

平巷烟流滚退逆行规律

周心权 王海燕 赵红泽

中国矿业大学(北京校区),北京 100083

摘要 运用环境流体力学及传热学的相关理论,研究了水平巷道火灾烟流滚退规律,通过对滚退烟流与巷壁间的热交换过程分析,得出了滚退发生时烟流逆行距离的函数表达式,并对其进行简化以便于实际应用.

关键词 矿井火灾;烟流滚退;逆行距离

分类号 TD 752.1

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流向火源.烟流滚退会导致火源上风侧烟流与新鲜风流掺混后,再逆流回火源,从而对火源上风侧从事直接灭火的人员构成威胁,并且在一定的条件下诱发瓦斯爆炸.因此,掌握烟流滚退发生的规律,对矿井火灾救灾安全具有重要的意义.烟流滚退的重要特征就是产生逆流层,因而逆流层的长度,即烟流滚退逆行距离对火灾安全亦具有重要意义^[1,2].本文在文献[3]的基础上,对平巷烟流滚退规律及其逆行距离进行了研究.

1 火烟羽流模型

在火灾过程中,由于燃烧产物和邻近火源的气体受热而体积膨胀,密度减少,相对于周围气体来说出现局部的密度差,从而产生重力差,即浮力作用和压强梯度,促使受热气流和燃烧产物上升,并在上升过程中卷吸周围气体共同前进,形成气体流动.这种气体流动常呈现羽状,称为火烟浮羽流.在静止的环境中,火烟羽流通常呈现垂向轴对称的几何性质.矿井火灾时期,由于有风流的存在,从火源升起的火烟羽流受到风流

的推力而发生弯曲,不再是垂向轴对称,因而应视为横流中的浮羽流.当发生烟流滚退时,风流速度较低,并且受巷道顶板的限制,羽流撞击顶板前的弯曲程度较小,因而可将撞击顶板前的火烟羽流视为近区流动^[3].利用环境流体力学理论,对火烟羽流可建立起以下几个量纲为1的关系式^[3,4].

$$\text{体积流量: } Q = k_1 |B_0|^{1/3} z^{5/3} \quad (1)$$

$$\text{轴线密度差: } \frac{\Delta\rho_m}{\Delta\rho_0} = k_2 \frac{Q_0}{u_a z_B} \left| \frac{z}{z_B} \right|^{-5/3} \quad (2)$$

$$\text{浮羽流半径厚度: } b = k_3 z \quad (3)$$

羽流断面密度差分布:

$$\Delta\rho(z,r) = \Delta\rho_m e^{-r^2/b^2} \quad (4)$$

式中, u_a 为风流速度, m/s; z_B 为特征尺度, $z_B = \frac{|B_0|}{u_a^3}$, m; B_0 为羽流的起始浮力通量, $B_0 = Q_0 \Delta\rho_0 g / \rho_a$, m^4/s^3 ; Q_0 为羽流的起始流量, m^3/s ; $\Delta\rho_0$ 为羽流的起始密度差, $\Delta\rho_0 = \rho_0 - \rho_a$, kg/m^3 ; ρ_0 为羽流的起始密度, kg/m^3 ; ρ_a 为风流密度, kg/m^3 ; $\Delta\rho_m$ 为羽流的轴线密度差, $\Delta\rho_m = \rho_m - \rho_a$, kg/m^3 ; ρ_m 为羽流的轴线密度, kg/m^3 ; z 为羽流轴向坐标,即距火源点的垂直距离, m; r 为羽流径向坐标, m; k_1, k_2, k_3 为实验系数; λ 为略大于1的系数.

