

中文引用格式:薛希龙, 李佳乐, 武拴军, 等. 下向进路采场内炮烟的扩散特征及通风参数确定[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(4):76-84.

英文引用格式:XUE Xilong, LI Jiale, WU Shuanjun, et al. Diffusion characteristics of blasting fumes in downward drift stope and determination of ventilation parameters [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(4):76-84.

下向进路采场内炮烟的扩散特征及通风参数确定*

薛希龙^{1,2,3}副教授, 李佳乐¹, 武拴军^{2,4}教授级高级工程师, 张晓^{**1}讲师,
刘斌², 张钦礼³教授

(1 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421200; 2 金川集团股份有限公司,
甘肃 金昌 737100; 3 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;
4 金诚信矿业管理股份有限公司, 北京 101500)

中图分类号:X936 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.04.1577

基金项目:中国博士后基金资助(2021M693837);国家重点实验室开放基金资助(GZSYS-KY-2020-013);湖南省自然科学基金资助(2019JJ50516)。

【摘要】 为明确下向进路充填采矿法采场炮烟的扩散特征,以金川龙首矿下向进路充填采矿法为例,开展数值模拟和现场试验,研究进路和分层道内风流的空间分布,分析进路内CO和NO₂的扩散特征,探讨通风井位置、进路长度对CO扩散的影响,并确定采场的通风参数。结果表明:分层道和进路内的风流场可划分为进风带、中性带和回流带,进路内风速呈底部高、中部低、顶部缓的S型分布;进路垂面上CO体积分数随高度增加而不断升高,进路水平方向上CO体积分数由里向外先降低后升高;进路腰线处CO扩散速度随通风时间呈现对数递减的趋势;NO₂主要分布在进路腰线以下,其扩散速度快于CO;CO扩散速率与通风井距进路口的距离、进路的长度呈负相关;当通风井与进路口的距离≤40 m、进路长度≤55 m时,自然通风30 min炮烟中CO和NO₂低于安全规程限值。

【关键词】 下向进路采场; 采场炮烟; 数值模拟; 扩散特征; 通风井位置; 进路长度

Diffusion characteristics of blasting fumes in downward drift stope and determination of ventilation parameters

XUE Xilong^{1,2,3}, LI Jiale¹, WU Shuanjun^{2,4}, ZHANG Xiao¹, LIU Bin², ZHANG Qinli³

(1 School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421200, China; 2 Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchuan Gansu 737100, China; 3 Central South University, School of Resources and Safety Engineering, Changsha Hunan 410083, China;
4 JCHX Mining Management Co., Ltd., Beijing 101500, China)

Abstract: To definite the diffusion characteristics of blasting fumes in downward drift filling mining stopes, taking the downhole filling mining method of Longshou Mine in Jinchuan as an example, numerical simulations and field tests were conducted. The spatial distribution of airflow in drifts and layered roads was studied, and the diffusion patterns of CO and NO₂ in drifts were analyzed. Furthermore, the effects of

* 文章编号:1003-3033(2025)04-0076-09; 收稿日期:2024-12-04; 修稿日期:2025-02-11

** 通信作者:张晓(1988—),女,湖南省益阳人,博士,讲师,主要从事矿山安全与固废处置方面的研究。E-mail:zhangx880202@126.com。

ventilation shaft locations and drift lengths on CO diffusion were explored, and the ventilation parameters of the Longshou Mine were determined. The results indicated that the airflow field in drifts and layered drifts can be divided into the inflow zone, neutral zone, and return zone. The airflow velocity in the drift shows the S-shaped distribution, with higher velocity at the bottom, lower in the middle, and moderate at the top. In the vertical cross-section of the drift, the CO volume fraction continuously increases with height. While horizontally, it exhibits a "decrease-then-increase" pattern from the inner to outer side. At the drift waistline, the CO diffusion velocity shows a logarithmic decreasing trend with ventilation time. NO₂ is primarily concentrated below the midline of the drift, and its diffusion velocity is significantly faster than that of CO. The CO diffusion rate is negatively correlated with both the distance from the ventilation shaft to the drift entrance and drift length. When the distance between the ventilation shaft and the drift entrance is ≤ 40 m, and the drift length is ≤ 55 m, the CO and NO₂ concentrations in the natural ventilation blasting fumes are below the standard limits below after 30 minutes.

Keywords: downward drift stope; stope fumes; numerical simulation; diffusion characteristics; ventilation shaft locations; drift lengths

0 引言

下向进路胶结充填法是目前开采厚大、破碎、高品位矿体的主要采矿方法^[1],其采场属于典型独头巷道型工作面。回采过程中,采场爆破会产生大量含CO、NO_x的炮烟^[2],如不及时排出,将对作业人员健康和生命造成威胁^[3]。因此,研究下向进路采场中炮烟的扩散特征,优化采场通风参数,对保障采场安全高效回采具有重要意义。

近年来,学者们围绕独头巷道和采场的通风及炮烟扩散特征开展了大量研究。谭香^[4]采用数值模拟和相似模拟,研究了巷道型采场炮烟体积分数的动态演化,分析了时间、风速、CO初始体积分数等因素对排烟效果的影响;WU Bo^[5]、CHANG Xiaoke^[6]等探讨了长距离隧道中CO初始体积分数、通风时间与其扩散速度的关系;LIU Qiang^[7]、HUA Yun^[8]等模拟不同通风方式下巷道内风流场及工作面附近CO体积分数的演化,发现涡旋气流场会抑制CO的扩散;曹杨^[9]研究了采场中CO运移特征及其体积分数的时空分布特征,探明了通风时间与通风距离、风筒口位置的关系,并建立了采场通风时间预测模型;陶发玉等^[10]模拟了下向进路采场内CO的扩散特征,发现高分层道有利于加快炮烟的扩散。以上研究大多聚焦于辅助通风条件下巷道或采场炮烟的扩散特征,然而,下向进路采场中进路长度小、回采周期短,且进路距通风井较近,其回采工艺、通风系统与长距离独头巷道和无底柱分段崩落法采场的生产工艺存在本质区别,因而下向进路采场采用自然通风具有可行性,但目前相关研究

