

季节变化对矿井通风系统的影响及应对策略

汪成刚

江西乐矿集团陕西黄陵分公司 陕西 延安 727307

摘 要: 矿井通风系统是保障井下安全生产的命脉,其运行状态受季节变化的显著影响。本文系统分析了季节变化对矿井通风系统的作用机理,从自然风压波动、风流方向逆转、风量供需失衡和井下气候条件恶化四个方面阐述了季节性影响的具体表现与成因。在此基础上,从自然风压调控、风量动态调节、热害治理与防寒防冻、系统稳定性维护等维度提出了综合性的应对策略体系。研究表明,季节变化对通风系统的影响具有周期性、累积性和联动性特征,应对策略应从被动适应转向主动调控,建立以季节性预测为基础、以动态调节为核心、以应急预案为保障的全时段通风保障机制。

关键词: 矿井通风; 季节变化; 自然风压; 通风系统稳定性; 气候调节

引言

矿井通风系统的核心任务是持续输送新鲜空气,稀释有害气体与粉尘,调节井下气候,保障作业安全。其实现依赖于通风动力(主扇与自然风压)与通风阻力的动态平衡。然而,该系统运行受地面季节变化显著影响:气温、气压和湿度的周期性波动通过改变自然风压、风流温度及空气密度,引发通风工况的季节性变化。在我国多数矿区,这种影响尤为突出——冬季低温使入风井空气柱密度增大,自然风压增强,易导致多井筒系统风流逆转或主扇工况偏移;夏季高温则抬升入风温度,削弱排热能力,加剧热害;春秋昼夜温差与气压骤变更可能造成自然风压方向频繁反转,引发系统不稳定。若缺乏有效应对,轻则增加能耗、降低有效风量,重则诱发瓦斯积聚甚至通风事故。尽管季节影响具有规律性,许多矿井仍以静态设计应对动态环境,缺少基于季节特征的动态调风机制与系统预案。本文从季节变化的物理机制出发,剖析其对通风系统的多重影响,并提出针对性应对策略,为矿井通风的季节性管理提供理论与技术支撑。

1 季节变化影响矿井通风的物理基础

1.1 自然风压的产生与季节性演变

自然风压是矿井通风的辅助动力,其本质是进风井筒与回风井筒中空气柱重量差所产生的压差。当进风侧空气柱的平均密度与回风侧存在差异时,两者之间的重力差即形成自然风压。自然风压的大小由下式表述:自然风压等于重力加速度乘以进回风两侧空气柱的平均密度差再乘以高差。空气密度是温度、压力和湿度

的函数,其中温度的变化对密度的影响最为敏感——温度每升高 10°C ,空气密度约下降 $3\% \sim 4\%$ 。季节变化正是通过改变进风井口的空气温度,进而改变进风井筒内空气柱的平均温度和密度,使自然风压呈现显著的季节性特征。冬季,地面气温远低于井下气温,冷空气沿进风井筒下行,进风侧空气柱密度大、重量大,自然风压为正值(方向与主扇一致),可为主扇提供额外助力。夏季,地面气温升高甚至高于井下气温,进风侧空气柱密度减小,自然风压降低甚至转为负值(方向与主扇相反),对主扇运行构成附加阻力。春、秋过渡季节,自然风压则随昼夜温度和天气变化频繁波动。自然风压的季节性变化幅度相当可观,尤其在深井和严寒地区,冬夏自然风压之差可达到数百帕斯卡,足以显著改变主扇的工作状态。

1.2 空气密度与风流的季节性特征

季节变化不仅影响自然风压,还直接改变井下风流的物理性质。冬季低温使井下风流密度增大、体积流量减小(质量流量不变的情况下),通风阻力系数因雷诺数变化而有所降低,但低温也会使井筒内壁结冰、断面缩小,增加局部阻力。夏季高温使风流密度降低、体积流量增大,通风阻力相应增加,主扇能耗上升。更为重要的是,夏季高温空气进入井下后,经过人体代谢产热、机电设备散热和围岩放热,风温进一步攀升,其携带热量的能力有限,造成工作面热环境恶化。湿度随季节变化也影响风流的物理性质^[1]。夏季湿热空气进入井下,在温度降低过程中析出水分,增加井筒淋水和巷道潮湿程度,既影响巷道围岩稳定性,也增加空气的比热容,使风流在换热过程中温度变化趋于平缓但总热焓增

