

矿井通风系统可靠性研究

陈冬冬

陕西煤业化工建设（集团）有限公司矿建二公司 陕西 西安 710000

摘要：矿井通风系统作为保障矿井安全生产的核心环节，其可靠性直接关系到井下作业人员的生命安全和矿山经济效益。本研究聚焦矿井通风系统可靠性，系统分析通风方式、动力设备、网络结构、构筑物、自然风压及管理等多维影响因素，结合事故树分析、数值模拟、数学模型构建等方法，剖析系统失效机理。研究提出建立规范管理制度、优化网络设计、强化设备维护、合理布置构筑物、应对自然风压影响及完善监测预警等可靠性提升措施，为矿井通风系统的安全高效运行提供理论与实践参考。

关键词：矿井；通风系统；可靠性；研究

引言：在矿山安全生产中，矿井通风系统承担着排出有毒有害气体、调节井下气候环境的关键职能，其可靠性是防范瓦斯爆炸、粉尘危害等事故的重要基础。随着矿井开采深度增加与复杂度提升，通风系统面临自然风压波动、设备老化、管理疏漏等多重挑战，现有研究虽在部分影响因素分析上取得进展，但对系统整体可靠性的多维度耦合机制及综合提升策略仍缺乏系统性探讨。本文基于矿井通风系统的组成与特点，通过剖析可靠性影响因素、梳理研究方法，提出针对性提升措施，旨在为矿井通风系统的可靠性优化提供完整解决方案，推动矿山安全管理的科学化发展。

1 矿井通风系统概述

1.1 矿井通风系统的组成

矿井通风系统是一个复杂且精密的体系，主要由通风动力装置、通风网络、通风构筑物三大部分构成。通风动力装置作为系统的“心脏”，通过主要通风机为风流提供动力，常见的离心式、轴流式风机通过机械运转实现空气定向流动；通风网络则是由井下巷道、硐室等相互连接形成的“血管”，包括进风巷、回风巷、工作面巷道等，负责引导风流按既定路线流动；通风构筑物如风门、风桥、密闭墙等，起到控制和调节风流的作用，类似“阀门”，确保风流按需分配到各作业区域。

1.2 矿井通风系统的特点

矿井通风系统具有复杂性、动态性、安全性三大显著特点。复杂性体现在其涵盖机械、流体力学、工程管理等多学科知识，且需适配不同地质条件、开采布局；动态性则源于矿井开采过程中巷道不断延伸、工作面持续推进，致使通风阻力、需风量时刻变化，系统需灵活调整；安全性是其核心特性，一旦系统失效，瓦斯积聚、粉尘浓度超标等风险将直接威胁矿工生命安全。

1.3 矿井通风系统可靠性的定义

矿井通风系统可靠性是指在规定时间、条件下，系统完成向井下各作业场所输送足够新鲜空气、排出有害气体及调节气候环境等预定功能的能力。它不仅要求通风设备无故障运行，更强调系统在面对地质变化、设备故障、自然灾害等突发状况时，仍能维持最低安全标准的通风效果。可靠性包含设备可靠性、网络可靠性和管理可靠性三个维度，设备可靠性指通风机、传感器等硬件的稳定性能；网络可靠性涉及通风网络布局的合理性与抗灾变能力；管理可靠性则体现为规章制度的执行与应急响应机制的有效性，三者共同构成系统可靠性的完整内涵^[1]。

2 矿井通风系统可靠性影响因素分析

2.1 通风方式与通风方法

通风方式与方法的选择直接影响矿井通风系统可靠性。部分矿井未结合实际地质条件和开采布局，盲目采用中央式、对角式通风方式，导致风流分配不均，偏远工作面风量不足；压入式、抽出式通风方法使用不当，易引发风流短路或循环风问题。此外，通风方式与开采进度脱节，巷道延伸或工作面变换时，通风系统调整滞后，进一步削弱系统可靠性。

2.2 通风动力

通风动力设备的稳定性对系统可靠性至关重要。主要通风机选型不合理，额定风量、风压与矿井实际需求不匹配，易出现低效运行甚至过载现象；设备长期运行导致叶轮磨损、电机老化，故障概率增加；备用通风机维护不到位，关键时刻无法及时投入使用，造成通风动力中断风险。同时，供电系统稳定性差，突发停电会直接致使通风机停转。

2.3 通风网络结构

通风网络结构复杂且脆弱。部分矿井巷道布局混乱,角联巷道过多,导致风流方向不稳定,难以精确调控;网络分支阻力不平衡,造成部分区域风量过剩,而另一部分区域风量匮乏;老旧矿井通风网络缺乏科学优化,存在迂回风路,增加通风阻力,降低通风效率,使得整个通风网络的抗灾变能力薄弱。

