

矿用简易速开卷帘风门探究

侯伯允¹, 刘 振²

¹山东黄金集团有限公司深井开采实验室, 山东 烟台

²山东黄金矿业(沂南)有限公司, 山东 临沂

收稿日期: 2025年9月15日; 录用日期: 2025年10月25日; 发布日期: 2025年11月10日

摘 要

本研究设计并验证了一种用于矿山的简易速开卷帘风门。该风门的核心创新在于其自动收卷机构与集成式清障设计。具体而言, 研究发现, 采用发条弹簧作为动力源的防风布自动收卷方案, 相较于传统风门, 能实现快速启闭(快速响应), 并显著降低操作能耗(低能耗)。此外, 经测试验证, 设置于移动固定杆下部的专用清障装置, 可有效排除轨道区域的常见障碍物, 确保持续运行的可靠性(高效清障、高可靠性)。综合评估表明, 该风门结构简单、性能稳定, 为提升矿山通风系统的安全性及效率提供了可靠的解决方案。

关键词

矿井通风, 风门, 机械装置, 自动化, 风流控制

Research on Mine-Use Simple Quick-Opening Rolling Curtain Air Doors

Boyun Hou¹, Zhen Liu²

¹Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co., Ltd., Yantai Shandong

²Shandong Gold Mining (Yinan) Co., Ltd., Linyi Shandong

Received: September 15, 2025; accepted: October 25, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

This study designs and validates a simple and quick-opening rolling curtain air door for mining applications. The core innovation of this air door lies in its automatic retracting mechanism and integrated obstacle-clearing design. Specifically, the research finds that the automatic retraction system for the wind-resistant cloth, which utilizes a clock spring as the power source, enables rapid opening and closing (quick response) and significantly reduces operational energy consumption (low

文章引用: 侯伯允, 刘振. 矿用简易速开卷帘风门探究[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1285-1291.

DOI: 10.12677/me.2025.136143

energy consumption) compared to traditional air doors. Furthermore, tests verify that the dedicated obstacle-clearing device installed at the lower part of the movable fixing rod can effectively remove common obstructions in the track area, ensuring sustained operational reliability (efficient obstacle clearing, high reliability). A comprehensive evaluation demonstrates that the air door features a simple structure and stable performance, providing a reliable solution for enhancing the safety and efficiency of mine ventilation systems.

Keywords

Mine Ventilation, Damper, Mechanical Device, Automation, Airflow Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着矿产资源开采深度的不断增加, 矿井通风系统面临更为严峻的风流控制挑战。深井开采环境中, 通风路径长、阻力大, 对风门的性能提出了更高要求。风门作为调节风流方向与风量的关键设备, 其可靠性直接影响井下作业安全与生产效率[1]。传统风门多依赖人工操作, 存在启闭速度慢、操作费力等缺点。在高压风流环境下, 风门两侧压差增大, 人工开启尤其困难, 不仅增加了矿工的劳动强度, 也可能因操作延误影响通风系统的及时调整[2] [3]。

此外, 井下环境复杂, 爆破、掘进等作业产生的碎石、泥沙等杂物易堆积于风门底部, 导致风门卡阻、密封不严或损坏, 进一步影响通风系统的稳定运行。近年来, 部分机械式自动风门被应用于矿井中, 但其通常结构复杂、制造成本高昂, 且大多依赖外部电力驱动。在矿井电力供应不稳定或偏远矿区, 这类风门的适用性受到很大限制。高故障率和维护难度也制约了其推广使用[4]-[6]。

因此, 开发一种结构简单、无需外接动力、具备自主清障能力的高可靠性风门, 能有效解决通风构筑物管理问题[7]。本文基于机械自动化原理, 设计了一种矿用简易速开卷帘风门, 通过发条弹簧作为核心动力源, 实现风门的快速启闭, 并结合滑轮系统与清障装置, 提升其适应性与可靠性。下文将全面介绍该风门的结构设计、工作原理、性能特点及其在实际应用中的表现, 以期为矿山通风设备的技术创新提供参考。

