

基于开源信息融合的公共安全爆炸 事故分析方法*

李军润¹, 张中海², 徐恒威¹, 吕晓¹, 卢永刚¹, 黄辉³

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621900;

3. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要: 爆炸事故发生后, 为快速、准确评估事故影响范围和损伤程度, 制定科学合理的应急响应策略, 提出了一种基于开源信息融合的公共安全爆炸事故分析方法。进一步, 针对山东高密“5·27”化工车间爆炸事故, 快速构建了事故分析逻辑链条, 即: 基于开源信息获取爆炸发生、冲击波传播、爆炸后厂区和远区建筑结构损伤破坏等重要信息; 基于建筑结构毁伤判据和冲击波传播规律, 反演爆源位置和爆炸当量, 并分析事故发生原因; 基于数值仿真方法, 为工业厂房的安全防护提供依据。结果表明: 爆源位于1号硝化装置, 爆炸等效 TNT 当量约为 12000 kg, 与基于现场勘察的调查结果一致, 验证了该方法的有效性和准确性; 此次事故主要原因是由于该公司实际生产负荷超出设计标准, 设备长期处于满负荷运行状态, 且长期忽视安全连锁系统; 生产厂区应从严控爆炸危险物存量、总平面分区隔离、防殉爆安全管控、重点涉爆装置外围防护四个方面加强建筑抗爆性能, 降低爆炸事故造成的人员、设备损伤, 缩小毁伤范围。该方法的提出为现有事故调查体系提供了全新路径, 有效丰富了调查手段, 具有持续研究的必要性和实践价值。

关键词: 开源信息; 事故反演; 事故原因分析; 安全防护; 数值仿真

中图分类号: TU375

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Open-Source Information Fusion-Based Analysis Method for Public Safety Explosion Accidents

Li Junrun¹, Zhang Zhonghai², Xu Hengwei¹, Lv Xiao¹, Lu Yonggang¹, Huang Hui³

(1. Institute of Systems of Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621900, Sichuan, China;

3. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Following an explosion accident, a public safety explosion accident analysis method based on open-source information fusion was proposed to quickly and accurately assess the scope and severity of the accident's impact and to formulate a scientific and reasonable emergency response strategy. Furthermore, regarding the May 27 chemical plant explosion accident in Gaomi, Shandong, a logical chain for accident analysis was rapidly constructed. Specifically, open-source information was used to obtain

*收稿日期: 2025-11-27; 修回日期: 2026-07-07;

第一作者: 李军润 (1997—), 男, 博士. E-mail: lijunrun22@gscape.ac.cn;

通信作者: 卢永刚 (1973—), 男, 研究员. E-mail: lygcaep@263.net.

critical details such as the explosion generation, the shock waves propagation, and structural damage to buildings in both the plant area and far field. Based on criteria for structural damage and the laws of shockwave propagation, the explosion source location and TNT equivalent were reverse-calculated, and the cause of the accident was analyzed. Numerical simulations provided key evidence for improving safety protection in industrial plants. The results indicate that the explosion source was located at the No. 1 nitration device, with a TNT equivalent of approximately 12000 kg TNT, consistent with the conclusion based on field investigation, thereby verifying the effectiveness and accuracy of this method. The main causes of the accident were identified as the company's actual production load exceeding design standards, prolonged operation of equipment under full load conditions, and long-term neglect of the safety interlock system. The production plant should strengthen the blast-resistant protection measures for buildings from four aspects: control the stockpile of explosive hazardous materials, general layout zoning and isolation, safety control against sympathetic detonation, and peripheral protection for key explosion-prone installations, so as to improve the structural blast resistance, reduce casualties and equipment damage, and narrow the damage scope. The proposal of this method provides a novel approach to the existing accident investigation system, effectively enriches investigation techniques, overcomes the limitations of traditional analytical methods, and demonstrates the necessity for continued research and practical value.

Keywords: open-source information; accident inversion; accident cause analysis; safety protection; numerical simulation

公共安全爆炸事故一直是全球范围内威胁人类生命财产安全的重大灾难之一。近年来, 各类公共安全爆炸事故频发, 对人民的生命财产安全构成巨大威胁。例如: 2025 年 6 月 16 日, 湖南临澧花炮厂发生爆炸事故, 周边村民房屋门窗倒塌, 共造成 35 人伤亡^[1]; 2025 年 10 月 22 日, 俄罗斯车里雅宾斯克州工厂发生爆炸事故, 导致厂房屋顶坍塌并引发火灾, 共造成 4 人死亡^[2]。事故发生后, 如何全面、快速地获取现场数据, 以帮助应急管理人员快速掌握全局, 准确评估事故的影响范围和损伤程度, 从而制定出科学合理的应急响应策略, 是公共安全领域爆炸事故分析中的核心问题。

目前爆炸事故分析方法主要包含现场勘察、数字化建模和物证溯源。其中, 现场勘察是事故发生后获取关键数据、定位爆源位置和还原事故过程的重要手段。例如: 常颖^[3]针对居民燃气爆炸事故, 提出基于现场破坏痕迹、气源位置、管路敷设情况、外观痕迹等现象确定爆炸气体种类、起爆区域和泄漏点位置的分析方法。刘喜和^[4]基于现场勘察结果, 提出了基于爆轰产物起始作用痕迹、抛掷作用痕迹、极限作用痕迹和空气冲击波超压破坏距离的 4 种爆炸当量反演方法。数字化建模是利用三维激光扫描、摄影测量、有限元仿真等技术手段, 将事故现场进行三维重建, 并在此基础上完成事故反演和原因分析。例如: Gupta、Garimella、康越等^[5-7]综述了从人体宏观组织到神经元多尺度建模的研究进展, 为爆炸事故中人体生物力学响应计算提供参考。王震等^[8]利用 LS-DYNA 软件建立了钢储罐三维有限元模型, 分析了结构内部超压载荷分布特征, 为储罐防爆设计提供数值验证方法。物证溯源依附于现场勘察之后, 通过对事故现场遗留的宏观或微观物证进行采集和实验室检验, 进一步反推爆源位置和爆炸当量。例如: D'Uva^[9]等采用傅里叶变换-红外光谱 (ATR-FTIR) 与微量元素谱并结合化学计量学, 实现自制炸药的来源区分, 为爆炸事故物证溯源提供技术支撑。孙振文、李兴等^[10, 11]系统综述了爆炸遗留物采样、分离与仪器分析的最新进展, 为爆炸事故物证溯源提供技术路线。

上述三种传统事故分析方法虽然精度较高, 但普遍存在进场受限、耗时长、经济成本高且分析维度相对较窄等局限, 特别是在跨区域或国际爆炸事故分析中难以高效开展。然而, 开源信息的开放易获取性很好解决了这一难题。开源信息是指通过合法途径, 从公开可获取渠道收集、整理并分析得到的有效数据, 例如互联网、社交媒体和新闻报道。在爆炸事故调查中, 开源信息的开放易获取性能帮助专家们快速获取事故相关细节, 包括事故发生的时间、地点、原因、影响范围以及应对措施等, 为事故的调查、风险评估和应急管理提供有力支持, 帮助决策者制定更加科学合理的应急响应策略。尽管目前利用开源信息开展爆炸事故分析的报道相对较少, 但是该方法在其他领域的广泛应用与显著成效, 已展现出巨大借鉴价值。例如, 李来辉等^[12]以美国科学家联盟 (FAS) 核信息项目为例, 开展了基于开源信息的核力量评估方法研究, 证明了开源信息在核力量评估中的重要价值。于申^[13]深入

探讨了开源信息在科技前沿、风险评估、国防与安全工程等多个领域的应用，并进一步剖析了其当前面临的挑战与未来发展方向。冷烁、吴珍云和刘忠等^[14-16]分别将开源信息应用于自然地理、医学和农业科技，重点阐述了开源信息成本低、合法性强、来源广、可验证性高及实时性强等优势。在信息时代，有效利用开源信息已经成为保障人民生命财产安全和国家安全的关键组成部分。同时，开源信息的引入可以为事故调查提供新的视角和方法，丰富事故调查手段。因此，开展基于开源信息融合的公共安全爆炸事故分析方法研究十分有必要。

