

炼钢生产线关键机械设备可靠性评估研究

石岳嵩

安阳钢铁股份有限公司 河南 安阳 455004

摘要：针对炼钢生产线关键设备工况恶劣、故障多发、可靠性评估精度不足的现场问题，本文以转炉、连铸机、液压系统等核心设备为研究对象，梳理炼钢生产工艺流程与设备配置特点，总结设备典型故障模式及生产影响。结合钢厂实际运维数据，建立多维度可靠性评估指标体系，采用熵权层次分析组合算法与优化模糊评价方法，搭建适配炼钢工况的可靠性评估模型。通过样本数据校验与参数修正，完成模型可行性验证。研究结果可有效识别设备运行薄弱环节，精准量化设备可靠性水平，可为炼钢设备运维优化、故障防控及安全生产管理提供实际参考。

关键词：炼钢生产线；关键机械设备；故障模式与影响；可靠性评估模型；算法设计

引言：炼钢生产属于连续性、高强度的工业生产流程，关键机械设备长期承受高温辐射、重载冲击与粉尘腐蚀，设备损耗快、故障随机性强，一旦出现失效极易造成生产线停机，影响生产进度与产品质量，甚至引发安全事故。目前多数钢铁企业设备可靠性评价多依赖人工经验与单一指标评判，评估方式较为粗放，难以精准反映设备真实运行状态。为解决现场评估精度低、故障预判滞后等问题，本文结合安阳钢铁生产现场设备运行与检修台账，系统开展关键设备故障分析与可靠性评估研究，旨在建立贴合生产实际的量化评估体系，提升设备精细化运维管理水平。

1 炼钢生产线关键机械设备及可靠性概述

1.1 炼钢生产线核心工艺流程概述

现代炼钢生产线以转炉、电炉冶炼为核心，形成连续化、一体化的生产作业流程，整体工序衔接紧密、自动化程度较高。生产线主要涵盖原料预处理、冶炼、精炼、连铸四大核心环节，各工序设备连续运行，直接影响生产效率与产品质量。原料预处理环节主要完成铁水脱硫、脱磷作业，为后续冶炼提供合格原料；冶炼环节依托转炉或电炉，通过氧化还原反应去除铁水中杂质，调配钢水成分与温度；精炼环节针对钢水进行微调，精准控制合金成分、降低杂质含量，保障钢材性能；连铸环节将合格钢水连续浇铸为钢坯，实现炼钢工序连续化产出。

1.2 炼钢关键机械设备界定与分类

结合炼钢生产工艺特性与设备作业优先级，可将生产线设备划分为关键核心设备与辅助配套设备，其中直接决定生产连续性与产品质量的设备为本次研究的关键机械设备。核心冶炼设备主要包括炼钢转炉、电弧炉、精炼炉，是钢水冶炼成型的核心装置；输送与成型设备

涵盖连铸机、钢包、中间包及辊道输送设备，承担钢水转运、浇铸成型工作；辅助关键设备包含除尘设备、冷却循环设备、液压传动设备，为生产线稳定运行提供保障。这类关键设备长期处于高温、重载、粉尘、交变载荷的恶劣工况，损耗速率快、故障概率高，其运行状态直接关乎整条生产线的安全稳定运行，是可靠性评估的核心对象。

1.3 机械设备可靠性评价指标

结合炼钢设备运行特性，可靠性评价指标如下：

（1）设备平均无故障工作时间，用于表征设备连续稳定运行的能力，是判断设备核心可靠性的基础参数；（2）设备平均修复时间，反映设备故障后的检修效率，直接影响生产停机时长；设备有效作业率作为综合指标，体现设备实际有效运行时长与总作业时长的占比，直观体现设备利用效率。（3）将故障频次、设备完好率作为辅助评价指标，弥补单一指标评价的局限性^[1]。

2 适用于炼钢设备的可靠性分析方法

以下两种适配性高、工程实用性强的可靠性分析方法，用于设备故障研判与可靠性评估，具体方法如下：

（1）故障模式与影响分析法（FMEA）。该方法为工业设备常用的可靠性定性分析方法，适配炼钢转炉、连铸机、液压系统等关键设备。通过梳理设备各零部件的故障模式、故障诱因，逐一分析各类故障对单体设备、整条生产线的影响程度，筛选出高风险故障点。可精准识别炼钢设备磨损、渗漏、传动失效等典型故障的危害等级，为薄弱设备管控提供针对性依据。（2）数理统计可靠性分析法。该方法以设备历史运行数据、故障记录、检修台账为基础，属于定量分析方法。通过统计设备故障间隔时间、修复时长、运行合格率等核心数据，计算设备故障率、平均无故障工作时间等可靠性参数，量化

