

石油化工抗爆控制室结构设计原理

邵新龙

连云港沃利工程技术有限公司成都分公司 四川 成都 610000

摘要: 在石油化工领域,抗爆控制室扮演着守护生产安全的重要角色。其结构设计不仅要求抵御突发的爆炸冲击,还需确保在各种极端情况下的稳定性。本文简要概述了抗爆控制室的结构设计精髓,从设计原则到设计步骤的介绍,帮助首次接触抗爆结构设计的人员快速熟悉和理解设计原理与计算流程。

关键词: 石油化工;抗爆控制室;结构设计

引言

石油化工装置中烃类以及其它可燃物质极易发生爆炸,而控制室作为全厂或装置生产的指挥中心,当发生爆炸事故时,必须确保设备正常工作及操作人员生命安全,不会因为控制室结构坍塌而导致功能失常引发各类次生灾害。在国外,早在20多年前,就有针对性地对石油化工装置中控制中心进行防护,已经有较为成熟的做法,而国内由于HSE风险意识认识不足,起步较晚,2009年末才发布第一版抗爆设计规范(SH/T 3160-2009《石油化工控制室抗爆设计规范》),且很大程度上借鉴了美国土木工程协会(ASCE)编写《Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities》。近年来,才逐步加强对石油化工装置中控制室抗爆问题的关注和监管,先后颁布及更新多本有关石油化工抗爆控制室的规范。

2022年12月1日,《石油化工建(构)筑物抗爆设计标准》(GB/T50779-2022)取代了原国家标准《石油化工控制室抗爆设计规范》(GB50779-2012),与旧版比较,新规范设计范围由控制室抗爆设计变为建(构)筑物抗爆设计;取消了原规范中的爆炸荷载值,增加了大型抗爆建(构)筑物消防的设计要求;补充了抗爆建(构)筑物的变形要求;增加了抗爆建(构)筑物结构形式的选择原则;增加了砌体结构、钢结构抗爆设计的相关参数;增加了既有建(构)筑物抗爆改造设计的内容等。

本文就新版规范,对抗爆结构的设计原则,设计步骤及计算方法做一简要赘述,帮助首次接触抗爆结构设计的人员快速熟悉和理解设计原理与计算流程。

1 抗爆结构的设计原则

抗爆就是抵御附近爆炸产生的冲击波或者将爆炸对目标建(构)筑物的破坏限制在一定程度范围内。所以抗爆设计的重点就是对所保护的目标建(构)筑物按照附近爆炸源的冲击波能量、距离等参数,结合目标建

(构)筑物的保护程度要求而进行的一个综合设计计算。其设计原则为:

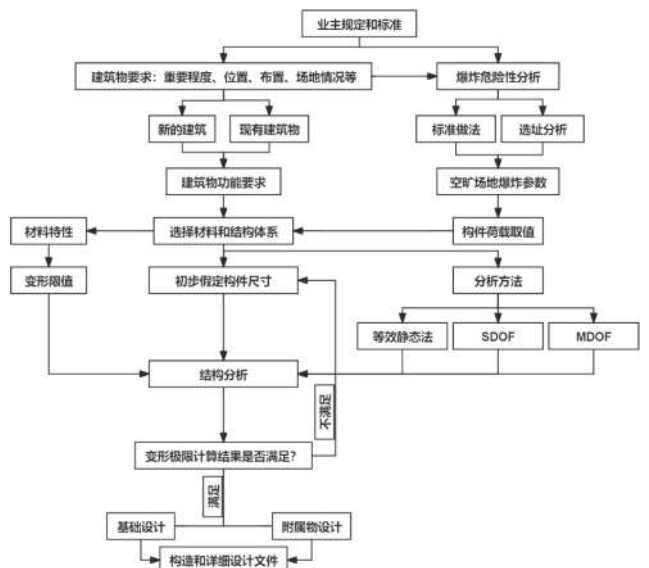
1.1 在爆炸动荷载作用下,允许结构构件进入弹塑性状态^[1]。

1.2 抗爆动力分析的目的是要确定建(构)筑物的变形,其变形的计算包含延性比、支座转角的计算。

由于装置爆炸所产生的冲击波超压其性质和破坏力具有不确定性的特征,因此在力学计算的基础上,抗爆设计过程中更应该重视概念设计,从建筑布局、结构选型等多方面综合考虑。

2 抗爆结构设计步骤

下图概要出常规抗爆结构从开始到结束的全流程,既包含业主范围,又包含结构设计人员职责,本文仅简要概括结构设计人员在抗爆结构设计中的流程与步骤。



2.1 收集设计基本资料

了解建(构)筑物在总平面的布置及方位,建筑资料、设计基本条件、爆炸危害性报告提供的爆炸荷载取值。

2.2 确定布置方案

与相关专业（仪表、建筑等）共同制定布置方案，尽量从方案上控制建（构）筑物平立面布置的结构合理性和经济性。低矮单层建筑方案宜为首选，建筑平面宜为规整矩形。

结构布置应保证有合理的传力路径，屋面板平面长宽比超过2~3时应考虑增设钢筋混凝土内墙（剪力墙）作为屋面在其平面内受力的中间支座；采用两层方案时中间层楼板要有足够刚度。

