

不同通风方式对矿井均压效果的影响

党 龙

中煤科工集团沈阳研究院有限公司 辽宁 抚顺 113000

摘 要: 矿井均压通风是防治煤层自然发火与瓦斯异常涌出的关键技术,其效果受通风方式影响显著。本文对比分析了中央式、对角式及混合式3种通风方式在均压中的气流分布、风压稳定性及漏风控制能力。通过数值模拟与现场实测,发现对角式均压适应性强,压差削减率可达87.5%以上;中央式响应快但稳定性差;混合式调控复杂。结果为矿井选择合理通风方式提供了理论依据。

关键词: 矿井通风;均压效果;通风方式;漏风控制;风流稳定性

引言: 矿井火灾与瓦斯事故是我国煤矿主要安全威胁,采空区漏风引发的自燃与瓦斯积聚尤为突出。均压通风通过调节风压分布消除漏风压差,抑制灾害发生。不同通风方式决定了风压场初始构型与调节能力,直接影响均压效果。目前现场多依靠经验选取通风方式,缺乏系统对比分析。本研究聚焦不同通风方式下均压效果差异,通过数值模拟与现场实测,定量评价3种典型通风方式的均压性能,为矿井均压设计提供科学指导。

1 矿井均压通风理论基础

1.1 均压通风原理

均压通风的核心在于“以风治风”,即通过调整通风系统的风压分布,使漏风通道两端风压趋于相等或大幅降低压差。其数学本质可由风压平衡方程描述:漏风量等于漏风通道两端压差除以风阻的平方根。均压的目标是使漏风通道两端静压差趋近于0。在实际应用中,可通过增阻调节、降阻调节、辅扇增压或调压风门等方式实现。均压技术不仅用于防灭火,还广泛应用于瓦斯治理领域,通过改变采空区与工作面的压力关系,抑制瓦斯向工作面涌出。

1.2 通风方式分类及风压场特征

根据进风井与回风井的布置方式,矿井通风方式主要分为3类。第1类是中央式,进风井与回风井均位于井田中央,风流路线短,风压梯度集中,适合小型矿井或单翼开采。第2类是对角式,进风井位于井田中央,回风井位于两翼边界,风压分布较为均匀,适合大型矿井或双翼均衡开采。第3类是混合式,是中央式与对角式的结合,适用于复杂煤层群或超大型矿井。不同方式下,风压场的空间分布差异显著,中央式压差集中在工作面两端,对角式压差沿走向缓慢变化,混合式则呈现

多峰分布,这些差异直接影响均压措施的施加点选择与调节效果^[1]。

1.3 均压效果评价指标

本文采用3项指标定量评价均压效果。第1项是压差削减率,即均压前后漏风通道两端压差之差与原始压差的百分比。第2项是漏风量减少率,通过示踪气体法测定均压前后采空区漏风量的变化百分比。第3项是风流稳定性系数,定义为1减去关键区域风压标准差与平均风压的比值,该系数越接近1表示风流越稳定。3项指标从不同维度反映均压效果,压差削减率衡量直接调控能力,漏风减少率体现最终治理效果,稳定性系数评价系统抗扰动能力。

2 不同通风方式均压效果数值模拟

2.1 模型建立

采用计算流体力学软件建立典型矿井三维通风模型,模型尺寸为走向长度2000 m、倾向宽度1200 m、垂直高度300 m,包含1个综采工作面、1条运输巷、1条回风巷及采空区。设定3种通风方式。中央式布置为进风井与回风井均位于模型中央位置,标高不同形成自然风压。对角式布置为进风井位于中央,2个回风井分别位于两翼边界。混合式布置为中央进风,两翼对角回风,兼具两者特点。

边界条件设定为:总风量 $80\text{ m}^3/\text{s}$,调节风门开度可连续调节,辅扇最大增压能力300 Pa。采空区设为多孔介质,渗透率取 $1\times 10^{-8}\text{ m}^2$,模拟实际垮落带的孔隙特征。工作面长度为250 m,采高6 m。

2.2 模拟方案

模拟分为2个阶段。第1阶段为基准工况,不采取任

何均压措施,测定3种通风方式下的工作面两端原始压差、采空区漏风分布及风压自然波动情况。第2阶段为均压工况,分别对3种通风方式采取针对性均压措施。中央式在工作面进风巷设置调节风门,通过增阻方式降低工作面两端压差。对角式利用边界回风井的辅扇进行增压调节,均匀抬升整个采区风压。混合式采用中央增阻与两翼增压的联合调节方式^[2]。同时,为测试风流稳定性,模拟风机频率产生 $\pm 10\%$ 的波动,观测各方式下关键区域风压的变化幅度。

