

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.008

# 盐城响水化工园区“3·21”危化品爆炸事故爆炸威力分析及灾害后果评估\*

陈大鹏<sup>1</sup>, 陈力<sup>2</sup>, 还毅<sup>3</sup>, 徐荣正<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 方秦<sup>1,2</sup>

(1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏南京 210007; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 210096; 3. 军委后勤保障部工程质量监督中心, 北京 100037)

**摘要:**为分析盐城响水化工园区“3·21”危化品爆炸事故的爆炸威力,通过对爆炸现场进行勘察以及对事故资料进行系统的收集和梳理,基于爆坑尺寸、质点震动速度和建筑物毁伤半径等一系列关键参数,运用3种不同方法综合计算出此次爆炸的等效TNT当量为340 t。通过进一步归纳分析爆炸灾害现场周边建筑物分布和损伤破坏特点,结合爆炸冲击波传播规律以及相关规范手册,评估此次爆炸对建筑物和人员的毁伤后果。评估结果表明:此次爆炸冲击波作用下的人员死亡半径为227 m;人员安全半径为573 m;建筑物摧毁半径为265 m;建筑物安全半径为1 626 m。

**关键词:**危化品;等效TNT当量;建筑破坏半径;人员伤亡半径

**中图分类号:** X928.7 **文献标识码:** **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0196-08

## Analysis on the Power and Disaster Consequences of “3·21” Explosion Accident in the Chemical Industry Park of Xiangshui, Yancheng

CHEN Dapeng<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>2</sup>, HUAN Yi<sup>3</sup>, XU Rongzheng<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, FANG Qin<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096; 3. Engineering Quality Supervision Center of Logistics Support Department of Military Commission, Beijing 100037)

**Abstract:** In order to find out the power of the “3·21” chemical explosion accident in Xiangshui Chemical Industrial Park of Yancheng, the explosion site was surveyed, and the accident data were collected and analyzed systematically. On the basis of a series of key parameters such as crater size, particle vibration velocity and building damage radius, the TNT equivalent of this explosion accident was determined to be 340 tons using three different methods. The distribution and damage characteristics of surrounding buildings at the site of the explosion disaster were further analyzed. Combined with the propagation law of blast wave and relevant specifications, the damage of buildings and the loss of life under this explosion accident were evaluated. The evaluation results show that suffering the impact of the blast wave, the radius of casualty is 227 m, the safety radius for life is 573 m, the destruction radi-

\* 收稿日期:2019-07-08;修回日期:2019-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51622812; 51738011)资助

作者简介:陈大鹏(1995-),男,硕士研究生。主要从事危化品防灾减灾研究。Email: chendapeng0921@163.com

通讯作者:陈力(1982-),男,教授,博导。主要从事爆炸灾害效应和抗爆结构研究。Email: chenli1360@qq.com

us of buildings is 265 m, and the safety radius for buildings is 1 626 m.

**Keywords:** hazardous chemicals; TNT equivalent; buildings damage radius; personnel casualty radius

## 引言

2019年3月21日14时47分,位于盐城市响水县陈家港镇化工园区的天嘉宜化工厂发生爆炸事故。爆炸的初步调查原因为堆放固体废料的化工厂仓库发生火灾,废料中的危化品遇明火发生爆轰,已经查明的固体废料中包含有硝基甲苯、硝基丁醇、二硝基苯等危险化学品<sup>[1]</sup>。爆炸事故造成78人遇难、604名伤员住院治疗,灾害后果十分严重,震惊全国。

爆炸导致距爆心300 m内的核心区域厂房严重受损(图1),距爆心2 km范围内的建筑物门窗玻璃严重破坏,距爆心5 km处的陈家港镇爆炸震感十分强烈。调查显示,距离爆心500 m的天嘉宜公司内部及附近厂房损毁,门窗玻璃全部破碎,墙皮脱落,部分建筑结构倒塌(图2);距爆心700 m处一老房子年久失修,一面承重墙倒塌,房顶塌陷(图3)。

