

煤矿井下风桥结构优化设计及其通风效率研究

杨二只 刘高宏 贾昭昭

国能神东煤炭集团有限责任公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017209

摘要: 风桥作为煤矿井下通风系统的关键构筑物, 承担着分隔不同风压、风流, 保障风流按需定向流动的核心功能, 直接影响矿井通风效率、安全生产及能源消耗。传统风桥设计多依赖经验公式, 存在结构合理性不足、通风阻力偏大、抗冲击能力较弱等问题, 难以适配复杂地质条件与高产高效矿井的通风需求。本文基于流体力学理论、结构力学分析及数值模拟技术, 开展煤矿井下风桥结构优化设计研究。详细探讨风桥流道优化、材料选型、结构参数匹配等关键技术, 结合数值模拟与现场试验验证优化方案的可行性, 分析其在降低通风阻力、提升通风稳定性、增强结构安全性等方面的应用效果, 并对未来智能化、绿色化风桥发展趋势进行展望, 为煤矿井下通风系统升级改造提供技术支撑与参考。

关键词: 煤矿井下; 风桥; 结构优化; 通风效率; 数值模拟; 流体力学

Optimization Design of Air Bridge Structure and Research on Ventilation Efficiency in Underground Coal Mines

Yang Erzhi, Liu Gaohong, Jia Zhaozhao

Shendong Coal Group Co., Ltd., China Inner Mongolia Ordos 017209

Abstract: As a key structure in the underground ventilation system of coal mines, the air bridge plays a crucial role in separating different air pressures and airflows, ensuring the directional flow of air as required. It directly affects the ventilation efficiency, safety production, and energy consumption of the mine. Traditional air bridge designs often rely on empirical formulas, which have problems such as insufficient structural rationality, high ventilation resistance, and weak anti-impact capacity, making it difficult to meet the ventilation needs of complex geological conditions and high-yield, high-efficiency mines. This paper, based on fluid mechanics theory, structural mechanics analysis, and numerical simulation technology, conducts research on the optimization design of air bridge structures in underground coal mines. It elaborates on key technologies such as the optimization of air bridge flow channels, material selection, and structural parameter matching. The feasibility of the optimization scheme is verified through numerical simulation and field tests, and its application effects in reducing ventilation resistance, improving ventilation stability, and enhancing structural safety are analyzed. The paper also looks forward to the future development trends of intelligent and green air bridges, providing technical support and reference for the upgrading and transformation of underground ventilation systems in coal mines.

Keywords: Underground coal mines; Air bridge; Structural optimization; Ventilation efficiency; Numerical simulation; Fluid mechanics

0 引言

煤炭作为我国能源安全的战略基石, 其井下通风系统随开采深度与范围扩大面临严峻挑战, 风桥作为关键风流分隔设施, 其结构设计直接影响通风效率与安全。传统风桥常因结构不合理导致风流紊乱、阻力增大及能耗上升, 并可能引发瓦斯超限等隐患。本文通过分析风桥内风流运动规律, 结合数值模拟与新材料技术, 对流道形态、结构参数和材料性能进行优化, 旨在构建低阻力、高稳定、强耐久的风桥结构体系, 为矿井实现安全、高效、节能通风提供技术支撑。

1 煤矿井下风桥结构设计现状与问题分析

1.1 风桥结构设计现状

当前煤矿井下常用风桥主要分为三类: 混凝土风桥、金属风桥及复合材料风桥。混凝土风桥因成本较低、耐久性强, 广泛应用于永久通风系统, 其结构形式多为矩形截面直筒式, 流道长度根据井下巷道交叉角度确定, 通常采用 1:3 的坡度设计; 金属风桥以钢板焊接而成, 具有施工周期短、重量轻的特点, 适用于临时或半永久通风场景, 截面多为梯形, 流道转折处采用直角过渡; 复合材料风桥则凭借耐腐蚀、强度高的优势, 在高温、高腐蚀井下环

