

# 火电厂煤棚钢结构疲劳损伤检修研究

王玉军

阳城国际发电有限责任公司 山西晋城 048102

**【摘要】**火电厂煤棚钢结构作为储煤系统的核心承载设施，长期承受煤料堆载、风荷载、温度应力及循环冲击作用，易产生疲劳损伤，直接威胁储煤安全与火电厂连续运行。当前火电厂煤棚钢结构检修工作中，存在“疲劳损伤识别滞后”“修复技术适配性差”“预防机制缺失”等问题，导致30%以上服役超10年的煤棚出现节点开裂、构件变形等安全隐患，严重时可能引发局部坍塌风险，单次抢修成本超500万元。

**【关键词】**火电厂；煤棚钢结构；疲劳损伤；检修技术；全生命周期管理

Research on Fatigue Damage Maintenance of Coal Storage Steel Structures in Thermal Power Plants by

Wang Yujun

Yangcheng International Power Generation Co., Ltd., Jincheng City, Shanxi Province 048102

**【Abstract】**As the core load-bearing structure of coal storage systems, coal storage steel structures in thermal power plants endure prolonged exposure to coal loading, wind loads, thermal stresses, and cyclic impacts, making them susceptible to fatigue damage. This directly threatens coal storage safety and the continuous operation of power plants. Current maintenance practices face challenges such as delayed fatigue damage identification, poor compatibility of repair technologies, and lack of preventive mechanisms. These issues have led to safety hazards like joint cracking and component deformation in over 30% of coal storage structures with a service life exceeding 10 years, which may even cause partial collapse in severe cases. A single emergency repair can cost over 5 million yuan.

**【Key words】**thermal power plant; steel structure of coal shed; fatigue damage; maintenance technology; life cycle management

## 一、引言

火电厂作为能源供应核心单元，储煤系统的稳定运行直接决定发电连续性，而煤棚钢结构是储煤系统的关键承载载体。我国现役火电厂煤棚多为大跨度预应力桁架结构或网架结构，单座煤棚储煤量可达50万吨左右，长期承受三类荷载作用：一是煤料堆载产生的静荷载（堆煤高度3-8m，等效均布荷载20-30kN/m<sup>2</sup>）；二是输煤系统落煤带来的循环冲击荷载（落煤速度3-5m/s，单次冲击力超100kN）；三是风、雪、温度变化引发的环境荷载（冬季低温导致钢结构脆化，夏季高温使节点应力集中）。

## 二、火电厂煤棚钢结构疲劳损伤成因与演化规律

### 2.1 疲劳损伤核心成因

结合火电厂煤棚钢结构服役场景，疲劳损伤的形成源于荷载、环境、结构三类因素的叠加作用：

●循环荷载累积作用：

●风载对钢结构的循环作用与损伤机制

●煤棚所在区域年均阵风风速超12m/s（对应6级风），强风天气（风速≥17m/s）年均出现35次以上。风载作为典型动态荷载，会对煤棚檐口、屋面檩条等突出部位产生周期性冲击；当气流流经屋面时，形成“吸气-施压”

交替的风环境，使屋面钢梁每小时承受风荷载循环超280次，长期作用下产生交变应力（应力幅值45-75MPa）。当应力循环次数累计超10<sup>6</sup>次时，易在构件应力集中部位（如屋面钢梁与柱体连接节点、檩条拼接焊缝）萌生微裂纹——此类裂纹初始宽度虽仅0.02-0.05mm，但在持续风载循环下会逐步扩展，严重时导致节点连接刚度下降15%-20%。

●雪载的累积作用与动态调整损伤

●煤棚所在区域冬季积雪深度年均达30-50cm，屋面雪载峰值可达0.7kN/m<sup>2</sup>（对应大雪等级）。雪载对钢结构的影响体现在“累积-消融-再累积”的动态循环：初期积雪均匀覆盖时，屋面主梁承受稳定均布荷载；随着气温波动（昼夜温差超8℃），部分积雪消融后，剩余积雪在屋面形成局部堆载（堆载区域荷载超1.2kN/m<sup>2</sup>），使钢结构承受“加载-卸载”循环。数据显示，冬季积雪期内，堆雪区柱脚支座年均荷载变化超180次，荷载波动幅度达0.3-0.5kN/m<sup>2</sup>，这种频繁的荷载交替会加速柱体焊缝处的疲劳损伤演化，使构件疲劳寿命缩短20%-25%。

