

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210419004

# 温岭“6·13”液化石油气槽罐车爆炸事故 灾害效应分析\*

岳承军<sup>1</sup>, 陈力<sup>1</sup>, 李展<sup>2</sup>, 毛源潮<sup>1</sup>, 刘思嘉<sup>1</sup>, 许林峰<sup>1</sup>, 方秦<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学爆炸安全防护教育部工程研究中心, 江苏南京 211189;

2. 陆军工程大学防灾减灾国家重点实验室, 江苏南京 210007)

**摘要:** 为了揭示浙江温岭“6·13”液化石油气(LPG)槽罐车特大爆炸事故的成灾机制和破坏威力,通过事故现场实地勘察并收集公开资料,发现此次事故的两次主要爆炸分别为沸腾液体扩展蒸汽爆炸(BLEVE)和蒸气云爆炸(VCE);分别采用BLEVE热辐射模型、能量法和Jarrett模型对两次爆炸进行了爆炸威力和灾害效应分析。结果表明:BLEVE事故中参与火球燃烧的LPG约为7.59 t,火球热辐射死亡半径、重伤半径、轻伤半径分别为93、124和200 m;BLEVE的爆炸威力相当于88.4 kg TNT炸药;BLEVE冲击波作用下人员的死亡半径和安全半径分别为9.5和23.6 m,建筑物的安全半径为55 m;VCE事故的爆炸威力相当于10.7 t TNT炸药;参与VCE反应的LPG约为1.05 t;通过Braker评估模型计算出的VCE事故中人员安全半径和死亡半径分别为221和84 m,钢筋混凝土结构倒塌(严重损毁)半径为94 m,瓦片掉落、钢筋混凝土墙产生裂缝对应的计算半径为136 m,窗框的损坏半径为273 m,建筑物的安全半径为700 m,计算结果与实际破坏情况吻合较好。

**关键词:** 液化石油气(LPG); 蒸气云爆炸(VCE); 爆炸威力; 伤亡半径; 建筑损毁半径

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-0928-08

## Power and Consequence Analysis of "6·13" Explosion Accident of LPG Tank Truck in Wenling

YUE Chengjun<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, LI Zhan<sup>2</sup>, MAO Yuanchao<sup>1</sup>, LIU Sijia<sup>1</sup>,  
XU Linfeng<sup>1</sup>, FANG Qin<sup>1,2</sup>

(1. Engineering Research Center of Safety and Protection of Explosion & Impact of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** To reveal the power and mechanism of "6·13" LPG tank truck explosion accident in Wenling, Zhejiang Province, on-site investigation was carried out and publicly reported data were collected, and it is found that this accident consisted of two explosions, i.e., the boiling liquid extended vapor explosion (BLEVE) and vapor cloud explosion (VCE). The BLEVE thermal radiation model and energy method, as well as the Jarrett model, were used to evaluate the explosion power and disastrous consequences in BLEVE and VCE. The results show that the liquefied petroleum gas (LPG) involved in the fireball of BLEVE was about 7.59 t. The thermal radiation death radius, the serious inju-

\* 收稿日期:2021-04-19;修回日期:2021-06-07

基金项目:国家自然科学基金(51978166)、中央高校基本科研业务费专项资金(2242021R10131)资助

作者简介:岳承军(1993—),男,博士研究生。主要从事结构抗爆方面的研究。E-mail:yuecj993@163.com

ry radius, and the minor injury radius were 93 m, 124 m, and 200 m, respectively. The equivalent explosion power of BLEVE was about 88.4 kg TNT explosive charge. The death radius and safety radius of personnel under shock wave in BLEVE were 9.5 m and 23.6 m, respectively. The safety radius of buildings was 55 m. The equivalent explosion power of VCE was about 10.7 t TNT. The LPG involved in VCE was about 1.05 t. The safety radius and death radius of personnel in VCE accident calculated by Braker evaluation model were 221 m and 84 m, respectively. The collapse (serious damage) radius of reinforced concrete structures was 94 m. The radius of tiles falling and cracking of reinforced concrete walls was 136 m. The damage radius of window frames was 273 m, and the safety radius of buildings was 700 m. The calculation results are in good agreement with the actual damage.

