

矿井安全门事故致灾机理与防控策略研究

Research on the Disaster Mechanism of Mine Shaft Safety Door Accidents and Prevention and Control Strategies

吴立活(五矿有色金属股份有限公司,北京 100044)

摘要:本文基于国内外事故案例剖析,精准锁定机械故障、人为操作失误及管理漏洞等核心诱因。系统梳理平开式、竖开式、八字开式与摆折式安全门的结构特点及安全性能,并提供本质安全分析框架及选型优化方案。全面剖析手动、气动、电动、液压及罐笼联动等多元驱动模式,从工作原理、安全效能、优劣势对比等维度进行深度评估,匹配不同作业场景的驱动方式选择指南。在闭锁与安全特性分析领域,创新性提出机械闭锁、电气闭锁及综合闭锁的层级化安全模型,确立闭锁信号直接检测原则,构建涵盖启动、运行及紧急制动环节的强化型联锁控制体系。科学定义安全性能量化指标,确立本质安全设计规范,前瞻性展望无源检测技术、智能标准体系构建及安全完整性验证等发展方向。

关键词:矿井安全门;事故致灾机理;防控策略;驱动模式;联锁控制;本质安全设计

中图分类号: TD54 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)04-0077-05

Abstract: This paper delves into the disaster-causing mechanisms and prevention strategies of mine vertical shaft hoisting system's portal safety gate accidents. After analyzing domestic and foreign accident cases, it identifies mechanical failures, human-induced errors, and management deficiencies as key causes. It also systematically categorizes the structural and safety features of planar, vertical, V-shaped, and fold-over safety gates, presenting an inherent safety analysis framework and model selection optimization plan. Furthermore, it thoroughly assesses various drive modes (manual, pneumatic, electric, hydraulic, and cage-linked), comparing their principles, safety, and pros/cons, along with a guide for scenario-based drive selection. In closure and safety analysis, it originally proposes a hierarchical safety model of mechanical, electrical, and integrated locking, establishes the principle of direct detection of locking signals, and forms an enhanced interlocking control system for start-up, operation, and emergency braking. Finally, it scientifically defines safety-related quantitative indicators, sets inherent safety design standards, and envisions future directions like passive detection tech, intelligent standard systems, and safety integrity verification.

Key words: mine safety door; accident causation mechanism; prevention strategy; drive mode; interlocking control; inherent safety design

1 前言

矿用竖井提升系统井口安全门是竖井井口的关键安全装置,主要用于防止人员、矿车及其他物品坠落井下,确保提升系统的安全运行。其安装位置包括立井的井口、井底及中间运输巷等,不仅限于副井井口。井口安全门与提升信号系统联锁,只有在罐笼到位并发出停车信号后,安全门才能打开;反之,若安全门未关闭,提升机无法启动。作为竖井井口的最后一道安全保障,井口安全门通过防止坠落事故及与提升系统的联锁功能,显著提升了提升过程

的安全性和可靠性。因此,其设计、安装和维护是矿山安全生产中不可或缺的重要环节。

2 矿井安全门事故现状分析

2.1 国内统计数据与案例

1) 官方报告概览

国家矿山安全监察局:2021年发布的《全国矿山安全生产形势报告》指出,矿井提升系统事故约占矿山机电事故的35%~40%,其中约15%~20%与安全门联锁失效、人员违规操作(如强行打开安全门、未确认门闭合状态)直接相关^[1]。

2) 典型案例

2018年山西某煤矿事故:因竖井安全门联锁装置故障,操作人员未检测到门未闭合即启动提升机,导致罐笼坠落,造成3人死亡^[2-3]。

2020年河南某铁矿事故:维修工违规短接安全

[作者简介] 吴立活,男,河北邢台人,主要从事金属矿山开发运营、控制技术、信息技术和数字化转型等方面工作。

[引用格式] 吴立活. 矿井安全门事故致灾机理与防控策略研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(4):77-81+86.

