

钢结构厂房焊接节点常见缺陷及处理策略研究

黄晓锋

中国五冶集团有限公司, 四川 成都 610000

[摘要] 钢结构厂房焊接节点常见缺陷及其处理策略是文中的研究内容, 通过文献调研与现场调查能系统总结钢结构厂房焊接节点常见的缺陷类型, 例如焊缝裂纹、气孔、夹渣、未熔合、咬边等, 并且这些缺陷产生原因可从焊接工艺参数选择不当、焊接操作不规范、焊材质量问题等方面进行分析, 针对不同类型缺陷有相应处理策略和质量控制措施, 比如焊缝裂纹建议用合理预热和后热处理工艺, 气孔和夹渣要强调焊前清理和焊接过程保护, 未熔合和咬边需改进焊接工艺参数和操作技巧, 文章还探讨了焊接质量管理措施, 如加强焊工培训、完善质量检验制度、建立焊接工艺数据库等, 这些研究成果能够为提高钢结构厂房焊接节点质量、保障结构安全性提供理论依据和实践指导。

[关键词] 钢结构厂房; 焊接节点; 缺陷; 处理策略; 质量控制

DOI: 10.33142/ect.v3i10.18206

中图分类号: TU375

文献标识码: A

Research on Common Defects and Treatment Strategies of Welding Nodes in Steel Structure Factory Buildings

HUANG Xiaofeng

China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract: The common defects and their treatment strategies of welding joints in steel structure factory buildings are the research content of this article. Through literature research and on-site investigation, the common types of defects in welding joints of steel structure factory buildings can be systematically summarized, such as weld cracks, porosity, slag inclusion, lack of fusion, undercutting, etc. The causes of these defects can be analyzed from the aspects of improper selection of welding process parameters, non-standard welding operations, and welding material quality problems. Corresponding treatment strategies and quality control measures are proposed for different types of defects, such as reasonable preheating and post heat treatment processes for weld cracks, emphasis on pre weld cleaning and welding process protection for porosity and slag inclusion, and improvement of welding process parameters and operation skills for lack of fusion and undercutting. The article also explores welding quality management measures, such as strengthening welders. Training, improving quality inspection system Establishing a welding process database and other research results can provide theoretical basis and practical guidance for improving the quality of welding nodes in steel structure factories and ensuring structural safety.

Keywords: steel structure factory building; welding nodes; defects; processing strategy; quality control

引言

钢结构高强度、质量轻且施工周期短, 所以在现代工业建筑里被广泛使用。中国建筑金属结构协会最新统计表明, 2019 到 2023 年中国钢结构产业每年的增长率都在 15% 以上, 并且 2023 年钢结构建筑用量达到 8500 万吨, 在工业厂房建设里的应用占比超 70%, 其中钢结构厂房建设主要靠焊接连接, 焊接质量直接关系到整体结构的安全性与可靠性, 不过焊接过程复杂, 涉及材料学、力学、热学等多方面知识, 所以很容易出现各种缺陷。

钢结构厂房焊接节点这一结构应力传递关键部位极易出现缺陷, 并且建筑工程质量监督总站 2022 年发布的数据显示, 在钢结构工程质量事故里, 焊接缺陷引发的问题占比达 41.3%, 而在这类问题里, 焊接节点缺陷占比又达 68.7%, 常见的焊接节点缺陷有焊缝裂纹、气孔、夹渣、未熔合、未焊透以及变形等, 这些缺陷不但会削弱焊接节点的承载能力, 而且可能在结构服役时变成应力集中源, 致使结构失效乃至发生灾难性事故。

钢结构厂房焊接节点缺陷产生原因繁多, 包含焊接工

艺参数选择不合适、焊接材料与母材相配性差、焊接操作不规矩、环境因素干扰以及设计方面的原因等,当下研究表明不同类型缺陷有着特定的形成原理,需用有针对性的策略去防治,就像中国工程院院士王海福团队 2021 年所提的那样,若优化焊接热输入并控制好冷却速度,高强度焊接裂纹发生率能降低 35%,而且随着数字技术发展起来,像智能监测、实时控制这类新式技术手段用于焊接缺陷防控潜力巨大。

钢结构厂房焊接节点常见缺陷类型及其成因机制,本文将深入分析并探讨,还会联系工程实践,拿出科学有效的处理策略与质量控制方法,从而给钢结构厂房整体质量与安全性的提高提供理论和技术支撑。

