

李宗翔,王雅迪,高光超,等.巷道火灾火焰局部阻力模型构建及参数识别[J].煤炭学报,2015,40(4):909-914. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0573

Li Zongxiang, Wang Yadi, Gao Guangchao, et al. Development of local resistance model of roadway fire flames and parameter identification [J]. Journal of China Coal Society 2015, 40(4): 909-914. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0573

## 巷道火灾火焰局部阻力模型构建及参数识别

李宗翔<sup>1,2</sup>, 王雅迪<sup>1,2</sup>, 高光超<sup>1,2</sup>, 鲁忠良<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 阜新 123000; 3. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

**摘 要:**针对巷道火灾绕火源火焰的局部阻力计算及阻力系数的确定问题,建立按火焰断面积来计算的模型,其中的火焰局部阻力系数是火焰截断面积的函数,指出火焰面积是在特定巷道火灾条件下火源燃烧强度与风流速度相互作用的结果,确定阻力系数值必须考虑到巷道风流对火焰的压制作用。分析火焰局部阻力与风流速度、火源燃烧强度的关系,即随着火源燃烧强度的增大,火焰面积和局部阻力增大,风速降低,出现所谓的节流现象。当风速等于富氧燃烧临界风速时,火源燃烧充分,火焰面积和火焰局部阻力最大;当风速小于该临界风速时,火源燃烧减弱,火焰面积和局部阻力变小;当风速过大时,风流压缩火焰,火焰截断面积和火焰局部阻力减小,火焰局部阻力在风速中低时为最大。上述变化规律与点火源和线火源两组经典的实验结果相吻合;依据实验数据拟合确定出模型的参数,依火源强度不同,最大火焰面积系数取值一般在0.285~0.410。

**关键词:**灾变通风;矿井火灾;火焰节流;局部阻力;参数识别

中图分类号:TD752.2

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2015)04-0909-06

## Development of local resistance model of roadway fire flames and parameter identification

LI Zong-xiang<sup>1,2</sup>, WANG Ya-di<sup>1,2</sup>, GAO Guang-chao<sup>1,2</sup>, LU Zhong-liang<sup>3</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Fuxin 123000, China; 3. School of Safety Science and Engineering Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** In order to solve the problems associated with the local resistance calculation of roadway fire flames around fire source and resistance coefficient determination, a model based on flame cross-section area calculation was developed, where the flames local resistance coefficient is a function of flame truncated area. The study points out that the fire area is the result of roadway fire combustion intensity under certain conditions and merry speed interaction, and determines that the resistance coefficient values must take into account the deterrent effects of roadway romantic flame. The analysis on the relationship of local resistance with airflow velocity flame and fire burning intensity shows that with the increases of flame intensity, the flame area and local resistance increase, the wind velocity decreases and the phenomenon of so-called throttling occurs. When the wind speed is equal to the critical velocity of oxygen-enriched combustion, the fire source fully combusted, the flame area and flame local resistance reach maximum values. When the wind speed is less than the critical velocity, the source of fire burning is weakened, the flame area and local resistance become smaller. When the wind speed is too large, the wind flow velocity compresses flame, fire truncated area and

收稿日期:2014-05-02 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174109, 51074086)

作者简介:李宗翔(1962—),男,黑龙江绥化人,教授,博士生导师。E-mail:lx6211@126.com

flames local resistance decrease. The above variations are obtained with two classic experimental results of ignition sources and line sources match. The parameters of the model can be determined based on the experimental data. According to the different strength of the fire source, the coefficient values of the largest flame area are generally between 0.285 to 0.410.