较少。生产实践证明:短距离进路采场在自然通风一定时间后,炮烟中毒害气体的体积分数可降至安全限值以下,但现行安全规程将下向进路采场通风纳入长距离独头巷道和无底柱分段崩落法采场通风的管理范畴,给生产和管理带来诸多不便,存在局限性。

为此,笔者拟以甘肃金川龙首矿下向进路采场为例,通过数值模拟、现场测试和理论分析,研究采场炮烟中CO、NO₂的动态演化,分析通风井位置、进路长度对炮烟扩散的影响,并确定采场通风参数,以期优化下向进路充填法采准工程布置和进一步提升回采作业本质安全水平提供理论依据。

1 采场通风系统数值模型建立

1.1 金川下向六角形进路采场通风系统

甘肃金川龙首矿采用盘区机械化下向六角形进路充填法。采场进路沿矿体走向布置,进路长度为50 m,其断面尺寸为4 m(顶底)×5 m(高)×6 m(腰宽);分层道垂直进路布置,其断面尺寸为4.8 m(宽)×5 m(高);分层道上方预留2~5条通风井,其直径为1.6~2 m。采场风流路线为:分段运输大巷→分层联络道→分层道→进路(污风)→充填回风井→充填回风道→主回风井,如图1所示。

1.2 计算模型

为方便模拟计算,在建立数值模型之前作以下假设:① CO、NO₂在爆破瞬间集中产生,气体间不发生反应;② 忽略环境条件的变化^[11];③ CO、NO₂和空气介质视为理想流体^[12];④ 新鲜风流中CO、

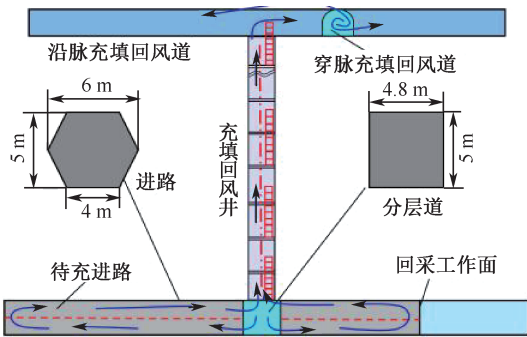


图1 采场通风系统

Fig.1 Stope ventilation system

NO₂ 的体积分数为 0。根据矿山实际情况,建立采场三维模型,如图 2 所示,其中,分层道上方通风井直径为 1.6 m,进路和分层道断面尺寸与实际一致,风流入口为自然风流。

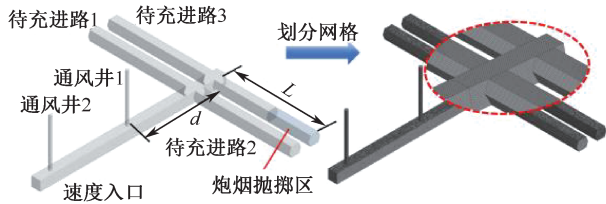


图2 数值模型及网格划分

Fig.2 Numerical model and meshing

为提升数值计算的效率与精度,将风速设为网格独立性检验的主要参数^[13],划分粗、中、细 3 种多面体网格,并进行独立性检验。结果表明:中网格和细网格计算结果误差较小,数值计算时选用中等网格可满足计算精度要求。

为研究通风井位置、进路长度对采场炮烟中 CO、NO₂ 扩散的影响,设计 14 组数值模拟方案,见表 1。方案中通风井距进路口-15 m 表示图 2 中通风井 1 在回采进路内侧的 15 m 处。

表 1 数值模拟方案

Table 1 Scheme of numerical simulation

| 通风井与进路口的距离/m | | | | | 进路长度 |
|--------------|---|----|----|----|------|
| -15 | 0 | 15 | 30 | 45 | 50 |
| -15 | 0 | 15 | 30 | 45 | 70 |

1.3 工况参数设置

矿山采用 2 号岩石乳化炸药,根据炸药爆炸理论,炮烟抛掷长度和 CO、NO₂ 初始体积分数分别为^[14]:

$$L = 15 + \frac{G}{5} \quad (1)$$

$$C = 1\,000 \frac{Gq}{V} \quad (2)$$

式中: L 为爆破瞬间炮烟抛掷长度, m; G 为工作面一次爆破药量, kg; C 为炮烟中毒害气体体积分数, 10^{-6} ; q 为单位质量炸药爆炸产生的 CO 或 NO₂, 根据实际 CO 取 21 L/kg, NO₂ 取 0.19 L/kg; V 为炮烟抛掷区体积, m³。

经计算,炮烟抛掷长度为 22 m, CO 和 NO₂ 的初始体积分数分别为 $1\,340 \times 10^{-6}$ 和 15×10^{-6} , 其他参数通过矿山实测获取,边界条件设定见表 2。

表 2 边界条件参数设置

Table 2 Boundary condition parameter setting

| 参数类型 | 参数 | 设定值 |
|-----------------|---------------------------|-----------------------|
| 速度入口 | 速度大小/(m·s ⁻¹) | 0.7 |
| | 水力直径/m | 4.74 |
| | 湍流强度/% | 3.35 |
| CO | 初始体积分数/ 10^{-6} | 1 340 |
| | 密度 | 不可压缩理想气体 |
| | 黏度/(Pa·s) | 1.72×10^{-5} |
| NO ₂ | 初始体积分数/ 10^{-6} | 15 |
| | 密度 | 不可压缩理想气体 |
| | 黏度/(Pa·s) | 1.72×10^{-5} |

2 采场内炮烟扩散特征分析

2.1 下向进路采场内风流的空间分布特征

以进路长 50 m、通风井距进路口 45 m 的采场为例,采场风速流场矢量图如图 3 所示。由图 3 可知:新鲜风流自分层道进入采场,在通风井附近出现分流,顶部大部分风流进入通风井,其余风流沿分层道持续涌入进路里端。在进路内,新鲜风流在工作面附近受阻涌向顶部,并与顶部聚集的炮烟混合形成反向回流。污风依次沿进路顶板、分层道顶板不断向外流动,最终进入通风井。由于通风井面积明显小于分层道和进路,通风井上方负压使分层道、进路顶部炮烟持续涌入井筒,新鲜风流自底部不断进入进路,在进路内形成持续对流风流。

