

石化人工岛上换流站建筑结构抗爆设计

程 亮¹, 艾 成², 王义鹏¹, 朱 东¹

(1. 中南电力设计院有限公司, 武汉 430061; 2. 武汉市园林建筑规划设计研究院有限公司, 武汉 430000)

摘要:结合国外某柔性直流输电工程的石化人工岛上换流站的主要建筑设计,依据美标 ASCE41088 和国标 GB 50779 的相关规定,对要求进行结构抗爆设计的建筑,从爆炸荷载、结构选型、分析方法及设计内容等方面进行探讨。以柔性直流换流站 GIS 配电室为例,采用单独的等效单自由度体系分析和多自由度体系的动力分析方法,进行了单层门式刚架的结构抗爆设计和验算。结果表明,合理设计的延性结构体系一般可以满足远距离长持时爆炸荷载的抗爆要求。研究成果可为国内外类似项目的设计提供参考。

关键词:柔性直流换流站;结构抗爆设计;爆炸荷载;延性比;弹塑性

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2021)04-0252-05

建筑结构的抗爆设计主要与爆炸荷载及结构动力特性有关,也可以从总平面布置、结构型式等多方面综合考虑^[1-2]。国际相应的组织及各国相关部门也对结构抗爆问题展开了广泛的研究,并制定了相应的标准和设计方法^[3-6]。中国在结构抗爆设计方面的研究起步较晚,仅在国防工程和石油化工设施等特殊的有抗爆需求的行业编制了抗爆标准^[7-8],对建筑结构的抗爆设计,在爆炸作用简化和混凝土构件爆炸相应分析有一定的研究^[9-11],但还没有建立完整的抗爆标准体系。本文根据美标和国标石油化工设施抗爆设计规范的规定,采用等冲量线性衰减爆炸荷载模式,以单独的等效单自由度体系分析和多自由度体系的弹塑性动力分析方法对柔性直流换流站的 GIS 室进行了抗爆分析,研究结果可为国内外类似项目的设计提供理论参考和技术支持。

1 爆炸荷载

石化人工岛上换流站建筑的结构设计除了考虑自重、风压及地震等常规荷载外,由于换流站周围存在石油化工装置,还需要考虑结构的抗爆设计。爆炸类型为有压力气体,或高温高压的可燃液体溢出到空气中形成气溶胶点火的蒸汽云爆炸。蒸汽云爆炸产生的冲击波作用时间短、荷载大,是一种瞬时荷载^[12]。爆炸冲击波的量级和形状取决于爆炸能量释放的特征以及到爆炸中心的距离。

典型的爆炸冲击波形状如图 1^[13]所示。

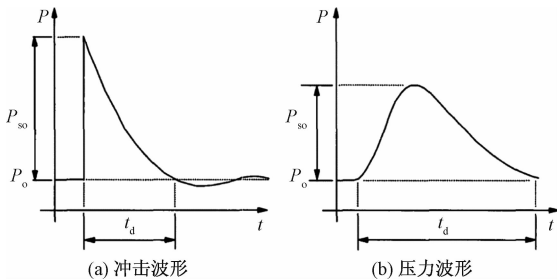


图 1 典型爆炸冲击波形和压力波形

为了简化抗爆设计流程,通常将图 1 所示的爆炸冲击波按照峰值超压相同和正相冲量相等的原则进行线性化简化^[9],简化的典型爆炸冲击波形和冲击压力波形如图 2 所示。爆炸峰值反射超压及持续时间取决于总平面布置、距爆炸中心距离及设施类型,通常,到爆炸中心距离越远,超压值和冲量越小,但爆炸荷载持续时间越长。

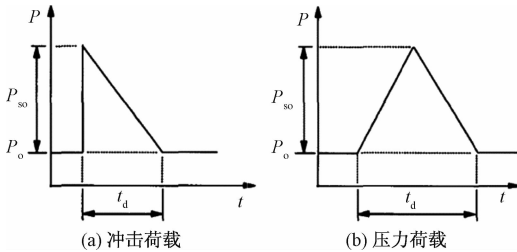


图 2 简化的爆炸冲击波形和冲击压力波形

收稿日期:2020-11-13

基金项目:中国能源建设集团规划设计有限公司科研项目(GSKJ2-T10-2019)。

作者简介:程亮(1989—),男,湖北黄冈人,中南电力设计院有限公司,工程师,硕士,研究方向为换流站、变电站等的结构设计;通信作者艾成(1989—),女,湖北武汉人,武汉市园林建筑规划设计研究院有限公司,工程师,研究方向为电力、园林结构设计。

