

瓦斯输送管道内抑爆过程数值模拟研究

祝 钊^{1,2,3}, 贾振元^{*1}, 罗海珠^{2,3}

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 煤炭科学研究总院 沈阳研究院, 辽宁 沈阳 110016;
3. 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 基于流体动力学和燃烧理论,建立了管道直径为 500 mm 的瓦斯爆炸数学模型,借助 Fluent 流体力学软件,采用有限速率燃烧模型,对管道内甲烷预混气体爆炸后被惰性气体熄灭的过程进行了数值模拟研究,考察了瓦斯被点燃后,喷入不同流量高压、低温二氧化碳气体后管道内的燃烧流场特性.结果表明,二氧化碳喷入量低于 12 kg/s 不能使管内火焰熄灭;二氧化碳喷入量大于 16 kg/s 时,能大大降低管道内混合气体温度,同时降低甲烷和氧气浓度,导致火焰在二氧化碳喷入口所在管道截面处熄灭.此过程中管内最大反应速率降低过程可分为 3 个阶段,其中 2 个快速降低阶段均符合幂律模型.二氧化碳喷入量在 16~100 kg/s 时,火焰熄灭时间先迅速变短后变化缓慢;模拟结果与试验结果吻合较好.研究结果可为煤矿防爆抑爆研究工作提供理论依据和参考,同时对保障煤矿安全生产和人民生命安全也具有重要的现实意义.

关键词: 抑爆;有限速率燃烧模型;火焰熄灭;幂律模型

中图分类号: TD684

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201401006

0 引言

瓦斯抽采是矿井瓦斯治理的根本措施,将煤层中的瓦斯通过输送管道抽出,可防止和减少煤矿瓦斯事故,保证矿井安全,保护矿区环境,并且抽采出的瓦斯再次利用还可以产生良好的经济效益和社会效益.目前,我国煤矿井下抽采气中,70%以上为 5%~16% 的低浓度瓦斯,若抽放系统或管路系统出现火花,随时都有爆炸的可能.为了保证低浓度瓦斯输送过程的安全,实现瓦斯输送管道的主动抑爆,开发合理有效的抑爆技术成为亟待解决的问题.

近年来,国内外学者展开了以惰性气体为介质的抑爆技术和理论研究.陈思维等^[1]对管道内预先充入一定比例惰性气体的爆炸过程进行了数值模拟研究,获得了爆炸波发展规律和惰性气体的抑爆规律;Gieras 等^[2-3]用实验手段研究了碳酸氢钠粉末对甲烷燃烧火焰的抑制作用;Liu 等^[4]利用高速摄像机对细水雾抑制火焰过程进行了定性分析,发现在水雾充足的情况下,细水雾能有效

抑制管道瓦斯爆炸的传播速度,降低火焰温度,在瓦斯浓度较高或雾通量不足时,细水雾将通过助燃促进瓦斯爆炸的进行.喻健良^[5]、赵涛^[6]等对爆炸火焰在微小通道中的传播机理和淬熄条件进行了考察和研究.李凌飞^[7]采用实验方法考察了甲烷空气预混气体分别充注不同惰性气体后对管内气体爆炸极限的影响.You 等^[8]通过将抑制剂和煤尘预先混合,考察了 ABC 粉、SiO₂ 粉、岩尘粉对爆炸火焰的抑制效果.Kosinski^[9]采用计算流体力学方法对固体颗粒抑制爆炸火焰的过程进行了气-固两相流模拟研究.以上大多数研究采用将惰性气体预先充入爆炸流场或者惰性气体预先均匀混合于爆炸气体等方法,而对于动态连续通入惰性气体的抑爆流场特性研究还未见相关报道.

