

文章编号: 1671-251X(2023)12-0130-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023040024

## 深井“T”型巷道火灾的安全区域划分

周亚博<sup>1</sup>, 吴斌杰<sup>1</sup>, 柏杨<sup>1</sup>, 姚奇<sup>2</sup>, 张永亮<sup>2</sup>, 牟宏伟<sup>2</sup>

(1. 锡林郭勒盟山金阿尔哈达矿业有限公司, 内蒙古 锡林郭勒 026000;  
2. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 矿井火灾中高温烟气的流动扩散是造成安全事故的重要原因, 针对矿井典型巷道中火灾危险区域与时间关系不明确的问题, 提出了一种深井“T”型巷道火灾的安全区域划分方法。采用 Pyrosim 软件建立三维数值模型, 模拟了在高温高湿情况下“T”型巷道火灾发展阶段巷道内的高温烟气流动, 揭示了火灾发展阶段“T”型巷道下温度场和有害气体浓度场随时间和空间位置的变化规律; 根据人体口鼻高度(即巷道 1.6 m 高度位置)的模拟数据, 得出巷道的水平长度与温度、CO 浓度、CO<sub>2</sub> 浓度的关系: 风流通过巷道混合高温烟雾沿巷道顶部向下风侧蔓延, 随着与火源距离增加, 温度逐渐降低, CO、CO<sub>2</sub> 浓度等值线纵向分布逐渐密集。在此基础上, 根据烟气温度和 CO、CO<sub>2</sub> 气体对人体的危害程度进行安全区域划分, 将烟气扩散区域划分为安全区域(危险等级 1)、轻度危险区域(危险等级 2)、中度危险区域(危险等级 3)、重度危险区域(危险等级 4)4 类, 分析结果表明: 温度划分结果中巷道 I 中测点主要集中在重度危险区域, 毒性气体划分结果中巷道 I CO<sub>2</sub> 的安全区域范围较 CO 大, CO 的危险因素更大, 主要集中在轻度、中度危险区域, 在巷道 II 中测点主要集中在轻度危险区域; 在巷道 I 中危险等级 1 的范围随时间的推移逐渐变小, 危险等级 4 的范围随时间的推移逐渐变大, 且均在 40 s 时变化率最大, 危险等级 2、3 变化率很小; 在巷道 II 中 2 种划分方法的区域范围变化相似, 危险等级 2、3 均在 60 s 时变化率最大。

**关键词:** 矿井火灾; 巷道火灾; “T”型巷道; 高温烟气扩散; 巷道安全区域划分

中图分类号: TD752 文献标志码: A

Classification of safety zones for T-shaped roadway fire in deep coal mines

ZHOU Yabo<sup>1</sup>, WU Binjie<sup>1</sup>, BAI Yang<sup>1</sup>, YAO Qi<sup>2</sup>, ZHANG Yongliang<sup>2</sup>, MOU Hongwei<sup>2</sup>

(1. Xilingol Shandong Gold Group A'erhada Minerals Co., Ltd., Xilingol 026000, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** The flow and diffusion of high-temperature smoke in mine fires is an important cause of safety accidents. In response to the unclear relationship between fire hazard zones and time in typical mine roadways, a safety zone classification method for T-shaped roadway fire in deep coal mines is proposed. A three-dimensional numerical model is established using Pyrosim software to simulate the high-temperature smoke flow in the T-shaped roadway during the fire development stage under high temperature and humidity conditions. The variation law of temperature field and CO, CO<sub>2</sub> concentration field with time and spatial location in the T-shaped roadway during the fire development stage are revealed. Based on the simulated data of the height of the human mouth and nose (i.e. the height of 1.6 meters in the roadway), the relationship between the horizontal length of the roadway and temperature, CO concentration and CO<sub>2</sub> concentration is obtained. The airflow mixes high-temperature smoke

收稿日期: 2023-04-09; 修回日期: 2023-12-03; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374209); 山东省自然科学基金项目(ZR2023ME012); 山东省高等学校优秀青年创新团队项目(2019KJH008)。

作者简介: 周亚博(1986—), 男, 河南郑州人, 工程师, 硕士, 主要从事矿山安全开采方面的研究和管理工作, E-mail: zhoub@sd-gold.com。通信作者: 张永亮(1979—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事矿山安全开采方面的研究工作, E-mail: zhyliang@163.com。

引用格式: 周亚博, 吴斌杰, 柏杨, 等. 深井“T”型巷道火灾的安全区域划分[J]. 工矿自动化, 2023, 49(12): 130-138.

ZHOU Yabo, WU Binjie, BAI Yang, et al. Classification of safety zones for T-shaped roadway fire in deep coal mines[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(12): 130-138.



扫码移动阅读

through the roadway and spreads downwards along the top of the roadway. As the distance from the fire source increases, the temperature gradually decreases, and the longitudinal distribution of CO and CO<sub>2</sub> concentration contour lines becomes denser. On this basis, safety zones are classified based on the temperature of the smoke and the harm degree of CO and CO<sub>2</sub> concentration to human health. The smoke diffusion area is divided into four categories: safety zone (hazard level 1), mild hazard zone (hazard level 2), moderate hazard zone (hazard level 3), and severe hazard zone (hazard level 4). The analysis results show that in the temperature classification results, the measurement points in roadway I are mainly concentrated in the severe hazard zone. In the toxic gas classification results, the safety zone range of CO<sub>2</sub> in roadway I is larger than that of CO. The risk factors for CO are greater, mainly concentrated in mild and moderate hazard zones. In roadway II, it is mainly concentrated in mild hazard zones. The range of hazard level 1 in roadway I gradually decreases over time, while the range of hazard level 4 gradually increases over time, with the maximum change rate occurring at 40 seconds. The rates of change for hazard levels 2 and 3 are very small. The regional range changes of the two classification methods in roadway II are similar, with the maximum change rate of hazard levels 2 and 3 occurring at 60 seconds.

