

管道内可燃气体爆燃的一维数值模拟*

毕明树 尹旺华 丁信伟 王淑兰
(大连理工大学化工学院)

毕明树等. 管道内可燃气体爆燃的一维数值模拟. 天然气工业, 2003; 23(4): 89~ 92

摘 要 密闭空间可燃气体爆炸一直是化工、石油、矿业、冶金等行业的重大灾害之一。由于可燃性气体燃料与空气混合物爆源具有能量密度小、爆源体积大、能量释放时间长等特点, 所以点源强爆炸近似不再成立。文章从流体力学和化学反应动力学守恒方程出发, 对管道内可燃气体爆燃进行了数值模拟, 获得了不同时刻爆燃的压力场、温度场、密度场, 讨论了可燃气体活性、组分以及管道长度对爆燃压力和压力上升速率的影响, 为工程上防爆、抑爆、泄爆提供了理论基础和数据。

主题词 管道 密闭系统 可燃气 爆炸 数值模拟

目前常用的解析解模型有等温爆炸模型、绝热爆炸模型和一般模型¹¹², 它们均假设整个容器内压力在任何时刻都均匀分布, 没有考虑流体动力学方程, 也没有考虑化学反应动力学问题。随着计算机技术的发展, 数值模拟方法能考虑更多的问题, 已成为求解爆炸这类复杂问题的有效手段。在此, 利用描述爆燃过程的流体力学基本方程组和燃烧反应方程, 运用 SA B 差分方法, 对管道内可燃气体的爆燃进行数值模拟。

物理和数值模型

对于装满燃料和空气混合物的一根圆管, 在闭端点火后, 将形成一薄层火焰, 然后反应过程放出的热量会使反应产物不断膨胀, 从而把能量输送给临近的混合气层, 使其温度升高而着火, 形成新的火焰。整个爆炸过程可以看作是由点燃点开始, 一层层新混合气依次点火, 并向未燃混合气传播的过程。这样整个爆炸场就形成了三个区域: 燃烧区、火焰

压力和压力增加速率越大; 气云爆热越大, 爆炸最大压力和压力增加速率越大。

符 号 说 明

e 表示内能, J/kg 或无量纲; p 表示压力, kPa; p₀ 表示气云初始压力, kPa 或无量纲; q 表示人工黏性, Pa; q₁ 表示线性人工黏性, Pa; q₂ 表示平方人工黏性, Pa; Q 表示能量源项, J/kg 或无量纲; r 表示观测点距爆心的距离, m 或无量纲; R 表示气云初始半径, m; t 表示时间, s 或无量纲; $\vec{u}$ 表示气体流动速度矢量, m/s; T 表示气体比容, m³/kg 或无量纲; Q 表示气体密度, kg/m³ 或无量纲; Q₀ 表示气云初始密度, kg/m³; C 表示气体比热容比。

参 考 文 献

1 Masri A R, Ibrahim S S et al. Experimental study of pre2

mixed flame propagation over various solid obstructions. Ex2
perimental Thermal and Fluid Science, 2000; 21(1~ 3): 109
~ 116
2 毕明树, 王淑兰等. 平板形障碍物对气云爆炸强度影响的
实验研究. 化工学报, 2002; 53(8): 815~ 818
3 Wiekeam B J. Vapor cloud explosion model. Journal of Haz2
ardous Materials, 1982; 3: 221~ 232
4 Van den Berg A C. The Mult2energy method: a frame work
for vapor cloud explosion. Journal of Hazardous Materials,
1985; 12: 1~ 10
5 Yunying Fan et al. Predicting the maximum gas deflagration
pressure over the entire flammable range. Journal of Loss
Prevention in the Process Industries, 2000; 13: 361~ 368
6 范宝春, 姜孝海等. 障碍物导致甲烷) 氧气爆炸的三维数
值模拟. 煤炭学报, 2002; 27(4): 371~ 373

(收稿日期 2003- 01- 21 编辑 居维清)

