

煤矿爆炸后巷道内温度变化规律

吕伟新, 刘 宝, 王 磊

(哈尔滨工业大学 机器人国家重点实验室, 150001 哈尔滨)

摘 要: 为了研究煤矿爆炸后巷道内温度的变化, 建立煤矿巷道爆炸后的简化数学物理模型. 以热力学方程为基础, 分析对流系数、密度对温度变化过程的影响, 通过迭代计算得到了巷道降温曲线; 为了避免因简化对流换热模型引入过大误差, 又采用 Fluent 软件进行非稳态气固耦合换热分析, 得到巷道内温度变化的过程信息. 两种方法得到的结果相吻合, 分析了爆炸后巷道内温度的变化规律, 结果表明: 爆炸后巷道内的高温不会持续很长时间, 可为优化矿用救生舱以及避难硐室的设计参数提供参考.

关键词: 煤矿爆炸; 矿用救生舱; 避难硐室; 温度场计算; 气固耦合换热

中图分类号: TD-0

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)05-0108-06

Research on temperature changing law after coalmine explosion in roadway

LÜ Weixin, LIU Bao, WANG Lei

(Harbin Institute of Technology, State Key Laboratory of Robotics and System, 150001 Harbin, China)

Abstract: To study the temperature changing process inside roadway after coalmine explosion, this paper built a simplified mathematical physical model of roadway after coalmine explosion, analyzed the effect of convection coefficient and density on the basis of thermodynamic equation, and got the curve of air temperature changing. To avoid generating excessive error because of simplifying the convection heat transfer model, the unsteady gas-solid coupling heat transfer was analyzed with Fluent to obtain the process information of temperature changing in roadway. The two curves match each other highly. The results show that the period of high temperature inside roadway after explosion won't last long, which provides reference for the parameter design of mine refuge chamber and rescue capsule.

Key words: coalmine explosion; mine refuge chamber; rescue capsule; temperature field-computation; gas-solid coupling heat transfer

我国煤矿事故率高, 国家高度重视, 力争在短期内全面为煤矿配备避难硐室、救生舱等设备, 全面提高我国煤矿安全技术水平^[1-4]. 这些设备的建造要符合矿井的实际情况, 才能做到安全、经济、实用. 特别是救生舱, 要方便迁移、造价足够合理才能达到普及应用. 这些大型救生设施的防热降温要求是一个重要技术指标, 有必要弄清其实际工作环境的温度状况. 目前该方面的资料很少, 大部分研究局限于爆炸瞬时的传播规律^[5-7], 没有展现巷道环境随着时间的迁移所发生变化的规

律. 通过实验实测该规律成本很高, 而且影响换热条件的多变性决定了没有理论分析为基础的试验数据也难以移植引用. 况且国内尚没有现成的与生产矿井截面相当的大型实验巷道场所.

本文试图通过仿真研究探索煤矿爆炸后巷道内的温度变化规律, 从而为救生舱等避难设备的防热性能指标提供参考.

1 爆炸后降温过程的迭代法计算

降温过程中, 圆形截面巷道的散热能力弱于实际的拱形、矩形截面巷道, 故选择圆形截面巷道作为模型, 即可简化算法, 也具有较高的安全系数.

收稿日期: 2012-04-10.

作者简介: 吕伟新(1962—), 男, 教授.

通信作者: 刘宝, liubao2182@126.com.

不考虑辐射影响,如果考虑辐射作用,巷道内温度降低会更快,在不考虑辐射的情况下,相当于增大安全系数。

由于爆炸冲击和重力的作用,巷道内部的空气将进行较充分的对流换热,为简化计算假设空气的温度是均匀一致的,空气与巷道壁面只发生对流传热. 空气温度变化过程中的热流密度等于空气与巷道壁面发生对流的热流密度:

$$\pi r_0^2 \rho_{\text{气}} c_{\text{气}} \frac{dt_{\text{气}}}{d\tau} = \pi r_0^2 \rho_{\text{气}} c_{\text{气}} \frac{t_{\text{气}}^{(i+1)} - t_{\text{气}}^{(i)}}{\Delta\tau} = -h2\pi r_0(t_{\text{气}}^{(i)} - t_1^{(i)}). \tag{1}$$

