

文章编号: 1001-1455(2002)02-0148-04

无约束气云爆燃压力场的计算

毕明树, 王淑兰, 丁信伟

(大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116012)

摘要: 利用球形流体力学方程和燃烧反应模型导出了无约束气云弱点火爆燃过程的压力分布场, 编制了求解压力场的计算程序, 可计算不同尺寸气云爆炸时各点的爆炸压力值。进行了可燃气云爆燃实验, 对计算结果进行了考核。与实验结果相比, 计算结果的偏差小于20%。

关键词: 可燃气云; 爆燃; 计算*

中图分类号: O381 文献标识码: A

1 引言

无约束可燃气云爆炸一直是人们关注的课题之一。这方面的理论与实验工作已进行了多年。关于弱点火气云爆炸的实验研究基本上是针对某些特定工况的试验结果^[1~3], 未能通过归纳总结得出某种规律, 又由于影响爆燃过程的因素较为复杂, 完全依赖实验研究也很难获得通用可靠的规律。在理论^[4~6]上, TNT当量法属于经验型或现象型模型, 由于可燃气体爆燃过程与TNT炸药爆炸过程有着本质的不同, 实际应用中往往造成很大偏差; 自相似方法过度简化了的模型, 把爆燃过程视为以恒速运动的活塞运动过程, 与实际情况差距很大; TNO多能模型虽然从概念上比较合理, 但是应用时还带有很强的主观性和盲目性; 随着计算机技术的发展, 数值模拟方法将成为解决这类问题的有效途径, 但这方面的工作还很不成熟, 正处在发展阶段, 目前主要是利用各种差分格式求解流体力学运动方程, 求解精度也各不相同, 各有优缺点, 化学反应动力学方程和湍流方程仍是学术界的热点。可见, 目前尚未找到非常有效的研究方法, 更谈不上成熟的结论。

在本文中, 我们拟从气体动力学方程出发导出无约束气云爆炸过程的压力分布场, 编制求解压力场的计算程序, 计算不同尺寸气云爆炸时各点的爆炸压力值, 并进行实验考核。

2 计算模型

半球形气云是工业中常见的气云, 中心点燃后, 火焰以球面向外传播, 在某时刻 t 传播到了火焰位置 R_t 处。此时的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, 为此过程提供能量。这种过程的质量和动量守恒方程分别为

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

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

式中: p 为爆燃压力; r 为观测点距爆源中心的距离; t 为时间; u 为气体流速; ρ 为气体密度。

爆燃过程很短, 可视为绝热过程, 引用绝热压缩状态方程的微分形式

$$p \rho^{-\gamma} = p_0 \rho_0^{-\gamma} \quad (3)$$

微分得

* 收稿日期: 2001-02-28; 修回日期: 2001-06-10
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。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{p_0^{1/\gamma}}{\rho_0} \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\partial p^{(\gamma-1)/\gamma}}{\partial r} \quad (4)$$

式中: p_0 为气云初始压力; ρ_0 为气云初始密度; γ 为比热容比。

将式(4)代入式(2)积分

$$\int_r^\infty \frac{\partial u}{\partial t} dr + \int_r^\infty u \frac{\partial u}{\partial r} dr = -\frac{p_0^{1/\gamma}}{\rho_0} \frac{\gamma}{\gamma-1} \int_r^\infty \frac{\partial p^{(\gamma-1)/\gamma}}{\partial r} dr \quad (5)$$

由于在爆燃情况下, 燃烧速度与音速相比很小, 火焰前面的整个流场中气体的密度变化不大, 故 $\partial \rho / \partial t \approx 0$ 。代入式(1)得

$$u(r) = u(R_f) R_f^2 / r^2 \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)积分得

$$\frac{p(r)}{p(\infty)} = \left[\frac{\gamma-1}{\gamma p^{(\gamma-1)/\gamma(\infty)} p_0^{1/\gamma}} \left[\frac{2R_f u(R_f)}{r} \frac{dR_f}{dt} + \frac{R_f^2}{r} \frac{du(R_f)}{dt} - \frac{1}{2} \frac{R_f^4 u^2(R_f)}{r^4} \right] + 1 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (7)$$

