

文章编号:0253-9993(2010)12-2105-06

矿井平巷木材火灾烟流滚退理论分析与实验研究

焦宇¹,周心权²,康与涛¹

(1. 上海海事大学 海洋环境与工程学院,上海 201306;2. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

摘要:为了研究矿井火灾产生的滚退烟流的危害,理论分析了矿井火灾后烟流发生滚退的条件及滚退特征,进行了真实巷道木材火灾实验。从烟流滚退滞止点的压力平衡和最小经验进风风速两个角度进行了烟流滚退的条件判别;基于环境流体力学、传热学和前人研究成果对滚退烟流的滚退特征数学模型进行了探讨和分析;并进行了真实矿井木材火灾实验,对相关实验数据和实验现象、烟流滚退特征数学模型进行了相互对比、分析和验证。结果表明,滚退烟流的特征参数数学模型和实验数据、实验现象吻合较好。

关键词:矿井;木材火灾;烟流;滚退

中图分类号:TD752 **文献标志码:**A

Theoretical analysis and experimental study on backflow smoke of mine laneway wood fire

JIAO Yu¹, ZHOU Xin-quan², KANG Yu-tao¹

(1. College of Environment and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The conditions and characteristics theories of backflow smoke were studied to know about the danger of backflow smoke of mine fire. Wood fire experiments in real laneway were carried out. The backflow condition was studied from two aspects: the pressure balance of backflow stopping point, the other one is the least inflowing air velocity. The characteristic of backflow smoke was studied based on environmental hydrodynamics, heat transfer and some research results of formers. Wood fire experiments were carried in real laneway. And the experimental data and phenomena and backflow characteristics were contrasted, analyzed, validated to each other. The characteristic parameters of plume mathematical models and experimental data are in good agreement with experimental phenomena.

Key words: mine; wood fire; smoke; backflow

矿井火灾是煤矿重大灾害之一,矿井火灾发生后,火势发展迅猛,变化复杂,影响范围广,往往造成人员和财产的重大损失,极易酿成重大灾害事故。在煤矿灾害中,火灾往往持续时间最长,造成矿井通风长期紊乱状态,继而造成火灾烟流流动状态的复杂变化,且容易转变成更为危险的灾害如瓦斯爆炸等,加大了救灾工作的危险性和难度,对救灾人员的安全造成严重威胁。烟流滚退是矿井火灾时期常见的、危害严重的风流紊乱现象之一,其表现形式为在火源下风

侧节流效应和巷道断面温度、压力梯度影响下,新鲜风流沿巷道底部按原风向流入火源的同时,火源产生的烟流沿上风侧巷道顶部逆向回退并翻卷向火源。滚退烟流可导致上风侧可燃物起火,同时,滚退的烟流在火源上风侧与新鲜风流混合后再次流回火源时有诱发瓦斯爆炸的可能。烟流滚退对火源上风侧直接灭火人员也会构成直接威胁^[1-2]。

所以,对矿井火灾烟流滚退现象进行理论和实验研究,对于改善矿井生产的安全状况,提高矿井防灾、

减灾能力具有重要意义。基于真实巷道木材火灾实验资料,本文欲对矿井平巷木材火灾情形下,烟流发生滚退的条件、滚退烟流特征等进行理论分析和实验验证。

1 烟流滚退的条件判定

(1) 判别方法 1 图 1 是水平巷道发生火灾情形下烟流的滚退示意图。其中 F 断面是烟流羽流的滚退上边界, K 断面是烟羽流的中心, H_F 、 H_K 分别是 F、K 断面对应的距离巷道底板的高度, B 断面是烟流滚退滞止处, B1 断面是烟流滚退滞止点的进风侧, B2 断面是烟流滚退滞止点的烟流侧, B1、B2 和 B 断面的距离视为极小值, H 为巷道的高度。可以看出,发生火灾后,会形成火羽流区域,当火羽流上升到巷道顶板后受阻,从而会有一部分烟流沿着顶板往前运动,于是这部分前进的烟流形成了烟流顶板射流主流区。另外一部分则沿着顶板逆向流动,形成了烟流顶板射流逆流区域。当逆流的烟流逆行到 B 断面时,烟流和进风流达到某种平衡,烟流停止逆行,并和新风一起从顶板烟流下侧一起流向火源,从而形成了烟流的滚退^[3-5]。