其中: r_0 为巷道半径, $\rho_{\text{气}}, c_{\text{气}}$ 为空气比热容, $\Delta\tau$ 为最小时间微元, $t_{\text{气}}^{(i)}$ 为 i 时刻空气温度, h 为空气和巷道壁面的表面传热系数。

巷道壁面第一层温度变化时的热流密度等于空气与巷道壁面发生对流时的热流密度加上巷道第一层微元与第二层微元发生热交换时的热流密度。

$$\rho_{\text{岩}} c_{\text{岩}} 2\pi r_0 \Delta r \frac{t_1^{(i+1)} - t_1^{(i)}}{\Delta\tau} = \lambda \frac{t_2^{(i)} - t_1^{(i)}}{\Delta r} 2\pi(r_0 + \Delta r) + h2\pi r_0(t_{\text{气}}^{(i)} - t_1^{(i)}). \tag{2}$$

其中: $\rho_{\text{岩}}$ 为岩石密度, $c_{\text{岩}}$ 为岩石比热容, Δr 为巷道壁微元, $t_1^{(i)}$ 代表第一层巷道壁 i 时刻的温度, $t_n^{(i)}$ 代表第 n 层巷道壁面 i 时刻的温度, λ 为岩石的热导率。

巷道壁内柱坐标系下导热微分方程为

$$\frac{\delta t}{\delta \tau} = \alpha \left(\frac{\delta^2 t}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta t}{\delta r} \right). \tag{3}$$

其中 α 为热扩散率, $\alpha = \lambda/(\rho c)$, m^2/s ;

根据式(3)可推出:

$$\rho_{\text{岩}} c_{\text{岩}} \frac{t_n^{(i+1)} - t_n^{(i)}}{\Delta\tau} = \lambda \left(\frac{t_{n+1}^{(i)} - 2t_n^{(i)} + t_{n-1}^{(i)}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_0 + (n-1)\Delta r} \frac{t_{n+1}^{(i)} - t_n^{(i)}}{\Delta r} \right). \tag{4}$$

化简公式(1)、(2)、(4)可得式(5)~(7):

$$t_{\text{气}}^{(i+1)} = (1 - 2F_{\text{气}} \cdot B \cdot \frac{\Delta r}{r_0}) t_{\text{气}}^{(i)} + 2F_{\text{气}} \cdot B \cdot t_1^{(i)} \cdot \frac{\Delta r}{r_0}, \tag{5}$$

$$t_1^{(i+1)} = \left(1 - \frac{r_0 + \Delta r}{r_0} F - F \cdot B \right) t_1^{(i)} + \frac{r_0 + \Delta r}{r_0} F \cdot t_2^{(i)} + F \cdot B \cdot t_{\text{气}}^{(i)}, \tag{6}$$

$$t_n^{(i+1)} = \left\{ 1 - 2F - \frac{\Delta\tau \cdot \lambda}{\rho c [r_0 + (n-1)\Delta r]} \right\} t_n^{(i)} + F(t_{n+1}^{(i)} + t_{n-1}^{(i)}) + F \cdot \frac{\Delta r \cdot t_{n+1}^{(i)}}{r_0 + (n-1)\Delta r}. \tag{7}$$

其中: $F_{\text{气}} = \lambda \cdot \Delta\tau/(\rho_{\text{气}} c_{\text{气}} \Delta r^2)$; $F = \lambda \cdot \Delta\tau/(\rho_{\text{岩}} c_{\text{岩}} \Delta r^2)$; $B = h \cdot \Delta r/\lambda$; F 为傅里叶准则数, 表征无因次时间; B 为比欧准则数, 表征无因次散热系数. 应用公式(5)~(7)即可开始迭代, 其中初始条件: 最小时间微元 $\Delta\tau = 1 \text{ s}$, 时间微元的数目 20 000 个, 巷道半径 $r_0 = 1.8 \text{ m}$, 巷道壁微元 $\Delta r = 0.001 \text{ m}$, 巷道壁微元层数 300 000, 比热容 $c_{\text{气}} = 1\,000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, 岩石密度 $\rho_{\text{岩}} = 1\,500 \text{ kg/m}^3$, 比热容 $c_{\text{岩}} = 300 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 岩石的热导率 $\lambda = 1.3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