综上所述，本文提出了一种基于开源信息融合的公共安全爆炸事故分析方法，并以山东高密“5·27”化工车间爆炸事故为例进行验证。首先，从公开网站迅速获取爆炸发生、冲击波传播、爆炸后厂区 and 远区建筑结构损伤破坏等重要信息。其次，基于建筑结构毁伤判据和冲击波传播规律，进行爆源位置和爆炸当量反演，并分析事故发生原因。最后，结合数值仿真方法，探讨抗爆墙对厂区邻近建筑结构的防护性能。该方法的提出能够为公共安全爆炸事故的反演、原因分析以及应急响应决策提供重要参考。

1 开源信息获取

开源信息获取渠道丰富多样，涵盖互联网、社交媒体及新闻报道等多种来源。为保证数据真实性，首先通过提取视频中建筑结构的特征信息，与事故现场逐一比对，筛选出完全匹配且具有关键参考价值的事现场信息。其次，剔除疑似剪辑、拼凑，以及画质失真的开源信息，优先选取由独立机位（如行车记录仪、商户监控等）记录的原始信息。经系统整理与分析，可提取出包括音视频、图片及文本等在内的有效数据，帮助事故分析专家快速了解事故全貌，包括事故发生的时间、地点、原因及影响范围。本节以山东高密“5·27”化工车间爆炸事故为例，系统收集和整理出具有关键参考价值的事现场信息。

2025 年 5 月 27 日，山东友道化学有限公司（涉事公司）一化工厂车间发生一起重大爆炸事故，共造成 12 人死亡，19 人受伤^[17]。该公司位于山东省潍坊市高密仁和化工园区，厂区建筑结构呈正方形分布，坐北朝南，沿东向西排布，如图 1(a)所示。该涉事公司主营高效低毒类农药，主要生产氯虫苯甲酰胺原药及其中间体，主体工艺包括硝化、加氢工序，如图 1(b)~(c)所示。硝化反应与加氢反应是含能材料、染料、医药等行业的核心环节，也是国家安监总局重点监管的高危工艺。上述工序放热剧烈、温度易失控，存在反应失控风险，极易引发爆炸事故。

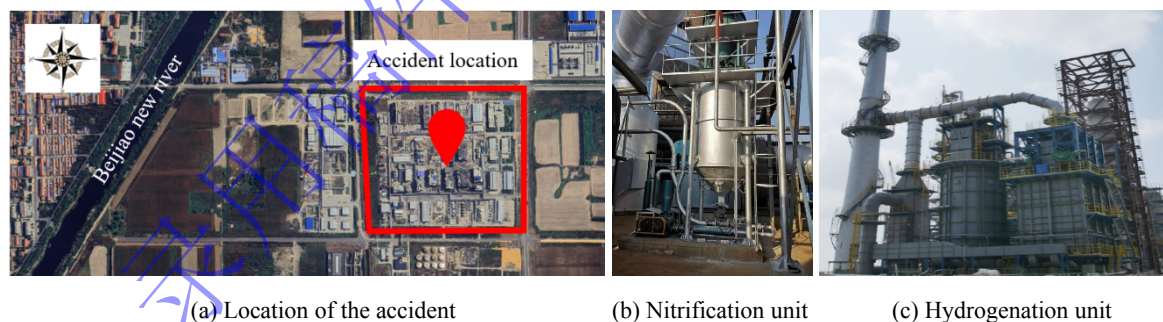


图 1 事故概况

Fig. 1 Accident overview

爆炸事故发生后，各视频平台及网站迅速发布了相关信息。图 2 给出了基于开源信息获取的爆炸发生、冲击波传播、爆炸后厂区和远区 ($> 1000\text{ m}$) 建筑结构破坏模式等重要信息。由于部分视频或图片来源于家庭监控装置或手机拍摄，分辨率较低，但仍然可以帮助事故分析专家快速了解事故全貌，并为后续事故反演和事故原因分析提供有效数据支撑。

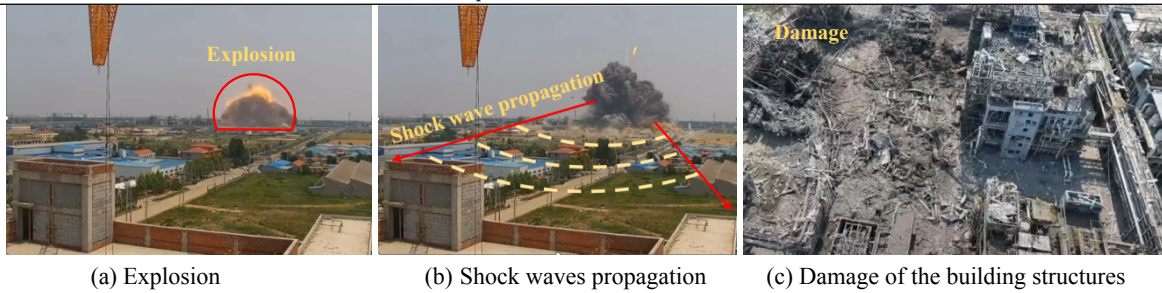


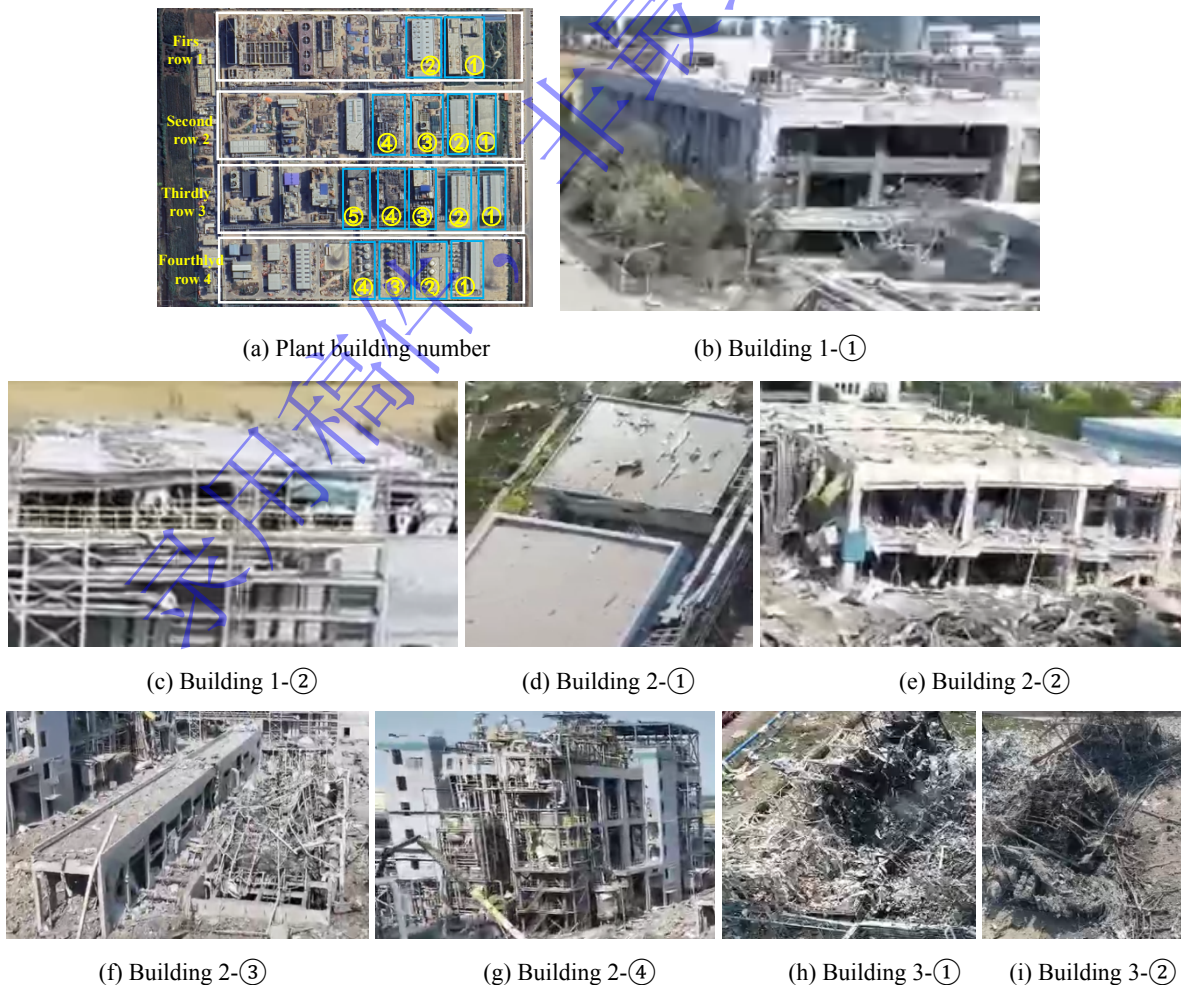
图 2 开源信息的获取^[18]
Fig. 2 Access to open-source information^[18]