**Key words:** cataclysm ventilation; mine fire; fire throttle; local resistance; parameter identification

巷道燃烧区产生的热阻力及其计算是矿井火灾研究中的焦点问题之一,也是当前矿井火灾仿真领域中重要的基础工作<sup>[1-4]</sup>。文献[5]根据热流体学理论,运用能量-动量方程对燃烧区内风流受热膨胀产生的热阻力进行了理论分析和实验研究<sup>[5]</sup>;文献[6-7]分析了火焰通过刚体障碍时阻力与风速关系,文献[8-10]研究了巷道火灾火源燃烧产生的节流局部阻力及其计算问题;笔者在文献[11]中将巷道火灾热阻力做了明确区分,即巷道火区热阻力包括热流摩擦阻力、热局部阻力和火燃烟气的外来风源附加阻力<sup>[11]</sup>。在巷道火灾热局部阻力中,较复杂的计算是风流绕火源火焰障碍的局部阻力(以下简称火焰局部阻力)。文献[8]给出了火焰局部阻力的概念表达式,其中火焰局部阻力系数如何确定,目前尚须要做进一步深入研究。这里提出按障碍阻力公式来计算火焰局部阻力,同时利用已有的经典火灾实验数据(即具备实验条件典型性和记录数据完备性),提出确定火焰局部阻力系数的新方法。

## 1 火焰局部阻力模型与阻力系数 $\xi$ 值特征 (推导)

如图1所示,在巷道火灾发生时,流动风流在绕过火源火焰后,火焰作为一种柔性的障碍物阻碍了风流的流动,从而产生了附加的热绕流局部阻力损失。绕火源局部阻力的节流问题是巷道火灾节流的普遍形式。

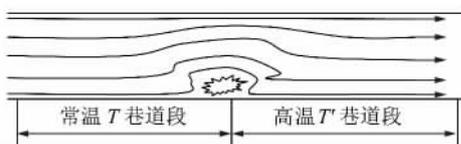


图1 巷道火灾火焰局部阻力

Fig. 1 Local resistance of the tunnel fire flames

巷道风流绕火源火焰局部阻力  $h'_{e,r}$  的计算公式为

$$h'_{e,r} = \frac{1}{2} \xi \rho' v^2 \quad (1)$$

式中  $\xi$  为绕火源的火焰局部阻力系数,无因次; $\rho'$  为通过火区的(出口)风流密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v'$  为出口风速,  $\text{m}/\text{s}$ 。

式(1)是火焰局部阻力的一个概念表达式,以下

就最关键的火焰局部阻力系数  $\xi$  展开分析。

首先假设,对风流而言,障碍物无论是刚体还是流体本身其障碍阻力的计算没有太大区别,那么,将图1巷道风流流动绕过火源火焰后产生的局部阻碍作用,简化成风流绕过障碍物的局部阻力。参照巷道中风流遇障碍物收缩(或风窗)局部阻力经验公式,得到单纯的火焰局部阻力,即

$$h'_{e,r} = \frac{1}{2} \rho' v^2 \left( \frac{1.7S_y}{S - S_y} \right)^2 \quad (S_y < S) \quad (2)$$

式中  $S$  为巷道断面面积,  $\text{m}^2$ ;  $S_y$  为火焰截断面积,  $\text{m}^2$ 。

把式(2)用常温风流速度  $v$  和密度  $\rho$  来表达,再考虑风流温度的变化,则式(2)可整理成

$$h'_{e,r} = \frac{1}{2} \rho v^2 \left( \frac{1.7S_y}{S - S_y} \right)^2 \frac{T'}{T} \quad (S_y < S) \quad (3)$$

式中  $T$ 、 $T'$  分别为风流的常温温度、火灾(火源下游)风流的绝对温度,  $\text{K}$ 。

对照式(2)和式(1),再引入火焰断面系数的概念,即令  $S_y = kS$ , 其中  $k$  为火焰截断面积  $S_y$  与巷道断面面积  $S$  之比,则无因次的巷道火焰局部阻力系数为

$$\xi = \left( \frac{1.7k}{1-k} \right)^2 \quad (k \leq k_1 < 1) \quad (4)$$

式中  $k$  为火焰断面系数,无因次; $k_1$  为火焰断面系数  $k$  的最大值,对应火焰截断面积  $S_y$  的最大值。

$$h'_{e,r} = \frac{1}{2S^2} \xi \rho Q^2 \quad (\xi < \xi_1) \quad (5)$$

式中  $\xi_1$  为火焰局部阻力系数最大值  $\xi_1 = \left( \frac{1.7k_1}{1-k_1} \right)^2$ ;  $Q$  为风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

由式(4)可知,显然  $\xi$  与火焰断面面积  $S_y$  有直接关系,而且在火灾燃烧过程中  $\xi$  是个变值。式(5)中的火焰局部阻力系数  $\xi$  包含了火焰断面面积因素。