巷道内空气的初始温度根据爆炸瞬时温度的研究资料^[6-10]进行确定。

所涉及到的参数受温度影响较严重的是空气密度和空气与巷道壁面的对流换热系数. 降温过程中, 空气和巷道壁面的表面换热系数 h 和空气的密度 $\rho_{\text{气}}$ 随温度发生改变. 而换热系数还受表面粗糙度、材料特性、接触面状况等多种因素影响. 对这两个参数要特别处理。

取气体的初始温度为 1 000 K, 岩石初始温度为 300 K. 假设空气密度为常温下的定常值 $\rho_{\text{气}} = 1.2 \text{ kg/m}^3$, 空气与巷道壁面的对流换热系数分别取 5、10、15、20 $\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, 对流系数拟合值, 可计算出巷道内温度随时间变化的关系曲线(如图 1 所示), 据此可估算出温度变化的范围。

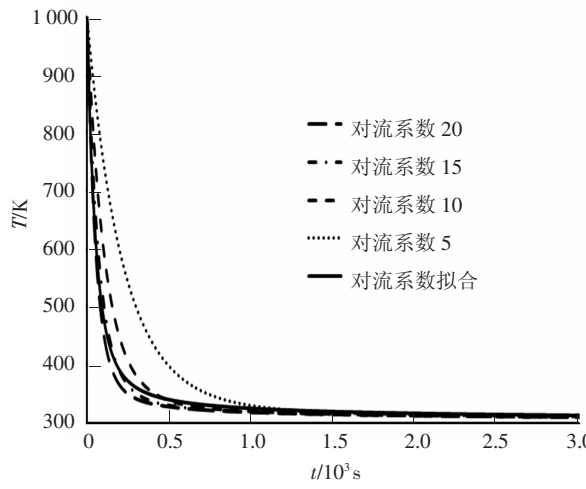


图 1 不同的定常对流系数对散热过程的影响

当气体的初始温度为 2 000 K 时, 巷道内空气温度随时间变化的曲线如图 2 所示. 从两条曲线可以看出, 无论空气初始温度为 1 000 K 还是 2 000 K, 高温时间都不会太长。

可见, 对流系数对散热过程的影响较严重, 不能简单地采用定常值计算。

对流系数 h 值无权威的实验数据可用, 本文依据所采用的模型, 根据 Fluent 导出的换热系数数据, 用 MATLAB 进行高次多项式拟合. 其关系

如图 3 所示.