2 基于开源信息的事故反演

爆炸事故反演包含爆源位置反演和爆炸当量反演。前者有助于快速锁定事故直接原因和初始设备、辨别事故类型、指导现场证据收集以及验证证人证言；后者则可以量化事故损伤程度、评估破坏威力、复现事故过程和机理分析，同时为应急响应和城市规划提供设计依据。因此，爆源位置反演和爆炸当量反演是现代事故调查中由传统经验推断转向科学实证的关键步骤。

2.1 爆源位置反演

基于事故发生后厂区建筑结构的损伤程度，并结合建筑结构的破坏模式和毁伤判据，对厂区建筑结构的毁伤等级进行划分，初步确定爆源位置。图 3(a)给出了事故发生前厂区建筑结构编号^[18]，以建筑 1-①为例，“1”对应图 3(a)第一行建筑结构，“①”对应第一行编号为①的建筑结构。图 3(b)~(o)给出了厂区建筑结构的破坏模式。



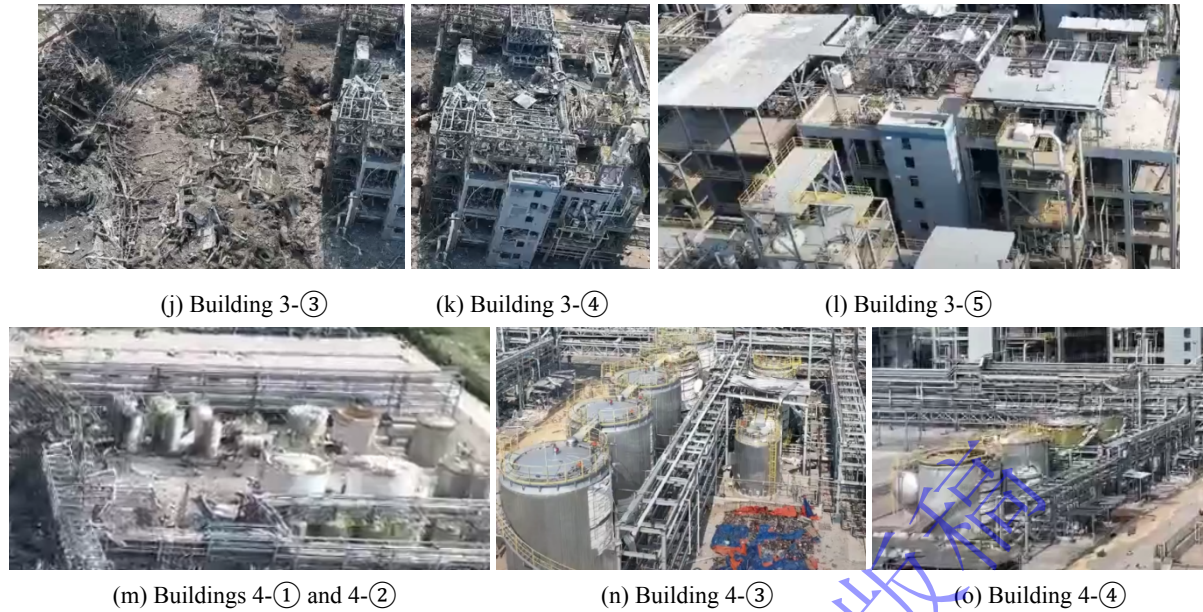


图3 爆炸事故发生后厂区建筑结构破坏模式^[18]

Fig. 3 Failure modes of plant building structures after blast accident^[18]

如表1所示,参考《民用爆炸物品工程设计安全标准》(GB 50089—2018)中冲击波超压作用下建筑物的毁伤等级^[19],确定爆炸事故发生后厂区建筑结构的毁伤等级。建筑结构1-①和1-②大部分门窗破坏,但整体结构保持完整,屋面板相对位移较小,毁伤等级为轻度;建筑结构2-①和2-⑤整体结构相对完整,毁伤等级为轻度;建筑结构2-②屋面板发生明显弯曲破坏,门窗全部破坏,仅框架结构保持完整,毁伤等级为中度;建筑结构2-④一侧少量钢结构倒塌,部分门窗破碎,整体结构完整,毁伤等级为中度;建筑结构3-①、3-②和3-④发生大面积倒塌,毁伤等级为重度;建筑结构3-③完全被摧毁,整体结构消失,毁伤等级为重度;由于建筑结构3-④对冲击波载荷的衰减作用,建筑结构3-⑤整体结构完整,各构件损伤较小,毁伤等级为轻度。建筑结构4-①和4-②储罐发生严重变形,周围管道破坏严重,气体外露,毁伤等级为重度;建筑结构4-③储罐变形较小,部分管道倒塌,罐体完整,毁伤等级为中度;建筑结构4-④储罐区变形较小,周围管道完整,毁伤等级为轻度。通过上述分析进一步划分厂区建筑结构重度、中度和轻度的毁伤范围,如图4(a)所示。第3行建筑结构毁伤等级最为严重,因此初步确定爆源位置位于第3行建筑结构。

表1 冲击波超压作用下建筑物的毁伤等级^[19]

Table 1 Damage levels of building structures under shock wave pressure^[19]

毁伤等级	破坏特征描述								超压阈值 /($\times 10^5$ Pa)
	玻璃	木门窗	砖外墙	木屋盖	钢砼屋盖	瓦屋面	顶棚	内墙	
无毁伤	偶然破坏	无损伤	无损伤	无损伤	无损伤	无损伤	无损伤	无损伤	0.02
轻度	部分呈小块破坏	窗扇破坏、窗框门窗破坏	裂缝较小,最大宽度小于5 mm	木屋面板变形、偶然折裂	无损伤	大量移动	抹灰大量掉落	板条墙抹灰大量掉落	0.02~0.25
中度	粉碎	窗扇掉落内倒窗框门扇大量破坏	裂缝较大宽度5~50 mm、砖垛明显倾斜	木屋面板变形、偶然折裂,木屋架支座松动	出现微小裂缝、最大宽度小于1 mm	大量移动到全部掀掉	木龙骨部分破坏、下垂	砖内出现小裂缝	0.25~0.4

重度	-	-	部分倒塌	部分倒塌	出现较宽裂缝	-	-	砖内墙出现严重裂缝到部分倒塌	0.4-0.76
----	---	---	------	------	--------	---	---	----------------	----------

进一步,结合厂区建筑分布图和第三行厂区建筑结构的破坏模式,精确确定爆源位置,如图4(b)~(c)所示。可以看出,建筑结构3-③硝化装置完全消失,周围建筑受冲击波作用,沿冲击波方向发生倒塌。此外,从以往爆炸事故分析中得知,硝化反应伴随着剧烈的放热反应,导致反应温度失控,是大多数工业厂房爆炸事故发生的主要原因。因此,可以确定建筑结构3-③硝化装置是此次爆炸事故发生的第一现场。