本文借助在燃烧领域被广泛采用的 Fluent 软件^[10],对预混瓦斯气体爆炸后喷入高压二氧化碳后的燃烧流场特性进行数值模拟研究,考察瓦斯爆炸后惰性气体在管道内流场特点,研究惰性气体对瓦斯燃烧火焰的抑制机制,为抑爆控制器

的设计提供理论依据和参考。

1 物理模型

计算选取直径 500 mm、长 30 m 的瓦斯输送管道,采用二维物理模型进行计算,在距离左端 9 m 处上下分别有一个 20 mm 大小的开口,如图 1 所示。在爆炸模拟计算过程中,这两个开口设定为固壁;当进行熄灭数值模拟计算时,两个开口设定为高压惰性气体的入口。



图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

2 数学模型

管道内瓦斯爆炸过程实际上是一个快速、复杂的燃烧反应过程,是湍流和化学反应相互作用的结果,燃烧的化学反应速率是强非线性和刚性的。为此在建立流场数学模型时,假设流动的惰性气体及燃烧气体为连续介质,忽略壁面的散热;假设化学反应为快速单极反应,反应方程式如下式所示:



采用体积反应计算组分的生成速率,瓦斯燃烧反应速率由有限速率模型控制。假设瓦斯和空气在点火之前为分子级别混合程度。这里建立的气体动力学模型以可压缩湍流流动为基础,包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程等,具体方程表达式及参数确定参见文献[11]。

湍流模型选用标准 $k-\epsilon$ 模型,忽略惰性气体射流带来的高雷诺数等问题。湍流-化学反应相互作用机理采用有限速率模型,模型中在化学反应中单个物质 i 的产生速率 R_i 由下式确定:

$$\bar{R}_i = \Gamma(\nu_i'' - \nu_i') k_f \prod_{j=1}^{N_r} c_j \eta_j' \quad (2)$$

式中: N_r 为系统中化学物质数目; ν_i' 为反应物 i 的化学计量系数; ν_i'' 为生成物 i 的化学计量系数; η_j' 为反应中每种反应物或生成物 j 的正向反应速度指数; c_j 为反应中每种反应物或生成物 j 的物质的量浓度; k_f 为正向反应速率常数。

3 计算条件

3.1 网格划分

模型网格划分采用四边形结构化网格。为提

高数值计算精度,在管道两侧开口处适当加密网格。整个管道模型的网格总数为 17 068 个,其中最小网格面积为 $5.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,最大网格面积为 $3.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 。

3.2 边界条件

实际上,瓦斯在管道内爆炸后,产生的高温、高压气体向管道左右两个方向传播,这里假设管道左右两方向上物理条件相同,则在瓦斯爆炸处,管道左右两方向上是对称的,没有热量、质量等物理量的相互传递。由于爆炸后气体流速很快,忽略瓦斯气体的输送速度,设定管道左端为无滑移、绝热壁面边界条件,管道右端为气体出口,压力为大气压,管壁为无滑移、绝热壁面边界条件。在计算瓦斯爆炸过程时,管道两侧的开口为固壁;计算瓦斯火焰熄灭过程时,管道两侧开口为压力为 8 MPa 的高压、低温二氧化碳进口。

3.3 初始条件

本文计算甲烷体积分数为 9.5% 的混合气体爆炸。基于非稳态计算,在 t_0 时刻,设定管道左端有一直径为 0.18 m 的半圆形火源,火源内部 CO_2 体积分数为 9.1%, H_2O 体积分数为 18.1%, CH_4 和 O_2 质量分数均为 0,湍动能和湍动能耗散率为 1,温度为 1 400 K,压力为 101 325 Pa;管道其余部分充满静止的常温、常压甲烷混合气体,其中 CH_4 体积分数为 9.5%, O_2 体积分数为 19.0%,其余为 N_2 。

4 结果与讨论

根据上述数学模拟以及计算条件的设置,采用 Fluent 软件对全管道充满均匀 9.5% 瓦斯气体的爆炸过程进行了数值模拟计算。在瓦斯爆炸 30 ms 后,通入压力为 8 MPa 的高压二氧化碳气体,两个喷入口总流量分别为 6、10、12、16、18、20、24、30、40、80、120 kg/s。为清晰起见,在显示瓦斯燃烧流场时将管道直径进行了适当放大。

