

刘星魁. 煤巷高冒区自燃升温特征的数值模拟[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(3):1-6. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.001

LIU X K. Numerical Simulation Study of Heating up Features During Spontaneous Combustion in Coal Roadway Caving Zoo[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(3):1-6. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.001

煤巷高冒区自燃升温特征的数值模拟

刘星魁

(河南工程学院 安全工程学院,河南 郑州 451191)

摘要:为了了解煤巷中高冒区由自燃引起的温度变化规律,利用数值方法分析了高冒区内漏风趋势,以及 100 m 长度煤巷温度受高冒区自燃的影响,并与热成像采集数据进行了比对.结果表明:迂回进出高冒区的漏风引起温度上升,高温区位置与以漏风风速标准划分的易自燃区吻合;高冒区自燃会沿风向引起下游碎煤同时升温,并连成一片;充分供氧前,风速提高会加快高冒区升温速率,充分供氧后,则反之,而孔隙率对升温速率影响仅体现出单调增减关系.依据研究结论,控制煤巷自燃首先应对高冒区及时密闭,完全密闭情况下可显著降低高冒区内温度,并防止由自燃衍生出的二次高温区,条件允许时应尽量延长密闭墙长度.

关键词:高冒区;漏风;煤巷;温度;下游

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)01-0001-06

Numerical Simulation Study of Heating up Features During Spontaneous Combustion in Coal Roadway Caving Zoo

LIU Xingkui

(College of Safety Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: Aiming at studying heating up features during spontaneous combustion in coal roadway caving zoo, the numerical simulation method is used to analyze the caving zoo air leakage direction and its influence on 100m coal roadway. Results are also companied with thermal imager data. The computation results indicate that heating up reason is the air leakage which detours into and out the caving zoo, and the high temperture zoo positon also fits the easy combusition area which is divided by air leakage velocity standard. The spontaneous combustion in caving zoo can lead to broken coal heating up in downstream along wind, and these two areas will be connected into one piece. Before adequate oxygen supply, increasing wind velocity can speed up heating up rate in caving zoo and reverse effect results exist after it, and porosity only reflects monotone decreasing effect to the heating up rate. According to the research conclusion, the caving zoo should be airtight first when controlling coal roadway spontaneous combustion, obturation can decrease temperature in caving zoo and prevent second high temperature zoo which is induced by caving zoo, finally the obturation should extend as long as possible when adaptive condition permits.

Keywords: caving zoo; air leakage; coal roadway; temperature; downstream

收稿日期:2021-01-11

基金项目:河南省高等学校重点科研项目资助(19A620001)

*通信作者, E-mail: 26638587@qq.com

煤自然发火一直是煤矿井下的重大危险源,历年来由煤自燃衍生出的火灾甚至爆炸事故不胜枚举^[1-2].以往井下煤自燃主要集中在采空区周边,灾害隐蔽难以发现,反复性强,如不及时发现易给煤矿带来重大损失.与之对应的,大量文献针对采空区自燃进行过深入研究,得到了“三带”划分标准、升温规律、预防措施等积极有益成果^[3-6].

但随着综采放顶煤开采工艺的推广,巷道在特厚煤层中掘进,与岩石的力学性质不同,煤层在开挖掘进过程中极易受到剪应力破坏,在煤巷周边形成大量碎煤,或在局部形成高冒^[7],高冒区内部存在大量破碎煤块,且与通风巷道相连导致新鲜空气渗入,由于巷道服役期较长,高冒区碎煤在半密闭空间内与氧气发生接触,发生氧化反应并逐渐释放出热量,当热量无法被导热和漏风对流及时带走时,碎煤温度即开始上升,形成阴燃,甚至明火.对于高冒区自燃的研究,文献[8]从实验的角度利用标志性气体判断当前燃烧状态,并通过红外热成像仪测量分析火源范围.文献[9-11]取高冒区局部为分析对象,采用二维或三维数值模型研究高冒区内流场分布,并对相应安全措施效果进行了讨论.文献[12]将整个煤巷纳入分析范围,研究了整条煤巷周边破碎虚煤的漏风状态,并对高冒区自燃带位置进行了划分.本文同样将整条煤巷作为研究对象,避免近距离进风边界对重点高冒区内部流场的干扰,在详细讨论高冒区内的动态温度变化过程及相关影响因素的同时,了解高冒区升温对周围碎煤的影响,为防止煤巷自燃发生提供施工参考.