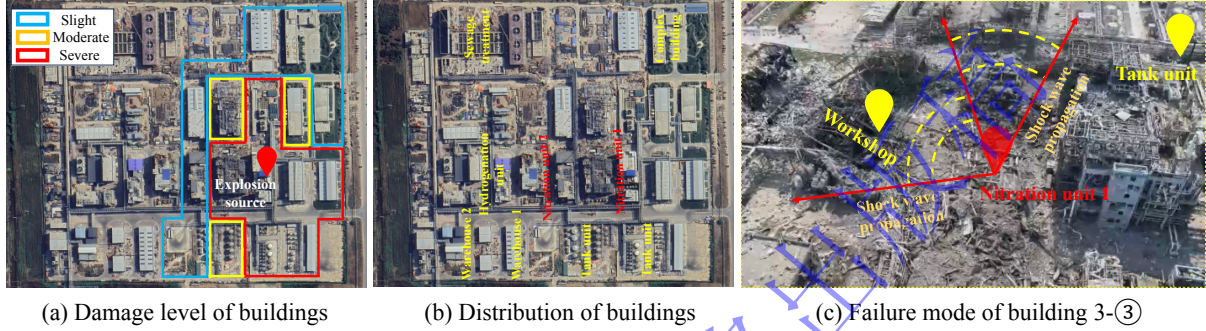


图4 厂区建筑结构破坏范围及爆源位置确定

Fig. 4 Damage level of buildings and determination of the explosion source

2.2 爆炸当量反演

2.2.1 基于远场建筑毁伤效应的当量反演

爆炸发生后,远场建筑结构受冲击波荷载作用,出现一定程度损伤。图5给出了距离爆炸中心约1600 m处商户建筑结构(红字烟酒、金足道)的视频监控画面^[20]。可以看出,商户建筑结构外墙、屋顶和内墙均无明显损伤,但玻璃门窗损伤较大。其中,红字烟酒二层部分玻璃窗户掉落,金足道玻璃门受冲击波荷载作用被冲开,但整体结构完整。对照表1冲击波超压作用下建筑物的毁伤等级,预估到达红字烟酒和金足道附近的超压约0.002 MPa。



图5 远场建筑结构的损伤破坏^[20]

Fig. 5 Damage of far-field building structures^[20]

通过反射超压反算爆炸当量,其中反射超压采用奥尔连科^[21]提出的不同入射角度下冲击波反射超压计算公式,入射超压采用 Baker^[22]提出的经验公式,见式(1)所示。

$$p_{\text{ref}} = \Delta p_m \left(1 + \frac{\cos \varphi}{C} + \frac{(\gamma + 1) \Delta p_m}{(\gamma - 1) \Delta p_m + 2 \gamma p_0} \cos^2 \varphi \right) \quad (1a)$$

$$\Delta p_m = \begin{cases} \frac{2.006}{Z} + \frac{0.194}{Z^2} - \frac{0.004}{Z^3}, & 0.05 \leq Z < 0.5 \\ \frac{0.067}{Z} + \frac{0.301}{Z^2} + \frac{0.431}{Z^3}, & 0.5 \leq Z < 70.9 \end{cases} \quad (1b)$$

$$C = \begin{cases} \cos \varphi, & \varphi \leq \varphi_{cr} \\ \cos \varphi_{cr}, & \varphi > \varphi_{cr} \end{cases} \quad (1c)$$

$$\cos \varphi_{cr} = \sqrt{\frac{r+1}{4}} \sqrt[3]{1 - \exp\left(-2.3 \frac{\Delta p_m}{p_0}\right)} \quad (1d)$$

式中： p_{rf} 为反射超压，MPa； Δp_m 为入射超压，MPa； γ 为绝热系数，取 1.4； p_0 为大气压力，取 0.1 MPa； φ 为冲击波入射角度； φ_{cr} 为临界角度； $Z = R / \sqrt[3]{W_{TNT}}$ 为比例距离， R 为目标与爆源间距离，m， W_{TNT} 为等效 TNT 当量，kg。

在该事故中，由于作用于玻璃门窗上的反射超压约为 0.002 MPa，相对大气压力 p_0 降低约 2 个量级。因此，式(1a)右侧括号内第三项趋近于 0，第二项为 1。化简得 $p_{rf} = 2\Delta p_m$ ，即 $\Delta p_m = 0.001$ MPa。受损建筑结构距离爆源 $R = 1600$ m。将上述参数代入式(1)中反算得到爆炸等效 TNT 当量约 11300 kg。由于入射超压 Δp_m 较小，比例距离较大，因此采用比例距离为 $0.5 \leq Z < 70.9$ 条件下的计算公式。

2.2.2 基于视频信息融合的当量反演

除上述基于建筑结构毁伤效应和超压阈值反算爆炸当量外，部分学者推导拟合得到了基于冲击波到达时间和目标与爆源间距离反算爆炸当量的经验模型。其中，杨亚东^[23]和 Wu 等^[24]拟合得到的经验公式应用广泛。本小节简要介绍上述 2 种经验公式，并反算得到此次爆炸事故中的等效 TNT 当量。

杨亚东等^[23]基于大量的数值仿真结果和文献试验数据，建立了自由场爆炸工况下冲击波超压峰值、到达时间和持续时间的经验预测模型，进一步构建了以到达时间、距离和当地声速为关键输入参数的等效 TNT 当量计算公式：

$$W_{TNT} = \left(\frac{0.1856 R^{1.666}}{c_0 T_a} \right)^{0.311} \quad (2)$$

式中： c_0 为当地声速，m/s； T_a 为冲击波到达时间，s。

Wu 等^[24]基于数值仿真，推导了冲击波压力随装药质量、距离、结构高度、持续时间等特征的经验公式。基于此，拟合得到了等效 TNT 当量与冲击波到达时间的函数关系：

$$W_{TNT} = \left(\frac{0.34 R^{1.4}}{c_0 T_a} \right)^5 \quad (3)$$

由式(2)~(3)可知，冲击波到达时间 T_a 为计算等效 TNT 当量的关键参数。在开源视频信息中，冲击波波阵面表现为一道快速向外扩张的半透明扭曲带，导致其后方的背景建筑或环境图像产生瞬间模糊和错位。对开源信息中视频信息进行处理^[25]，得到不同时刻下的光信号，进一步确定冲击波到达时间 T_a ，如图 6 所示。视频采集帧率为 30 FPS，即每一秒由 30 帧连续的静态图片组成。以爆炸火光出现为第 1 帧，如图 6(b)~(c)所示。第 5 帧和第 25 帧中可以看出冲击波的传播路径，如图 6(d)~(e)所示。以摄影装置显著晃动的帧数为冲击波到达帧（第 99 帧），换算得到冲击波到达时间 3.3 s，如图 6(f)所示。



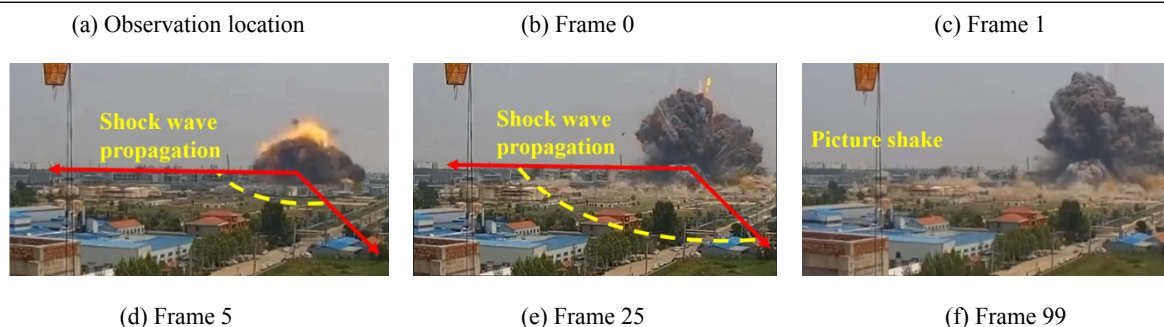


图 6 爆炸事故采集视频帧

Fig. 6 Video frames of explosion accidents

将冲击波到达时间 $T_a = 3.3$ s 分别代入式(2)~(3)得到两种经验模型计算的等效 TNT 爆炸当量分别为 26098 kg 和 12184 kg。由于本次事故近似地面爆炸，地面对冲击波的反射增强作用使其以半球形向外传播，其冲击波压力大于相同当量下的自由场爆炸场景。因此，杨亚东模型反演结果偏大。Wu 等经验模型是基于地面爆炸和复杂场景冲击波演化推导，其应用场景与获取的开源视频信息相吻合，反演结果与基于远场建筑毁伤效应反演得到的等效 TNT 当量 11300 kg 结果相近，最终确定爆炸等效 TNT 当量约为 12000 kg。经证实，该结果与现场勘察专家组调查统计结果基本一致。

