

文章编号: 1673-3363-(2012)01-0131-04

# 综放工作面“U+I”通风系统与煤自燃的关系

周福宝<sup>1,2</sup>, 刘玉胜<sup>1</sup>, 刘应科<sup>1</sup>, 张占国<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008; 3. 神华集团安全健康环保部, 北京 100011)

**摘要** 分析了综放工作面“U+I”型通风系统的特性, 推导了该系统各条巷道的配风关系式, 考察了高位巷通畅与堵塞时期“U+I”型通风系统的风排瓦斯效率, 并结合2005年神华宁夏煤业集团公司乌兰煤矿5344工作面的“4.8”火灾案例, 运用数值模拟的方法分析了“U+I”型通风系统高位巷阻塞或通畅对采空区氧浓度场的影响。研究表明: 高位巷阻塞期间风排瓦斯效率变低, 上隅角瓦斯浓度升高, 氧化升温带在回风侧离工作面较近且范围更大。研究结果对于防治工作面瓦斯超限和采空区煤自燃具有十分现实的指导意义。

**关键词** 通风方式; 高位巷; 自燃; 数值模拟

**中图分类号** TD 72

**文献标识码** A

## The Relationship Between ‘U+I’ Ventilation System of Fully Mechanized Top Coal Caving Face and Coal Spontaneous Combustion

ZHOU Fu-bao<sup>1,2</sup>, LIU Yu-sheng<sup>1</sup>, LIU Ying-ke<sup>1</sup>, ZHANG Zhan-guo<sup>3</sup>

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Research Centre of Internet of Things (Mine Awareness), China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 3. SHE Department, Shenhua Group, Beijing 100011, China)

**Abstract** In this paper, the ‘U+I’ ventilation system’s characteristics of fully mechanized top coal caving face have been analyzed and the air distribution formula of each roadway deduced. In addition, gas drainage efficiency of the ‘U+I’ ventilation system was investigated when the elevated lane was both blocked and unobstructed. And more specifically, the differences of the oxygen concentration field in the goaf caused by the elevated lane’s state of the ‘U+I’ ventilation system were studied with numerical simulation method and by combining the mine fire case dated April 8, 2005 at the working face 5344 of Wulan Coal Mine, Shenhua-Ningxia Coal Industry Group. The research shows that if the elevated lane is blocked, the gas drainage efficiency would become lower and gas concentration at upper corner of working face would become higher. Besides, the oxidization and heat accumulation zone would be expected to be larger than before and nearer to the working face in the exhaust section. The results achieved may serve as a guidance to solve gas overrunning problem at work face and prevent coal spontaneous combustion in the goaf.

**Key words** ventilation method; elevated lane; spontaneous combustion; numerical simulation

收稿日期: 2011-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50604014); 教育部新世纪优秀人才项目(NCET-08-0838); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(09KF11); 中国矿业大学杰出青年培养基金项目(2010JQPB03, 2011JQP08)

作者简介: 周福宝(1976-), 男, 江苏省南京市人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事矿井通风与安全方面的研究。

E-mail: fzhou@cumt.edu.cn

Tel: 0516-83995053

综采放顶煤技术以其高产、高效的优势而得到广泛应用,但存在采空区遗煤多、漏风大等不足<sup>[1]</sup>,对于高瓦斯矿井还存在瓦斯涌出量大等问题,此时工作面通风采用传统的 U 型通风方式易导致瓦斯超限。为此,部分矿区在 U 型通风系统的回风侧内错 5~15 m 增加一条高位巷,形成“U+I”型的“U+I”型通风系统(也有称“品”字型),如图 1 所示。但受高位巷维护困难、顶煤垮落不连续性等因素影响,工作面通风时常处于堵塞与通畅的非稳定状态,不仅加剧了采空区瓦斯涌出在时间和空间上的不均衡性,也增加了工作面瓦斯超限和采空区自然发火的风险,因此有必要对“U+I”型通风系统特性及对自然发火的影响进行综合研究。

