

# 大倾角采煤工作面热害机理分析

辛 嵩<sup>1</sup>, 孟祥喜<sup>1</sup>, 屈永良<sup>1</sup>, 陈兴波<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国石化河北唐山石油分公司, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 基于理想化的大倾角工作面及采空区建立二维直角坐标系, 结合采煤工作面的温度分布模型, 以微积分的形式, 建立大倾角工作面热风压模型。在大倾角工作面热风压模型的基础上, 结合采空区热风压作用规律的四个不同阶段, 以采空区临界点、临界温度为基础, 推导出采空区漏风风路风流方向的判定条件。通过对山东某矿 3206 工作面分析得出: 3206 工作面处于热风压作用的第四个阶段, 即采空区内部高温有害气体沿漏风风路从工作面上隅角涌入工作面。

**关键词:** 大倾角; 漏风通道; 高温热害; 热风压; 采空区

中图分类号: TD727      文献标志码: A      文章编号: 1672-3767(2016)05-0042-07

## Mechanism Analysis of Heat Harm in Large Dip Angle Coal Mining Working Face

XIN Song<sup>1</sup>, MENG Xiangxi<sup>1</sup>, QU Yongliang<sup>1</sup>, CHEN Xingbo<sup>1,2</sup>

(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. The Branch of Tangshan Petroleum Company, SINOPEC, Tangshan, Hebei 063000, China)

**Abstract:** Under the two-dimensional rectangular coordinate system established in idealized large dip angle working face and goaf, and combined with the temperature distribution model of coal face, a heat wind pressure model of large dip angle working face was set up in the form of calculus. Based on this model and combined with the four different stages of heat wind pressure action law in the goaf, the wind direction judging criteria of air leakage wind path in goaf were deduced from the analysis of the critical point and critical temperature. The analysis of working surface 3206 in a mine in Shandong showed that during the fourth stage of heat wind pressure action, the high temperature and noxious gas inside the goaf went up from the upper corner onto working face 3206 along the air leakage wind path.

**Key words:** large dip angle; air leakage channel; high temperature and heat harm; heat wind pressure; goaf

近年来,随着煤炭开采深度的增加,大倾角、高地温等复杂地质条件的采煤工作面越来越多,而且呈现出与普通高温采煤工作面不同的热害特点。何满潮等<sup>[1-2]</sup>提出我国深部矿井地温场的三种模式,即线性模式、非线性模式和异常模式,通过室内试验研究了温度对深部岩石强度和吸附气体逸出的影响;并提出了 HEMS 系统在矿井现场降温方面的应用对策;杨德源<sup>[3]</sup>从理论上对矿山热环境以及控制措施进行了阐述;卫修君<sup>[4]</sup>对矿山降温系统设计进行了分析;亓玉栋等<sup>[5]</sup>对当今煤矿热害防治现状做了详细地阐述。经过我国煤炭科技工作者的不懈努力,矿井热害防治理论取得了长足的进步,并逐渐应用到采煤工作面。从采煤工作面的热源分析、冷负荷的计算、空冷器的选型及布置方面对采煤工作面的高温热害分别进行了研究,这些成果奠定了我国矿井热害防治理论,尤其是采煤工作面热害防治的基础。本课题通过对大倾角采煤工作面

收稿日期: 2016-01-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51204103)

作者简介: 辛 嵩(1968—),男,山东莱阳人,教授,博士,主要从事矿井通风与降温方向研究. E-mail: xinsong518@126.com

孟祥喜(1990—),男,山东邹城人,博士研究生,主要从事矿井通风与降温方向研究,本文通信作者。

E-mail: 467717846@qq.com

热害问题形成原因的探究,找出大倾角、采煤工作面高温高湿问题以及采空区高温有害气体涌出问题之间的相互关系及作用规律,确保大倾角采煤工作面热害治理方案的应用效果。

## 1 大倾角高温采煤工作面热害特点分析

为运输方便,节约电能,采煤工作面运输平巷水平一般低于轨道平巷,机电设备也多集中在运输平巷。因此,为最大限度地利用通风对高温采煤工作面进行高温治理,降低运输中煤炭对风流的加热作用,高温采煤工作面一般采用下行通风。大倾角采煤工作面由于受煤层赋存条件、采煤工艺等因素的制约,往往具有推进速度慢、采空区遗煤多、局部自然风压较大等特点。大倾角高温采煤工作面热害特点及形成主要由于煤层倾角大,造成工作面进、回风隅角较大,引起热风压大,同时由于采空区遗煤过多、工作面推进速度较慢、原岩温度较高,造成采空区高温气体涌出,从而引起矿井热害。

