纹脱扣、螺栓拔出的问题^[5-8]。原因可能是钢板抗拉强度不足和板厚较小。当降低螺栓强度等级并加大钢板厚度时, 钢板螺纹脱扣现象消失, 能够达到等效刚接^[9-10]。当高强螺栓拧入长度比原设计减少 2 个啮合数时, 螺栓球节点发生螺栓拔出破坏^[11]。关于高强螺栓抗拉承载力计算, 刘秀丽等^[12]通过有限元分析提出考虑撬力的高强螺栓抗拉承载力计算公式, 陈绍蕃^[12]建议高强螺栓抗拉承载力设计值取螺杆极限抗拉荷载的 70%, 需试验验证。

本文高强螺栓等级为 10.9 级, 选用 Q460 高强钢板替代螺母, 并与螺母常用材质 45 号钢、低合金高强钢 Q345 钢进行对比, 以期获得现有高强螺栓的最优配合钢材牌号和厚度。

1 试验概况

1.1 试验设计与材料性能

根据《螺母设计指南》(GB/Z32564-2016)^[13]的设计原则, 静态拉力下连接副不应发生脱扣, 原因是这种破坏不易发现。故钢板攻丝孔内螺纹脱扣荷载 F_{sn} 应高于螺栓最小拉力荷载 P_n 。影响钢板内螺纹脱扣荷载的主要因素是钢板厚度和钢材抗拉强度。钢板内螺纹脱扣荷载 F_{sn} 可按(1)公式估算, 初步选取钢板厚度。但钢板不能完全等同于螺母, 原因是钢板内螺纹由工厂简易加工, 机械精度不及标准螺母, 且钢板尺寸也远大于螺母外轮廓尺寸, 计算结果的可靠性须经试验进一步验证。

$$F_{sn} = 0.6R_{mn}A_{Sn}C_1C_3$$

(1)

其中: C_1 为钢板(螺母)扩张的修正系数; C_3 为螺纹弯曲影响螺母脱扣强度的影响系数; R_{mn} 为钢板(螺母)抗拉强度; A_{Sn} 为内螺纹承剪面积; 选取 45 钢、Q460C、Q345B 三种钢材作为研究对象, 其中 45 钢是螺母常用钢材, 后二者为低合金高强钢; 选后二者是为了克服 45 钢焊接性较差的缺点, 有利于钢板芯筒焊接连接。钢板材料性能见表 1。

表 1 钢板材料性能
Tab. 1 Material property of steel plates

钢材	<i>t</i> /mm	<i>f_y</i> /MPa	<i>f_u</i> /MPa	<i>E</i> /10 ⁵ MPa
45 钢	25	375.28	668.01	2.05
Q460C	16	484.25	611.57	2.02
Q345B	25	395.44	558.09	2.00

1.2 试验装置与试件编号

钢板-连接副单调拉伸试验装置见图 1(a)。安装时将连接副的钢板通过安装螺栓固定于 T 形连接件, 再将 10.9 级高强螺栓旋入攻丝孔, 穿钢板后露 2~3 个丝扣; 螺杆和 T 形件分别在万能试验机的上下夹头处夹紧, 完成安装。连接副的钢板尺寸均为 200×200, 中心开孔攻丝, 丝孔应满足 10.9 级高强螺栓的配合精度, T 形件详图见图 1(b)。