2.3 爆炸事故原因分析

由上述爆炸事故反演可知，爆源位于 1 号硝化装置，爆炸当量约为 12000 kg TNT 当量。在此基础上，从爆炸发生的物理成因与事故后厂区建筑毁伤范围两个方面展开论述。

事故发生的诱发机理方面，其本质在于连续流硝化工艺发生热失控^[26]。硝化反应属于典型的强放热反应，对温度变化敏感。当反应体系的放热速率超过散热能力时，体系温度将持续升高并形成正反馈效应，最终导致热失控。根据开源信息事故还原时间线显示^[27]，事故发生前中控室监测到硝化反应釜温度由 80℃ 迅速升至 147℃，表明反应体系已进入严重失控状态。与此同时，安全仪表系统（SIS）未能及时发挥紧急联锁和切断作用^[28]，导致反应体系内副反应加剧、危险物料快速分解，并释放大热量和气体，使容器内部压力急剧升高并超过设计承载能力，最终诱发爆炸事故。

事故后厂区建筑毁伤范围方面，主要与危险物大量聚集及厂区防护措施不足有关。依据相关规范要求，车间浆料堆料不应超过日产生所需用量，据此推算正常运行下硝化浆料存量约为 10000 kg（约 3300 kg TNT）^[29]。然而，据公开报道资料^[30]，实际爆炸过程为管链机内 500 kg 堵塞物料率先起爆（约 170 kg TNT），引燃湿料仓中 2500 kg 物料爆炸（约 830 kg TNT），最终触发约 30000 kg 含 92% 硝酸的硝化浆料殉爆（约 10000 kg TNT）。由此可知，实际车间当量约 4300 kg TNT^[30]，而实际爆炸当量约 12000 kg TNT，危险物质实际存量远超规范限值，致使毁伤范围显著扩大。同时，高危涉爆区域缺乏与其危险等级相匹配的防护结构和隔离设施，使冲击波直接作用于邻近建筑，最终造成厂区建筑毁伤加剧。

综上所述，事故直接原因为该公司实际生产负荷超出设计标准，设备长期满负荷运行，工艺系统失稳，最终导致危险物质失控释放并引发爆炸。SIS 系统因维护缺失或违规屏蔽而未能在异常工况下启动联锁保护并阻断事故升级。此外，高危区域未设置与风险等级相匹配的防护或隔离设施，致使爆炸冲击波缺乏缓冲衰减，直接作用于邻近建筑，加剧厂区建筑毁伤效果。

3 厂区内建筑防护结构防护措施的有效性探讨

为探究大当量爆炸荷载作用下防护结构对爆源邻近建筑结构的防护性能，本节采用数值模拟方法定量分析钢筋混凝土（RC）防爆墙的防护效果，并给出增强厂区建筑结构抗爆性能的防护措施。

3.1 有限元模型建立及工况设计

基于 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[31]、GB 50016—2014（2018 年版）《建筑设计防火规范》^[32]和 GB 51182—2016《火炸药及其制品工厂建筑结构设计规范》^[33]，建立了工业厂房有限

元简化模型，爆源中心距建筑结构外表面 12000 mm，如图 7 所示。防护结构采用钢筋混凝土结构，双层双向配筋 $\Phi 12@100$ ，并通过 L 形锚固筋实现结构底部与地基的可靠连接。混凝土标号 C40，配筋采用 HRB400 钢筋，防护结构布置于爆源与建筑结构中心，其位置设计满足规范要求，同时兼顾厂区消防车道净宽需求。参考该案例，TNT 当量设置为 2000~12000 kg，以覆盖正常生产、轻度违规积存及严重超限积存等不同情景。其中，12000 kg TNT 当量与实际事故规模较为接近。每种当量下设置有或无防护结构两种场景。建筑结构外表面从下到上共布置 3 个反射超压测点，用于记录不同工况下的超压时程曲线。

混凝土结构采用 Lagrange 实体单元，钢筋采用 Beam 梁单元，空气网格采用 S-ALE 网格^[34]。采用关键字*INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 填充炸药。采用关键字*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 实现空气和炸药与防护结构和建筑结构之间的流固耦合。空气域边界通过关键字*BOUNDARY_NON_REFLECTING 设置为无反射边界，地面设置为刚体。通过网格敏感性分析确定空气网格大小为 42 mm，混凝土及钢筋网格尺寸为 37 mm^[34]。

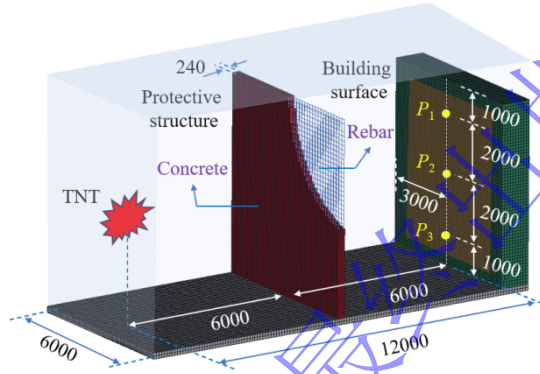


图 7 有限元模型与测点布置 (单位: mm)

Fig. 7 Finite element model and monitoring point layout (unit: mm)

采用关键字*MAT_PLASTIC_KINEMATIC 定义钢筋本构模型^[35]，该模型能够有效表征材料在塑性变形过程中的力学行为变化，适用于其在爆炸荷载下的非线性分析。钢筋本构模型及相应的动力放大系数为：

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_p \varepsilon_{\text{eff},p} \quad (4a)$$

$$\sigma_{dy} = 1 + (\dot{\varepsilon} / C)^{1/P} \quad (4b)$$

式中： σ_y 和 σ_{dy} 分别为材料静态和动态屈服强度，MPa； σ_0 为初始屈服强度，MPa； E_p 为塑性硬化模量，MPa； $\varepsilon_{\text{eff},p}$ 为有效塑性应变； $\dot{\varepsilon}$ 为钢筋应变率，s⁻¹； C 和 P 为应变率效应相关参数。

采用关键字*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 定义混凝土本构模型^[36]，该模型由三个独立的强度破坏面构成，分别为屈服面、最大破坏面和残余破坏面。其不同应力状态下的混凝土应力强度为：

$$\Delta\sigma_f = \zeta \Delta\sigma_m + (1 - \zeta) \Delta\sigma_y, \quad \lambda \leq \lambda_m \quad (5a)$$

$$\Delta\sigma_f = \zeta \Delta\sigma_m + (1 - \zeta) \Delta\sigma_r, \quad \lambda > \lambda_m \quad (5b)$$

式中： $\Delta\sigma_f$ 为不同应力状态下的有效应力偏量，MPa； $\Delta\sigma_m$ 、 $\Delta\sigma_y$ 和 $\Delta\sigma_r$ 分别为初始屈服强度、极限强度和残余强度，MPa； λ 为损伤变量； λ_m 为损伤阈值； ζ 为损伤变量 λ 的函数。

采用关键字*MAT_008_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 定义炸药的本构模型^[37]，同时采用*EOS_JWL 状态方程描述炸药的爆轰过程：

$$P_e = A[1 - \frac{\omega}{R_1 V_e}]e^{-R_1 V_e} + B[1 - \frac{\omega}{R_2 V_e}]e^{-R_2 V_e} + \frac{\omega E}{V_e} \quad (6)$$

式中： P_e 为爆轰产物压力，GPa； A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 分别为反映爆轰产物压力的参数； E 为炸药单位体积初始内能，J·m⁻³； V_e 为相对体积。

