

钢结构装配式梁柱节点的新发展趋势与工程应用

邢蓉^{1,2*}, 张俊杰³, 雷宏刚^{1#}

¹太原理工大学土木工程学院, 山西 太原

²山西工程科技职业大学交通工程学院, 山西 太原

³太原理工大学建筑设计研究院, 山西 太原

收稿日期: 2022年3月30日; 录用日期: 2022年4月19日; 发布日期: 2022年4月29日

摘要

钢结构住宅在装配式建筑中的地位日益提升, 钢结构住宅在国内外发展状况日益更新, 钢结构住宅的节点类型也日趋增多, 其中梁柱节点对于结构的整体承载能力的重要性越来越得到更多的关注, 各种类型的梁柱节点的构造特点、受力特点、工程应用也各不相同, 新型节点更加符合装配式钢结构的使用需求, 也越来越多地受到关注与重视。

关键词

装配式建筑, 钢结构, 梁柱节点

The New Development Trend and Engineering Application on Beam-Column Connection of Prefabricated Steel Structure

Rong Xing^{1,2*}, Junjie Zhang³, Honggang Lei^{1#}

¹College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

²Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Taiyuan Shanxi

³Architectural Design and Research Institute of Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

Received: Mar. 30th, 2022; accepted: Apr. 19th, 2022; published: Apr. 29th, 2022

Abstract

Steel structure residential building is becoming more and more popular among prefabricated

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 邢蓉, 张俊杰, 雷宏刚. 钢结构装配式梁柱节点的新发展趋势与工程应用[J]. 土木工程, 2022, 11(4): 626-643. DOI: 10.12677/hjce.2022.114069

buildings day by day, and the development of steel structure residence is becoming better and better day by day at home and abroad. What's more, the joint type of steel structure residence is also increasing day by day. Among them, the important role which beam-column joint play in the structure's overall bearing capacity has been paid more and more attention. The structural characteristics, mechanical properties and engineering applications of various types of beam-column joints are also different, and at the basis of these theories new beam-column joints are consistent with the using demand of prefabricated steel structures, meanwhile more and more attention has been paid to them.

Keywords

Prefabricated Building, Steel Structure, Beam-Column Connection

Copyright © 2022 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

人类进入到 21 世纪以来,对生活品质的要求越来越高,对每天需要进行身心休息的住宅要求也逐步提升,为了满足社会的需求,建筑行业也在经历着一场翻天覆地的变革,从以往的钢混结构到预应力混凝土结构再到钢结构,不仅在材料上、质量上而且在速度上、功能上都有所提升,同时也在适应我国钢产量稳居世界首位的国情,利用现有高质钢材,结合国内外钢结构住宅的建造技术,我们在迎接一个崭新的装配式钢结构绿色建筑时代的春天。

2. 钢结构的国内外发展状况

2.1. 国外发展状况

钢结构住宅的起步阶段源于 18 世纪初期英国的钢框架结构的房屋;随之进入初步探索阶段——20 世纪初,钢材利用率下降,有一批著名的建筑大师和一心探索新材料创造力的建筑师们着手关注钢结构技术,并进行实践创新,将钢材及钢结构新型技术运用到自己的住宅,更加凸显了钢结构住宅的可用性;二战后,由于人类对房屋的需求量急剧增大,欧美兴起钢结构热流,钢结构房屋的整体性及高效率性的优点一展无遗;很快进入到钢结构住宅的成熟阶段。

瑞典是世界上住宅工业化最发达的国家,其轻钢结构住宅预制构件达到 95%;日本和欧洲相继提出用建筑来储备钢铁资源,在日本各种建筑结构中钢结构数量比例占据前列,低层独立住宅居多;澳洲的装配式住宅也日趋成熟,在住宅的施工工艺和使用品质方面大幅度提高;美国是最先采用钢框架结构建造住宅的国家和地区之一,美国的 LSF 轻型钢框架建筑体系频繁应用于各类建筑,譬如美国湖滨大道公寓;英国 1998 年发布的《建筑发展报告》中大力推行钢结构建筑,政府规定从 2004 年起,至少有 25% 的住宅要使用 MMC;法国政府在 1982 年制定了“居住 88”计划,到 1988 年要拥有两万套钢结构住宅比例居高的高标准化住宅;德国的装配式住宅主要采取叠合板、混凝土、剪力墙结构体系,均采用装配式结构,耐久性较好。

随着钢材的生产技术的提高、计算机的日益普及、钢结构设计理论及软件的日益完善,钢结构住宅在全世界扩展速度增快,也适应了当今世界“保护地球、减少浪费”的主题[1] [2]。

2.2. 国内发展状况

我国在 20 世纪 50 年代第一次开始发展建筑工业化,着手在建筑业市场推行标准化、工业化、机械化,开始在预制构件和预制装配建筑上进行创造,使得构件工厂化、工业厂房实现预制装配、砌块建筑工业化。紧接着在 60、70 年代,结合我国国情,工程师们逐步引进国外先进装配技术进一步促进标准化设计方法的更新,构配件生产能力的提高,建筑材料的开发和结构体系的更新,进一步更新施工工艺、提高建筑能力和建筑速度[3]。

2.2.1. 装配式钢结构的相关政策更新

我国是在 1994 年正式提出住宅产业化,并在 1998 年 7 月成立了住房和城乡建设部住宅产业化促进中心,统一管理、协调和指导全国有关住宅产业化方面的工作,并提供相应的技术咨询和技术服务,致力于全面推进中国住宅产业现代化。

2001 年 12 月 19 日建设部(2001) 254 号文件《钢结构住宅建筑产业化技术导则》,确定了钢结构住宅建筑技术发展的基本原则,对钢结构住宅体系的平面布局、设计、围护结构、分隔结构、装修,连接钢结构材料的选用、宜选用耐火、耐候钢等都进行了阐述,对钢结构的防火、防腐的措施给予说明,是我国第一部有针对性的钢结构住宅体系建筑发展的指导性文件。

2009 年 11 月 1 日施行中国工程建设标准化协会批准发布的协会标准《钢结构住宅设计规范》。

2011 年,国家“十二五”发展计划“以建筑节能减排为重点,大力推行绿色、低碳的建设理念,通过技术引领、优化设计。逐步实现年建筑结构用材占到全国钢材总产量的 10%左右,钢结构住宅建筑占到房屋总建筑面积 15%左右。”[4]

2013 年 1 月 1 日国务院以国办发[2013] 1 号文件转发发展改革委和住房城乡建设部《绿色建筑行动方案》,要求“十二五”期间完成新建绿色建筑 10 亿 m^2 ,到 2015 年城镇新建建筑 20%达到绿色建筑标准[5]。

2014 年 8 月 8 日,国内首部关于工业化装配式钢结构的规范——湖南省地方标准《工业化装配式斜支撑节点钢框架结构技术规程》,通过湖南省建设厅审查[6]。

2016 年国家“十三五”规划中强调:要研究并推广在各类建筑中应用钢结构新体系,扩大钢结构的应用范围;我国的钢结构设计标准要与国际接轨、完善钢结构设计规范和标准;为实现钢结构建筑产业化提供成套技术,研制快速安装、经济适用、安全可靠的钢结构体系;争取到 2020 年,我国钢结构建筑占 10%以上[7]。

2018 年 2 月 1 日起实施《装配式建筑评价标准》。原国家标准《工业化建筑评价标准》同时废止。

2019 年 10 月 1 日起实施《装配式钢结构住宅建筑技术标准》,为装配式钢结构建筑的发展带来了新的曙光与强有力的动力。

2020 年 8 月 20 日正式发布《钢结构住宅主要构件尺寸指南》。根据《住房和城乡建设部标准定额司关于开展〈钢结构住宅评价标准〉编制工作的函》(建司局函标[2020] 77 号)的要求,《钢结构住宅评价标准》编制组成立暨第一次工作会议于 2020 年 7 月 8 日举行[8]。

2022 年 3 月住房和城乡建设部印发“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划,提出“大力发展钢结构建筑,鼓励医院、学校等公共建筑优先采用钢结构建筑,积极推进钢结构住宅和农房建设,完善钢结构建筑防火、防腐等性能与技术措施。”

2.2.2. 装配式钢结构体系更新

钢结构住宅体系随着时代的变迁,也在发生着天翻地覆的变化,不断地涌现出一些新型装配式体系,最基本的钢结构体系按承重骨架的不同分为:轻型钢结构体系和钢框架体系[9],其中轻型钢结构用冷弯

