

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.007

考虑炉体作用的塔式锅炉钢结构抗震性能分析

丁玉坤^{1,2}, 张文元^{1,2}, 孙洪鹏³, 郑睿¹, 李文文¹, 张耀春¹

(1.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2.结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨; 3.北京巴布科克·威尔科克斯有限公司, 100043 北京)

摘要: 针对某 1 000 MW 褐煤塔式锅炉钢结构, 为研究抗震分析中采用无炉体的简化结构模型(炉体对主钢架的地震作用通过在主钢架上施加炉体质量来实现)的可行性, 重点考察了有、无炉体的结构抗震性能的差别。当有炉体时, 还考察了主钢架与炉体间有、无止晃杆件两种情况下结构的抗震性能。分析表明: 多遇地震下, 结构均处于弹性。与有炉体结构相比, 无炉体结构中主钢架的杆件应力较大; 罕遇地震下, 部分中心支撑受压失稳并有塑性发展, 主钢架的偏心支撑无塑性发展, 部分钢梁有轻微塑性发展, 柱子基本处于弹性; 止晃杆附近部分杆件受力较大, 甚至有塑性发展, 建议这些杆件的设计中考虑止晃杆传力的影响。多、罕遇地震下, 主钢架层间侧移均小于规范限值。总体上, 与有炉体的结构相比, 无炉体的结构主钢架层间侧移和楼层侧移响应较大, 表明采用无炉体的简化结构模型基本可行。

关键词: 塔式锅炉钢结构; 支撑钢框架; 炉体作用; 抗震性能; 炉体止晃杆; 偏心支撑

中图分类号: TU393.2; TU392.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)06-0043-08

Analysis for seismic behavior of tower type boiler steel structure considering action of boiler

DING Yukun^{1,2}, ZHANG Wenyuan^{1,2}, SUN Hongpeng³, ZHENG Rui¹, LI Wenwen¹, ZHANG Yaochun¹

(1.School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, 150090 Harbin, China; 3. Babcock & Wilcox Beijing Co., Ltd., 100043 Beijing, China)

Abstract: A simplified model for seismic analysis of a 1 000 MW tower type lignite boiler steel structure was studied, in which the mass of boiler is added to main steel structure replacing its seismic action. The seismic behavior differences among the simplified model and two models with boiler are studied. One of the two models with boiler used steel bars to inhibit sway of boiler. All of the models remain elastic under small earthquake actions, and the stress responses are the largest in simplified model. Under strong earthquake actions, some concentrically compression steel braces are buckling with plastic deformation and some beams have plastic deformations while eccentrically steel braces in the main steel structures and steel columns remains elastic. Some members near the steel bars develop plastic deformations due to the increased loads applied by the bars, which should be considered in design. Under both small and strong earthquake actions, inter-story deformations of the main structures are much smaller than the design code limits. Both lateral deformations and inter-story deformations of the main structures in the simplified model are the largest.

Keywords: tower type boiler steel structure; braced steel frame; action of boiler; seismic behavior; steel bar used to inhibit sway of boiler; eccentric brace

收稿日期: 2015-03-10.

基金项目: 北京巴威有限公司科技攻关项目(CE2012-1).

作者简介: 丁玉坤(1979—),男,博士,副教授;

张文元(1972—),男,教授,博士生导师;

张耀春(1937—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 丁玉坤, dingyukun.student@sina.com.

塔式锅炉是一种悬吊式锅炉^[1-2]. 锅炉通过吊杆悬吊在主钢架顶部的大板梁上, 锅炉在吊入主钢架后, 为防止悬吊的炉体撞击到主钢架, 炉体通过止晃装置(导向装置)与主钢架连接^[3-5]. 止晃装置限制了炉体在主钢架内的大幅水平向摆动, 而不限制炉

体沿竖向的移动.文献[5-6]结合 300 MW 的 π 型锅炉构架体系,建立了吊入炉体的锅炉钢结构分析模型,研究了新型导向装置构造参数对锅炉钢结构抗震性能的影响.文献[7-8]在塔式锅炉钢结构的静力及地震响应分析中,炉体的重力作用通过对顶部板梁上施加炉体质量来模拟(该质量只产生重力作用,不产生水平地震作用).而炉体对主钢架的水平地震作用通过在设有止晃装置的主钢架上施加对应的炉体质量来模拟(该质量只产生水平地震作用,不产生重力作用).经上述方法建模,认为已考虑了炉体对主钢架结构的重力和水平地震作用.因此,结构建模中,略去了锅炉和吊杆等.