1 煤巷高冒区自燃环境分析及相应数值模型

漏风是煤自燃形成的必要条件,煤层在原始状态下较为密实,难以形成漏风.但经开挖后,煤巷周围卸压变形,在上部易形成破碎顶煤,甚至局部与煤层或岩层发生离层,形成高冒区.其内部易产生漏风,具备自燃环境,自燃速率与高冒区形状规模,漏风风速,煤体破碎程度相关.

高冒区形成后,巷道空气逐渐灌入内部,与破碎煤体发生氧化,放出热量.一部分热量由漏风带走,另一部分积蓄在氧化位置附近,当散热量显著小于放热量时,煤体温度上升形成自燃,最终导致阴燃甚至明火.因此应同时考虑高冒区内部流场与温度场的分布规律.巷道常规风速下,高冒区内漏风强度相对很小,倾向于层流状态,考虑热风压后渗流方程主要为

$$(-\Delta p + \bar{\rho}g) - g\bar{\rho}\beta(T - \bar{T}) = \mu \frac{V}{k}. \quad (1)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为温度为 \bar{T} 时的气体密度,kg/m³; $\bar{\beta}$ 为由状态方程决定的压强为 p 时的气体膨胀系数, $\bar{\beta} = -\frac{1}{\rho}(\frac{\partial \rho}{\partial T})_p$; ρ 为空气温度为 T 时的气体密度,kg/m³; Δp 为破碎煤体中某一点两侧压差,Pa; k 为松散煤体

渗透率,按照 Carmen-Kozeny 关系, $k = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2}$ (其中, ε 为孔隙率, D_p 为煤体颗粒粒径,这里将破碎煤体的粒径取为30 mm); μ 为空气动力黏度,取 1.789×10^{-5} Pa·s; V 为漏风风速,m/s.

空气在煤体内部的消耗运移除去物理吸附、化学吸附和化学反应外,还受对流扩散影响.其质量方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho C_{O_2}}{\partial t} + \nabla \rho C_{O_2} V = \nabla \rho D_{O_2} \Delta C_{O_2} - r_{O_2}; \\ C_{O_2}|_{F_1} = C_0; \\ C_{O_2}|_{l=0} = C_a. \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_{O_2} 为氧气质量分数,%; D_{O_2} 为氧气扩散系数,m²/s; r_{O_2} 为氧化反应速率,kmol/(m³·s); C_0 为巷道新鲜空气的质量分数,21%; C_a 为初始时刻煤体内氧气的质量分数,%; r_{O_2} 为煤氧化反应速率:

$$r_{O_2} = C'_{O_2} A \exp(-E/RT). \quad (3)$$

式中: C'_{O_2} 为氧气摩尔浓度,kmol/m³; T 为环境温度,K; R 为气体普适常数,8.314 J/(mol·K); A 为指前因子,与化学反应性质有关常数,s⁻¹; E 为活化能,同煤的破碎程度、氧化能力有关.对于煤氧反应,根据目前的实验数据统计,指前因子基本介于 $1 \times 10^5 \sim 7 \times 10^5$ s⁻¹,而活化能一般为12~90 kJ/mol.

