

不锈钢结构梁柱栓焊混接节点研究进展

赵文博, 孙亦男, 耿凯, 杨康

辽宁科技学院资源与土木工程学院, 辽宁 本溪

收稿日期: 2023年10月16日; 录用日期: 2023年11月22日; 发布日期: 2023年11月30日

摘要

不锈钢结构具有造型美观、耐腐蚀性好、易于维护和全寿命周期成本低等优点, 使其在建筑结构中具有广阔的适用性。本文列举了不锈钢结构的典型工程实例, 整理并总结了不锈钢结构梁柱栓焊混接节点的常用类型及其特点, 阐述了国内外栓焊混接节点的研究进展, 并提出了现有研究的不足和未来可发展的方向, 从而为不锈钢结构栓焊混接节点的理论研究和工程实践提供借鉴。

关键词

不锈钢结构, 梁柱节点, 栓焊混接节点, 研究进展, 设计规范

Research Progress of Bolt Welded Mixed Joint of Stainless Steel Structure Beam-Column

Wenbo Zhao, Yinan Sun, Kai Geng, Kang Yang

School of Resources and Civil Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

Received: Oct. 16th, 2023; accepted: Nov. 22nd, 2023; published: Nov. 30th, 2023

Abstract

Stainless steel structure has many advantages, such as beautiful appearance, good corrosion resistance, easy maintenance and low cost of the whole life time, so it has wide applicability in building structures. This paper gives a typical engineering example of stainless steel structure, sorts out and summarizes the common types and characteristics of bolt welded mixed joints of stainless steel structure beam-column, describes the research progress of bolt welded mixed joints at home and abroad, and puts forward the shortcomings of existing research and the future development direction, so as to provide a reference for the theoretical research and engineering practice of bolt welded mixed joints of stainless steel structure.

Keywords

Stainless Steel Structure, Beam-Column Joints, Bolt Welded Mixed Joints, Research Progress, Design Specification

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 钢结构因具有重量轻、强度高、韧性和塑性良好、施工周期短、回收利用率较高等优势, 在结构工程中得到了广泛应用。但大多数建筑结构工程中采用的普通碳素钢和低合金钢存在抗腐蚀性较差、回收利用率低等缺点[1], 不仅会造成较严重的安全隐患, 同时对结构后期维护产生了不小的挑战。

与前者相比, 不锈钢自身的耐腐蚀性和耐久性远远优于前两者, 可充分利用材料自身的抗腐蚀能力确保其耐久性能[2] [3], 从根本上克服普通钢结构的此类缺陷, 将会取得良好的建筑和经济效果[4] [5]; 另外, 从结构全生命周期成本以及环保方面出发, 不锈钢的生命周期成本较低、使用寿命较长, 对于大规模的钢架工程而言, 其相对投资成本较少; 不锈钢材料的性价比较高, 可以进行完全性回收利用, 在建筑、交通、能源等领域起着重要的作用, 并具有广阔的前景。

建筑结构中梁柱节点作为建筑钢结构的重要组成部分, 是保证梁与柱协同工作、形成结构整体的关键部件, 它的性能直接影响结构体系的刚度、稳定性和承载能力[6]。不锈钢材与普通钢材力学性能存在明显区别, 不锈钢结构的设计与施工需要按照 CECS 410-2015 《不锈钢结构技术规程》[7]执行。由于相关基础研究的不足, 该规程并未涵盖不锈钢梁柱节点的相关条款, 当前正处于新一轮修订中[8]。为了将普通钢结构梁柱节点理论及应用更好地在不锈钢的梁柱节点中得到更为广泛的推广和应用, 本文综述了国内外关于不锈钢钢结构梁柱节点的最新研究进展, 以期后续研究工作指明方向。

