

不锈钢环槽铆钉连接的金属结构研究进展

支新航¹, 王元清^{1*}, 王中兴², 张 钦³

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;
3. 眉山中车紧固件科技有限公司, 四川 眉山 620010)

摘要: 不锈钢环槽铆钉具有耐腐蚀性能好、安装方便快捷、不发生咬扣、防松动性能优良、疲劳寿命优异等优点, 目前已在轨道交通、桥梁结构等领域得到广泛应用。为进一步推广其在结构工程领域, 尤其是具有耐腐蚀要求的工程(如铝合金结构、不锈钢结构等)中的应用, 相关学者与研究单位从产品端与应用端两大方面对不锈钢环槽铆钉连接的结构开展了一系列基础研究工作。文中调研了不锈钢环槽铆钉的工程应用情况, 针对不锈钢环槽铆钉本身, 以及由该铆钉连接形成的金属结构这两个维度, 系统梳理了国内外学者的相关研究进展, 并在此基础上进行了详细综述, 包括奥氏体不锈钢环槽铆钉与沉淀硬化不锈钢环槽铆钉的力学性能、不锈钢环槽铆钉的简化有限元分析模型、不锈钢环槽铆钉的受剪连接、T形连接、节点以及体系的基本力学性能与设计方法。本综述可为进一步推进不锈钢环槽铆钉连接金属结构的研究、设计与应用实践提供有益参考。

关键词: 不锈钢环槽铆钉; 连接节点; 铝合金结构; 奥氏体不锈钢; 沉淀硬化不锈钢; 有限元分析; 设计方法

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)11-0001-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240604001

Research Advances of Metal Structures Connected by Stainless Steel Swage-Locking Pins

ZHI Xinhang¹, WANG Yuanqing^{1*}, WANG Zhongxing², ZHANG Qin³

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Meishan CRRC Fastening System Co., Ltd., Meishan 620010, China)

*Corresponding author: wang-yq@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: Stainless steel swage-locking pins (also known as swage-lock rivets or huckbolts) offer a unique combination of corrosion resistance, rapid and tool-free installation, absence of thread galling, superior anti-loosening performance and outstanding fatigue life. These advantages have already made them the choice of fastener in rail way and bridge structures. To extend their use to wider structural engineering applications, especially those that demand high corrosion resistance such as aluminium-alloy or stainless-steel structures, researchers have conducted systematic investigations from both the product and the application perspectives. This paper first investigates the current applications of stainless-steel swage-locking pins and then presents a comprehensive review of published studies, covering both the fasteners themselves and the metal structures they connect. The review includes the mechanical properties of austenitic stainless steel and precipitation hardening stainless steel swage-locking pins, the simplified finite element models of stainless steel

收稿日期: 2024-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(52178146)

作者简介:

支新航(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事铝合金结构方面的研究。E-mail: zhixh20@mail.tsinghua.edu.cn。

通信作者:

王元清(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事高性能钢材钢结构应用技术及钢结构的断裂、疲劳与损伤方面的研究。

E-mail: wang-yq@mail.tsinghua.edu.cn。

swage-locking pins, the basic mechanical properties and design methods of shear connections, T-stubs, joints and structures connected by stainless steel swage-locking pins. This paper provides a reference for the further research, design and application of metal structures connected by stainless steel swage-locking pins.

Keywords: stainless steel swage-locking pin; connection joint; aluminum alloy structure; austenitic stainless steel; precipitation hardening stainless steel; finite element analysis; design method

环槽铆钉,又名哈克铆钉(根据其第一代发明人 Louis C. Huck 命名),是由带环状凹槽的钉杆和套环组成的机械连接紧固件。其工作原理为:通过专用设备同步拉动钉杆、推挤套环,使得套环发生塑性变形并嵌入钉杆上的环状凹槽,从而在套环与钉杆之间形成紧密的连接,产生永久性的预紧力,紧固过程如图 1 所示。相较于高强度螺栓,环槽铆钉的铆接工具操作简单、施加预紧力方便且施工速度快,同时还具有优异的防松动和抗疲劳性能^[2]。

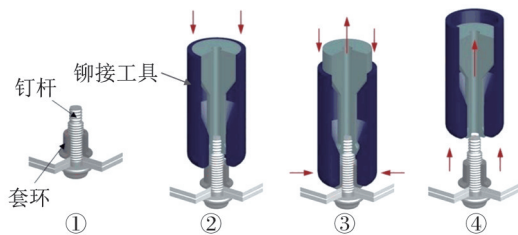


图 1 环槽铆钉紧固过程^[1]

Fig. 1 Tightening process of swage-locking pins^[1]

环槽铆钉诞生于第二次世界大战这个特殊时期,当时 Louis C. Huck 为解决传统螺栓的螺母在频繁冲击和振动的服役环境下容易产生松动的问题,发明了第一代环槽铆钉。此后,这种铆钉逐渐在全球范围内得到了广泛应用。我国自 20 世纪 80 年代在航空领域引入环槽铆钉,在 20 世纪 90 年代起将其大量应用在轨道交通装备中,并在此基础上逐步开展国产化研究。如今环槽铆钉已被广泛应用于航空航天、轨道交通、车辆船舶、矿山机械等领域中。2018 年 12 月,国家颁布了环槽铆钉的国家标准《环槽铆钉连接副 技术条件》(GB/T 36993—2018)^[3]。常用的环槽铆钉主要有拉断型、短尾型和单面型三种,如图 2 所示。



图 2 环槽铆钉类型

Fig. 2 Types of swage-locking pins

在土木工程领域,目前一些欧美国家已经开始在风电塔架结构中使用环槽铆钉连接技术,如图 3a)所示。国

内也正逐步将环槽铆钉连接技术推广应用于建筑结构,尤其是大跨空间结构中。代表性的工程项目如上海 G60 科创云廊(图 3b))、上海温室花园、雄安新区体育中心(图 3c))、常州文化活动中心等。