2.1.1 进路内风速的空间分布特征

为分析进路内风速的空间分布特征,按距工作面 10 m 的步距获取各剖面上风速,如图 4a 所示,绘制剖面的风速分布曲线如图 4b 所示。由图 4 可知:剖面上风速呈底部高、中部低、顶部缓的 S 型分布,由此可划分为底部进风带、中性带和顶部回流带。进风带位于距底板 0~1.3 m 处,其中,0~0.5 m 处风速为 0.221~0.305 m/s,当高度由 0.5 m 增加至

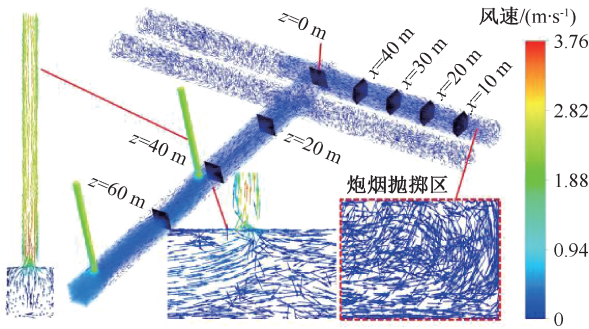


图3 爆破后采场风速流场矢量云

Fig. 3 Vector cloud of the airflow velocity in the stope

1.3 m, 风速缓慢下降;中性带位于 1.3~1.7 m 处, 该处风速小于 0.05 m/s, 在距底板 1.55 m 附近风速降至 0, 该平面两侧风速微弱、大小相近、方向相反;回流带位于 1.7~5 m 处, 平均风速为 0.12~0.27 m/s, 风速随高度增加先增大后减小, 在 2.5~3.5 m 处达最大, 风速较进风带明显减小, 分布范围变宽, 其变化与文献[15]基本吻合。在 $x=40$ m 处, 风速分布曲线凸起更明显, 其中进风带、回风带最大风速分别为 0.305、0.26 m/s。随着剖面与工作面距离的减小, 进风带、回风带风速分布曲线逐渐变平缓, 最大风速分别降至 0.22、0.12 m/s。

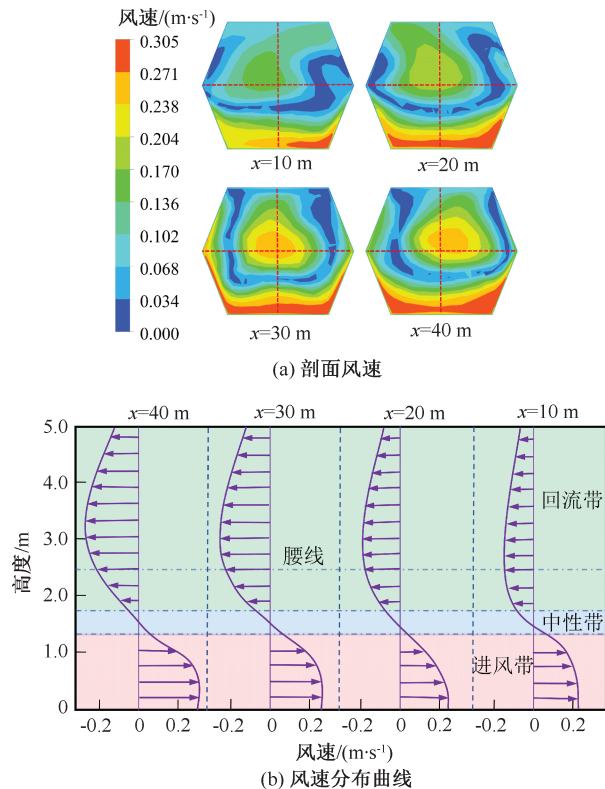


图4 进路剖面的风速及风速分布曲线

Fig. 4 Airflow velocity and distribution curve of the drift cross-sections

2.1.2 分层道内风速的空间分布特征

图 5a 和图 5b 分别为分层道各剖面的风速云图和风速分布曲线。由图 5 可知:剖面 $z=0$ 、20、40 m 的风速云图和风速分布曲线与进路类似, 但与进路相比, 其进风带风速分布范围变宽、回流带分布范围变窄。负压作用下, 分层道前端中性带的位置较进路明显升高, 进风带、回流带风速显著增大; 随着进路口与通风井之间距离减小 ($z=40$ m \rightarrow $z=0$ m), 中性带高度逐渐下降, 进风带、回流带峰值风速分别由 0.52、0.36 m/s 降至 0.39、0.27 m/s。在 $z=0$ m 处, 进路口出现紊流, 分层道底部隅角处形成高风速, 在距底板 0.8~1.4 m 处出现了亚中性带风速区。由于 $z=60$ m 位于通风井外侧, 顶部部分风流直接进入井筒, 腰线以上出现均匀分布的高风速 (0.52 m/s), 下部风流沿底板进入分层道里端, 剖面上风速随高度下降而逐渐减小。

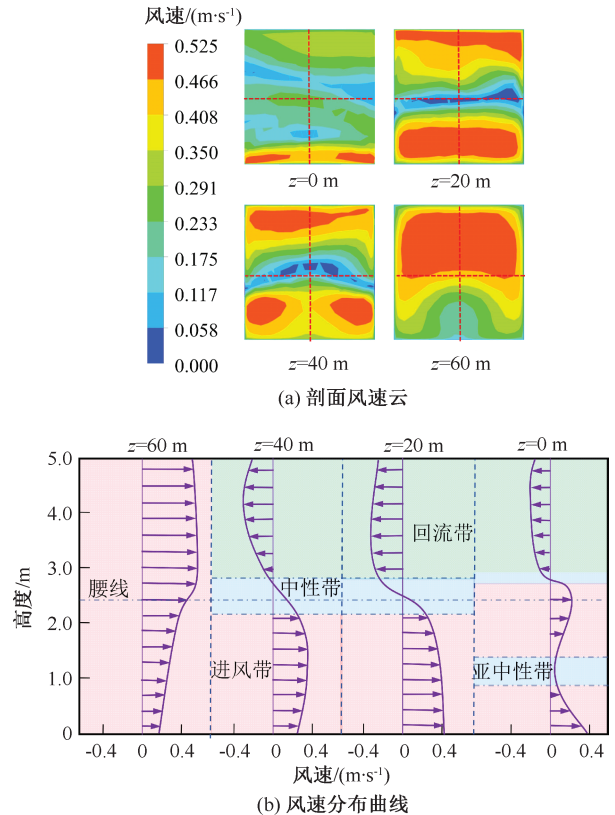


图5 分层道剖面的风速和风速分布曲线

Fig. 5 Airflow velocity and distribution curve of the layered road cross-sections