**Keywords:** liquefied petroleum gas (LPG); vapor cloud explosion (VCE); explosion power; radius of casualty; radius of building damage

## 事件概述

2020年6月13日16时40分,G15沈海高速浙江台州温岭出口处,一辆由宁波开往温州的液化石油气(LPG)槽罐车发生爆炸。事故造成20人死亡、170多人受伤,周边大量建筑损伤破坏严重。液化气爆炸形成机理相对于固体危化品爆炸更加复杂,调查和现场勘察结果显示,此次事故共经历了两次爆炸过程:槽罐车在匝道转弯处发生罐体失效导致LPG蒸汽急剧膨胀和液体迅速闪蒸并伴随火灾,发生了沸腾液体扩展蒸汽爆炸(BLEVE),即第一次爆炸(图1(a)),该过程属于物理爆炸,通常也会产生



(a) BLEVE



(b) VCE

图1 事故过程

Fig.1 Diagram of the accident process

冲击波。此次爆炸导致储罐和槽车的部分牵引装置炸飞跌落至爆炸点约350 m处的良山村内。蒸发气化的石油气在空气中形成蒸气云,在风力作用下移动至良山工业园附近,当达到一定浓度后遇明火发生了蒸气云爆炸,即第二次爆炸(图1(b)),该过程属于化学爆炸,从爆炸能量的角度来分析,其爆炸威力应该远大于第一次爆炸。两次事故发生的位置如图2所示,其中第二次爆炸事故的起爆点是根据课题组现场勘察建筑物的损坏程度确定的。

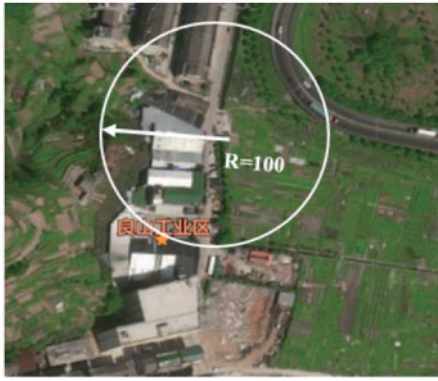


图2 两次爆炸发生位置

Fig.2 Location of two explosions

经实地勘察,此次爆炸致使爆心100 m范围内的建筑物严重倒塌,如图3~4所示。距爆心145 m范围内的良山村居民楼部分墙壁严重破损,屋顶瓦片脱落,但主体结构完好,如图5所示。距爆心255 m处居民楼门窗损伤严重,如图6所示。周边多处办公楼和住宅楼玻璃损毁严重(图7),玻璃的最大损坏半径可达650 m。

本文针对热辐射、爆炸波等灾害效应,通过对浙江温岭“6·13”爆炸事故现场进行实地勘察,并将相关勘察结果、收集的公开资料以及相关视频进行梳理,基于热辐射模型、能量法以及 Jarrett 模型等方



(a) 爆炸前



(b) 爆炸后

图3 爆炸核心区域建筑物破坏情况

Fig.3 Destruction of buildings in the core area of the explosion



图4 核心区域内居民楼倒塌情况

Fig.4 Collapse of buildings in the core area



图5 居民楼墙壁和屋顶受损(145 m)

Fig.5 Damaged walls and roofs (145 m)



图6 居民楼门窗受损(255 m)

Fig.6 Damaged doors and windows (255 m)



图7 周边办公楼损坏(650 m)

Fig.7 Damaged office buildings (650 m)

法,分析计算出此次事故中 BLEVE 和 VCE 两次爆炸的威力以及参加反应的 LPG 质量;选取确定了人员与建筑的伤亡和破坏准则,基于相关的灾害效应提出了本次爆炸事故中人员和建筑物安全范围,计算结果得到了现场勘查数据的验证,具体的计算流程如图 8 所示。

