

轻型单层钢结构厂房结构优化设计探讨

田文芳

(中铁建投(天津)开发建设有限公司, 天津 300000)

摘要 轻型单层钢结构厂房具有质量轻、空间大、抗震性能好、施工期短等优点。对于房屋高度不大于18m, 高宽比小于1的轻型屋盖单层钢结构房屋可以依据《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》进行设计。然而, 对于超出门规要求的单层厂房房屋, 如果不经深入研究与精细设计, 将很难达到节约造价、方便施工的要求。针对于此, 本文主要结合工程实例对高度超过18m, 高宽比大于1的轻型钢结构厂房, 在满足工艺功能、结构受力的前提下, 通过进行低延高承的抗震性能化设计、柱截面的方案比选、节点的对比分析等, 提出切实可行的结构优化设计方案, 以达到节约造价、方便施工的目的。

关键词 轻型钢结构厂房; 抗震性能化设计; 低延高承; 结构优化设计方案

中图分类号: TU318

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)06-0118-03

我国经济快速发展, 钢产量随之增大, 厂房设计也逐步由混凝土结构转向具有明显优势的钢结构设计。而工业厂房建筑的成本造价高低和施工周期是企业收益大小的关键。

因此, 钢结构厂房的设计需在其承载力满足规范要求的前提下尽量做到降低造价, 方便施工(可有效缩短工期), 从而实现良好的经济效益。

1 轻型单层钢结构厂房特点及设计一般规定

1.1 特点分析

轻型单层钢结构厂房是以框(排)架和门式刚架组成横向抗侧力体系、以柱间支撑加系杆组成纵向抗侧力体系的空间稳定结构。墙体及屋面则采用檩条加压型钢板复合保温板的轻型维护结构。其特点为自重轻、跨度大, 构配件生产标准化、工厂化, 施工机械化, 节能环保、可回收。

轻型厂房优势: 因其自重轻, 故抗震性能优越, 一般情况下地震力不起控制作用。比重钢厂房更加适应大跨度, 大空间。其构件壁厚相对较薄, 相对较经济。构件标准化生产、机械化施工可有效缩短建筑工期。

轻型厂房劣势: 因其自重轻, 故一般对风、雪荷载比较敏感, 所以在设计时应充分考虑风、雪荷载的不利作用以保证结构的可靠。由于其壁厚相对较薄, 且多为开口型截面, 所以其防腐和防火涂层要求相对较高。

1.2 设计一般规定

1. 一般单层厂房实际受力为空间体系, 为了方便计算, 可将厂房受力体系分解为平面体系, 即厂房横

向框架和纵向支撑结构两个相互独立的体系进行计算分析^[1]。

2. 厂房柱网的布置应从生产工艺、结构功能以及上部结构与地基基础的技术经济总体分析上进行综合考虑确定。厂房的纵向支撑体系应在每个温度区段内设置完整。

3. 横向框架及纵向支撑的设计应满足强度、整体稳定性、局部稳定性及刚度的要求。当有抗震要求时, 应进行结构截面抗震验算, 并应满足结构抗震措施与构造要求。

4. 柱子及柱间支撑的设计, 应尽可能使结构构件标准化, 以达到建筑工业化和降低造价的目的。

5. 设计应考虑制作、现场吊装的方便, 构造设计应符合计算假定, 受力明确简单, 方便安装。

2 工程概况

河北某地区拟建一单层工业厂房, 为磷酸铁锂车间, 车间包含炉区、湿法区、原料库、成品库、空压机房及配电室等。

2.1 结构设计主要技术指标

该项目设计基准期为50年, 建筑结构安全等级二级, 结构重要性系数1.0, 抗震设缝烈度为8度(0.2g), 设计地震分组为第三组, 场地类别为二类。地基基础设计等级为丙级。

2.2 项目自然条件

项目所处地区基本风压为0.4KPa, 地面粗糙度类别为B类, 基本雪压为0.4KPa, 场地土标准冻深为0.8

米。场地土类型属于中硬土,属于建筑抗震一般地段。

2.3 项目结构型式分析

由于该项目由很多区组成,各分区功能要求各异,空间需求各不相同,为满足工艺要求,根据功能的不同采用不同的结构形式,炉区及成品库由于其层高需求不高但面积需求较大,采用多跨双坡轻型门式刚架结构形式。空压机房及配电室需要垂直分层,故采用多层钢框架结构形式。而湿法区由于工艺设备较高、净空要求大而采用单层钢结构厂房结构形式。结合地勘单位勘察结果来看,场地地基土承载力较高,基础可采用柱下独立基础。