薄壁型钢作为承重外墙的结构骨架或水平、屋面构件,钢框架结构体系多用钢管或者型钢作为住宅的承重结构,其截面形式有工字型钢、H型钢、U型钢、L型钢、钢管混凝土截面、冷弯焊接方钢管或圆钢管截面、冷弯薄壁方钢管或者圆钢管内灌混凝土截面,2006年5月杭萧钢构承建的全国最大的钢结构住宅示范工程——武汉世纪家园,建筑面积22.97万 m^2 ,由12幢24层的高层住宅组成。该工程主体结构采用钢结构,楼层板和内外墙板采用杭萧钢构研发的CCA隔音、保温、防火板;2010年长沙远大集团在长沙建造钢结构酒店,共18层,该酒店采用H钢框架结构体系,组合楼板,用钢量 $40\text{kg}/\text{m}^2$,工期6天,建造速度惊人[10]。

由于纯钢框架的抗侧力刚度小,钢结构住宅应用层数受限,于是产生了钢框架-支撑结构体系,支撑成为框架的保护伞,具有良好的抗震性能,抗侧刚度也较大,根据其支撑设置的不同需求又分为中心支撑框架(CBFS)、偏心支撑框架(EBFS)和消能支撑框架结构。同济大学的王伟,陈以一对新型分层装配式套筒式花篮加扁钢支撑钢结构体系进行了研发,增强其工程应用性[11];刘大伟等人在国内既有工艺基础上研制的分层装配式钢结构体系的新型套筒——扁钢支撑在往复变形下有优良的变形能力,而且保证了体系的抗震安全性[12]。

为了解决了建筑空间的漏柱等不良现象出现了钢结构异形柱结构体系,而且很大程度地提高住宅的有效使用面积,还做到了平面布置灵活,空间的使用更加灵活。在1999年国务院办公厅72号文件《关于推进住宅产业化提高住宅质量的若干意见》中,异形柱结构就被列为我国现代住宅建筑的5大结构体系之一。

天津大学的陈志华教授从钢筋混凝土异形柱的特点出发,提出了两种新型钢结构异形柱形式——方钢管组合异形柱中利用了方钢管结构承载力可以充分发挥、与构件连接简单易操作,外形规则,建筑适用性较好,防火处理容易的优点;方钢管混凝土组合异形柱具有承载力高、抗扭和抗剪能力强,延性韧性好,而且耐火性好,增加了钢结构在异形柱结构领域的研究与应用[13]。

周绪红教授认为交错桁架钢结构体系是一种经济、适用高效的新型结构体系,用钢量很省,自重减轻,自由布置空间大,是一种典型的环保绿色建筑,在中国可以进行推广应用[14]。

装配式框架-核心筒结构体系也是当前高层建筑应用较广泛的一种结构形式,它的基础一种是框架结构,在框架结构中布置一定数量的剪力墙,通过框架与剪力墙共同作用下以提高结构的承受水平荷载作用的能力,从而构成钢框架-混凝土剪力墙体系;还有一种是钢管(型钢)混凝土组合框架,当框架中设置支撑时称之为支撑混合框架。借助钢管对核心混凝土的套箍约束作用,使核心混凝土处于三向应力状态,从而使核心混凝土具有更高的抗压强度和压缩变形能力,强度高,重量轻、延性好、耐疲劳、耐冲击,省工省料、架设轻便、施工速度快。

随着对高层建筑的层数、高度及抗震设防日益渐长的要求,逐步出现了适应高层建筑更大高度要求的结构体系——筒体结构,采用钢框筒可以建造高度为70~80层的建筑,采用钢束筒结构即外筒与内筒的结合使其刚度和承载力进一步提高,也增强了抗弯与抗剪能力,更适应了超高层建筑的进一步发展。美国芝加哥的西尔斯大厦就是采用的典型的束筒钢结构。除此之外还有以大型支撑钢框筒的巨型桁架体系也是一种很有发展前景的超高层建筑体系。

3. 装配式钢结构住宅结构的设计精髓

3.1. 钢结构住宅的体系

钢结构住宅包括建筑体系、承重体系、设备体系。其中承重体系包括板、柱、梁、支撑、节点、材料。通过高质量又施工方便且美观的节点将梁柱板及支撑连接成一个完美的实用的钢结构体系,节点是构造中的关键部位,结构师们的经典设计语“强节点弱构件”更是深入人心,2011年3月11日

日本东北海岸遭受里氏 9.0 级的大地震，大跨度空间结构中梁柱连接节点遭到了不同程度的损坏；我国 2008 年的汶川大地震和 2013 年芦山地震中钢屋架与混凝土柱组成的空间结构中混凝土柱顶端节点都发生了严重的破坏；在 2019 年的 3 月 15 日美国佛罗里达人行天桥也是由于超张拉导致腹杆节点失效，所以其节点的性能已经直接影响到整体结构的安全性及使用寿命，成为国内外专家学者近期研究的重点。

3.2. 不同钢结构住宅体系对应的梁柱节点

3.2.1. 轻钢龙骨的螺栓连接节点

轻钢龙骨体系是广泛适用于低层建筑中的一种结构形式，属于刚性节点。以加拿大 interland 公司首创的“Websteel”体系为例，最初模型如图 1 所示。节点按照梁柱的连接方式分为：边柱与顶梁(L 型)，边柱与中梁(侧 T 型)，顶梁与中柱(T 型)，中柱与中梁(十字型)四种节点形式[15]。

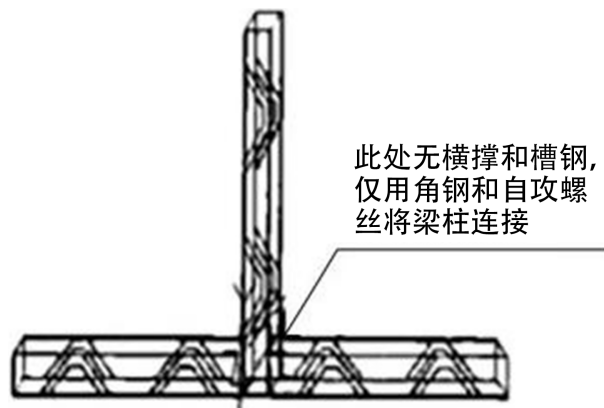


Figure 1. The original model of websteel
图 1. Websteel 最初模型

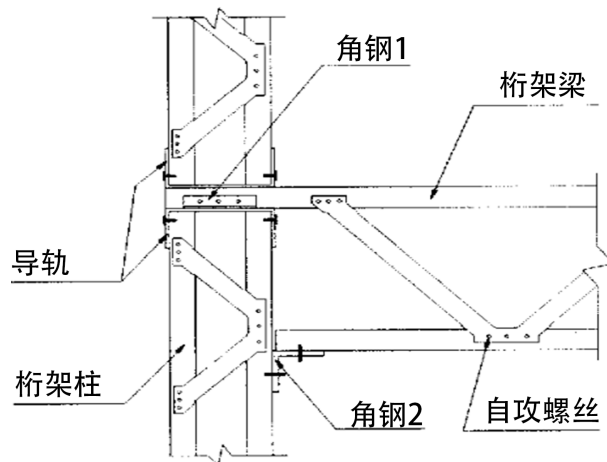


Figure 2. The joint of the truss beam-column
图 2. 桁架梁 - 桁架柱节点

武汉理工大学土木工程与建筑学院陆国威、陈坚等人针对该节点的受力性能差进行了改进，在将柱一端截断，与梁的上弦杆用槽钢和自攻螺丝连接，在梁柱节点的另一端用角钢相连。并且在其相交处有一段方钢管作为纵向支撑，再采用钢板、螺栓把它们连接到一起[16]，如图 2、图 3 所示。