上述简化模拟方法可近似考虑炉体对主钢架的重力和水平地震作用.虽然不能真实模拟主钢架和炉体二者的相互作用,但若简化模拟方法可行,可略去对炉体、吊杆以及止晃装置等炉体附属部件复杂的建模.在真实结构中,炉体吊入主钢架中,因有多层限位装置,水平地震作用下,炉体和主钢架间变形相互制约.上述简化模拟方法能否较好考虑主钢架和炉体实际的相互作用,尚不明确.因此,弄清这种简化模拟方法的可行性,以及考虑止晃装置设置的实际情况下,炉体和主钢架相互作用下结构真实的抗震性能,对大型塔式锅炉钢结构的抗震设计和工程应用有重要参考价值.此外,止晃装置将炉体与主钢架连接后,可能不利于发挥悬吊炉体减震的优越性^[5,9].对于 1 000 MW 的大型锅炉,若不设止晃装置,结构的抗震性能如何,也值得探讨.

基于上述问题,本文依据某一 1 000 MW 褐煤塔式锅炉钢结构的实际工程,采用有限元分析,建立了不吊入锅炉、吊入锅炉无止晃、吊入锅炉有止晃 3 个结构模型,分别简称为 J1、J2、J3,对比分析了 3 个结构的抗震性能.

1 结构概况及分析模型

1.1 结构概况

此塔式锅炉的构架采用支撑钢框架结构,由主钢架和主钢架以外的附属钢结构组成(图 1).

主钢架 6 个大柱的底部刚接,其他柱脚铰接.实际应用中,通过吊杆将炉体吊入主钢架中.沿结构高度方向(即 Y 向)标高 19、47、69 和 91 m 四处设置止晃装置,使炉体在水平地震作用下与主钢架协同受力和侧向移动,而炉体的重力作用经吊杆传给顶部的大板梁.

沿 Z 向,主钢架在 1、3、4 层内设置中心支撑;沿 X 向各层内设置偏心支撑.为论述方便,对主钢架结构的 5 个楼层进行编号,见图 1.

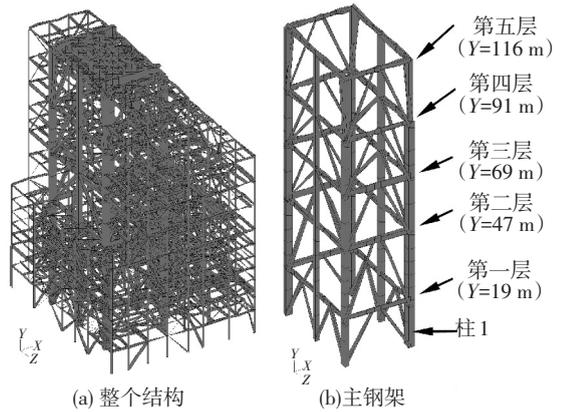


图 1 不吊入锅炉的钢结构

1.2 分析模型

采用 ANSYS 进行分析.按主钢架内部是否吊入锅炉,建模和分析包括两部分内容.第一部分,主钢架不悬吊锅炉.锅炉的水平地震作用由水平大质量产生,这些大质量施加在模型中 Y 向标高 19、47、69 和 91 m 四个止晃层上.锅炉的重力作用通过在顶部板梁上施加炉体竖向质量实现;第二部分,主钢架悬吊锅炉.在不悬吊炉体模型的基础上建模.建模中,删除考虑锅炉水平地震作用的大质量.因将锅炉吊在顶部的大板梁上,将顶部板梁上的锅炉质量删除.吊入锅炉后,按有、无止晃装置分别进行分析.

杆件钢材依据截面板厚的不同共 5 种,钢材采用 Q345 钢,根据《低合金高强度结构钢》^[10]查得的不同板厚下钢材的屈服强度.钢材弹性模量 E 均取 205 000 MPa,泊松比为 0.3(其他钢构件的模拟中,弹性模量和泊松比的取值与此相同).对支撑钢框架结构内的钢构件,包括钢梁、钢柱和支撑,考虑钢材屈服,采用 Von Mises 屈服准则,钢材应力-应变关系采用双线性随动强化模型,切线模量为 0.03E.

钢梁、钢柱和支撑均采用梁单元 beam188 模拟,每根杆件至少划分 4 个单元.考虑支撑初始弯曲变形,每根支撑中点的初始面外变形约为支撑杆长的 1/1 000.结构上的重力荷载均转化为质点施加在构件或节点上,质点采用质量单元 Mass21 模拟.

1.2.1 炉体吊入主钢架的模拟(无止晃装置)

在顶部的大板梁上对应炉体范围内,按要求布置吊杆,钢吊杆的截面按吊重和考虑吊杆工作应力 205 MPa 来计算,不计吊杆的密度.实际应用中吊杆两端连接构造使吊杆仅受拉力而不承受压力,并控制吊杆不受拉屈服,所以分析中也不考虑吊杆屈服.吊杆采用 Link10 单元(仅承受拉力不能承受压力)模拟,每根吊杆划分一个单元.