* 本研究成果属于国家自然科学基金资助项目(50076006)。
作者简介: 请见本期第 86 页。

面、未燃区(图 1)。

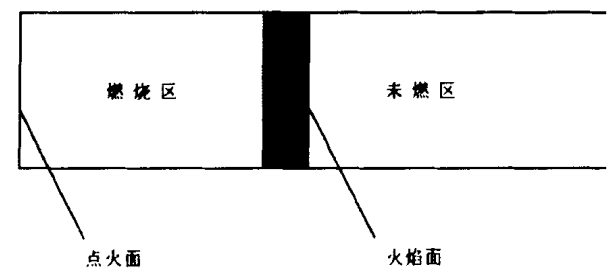


图 1 管道内可燃气体爆燃过程示意图

1. 控制方程

气体爆燃过程的控制方程组为具有化学反应的混合气体的 Euler 方程组, 转换成拉格朗日坐标后, 具有 N 种组分的质量守恒、动量守恒和能量守恒方程的统一形式为^{12,3,42}

5U / 5S + 5G(U) / 5q = U (1)

式中:

U = [1/Q, u, Y_F, Y_O, e]^T, F(U) = [-u, p, 0, 0, pu]^T, f(U) = [0, u, Y_F, Y_O, T]^T

U = [0, 0, \tilde{\Omega}_F/Q, S\tilde{\Omega}_F/Q, \tilde{\Omega}_F Q_F/Q]^T, G(U) = F(U) + V(U) * 5f(U) / 5q (2)

V(U) = [0, 0, 0, 0, 0; 0, -4/3 QL, 0, 0, 0; 0, 0, -Q^2 D, 0, 0; 0, 0, 0, -Q^2 D, 0; 0, 0, 0, 0, -QK]^T (3)

式中: U 为通用变量; Q 为密度; u 为 x 方向的速度; p 为压力; e 为比内能; T 为温度; L 为混合气体的黏度; K 为混合气体的导热系数; D 为各组分之间的扩散系数; Y_F 为燃料的质量百分比数; Y_O 为氧气的百分比数; $\tilde{\Omega}_F$ 为燃料组分的化学反应速率; S 为燃烧 1 kg 燃料所需要的氧气的质量计量比; Q_F 为燃料组分的燃烧热。

2. 化学反应模型¹⁵²

在组分守恒方程中的源项 $\tilde{\Omega}$ 代表单位体积(或

单位质量) 由于化学反应生成(或消耗) 组分 m 的速率, 它取决于组分 m 所参加的化学反应的反应率和组分在该化学反应式中的系数。为求解问题的方便性, 假设爆炸过程中, 发生的化学反应为一步不可逆化学反应。

\tilde{\Omega}_F = A Q^{A \cdot B} \frac{W_F^{1-A}}{W_O^B} Y_F^A Y_O^B \exp \left(- \frac{E_a}{RT} \right) (4)

式中: A 为常数; A、B 为反应物的反应速率的计量因子常数; W_F 为燃料的分子量; W_O 为氧气的分子量; E_a 表示活化能。上述常数对应于不同的燃料有不同的值。

3. 差格式

在爆炸中, 由于冲击波的存在, 往往会形成间断面。目前, 在数值模拟方法中解决这种间断面问题的方法有两种: 1 构造的差分方程由于截断误差作用而产生的格式黏性方法; ° 人工黏性法。本文选取具有二阶精度的 S_{A B}^{C 12,5,62} 差分方法对目标方程组进行差分求解, 以产生格式黏性(即人工阻尼) 来减少激波振荡。其具体差分方程在此从略。

数值计算结果

对于两端密封长度为 L = 0.5 m、管道内化学计量浓度下(4.5%) 的丙烷) 空气混合物爆炸, 取火焰厚度为 1 mm, 即空间步长为 1 mm, 时间步长为 1 Ls。初始条件和边界条件如下。

(1) t = 0(0 F x F 015) 时, 有:

u(x, 0) = 0, p(x, 0) = 101.325 kPa, Q(x, 0) = 1.173 kg/m³;
T(x F 0.60, 0) = 1500 K, T(0.06 < x F 015) = 300 K;

