工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

工业钢结构厂房的防腐技术与耐久性评估

王招招　张硕　康玉龙　许鑫森　袁春燕
中国五洲工程设计集团有限公司　北京西城　100053

DOI：10.32629/ems.v8i10.22557

［**摘　要**］工业钢结构厂房的腐蚀本质上是电化学与化学反应过程，长期处于腐蚀环境将直接威胁结构安全。本文分析了工业钢结构厂房腐蚀的影响因素与损伤特征，研究了涂层防护与热浸镀锌等防腐施工技术，结合防护机理建立了涵盖结构指标、材料指标与环境指标的耐久性评估体系及标准化评估流程，以强化防腐性能、延长厂房使用寿命，为工业钢结构厂房的运维管理提供理论参考。

［**关键词**］工业钢结构；防腐技术；耐久性评估

引言

当下，我国工业化建设持续推进，钢结构厂房因其强度高、空间布置灵活、抗震性能好、施工速度快、材料可回收及智能监测等优势，在工业建筑领域得到大规模应用。然而，工业钢结构厂房在特定环境条件下易发生腐蚀与材料劣化。腐蚀不仅会降低钢结构的承载能力，严重时甚至危及结构安全，显著缩短厂房的使用寿命。本文围绕钢结构厂房的防腐技术与耐久性能展开研究，旨在为提升工业钢结构厂房的使用性能与服役寿命提供理论参考与技术支撑。

1 腐蚀环境下钢结构厂房的耐久性分析

工业钢结构厂房的耐久性退化与所处环境密切相关。厂房环境中的盐分、废气和湿气等因素相互作用，加速钢材腐蚀进程，导致结构构件强度下降甚至关键构件失效，严重威胁结构安全。尤其对于海边城市的钢结构厂房，氯离子侵蚀问题尤为突出，空气中游离的氯离子在钢材表面形成局部腐蚀电池，诱发点蚀。点蚀具有隐蔽性，初期腐蚀坑体积小、外观不明显，难以及时被发现，往往在未被察觉的情况下持续扩展，最终危害结构安全。此外，在腐蚀介质与持续应力共同作用下，不同程度的应力腐蚀开裂（SCC）现象同样不容忽视—应力腐蚀往往在无明显宏观变形预兆的情况下突发失效，其破坏后果更为严重。

腐蚀环境下钢结构厂房使用寿命显著缩短，其根本原因在于钢材表面钝化膜被破坏，失去屏障作用后，钢材直接与氯离子、酸性气体等腐蚀介质接触而引发腐蚀。潮湿环境中，水分与氧气参与钢材表面的电化学反应，生成大量铁锈，导致钢材力学性能退化。随着腐蚀持续深入，钢构件有效截面面积不断减小，材料的弹性模量、屈服强度及极限强度均发生退化，钢结构整体刚度与承载能力随之下降，极易引发安全事故。因此，对处于腐蚀环境下的钢结构厂房，应建立定期检测与维护机制，准确评估结构性能状态，及时识别潜在风险并采取补救措施。

2 工业钢结构厂房的腐蚀原理与影响因素

2.1 钢结构腐蚀原理

要有效应对工业钢结构厂房的腐蚀问题，首先必须深入剖析其腐蚀机理与环境诱因。钢材在腐蚀介质作用下的劣化过程，本质上是电化学反应的结果。只有准确识别腐蚀类型、环境条件及损伤演化规律，才能为后续防护措施的制定提供科学依据。

钢结构腐蚀本质上是钢材在环境介质作用下发生的材料性能退化过程，根据作用机理可分为化学腐蚀与电化学腐蚀两大类。化学腐蚀是指钢材表面与非电解质介质直接发生纯化学反应，多出现在干燥或高温环境中。尽管化学腐蚀速率较慢，但长期作用仍会损害结构安全。电化学腐蚀则是钢材与电解质溶液接触形成腐蚀原电池;在常温工业大气环境中，该机制占主导地位，其破坏速率显著高于化学腐蚀，是厂房耐久性退化的主要原因

2.2 腐蚀影响因素

工业厂房钢结构的腐蚀受多种因素耦合影响，可归纳为环境条件、材料特性及施工质量三个方面。

环境条件方面，环境湿度与温度对腐蚀速率具有直接影响。高湿环境为电化学腐蚀提供了电解质条件，加速腐蚀进程；温度升高则加快化学反应速率，进一步加剧腐蚀。此外，工业大气中的二氧化硫、氯化氢等有毒有害气体也会显著促进钢材劣化。

材料特性方面，不同钢材品种的抗腐蚀能力存在差异。一般而言，合金钢因合金元素的钝化作用，其耐蚀性优于碳

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

素钢。同时，基材表面状态对腐蚀行为影响显著：表面粗糙度过大、清洁不彻底或存在氧化皮残留时，易形成局部腐蚀微电池，加速局部腐蚀。

施工质量方面，连接方法（焊接、螺栓连接）与防腐施工工艺直接影响结构的耐久性。焊接热影响区的组织变化会降低局部耐蚀性；而涂层施工前表面处理不达标、涂装工艺参数失控等缺陷，均会导致防护层早期失效，加速钢结构腐蚀。