图 1 中,假定存在这样一个断面(设定为图 1 中的 B),对于该断面右侧 B2 断面的烟流存在向左侧 B1 断面方向前进的趋势,而由于 B1 侧进风流的作用导致了在 B 断面处达到了一种运动状态的平衡,从而使得烟流在此点处停止继续逆风前进。那么 B 断面就是烟流滚退的滞止点,在 B 断面满足压力平衡原则,即 $p_{BL} = p_{BR}$ 。如果断面平衡状态被打破,则会有如下两种情形出现:① $p_{BL} > p_{BR}$, 风流方向的压力大于烟流方向的压力,出现这种情形则 B 断面不会出现烟流滚退现象;② $p_{BL} < p_{BR}$, 烟流方向压力大于风流方向压力,出现这种情形则 B 断面会出现烟流滚退现象。

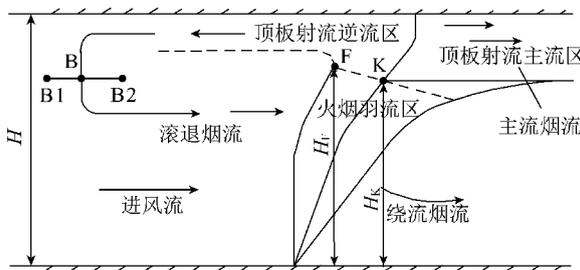


图 1 水平巷道火烟羽流

Fig. 1 Smoke plume in a horizontal airway

因为 $p_{BL} = p_{B1} + \rho_{B1} v_{B1}^2$, $p_{BR} = p_{B2} + \rho_{B2} v_{B2}^2$, 且火场区域内的高温使得该区域的温度较高,密度较低, B、B1、B2 三个断面距离非常微小,所以 B1、B2 断面的

静压近似认为相等,即 $p_{B1} = p_{B2}$ 。只考虑动压的因素,可有

$$\rho_{B1} v_{B1}^2 = \rho_{B2} v_{B2}^2 \quad (1)$$

其中, p_{BL} 为 B 断面左侧进风流压力, Pa; p_{BR} 为 B 断面右侧烟流的压力, Pa; v_{B1} 为进风流风速, m/s; v_{B2} 为烟流速度, m/s; ρ_{B1} 为进风流密度, kg/m³; ρ_{B2} 为烟流密度, kg/m³。

判断某个断面是否会出现烟流滚退现象可用下面的数学公式表述,即

$$\rho_{B1} v_{B1}^2 > \rho_{B2} v_{B2}^2 \quad (\text{不出现滚退})$$

$$\text{或者 } \rho_{B1} v_{B1}^2 < \rho_{B2} v_{B2}^2 \quad (\text{出现滚退}) \quad (2)$$

(2) 判别方法 2 还有一种简易的经验判别方法:相关研究资料表明,缓和烟流滚退的最小经验风速^[6]为

$$v_{\min} > 0.92 \sqrt{H} \quad (3)$$

式中, v_{\min} 为最小进风速度; H 为巷道高度。

表 1 列出了发生火灾情形时同巷道环境下防止烟流发生滚退的最小进风速度。因此,根据表 1 和巷道的设计情况,就可以确定为防止发生烟流滚退的最小进风速度。换言之,一般情形下可以根据进风速度的大小来判断是否会出现烟流滚退现象。

表 1 不同巷道防止烟流滚退最小风速经验值

Table 1 Experimental minimum wind speed to prevent smoke backflow in different laneway

