

基于风险预控的煤电锅炉本质安全设计与生产全流程管控实践

郭强, 苏承伟

黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050017

摘 要 : 本文聚焦基于风险预控的煤电锅炉本质安全设计与生产全流程管控实践, 阐述了设计阶段的风险预控总体策略, 探讨了实现本质安全的具体设计要点。在生产全流程管控实践上, 介绍了全流程风险预控管控体系的构建; 针对运行、维护与检修、应急管理及事故后控制等阶段的风险预控措施进行了详细说明。此外, 还分析了数字化孪生技术、大数据与人工智能、一体化安全管理信息平台等数字化与智能化技术在煤电锅炉风险预控中的应用, 研究旨在为提升煤电锅炉的安全性能、保障其安全稳定运行提供理论与实践参考。

关 键 词 : 煤电锅炉; 风险预控; 本质安全设计; 全流程管控

Practice of Intrinsic Safety Design and Full-Process Management and Control of Coal-Fired Power Plant Boilers Based on Risk Precontrol

Guo Qiang, Su Chengwei

Huanghe Hydropower Development Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000

Abstract : This paper focuses on the practice of intrinsic safety design and full-process management and control of coal-fired power plant boilers based on risk precontrol. It elaborates on the overall strategy of risk precontrol in the design stage and explores the specific design points for achieving intrinsic safety. In terms of full-process management and control practices, the paper introduces the construction of a full-process risk precontrol management and control system. Detailed explanations are provided for risk precontrol measures in stages such as operation, maintenance and repair, emergency management, and post-accident control. Additionally, the paper analyzes the application of digitalization and intelligent technologies such as digital twin technology, big data and artificial intelligence, and integrated safety management information platforms in risk precontrol of coal-fired power plant boilers. The research aims to provide theoretical and practical references for improving the safety performance of coal-fired power plant boilers and ensuring their safe and stable operation.

Keywords : coal-fired power plant boilers; risk precontrol; intrinsic safety design; full-process management and control

引言

本质安全理念强调从源头消除或降低风险, 通过设计优化、技术升级和管理强化, 实现“即使发生人为失误或设备异常, 也能有效避免事故发生”的目标。在此背景下, 将风险预控思想融入煤电锅炉的本质安全设计, 并延伸至生产全流程管控, 成为提升锅炉安全水平的关键路径。本文正是基于这一现实需求, 围绕基于风险预控的煤电锅炉本质安全设计与生产全流程管控展开研究。通过分析设计阶段的风险预控策略、系统与设备的本质安全优化要点, 探讨生产全流程中运行、维护、应急等环节的风险管控实践, 并结合数字化孪生、大数据等技术应用, 旨在为构建煤电锅炉全生命周期安全保障体系提供理论参考与实践路径, 助力煤电行业实现安全、高效、可持续发展。

一、基于风险预控的煤电锅炉本质安全设计

(一) 设计阶段的风险预控总体策略

作为能量转换的核心, 锅炉性能直接影响发电效率 and 环境排放。随着环保要求的日益严格和经济运行需求的提升, 火电厂锅

炉运行控制的节能和效率优化需求日益迫切^[1]。在煤电锅炉设计初始阶段, 制定风险预控总体策略是保障其本质安全的基础, 需构建全面系统的防控体系。要全面识别风险, 收集同类锅炉运行数据、事故案例和技术资料, 运用专业方法找出全生命周期可能存在的风险点。科学评估风险, 依据发生可能性、后果严重程度等

指标量化或定性分析，确定风险等级^[2]。针对高等级风险制定专门防控措施，中低等级风险也纳入体系以防升级。明确预控目标，确保设计中各类风险被控制在合理程度，保障锅炉在正常和异常情况下的安全性。同时考虑到运行环境、技术条件等变化会导致风险改变，设计阶段需制定定期重新评估风险和调整预控措施的制度，以保证策略始终有效。