2. 结构设计

本文卷帘风门采用模块化设计理念, 主要由防风布、固定槽、底座、卷帘轴、移动固定杆、第一滑轮、清障装置与第二滑轮等部件组成。各组件之间通过机械连接协同工作, 形成一个完整的风门系统。其整体结构如图1所示, 下面分别对各组件进行详细说明。

2.1. 核心组件功能说明

防风布是风门的主要阻风部件, 采用高强度抗风复合材料制成, 具备良好的柔韧性、耐磨性和抗撕裂性能。其宽度根据巷道断面尺寸确定, 长度则满足最大开启高度的要求。防风布一侧固定于卷帘轴上, 另一侧与移动固定杆连接, 形成可卷曲的屏障结构。

固定槽位于防风布顶部, 采用高强度合金材料制成, 通过预埋螺栓固定于巷道顶板。固定槽内部设

有凹槽结构，用于容纳第一滑轮的滚轮，为移动固定杆提供上部导向和支撑。其截面设计考虑了最大风压下的抗变形能力，确保长期使用的稳定性。

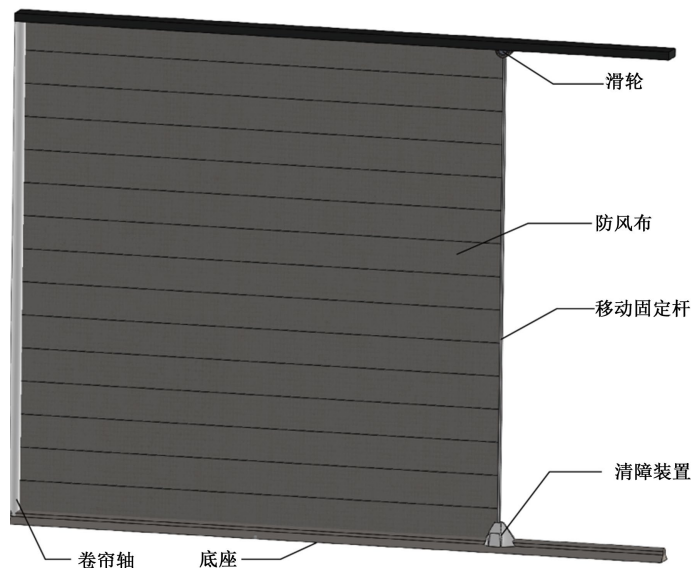


Figure 1. Overall structure diagram
图 1. 整体结构图

底座位于防风布底部，采用铸铁材料整体铸造而成，具有较高的强度和耐磨性。底座的横截面设计为中间凸起、两侧倾斜的独特结构。中间凸起部分为清障装置提供导向轨道，两侧倾斜斜面则有助于引导碎石和杂物向两侧滑落，避免在风门底部堆积。底座通过地脚螺栓固定于巷道底板，与固定槽共同形成风门的固定框架。

卷帘轴是风门的动力传动核心部件，采用中空钢管结构，内部嵌有螺旋形发条弹簧。发条弹簧一端固定于轴心，另一端与轴体外壳连接，通过旋转卷帘轴实现弹簧的储能与释能。卷帘轴两端通过轴承座固定于巷道侧壁，保证转动平稳可靠。

移动固定杆为矩形截面型钢构件，与防风布自由侧边缘牢固连接。移动固定杆上下端分别与第一滑轮和第二滑轮连接，在风门启闭过程中沿固定槽和底座滑动，带动防风布展开或收卷。

第一滑轮和第二滑轮组成风门的导向系统。每个滑轮均含两个滚轮及传动轴，采用耐磨铜基合金材料制成。第一滑轮设置于移动固定杆上部与固定槽之间，其两个滚轮精确嵌入固定槽的凹槽内，确保移动固定杆上部沿直线运动。第二滑轮位于移动固定杆下部与清障装置内部，其传动轴设置于底座凸起部分的上部，为移动固定杆提供下部支撑和导向。

清障装置是风门的创新设计组件，由外壳体、内部滑轮系统和底部缺口组成。外壳体上部为六面体结构，内部为空腔设计，既保证了结构强度，又减轻了整体重量。清障装置下部设有与底座横截面完全匹配的缺口，使其能够紧密贴合底座表面。在风门运动过程中，清障装置沿底座移动，有效清除堆积的碎石和杂物。