### 2.2 疲劳损伤演化规律

火电厂煤棚钢结构疲劳损伤演化可分为三个阶段，各阶段特征与危害明确：

●萌生阶段（服役0-5年）：构件应力集中部位（焊缝、螺栓孔）出现微裂纹（长度≤0.5mm），常规目视检查难以

发现, 构件力学性能无明显变化, 但裂纹扩展速率随循环荷载次数增加而加快;

●扩展阶段 (服役 5-15 年): 微裂纹扩展至可见范围 (长度 0.5-5mm), 裂纹深度达构件厚度的 10%-30%, 构件承载能力下降 15%-20%, 落煤冲击时会出现轻微振动异响;

●失稳阶段 (服役 15 年以上): 裂纹深度超构件厚度的 30%, 疲劳损伤进入快速扩展期, 承载能力下降超 40%, 在正常荷载下可能突发断裂, 引发局部结构坍塌。

某火电厂 2×600MW 机组煤棚监测数据显示, 落煤区钢梁在服役 8 年后, 焊缝疲劳裂纹检出率从 5% 升至 45%; 服役 12 年后, 30% 的裂纹长度超 3mm, 需紧急修复。

### 三、火电厂煤棚钢结构疲劳损伤检修技术体系

#### 3.1 疲劳损伤精准检测技术: 从“目视”到“智能”

构建“多层次检测体系”, 实现疲劳损伤的早期识别与量化评估:

●基础检测 (日常巡检):

●制定《煤棚钢结构日常巡检清单》, 重点检查落煤区钢梁、柱脚支座、网架节点等关键部位, 采用“目视 + 磁粉探伤”组合方式, 磁粉探伤对表面裂纹检出率 $\geq 90\%$ , 每季度开展 1 次, 某火电厂应用后, 表面裂纹发现时间提前 6 个月;

●安装振动传感器 (灵敏度 $\geq 0.1g$ ), 实时监测落煤区构件振动频率 (正常范围 2-5Hz), 当振动频率突变超 10% 时, 触发疲劳损伤预警, 某煤棚应用后, 成功预警 3 次钢梁早期疲劳损伤;

●进阶检测 (年度检测):

●采用超声探伤仪 (检测深度 $\leq 200mm$ , 精度 $\pm 0.1mm$ ) 检测焊缝内部裂纹, 重点排查 T 型焊缝、角焊缝等应力集中部位, 对堆煤区构件探伤覆盖率达 100%, 非堆煤区达 50%, 某火电厂检测发现 2 处长度 2mm 的内部裂纹, 避免裂纹扩展;

●运用无人机搭载红外热像仪 (分辨率 640×512) 检测屋面钢结构, 通过温度场分布差异识别构件变形 (温差超 2℃可能存在应力集中), 检测效率较人工提升 10 倍, 某煤棚应用后, 发现 4 处檩条变形隐患;

●主体结构竖向位移及腐蚀情况监测

●依据《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982-2014、《钢结构建筑施工测量及监测技术规范》T/CSPSTC 41-2019 及相关设计图纸、技术资料等开展监测工作。

●变形监测

在相同环境状态 (无风无雪) 的不同时期, 通过监测数据对比, 判断结构稳定性 (变形是否存在发展趋势)。监测仪器选用全站仪, 监测位置设定为: 主桁架上部通常布设三个监测点, 分别位于煤棚马道附近对应主桁架下弦杆中间位

置 (示意图如下: 马道)。

监测频次: 连续监测 3 年, 每年每个季度监测 1 次, 年均监测 4 次。

监测工作量: 每榀主桁架设立 3 个监测点, 需设置 4 个地面工作基点, 所有监测点每次均需完成监测, 每年开展 4 次完整监测。

结构变形分析需结合基础沉降数据综合判断。

●腐蚀监测

干煤棚内部工作环境恶劣, 煤炭挥发的有害气体会对钢结构和缆索产生长期腐蚀作用, 因此需定期检测干煤棚结构中的钢管、支座、索体、檩条、屋面板腐蚀情况, 确保结构正常使用。检测可参照《钢结构工程施工质量验收规范》GB50205 规定的方法与内容执行。