2.2 进路采场炮烟中毒害气体的动态扩散特征

2.2.1 炮烟中 CO 的动态扩散特征

爆破后进路内 CO 体积分数随时间的变化如图 6 所示。由图 6 可知: 爆破瞬间抛掷区 CO 体积分数为 $1\ 340 \times 10^{-6}$; 100 s 时, 各剖面上 CO 体积分数

随高度下降逐渐减小, $x = 10\text{ m}$ 、 $x = 20\text{ m}$ 处中性带以下 CO 体积分数急剧降至 722×10^{-6} , 此时 CO 已扩散至进路口并充满回流带, 回流带体积分数云沿进路口方向逐渐缩小; 200 s 时, $x = 10\text{ m}$ 、 $x = 20\text{ m}$ 处 CO 体积分数云较 100 s 时明显缩小, $x = 30\text{ m}$ 、 $x = 40\text{ m}$ 处体积分数云不断增大; 500 s 时, CO 体积分数已低于 508×10^{-6} , 高体积分数云由回流带缓慢移动至中性带; 900 s 时, CO 体积分数已低于 206×10^{-6} , $x = 10\text{ m} \rightarrow x = 40\text{ m}$ 处 CO 体积分数依次增大, 表明对流风流作用下 CO 持续外排; 在 1 800~2 400 s, CO 体积分数进一步下降, 大部分区域体积分数降至 24×10^{-6} 以下, 随着通风时间增加, CO 体积分数的差异变小, 扩散趋于稳定。

实际生产中, 作业工人操作设备时所处的工作空间高度一般小于 2 m。假设腰线所处平面为作业空间的顶面, 则腰线平面上 CO 峰值体积分数的变化如图 7 所示。由图 7 可知: 腰线平面上 $x = 10\text{ m}$ 、 $x = 20\text{ m}$ 处 CO 体积分数在 180~500 s 急剧下降, 780~1 800 s 已低于 24×10^{-6} , 1 800 s 后缓慢下降最终趋于 0; $x = 30\text{ m}$ 、 $x = 40\text{ m}$ 处 CO 体积分数在 120~300 s 急剧上升, 240~540 s 快速下降, 600~900 s 上下波动, 960 s 后缓慢下降至 24×10^{-6} 以下。由此可见: 进路工作空间内 CO 体积分数可在 1 800 s 内降至安全规程限值以下。

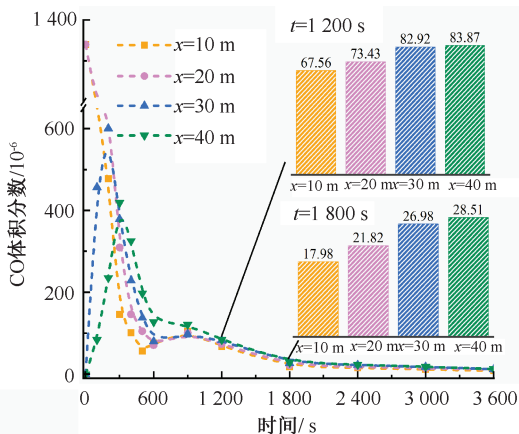


图 7 进路腰线平面上 CO 峰值体积分数的变化
Fig. 7 Variation of CO peak volume fraction at the waist line

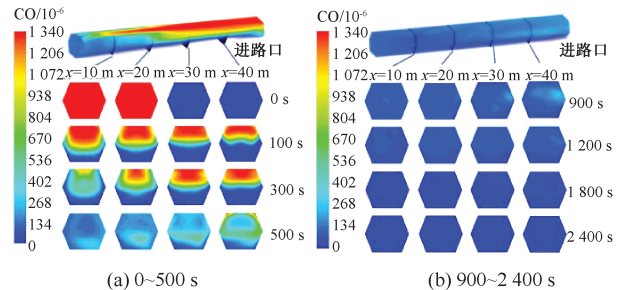


图 6 进路炮烟中 CO 体积分数云
Fig. 6 CO volume fraction of fumes in the drift

2.2.2 炮烟中 NO₂ 的动态扩散特征

图 8 展示了爆破后进路内 NO₂ 体积分数随时间的变化, 由图 8 可知: NO₂ 的扩散特征与 CO 存在明显差异, 由于 NO₂ 密度大于空气, 进路内 NO₂ 总体向下扩散。

100 s 时, NO₂ 充满进风带和中性带, 最高体积分数降至 3.5×10^{-6} , NO₂ 云沿进路口方向小幅增大; 300 s 时, NO₂ 云移至进风带, 云面积较 100 s 时明显缩小, 回流带体积分数已低于 3×10^{-6} ; 500 s 时, NO₂ 被进一步冲淡, 进风带和回流带体积分数分别降至

