

SF₆连续恒量释放法在矿井巷道漏风检测中的应用

于树江, 杨成轶, 徐纪元

中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083

摘要 在矿井通风网络有较大漏风时, 将形成结构复杂的通风网络, 使采取通风系统的稳定性、可靠性受到一定程度的影响, 若漏风通道连通火区, 则可能带来极为严重的后果。运用SF₆连续恒量释放法, 对北祖矿9211风巷漏风情况进行测定, 定性判断出有风流漏入9211风巷。通过确定最短采样距离、采样时间及SF₆释放量等漏风测定参数, 定量计算了漏入风量及漏风率的大小, 结合SF₆气体浓度的变化, 确定9211风巷巷道内有两处漏风区域, 进而为采取针对性的防治矿井漏风措施提供判断依据, 同时为该矿火灾防治提供技术支持。

关键词 示踪技术; SF₆示踪气体; 连续恒量释放; 漏风量

中图分类号 TD752.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.15.008

Determination of Air Leakage by Using the Method of Continuous Quantitative Releasing SF₆ in Mine Tunnel Shaft

YU Shujiang, YANG Chengyi, XU Jiyuan

School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract A coal mine might become a complex ventilation network to influence the stability and the reliability of the mine ventilation system when some large air-leakages exist in the underground coal mine. If the air leakage passage is connected with a fire area, the very serious results will be brought about. The air leakage of the 9211 airway in the Beizu mine shaft is measured by using the method of the continuous and quantitative releasing of SF₆, and the air flow leaking into the 9211 air way can quantitatively determined. The amount of the air leakage is calculated by determining the shortest distance of the detection, the detection time, the release volume and other air leakage determination parameters, according to the change of the concentration of SF₆ gas. Two air leakage areas in the 9211 air way are detected, to provide a foundation to take corresponding measures of prevention and control of the mine air leakage, and the technical support to the mine fire prevention.

Keywords tracer technology; SF₆ tracer gas; continuous and quantitative releasing; amount of air leakage

煤矿井中送到井下的风流, 未经用风地点而经过采空区、地表塌陷区、通风构筑物 and 煤柱裂隙等通道直接渗入回风道或排除地表现象称为漏风, 漏风能减少用风地点的有效风量, 造成供风量不足, 并加速采空区、高冒地点和密闭内等处煤矿的氧化, 极易造成煤炭自燃、有害气体侵入、瓦斯异常涌出、瓦斯超限或集聚、瓦斯爆炸等事故^[1]。因此, 采取有效、准确的方法进行漏风检测, 查找漏风通道, 定量测定漏风量在煤矿安全方面就显得尤为重要。

示踪技术是利用风流或漏风作为媒介, 在进风处设置释放点释放示踪气体, 并在预设的检测点检测示踪气体, 通过分析比较检测结果, 判断释放点与检测点间是否存在漏风的技术^[2]。对于煤矿井下等复杂工作场所, 示踪气体可以到达人员不易到达的地点, 所以运用其技术研究风流的流动轨迹具有独特的优越性。

本研究利用示踪技术, 针对北祖矿9211风巷实地情况, 运用SF₆连续恒量释放法, 对其风巷进行漏风测定, 定性判断

收稿日期: 2014-03-17; 修回日期: 2014-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(煤炭联合)重点项目(U1261214); 国家自然科学基金项目(51074168)

作者简介: 于树江, 博士研究生, 研究方向为煤矿安全, 电子邮箱: 2322155130@qq.com

引用格式: 于树江, 杨成轶, 徐纪元. SF₆连续恒量释放法在矿井巷道漏风检测中的应用[J]. 科技导报, 2014, 32(15): 58-61.

