

化工厂房钢筋混凝土框架结构设计策略

梁 超

河北正元化工工程设计有限公司 河北 石家庄 050031

摘 要：化工厂房作为现代工业体系中的关键基础设施，其结构安全直接关系到生产连续性、人员生命安全及环境生态稳定。本文系统探讨了化工厂房钢筋混凝土框架结构的设计策略，从荷载特性识别、材料性能优化、结构体系选型、抗震抗爆设计、耐久性保障、构造细节处理以及全生命周期管理等维度展开论述。通过结合现行规范与前沿研究成果，提出一套兼顾安全性、经济性与可持续性的综合设计方法，旨在为化工厂房结构工程师提供理论参考与实践指导。

关键词：化工厂房；钢筋混凝土框架；结构设计；耐久性；抗爆设计；腐蚀防护

引言

随着我国化学工业的快速发展，大型化、集约化、智能化成为化工生产的新趋势。化工厂房作为承载核心工艺设备与操作流程的物理空间，其结构形式多采用钢筋混凝土框架结构。该结构体系具有整体性好、刚度大、耐火性能优、可预制装配等优点，适用于多层、大跨度及重载工况。然而，化工环境的特殊性——包括但不限于强腐蚀性气体/液体、高温高压设备振动、潜在爆炸冲击波、长期湿热作用等——对传统钢筋混凝土结构的耐久性、安全性与服役寿命构成严峻挑战。因此，本文旨在系统梳理化工厂房钢筋混凝土框架结构的设计要点，提出一套科学、系统、可操作的设计策略，以提升结构在极端与恶劣工况下的可靠性与韧性。

1 化工厂房的特殊性及其对结构设计的影响

1.1 荷载复杂性

化工厂房荷载类型远超普通工业建筑，主要包括：

(1) 恒载与活载：除常规楼面、屋面荷载外，还需考虑大型反应釜、塔器、储罐等重型设备的集中荷载及吊车荷载。(2) 动力荷载：压缩机、泵、风机等旋转设备产生的周期性振动荷载，可能引起结构共振或疲劳损伤。(3) 温度荷载：高温管道、反应器散热导致局部温度梯度，引发混凝土热应力与徐变。(4) 爆炸荷载：可燃气体或粉尘爆炸产生的瞬时超压冲击波，具有高幅值、短持续时间、非线性传播等特点。(5) 腐蚀性环境荷载：酸、碱、盐雾、氯离子等介质对混凝土与钢筋的化学侵蚀。

1.2 环境严酷性

化工厂区常处于高湿、高盐、强酸碱或含硫环境中，加速混凝土碳化、钢筋锈蚀及骨料—水泥浆界面劣

化。此外，部分区域存在冻融循环、干湿交替等物理侵蚀机制。

1.3 安全等级高

化工厂房一旦发生结构失效，极易引发连锁反应（如泄漏、火灾、二次爆炸），造成重大人员伤亡与环境污染。因此，其结构安全等级通常被划分为一级或特级，要求更高的可靠度指标与冗余度设计。

2 钢筋混凝土框架结构体系选型与布置原则

2.1 结构体系选型

对于多层化工厂房，钢筋混凝土框架结构因其良好的空间适应性与承载能力成为首选。在高层或大跨区域，可考虑采用框架—剪力墙、框架—支撑或预应力混凝土结构以增强侧向刚度与抗侧能力。

2.2 平面与竖向布置

结构的平面与竖向布置应遵循规则性原则，以避免因质量、刚度突变而产生应力集中或扭转效应。平面形状宜尽量规整、对称，避免出现过大的凹凸或楼板开洞，确保水平力传递路径清晰直接。竖向布置上，应力求刚度和质量沿高度方向均匀分布，严禁出现软弱层或薄弱层，防止地震作用下发生层间剪切破坏。柱网尺寸的确定需与工艺专业紧密协同，在满足设备安装、操作及检修空间的前提下，尽可能采用标准化模数，以提高施工效率并降低造价^[1]。对于长度超过规范限值的超长结构，必须采取有效措施控制温度收缩裂缝，如合理设置伸缩缝、采用后浇带分段施工，或在混凝土中施加预应力以抵消收缩拉应力。

3 荷载分析与组合策略

3.1 特殊荷载取值

在化工厂房设计中，爆炸荷载的准确评估至关

重要。依据《石油化工控制室抗爆设计规范》(GB 50779)等相关标准,可采用等效静力法将瞬态爆炸超压简化为静态均布荷载进行结构验算,但对于复杂几何形状或高精度要求的场合,则需借助非线性动力学软件进行数值模拟,以获取更真实的结构响应。设备振动荷载则需由工艺专业提供详细的激振参数(如频率、幅值、方向),结构工程师据此进行动力特性分析,确保厂房自振频率与设备激振频率保持足够间隔(通常建议差值大于20%),以规避共振风险。虽然腐蚀性环境不直接参与荷载组合计算,但其对材料性能的长期劣化效应必须在耐久性设计中充分体现。