境中逐步推广,但应用规模仍有限。

在设计方法上,传统风桥设计主要依据《煤矿安全规程》中的最低要求,结合工程经验确定断面尺寸、材料强度等参数,例如风桥断面风速控制在6—8m/s,结构抗压强度不低于30MPa。设计过程中缺乏对风流动力学特性的量化分析,多采用经验公式估算通风阻力,忽略了流道形态、断面变化、表面粗糙度等因素对风流的影响^[1]。

1.2 传统风桥存在的主要问题

1.2.1 通风阻力过大,能耗浪费严重

传统风桥流道设计不合理,如直筒式风桥进出口转折处为直角,风流通过时易产生涡流与冲击损失,导致局部通风阻力系数高达1.5—2.0。矩形截面风桥的边角处存在明显的气流分离现象,形成回流区,进一步增加了通风阻力。某矿实测数据显示,传统混凝土风桥的通风阻力占所在通风支路总阻力的25%—35%,导致主扇运行负荷增加,年额外能耗达数万度。

1.2.2 结构稳定性不足,抗冲击能力弱

深部矿井地质条件复杂,地应力、采动影响显著,传统混凝土风桥脆性大、抗变形能力差,易出现裂缝、剥落等损坏;金属风桥则存在抗腐蚀性能不足的问题,长期处于井下高湿度、高瓦斯环境中,钢板易锈蚀,结构强度下降,在瓦斯爆炸冲击波作用下易发生变形坍塌。某矿曾因采动影响导致混凝土风桥开裂,造成风流短路,被迫停产检修,经济损失严重^[2]。

1.2.3 流道匹配性差,通风效率不均

传统风桥断面尺寸设计多基于平均风速估算,未考虑风流在流道内的速度分布规律,导致流道内风速差异较大,部分区域风速超过8m/s,易引发煤尘飞扬,而部分区域风速低于3m/s,可能造成瓦斯积聚。同时,风桥与前后巷道的衔接过渡突兀,风流转向时能量损失较大,通风效率仅为70%—80%。

1.2.4 施工与维护难度大

混凝土风桥施工周期长,需要支模、浇筑、养护等多个环节,对井下施工空间要求较高;金属风桥焊接工艺复杂,焊缝处易成为结构薄弱点;传统风桥维护依赖人工巡检,难以及时发现内部裂缝、腐蚀等隐患,维护成本高且效果不佳^[3]。

2 煤矿井下风桥结构优化设计关键技术

2.1 流道形态优化技术

基于计算流体动力学(CFD)理论,利用Fluent软件建立数值模型,对风桥流道进行优化设计。通过将直筒式

流道改为平滑的弧形流道,并采用15°—30°缓坡过渡,使局部通风阻力系数降低50%以上。在断面形状上,采用椭圆形或圆角矩形截面,有效减少气流分离与涡流,并使风速分布更加均匀。此外,通过采用渐扩渐缩式进出口过渡结构,风流转向的能量损失可降低40%—50%,最终形成低阻高效的流道系统^[4]。

2.2 结构参数匹配技术

结合矿井实际通风需求与地质条件,本研究建立了风桥结构参数优化模型,以实现断面尺寸、结构厚度与支撑间距等关键参数的精准匹配。断面尺寸以通风阻力最小和风速分布均匀为目标,基于流体力学原理及矿井风量确定最优面积,当风速控制在4—6 m/s时通风效率最佳,并建议高宽比保持在1.2—1.5以维持流场均匀性。结构厚度通过ANSYS软件进行力学分析,针对混凝土风桥采用300—500 mm顶板厚度并辅以双层钢筋网加固,金属风桥则选用8—12 mm波纹钢板以提升抗弯与抗冲击能力。支撑结构采用“钢架—桁架”组合体系,内部设置钢筋或型钢桁架,间距1.5—2.0 m,并在底部增设减震垫层,以增强整体稳定性和抗采动影响能力^[5]。