**Key words:** mine fire; roadway fire; T-shaped roadway; high temperature smoke diffusion; classification of safety zones in roadways

## 0 引言

矿井火灾严重威胁着地下工人和工业财产的安全<sup>[1-3]</sup>,一旦井下发生火灾,巷道将形成高温烟气环境,其中含有有毒窒息气体(如CO、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、HCl、Cl<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>等)和有害烟雾颗粒<sup>[4]</sup>,严重威胁井下人员的生命安全<sup>[5]</sup>。由于无法科学合理地界定危险区域,当矿井发生火灾时,井下人员的疏散和紧急救援行动的实施非常困难<sup>[6-7]</sup>。烟气的流动扩散情况是划分火灾危险区的重要依据,探索火灾烟流规律是矿井火灾应急救援的关键技术工作。

许多专家学者从多种角度对巷道火灾的烟气流动进行了研究。薛彦平<sup>[8]</sup>应用Pyrosim软件,模拟了巷道不同分岔状态(分叉形状、分叉角等)对烟气蔓延的影响。Zhao Shengzhong等<sup>[9]</sup>对纵向通风巷道的烟分岔流进行了一系列小尺度实验研究,提出了预测烟雾分岔流特征长度的理论模型。Huang Youbo等<sup>[10]</sup>在自然通风和强制通风条件下进行了不同放热速率的缩小尺度实验,表明分岔结构对火焰羽流有显著影响。索在斌<sup>[11]</sup>采用理论分析与数值模拟结合的方法,得出火灾时期烟气运移规律及火灾时期相关参数变化。王建国等<sup>[12]</sup>通过改变火源规模与风速对综采工作面进风巷火灾的能见度、CO浓度、温度变化进行了研究。李祥春等<sup>[13]</sup>通过模拟软件研究了人口风速对巷道火灾速度场、温度场、瓦斯浓度的影响。索在斌等<sup>[14]</sup>通过建立上行通风巷道模型,研究了坡度对火灾时期温度场和压力场及烟气蔓延的影响。沈云鸽等<sup>[15]</sup>研究了在“L”型巷道的火灾烟气蔓延分布情况。陈亮等<sup>[16]</sup>将火源视为固定

温度2 000 K、固定气体释放量的高温烟气释放源,研究巷道内温度和有毒气体的分布情况。刘蓓蓓<sup>[17]</sup>应用FDS软件构建火灾热分解模型,得出火灾规模由热释放速率最大值决定这一结论。上述文献通过实验研究和数值模拟等多种方法对巷道内灾变烟流扩散过程进行了深入研究,优化和分析了不同巷道火灾中高温气体分布、有害气体浓度、热释放过程等重要指标的变化规律,但对典型巷道中火灾危险区域划分和时间之间关系的研究较少。

矿井开采中“T”型巷道普遍存在,揭示该类型巷道火灾危险区域和最佳疏散时间的逻辑关系,准确划分火灾安全区域,对火灾情况下井下作业人员安全逃生具有重要指导作用。因此,本文应用Pyrosim软件建立“T”型巷道模型,利用可燃物在热辐射下热解并燃烧的性质建立火源,根据数值模拟结果和物理相似模拟准则,建立“T”型巷道危险区域划分标准,通过监测巷道内温度和气体浓度的变化,确定巷道内火灾烟气分布规律,对“T”型巷道安全区域进行准确划分,从而更好地提高火灾逃生效率。

## 1 数值模拟

### 1.1 物理模型与火源

模拟模型为内蒙古某矿山-506 m处的“T”型巷道,巷道壁面的热物理性质参数设置见表1。模拟假设如下:①火灾发生前,巷道内风流温度均匀。②通风风流及火灾产生的烟气视为理想气体。③烟气在巷道内流动过程中不再发生化学反应。④巷道壁无渗透,除通风口外,巷道内为封闭空间。

巷道模型如图1所示。巷道I进风口处风速为

表 1 巷道壁面岩石物理参数

Table 1 Rock physical parameters of the roadway wall

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	比热容/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
2 620	0.84	2.2

2 m/s。在距离进风口 20 m 处设置 1 个 1 m×1 m×0.5 m 的可燃物, 位置是巷道底部。以进风口位置为原点建立模型, 巷道 I 的长度为 100 m, 巷道 II 的长度为 60 m, 2 条巷道的断面积皆为 4 m×3.5 m (宽×高)。

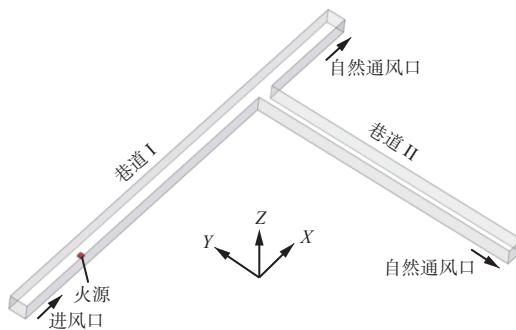


图 1 巷道模型

Fig. 1 Roadway model

在可燃物上方 0.1 m 处设置一个存在时间为 1 s 的 1 000 ℃ 热粒子, 使可燃物在热辐射作用下热解并燃烧。设置 100 L 柴油燃烧为火源, 柴油热物理参数见表 2。

表 2 柴油热物理参数

Table 2 Thermophysical parameters of diesel fuel

参数	值
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	851
沸点/℃	281
比热容/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	2.49
燃烧热/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	42 553
蒸发热/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	251
导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.133

实验矿山-506 m 处“T”型巷道湿度为 70%, 温度为 25 ℃, 在巷道 I、II 高 1.6 m(人体口鼻高度)每隔 4 m 设置温度、CO 浓度、CO<sub>2</sub> 浓度探测器, 同时在巷道 I、II 中间设置纵向温度、CO 浓度、CO<sub>2</sub> 浓度切片, 以观察火灾烟气随时间分布情况。