（二）系统与工艺的本质安全设计

煤电锅炉的系统与工艺设计是实现本质安全的关键环节，需从源头上消除或降低风险^[3]。在系统设计方面，要注重系统的可靠性和冗余性。同时系统的各个组成部分之间要实现良好的协同工作，避免因某一部分的故障而引发整个系统的瘫痪。在工艺设计上，要优化燃烧工艺，提高燃料的燃烧效率，减少有害物质的排放。通过合理设计炉膛的结构、布置燃烧器的位置等，使燃料在炉膛内能够充分燃烧，降低因燃烧不充分而导致的结焦、积灰等问题的发生概率^[4]。此外，还要制定科学合理的工艺参数，并通过有效的控制手段确保这些参数在正常范围内波动，避免因参数异常而引发安全事故。

（三）关键设备与结构的本质安全设计

关键设备与安全性能对煤电锅炉整体安全影响重大，设计中需高度重视^[5]。受压元件需按相关标准规范设计制造，选用高强度、高韧性、耐腐蚀的优质材料并严格质检，结构设计要避免应力集中，通过合理布局和尺寸设计使受力均匀，提升抗疲劳性能与使用寿命^[6]。燃烧器设计要保证燃料稳定燃烧和良好雾化，依据燃料特性确定类型和参数以实现充分混合、提高效率，同时具备良好调节性能，能随负荷变化调整燃料和空气供应量，确保燃烧稳定。锅炉支撑结构和框架需合理设计，保证足够强度和刚度以承受自重、介质压力及外部荷载，且布置均匀合理，避免因受力不均导致变形或损坏。

（四）仪表、控制与安全联锁系统的本质安全设计

仪表、控制与安全联锁系统是保障煤电锅炉安全运行的重要手段，其本质安全设计可及时处理异常、防事故发生扩大^[7]。仪表系统需保证测量数据准确可靠，选用高精度、高稳定性仪表，合理布置安装位置以精准测量关键部位参数，同时要具备良好的抗干扰能力以防数据失真^[8]。控制系统要实现锅炉运行的精准控制，采用先进算法和设备，实时控制调节燃烧、给水、蒸汽温度等参数，使锅炉处于最佳运行状态，且需有良好的响应速度和稳定性，及时处理扰动以保证参数稳定。安全联锁系统作为最后一道安全防线，设计要确保异常时及时动作，包含多种联锁保护功能，当参数超安全值时，能自动报警并采取保护措施，保障锅炉安全。

（五）人机工程与应急设计

人机工程与应急设计旨在提高操作人员工作效率和安全性，以及事故时能迅速有效应急处理。人机工程设计需考虑操作人员生理和心理特点，操作界面简洁明了，仪表、按钮等布置符合人体工程学，便于观察操作；操作环境保持良好通风、照明和温度，减少疲劳与误操作；同时提供必要培训指导，让操作人员熟悉流程和安全注意事项^[9]。应急设计要制定完善应急预案和措施，预案包含报警程序、救援组织机构、处置方法等，且定期演练以

确保操作人员能迅速响应处理；锅炉设计中设置必要应急设备设施提供保障，还需考虑事故时的物料隔离和排放措施，避免事故扩大蔓延。

二、煤电锅炉生产全流程风险预控管控实践

（一）全流程风险预控管控体系构建

构建煤电锅炉生产全流程风险预控管控体系是安全生产的重要保障，需覆盖其从启动到停运的全生命周期，贯穿风险预控理念^[10]。具体要做到，明确各部门和人员职责，成立由企业高层领导任组长，生产、技术、安全、维护等部门负责人及专业技术人员组成的专门管理小组，确保各项工作有人负责；建立完善包括风险识别与评估、管控措施执行、监督检查、考核奖惩等在内的管理制度，以规范流程，保障工作有序开展；搭建信息共享平台，利用先进技术建立全流程风险信息管理系统，实现信息实时共享，提高效率与准确性；加强企业文化建设，通过培训和宣传教育培养员工风险预控意识，使其掌握相关方法技能，形成“人人讲安全、事事讲风险”的良好氛围。

