

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240329002

## 建筑物内爆炸韧性评估与决策方法\*

卢浩<sup>1</sup>, 张效晗<sup>2</sup>, 李毅<sup>2</sup>, 杨晓宁<sup>2</sup>, 林津<sup>2</sup>, 何勇<sup>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. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

**摘要:** 建筑物内因可燃燃气云积聚导致的燃爆事故频发, 已严重制约相关重大工程设施安全, 同时爆炸事故严重威胁人员生命、财产安全。可燃燃气云内爆事故具有极大的不确定性, 传统抗爆技术手段难以有效平衡抗爆效率与经济投入的关系。基于数物驱动的韧性评估方法, 首先对内爆事故、荷载强度、主体结构破坏的不确定性展开分析与评估; 然后采用模糊数学的方法, 建立得到压力波对人员各伤害等级的超压隶属度函数, 得到各隶属度对应伤害等级的发生概率计算模型; 在地震经验公式基础上, 引入死亡率系数, 获得综合压力波毁伤与建筑物坍塌伤害的人员伤亡模型; 提出内爆事故损失计算模型与韧性指数计算模型。基于以上研究成果, 以某涉气厂房为例, 计算获得防护强度—伤亡概率、防护强度—韧性指数关系。考虑增加防护强度后带来的建设成本、维护成本的增加, 计算得到不同防护强度下建筑物防护韧性效费比。综合人员伤亡概率、建筑韧性指数及防护效费比变化, 兼顾节约成本与降低伤亡, 确定防护强度0.8。该韧性评估决策模型有效平衡经费投入与抗爆性能效益产出, 能够客观表征当前设计条件下存在的爆炸风险, 同时兼顾抗爆设计方案评价及优选。

**关键词:** 工程抗爆; 韧性评估; 损失; 数物驱动

**中图分类号:** O383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0554-08

## Resilience Assessment and Decision-making for Internal Building Explosions

LU Hao<sup>1</sup>, ZHANG Xiaohan<sup>2</sup>, LI Yi<sup>2</sup>, YANG Xiaoning<sup>2</sup>, LIN Jin<sup>2</sup>, HE Yong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Frequent combustion-explosion accidents caused by flammable gas cloud accumulation in buildings have seriously compromised the safety of related major engineering facilities. Meanwhile, explosions pose serious threats to life and property safety. Internal explosions of flammable gas clouds exhibit significant uncertainty, and conventional blast-resistant techniques struggle to balance protection efficiency and economic investment. Based on the physics- and data-driven resilience evaluation methodology, the uncertainties of internal explosion accidents, load intensity, and primary structure damage were first analyzed and assessed. Fuzzy mathematics was then employed to establish overpressure membership functions for different personnel injury levels and to derive probability calculation models for injury levels corresponding to membership degrees. Building upon the empirical seismic for-

\* 收稿日期: 2024-03-29; 修回日期: 2024-08-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(30923010308)、国家资助博士后研究人员计划(GZC20242240)资助

作者简介: 卢浩(1987—), 男, 副教授, 博士。主要从事防护结构毁伤评估研究。E-mail: lh829829@163.com

通信作者: 李毅(1995—), 男, 助理研究员, 博士。主要从事燃气爆炸安全研究。E-mail: yi.li@njjust.edu.cn

mula, a mortality coefficient was introduced to obtain a casualty model that integrated shock wave damage and building collapse injuries. Then, the calculation models of loss and resilience index were proposed. Based on these findings, the protective strength-casualty probability and protective strength-resilience index relationships were calculated and acquired by taking a gas-related plant as an example. Considering increased construction and maintenance costs from enhanced protection level, the cost-effectiveness ratios of building protective resilience under different protection levels were calculated. Considering the probability of casualties, building resilience index, and protection cost-effectiveness, and balancing cost savings with casualty reduction, the optimal protection level was determined to be 0.8. This resilience assessment and decision-making model effectively balances the costs and benefits of blast resistance and is able to objectively characterize explosion risks under existing design conditions, while also enabling evaluation and optimization of blast-resistant design schemes.

**Keywords:** engineering blast resistance; resilience assessment; loss; physics- and data-driven

## 0 引言

随着我国城市化和工业现代化的高速发展,天然气等可燃气体引起的爆炸事故屡有发生,严重威胁人民生活及工业生产安全,已引起社会的高度关注。此外,作为清洁能源,氢能被广泛推广使用,加氢站等设施的安全防控也是氢能利用中关键环节。从以往建筑物内爆炸事故中可以看出,爆炸灾害呈现较强的不确定性,爆炸强度、灾害后果的不确定性突出。传统抗爆设计以单维度的安全状态为目标,在面对较大强度气体爆炸时往往快速分离解体,有可能带来超预期的不可控损失。韧性抗爆则以最大限度保持系统功能水平为目标,要求在保持稳定性基础上,具备快速恢复能力,也是目前爆炸安全防护的重点发展方向。随着爆炸荷载的增强,为加强建筑物的防爆性能,保证主体结构的爆炸稳定性,其所需要的经费也相应增加。然而不同的事故原因、在爆室形成的不同可燃气体云和引爆的不同条件等都会导致爆炸对建筑物的不同作用效应,若采用最不利条件进行设计必然带来巨大的经费投入,从而大大降低易爆建筑物投产后的经济效益。因此有必要对涉爆建筑物事故性爆炸韧性进行评估,结合抗爆措施可能增加的费用,寻求爆炸韧性提升投入和产出之间的经济平衡,实现容积规划和建筑物抗爆措施的优化。