4.1 二氧化碳喷入前管内爆炸流场状况

瓦斯被点燃后,反应生成热加热周围混合气体,使气体迅速膨胀,压力不断增大,并推动气体在管内传播。随着爆炸的进行,管内压力波、速度波、温度波等均发生不同程度的变化。图 2 所示为瓦斯爆炸 30 ms 后,通入二氧化碳前爆炸流场的温度分布、反应速率分布、速度分布以及压力分布。可以看出,在通入二氧化碳前,爆炸流场最高温度为 3 439 K,这与戴林超等^[12] 研究结果相一

致;管内最大反应速率为 $0.1962 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 气体最大流速达 2070 m/s , 最高压力在 5 MPa . 最高速率区、最大压力区以及最大反应速率区有部分重叠. 火焰燃烧面位于管道最高温区的前方, 距离二氧化碳喷入口 7.8 m 左右.

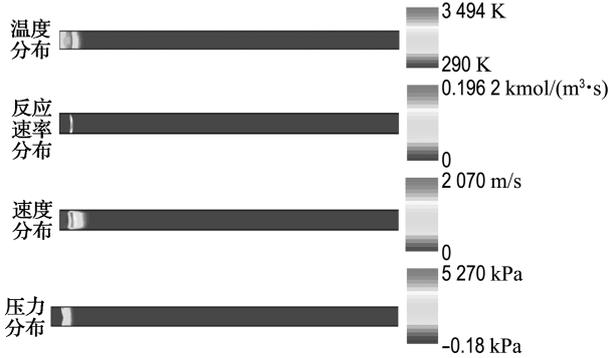


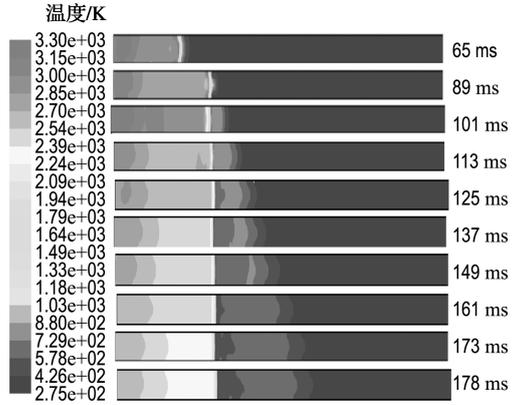
图2 二氧化碳气体通入前各参数流场分布

Fig. 2 Flow field distribution of parameters before CO_2 filling into the pipeline

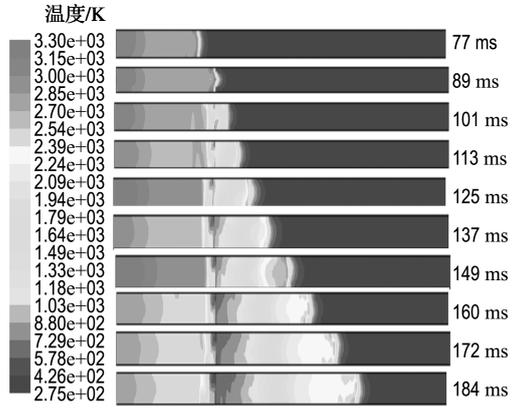
4.2 管道内温度分布

图3(a)所示为二氧化碳总喷入量为 20 kg/s 时管道内温度随时间的分布变化图. 可以看出, 高温气团约 89 ms 时到达二氧化碳喷入口位置, 此时高温区外沿最高温度达 3300 K . 之后, 高温气团与喷入的低温二氧化碳气体相遇, 这时高温气团外层的温度梯度加大, 散热速率增大, 使得在二氧化碳喷入口左端管道内气体温度开始逐渐降低, 右端管道的部分低温区被加热, 温度约达 1000 K . 从温度分布图的整个发展过程来看, 在二氧化碳喷入口右端管道, 持续喷入的超低温二氧化碳气体将较高温气团隔开, 并且较高温气团的总体温度也在持续降低, 说明没有反应热量产生, 由此可以判断火焰已经熄灭. 二氧化碳喷入量为 $24, 30, 40, 80, 120 \text{ kg/s}$ 时管内温度分布与图3(a)相似.