（二）运行阶段的风险预控

运行阶段是煤电锅炉生产中风险集中的阶段，做好此阶段风险预控至关重要。需加强运行参数监控，实时监测蒸汽压力、温度、水位等关键参数，确保在正常范围波动，发现异常及时调整以防事故。要做好设备巡检，定期检查受压元件、燃烧器等设备的运行状态及有无异常，发现问题及时记录并安排维修，同时做好巡检记录，为后续设备维护和风险评估提供依据。此外要严格执行操作规程，操作人员经专业培训后，需熟悉规程并严格按其操作，进行启炉、停炉等重要操作时遵守步骤，避免因操作不当引发安全事故。

（三）维护与检修阶段的风险预控

维护与检修阶段对保障煤电锅炉设备性能和安全运行至关重要，风险预控工作不可忽视。维护阶段需制定科学的维护计划，依据设备运行状况、使用年限及制造商建议，明确维护内容、周期和方法，包括清洁、润滑、紧固、检查仪表精度等，同时做好记录，及时处理潜在问题。检修阶段要严格遵守规程和安全规定，检修前制定详细方案，明确范围、步骤和安全措施；进入受限空间检修的人员需经严格安全培训交底，配备防护用品；检修中按方案操作，避免违章；检修后全面检查试验，确保设备性能达标方可投运。此外，要加强人员管理，维护与检修人员需具备相应专业技能和资质，熟悉设备情况，定期接受培训考核以提升业务水平和安全意识。

（四）应急管理与事故后风险控制

应急管理与事故后风险控制是煤电锅炉生产全流程风险预控管控的重要部分，能在事故发生时减少人员伤亡和财产损失，防止事故再发。应急管理方面，要制定完善应急预案，依据可能发生的事故类型明确应急处置措施、救援组织机构、物资储备等；定期组织演练，让员工熟悉流程方法，提高应急响应能力；建立应急救援队伍，配备必要设备物资，确保能迅速开展救援。事故

后风险控制方面,要及时调查分析事故,组织专业人员查明直接和间接原因,确定责任方;根据调查结果制定整改措施,消除隐患防类似事故;评估损失,做好善后,安抚受害者及家属。另外要建立事故信息反馈机制,及时将调查结果、整改措施等反馈给相关方,使其吸取教训;将事故信息纳入风险评估体系,重新评估相关风险并调整管控措施,不断完善风险预控管控体系。

三、数字化与智能化技术在风险预控中的应用

(一) 数字化孪生技术

数字化孪生技术是煤电锅炉风险预控的新兴高效手段,通过构建与物理锅炉完全映射的数字模型提供全新视角和方法。该模型借助遍布关键部位的传感器,实时同步物理锅炉的温度、压力等参数和运行状态,精准模拟运行情况,方便操作人员和管理人员随时了解细微变化,及时发现潜在风险点。基于此模型可进行多种模拟仿真实验,提前制定应对措施以避免实际运行风险;在维护与检修阶段,能模拟检修过程,发现方案问题、优化流程,降低检修风险。此外,该技术可为员工培训提供逼真模拟环境,新员工可在数字模型上练习操作,熟悉运行流程和应急处理方法,提高实际操作安全性。

(二) 大数据与人工智能

大数据与人工智能技术在煤电锅炉风险预控中作用日益重要,能从海量数据中挖掘潜在风险信息,实现智能化预警和控制。大数据技术可收集、存储和分析生产全流程的大量数据,包括运行参数、设备状态等,通过深入分析发现隐藏关联和规律,识别风险因素。人工智能技术利用大数据分析结果构建智能风险预警模型,依据实时运行数据自动识别异常并预警,相比人工监控更准确及时,能在风险萌芽阶段警报,争取处理时间。此外,人工智能可用于锅炉控制优化,通过智能算法实时调整运行参数,使锅炉处于最佳状态,降低参数异常引发风险的可能;还能