针对预应力索的检测, 核心内容为锈蚀情况检查, 需统计腐蚀钢丝数量以判断腐蚀程度, 必要时取样进行物理与力学试验, 明确钢丝实际状态。

拉索钢丝腐蚀后需考虑对索体强度的折减, 其中钢丝腐蚀等级与强度折减系数取值参照下表执行。根据拉索腐蚀程度等级确定是否更换索体, 换索阈值为断丝面积达 2% 或钢丝总面积损失超 10%。

腐蚀检测等级	特征	强度折减系数
5	无腐蚀	100%
4	轻微腐蚀	100%
3	轻微麻坑, 轻、中度腐蚀	75%
2	中度随机麻坑	50%
1	严重麻坑	25%
0	断丝	0

说明: 腐蚀监测内容摘自《大跨度预应力钢结构干煤棚设计与施工》

#### 3.2 差异化修复技术: 适配损伤程度与构件特性

根据疲劳损伤等级 (轻微、中度、严重) 与构件受力特性, 选择针对性修复技术, 避免“过度修复”或“修复不足”:

●轻微损伤修复 (裂纹长度 $\leq 1mm$ , 构件承载能力下降 $< 10\%$ ):

●焊缝表面裂纹: 采用“打磨 + 渗透检测”处理, 打磨深度超裂纹深度 1-2mm, 打磨后表面粗糙度 $\leq Ra25\mu m$ , 再通过渗透检测确认无残留裂纹, 某煤棚应用后, 修复合格率达 100%;

●中度损伤修复 (裂纹长度 1-5mm, 构件承载能力下降 10%-30%):

●焊缝内部裂纹: 采用“补焊 + 超声检测”方案, 补焊选用低氢型焊条 (如 E5015), 预热温度 $\geq 150^\circ C$ , 层间温度控制在 150-250℃, 补焊后进行 100% 超声检测, 确保无焊接缺陷, 某煤棚钢梁补焊后, 疲劳寿命恢复至原设计值的 90%;

●构件局部变形: 采用“热矫正 + 加固”方式, 对变形檩条进行局部加热 (温度 600-800℃), 配合机械矫正恢

复尺寸, 矫正后焊接加强肋(厚度 $\geq$ 原构件厚度的 80%), 某火电厂应用后, 变形构件承载能力提升 25%;

- 严重损伤修复(裂纹长度 $>5\text{mm}$ , 构件承载能力下降 $>30\%$ );

- 构件局部更换: 对开裂严重的钢梁段、节点板进行切割更换, 新构件材质与原构件匹配(如 Q355B 钢), 连接焊缝采用全熔透焊接, 焊后进行射线检测(RT), 某煤棚更换 3 段开裂钢梁后, 承载能力恢复至设计值;

- 结构加固: 对无法更换的关键构件(如网架主桁架), 采用“粘贴碳纤维布 + 体外预应力”加固技术, 碳纤维布抗拉强度 $\geq 3400\text{MPa}$ , 预应力值控制在 50–100MPa, 加固后构件承载能力提升 40%–60%, 某火电厂网架加固后, 疲劳寿命延长 8 年。

### 3.3 全生命周期预防机制: 从“修复”到“预防”

构建“设计 - 施工 - 运维”全流程预防体系, 降低疲劳损伤发生概率, 延长煤棚钢结构服役寿命:

- 设计阶段: 优化抗疲劳设计:

- 荷载计算时, 考虑落煤冲击的动态放大系数(取值 1.2–1.5), 堆煤区构件疲劳验算采用  $2 \times 10^6$  次应力循环;

- 节点设计避免应力集中, 如钢梁翼缘与腹板连接采用圆弧过渡(半径 $\geq 10\text{mm}$ ), 螺栓孔采用倒角处理(倒角半径 $\geq 2\text{mm}$ ), 某火电厂新煤棚设计后, 节点疲劳裂纹发生率降低 60%;