国内外学者在结构抗震韧性<sup>[1-3]</sup>、基础设施防灾韧性<sup>[4-5]</sup>、韧性城市<sup>[6]</sup>等方面做出了许多研究工作,在韧性评估模型<sup>[7-8]</sup>、抗震韧性技术<sup>[9]</sup>等方面也有很多研究突破。在抗爆韧性方面,国内学者主要关注武

器打击时弹药爆炸作用下的工程抗爆韧性<sup>[10-11]</sup>。由于建筑物内气体爆炸为事故性,在发生概率、爆炸强度上呈现出较强的随机性<sup>[12]</sup>,且目前研究成果中韧性评估方法主要以性能时程曲线为主,尚不能结合经济性为爆炸灾害防控提供有效参考。本文从建筑物内气体爆炸不确定分析与评估入手,研究建立基于爆炸灾害损失的韧性评估模型,结合经济成本,给出考虑韧性效费比的韧性决策模型,为灾害评估与控制提供支持。

## 1 建筑物内爆炸灾害过程不确定性分析与评估

建筑空间内可燃气体泄露爆炸受多种因素影响,包括爆燃气体类型、建筑物空间型式、建筑内部设施等。爆炸灾害过程不确定性突出,包括事故发生的随机性、爆炸强度的不确定性、主体结构破坏以及人员伤亡的不确定性等,准确评估爆炸灾害必须考虑以上诸多因素影响。

### 1.1 爆炸灾害发生的不确定性与评估

事件发生概率的确定是韧性评估的重要内容,理论上有多种方法进行计算,包括观测统计法、事故树法、贝叶斯法等。在各种方法受限的情况下,也可通过预设事件重复周期的方法进行计算,在建筑物服务期限内,爆炸荷载只出现一次的概率,用公式(1)表示:

$$P_1 = 1 - \exp\left(-\frac{t_1}{t}\right) \quad (1)$$

式中, $t_1$ 为建筑物设计服务期限; $t$ 为事件重现周期。

## 1.2 爆炸荷载强度的不确定性与评估

当今工程应用中,多采用萨道夫斯基公式表征球形炸药爆炸后的冲击波对周围建(构)筑物的爆破振动速度影响。不同于炸药爆炸,建筑物内气体爆炸强度受多种因素影响,包括气源种类与浓度、初始压力、气体与环境温度、爆室空间特性、点火源位置与点火强度、建筑空间内障碍物分布、泄放口面积等。当针对某一特定建筑物进行爆炸危险性评估时,爆源的种类、空间分布特征、泄放面积成为固定量,可以被准确获知。此时,爆炸超压不确定性主要受气体浓度、点火源位置、点火强度影响,初始压力与温度对超压影响较小。

俄罗斯科学家彼柳金通过对爆炸超压试验结果统计以及分析后提出,在实际计算时,超压分布符合正态分布规律<sup>[11]</sup>,如式(2)所示:

$$f(\Delta P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta P - \mu_P}{2\sigma_P^2}} \quad (2)$$

式中, $f(\Delta P)$ 为爆炸超压概率密度函数; $\mu_P$ 为分布均值; $\sigma_P$ 为分布标准差。其中 $\mu_P = 0.72\Delta P_m$ , $\sigma_P = 0.23\Delta P_m$ , $\Delta P_m$ 为可燃物云团形成和引爆时的最不利条件下的计算超压值。

## 1.3 主体结构破坏的不确定性与评估

文献[13]中以天然气作为爆炸源,给出了爆炸压力波作用下钢筋混凝土梁出现不同破坏等级的概率随比值 $X = \Delta P_e / \Delta P_p$ 的变化,其中 $\Delta P_e$ 为实际爆炸荷载 $P_r$ , $\Delta P_p$ 为设计承受爆炸荷载。如图1所示,图中轻微、中等、严重和完全破坏四条曲线数据来自500多根梁的试验结果统计分析。不同破坏等级的阈值范围存在较大的重合区域,需采用统计概率来表征主体结构破坏效应。

