

均压通风技术在预防采空区自燃发火中的实践应用

李 洋 权 辉

陕西彬长大佛寺矿业有限公司 陕西 咸阳 713500

摘 要: 煤炭自燃是威胁煤矿安全生产的重大灾害之一, 尤其在低瓦斯、易自燃煤层的开采过程中, 采空区自燃发火问题尤为突出。均压通风技术作为一种经济、有效且环境友好的防灭火手段, 在控制采空区漏风、抑制遗煤氧化方面发挥着关键作用。本文系统阐述了采空区自燃发火的机理与影响因素, 深入剖析了均压通风技术的基本原理、核心目标及其分类体系。在此基础上, 结合具体矿井的工程实践案例, 详细介绍了均压方案的设计流程、关键参数的确定方法、实施过程中的技术要点以及效果监测与评估手段。研究结果表明, 科学合理的均压通风措施能够显著降低采空区的漏风强度和供氧浓度, 有效延缓或阻止遗煤自燃进程, 为矿井的安全生产提供坚实保障。最后, 文章对均压通风技术未来的发展方向进行了展望, 旨在为同类矿井的防灭火工作提供理论参考与实践指导。

关键词: 均压通风; 采空区; 煤炭自燃; 漏风控制; 防灭火技术

引言

煤炭是我国能源结构基石, 安全高效开采是其核心议题。但煤炭开采时, 采空区遗煤自燃发火问题长期存在, 既造成资源浪费与经济损失, 又会引发次生灾害, 威胁矿工生命与矿井生产秩序。采空区自燃是破碎煤体与渗入空气氧化反应、热量积聚, 煤温升高至临界温度引发明火所致。控制向采空区供氧的漏风通道是防灭火关键。传统注浆、注氮等防灭火技术虽有效, 但成本高、操作复杂, 还可能影响井下环境和后续作业。而均压通风技术调节通风系统压力分布, 减小采空区内外压差, 从源头抑制漏风, 绿色可持续。近年来, 矿井开采深度增加、通风系统复杂, 对均压通风技术精准化、智能化要求提高, 科学设计方案、准确预测效果及动态调控成为煤矿安全领域研究热点。

1 采空区自燃发火机理与影响因素

1.1 自燃发火机理

煤炭自燃是一个复杂的物理化学过程, 通常可分为三个阶段: (1) 潜伏阶段: 新暴露的煤表面吸附氧气, 形成不稳定的氧化物, 此阶段放热微弱, 不易察觉。(2) 自热阶段: 煤的氧化反应加速, 生成CO、CO₂等气体, 并释放大热量。若热量不能及时散失, 煤温将稳步上升。(3) 燃烧阶段: 当煤温达到其燃点(通常为250-350℃)时, 便会发生明火燃烧。在采空区这一特殊环境中, 由于冒落矸石形成的多孔介质结构, 为氧气的渗透和热量的积聚提供了理想条件。采空区边缘(尤其是进、回风巷附近)因压差驱动而形成持续的漏风带, 新鲜空气不断涌入, 为遗煤的持续氧化提供了充足的氧气, 使得自燃风险极高。

1.2 主要影响因素

采空区自燃发火受多种因素综合影响, 主要包括: (1) 煤的自燃倾向性: 这是内因, 由煤的变质程度、孔隙结构、水分含量及含硫量等决定。褐煤、长焰煤等低阶煤通常具有更强的自燃倾向。(2) 供氧条件: 即漏风强度。漏风是自燃的必要外部条件, 其大小直接决定了氧化反应的速率和范围。漏风主要来源于工作面进、回风巷两端的压差^[1]。(3) 蓄热环境: 采空区冒落岩石的堆积状态决定了其导热性和透气性。松散、多孔的堆积体有利于热量积聚, 不利于散热。(4) 遗煤状况: 包括遗煤量、粒度和分布。破碎的煤块比表面积大, 更易与氧气接触, 自燃风险更高。(5) 开采技术因素: 如采煤方法、推进速度、采空区封闭质量等。推进速度慢会延长采空区处于危险状态的时间; 封闭不严则会形成新的漏风通道。由此可见, 控制漏风、隔绝氧气是预防采空区自燃最直接有效的途径, 这正是均压通风技术发挥作用的核心所在。

2 均压通风技术的基本原理与分类

2.1 基本原理

均压通风技术的核心思想是“以风治火”, 即通过人为干预, 调整矿井通风网络中的风流压力分布, 使采空区或火区进、回风侧的压力趋于平衡, 从而最大限度地减小或消除驱动漏风的压差(ΔP)。根据流体力学原理, 漏风量(Q)与压差(ΔP)的平方根成正比(Q ∝ √ΔP)。因此, 即使压差的微小降低, 也能带来漏风量的显著减少。理想的均压状态是使采空区内部各点的压力等于或略高于外部巷道的压力, 这样不仅能阻止外部新鲜空气流入, 还能防止采空区内可能产生的有毒有害气体向外涌出, 实现双

