

# 石油化工抗爆建筑物结构设计应用

赵建敏 徐珂

(清华城市规划设计研究院建筑分院, 北京 100083)

**[摘要]** 由于石油化工行业工艺复杂化、装置大型化、规模扩大化等因素, 化工设备出现爆炸事故的风险越来越高, 设备爆炸时对化工建筑产生较高的冲击波荷载, 为确保结构安全以及人员安全, 结构应具有相应的抗爆能力。本文参考美国土木工程师协会编写的《石油化工抗爆建筑设计》介绍抗爆设计目标、爆炸荷载确定、动力材料响应准则和强度、结构可靠度指标、动力分析方法等内容, 以构件计算实例介绍抗爆设计步骤。

**[关键词]** 石油化工抗爆建筑 目标性能 动力材料强度 响应准则 单自由度体系 动力分析方法

**The Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities** /Zhao Jian Min, Xu Ke (Beijing Tsinghua Urban Planning & Design Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Petrochemical processes have become more complex and plants have increased in size thus increasing the risk of accidental explosions, so the requirements for design of blast resistant are higher and higher. To protect lives and buildings, structure should have adequate resistant capacity according to objective blast loads. This article introduce the ASCE's Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, include the design objective, blast load, dynamic material strength and response criteria, dynamic analysis method, etc. also the blast resistant design procedures are described with a example.

**Keywords:** Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities; objective performance; dynamic material strength; response criteria; SDOF; dynamic analysis method

作者简介: 赵建敏, 本科, 工程师, Email: sephawk@126.com

## 0 前言

石油化工设备在爆炸时会产生冲击压力波, 对周边建筑形成爆炸荷载, 即空气冲击波荷载, 随着工艺复杂化、装置大型化、规模扩大化等影响, 对结构工程师进行石油化工抗爆建筑物设计提出了较高的要求, 选择适合的分析方法进行爆炸荷载作用下结构的动态响应分析, 是结构设计的重点, 本文结合美国土木工程师协会编写的《石油化工抗爆建筑设计》<sup>[1]</sup>讨论、介绍抗爆设计理念和办法。

### 1 抗爆设计前提

爆炸荷载属于偶然荷载, 根据荷载规范<sup>[2]</sup>的解释, 爆炸荷载是由各部门以专业本身特点、按经验采用, 并在有关的标准中规定。而国内目前尚未出台相关规范、标准, 仅石油行业预计于 2008 年 12 月出台《石油化工控制室抗爆设计规范》。

爆炸荷载的特点<sup>[3]</sup>是一旦出现, 其值很大且持续时间很短, 一般仅几个毫秒, 在空气冲击波传播过程中强度衰减的很快。爆炸荷载代表值由空气冲击波时间-超压函数, 建筑物几何形状、大小、所处方位确定。按照国际工程界的惯例, 空气冲击波的峰值侧正向超压  $P_s$  和相应的正波阶段持续时间  $t_d$  由业主根据抗爆设计目标提供, 结构工程师计算爆炸荷载代表值, 并且选择适合的结构分析方法进行抗爆分析设计。

### 2 抗爆设计目标

抗爆设计目标与化工建筑服役目标相适应, 考虑设备爆炸后会造成员工伤亡和经济损失的可能性, 原则上有三个目标, 按优先次序分为:

2.1 建筑物在冲击波的影响下, 结构及构件能保证建筑物内的人员生命安全;

2.2 当单个或局部构件破坏后, 不应引起整个建筑物的连续倒塌, 即整体结构应具备抗连续倒塌的能力, 在设备爆炸后经过简单的加固、修复后, 即可重新投入使用;

2.3 结构的安全储备能力充足, 能够将爆炸造成的经济损失降至最低, 甚至于不出现经济损失。

### 3 结构材料和结构型式

化工建筑抗爆设计中需要达到的最重要性能指标是, 结构在爆炸荷载作用下不能发生突然坍塌, 在保持整体安全性的同时, 具有一定的吸收爆炸能量能力, 因此结构体系和材料必须具有足够的强度和延性, 所以素混凝土、未配筋砌体等脆性材料不适用于抗爆结构中。