2.4 通风构筑物

通风构筑物的状态直接影响风流控制效果。风门、风窗等设施质量不过关,密封性差,易出现漏风现象,导致风流无法按预定路线流动;风桥施工工艺不达标,存在风流干扰问题;密闭墙年久失修,墙体开裂,致使采空区有害气体泄漏。此外,通风构筑物日常巡检不到位,故障隐患难以及时发现和处理,严重威胁通风系统可靠性。

2.5 自然风压与矿井活塞风

自然风压和矿井活塞风具有不确定性,对通风系统产生干扰。自然风压受季节、昼夜温差影响显著,其大小和方向的变化会改变井下风流状态,尤其在多井口矿井,易引发风流紊乱;矿井活塞风伴随提升设备运行产生,频繁的气流波动干扰正常通风,导致工作面风量不稳定。二者与机械通风协同作用复杂,难以精准预测和有效控制。

2.6 管理因素

管理因素是影响通风系统可靠性的关键。部分矿井安全管理制度不完善,通风系统日常维护、巡检流程不规范,导致设备隐患堆积;管理人员和作业人员专业素质不足,对通风系统原理和操作规程掌握不扎实,误操作风险高;应急预案缺乏针对性和实操性,面对突发通风故障时,无法迅速采取有效措施,延误应急处置时机,加剧系统失效后果。

3 矿井通风系统可靠性研究方法

3.1 事故树分析法

事故树分析法(FTA)以矿井通风系统故障作为顶事件,通过演绎推理将其逐步分解为中间事件和基本事件,形成倒立树状逻辑因果关系图。在构建过程中,综合运用“与门”“或门”等逻辑符号,直观展现通风系统故障的产生路径。例如,分析井下风流中断事故时,可拆解出主要通风机故障、供电系统瘫痪、通风网络严重堵塞等中间事件,进一步细化至风机叶片断裂、断路器跳闸、巷道坍塌等基本事件。利用布尔代数运算,能够量化各基本事件对顶事件的发生概率贡献度,识别出影响通风系统可靠性的关键薄弱环节。该方法广泛应用于煤矿瓦斯爆炸、通风系统瘫痪等事故的预防与诊断,

但实际应用中需依赖大量历史数据和丰富的工程经验,以确保事故树逻辑关系的准确性和完整性^[2]。

3.2 数值模拟法

数值模拟法借助计算流体力学(CFD)软件,通过建立三维数字化矿井巷道模型,输入风速、风压、温度、巷道粗糙度等参数,模拟风流在井下复杂空间的流动特性。运用有限元、有限体积等算法求解连续性方程、动量方程和能量方程,可直观呈现巷道内风流速度场、压力场和温度场的分布云图,精准定位通风死角、风流短路等问题区域。例如,在设计新矿井通风系统时,利用数值模拟对比中央并列式、对角式等不同通风方式下的风流分配效果,为优化通风网络布局提供数据支撑。不过,模型构建时需确保参数选取的准确性,常需结合现场实测数据进行反复验证和修正,以提高模拟结果的可信度。

3.3 数学模型法

数学模型法通过运用概率论、数理统计、运筹学等数学理论,构建能够准确描述矿井通风系统可靠性的数学表达式。例如,采用故障树-贝叶斯网络混合模型,结合故障树的因果分析优势和贝叶斯网络的不确定性推理能力,量化分析通风系统各组成部分的失效概率及其相互影响关系;运用马尔可夫模型刻画通风设备从正常运行、故障维修到再次投入使用的状态转移过程,预测设备在不同时间点的可靠度。此外,还可通过建立可靠性框图(RBD),将通风系统分解为串联、并联等不同逻辑结构,计算系统整体的可靠性指标。数学模型法能够从理论层面揭示通风系统可靠性的内在规律,但在实际应用中,需根据矿井的具体条件合理简化系统结构,并确保模型假设与实际工况相符,避免因过度简化导致结果失真。

3.4 相平面轨迹法

相平面轨迹法是一种基于系统动力学理论的分析方法,通过选取矿井通风系统的关键状态变量(如风量、风压、风机转速等),将系统动态行为映射到二维或多维相空间中,形成轨迹曲线。通过分析轨迹曲线的形状、走向和收敛性,可直观判断通风系统的稳定性和动态响应特性。例如,当通风系统受到外部扰动(如巷道局部堵塞)时,观察风量-风压相平面上轨迹曲线偏离平衡点的程度和恢复速度,评估系统的抗干扰能力和自愈性能。该方法尤其适用于分析通风系统的非线性动态过程,为优化通风设备控制策略、提高系统稳定性提供理论依据。然而,对于具有强非线性和多变量耦合特性的复杂通风系统,相平面轨迹的分析和解释存在一定难度。