## 1 BLEVE 爆炸

### 1.1 热辐射效应

火球热辐射是 BLEVE 事故的主要灾害效应之一。高压槽罐失效后,大量 LPG 泄漏到空气中形成液池或蒸发成气云,达到燃烧极限后遇火源便会产生湍动燃烧的火球,对周边的人员及建筑物造成一定的伤害和损毁。此次事故中,槽罐车储罐直径为 2.5 m,长为 10 m,储罐体积约为  $50 \text{ m}^3$ ;LPG 密度为  $580 \text{ kg/m}^3$ ;若容装系数取 0.85,则储罐中 LPG 的质量约为 24.65 t。本文采用国际劳工组织建议的 BLEVE 热辐射模型计算<sup>[1]</sup>:

$$R = 2.9W^{1/3} \quad (1)$$

火球持续时间:

$$t = 0.45W^{1/3} \quad (2)$$

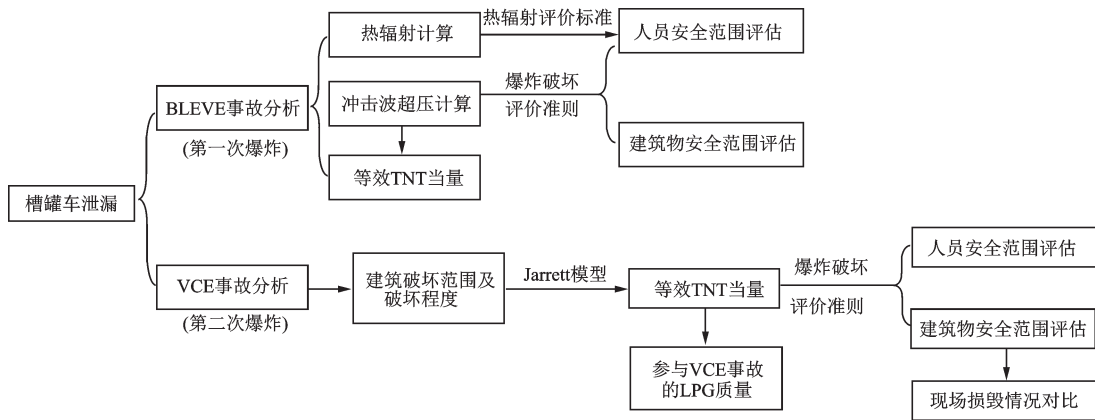


图8 事故评估计算流程

Fig.8 Flow chart of accident assessment and calculation

目标接收到的通量:

$$q(r) = \frac{q_0 R^2 r (1 - 0.058 \ln r)}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \quad (3)$$

式中,  $R$  为火球半径,  $m$ ;  $W$  为火球中消耗可燃物质量,  $kg$ ;  $T$  为火球持续时间,  $s$ ;  $q_0$  为火球表面的热辐射通量,  $kW/m^2$ , 对于柱形罐体可取  $270 kW/m^2$ , 对于球形罐体可取  $200 kW/m^2$ ;  $r$  为目标到火球中心的平均距离,  $m$ 。

通过 BLEVE 事故中现场火球的灼烧痕迹 (图9) 可推测出火球的真实半径约为  $R=57 m$ 。代入式(1)可得火球中消耗的 LPG 质量为  $7.59 t$ , 约占储罐燃料总质量的  $30.8\%$ 。通过式(2)可计算得火球持续燃烧时间为  $9 s$ 。



图9 BLEVE爆炸火球灼烧痕迹范围

Fig.9 Range of burning traces of fireball in BLEVE accident

以 F.P.Lees<sup>[2]</sup> 提供的经验公式为基础, 假设人员暴露面积为皮肤表面积的  $20\%$ , 彼得森 (Pietersen) 提出的常见热辐射伤害概率方程为<sup>[2-4]</sup>:

(1) 有衣服保护时 ( $20\%$  皮肤裸露) 的死亡概率:

$$P_r = -37.23 + 2.56 \ln(tq^{\frac{4}{3}}) \quad (4)$$

(2) 有衣服保护时 ( $20\%$  皮肤裸露) 的二度灼伤 (重伤) 概率:

$$P_r = -43.14 + 3.0186 \ln(tq^{\frac{4}{3}}) \quad (5)$$

(3) 有衣服保护时 ( $20\%$  皮肤裸露) 的一度灼伤 (轻伤) 概率:

$$P_r = -39.83 + 3.0186 \ln(tq^{\frac{4}{3}}) \quad (6)$$

式中,  $q$  为人体接受的热通量,  $W/m^2$ ;  $T$  为人体暴露的时间,  $s$ ;  $P_r$  为伤害概率变量, 对于不同的伤害程度, 本文均取  $50\%$  的伤害概率, 对应的伤害概率变量  $P_r=5$ 。