9211风巷漏风情况。通过综合最短采样距离、采样时间及SF₆释放量等漏风测定参数,定量计算了漏入风量及漏风率的大小,结合对设定的检测点检测的SF₆浓度变化分析,确定9211风巷漏风区域,进而为采取针对性的均压通风、灌浆堵漏等防治矿井漏风措施提供判断依据^[3],同时为该矿火灾防治提供了技术支持。

1 工作面概况

北祖煤矿是一座综合开拓方式开采的资源整合型矿井,主采煤层为4[#]、9[#]煤层,煤层具有自然发火倾向,对4[#]、9[#]煤层煤样进行程序升温实验,得出其煤层最短发火期为6个月,4[#]煤层在井田西南部与9[#]煤层合并为一层。煤矿合并区的煤层厚度为13.20~15.78 m,平均14.38 m。此合并区属与全井田稳定可采煤层,含夹矸1~3层,夹矸厚度为0.30~0.40 m,岩性为泥岩。煤层顶板为泥岩,底板一般为砂质泥岩、泥岩。采用走向长壁后退式采煤法,自然垮落法管理顶板。该矿井的9211风巷位于“4+9”煤层内,埋深距地表约200 m,矿井资源整合前由于小煤窑无序开采,“4+9”煤层内分布众多老巷,煤巷掘进过程中多次出现巷道内CO上升情况,严重影响矿井安全。

2 SF₆连续恒量释放法的原理

SF₆是一种无色、无味、非燃烧性的惰性气体,其物理活性大,在扰动的空气中可以迅速混合而均匀地分布在检测空间中。在矿内所遇到的物料对其无明显的吸附作用,并且具有很好的热稳定性和化学惰性^[4]。

在需要考查研究的井巷风流中连续稳定定量地释放SF₆气体,之后分别在顺风流方向预定的检测点检测,分析沿风流方向SF₆的浓度变化情况。当沿途不漏风或向外漏风时,各点SF₆浓度保持不变;如果风流沿途向内漏风,则沿途各点SF₆浓度呈下降趋势变化。通过分析SF₆气体的浓度变化,可得到漏风量,从而找出漏风规律^[5]。

2.1 当漏风漏向检测空间时的漏风量计算

如图1所示,设某一取样点的风量为 Q_1 ,SF₆气体的浓度为 C_1 ,风流方向的下一取样点SF₆气体的浓度为 C_2 ,若两点之间的漏风量为 ΔQ ,则该点的风量为 $Q_2 = Q_1 + \Delta Q$ 。设SF₆气体的释放量为 q ,由质量守恒定律知, $q = Q_1 \cdot C_1 = Q_2 \cdot C_2$ 。因此可以得到

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \frac{q}{C_2} - \frac{q}{C_1} \quad (1)$$

由式(1)可逐段求出各测段的漏风量,进而得出整个考查区段的漏风分布规律。

在释放取样过程中,如果各取样点间的大气参数相差较大时,可以用下式对风量进行校正,

$$Q_2 = \frac{(Q_1 + \Delta Q)P_1T_2}{P_2T_1} \quad (2)$$

式中, P_1 、 P_2 分别为检测点1、2的大气绝对压力,Pa; T_1 、 T_2

分别为检测点1、2的大气绝对温标,K。

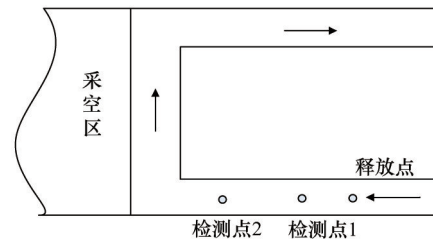


图1 SF₆释放点与检测点布置

Fig.1 Release and testing point arrangement

2.2 漏风从SF₆释放、检测空间漏向外部时的漏风量计算

设漏风汇的风量为 Q 其中SF₆气体浓度为 C ,漏风量为 ΔQ ,漏风流中的SF₆气体浓度为 ΔC 。根据质量守恒原理得到, $QC = \Delta Q\Delta C$,因此漏风量为

$$\Delta Q = \frac{QC}{\Delta C} \quad (3)$$

实际漏风检测中,可根据检测目的和研究对象,灵活布设释放点和取样点,并根据漏风类型选择漏风量计算公式。

2.3 漏风率计算

$$\alpha_i = \frac{C_{i+1} - C_i}{C_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中, α_i 为测井巷中第 i 段的漏风率,%; C 为示踪气体浓度,%。