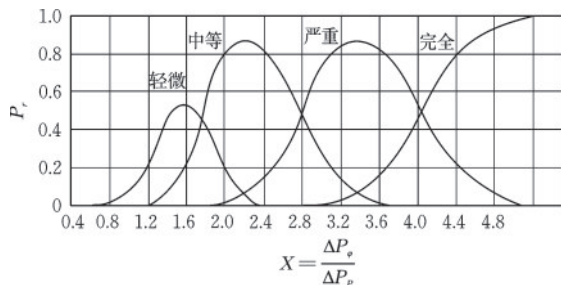


图1 破坏概率与荷载比值的关系

Fig.1 Relationship between damage probability and load ratio

## 1.4 室内人员伤亡的不确定性与评估

发生气体爆炸时车间、库房内的易燃、易爆物品极易引发火灾,对人员构成烧伤危害;可燃气云燃爆产生的冲击波或震荡作用,也极易造成人员内脏重大损伤;因爆炸导致的建筑物坍塌及结构飞散,亦会造成人员伤亡<sup>[14-15]</sup>。本文仅考虑爆炸所产生的压力波和建筑物坍塌伤害。

### 1.4.1 压力波导致的人员伤亡

国内外研究人员主要采用超压值作为评价指标衡量人员的不同伤害程度,如表1所示。

表1 爆炸压力波对人员的伤害估计

Table 1 Estimation of blast-induced injuries to personnel

文献来源	超压分级标准/kPa			
谭洪艳等 <sup>[16]</sup>	大部分死亡 >100	重伤或死亡 50~100	中等伤害 30~50	轻伤 20~30
吴宗之等 <sup>[17]</sup>	严重伤亡 >100	严重损伤 50~100	听觉器官损伤或骨折 30~50	碎块伤害 10~30
周月琴 <sup>[18]</sup>	高死亡率 >98	严重损伤 49~98	中等损伤 29.4~49	轻微挫伤 19.6~29.4

表1中分级标准具有一定的模糊性,如当人员承受超压值为80 kPa时,同时存在重伤与死亡的可能性,因此需采用模糊数学的方法进行处理,建立得到各伤害等级的超压隶属度函数。考虑我国事故等级划分方法,将人员伤亡等级划分为死亡、重伤、轻伤三个等级,分别用I、II、III来表示。

综合上述文献中伤害等级及其划分方法,给出不同超压时人员伤亡概率,得到各伤害等级的隶属度函数,按照如下原则:

(1)当 $\Delta P > 150$  kPa时,人员死亡概率为1;

(2)当 $\Delta P = 100$  kPa时,人员死亡概率为0.8,重伤概率为0.2;

(3)当 $\Delta P = 50$  kPa时,人员死亡概率为0,重伤概率为0.5,轻伤概率为0.5;

(4)当 $\Delta P = 30$  kPa时,人员死亡概率为0,重伤概率为0,轻伤概率为0.5;

(5)当 $\Delta P < 15$  kPa时,人员死亡概率为0,重伤概率为0,轻伤概率为0。

通过上述原则,可以获取各节点(15、30、50、100、150 kPa)超压的隶属度。令节点之间的隶属度函数为线性关系,得到隶属度曲线,如图2所示,图中IV级表示人员无伤亡。

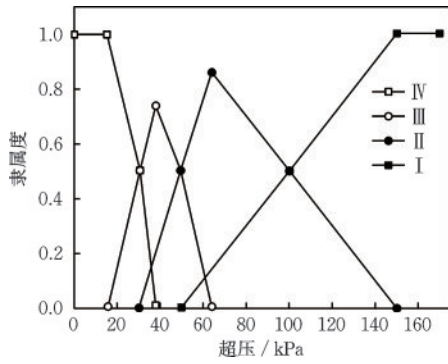


图2 隶属度曲线

Fig.2 Membership curves

得到各等级的隶属度  $\mu_i(\Delta P)$  为:

$$\mu_I(\Delta P) = \begin{cases} 1 & \Delta P > 150 \\ \frac{\Delta P - 50}{100} & 50 < \Delta P \leq 150 \\ 0 & \Delta P \leq 50 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{II}(\Delta P) = \begin{cases} 0 & \Delta P > 150 \\ \frac{150 - \Delta P}{100} & 64.3 < \Delta P \leq 150 \\ \frac{\Delta P - 30}{40} & 30 < \Delta P \leq 64.3 \\ 0 & \Delta P \leq 30 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{III}(\Delta P) = \begin{cases} 0 & \Delta P > 64.3 \\ \frac{64.3 - \Delta P}{28.6} & 50 < \Delta P \leq 64.3 \\ 0.5 + \frac{50 - \Delta P}{40} & 38.6 < \Delta P \leq 50 \\ \frac{\Delta P - 15}{30} & 15 < \Delta P \leq 38.6 \\ 0 & \Delta P \leq 30 \end{cases} \quad (5)$$