通过以上概率方程计算得到的死亡概率、重伤概率及轻伤概率的热通量阈值分别为  $46.2$ 、 $30.6$  和  $13.5 kW/m^2$ 。将临界阈值分别代入式(3)可得死亡半径、重伤半径及轻伤半径分别为  $r_1=93 m$ 、 $r_2=124 m$  及  $r_3=200 m$ 。热辐射灾害效应影响范围如图10所示, 离事故发生地最近的三栋居民楼以及良山工业园的部分楼栋均位于热辐射死亡半径内, 该区域范围内人员有超过  $50\%$  的概率死亡。

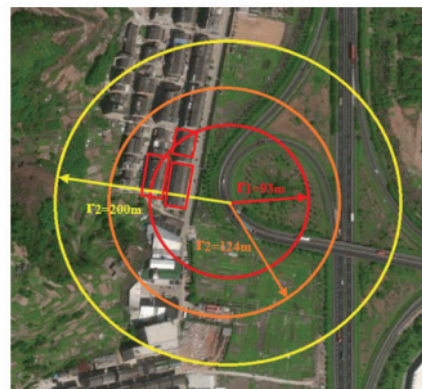


图10 BLEVE热辐射人员伤害范围

Fig.10 Personnel safety range of BLEVE thermal radiation

## 1.2 BLEVE 冲击波灾害效应

估算冲击波效应的关键是确定爆炸能量,多数研究者认为当容纳过热液体的压力容器发生完全破裂时,能量的释放源为“膨胀蒸汽”和“沸腾液体”,释放的能量部分形成爆炸冲击波<sup>[5]</sup>。但有学者通过试验研究发现使用“膨胀蒸汽”和“沸腾液体”的释放能计算出的冲击超压远大于试验值。A.M. Brik 等<sup>[6-7]</sup>在大量试验基础上得出冲击波能量仅由“膨胀蒸汽”单独提供,而过热液体的沸腾发生在容器破裂之后,气相变的速度不足以产生冲击波;“沸腾液体”所释放出的能量大部分用于碎片抛射、容器附近破坏以及撕裂容器等。因此,本文基于 A.M. Brik 的结论,采用储罐内物质热动力状态的改变所带来的膨胀做功能计算爆炸冲击波能量。

当高压罐体发生破裂时,蒸汽可视为理想气体绝热可逆膨胀,释放的能量计算如下<sup>[5]</sup>:

$$E_g = PV / (k - 1) [1 - (101.3/P)^{(k-1)/k}] \quad (7)$$

式中,  $E_g$  为气体释放能, kJ;  $P$  为容器内气体的绝对压力, kPa。根据储罐设计参数可知, 储罐内部极限压强为 2.2 MPa;  $V$  为容器内气相体积;  $k$  为气体绝热指数, LPG 的主要成分为丙烷 (>95%),  $k$  可近似地取为丙烷的绝热指数 1.13。

“膨胀蒸汽”所释放的能量并不能完全转化为冲击波能,二者之间存在一定的比例关系<sup>[8]</sup>,如下所示:

$$E_{ex} = \eta E_g \quad (8)$$

式中,  $E_{ex}$  为冲击波有效能;  $\eta$  为“膨胀蒸汽”释放能转化为冲击波可用能的比例系数。石剑云等<sup>[8]</sup>对 A.M. Brik 的丙烷火灾试验数据进行了统计,确定  $\eta$  为 0.55,即蒸汽在等熵膨胀过程释放的能量有 55% 转化为冲击波。冲击波能量的比例距离定义为:

$$\bar{R} = r \left( \frac{P_0}{2E_{ex}} \right)^{1/3} \quad (9)$$

式中,  $r$  为目标爆心距离, m;  $P_0$  为环境大气压, kPa;  $\bar{R}$  为比例距离。

从表 1 中爆炸冲击波超压对人体的伤害作用可知,能保证人员安全和大部分人员死亡对应的超压分别为 19.6 和 98.0 kPa;结合图 11 冲击波能量比例距离与超压的关系可计算得出人员安全半径和死亡半径分别为 23.6 和 9.5 m。表 2 列出了冲击波超压对建筑物破坏的评价标准,由此计算建筑物的安全半径  $R_1$  为 55 m;抗震钢筋混凝土结构破坏,小房