## 2 巷道风速对火源燃烧强度和火焰断面面积的影响

### 2.1 风速对火源燃烧强度的影响

从供氧的角度燃烧与风量有直接关系,在特定的巷道断面情况下,巷道火灾火源燃烧中风速与供氧量是一致的,火灾巷道火区及其下游附近的整体平均温度与火源燃烧强度也是一致的。那么,必然存在一个

火源燃烧充足供氧的风速,即当超过该风速时,火源燃烧所需氧充足,燃烧属于富氧燃烧,对应燃烧最强烈,如图 2 所示  $v_E$  为富氧燃烧供氧风速值;反之低于燃烧饱和供氧的风速时,风流供氧能力则相对不足,火源燃烧属于富燃料燃烧,风速越低、燃烧火势相对越弱。

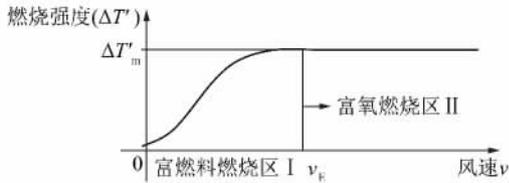


图 2 巷道火源燃烧强度与风速的关系

Fig. 2 Relationship between tunnel fire combustion intensity and wind velocity

巷道火区段整体温度与火源中心温度不是同一概念,一般远低于火源中心温度,图 2 中假设燃烧能量释放可用巷道火区段整体平均温度增量表达,也就是对应着燃烧的程度。

### 2.2 火焰断面系数与风速的关系

尽管在火灾燃烧时火源点产生的火焰是跳跃的,但在平均意义上火焰截面积变化存在一定的规律性。火焰断面是在一定火源条件下火势强度与风流速度相互作用的结果,在一定巷道条件和燃烧强度下,当巷道风速较低,如  $v < v_E$  时,过小的风速不能够压住火焰,火焰断面随着火源燃烧的强度增大而增大,当风速在  $v_E$  的附近时,火焰断面达到最大;当风速为 0 时,火区燃烧不断耗氧使氧体积分数减小,火焰必将趋于熄灭。但只要风速,火区就能得到供氧,维持燃烧,不妨设函数变化为凸曲线,这里用指数函数表达。当风速  $v > v_E$  时,且当风速  $v$  很大时,过大的风速也能压住火源的火焰,使火焰断面减小。这里按照以上规律来构建火焰断面系数随风速变化的函数关系,如图 3 所示。

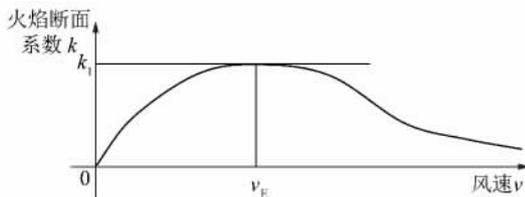


图 3 巷道火区火焰断面系数与风速的关系

Fig. 3 Relationship between truncated area of the tunnel fire district fire and wind velocity

用分段函数表达,有

$$k = \begin{cases} k_1 v_E^{-a} v^a & v \leq v_E \\ k_0 + (k_1 - k_0) e^{-b(v-v_E)^m} & v > v_E \end{cases} \quad (6)$$

式中  $k_0$  为最小火焰(火堆)面系数,当着火点熄灭时取 0 值,一般取 0.05(代表可燃物堆积断面); $a$  为第 1 段函数的识别参数; $b, m$  分别称为第 2 段函数的后变化指数和幂指数,文中作为识别参数使用。

以上所构建的火焰断面规律还必须用实验数据加以验证,函数中的参数须由实验数据拟合获得。在火源燃烧的(火势上升)成长阶段,(假设)最大的火焰截面积对应火源燃烧达到高峰点,也对应着火火焰局部阻力最大值,(假设)也对应着富氧燃烧临界风速  $v_E$ 。那么,富氧燃烧临界风速  $v_E$  值也可通过实验获得,同样根据最高阻力点还能估算出最大火焰截面积系数  $k_1$  值。