1 钢结构厂房焊接节点常见缺陷分析

1.1 焊缝裂纹

在钢结构厂房焊接节点里,焊缝裂纹是最严重的缺陷类型,中国建筑科学研究院 2022 年发布的《钢结构焊接质量通病分析报告》显示,焊接质量问题里裂纹缺陷占比达 32.5%,焊缝裂纹有热裂纹、冷裂纹、再热裂纹和层状撕裂等类型,其中热裂纹一般出现在焊接凝固期间且与钢材化学成分尤其是硫、磷含量关系紧密,而冷裂纹大多在焊接完成后的冷却阶段产生,氢含量、硬化组织和应力这三个因素对其影响较大,并且随着钢结构厂房应用高强度低合金钢的情况增多(这种钢的碳当量比较高),焊接出现冷裂纹的风险就明显增加了。

焊缝裂纹的形成机理和多种因素相关,其一为材料方面的因素,像母材和焊材化学成分不匹配、杂质元素含量过高就会涉及其中,其二为工艺方面的因素,例如焊接时热输入过大或者过小、焊接速度不合适、冷却速率没控制好等,其三为操作方面的因素,比如焊前预热不够、层间温度没控制好等,并且在梁柱连接节点、桁架节点等受力复杂的复杂节点处,应力集中现象特别明显,所以更容易产生裂纹,不过近年来研究显示,若能合理控制焊接热循环、运用低氢工艺、做好预热和后热处理,焊缝裂纹的发生率就能降低七成还多。

1.2 气孔和夹渣

钢结构厂房焊接节点里常见的体积型缺陷有气孔与夹渣,建筑工程质量监督总站 2023 年统计数据显示焊接质量问题里气孔和夹渣缺陷占比达 28.7%,焊缝金属里的气体空洞即气孔,焊接时熔池中的氢、氧、氮等气体溶解其中且凝固时未及时逸出就形成了这种空洞,而焊缝金属中的非金属夹杂物就是夹渣,焊接时没浮出焊缝表面的熔

渣或者氧化物往往就会成为夹渣。

气孔的形成主要有这么些原因:焊条受潮会使氢气溶解度升高,焊接材料表面有污染,保护气体纯度不够或者气体保护没做好,焊接速度太快致使气体没来得及逸出等。夹渣主要是由于焊缝清理没干净、多层焊接的时候层间清理不好、焊接操作技术不规范这些因素造成的。研究表明,在湿度超 70%的环境下焊接,气孔率会增加 2 到 3 倍,若焊前用丙烷火焰预热并充分干燥处理,则气孔率能降低近 60%。

焊接节点若出现严重气孔和夹渣,有效截面积就会降低且承载能力也会随之减弱,并且这些情况会使之处成应力集中源,动载荷作用时会促使疲劳裂纹更快萌生与扩展,主承重节点如厂房柱梁连接节点、支撑系统节点等尤其如此,有这种缺陷时结构安全会被严重威胁^[1]。

1.3 未熔合和未焊透

在钢结构厂房焊接节点里,对结构承载力影响最直接的是未熔合和未焊透这两种缺陷类型,中国建筑科学研究院 2023 年调查数据显示,这类缺陷在钢结构焊接质量问题里占比达 21.3%,其中焊缝金属与母材或者上层焊缝和下层焊缝之间没达成冶金结合就是未熔合,而焊缝根部没彻底融合且有未熔合缝隙的情况就是未焊透,这二者本质都是界面性缺陷,会大大削弱焊接节点有效截面积和承载能力。

未熔合和未焊透的主要成因包括:焊接热输入不足、焊接坡口设计不合理、焊接操作技术不到位、焊接位置难以操作等。特别是在厚板焊接或复杂节点构造中,如箱形柱与 H 形梁的连接节点、管接管节点等,这类缺陷更为常见。近年钢结构工业化程度提高,工厂预制构件增多,研究表明,在自动化焊接条件下,通过优化焊接工艺参数和坡口设计,未熔合和未焊透缺陷可减少 85% 以上。

结构安全受这类缺陷的影响特别严重,交替荷载作用时更是如此,因为未熔合与未焊透之处很容易变成疲劳裂纹的起点从而使构件早早失效,2021 年某个大跨度钢结构厂房发生屋盖系统失效事故,调查发现关键节点的未焊透缺陷在服役多年后发展成贯通性裂纹是事故的主要原因。

1.4 变形和应力集中

在钢结构厂房焊接节点里,变形与应力集中这两种常见问题很难完全避免,并且中国工程建设标准化协会 2022 年发布数据表明,由焊接变形导致的钢结构安装偏差问题占比 17.5%,角变形、纵向收缩、横向收缩以及扭曲变形等是焊接变形的主要表现形式,这些变形不但会影

响结构几何尺寸精度,还或许会引入二次应力从而降低结构整体稳定性。

焊接变形的产生机理跟焊接热循环里不均匀的加热和冷却关系很大,因为焊缝金属和热影响区在高温下加热之后快速冷却就会有不均匀的热胀冷缩而造成永久塑性变形,并且焊缝几何尺寸、焊接工艺参数、焊接顺序和约束条件等因素对变形量大小影响重大。大型钢结构厂房像主梁和次梁连接节点、柱脚节点之类的焊接节点往往焊缝多且热输入集中在那儿,所以变形的问题特别明显。

