

地下水封洞库施工中可伸缩式风管装置的设计与应用研究

张剑锋, 姚博文, 刘继响, 李鑫, 李复兴

中国石油管道局工程有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月23日

摘要

针对地下水封洞库等地下工程在钻孔爆破法施工中, 传统通风软管因紧邻掌子面而极易被爆破冲击波及施工机械损坏, 导致通风效率低下、材料损耗严重、施工成本增加及安全隐患突出等问题, 本文提出并设计了一种可重复使用的伸缩式风管系统。该系统由可轴向伸缩折叠的耐爆风管单元, 与配套的滑轨式快速收放悬挂机构集成构成。在爆破作业前, 风管可快速收缩至安全距离以规避冲击; 爆破后, 又可迅速伸展恢复通风。该设计显著降低了风管的非正常损耗率, 实现了关键通风段风管的重复利用, 保障了洞内特别是掌子面区域持续、稳定的高质量通风, 从而提升了施工效率, 降低了综合成本, 并具有良好的安全与环境效益。在QZGC工程应用中表明, 该系统是解决长距离、大断面、多工作面地下洞室群施工通风保障难题的有效技术创新, 对推动隧道及地下工程施工技术的绿色化、高效化发展具有借鉴意义。

关键词

地下水封洞库, 施工通风, 可伸缩风管, 滑轨系统, 爆破损伤, 绿色施工

Research on Design and Application of Retractable Air Duct Device in Underground Water-Sealed Cavern Construction

Jianfeng Zhang, Bowen Yao, Jixiang Liu, Xin Li, Fuxing Li

China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

Received: March 23, 2026; accepted: June 3, 2026; published: June 23, 2026

Abstract

In underground engineering projects such as underground water-sealed caverns constructed using

文章引用: 张剑锋, 姚博文, 刘继响, 李鑫, 李复兴. 地下水封洞库施工中可伸缩式风管装置的设计与应用研究[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(2): 264-268. DOI: 10.12677/jogt.2026.482031

the drill-and-blast method, traditional ventilation hoses are pro damage from blast shockwaves and construction machinery due to their proximity to the working face. This results in low ventilation efficiency, severe material loss, increased construction costs, and prominent safety. To address these issues, this paper proposes and designs a reusable telescopic ventilation duct system. The system integrates axially foldable blast-resistant duct units with a supporting rapid deployment and retraction mechanism featuring sliding tracks. Before blasting operations, the duct can be quickly retracted to a safe distance to avoid impact; after blasting, it can rapidly extend to restore ventilation. significantly reduces the abnormal loss rate of the ducts, enables the reuse of ducts in critical ventilation sections, and ensures continuous, stable, and high-quality ventilation within the caverns, particularly at the working face. Consequently, it improves construction efficiency, reduces overall costs, and offers favorable safety and environmental benefits. The application of this system in the demonstrates that it is an effective technological innovation for solving ventilation assurance challenges in the construction of long-distance, large-section underground cavern groups with multiple working faces, providing reference value for promoting green and efficient development of tunnel and underground engineering construction technologies.

Keywords

Underground Water-Sealed Cavern, Construction Ventilation, Flexible Duct, Sliding Rail System, Blasting Damage, Green Construction

Copyright © 2026 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

随着我国能源战略储备体系的不断完善与城市地下空间开发向纵深发展,大型地下水封石油洞库、深埋交通隧道、地下能源储配设施等巨型地下工程的建设日益增多[1]。此类工程普遍具有洞室跨度大、埋深深、工期长、作业面多且通风路径复杂等特点[2][3]。钻孔爆破法仍是当前硬岩地下洞室开挖的主流工法,其在施工中持续产生粉尘、炮烟(主要含 CO、NO_x 等有害气体)及内燃设备尾气,使得施工通风成为保障作业人员健康、维持机械设备正常运转、决定工程建设进度与安全的关键环节[4][5]。

传统的施工通风多采用大功率风机配合柔性风管(俗称“风带”)进行压入式通风。为有效稀释和排出掌子面有害物,风管末端需尽可能接近开挖面[6]。然而,在爆破作业时,强烈的冲击波、飞石及高温高压气体对紧邻掌子面的这段风管造成毁灭性破坏;此外,在出渣、排险等后续工序中,大型机械设备(如装载机、出渣车)的频繁移动也极易刮擦、擦拽固定悬挂的风管,导致其破损[7]。这使得末端风管实际上成为一种高消耗品,需要频繁更换。这不仅直接增加了工程的材料成本,更因更换风管导致的通风中断、工序衔接不畅,严重制约了施工循环效率,延长了工序间隔时间,并带来了因通风不良导致的聚集性气体中毒等安全隐患[8]。

因此,研发一种能够适应爆破施工恶劣环境、可重复使用、并能实现快速收放以保护自身的末端通风装置,成为地下工程,特别是采用多循环爆破作业模式的项目亟待解决的技术痛点。本文针对这一需求,借鉴柔性可伸缩结构理念,设计了一套集成可伸缩风管与滑轨悬挂系统的创新型通风末端解决方案,旨在从根本上降低风管的爆破损耗率,实现通风的稳定、连续与高效,从而为复杂地下工程的优质、安全、快速、经济建造提供技术支持。