2 滚退烟流与巷壁之间的热交换

高温烟流由火源点生成后,会在浮升力的作用下向上运动.在这一过程中由于卷吸作用会与周围气体发生掺混,因而是个传质传热过程.由

于巷道顶板的限制,羽流撞击顶板,压力增加,当热烟流产生的局部火风压高于机械风压时,部分烟羽流在距底板一定高度处发生逆转.随着高温烟流不断向周围环境释放热量,逆转烟流在前进的过程中产生的压力不断下降.当等于小于机械风压时,折转烟流会停滞并再次折转,形成烟流滚退.此时,如果没有外界因素的干扰,在某一时刻滚退烟流会达到一准稳态过程.本文考虑逆转烟流全部发生滚退,忽略边界上的微小烟流滚退,并以巷道上部逆行烟流作为研究对象.

烟流滚退发生时,高温烟流不仅由于对流引起烟流与巷壁之间的热交换,还存在烟流与周围物体和流体间的热辐射现象.由于烟流的热辐射与烟流中介质的温度以及介质的辐射吸收、散射能力有关,而且在巷道中任意一点对空气中其他点都有辐射换热作用,使得计算辐射换热变得复杂和困难.与对流换热相比,辐射换热所占比重小,因此在研究中忽略辐射换热作用,仅考虑烟流(上部)与巷壁的对流热交换过程.

如图1所示,假设烟流滚退发生时:

(1) 巷道围岩具有无限的热容量,在热传导过程中巷壁温度不变,烟流与巷壁的热交换过程是稳态过程,传导的热量不随时间而变化;(2) 火灾前,围岩具有与风温相同的温度 $t_w = t_a$.

由描述流体与巷壁间的对流换热基本定律得^[5]:

$$dq = \alpha(t_f - t_w)dA \tag{5}$$

式中, t_f 为烟流温度, $^{\circ}\text{C}$; q 为交换的热量, kJ/s ; t_w 为壁温,等于着火前的风温 t_a , $^{\circ}\text{C}$; A 为烟流与巷道接触的面积, m^2 ; α 为对流换热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

逆行烟流对巷壁的热交换 dq 引起烟流中温度变化 dt_f ^[6]:

$$dt_f = -\frac{dq}{GC_p} \tag{6}$$

式中, G 为烟流的质量流量, kg/s ; C_p 为烟流的质量定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

将式(5)代入式(6)进行积分,并考虑到在本问题中,取上部烟流与巷道壁接触的平均周长为 \bar{U} , m ,烟流滚退时从火源点到烟流滞止点的距离为 L , m . $L=0$ 时, $t_f = t_{fnc}$,即在C断面处,烟流温度 t_c 等于火源点温度 t_{fnc} .则A可表示为 $\bar{U}L$,故经过推导可得:

$$L = \ln \frac{t_{fnc} - t_a}{t_f - t_a} \cdot \left(\frac{GC_p}{\alpha \bar{U}} \right) \tag{7}$$

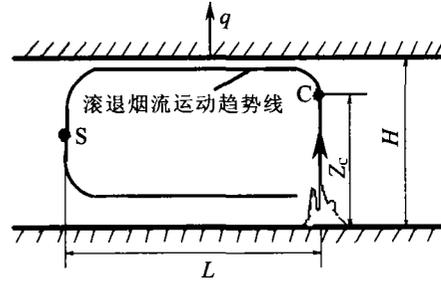


图1 烟流滚退示意图
Fig.1 Sketch of a reverse smoke flow

3 烟流滚退逆行距离

考虑在烟流与风流的冲击区(如图2所示),由于风流与烟流的对持,在烟流冲击区的前端必定存在一个烟流与风流的滞止点S.该点处的压力既可由流线风流侧紧邻点S的一点A的有关参数求得,也可由烟流侧紧邻点S的一点B的有关参数求得:

$$p_{s1} = p_A + \frac{\rho_A v_A^2}{2} \text{ 或 } p_{s2} = p_B + \frac{\rho_B v_B^2}{2}$$

式中, p_{s1} 为风流侧参数求得的S点的压力,Pa; p_{s2} 为烟流侧参数求得的S点的压力,Pa.