由于  $\Delta P$  是随机量,其概率分布密度函数为  $f(\Delta P)$ ,则一次爆炸事故下压力波导致各伤亡等级的发生概率为:

$$P(C_{P,w} = I) = \int_0^{+\infty} f(\Delta P) * \mu_I(\Delta P) d(\Delta P) \quad (6)$$

$$P(C_{P,w} = II) = \int_0^{+\infty} f(\Delta P) * \mu_{II}(\Delta P) d(\Delta P) \quad (7)$$

$$P(C_{P,w} = III) = \int_0^{+\infty} f(\Delta P) * \mu_{III}(\Delta P) d(\Delta P) \quad (8)$$

#### 1.4.2 建筑物倒塌导致的人员伤亡

可燃气云内爆多产生局部荷载,作用在建筑物内梁、柱、板等结构上,使关键结构产生塑性变形,继而引起整体建筑的垮塌。目前关于内爆造成的建筑物倒塌与人员伤亡关系的研究较少,相关研究多集中于地震灾害研究领域。本文基于地震灾害

相关研究成果,结合内爆事故特征,初步给出内爆条件下建筑物倒塌造成人员伤亡的估计方法。

傅征祥<sup>[19]</sup>根据华北地震数据资料,分析得出地震房屋倒塌率(CR)与人员死亡率(FR)满足  $\lg FR = A + B(CR)$  的关系。周雍年等<sup>[20]</sup>根据唐山地震、邢台地震和丽江地震时房屋倒塌率和人员死亡率数据,得出经验关系:

$$\lg FR = 9.221(CR)^{0.1} - 10.0077 \quad (9)$$

原国家地震局工程力学研究所<sup>[21]</sup>将地震死亡人员数据信息处理整合,并以房屋结构类型为根据,得出了房屋倒塌率与地震人员死亡率的表达关系式:

$$\lg FR = 12.478(CR)^{0.1} - 13.3 \quad (10)$$

由于可燃气云内爆事故的突发性更强,且爆炸产生的压力波伤害易叠加建筑结构损毁造成的损伤,对内部人员安全威胁较大。为此在地震经验公式(10)的基础上增加死亡率系数  $K_{FR}$ ,即:

$$\lg \frac{FR}{K_{FR}} = 12.478(CR)^{0.1} - 13.3 \quad (11)$$

结合内爆事故坍塌造成人员伤亡数据,  $K_{FR}$ 取2。

综合考虑压力波和建筑物倒塌对人员的伤害,可得爆炸事故发生一次时各伤亡等级的发生概率:

$$P(C_p = I) = \int_0^{+\infty} f(\Delta P) * \mu_I(\Delta P) d(\Delta P) + FR - FR * \int_0^{+\infty} f(\Delta P) * \mu_I(\Delta P) d(\Delta P) \quad (12)$$

## 2 建筑物内爆炸灾害韧性评估方法

爆炸灾害韧性是指系统具备抵抗、吸收和适应爆炸灾害以及从中迅速恢复的能力。韧性的基本内涵是保护和恢复,最终目的均是对灾害损失的有效控制。对系统的保护是控制灾害造成的直接损失,包括建筑物损伤和人员伤亡;对系统的快速恢复是控制灾害造成的间接损失,包括对人防设施的防御功能,重要目标的军事、生产生活功能影响等,所以韧性评价的标准是对爆炸灾害损失的有效控制能力,因此提出基于损失的结构抗爆韧性评估模型。

### 2.1 损失计算模型

对于人防设施、重要军事、经济目标来说,爆炸

灾害造成的损失主要有人员伤亡和经济损失。人员伤亡主要由爆炸灾害直接造成；经济损失包括建筑物损毁损失，以及建筑物受损导致的生产经营和生活间接损失，总的损失计算如式(13)所示。

$$L_{\text{总}} = L_{\text{人员}} + L_{\text{建筑物}} + L_{\text{间接}} \quad (13)$$

$$L_{\text{人员}} = N \cdot P(E) \quad (14)$$

式中， $L_{\text{人员}}$ 为人员伤亡量，通过式(14)获得，其中 $N$ 为建筑物内人员数量， $P(E)$ 表示爆炸强度为 $E$ 时人员伤亡概率，可通过1.4节方法进行评。  $L_{\text{建筑物}}$ 为建筑物自身损失，主要根据修复成本计算得出。单个构件的修复成本往往高于工程建设成本，当修复成本大于建设成本，则认为该工程需要重建，应以重建成本作为工程损失，计算过程如式(15)所示。

$$L_{\text{建筑物}} = C_{\text{建}} \sum_{i=1}^4 (K_{L,i} \cdot \lambda_{L,i} \cdot \omega_L \cdot \eta_L + K_{M,i} \cdot \lambda_{M,i} \cdot \omega_M \cdot \eta_M + K_{S,i} \cdot \lambda_{S,i} \cdot \omega_S \cdot \eta_S) \quad (15)$$