图3(b)所示为二氧化碳喷入量为 12 kg/s 时, 管内温度随时间的分布变化图. 与图4(a)对比可以看出, 由于二氧化碳喷入量减少, 瓦斯爆炸气体到达喷入口后, 通过与超低温二氧化碳的换热, 温度有所降低, 在 $1600 \sim 1800 \text{ K}$. 随后, 随着高温气团的继续向前传播, 温度又开始上升; 在 149 ms 以后, 二氧化碳喷入口右端管道内温度高达 2800 K , 说明瓦斯在管内又开始燃烧放热. 二氧化碳喷入量为 $3, 4 \text{ kg/s}$ 管内温度分布与图3(b)相似.



(a) 20 kg/s



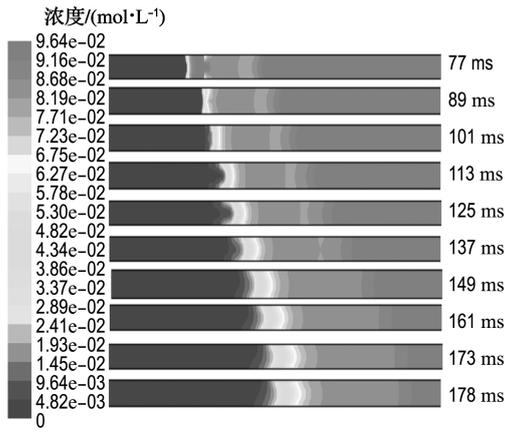
(b) 12 kg/s

图3 不同二氧化碳喷入量时管内温度分布
Fig. 3 Temperature distribution in pipeline at different CO_2 flow rates

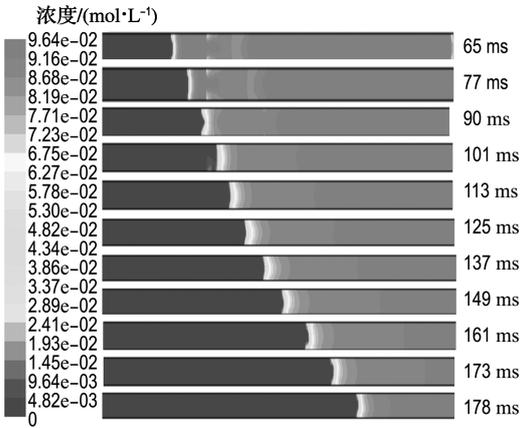
4.3 管道内组分浓度分布

研究管道内瓦斯燃烧情况除了要分析温度影响外, 甲烷在混合气体中的浓度也是至关重要的. 图4(a)、(b)所示为二氧化碳喷入量分别为 $20, 12 \text{ kg/s}$ 时管道内甲烷物质的量浓度分布. 可以看出, 二氧化碳的喷入, 使得喷入口后管道内甲烷物质的量浓度有所减小, 尤其是喷入量为 20 kg/s 时, 管内有段较宽的甲烷浓度范围在低浓度区域, 这部分区域被持续喷入的低温高压二氧化碳气体逐渐推向管出口方向; 同时可判断出, 氧气浓度在甲烷低浓度区也发生了相应的降低. 结合图4(b)可以看出, 喷入速度为 20 kg/s 的二氧化碳一方面使爆炸燃烧的高温气团降温至 1000 K 以下, 另一方面降低了管内甲烷和氧气浓度, 降低甲烷化学反应速率, 这种双重作用使管内甲烷火焰熄灭. 然而, 若二氧化碳喷入量降低为 12 kg/s 时, 喷入点后方管道内出现了较大的浓度梯度, 其中低浓度区域很小, 约 0.5 m , 之后便是体积分数为