## 1.2 网格设置

网格的尺寸是由火焰特征尺寸  $D^*/\delta$  决定的, 其中  $D^*$  为矿井火灾特征直径,  $\delta$  为模拟时设置的网格尺寸,  $D^*/\delta$  在 4~16 时模拟结果具有收敛性。

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho C_p t_0 \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为燃烧功率;  $\rho$  为空气密度;  $C_p$  为空气的定压

比热容;  $t_0$  为初始温度;  $g$  为重力加速度, 9.8 m/s<sup>2</sup>。

由式(1)计算得  $D^*=1.639$  m。为保证  $D^*/\delta$  在 4~16 内, 则火灾模拟过程中网格尺寸  $\delta$  应为  $D^* \sim \frac{D^*}{4}$ , 即  $\delta$  应为 0.102~0.410。

在实际模拟过程中, 当网格尺寸设置为 0.102 时, 计算时间将非常巨大, 而网格尺寸设置为 0.410 时, 得出的结果不稳定。因此, 采用 0.20, 0.25, 0.33 m 3 种常见的网格尺寸进行比较, 热释放速率曲线模拟结果如图 2 所示。可看出网格尺寸分别为 0.20, 0.25, 0.33 m 时热释放速率曲线比较接近。因此, 将存在火源的巷道 I 网格设置为 0.25 m×0.25 m×0.25 m, 由于巷道 II 中无火源存在, 不涉及燃烧等复杂的计算, 网格的划分对其烟气流动计算影响较小, 所以将其网格设置为 0.5 m×0.5 m×0.5 m, 共 140 800 个网格。根据模拟结果可知, 烟气在 80 s 前后扩散至整个巷道, 100 s 时烟气流动趋于稳定, 因此将模拟时间设定为 100 s。

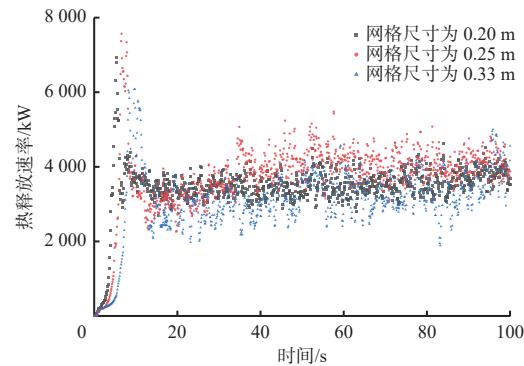


图 2 不同网格尺寸下的火灾热释放速率曲线

Fig. 2 Heat release rate curves of fires with different grid sizes

## 2 数值模拟结果与分析

### 2.1 温度分布

不同时间点垂直截面的温度云图如图 3 所示。可看出火灾产生的高温烟气扩散到巷道下风侧后, 巷道内的平均温度随时间推移逐渐升高, 但随距火源距离的增加而降低, 巷道 II 的烟气温度明显低于巷道 I, 高温气流在 40 s 左右时蔓延至整个巷道 I, 到 80 s 附近蔓延至整个巷道, 在 100 s 时巷道 I 出口处温度达 132 ℃, 巷道 II 出口处温度达 75 ℃。

### 2.2 烟气浓度分布

在火源燃烧过程中, 产生的烟气被风夹带, 并沿巷道蔓延。应用 Tecplot 软件进行处理, 得到 20, 40, 60, 80, 100 s 时 CO 和 CO<sub>2</sub> 体积分数在巷道纵轴面上的分布, 如图 4、图 5 所示。

由图 4 可看出, 火源处 CO 体积分数最大值约

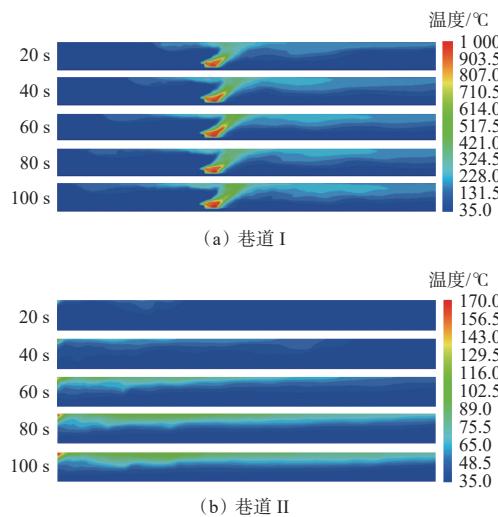
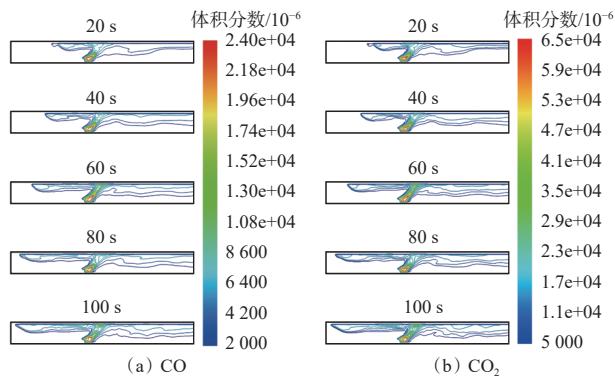
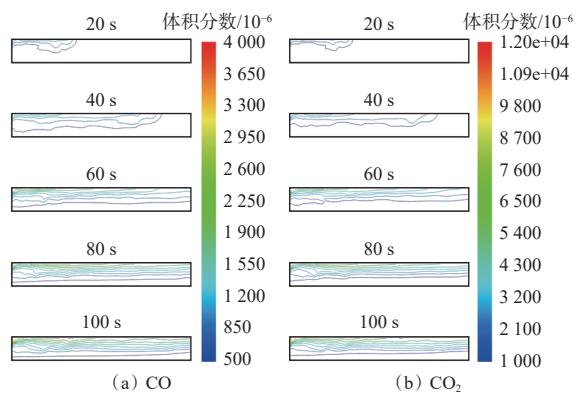