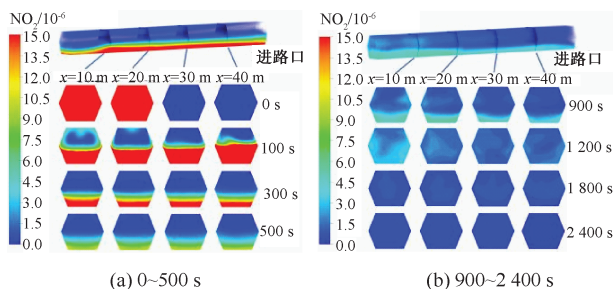


图 8 进路炮烟中 NO₂ 体积分数
Fig. 8 NO₂ volume fraction of fumes in the drift

6.5×10^{-6} 和 2.5×10^{-4} ; 900~1 200 s, 进风带 NO₂ 体积分数和分布范围持续减小, 扩散趋于稳定, $x = 10\text{ m} \rightarrow x = 40$ 上体积分数依次减小, 最高体积分数降至 4.2×10^{-6} ; 随着通风时间延长, NO₂ 体积分数不断下降, 在 1 200~1 800 s 降至 2.5×10^{-6} 以下。由此可见: NO₂ 扩散速度明显快于 CO, 因此, 后文主要分析 CO。

2.3 通风井位置对 CO 扩散的影响

以长 50m 的进路采场为例, 不同通风井位置腰线平面上 CO 体积分数变化如图 9 所示, 由图 9 可知: 通风井位置对腰线平面上 CO 峰值体积分数的较为敏感。1 200 s 时, CO 体积分数较爆破初期大幅下降, 通风井位于 -15、0、15、30、45 m 处的腰线平面上 CO 峰值体积分数分别降至 68×10^{-6} 、 29×10^{-6} 、 145×10^{-6} 、 182×10^{-6} 、 213×10^{-6} , 这表明: 此时采场内大部分 CO 已排出; 1 800s 时, 通风井位于 -15~30 m 处腰线平面上 CO 体积分数已降至 $6.1 \times 10^{-6} \sim 24 \times 10^{-6}$, 位于 45m 处时大部分区域 CO 体积分数已低于 24×10^{-6} , 但极个别区域 CO 体积分数仍维持在 35×10^{-6} 左右; 2 400 s 时, 腰线平面上 CO 均已低于

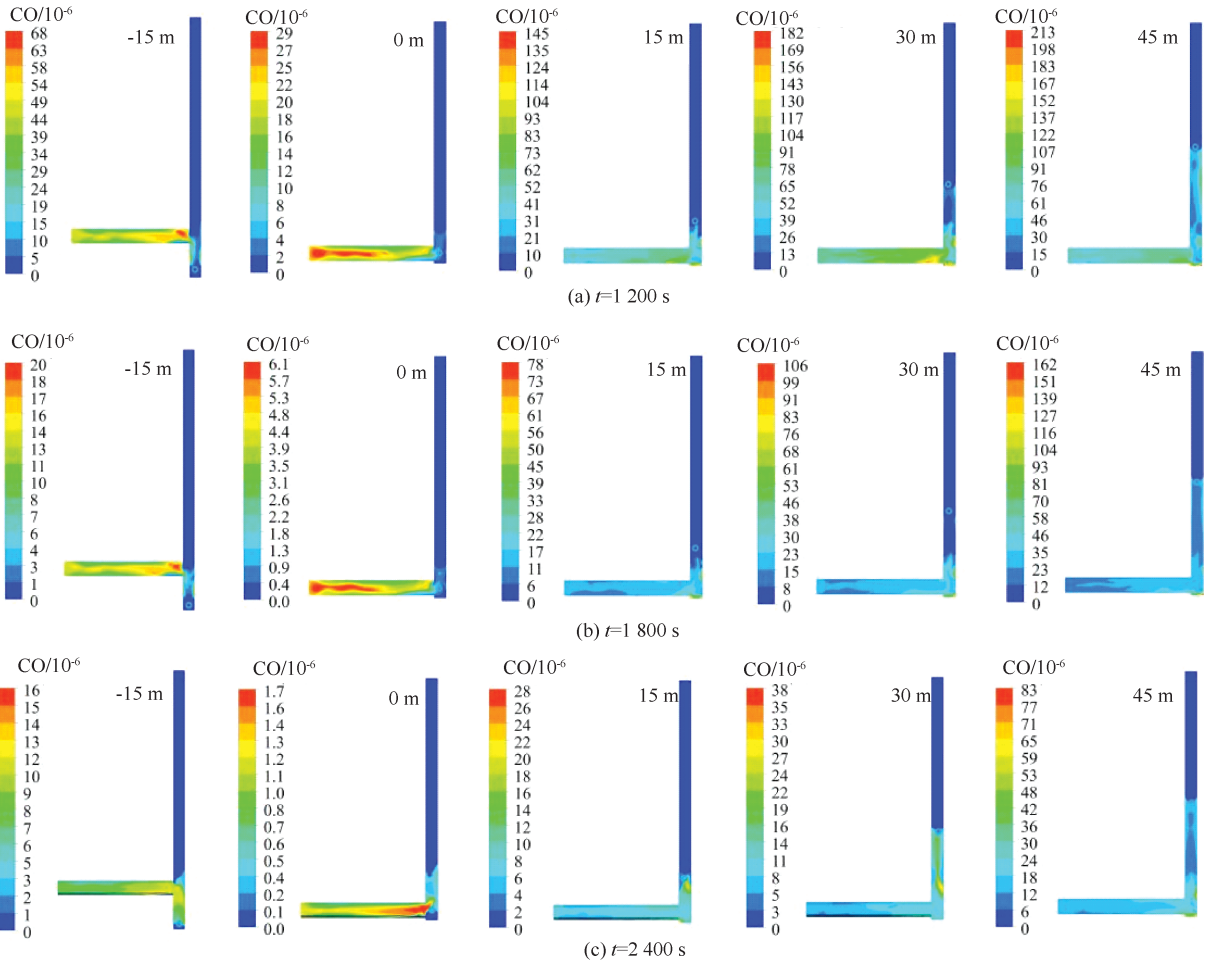


图 9 通风井在不同位置时腰线平面上的 CO 体积分数

Fig. 9 CO volume fraction at the waist line plane of different ventilation shaft

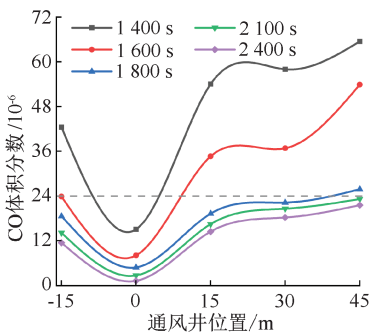


图 10 通风井位置与腰线处 CO 峰值体积分数的关系
Fig. 10 Relationship between the location of ventilation shafts and the peak CO volume fraction at the waistline