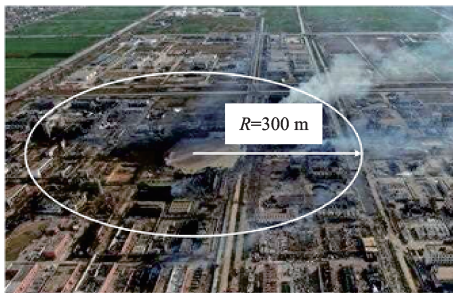


图1 爆炸核心区域建筑物破坏情况

Fig.1 Buildings damage in the core area of the explosion

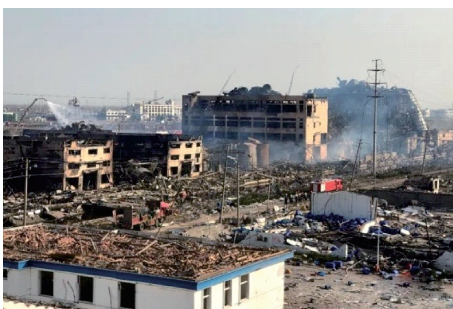


图2 距爆心500 m处的厂房

Fig.2 Workshop 500 m from the explosion center



图3 距爆心700 m处的老房子

Fig.3 An old house 700 m from the explosion center

近年来,危化品爆炸灾害威力与后果评估逐渐成为工程抗爆防灾领域的研究热点。陈武争等<sup>[2]</sup>结合某大型专业化危险品集装箱堆场的工程建设需要,基于蒙特卡洛法和MATLAB平台,建立了一种概率相关的危险品集装箱堆场的爆炸威力计算模型;胡广震等<sup>[3]</sup>研究了危险货物集装箱堆场爆炸地震效应对地下结构的安全影响,确定了隧道壁振动速度与地表堆场爆炸当量之间的关系;王杰等<sup>[4]</sup>通过地震波震动测试,研究了不同当量弹药对典型地下目标震动响应的影响规律;贾永胜等<sup>[5]</sup>开展了一系列低含水率砂土和饱和砂土中的爆炸成坑现场实验,研究了炸药当量、埋深等因素对土中爆坑的影响规律;黄郑华<sup>[6]</sup>广泛统计了烟花爆竹爆炸事故的人员伤亡情况,对事故现场超压峰值的分布、不同药量爆炸冲击波的危害范围等进行评估。可以看出,现有的方法大多是研究炸药当量与爆炸后可追溯特征之间的理论关系,这些特征主要包括:地震波,爆坑以及人员的伤亡和建筑物的破坏情况等。

本文基于“3·21”爆炸事故现场勘察结果,结合收集和梳理的事故公开资料,基于爆炸成坑理论、地震波数据推算法以及建筑物毁伤程度推算法估算此次危化品爆炸的等效TNT当量;归纳分析了爆炸灾害现场周边建筑物分布和损伤破坏特点,对建筑物和人员的毁伤后果进行了评估。

## 1 爆炸威力确定

### 1.1 基于爆炸成坑特征

航拍资料显示,此次危化品爆炸事故在地面形

成直径约为 120 m 的爆坑,符合凝聚相爆轰破坏特征,如图 4 所示。

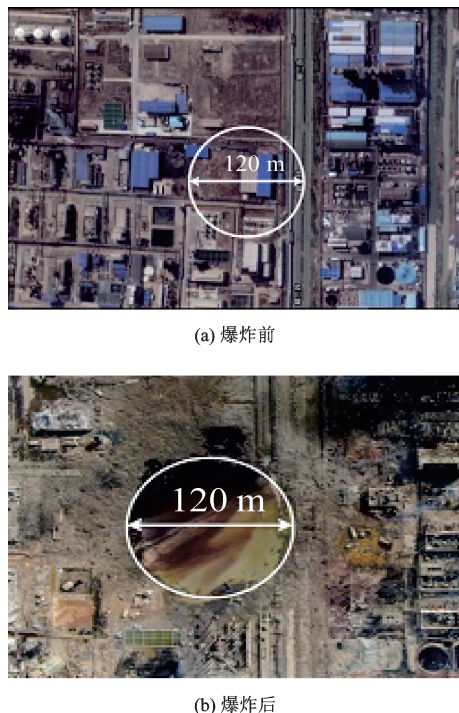


图 4 化工厂爆炸形成的爆坑

Fig.4 The crater formed by the explosion in the chemical plant

通常情况下,炸药在土层表面或浅层爆炸时,爆炸能量会压缩和抛掷土体而产生爆坑。影响爆坑直径与深度的主要因素为炸药的当量及埋深、地表坡度、土壤材料等因素。在不同种类的土壤介质中,爆坑比例直径及比例坑深随炸药比例埋深的变化规律如图 5 所示<sup>[7]</sup>。