- 施工阶段: 控制初始缺陷:

- 焊接质量管控: 长焊缝采用全自动埋弧焊, 节点焊采用气体保护焊, 焊接参数偏差控制在  $\pm 5\%$  以内, 焊后进行 100% 无损检测, 确保无气孔、未熔合等缺陷;

- 安装精度控制: 支座位移偏差 $\leq 3\text{mm}$ , 构件垂直度偏差 $\leq 1/1000$ , 网架节点安装偏差 $\leq 5\text{mm}$ , 某煤棚施工后, 初始缺陷率从 15% 降至 3%;

- 运维阶段: 动态监测与维护:

- 建立煤棚钢结构疲劳损伤数据库, 记录检测数据(裂纹长度、腐蚀速率)、修复记录、荷载变化情况, 运用大数据分析疲劳损伤趋势, 提前 6–12 个月发出预警;

- 定期维护: 每 2 年开展 1 次防腐涂层维护(补涂破损部位), 每 3 年清理 1 次煤尘堆积(重点为节点部位), 每 5 年调整 1 次堆煤区域(避免长期集中堆载), 某火电厂应用后, 煤棚钢结构年均损伤增长率从 8% 降至 2%。

## 参考文献

- [1]陈绍蕃. 钢结构设计原理 [M]. 科学出版社, 2022.
- [2]王肇民. 工业建筑钢结构检测与修复技术 [M]. 中国建筑工业出版社, 2021.
- [3]中华人民共和国国家能源局. DL/T 5339–2019 火力发电厂土建结构设计规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [4]李国强. 钢结构疲劳损伤检测与评估技术 [J]. 工程管理, 2023, 7(5): 89–96.
- [5]赵宪忠. 腐蚀环境下钢结构疲劳性能研究 [M]. 同济大学出版社, 2020.

## 四、工程案例与效果验证

### 4.1 某 $3 \times 1000\text{MW}$ 火电厂煤棚钢结构疲劳损伤检修案例

#### 4.1.1 案例背景

该火电厂煤棚为大跨度门式刚架结构, 于 2012 年建成, 储煤量 3 万吨, 落煤区钢梁长期承受循环冲击。2022 年检测发现: 落煤区 20% 的钢梁焊缝存在 0.5–3mm 裂纹, 30% 的柱脚支座腐蚀深度超 0.3mm, 构件承载能力平均下降 18%, 存在局部坍塌风险。

#### 4.1.2 检修方案

- 损伤检测: 采用“磁粉探伤 + 超声探伤 + 应力波断层扫描”组合检测方式, 全面识别疲劳损伤, 共检出裂纹缺陷 32 处(其中内部裂纹 8 处)、腐蚀缺陷 45 处;

- 修复实施:

- 轻微损伤(15 处): 采用打磨修复 + 防腐补涂处理;

- 中度损伤(28 处): 采用补焊修复 + 热矫正处理;

- 严重损伤(14 处): 采用局部构件更换 + 碳纤维布加固处理;

- 预防措施: 建立疲劳损伤数据库, 安装振动传感器实施实时监测, 每 2 年开展 1 次全周期检测与维护。

#### 4.1.3 实施效果

- 损伤控制: 疲劳损伤检出率达 98%, 修复合格率 100%, 构件承载能力恢复至设计值的 95% 以上;

- 寿命延长: 经疲劳性能试验验证, 修复后构件疲劳寿命延长 6 年, 预计可安全服役至 2035 年;

## 五、结论与展望

火电厂煤棚钢结构疲劳损伤检修需构建“精准检测 - 差异化修复 - 全生命周期预防”的完整技术体系, 通过多层次检测技术实现损伤早期识别, 结合损伤程度选择适配修复方案, 依托全流程预防机制降低损伤发生概率。案例表明, 该体系可使煤棚钢结构疲劳损伤检出率提升至 98%, 修复后疲劳寿命延长 5–8 年, 显著提升火电厂储煤系统的安全性与经济性。