假定煤体内部热源仅为氧化放热,散热依靠导热和对流,则温度方程为

$$\begin{cases} \rho_{\text{coal}} c_{\text{coal}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \lambda_{\text{whole}} \Delta T + (1 - \varepsilon) q - h(T_{\text{coal}} - T_{\text{air}}); \\ \lambda_{\text{whole}} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{F_2} = \bar{q}, T \Big|_{F_1} = T_0; \\ \lambda_{\text{whole}} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{F_3} = h(T_{\text{coal}} - T_{\text{air}}), T \Big|_{t=0} = T_0. \end{cases} \quad (4)$$

式中: T 为环境温度,K; ρ_{coal} 为破碎煤体密度, kg/m^3 ; c_{coal} 为破碎煤体等效热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; λ_{whole} 为煤与空气的等效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\lambda_{\text{whole}} = \varepsilon \lambda_{\text{air}} + (1 - \varepsilon) \lambda_{\text{coal}}$ (λ_{air} 和 λ_{coal} 为空气和煤的导热系数), $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; \bar{q} 为高温煤体向周围的导热量, W/m ; h 为空气与煤体之间的换热系数,由内部计算结果决定; q 为单位体积单位时间内煤氧化反应放出的热量, W/m^3 , $q = \Delta Q r_{\text{O}_2}$ (ΔQ 为标准状态下煤样反应每消耗1 mol 氧气后放出的热量, kJ/mol);在煤样具有极好的氧化能力和环境的条件下可以达到 $560 \text{ kJ}/\text{mol}$,依据实验结果,大多数文献取值介于 $220 \sim 380 \text{ kJ}/\text{mol}$ 之间,本文以东滩煤矿3#煤层煤热物性为基础^[13],联立式(1)~式(4)进行耦合求解,热物性参数取值见表1.

表1 煤体热物性参数取值

热物性参数	取值
煤密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.320
煤比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1 530
扩散系数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2×10^{-5}
活化能/ $(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	64
指前因子/ s^{-1}	7×10^5
导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.199 8
标准放热/ $(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	310

2 结果及讨论

某煤巷在 9.5 m 特厚煤层中开挖,巷道高度 2.5 m ,顶煤破碎后形成虚煤,上部为原始实煤,二者孔隙率分别为 0.05 和 0.30 .在巷道 35 m 处顶煤严重隆起形成一处高冒区.巷道风速为 $2 \sim 7 \text{ m}/\text{s}$,风流温度为 300 K ,从左至右在巷道内通过,并渗入虚煤中,构成自燃环境.由于煤巷长度远大于宽度,整个模型可简化为二维,以 100 m 巷道为研究对象.物理模型如图1所示.

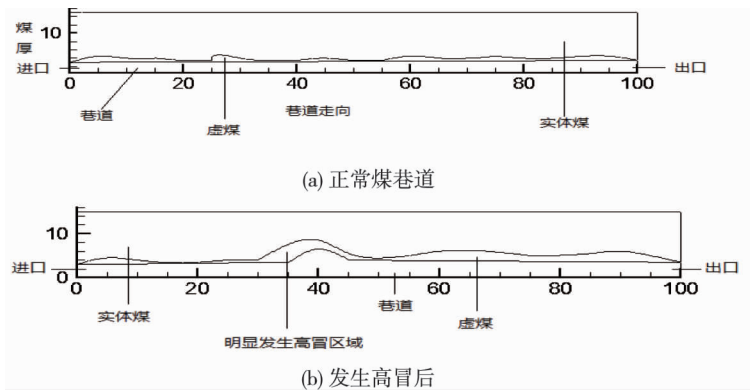


图1 煤巷高冒区物理模型

将各类边界条件,表1中热物性参数和物理模型导入计算流体力学软件 FLUENT,巷道内引入标准的 κ, ε 双方程湍流模型,并与式(1)~式(4)联立求解,对流项和扩散项分别采用二阶迎风和中心差分格式离散,速度与压力的耦合采用 SIMPLE 算法.