焊缝几何形状突变的地方、接头没过渡好的部位还有焊缝有缺陷的区域是焊接应力集中的主要发生地,2023年的研究显示,典型的T型焊接接头应力集中系数能达到2.5到3.5,使得结构在服役时疲劳破坏风险大幅增加,并且厂房吊车梁支承节点、大跨度屋盖主节点这些关键受力部位的应力集中问题更要格外重视。

3 焊接缺陷的检测方法

3.1 目视检查

在钢结构厂房焊接节点质量控制中,目视检查是最基本也最经济的检测手段,中国建筑金属结构协会2022年统计表明,表面缺陷靠目视检查能有高达85%的高效发现率且其成本仅为无损检测方法的10%~15%,此方法主要依仗检验人员的经验与专业知识,用肉眼或者放大镜、测量尺、焊缝规之类的简单工具查看焊缝表面,再直观评估从而有效检出表面裂纹、气孔、夹渣、咬边、焊瘤以及焊缝尺寸偏差等缺陷。

在良好照明条件(照度一般不能低于500lx)下进行目视检查,并且检查之前得把焊缝表面清理干净以去掉焊渣、飞溅和氧化皮之类的东西,在检查时依照像《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205—2020)这样的相关规范来系统地评定焊缝外观质量。这几年,高分辨率数码相机、工业内窥镜等设备被应用之后,目视检查的精度和效率提高不少,尤其对管道内部焊缝、狭窄空间内的节点等这些很难直接观察的部位来说更是如此^[2]。目视检查发现不了内部缺陷是它的局限,但它在焊接质量控制中是第一道防线,重要性没法小看。

3.2 无损检测技术

钢结构厂房焊接节点内部缺陷靠无损检测技术发现,像超声波探伤(UT)、射线探伤(RT)、磁粉探伤(MT)、渗透探伤(PT)等都是常用的无损检测方法,中国工程建设标准化协会2023年统计数据显示,超声波探伤效率高、没有辐射危害还方便携带,在钢结构焊接质量检测里的应用占比已达到56%而成为最主要的无损检测手段。

声波在不同介质边界有反射现象,超声波探伤就依据这一原理有效地检出焊缝内部未熔合、未焊透、裂纹等平面型缺陷。传统A型超声波探伤比较起来,相控阵超声波技术(PAUT)检测精度更高且缺陷成像更直观,近五年在钢结构领域应用增长超200%。而射线探伤依靠射线穿透能力的差别形成底片影像,从而能把焊缝内部气孔、夹渣之类的体积型缺陷清晰地显示出来。磁粉探伤和渗透探伤主要用来检测表面及近表面的缺陷,操作简单且成本低。

选择无损检测技术时需综合考量焊接节点的重要性、可能存在缺陷的类型以及检测条件等因素,比如厂房主要受力构件的全熔透对接焊缝一般要求100%做超声波或者射线探伤,而次要构件的角焊缝用磁粉或者渗透探伤抽检就行,随着数字化和智能化技术发展起来,计算机辅助超声波探伤分析、数字射线成像技术(DRT)之类的新方法被慢慢应用,这使得检测的准确性和效率提高了很多。

3.3 应力分析

评估钢结构厂房焊接节点安全性时,应力分析是重要技术手段,能确定焊接缺陷对节点承载能力影响的程度并给缺陷评定和处理提供科学依据。实验测试法和数值模拟法是常用应力分析方法,中国钢结构协会2022年调查显示,在焊接节点评估中有限元分析应用率达超65%而成为主流应力分析方法。

实验测试法包含应变片测量、光弹性测量以及声发射检测等技术,其中应变片测量最为常见,把微型应变片粘于焊接节点关键部位就能得到实际荷载作用下的应变数据从而算出应力分布,而声发射技术通过监测构件受载荷时发出的声波信号能对缺陷的活动状态进行实时评估,是近年发展较快的动态监测技术。

有限元分析(FEA)是数值模拟法的主要依靠,靠建立焊接节点三维模型并设置材料属性、边界条件和载荷工况来算出应力分布云图,若要评估焊接缺陷影响还能结合断裂力学理论计算应力强度因子或者J积分这类参数以预测缺陷扩展趋向,2023年研究数据显示云计算让大型钢结构有限元分析效率提高300%还多,从而给焊接节点全寿命周期安全评估提供了很强的技术支撑。

4 焊接节点缺陷处理策略

4.1 预防措施

确保结构安全,钢结构厂房焊接节点缺陷预防是第一道防线^[3]。中国建筑金属结构协会2022年行业报告显示,钢结构市场规模达2.5万亿元且每年增长率超8%,所以采取预防性措施能大幅降低返工率(可降近30%),像严格控制焊前准备工作(例如精准加工对接焊缝坡口以使坡