门电气闭锁装置,罐笼在运行中安全门意外打开,引发人员坠落。

3) 事故原因分布

机械故障(60%):安全门联锁装置老化、传感器失灵。

人为操作(30%):未执行闭锁检查、违规手动解除安全装置。

管理缺陷(10%):未定期维护、缺乏应急预案。

2.2 国际事故统计数据

(1)美国矿山安全与健康管理局(MSHA)统计显示,2015—2022年矿井提升事故中,约12%涉及安全门系统故障,主要原因为联锁装置失效或操作人员忽略闭锁信号。

典型案例:2019年阿拉斯加某金矿因安全门闭锁传感器进水失效,罐笼在门未关闭时运行,导致1名矿工被甩出。

(2)欧盟矿山安全委员会(EUROMINING)统计表明,矿井提升事故中约18%与安全门操作相关,集中于老旧矿井设备维护不足场景。

(3)南非矿产资源部(DMR)报告指出,2017—2021年矿井提升事故中,22%由安全门系统问题引发,主要原因为设计缺陷(如无冗余闭锁)和人员培训不足。

从国际数据来看,不同国家和地区的矿井安全门事故虽在具体占比和原因上有所差异,但总体上反映出安全门系统故障以及人员操作和管理方面存在的共性问题,这表明矿井安全门事故的发生具有一定的普遍性和规律性,需要引起全球矿山行业的重视和反思。

3 井口安全门类型与驱动方式综合分析

3.1 井口安全门类型

矿用井口安全门主要包括平开式、竖开式、八字开式和摆折式四种类型,具体如图1所示。这些类型在结构设计、安全性能和适用场景上各有特点。

(1)平开式安全门:采用金属格栅结构,通过滚轮在横梁轨道上移动实现开合。其优势在于抗冲击性强、透光性好,但滚轮易磨损,轨道易变形,且开启时占用侧向空间^[4]。

(2)竖开式安全门:通过悬挂装置和竖梁轨道实现垂直开合,节省空间,适合狭窄井口,但悬挂装置易疲劳断裂,轨道安装精度要求高^[5]。

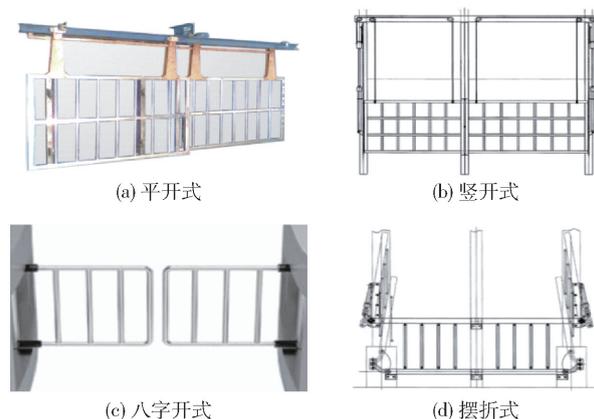


图1 矿用井口安全门四种类型

(3)八字开式安全门:人字形设计,闭合自锁性强,抗冲击能力突出,但铰接点需频繁润滑,闭合缝隙可能卡住异物^[6]。

(4)摆折式安全门:采用主动摆杆和从动摆杆联动实现开合,冗余设计降低单点故障风险,折叠后空间占用小,但摆杆连接处应力集中易开裂,液压故障时手动复位困难^[7]。

3.2 井口安全门类型本质安全分析

平开式、竖开式、八字开式和摆折式四种类型的安全门,在结构设计、关键部件的可靠性以及维护管理方面均表现出较高的本质安全性。然而,这些安全门在使用过程中仍存在一些潜在风险,需要在日常管理中采取相应的措施加以防范,以确保设备的安全运行。