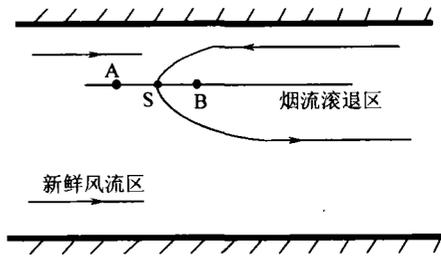


图2 烟流滚退区示意图
Fig.2 Sketch of the smoke rollback area

若取A,B点距S点很近,忽略其中的摩擦阻力,则在临界状态有 $p_{s1} = p_{s2}$,即S点处于力的平衡状态.忽略A,B两点的静压差异,则有

$$\rho_B = \rho_A (v_A / v_B)^2 \tag{8}$$

式中, v_A 为巷道顶板附近的风速,设 $v_A = k_4 u_a$ (u_a 为风速, k_4 为系数,以下还会用到类似的系数问题,意义相同,不再赘述).

设图1中烟流撞击顶板后折转点C距底板高为 z_c ,并设 $z_c = k_5 H$, H 为巷道高.火灾过程中,由于烟流温度和压力都不太高(温度一般不超过 900°C ,静压力略高于 10^5 Pa),因此烟流和风流都可视为理想气体.

如图3所示,可将巷道中的火烟羽流再分成两个区域,即基本未受顶板影响的羽流区 I 和受到顶板影响的撞击区 II. 在撞击区中,由于流动受到顶板的限制,压强增高,使流线发生转折. 流线的转折点 D 可作为羽流区与撞击区的分界点.

图3中 C 点(也即图1中的 C 点)与 D 点距底板的距离相差不大,可以认为近似相等(即 $z_D = z_C$),只是 D 点较 C 点沿水平方向向下风侧移动 x_D 的距离. 因此设 C 断面逆转的羽流总的体积流量就是 D 断面逆转的体积流量,即 $Q_C = Q_D$. 并设 C 断面的烟流密度与 D 断面所在羽流断面的平均密度相等. 假设烟流到达 C 断面后,发生逆转烟流量为 $k_C Q_C$ (k_C 系数, $0 \leq k_C \leq 0.5$),且质量流量不再发生变化,即不再与周围气体发生掺混作用. 由式(1)可得 C 断面处逆行的体积流量

$$Q'_C = k_C k_1 k_5 |B_0|^{1/3} H^{5/3} \quad (1')$$

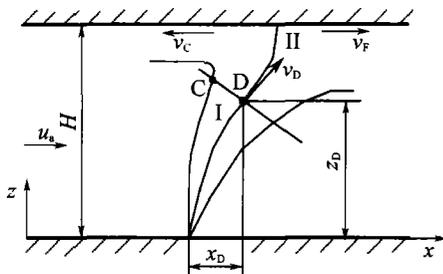


图3 水平巷道火烟羽流
Fig.3 Smoke plume in a horizontal airway

应用式(2)及 z_B, B_0 的定义式,可推导出 D 断面所在断面轴线处的烟流密度差

$$\Delta \rho_{mD} = k_2 \frac{Q_0 \Delta \rho_0}{u_a z_B^{1/3} z_C^{-5/3}} = -k_2 k_5 B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3} \rho_a \quad (2')$$

由式(3), D 断面处的浮羽流半径厚度为

$$b_D = k_3 k_5 H \quad (3')$$

实际上由于受到水平风速的影响, D 断面的羽流已经不完全是圆形断面,但考虑到巷道的有限性,仍将羽流断面视为圆形. 而实际的羽流半径厚度要略高于式(3')的值,但仍可按式(3')计算. 将式(3')代入(4)式可得 D 断面羽流断面密度差分布:

$$\Delta \rho(D, r) = \Delta \rho_{mD} e^{-\frac{r}{k_4 k_5 H}} \quad (4')$$

则根据式(3')式(4')及 $\Delta \rho_{mD}$ 可得 D 断面羽流平均密度差为

$$\begin{aligned} \Delta \rho_D &= \frac{1}{k_3 k_4 H} \int_0^{k_4 k_5 H} \Delta \rho_{mD} e^{-\frac{r}{k_4 k_5 H}} dr \\ &= -k_2 k_5 \lambda B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3} \rho_a \int_0^1 e^{-t} dt \end{aligned}$$