3.2 荷载组合

除常规的基本组合(1.3倍恒载+1.5倍活载)外,化工厂房必须考虑多种特殊工况下的荷载组合。抗震设计组合需包含地震作用,按1.3倍恒载+0.5倍活载+1.3倍地震作用进行验算;抗爆设计则属于偶然作用范畴,其组合形式通常为1.3倍恒载+0.5倍活载+1.0倍爆炸作用,且允许结构在爆炸后进入塑性状态,但必须保证整体不倒塌。此外,对于温差较大的区域,还需考虑温度作用与其他荷载的组合,如1.0倍恒载+0.7倍活载+0.6倍温度作用。所有组合系数的选取必须严格遵循《建筑结构荷载规范》(GB 50009)及行业专项规范的规定,确保结构在各种极限状态下均具备足够的安全储备。

4 材料选择与性能优化

4.1 混凝土

混凝土作为钢筋混凝土结构的基体材料,其性能直接决定结构的承载能力与耐久性。在化工厂房中,建议混凝土强度等级不低于C30,对于承受重载或位于高风险区域(如设备基础、抗爆墙)的构件,宜采用C40及以上强度等级。更重要的是,必须严格控制混凝土的耐久性指标:水胶比应控制在0.45以下以降低渗透性;氯离子含量不得超过水泥质量的0.10%;抗渗等级应达到P8或更高。为提升密实度与抗化学侵蚀能力,可在混凝土中掺加优质矿物掺合料,如粉煤灰或粒化高炉矿渣粉,它们不仅能改善工作性,还能通过火山灰反应细化孔隙结构^[2]。在极端腐蚀环境中,可考虑使用聚合物改性混凝土(PMC)或环氧树脂混凝土等特种材料,尽管成本较高,但其卓越的耐腐蚀性能可显著延长结构寿命。

4.2 钢筋

钢筋的选择与防护是保障结构长期安全的关键。优先选用具有优良延性和应变硬化特性的HRB400E或HRB500E抗震钢筋。在腐蚀环境中,单纯依靠混凝土保护层已难以满足长期防护需求,因此需采取多重防护

策略。首先,应适当增加混凝土保护层厚度,在一般腐蚀环境下不应小于40mm,在强腐蚀区域则建议不小于50mm。其次,可采用环氧涂层钢筋(ECR)或不锈钢钢筋,前者成本适中且施工便利,后者则适用于极端苛刻或关键部位,虽初期投资高,但全生命周期成本可能更低。对于地下结构或浸水区域,还可结合阴极保护技术,通过外加电流或牺牲阳极的方式,主动抑制钢筋电化学腐蚀过程。

5 抗震与抗爆设计策略

5.1 抗震设计

化工厂房的抗震设防烈度应依据《中国地震动参数区划图》(GB 18306)确定,并通常较同地区一般建筑提高一度设防,以体现其高安全等级。设计中应贯彻“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱构件”的延性设计理念,通过合理配筋确保塑性铰首先在梁端形成,而非在柱或节点核心区,从而避免脆性破坏。箍筋加密区的长度与间距需严格满足规范要求,以约束核心混凝土并提高构件的变形能力。在高烈度地震区或对连续性要求极高的关键设施(如中央控制室),可考虑采用基础隔震或安装粘滞阻尼器等消能减震技术,有效隔离或耗散地震能量,大幅降低上部结构的地震响应。

5.2 抗爆设计

抗爆设计的核心思想是“可生存性”,即允许结构在爆炸冲击下发生一定程度的局部损伤或塑性变形,但必须维持整体稳定性,防止灾难性倒塌。为此,构件截面宜采用矩形或箱形等抗冲击性能较好的形式,避免使用T形等易在冲击下发生翼缘剥离的截面。配筋设计上,应适当提高配筋率,特别是受拉钢筋的锚固长度需增加20%以上,以确保在大变形下仍能有效传递拉力。节点作为框架的“生命线”,其核心区必须配置足够数量的封闭式箍筋,形成有效的抗剪骨架,防止剪切脆性破坏。此外,非结构构件如填充墙、吊顶、管道支架等,应与主体结构采用柔性连接方式,避免在爆炸中脱落成为“飞射物”,造成二次伤害。

6 耐久性设计与腐蚀防护

6.1 混凝土保护层与裂缝控制

混凝土保护层是钢筋的第一道防线,其厚度必须根据环境作用等级严格确定,参照《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476)执行。同时,必须严格控制构件的裂缝宽度,因为在裂缝处,腐蚀性介质可直接侵入至钢筋表面。一般环境下,最大裂缝宽度限值为0.3mm;在腐蚀性环境中,该限值应收紧至0.2mm。为有效抑制早期塑性收缩裂缝和后期荷载裂缝,可在混凝土中掺入钢