2. 不锈钢的工程应用

随着经济增长和人们生活水平的提高, 不锈钢所具有的良好综合性能以及耐久、美观、使用寿命长、成本效益高的优点已被人们所共识。如今不锈钢已用于建筑结构的各个方面, 使用量在增长, 应用范围也在扩大, 从华丽大酒店、商业建筑、体育场馆、教堂、市政和桥梁、隧道等公共设施到装饰、屋顶、钢筋混凝土等民用建筑。

不锈钢起源可追溯到 20 世纪初期, 英国著名冶金科学家亨利·布雷尔利(Harry Brearley)发明了不锈钢, 后来由英国的 Brearley 和德国的 Maurer 和 Strauss 等人首次将不锈钢材料应用于建筑结构中。结构形式主要包括各类桥梁、体育馆、温室以及寺庙等。国外早期较为经典的不锈钢建筑有: 伦敦的 Savoy Hotel、纽约的 Chrysler 大厦、帝国大厦、美孚石油大厦等, 20 世纪 90 年代在亚洲建成的吉隆坡双塔大厦、北京保利大厦、上海金茂大厦、香港的会展中心, 2002 年为世界足球赛新建日本札幌市穹顶体育场等相继采用。

我国是从 1952 年开始着手对不锈钢进行生产的, 2006 年之后我国的不锈钢产量稳居全球第一, 整体保持增长态势。近年来, 随着国家相关设计规范的修订和研究工作的逐渐深入, 越来越多的建筑师和结构师更加关注不锈钢的独特性。作为建筑材料, 不锈钢必将引领土木工程中的新潮流[9], 逐渐广泛应用于各大项目工程中。

国内外典型不锈钢结构的工程应用如表 1 所示。

Table 1. Typical stainless steel structures at home and abroad
表 1. 国内外典型不锈钢结构

序号	项目名称	所属国家	年份	序号	项目名称	所属国家	年份
1	Savoy 大酒店	英国	1889	32	圣潘克拉斯火车站	英国	2007
2	Chrysler 大厦	美国	1930	33	国家大剧院	中国	2007
3	帝王大厦	美国	1931	34	多哈国际机场	卡塔尔	2008
4	费城储蓄基金协会大厦	美国	1932	35	银座德比尔斯大厦	日本	2008
5	美孚石油大厦	美国	1954	36	香港 Stonecutter 大桥	中国	2009
6	圣路易斯拱门	美国	1965	37	Helix Bridge	新加坡	2010
7	多伦多皇家银行大厦	美国	1976	38	哈利法塔	迪拜	2010
8	ICI 大厦	加拿大	1981	39	Harbor Drive Bridge	美国	2011
9	IBM 广场大厦	美国	1984	40	阿尔梅勒 Gnome 停车场	荷兰	2011
10	La Geode 超现代剧院	法国	1985	41	金泽海之未来图书馆	日本	2011
11	自由女神像 (内部结构骨架)	美国	1986	42	Madeleine 体图书馆	法国	2013
12	盖特威大桥	澳大利亚	1986	43	里昂总部(翻新)	法国	2013
13	Louvre Pyramid	法国	1989	44	Dalarna 多媒体图书馆	瑞典	2014
14	Waterloo 国际车站	英国	1992	45	Govett-Brewster 美术馆	新西兰	2015
15	Waterloo 国际车站	英国	1992	46	上海中心大厦	中国	2016
16	北京保利大厦	中国	1992	47	深圳平安金融中心	中国	2017
17	欧洲人权法院	法国	1994	48	港珠澳大桥	中国	2018
18	千禧桥	英国	1999	49	青岛新机场航站楼	中国	2018
19	吉隆坡双子塔	新加坡	1999	50	香港会展中心	中国	1988
20	上海金茂大厦	中国	1999	51	北京大型国际机场	中国	2019
21	Michael Fowler Center	新西兰	2000	52	五峰山长江大桥	中国	2019
22	札幌市穹顶体育场	日本	2001	53	雄安高铁站	中国	2020
23	福建会堂	中国	2001	54	“华龙一号”福清核电站	中国	2020
24	广州国际会议展览中心	中国	2002	55	平潭海峡公铁两用大桥	中国	2020
25	新德里国会图书馆	印度	2002	56	Boijmans Van Beuningen 博物馆	荷兰	2021
26	舒伯特俱乐部	美国	2002	57	“冰丝带”国家速滑馆	中国	2021
27	匹兹堡会议中心	美国	2003	59	中新广州知识塔	中国	2022
28	静冈县游泳馆	日本	2003	60	瓜达尔机场	巴基斯坦	2022
29	台北 101 大厦	中国	2004	61	兰州中川国际机场	中国	2023
30	芝加哥“Cloud Gate”	美国	2004	62	重庆江北国际机场 T3B 航站楼	中国	2023
31	雷佛森桥	挪威	2006	63	广商中心大厦	中国	2023