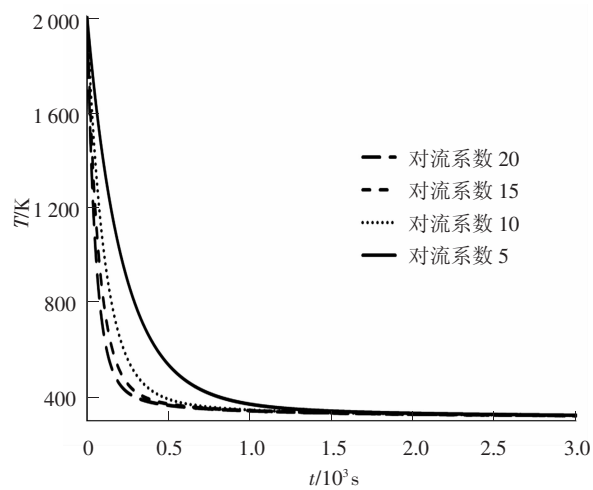


图 2 空气初始温度 2 000 K 不同对流系数空气温度曲线

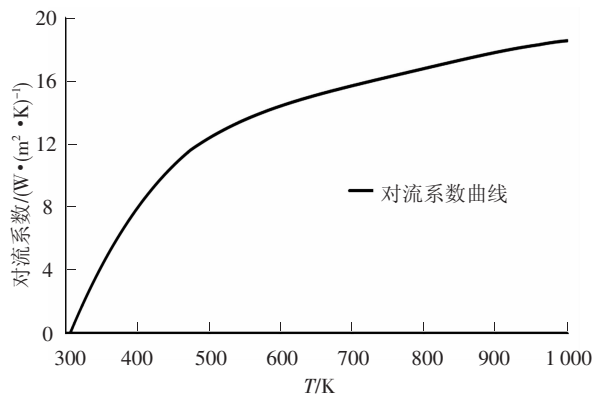


图 3 对流系数关于温度的曲线

空气密度采用 3 种方法进行确定:

1) 根据理想气体关系式进行推算,其中 ρ 为干空气密度, ρ_0 为 0 ℃ 时干空气密度, T 为热力学温度, p 为绝对压力(取 1.01×10^5 Pa).

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{T} \cdot \frac{p}{0.1013}.$$

2) 用高次多项式对权威的实测数据进行拟合,得到密度关于温度的曲线,如图 4 所示.

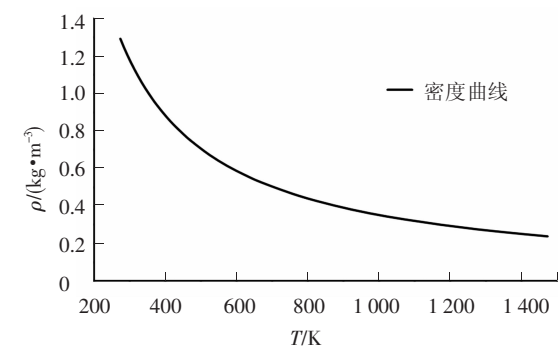


图 4 密度关于温度的曲线

3) 密度取平均值的方法(ρ 取 0.8 kg/m^3)在对流系数使用拟合值的情况下,分别计算得到的

巷道空气温度曲线如图 5 所示.

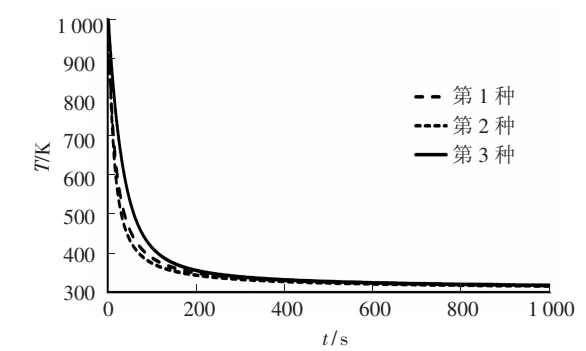


图 5 三种密度处理方式对巷道内空气温度变化过程的影响

可见,空气密度数据的利用方式对散热过程的高温持续时间影响比对流系数的影响小. 以下计算以第 2 种处理方法为准.

把上述方法确定的换热系数和空气密度的关系表达式带入迭代方程,利用 MATLAB 计算得到巷道内空气温度及巷道壁面温度随时间的变化曲线,如图 6、7 所示.