3 单层钢结构厂房结构优化设计分析

3.1 结构方案

结合湿法区实际情况来看,拟建建筑物净高要求 26m,最大柱跨 29m、柱距为 8m。为单层钢结构厂房,因其高度较高,结构对风荷载较为敏感,为满足风荷载作用下结构变形的要求,结构柱截面需求较大,从节约造价考虑,厂房下阶柱采用双肢隔构柱,上阶柱采用实腹 H 型钢柱,变阶处用肩梁过渡,钢梁采用等截面 H 型钢梁,柱间支撑采用圆钢管双片十字剪刀撑,通过系杆+支撑的构造来降低刚架面外计算长度,保证厂房的面外稳定性。厂房柱脚采用受力合理,方便施工的插入式刚接柱脚。支撑维护结构的檩条采用连续 Z 型檩,使弯矩分布较均衡,受力更加合理。

3.2 优化设计分析

1. 实腹 H 型钢柱方案与隔构柱方案对比:对压型钢板材质等轻型屋盖的单层钢结构厂房,各横向结构可视为互相独立的结构,按排架或刚架进行分析^[2];取实腹柱截面大小 WH1400×480×12×18,格构柱组合截面高度为 1200,肢柱为轧制窄翼缘 H 型钢 HN500×200,双肢之间采用角钢 L100×8 斜缀条连接。将两种柱截面通过 PKPM-STS 建立单榀刚架进行结构对比计算与分析得出,在板件宽厚比等级,承载力和变形基本相近的情况下,采用隔构柱的刚架比采用实腹柱的刚架每榀可节约含钢量 2.1 吨,有效地节约了工程成本。另外,格构柱加工极为便利,其中部形成的空间方便设备管道穿行,节约使用空间,且格构柱单肢强轴受弯,承担的水平地震作用较大,预留了抵抗强震作用的富裕度。

但对于格构柱,应准确计算弯矩所作用平面内的整体稳定性及分肢的稳定性,且应避免分肢先于整体失稳。确保分肢的强度和稳定性,就不必计算强度和

弯矩作用平面外的整体稳定性。设计者在优化设计的过程中,一定要充分地掌握构件的受力特性,不能因为盲目优化而导致构件承载力不足或失稳。

2. 原有结构方案拟按普通钢结构厂房进行设计,为满足结构因抗震构造措施对板件局部稳定的要求,板件宽厚比将会被限制得比较严格,这样势必会造成材料的浪费。依据 2016 年修订版设计规范中抗震性能化设计的要求,单层钢结构厂房抗震方面的设定,可采用“高延性,低承载力”或“低延性,高承载力”的抗震设计思路从而确定板件宽厚比限制。对于采用压型钢板材质的轻型屋盖单层钢结构厂房,设定防震烈度为 8 度(0.20g)及以下时,地震组合一般不起控制作用,可采用“低延性,高承载力”思路进行简化性能化抗震设计^[3]。抗侧力体系塑性铰区域或相邻区域,板件宽厚比应满足设计规范相关规定,其他不可能出现塑性铰区域的构件宽厚比,可按设计标准中非抗震要求设计。依据《建筑抗震设计规范(GB50011-2010)》第 9.2.14 条,当构件强度和稳定承载力两者均满足高承载力 2 倍多遇地震作用下的要求时,可采用现行《钢结构设计标准》GB50017 中的弹性设计阶段的板件宽厚比限值,即 C 类。通过软件计算分析,结构满足 2 倍地震力作用下的承载力要求,板件宽厚比按 S4 级经 εd (应力修正因子)修正后的宽厚比控制^[4]。同时为了保证有可能出现塑性铰区域的延性,在梁端和柱端通过在适当位置设置纵向加劲肋来达到减小板件宽厚比,以满足由于材料出现塑性、刚度下降导致板件局部稳定性不足的问题。通过结构的优化设计,不但能有效地降低宽厚比限值,减少含钢量,同时也保证了强震作用下塑性铰区的有效开展。

3. 厂房纵向体系由柱列、柱间支撑、吊车梁系统构件及系杆等组成,由于刚度大,地震作用下容易引起柱间支撑及连接破坏。一般厂房的纵向体系较横向框排架体系震害严重。因此,增加柱间支撑数量比单一提高柱间支撑的强度储备更优。而柱间支撑数量的增加又会约束厂房在温度作用下的伸缩,导致温度应力增大。该厂房通过设置温度缝将厂房分为两个结构单体,既满足增加柱间支撑的要求,又降低了由于温度应力对支撑构件产生的不利影响。

厂房的支撑及系杆采用圆钢管代替传统的角钢和槽钢,传统的角钢和槽钢属于截面剪心和形心不重合的单轴对称体系构件,在受轴心压力时,除了有可能会发生绕非对称轴弯曲失去稳定性以外,还可能出现绕对称轴弯曲的同时绕纵向轴扭转的弯扭失稳。所以

其用作单拉杆支撑尚可,但用作压杆支撑则受力极其不合理,如为了满足稳定性要求而加大截面则容易造成材料浪费。而圆钢管属于极对称构件,无强弱轴之分,在受压、受扭和各个方向受弯下具有优秀的承载结构性能,其只需要较薄的壁厚就可获得较大的回转半径,因此在被用做压杆时的稳定性和长细比相对于传统构件有显著优势。通过变换支撑构件,在降低含钢量的同时保证了结构的稳定性。但设计时如果采用的壁厚过薄,则不能使用线性小挠度理论计算临界荷载值,应运用非线性大挠度理论进行分析其轴向受压失稳的临界荷载值。