### 3 火区阻力构成、火焰局部阻力及阻力系数变化规律分析

若忽略燃烧产生烟气流附加阻力的影响<sup>[11]</sup>,那么火灾巷道的火区阻力(即通风总阻力)  $h'_t$  为热摩擦阻力与局部阻力之和,即

$$h'_t = h'_{f_r} + h'_{e_r} \quad (7)$$

式中  $h'_{f_r}$  为火区风流的摩擦阻力, Pa。

按如图 1 所示的巷道火灾模型,火源前段(上游)风流为常温状态,火源后段(下游)风流为高温状态,得到火灾巷道的通风摩擦阻力<sup>[11]</sup>,即

$$h'_{f_r} = \frac{1}{2} R_t \rho Q^2 \left( 1 + \frac{T'}{T} \right) \quad (8)$$

式中  $R_t$  为巷道几何风阻<sup>[11]</sup>,  $m^4$ 。

按前述分析,构成火区阻力各阻力成分(火焰局部阻力系数)及其随风速的变化规律如图 4 所示。

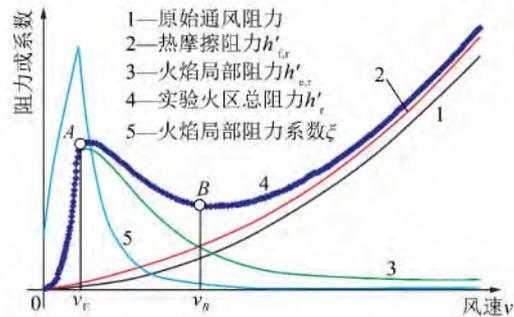


图 4 巷道火灾实验火区阻力的构成及其与风速的关系

Fig. 4 Tunnel fire zone resistance constitutes and its relationship with the wind velocity

从图 4 可以看出,火区各阻力变化基本特征:①通风热摩擦阻力随着风速增加而增大;②当  $v < v_E$  时,摩擦阻力很小,火焰局部阻力占优,当风速过低或趋向于 0 时,两阻力均降低或趋向于 0;③当  $v = v_E$ ,火源燃烧达到最强时,火焰最大,火焰局部阻力达到

最大值;④当  $v > v_E$  时,存在风流压制火焰,火焰局部阻力呈衰减降低;⑤当  $v < v_B$  时,火焰局部阻力占优;⑥当  $v > v_B$  时,摩擦阻力占优,火区总阻力增大。

## 4 火焰局部阻力实验验证与参数识别

### 4.1 经典实验结果的选取

巷道火灾实验中测得的火区阻力是  $h'_r$ ,其中摩擦阻力  $h'_{f,r}$  可通过观测火源下游巷道风流温度由式(8)计算,因此,分离出火焰局部阻力  $h'_{e,r}$  还需通过实验数据来提供支撑,实验数据资料来自中国矿业大学进行的一次典型巷道火灾实验成果<sup>[8]</sup>,如图5所示。

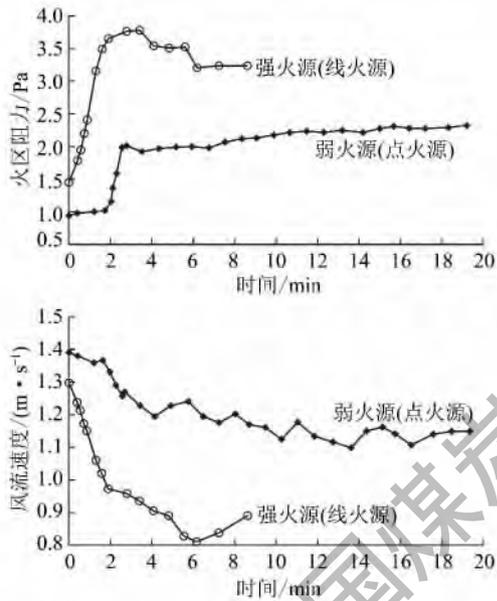


图5 一次典型巷道火灾实验的观测记录结果

Fig. 5 Observation records results of a typical tunnel fire experiment

该实验是按点火源和线火源两组实验进行的<sup>[8]</sup>,实验巷道长度9 m,断面0.3 m×0.3 m,其中点火源实验火源长度0.1 m,线火源实验火源长度4 m。实验实时观测记录结果如图5所示。图5中的数据是实验中火源在成长阶段连续观测记录的,其中点火源燃烧规模小,火区巷道段升温过程慢(弱火源),线火源燃烧规模大,升温过程快(强火源),3.2 min达到最高温。该实验中的每个数据点都构成了风速与火区阻力的观测样本。通过数据整理,进一步得到火区阻力与风流速度的关系,如图6所示。