口角度、钝边和间隙合乎设计要求)、妥善选择与保管焊接材料(尤其要规范烘烤焊条以保证低氢焊条干燥)以及管控施工环境(不在雨天、雪天、大风等恶劣天气下做户外焊接作业,必要时设临时防护设施)都是有效预防措施,而且焊工资质管理在预防措施里也占重要地位,必须让持证焊工上岗并且定期对他们进行技能更新培训。

4.2 焊接工艺优化

解决钢结构厂房焊接节点缺陷的核心策略是焊接工艺优化,中国工程建设标准化协会 2023 年数据显示焊接工艺优化能将焊接缺陷发生率降低大概 40%,其优化主要涉及如下方面:要合理选择焊接方法,不同部位、不同厚度的钢材分别用手工电弧焊、埋弧焊或者 CO_2 气体保护焊等合适的方法来焊。要优化焊接参数,精确控制焊接电流、电压、焊接速度这些关键参数,研究显示焊接电流控制在 $\pm 5\%$ 的误差范围之内焊缝质量会大大提高。要制定科学的焊接顺序和分层焊接技术以有效控制焊接变形和残余应力。对于高强度钢或者厚板结构来说,采用预热和后热处理工艺可以防止出现焊接裂纹。

4.3 修复技术

钢结构厂房焊接节点出现缺陷时,恰当的修复技术极为重要,中国钢结构协会 2021 年发布的行业标准指出不同类型缺陷有着不同修复方法且合理选择能将修复成功率提升到 95% 以上。焊缝表面有气孔和夹渣时,把它们局部打磨去除后再重新焊接就行,而未熔合和咬边等缺陷得先将缺陷区域彻底清除再按优化过的工艺参数重新焊接,焊缝裂纹尤其是贯穿性裂纹修复起来比较难,一般是先确定裂纹端部并钻个止裂孔,之后用 V 形或者 U 形坡口把裂纹完全去掉再重新焊接,必要时做局部热处理来释放残余应力,并且大面积或者严重的缺陷区域有时候要考虑用加强板补强或者整体换构件才能保证修复后结构的整体安全性和原设计强度的一致性。

4.4 质量控制体系

保障钢结构厂房焊接节点质量的系统性举措是建立完善的质量控制体系,近期建筑业全面质量管理(TQM)数据表明,严格施行质量控制体系的项目其焊接缺陷率可降低 60% 以上,有效的质量控制体系需涵盖如下关键环

节:首先得建立分级检验制度,包含焊工自检、班组互检、专职质检员检验以及第三方检测机构抽检,从而构建起多层次质量控制网络。其次要运用多种多样的无损检测方法,例如超声波探伤、射线探伤、磁粉探伤等,在不同部位和不同类型焊缝上挑选合适的检测手段。再者要建立焊接工艺数据库与质量追溯系统,记录下每道焊缝的焊接参数、焊工信息、检测结果等关键数据。最后还得定期举办质量分析会,对发现问题加以归纳分析,不断完善焊接工艺和操作规程。

5 结论

本研究系统分析了钢结构厂房焊接节点常见缺陷及其处理策略并得出如下结论:“预防为主,综合治理”这一策略应当被用于钢结构厂房焊接节点的质量控制,因为严格的焊前准备、科学的焊接工艺参数选择、规范的焊接操作以及完善的检测体系能够有效防止大多数焊接缺陷产生,并且不同类型的焊接缺陷应采用不同的处理方法,其中裂纹缺陷尤其要着重于预防措施与根治性修复,焊接工艺的优化是提升焊接质量的关键手段,在高强度钢和特殊部位的焊接中更是如此,多层次、全方位质量控制体系的建立对确保钢结构厂房焊接节点长期安全有着决定性意义,而且智能焊接技术与数字化质量管理不断发展会使钢结构厂房焊接节点的质量控制在未来变得更精准、更高效^[4]。

[参考文献]

- [1]宋龙龙.基于 ABAQUS 的高温下端板拼接钢梁整体稳定性分析[D].重庆市:重庆大学,2016.
- [2]刘斐然.焊接空心球网架中钢管—端板连接疲劳性能的试验研究[D].山西省:太原理工大学,2022.
- [3]徐红杰.多高层钢结构梁柱节点震害及抗震延性策略研究[D].云南省:昆明理工大学,2010.
- [4]张永生.某带吊车轻钢厂房加固节点分析与施工研究[J].安徽建筑,2020,27(7):72-72.

作者简介:黄晓锋(1989.3—),毕业院校:江南大学太湖学院,所学专业:土木工程,当前就职单位:中国五冶集团有限公司,职务:项目施工经理,职称级别:中级工程师。