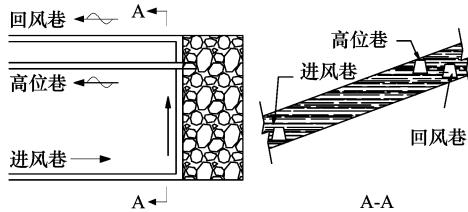


图 1 综放工作面“U+I”型通风系统

Fig.1 Pin(ranks) ventilation schematic diagram of fully mechanized top-coal caving

文献[2-3]分别讨论了中马村矿 2906 综放工作面、寺河矿 2308 综放工作面高位巷的瓦斯分流作用,文献[4]研究了“U+I”巷道系统综放工作面瓦斯涌出规律,但均未探讨“U+I”通风系统对采空区自然发火的影响。本文以乌兰煤矿为例展开分析。

## 2 通风系统特性

### 2.1 工作面配风

工作面绝对瓦斯涌出量在空间分布上可分为两部分:一部分为从工作面涌出的瓦斯;另一部分为从采空区涌出的瓦斯<sup>[5]</sup>。在不考虑采空区其它漏风源的情况下,“U+I”型通风系统工作面配风量可写为

进风巷配风量

$$Q_J = \frac{[a(1-k_2) + bk_3](1+k_2)}{x} k_1 q \quad (1)$$

高位巷配风量

$$Q_G = \frac{b(1-k_3) + ak_2}{y} k_1 q \quad (2)$$

回风巷配量

$$Q_H = Q_J - Q_G \quad (3)$$

式中:  $k_1$  为采面瓦斯涌出不均衡系数<sup>[6]</sup>,一般由实测获得,无实测数据时,取  $k_1=1.2\sim 2.1$ ;  $k_2$  为工作面漏风率,即从工作面漏向高位巷的风量与进风量的比值,%;  $k_3$  为采空区瓦斯涌入回风巷占采空区瓦斯的比值,%;  $q$  为风排瓦斯总量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;  $a$  为工作面瓦斯涌出量占风排瓦斯总量百分比,%;  $b$  为采空区瓦斯涌出量占风排瓦斯总量百分比,%,  $b=1-a$ ;  $x$  为工作面瓦斯体积分数,%;  $y$  为高位巷瓦斯体积分数,%。

与 U+L 型外错尾巷需外接风流不同,高位巷风流基本来源于工作面漏向采空区的风流。进风量保持不变时,如高位巷处于阻塞状态,流经高位巷的风量就会相应减少,则回风巷的风量必然会增加;类似地,高位巷通风通畅时,情况正相反。由此可见,高位巷与回风巷的配风量是此消彼长的关系。

取  $x=1\%$ ,  $k_1=1.5$ , 得工作面所需总风量为

$$Q_J = \frac{[a(1-k_2) + bk_3](1+k_2)}{x} k_1 q = 150q(-ak_2^2 + bk_3k_2 + a + bk_3) \quad (4)$$

这说明进风巷所需风量主要受绝对瓦斯涌出量、来自工作面瓦斯涌出比例、漏风率、采空区瓦斯涌入回风巷的量占采空区瓦斯比例的影响。

### 2.2 风排瓦斯效率

对进风量公式(1)进行变换,可得如下关系

$$Q_J/q = 150(-ak_2^2 + bk_3k_2 + a + bk_3) \quad (5)$$

$Q_J/q$  是工作面总风量与工作面排出瓦斯总量的比值,反映了综放工作面风排瓦斯效率,其值越大,效率越低;其值越小,效率越高。

1) 由于综放工作面通风的不稳定性较大,若高位巷被阻塞,此时通风方式近似于 U 型,采空区瓦斯大部分涌入回风巷,从工作面流入高位巷的瓦斯大幅减少,采空区排放瓦斯百分比  $a$  较小,因此可设  $k_2=0.2$ , 得

$$Q_J/q = 150(0.96a + 1.8k_3 - 1.2ak_3) \quad (6)$$

此时  $k_3$  为较大值,如图 2a 所示,  $Q_J/q$  在高位变化,所以风排瓦斯效率较高。虽然单位风量带走的瓦斯含量多,但会出现因局部瓦斯未得到稀释而瓦斯容易超限的状况。