3 漏风测定参数确定

3.1 最短采样距离的确定

示踪气体在巷道中沿径向扩散,距离释放点越远,扩散越均匀,当巷道断面中心浓度是巷道壁面浓度的0.95时,认为示踪气体已扩散均匀^[6]。图2为巷道断面当量示意图,巷道壁面中心 B 处的示踪气体浓度与巷道断面中心 A 处示踪气体浓度之比来衡量示踪气体是否扩散均匀,当两者之比为0.95时认为示踪气体扩散已经达到均匀。 B 处示踪气体浓度和 A 处示踪气体浓度分别用 $c(x,r)$ 和 $c(x,0)$ 表示,最短采样距离计算公式为

$$c(x,0) = c_0(x,0) + 4 \sum_{s=1}^{+\infty} c_0(x,2sr) \quad (5)$$

$$c(x,r) = c_0(x,r) + \sum_{s=1}^{+\infty} \{c_0[x,(2s-1)r] + c_0[x,(2s+1)r] + 2c_0[x,\sqrt{(2s)^2 + 1}r]\} \quad (6)$$

$$c_0(x,r) = \frac{q}{4\pi D_r x} \exp\left(-\frac{r^2 u}{4D_r x}\right) \quad (7)$$

$$\frac{c(x,0)}{c(x,r)} = 0.95 \quad (8)$$

式中, $c(x,0)$ 为巷道中心处示踪气体浓度,%; $c(x,r)$ 为巷道壁面中心示踪气体浓度,%; $c_0(x,r)$ 为忽略边界条件影响,距离释放点 x ,距离紊流中心 r 处示踪气体浓度,%; x 为距离释放

点的距离, m ; q 为示踪气体释放量, mL/min ; r 为紊流中心的距离, m ; u 为巷道中风速, m/s ; D_r 为径向紊流系数, 取 $0.52^{[7]}$ 。

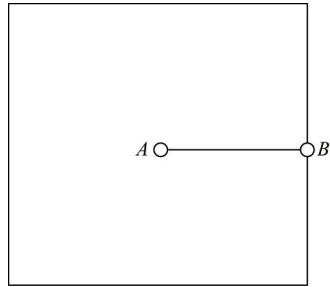


图2 巷道断面当量示意

Fig. 2 Tunnel cross-section equivalent sketch

由式(5)和式(6)可知, 巷道风速、巷道中心到巷道壁中心距离、径向紊流系数都会对示踪气体最短采样距离造成影响, 结合式(7)和式(8), 经计算得出 9211 风巷适用检测距离为 40 m 。

3.2 SF₆释放量的确定

释放量可依据检测装置的最小检测浓度 (10^{-8}) 和 9211 风巷风量进行确定^[8]。9211 风巷断面可简化为长方形与半圆的结合, 经实地测量巷道断面可估算为 14.28 m^2 , 风速经测量为 2.1 m/s , 经计算得出, 9211 风巷风量约为 $1800\text{ m}^3/min$ 。恒量连续释放流量可用式(9)估算^[9]:

$$q = KCQ \times 10^{-6} \quad (9)$$

式中, q 为 SF₆ 示踪气体释放量, mL/min ; K 为误差系数, 取 $5^{[10]}$; Q 为巷道风量, 经计算的 9211 风巷风量 $1800\text{ m}^3/min$; C 为预计风流中 SF₆ 最小浓度, 取值 10^{-8} 。

基于式(9)可确定出 SF₆ 最小连续释放量应不小于 900 mL/min 。为便于计算, 将 SF₆ 释放量近似为 1000 mL/min 进行处理。

3.3 采样时间

气体在巷道中流动绝大多数都处于紊流状态, 释放示踪气体后, 采样时间过早会影响测定结果的准确性, 为保证 SF₆ 示踪气体释放后与巷道风流充分混合^[11], 确定示踪气体释放 20 min 后在检测点进行检测采样。