式中， $C_{\text{建}}$ 为建筑物重建成本； $K_{L,i}$ 、 $K_{M,i}$ 、 $K_{S,i}$ 分别为主要承载结构、非主要承载结构、非承重结构经受 $i$ 级破坏时的破坏面积比； $\lambda_{L,i}$ 、 $\lambda_{M,i}$ 、 $\lambda_{S,i}$ 为三类结构经受 $i$ 级破坏的损失率； $\omega_L$ 、 $\omega_M$ 、 $\omega_S$ 为三类结构对应的价值系数，其总和为1； $\eta_L$ 、 $\eta_M$ 、 $\eta_S$ 为三类结构对应的修复系数，即修复费用与建设费用之比； $L_{\text{间接}}$ 为建筑物受损导致的间接损失，主要根据修复时间以及不同损伤状态下损失函数计算得到，如公式(16)所示。损失率与生产、生活状态恢复有关，若该工业厂房需完全恢复后才能开始生产，则损失率为生产完全停滞导致的损失。

$$L_{\text{间接}} = \int_{t_{oc}}^{t_{oc} + T_{CL}} \Delta L(t, Q_i) dt \quad (16)$$

式中， $\Delta L(t, Q_i)$ 为建筑物性能 $Q_i$ 时单位时间内的损失率，如工业厂房停止生产一天带来的经济损失； $t_{oc}$ 表示灾害发生时刻； $T_{CL}$ 表示从灾害发生到完全恢复的系统控制时间。

图3为间接损失与时间的关系曲线，曲线 $a$ 表示损失率为常数，随着时间的增加损失线性增长，直至达到控制时间。曲线 $b$ 表示损失率随着时间增大而增大。曲线 $c$ 表示建筑物生产生活功能得到阶段性恢复，损失率降低，在 $t_{re}$ 时刻功能完全恢复，损失不再增加。曲线 $d$ 表示建筑物生产、生活功能在 $t_{re}$ 时刻功能完全恢复，损失不再增加。在工程性能完全恢复之前，损失不断增加，恢复能力能够缩短恢复周期和降低损失率。

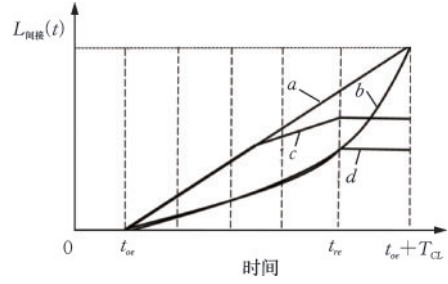


图3 间接损失与时间关系

Fig.3 Relationship between indirect loss and time

## 2.2 基于损失的韧性指数计算模型

考虑建筑物偶然性爆炸特点，建立以人员伤亡、建筑物自身损失、因建筑物功能丧失带来的持续损失为主要指标的韧性评估模型。

$$R = 1 - \sum_{i=1}^n P(E_i) \cdot [L_{\text{人员}} + L_{\text{建筑物}} + L_{\text{间接}}] / V_{\text{total}} \quad (17)$$

$$V_{\text{total}} = N + C_{\text{建}} + \int_{t_{oc}}^{t_{oc} + T_{CL}} \Delta L(t, Q=0) dt \quad (18)$$

式中， $R$ 为韧性指数； $V_{\text{total}}$ 为建筑物控制损失，为建筑物完全损失( $Q=0$ )时在控制时间 $T_{CL}$ 范围内造成的总损失。

建筑物偶然性爆炸损失类型主要包括人员伤亡和经济损失，为将两者进行统一计算，引入人员-经济等量转换系数 $K_{P-M}$ ，根据当地经济情况和其他考虑进行等价转换。需要指出的是，这种转换在低人员伤亡率时可以使用，人员伤亡率较高时应主要考虑降低人员伤亡的措施。改进后的韧性计算模型如式(19)所示。

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n P(E_i) \cdot [L_{\text{人员}} \cdot K_{P-M} + L_{\text{建筑物}} + L_{\text{间接}}]}{N \cdot K_{P-M} + C_{\text{建}} + \int_{t_{oc}}^{t_{oc} + T_{CL}} \Delta L(t, Q=0) dt} \quad (19)$$

## 3 爆炸灾害韧性决策模型与方法

### 3.1 韧性决策模型

公式(19)给出的评估模型可用于韧性决策，包括新建工程抗爆韧性设计以及已建工程抗爆韧性提升优化。

对于新建工程抗爆韧性设计方案，采用防护韧性效费比 $I_j$ 进行决策，投入费用一定的情况下，韧性指数越高，设计方案抗爆韧性越好。防护韧性效费比 $I_j$ 采用公式(20)计算。

$$I_j = \frac{R_j}{D_j} \quad (20)$$

式中,  $I_j$ 、 $R_j$ 、 $D_j$ 分别为第  $j$  种方案对应的防护效费比、韧性指数以及所需费用。

对于已建工程的韧性提升优化,当改造费用一定时,防护韧性效费比  $I_j$  大于 1 时,方案可选择,该值越大,韧性提升效果愈佳。防护效费比  $I_j$  采用公式(21)计算。

$$I_j = \frac{(R_j - R_0) \cdot C_T}{(\Delta D_j) \cdot (\omega_2)} \quad (21)$$

式中,  $I_j$ 、 $R_j$ 、 $\Delta D_j$ 分别为第  $j$  种方案对应的韧性提升效费比、韧性指数以及所增加费用;  $R_0$  为原设计方案韧性指数。