从强火源和弱火源两组实验中可以看出火源火焰的节流现象具有同一变化规律。图6表明,在火源燃烧成长阶段,随着火源火势逐渐增大,火焰面积逐渐增大,随之火焰局部阻力增大、风速降低;当火源燃烧强度达最大时,风速降低到  $v_E$  点。一旦旺盛点燃烧(如出现顶板逆流层)使风速继续降低小于  $v_E$  时,

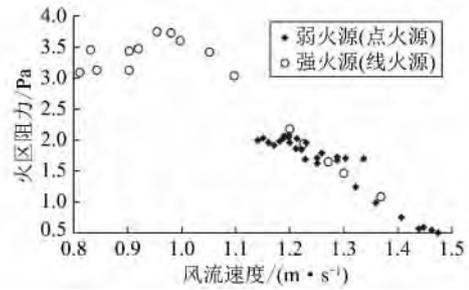


图6 巷道火灾燃烧实验火区阻力与风速的关系

Fig. 6 Relationship between fire resistance of the tunnel fire burning experiments and wind velocity

因供氧减弱又使火势减弱,(瞬间的)火焰面积减小,随之火区火焰局部阻力略有减小、风速回增。风速的增大又使火势增大。如此反复,形成火源稳定燃烧阶段,风速与阻力呈现波动现象,如图5所示。图5中弱火源实验共记录了反复5次波动的结果,强火源实验只记录了1次波动结果。

### 4.2 拟合参数识别

火源燃烧阶段的这种波动变化显然与燃烧供氧风速的波动有关。图6实验观测点具有很强的规律性,变化线形对应着图4中的AB段火区阻力曲线<sup>[8]</sup>。为了具体拟合出这种对应关系,采用参数识别方法,确定模型参数  $\{k_1, b, m\}$ ,取阻力误差平均值目标函数,有

$$E = \sum_{i=1}^n |h'_{r,i} - h''_{r,i}| \rightarrow \min$$

式中  $E$  为目标函数值; $h''_{r,i}$  为实验实测的各火区阻力值; $n$  为实验记录数据样本个数。

由于识别参数个数少,计算量小,具体最优方法利用穷举法,基于 MATLAB 可视化平台拟合确定阻力计算模型中的特征参数。首先分别判读出两组实验数据中最大阻力点的临界风速,其中线火源实验取前10个数据作为参数识别,幂指数  $m = 1.45$ ,见表1。取一段函数指数前因子  $a = 0.15$ 。通过有限次的调整试算确定出待定参数,如图7所示,数据结果见表1。经对阻力值的误差评估,与火区阻力最大值的相对误差均低于5%,参数识别结果可以接受,最优参数点如图8所示。

从表1结果可看出,显然,实验中线火源(强火源)最大火焰面积比点火源(弱火源)最大火焰面积明显要大,线火源的“后变化指数”比点火源明显要小,表现出火源燃烧强度越大火焰面积也越大的基本特征。这也说明所建立的理论模型与实际情况并不矛盾。

表 1 实验关键参数及参数识别结果

Table 1 Key parameters of the experiment and parameter identification results

实验规模	火区阻力最大值/Pa	临界风速 $v_E / (m \cdot s^{-1})$	幂指数 $m$	最大火焰断面系数 $k_1$	后变化指数 $b$	目标平均误差 $E$	相对误差/%
点火源(弱火源)	2.083 34	1.17	2.00	0.285 4	9.187 5	0.100 978	4.8
线火源(强火源)	3.748 77	0.97	1.45	0.409 2	2.307 0	0.026 082	0.7