2.3 模拟结果分析

从压差削减能力看,中央式原始压差 285 Pa,均压后降至 42 Pa,削减率 85.3%;对角式原始压差 156 Pa,降至 18 Pa,削减率 88.5%;混合式原始压差 203 Pa,降至 28 Pa,削减率 86.2%。对角式削减率最高,基础风压分布最有利。从漏风控制看,中央式漏风减少 71.2%,对角式减少 79.5%,混合式减少 74.6%。对角式风压梯度平缓,漏风通道少;中央式压力梯度陡峭,深部漏风难以阻断。从风流稳定性看,风机频率波动 $\pm 10\%$ 时,中央式风压波动 ± 12.3 Pa,对角式 ± 5.6 Pa,混合式 ± 8.2 Pa。对角式风路长、节点多,扰动被分散吸收,稳定性最佳;中央式压力场集中,扰动传递快,易引发连锁反应。

3 通风方式影响均压效果的机理分析

3.1 风压梯度分布差异

中央式通风风压从进风井向回风井急剧下降,工作面附近形成陡峭压降梯度,压差高度集中。均压调节时需大幅改变局部风阻,易引发风流反转或邻近区域压力失控。对角式通风风压沿工作面缓慢下降,压差分散,只需微调两翼风阻或辅扇即可实现整体平衡,系统鲁棒性强。混合式介于两者之间,调节时需同时考虑中央与两翼的耦合关系,风门与辅扇联动复杂,易出现相互抵消或叠加过调。

3.2 漏风通道识别能力

均压前提是准确识别漏风路径及压差。对角式通风回风井位于边界,漏风路径清晰,易于通过示踪气体或压差法精确定位,漏风主要集中于上隅角与边界回风巷之间。中央式通风漏风可能绕向采空区深部再返回,路径迂回隐蔽,需多点压差监测才能锁定。混合式通风漏风通道多源,既有中央短路径也有边界长路径,识别工作量最大,对监测系统要求最高。

3.3 调节措施的适应性分析

增阻调节下,中央式在进风巷设风门后,上游升压

下游降压,对邻近区域影响显著,易引发连锁反应。对角式增阻可分散在两翼回风巷,对主系统干扰小。辅扇增压下,对角式在边界设辅扇可均匀抬升采区风压,效果可控;中央式因风路短、阻力集中,易造成局部超压。联合调节仅适用于混合式,需中央增阻与两翼增压精确配合,参数整定周期长,对人员技术要求高^[3]。

3.4 动态扰动下的响应特性

矿井通风系统常受自然风压变化、风机工况漂移、风门状态改变等扰动。对角式风路长、节点多,扰动能量沿程衰减并分流,响应平缓,不易造成压差剧烈波动。中央式扰动传递快,工作面压差可在数十秒内变化数十帕斯卡,易诱发漏风反向或瓦斯异常涌出。混合式响应特性介于两者之间,但因存在2个调压点,扰动可能引发耦合振荡,表现为风压周期性波动。

4 现场实试验证

4.1 试验矿井概况

选择一处高瓦斯矿井3个相似采区进行现场实试验证。3个采区煤层条件基本一致,厚度 6.5 m,倾角 8°,采用 U 型通风方式。采区 A 采用中央式通风,采区 B 采用对角式通风,采区 C 采用混合式通风。各采区均配备调压风门与辅扇作为均压执行机构,并有独立的风压监测系统。3个采区开采深度相近,地质构造简单,具备对比条件。

4.2 实测方法

在工作面两端、采空区边缘及回风巷关键节点布设高精度风压传感器,连续监测 72 小时。实测分为3个阶段:第1阶段测定原始状态下的风压差与漏风量;第2阶段实施均压措施,记录调节过程中的参数变化;第3阶段进行风机低频扰动试验,人为改变主要通风机频率,观测各采区风压波动情况。漏风量测定采用六氟化硫示踪气体法,在采空区预设释放点,在回风巷采集气体样本,根据示踪气体浓度衰减计算漏风量^[4]。

4.3 实测结果对比

实测数据显示,采区 A 中央式通风原始压差为 302 Pa,均压后降至 51 Pa,压差削减率为 83.1%,漏风减少率为 69.8%,风流稳定性系数为 0.72,调压响应时间为 18 min。采区 B 对角式通风原始压差为 168 Pa,均压后降至 21 Pa,压差削减率为 87.5%,漏风减少率为 77.3%,风流稳定性系数为 0.91,调压响应时间为 42 min。采区 C 混合式通风原始压差为 221 Pa,均压后降至 36 Pa,压差削减率为 83.7%,漏风减少率为 73.2%,风流稳定性系数为 0.84,调压响应时间为 65 min。从实测结果可