2.2. 关键设计特点

发条弹簧动力系统采用特种弹簧钢制成，经过特殊热处理工艺，具有高储能密度和长寿命特点。弹簧设计考虑了风门频繁启闭的工作需求，确保了超过 10 万次的循环使用寿命。弹簧的预紧力可根据实际风压条件进行调整，保证在不同工况下都能提供足够的启闭动力。

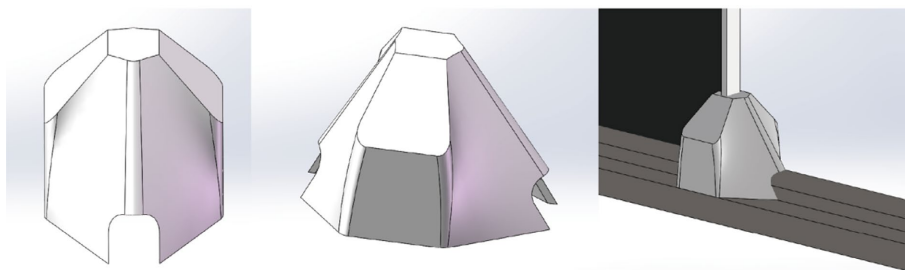


Figure 2. Obstacle removal device
图 2. 清障装置

滑轮导向系统采用双滚轮设计, 增加了与导轨的接触面积, 减少了单位面积压力, 提高了耐磨性。滚轮表面加工有环形导向槽, 与导轨精确配合, 防止运行过程中脱轨。轴承采用密封设计, 防止井下粉尘侵入, 保证长期润滑。

清障装置的六面体结构设计增加了与杂物的接触面积, 提高了清障效率。空心设计使装置重量减轻约 40%, 降低了运动惯性, 使启闭更加轻便(如图 2 所示)。底部缺口与底座的配合间隙控制在 2~3 mm 范围内, 既保证了紧密贴合, 又避免了因制造误差导致的卡阻现象。

3. 工作原理

3.1. 风门启闭机制

风门的开启与关闭过程是一个完整的能量转换与机械传动过程, 具体工作原理如下。

开启过程: 当行人和车辆需要通过风门时, 操作人员触发启动装置(可采用手动拉杆或远程控制方式), 释放卷帘轴内部的发条弹簧约束机构。发条弹簧迅速释放储存的弹性势能, 转化为旋转动能, 驱动卷帘轴以每分钟 20~30 转的速度旋转。卷帘轴的旋转带动防风布卷起, 同时通过牵引绳索带动移动固定杆运动。

移动固定杆在第一滑轮与第二滑轮的支撑下, 沿着底座倾斜斜面向上滑动。滑轮系统有效减少了运动阻力, 使总摩擦系数降低至 0.05 以下。整个开启过程在 3~5 秒内完成, 实现风门的快速开启。清障装置在移动过程中同步清除底座表面的碎石和杂物, 保障通行通道畅通无阻。

关闭过程: 当行人和车辆通过后, 操作人员松开启动装置, 发条弹簧开始复位过程。在弹簧复位力和防风布自重的作用下, 卷帘轴反向旋转, 防风布逐渐展开。移动固定杆在滑轮引导下沿底座斜面平稳下滑, 直至风门完全关闭。关闭过程中, 清障装置再次对底座表面进行清理, 确保无杂物影响风门密封性。

发条弹簧在关闭过程中重新旋紧, 储存下一次开启所需的能量。整个关闭过程耗时 4~6 秒, 比传统风门缩短了 60% 以上的时间。

3.2. 清障工作机制

清障装置的工作机制基于机械推挤和斜面引导原理。当风门启闭时, 清障装置随之移动, 其前部斜面与杂物接触后产生垂直方向和水平方向的分力。垂直分力将杂物轻微抬起, 水平分力推动杂物向前移动。

由于清障装置下部缺口与底座保持紧密贴合, 能够有效捕捉小型碎石和颗粒物。被捕捉的杂物随清障装置一起移动, 直至被推至巷道两侧。如图 3 所示, 底座两侧的倾斜斜面设计进一步辅助杂物向两侧滑落, 避免在风门通道中间堆积。