巷道高度/m	防止烟流滚退最小风速/(m·s ⁻¹)		
	倾角 0°	倾角 5.7°	倾角 11.3°
1.2	1.0	1.22	1.52
1.8	1.23	1.47	1.83
2.4	1.43	1.70	2.13
3.0	1.60	1.90	2.39

2 滚退烟流的相关特征参数

火灾所产生滚退烟流的特征包括烟流速度、温度、滚退距离等。首先,基于环境流体力学理论,对火烟羽流可建立起以下几个量纲关系式^[3,7]。

体积流量

$$Q = k_1 |B_0|^{1/3} Z^{5/3} \quad (4)$$

轴线密度差

$$\Delta\rho_m / \Delta\rho_0 = k_2 Q_0 |Z/Z_B|^{-5/3} u_a Z_B^2 \quad (5)$$

浮羽流半径厚度

$$b = k_3 Z \quad (6)$$

羽流断面密度差分布

$$\Delta\rho(Z, r) = \Delta\rho e^{r^2/\lambda^2 b^2} \quad (7)$$

式中, k_1, k_2, k_3 为实验系数; λ 为略大于 1 的系数; B_0 为羽流起始浮力通量, $B_0 = Q_0 \Delta \rho_0 g / \rho_a$, m^4/s^3 ; u_a 为风流风速, m/s ; Z 为羽流轴线坐标, 即距火源点的垂直距离, m ; Q_0 为羽流起始体积流量, m^3/s ; $\Delta \rho_0$ 为羽流起始密度差, $\Delta \rho_0 = \rho_0 - \rho_a$, kg/m^3 ; ρ_0 为羽流起始密度, kg/m^3 ; ρ_a 为风流密度, kg/m^3 ; $\Delta \rho_m$ 为羽流轴线密度差, $\Delta \rho_m = \rho_m - \rho_a$, kg/m^3 ; ρ_m 为羽流轴线密度, kg/m^3 ; Z_B 为特征尺度, $Z_B = |B_0| / u_a^3$, m ; r 为羽流径向坐标, m 。

在式(4)~(7)的基础上,进行了滚退烟流部分特征参数的确定。

2.1 滚退烟流的速度

烟流滚退的速度 v_{B2} 可根据体积流量的定义来确定,即

$$v_{B2} = Q_{B2} / S_{B2} \quad (8)$$

式中, Q_{B2} 为 B2 断面的烟流体积流量, m^3/s ; S_{B2} 为 B2 断面面积, m^2 。

式(8)中,假定所有断面面积始终保持一致,均为巷道断面面积 S ,则需要对 Q_{B2} 进行求解。如果已知 B2 断面的质量流量,则根据体积流量和质量流量的关系可以求出 B2 断面的烟流速度,即

$$v_{B2} = M_{B2} / S \rho_{B2} \quad (9)$$

假定 B2、K、F 三个断面滚退烟流的体积流量、密度、质量流量均相等,则求出了 K 断面的滚退烟流质量流量即可知 B2 断面滚退烟流的质量流量,从而可以根据式(9)求出该断面的滚退烟流的滚退速度。

首先,根据式(5)~(7)先对 K 断面逆流烟流的质量流量进行求解。对于 K 断面,滚退烟流羽流断面密度分布差为 $\Delta \rho(K, r) = \Delta \rho_{mk} e^{r^2 / (K_2 \lambda^2 H_K^2)}$, 从而 K 断面的平均烟流密度差 $\Delta \rho_K = -k_2 \lambda B_0^{2/3} g^{-1} H_K^{-5/3} \times \rho_a \int_0^{1/\lambda} e^{-t^2} dt$, 将其中的常数项 $\int_0^{1/\lambda} e^{-t^2} dt$ 用 k_4 代替,可简化为 $\Delta \rho_K = -k_2 k_4 \lambda B_0^{2/3} g^{-1} H_K^{-5/3} \rho_a$, 由于 $\rho_a = \rho_{B1}$, 从而 K 断面逆转烟流的平均密度为

$$\rho_K = \rho_{B1} + \Delta \rho_K = \rho_{B1} (1 - k_2 k_4 \lambda B_0^{2/3} g^{-1} H_K^{-5/3})$$