首先将高冒区局部作为分析对象,不同于采空区流场,高冒区贴近巷道,且几何规模相对非常小,氧气极容易充满整个空间,所以只取漏风速度进行分析,如图2a所示.在贴近漏风边界,漏风速度较大,深入高冒区后,漏风受碎煤空隙逐层阻碍,速度降低,参照当前自燃带的划分标准(漏风风速 $0.001 \sim 0.004 \text{ m}/\text{s}$),分别沿走向 5 m 长度,沿高度 4 m 长度的高冒区深部存在相当面积的易自燃区域,区域面积趋于由迎风向背风递减,此处易为自燃初始点位.图2b显示高冒区内漏风风向的趋势,从图2b中得出,空气自漏风边界进入高冒区后,漏风趋势分为3部分,一部分直接向上进入上覆实煤,一部分发生扰流后返回巷道,结合图1,最后一部分顺风向流向下游虚煤,由于高冒区和下游虚煤破碎程度较高,因此沿高冒区和碎煤漏风路径

上易产生自燃高温区。

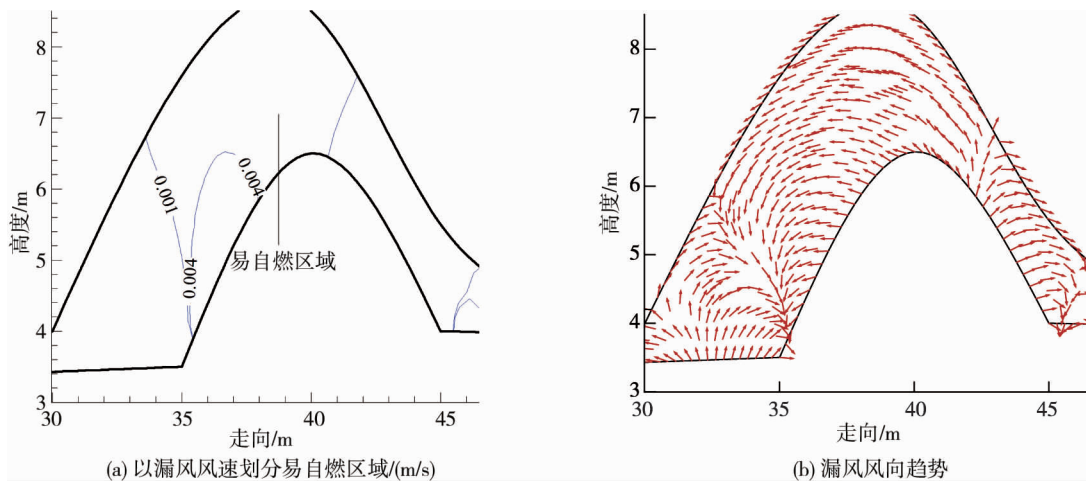


图2 煤巷高冒区流场结果

然后以整个煤巷为研究对象,对温度动态变化过程和分布进一步分析,如图3所示.沿走向看,前14 d内,整个煤巷温度变化非常缓慢,最高温度位于高冒区内,位置非常接近图1a中的易自燃区域,升温幅度仅有6 K,但随后升温速率逐渐加快,2 d后温度上升约为3 K,同时在风向下游虚碎煤处陆续出现第二高温区,这是由于图2a中显示高冒区中漏风会沿风向流向下游,初期影响不大,但随着高冒区温度上升,大量空气被加热后源源不断进入下游虚碎煤中,加速了此处的氧化速率和升温幅度,发展迅速,在18 d时高冒区和下游温度几乎达到一致.而到了20 d时,下游虚碎煤处温度甚至超过了高冒区,二者自燃连成一片,危险程度远高于单一高冒区自燃.沿高度看,随着温度的上升,高温区有向上发展的趋势,初期顶部煤区还处于常温状态,但16 d后大面积顶煤开始被加热,此时在高温区附近上升趋势非常明显,在40,60,80 m处,上覆煤层温度均高于其他区域,但20 d后,几乎所有区域的顶煤都出现上升,煤巷自燃程度越高,高温面积会向上发展,增加了火源侦测的难度.