屋倒塌的半径为  $R_2$  为 9.5 m,如图 12 所示。TNT 的爆热  $Q_{TNT} = 4\,520$  kJ/kg,根据式(10)能量相似定律<sup>[9]</sup>可得爆炸的等效 TNT 当量为 88.4 kg。

$$\alpha Q_{LPG} W_{LPG} = Q_{TNT} W_{TNT} \quad (10)$$

式中,  $W_{LPG}$ 、 $W_{TNT}$  分别为 LPG、TNT 等效当量, kg;  $Q_{LPG}$ 、 $Q_{TNT}$  分别为 LPG、TNT 的爆炸热 kJ/kg;  $\alpha$  为蒸气云爆炸效率因子,一般取 0.03~0.05。

对比 BLEVE 事故中热辐射与爆炸冲击波的分析结果可得,火球热辐射的人员死亡半径和安全半径分别为爆炸冲击波的 9.8 和 8.5 倍。可见,火球热辐射是 BLEVE 事故中的主要灾害因素,其影响范围远大于爆炸冲击波的伤害范围。

表 1 冲击波超压对人员的伤害作用<sup>[10]</sup>

Table 1 Damage effect of wave overpressure on the human body<sup>[10]</sup>

峰值超压/kPa	冲击波破坏效应
<19.6	能保证人员安全
19.6~29.4	人体受到轻微损伤
29.4~49.0	损伤人的听觉器官或产生骨折
49.0~98.0	严重损伤人的内脏或引起死亡
>98.0	大部分人员死亡

表 2 冲击波超压对建筑物的破坏作用<sup>[10]</sup>

Table 2 Damage effect of wave overpressure on buildings<sup>[10]</sup>

峰值超压/kPa	破坏作用
5~6	门、窗玻璃部分破碎
6~15	受压面的门窗玻璃大部分破碎
15~20	窗框损坏
20~30	墙裂缝
40~50	墙裂大缝,屋瓦掉落
60~70	木建筑厂房房柱折断,房架松动
70~100	砖墙倒塌
100~200	抗震钢筋混凝土结构破坏,小房屋倒塌
200~300	大型钢架结构破坏

## 2 VCE 爆炸

### 2.1 爆炸威力的等效 TNT 当量

蒸气云爆炸(VCE)事故会对人员及建筑造成极大的破坏,其作用机理与燃料空气炸弹相似。LPG 沸腾蒸发在空气中形成可燃蒸气云,当浓度达到爆炸极限(2%~9%)后遇点火源发生爆炸,形成爆炸波;同时产生大量的二氧化碳和一氧化碳,使

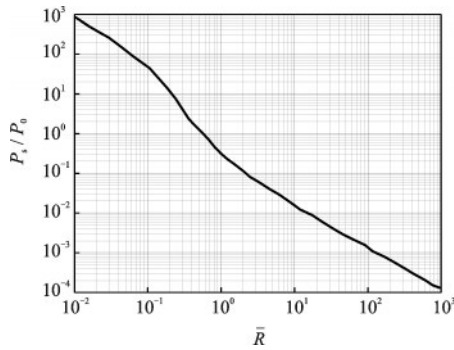
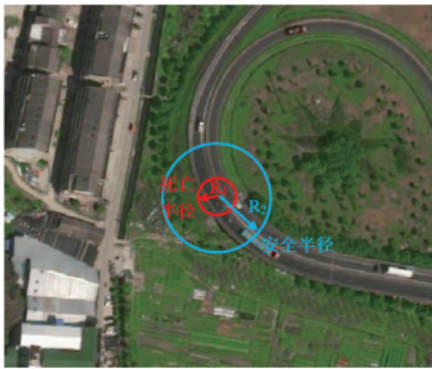
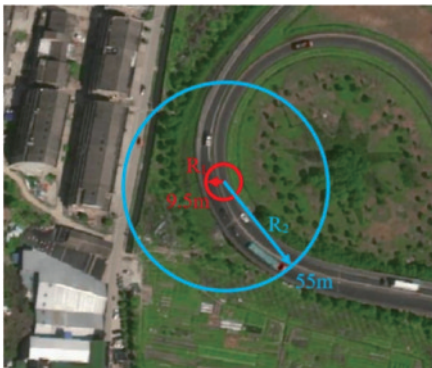