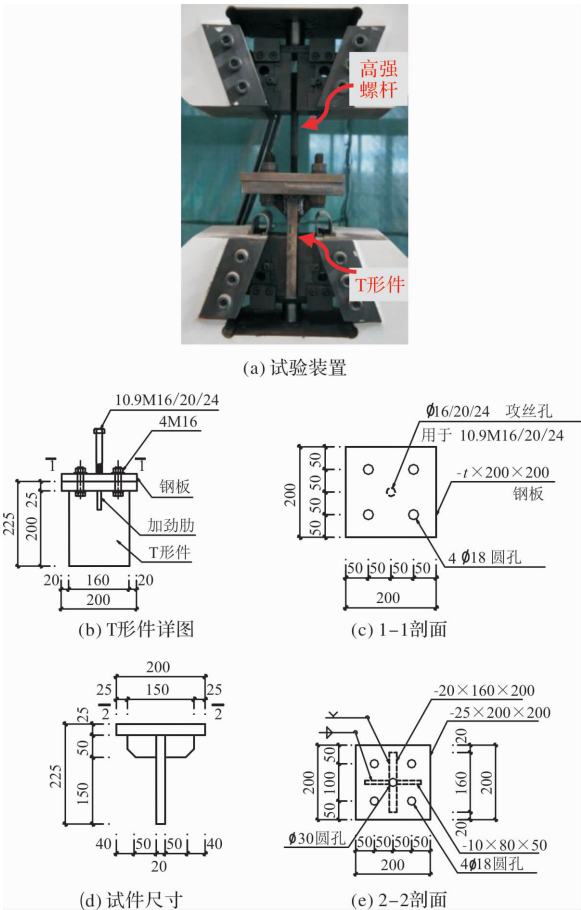


图 1 螺栓拉伸试验装置

Fig. 1 Bolt tensile test setup

对于 10.9 级 M16 螺栓, 钢板厚度参照《钢结构用高强度大六角螺母》(GB/T 1229-2006)^[14]给定的螺母厚度 16.4~17.1 mm, 结合公式(1)计算结果取最小厚度为 16 mm。对于 45 钢, 按“略厚(Thick)、标准(Standard)、略薄(Thin)”的原则选取三种厚度: 20 mm、16 mm、14 mm。将 20 mm 和 16 mm 钢板分为两批, 其中一批进行调质处理, 另一批不做处理, 考察材质处理对连接副抗拉承载力的影响。Q460C 和 Q345B 钢材均参照文献^[14]取标准厚度。连接副试件编号见表 2。

1.3 测量内容与试验方法

为测定不同牌号钢板-高强螺栓连接副的抗拉

极限承载力,采用单调拉伸试验方法,加载制度采用荷载控制方式,加载速度为1 kN/s. 整个试验在100 t 万能实验机上完成,螺栓拉力荷载由试验机自带荷载传感器测量,连接副的变形量由仪器内部位移计测量. 观测项目为螺栓拉断、脱扣拔出或钢板变形等破坏现象.

表2 试件编号
Tab. 2 Specimens number

钢材	编号	螺栓	钢材	编号	螺栓
45 钢 调 质	M16-20-T-1	M16	Q460C	M24-25-2	M24
	M16-20-T-2	M16		M24-20-1	M24
	M16-16-T-1	M16		M24-20-2	M24
	M16-16-T-2	M16		M16-16-1	M16
	M16-20-1	M16		M16-16-2	M16
	M16-20-2	M16		M20-20-1 *	M20
	M16-16-1	M16		M20-20-2 *	M20
	M16-16-2	M16		M24-25-1	M24
	M16-14-1	M16		M24-25-2	M24
	M16-14-2	M16		M16-18-1	M16
45 钢	M20-20-1	M20	Q345B	M16-18-2	M16
	M20-20-2	M20		M20-22-1	M20
	M20-16-1	M20		M20-22-2	M20
	M20-16-2	M20		M24-25-1	M24
	M24-25-1	M24		M24-25-2	M24

注: 14、16、18、20、22、25 代表钢板公称厚度, -1、-2 代表连接副编号; T 代表调质处理; * 代表组合钢板厚度, 即 20=16+4.

2 试验结果与分析

2.1 破坏模式

在调质 45 钢板-螺栓连接副系列中, 连接副 M16-16-T、M16-20-T 的螺栓在螺纹处发生断裂, 断裂后螺杆可以从丝孔中取出, 即丝孔完好可以重复使用. 连接副 M16-20、M16-16 的破坏模式与调质系列相同, 说明不调质也可满足螺栓要求, 为降低成本, 45 号钢板不进行调质.