图 3 环槽铆钉的工程应用

Fig. 3 Engineering applications of swage-locking pins

然而,国内目前研究和使用的环槽铆钉大多为碳钢环槽铆钉,不宜用于铝合金结构及不锈钢结构中。随着市场的开拓,眉山中车紧固件科技有限公司在碳钢类环槽铆钉研发与生产的丰富经验基础上,逐步向研发不锈钢环槽铆钉的方向拓展,目前已研发生产了奥氏体不锈钢普通强度环槽铆钉(涵盖 M10、M12、M16、M20、M24 规格)与沉淀硬化不锈钢高强度环槽铆钉(涵盖 M12、M16、M20 三种规格)。所研发的不锈钢高强度环槽铆钉能够解决高强度不锈钢螺栓在工程使用中由于扭矩系数过大极易产生螺纹“咬死”的问题,可以很好地替代高强度不锈钢螺栓,并且该环槽铆钉目前已成功应用于江门中微子^[5]与锦屏中微子探测器^[6]支撑结构中,如图 4 所示。中微子探测器支撑结构为全不锈钢结构,其节点连接要求使用低放射性、低磁性、无杂质污染的高强度不锈钢紧固件,而沉淀硬化不锈钢高强度环槽铆钉能够很好地满足以上要求。

不锈钢环槽铆钉作为一种新型紧固件,凭借优异的力学性能与耐腐蚀特性受到了工程界的广泛关注,尤其是沉淀硬化型不锈钢高强度环槽铆钉的成功研发,使其

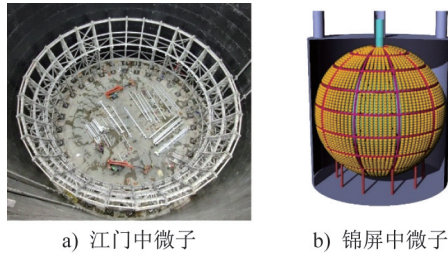


图 4 中微子探测器支撑结构

Fig. 4 Supporting structures of neutrino detector

在结构工程中的应用得到了拓展。目前国内外关于不锈钢环槽铆钉连接的研究尚处于探索起步阶段,本文对国内外的相关研究进行全面综述,为不锈钢环槽铆钉在结构工程领域中进一步的科学研究与工程应用提供参考。

1 不锈钢环槽铆钉的力学性能

1.1 奥氏体不锈钢普通强度环槽铆钉

眉山中车紧固件科技有限公司所研发的奥氏体不锈钢普通强度环槽铆钉性能对标 A2-70 等级不锈钢螺纹紧固件。铆钉的钉杆采用 S316 不锈钢,材料实测平均力学性能指标如表 1 所示,其中 $f_{0.2}$ 为名义屈服强度, f_u 为抗拉强度, A 为断后延伸率, Z 为断面收缩率。试验结果满足《紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱》(GB/T 3098.6—2023)^[7] 中对 A2-70 等级不锈钢螺纹紧固件的要求。

表 1 奥氏体不锈钢环槽铆钉材料力学性能

Table 1 Material properties of austenitic stainless steel swage-locking pins

| 参数 | $f_{0.2}/\text{MPa}$ | f_u/MPa | $A/\%$ | $Z/\%$ |
|------|----------------------|------------------|--------|--------|
| 均值 | 577 | 721 | 54.4 | 74.9 |
| 变异系数 | 0.005 | 0.005 | 0.008 | 0.007 |

除钉杆材料力学性能外,眉山中车紧固件科技有限公司对 M10、M12、M16、M20 和 M24 五种规格的不锈钢环槽铆钉的抗拉承载力、抗剪承载力、预紧力以及预紧力松弛监测也开展了试验研究。实测结果如表 2 所示。该铆钉的预紧力、抗拉承载力和抗剪承载力不仅均大于设计值要求^[8],还优于同等规格 A2-70 等级不锈钢螺纹紧固件的相应值。

选取 M12 规格的不锈钢短尾环槽铆钉作为研究对象,套环为不锈钢材质,从施加多阶梯静态荷载下的预紧力变化监测和无外荷载的预紧力长期静态监测两方面对其开展了预紧力松弛试验。当施加与预紧力相同的轴向荷载且保持一定时间卸载后,铆钉的预紧力仅衰减了 6.6%;且铆钉预紧力在完成铆接后的 7 h 内趋于稳定,

表 2 奥氏体不锈钢环槽铆钉各项力学性能指标
Table 2 Mechanical properties of austenitic stainless steel swage-locking pins

| 规格 | 数值类型 | 预紧力/ kN | 抗拉承载力/ kN | 抗剪承载力/ kN |
|-----|------|------------|--------------|--------------|
| M10 | 实测值 | 21.7 | 44.5 | 37.6 |
| | 设计值 | 17.4 | 27.1 | 35.4 |
| M12 | 实测值 | 37.1 | 76.3 | 67.4 |
| | 设计值 | 24.7 | 75.0 | 54.3 |
| M16 | 实测值 | 50.8 | 135.5 | 126.0 |
| | 设计值 | 36.6 | 120 | 68.4 |
| M20 | 实测值 | 114.7 | 218.9 | 193.8 |
| | 设计值 | 57.4 | 178 | 107.3 |
| M24 | 实测值 | 146.5 | 276.7 | 242.4 |
| | 设计值 | 83.0 | 268.0 | 154.9 |

48 h 后预紧力衰减了 4.0%。此外,还开展了不锈钢短尾环槽铆钉的疲劳试验,试验方法与参数的计算参照 ISO 3800^[9] 和《螺纹紧固件轴向载荷疲劳试验方法》(GB/T 13682—1992)^[10],试验结果如表 3 所示,结果表明:不锈钢环槽铆钉在 2×10^6 疲劳寿命下的应力范围为 90 MPa,高于标准要求,表明其具有优异的疲劳性能。