4. 原有结构方案柱脚拟采用外露式刚接柱脚,设计规范规定:若采用外露式柱脚,柱脚极限承载力不宜小于柱截面塑性屈服承载力的1.2倍。由于钢柱截面较大,其塑性屈服承载力很高,这将导致柱脚底板和锚栓过大,柱脚设计不合理,造成材料浪费。因此将外露式柱脚改用插入式柱脚,将钢柱直接插入预留的混凝土杯口基础内,再用二次浇灌层固定,可用与基础刚接的计算模型计算,上部钢柱的内力逐渐传入基础,无需外露式的扩大柱脚,构造简单,相对于外露式刚接柱脚可节约约1/3的钢材^[5]。另外,由于基础和插入杯口均在现场由土建施工完成,与钢结构加工无需穿插作业,工作界面清晰,后期现场安装简单方便,进一步优化施工。

插入式柱脚的设计要点:(1)插入式柱脚的插入深度:应满足设计规范规定,即实腹式钢柱插入深度不得小于其截面高度的2.5倍,格构柱最小插入深度不得小于单肢截面高度的2.5倍,且不得小于柱总宽度的0.5倍。(2)插入式柱脚的杯口设计:插入式柱脚属于高杯口基础,依据设计规范规定基础的杯底厚度和杯壁厚度可由规范表8.2.4-2选用,其杯壁厚度对于柱长边尺寸 $1000 \leq h < 1500$ 柱子杯底厚度不小于250mm,杯壁厚度不小于350mm,对双肢柱的杯底厚度值,可适当加大。杯壁的配筋根据钢柱下端内力(轴力、弯矩、剪力)进行计算配筋,对于抗震设防地区,插入式柱脚的极限承载力不应小于钢柱全塑性承载力的1.2倍。由于插入式柱脚杯口尺寸较大,最小配筋率如按受弯构件执行势必造成不必要的浪费,可按地基规范规定杯口的配筋率不少于0.05%短柱的截面尺寸执行,有效降低杯口的钢筋量。(3)插入式柱脚的构造要求:插入式柱当内力较大时应设柱脚底板,柱底端至基础杯口底的距离可采用200mm,且底板下应设置临时调整措施。钢柱脚在插入深度范围内,不得

涂刷油漆,在钢柱安装就位调平后应采用强度等级高一级的细石混凝土充填密实,当达到材料设计强度的70%以上时,方能进行上部吊装。设计者应根据项目特点,在掌握好各种柱脚的受力特性和施工工序前提下,才能选择出适合的柱脚形式,以达到优化目的。

5. 檩条优化设计:《工程结构通用规范》GB 55001-2021规定,当采用风荷载放大系数方法考虑风荷载脉动的增大效应时,对于维护结构的风荷载放大系数不应小于 $1+0.7I$,由于该项目柱距较大,如檩条采用简支C型檩进行设计,则其在风、雪荷载作用下需要很大的截面,采用连续Z型檩条则可有效均衡檩条支座与跨中的弯矩,使檩条受力更加合理,节约了钢材用量。连续檩条是将两根Z型檩条先嵌套在一起,再通过螺栓互相连接并固定于支座上。檩条的搭接是实现连续檩条设计的关键环节,如果檩条搭接长度设计不合理,就会造成檩条用量的浪费,甚至不能体现连续檩条原有的设计意图。搭接长度超过有效搭接之后,虽然檩条承载力仍然在增加,但此时弯矩及剪力值都已经下降到单根檩条即可承担的水平,多出的搭接段除了增加材料用料外对檩条受力已无任何帮助;而搭接长度短于有效搭接时,由于弯矩没有降至一半的位置檩条已成为单根受力状态,造成檩条必须采用较大的截面才能抵抗相应的弯矩,同样会造成檩条用量的显著增加。因此,设计者应通过计算分析掌握构件的受力,能做到合理利用构件截面及其构造,达到优化设计的目的。

4 结论

总而言之,对于轻型单层工业厂房结构设计,为实现良好的经济效益,在满足工艺功能要求的前提下,结构设计者应该通过深入理解规范、掌握规范原则,并借助计算机软件的计算分析对比,提出科学合理的结构设计方案,从而实现节约造价、方便施工的目的。本文通过具体项目给出了一些实用的结构优化设计方案,为轻型单层钢结构厂房提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 但泽义. 钢结构设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 同 [1].
- [3] 国家标准抗震规范管理组. 建筑抗震设计规范 [M]. 中国建筑工业出版社, 2016.
- [4] 住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准 (GB50017-2017) [S]. 2017-12-12.
- [5] 马付彪, 郭冰冰. 工业厂房双肢格构柱插入式柱脚设计方法研究 [J]. 工程建筑与设计, 2013(06):43-46.