当大倾角采煤工作面采用下行通风时,其漏风通路如图 1 所示。由于大倾角采煤工作面采空区遗煤较多,遗煤在漏风风流的氧化作用下,缓慢氧化,放出热量。采空区围岩散热及遗煤氧化的共同作用,致使采空区的气体温度比采煤工作面内的空气高。大倾角采煤工作面的突出特点是煤层倾角大,其工作面上、下隅角的垂直距离较大。在密度差与高程差的综合作用下,便会在工作面风路与采空区漏风通路之间形成局部的自然风压。此自然风压是由于采空区与工作面之间空气温度不同引起的,因此,定义此局部自然风压为热风压。

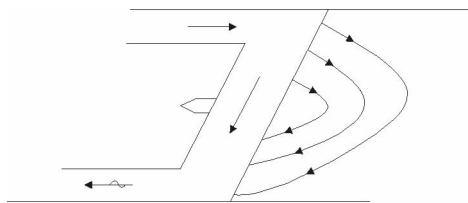


图 1 下行通风采煤工作面漏风示意图

Fig.1 Schematic diagram of working downward ventilation air leakage in coal face

## 2 大倾角采煤工作面热害形成规律

### 2.1 热风压作用规律的探究

#### 2.1.1 采煤工作面漏风通道理想化模型的建立

下行通风采煤工作面漏风是连续的,越靠近采煤工作面,漏风风流风速越大、风路越短;越远离工作面,漏风风流风速越小,风路越长。如图 2 所示,为研究方便,仅列出三条漏风风路示意图,虚线代表采空区漏风通路。具体漏风通路的确定,可以采用示踪技术,目前比较常用的是以 SF<sub>6</sub> 为示踪气体,确定漏风通路与漏风量<sup>[6]</sup>。

#### 2.1.2 采空区热风压作用规律

如图 2 所示,漏风通路与采煤工作面风路可以看作是并联风网。因此,其在遵循风量分配基本规律(即风量平衡规律、风压平衡规律和阻力定律)的同时,还遵循并联风网的网络特性<sup>[7]</sup>。以漏风通路 3 为例,说明采空区热风压的作用规律。漏风通路 3 与工作面风路 6 组成并联风网,采空区漏风通路 3 与工作面风路 6 可能由于空气温度的不同会引起其密度的不同,进而产生热风压,可将采空区热风压的作用规律分为四个阶段,即:热风压未形成阶段、热风压阻碍漏风阶段、热风压临界点和漏风风流反向阶段。

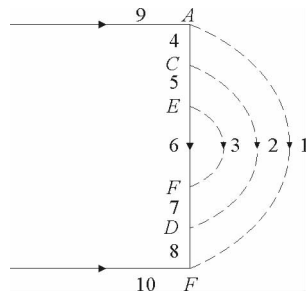


图 2 漏风通路简化图

Fig.2 Simplified diagram leakage pathways

#### 1) 热风压未形成阶段

此阶段采空区热风压尚未形成,采空区风路内的风流温度和密度与采煤工作面一致,则由风量平衡定律、风压平衡定律、阻力定律以及并联风网的通风网络特性可知:

$$M_5 = M_3 + M_6; \quad (1)$$

$$h_6 = h_3; \quad (2)$$

$$h_6 = R_6 Q_6^2 = R_6 \left( \frac{M_6}{\rho_6} \right)^2; \quad (3)$$

$$h_3 = R_3 Q_3^n = R_3 \left( \frac{M_3}{\rho_3} \right)^n \quad (4)$$

其中： $M$ —风流质量； $h_i$ — $i$  处风路的摩擦阻力 ( $i=1, 2, \dots, 6$ )； $R$ —摩擦风阻； $Q$ —风量； $n$ —漏风风流的流态指数， $n=1 \sim 2$ ；当漏风流态为紊流时， $n=2$ ；过渡流时， $1 < n < 2$ ；层流时， $n=1$ 。