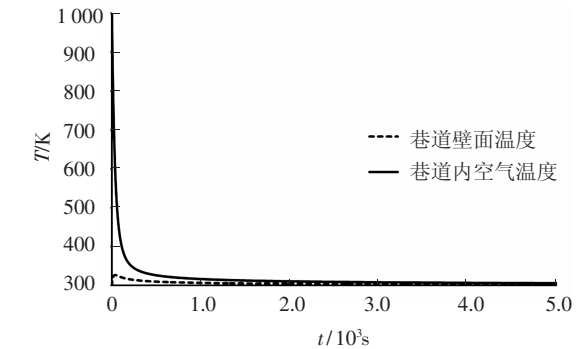


图 6 巷道内空气及巷道壁面温度随时间变化曲线

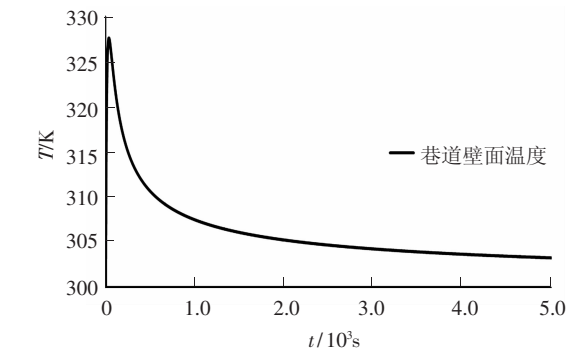


图 7 巷道壁面温度随时间变化曲线

2 有限元仿真模拟对流换热过程

采用有限元方法对散热过程进行仿真模拟,可以更细致地计算对流过程,展现热场的动态形貌,也可以印证前述数值计算的近似性. 在此采用 CFD 软件 Fluent 进行模拟分析.

2.1 基本假设

巷道内空气与巷道围岩换热是耦合换热问题^[11],受到很多因素的影响. 如果要完全按照实

际情况来建立数学模型基本是不可能的^[12]. 因此要根据所研究的内容,抓住主要矛盾,忽略次要矛盾,将实际问题转换成数学问题,为研究问题方便,特作如下假设:

- 1) 巷道围岩均质且各向同性,不考虑围岩的多样性和复杂性.
- 2) 初始条件下,围岩内温度统一,处于原始岩温.
- 3) 巷道的横截面为圆形,在整条巷道沿长度方向,换热条件相同. 热流流向均为径向.
- 4) 巷道内空气以对流换热为主,不考虑各表面间的辐射换热.
- 5) 岩石的传热和空气的数值模拟统一为一个整体,建立整个计算区域内的传热与流动控制的统一方程.

2.2 物理模型

为了与前述数值研究相对应,假设巷道为半径 1.8 m 的圆形截面. 通过多次计算验证,热影响范围不会超过半径 3 m 的同心圆,小圆内部代表高温气体,其余部分代表巷道岩石层,如图 8 所示,利用 CFD 软件 Fluent 进行计算,初始时刻巷道围岩温度为 300 K,巷道充满温度 1 000 K 的空气.

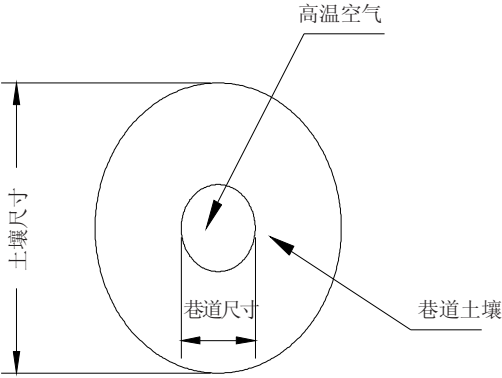


图 8 矿井巷道简化模型

2.3 数学模型和数值方法

Fluent 将质量、动量、能量守恒和其他守恒特性等控制方程统一为通用偏微分方程式,以此来描述流体的流动、传质传热、化学反应等物理现象. 通用控制方程的形式如下^[13-15]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S. \quad (8)$$

式中: ϕ 为通用变量,可代表浓度、速度、焓、单位质量的动量及紊流动能等; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项. 式(8)各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项.

选取 Realizable $k - \varepsilon$ 模型作为湍流计算模

型,使用壁面函数法进行模拟.

在 Fluent 中使用有限容积法求解. 控制容积积分法是有限容积法中建立离散方程的主要方法,应用控制容积积分法导出离散方程. 将守恒方程的通用偏微分方程在控制容积内转化为各变量的离散代数方程,对代数方程线性化求解. 方程中对流项的离散采用一阶迎风格式,扩散项采用中心差分格式. 本文采用分离式解法求解守恒方程组,该方法是顺序地、逐一地求解各方程.