在 45 钢板-螺栓连接副系列中, 连接副 M16-16、M20-20、M24-25 的螺栓被拉断图 2(a), 螺栓拉断前存在明显变形, 属于延性破坏; 螺栓拉断后取出, 发现钢板螺纹完好. 连接副 M16-14、M20-16、M24-20 发生钢板内螺纹脱扣破坏图 2(b), 钢板出现面外凸起变形图 2(c), 螺栓未被拉断, 破坏突然发生.

在 Q460C 钢板-螺栓连接副系列中, 连接副 M16-16、M24-25 的螺栓被拉断, 螺栓拉断前变形明显; M20-20 连接副破坏时钢板内螺纹发生脱扣, 这与预期不符. 主要原因是连接副中 20 mm 厚钢板并非一块整板, 而是由 16 mm 厚和 4 mm 两块钢板贴焊而成的叠合板; 虽一同钻孔攻丝, 但两部分螺纹在板间并不连续, 外侧的螺纹承担大部分拉力, 相当于单张板厚度, 面外刚度较小, 钢板内螺纹承载力低, 叠合板逐一脱扣滑牙.

在 Q345B 钢板-螺栓连接副系列中, 连接副 M16-18、M16-22、M24-25 的螺栓被拉断的延性破坏, 螺栓拉断前的存在明显变形. 钢板-螺栓连接副典型破坏现象见图 2.

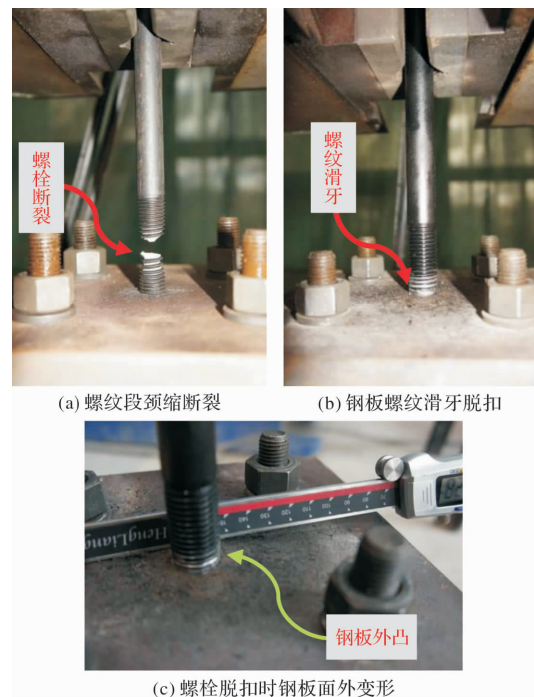


图2 钢板-螺栓连接副抗拉试验破坏现象

Fig. 2 Failure modes of steel plate-bolt assemblies in tensile test

2.2 极限承载力

45 钢板连接副单调拉伸试验 $P-\Delta$ 曲线见图 3(a)、图 3(b), 其中 P 代表拉力荷载、 Δ 代表轴向变形. 由图 3a 可知, 连接副 M16-16-1、M16-16-T、M16-20-1、M16-20-T 的极限荷载 P_{\max} 均超过 10.9 级 M16 螺母的最小拉力荷载 P_n . 由图 3(b) 可知, 连接副 M16-16、M20-20、M24-25 的极限荷载 P_{\max} 大于对应的螺母最小拉力荷载 P_n , 螺栓被拉断; 连接副 M16-14、M20-16、M24-20 的极限荷载 P_{\max} 略小于螺母的最小拉力荷载 P_n , 钢板内螺纹脱扣破坏.