2.3 材料选型与改性技术

针对不同矿井环境及使用需求,对风桥材料进行了优化选型。永久通风系统推荐采用超高强混凝土(UHPC),其抗压与抗拉强度高,抗裂和抗冲击性能显著优于传统混凝土。临时或半永久系统采用耐蚀合金钢板,配合表面防腐处理与内部填充泡沫,兼具防腐、保温与减震功能。在高湿度、高腐蚀环境下,则选用轻质高强、耐腐蚀的玻璃钢(FRP)复合材料,适应井下温变环境并便于安装。通过应用新材料与改性技术,全面提升了风桥的力学性能、耐腐蚀性与抗冲击能力。

2.4 智能监测与自适应设计技术

通过在风桥内部部署压力、风速与应变等传感器,构建了实时监测系统,以采集通风参数与结构受力状态,为风桥的智能化运行与自适应调控提供数据支持。通风参数监测通过高精度传感器实时获取风桥内的风速与风压数据,并上传至地面监控中心。系统能在风速过高或风压异常时自动预警。结构状态监测通过在关键受力部位安装光纤应变传感器,实时感知结构形变,一旦数据超过安全阈值便及时发出损伤预警,指导维护。基于实时数据,系统通过构建自适应模型,可自动调节风桥风门的开度,从而动态优化风流分配。例如,当监测到局部瓦斯浓度升高时,系统能自动增加该区域的风量,以预防瓦斯积聚,保障通风

系统的高效与安全运行。

3 风桥结构优化设计案例分析

3.1 案例背景

某矿为年产 800 万吨的大型现代化矿井，开采深度为 800—1200m，井下主要通风系统采用中央并列式通风，主扇额定风量为 $12000\text{m}^3/\text{min}$ ，额定风压为 3500Pa。该矿原 3# 风桥为传统矩形截面混凝土风桥，断面尺寸为 $3.0\text{m} \times 2.5\text{m}$ （宽 × 高），流道长度为 15m，运行过程中存在通风阻力大、风速分布不均等问题，实测通风阻力为 450Pa，占所在通风支路总阻力的 30%，主扇运行能耗较高，且风桥顶板出现多处细微裂缝。

3.2 优化设计方案

对 3# 风桥进行结构优化设计：

流道形态优化：采用弧形流道 + 椭圆形截面设计，流道曲线半径为 8m，进出口过渡段长度为 3m，过渡角度为 20° ；椭圆形断面尺寸为长轴 3.5m、短轴 2.8m，流道中部断面长轴扩大至 3.8m，形成变截面流道。

结构参数优化：采用超高强混凝土（UHPC）材料，顶板厚度为 400mm，侧板厚度为 300mm，内部设置双层钢筋网 + 碳纤维桁架支撑，桁架间距为 1.8m。

智能监测系统：在风桥内部布置 4 个风速传感器、2 个压力传感器及 6 个应变传感器，实现通风参数与结构状态的实时监测。

3.3 优化效果验证

3.3.1 数值模拟验证

采用 Fluent 软件对优化前后的风桥流场进行数值模拟，结果显示：优化后风桥的通风阻力降至 180Pa，较优化前降低 60%；流道内风速分布均匀，最大风速为 5.8m/s，最小风速为 4.2m/s，风速差值控制在 1.6m/s 以内，涡流区域面积仅为优化前的 25%。

3.3.2 现场试验验证

优化后的风桥施工完成后，进行为期 3 个月的外场试验，实测数据如下表所示：

指标	优化前	优化后	变化率
通风阻力 (Pa)	450	175	-61.1%
平均风速 (m/s)	6.8	5.2	-23.5%
风速标准差 (m/s)	1.8	0.5	-72.2%
主扇能耗 (kWh/h)	1850	1320	-28.6%
结构最大应变 ($\mu\epsilon$)	850	320	-62.4%