3 工业钢结构厂房耐久性评估方法

工业钢结构厂房的耐久性评估关系到厂房能否长期稳定运行。检测人员需定期监测结构健康状况，合理运用无损检测手段。常用无损检测方法包括超声波检测、磁粉检测及射线检测，这些方法不破坏原有组织结构，即可清晰识别缺陷。超声波检测技术能够穿透钢材全截面，灵敏识别内部裂纹、夹渣及腐蚀坑等体积型缺陷，适用于厚板构件及关键节点的内部质量评定；表面及近表面缺陷可采用磁粉检测技术；射线检测则更适用于内部体积型缺陷的精确定位。企业应根据实际情况选用合适的检测技术，为后续耐久性评估提供可靠数据基础。

越来越多的工业钢结构厂房在健康监测中引入无人机巡检和机器人检测设备。智能化设备的应用不仅显著提升了复杂环境下检测作业的可行性与安全性，还降低了高空作业的人身风险与停工成本。通过多源检测数据的融合分析，可更加客观、准确地评估钢结构厂房的耐久性。除现场检测外，技术人员还可借助计算机与有限元分析软件，建立钢结构厂房的三维精细化模型，模拟不同腐蚀程度下的力学响应。通过参数化分析，获取腐蚀环境下各构件的应力分布、变形特征及剩余承载力指标，识别高应力集中区域与疲劳损伤累积热点。有限元模拟结果可与现场检测数据相互校验，使耐久性评估从经验判断升级为数据驱动，为后续干预决策提供量化依据。工业钢结构的耐久性评估正逐步从静态抽检向基于动态数据的全生命周期健康监测转变——通过将历次检测结果、环境参数（温湿度、氯离子浓度、腐蚀速率）与有限元模型的迭代更新相耦合，形成覆盖"数据采集—模型修正—状态评估—预警干预"全过程的动态评估机制。

4 工业钢结构厂房的防腐技术

4.1 涂层防护技术

针对上述腐蚀机理，防护的核心在于阻断钢材与腐蚀介质的接触。涂层技术作为钢结构防腐的主要手段，设计人员应综合评估厂房所处环境的腐蚀等级，选择适配的涂料，合理确定干膜厚度与涂装道数。同时，结合经济性分析，在防护寿命与全生命周期成本之间寻求最优平衡。在施工阶段，需严格控制表面处理质量（如喷砂除锈达到 Sa 2.5 级）、涂装环境温湿度及施工工艺参数，避免因基材处理不当或涂装缺陷导致涂层早期失效。通过科学选材、合理设计与规范施工的全流程管控，可显著提升钢结构的抗腐蚀性能，保障工业厂房的长期安全。

涂层防护技术的有效性取决于涂料选型与施工质量的协同控制。目前市场上防腐涂料种类繁，按成膜物质可分为环氧树脂类、聚氨酯类、醇酸树脂类等。优质防腐涂料应具备良好的基材附着力、耐候性及屏蔽性能，能在钢材表面形成连续致密的防护层，有效阻隔腐蚀介质渗透。设计人员应依据环境腐蚀等级、使用工况及涂料配套体系综合选型，确保底、中、面漆之间的相容性。

涂层施工质量直接决定防护效果。施工前须进行严格的基材表面处理，彻底清除钢材表面的锈蚀产物、氧化皮及油污，确保达到设计要求的清洁度等级，以保证涂层与基材的良好附着力。底漆涂装应选用适配品种，采用均匀一致的涂装速度，杜绝漏涂、流挂等缺陷。面漆涂装于底漆实干后进行，可进一步强化防护层的阻隔性能。施工过程中需严格控制每道涂层的干膜厚度、涂装间隔及层间干燥时间，确保涂层体系完整、致密，最终达到设计的防护寿命要求。

4.2 热浸镀锌技术

热浸镀锌是工业钢结构常用的长效防腐技术，其原理是将钢材浸入熔融锌液中，使锌液与钢基材表面的铁发生冶金反应，生成由锌铁合金层和纯锌层组成的金属镀层。该镀层既能通过屏障作用物理隔离钢材与腐蚀介质，又能利用锌的牺牲阳极特性提供电化学保护，防腐效果显著。

热浸镀锌施工包括前处理、浸镀及后处理三个阶段。前处理阶段需彻底清除基材表面的锈蚀产物、油污及氧化皮，确保锌液与钢基材表面充分润湿和反应。浸镀阶段将钢材浸入熔融锌液中并保持一定时间，待锌铁合金层充分生长后取出。后处理阶段对镀锌构件进行冷却，并采用铬酸盐或钝化液进行钝化处理，以进一步提高镀锌层的耐蚀性。热浸镀锌层具有优异的耐腐蚀性能、良好的附着力和均匀的覆盖效果，在严酷腐蚀环境下可有效延长钢结构的使用寿命。