Y_F(x [0.06, 0) = 0, Y_O(x [0.06, 0) = 0
Y_F(0106 F x F 015, 0) = 01067,
Y_O(0106 F x F 015, 0) = 0.268

(2) 在管道两端, 即 x = 0 和 x = 0.5(0 F t F]) 处, 有:

u(0, t) = 0, 5p(0, t) / 5x = 0, 5Q(0, t) / 5x = 0,
5T(0, t) / 5x = 0, 5Y_F(0, t) / 5x = 0, 5Y_O(0, t) / 5x = 0

图 2~ 5 分别给出了 7 个不同时刻的压力) 距离曲线、密度) 距离曲线、温度) 距离曲线和燃料组分) 距离曲线。

由图 2、3 可知, 随着火焰的前进, 压力值逐渐增加, 且逐步趋向平衡, 当火焰达到管的另一端时, 气云区内能量刚好完全释放, 压力值也达到最大, 最终

在整个管道内达到最大爆炸超压 784 kPa, 结果与定容爆炸的实验测量压力¹¹²760 kPa 的误差为 3. 06%。

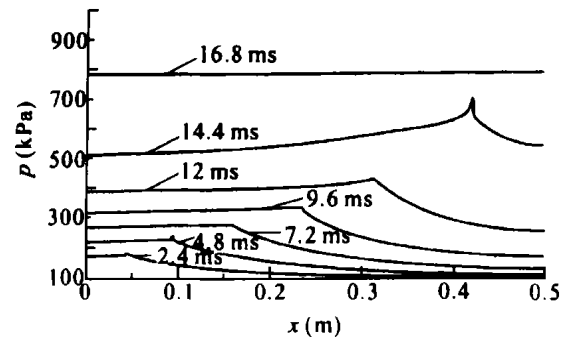


图 2 不同时刻的压力) 距离曲线

曲线 1~ 7 分别代表: 2. 4 ms、4. 8 ms、7. 2 ms、
9. 6 ms、12 ms、14. 4 ms、16. 8 ms

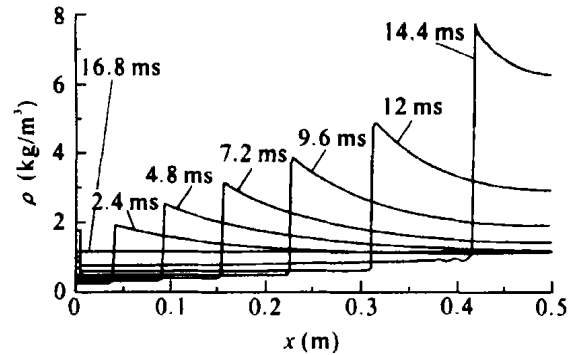


图 3 不同时刻的密度) 距离分布曲线

曲线 1~ 7 分别代表的时间同图 2

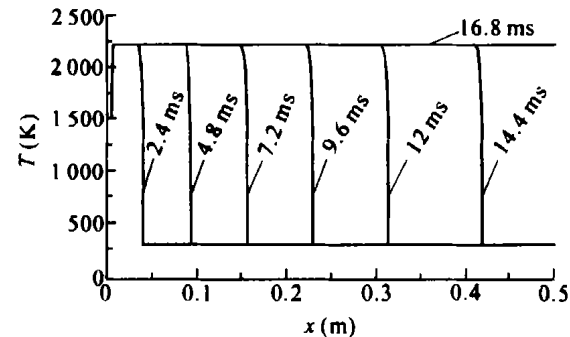


图 4 不同时刻的温度) 距离分布曲线

曲线 1~ 7 分别代表的时间同图 2

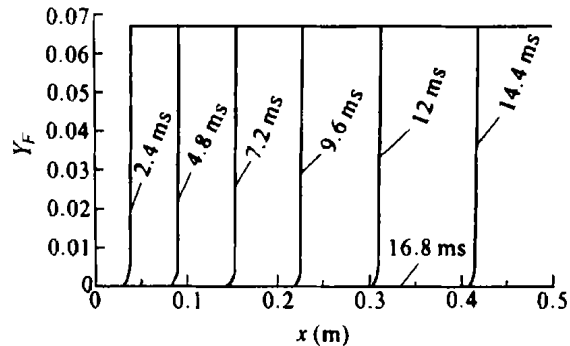


图 5 不同时刻的燃料组分质量百分比) 距离曲线

曲线 1~ 7 分别代表的时间同图 2

由于爆源能量不是瞬时释放, 火焰前面有一个比火焰速度更快的冲击波, 因此整个压力场、密度场在火焰没有达到管端之前有一个比较明显的间断。

由图 4.5 可知, 爆燃火焰面在爆源区内形成一个不断扩张的高温区, 且可以看到其温度的峰值位置(即火焰面所在的位置)的向前移动状况; 当可燃气体燃尽时, 气云区内能量刚好完全释放, 整个气云区域内温度达到平衡; 由于忽略了热损失, 火焰的快速前进, 对流传热和膨胀做功引起的温度变化很少, 能量传递主要由于火焰面上的热传导而预热前面未燃烧的气体, 化学反应集中在火焰区内。