9.0%左右的甲烷混合气体;结合图4(b)可以判断出,由于不能使来流高温气体温度大幅降低,火焰在中断一段时间后再次被点燃。



(a) 20 kg/s



(b) 12 kg/s

图4 不同二氧化碳喷入量时管内甲烷物质的量浓度分布

Fig. 4 CH_4 concentration of amount of substance distribution of the pipeline at different CO_2 flow rates

4.4 反应速率分布

管道空间内有甲烷化学反应的区域即火焰燃烧位置.图5所示为管道内反应速率分布随时间的变化.可以看出,瓦斯被点燃后,燃烧火焰面迅速在管道内向出口传播,约在89 ms时到达二氧化碳喷入口,之后遇到超低温、高压二氧化碳的喷入,火焰面位置处的甲烷与氧气被稀释,温度也迅速降低,导致瓦斯燃烧面不再向前传播,火焰开始熄灭,在178 ms时火焰基本熄灭.图6所示为管道内火焰前端最大反应速率随时间的变化曲线.可以看出,在火焰到达二氧化碳喷入口之前,由于湍流燃烧火焰的水动力学不稳定特性,到达二氧

化碳喷入口之前,管道内最大反应速率有上下波动现象,平均反应速率基本为 $1 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,最大反应速率可达 $4.5 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$.在火焰燃烧面到达二氧化碳喷入口时,最大反应速率经历一个快速降低阶段,在10~11 ms内,甲烷反应速率迅速降低为 $4 \times 10^{-3} \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$.这个阶段内最大反应速率不再呈现上下波动特征;之后反应速率经历一个慢速降低阶段,在这个阶段内反应速率有一个较短的停留,在13 ms内,反应速率从 $4 \times 10^{-3} \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 降低为 $4 \times 10^{-4} \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$;再之后火焰又经历一个快速的熄灭阶段,在约64 ms内,火焰面反应速率降低为 $1 \times 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 以下.纵观火焰的整个熄灭过程,可以看出,在两个快速熄灭阶段,反应速率随时间的变化近似成直线关系,符合幂律模型。

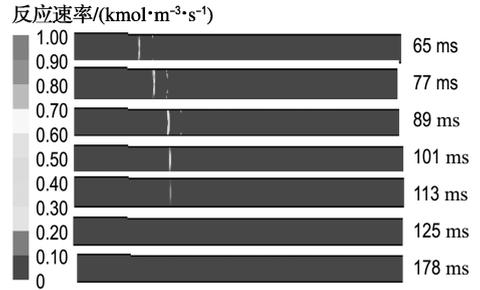


图5 反应速率图

Fig. 5 The reaction rate chart

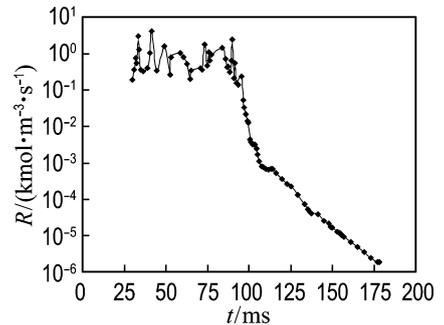


图6 火焰面最大反应速率随时间变化曲线

Fig. 6 The maximum reaction rate at flame surface versus time

定义从火焰传播到二氧化碳喷入口位置处,到瓦斯反应速率降为 $1 \times 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 时的时间为火焰熄灭时间.由于二氧化碳喷入量在12 kg/s以下时,燃烧火焰基本不能熄灭,二氧化碳喷入量在16~120 kg/s时的火焰熄灭时间曲线如图7所示.可以看出,对于直径为500 mm的管道,甲烷体积分数为9.5%情况下,二氧化碳通

入量越大,火焰熄灭时间越短.通入量在 25 kg/s 以下时,随着二氧化碳喷入量的增加,火焰熄灭时间变短较快,而在 25~100 kg/s 时,火焰熄灭时间变短比较缓慢.说明对于二维模型,二氧化碳的理论喷入量小于 25 kg/s 比较经济.