表 3 奥氏体不锈钢环槽铆钉的疲劳寿命

Table 3 Fatigue life of austenitic stainless steel swage-locking pins

| 序号 | 应力幅/ MPa | 交变荷 载/kN | 最大荷 载/kN | 平均荷 载/kN | 循环次 数/万次 | 失效形式 |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| 1 | 83.0 | 7.6 | 36.6 | 29.0 | 17.05 | 帽头断裂 |
| | | | | | 13.90 | 帽头断裂 |
| 2 | 73.5 | 6.8 | 35.8 | 29.0 | 32.95 | 帽头断裂 |
| | | | | | 11.43 | 帽头断裂 |
| 3 | 64.0 | 5.9 | 34.9 | 29.0 | 75.95 | 帽头断裂 |
| | | | | | 22.36 | 帽头断裂 |
| 4 | 54.5 | 5.0 | 34.0 | 29.0 | 139.27 | 帽头断裂 |
| | | | | | 227.80 | 帽头断裂 |
| 5 | 45.0 | 4.1 | 33.1 | 29.0 | 349.46 | 帽头断裂 |
| | | | | | 410.53 | 帽头断裂 |
| 6 | 35.5 | 3.3 | 32.3 | 29.0 | 500.00 | 未失效 |
| | | | | | 500.00 | 未失效 |
| 7 | 26.0 | 2.4 | 31.4 | 29.0 | 500.00 | 未失效 |
| | | | | | 500.00 | 未失效 |

王中兴等^[11]设计了一套新型试验夹具,对9.66 mm直径规格普通强度不锈钢环槽铆钉(拉断型)开展了拉剪组合受力下的承载力试验研究^[12]。该铆钉由美国Huck公司生产,在工程中被普遍使用,其钉杆材质为S304HC不锈钢。试验中铆钉的破坏形态包括三种,如图5所示,分别是套环抗拉、套环抗拉与钉杆受剪协同破坏、钉杆剪断破坏(其中加载角度 θ_s 代表荷载方向与铆钉轴线方向的夹角)。基于试验结果提出了该种不锈钢环槽铆钉的承载力设计公式并总结了设计的一般步骤。

1.2 沉淀硬化不锈钢高强度环槽铆钉

不锈钢高强度环槽铆钉的钉杆材质为经热处理的沉淀硬化型不锈钢0Cr17Ni4Cu4Nb(S51740),套环由S304不锈钢表面喷涂聚四氟乙烯制成。ZHANG等^[13]对热处理前后的沉淀硬化型不锈钢钉杆进行了材性试验,将结果汇总于表4中,其中 E_0 为初始弹性模量, ϵ_u 为 f_u 对应的应变值,其余同表1。从结果可以看出,经过热

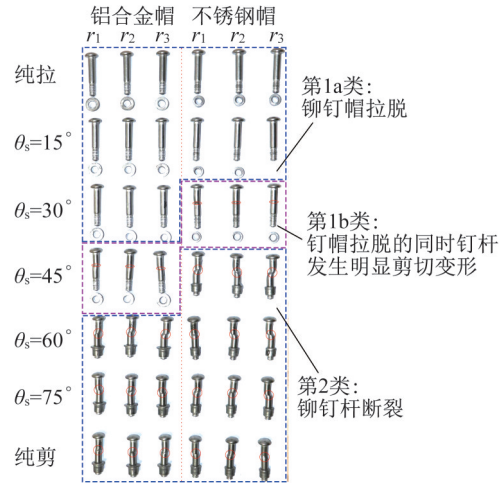


图5 环槽铆钉试验破坏形态汇总^[12]

Fig. 5 Failure modes of all tested swage-locking pins^[12]

处理后的沉淀硬化型不锈钢的屈服强度和抗拉强度均大于钢结构10.9级高强度螺栓的相应材料性能指标^[14]($f_{0.2}=940$ MPa, $f_u=1\ 040$ MPa)。

表4 沉淀硬化不锈钢环槽铆钉材料力学性能

Table 4 Material properties of precipitation hardening stainless steel swage-locking pins

| 处理方式 | 参数 | E_0 /GPa | $f_{0.2}$ /MPa | f_u /MPa | ϵ_u /% | A /% |
|-------|------|------------|----------------|------------|-----------------|--------|
| 未经热处理 | 均值 | 196 | 949 | 1 144 | 2.6 | 12.7 |
| | 变异系数 | 0.020 | 0.010 | 0.010 | 0.050 | 0.045 |
| 热处理 | 均值 | 197 | 1 000 | 1 190 | 4.3 | 16.5 |
| | 变异系数 | 0.035 | 0.019 | 0.008 | 0.034 | 0.014 |

张颖^[15]与张天雄等^[16]分别对M12和M20规格的不锈钢高强度环槽铆钉的预紧力、抗拉承载力、抗剪承载力进行了测量,试验结果可见表5。此外,张颖^[15]在试验中考虑了紧固板件不同的表面处理方式对预紧力大小的影响,结果表明:刻痕处理的预紧力离散性较为明显,相同情况下电弧喷涂处理的平均预紧力最小。张天雄等^[16]对比了两种套环尺寸、六种铆接工况(分别为热处理后的单板铆接、未热处理的单板铆接、双板铆接、三板铆接、双板带缝铆接及双板夹片铆接)对预紧力大小的影响。试验结果表明:通过增大套环尺寸可以有效提升铆钉的预紧力水平。同时,板间缝隙对预紧力的削弱作用最为明显,比常规铆接工况的平均预紧力降低13.2%。

表5 沉淀硬化不锈钢环槽铆钉力学性能指标

Table 5 Mechanical properties of precipitation hardening stainless steel swage-locking pins kN

| 规格 | 预紧力 | 抗拉承载力 | 抗剪承载力 |
|-----|-----|-------|-------|
| M12 | 65 | 126 | 108 |
| M20 | 206 | 367 | 265 |