从而, K 点烟流质量 $M_K = Q_K \rho_K$, 又 $Q_K = Q_F$, 结合式(4)可有 $Q_F = k_1 k_F |B_0|^{1/3} H_F^{5/3}$ 。于是, $M_K = Q_F \rho_K = k_1 k_F |B_0|^{1/3} H_F^{5/3} \rho_{B1} (1 - k_2 k_4 \lambda B_0^{2/3} g^{-1} H_K^{-5/3})$ 。由于 B2 断面和 K 断面滚退烟流的质量流量 M_{B2} 和 M_K 视为相等,因此 M_{B2} 表示为

$$M_{B2} = k_1 k_F |B_0|^{1/3} H_F^{5/3} \rho_{B1} (1 - k_2 k_4 \lambda B_0^{2/3} g^{-1} H_K^{-5/3}) \quad (10)$$

式中, M_{B2} 为 B2 断面烟流质量流量, kg/s ; ρ_{B1} 为进风流密度, kg/m^3 ; k_4 为常数; ρ_{B2} 为 B2 断面烟流平均

密度, kg/m^3 ; H 为巷道的高度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; k_F 为 F 截面逆转烟流体积占总烟流体积的比例系数,一般取 $0 \leq k_F \leq 0.5$; H_F 为 F 截面烟流高度, m ; H_K 为 K 截面烟流高度, m 。

将式(10)代入式(9),就可求出 B2 断面滚退烟流的速度为

$$v_{B2} = k_1 k_F |B_0|^{1/3} H_F^{5/3} \rho_{B1} \times (1 - k_2 k_4 \lambda B_0^{2/3} g^{-1} H_K^{-5/3}) / S \rho_{B2} \quad (11)$$

2.2 滚退烟流的温度

结合式(1)可有

$$\rho_{B2} = \rho_{B1} (v_{B1} / v_{B2})^2 \quad (12)$$

火灾发生后,由于烟流、风流的温度和压力都不会太高,故可将烟流、风流均视为理想气体,因此满足理想气体状态方程,即

$$\frac{\rho_{B1}}{\rho_{B2}} = \frac{R_{B2} T_{B2} \rho_{B1}}{R_{B1} T_{B1} \rho_{B2}} \quad (13)$$

实际实验过程中,一旦发生烟流滚退现象,滚退烟流的温度可以通过测温仪器进行测定。滚退烟流的温度取为 B2 断面的烟流温度。基于式(13),由于假定了 B1、B2 点的静压近似相等,如果同时假定 B1、B2 断面气体常数 R 近似相等,则式(13)可改写为

$$\frac{\rho_{B1}}{\rho_{B2}} = \frac{T_{B2}}{T_{B1}}$$

从而,烟流的温度 T_{B2} 可表示为 $T_{B2} = T_{B1} \frac{\rho_{B1}}{\rho_{B2}}$, 联立式(12)、(13)可以求出 B2 断面滚退烟流的密度:

$$\rho_{B2} = k_1^2 k_F^2 |B_0|^{2/3} \rho_{B1} |1 - k_2 B_0^{2/3} g^{-1} H^{5/3}|^2 H_F^{10/3} S^{-2} v_{B1}^{-2} \quad (14)$$

从而可有 B2 断面烟流的温度为

$$T_{B2} = k_1^{-2} k_F^{-2} |B_0|^{-2/3} |1 - k_2 B_0^{2/3} g^{-1} H^{5/3}|^{-2} \times H_F^{-10/3} S^2 v_{B1}^2 T_{B1} \quad (15)$$