2) 若高位巷通风通畅,则从采空区涌入回风巷的瓦斯含量减少,从工作面流入高位巷的风量大增加,采空区排放瓦斯百分比  $a$  较大,可设  $k_2=0.6$ , 得

$$Q_y/q = 150(0.64a + 1.6k_3 - 1.6ak_3) \quad (7)$$

类似前面讨论, 此时  $k_3$  应处于较小的状态, 如图 2b,  $Q_y/q$  在低位变化, 故风排瓦斯效率较低。尽管单位风量所排瓦斯含量减少, 但瓦斯得到很大的稀释, 特别是工作面上隅角瓦斯体积分被控制在允许的范围内, 从而使工作面正常生产得以保证。

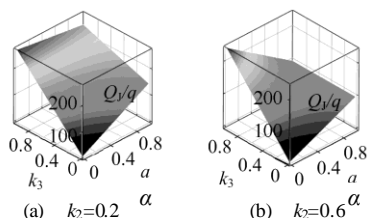


图 2  $Q_y/q$  随  $\alpha$ ,  $k_3$  在区间(0,1)上的变化

Fig.2  $Q_y/q$  changes with  $\alpha$ ,  $k_3$  during the interval of (0,1)

### 3 数值分析

以乌兰煤矿 5344 综放工作面为例论述“U+I”型通风系统状态对采空区自燃的影响, 运用 Fluent<sup>3D</sup> 软件对采空区自燃进行三维数值模拟。5344 综放工作面倾斜长 156 m, 设计走向长 270 m, 煤层平均厚度为 9.0 m, 倾角 19°~23°, 所采煤层的自燃倾向性为自燃, 工作面绝对瓦斯涌出量为 16~22 m<sup>3</sup>/min, 进风量约为 1 124 m<sup>3</sup>/min。高位巷布置在煤层中, 与回风巷内错 6 m, 其底板距工作面顶板约 7 m。工作面开采工艺为放顶煤一次采全高, 机采采高 2.4 m, 放煤高度 9 m。

#### 3.1 结果分析

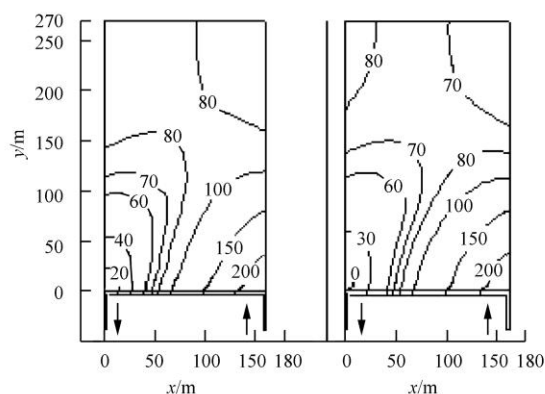
采空区自燃“三带”受高位巷通风状况影响, 呈动态变化, 常见划分方法<sup>[7]</sup>如下:

按照氧气体积分数划分: 散热带  $\varphi(O_2)$  大于 18%; 氧化升温带  $\varphi(O_2)$  处于 10%~18% 之间; 窒息带  $\varphi(O_2)$  小于 10%。按照速度划分: 散热带风速大于 0.004 m/s; 氧化升温带风速处于 0.001 7~0.004 m/s 之间; 窒息带的风速小于 0.001 7 m/s。由于氧气是参与煤氧复合升温的反应物之一, 而风速又是反应蓄热的重要影响因素, 因此氧化升温带的划分应根据氧浓度和风速来综合界定, 本文以氧气体积分数划分为主, 以风速为辅。

1) 高位巷阻塞时。如图 3a 所示, 在倾斜方向上, 压差从进风侧向回风侧依次减小, 回风侧压差比高位巷通畅时梯度更大: 如受高位巷影响的采空区回风侧 (0, 50 m) 范围即上隅角区域, 当高位巷堵塞和畅通时压力梯度分别为 0.67 (Pa m<sup>-1</sup>) 和 0.50 (Pa m<sup>-1</sup>); 倾向方向采空区平均压力梯度分别为