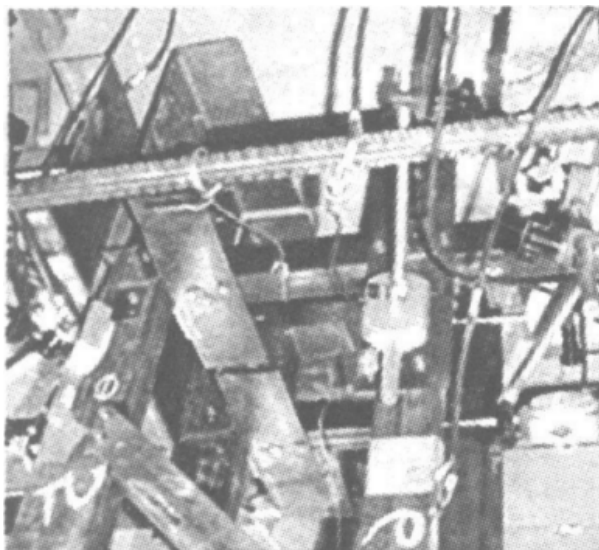


Figure 3. Improved joint model
图 3. 改进后的节点模型

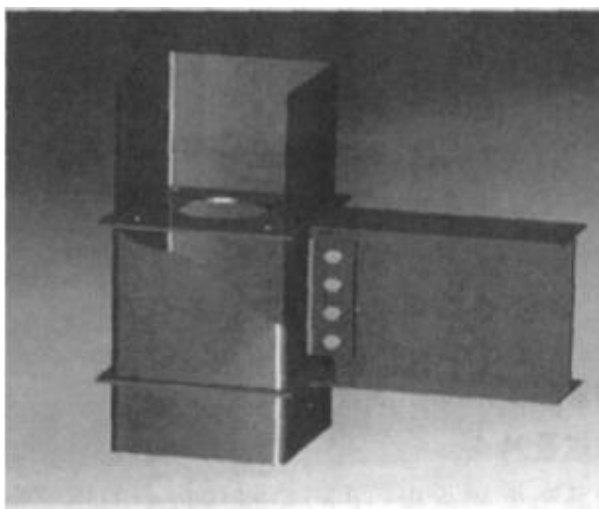


Figure 4. The rigid joint of direct diaphragm
图 4. 直通横隔板式刚接节点

3.2.2. 框架结构中梁柱节点

1、全焊接节点

最常见的焊接节点属于刚性节点。P. Ansourian 等学者在 1974 年对钢管混凝土柱与钢梁焊接节点进行了试验研究，对节点的传力途径和破坏方式进行详细研究，得出钢管混凝土柱与钢梁焊接节点受力的主要部位在焊接处，而且在往复荷载作用下节点焊接处容易出现撕裂现象[17]。Yousef M. Alostaz 在 1996 年对直接焊接式、外加强环式、腹板贯通式、钢筋贯通式、翼缘贯通式、钢梁贯通式六种不同连接形式的节点进行了有限元模拟分析，得出直接焊接式节点的初始刚度是最大的[18]。

2、贯通式隔板节点

该节点是典型的刚性连接节点形式，主要用于 H 形钢梁与钢管柱之间的连接，传递梁翼缘内力的隔板穿过整个柱截面[19]，如图 4 所示，柱内横隔板外伸，将柱壁切断，梁翼缘与横隔板焊接，避免了柱壁

板较薄时, 焊接工艺问题[20], 隔板外伸式也称为隔板贯通式如图 5 所示, 这种节点最早运用于日本。Schneider 和 Alostaz 针对贯穿型钢管混凝土柱与钢梁节点做了详细研究, 得出(1) 不同的位置的贯通构件性能差别大; (2) 翼缘贯通式节点抗震性能较差, 腹板贯通式节点抗震性能差, 钢梁贯通式节点抗震性能最好[21]。A. Elremaily 等在 2001 年对几个贯穿式钢管混凝土柱与钢梁连接节点进行了试验分析及有限元分析, 得出梁贯穿式节点的传力途径, 并得出一种评估节点强度的设计方法, 将其应用于梁贯穿式节点的设计, 得出设计结果与有限元计算结果很吻合[22]。Atorod Azizinamin 等在 2004 年对六个圆钢管柱 - 钢梁的 T 形节点进行了试验分析, 得出直接焊接的节点——柱腹板易发生平面外变形, 不适用于实际工程, 设置外隔板的节点刚度与强度有退化倾向, 但抗震性能较好, 梁整体贯穿式节点的抗震性能最优[23]。对于热轧或冷成形的圆管或方管柱, 当钢管内部空间不够容纳焊工在其中操作时, 柱内水平隔板焊接时必须将隔板附近处将柱断开, 同济大学陈以一教授对该节点进行抗震性能试验, 通过验证表明柱轴力的大小也不会影响节点的破坏模式, 因此柱身与隔板间的焊缝应处在相对更加有利的应力状态下[24]。

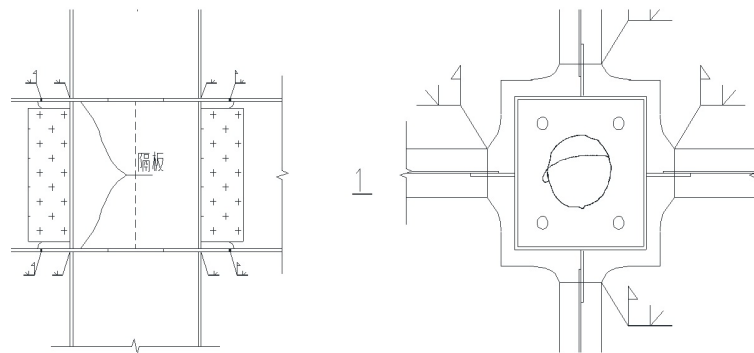


Figure 5. The joint of extended diaphragm
图 5. 隔板外伸式节点

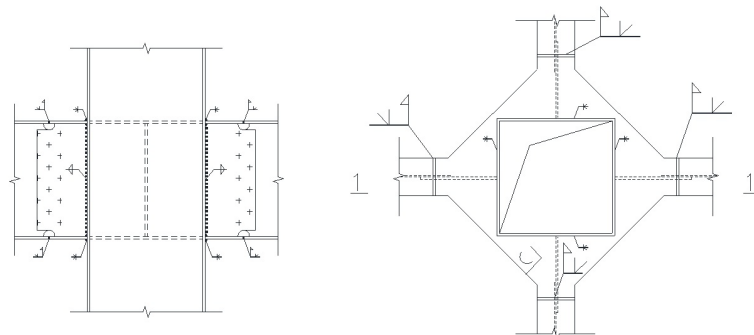


Figure 6. The joint of external round
图 6. 外环式节点

3、外环板式节点

采用外环板式的连接, 是保持柱贯通条件下对内隔板形式的一种替代方法, 外环式节点是在钢结构设计手册中被提出的, 2001 年的钢结构设计图集中对环板尺寸做了说明, 环板可以减少应力集中, 并避免脆性破坏。《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159:2002) [25]、《钢管混凝土结构设计及施工规程》(CECS 28:2012) [26]中详细进行了外环板式节点的设计说明, 早在 2005 年福州大学土木建筑工程学院的游经团对外环板式钢管混凝土节点环板尺寸进行了初步探讨, 按规范计算所得环板尺寸的 2/3 设计的节点从承载力、强度和刚度退化、耗能等方面均能满足设计要求。因此, 在大量参数分析和理论计算

核实的基础上,有更为可靠依据的情况下,设计中可以考虑适当减小钢管混凝土节点外加强环的尺寸[27]。2008年同济大学的陈星针对对外环板节点形式、柱壁厚度、环板宽度等参数进行研究,得出环板可以避免翼缘与柱壁连接处的应力集中,环板的宽度越大,产生的效果越好[28]。如图6所示。长江大学杜国峰教授通过对方钢管混凝土柱-H型钢梁外环板式节点抗剪性能进行研究,提出考虑楼板影响的方钢管混凝土柱-钢梁外环板式节点的核心区剪力-剪切变形恢复力模型[29]。

4、内隔板式节点

此类节点多用于钢管直径较大的建筑结构中,如图7所示。王来与王铁成对采用内隔板式节点的一榀三层钢管混凝土框架进行了试验,研究分析其工作机理与抗震性能;两跨合肥工业大学的陈道政教授的团队进行了方钢管混凝土-钢梁内隔板节点的受力性能研究[30][31],得出了该节点能满足“强节点弱构件、强柱弱梁、强剪弱弯”的受力要求,内隔板的厚度、钢管柱柱壁厚度、混凝土强度等级对节点的破坏荷载影响比较小,但较少降低了延性和耗能能力,强调了焊接的施工要求及内隔板上设置混凝土浇筑孔和透气孔以便提高混凝土的浇筑质量[32];天津大学的李黎明、陈志华老师对方钢管混凝土内隔板节点进行了试验研究,提出了节点的极限承载力计算公式,并提出要尽量采用螺栓连接而减少焊接连接[33];长安大学的周天华对用于高层建筑的带内隔板的方钢管混凝土柱-钢梁刚性节点的受力和变形特征进行了分析研究,并提出了节点核心区受剪承载力计算公式[34]。