屋面构件的跨度尽可能规整一致以简化分析计算，如果屋面构件存在多种跨度或支座形式，应分别选择截面、配筋并计算传递给下一级构件的“时程力”，不能简单地选择较大或较小跨度的构件进行分析并作为类似构件的配筋依据，否则可能造成不安全或不合理的设计。

2.3 根据受力特点进行爆炸荷载分析

根据建（构）筑物的体型特征参数及评估报告提供的超压 P_{so} 及作用时间 $t_d^{[2]}$ ，按照规范给出的公式计算爆炸冲击波参数，即波速、峰值动压、波长，分别计算出作用在建（构）筑物前墙、侧墙及屋面、后墙的等效爆炸荷载。需要注意的是，各方向冲击波前进方向结构构件的长度取值不同，侧墙计算时，取单位墙宽；屋面计算时，可根据荷载作用方向及需分析的构件，分别取屋面板的跨度或单位板宽、屋面梁的跨度等；后墙计算时，取建（构）筑物高度 H 。

对于封闭建（构）筑物，爆炸荷载主要作用于外墙和屋顶，并通过各个结构构件传至基础。爆炸能量通过结构的弹性变形，更为重要的是结构的塑性变形而被吸收。没有被结构吸收的爆炸能量部分传至基础。

抗爆结构设计中只限于外围结构构件直接承受爆炸动荷载作用，对内墙、与外围结构脱开的柱及中间楼板等一般不考虑由于结构振动引起的动力作用，仅在构造上予以适当加强（规范条文5.7.4）。

在设计过程中，通常的做法是根据荷载的传递途径，逐个构件进行分析。

2.4 抗爆构件的试算

根据规范规定的构件最小要求及建（构）筑物的跨距、层高信息，假定抗爆构件的截面及配筋，计算其抗弯承载力、抗剪承载力，比较后得到构件的最大抗力。预选构件的截面和配筋时，建议在满足规范对于延性比和变形的要求前提下，尽量使构件进入塑性（即延性比 $\mu > 1$ ）使其能够充分耗能，降低传递给下一级构件的能量。构件进入塑性的程度宜有所区别，次要及容易修复的构件（如墙、楼板）延性比可取大一些，主要构件

（主梁、柱）延性比可取小一些，直至按弹性设计。

选择简化分析法（图表法、等效静荷载法和数值积分法）进行抗爆结构的分析计算，核算构件弹塑性转角范围是否满足规范要求，常用的抗爆结构计算方法见下文第3节介绍。

2.5 框架梁、柱设计

框架梁、柱可利用结构计算软件辅助设计。因现有常规抗爆结构大部分布置方式为墙体与结构主体脱开，所以默认水平爆炸荷载仅由围护墙体吸收，不直接传递于结构主体本身。但屋面板无法做到与结构主体脱开布置，所以在结构计算软件辅助设计时，我们通常建立两个模型，即正常模型与爆炸模型。正常模型时无爆炸荷载参与，对于承载力极限状态以及正常使用极限状态，结构构件的荷载效应组合应按国家现行有关荷载组合标准的规定进行计算。

2.6 基础设计

基础设计采用等效静力分析方法，结合项目地址情况，对于柱下基础，可利用结构计算软件辅助设计；对于抗爆墙下条基，需先假定墙基宽度，分别计算基础的承载力、抗倾覆和抗滑移验算。

3 抗爆结构计算方法介绍

3.1 抗爆分析的系统误差：

1) 首先是爆炸荷载的估算误差，化工、石油化工装置爆炸源多种多样、与控制室的距离也各不相同，所以规范给定的爆炸参数与实际情况会有较大误差。

2) 冲击波超压随时间变化采用直线段模拟具有一定误差。

3) 将整体结构拆分为单独的构件从而采用单自由度体系分析，忽略了节点处各构件的相互作用和变形协调，具有一定误差。

4) 采用简化的两直线段模拟结构材料动力特性具有一定误差。

以上第2, 3, 4条均可以通过采用更复杂、更精确的计算方法、计算工具而提高其精度，但上述努力对整体结构的抗爆分析精度提高作用有限，因为第1条爆炸荷载的误差对结构计算的影响很大。所以，综合考虑分析精度和工程中分析计算的可操作性，推荐采用简化分析法进行抗爆结构的分析计算。简化分析法包括图表法、等效静荷载法和数值积分法。

3.2 图表法

当爆炸峰值荷载 P 和作用时间 T_d 已知时，先假定构件截面及配筋，根据规范公式计算出极限抗力 R_u 和振动周期 T_N ，再根据 R_u/P 和 T_d/T_N 查表得到延性比 μ 。