加。这些物理参数随季节的规律性变化,构成了通风系统受季节影响的深层次物理基础。

2 季节变化对通风系统的具体影响

2.1 自然风压波动与主扇工况偏移

自然风压的季节性变化对主扇运行工况产生直接扰动。在冬季,正自然风压与主扇风压叠加,相当于降低了通风网络的阻力,主扇工作风压需求减小,风量可能超出设计值。虽然超量供风在一定程度上有助于稀释有害气体,但过高的风量可能引起巷道风速超限、煤尘飞扬、人员不适和能耗浪费。更为严重的是,在多井筒进风的矿井中,各进风井的自然风压因井深、方位和受热条件的不同而变化幅度不一,可能导致进风系统之间的风量分配失衡——某些浅部井筒自然风压变化剧烈,可能由进风井变为回风井,造成风流逆转。在夏季,自然风压减小甚至转为负值,相当于给主扇增加了额外负担,主扇必须提供更高的全压才能维持设计风量。若主扇能力不足或叶片角度调节范围有限,则可能导致矿井总风量下降,有效风量率降低,威胁瓦斯积聚区域的安全。

2.2 风流方向稳定性与系统可靠性

风流方向的稳定性是通风系统可靠运行的基本要求。季节变化引发的自然风压波动可能突破某些通风构筑物的风压平衡阈值,导致风流方向紊乱。这在多井筒、多水平的复杂通风网络中尤为突出。在浅部与深部井筒之间、新旧采区之间,自然风压的季节性差异可能打破原有的风压平衡格局,使部分巷道或联络巷中出现风流停滞、反向甚至脉动现象^[2]。风流反向如果发生在主要进风巷或回风巷,将打乱整个矿井的通风秩序,使采掘工作面的风量分配完全偏离设计值,可能使高瓦斯区域的瓦斯无法有效稀释,使采空区有害气体涌入作业空间。即便不发生完全反向,风流方向的频繁波动也会降低通风系统的可靠性,增加通风管理人员对系统状态的判断难度。

2.3 井下温度场与热害的季节性加重

矿井下温度场的变化虽滞后于地面季节变化,但夏季地面高温通过入风进入井下后,叠加井下自身热源,使深井和高地温矿井的夏季热害问题更为严峻。当入风温度超过 25℃时,即使经过巷道调温,到达采掘工作面的风温往往仍在 28~32℃以上,加上湿度接近饱和,作业环境的热湿指数严重超标。高温高湿环境不仅降低作业人员的劳动效率和安全操作能力,还增加中暑和热射病的风险,同时也加速机电设备的绝缘老化和故障率。

冬季低温入风在进入井下初期能够吸收围岩热量、降低深部温度,对热害有一定缓解作用,但在井筒和浅部巷道中可能形成冻害。

2.4 通风能耗与运行成本的季节波动

季节变化带来的通风系统运行参数变化直接反映在能耗上。夏季为克服自然风压下降甚至负压阻力,主扇需要提高转速或增大叶片角度以维持设计风量,电耗显著上升。据部分矿井统计,夏季主扇电耗可比冬季高出 15%~30%。冬季虽然自然风压助力,但若不加控制可能产生超量供风,同样造成不必要的能量浪费。此外,冬季井筒防冻需要消耗大量热能——将入风加热至 2℃以上以防止井筒结冰,这部分能耗在北方矿区非常可观。因此,通风系统的运行成本在全年的分布极不均衡,若以固定模式运行,既不能保证夏季的充足供风,也会造成冬季的能耗浪费。

3 季节影响的应对策略

3.1 基于季节特征的自然风压调控

自然风压无法消除,但可以通过技术手段加以调控,削弱其对通风系统的扰动。对于主扇性能可调的矿井,应根据季节变化制定分季运行方案——夏季自然风压降低甚至为负时,适当提高主扇转速或增大叶片安装角以补偿风压损失;冬季自然风压增大时,适当降低主扇出力,避免过度供风。对于多井筒进风系统,应通过在进风井口设置可调节风门或风窗,人为增减进风支路的阻力,平衡各井筒之间的自然风压差,防止风流逆转^[3]。在自然风压变化特别剧烈的矿井,可考虑在主要进风巷中安装增压风机,与主扇联合运行,自动跟踪自然风压变化并实施动态补偿。对于有条件的矿井,可在井口设置热风炉或空气加热器,通过调节进风温度来减小冬夏空气密度的极端差异,从源头上平抑自然风压的季节性波动幅度。

3.2 通风网络的风量动态调节技术

通风网络的动态调节是应对季节变化的有效手段。应在主要通风巷道和采掘工作面安装风速、风压和温度传感器,建立实时的通风参数监测网络。基于监测数据,利用通风网络解算软件,按月或按季度对矿井通风网络进行解算,预判自然风压变化对风量分配的影响,提前优化调节方案。在实际调节中,应采用主要通风机工况调节与分支风阻调节相结合的方式——主扇调节解决总风量的供需平衡,分支风阻调节(通过风窗、风门等构筑物)解决各采区、各工作面之间的风量优化分配。调节风窗的设置和开启度应根据季节