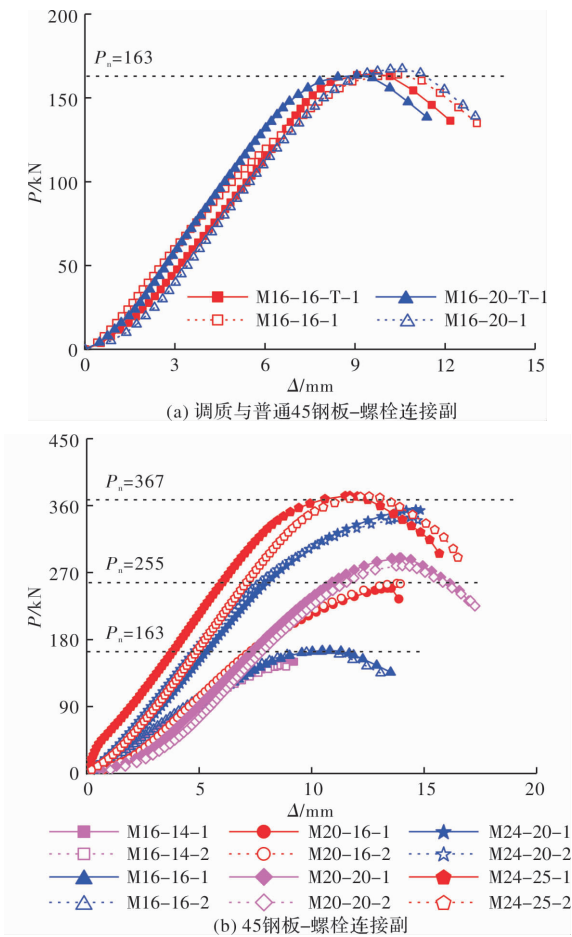


图 3 45 钢板-螺栓连接副 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 3 45 grade steel plate-bolt assemblies $P-\Delta$ curves

45 钢板-螺栓连接副 $P-\Delta$ 曲线分析见表 3, 表中 t 为钢板厚度, F_{Sn} 为钢板内螺纹理论承载力, P_n 为螺母最小拉力荷载, P_b 为螺栓极限荷载, P_{max} 为连接副极限荷载。

由表可知, 对于 M16、M20 和 M24 三种规格螺栓, 略厚板和标准钢板的内螺纹承载力 F_{Sn} 大于螺母最小拉力荷载 P_n , 且大于螺栓极限荷载 P_b , 螺栓最终被拉断; 薄钢板内螺纹承载力 F_{Sn} 接近螺母最小拉力荷载 P_n , 小于螺栓极限荷载 P_b , 螺栓未被拉断, 破坏时钢板内螺纹脱扣。对比薄钢板内螺纹承载力的理论值 F_{Sn} 与试验值 P_{max} 发现, M16 螺栓理论值比试验值略大而 M20、M24 的偏小, 差值在 10% 以内, 表明 45 号钢螺纹承载力的理论公式较准确。

Q460C 钢板连接副的 $P-\Delta$ 曲线见图 4(a), 由图可知, 连接副 M16-16、M24-25 的极限荷载 P_{max} 大于对应的螺母最小拉力荷载 P_n , 螺栓被拉断。M20-20 标准板连接副的极限荷载 P_{max} 接近螺母最小拉力荷载 P_n , 但小于螺栓极限荷载 P_b , 发生钢板内螺纹发生脱扣破坏。表明理论计算会高估叠合板内螺纹承载力。 $P-\Delta$ 曲线分析见表 4, 由表可

知, M16、M20 和 M24 三种规格螺栓, 标准钢板的内螺纹承载力 F_{Sn} 大于螺母最小拉力荷载 P_n , 且大于螺栓极限荷载 P_b , M16、M24 的 F_{Sn} 比 P_b 分别高出 9.21%、12.47%, 螺栓最终被拉断; M20 由于钢板加工问题未发生螺栓断裂, 不具有代表性。