(1)转动部件磨损:滚轮、滑动销轴、悬挂装置等转动部件在长期运行中容易出现磨损,可能导致门体运行不畅或脱轨。

为避免此类问题,需定期检查转动部件的磨损情况,并及时更换磨损严重的部件,确保转动部件的灵活性和可靠性。

(2)轨道变形:横(竖)梁轨道的变形是导致门体运行卡顿或脱轨的常见原因之一。

因此,需定期检查轨道的直线度和固定情况,确保轨道平整且稳固,必要时对变形轨道进行修复或更换,以保障门体的正常运行。

(3)耐腐蚀性问题:钢制格栅在长期使用过程中容易受到腐蚀,从而影响门体的结构完整性和使用寿命。

为增强门体的耐腐蚀性,建议优先采用不锈钢材料,或在现有钢制格栅表面增加防腐涂层,以延长其使用寿命并降低维护成本。

通过上述措施的实施,可有效降低安全门在运行过程中出现故障的风险,进一步提升其本质安全性,保障设备的长期稳定运行。

3.3 井口安全门驱动方式及安全特性

矿用井口安全门的驱动方式主要包括手动驱动、气动驱动、电动驱动、液压驱动和罐笼联动式驱动等^[8-9]。

1) 手动驱动

(1)原理:通过人力操作来实现门的开合。

(2)安全特性:结构简单,不依赖外部动力源,零部件数量少,维护成本低。在紧急情况下,能迅速响应,无需复杂控制系统的支持。

(3)优势与劣势:优势是无外部依赖,结构简单;劣势是效率低,依赖人力,无自动化连锁,在频繁操作时易导致人员疲劳,风险增加。

2) 气动驱动

(1)原理:利用压缩空气作为动力源,通过气缸推动门体实现开合。

(2)安全特性:气动系统响应速度快、操作简便,结构简单,维护方便,能在恶劣环境下稳定运行。

(3)优势与劣势:优势是防爆无火花,动作快(≤ 3 s);劣势是气压波动导致抖动,气路泄漏风险高,且速度和扭矩调节精度有限,易受气压波动影响导致运行不稳定,机械冲击较大,可能对设备和人员造成潜在风险。

3) 电动驱动

(1)原理:通过电机带动传动机构实现门的开合,传动机构主要有啮合传动式、螺旋传动式、钢丝绳缠绕牵引式、链条传动式、皮带传动式等。

(2)安全特性:具备高自动化程度,支持自动控制和远程监控,易于与现代自动化系统集成,运行速度和扭矩调节精度高。

(3)优势与劣势:优势是精准控制(误差 ≤ 2 mm),支持远程连锁;劣势是电机过热需强制散热,依赖备用电源,复杂性高,可能需要专业技术人员进行维护和故障排除,增加了维护成本和潜在的安全隐患。

4) 液压驱动

(1)原理:利用液压缸作为动力源,通过液压油的压力推动门体运动。

(2)安全特性:动力大、运行平稳,输出功率和扭矩较高,能满足大型安全门的驱动需求,在较宽的压力范围内运行稳定,负载适应能力强,可通过调节

液压油的压力和流量,实现精确的速度控制,运行平稳且噪音低。

(3)优势与劣势:优势是高扭矩(≥ 5 吨负载),运行平稳;劣势是液压油泄漏难检测,低温性能下降,密封性能以及液压泵、阀组等部件的性能和可靠性需不断提升,需定期检测和更换油液,加强维护保养措施。

5) 罐笼联动式驱动

(1)原理:通过罐笼的升降动作实现安全门开合,主要分为罐笼顶开门式和钢丝绳牵引式两种形式。当罐笼升至井口时,带动安全门自动打开;当罐笼开始下放时,带动安全门自动关闭。

(2)安全特性:依靠与罐笼的机械联动实现门体开合,操作与罐笼运行紧密配合,可有效避免人为失误,机械联动结构简单可靠,无需外部动力源,降低了系统复杂性和维护成本,紧急情况下能迅速响应,与罐笼紧急停止装置协同保障人员和设备安全。

(3)优势与劣势:优势是与罐笼动作同步,无独立动力需求;劣势是罐笼故障直接导致联动失效,机械联动结构易磨损,需定期检查维护,安装调试时精度和调试要求高,难度较大,柔性罐道和木质罐道因移动偏差大、晃动量大,不适合联动式设计。

3.4 驱动方式优选建议

根据不同的场景和需求,优先驱动方式及核心理由见表1。

表1 驱动方式优选建议

场景	优先驱动方式	核心理由
高精度自动化场景	电动驱动	精准控制、PLC 连锁集成
重型门体场景	液压驱动	高扭矩、平稳运行
防爆场景	气动驱动	无电火花风险
高可靠性场景	罐笼联动 + 电动备用	双冗余设计规避单点故障