3. 钢结构梁柱连接节点的形式及栓焊混接节点的特点

钢结构梁柱连接节点设计在钢结构整体设计中具有重要的作用和意义, 钢结构的可靠性和整体性通过连接节点的安全性得到有效保障。梁柱连接节点的基本设计原则: 节点必须能够完全传递被连接板件的压力(或拉力)、弯矩和剪力等。在强震作用下节点能够基于材料的延性, 保证结构产生非弹性变形, 即在梁内而不是在柱内产生塑性铰, 以消耗地震输入的能量, 使节点免于破坏, 并保证建筑结构具有足够的强度和适当的刚度而使其免于倒塌, 即“强柱弱梁、强节点弱杆件”的设计思想[10] [11] [12] [13]。梁与柱的连接节点, 按梁对柱的约束刚度大致可分为三类: 铰接节点、半刚性节点和刚性节点[14]。为了保证主梁与柱的连接具有足够刚度, 美国 and 我国的对于多高层钢框架结构体系的梁柱连接设计多按刚性连接设计。梁柱刚性连接的主要构造形式有 4 种: 全焊节点、高强螺栓连接节点、栓焊混合节点、三面围焊节点, 如图 1 所示[15]。

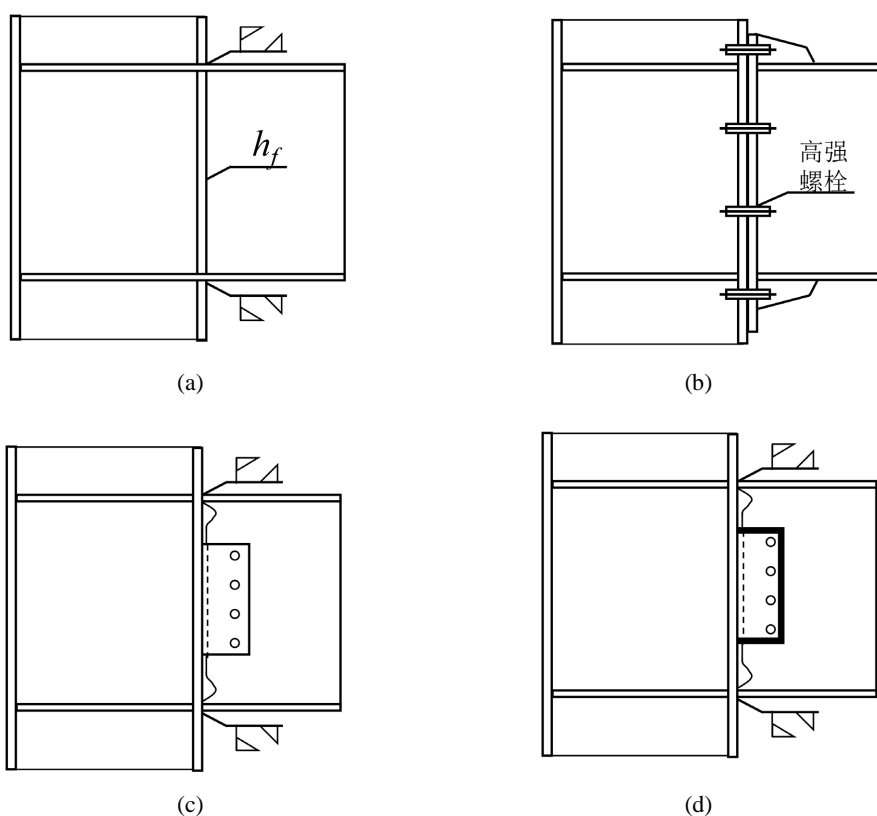


Figure 1. Common beam-column joint forms [15]: (a) All welded joints; (b) High strength bolted joints; (c) Weld joints on three sides; (d) Bolt welded mixed joints

图 1. 梁柱节点常用连接形式[15]: (a) 全焊接节点; (b) 高强螺栓连接节点; (c) 三面围焊节点; (d) 栓焊混接节点

在高层钢结构中, 梁与柱的刚性连接通常采用栓焊混合节点, 即对梁的上、下翼缘采用焊接连接, 对腹板则采用高强度螺栓连接。国内外关于地震破坏的资料表明, 栓焊混合连接将是高层、超高层钢结构工程的首选。这种构造受力合理, 焊缝和高强度螺栓各自传力路线明确, 故可按各自的计算方法分别计算其承载力。相关试验表明, 栓焊混合连接节点经过反复加载后节点承载能力基本没有降低, 而且还能满足工程抗震所要求的延性。相较于螺栓连接节点, 钢结构梁柱栓焊连接节点具有突出的优势:

- 1) 采用栓焊混接节点可以避免由于使用大量螺栓造成的材料成本过高的问题[14];
- 2) 采用栓焊混接节点对构件尺寸的容差大, 可以在梁定位后根据实际尺寸调整现场对接焊缝的大小,

减小施工过程中由于安装尺寸误差所产生的预应力[9];

3) 栓焊混接节点转动刚度大,在设计过程中,除了节点域很弱的情况外,栓焊混接梁柱节点均可以按照刚接节点设计[16][17][18]。相关计算结果表明,无论按照哪个国家的规范对钢结构节点的要求进行设计,栓焊混接节点转动刚度远高于螺栓连接节点[19];

4) 栓焊混接节点占用构件外空间较小,避免了由于连接螺栓和连接板或增设加劲肋时对空间利用的浪费[20],使对建筑使用功能的影响大大降低。

但同时,栓焊混接节点也存在明显劣势,主要集中在焊接和螺栓施工过程中,施工工艺、方法等对材料的力学性能的不利影响:

1) 施工过程复杂,现场焊接质量受到环境温度、焊接工人工作状态等多种不可控因素的影响[21],焊接的质量难以得到保证;

2) 对接焊缝施工过程中,产生焊接残余应力可能会对节点的疲劳和断裂性能产生不利影响,从而降低节点承载能力[22];

3) 焊接热输入影响钢材材质。焊接时,由于焊接不均匀的热输入,节点区局部钢材会产生微观应变[23],材料塑性下降,增加发生脆性断裂的风险;

4) 可焊性不好的材料,不能采用栓焊混接连接节点[23]。

4. 不锈钢结构梁柱栓焊混接节点的研究现状

尽管不锈钢材料应用比较广泛,从材料层面解决了钢结构易腐蚀问题,在全寿命周期内可取得良好的经济效益,但现阶段作为结构构件在建筑工程中的使用仍十分有限。各个国家根据不锈钢各方面性能取得的研究成果,分别制定了较为系统全面的建筑结构不锈钢设计规范。欧洲、美国、澳大利亚及新西兰、日本等发达国家开展较早,已有欧洲规范 EN 1993-1-4 [23]和 EN 1993-1-8 [24]、美国规范 SEI/ASCE 8-02 [25]、日本规范《不锈钢建筑结构设计标准》JIS G 4321-2000 [26]、澳大利亚/新西兰规范 AS/NZS 4673-2001 [27]等,我国于 2015 年 12 月正式颁布编制了 CECS 410-2015《不锈钢结构技术规程》。