在爆炸荷载作用下, 建筑物受到的冲击相当于一定烈度的地震作用, 结构构件必须具有足够的变形能力, 以形成逐步退出整体承载能力的屈服机制, 目前钢筋混凝土被认为是抗爆建筑最经济合理的材料, 尤其是建筑物处于可能产生高压和潜在爆炸源附近时。石油化工抗爆建筑常用型式及其适用范围见表 1。

表 1 常用抗爆建筑结构型式及适用范围

结构型式	适用范围 (P <sub>so</sub> )
钢结构	1psi~3psi
砌体结构	1psi~3psi
混凝土结构(预制混凝土挂板)	1psi~10psi
现浇混凝土结构	>7psi

注: 1psi=6.868kPa。

#### 4 爆炸波与荷载代表值的关系

化工建筑主要承受的爆炸形式有蒸汽云爆炸、压力容器爆炸、浓缩相爆炸、粉尘爆炸等，这些爆炸最重要的特征就是被压缩的能量突然向空气中释放，形成瞬时压力增加现象，即爆炸波超压，传递到化工建筑物上时就形成爆炸荷载。

由于爆炸波在空气中形成后，在传播过程中强度衰减的很快，建筑物随着距离爆炸点的远近不同，形成的爆炸波压力是不同的，一般情况下，爆炸在临近区域形成冲击波形式，在远离区域形成压力波形式：

4.1 冲击波：建筑物表面受到突然的、瞬时的压力上升，形成一个超压峰值自由场，通过高幅衰减振动逐渐恢复正常压力。冲击波正压阶段衰减结束之后会转变为一种负压力波。

4.2 压力波：建筑物表面受到的压力逐渐上升到超压峰值，然后逐渐衰减结束，之后形成负压力波，一般情况下，压力波超压峰值低于冲击波压力峰值。

两种爆炸波的表现形式见图 1。

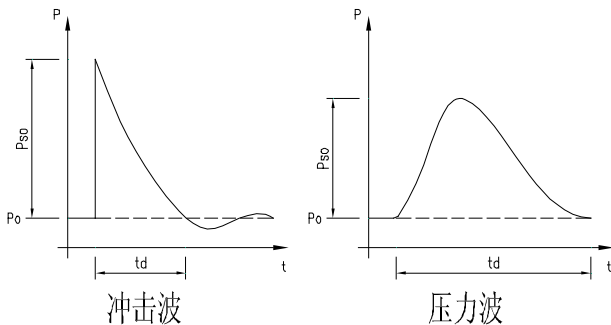


图 1 爆炸波的两类型

冲击波或压力波在负压阶段形成的冲击能量远远低于正压阶段，对建筑影响较小，通常在抗爆设计中可以不予考虑。

用于确定爆炸荷载代表值的参数主要包括：

- 正波峰值过压 P<sub>so</sub>——由业主提供；
- 正波阶段持续时间 t<sub>d</sub>——由业主提供；
- 相应的正波冲量 I<sub>0</sub>：