因炉体密度沿自身高度并非均布,考虑炉体实际质量分布,沿锅炉高度方向,根据炉体区段密度的不同和考虑止晃分段的需要,炉体沿垂直方向分为

9段。虽然炉体内兼有空的和实体的部位,但若按实际炉体内部构造建模需要的单元数量巨大。特别是,实际应用中在悬吊炉体外周围设置了刚性梁,采用刚性梁的目的是为了增强炉体的刚性,以保证炉体变形尽可能小。因此,为了简化建模,采用实体单元 Solid45 对炉体进行模拟。炉体钢材屈服点取 345 MPa(计算表明,炉体应力很小,不会屈服)。炉体总质量为 10 643 265 kg。

上述模拟,通过建立吊杆和锅炉,就将锅炉悬吊在 116 m 标高处的顶部大板梁上。因不考虑炉体与主钢架间的止晃装置。水平地震作用下,炉体可在主钢架内自由摆动。

1.2.2 炉体与主钢架间止晃装置的模拟

实际应用中,在锅炉止晃位置所在的水平面内,炉体外围设置了刚性梁,然后在刚性梁和主钢架之间建立杆式的止晃装置。因沿结构高度方向,有 4 个止晃层,所以在 4 个止晃层的水平面内均建立了炉体外围的无密度钢梁。不考虑钢梁的屈服,采用 Beam188 单元模拟。炉体按实体单元划分网格后,在实体单元的节点处,上述无密度的钢梁单元的节点均要与实体元共用节点。采用杆式止晃装置时,止晃杆装置连于炉体和主钢架之间,止晃杆一端与炉体周围的无密度钢梁连接,另一端与主钢架内的构件连接。在每个设置止晃杆的位置,两根止晃杆一上一下和两边的结构连接,构造示意图见图 2。因考虑止晃杆既能承受拉力、又能承受压力,因此止晃杆采用 Link8 单元模拟。不考虑止晃杆屈服。结合设计要求和试算,为简化建模,在每个设置止晃杆的位置,将上下两根止晃杆合并为一道止晃杆,每道止晃杆的横截面取 $0.015\ 7\ \text{m}^2$ 。

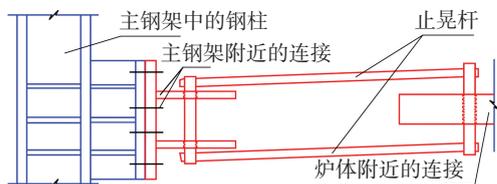


图 2 止晃杆及连接示意

因实际应用中,悬吊的炉体通过周围的刚性梁、止晃杆与主钢架连接,采用刚性梁的目的是为了增强炉体的刚性^[2],保证炉体和刚性梁在地震作用下处于弹性,减小变形。因此,分析中采用简化建模,不考虑炉体和刚性梁的屈服。而试算分析表明,这些部件的应力也很低。同样,为了保证主钢架能够通过止晃杆很好地对炉体进行止晃,也不考虑止晃杆的屈服。

在 19、47、69、91 m 四个标高处,结合已有的结构布置,按有利于止晃杆和相连构件的受力设置止

晃杆。根据要求,每个标高处,沿 X 和 Z 向各布置两道止晃杆,即沿 X 或 Z 向,仅在锅炉的一侧设置杆件。以 19 m 标高处为例,止晃杆布置见图 3。

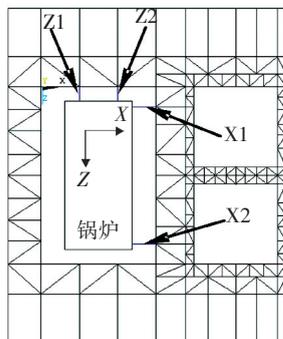


图 3 19 m 标高处止晃钢杆的布置和编号

2 地震作用

2.1 场地和地震作用

场地基本设防烈度为 7 度,III 类场地,第二设计分组,地震加速度为 0.15 g。

分析中采用 Rayleigh 阻尼,多遇和罕遇地震下阻尼比分别取 0.03 和 0.05,结合模态分析所得结构前两阶振型的频率,阻尼系数 α 和 β 的计算公式为:

$$\alpha = \frac{4\pi f_1 f_2}{(f_1 + f_2)} \xi, \beta = \frac{1}{\pi(f_1 + f_2)} \xi.$$

