文章编号：1000-5773(2009)05-0389-06

球罐 BLEVE 碎片抛射的危害性研究*

钱新明，徐亚博，刘振翼

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081）

摘要：多米诺效应是造成重大事故损失加剧、灾难升级的一个重要原因。爆炸碎片是化工区多米诺事故的重要诱因之一。以球罐液体沸腾进而扩展为蒸气云爆炸(BLEVE)为例，从爆炸碎片飞行过程的规律性及碎片产生抛射的不确定性出发，采用蒙特卡罗方法进行模拟，利用相关数据和资料确定爆炸碎片产生和飞行中的不确定性参数，计算出碎片的抛射范围。并在此基础上，计算得到了不同充装水平下的球罐爆炸后产生碎片碰撞两种目标容器的概率。研究发现：当目标容器不同时，储罐爆炸产生碎片的碰撞概率差别较大；当目标容器一定时，不同充装水平的储罐可造成的多米诺效应虽有不同，但差别不大。研究结果对于定量评价储罐爆炸碎片的危害性，减缓和控制碎片产生的风险，确定罐区之间防护碎片危害所需的安全距离等提供了指导和借鉴。

关键词：球罐；碎片；BLEVE；蒙特卡罗法；不确定性

中图分类号：X932 **文献标识码**：A

1 引 言

多米诺事故通常会造成非常严重的后果，其严重性远远大于初始事故后果的严重性，因此十分有必要对其进行深入研究[1-3]。安全距离是预防发生重特大事故的重要措施之一。近年来，因安全防护距离不符合要求导致的事故风险日益突出，已成为相当严重的事故隐患。据估计，有 30%以上的危险化学品生产企业存在周边安全距离不符合规定的问题，因此亟需开展此方面的研究。

爆炸碎片是化工区多米诺事故的重要诱因。容器的灾难性失效会产生碎片，并将其投射出较远的距离，投射的碎片能够在距初始事故较远的地方发生二次事故。在几个工业事故中，碎片投射是造成人员伤亡、财产损失和设备损坏的根源，如 1984 年墨西哥城液化石油气爆炸事故等[4]。根据 Cozzani 等对 100 起多米诺事故的统计分析，碎片引发多米诺事故主要是由球罐液体沸腾扩展为蒸气云爆炸(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion，BLEVE)造成的[1]。本研究针对球罐发生 BLEVE 事故时碎片抛射的情况，利用蒙特卡罗法和三维体系内碎片抛射方程，得到了不同充装水平下球罐产生碎片的抛射轨迹，以及碎片撞击两种形状不同的目标容器的概率。

2 碎片抛射方程和碰撞目标容器概率的确定

2.1 碎片抛射方程

由于碎片的飞行速度一般不超过音速，因此三维体系中碎片在飞行过程中的加速度状态方程为[5-7]

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+k\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)^2=0 \tag{1}$$

* **收稿日期**：2009-01-04；**修回日期**：2009-02-23

作者简介：钱新明(1967－)，男，博士，教授，主要从事系统安全分析与安全评价技术、危险物质安全性分析与检测技术研究. E-mail：qsemon@bit.edu.cn

$$\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}+k\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right)^2=0 \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}\pm k\left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\right)^2+g=0 \tag{3}$$

式中：x、y 为水平方向的坐标，z 为竖直方向的坐标，k 为阻力系数，t 为时间，g 为重力加速度。上升阶段，由于阻力与重力方向相同，故(3)式中的符号为“+”；而下降阶段，情况正好相反，符号为“−”。

利用 Matlab 求解加速度方程，得到 $\dot{x}(t)$、$\dot{y}(t)$、$\dot{z}(t)$、$x(t)$、$y(t)$和 $z(t)$的表达式。

x 方向

$$\dot{x}(t)=\frac{v_0\cos\varphi\cos\theta}{k\,t\,v_0\cos\varphi+1} \tag{4}$$

$$x(t)=\frac{\cos\theta}{k}\ln(k\,t\,v_0\cos\varphi+1) \tag{5}$$

y 方向

$$\dot{y}(t)=\frac{v_0\cos\varphi\sin\theta}{k\,t\,v_0\cos\varphi+1} \tag{6}$$

$$y(t)=\frac{\sin\theta}{k}\ln(k\,t\,v_0\cos\varphi+1) \tag{7}$$

z 方向上升阶段

$$\dot{z}(t)=\frac{\tan(\beta-a\,g\,t)}{a} \tag{8}$$

$$z(t)=-\frac{1}{2k}\ln\left[\frac{a^2\dot{z}(t)^2+1}{(a\,v_0\sin\varphi)^2+1}\right] \tag{9}$$

z 方向下降阶段

$$\dot{z}(t)=\frac{1-\exp(\chi t-2\beta)}{a\,[1+\exp(\chi t-2\beta)\,]} \tag{10}$$

$$z(t)=\frac{1}{2k}\ln[(a\,v_0\sin\varphi)^2+1]+\frac{1}{2k}\ln[1-a^2\dot{z}(t)^2] \tag{11}$$