2.3 滚退烟流的滚退距离

假定烟流滚退的距离为 L , 上部烟流滚退与巷道接触的平均周长为 C 。当 $L=0$ 时,烟流温度 t_f 等于火源温度 t_{fire} , 巷道的断面 S 可表示为 $S=CL$ 。根据对流换热模型可有^[3]

$$dq = \alpha (t_f - t_w) dS \quad (16)$$

又因为 $dt_f = -dq / (MC_p)$, 经过推导,烟流的滚退距离 L 可表示为

$$L = \ln \frac{t_{fire} - t_{B1}}{t_f - t_{B1}} \frac{MC_p}{\alpha C} \quad (17)$$

其中, C_p 为烟流的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; α 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$; t_w 为巷壁温度, K ; q 为交换的热量, kJ/s ; M 为滚退烟流的质量流量。

结合前述滚退烟流的速度和温度无量纲表达式,

烟流的滚退距离也可表示为

$$L = \ln \frac{t_{\text{fire}} - t_{\text{BI}}}{t_f - t_{\text{BI}}} k_1 k_F |B_0|^{1/3} H_F^{-5/3} \rho_{\text{BI}} \times (1 - k_2 k_4 \lambda B_0^{2/3} g^{-1} H_K^{-5/3}) C_p \alpha^{-1} Z^{-1} \quad (18)$$

3 火灾烟流滚退实验研究

3.1 实验系统简介

本实验在煤炭科学研究总院重庆研究院实验巷道中进行。所选取的巷道呈水平状态,巷道首尾长42 m,横截面为拱形(宽2.0 m,高2.3 m),设计火源

位于B断面处。试验系统包括火源、通风系统、温度采集系统、场景拍摄系统、气样采集系统、灭火系统。基于本文研究目的,文中只取测温系统部分。该部分共有热电偶20支(量程为0~1 200℃)在巷道中的位置分布在A、B、C、D、E五个测面。如图2(a)所示,在每个测面的测点布置如图2(b)所示。实验燃料采用500 kg松木,将1号风门入口风速调节为0.7 m/s(用微速风表测定),浇上少许柴油对木材堆进行引燃,确认木材堆着火后开始记录各测点的压力、温度及抽取气样。

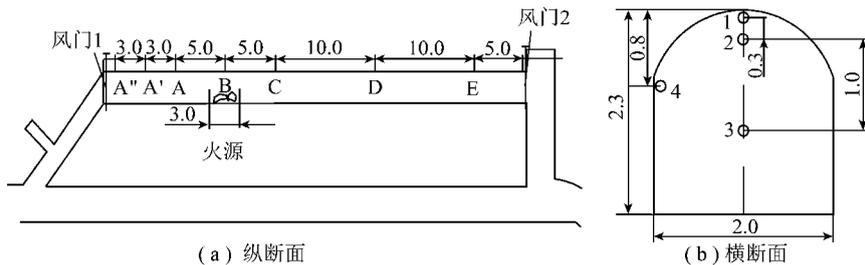


图2 测温点布置(单位:m)

Fig. 2 Temperature measurement point layout

3.2 实验结果分析

首先,由表1中的数据判断可知,由于实验巷道呈水平状态且其进风流速度0.7 m/s小于1.43 m/s(取表1中巷高2.4 m对应的最小风速),所以一定会出现烟流滚退现象。图3是木材堆燃烧进行了一段时间后在能见度允许的条件下拍摄到的烟流滚退的实景图片。由图3可以判断出实验中确实出现了烟流滚退现象。