采用关键字***MAT_NULL**定义空气的本构模型，同时采用***EOS_LINEAR_POLYNOMIAL**多项式状态方程描述空气的力学行为变化：

$$P_a = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_a \quad (7)$$

式中： C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 和 C_6 为多项式状态方程参数； E_a 为空气初始体积能量，J·m⁻³； μ 为无量纲数， $\mu = 1/V_a - 1$ ， V_a 为相对体积。

各材料模型及参数见表2所示。

表2 材料模型及参数^[35]
Table 2 Material model and parameters^[35]

混凝土结构(*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3)									
参数	密度 ρ_0 /(kg·m ⁻³)	抗压强度 f_c /MPa							
取值	2400	40.0							
钢筋(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC)									
参数	直径/mm	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa		应变率参数 P			
取值	12	210	0.3	400		5			
炸药(*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN&EOS_JWL)									
参数	密度 ρ_0 /(kg·m ⁻³)	爆速 D /(m·s ⁻¹)	P /GPa	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /(J·m ⁻³)
取值	1630	6930	21	370	3.747	4.15	0.9	0.35	7×10 ⁹
空气(*MAT_NULL&*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL)									
参数	密度 ρ_0 /(kg·m ⁻³)	初始能量 E_0 /(J·m ⁻³)	动态粘性系数		截断压力 P_c /MPa	C_0, C_1, C_2, C_3, C_6			C_4, C_5
取值	1.29	2.5×10 ⁵	0		-0.1	0			0.4

3.2 仿真结果分析

3.2.1 冲击波载荷特征

图8给出了各测点在有/无防护结构工况下的超压时程曲线。可以看出，在无防护结构工况下，建筑结构迎爆面的超压时程曲线呈现出典型双峰特征。主要是由于初始冲击波在建筑表面与地面分别发生反射，反射波相互叠加后再次作用于结构表面，从而形成两个明显的压力峰值。相比之下，在有防护结构工况下，由于防护结构对冲击波的阻挡与衰减作用，传播至建筑迎爆面的超压时程曲线仅表现为单峰特征。4000 kg TNT当量时，有防护工况下建筑迎爆面3个测点的峰值超压分别较无防护工况降低约49%、51.3%和53.5%，12000 kg TNT当量时，降低约88.8%、86.2%和91.4%。因此，防护结构能够有效衰减传播至邻近建筑表面的冲击波荷载，相对于无防护工况，峰值超压衰减可达50%以上。

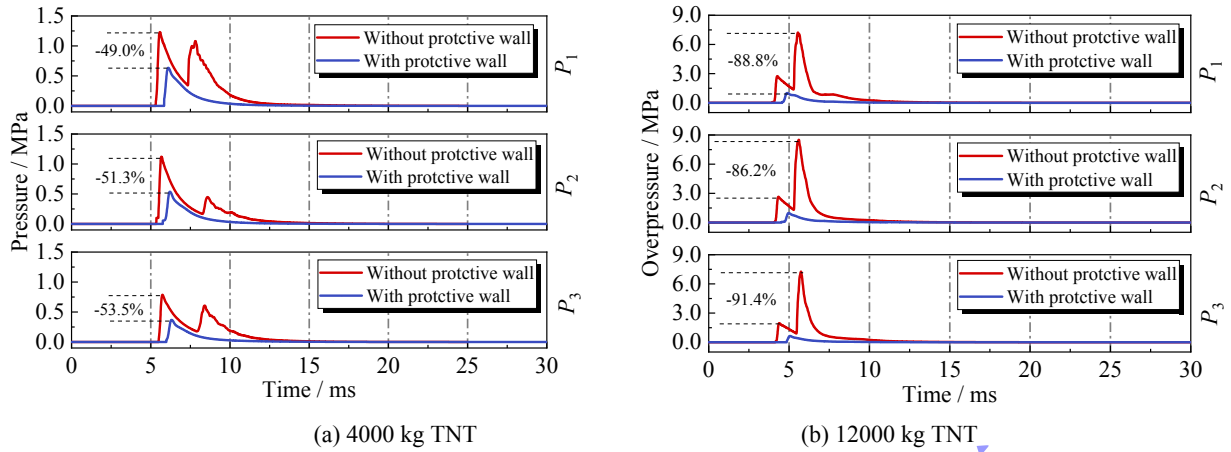


图 8 典型工况下测点超压时程曲线

Fig. 8 Overpressure-time histories in typical scenario

图 9(a)给出了各测点在有、无防护工况下的超压峰值。当爆炸当量较小时，有、无防护工况下超压峰值偏差较小。随着 TNT 当量增加，无防护工况下超压峰值呈指数增长，而有防护工况下超压峰值增长缓慢，两种工况下峰值超压偏差逐渐增大。相较于无防护工况，防护结构使得作用于相邻建筑表面的超压峰值衰减可达 85%，表明防护结构对高强度冲击波具有更加显著的衰减作用。图 9(b)进一步给出了防护结构与爆源间距离对相邻建筑表面峰值超压的影响规律。随着防护结构与爆源间距离由 4000 mm 增大至 8000 mm，各测点超压峰值明显降低，且降低幅度随爆炸当量增加愈加显著。以 P_3 测点为例，当防护结构与爆源间距离为 4000 mm 时，6 种当量下的峰值超压分别衰减 29.2%、48.9%、52.0%、53.8%、55.4% 和 57.8%，而当距离增加至 8000 mm 时，衰减幅度提高至 69.6%、78.2%、81.1%、82.7%、84.1% 和 85.4%。主要原因为：随着防护结构远离爆源，冲击波在到达防护结构前经历了更充分的几何扩散和能量耗散，入射压力显著降低。尽管防护结构均发生破坏，但其破坏后形成的透射波和绕射波均以较低能量继续传播，从而使得作用于建筑表面的峰值超压显著降低。因此，增大防护结构与爆源间距离能够对相邻建筑结构起到更好的防护效果。

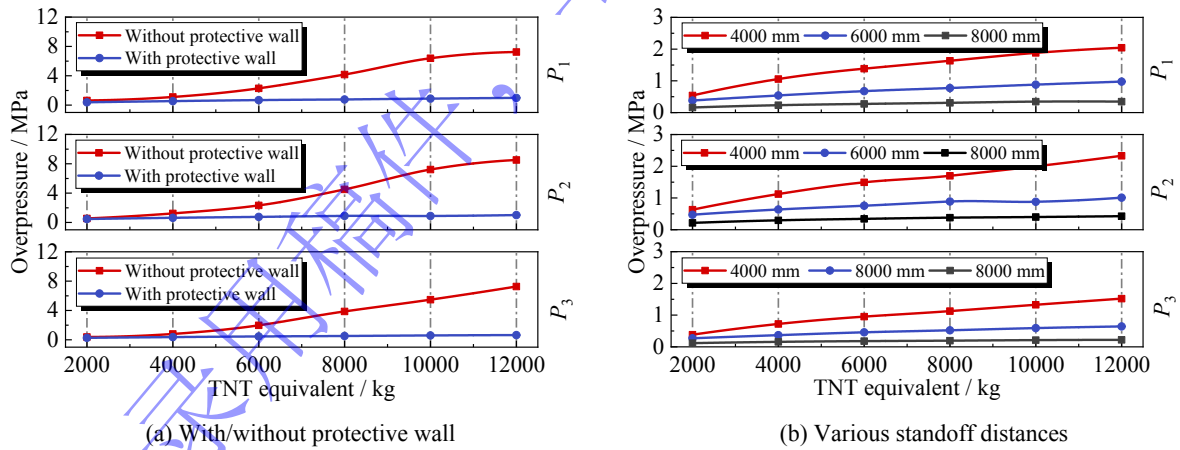


图 9 各工况下测点超压峰值

Fig. 9 Peak overpressure in each scenario

3.2.2 建筑结构损伤程度

图 10 给出了不同当量有/无防护结构工况下建筑结构迎爆面的损伤程度。可以看出，建筑结构迎爆面的损伤随爆炸当量增大而显著增强。相同当量下，由于防护结构对冲击波荷载的大幅衰减，导致建筑结构迎爆面的损伤远小于无防护结构工况。