通常情况下气云初始压力等于无穷远处的大气压力, 即 $p_0 = p(\infty)$, 音速 $c = \sqrt{\gamma p_0 / \rho_0}$, 故

$$\frac{p(r)}{p_0} = \left[\frac{\gamma-1}{c^2} \left[\frac{2R_f u(R_f)}{r} \frac{dR_f}{dt} + \frac{R_f^2}{r} \frac{du(R_f)}{dt} - \frac{1}{2} \frac{R_f^4 u^2(R_f)}{r^4} \right] + 1 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (8)$$

可燃燃气爆燃过程中

$$u(R_f) = dR_f / dt - S_u = S_f - S_u \quad (9)$$

式中: R_f 为火焰位置; S_f 为火焰速度; S_u 为层流燃烧速度。

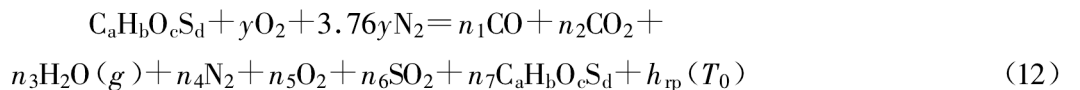
设火焰传播过程中, 燃烧产物体积是燃烧反应物体积的 E 倍, 则 $S_f = ES_u$, 代入式(9)得

$$u(R_f) = (E-1)S_u \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)得

$$\frac{p(r)}{p_0} = \left[\frac{\gamma-1}{c^2} (E-1) \left[\frac{2ER_f}{r} S_u^2 + \frac{R_f^2}{r} \frac{dS_u}{dt} - \frac{1}{2} (E-1) \frac{R_f^4}{r^4} S_u^2 \right] + 1 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (11)$$

燃烧过程的能量方程采用一步反应模型, 由碳、氢、氧、硫等元素组成可燃气体与空气的反应方程



式中: y 为化学反应方程的配比系数; n 为物质的剂量系数; h 为物质的焓; $h_{rp}(T_0)$ 为燃烧反应热

$$h_{rp}(T_0) = (n_2 h_{CO_2} + n_3 h_{H_2O} - y_{cc} h_{O_2} - h_f + n_6 h_{SO_2}) T_0 \quad (13)$$

$$\text{化学方程式平衡, 有 } \sum_{i=1}^7 [h_i(T) - h_i(T_0)] n_i = -(1-n_7) h_{rp}(T_0) + h_{rpCO_2}(T_0) n_1 \quad (14)$$

式中: y_{cc} 为化学反应方程的临界配比系数; h_{rpCO_2} 是 CO_2 的分解反应热。

3 实验及计算结果检验

为了检验计算结果的精度, 我们进行了乙炔-空气气云的爆炸实验。实验利用 0.2mm 的聚乙烯薄膜形成半球形限制膜, 然后向球内充入按理想当量配比的乙炔与空气的混合物, 从而形成半球形气云。在半球形气云的中心设置有点火电极, 点火能量约为 100mJ。气云爆炸产生的压力与时间曲线由量程为 -5 ~ 10kPa 的压力变送器接收, 经数据采集卡采集后由计算机纪录。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%。图 1 是一个记录示例。

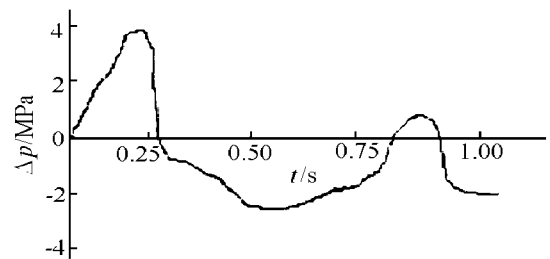


图 1 气云爆炸的压力-时间历史

Fig. 1 Pressure history of gas cloud explosion

依据式(11)~(14),编制了求解无约束气云爆燃过程的计算程序。可获得各种可燃气云爆炸时的压力场。表1和图2给出了爆炸超压 Δp 的计算值及实验值(实验值为三次实验的平均值)的比较。可见,计算值与实验值的最大偏差小于 20%。