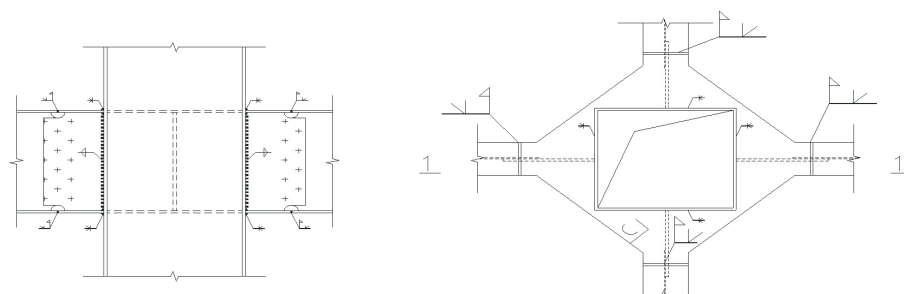
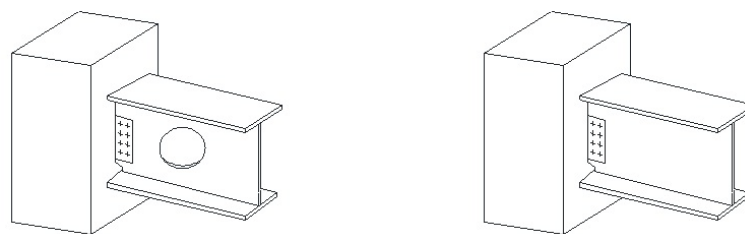


Figure 7. The joint of inner diaphragm
图7. 内隔板式节点

5、削弱型节点

为了控制塑性铰,又有一批削弱型节点的出现,像腹板开孔型节点、狗骨式节点,梁翼缘加宽式节点、加强梁翼缘——在梁根部上下翼缘加焊侧板,如图8所示,都是为了达到强节点弱构件的效果,使得节点的脆性破坏转变为梁的局部屈曲破坏。西安建筑科技大学周天华教授对带8度及8度以上抗震设防的内隔板的方钢管混凝土柱-钢梁RSB节点进行了非线性有限元分析,提出了该节点的设计计算理论[35]。

在此基础上长安大学的王秀梅对四种栓焊连接的方钢管混凝土柱-削弱钢梁框架节点的受力性能进行研究,得出了推荐节点模型[36];南京工业大学的吴文平等进行了未加内隔板的翼缘加强型狗骨式节点,比普通狗骨式节点外移塑性铰的作用明显[37];还有学者对翼缘削弱不同形式和翼缘和腹板同时削弱的不同形式进行了节点力学性能研究,证明这种节点的抗震性能良好及其工程实用性[38]。



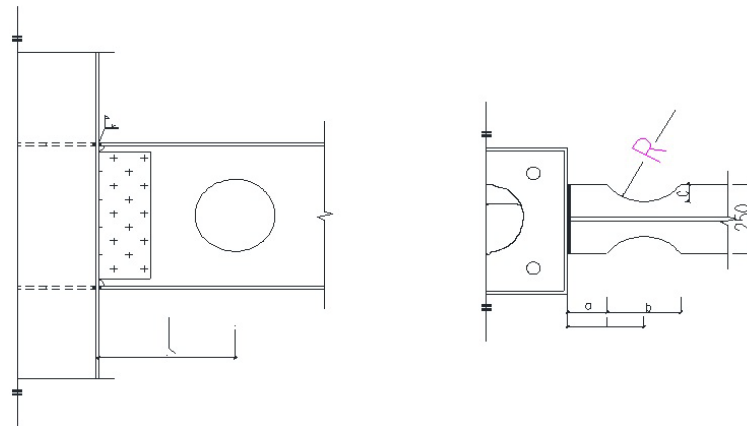


Figure 8. Reduced joint
图 8. 削弱型节点

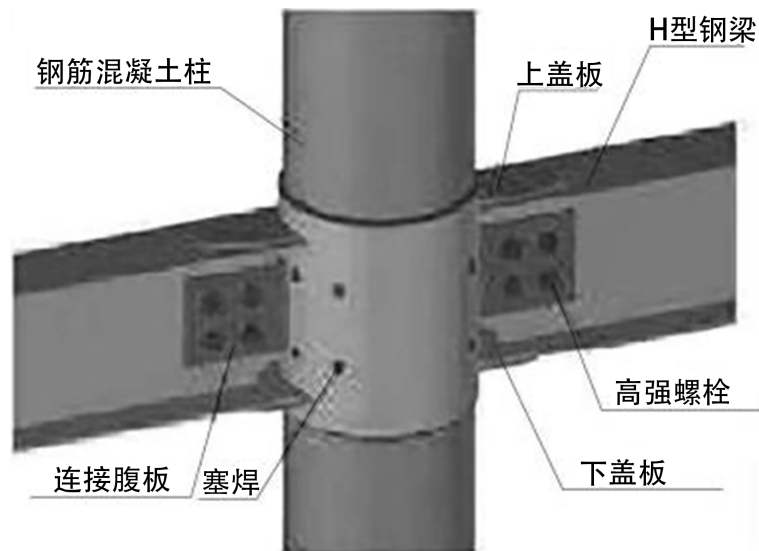


Figure 9. The joint of steel sleeve
图 9. 钢套筒式节点

6、套筒式节点

随着装配式住宅的新概念与新体系的成熟，现在越来越多的装配式节点油然而生，除了传统的高强螺栓连接，现在又出来一种钢套筒节点。

套筒式节点又分为外套筒式、分离式外套筒、内套筒-T型件梁柱节点、用于冷弯方钢管-H钢梁的外套筒式节点，如图9所示。张莉若对环板式节点和套筒式节点进行了受力性能试验对比，得出它俩的极限受弯承载力能满足设计要求，在相同试件尺寸和轴压比的情况下抗震能力相当[39]。

李孛生对纯钢管柱-H型钢梁分离式外套筒式节点进行了有限元建模分析，得出外套筒的厚度与高度的增大可以提高节点的刚度、极限承载力、滞回性能、延性性能和耗能能力；轴压比的增加使节点的刚度和承载能力稍有下降，对抗震性能基本没有影响[40]。张茗伟在对装配式钢管内套筒-T型件梁柱连接节点力学性能的分析中，提出内套筒的厚度与长度、T型件腹板厚度对节点的刚度与力学性能及构件破坏形态的影响，并通过实例分析指出该节点不适用于超高层建筑和抗震等级较高地区的建筑[41]。

潘秀珍运用 ANSYS 有限元软件，深入分析了方钢管柱轻钢住宅结构的外套筒式连接节点在水平往

复荷载作用下的抗震性能,并研究了套筒厚度对其抗震性能的影响——套筒厚度的增大能提高节点的强度、刚度及延性,但建议套筒厚度不应小于柱的壁厚,也不宜超过2倍柱壁厚;同时通过侧板加强节点,以提高梁端抗弯和抗剪承载力,但建议侧板长度在 $(1/2\sim 3/4)$ 的范围内取值较为合理。总的来说,外套筒式节点用于轻钢住宅结构可以有效提高节点域的抗弯和抗剪承载力,具有较好的耗能能力[42]。

7、拼装式节点

拼装式节点包括上钢管柱、下钢管柱、钢套筒、高强螺栓、梁及加劲肋。在钢套筒与梁柱连接处预留螺栓孔洞,将加劲肋焊接到柱套筒节点域处,且将梁套筒、柱套筒焊接到一起如图10所示[43]。