处理涉及压力场与速度场的对流问题时采用 SIMPLE 算法. 对于变化过程,借助隐式时间积分方案,在每个时间步内进行迭代计算,直到取得本时间步的收敛解,然后转入下个时间步继续重复上述过程.

2.4 散热过程的模拟

按照上述描述对 Fluent 进行设置,选择气固耦合换热,考虑气体重力,气体与巷道壁接触壁面设置为 coupled 耦合边界;距巷道足够远处的外边界,温度几乎不随时间变化,热流密度几乎为零,按第一类边界处理;空气的导热系数取 0.024 2 W/(m · K),仿真中所涉及各参数取值同上述数值计算情况;进行非稳态求解,得到矿井巷道内空气平均温度随时间的变化曲线,如图 9 所示,温度云图如图 10、图 11 所示.

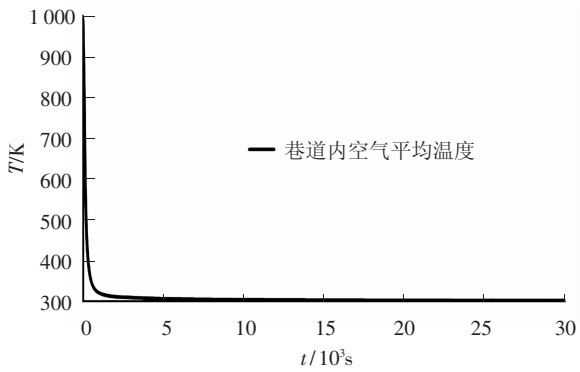


图 9 巷道内空气平均温度随时间变化曲线

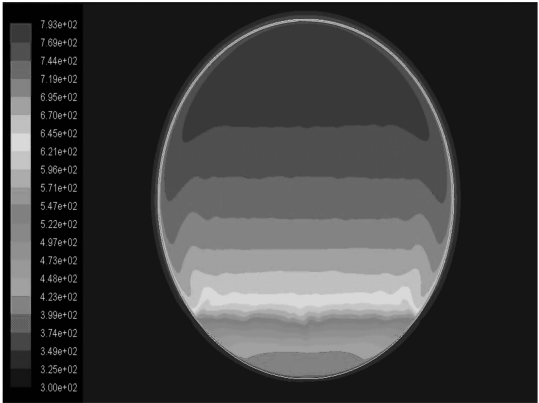


图 10 $t=150\text{ s}$ 时巷道内空气温度云图

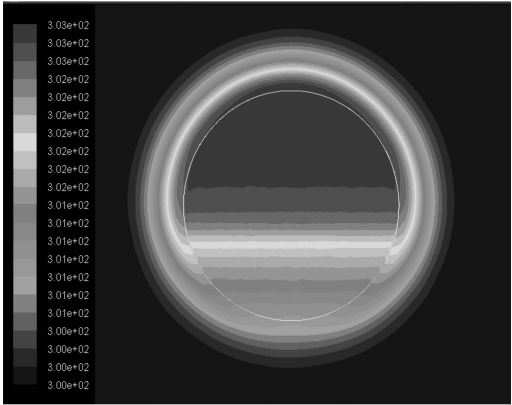


图 11 巷道内空气温度趋近稳定时的云图

3 模拟结果对比及分析

对比 MATLAB 迭代计算和 Fluent 模拟仿真得到的曲线,图 12~14 为采用 3 种密度拟合方式得到的曲线与 Fluent 仿真得到的曲线.