图3 不同时间点沿巷道垂直截面的温度云图

Fig. 3 Temperature distribution along the vertical section of roadway at each time point

图4 不同时间点 CO 和 CO<sub>2</sub> 体积分数沿巷道 I 垂直截面的等值线Fig. 4 Contour maps of CO and CO<sub>2</sub> volume fraction at different time points along the vertical section of roadway I图5 不同时间点 CO 和 CO<sub>2</sub> 体积分数沿巷道 II 垂直截面的等值线Fig. 5 Contour maps of CO and CO<sub>2</sub> volume fraction at different time points along the vertical section of roadway II

为  $24000 \times 10^{-6}$ 。在烟流扩散过程中,火源处附近的CO体积分数基本不变,烟气在浮力作用下蔓延至巷道顶板处。随着烟气在巷道中持续扩散,CO体积分数随着与火源距离的增加而降低,巷道中的CO体积分数等值线沿水平方向分层。由CO体积分数等值

线在垂直方向上的分布特征可看出,在浮力作用下,烟气沿巷道顶部流动。CO在巷道底板的体积分数低于巷道顶部,即从上到下逐渐降低。大约40s时高温烟气已蔓延整个巷道I下风侧。

由图5可看出,烟气中CO<sub>2</sub>体积分数的变化规律与CO变化相似。火源处CO<sub>2</sub>体积分数最高,约为 $65000 \times 10^{-6}$ 。火源附近CO<sub>2</sub>体积分数在柴油燃烧过程中变化不大,呈现从下到上逐渐降低的态势。CO<sub>2</sub>体积分数在火源燃烧时的分布与CO一样,风流通过巷道混合高温烟雾沿巷道顶部向下风侧蔓延,随着与火源距离增加,CO<sub>2</sub>体积分数逐渐降低,等值线纵向分布逐渐密集。可看出由于CO<sub>2</sub>产量比CO高,所以巷道II的CO<sub>2</sub>体积分数等值线分布较CO更接近地面,CO分布更接近巷道顶板。在大约20s时,高温烟气开始蔓延至巷道II,80s时火灾产生的烟雾已蔓延至整个巷道。由于被风流稀释,巷道II的CO体积分数明显低于巷道I。

### 3 安全区域划分

#### 3.1 火灾烟气的危害

在以往众多的各类火灾事故中,烟气中的CO、CO<sub>2</sub>是夺人性命的罪魁祸首<sup>[18]</sup>。为了明确在巷道中火灾烟气蔓延危险区域分布,以烟气中的CO、CO<sub>2</sub>和烟气温度为评价对象,对巷道进行烟气蔓延区域危险性划分。

根据不同温度及不同体积分数的CO、CO<sub>2</sub>对人体的影响(表3—表5),对井巷火灾高温、毒害进行危害等级划分<sup>[19]</sup>,分别为安全区域(危险等级1)、轻度危险区域(危险等级2)、中度危险区域(危险等级3)、重度危险区域(危险等级4),见表6。

#### 3.2 安全区域划分结果

##### 3.2.1 温度安全区域划分

利用巷道I、II各时间步长的巷道烟气温度分布模拟结果,绘制30, 45, 65 °C 3条温度分级线,对2条巷道温度场的安全区域进行划分,结果如图6所示。

由图6(a)可看出,安全区域主要出现在火源上风侧,随着时间的推移在下风侧相同位置的温度逐渐升高,最高温度均出现在火源附近。在火灾的前20s,巷道I的火灾最高温度已超过危险等级4的临界值,100s时的最高温度达809 °C。随着风流的介入,温度逐渐降低,在巷道I末尾处回到危险等级2、3。由图6(b)可看出,巷道II中各时间点的温度均不在危险等级4,总体趋势与巷道I类似,随着巷道距离的增加,温度逐渐降低至危险等级1、2。

表 3 不同温度对人体的影响

Table 3 The effect of different temperatures on the human body

温度/℃	对人体的影响
20~28	感觉舒适
28~30	感觉到热且有点不舒服
30~34	人体汗腺工作, 出汗较多, 心跳加快
34~40	体表发热难忍, 内热难消
40~90	吸入高温烟气, 体内循环系统紊乱
90~120	吸入烟气会导致呼吸气管和支气管起泡
>120	皮肤灼伤, 肌肉痉挛, 窒息, 容易死亡

表 4 CO 对人体的影响

Table 4 Effects of CO on human body

CO体积分数/ $10^{-6}$	对人体的影响
<24	正常
50	人体允许暴露
200	2~3 h 内会有轻度头痛
400	1~2 h 内会出现头痛、恶心、头晕现象症状
800	45 min 内剧烈头痛, 呕吐; 2 h 导致昏迷
1 300	有强烈的头痛, 1 h 生命垂危
5 000	20~30 min 内窒息死亡

表 5 CO<sub>2</sub> 对人体的影响Table 5 Effects of CO<sub>2</sub> on human body

CO <sub>2</sub> 体积分数/ $10^{-6}$	对人体的影响
450	正常
5 000	6 h 内不会产生任何症状
10 000~20 000	有不适感
30 000	刺激呼吸中枢, 呼吸次数增加
40 000	呼吸急促, 有头痛、心跳加快等症状
50 000	喘气困难
60 000	呼吸急促, 感觉非常难受

表 6 矿井火灾高温危险性分级

Table 6 High temperature hazard classification of mine fire

危险等级	温度/℃	CO体积分数/ $10^{-6}$	CO <sub>2</sub> 体积分数/ $10^{-6}$
1	<30	<24	<5 000
2	36~50	24~800	50 00~20 000
3	50~90	800~1 300	20 000~30 000
4	>90	>1 300	>30 000