陈家港地区多为黏土并伴有砂质黏土,因此本文按照黏土进行计算。由于固体废料仓库危化品为地面堆放,可等效为地面接触爆炸。由图 5 可知,此次爆炸的等效 TNT 当量约为 311 t。理论计算爆坑深度应为 36 m,而实际爆炸现场勘探的爆坑深度为 1.7 m。爆坑深度误差较大的原因主要有两方面:首先,在灭火过程中,爆坑大量积水,经排水之后进行勘探,在积水和排水的过程中,爆坑周边的松散土体被冲刷进爆坑,导致爆坑深度的测量值偏小;其次,图 5 是由集团装药的 TNT 爆炸试验获得,而此次化工厂爆炸的爆炸物主要为地面堆放的固体危化品,相比于集团 TNT 炸药,仓库中固体废料的分布更为分散,危化品的形状影响较大,因此形成的爆坑相对较浅。

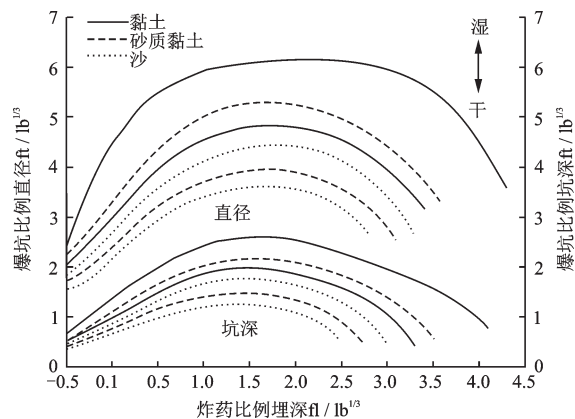


图 5 土中爆炸爆坑比例直径及比例坑深随炸药比例埋深的关系<sup>[7]</sup>

Fig.5 Relationship between the scaled diameter/scaled depth of blast crater and the scaled burying depth of explosive<sup>[7]</sup>

## 1.2 基于地震台网监测的地震质点运动速度

爆炸不仅会产生巨大的空气冲击波,同时还会诱发明显的爆炸地冲击。相比空气冲击波,土中地震波衰减速度更慢、传播距离更远、作用时间更长。

根据距爆心最近的响水县地震台(距爆心约 26.7 km)的监测结果,盐城化工厂爆炸产生的直接地冲击在竖直方向的最大质点速度为 133  $\mu\text{m/s}$ ,如图 6 所示。

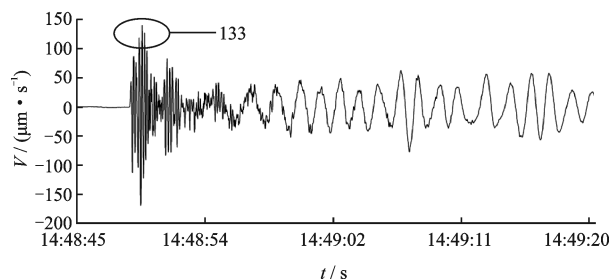


图 6 响水县地震台测得的竖直方向地震波(江苏省地震局提供)

Fig.6 Seismic waves measured by seismic stations in Xiangshui County

由美国《抗偶然爆炸结构设计手册》(UFC-340-02)可知,爆炸引起直接地冲击的竖直方向最大质点速度为<sup>[8]</sup>:

$$V_v = \frac{150}{Z_e^{1.5}} \quad (1)$$

式中,  $V_v$  为直接地冲击竖直方向的最大质点速度, in/sec;  $Z_e$  为比例爆距,  $\text{ft}/\text{lb}^{1/3}$ ;

$$Z_c = \frac{R}{\sqrt[3]{m_{TNT}}} \quad (2)$$

式中,  $R$  为测点距爆心的距离, ft;  $m_{TNT}$  为等效 TNT 当量, lb。

将地震台测得的直接地冲击的垂直方向最大质点速度代入式(1)和式(2), 通过公式反算可得此次爆炸的等效 TNT 当量为 371 t。

### 1.3 基于建筑物的毁伤半径

爆炸引起的空气冲击波会对周边的建筑物造成损伤破坏。建筑物的破坏程度不仅与爆炸源性质、爆炸能量、比例距离等因素有关, 而且与建筑材料和结构形式也相关。1968年 Jarrett 对 100 次爆炸事故(涉及 TNT、硝化甘油、硝化棉和铝末混合炸药等爆炸物类型, 药量为  $136.1 \sim 2.4 \times 10^6$  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>[9]</sup>:

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

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 1 取值;  $m_{TNT}$  为等效 TNT 当量, kg。

表 1 房屋破坏程度<sup>[10]</sup>

Table 1 Damage degree of houses<sup>[10]</sup>

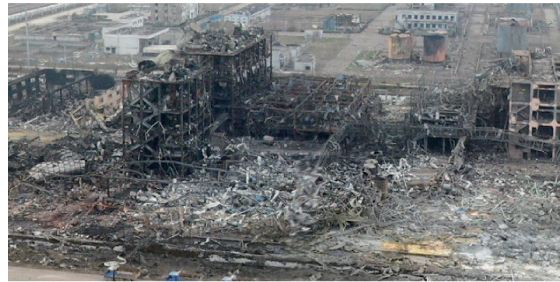
破坏等级	破坏常数 $K$	破坏状况
A	3.8	房屋几乎被完全摧毁
B	4.6	房屋 50%~75% 的外部砖墙被摧毁, 或不能继续安全使用, 必须推倒
C	9.6	屋顶部分完全坍塌, 1~2 个外墙部分被摧毁, 承重墙严重破坏, 需要修复
D	28	房屋隔板从接头上脱落, 房屋结构至多受到轻微破坏
E	56	屋顶和盖瓦受到一定程度的破坏, 10% 以上的窗玻璃破裂, 房屋经过修复可继续居住

根据现场航拍勘察, 距爆心 260 m 范围内的房屋几乎被完全摧毁(图 7), 即破坏等级为 A 级, 破坏常数  $K$  取为 3.8, 代入式(3)可得等效 TNT 当量为 330 t。

采用上述 3 种方法计算出的化工厂爆炸等效 TNT 当量分别为 311、371 和 330 t。因此, 可以得出等效 TNT 当量的平均值为 340 t。



(a)



(b)



(c)

图 7 距爆心 260 m 范围内的房屋

Fig.7 A building about 260 m from the explosion center

## 2 爆心附近区域建筑物破坏情况分析

冲击波是一种介质状态(压力、温度、密度等)突跃变化的强扰动传播过程, 空气冲击波最为常见。通常情况下可以用超压大小来评估冲击波的破坏能力, 冲击波压力超过周围标准大气压力的最大压力称为峰值超压。冲击波峰值超压对建筑物的破坏作用和对人员的破坏效果, 见表 2 和表 3。

冲击波峰值超压的计算方法和公式较多<sup>[12-15]</sup>, 其中应用最为广泛的为美国军用手册《常规武器防护设计原理》<sup>[7]</sup>。该手册给出了 TNT 炸药地面爆炸时, 冲击波峰值超压随比例距离的变化规律, 如图 8 所示。利用曲线②计算入射冲击波峰值压力。

表2 冲击波超压对建筑物的破坏作用<sup>[11]</sup>

Table 2 Damage effect of blast overpressure on buildings<sup>[11]</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	防震钢筋混凝土破坏,小房屋倒塌
200~300	大型钢架结构破坏

表3 冲击波超压对人员的伤害作用<sup>[11]</sup>

Table 3 Damage effect of shock wave overpressure on human body<sup>[11]</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