4 井口安全门闭锁及安全特性分析

4.1 闭锁形式分类

矿用井口安全门的闭锁形式主要包括机械闭锁、电气闭锁和综合闭锁等。选择闭锁形式时需综合考虑矿山需求、井口空间条件、操作频率及安全要求。

1) 机械闭锁形式

弹簧销闭锁:通过罐笼位置变化或杠杆机构、钢丝绳带动弹簧销动作,实现闭锁与解锁。

插销式闭锁:利用罐笼升降动作操控插销的插入/拔出,完成闭锁功能。

罐笼联动闭锁:基于罐笼位置变化,实现安全门与罐笼升降的协同联动。

抗干扰设计:闭锁插销、弹簧销等部件需与门本体刚性连接,采用防拆解结构(如焊接固定点或防护罩),防止外力绕过闭锁逻辑。

2) 电气闭锁形式

信号闭锁:安全门与提升信号系统联锁,门未关闭时无法发出开车信号。

电磁锁闭锁:采用防爆电磁锁,通过通电/断电实现闭锁,具有动作快、可靠性高的特点。

智能化升级:动态逻辑校验:PLC实时比对传感器信号与驱动装置状态,逻辑冲突时触发急停。

抗干扰设计:信号传输采用屏蔽电缆,集成温度传感器监测过热风险。

3) 综合闭锁形式

结合了机械与电气闭锁(如机械闭锁+信号闭锁),可提升安全性与可靠性。

4.2 安全特性评价与本质安全设计

1) 安全特性评价指标

故障安全裕度:失效时导向安全状态的概率 $\geq 99.9\%$ 。

响应时间特性:异常检测至闭锁动作总时延 $\leq 300\text{ms}$ 。

抗干扰能力:满足 EN 50270 标准,防护等级 $\geq \text{IP67}$ 。

环境适应性:防爆等级 Ex d I Mb,抗冲击性能 $50\text{g}/11\text{ms}$ 。

2) 本质安全设计原则

冗余架构:机械闭锁作为最终保障层,与电气闭锁形成“与”逻辑关系。

能量隔离设计:维护时采用双断点隔离开关,确保闭锁机构完全失能。

人机工程防护:安全门操作需双手协同解锁,设置误操作防护罩。

3) 技术创新与维护

数字孪生实时映射:构建闭锁系统数字孪生模型,预判信号偏差并自动校准。

5G+边缘计算:实现闭锁状态毫秒级云端同步

与远程诊断,支持实时干预。

5 矿用井口安全门安全特性综合优化建议

5.1 安全门类型选择综合排序

经综合考量,矿用井口安全门类型的优选排序为:摆折式 $>$ 八字开式 $>$ 竖开式 $>$ 平开式。摆折式因冗余设计和高适应性居首,八字开式凭借轻量化与快速响应列第二,竖开式因节省空间排第三,平开式虽结构简单,但在潮湿环境需强化轨道和滚轮防锈处理。

5.2 驱动方式综合排序

结合自动化程度、动力特性、环境适应性及潮湿环境可靠性,矿用井口安全门驱动方式的优选排序为:液压驱动 $>$ 电动驱动 $>$ 气动驱动 $>$ 罐笼联动式(需冗余)。液压驱动在重型门体场景表现出色,其封闭的液压系统较电动驱动的电气部件更耐潮湿,且能提供平稳动力;电动驱动虽具高自动化和精准控制优势,但电气元件易受潮损坏;气动驱动适用于防爆场景,却易受潮导致气路系统进水;罐笼联动式需冗余设计保障,且要注重机械联动部件防腐蚀处理。

5.3 核心优化原则

(1)高冗余与高自动化协同设计。在潮湿环境下,设备故障风险增加,因此安全门系统必须采用高冗余设计,确保在部分部件失效时整体功能不受影响。同时,高自动化设计能够减少人工干预,降低因人为疲劳导致的操作失误。例如,系统可配置双备份的驱动电机或液压泵,结合自动化控制系统,实现故障自动切换,保障连续稳定运行。

(2)强化故障安全导向设计。构建故障导向安全体系,确保矿用井口安全门在故障或异常时自动进入安全状态。例如,若电气系统故障,机械闭锁装置应立即锁死安全门防止意外开启;驱动系统故障时,需配备手动应急操作功能,保障紧急情况下的安全启闭,并通过定期演练确保操作人员熟练掌握应急流程。

