

文章编号: 1001-1455(2003)01-0081-05

气云内存在障碍物时的爆炸压力计算*

毕明树, 银建中, 王淑兰, 丁信伟

(大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116012)

摘要: 通过引入障碍物扰动因子, 对球形可燃燃气云内存在对称障碍物的爆炸过程进行了理论分析, 建立了物理和数学模型, 并编制了爆炸压力场的计算程序, 获得了气云爆炸压力与气云半径、距气云中心的距离之间的关系。按国际标准和美国标准建设了爆炸试验系统并进行了试验, 计算结果与实验结果的偏差小于20%。将计算结果与多能模型方法比较, 在气云爆炸超压与量纲一距离之间的关系上, 结果与多能模型一致, 且较大的气云与多能模型中较高的爆炸级别相对应。

关键词: 流体力学; 可燃气体; 爆炸; 安全

中图分类号: O354

国标学科代码: 130°2517

文献标志码: A

1 引言

可燃燃气云爆炸是常见的工业灾害之一。为防治可燃气体爆炸, 首先应探索其破坏效应, 这方面的研究工作已有几十年的历史, 并提出了多种理论分析方法^[1]。然而, 可燃气体爆炸过程非常复杂, 不但与可燃气体本身的性质有关, 还受到环境、爆炸场中的障碍物等条件的影响, 给理论分析和实验研究带来了许多困难。实验研究工作给出了障碍物对爆炸强度加强作用的真实数据, 但限于实验手段和经费, 数据量不足, 且各研究者的实验条件差别较大, 难以得出定量结论^[2]。理论解析解也难以获得。数值模拟方法原则上可以解决各类问题, 但受到基础研究的限制, 例如适合于气云爆炸的精确的湍流模型尚在研究之中, 分步反应模型也不成熟, 仍处在发展之中^[3]。鉴于这种现状, 本文拟对球形可燃燃气云内存在对称障碍物的爆炸过程进行理论分析, 建立物理和数学模型, 并在此基础上编制计算程序, 获得气云内存在障碍物时的爆炸压力。

2 计算模型

设有均匀混合的球形气云, 在半径为 R_0 的球形范围内存在障碍物, R_0 以外没有障碍物。从中心点燃后, 形成一层球面火焰, 然后能量不断输送给邻近的混合气层, 使其温度升高而着火, 形成新的火焰。整个爆炸过程可视为由点燃点开始, 一层层新混合气依次着火, 并向未燃混合气传播的过程。这样, 整个爆炸过程中火焰面相当于一个球形的活塞推动着整个区域气体的运动。因此可以把气云爆燃引起的压力波传播分成两个相互耦合的过程进行考虑: 一个是可燃气体混合物在燃烧过程中体积膨胀, 从而推动外侧空气运动, 即燃烧过程是空气中压力波传播推动力的过程, 这个过程可以通过对能量方程采用几何微元法和能量均匀加入法进行求解; 另一个是火焰外侧的压力波传播过程, 这个过程是一个纯粹的气体动力学问题, 可以通过气体动力学方程求解。本文中主要研究气云界外的压力场。

无约束球形气云爆炸时火焰的扩展过程可视为点对称过程, 其压力场可通过燃烧过程的能量方程和压力波传播过程的质量和动量方程求解^[4]。当气云内存在非球形障碍物时, 严格地说已不再是点对称过程, 但由于本文中主要讨论气云界外的压力场, 所以可以把障碍物的作用采用扰动因子来表示, 即

* 收稿日期: 2001-10-15; 修回日期: 2002-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(50076006)

作者简介: 毕明树(1962—), 男, 博士, 副教授。

只考虑障碍物对火焰的加速作用,而忽略它引起的局部火焰路径变化。因此描述理想可燃气体爆炸过程的 N-S 方程仍采用球面坐标形式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} \quad (2)$$

式中: ρ 、 u 、 r 、 t 分别为气体密度、气体流速、观测点距爆心的距离、时间, p 为爆炸压力, $\partial \tau_{rr} / \partial t$ 代表障碍物引起的气体扰动项, R.C. Philip 等^[4]提出了以下表达式

$$\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} = k_1 \frac{\partial u}{\partial t} + k_2 \frac{u^2}{2} \quad (3)$$