式中: f_1 、 f_2 分别为结构的一阶和二阶频率, ξ 为阻尼比。

2.2 地震动加速度记录

根据场地条件,按《建筑抗震设计规范》^[11] 规定:多遇、罕遇地震下加速度峰值分别取 55、310 gal。按《建筑工程抗震性态设计通则》^[12] 建议,选取 F5 和 F7 加速度记录。此外,还选取 GM1 加速度记录。输入时间均为 20 s。图 4 所示为加速度峰值 310 gal 的 3 个地震动的前 30 s 加速度时程曲线。多遇地震下,3 种加速度反应谱和设计反应谱见图 5。分析时,沿结构跨度方向(X 向或 Z 向)输入上述地震作用,时间步长为 0.02 s(F5、F7)和 0.01 s(GM1),同时施加重力加速度(Y 方向)以考虑重力作用。

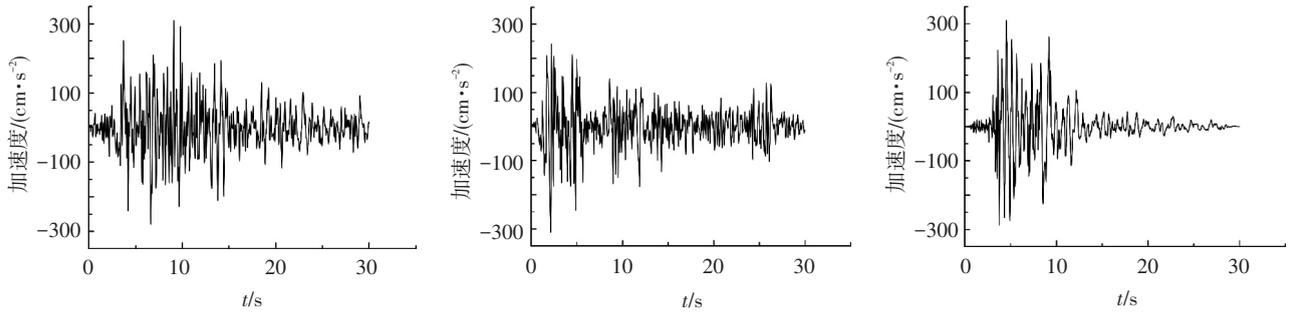
3 结构的自振特性

3.1 无炉体的结构(J1)

结构的前三阶自振频率见表 1。结构的第一阶和第二阶振型分别为沿 Z 向和 X 向的平动,第三阶为扭转变形。

3.2 有炉体无止晃的结构(J2)

结构的前三阶自振频率见表 1。结构的第一、二阶振型分别为沿 Z 向和 X 向的平动。第三阶为扭转变形。



(a) F5 加速度时程曲线

(b) F7 加速度时程曲线

(c) GM1 加速度时程曲线

图 4 地震动的加速度记录

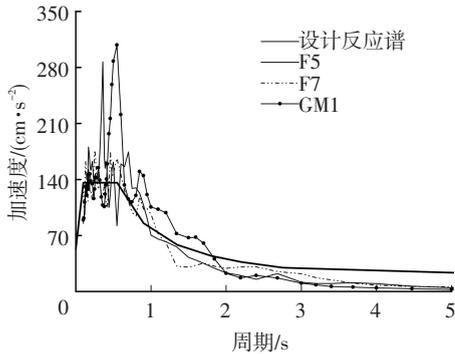


图 5 加速度反应谱和设计反应谱

3.3 有炉体有止晃的结构 (J3)

当设置止晃杆后,结构的前三阶自振频率见表 1,前三阶振型见图 6.结构的第一阶和第二阶振型分别为沿 X 向和 Z 向的平动,第三阶为扭转变形.