### 3.2 韧性决策方法

无论是将人员损失与经济损失分开考虑,还是将人员损失按一定的规则进行经济等价,都具有一定的弊端。出于人性化的考虑,用货币去度量人员伤亡损失是不道德的,然而气体爆炸事故中人员伤亡难以避免,为此,本文基于风险接受准则给出了考虑人员伤亡的风险决策模型。将风险接受度划为三个区域,在不同的区域范围内应采用不同的方法进行处理,具体评估与决策流程如图 4 所示。

(1)根据荷载分布特征、建筑结构参数、人员数量及分布,利用公式分别计算超压直接导致的人员死亡率以及建筑物倒塌导致的人员死亡率,综合估

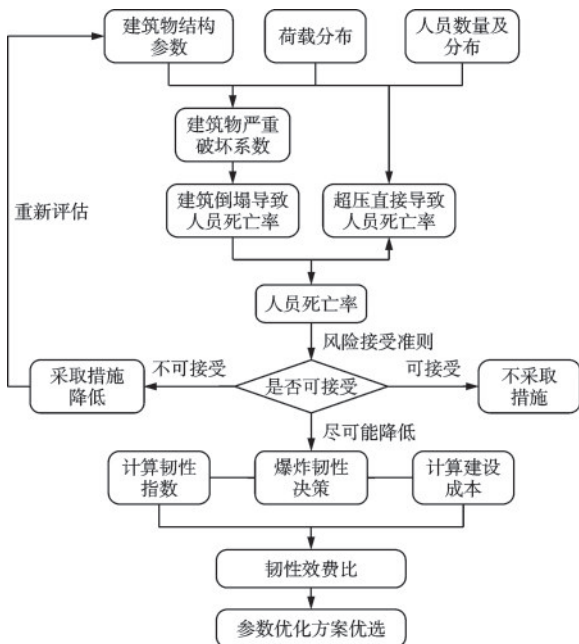


图 4 韧性决策流程

Fig.4 Resilience-based decision workflow

计爆炸事件可能导致的人员死亡率。

(2)将计算结果与 2014 年我国颁布的《危险化学品生产、储存装置个人可接受风险标准和社会可接受风险标准》<sup>[22]</sup> 中的风险接受准则(表 2)进行比较。

(3)当评价结果处于不可接受区域时,表明人员伤亡率较高,爆炸事故的危害性大,此时必须采取措施,更新结构参数,对采取措施后的人员伤亡率进行重新估计,直至将人员伤害风险值降低至不可接受区域外。

(4)当评价结果处于尽可能降低区域时,人员伤亡率处于可承受的中等水平,可考虑将人员伤亡转化为经济损失,利用韧性模型进行决策优化。

表 2 我国个人可接受风险标准值

Table 2 Standard values of acceptable risk for individuals in China

防护目标	个人可接受风险标准 (概率值)	
	新建装置 (每年) ≤	在役装置 (每年) ≤
低密度人员场所(人员 < 30 人): 单个或少量暴露人员	$1 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
居住类高密度场所(30 人 ≤ 人数 < 100 人): 居民区、宾馆等	$3 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$
公众聚集类高密度场所(30 人 ≤ 人数 < 100 人): 办公场所、商场等		
高敏感场所: 学校等		
重要目标: 军事禁区、文物保护单 位等	$3 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-6}$

### 3.3 韧性决策示例

以某涉可燃气体厂房为例,设计年限 50 年,厂房内常驻工作人员 10 名,厂房停产后损失为 3 单位/天。首先根据可燃气体类型、厂房体积等参数计算不同设计防护强度下人员伤亡概率,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,随着防护强度的增加,建筑倒塌导致的人员死亡概率在不断降低。根据社会风险可接受标准,对于爆室内 10 人,可接受人员死亡概率为  $10^{-4}$ ,当防护强度大于 0.5 时,风险脱离不可接受水平。在此范围内,利用公式(17)分析不同防护强度条件下韧性指数,如图 6 所示。可以发现,随着防护强度的增加,韧性指数随之增加,且增加速度逐渐放缓。