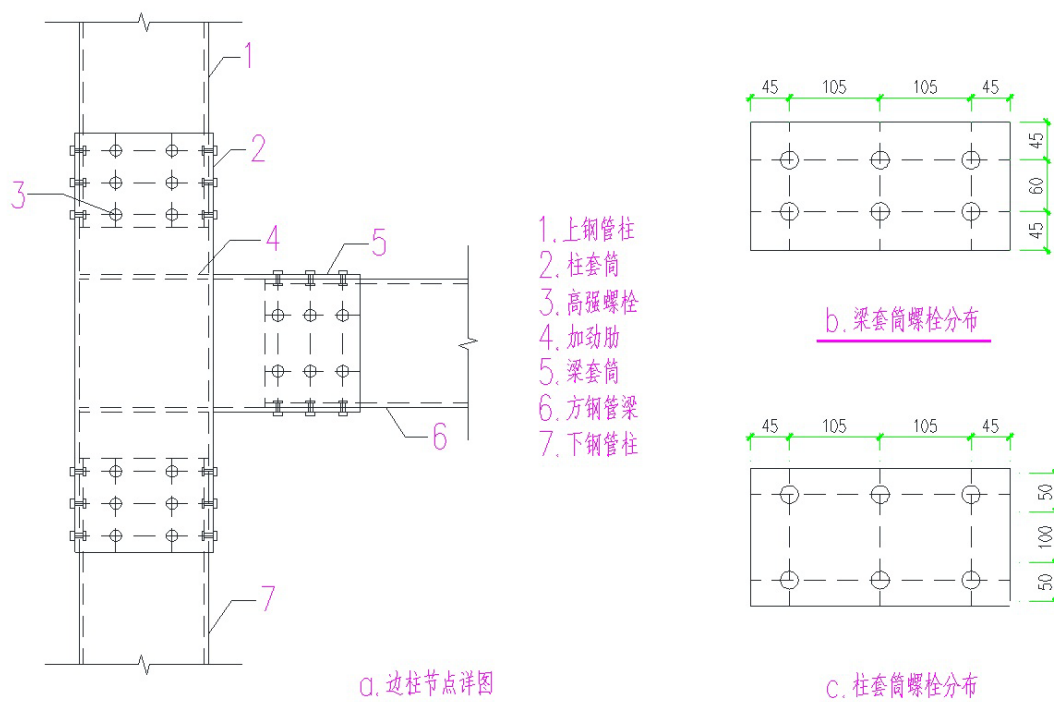


Figure 10. Structural details of steel sleeve joint
图 10. 钢套筒节点构造详图

济南大学的王倩对拼装式节点和纯钢式节点进行对比研究,指出拼装式节点可以满足“强节点弱构件”的要求,而且比纯钢节点的承载力高,初始刚度提高,等效粘滞阻尼系数增大,耗能能力好,抗震性能提高;并对套筒的厚度、梁的厚度、和套筒的长度对节点的力学性能的影响进行详细深入的研究。

8、自复位梁柱节点

自复位梁柱节点是由自复位体系和耗能体系构成,主要以后张预应力梁柱节点(post-tensioned steel connections)和形状记忆合金梁柱节点为主,后张预应力梁柱节点在构造上一般需要预应力筋和预应力钢绞线沿梁通长布置,对其施加预张力并锚固于柱端,以实现梁柱整体连接[44]。

基于不同的材料运用,不同的学者分别对自复位梁柱节点进行了细致的研究,出现了以栓焊形式为基础的马氏体梁柱节点,超弹性 SMA 杆梁柱节点,增加矩形钢管的超弹性 SMA 梁柱节点,超弹性 SMA 螺栓端板梁柱连接节点,高强螺栓和 SMA 螺栓端板梁柱连接节点,超弹性 SMA 杆、角钢和延伸钢板进行圆管钢柱和 H 型钢梁的连接,为了进一步提高 SMA 杆在自复位梁柱节点的稳定耗能能力,刚开始是使用黄铜作为摩擦材料[45],由于其噪音大易划痕,又提出一种带 SMA 杆和非石棉(NAO)摩擦耗能器的自复位梁柱节点(NAO-SMA-SC),不仅使节点的抗弯能力和耗能能力提高,而且通过对 SMA 杆施加预应

变,有效解决传统梁柱节点震后残余变形较大的问题[46]。

9、端板式连接节点

端板式连接节点有穿芯高强螺栓端板式和单边螺栓端板式连接节点,都属于半刚性连接节点。近些年对穿芯螺栓端板式连接节点较多,Ricle 等学者对穿芯高强螺栓节点进行了拟静力试验研究,得出该节点具有良好的强度、刚度、延性性能,在加载过程中,对节点域形成的受压短柱可以有效提高穿芯高强螺栓节点的抗剪承载力[47]。

France 等学者做了 26 个单边螺栓端板连接节点的单调加载试验分析,得出了单边螺栓部分端板、平齐端板、外伸端板式节点的力学性能与破坏模式[48];韩林海等人在 2009 年对单边螺栓连接的钢管混凝土柱与钢梁连接节点进行了试验研究,得出单边螺栓节点刚度较小,在往复荷载作用下得到的滞回曲线出现了严重的捏拢现象,导致节点域钢管柱壁在受拉作用下容易发生向外鼓出的变形,从而对整体结构的稳定性产生影响[49]。王先铁在 2014 年通过对三榀采用穿芯高强螺栓端板式节点的方钢管混凝土-钢梁的拟静力试验分析,得出采用该节点的框架结构具有良好的耗能能力[50]。

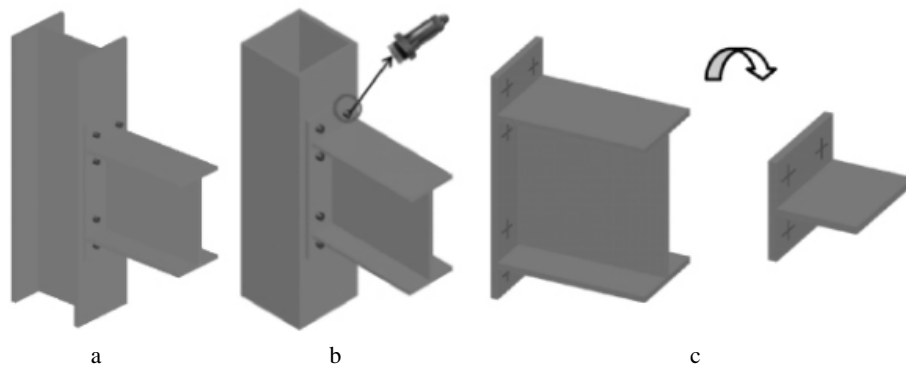


Figure 11. The joint of beam-column high strength bolts

图 11. 梁柱高强螺栓节点

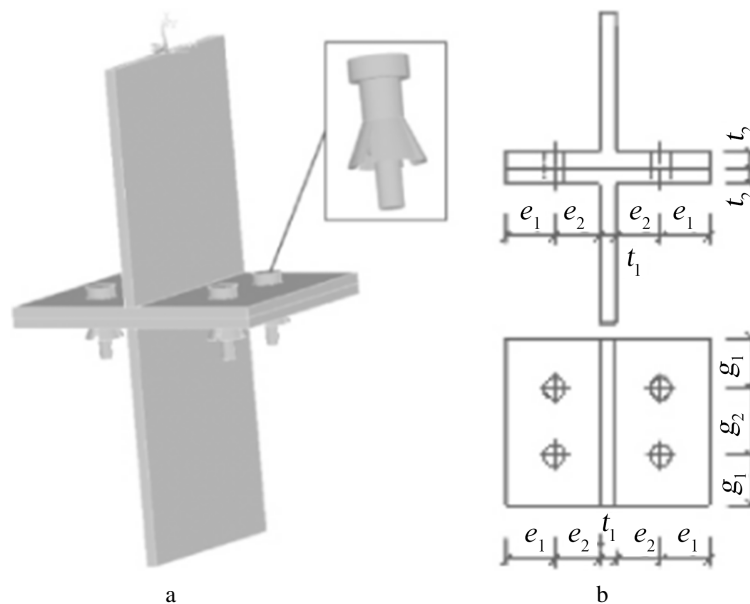


Figure 12. T-type connection joint

图 12. T 型件连接节点

10、自锁式高强螺栓节点

高强螺栓连接是装配式钢结构梁柱节点最常用的连接形式，对于如图 11 所示的矩形截面柱与 H 型钢梁采用高强度螺栓连接时需要开安装手孔后方能实现连接[51]。自锁式高强螺栓起源于 20 世纪 90 年代的英国。安装时需用扳手夹住垫片，使用扭矩扳手拧紧螺栓头直至达到安装扭矩值。拧紧过程中，锥形螺母自动旋紧并撑开螺栓外套管分枝，沿螺栓孔环向卡住连接件以实现紧固完成安装。自锁式高强螺栓破坏模式为外套管分枝发生挤压剪切破坏；高强螺栓破坏模式为螺杆伸长颈缩拉断破坏[52]。自锁式高强螺栓 T 型件连接节点与高强螺栓 T 型件连接节点二者的抗拉承载力基本相同。如图 12 所示。