### 2) 热风压阻碍漏风阶段

此阶段由于围岩散热，煤炭自然氧化等因素的影响，采空区内部空气温度上升，造成采空区风路 3 与工作面风路 6 之间的空气存在温度差，进而存在密度差。因此，在漏风通路 3 中，热风压只起到部分通风阻力的作用、阻碍工作面向采空区漏风，热风压用  $\rho h_{\text{热}}$  表示，可知

$$h_6 = h_3 + \rho h_{\text{热}} \quad (5)$$

### 3) 热风压临界点

由于采空区围岩及煤炭氧化对采空区空气的持续加热，采空区风路与工作面风路之间的热风压不断增大，当热风压压力值等于节点  $E, F$  间的通风压力时，便达到一个临界值，在此临界条件下，采空区漏风通路风量为零，热风压完全充当漏风通路 2 的通风阻力，可知

$$h_6 = h_3 + \rho h_{\text{热}} = \rho h_{\text{热}} \quad (6)$$

### 4) 漏风风流反向阶段

当采空区漏风通路与工作面风路之间的热风压超过临界值时，采空区漏风通路的风流便会发生反转，采空区内的高温气体便会从节点  $E$  流出，并与新鲜风流  $M_5$  混合后，进入工作面风路 6。此阶段，热风压不仅需要克服节点  $E, F$  之间的压力差，还需要克服漏风通路 2 中的通风阻力，可知

$$\rho h_{\text{热}} = h_3 + h_6 \quad (7)$$

## 2.2 采空区热风压模型的假设条件

为了简化问题，便于建立数学模型，对采煤工作面及采空区作如下假设：

- 1) 采空区为均质各向同性的多孔介质；
- 2) 采空区内的热源只考虑围岩、煤体散热以及遗煤自然氧化散热；工作面内热源主要有围岩散热、运输中的煤炭散热，其他热源的放热量统一用  $\sum Q_m$  表示；
- 3) 采空区内部各空气成分之间无化学反应。

## 2.3 大倾角采煤工作面采空区热风压模型的建立

大倾角工作面热风压形成的实质是工作面风路与采空区风路之间由于空气温度的不同而形成的一个较大的局部自然风压<sup>[8-9]</sup>，即：

$$H_{\text{热}} = H_{\text{自}} \quad (8)$$

$$H_{\text{自}} = gZ(\rho_1 - \rho_2) \quad (9)$$

式中： $H$ —自然风压； $Z$ —工作面漏风点与汇风点的垂高， $Z=L\sin\theta$ ，其中  $L$  是工作面漏风点与汇风点的直线距离， $\theta$  为煤层倾角； $g$ —重力加速度； $\rho_1$ —存在热风压后，采煤工作面空气密度； $\rho_2$ —采空区空气密度。

### 2.3.1 热风压微分方程

以工作面下隅角为坐标原点，沿煤层走向为  $X$  轴（指向采空区深部为正），沿煤层倾向向上为  $Y$  轴正方向，建立工作面、采空区二维平面直角坐标系，如图 3 所示。

取  $AD$  段长度为  $dy$ ，则对应的  $BC$  段长度也为  $dy$ ，则在  $A-B-C-D$  组成的漏风循环中，热风压微分公式为

$$d\rho h_{\text{热}} = \frac{gP_1}{RT_1}(1-K)\sin\theta dy \quad (10)$$

式中： $\rho h_{\text{热}}$ —热风压，Pa； $g$ —重力加速度， $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ； $P_1$ —工作面大气压强，Pa； $R$ —普适气体常数， $R=8.31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ ；

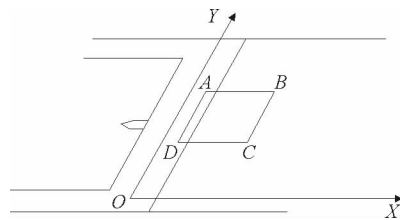


图 3 工作面、采空区二维平面直角坐标系

Fig. 3 Two-dimensional Cartesian coordinate system of working face and goaf

$K$ —温度比,无量纲量,  $K = \frac{T_1}{T_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ ;  $T_1$ 、 $T_2$ —采煤工作面、采空区风流温度,  $K$ ;  $\theta$ —煤层倾角。