度,通常需要结合其他研究方法进行综合分析。

4 矿井通风系统可靠性提升措施

4.1 建立规范的通风管理制度

建立健全覆盖通风系统全生命周期的管理制度,明确各岗位职责与操作规范。制定详细的日常巡检制度,要求工作人员按规定频次对通风设备、构筑物进行检查,记录运行参数与设备状态,发现隐患及时上报处理。完善维护保养制度,定期对通风机、传感器等设备进行检修与校准,确保性能稳定。同时,建立奖惩机制,对严格遵守制度、及时发现重大隐患的人员给予奖励,对违规操作、敷衍了事的行为严肃追责。此外,定期组织安全培训与应急演练,提升管理人员与作业人员的专业素养和应急处置能力,确保制度有效落实。

4.2 优化通风网络设计

在矿井设计阶段,充分考虑地质条件、开采布局及未来发展规划,科学选择通风方式与网络结构。优先采用对角式或分区式通风方式,确保风流均匀分配至各作业区域。运用数值模拟法对不同通风网络方案进行对比分析,优化巷道布局,减少角联巷道与迂回路,降低通风阻力。针对老旧矿井,结合开采现状对通风网络进行系统性改造,通过调整巷道断面、增设调节风窗等措施,平衡网络分支阻力,提升通风效率与抗灾变能力。同时,预留通风系统升级空间,适应矿井开采规模扩大与工艺变更的需求。

4.3 强化通风设备维护与管理

根据矿井实际需风量、风压,合理选型主要通风机,确保设备性能与系统需求精准匹配。建立通风设备全生命周期管理档案,详细记录设备采购、安装、运行、维护及故障处理等信息,为设备管理提供数据支持。采用状态监测技术,实时监测通风机振动、温度、电流等参数,运用大数据分析故障诊断算法,提前预判设备故障风险,实施预防性维护。加强备用通风机的日常维护与定期试运行,确保主通风机故障时能迅速切换,保障通风动力不间断。同时,优化供电系统,配备双回路电源与应急发电机,降低停电对通风设备运行的影响。

4.4 合理布置通风构筑物

在通风构筑物设计与施工环节,严格遵循相关标准规范,确保风门、风窗、风桥等设施的建造质量。根据风流调控需求,合理确定通风构筑物的位置与数量,采用高强度、高密封性材料,减少漏风现象。例如,在主要进回风巷交汇处设置自动风门,实现车辆、行人通过

时的自动启闭,避免风流短路。定期对通风构筑物进行检查与维护,及时修复损坏的风门、密闭墙,清理风桥杂物,保障风流顺畅。

4.5 应对自然风压与矿井活塞风

加强对自然风压与矿井活塞风的监测与研究,在井口、巷道关键节点安装风压传感器,实时采集风压数据,分析其变化规律。建立自然风压与矿井活塞风预测模型,结合气象数据、提升设备运行参数,提前预判风压波动趋势。针对自然风压季节性变化,在冬季、夏季等风压波动较大时期,及时调整机械通风参数,平衡自然风压影响;对于矿井活塞风,优化提升设备运行时序,减少其对通风系统的干扰。此外,研究自然风压与机械通风协同调控技术,提高通风系统应对复杂风压环境的能力。

4.6 加强通风系统监测与预警

构建智能化通风系统监测网络,在井下关键区域部署风速、风压、瓦斯浓度、温度等传感器,实现对通风参数的实时、全面监测。利用物联网技术将监测数据上传至地面监控中心,通过大数据分析与人工智能算法,对通风系统运行状态进行智能评估。建立多级预警机制,根据参数异常程度设定不同等级的预警阈值,一旦监测数据超过阈值,系统立即发出声光报警,并通过短信、APP等方式通知相关人员。同时,开发通风系统故障诊断专家系统,结合历史数据与故障案例,快速定位故障原因,为应急处置提供决策支持,实现通风系统的动态化、智能化管理^[3]。

结束语

矿井通风系统可靠性研究关乎矿山安全生产与可持续发展。通过剖析系统组成、特点及影响因素,运用科学研究方法揭示其运行规律,提出的系列提升措施为保障系统稳定运行提供了实践路径。然而,随着开采技术革新与复杂地质挑战加剧,通风系统可靠性研究需持续深化,未来应进一步探索智能化监测技术、多因素耦合作用机制等方向,推动研究成果与实际生产深度融合,为矿井安全生产筑牢坚实屏障。

参考文献

- [1]陈小建.矿井通风系统可靠性的影响因素及改善措施[J].机械管理开发,2022(06):245-247
- [2]刘志.矿井通风系统可靠性影响因素分析[J].科技视界,2021(21):156-158
- [3]孟祥允.矿井通风系统可靠性量化分析[J].黄金,2022(07):187-189