$$I_0 = \int_0^{t_d} P(t) \times dt$$

$$= 0.5 P_{so} t_d \text{ (三角形波)}$$

$$= 0.64 P_{so} t_d \text{ (半正弦波)}$$

$$= c P_{so} t_d \text{ (指数衰减波)}$$

P(t)：时间-超压函数

P<sub>so</sub>：侧正向超压峰值

c：0.2~0.5 之间，依赖于 P<sub>so</sub>。

峰值反射压力 P<sub>r</sub>：

$$P_r = C_r P_{so}$$

C<sub>r</sub>：反射系数

$$C_r = 2 + 0.0073 P_{so} \text{ (P}_{so} \text{ 单位 kPa)}$$

峰值动态压力 q<sub>0</sub>：

$$q_0 = 0.0032 P_{so}^2 \text{ (P}_{so} \text{ 单位 kPa)}$$

冲击波前进速度 U：

$$U = 345 (1 + 0.0083 P_{so})^{0.5} \text{ (P}_{so} \text{ 单位 kPa)}$$

爆炸波波长 L<sub>w</sub>：

$$L_w = U t_d$$

根据爆炸源与建筑物的相对位置，作用于建筑物上的爆炸荷载分为正面荷载、侧面荷载、屋面荷载和背面荷载，见图 2。

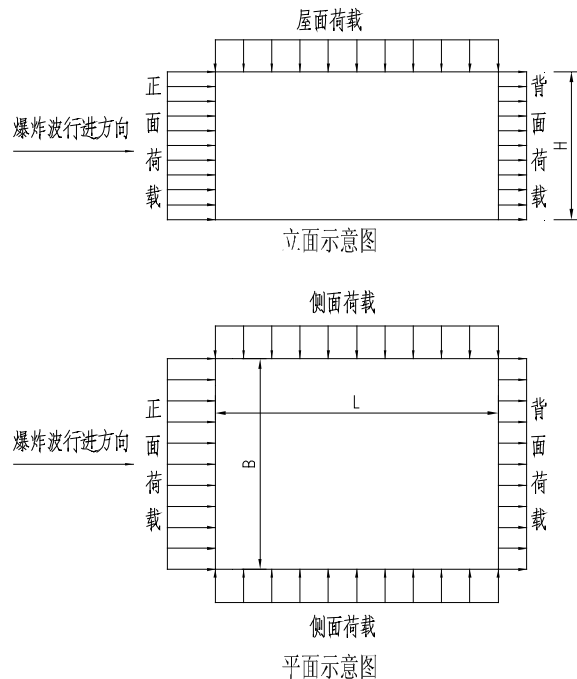


图 2 爆炸源与抗爆建筑的位置关系

#### 5 材料响应准则和强度

常规设计中，在常规荷载如风荷载等常规活荷载作用下，材料应力必须保持在弹性范围之内。材料始终处于弹性状态。

爆炸动力荷载下材料响应与静力荷载不同。在爆炸荷载作用下，结构首先会经历

速的加载过程，形成构件应力快速上升的状态，在这个过程中，材料的变形速率一般会落后于应力加载速率，这种响应方式使材料在最终破坏前达到一个高于最小屈服点的应力值，形成材料强度增加的现象。一般情况下，材料变形（应变率）越快，材料强度提高越多。材料强度增加使结构动力承载能力超出静态加载的能力，增加值约为 10%~30%，这个增加值用动力增强系数（DIF）来衡量。

结构材料在爆炸荷载作用下产生强化效应，可以显著地提高结构抗爆承载能力，并且允许结构产生较大的塑性变形吸收爆炸产生的能量，这与常规荷载状态下结构材料保持弹性状态是不同的。

另外，在一般规范和规程中，材料强度是按照最低性能定义的，在实际爆炸受力中，材料平均屈服强度会高于规范中制定的强度，如钢材的平均屈服强度比规范定义的屈服强度增加约 25%，在抗爆设计中使用材料的平均屈服强度，采用材料增强系数（SIF）来衡量。

则材料在爆炸荷载状态下的屈服强度：

$$F_{dy} = F_y \times (\text{DIF}) \times (\text{SIF})$$

式中：

$F_y$ ：材料在静力受荷状态下最小屈服强度值；

DIF：动力增加系数；

SIF：材料增强系数。

## 6 结构动态响应可靠度指标

在动态响应中，构件中关键控制截面的应力随着材料应变而变化。在弹性区域中，截面中应变随着中性轴位置而变化；弹性区域之外，杆件处于塑性响应状态，整个截面的纤维应力会超出弹性极限值，此时，应力随着杆件的总应变保持恒定。钢构件在应变强化区域会有所增加直至达到最终动力材料应力；然后，应变增加，纤维应力降低，直至构件破坏。

在动态设计中，结构可靠度使用最大变形来衡量，容许位移值经实验得出。容许位移值因结构型式、建筑材料、建筑物所在位置、抗爆水准等而不同。结构响应评价的基本指标是单个构件的延性系数和转角的评价，预期响应指标不能超出延性系数和转角的容许值，其中延性系数是构件最大位移与弹性极限位移的比值。