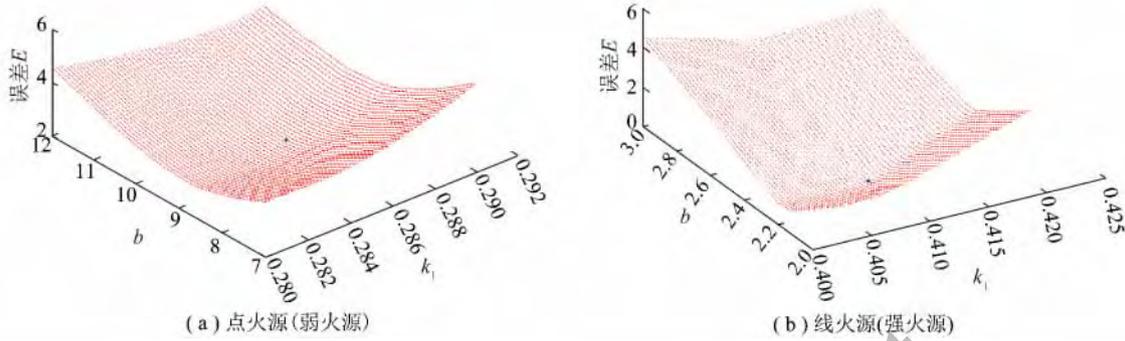


图 7 巷道火灾燃烧实验参数识别与最优解

Fig. 7 Parameter identification and optimal solution of the tunnel fire experiment

(图中标注的点表示最优极值点所在的位置)

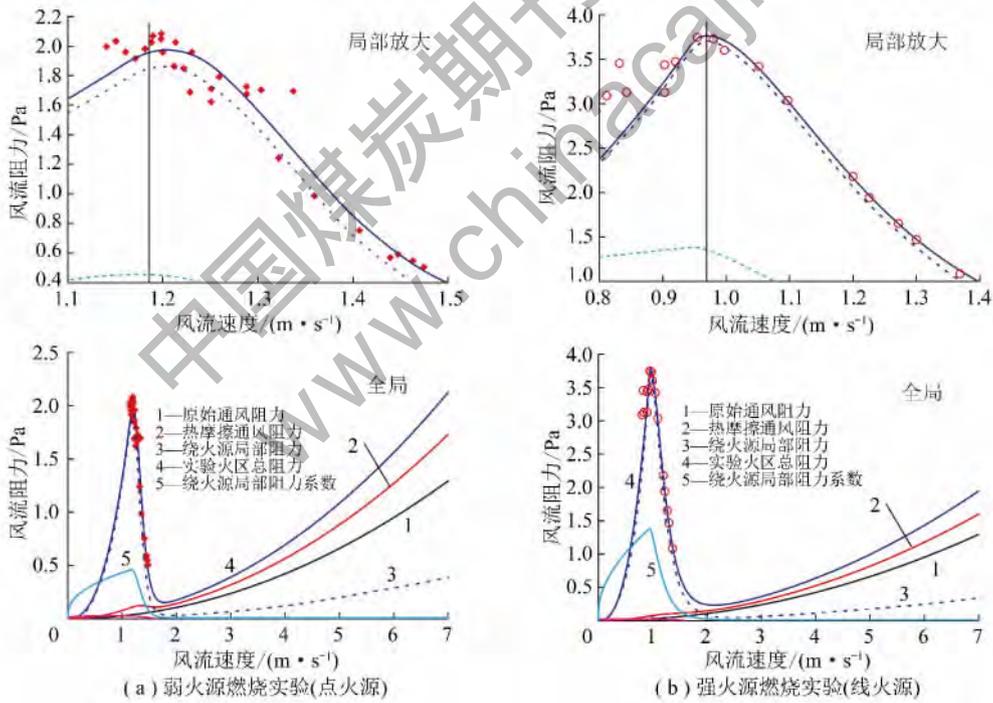


图 8 巷道火灾燃烧实验火区阻力与风速的关系、拟合结果

Fig. 8 Relationship and fitting results between fire resistance of the tunnel fire burning experiments and wind velocity

### 5 结 论

(1) 从典型火灾实验中找到风速与火区阻力的关系 将阻力分解出风速与火焰局部阻力的关联。研究揭示了巷道火灾绕火焰局部障碍阻力(火焰面积)与风流速度、火源燃烧强度的关系,构建的计算模型符合一般逻辑关系,即随着火燃强度增大,火焰面积