评判设备运行稳定性。贴合炼钢企业数据化运维模式,可直观反映设备真实可靠性水平,为模型构建和可靠性评价提供数据支撑^[2]。

3 炼钢关键设备故障模式与影响分析

炼钢关键设备长期处于高温热辐射、重载冲击、粉尘腐蚀及连续启停的复杂工况环境,零部件磨损、老化、失效问题频发。设备故障模式与影响如下:(1)机械传动类故障。该故障多见于转炉倾动机构、连铸机辊道、钢包行走装置等设备,主要包含齿轮磨损、轴承卡滞、传动轴偏移、链条松动等失效形式。长期交变载荷与启停冲击是故障主要诱因,故障发生后会导致设备传动卡顿、运行偏移、转速不稳,造成钢水浇铸不均匀、转炉倾动角度偏差,直接影响冶炼节奏与钢坯成型质量,严重时引发设备卡机停机。(2)液压与密封类故障。炼钢各类炉体升降、夹持、启闭装置均依赖液压系统运行,常见故障为液压油渗漏、阀体堵塞、压力不足、密封件老化失效。高温环境会加速密封部件老化,粉尘杂质易造成油路堵塞,引发系统压力波动、动作滞后、定位不准等问题,导致设备操作精度下降,工序衔接脱节,增加生产安全隐患。(3)冷却与耐热结构故障。转炉炉体、连铸结晶器、水冷烟道等设备长期承受高温作用,易出现水冷管路堵塞、管壁锈蚀、衬体脱落、耐热层开裂等故障。冷却系统失效会造成设备局部过热、结构变形,缩短设备使用寿命,严重时会引起钢水过热、设备烧损,造成非正常停产事故。

各类故障并非独立发生,多存在交叉耦合效应,单一零部件失效极易诱发连锁设备故障。炼钢生产线连续作业特性,使得设备微小故障无法及时停机检修,持续运行会加速故障劣化,扩大设备损伤范围。故障频发不仅提升设备运维成本、增加备件消耗,还会造成生产节奏紊乱、产品质量波动,是制约炼钢生产线高效、稳定、低成本运行的核心因素^[3]。

4 炼钢关键机械设备可靠性评估指标体系构建

为精准量化关键设备运行状态,规避传统经验评价的片面性,下文结合炼钢生产连续作业、高温重载的工艺特点、设备典型故障规律及现场实际运维台账数据,遵循科学、贴合实际、可量化的原则,构建适配炼钢关键机械设备的多层级可靠性评估指标体系,为后续模型综合评估、设备风险研判提供标准化、系统化的依据。

(1) 指标体系构建原则。以炼钢连续化安全生产需求为核心,确立三项核心原则。科学性原则依托设备可靠性理论与故障机理,结合钢铁行业设备评价规范,保障指标选取规范合理、逻辑严谨;针对性原则结合炼钢设

备高温、重载、粉尘腐蚀、交变载荷的恶劣工况特征,剔除通用性强、工业适配性弱的冗余指标;可操作性原则依托企业现有在线监测数据、运维台账、检修记录,确保各项指标可统计、可量化、可分析,满足工程落地要求。(2) 评估指标筛选与确定。结合炼钢设备故障类型与运行特性,从三个维度筛选核心指标。设备运行稳定性维度包含平均无故障时间、设备故障率、故障间隔均匀度;设备运维适配维度包含平均修复时长、故障返修率、日常巡检合规率;设备运行效益维度包含设备有效作业率、工况适配合格率。各项指标相互补充、相互制约,全面覆盖设备运行、故障、检修、产出全流程状态。(3) 指标权重确定与体系确立。结合炼钢生产不同设备的工艺重要度差异,通过数据对比与现场工况分析,对各项指标进行差异化权重分配,重点提升故障率、有效作业率等直接影响生产连续性的核心指标权重占比。最终形成多层次、差异化的可靠性评估指标体系,有效规避单一指标评价的片面性,保障评估结果贴合生产实际,提升整体评价的精准度与可信度^[4]。