栓焊混接节点在普通碳素钢结构中已应用广泛,但现有相关研究表明,采用常规的摩擦面加工工艺(拉丝、喷砂、割痕、不处理)处理的不锈钢材料表面抗滑移系数很小[28][29],使得剪切板与腹板达不到很好的受剪效果,导致梁翼缘板根部承受弯剪联合作用[15],使摩擦型连接难以实现,并且不锈钢材料在循环荷载作用下表现明显的循环硬化,致使此类型节点处于研究的空白。因此,在现有的不锈钢规范中,相对较少的不锈钢连接节点研究大都集中在全焊接或螺栓连接相关性能方面,且适用条件较为狭窄,而缺乏不锈钢栓焊混接节点的理论 and 试验研究,针对不锈钢梁柱栓焊混接节点的相关试验和理论研究则更加匮乏,亟待开展。

针对不锈钢梁柱栓焊混接节点,部分学者已开展了相关的研究(见表 2)。

Hasan 等人[30][31]开展了奥氏体 AISI 316L 不锈钢梁柱顶底角钢连接节点的静力试验研究和数值分析,提出了预测半刚性梁柱节点弯矩-转角关系的四参数分析模型。

Elflah 等人[32][33][34]开展了 12 个奥氏体 EN 1.4301 不锈钢梁柱连接节点的静力试验研究和数值分析,其中包括单向外伸端板连接、平齐端板连接、顶底角钢连接以及双腹板角钢连接等 4 种欧洲常用的梁柱节点连接形式,结果表明,现有普通钢节点计算公式不能直接适用于计算不锈钢节点的承载性能。在此基础上,Elflah 采用简化三维壳单元有限元模型准确地模拟了不锈钢梁柱节点试件的承载性能。

Liu 等人[35]对 3 个全焊接连接的双相型 S22053 不锈钢焊接梁柱节点开展了循环加载试验,研究了柱轴力和节点域厚度对节点抗震性能的影响,结果表明,试验节点具有良好的抗震性能。

林梓宏[36]分析对比了各国规范的设计方法,其主要差别在于针对节点域周围板件对承载力的有利影

响作出不同的处理方法。利用验证的有限元模型,对双相型不锈钢梁柱节点域承载力进行参数分析,研究参数包括节点形式、材料牌号、节点域厚度、柱腹板高度和柱轴压比。验证了美国、欧洲、日本和中国四个钢结构设计规范的梁柱节点域设计方法应用到不锈钢结构的适用性。

王元清等人[29] [37] [38]完成了 10 个奥氏体型不锈钢梁柱节点的循环加载试验,着重研究了梁柱节点的破坏形态、承载力及延性指标,结果表明,5 个外伸端板连接节点的滞回曲线存在不同程度的捏拢现象,而另外 5 个栓焊混接连接节点的滞回曲线饱满无捏拢。王元清等人[15]研究了不同螺栓类型和连接构造细节对奥氏体型 S31608 不锈钢梁柱栓焊混用节点静力性能的影响,通过 6 个非线性有限元模型对节点试件梁翼缘板沿梁长方向、焊接孔末端梁宽度方向和剪切板根部的应力分布状况进行了研究,并选取其中一个不锈钢结构梁柱栓焊节点在单调荷载作用下进行了试验验证,模拟结果与试验结果吻合度是较好的,而且模拟结果偏安全。