式中: $k_1 \partial u / \partial t$ 表示障碍物对气云的惯性曳力, $k_2 u^2 / 2$ 表示障碍物的形体曳力。 k_1 、 k_2 是扰动因子, 它们可表示为

$$k_1 = C_m V_b, \quad k_2 = C_d A_t / V \quad (4)$$

式中: C_m 和 C_d 为取决于障碍物的形状及尺寸的常数, V_b 为障碍物体积与气云体积之比, 即障碍物的体积占有率, A_t 为垂直于气流流动方向的总面积, V 为气云初始体积。

爆燃过程进行得很快, 通常在毫秒级完成, 压力波的传播过程可视为绝热过程, 过程方程的微分形式为

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{p_0^{1/\gamma}}{\rho_0} \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\partial p^{\gamma-1/\gamma}}{\partial r} \quad (5)$$

式中: p_0 为气云初始压力, ρ_0 为气云初始密度, γ 为比热比。将式(3)、(4)、(5)、(6)代入式(2)得

$$k_1 \int \frac{\partial u}{\partial t} dr + \int \frac{\partial u}{\partial t} dr + \int u \frac{\partial u}{\partial r} dr + k_2 \int \frac{1}{2} u^2 dr = -\frac{p_0^{1/\gamma}}{\rho_0} \frac{\gamma}{\gamma-1} \int \frac{\partial p^{(\gamma-1)/\gamma}}{\partial r} dr \quad (6)$$

要对式(6)进行积分, 需要确定速度场。由于在爆燃情况下燃烧速度与当地音速相比很小, 所以火焰前面的流场中气体的密度变化不大, 因此为简化质量守恒方程, 可把密度视为常数, 即 $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial \rho}{\partial r} = 0$, 代入式(1)可得到速度场

$$u(r) = u(R_f) R_f^2 / r^2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{R_f^2}{r^2} \frac{du(R_f)}{dt} + u(R_f) \frac{2R_f}{r^2} \frac{dR_f}{dt} \quad (8)$$

式中: R_f 为火焰前沿距爆心的距离。对式(6)积分得

$$(1 + k_1) \left[\frac{R_f^2}{r} \frac{du(R_f)}{dt} + 2 \frac{R_f}{r} \frac{dR_f}{dt} u(R_f) \right] - \frac{1}{2} \frac{R_f^4}{r^4} u^2(R_f) + \frac{1}{6} \frac{R_f^4}{r^3} u^2(R_f) = \frac{p_0^{1/\gamma}}{\rho_0} \frac{\gamma}{\gamma-1} p^{(\gamma-1)/\gamma} + C_1 \quad (9)$$

式中: C_1 为积分常数。边界条件为: 当 $r \rightarrow \infty$ 时, $p = p_0$, 代入式(9)得

$$C_1 = -\frac{p_0}{\rho_0} \frac{\gamma}{\gamma-1} \quad (10)$$

大气条件下的声速

$$a = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}} \quad (11)$$

将式(10)、(11)代入式(9)得

$$(1 + k_1) \left[\frac{R_f^2}{r} \frac{du(R_f)}{dt} + 2 \frac{R_f}{r} \frac{dR_f}{dt} u(R_f) \right] - \frac{1}{2} \frac{R_f^4}{r^4} u^2(R_f) + \frac{1}{6} \frac{R_f^4}{r^3} u^2(R_f) = \frac{a^2}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (12)$$

火焰速度为 $S_f = \frac{dR_f}{dt}$, 可燃气云爆燃过程中, 火焰速度是气体流动速度与气体燃烧速度之和, 即

$$u(R_f) = \frac{dR_f}{dt} - S_u = S_f - S_u \tag{13}$$

式中: S_u 为气云层流燃烧速度。球面火焰传播过程中, 火焰速度是层流燃烧速度的 E 倍, E 为气云燃烧过程的膨胀比, 通常 $E = 1.6 \sim 2.2$ ^[6], 则 $S_f = ES_u$, 代入式 (13) 得

$$u(R_f) = (E - 1)S_u \tag{14}$$

将式 (14) 代入式 (12) 得

$$\frac{p}{p_0} = \left[\frac{\gamma - 1}{a^2} (E - 1) \left(\left[\frac{R_f^2}{r} \frac{dS_u}{dt} + 2 \frac{R_f}{r} ES_u^2 \right] + (1 + k_1) - \frac{1}{2} \frac{R_f^4}{r^4} (E - 1) S_u^2 - \frac{1}{6} k_2 \frac{R_f^4}{r^3} (E - 1) S_u^2 \right) + 1 \right]^{\gamma/(\gamma - 1)} \tag{15}$$