式中：$a=(k/g)^{1/2}$，$\beta=\arctan(a\,v_0\sin\varphi)$，$\chi=2k/a$，$v_0$ 为碎片的初速度，θ 和 φ 见图 1。

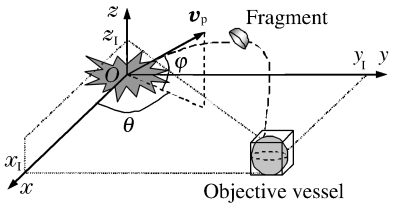


图 1 爆炸碎片抛射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fragment projection

2.2 碎片碰撞目标容器概率的计算

要确定碎片的抛射距离，必须先确定碎片的初始速度、碎片的抛射角和空气阻力，而它们又涉及到碎片的能量、数量和形状等，并且这些参数大多是随机的。参考文献[5-11]给出了不确定参数的分布，结果列于表 1。

表 1 球形碎片的不确定参数的分布

Table 1 Distribution of uncertain parameters of spherical fragment

Uncertain parameter	Distribution
Ratio of kinetic energy factor	Right-sided triangular distribution on [0.2,0.5]
Pressure at the beginning of accident	Uniform distributin on 90%～100% of pressure of failure
Number of fragments	Log-normal distribution with $\mu=1.8875$,$\sigma=0.6997$
Mass and shape of fragment	Assumed to be of equal mass and section from spherical shell
Projectile angle	Vertical angle: uniform distribution on [−90°,90°] Horizontal angle: uniform distribution on [0°,360°]
Degree of filling at the time of burst	Uniform distributin on [0.1,0.8]

当碎片的数量、形状、质量、垂直和水平抛射角等参数已知后，利用蒙特卡罗法，采用大量抽样的方

法对这些随机变量和不确定性进行模拟,将这些参数代入三维体系内碎片的加速度状态方程,计算出任一时刻碎片的位置,从而获得碎片从飞行到落地之间的整个轨迹曲线。只要碎片在飞行过程中的任一时刻落在包围目标的外切立方体内,即服从如下分布:$x(t)\in[x_1-R,x_1+R]$,$y(t)\in[y_1-R,y_1+R]$,$z(t)\in[0,2R]$,其中,R 为目标球罐半径,球罐中心点的坐标为(x_1,y_1,R),如图 1 所示。只要上述分布满足,便认为碎片碰撞到目标,即此次碰撞概率为 1,记做 $n=1$;如果在整个飞行过程中,碎片的轨迹坐标均无法满足该范围,则此次碰撞概率为 0,记做 $n=0$。

用此方法模拟 N_{sim} 次得到总碰撞概率 P_{imp},计算公式如下

$$P_{\mathrm{imp}}=\frac{\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{sim}}}\sum_{i=1}^{N}\frac{n}{N}}{N_{\mathrm{sim}}} \tag{12}$$

式中:N 为每次模拟时产生的碎片总数。

当然,抽样次数的多少决定计算精度,抽样次数越多,计算结果越精确,但计算时间也越长。因此需要在抽样次数和计算精度之间取得平衡。一般来说,10 000 次左右的抽样就可以得到足够的精度。

3　案例分析

表 2 给出了本研究案例中使用的墨西哥城液化石油气爆炸事故中球罐的参数[4]。图 2～图 6 给出了利用 Matlab 模拟计算的结果。

表 2　球罐参数

Table 2　Parameters of spherical vessel

Volume/(m^3)	Wall thickness/(m)	Pressure/(MPa)	Mass/(kg)
1 600	0.028	1.34	146 529

图 2 为模拟储罐爆炸后被抛射碎片的空间分布情况。从图中可以看出,采用蒙特卡罗法可以清楚地掌握每个碎片的飞行轨迹,为以后计算碰撞周围目标容器的概率等奠定了基础。

由于较难精确确定储罐的充装水平,因此设充装水平在 0.1～0.8 范围内服从均匀分布,模拟计算结果见图 3。从图中可以看出,模拟计算结果与事故数据吻合较好,再次证明蒙特卡罗法的有效性。