外场试验结果表明，优化后的风桥通风阻力显著降低，风速分布更加均匀，主扇能耗减少 28.6%，结构受力状态明显改善，最大应变降低 62.4%，未出现新的裂缝或

损伤，通风效率提升至 92% 以上。同时，智能监测系统运行稳定，能够实时准确监测通风参数与结构状态，成功预警 2 次小规模风流波动，保障了通风系统的稳定运行。

4 风桥结构优化设计应用效果总结

4.1 降低通风阻力，节约能源消耗

通过流道形态优化与结构参数匹配，优化后的风桥通风阻力较传统风桥降低 50%—60%，有效减少了通风系统的总阻力。某矿多座风桥优化后，全矿通风系统总阻力降低 22%，主扇运行负荷显著下降，年节约电能消耗约 120 万 kWh，按工业电价 0.6 元 /kWh 计算，年节约电费 72 万元，节能效果显著。

4.2 提升通风稳定性，保障安全生产

优化后的风桥流场分布均匀，避免了涡流、回流等现象，有效降低了瓦斯积聚与煤尘飞扬的风险。同时，新型材料与优化结构增强了风桥的抗冲击能力与耐久性，在采动影响与瓦斯爆炸冲击波作用下的结构稳定性提升 3—5 倍，减少了风桥损坏导致的通风系统故障，保障了矿井安全生产。某矿优化风桥投入使用后，通风系统故障率从之前的 8% 降至 1.5%，未发生因风桥问题引发的安全事故。

4.3 优化施工工艺，降低维护成本

新型材料与结构设计简化了风桥施工流程，例如玻璃钢风桥采用模块化拼装工艺，施工周期较传统混凝土风桥缩短 60% 以上；超高强混凝土风桥的养护时间从 28 天缩短至 7 天，大幅提高了施工效率。同时，智能监测系统实现了风桥运行状态的实时监控，维护人员可针对性地开展检修工作，避免了盲目维护，维护成本降低 40%—50%。

4.4 适配复杂工况，拓展应用范围

优化后的风桥通过变截面设计、材料改性及自适应调整技术，能够适配不同风量需求、地质条件与矿井环境，可应用于浅部矿井、深部矿井、高瓦斯矿井等不同类型的煤矿。例如，在高瓦斯矿井中，优化后的风桥可有效控制风流速度，避免瓦斯积聚；在深部矿井中，超高强材料与加固结构能够抵御高地应力与采动影响，确保风桥长期稳定运行。

5 结语

综上，煤矿井下风桥结构优化设计是提升通风效率与保障安全的关键。本文针对传统风桥存在的通风阻力大、结构稳定性不足等问题，综合运用流体力学、结构力学与数值模拟技术，提出了流道形态优化、结构参数精准匹配、新材料应用及智能监测等系统方案。实践证明，优化后风桥的通风阻力可降低 50% 以上，主扇能耗减少 28% 以上，

结构安全性与耐久性显著提升。未来，风桥设计将朝着智能感知、自适应控制与低碳环保方向发展，煤矿企业与相关部门应加强技术研发、标准更新与推广应用，为煤矿通风系统的高效、安全运行和行业高质量发展提供坚实支撑。

参考文献：

[1] 张建国, 李刚. 煤矿井下通风构筑物优化设计研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 145-151.

[2] 王强, 刘敏. 基于 CFD 的风桥流道优化设计与数值模拟[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(3): 78-83.

[3] 陈峰, 赵伟. 超高强混凝土在煤矿风桥结构中的应用研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(8): 67-71.

[4] 李艳, 孙亮. 煤矿风桥智能监测系统设计与应用[J]. 自动化应用, 2024, 66(2): 89-91.

[5] 张国栋, 王军. 复合材料风桥在高湿高腐蚀矿井中的应用[J]. 煤矿机械, 2022, 43(7): 123-125.

作者简介：杨二只（1985.04-），男，汉族，山西省太原市，本科，助理工程师，副队长兼副书记，研究方向：采矿工程。