张颖^[15]同样也监测了无外荷载状态下铆钉的预紧力松弛,基于长期(58 d)预紧力监测数据拟合,得到了时间对数-预紧力损失曲线,并预测了M12不锈钢高强度环槽铆钉50年预紧力损失值,得到该损失值小于同等条件下的不锈钢高强度螺栓的50年预紧力损失值。张天雄等^[16]对M20不锈钢高强度环槽铆钉的预紧力松弛进行了90 h监测,发现在铆接后90 h预紧力仅损失0.6%,短期内预紧力松弛幅度极小,可忽略不计。

为了得到不锈钢高强度环槽铆钉在拉剪组合作用下的承载力,张颖^[15]与张天雄等^[16]分别对M12和M20规格的不锈钢高强度环槽铆钉开展了多角度拉剪试验(荷载方向与铆钉轴线的夹角 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$)。两种规格的铆钉均出现两类破坏模式:套环拉脱破坏($\theta=0^\circ, 15^\circ$)和铆钉杆断裂破坏($\theta \geq 30^\circ$)。基于试验结果,分别提出了一套环槽铆钉在拉剪组合作用下的承载力计算公式。

2 不锈钢环槽铆钉的简化有限元模型

一般而言,结构工程的有限元仿真研究对象尺寸都

较大,考虑到计算时间和资源限制,在不锈钢环槽铆钉连接结构的有限元分析中,需要将环槽铆钉进行简化建模,以平衡计算可靠性与计算时间。然而不同于高强螺栓,不锈钢环槽铆钉在受力过程中(尤其在受拉下)套环和钉杆环槽之间会发生滑移,滑移量的大小会直接影响环槽铆钉的受力性能,因此在有限元模拟中不可忽略该现象。

WANG 等^[17]提出了一种简化的环槽铆钉模型,该模型由原始段和滑移等效段组成,如图 6 所示,其中 w_h 和 w_c 分别为铆钉帽与铆钉头的直径; L_g 为夹紧厚度; t_h 为铆钉头高度; t_c 为钉帽长度; t_{eq} 为等效段长度。滑移等效段的长度及材料应力-应变关系,通过环槽铆钉纯受拉试验的荷载-位移曲线进行标定;经验证,该简化模型计算结果精确可靠,且比精细化有限元模型节省约 95% 的计算时间,显著优化了计算效率。

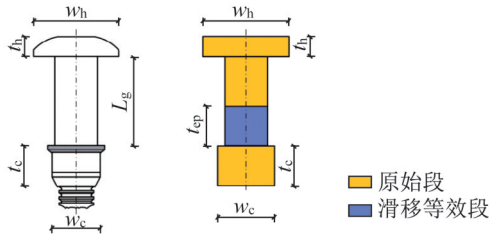


图 6 实际与简化的环槽铆钉模型^[17]

Fig. 6 Actual and simplified swage-locking pin model^[17]

张颖^[15]根据环槽铆钉套环拉脱过程的受力特点,提出了另外一种简化有限元模型,该模型由铆钉杆和套环两部分组成,如图 7a) 所示;通过有限元分析软件 ABAQUS 中黏性接触 (cohesive behaviour) 的定义来简化模拟套环与钉杆之间的相互作用(包括滑移)。该黏性接触定义涉及剪切黏性刚度 (K)、损伤初始最大应力 (σ_0)、损伤变量 (D) 和塑性位移 (u^{pl}),如图 7b) 所示,该 4 个参数同样通过环槽铆钉在纯受拉作用下的荷载-位移曲线进行标定。与试验结果对比发现,基于黏性接触的有限元模型能够准确模拟不锈钢高强度环槽铆钉在不同荷载作用下的受力状态。

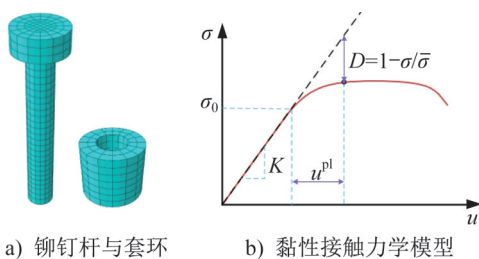


图 7 环槽铆钉的简化有限元模型^[15]

Fig. 7 Simplified finite element model of swage-locking pin^[15]

3 不锈钢环槽铆钉连接的金属结构力学性能研究

3.1 受剪连接

WANG 等^[18]设计并完成了 23 个铝合金结构环槽铆钉受剪连接的拉伸试验,所使用的铆钉为 9.66 mm 直径规格普通强度(拉断型)不锈钢环槽铆钉。对 4 种牌号的铝合金板进行了摩擦面抗滑移系数测量,得到表面未处理的铝合金板抗滑移系数值分布于 0.13~0.22 之间。试验还得到了端部剪出、承压破坏、净截面拉断、块状撕裂 4 种破坏形态,对比分析发现,所有规范的设计方法均低估了铝合金受剪连接的承载能力。基于试验与有限元参数分析结果^[19],提出了端部剪出、承压破坏两种破坏形态的设计公式,可以用于普通和高强铝合金承载力的区别设计,并合理考虑了预紧力变化及边距的影响效应。

邓华等^[20]对不锈钢环槽铆钉(铆钉类型同文献[12])连接的铝合金板件进行了受剪性能试验研究,结果表明:铆钉的预紧力在板件间产生的摩擦力有限,该连接传力以承压为主,故属于承压型。CHEN 等^[21]基于文献[20]开展有限元分析,研究表明经典的 Coulomb 摩擦模型适用于环槽铆钉与铝合金板的连接。不同材料连接的摩擦系数取值为:铝合金与铝合金的连接,摩擦系数可取为 0.25;铝合金和不锈钢的连接,摩擦系数可取为 0.15。