表 3 45 钢板-螺栓连接副 $P-\Delta$ 曲线分析

Tab. 3 $P-\Delta$ curves analysis of 45 grade steel plate-bolt assemblies

编号	t/mm	F_{Sn} /kN	P_b /kN	P_{max} /kN	破坏形式	$(F_{Sn} - P_b) \cdot P_b^{-1} / \%$
M16-20-T-1	20.12	266	172	169	拉断	54.37
M16-20-T-2	20.18	267	172	171	拉断	54.93
M16-16-T-1	16.29	203	172	171	拉断	18.14
M16-16-T-2	16.21	202	172	171	拉断	17.38
M16-20-1	19.92	263	172	170	拉断	52.47
M16-20-2	19.96	263	172	170	拉断	52.85
M16-16-1	16.08	200	172	170	拉断	16.15
M16-16-2	16.14	201	172	169	拉断	16.72
M16-14-1	14.15	172	172	156	脱扣	-2.10
M16-14-2	14.06	167	172	161	脱扣	-2.95
M20-20-1	20.00	319	294	284	拉断	8.39
M20-20-2	20.10	321	294	293	拉断	9.10
M20-16-1	16.30	242	294	249	脱扣	-17.91
M20-16-2	16.21	240	294	256	脱扣	-18.55
M24-25-1	25.42	484	397	393	拉断	21.92
M24-25-2	25.33	482	397	393	拉断	21.37
M24-20-1	19.40	336	397	364	脱扣	-15.30
M24-20-2	19.87	348	397	375	脱扣	-12.39

Q345B 钢板连接副的 $P-\Delta$ 曲线见图 4(b), 由图可知, 连接副 M16-18、M16-22、M24-25 极限荷载 P_{max} 大于对应的螺母最小拉力荷载 P_n , 故螺栓被拉断。 $P-\Delta$ 曲线分析见表 5, 由表可知, M16、M20 和 M24 三种规格螺栓, 标准钢板的内螺纹承载力 F_{Sn} 大于螺母最小拉力荷载 P_n , 且大于螺栓极限荷载 P_b , 三者 F_{Sn} 比 P_b 分别高出 18.88%、7.74%、7.45%, 螺栓最终被拉断。以上表明 Q345B 钢板-螺栓连接副的钢板厚度应不小于螺栓直径 $d + (1 \sim 2)$ mm, 即取常用钢板厚度中比螺栓公称直径高一个规格的厚度。

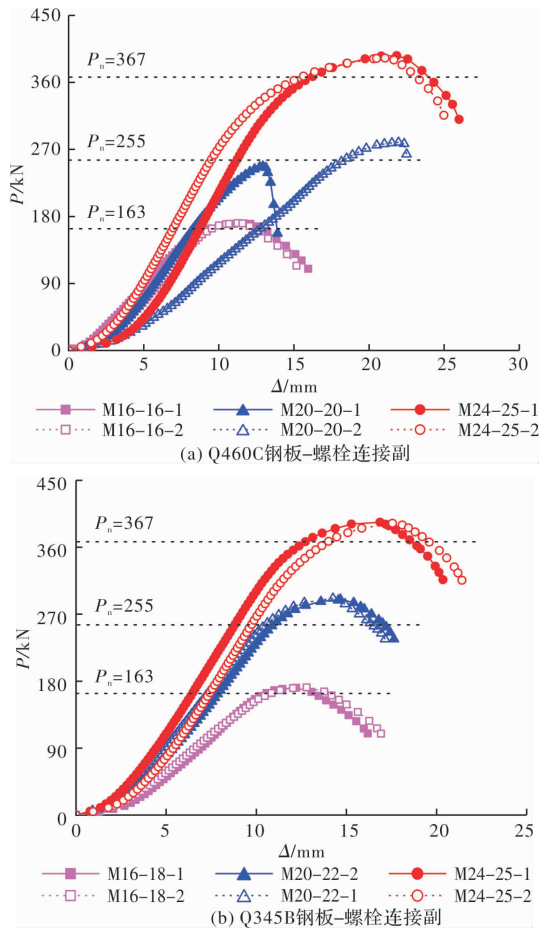


图 4 高强度钢板-螺栓连接副 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 4 High strength steel plate-bolt assemblies $P-\Delta$ curves