抗爆建筑的爆炸荷载参数一般由石油化工设施的业主根据专业的咨询机构的定量风险分析报告提供。如果没有定量风险分析报告,则可参照ASCE 41088 第3 章的步骤取值^[3],并在设计文件中注明结构抗爆设计采用的荷载参数。

2 基本规定

2.1 结构选型

当爆炸发生时,临近爆炸源一侧墙体先受到爆炸冲击波作用,产生反射超压。随着冲击波的传播和衍射,建筑物的侧墙、屋面及后墙都将受到爆炸冲击波的超压作用,最终通过上部结构将爆炸荷载传递到基础。

与结构抗震设计的概念类似,抗爆设计的关键是结构吸收爆炸冲击波能量的能力,合理设计的结构和基础在爆炸冲击荷载作用下能发生一定的塑性变形从而耗散爆炸能量。因此,对于要求进行抗爆设计的建筑应选择延性好的结构体系和材料,使结构在爆炸冲击荷载作用下具有足够的塑性变形能力,并增加结构的冗余度,以避免结构发生连续性倒塌。同时,建筑外形应尽量简单、规则,以减少爆炸冲击波在结构上引起的应力集中^[3]。

对于距离潜在爆炸源较近的建筑,采用钢筋混凝土结构时的抗爆性能和经济性最好,当距离潜在爆炸源有一定距离时,采用合理设计的钢结构抗爆性能和经济性也较好。抗爆结构应避免采用素混凝土、砖、木材和非配筋砌体等脆性材料用作钢筋混凝土框架的填充墙,应该进行合理配筋,保证其在爆炸荷载作用下具有足够的延性。

2.2 材料强度取值

爆炸荷载是一种动力荷载,结构材料强度随应变速率增大而增大,用动态材料强度增大系数 DIF 来考虑爆炸荷载作用下材料强度的提高。在实践中,不同等级钢材的平均屈服强度一般高于规范给定的最小屈服强度约 25%,抗爆设计中采用强度提高系数 SIF 来考虑这种情况,该系数与材料的应变速率无关。对于 A50 及以下的钢材,ASCE 41088 建议 SIF 取值 1.1;对于混凝土,其实际材料强度提高不明显,且强度的影响因素较多,因此建议其 SIF 取值 1.0。

2.3 设计方法

结构在爆炸荷载作用下的响应分析方法,经历了从简单的手算和图解法到复杂的非线性动力时程分析法的发展过程。等效静态法适用于距离爆炸中心非常远、爆炸荷载作用类似风荷载的情况,由于确定合理的等效静力荷载非常困难,且无法考

虑动态荷载参数、材料强度提高、动态荷载放大系数、自振周期及允许的塑性变形发展,一般不推荐采用。单自由度分析法是结构爆炸设计最基本的方法,结构主要承重构件如梁、墙梁、柱、墙板、屋面板和剪力墙等都可以分别按单独的等效单自由度体系进行结构动力分析,一般能满足工程精度的要求。对于复杂或多层框架等具有多个集中质量的结构,则必须采用多自由度体系进行结构动力分析,一般采用非线性有限元程序进行求解。

2.4 荷载组合

爆炸荷载是一种偶然荷载,有爆炸荷载参与时,对于承载力极限状态和正常使用极限状态,爆炸荷载不与地震作用、风荷载进行组合,只与恒、活荷载进行组合,且组合值系数均取 1.0^[3,8]。

2.5 极限状态和结构性能准则

结构抗爆设计采用极限状态设计法。结构抗爆设计不采用以荷载抗力分项系数或容许应力定义的传统安全系数,而以容许变形的方法来定义结构的能量吸收能力,如构件挠度、侧移、延性比等。

3 设计步骤

3.1 结构选型和爆炸荷载确定

根据工艺、建筑专业提供的资料,并结合现场条件,选择合适的结构体系,确定结构的抗爆性能目标。根据定量风险分析报告或相关规范,确定爆炸荷载参数。

3.2 确定计算模型及构件试算

选择结构构件材料,对结构模型进行适当简化,分别进行各个构件的等效单自由度体系分析。根据计算分析的变形结果与规范要求的延性比、弹塑性转角和侧移的变形准则对比,确定各个构件截面尺寸。

