

Analysis of Maintenance and Management Strategies for Metallurgical and Chemical Equipment

Guangzhi Wei Hongxia Jin Haiying Zhao Yiran Wei

Baotou Xijun Rare Earth Co., Ltd., Baotou, Inner Mongolia, 014010, China

Abstract

As a foundational industry for the national economy, the metallurgical and chemical industry features equipment operation environments characterized by high temperature, high pressure, and strong corrosion. The maintenance and management levels of such equipment directly impact production safety, efficiency, and costs. This paper, based on the theory of equipment lifecycle, combines typical cases and empirical data from the industry to systematically analyze the current status and pain points of equipment management in the metallurgical and chemical sector. It proposes an optimized strategy of 'preventive maintenance-predictive maintenance-intelligent management' as a three-in-one approach. Research indicates that a scientific management system can reduce equipment downtime due to faults by 30%-45%, and decrease comprehensive maintenance costs by 15%-25%, thereby providing equipment assurance for high-quality development in the industry.

Keywords

metallurgical chemical equipment; full life cycle management; predictive maintenance; intelligent platform; fault prevention and control

冶金化工设备维护与管理策略分析

魏广志 靳宏霞 赵海营 魏亦然

包头市玺骏稀土有限责任公司，中国·内蒙古 包头 014010

摘要

冶金化工行业作为国民经济的基础性产业，其设备运行环境具有高温、高压、强腐蚀等特点，设备维护与管理水平直接影响生产安全、效率及成本。本文基于设备全生命周期理论，结合行业典型案例与实证数据，系统分析当前冶金化工设备管理的现状与痛点，提出“预防维护—预测维护—智能管理”三位一体的优化策略。研究表明，科学的管理体系可使设备故障停机率降低30%~45%，综合维护成本下降15%~25%，为行业高质量发展提供设备保障。

关键词

冶金化工设备；全生命周期管理；预测维护；智能平台；故障防控

1 引言

冶金化工行业是能源与资源密集型产业，其生产设备涵盖高炉、反应釜、压缩机等关键装置，运行环境具有“三高一强”特征——高温（如高炉炉缸温度达1500℃）、高压（如合成氨装置压力达32MPa）、高转速（如轧机转速达1800r/min）及强腐蚀（如酸碱处理设备）。设备故障不仅导致生产中断，更可能引发爆炸、泄漏等重大安全事故。据中国冶金工业协会统计，2022年全国冶金企业因设备故障导致的非计划停机平均时长为4.2小时/月，直接经济损失超300亿元；化工行业因设备腐蚀引发的事故占比达42%，年均损失约280亿元。

随着智能制造技术的发展，传统“故障后维修”模式

已难以适应现代生产需求。宝钢集团、万华化学等龙头企业通过引入预测维护与智能管理系统，实现了设备故障率的显著下降。本文以设备全生命周期管理为框架，从维护模式创新、技术应用、管理机制三个维度，构建适配冶金化工行业的设备管理体系，并结合具体案例验证策略有效性，为行业提供实践参考。

2 冶金化工设备维护与管理的现状及痛点

2.1 设备特性与管理要求

冶金化工设备按功能可分为冶炼设备（高炉、转炉）、反应设备（聚合釜、加氢反应器）、传动设备（泵、风机）及特种设备（压力容器、起重机械）等，其管理需满足三大核心要求：

1. 安全性优先：高压设备泄漏可能引发爆炸（如某化肥厂合成塔爆炸致直接损失1.2亿元）；
2. 连续性保障：生产线停机1小时将导致吨钢成本上

【作者简介】魏广志（1979-），男，中国内蒙古赤峰人，本科，工程师，从事化工冶金研究。

升 12~15 元，大型化工装置单日停机损失超千万元；

3. 精度控制：轧机辊缝偏差超 0.1mm 将导致产品质量降级，合格率下降 15%~20%。

2.2 当前管理模式的局限性

2.2.1 被动维修为主，计划性不足

调研显示，70% 的中小型冶金化工企业仍采用“故障停机后维修”模式。某民营钢铁企业 2021 年因轧机齿轮箱突发故障，导致生产线停机 18 小时，直接损失达 230 万元；某化工厂因未及时更换反应釜密封垫，造成介质泄漏，环保罚款及停产损失合计 890 万元。

2.2.2 数据割裂与经验依赖

设备数据分散在生产、维修、采购等部门，未形成统一管理平台。某焦化厂依赖老技师经验制定焦炉检修周期，未考虑原料成分变化对设备腐蚀的影响，2022 年发生上升管泄漏事故，煤气回收率下降 8%，年增能耗成本 450 万元。

2.2.3 技术与管理脱节

部分企业虽引入振动监测、油液分析等技术，但因缺乏专业团队，数据未有效转化为决策依据。某钢厂风机振动超标预警后未及时处理，最终导致轴承烧毁，停机维修损失达 150 万元。