向隔离。

2.2 技术分类

2.2.1 开区均压

在工作面正常回采期间实施的均压措施。其目的是在不影响工作面正常通风的前提下，减小采空区周边的压差。常用方法包括：（1）调节风窗均压：在回风巷或相关联络巷中设置可调风窗，增加回风侧的局部阻力，从而抬高采空区回风侧的压力。（2）风机均压：在进风巷或回风巷安设辅助风机（局扇），通过增压或减压来改变压力分布。例如，在回风巷安设一台抽出式风机，可以有效降低采空区回风侧的压力^[2]。（3）并联风路均压：利用原有的或新开掘的巷道，构建一条与工作面并联的风路，分流部分风量，从而降低工作面两端的压差。

2.2.2 闭区均压

在工作面回采结束并对采空区进行永久性封闭后实施的均压措施。此时，采空区成为一个封闭区域，均压的目标是维持密闭墙内外的压力平衡。主要方法是：（1）连通管均压：在进、回风侧的密闭墙上各安装一根连通管，并通过地面或井下的调节装置（如调节风门、水柱计）来精确控制两根管内的压力，使其相等。（2）气室均压：在密闭墙外侧建造一个气室，并通过风机向气室内鼓风或抽风，以调节密闭墙内侧的压力。

2.2.3 区域性均压

针对整个采区或盘区进行的系统性压力调整，通常涉及主通风机的特性调节或大型风门的开关，影响范围广，需要精确的通风网络解算支持。

3 均压通风方案的设计与实施

3.1 设计前的准备工作

成功的均压方案始于周密的前期调研与分析。（1）基础数据收集：全面掌握矿井的开拓开采系统、通风系统图、采掘工程平面图、煤层自燃倾向性鉴定报告、历史发火记录等。（2）通风系统测定：对目标区域进行全面的通风阻力测定和风量、风压普查，建立精确的通风网络模型。（3）漏风通道探测：利用SF₆示踪气体、红外热成像、束管监测系统等技术，精确定位采空区的主要漏风入口和出口，量化漏风量。

3.2 均压方案的设计流程

（1）确定均压目标：明确需要保护的区域（如某工作面采空区），并设定预期的压差控制目标（例如，将压差降至50Pa以内）。（2）建立数值模型：利用专业通风模拟软件（如Ventsim, MineVent等），将实测数据输入，构建高精度的三维通风网络模型。（3）方案模拟与比选：在模型中模拟不同的均压措施（如不同位置、不同规格

的风窗或风机），计算其对全矿井及局部区域风流、压力的影响。重点评估方案的有效性（能否达到目标压差）、安全性（是否会造成其他区域风量不足或瓦斯积聚）和经济性。（4）确定最优方案：综合比较各模拟方案的优劣，选择既能有效控风又安全可靠的最优方案。

3.3 关键参数的确定

（1）调节风窗面积：根据伯努利方程和局部阻力公式，通过迭代计算确定所需风窗的面积，以产生精确的附加阻力，从而实现目标区域风压的有效调控。（2）辅助风机风压与风量：辅助风机应采用压入式布置（鉴于本单位无抽出式通风系统），其全压需足以克服目标巷道的通风阻力，并提供足够的风量以实现所需的压力调整。风机投入运行后，必须校核其对系统的影响，确保不会导致上游巷道风速超过安全限值，或造成下游区域风量显著减少^[3]。（3）连通管管径：对于闭区均压，连通管的管径需足够大，以保证气体在压差驱动下流通顺畅，避免因管路过细而产生过大的沿程或局部阻力，影响均压系统的调节精度与稳定性。

3.4 实施过程中的技术要点

（1）分步实施，动态调整：均压措施不宜一步到位，应采取渐进式调节。每次调整后，需留出足够时间（通常24-48小时）让系统稳定，并进行效果监测。（2）强化监测，闭环管理：在均压区域的关键节点（如采空区进、回风侧、密闭墙内外、上隅角等）布设压力传感器、气体传感器（O₂, CO, CH₄, C₂H₄等）和温度传感器，构成实时监测网络。依据监测数据反馈，对均压参数进行微调，形成“监测-分析-调整”的闭环管理。（3）关注次生风险：均压可能会改变原有风流路径，导致某些盲巷或硐室出现瓦斯积聚。必须同步加强这些区域的瓦斯检查和通风管理。