变化灵活调整,避免“一年调一次、一次用一年”的粗放做法。在风量调节的过程中,应特别注意关键敏感区域的稳定性——如高瓦斯采掘面、采空区上隅角和盲巷区域,确保这些区域在任何季节条件下都有充足且稳定的风量供给。

3.3 热害防治与夏季降温措施

针对夏季热害加剧问题,应建立地面入风预冷与井下局部降温相结合的防治体系。地面预冷方面,可在主要进风井口设置喷雾降温系统,利用水雾蒸发吸热降低入风温度;条件允许时可在进风井筒周围设置遮阳设施,减少阳光直射对井筒壁的加热效应。井下降温方面,对于高温采掘工作面,可采用局部制冷机组配合空冷器进行闭路循环降温,将工作面风温降低 $3\sim 6^{\circ}\text{C}$ ^[4]。通风系统本身的调节也有助于缓解热害——适当增加夏季矿井总风量,利用更大的风量带走更多热量;优化通风线路,尽量使新鲜风流走最短路径进入热害严重区域,减少沿途吸热升温。对矿井自身的散热源(如机电设备、充填体、自燃氧化带)应进行隔热和散热改造,降低其对风流的加热贡献,从根本上减少井下热负荷。

3.4 冬季防冻与进风预热技术

冬季防冻的核心是确保进风井筒不结冰、不挂冰,同时保证足够的入风温度和风量。进风预热是最直接的防冻手段,通常采用井口热风炉或空气加热机组将地面冷空气预热至 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$ 后再送入井下。预热温度的选择需兼顾防冻效果和经济性——温度过高会降低自然风压、增加能耗,温度不足则无法有效防止井筒结冰。应依据历史气象数据和实时温度监测,确定分阶段加热方案,在极寒时段加大供热量,在气温回升时及时减少或停止加热。除预热外,还应加强井筒围护——对井口周边进行封闭保温,减少冷风渗入和热风逸散;对提升井塔、井口房等设施进行保温改造。对已形成的井筒挂冰,应制定专项清理方案,明确清理周期和安全操作规程,防止冰块坠落伤人或堵塞通风断面。

3.5 通风系统稳定性的预警与应急管理

建立通风系统季节性变化的预警与应急机制,是从被动应对转向主动管控的关键。预警机制以自然风压监测和天气预报数据为基础,对可能引起通风系统大幅波

动的极端天气事件(寒潮、热浪、强降温等)提前发布预警。当预警发出后,通风管理部门应依据预案调整主扇运行参数、增设备用通风通道或准备临时调风设施。应急管理则应针对最不利的季节性工况制定专项应急预案,包括夏季自然风压最低条件下的最大供风方案、冬季极端低温条件下的防冻供风方案以及风流逆转后的恢复程序。应急预案应定期演练,确保通风管理人员和操作人员熟悉应急操作流程。此外,通风系统的季节性管理应形成制度化流程——每季度开展一次通风系统季节性风险评估,每月进行一次自然风压和风量分布的实测与分析,每周根据气温变化调整一次通风设施参数。

4 结语

季节变化对矿井通风系统的影响是客观存在且不容忽视的。自然风压的季节性波动通过空气密度变化传导至整个通风网络,引发主扇工况偏移、风量分配失衡、风流稳定性下降和井下气候条件恶化等多重效应。本文系统分析了这一影响的物理机理与具体表现,并提出了涵盖自然风压调控、风量动态调节、热害防治、防冻保温、预警应急和制度化管理的综合应对策略。研究认为,应对季节变化的关键在于转变管理理念——将通风系统视为一个动态系统而非静态设计产物,建立“随季而变、预先调节、全程监控”的运行管理新范式。季节性通风管理的本质是通过定期对周期性扰动的主动响应,使通风系统在各种气候条件下始终保持安全、稳定、高效的运行状态。随着智能化通风管控技术的发展,基于实时气象数据和通风网络在线解算的自动调风系统将成为未来发展方向,届时季节变化对通风系统的影响将得到更为精准和及时的调控。

参考文献

- [1] 程远平,俞启香,周红星. 矿井自然风压变化规律及其对通风系统的影响 [J]. 采矿与安全工程学报,2024,41(1):89-97.
- [2] 张国枢,谭允祯,陈开岩. 矿井气候条件与热环境评价方法 [J]. 中国安全科学学报,2023,33(7):156-163.
- [3] 秦跃平,宋伟,王丽. 季节因素对矿井通风能耗的影响评估 [J]. 矿业科学学报,2025,10(1):78-86.
- [4] 王凯,周福宝,张玉良. 矿井智能通风与季节性调控技术展望 [J]. 煤炭科学技术,2025,53(2):45-54.