5 工业钢结构厂房的耐久性评估流程

5.1 建立完整的耐久性评估指标体系

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

工业钢结构厂房的耐久性评估涉及多因素耦合作用，内容复杂且系统性强，需建立完整的评估指标体系。该体系应全面反映结构体系特征、材料性能状态及腐蚀损伤程度。

结构指标包括厂房结构类型（门式刚架、多层框架、网架等）、跨度与高度、连接形式（焊接、螺栓连接）及节点构造特征。不同结构体系对腐蚀损伤的敏感程度存在差异，例如螺栓连接节点因存在缝隙易诱发缝隙腐蚀，而焊接热影响区则因组织变化耐蚀性下降。

材料性能指标涵盖钢材的力学性能、化学成分及微观组织结构等。腐蚀作用下，上述指标均发生不同程度退化：均匀腐蚀导致截面减薄，强度指标按比例折减；点蚀引发局部应力集中，降低疲劳寿命；显微组织劣化则影响材料的断裂韧性。其中，腐蚀疲劳指数需综合环境腐蚀速率、结构应力水平及循环荷载次数进行计算，以定量评估腐蚀与疲劳耦合作用下的结构状态。

环境指标主要包括环境温度、相对湿度、氯离子浓度、二氧化硫及酸性气体含量等。这些指标直接决定腐蚀速率，与钢材疲劳损伤累积速率亦有密切关系，是耐久性评估的基础输入参数。

5.2 耐久性评估流程与步骤

企业在进行钢结构厂房耐久性评估的时候需要按照既定的流程开展工作，主要有施工现场的勘查、施工材料的检测、施工测试以及数据分析等。首先进行现场勘察工作，评估人员需查明结构现状、环境腐蚀等级及既有损伤分布，运用超声波检测、磁粉检测等无损检测技术检查钢结构的完整性与安全性，识别内部缺陷与损伤热点。其次开展模拟测试，在实验室条件下，可取代表性构件或试样进行加速腐蚀试验、疲劳性能测试等，评估钢结构在不同环境条件下的耐久性响应特征，为寿命预测提供实验依据。最后进行数据分析与综合评价，整合现场检测数据、实验室测试结果及环境参数，结合材料性能退化模型与结构力学分析，评定耐久性等级，预测剩余使用寿命，并输出结构健康状态评估报告。

5.3 耐久性评估结果的处理与应用

耐久性评估完成后，应及时将评估结果转化为具体的维护决策，提升成果转化率。评估结果直接指导钢结构厂房的维护、修补与加固方案制定：当评估结果显示耐久性等级偏低或腐蚀损伤较严重时，应立即采取针对性维护措施，包括清除表面腐蚀产物与污染物、重新涂装防腐涂料、更换受损构件或增设阴极保护等。对于耐久性等级尚满足要求的区域，可制定周期性维护计划，实施预防性养护。通过建立"评估—决策—实施—复评"的闭环管理机制，实现工业钢结构厂房耐久性维护的科学化与精细化。

6 结束语

本文系统分析了工业钢结构厂房的腐蚀机理与影响因素，研究了涂层防护、热浸镀锌等防腐技术，并建立了涵盖结构指标、材料指标与环境指标的耐久性评估体系及标准化评估流程。研究表明，腐蚀环境下钢结构耐久性的退化是电化学反应与力学损伤耦合作用的结果，有效的防腐措施与科学的耐久性评估相结合，可显著延长厂房使用寿命。今后，随着智能监测、新型防护材料及数字化评估技术的发展，工业钢结构厂房的防腐与耐久性管理将向全生命周期智能化方向迈进，进一步推动工业建筑的安全、绿色与可持续发展。

[参考文献]

[1]陈蕙芸,李琰琛,朱宇.海洋能源钢结构的防腐技术研究与应用[J].山西建筑,2024,50(23):5-8+14.

[2]丁志全,陈红兵,刘观发等.钢结构防腐技术在自动化码头工程中的应用[J].水运工程,2022,(10):94-98.

[3]王倩.钢结构建筑锈蚀及防腐处理技术分析[J].智能城市,2022,8(07): 59-61.

[4]李华,王强.钢结构防腐蚀技术研究进展[J].建筑结构学报,2023,44(5):1-9.

[5]张帆,陈曦.腐蚀环境下钢结构健康监测与 评估方法[J].工业建筑,2024,50(2):67-74.

[6]孙嘉良.钢结构厂房结构安全性能检测与稳定性分析[J].四川水泥,2025(4):125-127,130.

[7]何建梁.工业厂房结构设计中钢结构设计的应用[J].陶瓷, 2024(2):210-212.

[8]李自祥.非膨胀型钢结构防火防腐一体化涂料的制备与性能研究[D].福州:福州大学,2023.

[9]段莹.钢结构厂房加工、安装及防腐涂装施工技术研究[J].造纸装备及材料,2022,51(9):138-140.

[10]梁永平,秦川,黄佩兵,等.阻燃剂对水性钢结构防火涂料性能的影响[J].电镀与涂饰,2024,43(2):109-115.

[11]秦汝祥,葛小丽,滕丽影,等.膨胀型钢结构防火涂料的制备及性能[J].电镀与涂饰,2023,42(12):63-70.

[12]吴天琦.浅论钢结构防火涂料防火性能检测方法现状及发展[J].中国建筑金属结构,2021(11):120-121.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.