4 9211 风巷巷道漏风测定

在实地矿井中, 9211 风巷与相邻的 9209 机巷同时掘进, 在两者通过联络巷贯通后, 运用便携式 CO 检测仪检测出 9211 风巷距北联络巷 $60\sim 100\text{ m}$ 区域 CO 浓度超限, 据此初步判定存在风流经上部老旧巷道漏入 9211 风巷。因此, 着重在 CO 浓度超限区域设置检测点。

4.1 释放点与检测点布置

释放点布置在靠近 9211 风巷北部进风侧, 距离下风向第一个检测点约 40 m , 后续依次布置 6 个检测点, 每个检测点

距离相差约 10 m , 并在 9211 风巷与回风大巷联络巷处设置 1 个检测点, 8 个检测点的具体布置如图 3 所示。



图3 9211 风巷释放点与检测点布置示意

Fig. 3 9211 air way release and testing point arrangement

4.2 检测结果与分析

检测结果如表 1 所示, 根据检测结果可知, 采样过程中在检测点 2~3 区段和检测点 4~5 区段检测到的 SF₆ 浓度逐渐减小, 风流途径检测点 5 至 9211 风巷与回风大巷联络巷处检测点 8 的 SF₆ 浓度并未发生明显变化。

表 1 9211 风巷漏风测定及示踪气体浓度分析

Table 1 Determination of air leakage and tracer gas concentration analysis of 9211 air way

SF ₆ 释放点	SF ₆ 释放量 ($mL \cdot min^{-1}$)	检测点	检测点 SF ₆ 浓度/ 10^{-7}
9211 风巷 进风侧	1000	1	5.8
		2	5.8
		3	5.6
		4	5.6
		5	5.5
		6	5.5
		7	5.5
		8	5.5

分析结果如表 2 所示。根据 SF₆ 恒量释放法的原理可以判断被检测区域有风量漏入: 漏风区域位于距离释放点距离 $50\sim 60\text{ m}$ 和 $70\sim 80\text{ m}$ 左右所处巷道区段, 漏风量分别为 32.47

m^3/min 和 $61.56 \text{ m}^3/\text{min}$, 漏风率分别为 1.8% 和 3.4%。总漏风量为 $94.03 \text{ m}^3/\text{min}$, 占 9211 风巷总风量的 5.22%。

表 2 9211 风巷漏风量及漏风率计算结果

Table 2 Results of leakage air volume and air leakage rate calculation of 9211 air way

测段	漏风量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	漏风率/%	总漏风量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
2~3	32.47	1.8	94.03
4~5	61.56	3.4	

漏风的主要原因为北祖煤矿为整合矿井, 9211 风巷上覆煤层已被小煤窑进行过不规范开采, 在开采初期, 因技术相对落后, 多采用巷采法。在煤矿的巷采过程中, 一旦揭露煤层就开始采掘, 如果遇到复杂地质构造或顶板冒落等问题, 就转向其他区域进行采掘, 煤炭开采缺乏基本的回采设计与规划, 导致分布众多老旧巷道, 在矿压作用下上覆煤层老旧巷道易与 9211 风巷煤壁沟通, 形成漏风通道导致巷道漏风。因此, 应及时采取有效的堵漏措施, 防止风流通过漏风通道导致上覆煤层老旧巷发生遗煤自燃。

5 结论

为保证漏风测定的准确性, 根据 SF_6 气体的性质及 9211 风巷实际情况, 结合相应理论分析, 通过公式计算可以确定最短采样距离, 同时确定 9211 风巷 SF_6 示踪气体释放点与采样点的位置, 由此得出 9211 风巷的漏风量和漏风率。

根据便携式 CO 检测仪的检测结果, 初步判断了 9211 风巷可能存在漏风区域。通过运用 SF_6 连续恒量释放法检漏, 确定在 9211 风巷的确存在漏风区域, 漏风区域位于 9211 风巷中部距释放点约 60、80 m 处所处区域。