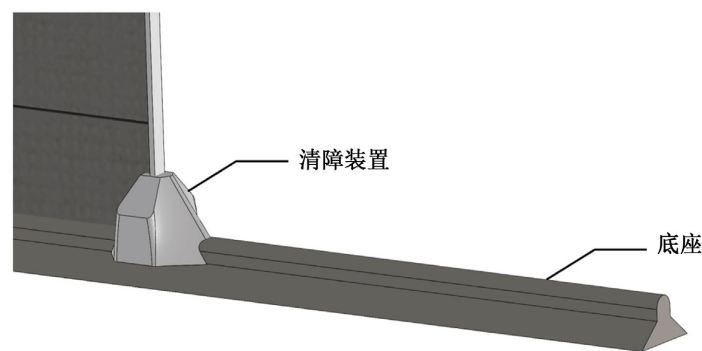


Figure 3. Schematic diagram of the obstacle removal process
图 3. 清障过程示意图

清障装置的六面体结构确保了无论风门处于开启还是关闭过程中，都能保持最佳的清障角度。内部空心设计降低了装置质量，减少了运动惯性，使清障动作更加灵活高效。

4. 应用评价

该风门在使用过程中，面临着矿井内部碎石和杂物的挑战。当风门关闭时，清障装置位于底座的前端，其六面体的结构设计能够有效地捕捉和引导碎石和杂物沿着底座的倾斜斜面滑落。清障装置下部的凹形设计使其能够紧密贴合底座的表面，确保了与底面的接触面积最大化，从而提高了清障效率。当风门开启时，移动固定杆带动清障装置沿着底座移动，清障装置的空心设计减轻了其重量，使得移动过程更加顺畅。同时，清障装置内部的第二滑轮通过传动轴与第一滑轮连接，确保了移动固定杆的平滑移动，减少了摩擦和阻力。在风门开启和关闭的过程中，清障装置不断地收集和排除底座附近的碎石和杂物，防止了这些杂物进入风门内部，确保了风门的顺畅运转。通过这种设计，矿井内部风流控制的效率 and 安全性得到提高，同时降低了矿工的工作强度，提高了工作效率。

综上所述，本文提供了一种矿用简易速开卷帘风门，通过收卷防风布的设计，使得行人和车辆可以快速通行，采用了发条弹簧作为动力源，无需外部电源驱动，降低了能耗，设置清障装置，引导碎石和杂物沿着斜面滑落，进一步提高了清障效率，具有快速响应、高效清障、低能耗、高可靠性等优点，为矿山安全生产提供了有力保障。

效果预估

该风门显著提高了通行效率，车辆平均等待时间从原来的 1~2 分钟缩短至 10~15 秒。无需外部动力的特点使其在矿山临时停电期间仍能正常运作，保证了通风系统的连续性。

清障装置有效解决了传统风门底部杂物堆积的问题，试验期间未发生因杂物卡阻导致的风门故障。维护工作量减少约 70%，仅需每月进行一次常规检查和润滑保养。该风门操作简便，劳动强度大大降低，消除了大风压下开启困难的安全隐患。同时，风门的快速启闭特性减少了风流短路时间，有利于维持矿井通风系统的稳定性。

5. 讨论与分析

5.1. 技术优势评述

本研究提出的矿用简易速开卷帘风门具有多方面的技术优势。

快速响应能力：发条弹簧提供瞬时动力，风门启闭时间显著缩短，适用于需频繁通行的井下区域。

快速启闭减少了风流短路时间, 有利于维持矿井通风系统的稳定性。

能源独立性: 依靠机械储能实现运作, 克服了井下电力供应不稳定的问题。无需铺设电缆和配电设备, 降低了安装成本和维护复杂度。

高效清障性能: 清障装置与斜面底座的协同设计有效减少杂物堆积, 降低维护频率。独特的结构设计使清障效率比传统方式提高 50% 以上。

结构简单可靠: 机械结构简洁, 故障点少, 运行可靠。模块化设计便于拆卸更换, 维修时间比复杂电动风门缩短 60% 以上。

适应性强的特点: 可根据不同巷道断面尺寸进行定制设计, 满足多种应用场景需求。所有部件均采用防腐蚀处理, 适应井下潮湿环境。

5.2. 经济性分析

从全生命周期成本角度分析, 该风门虽然初始制造成本比普通手动风门高约 30%, 但运营成本显著降低。无需电力消耗, 维护成本降低约 50%, 主要体现为减少的人工清理时间和备件更换频率。