图表法仅用于爆炸峰值荷载及随时间变化曲线已知情况（墙和屋面板）。

使用规范A.0.2三角形荷载下的极限抗力—延性比关系图解法时步骤：

假定构件截面及配筋→计算可达到的抗力 R_u →计算构件的屈服位移 $\Delta_y = \frac{R_u}{K} \rightarrow$ 由 $\frac{t_c}{T_N}$ 、 $\frac{R_u}{P}$ 在表中查出 μ_c →核算 $\mu_c \leq [\mu]$ →计算最大挠曲变形 $\Delta_{max} = \mu_c \cdot \Delta_y$ →计算支座转角 θ →核算 $\theta \leq [\theta]$

3.3 等效静力法

$$Q_d = \frac{P}{\sqrt{a} + \frac{\alpha \tau}{2\mu(\tau + 0.637)}}$$

其中： $\alpha = 2\mu - 1$ ， $\tau = T_d/T_N$

当爆炸峰值荷载 P 和作用时间 T_d 已知时，先假定构件截面及配筋，根据规范公式计算出振动周期 T_N ，再假定延性比 μ 值，按上述公式计算出作用于构件上的等效均布爆炸荷载 Q_d 。

等效静力法同样仅用于爆炸峰值荷载已知情况（墙和屋面板）。

3.4 数值积分法

爆炸荷载作用下忽略阻尼作用，则等效单质点体系的运动方程如下：

$$MY'' + KY = F(t) \text{ 弹性阶段}$$

$$MY'' + Ru = F(t) \text{ 塑性阶段}$$

对于抗爆墙及屋面板，其爆炸荷载为已知直线，弹性和塑性阶段分别可以得出上述方程的解析解。而对于主次梁和柱，因荷载 $F(t)$ 为不规则曲线，需要通过数值方法求解上述运动方程。

抗爆计算中的数值积分法就是确定一个很小的时间增量 Δt （通常为振动周期 T_N 的 $1/10 \sim 1/20$ ），用 Δt 时间段内各个物理参数的近似值代替理论值求解运动方程的方法。

求解过程中还要辅以弹性/塑性、受压/受拉（以指向建（构）筑物内部的方向为受压）等状态的判断。数值积分法难以通过手工计算完成，需要通过软件编程来实现，以提高计算精度和计算效率。

3.5 有限元分析法

又分为整体结构的有限元分析法以及单个构件等效单自由度体系的有限元模拟法。

因为在爆炸荷载作用下各构件之间节点的作用机理以及构件在弹塑性状态下的本构关系很难正确模拟，而且爆炸荷载本来就难以准确确定，所以整体结构的有限

元分析法一般不用于工程设计。

4 抗爆设计注意事项

4.1 分析构件延性比 μ 与位移的关系可知，延性比越大，构件耗能越多，同时塑性变形也越大。墙、板等构件发生塑性变形后不会导致结构失去竖向承载能力，且修复相对简单，所以 μ 值可以设计得大一些，传递给主体结构支座的力会小一些；而主梁的过大塑性变形可能导致结构倒塌，所以 μ 值可以设计得略小。对于柱，因为是拉压变形，延性较小，所以可以按照弹性阶段设计。

结构设计和施工过程中均中应避免随意提高墙、板钢筋的强度等级或加大纵向配筋面积，这样可能造成构件的弯曲抗力提高，不仅对构件强剪弱弯具有不利影响，同时可能造成构件不能按设计预期进入塑性，所以也是对结构不利的，应该予以避免。

4.2 不管是地震动分析还是抗爆分析，现阶段都存在理论滞后于实际的情况^[3]，计算模型简化、计算参数的简化、爆炸理论的基础等等都有很多需要完善的地方，所以想要计算精确甚至贴近实际是比较困难的，因此构造措施的地位应当得到更多的重视，正如规范里要求乙类建筑即便抗震计算不做提高，抗震构造措施都要加强一级一样，在算不清道不明的时候构造措施才是更能保障结构安全的底线，也就是抗爆的概念设计重于计算。

4.3 控制室通常存在大量电缆穿入，须在外墙处开设进线洞口，进线洞口不宜对墙体有较大的削弱，须加强洞口构造措施，同时室外入线口处需设置防护沟并填砂，或者可将入线口设置在室外地面以下，避免冲击波直接侵入。

结语

石油化工抗爆控制室的结构设计不同于一般框架剪力墙的设计，采用的是单自由度体系的弹塑性动力分析方法，这种方法强调的是对构件变形的控制，而非常规的应力控制，因此在设计时要摒弃截面越大越好，配筋越多越牢的传统思想，在爆炸发生时，允许外部结构构件在规范规定的范围内发生变形开裂以吸收能耗，从而保证主体的结构安全。

参考文献

- [1]黄思远.石油化工抗爆控制室结构设计[J].化工管理,2020,34(22):181-183.
- [2]从恺源.石油化工企业抗爆控制室结构设计分析[J].石油工程,2020,46(12):10-11.
- [3]刘青.石油化工控制室抗爆设计中结构专业的几点注意事项[J].天津化工,2020,34(4):83-85.