### 2.3.2 热风压积分方程

由漏风通道  $A-B-C-D$  内形成的热风压方程为

$$ph_{\text{热}} = \frac{gP_1}{RT_1}(1-K)l\sin\theta. \quad (11)$$

式中:  $l$ —采煤工作面  $AD$  段的直线距离,  $m$ ;  $T_1$ 、 $T_2$ —采煤工作面  $AD$  段及采空区  $BC$  段风流平均温度,  $K$ ;  $\theta$ —煤层倾角。

### 2.3.3 工作面温度分布模型及采空区最高温度

#### 1) 工作面温度分布模型

采煤工作面的范围为进风平巷的上隅角至回风平巷的下隅角,假设采煤工作面长度为  $L$ ,则上隅角坐标为  $(0, L)$ ,下隅角为  $(0, 0)$ 。工作面的热源分为三大类:围岩(煤壁及上下顶板)散热,采落的煤体、矸石散热以及其他热源散热,热传递方式主要为热传导和热对流。则风流通过采煤工作面时的热平衡微分方程式为

$$M_{BCp}dT + M_B\gamma dd = dQ_{gu} + dQ_k + \frac{\sum Q_m}{L}dy; \quad (12)$$

$$dQ_k = 0.0024 mc_m(T_r - T_{\text{湿}})(dy)^{0.8}. \quad (13)$$

式中:  $M_B$ —风流的质量流量,  $kg/s$ ;  $c_p$ —空气的定压比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $\gamma$ —汽化潜热,  $J/kg$ ;  $d$ —空气的含湿量,  $g/kg$ ;  $Q_{gu}$ —围岩散热量,  $W$ ;  $Q_k$ —运输中煤炭的散热量,  $W$ ;  $Q_m$ —其他热源散热量,  $W$ ;  $K_r$ —围岩与风流间的不稳定换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $U$ —风流与工作面接触的周长,  $m$ ;  $T_{gu}$ —围岩温度,  $K$ ;  $m$ —煤炭及矸石运输量,  $kg/s$ ;  $c_m$ —煤炭或矸石的比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ,对煤炭来说,  $c_m \approx 1.25 J/(kg \cdot K)$ ;  $T_r$ —运输中煤炭始点的平均温度,  $K$ ,比工作面原始岩温低  $4 \sim 8^\circ C$ ;  $T_{\text{湿}}$ —工作面中风流的平均湿球温度,  $K$ 。

以工作面上隅角(即  $x=0, y=L$ )为积分始点,以工作面任一位置为积分终点,对公式(12)、(13)进行积分得

$$M_{BCp}(T_1 - T_0) + M_B\gamma(d_1 - d_0) = K_r Ul(T_{gu} - T) + 0.0024 mc_m(T_r - T_{\text{湿}})l^{0.8} + \frac{l}{L} \sum Q_m. \quad (14)$$

式中:  $l$ —工作面中点  $(0, y)$  到工作面上隅角的直线距离,  $m, l = L - y$ ;  $T_1$ —工作面中点  $(0, y)$  的风流温度,  $K$ ;  $T_0$ —工作面上隅角风流温度,  $K$ ;  $d_1$ —工作面中点  $(0, y)$  的风流含湿量,  $g/kg$ ;  $d_0$ —工作面上隅角风流含湿量,  $g/kg$ 。

工作面温度  $T_1$  的表达式为

$$T_1 = \frac{(R + E\varphi_0 - N)T_0 + M + F}{R + E\varphi_1}. \quad (15)$$

其中,组合参数分别为:  $R = 1 + 0.5N$ ;  $E = 2.4786A, A = 622 \frac{b}{P - P_m}$ ;  $N = \frac{K_r Ul + 6.67 \times 10^{-4} c_m ml^{0.8}}{M_{BCp}}$ ;  $F =$

$\frac{l}{L} \sum Q_m - 2.33 \times 10^{-3} \times c_m ml^{0.8}$   
 $\frac{l}{L} \sum Q_m - 2.33 \times 10^{-3} \times c_m ml^{0.8} - E\Delta\varphi\epsilon'$ ;  $M = N_r T_r = \frac{K_r UT_{gu}}{M_{BCp}}l$ 。式中,  $b, \epsilon', P_m$  为与风温有关的常数,其