根据上文数据处理后的烟气高温危险性划分结果见表 7。可看出随着火源的持续燃烧, 巷道 I 的安全区域与轻度危险区域的总范围基本不变, 由于火灾的烟气逆流, 上风侧的安全区域逐渐被压缩, 随着温度上升, 中度危险区域逐渐变为重度危险区域, 巷道 I 中测点主要集中在重度危险区域。巷道 II 随着

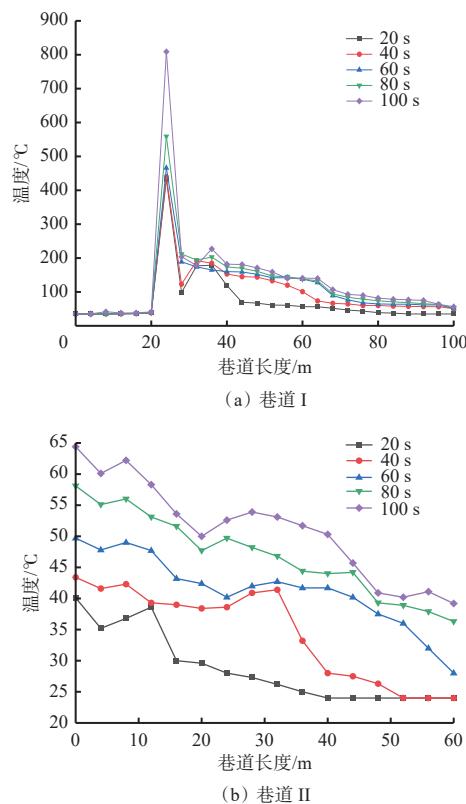


图 6 温度随巷道水平长度变化

Fig. 6 Temperature variation with horizontal length of the roadway

时间推移由中度危险区域逐渐变为轻度危险区域与安全区域, 巷道 II 中测点主要集中在轻度危险区域。

表 7 烟气高温危险性划分结果

Table 7 Flue gas high temperature hazard classification results

时间/s	巷道	安全区域范围/m	轻度危险	中度危险	重度危险
			区域范围/m	区域范围/m	区域范围/m
20	I	(0,16) $\cup$ (88,100)	(16,20) $\cup$ (72,88)	(44,72)	(20,44)
	II	(8,60)	(0,8)	—	—
40	I	(0,12)	(12,20)	(64,100)	(20,64)
	II	(32,60)	(0,32)	—	—
60	I	(0,8)	(8,20)	(68,100)	(20,68)
	II	(52,60)	(0,52)	—	—
80	I	(0,8)	(8,20)	(72,100)	(20,72)
	II	—	(20,60)	(0,20)	—
100	I	(0,4)	(4,20)	(76,100)	(20,76)
	II	—	(40,60)	(0,40)	—

### 3.2.2 烟气毒害安全区域划分

火灾烟气中的一些气体会导致人体中毒窒息和死亡, 这些气体主要成分为 CO、CO<sub>2</sub>。因此, 当烟气在巷道蔓延时, 有必要评估 CO 和 CO<sub>2</sub> 体积分数, 以对有危险的区域进行分类<sup>[20]</sup>。在火灾过程中, 巷道 I、II 中 CO 和 CO<sub>2</sub> 体积分数变化如图 7 所示。可

看出产生的CO和CO<sub>2</sub>聚集在顶板,顺着风流向火源下风侧扩散,随着时间的增加,火源附近的气体体积分数比较高,升幅较大,很快超过了重度危险区域的阈值。当持续的风流快速经过火源处,CO和CO<sub>2</sub>被吹向火源下风侧,CO和CO<sub>2</sub>体积分数迅速降低。