令 $A = \frac{R_f^2}{r} \frac{dS_u}{dt} + 2 \frac{R_f}{r} ES_u^2$, $B = K_1 A$, $C = \frac{1}{2} \frac{R_f^4}{r^4} (E - 1) S_u^2$, $D = \frac{1}{3} k_2 r C$, 则

$$\frac{p}{p_0} = \left[\frac{\gamma - 1}{a^2} (E - 1) (A + B - C - D) + 1 \right]^{\gamma/(\gamma - 1)} \tag{16}$$

同理, 当 $R_c < R_f \leq R_b$ 时, 式 (16) 仍然成立, 其中 $A = \frac{R_f^2}{r} \frac{dS_u}{dt} + 2 \frac{R_f}{r} ES_u^2$, $B = 0$, $C = \frac{1}{2} \frac{R_f^4}{r^4} (E - 1) S_u^2$, $D = 0$, R_c 为障碍物边界半径, R_b 为气云燃烧的最终半径。

3 实验及结果

本实验依靠 0.2mm 的聚乙烯薄膜形成半球形限制膜, 然后向球内充入按化学计量量配比的乙炔与空气的混合物。从而形成半球形气云。气云内设有障碍物, 障碍物用砖块制成, 砖块尺寸为 230mm × 110mm × 50mm, 摆放位置如图 1 所示。气云外放置了由 1.6m × 4.8m × 0.02m 的木板制成的平板, 以角钢固定, 使之具有足够的刚性和稳定性, 平板垂直于地面放置。板上按需要钻孔用来放置压力变送器, 变送器垂直于平板放置。坐标原点设在球面法线在平板上的垂足处。在半球形气云的中心设置有点火电极。点火装置参照国际标准 ISO6184《Explosion Protection Systems》和美国标准 NFPA68《Guide For Venting of Deflagrations》的规定制作, 采用电火花点燃, 点火电极之间的间隙为 3 ~ 5mm, 点火能量约为 100mJ。气云爆炸产生的压力与时间曲线^[5]由量程为 -5 ~ 10kPa 的压力变送器感受, 经数据采集卡采集, 最后由计算机记录。变送器的动态响应时间为 1ms, 精度为 0.5%; 采集卡为 12bit, 精度为 0.02%。

表 1 给出了气云初始半径 $R_0 = 50\text{cm}$ 的乙炔-空气气云爆炸时距爆心的距离 $d = 100, 213.5\text{cm}$ 的平板上的压力分布试验结果, 图 2 是平板坐标 $x = 0$ 时爆炸压力沿板高度方向的变化。

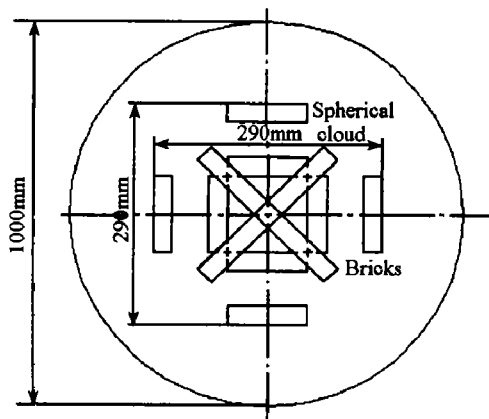


图 1 气云内砖块障碍物俯视图
Fig. 1 The planform of bricks in the gas cloud

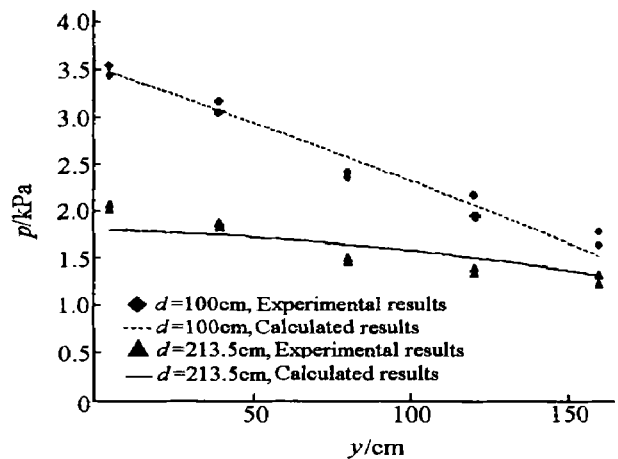


图 2 气云爆炸压力沿平板高度方向的变化
Fig. 2 The $p - y$ relations of C_2H_2 -air cloud explosions