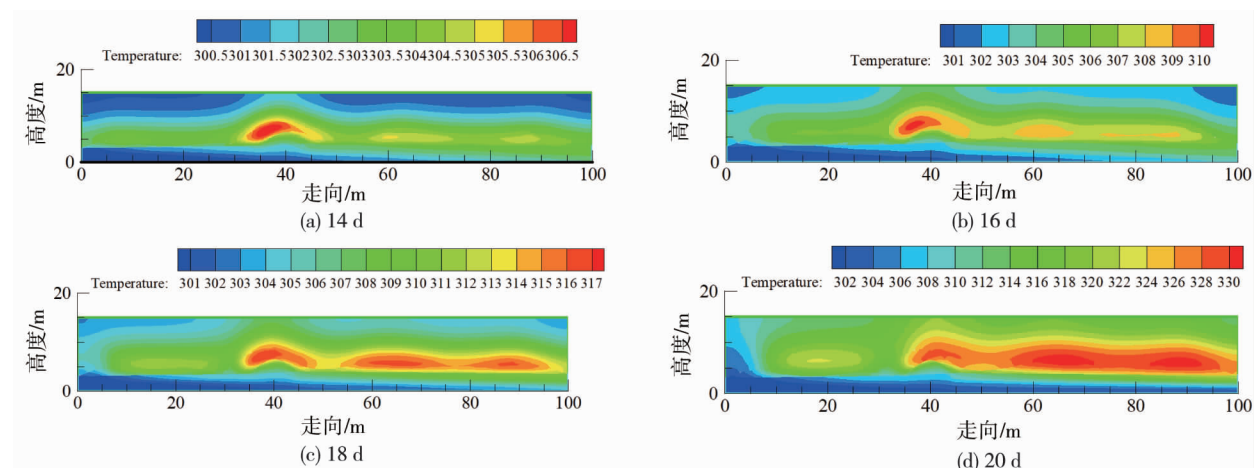


图3 煤巷温度计算结果

出于安全性和可操作性考虑,无法将模拟结果与现场进行真正非稳态比对,这里仅将图3d中的温度稳态分布与实际情况进行对比.为了验证文中温度模拟的准确性,在100 m煤巷内沿走向每10 m取1个测点,将模拟结果与红外成像仪测温结果进行对比,如图4所示.从图4中可知,除2个点位二者差距较大外,其他各测点所呈现的趋势相近,说明温度模拟结果具有相当可信性,在此基础上可进行影响因素变量分析.

通常情况下巷道风速不会超过7 m/s,高冒区形成后孔隙率不会超过0.4,因此尝试选取7种不同风速,3种不同的孔隙率,以333 K(60 ℃)为临界温度,观察高冒区内部最高温度达成时间,在21次模拟后

得到图 5 所示.从图 5 中看出,孔隙率越大,即高冒区破碎程度越大,供氧容易,达到临界温度的时间越短,7 种风速下的孔隙率为 0.2 的升温速率均快于其他两种.而在同一孔隙率下,模型中风速从小到大大过渡时存在拐点区间,由于高冒区规模不大,并贴近巷道,供氧充分,但同时又强烈受到漏风散热的影响.在小风速下,随着风速的增高,高冒区内供氧加剧,升温速率加快,但如果高冒区内已经充分供氧,再增加风速,会增大散热量,延缓升温速率.图 3 中温度结果为风速 3 m/s、孔隙率 0.3 下所得,为图 5 中的拐点区间,可考虑作为最危险的情况.孔隙率和巷道风速均可决定高冒区内的供氧和散热,这里孔隙率的增减对升温速率仅存在单调增减作用,而巷道风速却呈现较复杂的双向影响,这可能与模型几何规模与煤质有关,内部影响机制需要进一步研究.