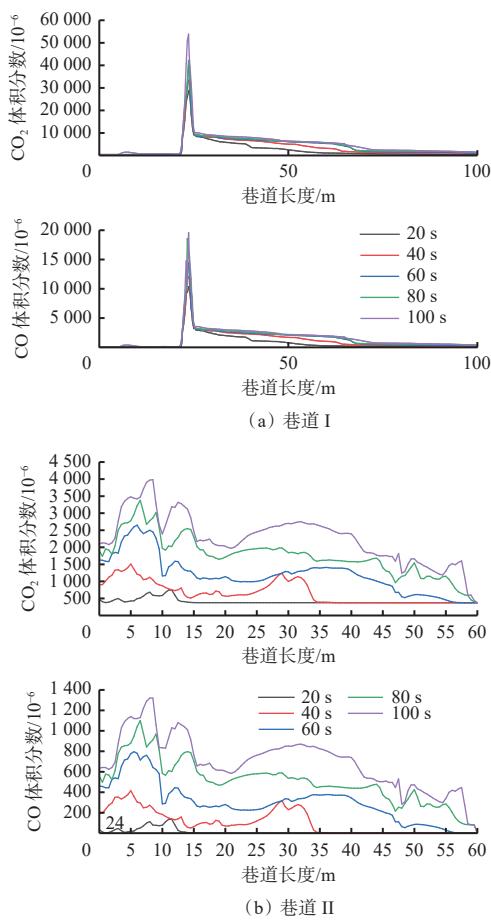


图7 巷道中CO和CO<sub>2</sub>体积分数变化

Fig. 7 Variation of CO and CO<sub>2</sub> volume fraction in the roadway

巷道Ⅰ、Ⅱ中烟气毒性的危险性划分结果见表8、

表8 巷道Ⅰ烟气毒性危险性划分结果

Table 8 Risk classification results of flue gas toxicity of roadway I

时间/s	气体	安全区域范围/m	轻度危险区域范围/m	中度危险区域范围/m	重度危险区域范围/m
20	CO	(0,21) $\cup$ (89,100)	(21,21.8) $\cup$ (49.8,89)	(40,49.8)	(21.8,40)
	CO <sub>2</sub>	(0.5,2) $\cup$ (4,5.5) $\cup$ (13,60)	(0,0.5) $\cup$ (2,4) $\cup$ (5.5,13)	—	—
40	CO	(0,13.6) $\cup$ (16.6,21.3)	(13.6,16.6) $\cup$ (21.3,21.6) $\cup$ (63,100)	(21.6,22) $\cup$ (55.8,63)	(22,55.8)
	CO <sub>2</sub>	(34.5,60)	(0,34.5)	—	—
60	CO	(0,10) $\cup$ (17.6,20.8)	(10,17.6) $\cup$ (20.8,21.6) $\cup$ (67.6,100)	(21.6,22) $\cup$ (65.8,67.6)	(22,65.8)
	CO <sub>2</sub>	(55.5,60)	(0,55.5)	—	—
80	CO	(0,8.6)	(8.6,21.6) $\cup$ (67.6,100)	(66.3,67.6)	(21.6,66.3)
	CO <sub>2</sub>	(59.5,60)	(0,3) $\cup$ (14.5,59.5)	(3,14.5)	—
100	CO	(0,4.8)	(4.8,21.6) $\cup$ (72.3,100)	(68,72.3)	(21.6,68)
	CO <sub>2</sub>	(59.5,60)	(0,2.5) $\cup$ (15,26.5) $\cup$ (36.5,59.5)	(2.5,15) $\cup$ (26.5,36.5)	—

表9。可看出巷道Ⅰ中CO<sub>2</sub>的安全区域范围较CO大,CO的危险性更大,主要集中在轻度、中度危险区域。巷道Ⅱ中CO主要分布区域与巷道Ⅰ相似,体积分数均在重度危险区域阈值以下,而CO<sub>2</sub>均在安全区域范围内。由于CO和CO<sub>2</sub>危险性分类的部分区域是一致的,所以根据高毒性水平的结果,将巷道Ⅰ、Ⅱ中CO和CO<sub>2</sub>毒性危险性分类结果合并,并进一步划分,划分结果见表10。

### 3.3 危险区域综合分析

对烟气高温、毒性划分结果进行处理,以观察巷道火灾的危险区域范围随时间的变化,如图8所示。由图8(a)、(b)可知在巷道Ⅰ中,危险等级2、3随时间的变化不大,危险等级1的范围随时间变化逐渐变小,均在40 s时变化率最大,危险等级2的范围随时间的推移逐渐变大,在40 s时变化率最大。在40 s后危险等级1的范围均呈现线性减小趋势,危险等级2的范围均呈现线性增大趋势。由图8(c)、图8(d)可知2种划分结果的区域变化相似,2种划分方法均未出现重度危险区域,危险等级1的范围随时间推移逐渐减小,在60 s前呈线性减小趋势,60 s后变化率逐渐降低为0。危险等级2的范围随时间推移线性增大,在60 s时达到最大后逐渐减小,危险等级3范围在60 s时从0开始线性增大。

对划分结果进行整合处理后,巷道Ⅰ、Ⅱ的总危险范围随时间变化如图9所示。

由图9可看出,在巷道Ⅰ中危险等级2、3随时间的变化很小,巷道Ⅰ中安全区域与重度危险区域在40 s时变化度最大,因此处在巷道Ⅰ的人员在发生火灾时应尽量在40 s内完成逃生;巷道Ⅱ中安全区域与重度危险区域在60 s时变化度最大,因此位

表 9 巷道 II 烟气毒性的危险性划分结果

Table 9 Risk classification results of flue gas toxicity of roadway II

时间/s	气体	安全区域范围/m	轻度危险区域范围/m	中度危险区域范围/m	重度危险区域范围/m
20	CO	(0.5,2) $\cup$ (4.5,5) $\cup$ (13,60)	(0,0.5) $\cup$ (2,4) $\cup$ (5.5,13)	—	—
40	CO	(34.5,60)	(0,34.5)	—	—
60	CO	(55.5,60)	(0,55.5)	—	—
80	CO	(59.5,60)	(0,3) $\cup$ (10,59.5)	(3,10)	—
100	CO	(59.5,60)	(0,2.5) $\cup$ (15,26.5) $\cup$ (36.5,59.5)	(2.5,15) $\cup$ (26.5,36.5)	—

表 10 烟气毒性危险性划分结果

Table 10 Results of flue gas toxicity risk classification

时间/s	巷道	安全区域范围/m	轻度危险区域范围/m	中度危险区域范围/m	重度危险区域范围/m
20	I	(0,21) $\cup$ (89,100)	(21,21.8) $\cup$ (49.8,89)	(40,49.8)	(21.8,40)
	II	(0.5,2) $\cup$ (4.5,5) $\cup$ (13,60)	(0,0.5) $\cup$ (2,4) $\cup$ (5.5,13)	—	—
40	I	(0,13.6) $\cup$ (16.6,21.3)	(13.6,16.6) $\cup$ (21.3,21.6) $\cup$ (63,100)	(21.6,22) $\cup$ (55.8,63)	(22,55.8)
	II	(34.5,60)	(0,34.5)	—	—
60	I	(0,10) $\cup$ (17.6,20.8)	(10,17.6) $\cup$ (20.8,21.6) $\cup$ (67.6,100)	(21.6,22) $\cup$ (65.8,67.6)	(22,65.8)
	II	(55.5,60)	(0,55.5)	—	—
80	I	(0,8.6)	(8.6,21.6) $\cup$ (67.6,100)	(66.3,67.6)	(21.6,66.3)
	II	(59.5,60)	(0,3) $\cup$ (10,59.5)	(3,10)	—
100	I	(0,4.8)	(4.8,21.6) $\cup$ (72.3,100)	(68,72.3)	(21.6,68)
	II	(59.5,60)	(0,2.5) $\cup$ (15,26.5) $\cup$ (36.5,59.5)	(2.5,15) $\cup$ (26.5,36.5)	—