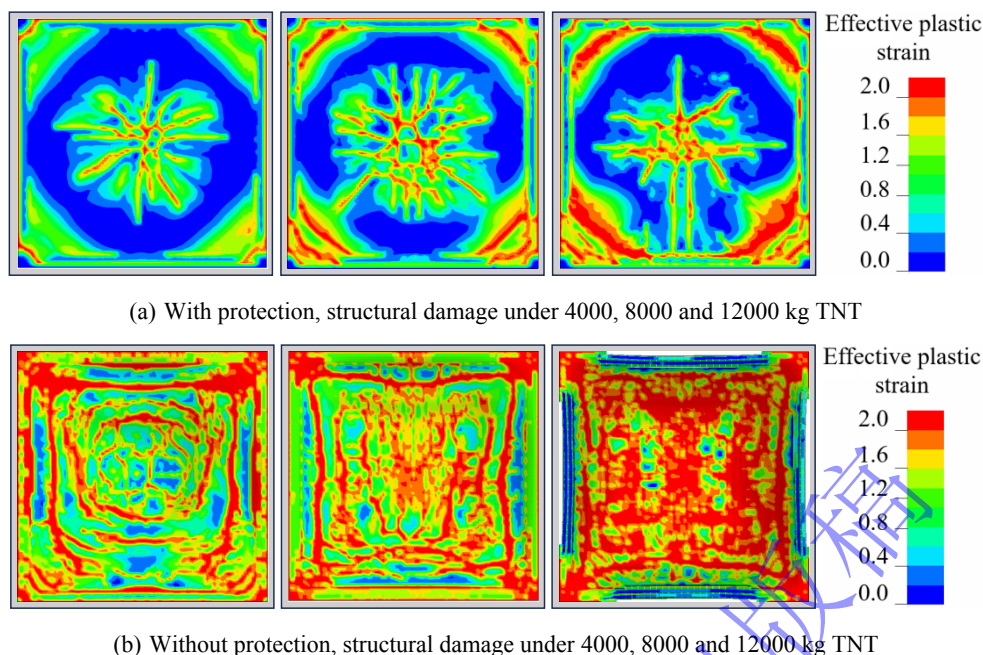


图 10 建筑结构外表面损伤云图
Fig. 10 Damage contour on building exterior surfaces

由事故反演可知, 建筑结构 3-③为爆源位置, 主体结构完全摧毁, 毁伤等级较高。相邻建筑结构 3-④发生大面积倒塌, 同样毁伤等级较高。由于建筑结构 3-④对爆炸冲击波的大幅衰减, 对相邻建筑结构 3-⑤起到较好的防护作用, 导致其损伤程度较小, 毁伤等级仅为轻度。然而, 邻近建筑结构 3-①虽然受到建筑结构 3-②的防护作用, 但是毁伤等级仍然较高。经分析, 主要原因是由于建筑结构 3-②相对高度较低, 部分冲击波仍直接作用于建筑结构, 不能对建筑结构 3-①形成有效防护。

通过爆炸事故分析及数值仿真结果分析, 给出增强生产厂区建筑结构抗爆性能的防护措施, 主要包含 4 个方面: (1) 严控爆炸危险物质存量, 将车间内危险化学品储量严格控制在设计限值以内, 从源头限制爆炸能量释放规模; (2) 在厂区建筑总平面设计中, 应严格划分高危涉爆工序厂房与人员办公区域, 并在两类区域之间设置符合安全规范的隔离带, 从源头规避爆炸荷载对人员、设备的损伤; (3) 应综合涉爆工序风险等级、建筑布局及结构尺寸等因素, 合理规划含易燃易爆危险品建筑单体结构的平面位置, 并严格控制建筑间的安全距离, 避免单点爆炸引发的多点殉爆, 阻断爆炸事故的连锁扩散; (4) 沿硝化装置、加氢装置等易发生爆炸事故的建筑结构外围添加防护结构能够有效衰减作用于相邻建筑结构迎爆面的冲击波荷载, 降低相邻建筑结构的毁伤等级, 进一步达到缩小爆炸事故毁伤范围的目的。

4 结论

本文基于开放易获取的开源信息, 提出了一种公共安全爆炸事故分析方法, 并针对“5·27”山东高密化工厂爆炸事故进行了事故反演和原因分析, 进一步结合数值仿真分析, 开展了厂区内结构防护措施的有效性探讨, 主要结论如下:

(1) 基于开源信息进行的爆炸事故反演结果表明, 此次事故爆源位于 1 号硝化装置, 爆炸当量约为 12 吨等效 TNT 当量, 该结论与基于现场勘查的调查结果一致。该方法在典型公共安全爆炸事故反演与原因分析中的成功实践, 有力验证了利用开源信息进行事故分析的有效性和准确性。

(2) 针对典型公共安全爆炸事故, 构建了基于开源信息融合的事故分析逻辑链条, 即: 基于开源信息获取爆炸发生、冲击波传播、爆炸后厂区和远区建筑结构损伤破坏等重要信息; 基于建筑结构毁伤判据和冲击波传播规律, 反演爆源位置和爆炸当量, 并分析事故发生原因; 基于数值仿真, 为商用建筑、工业厂房、居民住宅等结构的安全防护提供依据。

(3) 生产厂区应从严控爆炸危险物质存量、总平面分区隔离、防殉爆安全管控、重点涉爆装置外围防护四个方面加强抗爆防护,提升厂区建筑结构抗爆性能,降低爆炸事故造成的人员、设备损伤与毁伤范围。

值得注意的是,该方法可在事故发生后的较短时间内完成事故信息整合、爆炸参数反演及灾害后果评估,为事故原因分析和应急决策提供及时的技术支撑,充分体现了该方法在事故分析中的高效性。

参考文献

- [1]. 湖南省应急管理厅. 湖南临澧山洲花炮厂“6·16”爆炸事故初步通报 [EB/OL]. (2025-06-16) [2025-10-25]. https://yj.t.hunan.gov.cn/xwzx/snyw/202506/t20250616_33550768.html.
- [2]. 央视新闻. 俄罗斯车里雅宾斯克州一工厂发生爆炸致4死多伤 [EB/OL]. (2025-10-23) [2025-10-25]. <https://news.sina.com.cn/w/2025-10-23/doc-infuvkux7382659.shtml>.
- [3]. 常颖, 梁国福, 吴宪. 燃气爆燃事故调查与测试技术 [J]. 消防科学与技术, 2022, 41(04): 575-578.
CHANG Y, LIANG G F, WU X. Investigation and testing techniques for gas deflagration accidents [J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(04): 575-578.
- [4]. 刘喜和. 爆炸现场勘察计算爆炸物数量的方法 [J]. 警察技术, 2006, (01): 52-53.
LIU X H. Method for calculating explosive quantity in explosion scene investigation [J]. Police Technology, 2006, (01): 52-53.
- [5]. GUPTA R K, PRZEKAS A. Mathematical models of blast-induced TBI: current status, challenges, and prospects [J]. Frontiers in Neurology, 2013, 4:59. DOI: 10.3389/fneur.2013.00059.
- [6]. GARIMELLA H T, KRAFT R H. Modeling the mechanics of axonal fiber tracts using the embedded finite element method [J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2017, 33(5): e2823. DOI: 10.1002/cnm.2823.
- [7]. 康越, 黄超. 颅脑爆炸伤数值模拟研究进展: 建模、力学机制及防护 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(11): 3-38. DOI:10.11883/bzycj-2022-0521.
KANG Y, HUANG C. Progress in numerical simulation of blast brain injury: modeling, mechanical mechanisms and protection [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(11): 3-38. DOI:10.11883/bzycj-2022-0521.
- [8]. 王震, 胡可, 赵阳. 拱顶钢储罐内部蒸气云爆炸冲击荷载的数值模拟 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(20): 35-40. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2013.20.032.
WANG Z, HU K, ZHAO Y. Numerical simulation of internal VCE shock loads for dome steel tanks [J]. Vibration and Shock, 2014, 33(12): 184-189. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2013.20.032.
- [9]. D'UVA J, DETATA D, LEWIS S. Source determination of homemade ammonium nitrate using ATR-FTIR spectroscopy, trace elemental analysis and chemometrics [J]. Forensic Chemistry, 2022. DOI: 10.1016/j.forc.2022.100411.
- [10]. 孙振文, 张冠男, 乔婷, 等. 炸药爆炸残留物分析研究进展 [J]. 化学研究与应用, 2020, 32(7): 1117-1125.
SUN Z W, ZHANG G N, QIAO T, et al. Progress in analysis of explosive residues [J]. Chemical Research and Application, 2020, 32(7): 1117-1125.
- [11]. 李兴, 孙振文, 刘耀. 法庭科学领域烟火药及其爆炸残留物检验研究进展 [J]. 化学研究与应用, 2022, 34(10): 2265-2273.
LI X, SUN Z W, LIU Y. Progress in forensic detection of pyrotechnics and explosive residues [J]. Chemical Research and Application, 2022, 34(10): 2265-2273.
- [12]. 李来辉, 李景龙. 基于开源情报的核力量评估方法研究——以美国科学家联盟(FAS)核信息项目为例 [J]. 情报杂志, 2025, 44(11), 42-47.
LI L H, LI J L. Research on nuclear force assessment based on open-source intelligence: a case study of FAS nuclear information project [J]. Journal of Intelligence, 2025, 44(11): 42-47.