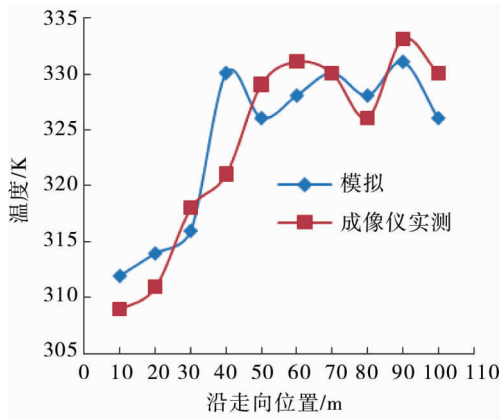


图 4 温度模拟与实测对比结果

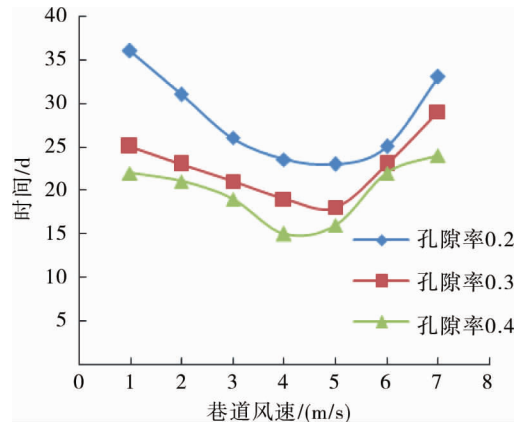


图 5 达到 333 K 所需时间的模拟结果

由图 3 所知:高冒区为煤巷自燃发起点,随着高冒区温度升高,逐渐衍生出下游自燃区,并连成一片,且巷道注氮会显著污染工作环境,可操作性较差.因此首先考虑将高冒区封闭,图 6a 为高冒区密闭墙位置示意,密闭墙阻力系数达到 110^{11} m^2 ,以模拟高冒区完全封闭后的工况.图 6b 为相同边界条件下 20 d 的温度计算结果,与图 3 d 相比,高冒区温度下降 15 K,更明显的是下游大面积 2 次高温区并未出现,高冒区对整个煤巷的温度分布减弱,自燃危险性大幅降低.但实际操作中,由于煤巷持续变形,定期维护不利等情况,密闭墙时有裂纹发生,产生漏风.将密闭墙阻力系数降低 2 个数量级后得到密闭不严的温度计算结果,如图 6c 所示.当密闭墙效果下降时,会重新有大量空气出入高冒区,加热后的空气顺风向流出后,但经密闭墙阻碍后动能减少,影响范围降低,虽然下游重新出现高温区,但二者并未连成一片,自燃危险性小于图 3d.因此,防治煤巷自燃过程中,工作要务首先应对明显高冒区域进行完全封闭,并持续对密闭墙性能进行监测,当密闭效果下降时,存在多处同时自燃的风险.如条件适宜,可延长密闭墙长度,配合新型无机发泡胶凝材料取得更佳防火效果.