3.3. 带斜撑的钢管柱 - 桁架梁的节点

在钢管柱 - 桁架梁框架体系中通过斜撑的设置，很大程度地提高了钢管柱与桁架梁拼接节点的刚度和承载力，北京工业大学张爱林老师研究了斜撑对装配式钢框架梁柱节点的滞回性能、极限承载力、延性系数、破坏模式等抗震性能的影响[53]。

3.3.1. 焊接节点

焊接节点的承载力最高，延性性能较好，焊接节点的延性系数为 7。塑性变形发生在梁端，没有实现“强柱弱梁”：其中一种为焊接不带支撑节点。通过再上下柱端部施加固定支座的边界条件[54] [55]，将高强螺栓预紧力进行等效转换，加载点处建立刚体垫块和刚体传力构件进行有限元分析，这种节点的应力分布比较均匀，使得构件具有较高的利用率。它的破坏特征是在桁架梁端的第一根腹杆首先严重屈曲，然后引起节点破坏，破坏位置主要集中在梁端；另一种为焊接带斜撑节点。加斜撑后，焊接节点的承载力提高约 50%，延性系数提高约 70%，它的破坏特征是位于支撑之外的桁架梁翼缘槽钢发生屈曲，同时腹杆角钢也发生局部屈曲引起节点产生失效[56]。

3.3.2. 螺栓连接节点

栓接节点的承载能力和耗能能力次之，栓接节点的延性系数为 5：其中一种为栓接不带斜撑节点，它的破坏特征是首先是位于桁架梁端部的上翼缘达到屈服，随着梁端荷载的不断增大，这时候采用高强螺栓连接的桁架梁端的上翼缘弦杆与柱座分离，导致节点随之破坏；另一种为栓接带斜撑节点。对于螺栓型连接的梁柱节点，斜撑的设置使其承载力提高 3 倍多。它的破坏形态是在加斜撑的基础上，破坏位置不集中在梁端，而是位于支撑之外的桁架梁翼缘槽钢发生屈曲，同时腹杆角钢发生局部屈曲而破坏，与焊接带斜撑节点的破坏形态颇为相似[53]。

3.3.3. 栓焊连接节点

栓焊节点的极限承载力最低，是由于桁架梁一部分与柱座焊接，一部分与柱座通过盖板栓接，这两部分凉的刚度会有所不同导致传力会在很大程度上的不均匀，从而在加载点一端发生一定的平面外扭转，承载力很快下降，但它的耗能能力较强。栓焊节点的延性系数为 7，可以看出这三种节点的延性性能都比较强[57]。

3.4. 其他节点

3.4.1. 蝶形节点

装配式蝶形节点一般由四对蝶形卡、和摩擦抗剪板两部分组成，如图 13 所示。蝶形卡可通过预紧产生对摩擦抗剪板的预压力，同时具有与建筑钢框架结构横梁 H 型钢的翼板相连接的功能，承担节点的抗弯、抗拉和部分抗剪；摩擦抗剪板的内侧为摩擦面与柱体相配合，在蝶形卡的预压力下与柱体的节点部位形成过盈连接。摩擦抗剪板的外侧设有与钢框架结构横梁 H 型钢的腹板相连接的连接板，承担节点的部分抗剪。

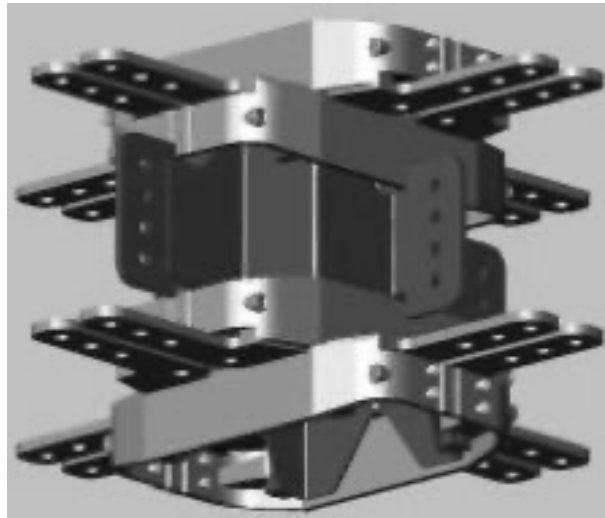


Figure 13. Butterfly-type joint
图 13. 蝶形节点

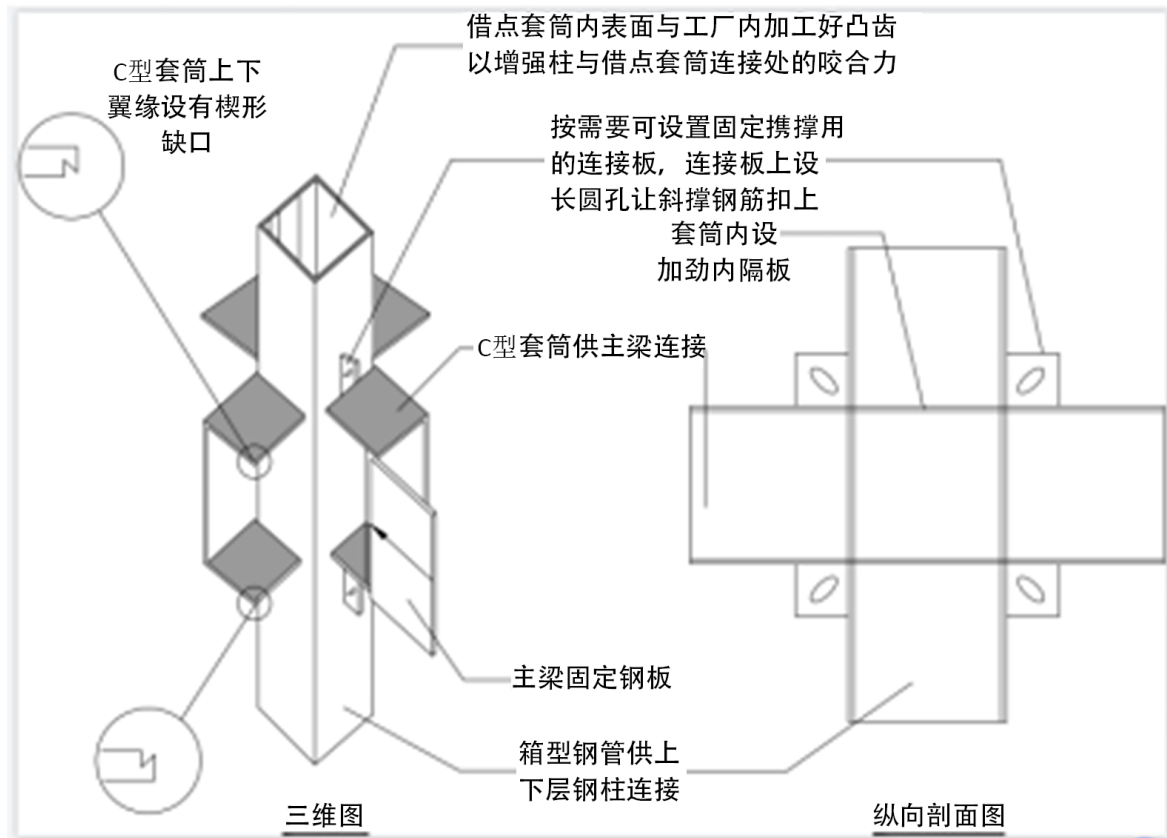


Figure 14. The sleeve of beam-column joint
图 14. 梁柱连接节点套筒

3.4.2. 卯榫节点

卯榫节点是一种让钢结构住宅的主体构件在施工时完全不需要采用高强螺栓和焊接连接的新型装配式节点。

采用和卯榫形式相似的梁柱连接套筒来连接上层柱和下层柱，还用来连接柱和主梁；采用和燕尾榫形式相同的的的梁柱连接套筒来连接主梁与次梁；所采用的连接套筒全部都需要在工厂预先进行预制。套筒各组件尺寸更小如图 14 所示，重量轻，不仅在工厂可以精确加工，而且可以大批量加工，方便运输和安装，不会在运输和安装过程中发生过大的破损变形；柱、主梁和梁的加工过程大大简化；进行现场安装，全面实现主体结构无栓无焊装配式连接，减少安装工序、缩短安装时间、确保施工质量；减少对高昂的人工技术的需求；提高了对钢构件和连接套筒的标准化模块化生产技能、实现了整体模块化设计、工厂化生产、专业化安装，达到稳定可靠的连接安装性能，形成简单高效地现场装配化流水线施工程序，施工速度快，施工效率高，施工成本低[58]。