3.3 荷载基本组合时的结构验算

在不考虑爆炸荷载作用时,对结构进行恒、活、风、地震等荷载效应组合下的承载能力极限状态和正常使用极限状态验算,根据验算结果对构件截面进行适当调整。

3.4 抗爆验算

根据需要对以上满足基本组合和有爆炸荷载组合作用下的结构选型和构件截面,采用多自由度体系进行结构整体非线性动力时程响应分析,根据分析结果,验算整体结构的侧移等整体变形指标是否满足规范要求。

4 实例分析

某柔性直流输电工程的石化人工岛上换流站

户内 GIS 室平面尺寸为 78 m×12 m,柱距 $B=6$ m, 单层,檐口高度 $H=15.0$ m,采用门式刚架结构,墙面和屋面均采用压型钢板维护。由于结构布置规则,取一榀中间门式刚架,结合结构力学原理和 ASCE 41088 的相关要求,对该 GIS 室进行结构抗爆设计。

4.1 爆炸荷载参数

根据建筑围护方案和业主提供的定量风险分析报告,爆炸荷载及恒载取值如表 1 所示。

表 1 刚架荷载取值

参数符号	参数含义	取值
P_{so}	峰值入射超压/kPa	4.6
I_0	爆炸荷载冲量/(N·s·m ⁻²)	368
t_d	爆炸荷载持时/ms	160
DL	墙面和屋面恒载/kPa	0.6

4.2 刚架梁计算

刚架梁、柱材料采用 ASTM A36,材料强度取值如表 2 所示。

表 2 刚架材料参数

参数符号	参数含义	取值
F_y	屈服强度/MPa	248
SIF	强度提高系数	1.1
DIF	动态强度增大系数	1.29
E_s	弹性模量/GPa	200
F_{ds}	动态材料强度/MPa	352

刚架梁为两端固结构件,初步试算时,假定荷载持时周期比 $\tau=t_d/t_n=1.0$,则爆炸荷载效应与梁抗力比为

$$\frac{F_o}{R_m} = \frac{\sqrt{2\mu_d-1}}{\pi\tau} + \frac{(2\mu_d-1)\tau}{2\mu_d(\tau+0.7)} = 0.993 \quad (1)$$

式中: F_o 为梁峰值荷载, $F_o=DL+P_{so}=5.2$ kPa;则梁的抗力 $R_m=F_o/0.993=5.24$ kPa,据此计算得

$$M_{pe}=BR_mL^2/8=5.24\times6\times12^2/8=565.6\text{ kN}\cdot\text{m} \quad (2)$$

$$W=M_{pe}/F_{ds}=565.6\times10^6/352=1.61\times10^6\text{ mm}^3 \quad (3)$$

式中: L 为梁跨度,取值 12 m; M_{pe} 为梁的弹塑性弯矩承载力,kN·m; W 为梁的抗弯模量,mm³;梁截面可选用 H500×250×8×12,其抗弯模量 $W_{be}=1.717\times10^6$ mm³,满足抗爆要求。

4.3 刚架柱计算

根据 ASCE 41088 表 5.2.B, GIS 室的爆炸损

坏水准可采用“中等”,则 GIS 室在爆炸荷载作用下的变形允许值如表 3 所示。

表 3 刚架变形限值

损坏水准	转角限值 $\theta_a/(^{\circ})$	延性比限值 μ_a	柱顶允许侧移 X_a/mm
中等	1.5	2.0	428.6

初步计算时,令刚架柱延性比 $\mu_d=\mu_a=2.0$,并假定荷载持时周期比 $\tau=t_d/t_n=1.0$,则爆炸荷载效应与柱抗力比为

$$\frac{F_o}{R_m} = \frac{\sqrt{2\mu_d-1}}{\pi\tau} + \frac{(2\mu_d-1)\tau}{2\mu_d(\tau+0.7)} = 0.993 \quad (4)$$

则刚架柱的抗力 $R_m=F_o/0.993=4.63$ kPa,据此计算得

$$M_{pe}=BR_mH^2/8=4.63\times6\times15^2/8=781.3\text{ kN}\cdot\text{m} \quad (5)$$

$$W=M_{pe}/F_{ds}=781.3\times10^6/352=2.22\times10^6\text{ mm}^3 \quad (6)$$

式中: M_{pe} 为柱的弹塑性弯矩承载力,kN·m; W 为柱的抗弯模量,mm³;柱截面可选用 H600×250×12×16,其截面抗弯模量 $W_{ce}=2.885\times10^6$ mm³,截面惯性矩 $I_{ce}=8.655\times10^{-4}$ m⁴,其塑性抗弯模量 $W_{cp}=3.304\times10^6$ mm³。

$$M_p=F_{ds}W_{cp}=352\times3.304\times10^6=1\,163\text{ kN}\cdot\text{m} \quad (7)$$