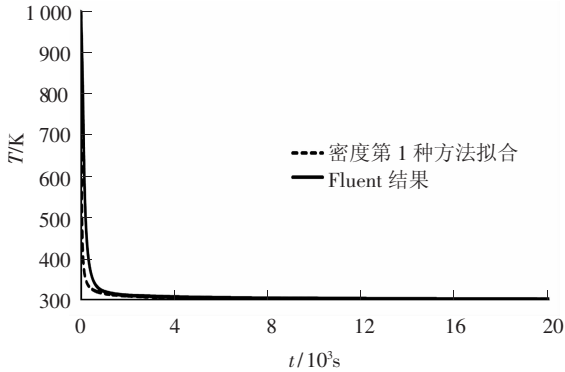


图 12 密度第 1 种方法拟合曲线与 Fluent 曲线对比

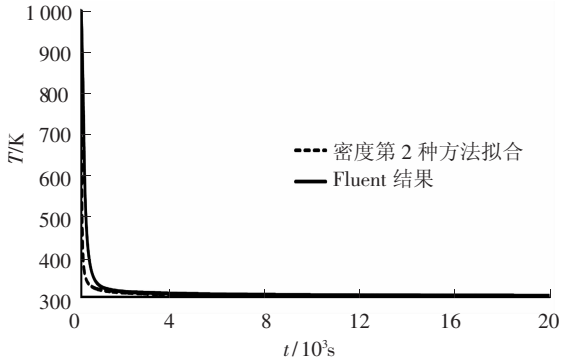


图 13 密度第 2 种方法拟合曲线与 Fluent 曲线对比

可以看到采用密度第 1 种、第 2 种拟合的方式,空气温度变化要比 Fluent 数据变化快,原因是 MATLAB 里假设空气导热系数无穷大.而当采用第 3 种密度平均值(固定值)时,由于空气导热系数无穷大, MATLAB 数据变化快,但随着温度变化,密度影响作用加强,故 Fluent 变化快,会出现第 1 个交点,但最后 Fluent 中密度变大,大于 MATLAB 中给定的值,故最后 MATLAB 数据变化更快,图像中会出现第 2 个交点.

第 3 种取密度固定的平均值的方法偏离实际

情况最远,却与有限元仿真最接近,可能是因为初期密度就很大,抵消了模型中导热系数无穷大假设带来的误差.

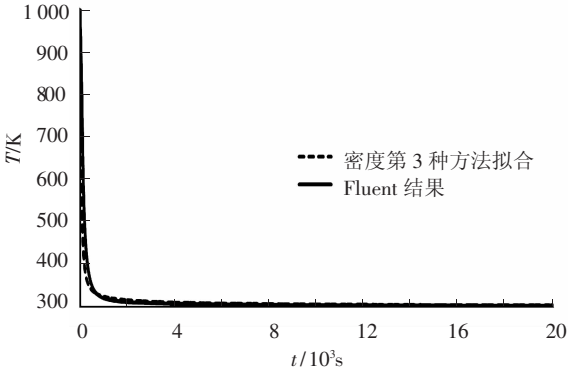


图 14 密度第 3 种方法拟合曲线与 Fluent 曲线对比

模拟的结果是:发生爆炸后,由于巷道内高温空气的强烈流动,巷道壁面和空气之间的对流换热系数较大;同时,高温空气密度较小,使巷道内的空气温度在短时间内迅速下降.但随着时间的增长,巷道壁面的温度逐渐升高,空气温度逐渐降低,对流换热系数逐渐减小,空气密度逐渐增大,巷道内的空气温度下降变慢,壁面温度和空气温度缓慢趋近初始温度 300 K.

爆炸后气体体积迅速膨胀,对原参考空间来说带走了一部分热量,随后温度降低,气体收缩,吸入一部分低温气体弥补,使温度进一步降低.以上有限元模拟过程的缺陷是忽略气体的膨胀与收缩.这样,计算中通过降低的 $\rho_{气}$ 确实体现了因膨胀带走的热量,但是气体收缩却只能假设为当时巷道内部的温度,这就等于减弱了散热能力.该模拟还忽略了爆炸造成的气流扰动对换热能力的加强作用.因此,这样模拟温度的结果会有所偏高.考察的是巷道内的平均气温,比实际放置救生舱的下部温度也高.因此以这种模拟结论指导救生舱的建造是偏安全的.