考虑到提高通行效率带来的生产效率提升和减少通风系统故障带来的安全效益, 该风门的投资回收期通常在 1~2 年之间, 具有较好的经济性。

5.3. 适用性与局限性

该风门适用于中小型矿井通风系统中需频繁启闭的场景, 尤其在电力基础设施薄弱的矿区具有显著优势。其主要技术参数适用范围为: 巷道断面 $3 \times 3 \text{ m}$ 至 $5 \times 4 \text{ m}$, 风压 200~1500 Pa, 环境温度 -15°C 至 $+40^{\circ}\text{C}$ 。

然而, 该风门也存在一定的局限性: 其性能高度依赖于发条弹簧的寿命与清障装置的耐磨性, 需定期维护以确保长期稳定性。在极端风压条件下(大于 1500 Pa), 可能需要加大弹簧规格或采用辅助动力系统。此外, 对于特别潮湿或腐蚀性环境, 需要采用特殊表面处理工艺。

6. 结论与展望

6.1. 主要结论

本文设计了一种基于发条弹簧驱动的矿用简易速开卷帘风门, 通过结构创新与机械自动化设计, 实现了风门的高效启闭与清障功能。主要结论如下。

该风门采用发条弹簧作为动力源, 无需外接电源, 结构简单, 可靠性高, 适用于井下复杂环境。

独特的清障装置与底座斜面设计有效解决了风门底部杂物堆积问题, 降低了维护频率。

滑轮导向系统确保了风门启闭过程的平稳性, 减少了运动阻力, 延长了使用寿命。

现场应用表明, 该风门可显著提高通行效率, 减少风流短路时间, 提高通风系统稳定性。

该风门具有较好的经济性, 投资回收期短, 适合在矿山推广使用。

6.2. 未来展望

基于本研究的结果, 未来可在以下方面进一步深入研究和改进。

材料优化: 研发新型复合材料应用于防风布制造, 提高耐磨性和抗老化性能。探索高性能合金材料在发条弹簧中的应用, 进一步提高储能密度和使用寿命。

智能化升级: 增加传感器监测系统, 实时监测风门状态、弹簧扭矩和杂物堆积情况。开发智能控制算法, 实现风门的自适应调节和预测性维护。

系列化开发: 针对不同巷道条件和风压要求, 开发系列化产品, 形成完整的产品体系。制定标准化

的设计规范和使用维护指南。

集成化应用：将该风门与矿井通风控制系统集成，实现风门的远程监控和集中管理。探索与其它通风设备(如风机、风窗)的协同控制策略。

综上所述，矿用简易速开卷帘风门为矿山通风系统提供了一种创新解决方案，具有广阔的应用前景和推广价值。未来的研究将继续优化其性能，扩大应用范围，为矿山安全生产提供更加可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 吴海卫, 张宜明, 吴征艳, 等. 矿用自动风门技术的发展及其分析比较[J]. 工矿自动化, 2010, 36(1): 61-65.
- [2] 邵昊, 蒋曙光, 吴征艳, 等. 推拉式自动风门系统在南谿河铁矿中的应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 5.
- [3] 孙建华, 邵芝梅. 煤矿自动控制风门的选择与应用[J]. 煤矿机械, 2006, 27(8): 134-136.
- [4] 孙建华, 赵景礼, 魏春荣, 等. 一种用于矿井中的多孔泄压阻隔爆自动风门[J]. 中国矿业, 2011, 20(3): 105-108.
- [5] 夏万报. 矿用无压风门的原理及其在通风系统中的应用[J]. 煤矿现代化, 2007(1): 43.
- [6] 王二鹏, 刘波, 郭文杰. 浅谈各种矿井风门的功能及应用[J]. 矿山机械, 2010, 38(19): 32-35.
- [7] 龚杰, 杨少峰, 彭浩. 矿井风门全自动互锁系统研制[J]. 电子设计工程, 2010, 18(6): 76-79.