值参见表 1。

#### 2) 采空区最高温度

采空区内部气体的温度  $T_2$  是一个与采空区位置、时间有关的函数。经分析并结合现场实际情况知:当气体到达采空区一定深度、并经过一段时间后,采空区气体温度趋于一个稳定数值,该温度高于采空区围岩的原始岩温。

$$T_2 = T_{gu} \times K_{\text{补}}. \quad (16)$$

表 1  $b, \epsilon', P_m$  参数取值  
Tab. 1 The parameters of  $b, \epsilon', P_m$

风温/℃	$b$	$\epsilon'$	$P_m$	
			井下	地面
1~10	61.978	9.324	1 016.12	734.16
11~17	50.274	19.979	1 459.01	1 053.08
18~23	144.305	-3.770	2 108.05	1 522.08
24~29	197.838	-8.988	3 028.41	2 187.85
30~35	268.328	-14.288	4 281.27	3 105.55
36~45	393.015	-22.958	6 497.05	4 692.24

式中： $T_{gu}$ —采空区冒落岩石及围岩的原始岩温，K； $K_{补}$ —采空区风温补偿系数，与工作面推进速度、顶板管理方式、漏风风量及煤炭采出率等因素有关，一般采用经验数值。

### 2.3.4 大倾角工作面热风压模型

如图 3，假设采煤工作面的漏风点为 A、坐标为  $(0, y_A)$ ，汇风点为 D、坐标为  $(0, y_D)$ 。在 A-B-C-D 与 A-D 组成的并联风路中的热风压可表示为

$$ph_{热} = \frac{gP_1}{RT_1}(1-K)l\sin\theta. \quad (17)$$

式中： $T_1$ —AD 段风流的平均风温，可用 AD 段中点的温度代替，K。

## 2.4 大倾角采煤工作面热风压临界条件的分析

### 2.4.1 采空区临界温度

如图 4 所示，为工作面采空区并联风路的示意图，其中：A 点为漏风点，B 点为汇风点，实线 A-1-B 为工作面风路，虚线 A-2-B 为采空区风路。

正常条件下，工作面与采空区漏风通路之间形成的并联风路的风流流向如图 4(a) 所示，均为下行风；当热风压等于漏风节点 AB 点的通风压力时，此点处于最理想状态，工作面不向采空区漏风，采空区也无高温有害气体涌入工作面，如图 4(b) 所示；当热风压超过漏风节点 AB 间的通风压力时，热风压充当采空区漏风风路中的通风动力，在克服 AB 点的

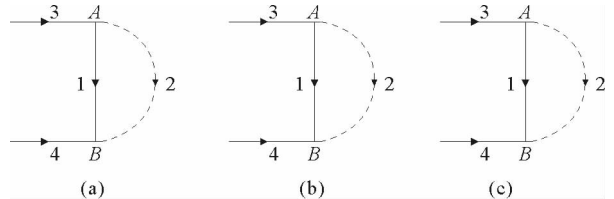


图 4 简化的并联风路

Fig. 4 Simplified parallel air duct

的通风压力后，还为采空区漏风风路中的反转风流提供通风动力，如图 4(c) 所示。分析知，当热风压正好等于漏风节点 AB 间的热风压时，状态最为理想，此点为临界点。

### 2.4.2 临界温度公式的推导

由临界条件的定义可知，此时热风压在数值上等于漏风点与汇风点之间的漏风风压，且方向相反。如图 4(b) 所示，则  $h_1^* = h_2^*$ ，漏风风压条件为：

$$h_1^* = h_2^* = ph_{热} = \frac{gP_1}{RT_1}(1-K)l\sin\alpha. \quad (18)$$

式中： $h_1^*$ —工作面 A、B 两点间的压能差，Pa；式中其他符号意义同前。

临界温度比

$$K_{临} = 1 - \frac{\alpha UR}{S^3 P_1 g \sin\theta} T_1 Q_1^2. \quad (19)$$

式中： $K_{临}$ —临界温度比； $R$ —普适气体常数， $J/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ； $T_1$ —采煤工作面风流温度，K； $Q_1$ —采煤工作面风量， $\text{m}^3/\text{s}$ ； $P_1$ —采煤工作面内的大气压力，Pa； $\alpha$ —采煤工作面在大气压力  $P_1$  和风温  $T_1$  下摩擦阻力系数，