2. 传统风管在地下洞库爆破施工中的破坏机理与现存问题分析

在深入阐述新型设计前,有必要系统分析传统风管在爆破工作面所面临的失效模式。其破坏主要源于以下三类机理:

冲击波超压破坏: 爆破瞬间产生的高强度空气冲击波是风管损毁的首要原因。冲击波超压远超柔性风管材料的抗拉强度,可直接导致风管管体撕裂、接缝崩开,甚至整个风带从悬挂点被扯脱[9]。

碎片撞击与射流侵彻: 爆破产生的岩体碎块(飞石)高速撞击风管,形成穿孔或划裂。同时,高温高压的爆生气体流亦可视为高速射流,对风管表面产生热-力耦合侵蚀作用,加速材料老化与破损。

机械刮蹭与疲劳损伤: 在非爆破时段,风管固定悬挂于洞顶/壁。进行装载、运输的工程机械及其工作装置(如挖斗、铲斗)或车辆顶部在回转、举升、行进过程中,极易与风管发生碰撞、刮蹭。这种反复的机械作用导致风管表面磨损、划伤,接头松动,最终引发漏风或结构性破坏。

基于上述破坏机理,传统通风模式暴露出几个核心问题:一是**经济性差**,末端风管作为“一次性”耗材,更换频繁,采购与安装成本持续发生;二是**通风可靠性低**,风管损坏导致有效通风风量衰减,掌子面炮烟和粉尘排出时间延长,恶化作业环境;三是**存在安全与进度风险**,通风不良直接影响作业人员健康与安全,且更换风管需中断其他作业,打乱正常施工循环,制约快速施工目标的实现。尽管可通过将风管末端悬挂点后移以规避部分破坏,但这会显著削弱掌子面的通风效果,并非治本之策。

3. 可伸缩折叠式风管系统设计

为解决上述问题,本文提出一种“主动防护”的设计思想:即通过使风管本身具备快速改变自身形态与位置的能力,在爆破威胁来临前主动撤离危险区域,威胁解除后又迅速复位履行职责。整套系统由可伸缩风管本体与收放悬挂机构两大部分构成。

3.1. 可伸缩风管本体设计

风管本体是可伸缩系统的核心功能部件。其设计目标是实现轴向长度上的大幅、快速、可靠伸缩,同时保证在伸展状态时具有足够的结构刚度以维持通风截面,并满足通风阻力、耐磨、抗静电、阻燃等安全规范要求[10]。

结构形式: 借鉴金属波纹管或铰链连接原理,设计/采用一种折叠伸缩式风管。管体由高强度、耐腐蚀的柔性复合材料(如高强聚酯纤维布涂覆 PVC 或聚氨酯)制成,作为蒙皮。其内部沿轴向均匀布置数个环形弹性支撑圈。支撑圈可采用具有良好抗疲劳特性的弹簧钢或复合材料制成,其自然状态保持圆形,为风管提供径向支撑。

伸缩机理: 相邻支撑圈之间通过特制的柔性连接件(如高强铰链或折叠织物)联接。当需要收缩时,在外部牵引力或支撑圈自身的弹性收缩力作用下,支撑圈可沿轴向相互靠拢,蒙皮在连接件处形成有规律的褶皱,从而实现长度的压缩,压缩比可达 1:3 至 1:5。在伸展时,依靠外部牵引力或支撑圈自身的弹性伸张力,将褶皱展开,恢复至工作长度与形状。

连接与密封: 风管两端设计有标准的法兰盘接口,用于与主通风管路及末端送风头的连接。所有活动关节和折叠处在设计时需进行专门的密封处理,如采用迷宫式密封条或弹性密封胶垫,确保在伸缩过程中及工作状态下,风管整体的漏风率控制在通风效果允许范围内(通常低于 5%)。

抗爆强化设计: 在风管最前端(最靠近掌子面)的 1~2 个节段,蒙皮材料可采用添加了凯夫拉纤维或钢丝网夹层的加强型复合材料,以提升其抗瞬间冲击和抗撕裂性能,作为额外的安全冗余。

3.2. 滑轨式快速收放悬挂系统设计

仅有可伸缩的风管本体不足以实现其快速、顺畅伸缩移动，必须配套设计一套可靠的悬挂与滑动系统。本文设计采用顶部滑轨方案。

系统构成：该系统主要由承重滑轨、滑动挂架、牵引与锁定机构组成。轻型高强度铝合金或钢制滑轨通过胀管螺钉固定于隧道拱顶，沿隧道轴线方向铺设。滑动挂架通过滚轮或滑块“骑跨”在滑轨上，可沿滑轨低阻力移动。可伸缩风管通过一组吊带与滑动挂架连接。