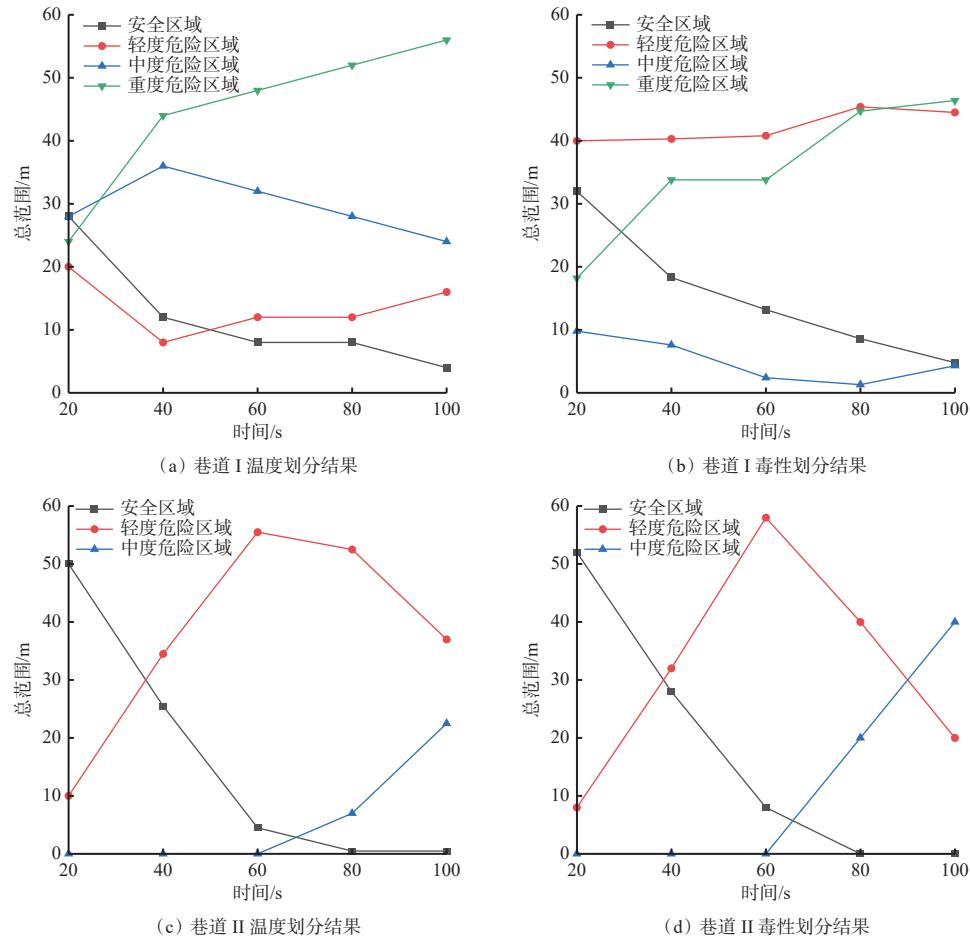


图 8 危险区域范围随时间的变化

Fig. 8 Changes in the range of the hazardous zones with time

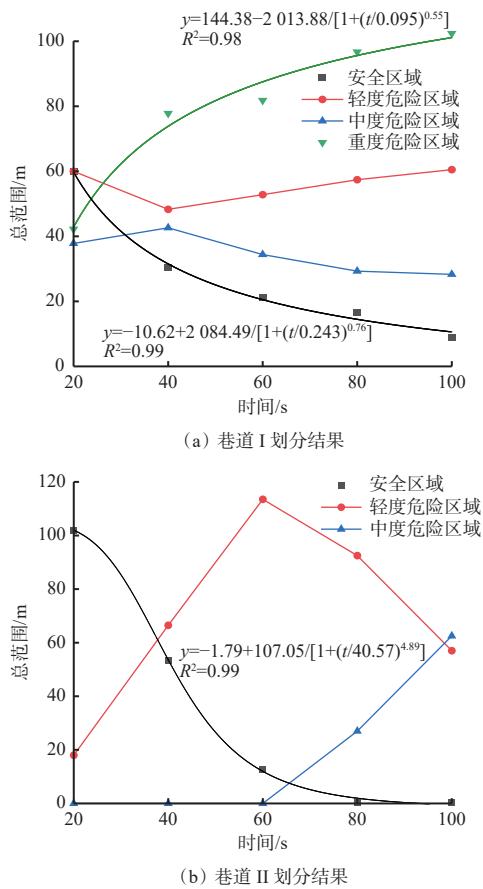


图9 危险区域总范围随时间的变化规律

Fig. 9 The law of changes in the total range of the hazard zones with time

于巷道Ⅱ的人员在发生火灾时应尽量在60 s内完成逃生。在巷道Ⅰ、Ⅱ中危险等级1、4范围的变化具有明显的规律性。通过拟合得出危险区域的范围和时间之间的关系:

$$W_I = \begin{cases} 144.38 + \frac{-2013.88}{1 + \left(\frac{t}{0.095}\right)^{0.55}} \\ -10.62 + \frac{2084.49}{1 + \left(\frac{t}{0.243}\right)^{0.76}} \end{cases} \quad (2)$$

$$W_{II} = 1.79 + \frac{107.05}{1 + \left(\frac{t}{40.57}\right)^{4.89}} \quad (3)$$

式中:  $W_I$  为巷道Ⅰ的危险区域范围;  $W_{II}$  为巷道Ⅱ的危险区域范围;  $t$  为时间。

#### 4 结论

1) 风流通过巷道混合高温烟雾沿巷道顶部向下风侧蔓延, 随着与火源距离增加, 浓度逐渐降低,  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  体积分数等值线纵向分布逐渐密集。

2) 将烟气扩散区域划分为安全区域(等级为1)到重度危险区域(等级为4)4类。温度划分结果中

巷道Ⅰ中测点主要集中在重度危险区域,  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  毒性划分结果中巷道Ⅰ的  $\text{CO}_2$  安全区域范围较  $\text{CO}$  大,  $\text{CO}$  危险因素更大, 主要集中在轻度、中度危险区域, 在巷道Ⅱ主要集中在轻度危险区域。