袁焕鑫等人[39] [40] [41]综合采用了试验研究、数值模拟和理论分析的方法,研究了 S316L 不锈钢材料梁柱栓焊连接节点的抗震性能和变形能力,探究了不锈钢端板连接梁柱节点的承载性能以及计算方法。通过试验和参数分析,得出了不同螺栓材料对节点的影响较小,并且建议选用 A4-70 螺栓应用于不锈钢梁柱栓焊节点中。同时,对中国 CECS 410-2015、美国 ANSI/AISC 358-16 和欧洲 EN 1993-1-8 中的端板连接节点承载性能计算方法进行评估,结果表明,3 种计算方法均低估了不锈钢端板连接梁柱节点的承载性能,不能直接采用现有普通钢节点的公式计算不锈钢节点的承载力。

Table 2. Research summary of bolt welded mixed joints of stainless steel beam-column

表 2. 不锈钢梁柱栓焊混接节点研究汇总

参考文献	研究方法	节点形式	亮点
Hasan <i>et al.</i> [30] [31]	试验研究、数值模拟	螺栓连接	提出了预测半刚性梁柱节点弯矩 - 转角关系的四参数分析模型
Elfalah <i>et al.</i> [32] [33] [34]	试验研究、数值模拟	螺栓连接	研究了不锈钢梁柱节点在静单调荷载作用下的全尺寸试验,采用简化三维壳单元有限元模型准确地模拟了不锈钢梁柱节点试件的承载性能
Liu <i>et al.</i> [35]	试验研究	全焊接连接	研究了 3 个不同节点板厚和轴压比的试件进行了循环加载试验
林梓宏[36]	数值模拟	全焊接连接	研究了双相型不锈钢梁柱节点域承载力参数,验证了美国、欧洲、日本和中国四个钢结构设计规范的梁柱节点域设计方法应用到不锈钢结构的适用性
王元清等[29] [37] [38]	试验研究、数值模拟	螺栓连接、栓焊混接	研究了奥氏体型不锈钢梁柱栓焊混接节点的循环加载试验;研究了不同螺栓类型和连接构造细节对奥氏体型 S31608 不锈钢梁柱栓焊混用节点静力性能的影响
袁焕鑫等[39] [40] [41]	试验研究、数值模拟	栓焊混接	研究了 S316L 不锈钢材料梁柱栓焊连接节点的抗震性能和变形能力,探究了不锈钢端板连接梁柱节点的承载性能以及计算方法

5. 结语与展望

国内外学者先后对不锈钢轴心受压构件、不锈钢构件螺栓连接摩擦面抗滑移系数、焊接工字形截面轴压短柱、不锈钢材料本构关系和循环荷载下的本构关系、受弯构件、压弯构件等进行了相关试验和有限元研究,对于不锈钢梁柱节点的相关研究也主要围绕全焊接连接节点和螺栓连接节点,而针对不锈钢梁柱栓焊混接连接节点也只是围绕静力特性、抗震特性等方面,且处于起步阶段,不锈钢梁柱栓焊混接

连接节点的受力特性以及工程应用还有待于更深入的研究。目前,围绕不锈钢梁柱节点连接存在的不足,及进一步研究:

1) 我国已颁布的《不锈钢结构技术规程》是在钢结构设计规范的基础上进行相应的修正得出的相关设计方法,对于不锈钢全焊接连接和螺栓连接的计算方法的正确性有待开展相关试验进一步验证;

2) 目前,国内对不锈钢梁柱栓焊混接连接节点的相关研究处于起步阶段,以现行中国、美国和欧洲规范进行设计的不锈钢梁柱栓焊混接连接节点均偏于保守,其相关的计算方法和设计指标还有待开展实验和理论研究;

3) 国内针对不锈钢焊缝的相关研究目前仅涉及材料本构和承载力试验研究,仍然缺乏断裂和疲劳的相关研究;

4) 缺少不锈钢构件的高强度摩擦型螺栓连接更深入的研究,以解决不锈钢螺栓连接中,母材表面摩擦面抗滑移系数小的问题,并探索其表面的新处理工艺技术或新的连接方式;