$N \cdot s^2/m^4$ ;  $U$ —采煤工作面的周长,  $m$ ;  $S$ —采煤工作面的断面积,  $m^2$ 。为方便计算与分析, 定义采煤工作面特征参数  $\delta = \frac{\alpha UR}{S^3 P_1 g \sin\theta}$ , 则公式可变形为:

$$K_{\text{临}} = 1 - \delta T_1 Q_1^2; \quad (20)$$

$$T_{\text{临}} = \frac{T_1}{1 - \delta T_1 Q_1^2}。 \quad (21)$$

由于采煤工作面特征参数  $\delta$  为定值, 因此, 采空区临界温度  $T_{\text{临}}$  是一个关于采煤工作面的风量  $Q_1$  和风流温度  $T_1$  的函数, 分别对  $Q_1$  和  $T_1$  求偏导数, 可得出  $T_{\text{临}}$  与  $Q_1$  和  $T_1$  的关系。

1) 采空区临界温度  $T_{\text{临}}$  与工作面的风量  $Q_1$  的关系

$$\frac{\partial T_{\text{临}}}{\partial Q_1} = \frac{-T_1(-2\delta T_1 Q_1)}{(1 - \delta T_1 Q_1^2)^2} = \frac{2\delta T_1^2 Q_1}{(1 - \delta T_1 Q_1^2)^2} > 0。 \quad (22)$$

2) 采空区临界温度  $T_{\text{临}}$  与采煤工作面风流温度  $T_1$  的关系

$$\frac{\partial T_{\text{临}}}{\partial T_1} = \frac{T_1'(1 - \delta T_1 Q_1^2) - T_1(1 - \delta T_1 Q_1^2)'}{(1 - \delta T_1 Q_1^2)^2} = \frac{1}{(1 - \delta T_1 Q_1^2)^2} > 0。 \quad (23)$$

### 2.4.3 不同条件下的气体运动规律

1) 采空区气体温度高于工作面风流温度但低于临界温度

当采空区气体温度高于工作面风流温度但低于临界温度时, 由公式  $K = \frac{T_1}{T_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$  可知:  $K > K_{\text{临}}$ 。可得漏风风压与热风压关系为

$$\frac{gP_1}{RT_1}(1 - K)l\sin\theta = ph_{\text{热}} < ph_{\text{漏}} = \frac{gP_1}{RT_1}(1 - K_{\text{临}})l\sin\theta。 \quad (24)$$

式中  $ph_{\text{漏}}$  为漏风风压。

由上式分析知: 当采空区内部气体温度低于临界温度时, 其与工作面组成的并联漏风通路中的热风压小于采空区风路风流停滞的临界值, 由于热风压的存在, 且方向与漏风风流方向相反, 热风压实质上起到了通风阻力的作用, 即漏风风路漏风点与汇风点之间的压能差降低。

2) 采空区气体温度等于临界温度

$$\frac{gP_1}{RT_1}(1 - K)l\sin\theta = ph_{\text{热}} = ph_{\text{漏}} = \frac{gP_1}{RT_1}(1 - K_{\text{临}})l\sin\theta。 \quad (25)$$

此时采空区内部气体的温度等于临界温度, 其形成的热风压等于采空区风路风流停滞的漏风风压值, 采空区漏风风路的风流处于停滞状态。

3) 采空区气体温度高于临界温度

$$\frac{gP_1}{RT_1}(1 - K)l\sin\theta = h_{\text{热}} > h_{\text{漏}} = \frac{gP_1}{RT_1}(1 - K_{\text{临}})l\sin\theta。 \quad (26)$$

此时, 由于采空区内部形成的热风压大于其漏、汇风点间的压能差, 故采空区内高温有害气体在热风压的作用下, 在漏风点涌出、与进入工作面的新鲜风流混合后, 进入工作面风路。

## 3 工程应用

### 3.1 矿井概况

我国山东某矿 3206 工作面, 煤层倾角  $32^\circ$ , 厚度 3.5 m, 布置工作面长度 180 m, 回采长度 1 400 m。工作面轨道平巷 -700 m, 运输平巷埋深 -795 m, 采用下行通风方式, 进风量为  $1\ 852\ m^3/min$ , 风速 2.1 m/s。工作面原始岩温  $35.7 \sim 38.2\ ^\circ C$ , 平均  $36.95\ ^\circ C$ 。经过降温处理后, 采煤工作面温度达到《煤矿安全规程》规定的  $28\ ^\circ C$ , 经测定, 工作面上下隅角的压能差为 27 Pa, 井下大气压力为 99 625 Pa。