图 11 BLEVE 冲击波能量比例距离与超压的关系<sup>[7]</sup>

Fig.11 Relationship between BLEVE accident ratio distance and overpressure<sup>[7]</sup>



(a) 人员



(b) 建筑

图 12 BLEVE 事故人员及建筑物安全范围评估

Fig.12 BLEVE accident personnel and assessment images of building safety area

得一定空间在短时间内人员缺氧窒息,形成二次伤害。爆炸波能不同程度地破坏周围的房屋和建筑设施;对爆炸威力的评估可基于爆炸源周边建筑的破化程度以及破坏距离进行分析。Jarrett 对 100 次爆炸事故(涉及 TNT、硝化甘油、硝化棉和铝粉混合炸药等爆炸物类型,药量从 136.1 kg 到  $2.4 \times 10^6$  kg)系统调查研究的结果进行了归纳总结,得出了砖石结构房屋破坏程度与药量、距离间的关系<sup>[11-12]</sup>:

$$R = \frac{Km_{\text{TNT}}^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{3175}{m_{\text{TNT}}}\right)^2\right]^{1/6}} \quad (11)$$

式中, $R$ 为财产损失半径,指在爆炸冲击波作用下建筑物的破坏半径, $m$ ;  $K$ 为建筑物破坏常数,可按表 3 取值;  $m_{\text{TNT}}$ 为等效 TNT 当量,kg。

表 3 房屋破坏程度<sup>[12]</sup>

Table 3 Damage degree of buildings<sup>[12]</sup>

破坏等级	破坏常数 $K$	破坏状况
A	3.8	房屋几乎被完全摧毁
B	4.6	房屋 50%~75% 的外部砖墙被摧毁,或不能继续安全使用,必须推倒
C <sub>b</sub>	9.6	屋顶部分完全坍塌,1~2 个外墙部分被摧毁,承重墙严重破坏,需要修复
C <sub>a</sub>	28	房屋隔板从接头上脱落,房屋结构至多受到轻微破坏
E	56	屋顶和盖瓦受到一定程度的破坏,10% 以上的窗玻璃破裂,房屋经过修复可继续居住

由图 3(b)可知,距爆炸点 100 m 范围内的建筑物超过 50 % 的墙体被摧毁,房屋已无法继续使用,破坏等级属 B 级,破坏常数  $K$  取 4.6。代入式(11)得到等效 TNT 当量  $m_{\text{TNT}}$  为 10.7 t。LPG 的爆热  $Q_{\text{LPG}} = 46\,000$  kJ/kg,根据式(10)能量相似定律,将等效 TNT 当量换算为 LPG 质量为 21.03 t,其中  $\alpha$  取 0.05,即参与 VCE 反应的 LPG 质量为 1.05 t。

## 2.2 VCE 爆炸波灾害效应

对于爆炸波作用下人员和建筑物安全的评估,Baker 提出了当量比例距离估算超压的计算公式<sup>[13-14]</sup>:

$$Z_e = R/m_{\text{TNT}}^{1/3} \quad (12)$$

式中, $Z_e$ 为当量比例距离, $m/\text{kg}^{1/3}$ ;  $R$ 为人员或财产损失半径, $m$ 。发生在平坦地面上的 TNT 爆炸产生的侧向超压可用下式进行计算:

$$\frac{\Delta P}{P_a} = \frac{1616 \left[1 + \left(\frac{Z_e}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_e}{0.048}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_e}{0.32}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_e}{1.35}\right)^2}} \quad (13)$$

式中,  $\Delta P$  为爆炸冲击波超压, Pa;  $P_a$  为环境大气压, Pa。

与其它参数相比, 爆炸波超压易于测量和估计, 因此常用超压峰值来评价爆炸波破坏效应<sup>[15]</sup>。图 13 为 Braker 模型计算得到的伤亡半径和 TNT 当量与超压之间的关系, 基于 2.1 节中确定的 VCE 爆炸 TNT 当量为 10.7 t, 结合破坏评价准则即可得到人员和建筑物的安全半径。