5) 不锈钢栓焊混接连接节点的施工及质量验收还没有明确的规范规程,也没有统一标准,有待补充。

项目名称

辽宁科技学院大学生创新创业计划资助项目,基于建筑固废利用的再生混凝土力学性能试验研究,项目编号:202411430057。

参考文献

- [1] 乔学良. 不锈钢栓焊连接梁柱节点的静力与抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
- [2] 李洪波, 舒赣平. 不锈钢在建筑结构中的应用研究[C]//第八届全国现代钢结构学术研讨会. 天津: 天津大学, 2008: 1896-1901.
- [3] 王元清, 高博, 戴国欣, 等. 不锈钢受弯构件承载性能的研究进展[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(1): 189-194.
- [4] 王元清, 袁焕鑫, 石永久, 杨璐. 不锈钢结构构件稳定性的研究进展[J]. 工业建筑, 2012, 42(5): 1-11.
- [5] 王元清, 袁焕鑫, 石永久, 等. 不锈钢结构及其应用和研究现状[J]. 钢结构, 2010, 25(2): 1-13.
- [6] 吴兆旗, 何田田, 姜绍飞, 等. 钢结构梁柱连接节点抗震性能研究进展[J]. 福建大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 658-665.
- [7] 徐赣萍, 王元清, 吴耀华, 等. CECE 410-2015 不锈钢结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [8] 袁焕鑫, 高煊栋, 杨璐, 等. 端板连接不锈钢梁柱节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 48(2): 160-169.
- [9] 乔学良, 王元清, 贾连光. 不锈钢结构梁柱连接节点的研究现状[C]//第十七届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京: 工业建筑, 2017: 154-162.
- [10] 中华人民共和国建设部. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [11] 阎石, 李康宁, 张曰果, 等. 翼缘削弱型钢筋混凝土框架梁柱节点受力性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2): 219-227.
- [12] Song, A.L., Ran, H.D., Su, M.Z., et al. (2013) Finite Element Analysis on Mechanic Behavior of Joints between Elevated Columns and Truss Columns in Substation Frame. *Applied Mechanics & Materials*, **259**, 949-953. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.949>
- [13] Zhang, Y.F., Zhao, J.H. and Zhang, D.F. (2015) Force Transference Mechanism and Bearing Capacity of Connection between Composite CFST Column and Steel Beam. *Journal of Chang'an University*, **35**, 82-88.
- [14] 石永久, 王磊, 王元清. 高强度钢材钢结构梁柱连接节点承载性能研究进展[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第12届(ASSF-2010)学术交流会暨教学研讨会. 北京: 钢结构, 2012: 43-50.
- [15] 王元清, 乔学良, 贾连光, 等. 单调加载下不锈钢结构梁柱栓焊混用节点承载性能分析[J]. 工程力学, 2019, 36(z1): 59-65.
- [16] SAC Joint Venture (2000) FEMA-355D State of the Art Report on Connection Performance. Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
- [17] Faella, C., Piluso, V. and Rizzano, G. (2000) Structure Steel Semirigid Connections: Theory, Design and Software. CRC