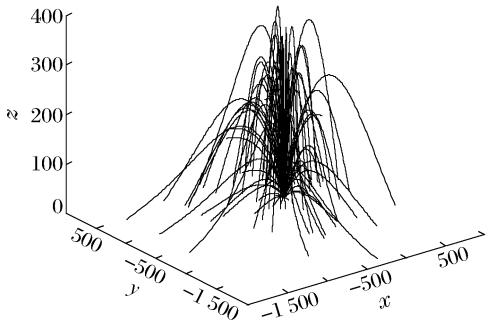


图 2　模拟碎片轨迹图

Fig. 2　Fragment trajectory by simulation

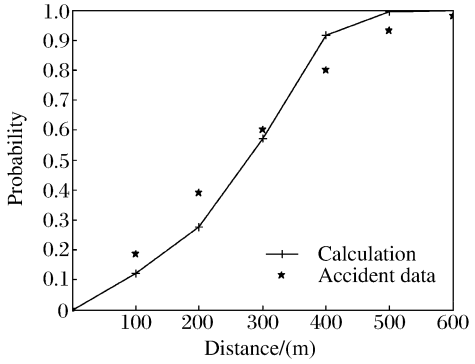


图 3　模拟结果和事故数据之间的比较

Fig. 3　Comparison between simulation and accident data

下面将利用该方法对 3 种不同充装水平下储罐爆炸的情况进行详细地分析,得到了充装水平不同的储罐爆炸后其碎片飞行及撞击周围容器的情况。

图 4 给出了 80%、50%和 10%这 3 种不同充装水平下储罐爆炸产生的碎片被抛射的距离分布。从图 4 可以看出,充装水平对碎片抛射距离的影响比较大。当充装水平为 80%时,产生的碎片可抛射到约 600 m 远;当充装水平为 50%时,碎片可到达约 450 m;而当充装水平只有 10%时,碎片仅飞到约

100 m远。这充分说明了储罐的充装水平是计算储罐总能量传递给碎片的一个重要因素。从图 4 还可以看出,不同范围内分布概率的增长趋势是不同的。以 80%充装水平为例,在 0～300 m 范围内,分布函数增长缓慢,在 300～500 m 范围内增长迅速,在 500～600 m 范围内增长又趋于缓慢。

图 5 为图 4 对应的概率密度函数分布图。从图中可以明显看出,碎片在不同区间内出现的概率是不同的。有的区间概率大,碎片出现的可能性大;有的区间概率小,碎片出现的可能性小。当充装水平分别为 80%、50%和 10%时,碎片分别出现在 410 m、260 m 和 46 m 处的可能性最大,此距离可作为不同充装水平下储罐爆炸碎片被抛射的最可能危害距离。