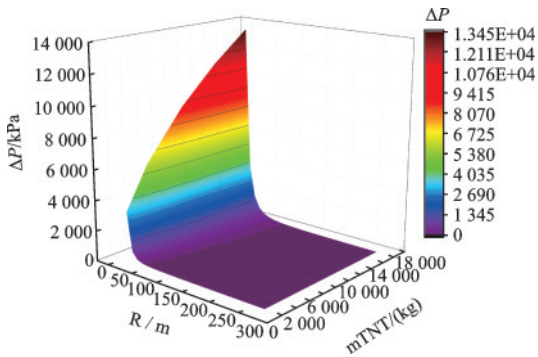


图 13 Braker 模型确定的 TNT 爆炸伤亡半径和 TNT 当量与超压峰值关系

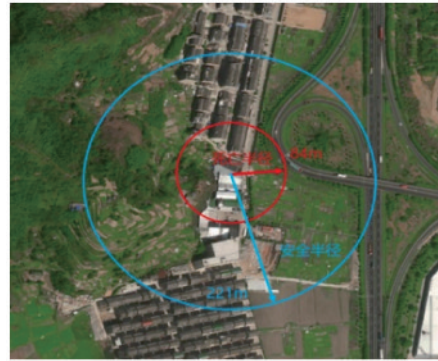
Fig.13 Relationship between TNT explosion casualty radius, TNT equivalent and overpressure determined by Braker model

根据表 1 和表 2 爆炸波超压对人体的伤害和建筑物的破坏作用, 计算出的人员安全半径和死亡半径分别为 221 和 84 m。建筑物的安全半径  $R_1$  为 700 m, 窗框损坏半径  $R_2$  为 273 m, 墙裂大缝、屋瓦掉落半径  $R_3$  为 136 m, 抗震钢筋混凝土结构破坏、小房屋倒塌的半径为  $R_4$  为 94 m。

采用 Braker 模型评估的人员及建筑物的毁伤范围如图 14 所示。将评估结果与实际破坏范围进行对比, 见表 4。可以看出, Braker 模型评估的影响范围与事故实地勘察的建筑物破坏范围较为吻合,

表 4 Braker 法评估的爆炸影响范围与勘察破坏范围的比较  
Table 4 Comparison of the explosion impact range and actual damage range evaluated by Braker method

建筑物损坏程度	防震钢筋混凝土破坏、小房屋倒塌	墙裂大缝、屋瓦掉落	窗框损坏	安全半径
Braker 评估范围/m	94	136	273	700
勘察爆炸结果/m	100	145	360	650



(a) 人员



(b) 建筑

图 14 VCE 事故人员及建筑物安全范围

Fig.14 Personnel and building safety areas in the VCE accident

说明该模型在计算 VCE 超压时具有较高的可靠性。

### 3 结论

基于爆炸波和热辐射对人员和建筑物造成伤亡和破坏的相关准则, 采用热辐射模型、能量法以及 Jarrett 模型等方法, 对浙江温岭“6·13”液化石油气 (LPG) 槽罐车罐体失效发生的 BLEVE 和 VCE 事故进行了较为系统的灾害效应分析与爆炸威力计算, 且部分计算结果得到了事故勘察现场数据的验证, 主要结论如下:

(1) 采用国际劳工组织建议的 BLEVE 热辐射模型, 通过现场火焰灼烧痕迹推测出火球半径为 57 m, 得出参与 BLEVE 事故的 LPG 质量约为 7.59 t; 在此次 BLEVE 热辐射作用下人员的死亡半径、重伤半径及轻伤半径分别为 93、124 及 200 m。

(2) 采用“膨胀蒸汽”能量法计算出 BLEVE 产生的爆炸冲击波威力的等效 TNT 当量为 88.4 kg; 在此次 BLEVE 爆炸冲击波作用下, 人员的死亡半径和安全半径分别为 9.5 和 23.6 m, 建筑物的安全