- Press LLC, Boca Raton.
- [18] SAC Joint Venture (2000) FEMA-355C State of the Art Report on Systems Performance of Steel Moment Frames Subject to Earthquake Ground Shaking. Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
- [19] Shi, G., Chen, X. and Wang, D. (2017) Experimental Study of Ultra-Large Capacity End-Plate Joints. *Journal of Constructional Steel Research*, **128**, 354-361. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.09.001>
- [20] 陈学森, 施刚, 王喆, 等. 多层装配式钢框架梁柱节点选型分析[C]//第十四届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京: 工程力学, 2014: 174-179.
- [21] 陈学森, 施刚, 石永久, 等. 钢框架双重设防梁柱节点受力性能的有限元分析[C]//中国钢结构会结构稳定与疲劳分会第14届(ISSF-2014)学术交流会暨教学研讨会论文集. 北京: 钢结构工程研究所, 2014: 215-222.
- [22] Matos, C.G. and Dodds, R.H. (2000) Modeling the Effects of Residual Stresses on Defects in Welds of Steel Frame Connections. *Engineering Structures*, **22**, 1103-1120. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00055-3)
- [23] (2006) EN 1993-1-4-2006, Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1 - 4: General-Supplementary Rules for Stainless Steels. European Committee for Standardization, CEN, Brussels.
- [24] (2005) EN 1993-1-8-2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1 - 8: Design of Joints. European Committee for Standardization, CEN, Brussels.
- [25] (2002) SEI/ASCE 8-02, Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members. American Society of Civil Engineers, Reston.
- [26] JIS G 4321-2000 日本不锈钢建筑结构设计标准[S]. 东京: 日本不锈钢结构建筑协会设计基准编制委员会, 2000.
- [27] (2001) AS/NZS 4673-2001, Cold Formed Steel Structural. Standards Australia International Ltd., Sydney.
- [28] 王元清, 关建, 张勇, 等. 不锈钢构件螺栓连接摩擦面抗滑移系数试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(5): 769-774.
- [29] 王元清, 赵义鹏, 徐春一, 等. 不同种类螺栓的不锈钢端板连接节点抗震性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(z1): 140-146.
- [30] Hasan, M.J., Ashraf, M. and Uy, B. (2017) Moment-Rotation Behaviour of Top-Seat Angle Bolted Connections Produced from Austenitic Stainless Steel. *Journal of Constructional Steel Research*, **136**, 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.05.014>
- [31] Hasan, M.J., Al-Deen, S. and Ashraf, M. (2019) Behaviour of Top-Seat Double Web Angle Connection Produced from Austenitic Stainless Steel. *Journal of Constructional Steel Research*, **155**, 460-479. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.12.015>
- [32] Elfalah, M., Theofanous, M., Dirar, S., et al. (2019) Behaviour of Stainless Steel Beam-to-Column Joints: Part 1: Experimental Investigation. *Journal of Constructional Steel Research*, **152**, 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.040>
- [33] Elfalah, M., Theofanous, M. and Dirar, S. (2019) Behaviour of Stainless Steel Beam-to-Column Joints: Part 2: Numerical Modelling and Parametric Study. *Journal of Constructional Steel Research*, **152**, 194-212. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.017>
- [34] Elfalah, M., Theofanous, M., Dirar, S., et al. (2019) Structural Behaviour of Stainless Steel Beam-to-Tubular Column Joints. *Engineering Structures*, **184**, 158-175. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.073>
- [35] Liu, M.M. and Shi, G. (2018) Cyclic Loading Tests of Duplex Stainless Steel Beam-to-Column Joints with WUF-W Connections. In: *9th International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS)*, The Hong Kong Institute of Steel Construction, Hong Kong, 947-956.
- [36] 林梓宏. 双相型不锈钢全焊接梁柱节点受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2018.
- [37] 王元清, 乔学良, 贾连光, 等. 不同连接方式的不锈钢梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(2): 316-322.
- [38] Bu, Y.D., Wang, Y.Q. and Zhao, Y.P. (2019) Study of Stainless Steel Bolted Extended End-Plate Joints under Seismic Loading. *Thin-Walled Structures*, **144**, Article ID: 106255. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106255>
- [39] 袁焕鑫, 胡松, 杜新喜, 等. 不锈钢 T 形件螺栓连接承载性能试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(2): 215-223.
- [40] 袁焕鑫, 刘向华, 杨璐, 等. 循环荷载作用下不锈钢 T 形件螺栓连接试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(7): 175-183. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0486>
- [41] 袁焕鑫, 高浚栋, 杜新喜, 等. 不锈钢端板连接梁柱节点静力承载性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 125-132.