1.58 (Pa m<sup>-1</sup>) 和 1.08 (Pa m<sup>-1</sup>)。此时, 尽管受压力梯度分布的影响风排瓦斯率得到提高, 但由于高位巷阻塞导致瓦斯排放能力大大减弱, 大量瓦斯从采空区涌入工作面, 易造成上隅角瓦斯超标。如图 4a 所示, 回风侧漏风减小, 氧化升温带前移, 特别是回风侧部分原处于散热带浮煤转变到氧化升温带, 使自然发火区离工作面更近, 增加自燃风险。

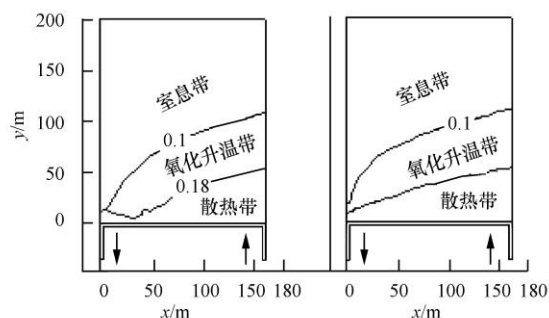
2) 高位巷通畅时。如图 3b 所示, 在回风处, 采空区压差相比高位巷阻塞时梯度变化较小, 说明此处漏风量很大; 在进风侧处, 压差则相对变化不大。如图 4b 所示, 原聚集在采空区的瓦斯大量涌入高位巷, 缓解了上隅角瓦斯涌出, 此时采空区氧化升温带在回风侧延长, 并远离工作面。因此, 随着氧化升温带的向后推移, 原处于窒息带的浮煤由于氧气供给量上升转化到氧化升温带, 加速了煤氧复合, 给浮煤自燃创造了有利条件。



(a) 高位巷阻塞时 ( $k_2=0.2$ ) (b) 高位巷通畅时 ( $k_2=0.6$ )

图 3 Z=0 处采空区平面压差分布 (Pa)

Fig.3 Pressure distribution in surface where Z is zero

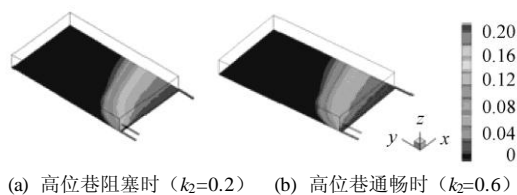


(a) 高位巷阻塞时 ( $k_2=0.2$ ) (b) 高位巷通畅时 ( $k_2=0.6$ )

图 4 Z=0 处采空区平面自燃“三带”划分

Fig.4 Spontaneous combustion “three zones” distribution in the goaf

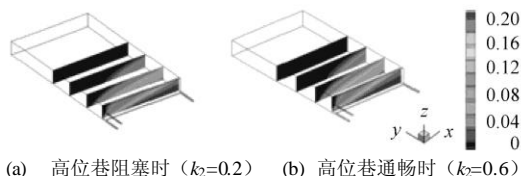
为了进一步获得氧气体积分数在采空区的三维分布规律, 导出了采空区部分三维截面的氧气体积分数分布图, 如图 5~7 所示。



(a) 高位巷阻塞时 ( $k_2=0.2$ ) (b) 高位巷通畅时 ( $k_2=0.6$ )

图 5  $Z=1$  m 处  $\varphi(O_2)$  分布

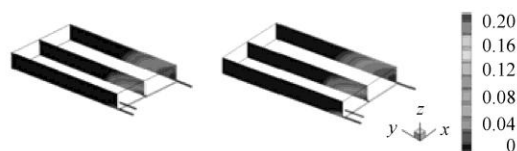
Fig.5 Oxygen concentration distribution where  $Z$  is 1 meter



(a) 高位巷阻塞时 ( $k_2=0.2$ ) (b) 高位巷通畅时 ( $k_2=0.6$ )

图 6  $Y=5, 50, 100, 150$  m 处  $\varphi(O_2)$  分布

Fig.6 Oxygen concentration distribution where  $Y$  is 5,50,100,150 m



(a) 高位巷阻塞时 ( $k_2=0.2$ ) (b) 高位巷通畅时 ( $k_2=0.6$ )