## 7 动力分析方法

抗爆动力分析方法需要在计算的精确性和简单性之间寻求一种平衡。计算性能指标包括结构构件最大相对挠度、塑性铰位置的相对转角、动力效应向支座的传递、挠度和回弹效应。

抗爆设计中基本分析模型是单自由度体系 SDOF 动力分析模型 (SDOF Model for Dynamic Analysis)，见图 3。

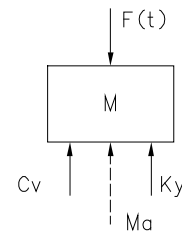


图 3 SDOF 动力分析模型

该模型的计算公式为：

$$Ma + Cv + Ky = F(t)$$

式中：

M：质量； a：加速度；

C：粘滞阻尼系数； v：速率；

K：刚度系数； y：位移；

$F(t)$ ：以时间为变量的作用力；

在建立 SDOF 平衡方程时，结构的变形和应变要与实际受力状态一致，所以在平衡方程中使用的刚度、质量、力、抗力为等效刚度、等效质量、等效力、等效抗力。

动力分析中，除了单自由度体系分析方法之外，还有多自由度体系分析模型、高级分析方法、有限元分析方法、实验分析方法等其他分析方法。

## 8 抗爆设计基本概念

进行化工建筑抗爆设计时，一些重要的设计理念是必须遵循和考虑的，包括爆炸能量的吸收、安全指标、荷载组合、抗力函数、适用性以及最重要的一点——冗余度。

### 8.1 爆炸能量的吸收

强度和延性是保证能量充分吸收的必要条件。

### 8.2 安全指标

静态设计中安全指标的定义通常是强度要求，而抗爆设计中重要着眼与应变能的吸收能力，而容许的变形是衡量能量吸收能力的重要指标，所以在抗爆设计中，容许变形是抗爆设计中的安全指标。

### 8.3 极限状态设计方法

在抗爆设计中，使用极限状态设计方法。该方法提供了预测结构承受能力和破坏机制的一种现实的、全面的、可靠的手段。

### 8.4 荷载组合

由于爆炸荷载的特殊性，一般不考虑地震作用和风荷载与爆炸荷载一起参与组合，爆炸荷载为：

$$S = 1.0x(\text{DL}) + 1.0x(\text{LL}) + 1.0x(\text{BL})$$

式中:

- DL: 永久荷载效应标准值;  
LL: 可变荷载效应标准值;  
BL: 爆炸荷载效应标准值。

### 8.5 抗力函数

力与挠度的关系函数是非线性的, 作为基本输入参数来进行单自由度体系 (SDOF) 分析。

### 8.6 适用性

抗爆设计中结构适用性要求通常包括构件挠度、层位移、损伤等级等。

### 8.7 冗余度

提供多条荷载传递途径, 保证在爆炸荷载下结构的抗连续倒塌能力。

## 9 构件抗爆设计实例

沙特延布石化综合项目中的中央实验室, 建筑物长 92m, 宽 42m, 考虑抗爆设计, 建筑物正面超压为 1.18psi, 即 8.1kN/m<sup>2</sup>, 正压持续时间为 0.05sec。钢筋混凝土框架结构, 外墙围护结构使用预制钢筋混凝土挂板, 计算高度为 5.3m, 如图 4 所示, 现对该预制钢筋混凝土挂板进行抗爆设计。