表 4 Q460C 钢板-螺栓连接副 $P-\Delta$ 曲线分析

Tab. 4 $P-\Delta$ curves analysis of Q460C grade steel plate-bolt assemblies

编号	t/mm	F_{Sn} /kN	P_b /kN	P_{max} /kN	$(F_{\text{Sn}} - P_b) \cdot P_b^{-1} / \%$	破坏形式
M16-16-1	16.34	192	172	171	11.43	拉断
M16-16-2	16.09	188	172	171	9.21	拉断
M20-20-1	20.15	303	294	247	2.79	脱扣
M20-20-2	20.12	302	294	280	2.59	脱扣
M24-25-1	25.11	448	397	397	12.76	拉断
M24-25-2	25.06	447	397	393	12.47	拉断

2.3 分析与讨论

(1)45 号钢是高强螺母常用材质,能够被低合金高强度钢材替代的原因是二者抗拉强度接近.当采用强度较低的合金钢时,需要增加一定钢板厚度;若钢材抗拉强度进一步降低,虽增加钢板厚度可能也达不到螺母的最小拉力荷载,原因是螺纹啮合部位最大应力出现在前三扣^[15],连接副

在拉断前就出现解扣式滑牙脱扣破坏,而不会出现螺栓拉断破坏.

表 5 Q345B 钢板-螺栓连接副 $P-\Delta$ 曲线分析

Tab. 5 $P-\Delta$ curves analysis of Q345B grade steel plate-bolt assemblies

编号	t/mm	F_{Sn} /kN	P_b /kN	P_{max} /kN	$(F_{\text{Sn}} - P_b) \cdot P_b^{-1} / \%$	破坏形式
M16-18-1	18.03	205	172	171	18.88	拉断
M16-18-2	18.11	206	172	172	19.55	拉断
M20-22-1	22.04	318	294	292	8.17	拉断
M20-22-2	21.97	317	294	290	7.74	拉断
M24-25-1	25.38	427	397	395	7.45	拉断
M24-25-2	25.45	428	397	392	7.83	拉断

(2)不同厚度高强度钢板贴焊成叠合板,攻丝后与高强螺栓连接,破坏模式与整张板完全不同.原因是叠合板中两部分螺纹紧贴但无有效连接措施,螺纹不连续,无法共同工作,外侧的螺纹承担大部分拉力,相当于单张板厚度,面外刚度较小,叠合板逐一被拉脱滑牙.

(3)考察 45 钢、Q460C、Q345B 不同厚度钢板与 M16、M20、M24 的组合连接副极限抗拉承载力,为便于分析,采用无量纲化处理各组螺栓的承载力,各组合连接副的极限承载力对比见图 5. 由图可知,采用标准厚度的高强钢板-螺栓组合连接副的承载力与螺杆极限承载力比值不小于 0.85;考虑到加工和安装误差,折减 15%,因而建议标准厚度高强度钢板-螺栓组合连接副抗拉承载力设计值 $N_{bt} = 0.7A_e f_{tb}$,其中 A_e 为螺栓有效面积, f_{tb} 为螺栓极限抗拉强度,这与文献[8]一致.为谨慎起见,仍需扩大样本数量进一步试验验证.