以看出, 对角式通风在压差削减率、漏风减少率和稳定性系数 3 项指标上均优于其他 2 种方式, 但调压响应时间较长, 这是因为对角式风路长、调节点距离远, 压力传递需要更长时间。中央式通风响应最快, 18 min 即可完成调压, 但稳定性最差, 0.72 的稳定性系数表明其抗扰动能力不足。混合式通风各项指标居中, 但调压响应时间最长, 达到 65 min, 且现场操作记录显示, 混合式需要频繁调整 2 个调压点, 工人操作难度大, 实际均压效果波动较大。实测压差略高于模拟值, 因现场巷道变形、风阻波动等复杂因素所致, 但两者趋势一致, 相互印证。

4.4 扰动试验结果

风机低频扰动试验中, 采区 A 在风机频率波动 $\pm 10\%$ 时, 工作面压差瞬时变化达到 ± 35 Pa, 采空区气体监测仪显示出现异常涌出, 瓦斯浓度短时升高。采区 B 在相同扰动条件下, 工作面压差变化仅为 ± 7 Pa, 气体监测稳定。采区 C 变化为 ± 15 Pa, 但出现持续时间约 5 min 的周期性波动, 分析认为是中央增压与两翼增压 2 个调节点之间的耦合振荡所致。实测充分表明, 对角式通风方式本身具有更合理的风压场分布, 是实施均压优先选择的通风系统构型。中央式虽然响应快, 但稳定性不足, 在动态工况下存在安全风险。混合式理论上可兼顾两者优点, 但工程实现难度大, 对自动化控制水平要求高。

5 工程应用建议与优化策略

5.1 不同条件下的通风方式选择

针对单翼开采、埋深浅、自然发火严重的矿井, 优先推荐对角式通风, 两翼回风井辅扇独立控制, 采用先平衡两端压差再整体提压的策略。对于双翼均衡开采、瓦斯涌出量大的大型矿井, 推荐混合式通风, 以对角为主、中央为辅, 设置分区均压系统, 各采区独立调节。对于小型矿井或采区集中布置, 可采用中央式通风, 但必须增设自动调压风门, 加强压差实时监测, 严禁手动盲目增阻。对于多煤层联合布置、采空区连通性强的复杂矿井, 推荐分区对角通风, 各煤层独立均压并设置隔离设施防止层间串风^[5]。

5.2 均压参数优化方法

针对对角式通风, 建议采用边界辅扇恒压控制, 使采区保持微正压, 同时在两翼回风巷设置可调节风窗,

实现先平衡压差再整体提压的两步法操作。针对混合式通风, 因存在中央与两翼的耦合问题, 建议引入压差解耦算法, 将调压量解耦计算, 避免耦合振荡, 推荐采用 PLC 自动均压系统, 控制周期不大于 10 秒。针对中央式通风, 采用多点联合调压, 在进风巷设调节风门, 同时在回风巷增设辅助调节点, 分散压差调节负荷。

5.3 动态均压技术发展方向

传统均压多为静态调节, 而现代矿井工况不断变化, 需发展动态均压技术。不同通风方式的适应性不同: 对角式压力场线性度好, 适合接入 PID 闭环控制, 可根据实时压差自动调节辅扇频率; 中央式压力场非线性强, PID 控制易失稳, 应采用模糊控制或自适应控制; 混合式需采用分布式智能均压节点, 各节点通过工业以太网通信, 协同完成均压任务, 实现对复杂工况的快速响应。

结束语

本研究通过数值模拟与现场实测, 系统揭示了中央式、对角式、混合式 3 种通风方式对矿井均压效果的影响规律。对角式通风因风压梯度平缓、漏风路径清晰, 在压差削减、漏风控制及动态稳定性方面均表现最优, 是实施均压技术的理想构型。中央式响应迅速但稳定性不足, 混合式调控灵活但工程复杂。建议新建矿井优先采用对角式通风, 生产矿井应根据自身条件优化均压参数并引入动态控制技术。后续可进一步研究极端扰动下均压系统的自适应调控策略及智能监测预警方法。

参考文献

- [1] 姚尚辉, 张国梁, 杨向东, 等. 高海拔矿井局部增压通风系统设计与效果分析 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(9): 158-164.
- [2] 臧燕杰, 杨彦龙. 局部通风系统优化对矿井安全生产的影响 [J]. 陕西煤炭, 2022, 41(3): 87-89, 93.
- [3] 王振国, 侯双荣, 王勇, 等. 均压通风技术在煤矿低氧工作面治理中的应用 [J]. 陕西煤炭, 2026, 45(5): 137-142.
- [4] 徐杰. 同向气动风门在矿井均压通风系统中的应用 [J]. 机械管理开发, 2023, 38(3): 274-275, 282.
- [5] 吕鹏飞, 林看, 王少珂. 均压通风技术在治理综采工作面回风隅角缺氧的应用 [J]. 陕西煤炭, 2022, 41(2): 149-152.