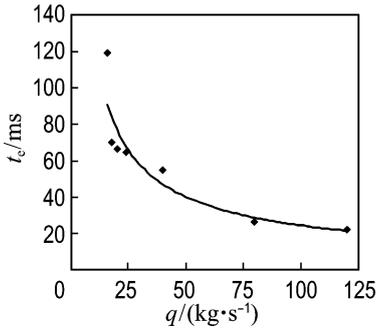


图7 不同二氧化碳通入量时火焰熄灭时间

Fig. 7 Extinguished time of flame with different inflow quantity of CO_2

5 试验验证

为验证模拟计算的正确性,在室外建立了直径 500 mm、长 30 m 的试验管道进行爆炸试验.试验开始前用厚度约为 0.12 mm 的聚氯乙烯塑料薄膜封闭管道,管道内混合 9%~10% 的瓦斯;火焰传感器在管道长 0~20 m 内约每 3 m 安放一个,剩余长度每 4 m 安放一个,总共安放 10 个.采用火焰传感器测量火焰到达时间.为屏蔽火焰传感器本身的响应速度、响应距离对测量结果的影响,可计算爆炸气体的相对平均速度,即两个传感器之间距离与传感器触发时间差的比值.相对平均速度的数值模拟计算值和试验测量值见图 8.可以看出,由于火焰水动力学的不稳定性,在传感器测点位置气体相对平均速度值存在一定的波动,但由两种方法得到的速度变化趋势相似,数值

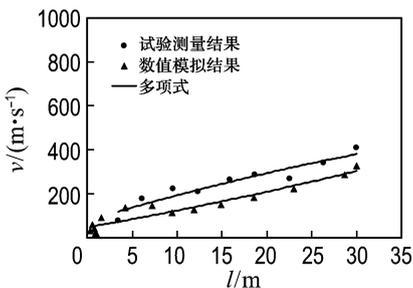


图8 数值模拟计算值与试验测量值的对比

Fig. 8 Comparison of numerical simulations and experimental measurements results

模拟结果较试验测量值偏小,两者最大相对误差不超过 15.0%,在工程允许范围之内,说明数值模拟计算结果与试验测量结果吻合较好.

6 结论

(1)瓦斯预混气体被点燃 30 ms 后,管内最高温度为 3 439 K,最大反应速率为 0.196 2 kmol/($m^3 \cdot s$),气体最大流速高达 2 070 m/s,最高压力在 5 MPa,火焰燃烧面距离二氧化碳喷入口有 7.8 m 左右.

(2)超低温二氧化碳的喷入,一方面降低了管道内高温气体的温度,另一方面稀释了火焰前方甲烷和氧气.对于二维模型,二氧化碳喷入量大于 16 kg/s 时火焰熄灭,小于 12 kg/s 时火焰还可复燃.

(3)管内火焰在遇到低温二氧化碳之前有波动现象,之后火焰前端最大反应速率经历两个快速降低和缓慢降低共 3 个阶段,其中两个快速降低阶段均符合幂律模型.二氧化碳喷入量越大,火焰熄灭时间越短.喷入量在 25 kg/s 以下时,随着二氧化碳喷入量的增加,火焰熄灭时间迅速变短,而在 25~100 kg/s 时,火焰熄灭时间变短比较缓慢.

(4)室外现场试验结果表明,试验结果与数值模拟结果吻合较好.