20×10^{-6} 。

以 $x = 40 \text{ m}$ 的剖面为例,各采场进路剖面 $x = 40 \text{ m}$ 处腰线上 CO 峰值体积分数随时间的变化如图 10 所示,由图 10 可知:随着通风井与进路口之间距离的增加,CO 扩散明显减慢,但通风井位于 -15 m 处时 CO 扩散速度明显快于 15 m 处的采场。当通

风井与进路口距离小于 40 m 时,腰线上 CO 体积分数可在 1800 s 内降至 24×10^{-6} 以下。因此实际生产中,将通风井与进路口之间的距离控制在 40 m 以内。

2.4 进路长度对 CO 扩散的影响

以通风井距进路口 30 m 的采场为例,不同长度的进路腰线处 CO 体积分数变化如图 11 所示,由图 11 可知:腰线处 CO 体积分数由里向外依次升高,其扩散速度随进路长度增加而逐渐减慢。 1200 s 时,进路腰线处 CO 峰值体积分数降至 $77 \times 10^{-6} \sim 155 \times 10^{-6}$,分层道边壁上 CO 紊流微区不断变小; 1800 s 时, $30 \sim 50 \text{ m}$ 长进路腰线处 CO 体积分数均低于 24×10^{-6} , $60 \sim 70 \text{ m}$ 长进路腰线处 CO 体积分数仍维持在 $29 \times 10^{-6} \sim 44 \times 10^{-6}$; 2400 s 时, 70 m 长进路大部分区域 CO 体积分数均低于 24×10^{-6} 。

不同长度进路 $x = 10 \text{ m}$ 处剖面腰线上 CO 峰值体积分数的变化如图 12 所示,由图 12 可知:进路腰线处 CO 峰值体积分数与通风时间符合对数函数的

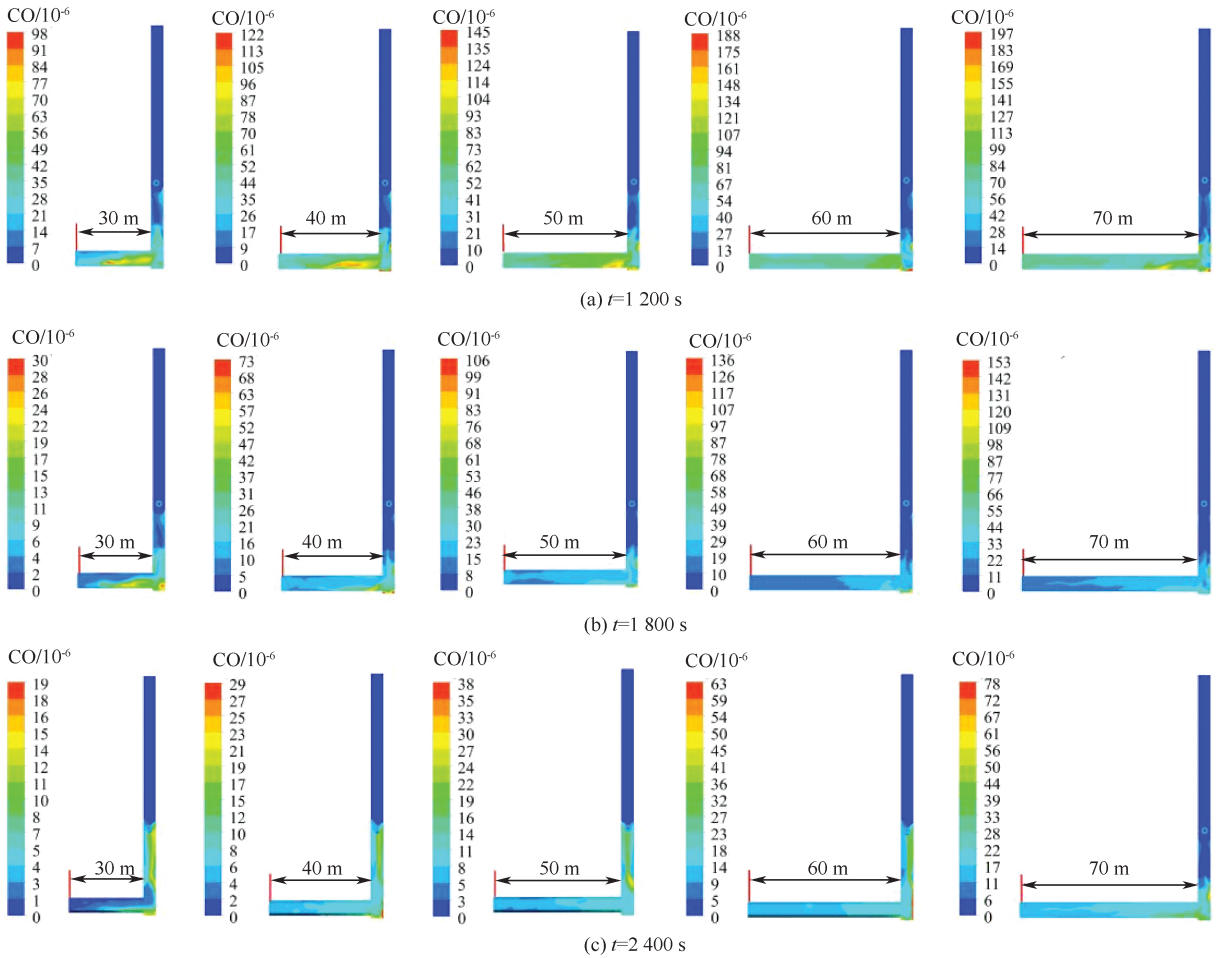


图 11 不同长度进路采场腰线平面上 CO 体积分数
Fig. 11 CO volume fraction on the waist line of different drift length