爆炸参数的影响因素的讨论

容器内可燃气体发生爆炸时主要的破坏因素是爆炸压力和压力上升速率, 下面以管道内可燃气体的爆炸压力和爆炸压力上升速率为例, 讨论程序中爆炸参数的影响因素。在程序中, 影响爆炸参数的计算结果的主要变量有爆源长度 L 和燃料的种类。

1. 爆源长度对爆炸压力上升速率的影响

(1) 用本模型和等温模型计算的压力) 时间曲线

取 0.5 m 长度的管道用本文建立的模型和等温爆炸模型¹⁷²计算的压力时间曲线进行了比较。从结果可以看出, 用本程序的模型计算的时间压力曲线, 有一个非常明显的拐点, 其对应的时刻为 5 ms, 这个时刻火焰刚好达到 0. 01 m 的位置。因此在这个时间之前, 其压力上升的速率是逐渐增加的, 过此拐点以后, 其压力上升速率开始下降。另外, 比较结果还反映出: 0. 01 s 以前, 由等温爆炸模型计算的压力值低于用本文推导的模型计算出来的压力值, 故在 0. 01 s 以后, 前者反而高于后者。这是因为等温爆炸模型是在假设压力和温度的升高对燃烧速度没有影响的情况下推导出来的解析式, 从而导致其结果在点火后的一段时间内燃烧速度偏小、而后期却偏大; 而本模型的燃烧速度是温度和压力的函数, 能够全面考虑各种因素对燃烧速度的影响, 因此本模型与实际爆炸情况更相符。

(2) 爆源长度对爆炸压力) 时间曲线的影响

从其余条件不变时, 爆源长度 L 对爆炸的压力) 时间曲线(取空间坐标为 0. 1 m)的影响分析结果可以看出, 能量释放的初始阶段, 不同管道长度的压力上升速率大致相当, 而在各自的后期, 管道长度越短, 整个管道内压力趋近平衡的速度越快, 其压力上升速率也就越大。由于火焰速度在管道内是逐步增

加的,所以不同管道长度的爆炸时间并不是与管道长度呈正比,其压力上升速率也并不是随管道长度增加而呈正比变化。管道长度越短,压力趋近平衡的速度越快,能量释放的时间也越短,因此其压力上升速率也越大。不同管道长度的爆炸终了压力相等。

2. 不同燃料活性对爆炸压力的影响

气体爆炸出现的可能性以及爆炸后产生的后果在很大程度上取决于气体活性。气体活性越强,分子扩散越快,则它爆炸时产生的爆炸超压和火焰速度越大,产生爆轰的可能也越大。到目前为止,还没有关于可燃气体爆炸危害的标准,一般只是根据反应活性把气体分为三类¹⁸²,见表 1。