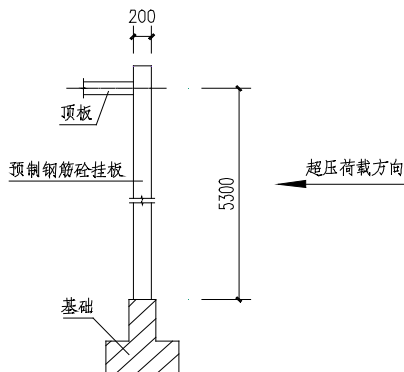


图 4 结构剖面简图

### 9.1 爆炸荷载

$$\begin{aligned}
 P_{so} &= 1.18 \text{ psi} = 1.18 \times 6.868 = 8.1 \text{ kPa}; \\
 t_d &= 0.05 \text{ sec}; \\
 U &= 1130 (1 + 0.058 \times 1.18)^{0.5} \\
 &= 1168 \text{ ft/sec} (356 \text{ m/sec}); \\
 L_w &= U \times t_d = 356 \times 0.05 = 17.8 \text{ m}; \\
 q_0 &= 0.022 (P_{so})^2 \\
 &= 0.022 \times 1.18 \\
 &= 0.03 \text{ psi} (0.2 \text{ kPa}); \\
 P_r &= (2 + 0.05 P_{so}) P_{so} \\
 &= (2 + 0.05 \times 1.18) \times 1.18 \\
 &= 2.43 \text{ psi} (16.7 \text{ kPa}); \\
 \text{取 } 1 \text{ m 板宽进行计算,} \\
 P_0 &= 5.3 \times 1 \times 16.7 = 88.51 \text{ kN}; \\
 S &= 21 \text{ m};
 \end{aligned}$$

$$t_e = 3(S/U) = 3 \times 5.3/356$$

$$= 0.045 \text{ sec} < t_d = 0.05 \text{ sec};$$

$$C_d = 1;$$

$$P_s = P_{so} + C_d q_0 = 1.18 + 1 \times 0.03$$

$$= 1.21 \text{ psi} = 8.3 \text{ kPa};$$

$$I_w = 0.5 (P_r - P_s) t_e + 0.5 P_s t_d = 0.058 \text{ psi} \cdot \text{sec};$$

$$t_e = 2I_w/P_r = 2 \times 0.058/2.43 = 0.048 \text{ sec}.$$

### 9.2 材料参数

钢筋: 60 级,  $f_y = 414 \text{ MPa}$ ;

混凝土:  $f_c' = 35 \text{ MPa}$ ;

$$E_s = 199948 \text{ MPa};$$

$$E_c = 27806 \text{ MPa};$$

$$n = E_s/E_c = 7.19.$$

### 9.3 试选挂板尺寸

试选择的挂板厚为 200mm, 受力配筋为双层 D12@200, 构造钢筋为 D10@200。

### 9.4 构件抗爆承载能力计算<sup>[4]</sup>

#### 9.4.1 按受弯构件计算

$$f_{dy} = 1.1 \times 1.17 \times 414 = 532.8 \text{ MPa};$$

$$f_{dc}' = 1.0 \times 1.19 \times 35 = 41.6 \text{ MPa};$$

$$b = 1000 \text{ mm};$$

$$d = 200 - 40 - 6 = 154 \text{ mm};$$

$$A_s = 113 \times 1000/200 = 565 \text{ mm}^2;$$

$$\rho = 565/(1000 \times 200) \times 100\%$$

$$= 0.28\% > \rho_{\min} = 0.12\%;$$

$$a = A_s f_{dy} / (0.85 f_{dc}' \cdot b)$$

$$= 565 \times 532.8 / (0.85 \times 41.6 \times 1000)$$

$$= 8.5 \text{ mm};$$

$$M_p = M_n = A_s f_{dy} (d - a/2) = 45 \text{ kN} \cdot \text{m};$$

$$R_b = 8 M_p / L = 8 \times 45 / 5.3 = 67.9 \text{ kN}.$$

#### 9.4.2 按受剪计算抗力

$$f_{dy} = 1.1 \times 1.17 \times 414 = 532.8 \text{ MPa};$$

$$f_{dc}' = 1.0 \times 1.1 \times 35 = 38.5 \text{ MPa};$$

$$V_n = 0.17 (f_{dc}')^{0.5} b d$$

$$= 0.17 \times (38.5)^{0.5} \times 0.5 \times 1000 \times 154$$

$$= 162.4 \text{ kN};$$

$$R_s = V_n L / (0.5L - d) = 344.8 \text{ kN}.$$

### 9.5 按弹塑性单自由度系统模型进行动力分析

$R_b < R_s$ , 取  $R_u = R_b = 67.9 \text{ kN}$ ;