特征,随着进路长度减小,CO 扩散明显加快,当进路长度<55 m 时,CO 峰值体积分数可在 1 800 s 内降至 24×10^{-6} 以下。因此,实际生产中应将进路的长度控制在 55 m 以内。

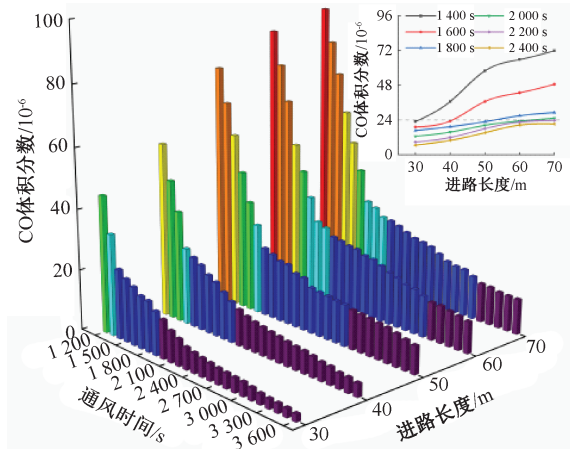


图 12 进路长度与其腰线上 CO 峰值体积分数的关系
Fig. 12 Relationship between the length of drift and peak CO volume fraction at the waistline

3 进路内炮烟现场测试及参数确定

3.1 进路内炮烟监测方案

为验证进路采场炮烟扩散数值模拟结果,以龙首矿中采区 24 行 W01 进路(长度为 50 m,进尺为 36 m)为例,采用气体监测仪对进路爆破后不同时刻炮烟中 CO、NO₂ 和 O₂ 的体积分数进行测试。监测时,在气体监测仪采样泵出口连接橡胶软管,软管末端安装过滤嘴并固定在伸缩杆顶端。监测从爆破后第 10 min 开始,分别在距工作面 1/3、1/2、2/3 处和进路口设置监测面,监测面上设置顶、腰、底 3 个监测点,如图 13 所示。数据采集时间间隔为 10 min,采样持续 50 min。

3.2 进路内炮烟的扩散特征

各监测点 O₂ 体积分数始终维持在 $20 \times 10^{-6} \sim 20.9 \times 10^{-6}$; NO₂ 体积分数在 10 min 内大幅下降,20 min 时均已低于 2.5×10^{-6} ,受篇幅限制,其规律

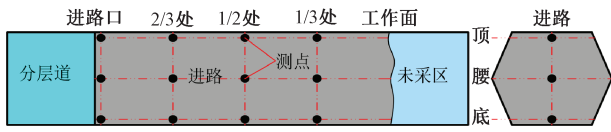


图13 进路炮烟监测点布置

Fig. 13 Blasting fume monitoring points layout

不在赘述。

各监测点 CO 体积分数随时间的变化如图 14 所示,由图 14 可知:进路内 CO 体积分数随高度下降而急剧减小;10 min 时,顶部 CO 体积分数为腰线

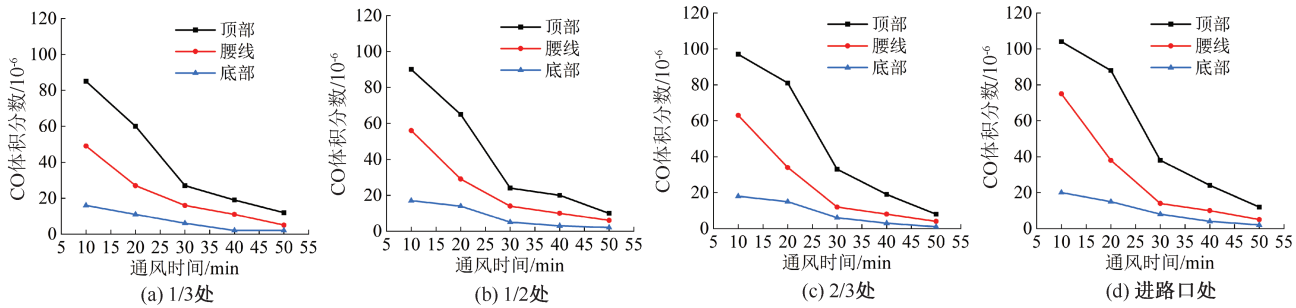


图14 进路不同监测面上 CO 体积分数与时间的关系

Fig. 14 Relationship between CO volume fraction and time at different monitoring sections in the drift

3.3 数值模拟与实测结果对比

以各监测面顶部、腰线和底部 CO 体积体积分数的实测值为横坐标,其对应模拟值为纵坐标,绘制的散点图如图 15 所示,由图 15 可知:各点紧密分布在直线 $y=x$ 附近,表明数值模拟结果能较好预测炮烟中毒害气体的扩散特征。图 15 中个别点离直线 $y=x$ 较远,主要由监测时间迟滞、进路断面规格不标准以及气体监测系统连接管路的阻力等因素引起。

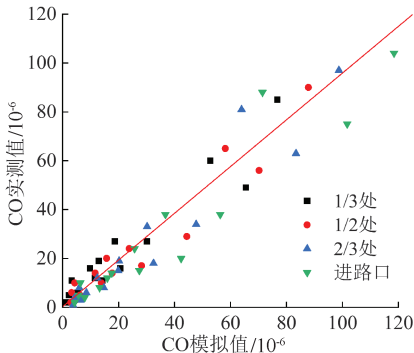


图15 数值模拟与现场实测对比

Fig. 15 Comparison between simulations and measurements

3.4 下向进路采场通风参数确定

以上研究表明:下向进路采场内存在持续对流

处的 1.39~1.73 倍,为底部的 5.2~6.5 倍,峰值体积分分数较爆破瞬间下降 92.2%~93.7%,表明自然通风 10 min 时大部分 CO 已被排出;20 min 时,CO 体积分分数降至 $66 \times 10^{-6} \sim 88 \times 10^{-6}$,随着监测面与工作面距离的增加,CO 体积分分数逐渐上升,表明 CO 持续向外扩散;30 min 时,CO 主要聚集在进路顶部,其体积分分数仍维持在 $24 \times 10^{-6} \sim 38 \times 10^{-6}$,但腰线以下均低于 20×10^{-6} ;30 min 后,CO 扩散速度逐渐变缓并趋于恒定。由此可见:实测结果与数值模拟结果基本吻合。