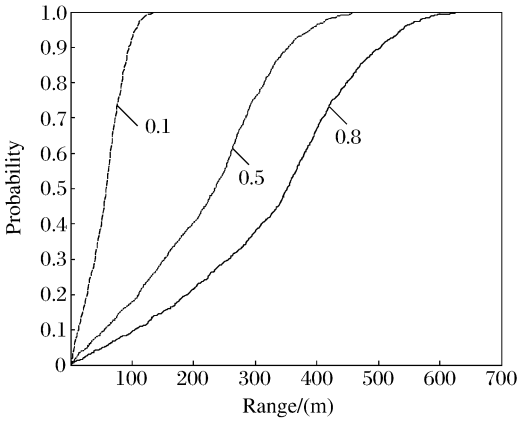


图 4 不同充装水平下储罐爆炸碎片抛射距离的分布函数

Fig. 4 The probabilities of projectile range under different filling degrees

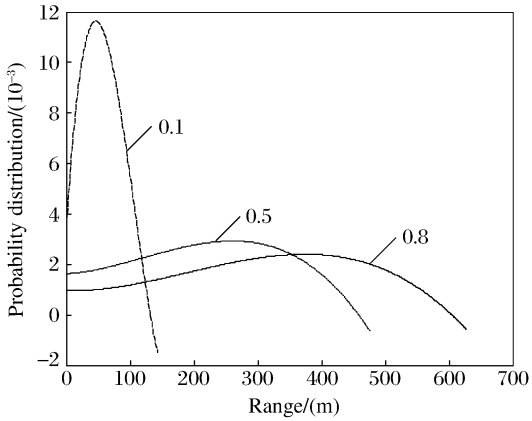
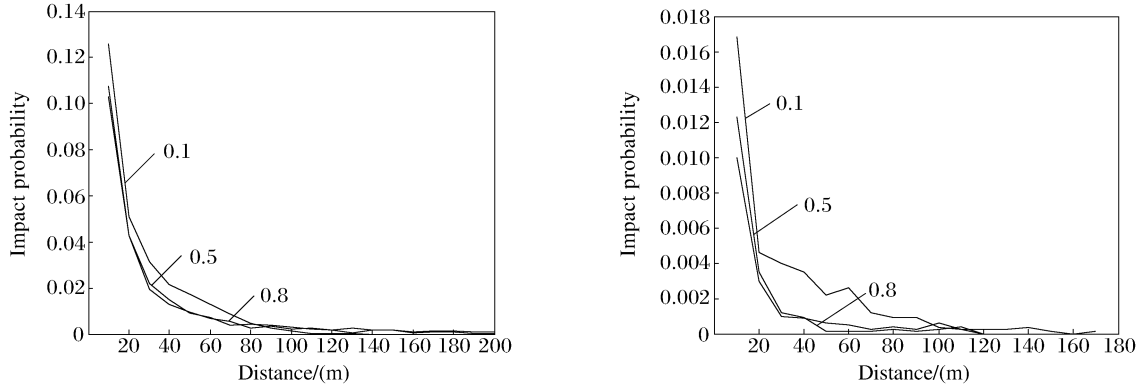


图 5 不同充装水平下储罐爆炸碎片抛射距离的概率密度函数

Fig. 5 The probability density functions of projectile range under different filling degrees

图 6 为抛射碎片碰撞不同距离的目标容器的概率图。本案例中采用两种目标容器,分别为 1 600 m^3 的球罐和 180 m^3 的柱罐(直径为 3.5 m)。从图 6 可以看出:充装水平虽对碎片的抛射距离影响较大,但对碰撞概率的影响不大,尤其是充装水平在 50%～80%之间;由于目标罐的不同所造成的碰撞概率差别较大。表 3 列出了不同充装水平下储罐爆炸碎片碰撞不同距离处的目标容器的概率值。



(a) Spherical vessel (b) Cylindrical vessel

图 6 不同充装水平下储罐爆炸产生的碎片碰撞目标容器的概率

Fig. 6 The probabilities of fragment impacting on objective vessels with different filling degrees

从表 3 可以看出,当目标容器为 1 600 m^3 的球罐时,若要保证储罐可造成多米诺效应的概率为 0.01,则充装水平为 80%、50%和 10%时,对应的距离分别为 40 m、40 m 和 60 m;若提高安全级别到 0.001,则 80%、50%和 10%充装水平下对应的距离分别为 120 m、140 m 和 100 m。可以看出,当目标容器一定时,不同充装水平下储罐可造成多米诺效应的概率虽有不同,但差别并不大。这与前面通过服

从一定区间的充装水平计算得到的,当安全级别为 0.001 时,对应的距离为 130 m 的结论非常接近。因此,在实际储罐爆炸时,由于很难精确确定储罐的充装水平,在计算分析时完全可以用一定范围的充装水平来替代。

表 3　不同充装水平下爆炸碎片的碰撞概率与抛射距离

Table 3　Impact probabilities and projectile distances under different filling levels

Filling level	Impact probability	Projectile distance/(m)	
		Spherical vessel	Cylindrical vessel
0.8	(0.01,1)	(0,40)	(0,10)
	[0.001,0.01]	[40,120]	[10,40]
	(0,0.001)	(120,∞)	(40,∞)
0.5	(0.01,1)	(0,40)	(0,10)
	[0.001,0.01]	[40,140]	[10,30]
	(0,0.001)	(140,∞)	(30,∞)
0.1	(0.01,1)	(0,60)	(0,10)
	[0.001,0.01]	[60,100]	[10,60]
	(0,0.001)	(100,∞)	(60,∞)

当目标容器为 180 m^3 的柱形罐时,若要保证储罐可造成多米诺效应的概率为 0.01,则充装水平为 80%、50%和 10%时对应的距离分别为 10 m、10 m 和 10 m;若提高安全级别到 0.001,则充装水平为 80%、50%和 10%时对应的距离分别为 40 m、30 m 和 60 m。可以看出,当目标容器不同时,储罐爆炸产生碎片的碰撞概率差别较大,防护碎片所需的安全距离也有所区别。因此,在工厂布局时,要充分考虑到周围容器的差别,从而确立相应的安全防护距离。