式中, M_p 为刚架柱的塑性抗弯承载力,kN·m。刚架柱下端与基础固结,上端与刚架梁刚结,爆炸荷载入射超压的一半集中作用于柱顶,则

$$I_f=4.6\times6\times15/2\times160/2=16\,560\text{ kN}\cdot\text{ms} \quad (8)$$

式中, I_f 为爆炸荷载分布在柱顶处的冲量,kN·ms。假设侧向爆炸荷载作用下刚架柱反弯点位于 2/3 的柱高处,则

$$R_u=2M_p/(2/3H)=2\times1\,163/10=232.6\text{ kN} \quad (9)$$

式中, R_u 为一榀刚架抗剪强度,kN。根据梁柱线刚度比,考虑柱侧移刚度折减系数,计算一榀刚架的侧移刚度为

$$k=i_b/i_c=(I_{be}/L)/(I_{ce}/H)=0.62 \quad (10)$$

$$\alpha_c=(0.5+k)/(2+k)=0.427 \quad (11)$$

$$K_e=2\alpha_c\times12EI_{ce}/H^3=525.61\text{ kN/m} \quad (12)$$

式中: k 为梁、柱线刚度比; i_b 、 i_c 分别为梁、柱线刚度,m³; I_{be} 、 I_{ce} 分别为梁、柱截面惯性矩,m⁴; α_c 为柱

侧移刚度折减系数; K_e 为一榀刚架的侧移刚度, kN/m 。

一榀刚架在爆炸荷载作用下的弹性侧移为

$$X_e = R_u / K_e = 232.6 / 525.61 = 442.5 \text{ mm} \quad (13)$$

式中, X_e 为刚架在爆炸荷载作用下的弹性侧移, mm 。柱顶的集中质量 $M = (2 \times 15/3 + 12) \times 6 \times 0.6/9.8 = 8\ 081.6 \text{ kg}$ 。

根据能量平衡原理, 正面爆炸荷载可视为冲量作用, 其产生的动能, 等于刚架柱弹塑性变形的应变能, 即

$$\frac{I_f^2}{2M} = \frac{R_u X_e}{2} + R_u (X_{pe} - X_e) \quad (14)$$

式中, X_{pe} 为刚架在爆炸荷载作用下的弹塑性侧移, mm , 由式(14)变形可得

$$X_{pe} = I_f^2 / (2MR_u) + 0.5X_e = 16\ 560^2 / (2 \times 8\ 081.6 \times 232.6) + 0.5 \times 442.5 = 294.2 \text{ mm} < X_a,$$

变形满足要求。

4.4 刚架整体动力分析

采用 Sap2000 建立一榀刚架的整体有限元模型, 定义符合 FEMA356 规范的塑性铰, 并赋予刚架柱的端部位置, 将刚架的恒载和活载定义为静力非线性荷载工况, 作为爆炸荷载作用下非线性动力时程分析的初始条件, 进行刚架在正面和屋面爆炸荷载作用下的非线性动力时程响应分析, 刚架柱顶侧移-时间的时程曲线如图 3 所示。

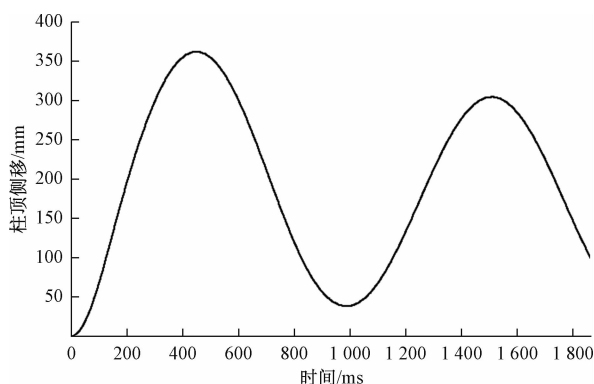


图 3 刚架柱顶侧移-时间曲线

由于刚架整体有限元分析考虑了刚架柱在恒载和活载下的轴力作用, 计算的柱顶最大弹塑性侧移比单自由度分析法的结果大 20% 作用, 柱顶最大侧移 $X_m = 361.2 \text{ mm} < X_a = 428.6 \text{ mm}$, 变形满足要求。