表 1 乙炔-空气气云爆炸压力实测值与计算值比较

Table 1 Comparisons between calculated and experimental overpressures

$R_0 = 50\text{cm}$				$R_0 = 100\text{cm}$			
r/cm	$\Delta p/\text{kPa}^{1)}$	$\Delta p/\text{kPa}^{2)}$	偏差/(%)	r/cm	$\Delta p/\text{kPa}^{1)}$	$\Delta p/\text{kPa}^{2)}$	偏差/(%)
60	0.396	0.402	1.5	160	1.872	1.744	6.8
100	0.266	0.267	3.8	200	1.805	1.604	11.1
140	0.186	0.194	4.3	240	1.353	1.413	4.4
180	0.152	0.152	0	280	1.112	1.244	11.9
220	0.123	0.124	0.8	320	1.063	1.104	3.7
260	0.106	0.106	0	400	0.733	0.796	8.6

1)实验值; 2)计算值。

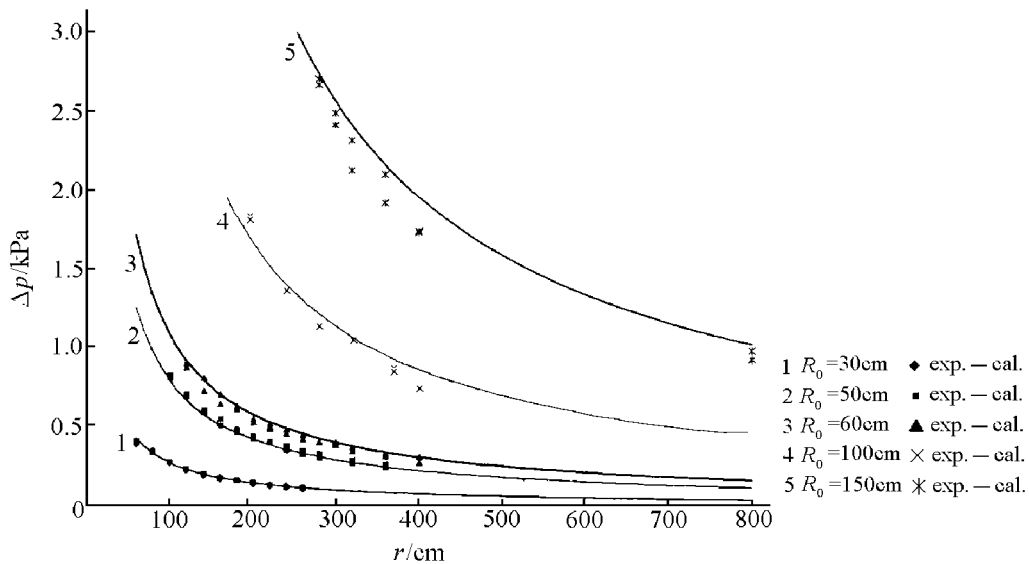


图 2 爆炸超压计算结果与实验结果的比较

Fig.2 Comparisons between calculated and experimental overpressures

4 讨 论

4.1 最大爆炸压力

实验及计算结果表明,随着火焰的前进,各点的爆炸压力不断增加。但火焰的传播是有边界的,设此边界在距离爆心为 R_b 处,则 $0 < R_f \leq R_b$, 对于半球形气云

$$R_b = R_0 \sqrt[3]{E} \tag{15}$$

火焰传播到达边界 R_b 时,火焰面消失,流场依靠惯性向前运动。根据式(11), $p(r)$ 随 R_f 的增加而递增,且当 $R_f = R_b$ 时,各点的压力值达到最大值,即

$$\frac{p(r)}{p_0} = \left\{ \frac{\gamma-1}{c^2} (E-1) \left[\frac{2ER_b S_u^2}{r} + \frac{R_b^2}{r} \frac{dS_u}{dt} - \frac{1}{2} (E-1) \frac{R_b^4}{r^4} S_u^2 \right] + 1 \right\}^{\gamma/\gamma-1} \tag{16}$$