表 1 结构自振频率 Hz

模型	一阶	二阶	三阶
J1	0.36	0.38	0.47
J2	0.39	0.42	0.51
J3	0.38	0.41	0.56

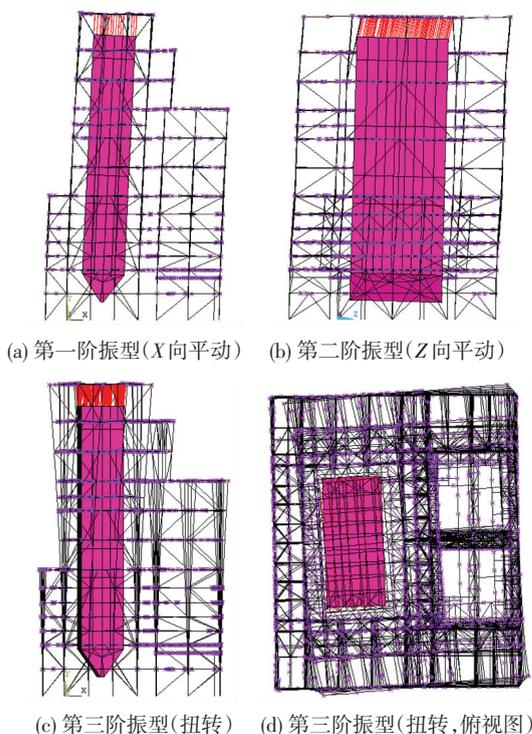


图 6 有炉体有止晃的结构前三阶振型

J2 模型中炉体与主钢架虽然无直接水平连接,但其第一或第二振型中二者均分别有 Z 向或 X 向侧移,这与 J1 和 J3 的第一或第二阶振型中炉体和主钢架均有 Z 向或 X 向侧移类似(见图 6).因此,总体上,3 种结构的前两阶自振频率较接近.

4 结构的地震反应分析

4.1 结构在多遇地震下的响应

将相同地震作用下,不吊入炉体、吊入炉体无止晃、吊入炉体有止晃的 3 个结构的响应进行比较.以 F7 作用下为例,3 个结构的楼层侧移包络值见图 7,其他地震作用下,规律与此类似.3 个结构在图中分别简称为 J1、J2、J3.比较可知,总体上,相同地震作用下,J1 和 J3 二者的楼层最大侧移响应较接近,前者响应较大.与 J1 和 J3 相比, J2 的侧移响应较小.因在 X 向或 Z 向地震作用下结构主要发生沿 X 向或 Z 向的侧移,扭转变形很小,因此上述楼层侧移是以主钢架各层标高处柱 1(见图 1)节点的侧移给出的.柱 1 在主钢架每层顶、底标高处的侧移差即为楼层的层间侧移.

以 F5 为例,3 个结构的层间侧移包络值见图 8.总体上,相同地震作用下,J1 响应较大.F7 和 GM1 作用下,规律与此类似.

以 F5 为例,3 个结构的顶层侧移时程曲线见图 9.与 Z 向地震作用相比,在 X 向地震作用下,J1 和 J3 的顶层侧移应较一致.而 X 向和 Z 向地震作用下,J2 与前两个结构的侧移响应明显不一致,且响应较小.F7 和 GM1 作用下,规律与此类似.

3 个结构在 F5、F7 和 GM1 作用下均处于弹性,整个结构中杆件的最大 Mises 应力均不超过 290 MPa.3 个结构内出现最大应力的杆件均在主钢架以外的附属结构中,且相同地震作用下,最大 Mises 应力较接近.主钢架与主钢架以外结构相比,应力较低.与 X 向地震作用相比,Z 向地震作用下,主钢架的应力较高.

3 个结构中主钢架的最大应力与发生时刻见

表 2、3. 相同地震作用下 (X 向或 Z 向), 主钢架的最

大应力在 J1 中较大, 在 J3 中较小。

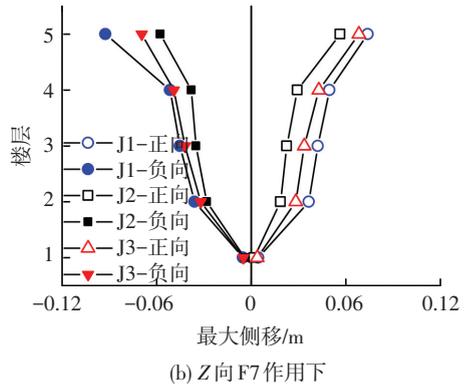
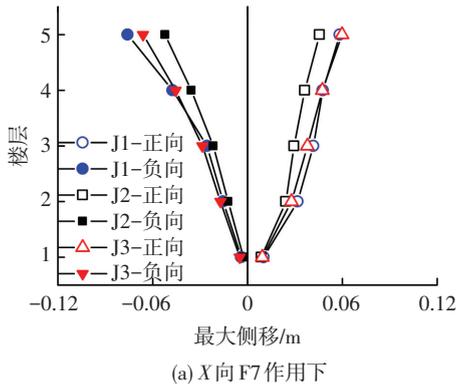