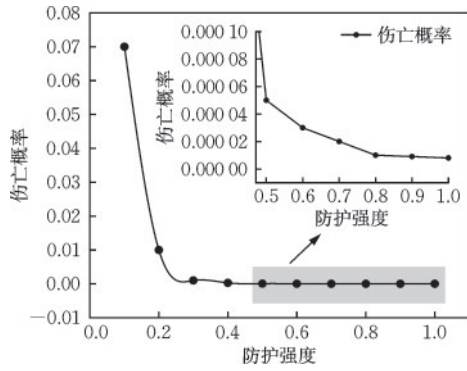


图5 防护强度与伤亡概率关系

Fig.5 Relationship between protection level and casualty probability

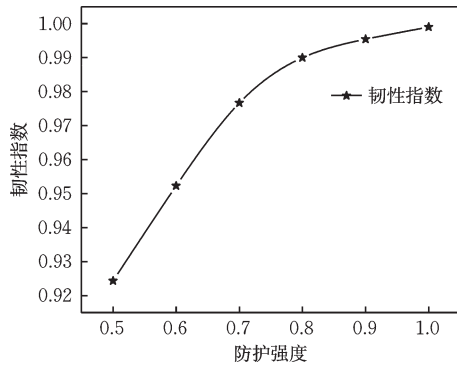


图6 防护强度与韧性指数关系

Fig.6 Relationship between protective strength and resilience index

考虑增加防护强度后带来的建设成本、维护成本的增加,计算得到不同防护强度下建筑物防护韧性费效比,如图7所示,由图可知,随着防护强度的增加,费效比逐渐降低,但降低幅度较小,不具有显著差别。

综合以上不同防护强度下人员伤亡概率、建筑韧性指数及防护费效比变化,考虑降低人员伤亡,节约经济成本,确定防护强度为0.8。

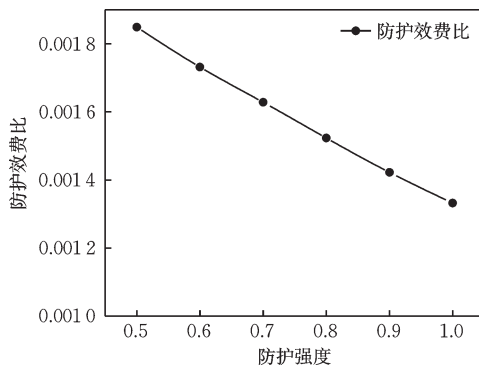


图7 防护强度与防护费效比关系

Fig.7 Relationship between protection level and cost-effectiveness ratio

## 4 结论

(1) 分析了造成人员伤亡和经济损失的因素,针对人员损失和建筑物结构损失两种后果重点开展研究;通过资料统计与收集,考虑人员抗力的不确定性以及评价标准的模糊性,采用模糊理论,构建各伤害等级对超压的隶属度函数,建立超压影响下人员伤亡概率评价模型;结合地震房屋倒塌率与人员伤亡率之间的研究成果,考虑内爆建筑物坍塌特点,建立建筑物严重破坏系数与人员伤亡率之间的关系。

(2) 建立涵盖爆炸发生概率、毁伤概率、后果估计等要素在内的建筑物内气体爆炸灾害评估模型,可为建筑物抗爆设计提供计算依据。通过权衡抗爆设计方案的经费投入和抗爆性能的产出效益,建立了包括抗爆经费增加额、爆炸事故可能损失量在内的计算模型,给出了各分量的计算方法。应用案例表明,该模型结合建筑物实际情况,能够客观表征当前设计条件下存在的爆炸风险,也能够很好的应用于抗爆设计方案评价及优选。

(3) 下一步的研究,可针对建筑物的功能、使用时间等特点分析建筑物各室内人员及设备的分布规律,研究爆炸荷载下可能造成人员伤亡的因素,全方位地评估内爆事故的负面效应。

## 参考文献:

- [1] 江辉,李新,白晓宇.桥梁抗震结构体系发展述评:从延性到韧性[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(6):1550-1565.  
Jiang H, Li X, Bai X Y. Review on the development of bridge seismic structural systems: from ductility to toughness[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6): 1550-1565. (in Chinese)
- [2] 霍林生,英培钰,薛兆余,等.地震-燃气爆炸灾害链效应对剪力墙结构的损伤研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(2):251-258.  
Huo L S, Ying P Y, Xue Z Y, et al. Explosion hazard chain effect research on damage of shear wall structures subjected to earthquake-gas[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 251-258. (in Chinese)
- [3] 徐哲,廖承帅,林峰.地震下建筑倒塌及城市次生灾害链分析方法研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(3):423-434.