图3 火灾初期烟流滚退效果

Fig. 3 The initial effects of backflow smoke

此外,为了验证前述数学模型的可靠性,还需要从实验数据上得到支撑。在分析计算之前,结合实验数据对模型中的相关系数、参数进行了数值确认。取 $k_1 = 1.2$, $k_2 = 0.75$, $k_4 = 2.7$, $\lambda = 1.005$, $\rho_0 = 1.6 \text{ kg/m}^3$ (初始烟流密度), $\rho_{\text{BI}} = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $k_F = 0.5$, $H_F = 1.8 \text{ m}$, $H_K = 1.8 \text{ m}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $Q_0 = 0.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 火焰温度 $t_{\text{fire}} = 1\ 000 \text{ K}$, 烟流温度 t_f 根据下面计算的 T_{B2} 得出。进风流温度 $t_{\text{BI}} = 293 \text{ K}$, $C_p = 1.005 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{°C)}$, $\alpha = 9.085 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$, $C = 3.4 \text{ m}$, 巷道断面

积 S 和进风风速 v_{BI}^2 取实验数据。当然,各个参数都可以允许有一定的波动取值范围,对最终的计算数值范围影响不大。下面分别对滚退烟流的滚退速度、温度、滚退距离进行模型验证。

3.2.1 烟流滚退速度

$$v_{\text{B2}} = k_1 k_F |B_0|^{1/3} H_F^{-5/3} \rho_{\text{BI}} \times (1 - k_2 k_4 \lambda B_0^{2/3} g^{-1} H_K^{-5/3}) / S \rho_{\text{B2}} = 0.064\ 9 \text{ m/s}$$

3.2.2 滚退烟流温度

首先,对实验温度数据进行分析和描述。A、B断面所测得的温度变化趋势如图4所示。图4(a)是火源所在B断面测点的温度随火灾时间的变化关系;图4(b)是A断面处4个测点所测得的温度随火灾时间的变化关系。从图4(a)可知,火源所在B断面4个测点的温度在火灾开始阶段以很接近的升温速率在30 min内快速升温至750~800℃附近,然后在600~800℃这个高温区间保持了35~40 min,接着又以接近的速率先是快速降温至400℃左右,然后均缓慢下降。整个火灾过程中,B1、B2测点的温度相对较高,B3测点的温度最低,局部时间区域温度互有重叠和波动。

从图4(b)可以看出,火源所在A断面4个测点的温度均是先升高至某个温度后持续一段时间,然后缓慢降低。A2的升温速率最大,A4的最小,A2、A3的则较为接近。其中,测点A2的温度均是先快速升高至260℃附近,然后保持在240~270℃这样一个较高温度的状态,大约在燃烧进行了30 min后开始

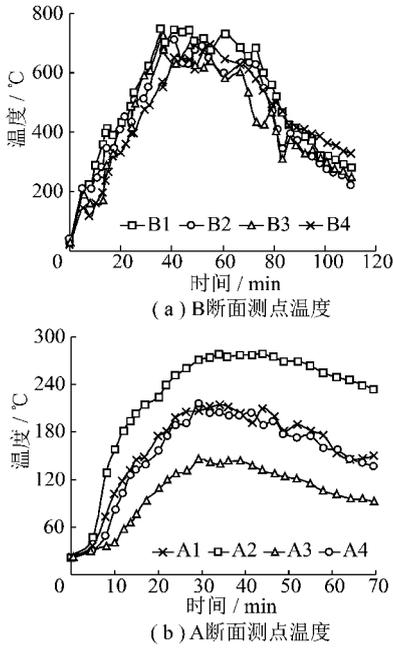


图 4 A、B 断面各测点温度随时间的变化关系

Fig. 4 The temperature changes with time of A, B cross section
 缓慢降低;A4 测点的温度由于低温进风风流的降温作用而始终最低;A1、A3 测点的温度较为接近,相互交替增大和减小。

基于实验数据的基础上,对滚退烟流的滚退数学模型进行了计算:

$$T_{B2} = k_1^{-2} k_F^{-2} |B_0|^{-2/3} |1 - k_2 B_0^{2/3} g^{-1} H^{5/3}|^{-2} \times H_F^{-10/3} S^2 v_{B1}^2 T_{B1} = 540.3 \text{ K}$$