随着 r 的增大, R_b/r 逐渐减小, R_b/r^4 的影响也逐渐减小。如果忽略该项,则各点的最大压力与该点离开爆心的距离成反比。当 $r = R_b$ 时,爆燃压力达到最大值。

4.2 爆燃过程的负压

当火焰传播到边界时,火焰熄灭,向流场加入能量的过程就此结束。此时是燃烧气体和空气的惯性

使整个流场在运动。而后, 由于气体的过膨胀, 同时爆燃产物向大气散热和扩散, 温度下降, 压力随之下降, 导致了流场中产生一个很大的负压。并且气云越大, 此负压绝对值越大, 持续的时间也越长。这个现象已为实验所证实。

4.3 气云半径对爆燃压力的影响

气云点燃后, 燃烧产物推动未燃气体和空气向前运动, 并产生一定程度的湍流, 导致火焰不断加速, 即 $dS_u/dt > 0$ 。由式(11)可知, 火焰加速度越大, 爆炸压力越高。一般来说, 气云半径越大, 火焰加速越快, 爆炸压力就越高。如果气云内有障碍物, 火焰急剧加速, 爆炸压力会更高。

4.4 关于点火能量

工业气云爆炸的点火源大多是静电、火花塞等, 它们的点火能量一般不超过数十毫焦。本文的爆炸实验所用的点火装置的点火能量约为 100mJ, 属工业气云爆炸的常见点火能量中的较大值, 同时又符合弱点火条件。我们采用的点火方式也符合国际标准 ISO6184 和美国标准 NFPA68 的规定。在该范围内, 气云爆炸压力受点火能量的影响很小, 且不会产生爆轰波。

4.5 关于气云爆炸的影响范围

根据前面的研究结果, 气云爆炸在各点的爆炸压力与该点距爆心的距离成反比, 与气云半径的平方成正比。因此, 气云尺寸越大, 影响范围也越大。对于特定的气云来说, 距气云爆心足够远的地方, 爆炸压力就衰减至常压。根据图 2 的计算和实验结果, 爆炸超压与距离之间是一条近似的双曲线, 即爆炸超压与距离成反比, 因此可视具体情况判断气云爆炸的影响范围。

5 结 论

(1)建立了爆炸过程的物理和数学模型, 由气体动力学方程导出了无约束气云爆炸压力的计算式。

(2)编制了无约束气云爆炸过程的计算程序。通过对计算结果的分析, 得到了爆炸压力的基本规律, 即气云直径越大、气云爆炸压力越大, 影响范围也越广。经实验检验, 在本文所述的实验范围内, 计算结果与实验结果的偏差不大于 20%。

参考文献:

- [1] David B. Review of Large-scale Explosion Experiments[J]. Plant/Operation Progress, 1992, 11(1):33—41.
- [2] 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.
- [3] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [4] Van den Berg A C. Evaluation of Consequence Models for Gas Explosions and Blast Propagation[J]. The 8th Inter Symp on Loss Prev and Safety Promotion in the Proc Industries[C]. Antwerp, Belgium; 1995.1—69.
- [5] Librovich B V, Makhviladze G M, Roberts J P, et al. Numerical Analysis of Combustion of Fuel Gas Clouds[J]. Combustion and Flame, 1999, 118:669—683.
- [6] 彭金华, 汤明钧. 非理想爆源产生的爆炸场数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1991, 11(4):289—296.

A Calculations of Deflagration Pressure Field of Unrestricted Flammable Gas Cloud

BI Ming-shu, WANG Shu-lan, DING Xin-wei

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

Abstract: A numerical code is proposed to calculate the deflagration pressure fields of flammable gas cloud under weak ignition, which is deduced from combustion reaction model and gas dynamics equations in spherical coordinate. The experiments of gas cloud explosion were carried out to examine the validity of the calculations. The difference of results between experiments and calculations is less than 20%.

Key words: Flammable cloud; Deflagration; Calculation