查表得, 动力响应允许变形值为:  $\theta_d = 1^\circ$ 。

毛截面惯性矩计算:

$$I_g = bh^3/12 = 1000 \times 200^3/12 = 6.67 \times 10^8$$

开裂截面惯性矩计算:

$$nA_s = 7.19 \times 565 = 4062.4 \text{ mm}^2;$$



$$c = \{-nA_s + [nA_s(nA_s + 2bd)^{0.5}]\} = 31.5\text{mm};$$

$$I_r = bc^3/12 + nA_s(d-c)^2 = 0.71 \times 10^8 \text{mm}^4.$$

平均惯性矩为:

$$I_a = (I_g + I_c)/2 = 3.69 \times 10^8 \text{mm}^4.$$

刚度系数为:

$$K = 384EI / (5L^3) = 5392 \text{kN/m};$$

$$y_e = R_0 / K = 67.9 / 5392 = 12.6 \text{mm};$$

$$M = 25000 \times 5.3 \times 1 \times 0.2 / 9.8 = 2704 \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m};$$

$$\text{弹性状态下, } K_{LM} = 0.5 / 0.64 = 0.78;$$

$$\text{塑性状态下, } K_{LM} = 0.33 / 0.5 = 0.66;$$

$$\text{取二者平均值, } K_{LM} = 0.72;$$

$$\text{等效质量 } M_e = 0.72 \times 2704 = 1947 \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m};$$

$$\text{震动周期 } t_e = 2\pi(M_e/K) = 0.119 \text{s};$$

$$t_e/t_e = 0.048 / 0.119 = 0.4;$$

$$R_0/P_0 = 67.9 / 88.51 = 0.77;$$

据此查图表得, 动力最大挠度与屈服挠度比值为  $\mu_d = 1.5$ ,

于是得, 最大挠度为:

$$y_m = \mu_d \cdot y_e = 1.5 \times 12.6 = 18.9 \text{mm};$$

支座转角为:

$$\theta_d = \arctan(y_m / 0.5L) = 0.4^\circ < 1^\circ.$$

即, 在 1.18psi 爆炸荷载下, 200mm 厚预制钢筋混凝土挂板满足抗爆设计容许位移要求。

## 10 小结

化工设备发生爆炸事故虽然是小概率事件, 但相关建筑如不进行针对性抗爆设计, 就会存在严重的安全隐患。为了提高结构在这种意外爆炸荷载下的鲁棒性, 前期设计时就需考虑结构方案应具有足够的整体性和冗余度。其中水平构件须具有足够的跨越能力, 对于结构体系中拆除后可能引发大面积坍塌的构件, 应设计成关键构件<sup>[5]</sup>

化工建筑有距离爆炸源较近的特点, 其动力响应原则决定了抗爆设计属于动力弹塑性计算范畴, 相应的解决办法虽然很多, 但缺少统一、简单的计算模式, 这是结构设计的难点; 在计算上虽然可以参考国内核爆设计采用的等效静荷载方式, 但由于化工设备多样化, 单一荷载值可能会影响实际抗爆效果, 因此具体设计可遵循以下原则: 基于静态分析进行建筑结构构件设计方法和基于动态分析验证目标性能的方法相结合来应用。

基于目标性能进行结构安全设计是石油化工抗爆建筑设计的重要出发点, 不仅主体结构要满足目标性能的要求, 围护结构和其他附属结构也应满足目标性能的要求, 才能在整体上确保建筑物内人员生命和财产的安全。

## 参考文献

- [1] Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities[S]. ASCE, USA, 1997.
- [2] GB 50009-2001 建筑结构荷载设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [3] 李国强、黄宏伟、郑步全编著. 工程结构荷载与可靠度设计原理[M]. 中国建筑工业出版社, 1999.
- [4] 张川、白绍良、钱觉时译. 美国房屋建筑混凝土结构规范及条文说明[S]. 重庆大学出版社, 2007.
- [5] 梁益、陆新征、缪志伟、叶列平. 结构的连续倒塌: 规范介绍和比较[C]. 第六届全国工程结构安全防护学术会议论文集, 2007.

100083 北京市海淀区中关村东路 8 号东升大厦 A 座 901 室  
Tel: 13501308931/(010)-82526161-109