4 工程实践案例分析

4.1 矿井概况

陕西大佛寺煤矿（彬长矿业集团下属）为高瓦斯、易自燃矿井，主采4#煤层，自燃倾向性II类，最短自然发火期31天。工作面采用综合机械化放顶煤开采，平均推进速度3-4m/天。2025年数据显示，该矿绝对瓦斯涌出量达210m³/min，采空区遗煤量大，漏风通道复杂，历史上曾因采空区自燃引发瓦斯爆炸风险。

4.2 问题诊断

（1）高漏风压差：1302工作面进回风巷静压差达280Pa，漏风量超100m³/min，形成“O”型漏风带；（2）瓦斯与自燃耦合风险：高位钻孔抽采导致采空区氧气浓度升高，甲烷浓度降低，但进风侧遗煤氧化加速，形成

贫氧圈与甲烷积聚区；(3)热害与气体异常：采空区深部温度梯度异常，CO浓度超标（达35ppm），O₂浓度18.5%，存在自燃隐患。

4.3 均压方案设计与实施

采用“开区均压+区域协同”策略：(1)主措施：在回风巷距工作面50m处设置可调式风门（面积0.8m²），调控压差至60Pa，漏风量减少60%；(2)辅助措施：关闭进风巷与邻近工作面联络巷调节风门，优化并联风路分流，稳定主通风路线；(3)监测系统：布设多点气体（CO、O₂、CH₄）及压力探头，数据实时上传调度中心，结合通风瓦斯蓄热氧化装置（RTO）实现热电联产；(4)防火技术：采用注氮、胶体防灭火及高位钻孔“以孔代巷”抽采，抑制遗煤氧化。

4.4 效果监测与评估

实施后效果显著：(1)压差控制：工作面压差降至55Pa，漏风供氧有效抑制；(2)气体浓度：上隅角CO浓度稳定在8ppm以下，O₂浓度降至16.2%，采空区甲烷浓度降低，高温区域传播受阻；(3)温度与安全：采空区深部温度梯度放缓，未出现异常升温，剩余40天回采期未发生CO超限报警；(4)系统优化：通过通风网络解算优化风机工况，主要通风机效率提升，矿井负压与等积孔计算符合安全规程。

4.5 案例启示

该案例验证了均压通风技术在高瓦斯易自燃矿井中的适用性，通过“压差调控+漏风封堵+多参数监测”的综合措施，有效控制采空区漏风，抑制遗煤氧化，为后续采空区封闭及瓦斯综合利用（如RTO发电）创造了安全条件，符合“灾害治理能力大于生产能力”的现代煤矿安全理念。

5 面临的局限性与挑战

(1)系统依赖性强：均压效果高度依赖于矿井通风系统的稳定性。一旦主通风机工况改变、主要风门意外开启或关闭、甚至季节性大气压力变化，都可能破坏已建

立的均压状态，需要频繁调整。(2)精准调控难度大：对于地质条件复杂、漏风通道多变的采空区，实现全域性的完美均压非常困难。可能存在局部区域均压效果不佳的情况^[4]。(3)潜在瓦斯风险：过度均压可能导致采空区内瓦斯无法被有效稀释和排出，存在瓦斯积聚的风险，尤其是在高瓦斯矿井，必须与瓦斯抽采系统协同考虑。(4)对封闭质量要求高：闭区均压的效果直接受密闭墙气密性的影响。若密闭墙存在裂缝或施工质量差，外部空气仍会通过缝隙渗入，削弱均压效果。

6 结语

本文通过理论分析与工程实践案例研究得出结论：均压通风技术主动调控矿井通风压力场，从源头抑制采空区漏风，兼具根本性、经济性与环保性，是预防煤炭自燃发火的有效措施；其成功应用依赖精准把握矿井通风系统和采空区漏风规律，通风网络模拟是方案设计与优化的关键工具；“开区均压”与“闭区均压”应有机结合形成完整防火体系；实时全面的监测系统不可或缺，需建立动态管理机制。展望未来，均压通风技术将朝着智能化与自动化方向发展，开发智能均压控制系统实现无人值守精准均压；与瓦斯抽采、粉尘防治等系统深度融合，构建“一通三防”一体化智能管控平台；发展基于计算流体动力学的采空区三维非稳态耦合模型，为均压方案提供更高精度理论支撑。

参考文献

- [1]张凯龙.浅埋复合采空区漏风均压通风预防遗煤自燃技术[J].内蒙古煤炭经济,2024,(09):9-12.
- [2]孟兆阳.上覆采空区下工作面均压通风技术应用研究[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(02):200-201.
- [3]孟振华.综采工作面均压通风技术的研究与实践[J].石化技术,2025,32(08):380-381.
- [4]殷其朗,刘凯,褚福涛.煤矿综采工作面均压通风防火技术分析[J].内蒙古煤炭经济,2025,(03):11-13.