对比 Fluent 仿真和 MATLAB 密度取平均值两种方法得到的曲线,可以看出两条曲线在空气初始温度 1 000 K 的条件下,分别在 920 s (15.3 min) 和 885 s (14.8 min) 温度下降到 50 ℃,分别在 8 200 (2.3 h) s 和 7 540 s (2.1 h) 温度下降到 32 ℃,分别在 5.7 h 和 6 h 后温度下降到 30 ℃,之后温度变化非常慢,经过较长时间,最终将逼近初始温度.可见两种模拟结果吻合程度良好,可以起到互相印证的作用.

4 结 论

1) 通过 Fluent 模拟仿真和 MATLAB 迭代方法两种方法,得到了吻合的温度曲线,互相印证了

对巷道散热过程的模拟具有一定的真实性,为以后更复杂的模型提供了基础。

2) 巷道内爆炸后高温持续时间较短,在可能的较大范围的给定参数范围内,该现象依然存在,推测高于 50 ℃ 的持续时间 < 1 h,而不会是数小时。这提示我们降低救生舱隔热指标的可能性。

3) 两种方法得到的降温曲线均表明,开始阶段巷道内空气温度会很快下降,之后下降速度会逐渐减慢,巷道内温度在 6 h 后即可能降至 30 ℃。这提示我们降低救生舱降温能力指标的可能性。

4) 爆炸后巷道内温度随时间的变化规律,展现了煤矿发生爆炸后巷道的温度环境,对优化救生舱的设计具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 韩文达,刘铁军,刘贵强. 矿用安全救生舱的发展趋势研究[J]. 煤矿机械, 2011, 32(10): 11 - 12.
- [2] FASOULETOS M A. Parametric design of a coal mine refuge chamber [D]. Morgantown: West Virginia University, 2007.
- [3] MITCHELL M D. Analysis of underground coal mine refuge shelters [D]. Morgantown: West Virginia University, 2008.
- [4] 高广伟,张禄华. 煤矿井下移动救生舱的设计思路[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(4): 162 - 164.
- [5] 徐景德,徐胜利,杨庚宇. 矿井瓦斯爆炸传播的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(7): 55 - 57.
- [6] 段玉龙,周心权,龚武,等. 矿井瓦斯爆炸后巷道空气温度分布规律[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3): 318 - 323.
- [7] BLANCHARD R, ARNDT D, GRATZ R, *et al.* Explosions in closed pipes containing baffles and 90 degree bends [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(2): 253 - 259.
- [8] 焦宇,段玉龙,周心权. 掘进巷道瓦斯爆炸后巷道内空气温度时空分布[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(9): 95 - 101.
- [9] BENEDETTO A D, SARLI V D, SALZANO E, *et al.* Explosion behavior of CH₄/O₂/N₂/CO₂ and H₂/O₂/N₂/CO₂ mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(16): 6970 - 6978.
- [10] ZHU Y J, CHAO J, LEE J H S. An experimental investigation of the propagation mechanism of critical deflagration waves that lead to the onset of detonation [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2455 - 2462.
- [11] 周西华,王继仁,卢国斌,等. 回采工作面温度场分布规律的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 59 - 63.
- [12] ZHU Y J, CHAO J, LEE J H S. An experimental investigation of the propagation mechanism of critical deflagration waves that lead to the onset of detonation [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2455 - 2462.
- [13] INABA Y, NISHIHARA T, GROETHE M A, *et al.* Study on explosion characteristics of natural gas and methane in semi-open space for the HTTR hydrogen production system [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 232(1): 111 - 119.
- [14] CAMMAROT F, BENEDETTO A D, DISARLI V, *et al.* Combined effects of initial pressure and turbulence on explosions of hydrogen-enriched methane/air mixtures [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(5): 607 - 613.
- [15] BRETISLAV J, PETR S, JAN H, *et al.* Vented confined explosions in Stramberk experimental mine and AutoReaGas simulation [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(3): 280 - 287.

(编辑 杨波)