(3)耐腐蚀与密封强化措施。针对潮湿环境,安全门所有金属部件应采用耐腐蚀材料或进行防腐处理。首选不锈钢材质,对于其他金属部件,采用纳米涂层或热喷锌工艺增强耐腐蚀性。同时,对机械部件进行密封处理,防止水分侵入导致锈蚀和磨损,确保设备长期稳定运行。

(4) 强化维护管理策略。制定严格的维护计划,增加检查频次,重点关注金属部件锈蚀、电气元件绝缘性能及机械部件磨损和润滑情况。同时,利用在线监测系统实时采集和分析运行数据,提前发现并处理潜在故障。通过加强对维护人员的技术培训,提高其在潮湿环境下对安全门的维护和故障处理能力,确保设备始终保持在良好运行状态。

总之,在潮湿且伴有井壁淋水的矿井环境中,矿用井口安全门的选型优化必须充分考虑环境因素对设备性能的影响。通过选用液压驱动结合高冗余、高自动化及耐腐蚀设计的安全门系统,并实施强化的维护管理措施,可显著提升设备的可靠性和安全性,有效降低事故风险,确保矿井提升系统的安全运行。

6 某矿安全门事故案例剖析

6.1 事故经过

2023年夏季,某矿1#盲竖井提升机发生高处坠落事故,造成1人死亡、2人受轻伤。该井口标高346 m(中段),井底标高-16 m,提升机(2JK3.3 × 1.58 单层双罐笼)负责人员、物料的提运。事故现场采用平开式安全门形式,通过液压升降滑道靠势能自然滑动实现开闭,液压缸升降触动磁开关实现联锁。事故发生时,四名员工准备运送矿车,推车人员手动逆向强制拉开安全门,导致安全门机构联锁显示关门状态。

6.2 事故原因多维度剖析

1) 设计与设备缺陷

事故现场采用平开式安全门,此形式在该场景空间具有合理性,其抗冲击性强、透光性好。然而,其驱动方式为间接液压驱动,液压缸升降滑道,安全门沿滑道靠势能自动实现开闭,触动闭锁开关的磁铁安装在液压缸上,而非直接安装于安全门本体,违背了闭锁信号直接检测原则,导致联锁信号不能准确反映安全门本体状态。安全联锁机构存在欠缺,正常情况开门时无法发出信号运行提升机,但此次事故中手动逆向拉开安全门后,联锁机制产生错误信息,反映出闭锁措施设计严重缺陷,未能构建起有效的机械-电气双重锁定机制。事故现场如图2所示。

2) 人为操作失误

推车人员违规手动拉开逆向安全门,直接破坏了安全门联锁状态,是事故发生的直接原因之一。



图2 提升机井口安全门事故现场

信号工和提升机司机存在惯性思维,在安全门未有效闭合情况下发出运行信号。

6.3 事故防范及新技术展望

1) 优化安全门设计与驱动方式

基于本文的分析,针对该矿井建议采用电动或液压等自动化直接驱动方式,提高安全门的开合效率和可靠性,减少人为操作失误。同时,确保安全门本体直接体现闭锁措施,采用机械闭锁与电气闭锁相结合的方式,确保只有在安全门完全关闭的情况下,提升机才能正常运行,构建起机械-电气双重锁定机制,提升安全性。

2) 新技术赋能安全门管理

通过在安全门本体安装传感器,实时采集安全门的开合状态、闭锁状态等信息,并将数据传输至监控中心进行分析和处理。基于本文的分析,运用 AI 视觉辅助验证技术,借助高清摄像头与边缘计算模块,利用目标检测算法实时校验门状态;引入突变检测算法,通过 FPGA 芯片对门信号突变进行实时监测,确保快速响应。

7 展望

在智能化领域,可运用 AI 视觉辅助验证技术,借助高清摄像头与边缘计算模块,利用目标检测算法(如 YOLO)实时校验门状态,将误差容忍度控制在 $\leq 0.05\%$;同时引入突变检测算法,通过 FPGA 芯片对门信号突变(如 200 ms 内位移超限)进行实时监测,确保响应时延在 ≤ 150 ms 内。在自动化方面,实现动态权限管理功能,当提升系统运行时自动锁定井口安全门操作权限,在罐笼距离井口 30 m 时触发区域闭锁逻辑;采用生物识别权限管理技术,限

(下转第 86 页)