5 结论与建议

1) 爆炸冲击荷载作用的动力效应与总平面布置、结构到爆炸中心距离以及设施类型有关。对常

见的蒸汽云爆炸, 一般按照爆炸冲击波峰值超压相同和正相冲量相等的原则进行线性简化。通常, 结构到爆炸中心距离越远, 爆炸超压值和冲量越小, 但爆炸荷载持续时间越长。

2) 结构抗爆设计不同于一般的静力设计, 采用的是弹塑性设计方法, 其关键是结构吸收爆炸冲击波能量的能力, 即通过合理设计, 使结构构件发生一定的塑性变形从而耗散爆炸能量, 但变形应满足规范要求。

3) 要求进行抗爆设计的结构建筑外形应尽量简单、规则, 减少冲击波引起结构应力集中作用。同时, 应选择延性好的结构体系和材料, 使结构在爆炸冲击荷载作用下具有足够的塑性变形能力, 并增加结构的冗余度, 避免结构发生连续性倒塌。

4) 简单、规则结构的抗爆设计可以采用单独的等效单自由度体系进行各构件的结构动力分析, 一般能满足工程精度的要求。对于复杂或多层框架等具有多个集中质量的结构, 则应采用多自由度体系进行结构动力分析, 一般采用非线性有限元程序进行非线性动力时程响应分析。

参考文献

- [1] 张宇, 李国强. 建筑结构抗爆设计标准现状[J]. 爆破, 2014, 31(2): 153—160.
- [2] DUSENBERRY D, SCHMIDT J, HOBELMANN P, et al. Blast protection of buildings: ASCE/SEI 59-11 [S]. New York: American Society of Civil Engineers Structural Engineering Institute, Forth coming, 2011.
- [3] Task Committee on Blast-Resistant Design Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities (Second Edition): ASCE 41088 [S]. New York: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [4] BAKER W E, COX P A, WESTINE P S, et al. Explosion hazards and evaluation [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co., 1983.
- [5] UFC3-340-02, Structures to resist the effects of accidental explosions [S]. Washington DC: 1090 Vermont Avenue, NW, Suite 700, 2008.
- [6] Code requirement for nuclear safety related concrete structures: ACI 349-01 [S]. ACI Committee, 2001.
- [7] 中华人民共和国建设部. 人民防空地下室设计规范: GB 50038—2005 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 石油化工控制室抗爆设计规范: GB 50779—2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [9] 陈俊杰, 高康华, 孙放. 爆炸条件下结构超压—冲量曲线简化计算研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 224—232.
- [10] 汪维, 刘瑞朝, 吴飏, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁毁伤判据研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1421—1429.

[11] 闫秋实,杜修力. 典型地铁车站柱在爆炸荷载作用下损伤评估方法研究[J]. 振动与冲击,2017,36(1):1—7.

[12] 黄思远. 石油化工抗爆控制室结构设计[J]. 化工管理,2020(11):181—182.

[13] BLASKO J,SOH T B,ASTARLIOGLU S,et al. Pressure-impulse diagrams for the behavior assessment of structural components[J]. International Journal of Impact Engineering,2008,35(8):771—783.

Blast-Resistant Design of Structure for Converter Station Building on Petrochemical Artificial Island

CHENG Liang¹, AI Cheng², WANG Yi-peng¹, ZHU Dong¹

(1. Central Southern China Electric Power Design Institute,Wuhan 430061,China;
2. Wuhan Institute of Landscape Architectural Design Co. ,Ltd. ,Wuhan 430000,China)

Abstract: Structural blast-resistant design of buildings are discussed from the aspects of explosion load, structural and material type, analysis methods, and design procedure according to the relevant provisions of ASCE41088 and GB50799. Structure designs of the converter station on the petrochemical artificial island of a flexible direct-current transmission project in a foreign country are taken as the background. GIS power distribution equipment room typical in the flexible direct-current converter station are taken as an example to carry out the blast-resistant design and check of single-layer portal frame structure. The separate equivalent single degree of freedom system analysis and multiple degrees of freedom system for the dynamic analysis method are adopted. The results show that the ductile structure system that designed reasonably can generally meet the blast-resistant requirements under far-distance and long-duration blast loads. The research can give reference for the structural blast-resistant design of similar projects at home and abroad.

Key words:flexible direct-current converter station;blast-resistant design of structure;blast load;ductility ratio;elastic-plastic