表 1 可燃气体反应活性的参照分类表

反应活性	可 燃 气 体
低	氨, 甲烷, 氯乙烯
中	乙烷, 丙烷, 乙烯, 正丁烷, 高碳烷烃
高	氢, 乙炔, 苯

下面分别选取各类活性中比较典型的气体, 甲烷、丙烷和乙炔作为算例参数, 均按照化学计量比混合, 管道长度取为 0.5 m, 从计算得到的空间坐标 0.1 m 处的压力) 时间曲线图上可以看出, 乙炔的压力) 时间曲线非常陡峭, 丙烷和甲烷的压力) 时间曲线比较平坦一些。这主要是由于乙炔的燃烧速度越大, 火焰速度也越大, 爆炸时间相应也就减少, 其压力上升速率比另外两种气体也就要大得多。另外, 燃料活性越高, 燃烧速率相应也就越大, 释放的能量也就越多, 在同一个空间点上的爆炸压力也越大。乙炔的爆炸压力明显要大于丙烷, 丙烷的爆炸压力大于甲烷。

结 论

在对可燃气体爆燃过程分析的基础上, 利用气体动力学和化学反应动力学建立的数值模型较好地反映了实际爆燃情况, 可用以计算管道内可燃气体爆燃的最大压力以及压力上升速率, 为可燃气体爆燃的机理、抑爆、防爆和泄爆研究提供了大量的基础数据和理论基础。

在其他条件相同的情况下, 燃料活性越高, 其爆炸压力也越大, 且达到最大压力的时间也越短, 因此其最大爆炸压力上升速率也越大。同类燃料在不同体积的密闭容器内发生爆炸时, 其最终爆炸压力相同, 但达到最大压力的时间不相同, 其最大爆炸压力上升速率随体积的增大而减少。

参 考 文 献

1 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 15~ 22, 162~ 182

2 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 2001

3 周光炯, 严宗毅, 许世雄等. 流体力学上册. 北京: 高等教育出版社, 2001

4 陈义良, 张孝春, 孙慈等编译. 燃烧原理. 北京: 航空工业出版社, 1992

5 范维澄, 万跃鹏. 流动及燃烧的模型与计算. 北京: 中国科学技术出版社, 1992

6 恽寿榕. 爆炸力学计算方法. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 95~ 96

7 Nagy J. Development and control of dust explosions. Marcel Deker Inc, New York, 1983

8 Van den Berg A C et al. Guidance for the application of the multi-energy method. The 2nd International Specialist Meeting on Fuel) Air Explosions, Bergen, Norway, June 27, 1996

(收稿日期 2003- 01- 10 编辑 居维清)

中国石油天然气集团有限公司在阿塞拜疆陆上钻遇石油

目前, 位于阿塞拜疆西南部的 Gobustan 气田的一口探井在 2 200 m 深处钻遇石油, 中国石油天然气集团有限公司计划在该地区再钻 7 口探井, 以加强勘探力度。

中国石油天然气集团有限公司持有这个价值 7 亿美元的项目 63% 的股份, 阿塞拜疆国家石油公司 SOCAR 持有 20% 股份, 该油田估计剩余储量为(2 500~ 3 000)@10⁴t。

由于中国能源需求增长迅速, 而石油产量下降, 中国的石油公司正多方寻求进口来源。目前, 中国在里海地区的活动逐渐增多, 2003 年 6 月, 中石化与阿塞拜疆签署了一项价值 1.4 亿美元的合作项目, 旨在恢复该国一中型陆上油田的开采活动。

(陈敏 摘)

Jinzhou¹ (1. Southwest Petroleum Institute; 2. Oil Production Technology Research Institute of Xinjiang Petroleum Administration). NATURAL GAS IND. v. 23, no. 4, pp. 83 ~ 85, 7/25/2003. (ISSN1000 - 0976; In Chinese)