图 7 楼层侧移包络值

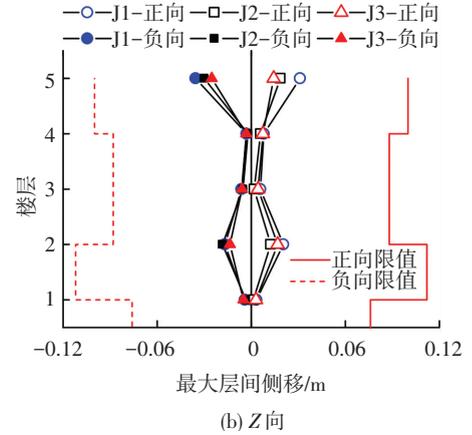
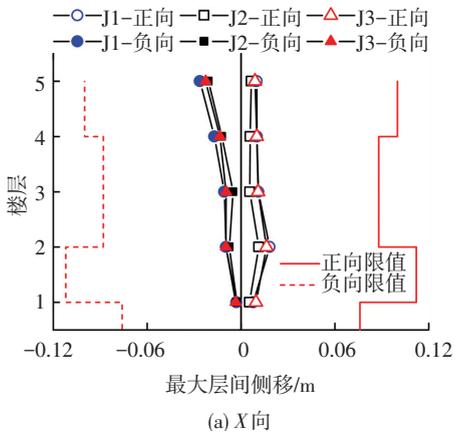


图 8 F5 作用下层间侧移包络值

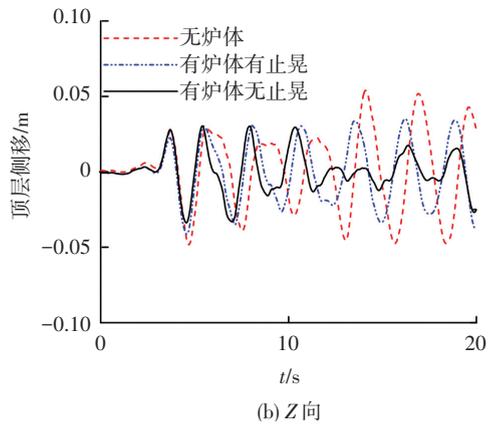
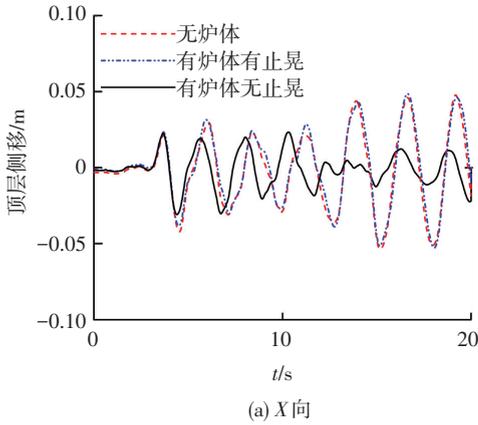


图 9 F5 作用下顶层侧移时程曲线

表 2 X 向地震作用下主钢架最大应力

地震动	J1		J2		J3	
	最大应力/ MPa	时刻 /s	最大应力/ MPa	时刻 /s	最大应力/ MPa	时刻 /s
F5	175	4.48	170	4.62	165	4.24
F7	177	5.86	169	7.60	168	5.64
GM1	181	10.02	172	10.29	168	9.96

表 3 Z 向地震作用下主钢架最大应力

地震动	J1		J2		J3	
	最大应力/ MPa	时刻 /s	最大应力/ MPa	时刻 /s	最大应力/ MPa	时刻 /s
F5	194	6.68	185	3.88	180	7.98
F7	210	4.90	194	6.66	175	4.26
GM1	214	9.62	193	9.54	187	9.65

4.2 结构在罕遇地震下的响应

4.2.1 结构的楼层侧移响应

罕遇地震作用下, 以 F5 为例, 3 个结构的楼层侧移包络值见图 10. F7 和 GM1 作用下, 规律与此类似, 总体上, J2 侧移响应较小, J1 侧移响应较大。

以 F7 作用下为例, 3 个结构的层间侧移包络值见图 11. 与多遇地震下相似, 总体上, 相同地震下, 结构 J1 响应较大. 3 个结构的顶层侧移响应规律与多遇地震下类似, 结构 J2 响应较小。

4.2.2 构件的塑性发展程度

各地震作用下, 3 个结构中柱子基本处于弹性,

部分钢梁有轻微屈服,部分中心支撑受压后发生平面外失稳,且支撑杆件中部有塑性发展.总体上,结构的塑性发展不多,进入屈服的杆件较少.