纤维或聚丙烯纤维,这些微细纤维能桥接微裂缝,显著提升混凝土的抗裂性能和韧性。

6.2 表面防护体系

在材料本体防护之外,施加高性能表面防护涂层是提升耐久性的有效补充手段。环氧树脂涂层、聚氨酯涂层或氟碳涂料能形成致密的物理屏障,有效阻隔水分、氧气和腐蚀离子的侵入。对于已建结构或新建结构的关键部位,还可采用硅烷浸渍等渗透型防护剂,其小分子能深入混凝土毛细孔道,与内部成分反应形成憎水层,大幅降低氯离子扩散系数^[3]。在极端情况下,如海洋环境中的地下结构,可实施阴极保护系统,通过电化学手段从根本上阻止钢筋锈蚀的发生。

6.3 排水与通风设计

良好的建筑细部设计对延缓腐蚀进程同样重要。屋面和楼面应设置合理的排水坡度,并配备足够数量的地漏,确保雨水或工艺洒水能迅速排走,避免长期积水浸泡结构。厂房内部应加强机械通风或自然通风设计,有效稀释和排出腐蚀性气体,降低环境湿度,从而减缓混凝土碳化和钢筋锈蚀的速度。

7 构造细节与节点设计

7.1 梁柱节点

梁柱节点是框架结构传力的关键部位,其受力复杂,常处于压、弯、剪、扭复合应力状态。为确保其在地震或爆炸作用下的可靠性,节点核心区的配箍特征值 λ_v 不得低于规范规定的最小值(如抗震等级二级时 $\lambda_v \geq 0.12$)。纵向钢筋在节点内的锚固必须可靠,通常采用90°弯钩或机械锚固件,并确保满足最小锚固长度要求。为避免削弱节点核心区的抗剪能力,应严禁纵向受力钢筋在节点区域内进行搭接。

7.2 设备支座与预埋件

工艺设备通过支座或地脚螺栓与厂房结构连接,这些连接点往往是应力集中区域。预埋钢板或套筒必须与主体结构的主筋进行可靠焊接,形成整体受力体系。在设备支座下方的楼板或梁内,应局部加厚并增设抗剪钢筋(如吊筋或附加箍筋),以抵抗设备传来的集中反力^[4]。同时,考虑到高温设备运行时的热膨胀效应,部分支座应设计为滑动支座或采用柔性连接构造,允许一定的位移,避免对主体结构产生附加约束应力。

7.3 施工缝与后浇带

施工缝不可避免,但其位置应精心选择,避开弯矩或剪力最大的区域。对于超长结构设置的后浇带,应采用补偿收缩或微膨胀混凝土进行浇筑,以抵消两侧混凝土的收缩变形。后浇带混凝土的养护期不得少于14天,

以确保其充分膨胀并建立有效粘结。在新旧混凝土接缝处,应凿毛处理并涂刷专用界面剂,以增强两者之间的粘结强度,防止形成薄弱面。

8 全生命周期视角下的设计优化

8.1 可检可修性设计

结构设计应具备前瞻性,考虑未来检测与维修的便利性。例如,在关键承重构件附近预留检测通道或检修孔,便于定期进行裂缝、腐蚀状况的目视或仪器检查。对于高风险区域,可在梁、柱内部预埋光纤光栅传感器或腐蚀探头,构建结构健康监测系统,实现对结构状态的实时感知与预警。此外,采用模块化设计理念,将部分非关键围护或辅助结构设计为可拆卸单元,可在局部损坏时快速更换,而不影响主体结构安全。

8.2 绿色与可持续性

在满足安全与功能的前提下,应积极践行绿色建筑理念。可充分利用粉煤灰、钢渣等工业固体废弃物作为混凝土掺合料,既减少水泥用量、降低碳排放,又提升混凝土性能。通过精细化计算与优化设计,合理确定构件截面尺寸,在保证安全的前提下减少材料消耗。同时,在设计初期就应考虑结构拆除阶段的资源回收问题,如选用易于分离的钢筋类型,为未来的循环经济奠定基础。

9 结语

化工厂房钢筋混凝土框架结构的设计是一项多学科交叉、多目标耦合的系统工程。面对复杂的荷载环境与严苛的安全要求,设计者必须超越常规建筑思维,从全生命周期出发,综合运用材料科学、结构力学、腐蚀工程与风险评估等知识。本文提出的“荷载精准识别—材料性能强化—结构体系优化—构造细节保障—运维监测闭环”的设计策略,可有效提升化工厂房结构的安全性、耐久性与经济性。未来,随着智能材料、数字孪生、AI辅助设计等技术的发展,化工厂房结构设计将迈向更高水平的智能化与韧性化。

参考文献

- [1]杜伟强.石油化工厂房的建筑设计特点[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(07):71-73.
- [2]谢健.化工厂房建筑设计特点[J].建材与装饰,2020,(11):66-67.
- [3]刘宏伟.某化工厂房既有结构安全性鉴定[J].安徽建筑,2023,30(05):168-170.
- [4]刘丽.石油化工厂房的建筑设计特点[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(13):122-123.