针对测定结果确定 9211 风巷漏风区域, 可开展相应的防火工作, 对巷道漏风区域采取喷浆堵漏等措施, 以减少漏风量, 避免发生煤自燃。另可通过均压措施, 降低漏风巷道区域漏风源与漏风汇压差进行防火。通过 SF_6 示踪气体连续恒量释放法, 可有效检测出巷道内漏风区域, 并可将该技术运用到采空区及地表漏风区域的检测中。

参考文献 (References)

[1] 李广培, 戴广龙, 袁树杰, 等. 煤岩裂隙中脉冲释放示踪气体运移规律分析[J]. 煤矿安全, 2011, 42(1): 133-135.
Li Guangpei, Dai Guanglong, Yuan Shujie, et al. Pulsed release tracer gas migration rule analysis in the coal and rock fracture[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(1): 133-135.

[2] 张福成. 浅埋易自燃煤层防灭火关键技术[J]. 煤矿安全, 2011, 42(2): 35-38.
Zhang Fucheng. Shallow buried spontaneous combustion of coal seam fire security key technology[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(2): 35-38.

[3] 朱红青, 和超楠, 徐纪元, 等. 基于正交实验法的 L-C-C 聚合填充材料的研制[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(5): 21-24.
Zhu Hongqing, He Chaonan, Xu Jiyuan, et al. Development of L-C-C polymerization filler material based on orthogonal experiment[J]. Mining Research and Development, 2013, 33(5): 21-24.

[4] 刘国忠, 李国华, 王正辉, 等. SF_6 示踪气体连续释放法在采空区漏风检测中的应用[J]. 煤矿安全, 2011(9): 114-117.
Liu Guozhong, Li Guohua, Wang Zhenghui, et al. SF_6 gas continuous release method in the application of the goaf air leakage detection[J]. Safety in Coal Mines, 2011(9): 114-117.

[5] 何俊忠, 杨宏伟. SF_6 示踪气体在采空区漏风量测定及注氮优化中的应用[J]. 煤矿安全, 2012(S1): 119-121.
He Junzhong, Yang Hongwei. Application of SF_6 tracer gas in the goaf air leakage measurement and nitrogen injection optimization[J]. Safety in Coal Mines, 2012(S1): 119-121.

[6] 杨勇, 史惠堂. 应用示踪技术检测矿井采空区漏风[J]. 中国煤炭, 2009(2): 52-55.
Yang Yong, Shi Huitang. Application of tracing technology in testing air leakage in coal mine gob areas[J]. China Coal, 2009(2): 52-55.

[7] 王海桥. 掘进工作面射流通风流场研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 498-501.
Wang Haiqiao. Study on jet ventilation flow field in heading face[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(5): 498-501.

[8] 李增华, 程远平, 彭担任. 示踪气体连续释放技术及其在矿井外部漏风检测中的应用[J]. 煤矿安全, 1992, 24(5): 19-20.
Li Zenghua, Cheng Yuanping, Peng Danren. Tracer gas continuous release technique and its application in mine external air leakage detection[J]. Safety in Coal Mines, 1992, 24(5): 19-20.

[9] 任晓鹏. SF_6 示踪气体在矿井近距离煤层漏风检测中的应用[J]. 煤炭技术, 2013(6): 188-190.
Ren Xiaopeng. Exploration on air leakage detection with SF_6 tracer gas in contiguous seams of coal mines[J]. Coal Technology, 2013(6): 188-190.

[10] 李迎春, 杨胜强, 张帅. 基于示踪气体采空区漏风通道定性识别[J]. 煤矿安全, 2013(1): 185-188.
Li Yingchun, Yang Shengqiang, Zhang Shuai. The qualitative identification of air leakage channels in goaf based on the tracer gases [J]. Safety in Coal Mines, 2013(1): 185-188.

[11] 舒祥泽, 商登堂. 示踪技术在矿井漏风状况定量分析中的应用[J]. 煤炭学报, 1991(2): 31-40.
Shu Xiangze, Shang Dengting. Tracer technology application in mine air leakage situation quantitative analysis[J]. Journal of China Coal Society, 1991(2): 31-40.

(编辑 季超)