3) 在巷道Ⅰ中危险等级1的范围随时间的推移逐渐变小, 危险等级4的范围随时间的推移逐渐变大, 且均在40 s时变化率最大, 危险等级2、3变化率很小。在巷道Ⅱ中2种划分方法的区域范围变化相似, 危险等级2、3均在60 s时变化率最大, 结合高温和有毒气体划分结果, 通过拟合确定了危险区域总范围与时间的关系。

4) 该划分方法在前人的研究基础上能够得出各危险等级范围随时间的变化关系, 及各时间点区域危险性的变化趋势, 为矿井火灾救援中危险区域判断提供了思路和方法。

#### 参考文献(References):

- 1] CHUAN Gangfan, XU Yanli, YAN Mu, et al. Smoke movement characteristics under stack effect in a mine laneway fire[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 70-79.
- 2] SHI Xueqiang, ZHANG Yutao, CHEN Xiaokun, et al. Effects of thermal boundary conditions on spontaneous combustion of coal under temperature-programmed conditions[J]. *Fuel*, 2021, 295(15). DOI: [10.1016/j.fuel.2021.120591](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120591).
- 3] LIU Yin, WEN Hu, GUO Jun, et al. Coal spontaneous combustion and  $\text{N}_2$  suppression in triple goafs: a numerical simulation and experimental study[J]. *Fuel*, 2020, 271. DOI: [10.1016/j.fuel.2020.117625](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117625).
- 4] GUO Jun, WEN Hu, ZHENG Xuezhao, et al. A method for evaluating the spontaneous combustion of coal by monitoring various gases[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 126: 223-231.
- 5] CHOW WK, GAO Y, ZOU JF, et al. Numerical studies on thermally-induced air flow in sloping tunnels with experimental scale modelling justifications[J]. *Fire Technology*, 2018, 54(4): 867-892.
- 6] GUO Jun, LIU Yin, CHENG Xiaojiao, et al. A novel prediction model for the degree of rescue safety in mine thermal dynamic disasters based on fuzzy analytical hierarchy process and extreme learning machine[J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2018, 36(4): 1336-1342.
- 7] WEN Hu, LIU Yin, GUO Jun, et al. A multi-index-classified early warning method for spontaneous combustion of coal under air leakage blocking[J]. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 2021, 27(2): 208-226.

- [8] 薛彦平. 巷道分岔角度对火灾烟气蔓延的影响数值模拟[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(6): 179-183.  
XUE Yanping. Numerical simulation of effect of tunnel diverging angles on fire smoke flow[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(6): 179-183.
- [9] ZHAO Shengzhong, LIU Fang, WAGN Jun, et al. Experimental investigation on fire smoke bifurcation flow in longitudinal ventilated tunnels[J]. *Fire and Materials*, 2020, 44(5). DOI: [10.1002/fam.2828](https://doi.org/10.1002/fam.2828).
- [10] HUANG Youbo, LI Yanfeng, LI Junmei, et al. Experimental investigation on maximum gas temperature beneath the ceiling in a branched tunnel fire[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 145. DOI: [10.1016/j.ijthermalsci.2019.105997](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.105997).
- [11] 索在斌. 工作面进风巷下行风流火灾数值模拟及风流控制研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.  
SUO Zaibin. Numerical simulation and airflow control of downstream flow fire in working face[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [12] 王建国, 武睿萌, 殷雄, 等. 综采工作面进风巷火灾数值模拟研究[J]. *矿业安全与环保*, 2019, 46(5): 7-11, 15.  
WANG Jianguo, WU Ruimeng, YIN Xiong, et al. Numerical simulation of fire in intake airway in fully mechanized working face[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2019, 46(5): 7-11, 15.
- [13] 李祥春, 蒋颖, 李梅生. 巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(5): 119-125.  
LI Xiangchun, JIANG Ying, LI Meisheng. Study on numerical simulation of variations of airflow field and gas concentration during roadway fire[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(5): 119-125.
- [14] 索在斌, 吴世跃, 牛煜, 等. 坡度对上行通风火灾影响的数值模拟[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(1): 192-195, 199.  
SUO Zaibin, WU Shiyue, NIU Yu, et al. Numerical simulation of the influence of slope on upward ventilation fire[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(1): 192-195, 199.
- [15] 沈云鸽, 王德明. 基于 FDS 的矿井巷道火灾烟气致灾的数值模拟[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(2): 183-187.  
SHEN Yunge, WANG Deming. Numerical simulation of smoke disaster caused by mine roadway fire based on FDS[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(2): 183-187.
- [16] 陈亮, 邬长福, 陈祖云, 等. 矿井巷道火灾安全区域划分数值模拟[J]. *消防科学与技术*, 2016, 35(5): 633-636.  
CHEN Liang, WU Changfu, CHEN Zuyun, et al. Numerical simulation study on the regional division of mine roadways fire safety[J]. *Fire Science and Technology*, 2016, 35(5): 633-636.
- [17] 刘蓓蓓. 金属矿井下火灾热释放速率及烟气逆流行为研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.  
LIU Beibei. The research of heat release rate and backlayering in the fire under the metal mine[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [18] 张泽. 矿井胶带火灾烟气流动模拟及危险区域划分[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.  
ZHANG Ze. Simulation and division of danger areas of smoke flow of belt fire in coal mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [19] 邓权龙. 矿井巷道火灾烟流数值模拟及安全区域划分[D]. 赣州: 江西理工大学, 2015.  
DENG Quanlong. The numerical simulation of the smoke flow during fire and the safety zone divide in mine roadways[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015.
- [20] WEN Hu, LIU Yin, GUO Jun, et al. Study on numerical simulation of fire danger area division in mine roadway[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. DOI: [10.1155/2021/6646632](https://doi.org/10.1155/2021/6646632).