工作流程：在正常通风阶段，风管处于完全伸展状态，其末端靠近掌子面。临近爆破作业前，通过控制指令(可手动或远程电动控制)启动牵引，使滑动挂架/滚轮吊钩沿滑轨向后方(远离掌子面方向)快速移动。此移动力同步带动可伸缩风管本体轴向压缩、折叠，使其整体长度大幅缩短，从而将风管末端从高风险区回撤至安全距离。爆破及排险结束后，牵引机构反向动作，将滑动挂架/滚轮吊钩推回原位，风管在弹性支撑和气流作用下伸展复位，迅速恢复对掌子面的高效通风。

快速对接与锁定：为确保风管复位后接口的稳定性，在风管末端与滑轨末端，设计有磁吸式或卡扣式快速对接头，可实现连接锁定。滑动挂架方式在行程两端设有机械定位锁，确保工作位置准确、固定可靠。

4. 工程应用优势分析

该可伸缩式风管系统并非对传统风管的简单修补，而是一种系统性的解决方案革新，其工程应用价值体现在多个层面：

显著提升通风安全性与可靠性：系统允许风管末端在爆破时段安全回缩，爆破后又能第一时间恢复最佳通风位置。这保障了通风的连续性，使掌子面有害气体和粉尘浓度得以持续、快速降低，极大改善了作业环境，从根本上降低了职业健康危害和安全风险。

创造直接经济效益：风管从“消耗品”变为“耐用品”。单次投入后，可重复使用数百次乃至整个项目周期。节省了因频繁损坏而产生的大量风管购置费、运输费及安装人工费。经济效益分析模型显示，在长工期、多工作面项目中，该系统的增量投资通常可在较短时间内被节省的材料成本所覆盖。

提高施工综合效率：避免了因更换破损风管而导致的工序中断。施工循环中的通风准备时间被压缩，出渣、排险等后续工序可更早介入，从而缩短单个开挖循环时间，加快整体施工进度，实现工程建设的“提质增效”。

符合绿色施工理念：大幅减少了废弃风管材料的产生，降低了建筑垃圾的处理压力，节约了资源，体现了循环经济和可持续发展的工程建设理念。这与当前行业倡导的绿色化、工业化施工发展方向高度契合。

5. 环境适应性与适用范围

本系统的模块化设计充分考虑了洞室环境变化的适应性。由于风管截面远小于洞室截面，因此，断面形状变化对该风管系统使用没有任何影响。系统滑轨为单独金属材质模块，整体重量很小，且采用膨胀螺丝固定安装，锚固位置可随围岩质量情况横向调整，无论何种地质条件均不影响其安装使用。就适用规模而言，该系统特别适用于大跨度、长距离的主洞室施工，其机械化收放优势在大规模洞库中最为显著；而对于断面狭小的支洞、导洞、巷道，虽无技术障碍，但应根据经济效益和便捷性决定是否采用该装置。因此，该系统具备广泛的工程应用场景。

6. 结论与展望

本文针对地下洞库爆破施工中通风风管易损难题，提出了一种集成可伸缩风管与滑轨悬挂系统的创

新型解决方案。该系统通过赋予风管“主动避让”和“快速复位”的能力，有效解决了传统通风末端在爆破冲击和机械碰撞下的高损耗问题，实现了关键通风段风管的重复利用。

工程实践表明，该设计理念先进，结构可行，具有以下突出优点：(1) 从根本上降低了风管的非正常损耗，经济性显著；(2) 确保了掌子面通风的持续高效，安全与环境效益突出；(3) 优化了施工工序衔接，有利于提高施工效率。该系统特别适用于地下水封洞库、大型水工隧道、深埋矿山巷道等具有长距离、大断面、多循环爆破作业特点的地下工程项目。

未来，该技术可在以下方向进一步深化研究与优化：(1) **智能化控制**：集成传感器(如爆破震动传感器、有毒气体传感器)，实现风管收放与爆破作业联动的自动控制与智能预警。(2) **轻量化与模块化设计**：采用更先进的复合材料，优化结构，降低自重，并发展标准模块，便于快速安装与拆卸，适应不同断面尺寸。(3) **综合效能评估**：开展不同地质条件、爆破参数下的长期耐久性测试与全生命周期成本效益分析，形成更为完善的设计与应用指南。

可伸缩式重复利用风管系统是施工通风领域一项具有实用价值的创新，其推广应用将为复杂条件下地下工程的绿色、安全、高效建设提供有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 张顶立, 台启民, 房倩. 复杂隧道围岩安全性及其评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 270-296.
- [2] 刘泉声, 黄兴, 刘建平, 潘玉丛. 深部复合地层围岩与 TBM 的相互作用及安全控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1213-1224.
- [3] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004.
- [4] 杨小林, 王树仁. 岩石爆破损伤断裂的细观机理[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 247-252.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. GB/T 50455-2020 地下水封石洞油库设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2020/art_17339_247323.html
- [6] 张国枢. 通风安全学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [7] 吴波, 刘维华. 复杂环境隧道施工通风技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [8] 蒋仲安, 闫鹏, 陈举师, 等. 岩巷掘进巷道长压短抽通风系统参数优化[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 54-58.
- [9] 言志信, 王后裕. 爆破空气冲击波理论与数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [10] 国家安全生产监督管理总局. AQ 1071-2023 隧道施工用风筒安全技术要求[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2023.