参考文献:

- [1] 陈思维,杜 扬. 惰性气体抑制管道中可燃气体爆炸的数值模拟[J]. 天然气工业, 2006, 26(10):137-139. CHEN Si-wei, DU Yang. Numerical simulation of flammable pipe gas explosion inhibition with inert gas [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(10):137-139. (in Chinese)
- [2] Gieras M, Klemens R. Effectiveness of an active dust and gas explosion suppression system [J]. *Journal of Power Technologies*, 2012, 92(1):1-11.
- [3] Gieras M. Studies on process of dust explosion suppression by water spray [J]. *Archivum Combustionis*, 2011, 31(1-2):63-78.
- [4] LIU Qing-ming, HU Yong-li, BAI Chun-hua, et al. Methane/coal dust/air explosions and their suppression by solid particle suppressing agents in a large-scale experimental tube [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(2): 310-316.
- [5] 喻健良. 预混火焰在微小通道中传播和淬熄的研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2008. YU Jian-liang. The research of premixed flame's

- propagation and quenching in narrow channels [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [6] 赵涛. 惰性气体对管道内预混火焰淬熄的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
ZHAO Tao. The research on premixed flame's quenching of inert gas in duct [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] 李凌飞. 甲烷爆炸特性及其抑爆技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2012.
LI Ling-fei. Research on methane explosion characteristics and explosion suppression technology [D]. Taiyuan: North University of China, 2012. (in Chinese)
- [8] YOU Hao, YU Ming-gao, ZHENG Li-gang, *et al.* Study on suppression of the coal dust/methane/air mixture explosion in experimental tube by water mist [J]. *Procedia Engineering*, 2011, **26**:803-810.
- [9] Kosinski P. Numerical investigation of explosion suppression by inert particles in straight duct [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154** (1-3): 981-991.
- [10] Lipitskii M, Safronov V. Numerical simulation of turbulent combustion of subsonic gas jet flows [J]. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2012, **4**(5):484-492.
- [11] 侯玮, 曲志明, 駢龙江. 瓦斯爆炸冲击波在单向转弯巷道内传播及衰减数值模拟 [J]. *煤炭学报*, 2009, **34**(4):549-553.
HOU Wei, QU Zhi-ming, PIAN Long-jiang. Numerical simulation of propagation and attenuation of shock waves in simplex turn roadway during gas explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, **34**(4):549-553. (in Chinese)
- [12] 戴林超, 赵彩虹, 刘楨, 等. 管道内瓦斯爆炸传播规律的数值模拟研究 [J]. *矿业工程研究*, 2011, **26**(1):31-34.
DAI Lin-chao, ZHAO Cai-hong, LIU Zhen, *et al.* Numerical simulation study of gas explosion propagation law in the pipe [J]. *Mineral Engineering Research*, 2011, **26**(1):31-34. (in Chinese)

Numerical simulation research on explosion suppression process in gas transmission pipeline

ZHU Zhao^{1,2,3}, JIA Zhen-yuan^{*1}, LUO Hai-zhu^{2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Shenyang Branch, China Coal Research Institute, Shenyang 110016, China;

3. Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: Based on the theory of fluid dynamics and combustion, the mathematical model of gas explosion in the pipe with diameter of 500 mm is established, by Fluent, numerical simulation study of the flame's quenching process in inert gas is conducted by using the finite rate combustion model, and the characteristics of explosion field by injecting different flow rate of high pressure and low temperature CO₂ are also investigated. The experimental results show that, when the CO₂ injection is less than 12 kg/s, it can not extinguish the flame in the pipe; however, when the CO₂ injection is greater than 16 kg/s, it can greatly reduce the temperature of the mixed gas, and also dilute the methane and oxygen, and eventually lead to the flame extinguished at the carbon dioxide entrance. The reducing process of the maximum reaction rate can be divided into three stages, where two of the high-speed reducing stages satisfy the power-law model. When the CO₂ injection is between 16 kg/s and 100 kg/s, the extinction time reduces rapidly, and then changes slowly; the simulation results agree well with the experimental data. Research results can provide theoretical basis and reference for the explosion suppression in coal mine, and also have practical significance to protect the safety of people's lives during coal mine production.

Key words: explosion suppression; finite rate combustion model; flame extinguish; power-law model