3.5. 对比各类节点

通过上述节点的研究内容，经过一些调查与研究，对各类节点进行了优缺点及工程应用的详细对比，见下表 1。

Table 1. The comparison of diverse joints

表 1. 各类节点的对比

梁柱节点类型	优点	不足	工程应用
“Websteel”体系中的改进螺栓节点	延缓了柱的外凸，减少其变形量；增加了节点刚度，大大提高了结构的承载能力。	1. 降低了结构的延性； 2. 耗能能力有所不满足要求。	该节点已经用于齐齐哈尔市建造一栋 6 层教学楼的梁柱节点。
外套管式	1. 保护节点域钢管柱壁防止变形；2. 减小端板变形，保证节点域不发生较大的剪切变形；3. 保证节点破坏在梁端；4. 提高节点的初始刚度和承载力。	1. 外套管式节点属于半刚性节点，采用该节点的结构整体侧移会加大； 2. 框架剪力墙结构比较适宜于配合外套管式节点；侧移增加幅度较小。	推导钢管柱与梁平面框架荷载-侧移的恢复力模型，并进行动力时程分析。浙江东南网架股份有限公司的横向项目。
外环板式	设计简便、受力合理，承载力高，耗能能力强，无管内施工。	1. 环板尺寸大，出现凸角，尤其是对于截面较小的钢管混凝土不便于建筑物装饰； 2. 用钢需求大，刚度太大而会导致脆性破坏。	保持柱贯通条件下对内隔板形式的一种替代方法。
外肋环板式	在外隔板式节点基础上，将其外部两侧的加强板改为平行于柱侧的竖向板及其它适当改造。	1. 用钢量； 2. 焊缝种类多，焊接量大，肋板焊接处容易破坏； 3. 施工工艺复杂，工期长。	用于钢管边长尺寸有限的低层或多层住宅。
外套板式	预先将套板焊接于柱侧，施工现场不需要焊接，抗震性能好，良好的延性。	1. 试验理论分析不足； 2. 在高烈度区需采用有抗剪腹板连接的节点形式。	在多层钢框架、高层结构及框架核心筒中应用，北京水利基础总队住宅、武汉黄金口岸经济适用房，都江堰幸福家园住宅小区等。
内隔板式	可用于钢管直径较大的建筑结构，承载力高。	1. 隔板的存在使混凝土浇筑不便，容易形成钢管受力不均匀，承载力降低； 2. 钢梁直接焊接于柱壁，内部进行焊接，焊缝应力集中，焊缝多导致节点的脆性破坏，影响了结构的稳定性，焊接技术含量高，成本高。	受钢管柱边长的限制，在钢结构住宅中应用少。

Continued

贯穿型隔板节点	钢梁贯通式钢梁向核心混凝土传力,减小钢梁与柱壁的应力集中,抗震性能较优。	1. 焊缝容易开裂; 2. 抗震性能差; 3. 施工构造复杂,有一定的困难。	同济大学陈以一教授对其进行了改善,在隔板附近将柱断开。
贯穿(穿心)螺栓连接(穿心螺栓端板)	承载力高,抗震性能优越。	1. 施工复杂; 2. 受钢管截面类型限制。	西安建筑大学王先铁老师提出了穿心高强螺栓——端板节点。
单边螺栓钢管混凝土柱节点	具有较好的承载能力和抗震性能。	内置在钢管内的螺栓缺少与混凝土的锚固,节点域内的钢管柱壁由于受到螺栓的拉力作用会发生明显的外凸变形; 1. 这不仅降低了节点的承载能力, 2. 而且钢管柱壁的破坏将加速整体结构破坏	广州大学刘坚老师提出了新型外套管式钢管混凝土柱——钢梁单边螺栓端板连接节点,节点域钢管柱壁不会发生较大的外凸变形,避免导致整个节点连接处损坏。
带短梁的内隔板式节点	减少现场施工作业量,安装难度低。	1. 运输不便; 2. 短梁易产生局部屈曲,影响结构的整体稳定性。	解决了内隔板节点施焊困难、混凝土浇筑质量降低的问题。
削弱型节点——RBS削弱梁端梁腹板削弱型梁柱节点	有效地将梁端塑性较外移到梁截面的削弱区域内,降低梁端焊缝及热影响区内的应力集度,起到了保险丝的作用,也避免了梁翼缘的局部屈曲,梁腹板的峰值剪应力外移到削弱区。	1. 削弱区域附近的应力集中现象显著; 2. 焊缝施工质量不容易控制; 3. 抗弯承载力降低; 4. 降低了梁柱节点的整体刚度。	工程中采用此类节点应合理地选择腹板开孔位置与大小,腹板开孔的构造在梁上合理控制塑性铰位置,在增大变形的同时承载力降低不多。
梁端翼缘扩大型梁柱	很好的能量耗散能力和很好的刚度。	1. 增加用钢量; 2. 加大了焊缝长度。	不影响建筑物的美观和净空高度;可以在加工厂制作,也可以现场进行焊接;对节点加工工艺的复杂程度和现场施工难度影响小。
套筒式节点	具有更好的初始刚度和抗弯承载能力,易于满足住宅建筑的某些要求,且布置灵活。	1. 壁厚的控制; 2. 施工中套筒两端与柱壁的焊接质量不好控制。	可在多层或小高层钢结构住宅建筑中应用。
拼装式节点	比纯钢节点的承载力高,初始刚度提高,等效粘滞阻尼系数增大,耗能能力好,抗震性能提高。	1. 整体性能会降低; 2. 与梁柱的安装要求会考虑多一些。	现场施工简便,周期短,是一种环保的绿色节点。
自复位节点	高耗能。	在此基础上,耗能器材料性能还需要进一步改进和 SMA 的自复位性能更加匹配。	用于地震灾害严重的西部或西南地区抗弯钢框架体系。
自锁式高强螺栓节点	单边拧紧、施工方便。	抗拉承载力还需进一步提高。	应用不太广泛。
蝶形节点	保持弹性,满足“强节点、弱杆件”的结构抗震要求。	异型节点应用比较有限。	用于 CCTV 新台址、武汉绿地中心主塔楼。

Continued

卯榫节点	无栓无焊装配连接, 抗震性能良好, 降低造价, 施工速度快。	1. 连接繁琐, 进一步进行简化; 2. 需要加强防火和防腐蚀。	适用于住宅、办公楼、学校、医院或酒店等用途的多层和小高层建筑。
斜支撑钢框架梁柱节点	斜撑的设置有效地转移了塑性铰, 使节点破坏位置位于斜撑之外的桁架梁上, 起到保护节点的作用, 符合“强节点, 弱构件”的设计要求, 同时具有更好的抗震性能。	1. 延性稍有降低; 2. 腹杆与桁架弦杆的节点处会产生局部应力; 3. 桁架腹杆薄壁开口处会在局部应力。	适用于多高层建筑, 为减小该节点体系的罕遇地震下的层间位移角, 在结构楼层布置粘滞阻尼器, 达到很好的耗能减震效果。

4. 展望

随着节点装配化的需求越来越多, 也越来越高, 国内外专家学者也在竭力创新出更有代表性、适用性、更接近绿色建筑标准的新型节点, 能适应更多的新型结构体系, 改善了结构的抗震性能、防火性能和耐久性, 适应绿色建筑的装配化要求, 改进后的节点都受力明确、构造简单、施工便捷, 加快工期, 很有利地推动了钢结构住宅产业化发展。