2.2.4 成本控制失衡

部分企业为压缩成本减少必要维护。某氯碱企业连续 3 年未更换电解槽阳极，导致槽电压升高 15%，电耗增加 200 万 kWh/ 年，反而推高生产成本。

3 设备维护模式创新与技术应用

3.1 预防维护模式的优化

预防维护基于设备运行周期制定计划，核心是通过数据优化维护间隔。结合“故障浴盆曲线”理论，分阶段实施策略：

初期故障期（投用 1 年内）：加强磨合期监测。某铝厂对新电解槽每周进行 3 次槽温与电压巡检，初期故障率下降 40%，磨合期从 3 个月缩短至 1.5 个月；

偶然故障期（稳定运行阶段）：基于磨损数据调整周期。某钢管厂通过轧辊磨损量监测，将更换周期从 15 天延长至 20 天，年节约成本 120 万元；

耗损故障期（老化阶段）：强化维护频率。某钢铁企业对服役 15 年以上的高炉冷却壁，将检查周期从 3 个月缩短至 1 个月，避免炉壳烧穿风险。

案例 1：宝钢集团冷轧厂预防维护优化：宝钢股份分析 2018-2020 年连轧机组故障数据，发现工作辊轴承故障占比 35%，且 80% 发生在运行 1200 小时后。据此将维护周期从 1500 小时调整为 1200 小时，2021 年该类故障减少 62%，年节约维修成本 860 万元，设备综合效率（OEE）从 82% 提升至 89%。

3.2 预测维护技术体系构建

预测维护通过状态监测预判故障，核心技术包括：

振动监测：对旋转设备（风机、泵）采用 25.6kHz 采

样频率的加速度传感器，可识别早期轴承磨损（如某化工厂风机振动值从 0.1mm/s 升至 0.3mm/s 时，预警轴承内圈剥落）。

油液分析：通过光谱仪检测油中金属元素含量。某轧机齿轮箱油样中铁元素浓度从 5ppm 升至 30ppm 时，预测齿轮磨损趋势，提前更换避免齿面崩裂；

红外热成像：对高压配电柜温度监测，温升超 8℃ 即预警接触不良，某钢厂通过该技术避免了配电柜短路事故；

超声波检测：用于压力容器焊缝泄漏检测，灵敏度达 0.01mm/ 年的腐蚀速率，某化肥厂通过该技术发现合成塔焊缝微泄漏，及时修复避免爆炸风险。

效益数据：中国设备管理协会统计显示，预测维护较传统模式可降低故障停机率 30%~45%，维护成本 20%~30%，备件库存 15%~25%。

案例 2：万华化学 MDI 装置预测维护系统：万华化学在 MDI 装置部署 1200 余个传感器，构建设备健康管理平台。2022 年通过振动数据分析，提前 72 小时预测循环气压缩机叶轮不平衡故障，安排计划停机维修，避免非计划停机损失约 500 万元。系统运行后，装置年均故障停机时长从 18 小时降至 5.2 小时，OEE 提升至 92%。

3.3 主动维护与故障自愈技术

主动维护通过改善运行环境降低故障概率：

高温设备采用强制冷却系统：某钢厂将高炉热风炉温度控制精度从 ±50℃ 提升至 ±10℃，炉衬寿命延长 2 年；

腐蚀设备实施阴极保护：某化工厂对氯碱装置管道采用外加电流阴极保护，腐蚀速率从 0.2mm/ 年降至 0.05mm/ 年；

智能自愈技术：智能阀门定位器可自动补偿磨损量，某石化企业应用后阀门控制精度维持在 ±0.5% 以内，故障率下降 60%。

4 设备全生命周期管理体系构建

4.1 前期管理：选型与安装优化

设备前期管理（规划、采购、安装）决定全生命周期成本的 70%。

4.1.1 全周期成本评估模型

某企业连铸机选型时的评估矩阵如表 1 所示。

表 1 设备性能评估表

指标	权重	国产设备得分	进口设备得分
初始投资（万元）	0.2	85	60
预计寿命（年）	0.3	60	90
维护成本（万元/年）	0.25	70	50
故障停机损失	0.25	50	90
综合得分	-	66.5	73.5