图 7  $X=1, 75, 160$  m 处  $\varphi(O_2)$  分布

Fig.7 Oxygen concentration distribution where

$X$  is 1,75, 160 m

由于煤层倾角较大,氧气体积分数在采空区内分布极不均匀,氧气主要集聚在进风巷侧并沿采空区深部、走向和垂高方向快速下降。在总风量变化不大的情况下,氧化升温带在进风侧相对保持不变,但在高位巷通畅时,上隅角处瓦斯含量会显著降低。

### 3.2 案例分析

乌兰煤矿 5344 工作面在回采过程中,“U+I”型通风系统高位巷由于阻塞不能有效地发挥排放瓦斯的作用,造成工作面回风巷、上隅角和放煤口等地点瓦斯超限,氧化升温带在回风侧显著加宽并靠近工作面,严重影响了安全和生产。为了解决高位巷通风不畅、风量小的问题,在高位巷加设了 2 台抽出式局部通风机用于抽排瓦斯,虽缓解上隅角瓦斯超限问题,但氧化升温带在回风侧显著加长,原处于窒息带的浮煤由于氧气供给量上升而转化到氧化升温带,采空区呼吸式供氧作用明显,所以大量空气的涌入对采空区防火灭火极为不利。再加上煤层受到构造带断层搓揉、挤压的影响,使自然发火期大大缩短。2005 年 4 月 8 日 6 时 40 分,5344 综放工作面高位巷突然出现  $CO$ , 体积分数为 0.006%~0.013%,最大值时达到 0.050 06%,采空区发生煤自燃火灾。

## 4 结 论

1) 推导了综放面“U+I”型通风系统的配风关系式,揭示了影响综放面所需风量的主要因素,研究了工作面风排瓦斯效率:高位巷通风通畅时风排瓦斯效率较高,通风阻塞时风排瓦斯效率较低。

2) 采空区煤炭自燃“三带”随“U+I”型通风系统的高位巷通风状态的不同而处于动态变化中。高位巷阻塞时,氧化升温带更接近回风侧工作面且范围也比通畅时更宽,进风侧氧化升温带变化较小。

3) 顶煤垮落的不连续性会致使高位巷阻塞,造成采空区呼吸式供氧,开采容易自燃或自燃煤层时对采空区防火极为不利,对此类煤层应避免采用“U+I”型通风系统。

### 参考文献:

- [1] LIU Lang, ZHOU Fu-bao. A comprehensive hazard evaluation system for spontaneous combustion of coal in underground mining[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(1/2): 27-36.
- [2] 刘新中. 高位巷在 2906 综放工作面开采期间的应用[J]. 中州煤炭, 2006(1): 52-53.  
LIU Xin-zhong. The application of rock entry to the fully mechanized working face 2906[J]. Zhongzhou Coal, 2006(1): 52-53.
- [3] 王志玉. 内错尾巷在寺河矿 2308 综采放顶煤工作面的应用[J]. 华北科技学院学报, 2004, 1(4): 70-78.  
WANG Zhi-yu. The application of the inner-tail entry of fully mechanized top caving face 2308 at Sihe coal mine[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2004, 1(4): 70-78.
- [4] 戴广龙, 张国枢, 卢平, 等. “品”字巷道系统综放工作面瓦斯涌出规律研究[J]. 中国煤炭, 2000, 26(7): 23-26.  
DAI Guang-long, ZHANG Guo-shu, LU Ping, et al. The law of gas emission from the “品”-shaped entries of fully mechanized working face[J]. China Coal, 2000, 26(7): 23-26.
- [5] 程远平. 高沼气综采工作面 Y 型通风方式主副配风比的探讨[J]. 煤矿安全, 1990(2): 32-35.  
CHENG Yuan-ping. The discussion of air distribution between major and accessory air intake entries at the fully mechanized Y-shaped working face with high gas concentration[J]. Safety in Coal Mines, 1990(2): 32-35.
- [6] 周福宝, 王德明, 陈开岩. 矿井通风与空气调节[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [7] CHENG Wei-min, GUO Yan-pei, WANG Gang, et al. Research on “three zone” classification of spontaneous combustion and its numerical simulation in gob of mines under the sea[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2007, 13(3): 281-285.