4　结　论

(1) 本研究采用蒙特卡罗法对不确定性参数进行数值模拟,得到了碎片抛射距离的概率分布。将模拟结果与事故数据进行比较,可以看出模拟结果与事故数据之间吻合较好,证明了本研究中使用的不确定性参数的正确性及蒙特卡罗法的有效性。

(2) 计算了 3 种不同充装水平下储罐爆炸产生的碎片被抛射的距离分布,结果表明:充装水平对碎片抛射距离的影响比较大;并且不同范围内抛射距离分布概率的增长趋势是不同的,有的区间碎片出现的可能性大,有的区间碎片出现的可能性小。碎片出现可能性较大的区间可作为不同充装水平下储罐爆炸碎片被抛射的最可能危害范围。

(3) 计算了 3 种不同充装水平下储罐爆炸产生的碎片碰撞周围目标容器的概率,分析发现:当目标容器一定时,不同充装水平的储罐可造成多米诺效应的概率虽有不同,但差别并不大,并且与服从一定区间的充装水平计算得到的安全防护距离非常接近。因此,当实际储罐爆炸时,由于很难精确确定储罐的充装水平,在计算分析时完全可用一定范围的充装水平来替代。

(4) 计算了储罐爆炸产生的碎片碰撞两种形状和大小不同的目标容器的概率,计算结果表明:当目标容器不同时,储罐爆炸产生碎片的碰撞概率差别较大,防护碎片所需的安全距离也不同。因此,在工厂布局时,要充分考虑到周围容器的差别而确立不同的安全防护距离。

References:

[1] Cozzani V,Gubinelli G,Antonioni G,et al. The Assessment of Risk Caused by Domino Effect in Quantitative Area Risk Analysis [J]. J Hazard Mater,2005,127(1-3):14-30.

[2] Cozzani V, Gubinelli G, Salzano E. Escalation Thresholds in the Assessment of Domino Accidental Events [J]. J Hazard Mater, 2006, 129(1-3): 1-21.

[3] Khan F I, Abbasi S A. DOMIFFECT (Domino Effect): User-Friendly Software for Domino Effect Analysis [J]. Environmental Modeling & Software, 1998, 13(2): 163-177.

[4] Pietersen C M. Analysis of the LPG Disaster in Mexico City [J]. J Hazard Mater, 1988, 20: 85-107.

[5] Hauptmanns U. A Monte-Carlo Based Procedure for Treating the Flight of Missiles from Tank Explosions [J]. Probab Eng Mech, 2001, 16(4): 307-312.

[6] Hauptmanns U. A Procedure for Analyzing the Flight of Missiles from Explosions of Cylindrical Vessels [J]. J Loss Prev Process Ind, 2001, 14(5): 395-402.

[7] Gubinelli G, Zanelli S, Cozzani V. A Simplified Model for the Assessment of the Impact Probability of Fragments [J]. J Hazard Mater, 2004, 116(3): 175-187.

[8] Less F P. Loss Prevention in the Process Industries Hazard Identification, Assessment and Control [M]. 2nd ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1996.

[9] Center for Chemical Process Safety of American Institute of Chemical Engineers. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs [M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994.

[10] Holden P L, Reeves A B. Fragment Hazards from Failures of Pressurized Liquefied Gas Vessels [J]. IchemE Symposium Series, 1985, 93: 205-220.

[11] Pula R, Khan F I, Veitch B, et al. A Model for Estimating the Probability of Missile Impact: Missiles Originating from Bursting Horizontal Cylindrical Vessels [J]. Process Safety Progress, 2007, 26(2): 129-139.

Research on Hazard of Fragments from Spherical Tank BLEVE

QIAN Xin-Ming, XU Ya-Bo, LIU Zhen-Yi

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Domino effect is a well-known cause of major accidents in the chemical process industries, resulting in overall consequences which are more severe than those of the primary event. Fragment projection is one of the major escalation vectors to cause domino effect. The present work took a spherical tank with boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) as an example. The probability distribution density of uncertain parameters in the generation and flight of fragments were determined by the data from literatures, and simulated by Monte-Carlo method. Then the projectile distances of fragments were calculated. In this way, the impact probabilities of fragments on objective vessels were attained. The impact probabilities of fragments on the different objective vessels have great gaps. However, the impact probabilities of fragments produced by vessels with different filling levels on the same object are almost same. This method is of great significance for the risk assessment and control of fragments from explosion of spherical tank. It can be used to provide guidance and reference for determining safety distance to prevent domino effect of fragments between storage tanks.

Key words: spherical tank; fragment; BLEVE; Monte-Carlo; uncertainty