表1 内部有障碍物的乙炔-空气气云爆炸试验与计算结果

Table 1 The calculated and experimental results of C₂H₂-air cloud explosions

$(x, y)/\text{cm}$ \bar{p}_e/kPa p_c/kPa $\Delta p_e/(\%)$				$(x, y)/\text{cm}$ \bar{p}_e/kPa p_c/kPa $\Delta p_e/(\%)$				$(x, y)/\text{cm}$ \bar{p}_e/kPa p_c/kPa $\Delta p_e/(\%)$			
$R_0=50\text{cm}, d=100\text{cm}$				$R_0=50\text{cm}, d=213.5\text{cm}$				$R_0=50\text{cm}, d=213.5\text{cm}$			
(0, 5)	3.475	3.424	1.5	(0, 5)	2.051	1.797	12.4	(0, 160)	1.248	1.300	4.2
(50, 5)	3.102	3.012	2.9	(0, 40)	1.845	1.753	5.0	(50, 5)	1.474	1.728	17.2
(0, 160)	1.685	1.544	8.3	(0, 80)	1.470	1.633	11.1	(50, 80)	1.442	1.577	9.4
(50, 160)	1.470	1.478	0.1	(0, 120)	1.350	1.471	9.0	(50, 160)	1.242	1.268	2.1

注: \bar{p}_e 为试验平均值, p_c 为计算值, Δp_e 为偏差。

4 计算结果

根据以上计算模型, 编制了求解内部有障碍物气云的爆炸压力场。对内部摆放砖块的乙炔-空气气云爆炸进行计算, 初始条件仍是大气环境条件, 取初始压力 $p_0=100\text{kPa}$, 初始温度 $T_0=300\text{K}$, 扰动因子 $C_d=5.5$, $C_m=1$ 。为了便于比较, 半球形乙炔-空气气云爆炸最大压力计算结果也列于表1, 气云爆炸压力沿平板高度方向的变化关系如图2所示。图3是几种情况下乙炔-空气气云爆炸的最大爆炸压力 Δp 与距爆心距离 r 之间的关系曲线。

图2表明, 气云一定时, 爆炸压力随着距爆源中心距离的增加而减小, 两者之间的关系近似为双曲线。这种双曲线关系可通过理论推导得到。式(16)的左右两侧同时减1得

$$\frac{p}{p_0} - 1 = \frac{\Delta p}{p_0} = \left[\frac{\gamma-1}{a^2} (A+B-C+D) + 1 \right]^{\gamma/(\gamma-1)} - 1$$

式中: Δp 为爆炸超压值。应用二项式展开有

$$\left[\frac{\gamma-1}{a^2} (A+B-C+D) + 1 \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \approx 1 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\gamma-1}{a^2} (A+B-C+D)$$

由式(16)可知, $A \propto r^{-3}$, $B \propto r^{-3}$, $C \propto r^{-3}$, $D \propto r^{-3}$ 。随着 r 的增大, R_f/r 越来越小, C 和 D 相对于 A 和 B 也越来越小。因此, 当 r 较大时, C 和 D 可以忽略不计, 超压值近似与离开爆心的距离成反比。

多能 (Multi-Energy) 模型^[6] 是荷兰的 TNO 实验室于 1985 年提出来的用于可燃气云爆炸强度计算的模型。它以燃烧能密度 $E_c=3.5\text{MJ/m}^3$ 为依据得到了气云爆炸的最大超压与距离的 10 条关系曲线, 如图4所示。在图中, 爆源强度由弱到强用数字 1~10 表示, 1 代表爆源强度极弱的情况, 只适用于无任何约束的气云爆炸; 10 代表产生爆轰的情况。为便于比较, 将表1的数据按多能模型图的坐标转换后也画在了图4上。可见, 在气云爆炸超压与量纲一距离之间的关系上, 本文结果与多能模型是一致的, 较大的气云与多能模型中较高的爆炸级别 (即爆源强度较强的曲线) 相对应。图4中, $\Delta \bar{p}_s = \Delta p/p_0$ 为量纲一超压, $\bar{r}_s = r/(E_c/p_0)^{1/3}$ 为量纲一对比距离。