ZHANG 等^[22]设计并开展了 76 组抗滑移连接试验,试验变量包括不同材料组合与表面处理方式,且该试验包括 39 组铝合金-铝合金连接件、37 组铝合金-不锈钢连接件,探究了 6 种铝合金板件的摩擦型连接表面处理方式,得到了对应的抗滑移系数,如表 6 与表 7 所示, $\mu_{5\%}$ 为试验结果的 5% 分位值, μ_d 为建议的抗滑移系数设计值。经验证,电弧喷涂和超音速冷喷涂两种新型表面处理方式适用于铝合金和不锈钢板件。基于试验与有限元参数分析结果,提出了一套不锈钢环槽铆钉连接铝合金板件抗剪承载力的计算公式。

表 6 铝合金板-铝合金板表面处理方式及其抗滑移系数
Table 6 Surface treatment methods and anti-slip coefficients between aluminum alloy plates

| 表面处理方式 | 抗滑移系数 | | | |
|--------------|-------|-------|-------------|---------|
| | 均值 | 变异系数 | $\mu_{5\%}$ | μ_d |
| 不处理铝合金-喷涂铝合金 | 0.29 | 0.014 | 0.28 | 0.25 |
| 双面喷砂 | 0.63 | 0.027 | 0.60 | 0.60 |
| 双面拉丝 | 0.40 | 0.056 | 0.35 | 0.35 |
| 双面电弧喷涂 | 0.75 | 0.076 | 0.64 | 0.65 |
| 双面冷喷涂 | 0.70 | 0.072 | 0.60 | 0.60 |

表7 铝合金板-不锈钢板表面处理方式及其抗滑移系数
Table 7 Surface treatment methods and anti-slip coefficients between aluminum alloy plates and stainless steel plates

| 表面处理方式 | 抗滑移系数 | | | |
|---------------|-------|-------|-------------|---------|
| | 均值 | 变异系数 | $\mu_{5\%}$ | μ_d |
| 不处理铝合金-喷砂不锈钢 | 0.51 | 0.049 | 0.46 | 0.45 |
| 不处理铝合金-冷喷涂不锈钢 | 0.32 | 0.020 | 0.31 | 0.30 |
| 双面喷砂 | 0.62 | 0.044 | 0.56 | 0.55 |
| 双面拉丝 | 0.48 | 0.074 | 0.41 | 0.40 |
| 双面电弧喷涂 | 0.73 | 0.036 | 0.68 | 0.65 |
| 双面冷喷涂 | 0.72 | 0.032 | 0.67 | 0.65 |
| 喷砂铝合金-电弧不锈钢 | 0.58 | 0.107 | 0.45 | 0.45 |

3.2 T形连接

在紧固件连接的梁柱节点中,等效T形件是最重要的结构组件之一。WANG等^[12]开展了30个铝合金结构环槽铆钉T形连接的试验研究,如图8所示,得到了此类试件的4种破坏模式及承载力数据。通过建立有限元模型及大规模参数分析^[17],总结了材料与几何参数的影响,梳理并重新界定了T形连接的破坏模式,并以连续强度法(CSM)为设计理论基础,考虑铝合金材料的非线性行为以及铆钉受弯对承载力的影响,提出了T形连接的设计方法。

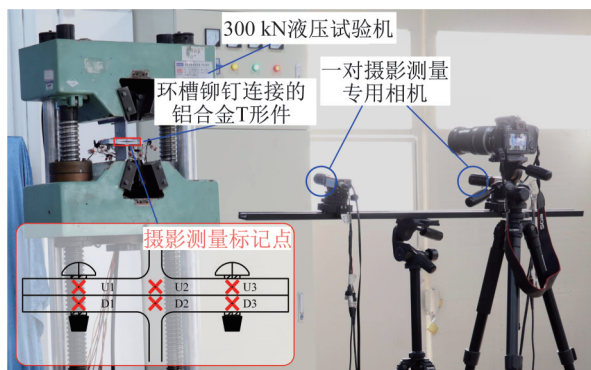


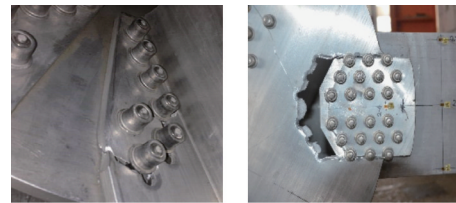
图8 铝合金T形件试验的试验装置^[12]

Fig. 8 Test setup for aluminum alloy T-stub tests

3.3 节点

王元清等^[23-25]、柳晓晨等^[26]对不锈钢环槽铆钉连接的铝合金箱形-工字形杆件盘式节点开展了静力加载试验研究并进行了有限元分析,结果表明:在节点盘中心竖向荷载作用下,试件发生脆性破坏;对向杆件为箱形截面时,箱形截面杆件下翼缘断裂、上下节点盘屈曲,且与断面相邻的螺栓被拉断;对向杆件为工字形截面时,下节点

盘发生块状撕裂,如图9所示,破坏时铝合金型材及环槽铆钉均未发生屈曲和破坏。



a) 翼缘板断裂 b) 节点盘块状撕裂

图9 铝合金盘式节点破坏模式^[23]

Fig. 9 Failure modes of aluminum alloy TEMCOR joints

为了研究环槽铆钉连接的铝合金梁柱节点的承载性能,WANG等^[27]设计并开展了10个铝合金梁柱节点单调加载试验、4个循环加载试验,如图10所示。节点构造分为两种类型,第一种为顶底采用角铝或角不锈钢连接,第二种为顶底与梁端腹板两侧均采用角铝或角不锈钢连接,如图11所示,其中, H_{ch} 为柱翼缘高; t_{chf} 和 t_{chw} 分别为槽形加劲肋的翼缘和腹板厚度; b_{ch} 和 h_f 分别为槽形加劲肋的翼缘宽度和焊脚尺寸。槽形加劲肋通过S304不锈钢焊接加工而成,通过环槽铆钉紧固形成柱腹板的加劲肋,该种构造弥补了铝合金可焊性差的缺点,在一定程度上辅助柱腹板承受拉压力,防止腹板被压屈和拉裂。节点试验结果表明:环槽铆钉连接的铝合金梁柱节点为半刚性节点,通过合理选择节点构造、连接件材料及采取节点域加强措施,可获得较好的承载能力、初始刚度与延性。例如采用不锈钢作为连接件材料,同时使用腹板角形件加强的节点其滞回曲线较为饱满,且耗能能力接近同类型的全钢结构节点。基于试验结果,以经验证的有限元模型为基础开展了节点参数分析^[28],基于组件法提出了环槽铆钉连接的铝合金梁柱节点初始刚度与承载力设计方法。