最终选择进口设备，虽初始投资增加 30%，但 10 年全周期成本降低 15%。

4.1.2 安装精度控制

轧机安装时牌坊垂直度控制在 0.03mm/m 以内，空载试车 48 小时后进行 110% 额定负载测试，某企业通过该标

准使轧机精度寿命延长 1 倍。

4.2 运行阶段：精细化管理体系

4.2.1 三维度绩效指标

可靠性：平均故障间隔时间（MTBF）、故障停机率；

经济性：单位产品维护成本、OEE；

安全性：特种设备定检率、隐患整改率。

某钢铁企业 2022 年关键设备 MTBF 达 420 小时，较行业平均高 150 小时；OEE 达 89.7%，超行业平均 5.3%。

4.2.2 标准化点检流程

制定《设备点检作业指导书》，明确：

路线：按“工艺流向 + 故障高发区优先”设计（如高炉点检优先检查风口、冷却壁）；

周期：关键泵类每 2 小时一次，辅助设备每日一次；

记录：二维码扫码实时上传数据，某企业应用后数据准确率从 75% 提升至 98%。

4.3 后期管理：退役与根因分析

4.3.1 退役评估与再利用

某企业对服役 10 年的转炉评估后，将炉壳翻新再利用，节约新购成本 60%；电机、减速机等核心部件经检测合格后用于辅助生产线，年降成本 280 万元。

4.3.2 故障根因分析（RCA）

某化工厂反应器泄漏事件分析：

直接原因：密封面垫片老化；

根本原因：维护规程未考虑介质温度波动对垫片寿命的影响；

修订规程后，将垫片更换周期与温度波动系数关联，类似故障未再发生。

5 智能管理平台建设与应用

5.1 数据采集与整合

构建“物联网 + 工业互联网”网络；

底层设备：通过 PLC、DCS 采集实时数据（采样间隔 1~10 秒）；

监测系统：振动、温度等传感器数据（间隔 1~60 分钟）；

管理数据：维护记录、备件库存等（实时更新）；

某钢铁企业平台日均采集数据 800GB，实现 3000 余台关键设备全联网。

5.2 智能分析与决策模型

5.2.1 设备健康度评价模型

基于多参数构建健康指数（HI）：

$HI = \sum_{i=1}^n w_i \times (1 - \frac{x_i - x_{min,i}}{x_{max,i} - x_{min,i}})$

其中， w_i 为权重， x_i 为实测值， $x_{min,i}$ 、 $x_{max,i}$ 为正常范围。 $HI < 0.6$ 时触发预警，某企业应用后故障预警准确率达 92%。

5.2.2 剩余寿命预测（RUL）

采用 LSTM 神经网络预测设备 RUL，某轧机 RUL 预

测误差控制在 5% 以内，为维护计划提供精准依据。

5.3 平台架构与效益

平台分三层架构见表 2。

表 2 冶金化工设备智能管理平台架构图

层级	构成	数据流向	效果
感知层	传感器、智能仪表	数据采集—分析—决策—执行	维修工单响应时间从 4 小时缩短至 1.5 小时；备件库存周转率提升 25%；年降管理成本 1200 万元
平台层	云服务器、AI 引擎		
应用层	设备监控、维护管理等模块		

6 管理机制与保障体系

6.1 组织架构优化

建立“设备总监—区域工程师—点检员”三级体系，推行 TPM（全员生产维护）：

生产班组：负责日常点检与微小缺陷处理；

维修团队：实施专业维护与抢修；

技术部门：制定策略与标准。

某冶炼厂推行 TPM 后，操作人员发现的隐患占比从 15% 升至 60%，故障发现及时率提升 40%。

6.2 成本控制策略

6.2.1 维护成本结构优化

企业实施新策略后成本结构变化见表 3。

表 3 企业实施新策略后成本结构变化表

维护类型	实施前占比	实施后占比
预防维护	30%	55%
预测维护	5%	25%
故障维修	65%	20%

6.2.2 备件 ABC 分类管理

A 类（轧机工作辊）：供应商寄售，保障库存；

B 类（阀门）：动态调整采购周期；

C 类（螺栓）：集中采购降低成本。

某冶金企业维护成本与效益趋势见表 4。

表 4 某冶金企业维护成本与效益趋势表

项目	实施前数值	实施后数值
故障停机损失	2800 万	980 万
维护成本	3200 万	2500 万
设备寿命	8 年	10 年
年度综合效益提升	-	年均增加 4200 万元

6.3 人员能力提升

构建“技能 + 知识 + 数字化”培训体系：

技能培训：焊工、钳工等级认证；

知识培训：设备原理、材料性能；

数字化培训：数据分析工具、智能平台操作。

某企业培训后，维修人员处理复杂故障时间从 8 小时降至 3 小时，培训投入产出比达 1:5。

7 结论与展望

冶金化工设备维护与管理需从“被动应对”转向“主动防控”，通过预防维护与预测维护结合、全生命周期管理与智能平台支撑，实现安全性、经济性与连续性的统一。实践表明，科学的管理体系可显著降低故障率与成本，提升生

产效率。

参考文献

- [1]高虎.A钢铁企业设备管理优化研究[D].云南师范大学,2023.
- [2]何立军.山东A钢铁公司精益设备管理应用及对策研究[D].山东师范大学,2023.
- [3]张思岩.多种生产设备预知性联合维修决策模型研究[D].沈阳工业大学,2022.