半径为 55 m。

(3) 根据事故现场建筑物的破坏情况,基于 Jarrrett 模型估算出此次 VCE 事故爆炸威力的等效 TNT 当量为 10.7 t,由能量相似律换算得到参与 VCE 事故的 LPG 质量为 1.05 t。

(4) 采用 Braker 模型计算出此次 VCE 事故的人员安全半径和死亡半径分别为 221 和 84 m,建筑的安全半径为 700 m,计算出的相关破坏范围与事故勘察结果吻合较好。

## 参考文献:

- [1] 化工企业定量风险评估导则: AQ/T 3046—2013 [S]. 北京:煤炭工业出版社, 2013.  
Guidelines for quantitative risk assessment of chemical enterprises: AQ/T 3046—2013 [S]. Beijing: Coal Industry Press, 2013.(in Chinese)
- [2] Lees F P. Loss Prevention in the process industries-hazard identification, assessment, and control [M]. 2nd Ed. Oxford:[s.n.], 1996.
- [3] Pula R, Khan F I, Veitch B, et al. A GLPGid based approach for fire and explosion consequence analysis [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2006, 84(B2): 79-91.
- [4] LaChance J, Tchouvelev A, Engebo A. Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36: 2381-2388.
- [5] Birk A M. Hazards from propane BLEVEs: An update and proposal for emergency responders [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996, 9(2): 173-181.
- [6] Birk A M, Davison C, Cunningham M. Blast overpressures from medium scale BLEVE tests [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20(3): 194-206.
- [7] Genova B, Silvestrini M, Leon Trujillo F J. Evaluation of the blast-wave overpressure and fragments initial velocity for a BLEVE event via empirical correlations derived by a simplified model of released energy [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21(1):110-117.
- [8] 石剑云, 潘科. 基于能量转化的 BLEVE 冲击波超压和抛射物初速预测[C]// 国际安全科学与技术学术研讨会. 沈阳: 东北大学安全工程研究中心, 2010: 302-307.  
Shi J Y, Pan K. BLEVE shock wave overpressure and

projectile muzzle velocity prediction based on energy conversion [C]// Proceedings of 2010 (Shenyang) International Colloquium on Safety Science and Technology. Shenyang:Northeastern University Safety Engineering Research Center, 2010:302-307. (in Chinese)

- [9] 霍然, 杨振宏, 柳静献. 火灾爆炸预防控制工程学[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.  
Huo R, Yang Zh H, Liu J X. Fire and explosion prevention and control engineering[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [10] 徐志胜. 安全系统工程[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.  
Xu Zh Sh. Security system engineering [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [11] Baker W E, Cox P A, Westine P S, et al. Explosion hazards and evaluation[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- [12] 宇德明. 易燃、易爆、有毒危险品储运过程定量风险评估[M]. 北京:中国铁道出版社, 2000.  
Yu D M. Quantitative risk assessment during the storage and transportation of flammable, explosive, and toxic dangerous goods [M]. Beijing: China Railway Press, 2000. (in Chinese)
- [13] 克劳尔 D A, 卢瓦尔 J F. 化工过程安全理论及应用[M]. 蒋军成, 潘旭海, 译. 北京:化学工业出版社, 2006.  
Claire D A, Loire J F. Chemical process safety theory and application[M]. Jiang J Ch, Pan X H, Trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [14] Jo Y D, Ahn B J. Analysis of hazard area associated with hydrogen gas transmission pipelines [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(14): 2122-2130.
- [15] 方秦, 杨石刚, 陈力, 等. 天津港“8·12”特大火灾爆炸事故建筑物和人员损伤破坏情况及其爆炸威力分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(3): 12-18.  
Fang Q, Yang Sh G, Chen L, et al. Analysis of damage and destruction of buildings and personnel in the "8·12" fire and explosion accident in Tianjin Port and its explosion power [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(3): 12-18. (in Chinese)
- [16] 傅智敏, 黄金印, 臧娜. 爆炸冲击波伤害破坏作用定量分析[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(6): 390-395.  
Fu Zh M, Huang J Y, Zang N. Quantitative analysis of the damage and destruction effect of explosion shock wave [J]. Fire Science and Technology, 2009, 28(6): 390-395. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)