和局部阻力增大,风速降低,出现所谓的节流现象。当风速等于富氧燃烧临界风速时,火源燃烧充分,火焰面积和火焰局部阻力最大;当风速小于该临界风速时,火源燃烧减弱,火焰面积和局部阻力变小;当风速过大时,风流压缩火焰,火焰截断面积和火焰局部阻力减小。并为实验数据所证实。

(2) 揭示了火焰局部阻力系数的一般性规律和

特性。火焰局部阻力系数不是定值,而是随火焰面积而变化的函数,一定火源条件下的火焰截断面积是火源特性、火势强度和风流速度相互作用,即风流对火焰的压制作用的结果。火焰局部阻力一般只在巷道低、中风速条件下才能达到最大。

(3) 火源燃烧本身是带有随机性的,但强火源和弱火源两组实验中出现的节流现象却具有同一变化规律,这并非偶然,即偶然中存在必然因素。从实验数据中提取的是火灾燃烧随机性的一般规律;与实验结果相吻合。研究为火灾时期矿井通风系统仿真中风流绕火源火焰局部阻力计算提供了实用算法。

#### 参考文献:

- [1] 焦宇,周心权,康与涛. 矿井平巷木材火灾烟流滚退理论分析与实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2105-2110.  
Jiao Yu, Zhou Xinquan, Kang Yutao. Theoretical analysis and experimental study on back flow smoke of mine laneway wood fire [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2105-2110.
- [2] 张圣柱,程卫民,张如明,等. 矿井胶带巷火灾风流稳定性模拟与控制技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 812-817.  
Zhang Shengzhu, Cheng Weimin, Zhang Ruming, et al. Stability simulation and control technology of airflow during fire in mine belt roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 812-817.
- [3] 李翠平,曹志国,李仲学,等. 地下矿火灾烟流蔓延的三维仿真构模技术[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 257-263.  
Li Cuiping, Cao Zhiguo, Li Zhongxue, et al. 3D simulation modeling techniques of fire fume spread process for underground mines [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2): 257-263.
- [4] 李宗翔,王雅迪,李林. 上行风流火灾 3D 矿井通风系统灾变过程仿真研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 115-121.  
Li Zongxiang, Wang Yadi, Li Lin. Dynamic imitation study on fire effect in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 115-121.
- [5] 李传统,王省身. 矿井火灾燃烧区热阻力的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(4): 6-11.  
Li Chuantong, Wang Xingshen. Study on thermal drag in the combustion zone of mine fire [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1996, 25(4): 6-11.
- [6] Carvel R O, Beard A N, Jowitt P W, et al. Fire size and fire spread in tunnels with longitudinal ventilation system [J]. J. Fire Sciences, 2005, 23(3): 485-518.
- [7] Serkan Kayili, Ahmet Yozgatligil, Cahit Eralp O. An experimental study on the effects of blockage ratio and ventilation velocity on the heat release rate of tunnel fires [J]. J. Fire Sciences, 2011, 29(6): 555-575.
- [8] 王德明,周福宝,周延. 矿井火灾中的火区阻力及节流作用[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(4): 328-331.  
Wang Deming, Zhou Fubao, Zhou Yan. Fire resistance and its effect on fire-throttling during mine fire [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(4): 328-331.
- [9] 王树刚,王如竹. 矿井火灾引起节流和浮力效应的理论研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 229-232.  
Wang Shugang, Wang Ruzhu. Theoretical research on throttling and buoyancy effects induced by mine fire [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(3): 229-232.
- [10] 傅培舫,周怀春,俞启香. 火灾节流过程参数变化时序及其影响因素的研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(7): 108-112.  
Fu Peifang, Zhou Huaichun, Yu Qixiang. Study on parameter variation time-sequence in fire-throttling process and its influence factors [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(7): 108-112.
- [11] 李宗翔,王双勇,贾进章. 矿井火灾巷道通风热阻力计算与实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2158-2162.  
Li Zongxiang, Wang Shuangyong, Jia Jinzhang. Study of computation and experiment of ventilation heat resistance in roadway during mine fire [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2158-2162.