参考文献

- [1] 张建新, 刘雁, 环志中. 国外钢结构住宅的发展历史浅析[J]. 钢结构, 2005, 20(4): 5-7, 14.
- [2] 马飞鹤. 高层钢结构住宅标准构件库和节点库的开发[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [3] 王燕, 彭福明, 赵桂明. 钢框架梁柱半刚性节点在循环荷载作用下的试验研究[J]. 钢结构, 2004, 31(12): 55-57.
- [4] 中华人民共和国建设部. 国家建筑钢结构产业“十五”计划和 2020 年发展规划纲要[S]. 2015.
- [5] 住房和城乡建设部. 绿色建筑行动方案[S]. 2013.
- [6] 张爱林. 工业化装配式高层钢结构体系创新、标准规范编制及产业化关键问题[J]. 工业建筑, 2014, 44(8): 1-6.
- [7] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[z]. 2016.
- [8] 张守峰. 钢结构住宅的技术体系与发展趋势[J]. 建筑, 2021(1): 21-25
- [9] 埃斯科·米耶蒂, 宁瑞斯托·萨尔尼. 钢结构住宅[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004: 48-67.
- [10] 住房和城乡建设部科技与产业化发展中心(住房和城乡建设部住宅产业化促进中心). 中国装配式建筑发展报告 2017 版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [11] 王伟, 陈以一, 余亚超, 等. 分层装配式支撑钢结构工业化建筑体系[J]. 建筑结构, 2012, 42(10): 48-52.
- [12] 刘大伟, 王伟, 马场峰雄, 余亚超, 陈以一, 杨建行. 新型支撑研制与性能试验[J]. 建筑结构, 2012, 42(10): 57-60.
- [13] 陈志华. 钢结构和组合结构异形柱[J]. 钢结构, 2006, 21(2): 27-29.
- [14] 周绪红, 等. 新型交错桁架结构体系的应用[J]. 钢结构, 2000, 15(48): 16-18.
- [15] 陈坚. 新型轻钢龙骨体系梁-柱节点试验性研究及有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [16] 陆国威, 陈坚. Websteel 梁柱节点的改进方案试验研究[J]. 工程设计与建设, 2005, 37(6): 9-12.
- [17] Ansourian, P. (1974) Rigid-Frame Connection to Concrete-Filled Tubular Steel Column. CRIF, MT, 86.
- [18] Alostaz, Y.M. and Schneider, S.P. (1996) Analytical Behavior of Connections to Concrete-Filled Steel Tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, **40**, 95-127. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(96\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(96)00047-8)
- [19] 李文斌, 高长喜. 多高层钢结构住宅体系的设计与施工[C]//第二届全国建筑结构技术交流会. 第二届全国建筑结构技术交流会论文集. 上海: 中国土木工程学会中国建筑结构设计研究院, 2009: 414-418.
- [20] 蔡益燕. 钢框架梁柱连接的贯通式隔板[J]. 建筑结构, 2006(3): 6-7.
- [21] Schneider, S.P. and Alostaz, Y.M. (1998) Experimental Behavior Connections to Concrete-Filled Steel Tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, **45**, 321-352. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(97\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(97)00071-0)

- [22] Elremaily, A. and Azizinamini, A. (2001) Design Provisions for Connections between Steel Beams and Concrete Filled Tube Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, **57**, 971-995. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00016-5)
- [23] Azizinamini, A. and Schneider, S.P. (2004) Moment Connections to Circular Concrete-Filled Steel Tube Columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **130**, 213-222. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:2\(213\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(213))
- [24] 陈以一, 李刚, 庄磊, 黄明鑫, 李洁. H 形钢梁与钢管柱隔板贯通式连接节点抗震性能试验[J]. *建筑钢结构进展*, 2006, 8(1): 23-30.
- [25] American Institute of Steel Construction (1999) Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings. Chicago.
- [26] Bjorhovde, R., Colson, A. and Brozzetti, J. (1990) Classification System for Beam-to-Column Connections. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **116**, 3059-3076. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:11\(3059\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:11(3059))
- [27] 游经团, 陈国栋, 韩林海. 外环板式钢管混凝土节点环板尺寸的初步探讨[C]//中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会第十次年会. 中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会第十次年会论文集. 成都: 中国钢结构协会, 2005: 354-357.
- [28] 陈星. 外环板式梁柱节点受力机理分析与设计方法[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2008.
- [29] 别雪梦, 李召, 管文强, 等. 方钢管混凝土柱-钢梁外环板式节点抗剪性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(1): 226-237.
- [30] 王来, 王铁成, 陈倩. 低周反复荷载下方钢管混凝土框架抗震性能的试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(3): 113-117.
- [31] 王来. 方钢管混凝土框架抗震性能的试验与理论研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2005.
- [32] 陈辉. 内隔板方钢管混凝土-钢梁节点受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [33] 李黎明, 陈志华. 方钢管混凝土内隔板节点试验研究[C]//第四届全国现代结构工程学术研讨会. 第四届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 宁波: 中国钢结构协会中国建筑金属结构协会, 2004: 943-953.
- [34] 周天华, 聂少锋, 卢林枫, 何保康. 带内隔板的方钢管混凝土柱-钢梁节点设计研究[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(5): 23-29.
- [35] 周天华. 方钢管混凝土柱-钢梁框架节点抗震性能及承载力研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [36] 王秀梅. 栓焊连接的方钢管混凝土柱——削弱钢梁框架节点受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2007.
- [37] 吴文平, 黄炳生. 方钢管混凝土柱——钢梁狗骨式节点有限元分析[J]. *钢结构*, 2009, 24(5): 24-27, 70.
- [38] 郭彦利, 姚行友. 钢管混凝土柱——削弱钢梁节点受力性能研究[J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(1): 28-34.
- [39] 张莉若, 汤中发, 王明贵. 套筒式钢管混凝土梁柱节点试验研究[J]. *建筑结构*, 2005, 35(8): 73-75.
- [40] 李孛生. 新型分离式外套筒钢管柱-H 型钢梁框架节点有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [41] 张茗伟. 装配式钢管内套筒-T 型件梁柱连接节点力学性能分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [42] 潘秀珍, 马俊, 杨水成, 刘辉, 张鹏, 田建勃. 外套筒式节点用于轻钢住宅的抗震性能分析[J]. *西安理工大学学报*, 2019, 35(1): 7-16.
- [43] 王倩. 钢结构拼装式节点的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2017.
- [44] 李灿军. 带 SMA 杆的自复位梁柱节点性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [45] Lin, Y.C., Sause, R. and Ricles, J.M. (2013) Seismic Performance of Steel Self-Centering Moment-Resisting Frame: Hybrid Simulations under Design Basis Earthquake. *Journal of Structural Engineering*, **139**, 1823-1832. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000745](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000745)
- [46] 李灿军, 周臻, 谢钦. 摩擦耗能型 SMA 杆自复位梁柱节点滞回性能分析[J]. *工程力学*, 2018, 35(4): 115-123.
- [47] Ricle, J.M., Lu, L.W. and Graham, W. (1996) Seismic Performance of CFT Column-WF Beam Rigid Connections. *Proceeding of the Third International Composite Construction Conference*, Vol. 1.
- [48] France, J.E., Davison, J.B. and Kirby, P.A. (1999) Strength and Rotational Stiffness of Simple Connections to Tubular Columns Using Flowdrill Connectors. *Journal of Constructional Steel Research*, **50**, 15-34. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00236-3](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00236-3)

-
- [49] 韩林海, 陶忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [50] 王先铁, 周超, 等. 方钢管混凝土平面框架的恢复力模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(5): 94-99.
- [51] 李德山, 陶忠, 王志滨. 钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓连接节点静力性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(3): 43-49.
- [52] 柴文娟, 王燕, 杨帆. 自锁式高强螺栓 T 型件连接节点力学性能研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(3): 176-183.
- [53] 张爱林, 惠怡, 刘学春. 斜撑对装配式钢框架梁柱拼接节点抗震性能影响研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(8): 35-38.
- [54] 沈国辉, 孙炳楠, 楼文娟, 等. 大型钢结构节点承载力的有限元分析[J]. 土木建筑工程信息技术, 2013, 5(30): 32-36.
- [55] 刘晓辉, 刘增科, 韩毅. 半刚性端板连接节点有限元模拟分析[J]. 山西建筑, 2008, 34(1): 78-79.
- [56] 刘学春, 徐阿新, 倪真, 张爱林. 模块化装配式钢结构梁柱节点极限承载力分析与抗震性能研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(8): 23-60.
- [57] 杨尉彪, 高小旺, 张维, 等. 高层建筑钢结构梁柱节点试验研究[J]. 建筑结构, 2001, 31(8): 3-8.
- [58] 喻德明, 吕文杰, 江锦正. 一种新型装配式钢结构体系的提案[C]//2017 年全国建筑钢结构行业大会. 2017 年全国建筑钢结构行业大会论文集. 2017: 61-74.