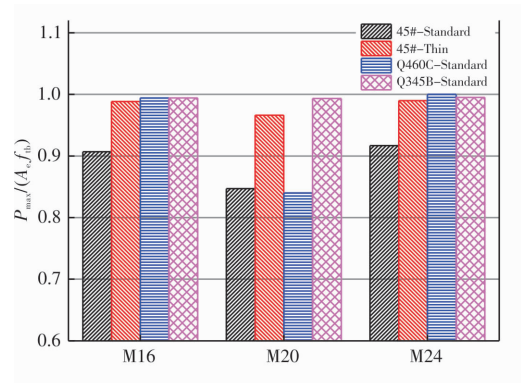


图 5 高强度钢板-螺栓连接副抗拉承载力

Fig. 5 High strength steel plate-bolt assemblies tensile strength

(4)试验未考虑钢板攻丝孔与安装螺栓孔的孔

距对抗拉承载力的影响,即攻丝钢板约束边界范围内的有效宽厚比,拟通过试验和有限元分析进一步探讨该因素下连接副的破坏模式和抗拉承载力变化规律。

3 结论

(1) Q460C 和 Q345B 均可作为 45 钢的替代材料,满足高强螺栓的强度要求和钢结构的焊接要求。

(2) 采用强度较高钢材可减少连接副用钢量,并为高强钢芯筒-螺栓连接梁柱节点提供设计参考。

(3) 为保证钢板-螺栓连接副不发生钢板滑牙破坏,建议对于 Q460C 钢板厚度不宜小于螺栓的公称直径 d ; Q345B 钢板厚度不宜小于螺栓直径 $d+(1\sim 2)$ mm。

参考文献 References

- [1] KOROL R, GHOBARAH A, MOURAD S. Blind bolting W-shape beams to hss columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (12), 3463-3481.
- [2] YAO H, 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), 198-208.
- [3] 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, 2015, 142(2): 1-18.
- [4] PITRAKKOS T, TIZANI W. Experimental behaviour of a novel anchored blind-bolt in tension[J]. Engineering Structures, 2013, 49, 905-919.
- [5] 郭琨, 何明胜, 田振山. 新型全螺栓连接承载力的试验研究及性能分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2014, 32(4), 504-510.
GUO Kun, HE Mingsheng, TIAN Zhenshan. Study on bearing capacity test and performance of new bolt connections[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2014, 32(4), 504-510.
- [6] 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), 118-123.
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), 118-123.
- [7] 焦健, 何明胜, 王京, 等. 方形钢管柱与 H 形钢梁全螺栓连接抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(2), 34-40.
JIAO Jian, HE Mingsheng, WANG Jing, et al. Experimental study on seismic behavior of all-bolt connection between square steel tubular column and h-shaped steel beam [J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18(2), 34-40.
- [8] 陈绍蕃. 论高强度螺栓连接的分类和抗拉连接的计算[J]. 建筑钢结构进展, 2014, 16(3), 1-6, 29.
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), 1-6, 29.
- [9] 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), 143-150.
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), 143-150.
- [10] 丁娟, 张其林, 张齐, 等. 多层预拼装钢结构系统特殊连接螺栓性能试验研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(4), 112-117.
DING Juan, ZHANG Qilin, ZHANG Qi, et al. Experimental study on a new bolt connection used in multistory fabricated steel structure[J]. Structural Engineers, 2014, 30(4), 112-117.
- [11] 吴琼亮, 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), 53-59.
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), 53-59.
- [12] 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.
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), 29-36.
- [13] 中国标准化研究院. 螺母设计指南: GB/Z32564-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 2-6.
China National Institute of Standardization. Nut design guide: GB/Z32564-2016 [S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 2-6.
- [14] 全国紧固件标准化技术委员会. 钢结构用高强度大六角螺母: GB/T1229-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1-2.
Technical Committees. High strength large hexagon nuts for steel structures: GB/T1229-2006 [S]. Beijing: China Standards Press, 2006: 1-2.
- [15] 陈海平, 曾攀, 方刚, 等. 螺纹副承载的分布规律[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9), 171-178.
CHEN Haiping, ZENG Pan, FANG Gang, et al. Load distribution of bolted joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9), 171-178.

(编辑 沈 波)