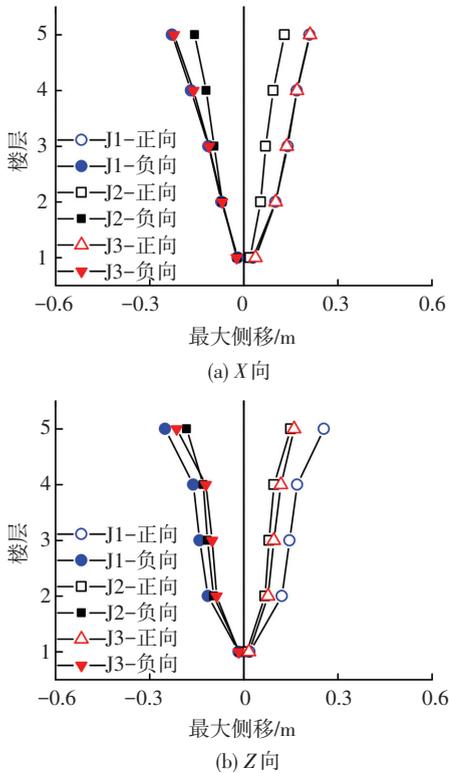


图 10 F5 作用下下层侧移包络值

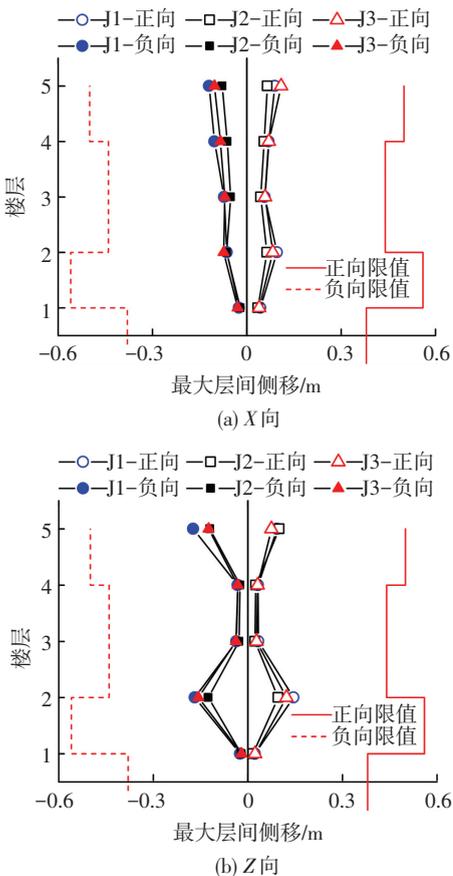


图 11 F7 作用下层间侧移包络值

以结构 J1 为例,当 F7 沿 X 向作用下,4.7 s 时, Y=91 m 标高处(图 1),主钢架中被偏心支撑所撑的钢梁达到屈服, Von-Mises 应力为 336 MPa (钢材的屈服应力为 335 MPa).5.8 s 时,该梁应力达到 363 MPa(图 12),此时应力最大截面处钢梁翼缘外表面平行钢梁轴线方向的平均应变约为钢材单调拉伸屈服应变的 2.7 倍.而偏心支撑既无受压失稳,也无塑性发展,实现了大震下利用耗能梁段屈服耗能的意图.

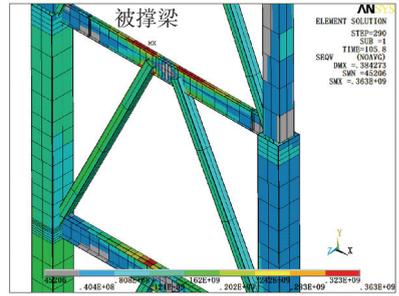
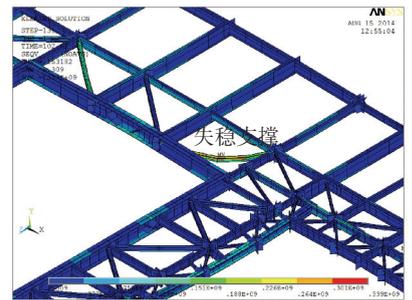
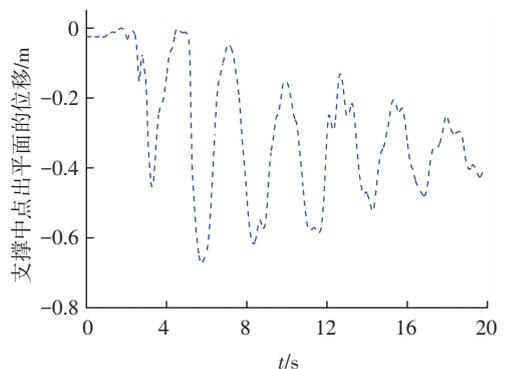


图 12 F7 作用下 Y=91 m 标高处的被撑梁屈服

对于结构 J3,在某一标高位置的平面内,与止晃杆交于一点的部分钢梁和斜撑,因承受止晃杆传来较大的集中力,有塑性发展.以 F7 沿 Z 向作用下为例,2.62 s 左右, Y=19 m 标高的平面内(该标高处止晃杆的布置见图 3),一根水平斜撑受压失稳(图 13(a)), Von-Mises 应力高达 339 MPa(钢材的屈服应力为 335 MPa),进入屈服.之后,其他时刻该水平斜撑也有屈服,支撑中点有残余变形(图 13(b)).