由于 A 断面和 A' 断面的距离为 3 m,在经过一段时间后火灾达到稳定状态的情形下,这个距离对于温度的变化是不明显的。为此,可以取 A' 断面的温度就是 A 断面的温度值。而这个计算的模型温度值 T_{B2} 和火灾进行了 20~25 min 后测得图 4(b) 中 A 断面的 240~270 °C 的稳定状态范围很接近,误差很小,说明该温度模型在该实验场景下得到了一定程度上的验证。

3.2.3 烟流滚退距离

$$L = \ln \frac{t_{\text{fire}} - t_{B1}}{t_f - t_{B1}} k_1 k_F |B_0|^{1/3} H_F^{-5/3} \rho_{B1} \times$$

$$(1 - k_2 k_4 \lambda B_0^{2/3} g^{-1} H_K^{-5/3}) C_p \alpha^{-1} Z^{-1} = 0.011 \text{ m}$$

即烟流在 1 s 的时间内滚退了 0.011 m。根据图 2、4(b) 可知,测点 A 的温度在经过 7 min 左右后才有明显的变化,说明烟流到达这里的时间为 7 min,又计算的烟流滚退速度为 0.064 9 m/s,所以烟流在这段时间的滚退距离 $L=4.68 \text{ m}$,这个距离刚好和 A、B 两点的距离相近。根据图 2、4(b) 还可知,A 点温度在火源热电偶有变化后经过 20~25 min 的时间达到了较为稳定的相对高温区域,这段时间烟流的滚退距离应当是烟流滚退速度为 0.064 9 m/s×(1 200~1 500 s),滚退距离 L 的范围应当是 13.37~16.71 m。根据这个距离来判断,可知不仅是 A 断面,A' 断面也在烟流的滚退范围之内。这一点在实验现象上也得到了验证。

结合图 2(a),在 A' 处有一道开启的木门,木门距离火源的距离是 8 m,显然,这个距离是在烟流滚退区的。因此,从距离的角度来说,木门在烟流滚退范围之内。又由图 3 可以得出,因为 A 断面的 A2 测点属于烟流的密集区域,该区域的温度在火灾的大约第 20~70 min 之间高于 240 °C。相关研究文献得出,当木材在温度高于 205 °C 下被连续加热超过 15 min 即会起火^[6]。而 A 断面和 A' 断面的距离仅为 3 m,所以可近似认为这两个断面的温差不大,认为 A' 断面的 2 测点的温度有相当一段时间仍然高于 205 °C。从温度的角度来说,A' 点的木门存在被点燃的可能。结合这两个因素的分析可知,A' 处的木门从理论上讲是会被引燃的。这一点从实验上也得到了验证,离火源 8 m 处 A' 木门被引燃,离火源 11 m 远处 A' 处墙壁上悬挂的胶皮管被轻微碳化,具体如图 5 所示。

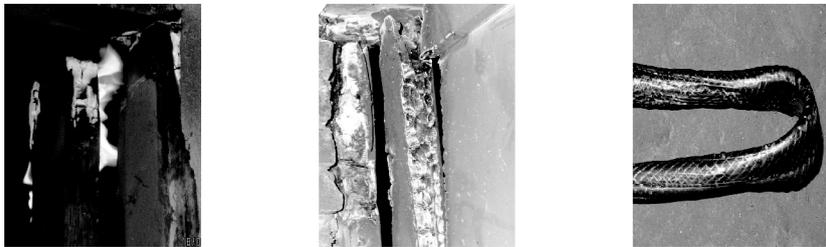


图 5 滚退烟流引发火源上风侧木门燃烧、胶管轻微碳化的图片

Fig. 5 Fired wood door at unwind side and slight carbonized hose by rolling back plume