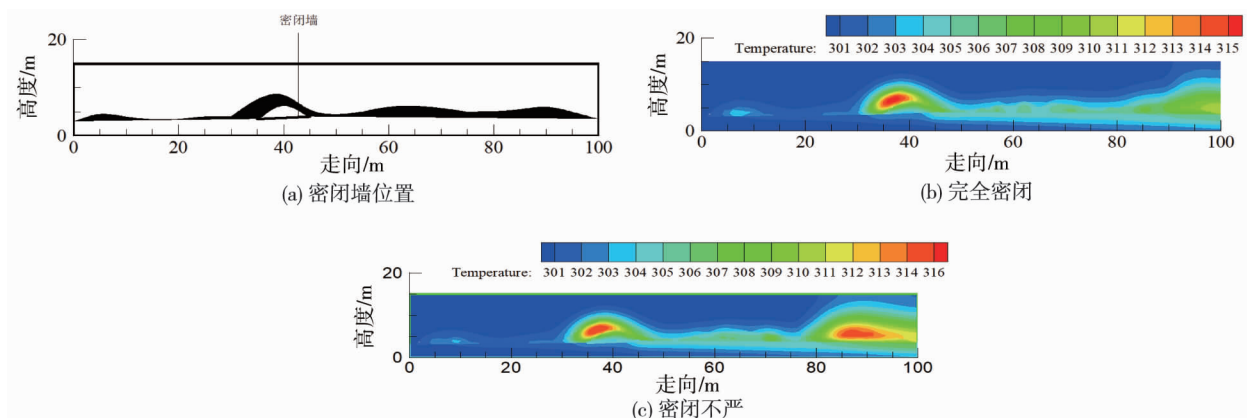


图 6 高冒区密闭后的温度计算结果

3 结论

1)以漏风风速 $0.001\sim 0.004\text{ m/s}$ 为标准,深入煤巷高冒区内约 1 m 存在某一易自燃区域,此处温度显著高于煤巷各处.高冒区内漏风趋势大致分为3个部分,其中迂回出入高冒区和顺风向在碎煤中传递的漏风为自燃产生的主要原因.

2)从整个煤巷看,明显高冒处为自燃发起点,当高冒区内长期处于升温状态时,会加热漏风,引发多处碎煤同时自燃.煤巷自燃时受热压力的影响温度分布有整体上移的趋势,增加了火源侦测的难度.

3)高冒区内的供氧和散热由巷道风速和孔隙率决定,在本文所设边界条件下,孔隙度越大,升温速率加快,并未体现出强化散热作用.而增加风速后,高冒区内呈现先加快后减慢的趋势.临界风速下,供氧缺乏,增加风速加速升温,临界风速上供氧充分,增加风速减缓升温.

4)控制煤巷自燃首先应对高冒区及时密闭,完全密闭情况下可显著降低高冒区内温度,并防止由自燃衍生出的2次高温区,条件允许时应尽量延长密闭墙长度.

参考文献:

- [1] 陈晓坤,于志金.煤自燃早期预报指标的研究与应用[J].煤炭科学技术,2016,44(10):13-17.
- [2] 刘晨,谢军,辛林.煤自燃预测预报理论及技术研究综述[J].矿业安全与环保,2019,46(3):92-95.
- [3] 徐青云.近距离煤层采空区瓦斯抽采对注氮效果的影响研究[J].煤矿安全,2019,50(8):162-165.
- [4] 曹乃夫.三道沟煤矿综采工作面采空区自燃“三带”划分与漏风测定[J].煤矿安全,2019,50(6):192-196.
- [5] 桂小红,蔚世鹏.综放工作面Y型通风方式下的采空区自燃“三带”研究[J].煤炭工程,2019,51(2):49-53.
- [6] 李喜员,沈广辉,徐成林,等.二氧化碳抑制采空区进风侧浮煤剧烈氧化技术[J].煤矿安全,2018,49(10):72-75.
- [7] 武光辉,袁西亚,何涛,等.高瓦斯易自燃煤层巷道高冒火灾防治技术[J].煤矿安全,2015,46(3):74-76.
- [8] 谭波,朱红青,王海燕,等.巷道高冒封闭火区燃烧状态及表面温度场演变规律[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(3):946-951.
- [9] 张东海,杨胜强,王钦方,等.煤巷高冒区松散煤体自然发火的数值模拟研究[J].中国矿业大学学报,2006(6):757-761.
- [10] Zhang H, Gao E. 3D numerical simulation and influencing factors of loose top coal spontaneous combustion in roadway[J]. International Journal of Heat and Technology, 2015, 33(3):91-96.
- [11] 朱红青,刘星魁.顶煤自燃危险性分析及注氮防火的理论研究[J].煤炭学报,2012,37(6):1015-1020.
- [12] 刘星魁,韩红强.煤巷高冒区自燃危险区域分布特征的数值分析[J].煤炭技术,2014,33(4):8-11.
- [13] 邓军,徐精彩,李莉.松散煤体中氧气扩散系数的实验研究[J].中国矿业大学学报,2003,32(2):145-147.