辅助制定维护计划,根据设备运行状态和历史数据预测剩余寿命,提前安排维护,避免设备故障导致安全事故。

(三) 一体化安全管理信息平台

一体化安全管理信息平台是整合煤电锅炉风险预控相关信息和功能的综合性平台,能实现信息集中管理与高效利用,提升风险预控整体效能。平台可整合设计资料、运行数据等各类信息形成完整数据库,通过统一标准和接口实现不同系统设备的信息共享交互,避免信息孤岛,方便管理人员查询信息以支持决策。在风险预控上,平台能实时展示运行状态和风险预警信息,实现风险评估自动化标准化并自动生成报告,提高效率和准确性;还可管理跟踪维护检修工作,制定计划、安排任务、记录信息,确保按流程进行,对问题隐患及时下达整改通知并跟踪消除。此外,平台为应急管理提供支持,事故时能快速调取应急预案等信息辅助决策,记录处理全过程,为事后分析总结、完善应急体系提供依据。

四、结束语

本文从本质安全设计与生产全流程管控两个维度,系统阐述了基于风险预控的煤电锅炉安全管理体系。实践表明,这种“设计-管控-技术”三位一体的风险预控模式,既能从根本上降低锅炉固有风险,又能通过全流程闭环管理及时化解运行中的动态风险,为煤电锅炉的安全高效运行提供了全方位保障。随着新能源与煤电联营模式的推进、环保标准的进一步收紧,煤电锅炉的风险因素将更趋多元化。因此需持续深化本质安全设计理念,推动数字化技术与安全管理的深度融合,完善风险预控的标准化与智能化体系,同时加强人员安全素养培训,形成“技术防控+管理优化+人员赋能”的协同机制。唯有坚持“预防为主、源头管控、全程防控”的原则,才能有效应对行业发展中的新挑战,为煤电行业的绿色低碳转型与安全可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 闫小瑞,解小军,王昊泳.基于模糊关联规则的火电厂锅炉设备故障智能预警研究[J].自动化应用,2025,66(1):155-158. DOI:10.19769/j.zdhy.2025.01.044.
- [2] 刘学莹.350MW超临界锅炉末级过热器壁温计算及氧化膜热应力分析[D].华北电力大学,华北电力大学(北京),2024.
- [3] 白哲,陈晓龙,杨元成.超超临界电站锅炉水冷壁管横向开裂原因分析[J].电力安全技术,2024,26(4):60-63. DOI:10.3969/j.issn.1008-6226.2024.04.019.
- [4] 胡仙楠,邓博宇,刘欢鹏,等.循环流化床锅炉负荷快速调节技术现状及发展趋势[J].洁净煤技术,2023,29(6):11-23. DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.SD23060101.
- [5] 刘繁旭,施龙平,杨金泽.燃煤锅炉水冷壁管的沉积物氧化腐蚀特征与力学特性分析[J].工业加热,2024,53(4):45-48,54. DOI:10.3969/j.issn.1002-1639.2024.04.011.
- [6] 梁双荣,徐艳,段丽,等.煤电机组掺烧生物质需关注问题及分析[J].节能,2025,44(1):138-140. DOI:10.3969/j.issn.1004-7948.2025.01.037.
- [7] 刘军,郑志行,吴爱军,等.600MW超临界锅炉水冷壁高温腐蚀综合治理应用研究[J].锅炉技术,2022,53(6):65-71. DOI:10.3969/j.issn.1672-4763.2022.06.012.
- [8] 张朋.基于LightGBM模型的电站锅炉运行目标值优化[D].华北电力大学,华北电力大学(保定),2023.
- [9] 周西伟.基于数据挖掘的锅炉岛运行能效诊断及优化研究[D].广东:华南理工大学,2023.
- [10] 王中玉.锅炉长周期运行寿命管理模式应用分析[J].电气技术与经济,2024(2):287-290. DOI:10.3969/j.issn.1673-8845.2024.02.088.