因为 $k_2, k_5, \lambda, \int_0^1 e^{-t} dt$ 均为常数,故可以合并为

常数 k (以下遇到类似的问题以同样方法处理),则上式写为

$$\Delta \rho_D = -k B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3} \rho_a$$

则 C 断面逆转烟流平均密度为

$$\rho_C = \rho_a + \Delta \rho_D = \rho_a |1 - k B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3}|$$

由此可得逆行烟流的质量流量为

$$G = Q'_C \rho_C = k_C k_1 k_5 |B_0|^{1/3} H^{5/3} \rho_a |1 - k B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3}| \quad (9)$$

烟流到达 S 点再次发生转向前的速度(沿巷道纵向,即水平方向速度)可由 B 点断面处速度代替,即 $v_B = k_6 Q_B / A_B$. 式中 A_B 为 B 断面巷道断面面积,可设 $A_B = k_7 A$ (A 为巷道断面面积). 将式(1)代入,注意到 $Q_B = G / \rho_B$ (因为本研究关心的是断面上的平均温度,因此近似认为 B 断面的平均密度与 B 点密度相同),有

$$v_B = k_C k_1 k_5 k_6 k_7^{-1} |B_0|^{1/3} H^{5/3} \rho_a A^{-1} |1 - k B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3}| \rho_B^{-1} \quad (10)$$

联立式(8)和式(10)并取 $\rho_a = \rho_a$, 可得

$$\rho_B = k^2 B_0^{2/3} H^{10/3} A^{-2} u_a^{-2} |1 - k B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3}| \rho_a \quad (11)$$

真实气体温度越低(或密度越大),真实气体与理想气体差别越大,高温(低密度)烟流均可视为理想气体. 因此,烟流和风流都满足理想气体状态方程式,由此给出风流密度和烟流密度的关系为

$$\frac{\rho_a}{\rho_t} = \frac{R_t T_t \rho_a}{R_a T_a \rho_t}$$

而火灾期间因火场附近为非封闭区域,高温使气体膨胀,密度降低,故该区域的静压变化很小,近似取 $p_t = p_a$. 燃烧生成气体假定以 N_2 (气体常数 $R = 0.29680 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), CO ($R = 0.29683 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) 和 CO_2 ($R = 0.18892 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) 为主,火灾烟流与风流的气体常数 ($R = 0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) 比较接近,计算时近似取 $R_t = R_a$, 则上式变为

$$\rho_a / \rho_t = T_t / T_a \quad (12)$$

联立式(11)和式(12),可得 B 点烟流温度(注: T 为热力学温度, K ; t 为摄氏温度, $^{\circ}C$).

$$T_B = T_a \frac{\rho_a}{\rho_B} = k'^2 B_0^{2/3} H^{-10/3} A^2 u_a^2 |1 - k B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3}|^{-2} T_a \quad (13)$$

对 S 点所在断面烟流温度可取 $T_s = T_B$. 设逆行烟流与巷壁接触的平均巷道周长 $\bar{U} = k_8 U$ (U 为巷道断面周长),且注意到热力学温度 T 之差与摄氏温度 t 之差相等,则由式(7)有

$$L = \left(\ln \frac{T_{inc} - T_a}{M T_a} \right) k'' \alpha^{-1} |B_0|^{1/3} H^{5/3} U^{-1} C_p \rho_a |1 - k B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3}| \quad (14)$$

式中, $M = k'^2 B_0^{2/3} H^{-10/3} A^2 u_a^2 |1 - k B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3}|^{-2} - 1$, k, k', k'' 为待定系数,均为正值,通过式(14)可引出两个量纲为 1 的量:

量纲为 1 的量 I: $B_0 = B_0^{2/3} g^{-1} H^{-5/3}$

量纲为 1 的量 II: $B_0 |B_0|^{-1/3} H^{-5/3} A u_0$

通过引入 B_0, B_0 两个量纲为 1 的量, 烟流滚退时烟流逆行距离表达式可写为如下形式, 即

$$L = |1 - kB_0| k'' \alpha^{-1} C_p H^{5/3} \rho_a U^{-1} |B_0|^{1/3} \times \left[\frac{T_{\text{fire}} - T_a}{T_a (k'^{-2} B_0^2 |1 - kB_0|^{-2} - 1)} \right]$$

烟流滚退现象发生过程中涉及多因素的影响, 其逆行距离也与包括火源、风流状态及巷道特征、壁面条件等等多种因素有关。观察式(14), 可以反映出上述特点。一般情况下, 对某一确定矿井来说, 对流换热系数、新鲜风流密度烟流的质量定压热容等参数可认为常数, 因此对逆行距离影响最大的因素主要有巷道高度、巷道周长及火源特征三个方面。而逆行距离与风速变化的关系较为复杂。

以式(14)作为理论基础, 可通过巷道模拟实验确定三个待定系数 k, k', k'' , 进而为实际应用时提供参考系数。对于某一确定的烟流滚退现象, 其火源温度、羽流起始流量可以估算(根据燃料类型及燃料规模), 而新鲜风流密度、温度可以通过测定获得, 巷道断面参数已知, 因此通过式(14)即可以计算出滚退烟流逆行距离。

4 结论

对水平巷道火灾烟流滚退时烟流与巷道壁间的热交换理论进行分析, 从而得出烟流逆行距离的表达式。运用烟流模型及理想气体状态方程等基本理论对表达式进行了求解。结果表明, 滚退发生时逆退距离不仅与火源的基本参数有关, 而且与风速、风温、风流密度、巷道断面(周长、面积)及巷道高度有密不可分的联系。

参 考 文 献

- 1 Flecher D F, Kent J H, Apte V B, et al. Numerical simulations of smoke movement from a pool fire in a ventilated tunnel [J]. Fire Saf J, 1994, 23(3): 305
- 2 Lee C K, Chaiken R F, Singer J M. Interaction between duct fires and ventilation flow — An experimental study [J]. Combust Sci Technol, 1979, 20: 59
- 3 余常昭. 环境流体力学导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992
- 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
- 5 黄方谷, 韩凤华. 工程热力学与传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1992
- 6 周心权, 吴兵. 矿井火灾救灾理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996

Rollback Law of Reverse Smoke Flow in a Horizontal Airway during Mine Fire

ZHOU Xinquan, WANG Haiyan, ZHAO Hongze

China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

ABSTRACT Rollback smoke is one kind of familiar turbulent flow during mine fire and may cause serious damage and injury. The rollback law of reversal smoke flow is significant to mine fire rescue. The theories of environmental fluid mechanics and heat transfer are applied to study on the rollback law of the reversal smoke flow in a horizontal airway during mine fire. The heat transfer process between the reversal smoke and the airway wall is analyzed. Through the analysis above, the rollback distance equation of the reversal smoke is formed. The mass flux of the reversal smoke flow at the reverse point above the fire source and under the roof and the temperature at the point before smoke reverse again are the key points of working out the equation. At the stagnation before smoke reverse again, namely at the stagnant point of the reversal smoke, the pressure between smoke flow and airflow is equal and thus a pressure equilibrium equation is built up. Combined with the smoke plume model and gas state equation, the mass flux of the reversal smoke and the temperature at the stagnant point are worked out. At a result, the function of rollback distance of the reversal smoke is deduced and simplified in order to be used in practice.

KEY WORDS mine fire; reverse smoke; back distance