风流,通风井与进路口之间的距离 ≤ 40 m,且进路长度 ≤ 55 m 时,爆破后自然通风 30 min 采场空气质量可满足《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423-2020)的要求;当进路长度为 55~70 m 时,通风时间应 ≥ 40 min。

4 结论

1) 新鲜风流沿分层道下部持续涌入进路,进路内风流沿底板到达工作面,在工作面附近涌向顶部与顶部炮烟混合形成回流,再沿顶板向外流入通风井,形成“ \cap ”字型持续对流风流。

2) 对流风流作用下,CO 主要沿进路和分层道顶板向外扩散;进路内 CO 体积分分数随高度下降和通风时间延长而减小,水平方向上 CO 体积分分数由里向外先降低后升高; NO_2 集中在进路的进风带和中性带,随风流主要向下、向里扩散,扩散速度明显快于 CO。

3) CO 扩散速度随通风井与进路口距离、进路长度的增加而逐渐减慢,通风井位于进路内侧时扩散效果优于外侧;炮烟的数值模拟结果与现场测试结果与相吻合。

4) 通风井与进路口之间的距离、进路长度分别控制在 40 和 55 m 内可确保生产作业的安全;当进

路长度为 55~70 m 时,应采取延长通风时间或辅助通风等措施保障采场通风质量。

参 考 文 献

- [1] 薛希龙,孙鹏程,武拴军,等.粗骨料纤维充填体的力学特性与能量损伤演变规律[J].中国有色金属学报,2024,34(7):2476-2490.
XUE Xilong, SUN Pengcheng, WU Shuanjun, et al. Mechanical properties and energy damage evolution law of coarse aggregate fiber backfill[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(7): 2476-2490.
- [2] 金龙哲,郭敬中,李刚,等.金属矿山采场爆破尘毒防控技术研究进展及展望[J].金属矿山,2021(1):120-134.
JIN Longzhe, GUO Jingzhong, LI Gang, et al. Study progress and prospect on prevention and control technology of blasting dust and poison in metal mine stope[J]. Metal Mine, 2021(1): 120-134.
- [3] 陈赞成,杨鹏,吕文生,等.高寒矿井穿脉巷道掘进炮烟扩散规律的数值模拟[J].北京科技大学学报,2011,33(5):521-525.
CHEN Zancheng, YANG Peng, LYU Wensheng, et al. Numerical simulation on the diffusion law of blasting fume during roadway tunneling across a vein in an alpine mine[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(5): 521-525.
- [4] 谭香.巷道型采场通风炮烟运动的数值试验[D].南宁:广西大学,2012.
TAN Xiang. Numerical tests on ventilating blasting fume movement in long stope[D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [5] WU Bo, ZHAO Rui, MENG Guowang, et al. A numerical study on CO migration after blasting in high-altitude tunnel by inclined shaft[J]. Scientific Reports, 2022, 12: DOI:10.1038/S41598-022-18995-Y.
- [6] CHANG Xiaoke, CHAI Junrui, LUO Jipeng, et al. Tunnel ventilation during construction and diffusion of hazardous gases studied by numerical simulations[J]. Building and Environment, 2020, 177: DOI: 10.1016/j. buildenv. 2020.106902.
- [7] LIU Qiang, NIE Wen, HUA Yun, et al. Research on tunnel ventilation systems: dust diffusion and pollution behaviour by air curtains based on CFD technology and field measurement[J]. Building and Environment, 2019, 147: 444-460.
- [8] HUA Yun, NIE Wen, CAI Peng, et al. Pattern characterization concerning spatial and temporal evolution of dust pollution associated with two typical ventilation methods at fully mechanized excavation faces in rock tunnels[J]. Powder Technology, 2018, 334:117-131.
- [9] 曹杨.金属矿采掘爆破炮烟成分影响因素分析与扩散规律及控制[D].北京:北京科技大学,2019.
CAO Yang. Analysis to influence factors to constituents of blasting fume and its dispersion law at stope and heading and control in metal mine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019.
- [10] 陶发玉,陶云波,黄春云.基于Fluent模拟的龙首矿下向进路采矿炮烟扩散规律研究[J].金属矿山,2022(8):232-238.
TAO Fayu, TAO Yunbo, HUANG Chunyun. Fluent-based simulation of gun smoke diffusion from single-head approach in Longshou mine[J]. Metal Mine, 2022(8): 232-238.
- [11] FENG Xue, JIANG Zhongan, ZHANG Guoliang, et al. Study on CO diffusion law and concentration distribution function under ventilation after blasting in high-altitude tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 220: DOI:10.1016/j. jweia. 2021.104871.
- [12] 张美长,祁云,汪伟,等.特厚煤层分层开采的自燃危险区域演化特征[J].中国安全科学学报,2024,34(8):147-154.
ZHANG Meichang, QI Yun, WANG Wei, et al. Evolution characteristics of spontaneous combustion hazard zone in layered mining of extra thick coal seams[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 147-154.
- [13] 陈星宇,吴剑,任松,等.高海拔隧道施工期污染物扩散规律[J].浙江大学学报:工学版,2024,58(1):176-187.
CHEN Xingyu, WU Jian, REN Song, et al. Pollutant diffusion law during high-altitude tunnel construction[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2024, 58(1): 176-187.
- [14] HUANG Rui, SHEN Xue, WANG Bing, et al. Migration characteristics of CO under forced ventilation after excavation roadway blasting: a case study in a plateau mine[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267: DOI:10.1016/j. jclepro. 2020.122094.
- [15] 拜生学.龙首矿采场通风方案的研究[J].中国安全科学学报,1998,8(增1):124-129.
BAI Shengxue. Study on the ventilation protecel of down stope in longshou mine[J]. China Safety Science Journal, 1998, 8(S1): 124-129.

作者简介:薛希龙(1985—),男,甘肃金昌人,博士,副教授,主要从事采矿技术、矿山充填与固废处置等方面研究。E-mail:xxl3305@126.com。