张颖^[15]基于某原型框架设计并开展了8个不锈钢高

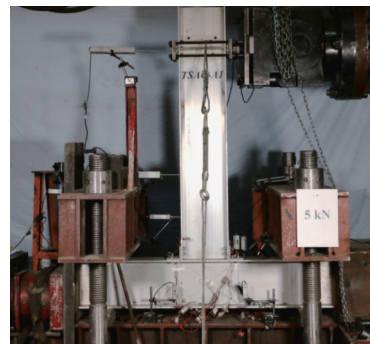


图10 铝合金T形梁柱节点加载装置^[27]

Fig. 10 Beam-to-column joint (T-shaped) loading setup^[27]

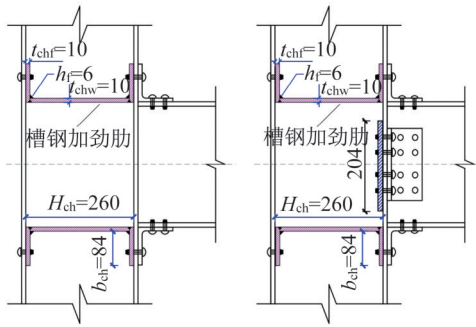


图 11 铝合金梁柱节点 (T 形) 构造^[27] (单位: mm)

Fig. 11 Configurations of aluminum alloy beam-to-column joints (T-shaped)^[27] (unit: mm)

强度环槽铆钉连接的足尺铝合金梁柱节点试验,如图 12 所示。所有梁柱节点与节点域均通过 S304 不锈钢连接件进行连接与加强,其构造如图 13 所示,包括 4 种柱强轴方向和 2 种柱弱轴方向的连接构造类型。试验结果表明:采用加强型 T 形连接件的节点 (ST 型) 的承载力、转动刚度、延性与耗能能力均较为优异,建议工程中采用此种节点构造。而采用具有相同尺寸的 L 形连接件的节点其各方面受力性能明显弱于 T 形连接件各方面受力性能。所有沿柱弱轴方向连接的节点试件在加载过程中,连接件和柱翼缘之间的滑移明显,滞回曲线的捏拢现象较为显著,柱翼缘上的环槽铆钉在往复受剪作用下钉头断裂掉落。因此,在抗震设计下,受剪环槽铆钉需保证连接的抗滑移性能,以满足抗震承载要求。研究学者通过对试验和有限元计算结果进行对比分析,提出了采用不锈钢连接件与不锈钢高强度环槽铆钉连接的铝合金梁柱节点的构造建议,还提出了节点刚度和承载力的计算方法。得到了该类节点的抗震设计方法,可保证节点出现理想屈服模式,从而使其具备良好延性。



图 12 铝合金梁柱节点 (十字形) 加载装置^[15]

Fig. 12 Beam-to-column joint (cross-shaped) loading setup^[15]

张天雄^[29]在江门中微子探测器不锈钢支撑网壳拼接连接节点的基础上,对采用梁-梁拼接的不锈钢梁柱节点开展了试验研究,如图 14 所示,为锦屏中微子探测器不锈钢支撑结构选型方案提供了重要参考。该试验共设计并开展了 4 个不锈钢梁柱节点加载试验,其中 1 个节点

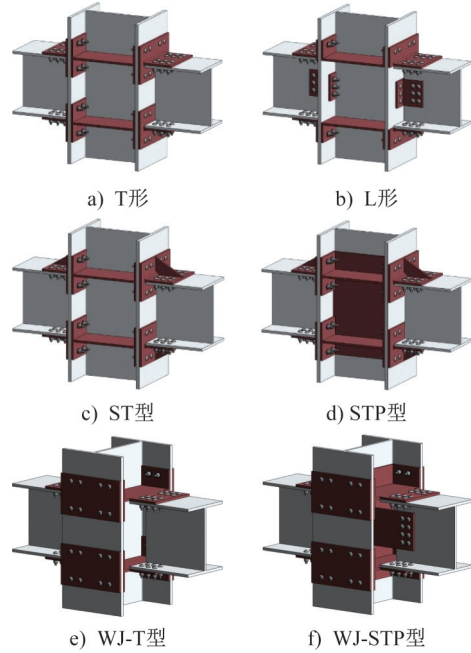


图 13 铝合金十字型梁柱节点构造^[15]

Fig. 13 Configurations of aluminum alloy beam-to-column joints (cross-shaped)^[15]

紧固件采用 M20 不锈钢高强度环槽铆钉,其余 3 个节点均采用不锈钢高强度螺栓。拼接节点短梁与柱焊接连接,梁与梁之间通过连接板与不锈钢螺栓或环槽铆钉连接。试验结果表明:节点破坏发生在短梁与柱相连的上下翼缘处,如图 15 所示,梁-梁拼接节点未发生破坏且板件之间未发生相对滑移,满足摩擦连接要求。使用不锈钢高强度环槽铆钉连接的节点与使用不锈钢高强度螺栓连接的节点在初始刚度、极限承载能力、转动能力以及耗能能力方面基本一致。

