

管状容器气体燃爆泄放过程的数值模拟^{*}

王志荣 蒋军成

(南京工业大学城市建设与安全环境学院)

王志荣等.管状容器气体燃爆泄放过程的数值模拟.天然气工业,2005;25(6):122~124

摘要 工业过程中管状容器气体爆炸事故时有发生,严重威胁着过程工业的安全生产。为预防这类事故,通常会在容器上安装泄压装置,这就要求对该类容器进行防爆泄压设计。对管状容器气体爆炸泄放过程进行分析,特别是容器内压力发展特性的分析是进行防爆泄压设计的关键。为此,首先分析了管状容器内气体爆炸泄放过程,根据其燃爆发展规律建立了描述整个泄爆过程的物理模型。从能量守恒方程和质量守恒方程出发,结合气体状态方程、绝热压缩方程和气体泄放速率方程建立了泄爆过程的数学模型,利用四阶龙格—库塔方法对该过程进行了数值模拟,得到了不同时刻燃爆压力、压力上升速率、火焰位置和火焰传播速度。另外还讨论了泄压面积和泄爆压力对泄爆过程的影响,对于该类容器的防爆泄压设计具有指导意义。

关键词 管类 容器 可燃气体 燃烧 爆炸 泄放 过程 数值模拟

开口泄压是预防管状容器气体爆炸事故的常见方法^[1]。但目前对此类容器开口泄爆过程缺乏深入研究,特别是对于容器内压力发展特性的研究。对于球形或长径比接近1的方形容器的中心点火泄爆过程,国外有些研究工作具有代表性,如Bradley通过研究给出了开口面积、容器体积和泄爆压力等参数的关联公式^[2];Chippett考虑了球形容器内燃烧状况的影响,通过加入湍流加速因子、燃烧不稳定性因子和火焰面变形系数对泄爆设计的关联公式进行了修正^[3],但由于参数的不确定性和不同形状容器中泄爆发展的差异,将这些模型应用于管状容器时差别较大,由于气体泄爆过程比较复杂,影响因素较多,直接使用计算公式进行安全泄放设计误差较大^[4]。笔者对管状容器气体泄爆过程进行了数值模拟,探讨了泄爆过程发展规律,并研究分析了泄放面积和泄爆压力对压力发展特性的影响。

一、数学模型

1. 基本假设

为了对管状容器气体泄爆过程进行数值模拟,必须作一些基本假设:①点火面在密闭端,火焰面为平面;②容器内气体属于理想气体,满足理想气体状态方程;③燃爆在绝热条件下进行,泄爆过程中气体

受到等熵压缩;④容器内压力分布均匀,不存在压力梯度。

2. 数学模型

图1是管状容器燃爆泄放过程的物理模型,假设容器轴向长度为 L ,火焰面位于密闭端,容器截面积和泄放面积分别为 S_0 和 S_v ,环境压力为 p_0 ,环境

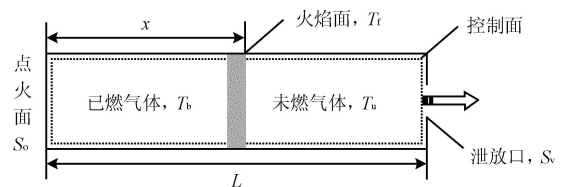


图1 管状容器气体燃爆泄放过程物理模型示意图

温度为 T_0 。燃爆时刻 t 时火焰面位于 x 位置,火焰温度为 T_f ,燃烧速度为 C_u ,已燃和未燃气体温度分别为 T_b 和 T_u ,容器内压强为 p ,已燃、未燃和泄放气体质量分别为 m_r 、 m_u 和 m_v 。由图1中控制体可列出气体状态方程:

$$pS_0 x = m_r R_{gb} T_b \quad (1)$$

$$pS_0 (L - x) = m_u R_{gu} T_u \quad (2)$$

式中: R_{gb} 、 R_{gu} 分别表示已燃和未燃气体的气体常数; R 表示气体常数,8.314 J/(mol·K)。

由层流燃烧理论, t 时刻气体燃烧质量变化率和

^{*} 本成果受到国家自然科学基金项目(No.29936110)和江苏省青年科学基金项目(BQ98029)的资助。

作者简介:王志荣,1977年生,博士研究生;主要从事化工过程火灾和爆炸灾害模拟分析与防治技术的研究。地址:(210009)江苏省南京市。电话:(025)83587422,66814898。E-mail:zhirongwang@etang.com