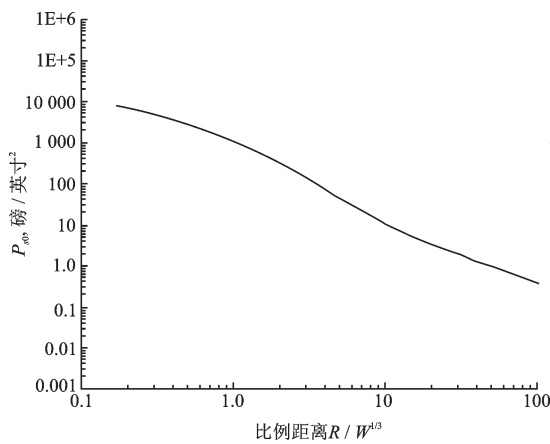


图8 TNT地面爆炸传播规律

Fig.8 Propagation of TNT ground explosion

### 2.1 距爆心 300 m 区域内典型建筑物破坏情况分析

前文已估算出爆炸的等效 TNT 当量为 340 t, 结合表 2, 计算得出距爆心 300 m 范围内爆炸冲击波对建筑物的破坏情况, 见表 4。

根据航拍照片, 对距爆心 300 m 区域内典型建筑物的损伤破坏情况进行分析, 建筑物与爆心的相对位置如图 9 所示。

距爆心 168 m 处的建筑物 A 为框架式结构, 建

表4 距爆心 300 m 区域内建筑物破坏情况

Table 4 Buildings damage within 300 m of the detonation center

破坏程度	大型钢架结构破坏	防震钢筋混凝土破坏, 小房屋倒塌	砖墙倒塌	木建筑厂房房柱折断, 房架松动
半径/m	136~163	163~225	225~268	268~291

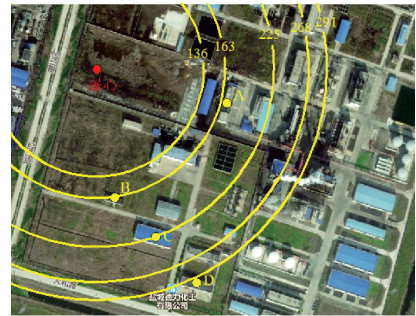


图9 距爆心 300 m 区域内典型建筑物的相对位置

Fig.9 Relative location diagram of typical buildings in the area 300 m away from the explosion center

建筑物外墙几乎全部破坏, 部分混凝土柱弯曲变形, 少数已发生破坏(图 10)。相比于表 4 中的评估范围, 建筑物 A 中钢筋混凝土的破坏相对较轻, 主要是由于建筑物 A 与爆心之间有厂房阻隔, 阻碍了冲击波的传播。



图10 建筑物 A 破坏情况

Fig.10 Damage of building A

距爆心 166 m 处的建筑物 B 为单层小型建筑物, 结构整体发生塌陷(图 11)。由于建筑物 B 与爆心之间较为空旷, 因此, 相比于建筑物 A, 建筑物 B 的破坏更为严重。

距爆心 210 m 处的建筑物 C 为大跨度钢结构厂房, 主要由钢制梁柱, 钢结构基础, 钢屋架, 钢屋盖组成。该厂房具有质量轻, 跨度大, 施工工期短等特点。但相比于传统的砖混结构和钢混结构, 该厂房的抗爆能力较差。爆炸发生后, 建筑物 C 整体



图 11 建筑物 B 破坏情况  
Fig.11 Damage of building B

发生破坏,仅有背爆面的少数钢柱较为完好(图 12)。



图 12 建筑物 C 破坏情况  
Fig.12 Damage of building C

距爆心 289 m 处的建筑物 D 与爆心之间有多个建筑物阻隔,冲击波受到了较大的衰减。因此,建筑物 D 整体结构并未发生明显的损伤,只有受压面的外墙发生了部分的破坏(图 13)。

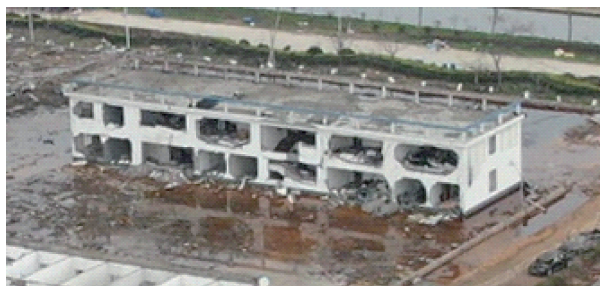


图 13 建筑物 D 破坏情况  
Fig.13 Damage of building D

总体而言,距爆心 300 m 区域内典型建筑物的损伤破坏形式与表 4 中的估算结果吻合较好,初步验证了化工厂爆炸威力估算值的可靠性。

## 2.2 距爆心 1~2 km 区域内建筑物破坏情况分析

本文着重对爆心东北侧的响水县生态化工园区及王商村三组进行了现场勘查,相对位置如图 14 所示。

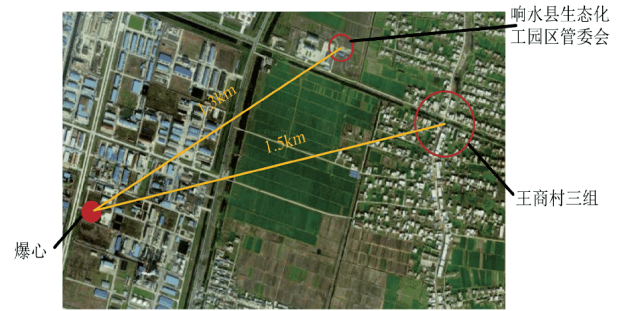


图 14 爆心周边 1~2 km 区域内的相对位置  
Fig.14 Relative location diagram in the 1-2km region around the explosive center