图 5(a)、(b) 说明,距离火源 8 m 处的巷道上半部的温度在可以引起木门燃烧的温度下持续了一定

的时间。计算得知,由于 8 m 的距离下热辐射的强度不足以引发木材起火,所以主要还是高温滚退烟流的

热作用,所以木门一定处于烟流的滚退区域内,再加上不断地有新鲜风流从进风侧进入,从而可以保证充足的氧气。

综上,木门具备了起火的条件,从而出现了图5(a)、(b)的实验现象。图5(c)是位于A'处木门外侧3 m巷道上半壁斜挂的废弃胶皮管被碳化的示意图。该种胶皮管的碳化温度大约在180℃,从而可知在距离火源11 m远的地点有高温烟流出现,且烟流的温度应当是超过了180℃的高温,从而造成了图5(c)中所示的现象。当然烟流甚至可能滚退倒了更远的地方。该图片从某种程度上印证了前面的关于烟流的滚退距离的理论和计算结果。

当然,不能忽略火源对木门的热辐射作用。因为巷道内滚退烟流很浓(黑度较大),从而滚退烟流吸收了很大一部分火源对木门的热辐射能量,提高了滚退烟流的温度,间接地把这部分能量作用到了木门上。只有少许热辐射能量可以直接达到木门的位置。假定最后木门对于火源热辐射的吸收率为0.1~0.2,并根据实验数据取火源温度为600~800℃,木门的初始温度为27℃,木门的表面发散率为0.2~0.3,且火源和木门相距8 m。则经过计算可知,只能使木门的温度升高10~20℃。可以看出,影响是有的,但是对于木门温度的影响只有5%~10%的误差,可知木门最后升温着火主要还是滚退烟流的热作用,从而得出前面的计算和分析是可行的。

4 结 语

首先对矿井火灾烟流是否会发生滚退现象进行了条件判别,然后基于相关知识对滚退烟流的滚退特征参数进行了无量纲数学描述。烟流的滚退和多个影响因素有关。开展了矿井水平巷道木材火灾实验,

结合实验数据和数学模型进行了对比、分析和验证,得出滚退烟流的滚退模型是较为合理的。

参考文献:

- [1] 王海燕,周心权. 平巷烟流火灾滚退火烟羽流模型及其特征参数研究[J]. 煤炭学报,2004,29(2):190-194.
Wang Haiyan,Zhou Xinquan. Fire buoyant plume model and characteristic parameters of a reverse smoke in a horizontal airway during mine fire[J]. Journal of China Coal Society,2004,29(2):190-194.
- [2] 周福宝,王德明. 巷道火灾烟流滚退距离的理论研究[J]. 湘潭矿业学院学报,2003,18(4):22-24.
Zhou Fubao,Wang Deming. Theoretical study on the backflow distance of smoke and hot gases in a roadway fire[J]. Xiangtan Min. Inst.,2003,18(4):22-24.
- [3] 周心权,王海燕,赵红泽. 平巷烟流滚退逆行规律[J]. 北京科技大学学报,2004,26(2):118-121.
Zhou Xinquan,Wang Haiyan,Zhao Hongze. Rollback Law of reverse smoke flow in a horizontal airway during mine fire[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2004,26(2):118-121.
- [4] 周 延,王省身. 水平巷道烟流滚退发生条件的研究[J]. 煤炭学报,1998,23(4):362-365.
Zhou Yan,Wang Xingshen. Conditions for formation of a reverse smoke flow in a horizontal tunnel[J]. Journal of China Coal Society,1998,23(4):362-365.
- [5] Wu Y,Bakar MZA. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation system-a study of the critical velocity[J]. Fire Safety Journal,2000,35(3):363-390.
- [6] 周心权. 矿井火灾救灾理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社,1996.
Zhou Xinquan. Mine fire disaster theory and practice[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,1996.
- [7] 余常昭. 环境流体力学导论[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
Yu Changzhao. Introduction to environmental fluid mechanics[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1992.