燃烧速度分别为:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\pi}{4} d^2 \rho C_u \quad (3)$$

$$C_u = C_0 \left(\frac{T_u}{T_0} \right)^2 \left(\frac{p_0}{p} \right)^{0.5} \quad (4)$$

式中: d 表示管状容器直径, m ; ρ 表示未燃气体密度, kg/m^3 ; C_0 表示常温常压下气体燃烧速度, m/s 。

根据绝热压缩方程, 可求得已燃气体和未燃气体的温度^[5]:

$$T_u = T_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k_u-1}{k_u}} \quad (5)$$

$$T_b = T_f \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k_b-1}{k_b}} \quad (6)$$

式中: k_u 、 k_b 分别表示未燃气体和已燃气体的绝热指数, 可由热化学和能量守恒计算求得^[6]。

通过绝热条件下气体燃烧能量守恒方程可以求出火焰温度 T_f ^[7]:

$$\sum_{k=1}^m \int_{T_0}^{T_f} M_k C_{p,k,b} dT + \sum_{k=1}^n N_k \Delta H_{c,k} = 0 \quad (7)$$

式中: $C_{p,k,b}$ 表示已燃气体混合物中组分 k 的定压比热, $J/(mol \cdot K)$; $\Delta H_{c,k}$ 表示未燃气体混合物中组分 k 的燃烧热, J/mol 。

未燃气体通过泄放口的流动状态可以由泄放速率方程描述。对于音速泄放, 泄放速率方程为:

$$\frac{dm_b}{dt} = C_d S_v \sqrt{p \rho_u k_u \left(\frac{k_u+1}{2} \right)^{\frac{1+k_u}{1-k_u}}} \quad (8)$$

对于亚音速泄放, 泄放速率方程为:

$$\frac{dm_b}{dt} = C_d S_v \sqrt{\frac{2k_u p_0 \rho_u}{k_u-1} \left[\left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{k_u}} - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k_u+1}{k_u}} \right]} \quad (9)$$

式中: C_d 表示泄放口泄放系数。

由质量守恒方程, 得

$$m_0 = m_r + m_u + m_b \quad (10)$$

式中: m_0 表示容器内泄放前气体总质量, kg 。

联立方程(1)~(10)得到 x 、 m_r 、 m_u 、 m_b 、 p 关于时间 t 的一阶微分方程组, 利用四阶龙格库塔方法求得数值解, 可以得到不同时刻容器内压力和压力上升速率。

二、数值模拟结果分析

假设柱形容器长 1 m, 内径 180 mm, 泄放口直径为 100 mm。容器内介质为 9.5% 的甲烷—空气预混气, 泄爆压力为 137 kPa。利用笔者建立的数学模型对该管状容器气体泄爆过程进行数值模拟。图 2、图 3 分别是容器内超压和压力上升速率随时间变

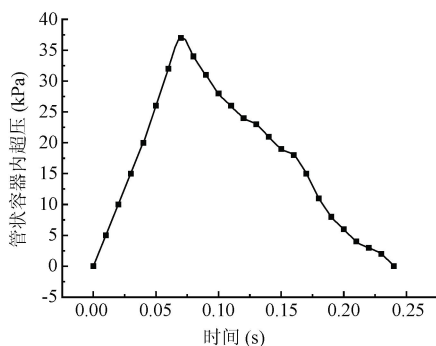


图 2 容器内超压随时间的变化曲线图

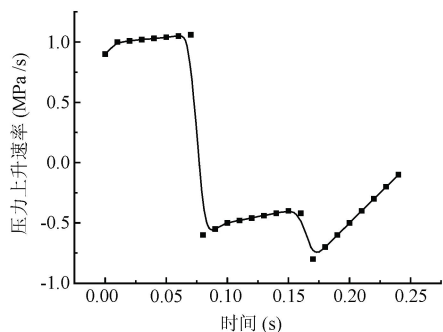


图 3 容器内压力上升速率随时间的变化曲线图

化的曲线。

从图 2、图 3 可以看出: 容器中甲烷点火后压力和压力上升速率均逐渐增加; 当压力达到泄爆压力时, 泄放口打开, 由于未燃的甲烷与空气混合物泄放引起的压力下降速率大于其燃烧引起的压力上升速率, 压力迅速减小, 压力上升速率变为负值, 压力上升速率出现一个间断。随着时间的增加, 泄放速率降低, 压力变化速率在数值上逐渐减小。当火焰面到达泄放口时, 泄放气体变为已燃气体, 压力进一步减小, 如图 2 中出现一个拐点。压力降低速率突然增加, 压力上升速率在图 3 中出现第二次间断。