ABSTRACT: As hydraulic fracturing techniques are developed and applied, the more and more attention has been paid to the analyzing method of pressure decline after fracturing. According to the pressure testing data after the pumps stop, considering the effect of fluid compressibility in the fractures, and based on the principle of fluid mass equilibrium, the pressure variation law is first investigated before and after fracturing. It is found that the function of pressure vs. time appears linear relationship before and after fractures closure. A new accurately analyzing method is developed to determine the closure points of propping fractures. And the calculating method is provided to determine the closure pressure and time of the fractures, and other parameters for fracturing evaluation. Considering the influence of the proppant, the method can be used to analyze the pressure data of fracturing test and the pressure data after fracturing with sand. With the method, the evaluation parameters, such as fracturing fluid loss coefficients, fracture length, fracture width, and fracturing fluid efficiency, etc., can be achieved. Also, the evaluation parameters, such as the fractures closure pressure and time, the closure pressure and time of the propped fractures, and the width of the propped fractures, etc., which can't be determined by traditional analyzing method of pressure drop, can be achieved. The applicability and reliability of the method is demonstrated by calculation with real cases.

SUBJECT HEADINGS: Fracturing, Pressure decline, Analytical method, Fracture(rock), Parameter, Closure stress

Guo Dali (professor), born in 1967, is a Master. Add: Nanchong, Sichuan (637001), China Tel: (0817) 2643401

NUMEROUS SIMULATION OF SEMISPHERICAL FLAMMABLE GAS CLOUD EXPLOSIONS*

Bi Mingshu, Dingxinwei, Wang Shulan and Shao Wei (Chemical Engineering Institute of Dalian Technology University). NATURAL GAS IND. v. 23, no. 4, pp. 86 ~ 89, 7/25/2003. (ISSN1000 - 0976; In Chinese)

ABSTRACT: During transportation, storage, processing, and utilizing of flammable gas, explosion accidents of gas cloud caused by leakage of the gas often cause severe person injuries and great property loss. The features and power of gas cloud explosions are investigated to prevent the accidents and decrease the loss. With the finite difference method, a numerous simulation program has been worked out to solve the control equations

for the explosion process of flammable gas clouds. The source item of the equations is treated by means of even energy addition model, and the disconnection in the explosion field is coped with artificial viscosity model. According to the explosion experience of acetylene-air clouds in the open space, the deviations of numerous calculation results are not more than 13%. The calculation results indicate that the explosion pressure and the rate of pressure rise increase with the cloud radius and the explosion reaction heat.

SUBJECT HEADINGS: Combustible gas, Explosion, Numerous simulation, Explosive force

Bi Mingshu (Doctor), born in 1962, is an assistant professor. Add: Dalian, Liaoning (116024), China Tel: (0411) 3629481 E-mail: mingshub@21cn.com

1- D NUMEROUS SIMULATION OF COMBUSTIBLE GAS DEFLAGRATION IN PIPELINE*

Bi Mingshu, Yin Wanghua, Ding Xinwei and Wang Shulan (Chemical Engineering Institute of Dalian Technology University). NATURAL GAS IND. v. 23, no. 4, pp. 89 ~ 92, 7/25/2003. (ISSN1000 - 0976; In Chinese)

ABSTRACT: Combustible gas deflagrations in a closed place are always the big disaster in the chemical industry, petroleum industry, mining industry, and metallurgical industry. Since the explosion source from the mixture of combustible gas and air has the characteristics of small energy density, big volume of explosion source, and long time for energy discharge, etc. the strong explosion approximation of point source can't be applied. With the fluid mechanics and chemical reaction dynamics equations, the numerous simulation has been conducted for combustible gas deflagration in pipeline, and pressure field, temperature field and density field are obtained for the different deflagration time. According to the calculation results, and the influence of the activity and composition of combustible gas, and the length of pipeline on deflagration pressure and the rate of pressure rise is discussed. The theory foundation and calculation results can be applied in the design of deflagration prevention, suppression and venting for the engineering.

SUBJECT HEADINGS: Pipeline, Closed system, Combustible gas, Explosion, Numerical simulation

Bi Mingshu: See the last article.

A NEW PREDICTIVE METHOD OF GAS PIPELINE LOAD*

Yang Zhao, Miao Zhibin and Liu Yan (Thermal Energy Research Institute of Tianjin University). NATURAL GAS IND. v. 23, no. 4, pp. 93 ~ 96, 7/25/