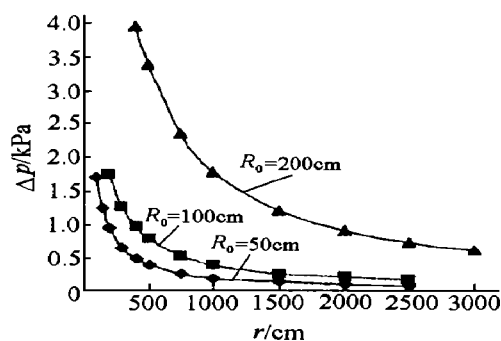
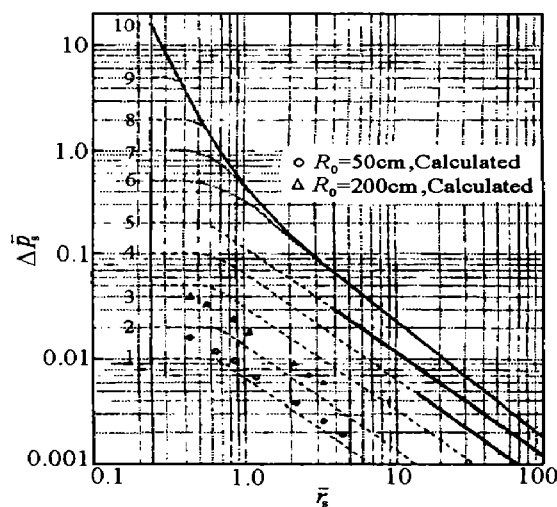
图3 乙炔-空气气云的 $\Delta p-r$ 曲线Fig. 3 The $\Delta p-r$ relations of C₂H₂-air explosions

图4 计算结果与多能模型比较

Fig. 4 Comparison between the calculated results and Multi-energy model

5 结 论

利用气体动力学方程组, 并引入障碍物扰动因子, 建立了内部有障碍物的气云爆炸压力场的计算模型, 获得了压力场计算式。依据气云内有障碍物时的气云爆炸模型编制了求解程序, 对乙炔-空气气云爆炸压力场进行了计算。与实验结果相比, 计算结果的偏差小于 20%。

通过将本文结果与多能模型结果比较可知, 两者在气云爆炸压力的发展趋势上是一致的, 不同直径的气云爆源对应多能模型中的不同爆炸等级。本文的结果可针对球形气云爆炸的具体情况给出爆炸压力分布, 也相当于为多能模型的应用确定了具体等级, 从而避免了等级选取中的盲目性。

参考文献:

- [1] Mercx W M, van den Berg A C, Hayhurst C J, et al. Developments in vapor cloud explosion blast modeling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 71: 301-319.
- [2] David C B. Review of large-scale explosion experiments[J]. *Plant/operation Progress*, 1992, 11(1): 33-41.
- [3] Librovič B V, Makhviladze G M, Roberts J P, et al. Simulation of vapor explosions[J]. *Applied Energy*, 1999, 64: 317-321.
- [4] Philip R C, Clive G R. An analysis of the mechanisms of overpressure generation in vapor cloud explosions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1996, 45: 27-44.
- [5] 毕明树, 王淑兰, 丁信伟. 无约束气云弱点火爆炸压力实验研究[J]. *化工学报*, 2001, 52(1): 85-87.
BI Ming-shu, WANG Shu-lan, DING Xin-wei. Experimental study on explosion pressures of unrestricted gas cloud explosions[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2001, 52(1): 85-87.
- [6] Mercx W P M, Van den Berg A C. The explosion blast prediction model in the revised "yellow book"[A]. *The 31st Annual Loss Prevention Meeting*[C]. Houston, 1997: 1-18.

Explosion pressure calculation of flammable gas clouds with barriers

BI ming-shu, YIN Jian-zhong, WANG shu-lan, DING Xin-wei

(*School of Chemical Engineering, Dalian University
of Technology, Dalian 116012, Liaoning, China*)

Abstract: Based on experimental and theoretical analyses on explosion process of flammable gas clouds with barriers, a physical and mathematical model is suggested and a code is developed to calculate explosion pressure distribution. The relationship among cloud explosion pressure, cloud radius and distance from ignition point was derived. An experimental system that met ISO6164 "Explosion Protection System" and NFPA68 "Guide For Venting of Deflagrations" was set-up to prove the effectiveness of present calculation method. Compared with the experimental results, the deviations of present calculated results are less than 20%. Present method provides a useful way to evaluate explosion grade in the application of multi-energy model.

Keyword: fluid mechanics; flammable gas cloud; explosion; safety