三、管状容器气体燃爆泄放过程影响因素分析

1. 泄放面积对泄爆过程压强变化的影响

图 4 表示泄压面积对容器内压强变化的影响。图中 diam80、diam60、diam40 表示其他条件相同时, 分别表示泄爆口直径为 80 mm、60 mm 和 40 mm。图中 3 条曲线在 60 ms 之前是重合的, 共同表现了泄放口开启之前容器内等容爆炸的特征。图中曲线 diam80 和 diam60 表示当泄放口打开时, 容器内压强立即下降。泄放口越小, 压力降低速率减小, 泄压时间增加。当泄放口直径降低到一定值时, 容器内

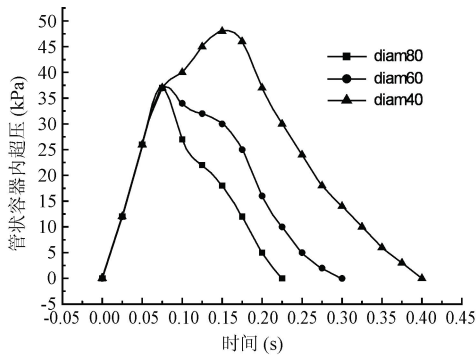


图4 不同泄压面积下容器内超压变化曲线图

压力并不立即下降,而是升高到一定值时才下降(如曲线 diam40),主要是由于燃烧引起压强增加的速率大于泄放引起压力下降的速率。

2. 泄爆压力对泄爆过程压强变化的影响

图5表示泄爆压力对容器内压强变化的影响。曲线 low、middle、high 分别表示泄爆压力为 0.13 MPa、0.17 MPa 和 0.25 MPa。甲烷点火后 3 条曲线重合再次说明了泄爆前容器内甲烷等容爆炸的特性。当泄爆压力较低时(如曲线 low 和曲线 middle),泄爆口打开后容器内压强没有立即下降,而是先增加后减小。当泄爆压力较高时(如曲线 high),泄放口打开后容器内压力立即下降,因为容器内压强较大,气体泄放引起的压力下降速率高于燃烧引起的压力上升速率。

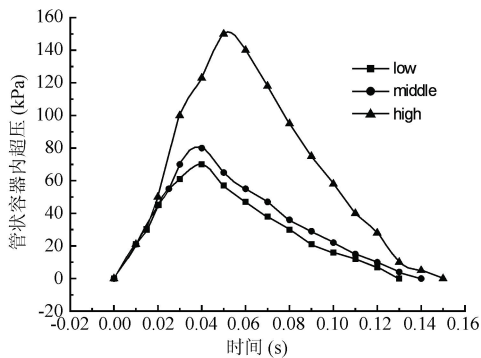


图5 不同泄爆压力下容器内超压变化曲线图

四、结论

通过对管状容器内气体泄爆过程的数值模拟研究,可得到以下结论。

(1)利用本文建立的管状容器气体泄爆过程的数学模型,能够较好地对容器内整个燃爆泄放过程进行数值模拟,可以计算不同时刻容器内压强和压力上升速率。

(2)在其他条件相同时,不同泄压面积和泄爆压力对应着容器内不同的泄爆过程。当泄压面积较小时,泄放口打开后容器内压力可能继续增加到一定值时才下降;当泄爆压力较低时,泄爆口打开后容器内压强也有可能继续增加,达到一定值后下降。

参考文献

- 1 王振成,小川辉繁.管状容器的泄压.工业安全与防尘,1995;(1):13~16
- 2 Bradley D, Mitcheson A. The venting of gaseous explosions in spherical vessels. Combustion and Flame, 1978; 32(3): 221—255
- 3 Chippett S. Modeling of vented deflagration. Combustion and Flame, 1984; 55(2): 127—140
- 4 胡俊,浦以康,万士昕,贾复.柱形容器开口泄爆过程中压力发展特性的实验研究.爆炸与冲击,2001; 21(1): 47~52
- 5 王淑兰,丁信伟,贺匡国.容器内烃类气体燃爆温度和压力的数值解.大连理工大学学报,1992; 32(2): 163~169
- 6 赵衡阳.气体和粉尘爆炸原理.北京:北京理工大学出版社,1996
- 7 邢志祥.密闭容器内液化石油气燃爆特性的计算.消防科学与技术,2000;(2): 61~62

(修改回稿日期 2005-04-24 编辑 居维清)