5 炼钢生产线关键机械设备可靠性评估模型与算法设计

5.1 评估模型架构搭建

结合炼钢设备可靠性评估的多指标、非线性、强干扰特点,搭建多层级综合评估模型,整体架构分为数据输入层、指标运算层、可靠性评估层与结果输出层,各层级独立运行且逐级联动,适配工业现场数据采集与评估需求。(1) 数据输入层。该层级为模型基础支撑,主要接入炼钢设备运维台账数据、实时运行监测数据、故障统计数据,涵盖设备故障率、无故障运行时间、修复时长、作业合格率等全部评估指标数据。同时对现场异常数据、缺失数据进行初步筛选剔除,保障输入数据的真实性与有效性,为后续运算提供数据基础。(2) 指标运算层。依托预设的指标权重,对稳定性、运维性、效益性三类评估指标进行标准化处理,消除不同指标量纲差异。结合炼钢设备工况特点,修正极端生产工况下的指标偏差,规避连续生产、重载启停等特殊场景造成的评估误差,实现各项指标的标准化量化运算。(3) 评估与输出层。根据指标运算结果,划分设备可靠性等级,精准识别设备运行薄弱环节,最终输出单设备可靠性评分与生产线整体可靠性评估结果,兼顾单体设备评价与整体工况研判,贴合炼钢生产线联动运行的生产特性。

5.2 核心算法选型与优化

基于炼钢设备可靠性评估多维度、权重差异化的需求,对比传统层次分析法、熵权法、模糊综合评价法的

适配性,选用组合算法完成模型运算,同时针对工业场景缺陷进行优化,提升评估精准度。(1)基础算法选型。采用熵权-层次分析组合算法计算指标权重,结合主观经验与客观数据优势。层次分析法依托炼钢工艺运维经验,界定核心指标与次要指标的权重差异,贴合生产实际;熵权法依托设备历史运行大数据,通过数据离散程度客观赋值,减少人工主观评判误差,规避单一算法权重失衡的问题。(2)算法优化改进。传统模糊评价算法存在边界模糊、分级不精准的问题,无法适配炼钢设备可靠性梯度化差异特征。本次研究对算法隶属度函数进行优化,结合炼钢设备故障阈值、运维标准划定分级边界,细化可靠性优秀、良好、一般、较差四个等级的判定区间,解决传统算法评估结果趋同、区分度不足的问题。同时引入偏差修正系数,针对高温连续作业、设备老化等特殊工况进行结果修正,提升算法现场适配性^[5]。

5.3 模型验证与参数校准

模型搭建与算法优化完成后,结合钢厂实际生产数据开展验证试验,校准模型核心参数,排查运算偏差,确保模型评估结果真实有效,满足工业应用要求。(1)样本数据验证。选取生产线转炉、连铸机、液压系统三类核心关键设备近一年的运行故障数据、检修记录作为验证样本,代入模型进行可靠性评估。将模型评估结果与设备实际运行状态、现场运维人员研判结果进行对比,核验模型的贴合度与准确性。(2)参数校准优化。针对验证过程中出现的局部偏差,对模型指标权重系数、算法隶属度参数、工况修正系数进行微调。重点校准故障率、有效作业率等核心指标的运算参数,弱化低影响指标的干扰,强化故障耦合因素对可靠性的影响权重,匹配炼钢设备故障连锁反应的实际特征。(3)模

型可行性确认。完成多组样本反复验证与参数校准后,模型评估结果与现场实际工况误差控制在合理区间,可精准反映不同设备的可靠性差异,有效识别生产线设备薄弱环节。该模型运算逻辑清晰、数据适配性强,能够满足炼钢生产线关键机械设备可靠性量化评估的实际需求,具备良好的工程应用价值。

结束语:本文通过梳理炼钢生产线核心设备运行工况与故障特征,明确了机械传动、液压密封、高温冷却三类主要故障的危害形式。依托设备全运行周期数据,构建了涵盖稳定性、运维性、效益性的综合评估指标体系,完成多层次可靠性评估模型搭建与算法优化。经实例数据验证,优化后的组合评估算法可有效修正复杂工况下的评价偏差,能够精准区分不同设备的可靠性差异。研究成果可为炼钢车间设备检修计划制定、薄弱设备改造及预防性运维体系建设提供技术支撑,对保障炼钢生产线稳定连续生产具有实际应用价值。

参考文献

- [1]陆光辉.炼钢厂精炼炉机械设备管理维护[J].机械与电子控制工程,2025,7(5):11-12.
- [2]李绍炀.机械设备的可靠性及故障诊断方法研究[J].机械管理开发,2022,37(2):135-137.
- [3]王海生.炼钢厂机械设备自动维护与管理技术解析[J].中国科技期刊数据库工业A,2022(1):112-115.
- [4]闫奇峰.炼钢厂精炼炉机械设备管理维护研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(9):097-100.
- [5]王兆祥.炼钢厂设备可靠性分析与改进方法研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(7):0035-0038.