### 3.2 3206 工作面热害形成机理及作用规律分析

1) 3206 工作面热害形成机理分析

3206 工作面为大倾角采煤工作面, 虽采取了机械制冷降温措施, 工作面高温高湿问题得到改善, 但依然

存在采空区高温有害气体涌出问题。经现场实际调查,采空区高温有害气体主要由工作面上隅角涌出,涌出风流温度高达 40℃。3206 工作面空气温度在采取降温措施后,稳定在 28℃左右,工作面上隅角涌出气体温度为 40℃,可基本看作是采空区内部空气温度。因此在工作面与采空区漏风风路组成的并联风路中,风流存在密度差。在大倾角工作面高程差的作用下,形成热风压,迫使采空区漏风风流反向,由工作面上隅角涌出,形成 3206 工作面采空区高温有害气体涌出的问题。

#### 2) 3206 工作面热风压作用规律分析

3206 工作面采空区高温有害气体涌出的问题,是热风压造成的。根据现场实际条件可知,3206 工作面空气温度为 28℃,工作面上下隅角的压能差为 27 Pa,井下大气压力为 99 625 Pa,采空区内部空气温度为 40℃,带入公式得: $T_{\text{临}}=35.72℃$ 。

经分析可知 3206 工作面上、下隅角压能差为 28 Pa,故  $\rho h_{\text{热}} > h_{\text{漏}}$ 。进一步计算可知: $K < K_{\text{临}}$ ,  $T_2 > T_{\text{临}}$ , 3206 工作面处于热风压作用的第四个阶段,即:漏风风流反向阶段。因此,出现了采空区内部高温有害气体沿漏风风路从工作面上隅角涌入工作面的热害问题。

## 4 结论

1) 根据热风压作用规律,可将采空区热风压的作用过程分为四个阶段,即:热风压未形成阶段、热风压阻碍漏风阶段、热风压临界点和漏风风流反向阶段。

2) 运用建立的大倾角工作面热风压模型和采空区临界温度公式对山东某矿 3206 工作面进行分析。结果表明:3206 工作面处于热风压作用的漏风风流反向阶段,出现了采空区内部高温有害气体沿漏风风路从工作面上隅角涌入工作面的热害问题。

### 参考文献:

- [1]何满潮,郭平业.深部岩体热力学效应及温控对策[J].岩石力学与工程学报,2013,32(12):2377-2393.  
HE Manchao, GUO Pingye. Deep rock mass thermodynamic effect and temperature control measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2377-2393.
- [2]何满潮,徐敏. HEMS 深井降温系统研发及热害控制对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1353-1361.  
HE Manchao, XU Min. Research and development of HEMS cooling system and heat-harm control in deep mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1353-1361.
- [3]杨德源. 矿山热环境及其控制[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2009: 3-25.
- [4]卫修君. 矿井降温理论与工程设计[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2008: 5-55.
- [5]亓玉栋,程卫民,于岩斌. 我国煤矿高温热害防治技术现状综述与进展[J]. 煤矿安全, 2014, 45(3): 167-170.  
QI Yudong, CHENG Weimin, YU Yanbin. Status summarization and progress of heat hazard control technology in coal mine of China[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(3): 167-170.
- [6]孙九良,程方霖,李长杰. 华丰煤矿 1409 大倾角综放面采空区漏风规律分析及防治对策[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(4): 44-46.  
SUN Jiuliang, CHENG Fanglin, LI Changjie. Huafeng coal mine 1409 steep fully mechanized caving gob law analysis and countermeasures[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35(4): 44-46.
- [7]辛嵩. 矿井通风技术与空调[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2014: 104-105.
- [8]谭经建. 热风压引起风流对流的规律及其稳定措施[J]. 煤矿安全, 1984, 1(7): 39-42.  
TAN Jingjian. The regularity and stability of airflow convection caused by hot air pressure[J]. Safety in Coal Mines, 1984, 1(7): 39-42.
- [9]邵长宏. 热风压对矿井通风系统的影响及其处理对策[J]. 煤炭工程师, 1990, 4(2): 12-14.  
SHAO Changhong. The influence of hot air pressure on mine ventilation system and the countermeasures[J]. Coal Engineer, 1990, 4(2): 12-14.

(责任编辑:吕海亮)