- Xu Z, Liao C S, Lin F. An analytical method for earthquake-induced building collapse and urban secondary disaster chain[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(3):423-434. (in Chinese)
- [4] 倪永军, 宋园, 江辉. 基于韧性的摇摆桥墩桥梁抗震研究综述[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(3):1-9.  
Ni Y J, Song Y, Jiang H. Summary of seismic research on rocking pier bridges based on resilience[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(3):1-9. (in Chinese)
- [5] Shadabfar M, Mahsuli M, Zhang Y, et al. Resilience-based design of infrastructure: review of models, methodologies, and computational tools[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part A: Civil Engineering, 2022, 8(1): 03121004.
- [6] 陶思睿, 王敏. 中国式现代化视域下的韧性城市建设研究[J]. 城市发展研究, 2023, 30(9):5-8, 14.  
Tao S R, Wang M. Study on resilient city construction from the perspective of Chinese modernization[J]. Urban Development Studies, 2023, 30(9):5-8, 14. (in Chinese)
- [7] 赵旭东, 陈志龙, 龚华栋, 等. 关键基础设施体系灾害毁伤恢复力研究综述[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12):62-71.  
Zhao X D, Chen Z L, Gong H D, et al. Review on the study of disaster resilience of critical infrastructure systems[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(12):62-71. (in Chinese)
- [8] 李强, 陈志龙, 赵旭东. 地震灾害下城市生命线体系恢复力双维度综合评估[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2):65-72.  
Li Q, Chen Z L, Zhao X D. Seismic resilience assessment of urban lifeline systems: a double-dimensional approach[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(2):65-72. (in Chinese)
- [9] 吕西林, 陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1):27-36.  
Lyu X L, Chen C. Research progress in structural systems with replaceable members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1):27-36. (in Chinese)
- [10] 闫秋实, 吕辰旭, 陈叶青, 等. 关键基础设施抗爆韧性研究展望[J]. 防护工程, 2022, 44(2):1-11.  
Yan Q S, Lyu C X, Chen Y Q, et al. Research prospect of anti-blast resilience of critical infrastructure[J]. Protective Engineering, 2022, 44(2):1-11. (in Chinese)
- [11] 卢浩, 陈丹鹤, 邓树新, 等. 重大工程设施抗爆韧性设计的思考[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(6):864-873.  
Lu H, Chen D H, Deng S X, et al. Reflection on anti-explosion toughness design in major engineering facilities[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(6):864-873. (in Chinese)
- [12] 孙松, 邱艳宇, 卢浩, 等. 建筑物内气体爆炸灾害风险评估[J]. 防护工程, 2022, 44(3):35-43.  
Sun S, Qiu Y Y, Lu H, et al. Disaster risk assessment of gas explosion overpressure in buildings[J]. Protective Engineering, 2022, 44(3):35-43. (in Chinese)
- [13] B.A. 柯略列夫斯基, A.A. 柯斯金. 民防掩蔽部结构与计算[M]. 徐州:中国解放军工程兵工程学院, 1989.
- [14] 卢浩, 王明洋, 高康华, 等. 建筑物泄爆结构风险设计方法[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2018, 40(5):71-78.  
Lu H, Wang M Y, Gao K H, et al. Risk design method of building explosion-vented structure[J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2018, 40(5):71-78. (in Chinese)
- [15] 金友平, 帅健, 王旭, 等. 狭长受限空间内燃气燃爆灾害演化规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6):1366-1376.  
Jin Y P, Shuai J, Wang X, et al. Study on evolution law of gas explosion disaster in narrow and confined space[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6):1366-1376. (in Chinese)
- [16] 谭洪艳, 于革, 郭继平, 等. 燃气安全技术与管理[M]. 北京:冶金工业出版社, 2013.
- [17] 吴宗之, 高进东, 张兴凯, 等. 工业危险辨识与评价[M]. 北京:北京气象出版社, 2000.
- [18] 周月琴. 室内燃气泄漏爆炸力及影响因素的研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2013.  
Zhou Y Q. Investigation on the explosive force and the influence factors of indoor gas leakage[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2013. (in Chinese)
- [19] 傅征祥. 华北地震生命损失率与房屋倒塌率的统计关系讨论[J]. 东北地震研究, 1994, 10(1):68-70.  
Fu Z X. A discussion of the statistical relationship between the rate of loss of life and the rate of house collapse in the North China earthquake[J]. Northeast Earthquake Research, 1994, 10(1):68-70. (in Chinese)
- [20] 周雍年, 张晓志. 社会可接受的地震人员死亡率研究[J]. 自然灾害学报, 1999(4):35-40.  
Zhou Y N, Zhang X Z. Study on socially acceptable mortality rates for earthquake personnel[J]. Journal of Natural Disasters, 1999(4):35-40. (in Chinese)
- [21] 国家地震局工程力学研究所. 中国地震工程研究进展[M]. 北京:地震出版社, 1992.
- [22] 国家安全生产监督管理总局.《危险化学品生产、储存装置个人可接受风险标准和社会可接受风险标准(试行)》[EB/OL]. (2014-05-09).[https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/xgxywj/wxhxp\\_228/201405/t20140509\\_232624.shtml](https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/xgxywj/wxhxp_228/201405/t20140509_232624.shtml).

(本文编辑:池营营)