根据爆炸估算当量,结合表 2,计算得出爆心周边 1~2 km 区域内爆炸冲击波对建筑物的破坏情况,见表 5。

表 5 爆心周边 1~2 km 区域内爆炸冲击波对建筑物的破坏情况

Table 5 Buildings damage caused by blast wave within 1-2 km from the explosion center

破坏程度	受压面的门窗玻璃大部分破碎	门、窗部分玻璃破碎	冲击波对建筑物基本无破坏
半径/km	1~1.409	1.409~1.626	1.626~2

爆心东北方向约 1.3 km 处为响水县生态化工园区管委会。该处建筑物受压面的窗户玻璃基本全部破碎,玻璃碎片成抛射状洒向路面,非受压面的新建办公大楼也出现门窗玻璃部分破坏的现象,但建筑物结构并未发生明显的破坏(图 15)。



图 15 响水生态化工园区管委会

Fig.15 Management Committee of Xiangshui County Ecological Chemical Park

爆心北偏东 60°方向约 1.5 km 为陈家港镇王商村三组。该处为一到三层的居民房,多为砖混结构。房区在爆炸冲击波作用下,部分窗户玻璃破

碎,卷帘门发生变形,极少数年久失修的砖瓦房屋顶塌陷(图16)。



图16 陈家港镇王商村三组

Fig.16 The group 3 in Wangshang Village, Chenjiagang Town

根据上述两处实地勘察,建筑物破坏情况与TNT当量估算值所造成的破坏情况较为符合,进一步验证了前文中TNT当量估算值的准确性。另外,在距爆心约2.5 km的沙荡村(图17),由于地冲击和地震动的作用,也出现部分门窗玻璃破坏的情况。门窗玻璃受冲击波或地震动破坏的明显区别在于:受冲击波破坏时,玻璃碎片获得沿冲击波传播方向的初始速度,抛掷距离较远;而受地震动破坏时,玻璃碎片垂直下落,抛掷距离较近。

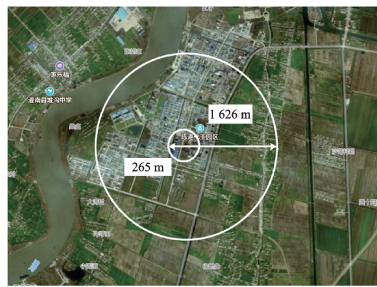


图17 沙荡村破坏情况

Fig.17 Damage in Shadang Village

### 3 危化品爆炸灾害评估

由前文的计算和分析结果可知,响水县天嘉宜化工厂危化品爆炸的威力相当于340 t TNT,即等效TNT当量为 $m_{TNT}=340$  t。根据表2,在爆炸冲击波作用下,能保证建筑物安全(门窗玻璃不破碎)的超压临界值为 $P_1=5$  kPa,结合图8可知,对应的建筑物安全半径为 $R_1=1626$  m。同理,根据表3,在冲击波作用下,致使大部分人员死亡和保证人员安全的超压分别为 $P_2=98$  kPa和 $P_3=19.6$  kPa,对应的人员死亡半径和人员安全半径分别为 $R_2=227$  m和 $R_3=573$  m。根据式(3),计算可得建筑物的摧毁



(a) 建筑物安全及摧毁破坏半径



(b) 人员安全及死亡半径

图18 化工厂爆炸等效TNT当量估算值评估的爆炸影响范围

Fig.18 The influencing range of the explosion with the estimated TNT equivalence of the chemical plant

半径为 $R_4=265$  m。

### 4 结论

通过对盐城市响水县“3·21”化工厂爆炸事故的资料进行收集和梳理,通过三种计算方法对爆炸的等效TNT当量进行了评估,通过爆炸现场的实地调研,对比验证了评估结果的可靠性,最后结合规范手册,进行了爆炸的灾害后果评估,主要结论有:

(1)“3·21”危化品爆炸事故爆炸威力的等效TNT当量约为340 t。

(2)经评估,在爆炸冲击波作用下:距爆心300 m区域内,大部分建筑物结构发生破坏,外墙倒塌;据爆心1~2 km区域内,门窗玻璃破碎,与实地调研情况吻合较好。

(3)人员死亡半径为227 m,建筑物摧毁半径为265 m,人员安全半径为573 m,建筑物安全半径为1626 m。

#### 参考文献:

[1] 危险货物分类和品名编号:GB6944—2012[S].北京:

- 中国国家标准化管理委员会, 2012.  
Classification and code of dangerous goods: GB6944—2012[S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China, 2012. (in Chinese)
- [2] 陈武争, 陈大鹏, 陈力, 等. 基于蒙特卡洛法的集装箱堆场危险品爆炸威力计算模型[J]. 振动与冲击, 2019, 38(16): 233-238.  
Chen W Zh, Chen D P, Chen L, et al. A calculation model of explosion power of dangerous goods stacked in container yards based on Monte Carlo method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(16): 233-238. (in Chinese)
- [3] 胡广霞, 段晓瑞. 危险货物集装箱堆场爆炸地震效应对地下结构的安全影响分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(4): 142-147.  
Hu G X, Duan X R. Analysis on safety influence of seismic effect by explosion in container yard of dangerous goods on underground structure [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(4): 142-147. (in Chinese)
- [4] 王杰, 孔德仁, 李丽萍, 等. 爆炸场地震波对模拟目标振动响应的实验研究[J]. 测试技术学报, 2015, 29(6): 484-489.  
Wang J, Kong D R, Li L P, et al. Experimental study on vibration response of simulation target caused by shock wave in blast field [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2015, 29(6): 484-489. (in Chinese)
- [5] 贾永胜, 王维国, 谢先启, 等. 低含水率砂土和饱和砂土场地爆炸成坑特性实验[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(5): 799-806.  
Jia Y Sh, Wang W G, Xie X Q, et al. Characterization of blast-induced craters in low-moisture and saturated sand from field experiments [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(5): 799-806. (in Chinese)
- [6] 黄郑华. 烟花爆竹火灾爆炸事故伤害范围分析评估[J]. 消防技术与产品信息, 2012, 25(7): 20-23.  
Huang Zh H. Analysis and evaluation of damage range of fireworks and firecrackers fire and explosion accidents [J]. Fire Protection Technology and Product Information, 2012, 25(7): 20-23. (in Chinese)
- [7] UFC 3-340-01. Design and analysis of hardened structures to conventional weapon effects [S]. Washington: The Departments of the Army, 1998.
- [8] U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command (Preparing Activity), Air force civil engineer support agency 3-340-02 (TM5-1300). Structures to resist the effects of accidental explosions [S]. US: U.S. Department of Defense, 2008.
- [9] Baker W E, Cox P A, Westine P S, et al. Explosion hazards and evaluation [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- [10] 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 on the building damage, personnel casualties and blast energy of the “8·12” explosion in Tianjin port [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(3): 12-18. (in Chinese)
- [11] 徐志胜. 安全系统工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
Xu Zh Sh. Safety system engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 李梅, 蒋建伟, 王昕. 复合装药空气中爆炸冲击波传播特性[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 367-372.  
Li M, Jiang J W, Wang X. Shock wave propagation characteristics of double layer charge explosion in the air [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 367-372. (in Chinese)
- [13] 王可强, 苏经宇, 王志涛. 爆炸冲击波在建筑群中传播规律的数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(10): 121-127, 176.  
Wang K Q, Su J Y, Wang Zh T. Numerical simulation of propagation rules of blast shock wave in building cluster [J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(10): 121-127, 176. (in Chinese)
- [14] 耿振刚, 李秀地, 苗朝阳, 等. 温压炸药爆炸冲击波在坑道内的传播规律研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(5): 23-29.  
Geng Zh G, Li X D, Miao Ch Y, et al. Propagation of blast wave of thermobaric explosive inside a tunnel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(5): 23-29. (in Chinese)
- [15] 骆浩浩, 李祥龙, 王建国, 等. 井下大爆破直通巷道冲击波超压的预测研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(3): 57-62.  
Luo H H, Li X L, Wang J G, et al. Study on peak overpressure prediction of underground blasting shock waves on straight-through roadways [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(3): 57-62. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)