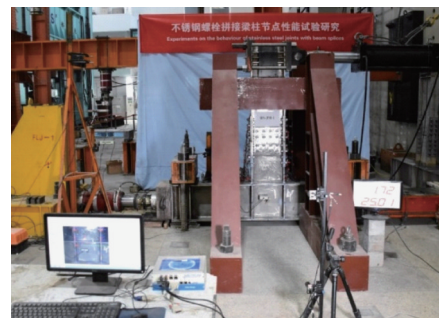


图 14 不锈钢梁柱节点加载装置^[29]

Fig. 14 Stainless steel beam-to-column joint loading setup^[29]

3.4 结构体系

在不锈钢环槽铆钉连接的铝合金梁柱节点的相关研究基础上,为进一步推进铝合金框架结构的工程应用,本文研究学者所在团队目前正在开展不锈钢环槽铆钉连接的铝合金框架结构体系的抗震性能试验研究^[30]。结合

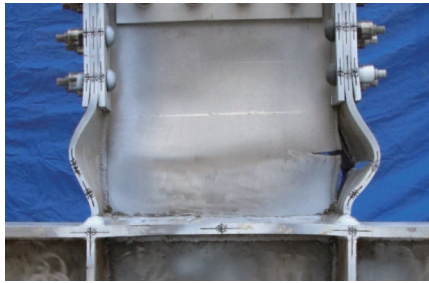


图 15 不锈钢梁柱节点破坏模式^[29]

Fig. 15 Failure modes of stainless steel beam-to-column joints^[29]

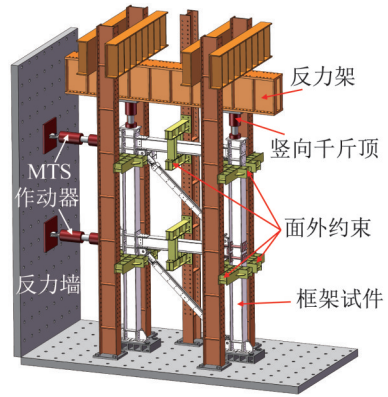


图 18 铝合金框架结构试验装置

Fig. 18 Test setup of aluminum alloy frames

实际工程背景,设计了两个单跨两层的足尺铝合金平面框架试件,其中试件1为纯框架体系,试件2为框架-支撑体系,如图16所示。梁柱构件均采用6061-T6铝合金,节点连接件采用S304不锈钢,紧固件采用M20不锈钢高强度环槽铆钉。节点构造如图17所示,梁柱构件采用一体式不锈钢 π 形连接件进行连接,节点域通过横向加劲肋加强。对于框架-支撑体系,为保证节点的半刚性设计,支撑节点板仅与梁端相连。框架试件通过两个MTS作动器联动循环加载,加载装置如图18所示。目前相关试验工作正在开展中。

4 结论

本文调研了不锈钢环槽铆钉的工程应用实例,综述了不锈钢环槽铆钉及其连接的金属结构的研究现状。目前国产奥氏体不锈钢环槽铆钉相关的力学性能研究已较为充分,其预紧力较小,仅适用于承压型连接。对于沉淀硬化不锈钢高强度环槽铆钉,其预紧力能够达到同规格高强度螺栓的水平,能够满足摩擦型连接的要求,更加适用于结构工程领域。由于该产品正处于研发阶段,相关的力学性能研究尚不全面,诸如防松动性能、疲劳寿命的研究有待继续开展。有关不锈钢环槽铆钉的抗剪连接、T形连接以及节点与体系方面,目前开展了部分探索性试验与有限元分析工作,为后续相关研究奠定了良好的基础,例如不锈钢高强度环槽铆钉连接的铝合金或不锈钢T形连接节点、及更多构造形式的该类铆钉连接节点,其力学性能与设计方法仍需完善,以促进不锈钢环槽铆钉在结构工程中的成熟应用。

参考文献:

[1] GLIENKE R, SCHWARZ M, EBERT A, et al. Joints with lockbolts in steel structures-part 1: Lockbolt technology[J]. Steel Construction, 2020, 13(2): 120-127. DOI: 10.1002/stco.202000011.

[2] 蒋斯来. 环槽铆钉[J]. 机械制造, 1980(9): 28-30. DOI: CNKI: SUN: JXZG.0.1980-09-010.

JIANG Silai. Lockbolt[J]. Machinery, 1980(9): 28-30. DOI: CNKI: SUN: JXZG.0.1980-09-010. (in Chinese)

[3] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 环槽铆钉连接副 技术条件: GB/T 36993—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Ring Groove Rivet Assemblies—Specifications: GB/T 36993—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)

[4] GLIENKE R, SCHWARZ M, EBERT A, et al. Joints with

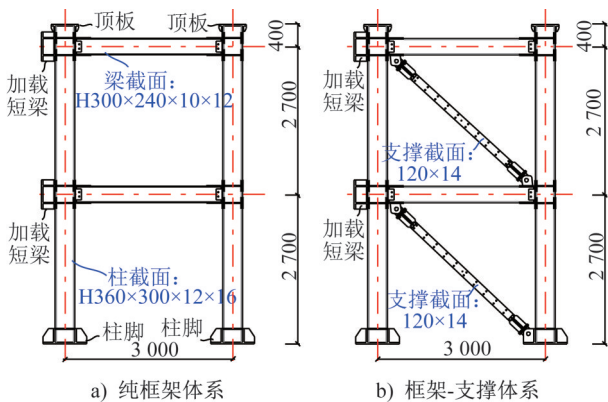


图 16 铝合金框架试件(单位:mm)

Fig. 16 Specimens of aluminum alloy frames (unit: mm)