- [13]. 于申. 开源信息在科技情报领域的应用及展望 [J]. 科技创新与生产力, 2025, 46(07): 7-10+14.
YU S. Application and prospect of open-source information in scientific and technological intelligence [J]. Science & Technology Innovation and Productivity, 2025, 46(07): 7-10+14.
- [14]. 冷烁, 李孙伟, 胡振中. 基于开源技术的城市地理信息平台构建方法研究 [J]. 图学学报, 2020, 41(06): 1001-1011. DOI: 10.11996/JG.j.2095-302X.2020061001.
LENG S, LI S W, HU Z Z. Research on construction method of urban GIS platform based on open-source technology [J]. Journal of Graphics, 2020, 41(06): 1001-1011. DOI: 10.11996/JG.j.2095-302X.2020061001.
- [15]. 吴珍云, 金忠平, 王冬辰, 等. 基于开源 GIS 的地震应急信息可视化平台构建与应用 [J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(01): 69-73.
WU Z Y, JIN Z P, WANG D C, et al. Construction and application of earthquake emergency information visualization platform based on open-source GIS [J]. Laboratory Research and Exploration, 2020, 39(01): 69-73.
- [16]. 刘忠, 李保国, 许敏, 等. 基于开源 Web-GIS 的县域土壤信息系统设计 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 175-182. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.17.023.
LIU Z, LI B G, XU M, et al. Design of county soil information system based on open-source Web-GIS [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(17): 175-182. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.17.023.
- [17]. 国务院安委办. 山东友道化学“5·27”重大爆炸事故通报 [EB/OL]. (2025-07-09) [2025-10-25]. <https://www.enongzi.com/news/details/24ee3ce4-cf96-4aef-976f-19b1b78e0df0>.
- [18]. 央广网. 山东高密化工园区爆炸前后光学卫星对比图公布-直击航拍现场 [EB/OL]. (2025-10-23) [2025-10-25]. https://www.douyin.com/root/search/山东高密化工厂爆炸事故/aid=0ece8dae-d7fl-454b-bf35-1c612ea3a50a&modal_id=7509770674395778330&type=general.
- [19]. 民用爆炸物品工程设计安全标准, GB 50089—2018 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Safety standard for engineering design of civilian explosives, GB 50089—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [20]. 哔哩哔哩. 5.27 山东高密化工厂爆炸瞬间附近多个监控画面! [EB/OL]. (2025-05-29) [2025-10-25]. https://www.bilibili.com/video/BV1TnjzoEiz/?spm_id_from=333.1391.0.0&vd_source=7d99ba198a3defd861acb087353000ab.
- [21]. ORLENKO O. 爆炸物理学 (上册) [M]. 孙承纬译, 北京: 科学出版社, 2011, 286-293.
ORLENKO O. Physics of Explosion (Volume I). Translated by SUN C W. Beijing: Science Press, 2011: 286-293.
- [22]. BAKER W E. Fundamental studies in engineering [M]. Elsevier Science Publishing Company, 1983.
- [23]. 杨亚东, 李向东, 王晓鸣. 爆炸冲击波空中传播特征参量的优化拟合 [J]. 爆破器材, 2014, 43(01): 13-18.
YANG Y D, LI X D, WANG X M. Optimization fitting of characteristic parameters for air propagation of blast shock waves [J]. Explosive Materials, 2014, 43(01): 13-18.
- [24]. WU C, HAO H. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(6): 699-717. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.002.
- [25]. 吕晓, 卢永刚, 牛公杰, 等. 基于音视频信息融合的事故爆炸当量反演 [J/OL]. 爆炸与冲击, 2026, 1-23.
LU X, LU Y G, NIU G J, et al. Inverse evaluation of explosion yield in accident scenarios based on audio-video information fusion [J/OL]. Explosion And Shock Waves, 2026, 1-23.
- [26]. 封面新闻. 山东高密化工厂爆炸致 10 死 2 失联, 初步调查结果公布 [EB/OL]. (2025-05-29) [2025-10-25]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1839611360201905384&wfr=spider&for=pc>.
- [27]. 鸛鸟安全. 山东高密“5·27”硝化装置爆炸事故 137s 时间线解析: 中控室监测温度异常升至 147℃后系统连锁失效 [EB/OL]. (2025-05-29) [2025-10-25]. <https://www.sckhyx.com/hangye-12/237.html>.
- [28]. 国家安全生产监督管理总局. 危险化学品重大危险源监督管理暂行规定 [Z]. 2011-08-05.
Supervision and Management Measures for Major Hazard Sources of Hazardous Chemicals [Z]. State Administration of Work Safety Supervision and Management, 2011.

- [29]. 建筑防火通用规范: GB 55037—2022. [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
General Code for Fire Protection of Buildings: GB 55037—2022 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2022.
- [30]. 金融界. 山东高密化工厂发生爆炸! 附近居民家中电器被震出屋外, 系全球最大氯虫苯甲酰胺生产企业, 产能11000吨, 各大上市公司密集回应影响 [EB/OL]. (2025-05-27) [2025-10-25]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1833276316276065214&wfr=spider&for=pc>.
- [31]. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [32]. 建筑设计防火规范: GB 50016—2014 (2018 年版) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Code for fire protection design of buildings: GB 50016—2014 (2018 ed.) [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [33]. 火炸药及其制品工厂建筑结构设计规范: GB 51182—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
Code for design of architecture and structure for the factory of explosives and their products: GB 51182—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [34]. ZHANG Z, JIA B, LU Y, et al. Experimental and numerical investigation of internal explosions in RC frame structures with foam concrete infill walls [J]. Structures, 2025, 81: 110261. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.110261.
- [35]. 李军润, 卢永刚, 冯晓伟, 等. RC 箱型结构内爆炸载荷特性和动力行为分析 [J]. 爆炸与冲击, 2026, 46(01): 133-153. DOI:10.11883/bzycj-2024-0388.
LI J R, LU Y G, FENG X W, et al. Analysis of internal explosion load characteristics and dynamic behavior of RC box-type structures [J]. Explosion and Shock Waves, 2026, 46(01): 133-153. DOI:10.11883/bzycj-2024-0388.
- [36]. ZHOU G, WANG R, WANG M, et al. Explosion resistance performance of reinforced concrete box girder coated with polyurea: Model test and numerical simulation [J]. Defence Technology, 2024, 33: 1-18. DOI:10.1016/j.dt.2023.08.006.
- [37]. WANG L, BAI Z, QIAN B, et al. The damage of sequential explosions in reinforced concrete: Experimental and numerical investigation [J]. Defence Technology, 2025, 48: 284-297. DOI:10.1016/j.dt.2025.02.012.