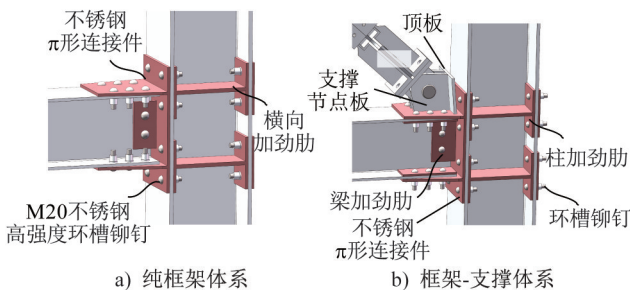


图 17 铝合金框架梁柱节点构造

Fig. 17 Configurations of beam-to-column joints in aluminum alloy frames

- lockbolts in steel structures-part 2: Design and execution[J]. Steel Construction, 2020, 13(3): 223-237. DOI: 10.1002/stco.20200039.
- [5] 曹俊. 大亚湾与江门中微子实验[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44(10): 1025-1040. DOI: 10.1360/SSPMA2014-00174.
CAO Jun. Daya bay and Jiangmen underground neutrino observatory (JUNO) neutrino experiments[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2014, 44(10): 1025-1040. DOI: 10.1360/SSPMA2014-00174. (in Chinese)
- [6] ZENG Z M, GONG H, YUE Q, et al. Thermal neutron background measurement in CJPL[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 804: 108-112. DOI: 10.1016/j.nima.2015.09.043.
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱: GB/T 3098.6—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Mechanical Properties of Fasteners—Stainless Steel Bolts, Screws and Studs: GB/T 3098.6—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023. (in Chinese)
- [8] 中国中车股份有限公司. 环槽铆钉连接副: Q/CRRC J 24-2018[S]. 北京: 中国中车股份有限公司, 2018.
CRRC Corporation Limited. Joint Sets of Lockbolts: Q/CRRC J 24-2018[S]. Beijing: CRRC Corporation Limited, 2018. (in Chinese)
- [9] International Organization for Standardization. Threaded Fasteners-Axial Load Fatigue Testing-Test Methods and Evaluation of Results: ISO 3800: 1993 [S]. International Organization for Standardization, 1993.
- [10] 国家技术监督局. 螺纹紧固件轴向载荷疲劳试验方法: GB/T 13682—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Axial Load Fatigue Testing for Threaded Fasteners: GB/T 13682—1992[S]. Beijing: Standards Press of China, 1992. (in Chinese)
- [11] 王中兴, 王元清, 欧阳元文. 一种多角度可调节的试样同时承受拉力与剪力的试验装置: CN108169016A[P]. 2018-06-15.
WANG Zhongxing, WANG Yuanqing, OUYANG Yuanwen. An adjustable testing device with multi angles for simultaneously tensile and shear forces: CN108169016A[P]. 2018-06-15.
- [12] WANG Z X, WANG Y Q, ZHANG Y, et al. Experimental investigation and design of extruded aluminium alloy T-stubs connected by swage-locking pins[J]. Engineering Structures, 2019, 200: 109675. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109675.
- [13] ZHANG T X, BU Y D, WANG Y Q, et al. Experimental study on the mechanical properties of stainless steel high strength short tail swage-locking pins[J]. Structures, 2024, 59: 105583. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105583.
- [14] European Standards. Mechanical Properties of Fasteners Made of Carbon Steel and Alloy Steel-Part 1: Bolts, Screws and Studs with Specified Property Classes-Coarse Thread and Fine Pitch Thread: ISO 898-1: 2013 [S]. Brussels: BSI Standards Publication, 2013.
- [15] 张颖. 不锈钢高强度环槽铆钉连接的铝合金梁柱节点抗震性能[D]. 北京: 清华大学, 2022.
ZHANG Ying. Seismic Behaviour of aluminium alloy beam-to-column joints connected by high-strength stainless steel swage-locking pins[D]. Beijing: Tsinghua University, 2022. (in Chinese)
- [16] 张天雄, 王元清, 陈志华, 等. 高强度不锈钢短尾环槽铆钉力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(增刊1): 151-158. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.05.S027.
ZHANG Tianxiong, WANG Yuanqing, CHEN Zhihua, et al. Experimental study on the mechanical properties of high strength stainless steel short tail swage-locking pins [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38 (Suppl. 1) : 151-158. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.05.S027. (in Chinese)
- [17] WANG Z X, WANG Y Q, YUN X, et al. Numerical modelling of extruded aluminium alloy T-stubs connected by swage-locking pins: FE validation and parametric study [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 155: 106926. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106926.
- [18] WANG Z X, WANG Y Q, YUN X, et al. Experimental study of swage-locking pinned aluminium alloy shear connections [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 163: 107641. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107641.
- [19] WANG Z X, YUN X, WANG Y Q, et al. Numerical study and design of swage-locking pinned aluminium alloy shear connections [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 190: 110949. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110949.
- [20] 邓华, 陈伟刚, 白光波, 等. 铝合金板件环槽铆钉搭接连接受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(1): 143-149. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.01.016.
DENG Hua, CHEN Weigang, BAI Guangbo, et al. Experimental study on shearing behavior of lockbolted lap connection for aluminum alloy plates [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37 (1) : 143-149. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2016.01.016. (in Chinese)
- [21] CHEN W G, DENG H, DONG S L, et al. Numerical modelling of lockbolted lap connections for aluminium alloy plates [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 130: 1-11. DOI: 10.1016/j.tws.2018.04.010.
- [22] ZHANG Y, WANG Y Q, ZHI X H, et al. Tests on slip resistant behaviour of aluminium alloy-stainless steel faying surfaces [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 202: 107762. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107762.
- [23] 王元清, 柳晓晨, 石永久, 等. 铝合金网壳结构盘式节点受力性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(5): 769-777. DOI: 10.11717/j.issn:209s-1922.2014.05.01.
WANG Yuanqing, LIU Xiaochen, SHI Yongjiu, et al. Experimental study on mechanical performance of TEMCOR joints in aluminum alloy shell structures [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2014, 30(5) : 769-777. DOI: 10.11717/j.issn:209s-1922.2014.05.01. (in Chinese)