(a) 失稳支撑及周边构件应力云图



(b) 失稳支撑中点的面外变形

图 13 Y=19 m 标高处的斜撑受压失稳

4.2.3 止晃杆的轴向应力

以 19 m 标高处为例,止晃杆的布置见图 3.图中, X 和 Z 分别表示止晃杆轴向分别沿 X 和 Z 向布置;1 和 2 分别表示每个标高处,沿 X 或 Z 向两根止晃杆的编号.47、69 和 91 m 标高处编号规律相同.

多遇地震下,沿 X 向布置的止晃杆的最大轴向应力出现在 GM1 沿 X 向作用下,为 -100.7 MPa(负值为压应力).在 Z 向作用下, Z 向布置的止晃杆的最大应力出现在 F7 作用下,为 102.3 MPa,见图 14(a).图中数字 19、47、69 和 91 表示布置止晃杆的 4 个标高位置.其余时刻和其他地震作用下,止晃杆的最大应力绝对值均不超过 100 MPa.这表明,模拟中采用的止晃

杆横截面面积以及不考虑止晃杆屈服的做法是可行的.

罕遇地震下,沿 X 向布置的止晃杆的最大轴向应力出现在 GM1 沿 X 向作用下 10.03 s 左右,为 -405.6 MPa,见图 14(b).在其他时刻和其他地震作用下,止晃杆的最大应力绝对值均不超过 360 MPa.此外,因结构的扭转变形较小,在与地震作用方向垂直的方向上布置的止晃杆,其轴向应力较小(图 14(c)). Z 向地震作用下,止晃杆的最大应力出现在 F7 作用下,为 381.8 MPa.在其他地震作用下,止晃杆的最大应力绝对值均不超过 366 MPa.这表明,按模拟中止晃杆的横截面或适当增大止晃杆的横截面,采用 Q420 或 Q345 钢材,均可实现止晃杆不屈服.

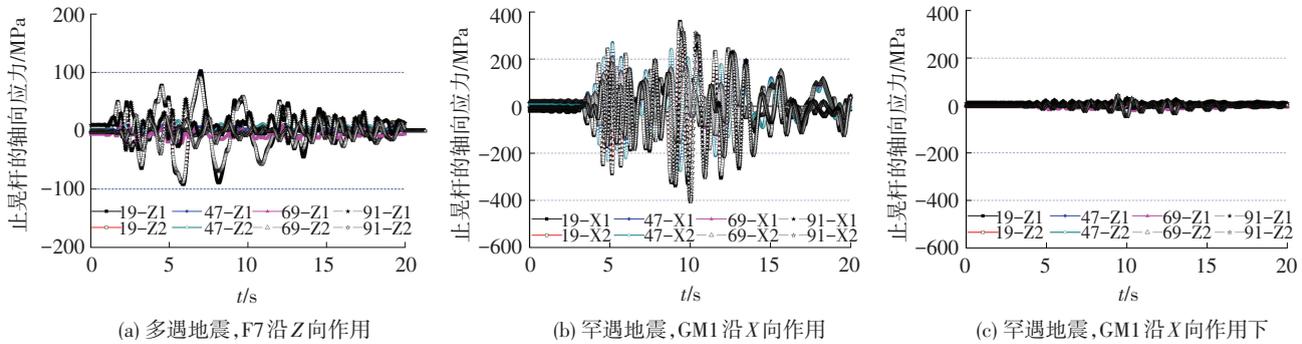


图 14 沿 Z 向或 X 向布置的止晃杆的轴向应力

4.2.4 无止晃杆炉体的侧移

因锅炉刚度较大,选取炉体两个侧面上各 4 个角点,分析这些角点在各地震作用下的侧移.锅炉角点的编号见图 15.

多遇地震下,在 X 向和 Z 向地震作用下,炉体的最大侧移均小于 0.1 m.罕遇地震下, X 向和 Z 向地震作用下炉体的最大侧移均小于 0.4 m.炉体的最大侧移出现在 F7 沿 X 向作用下,见图 16(a).因炉体摆动后,基本无绕 Y 轴的扭转,角点 1 和 5(或角点 2 和 6)的侧移基本重合.当结构受到沿 X 向或 Z 向的地震作用后,炉体在垂直地震力作用方向(即 Z 向或 X 向)的侧移响应很小,以 GM1 沿 Z 方向作用下炉体在 X 向和 Z 向的侧移响应为例,见图 16(b)和(c).

后,不会碰撞到主钢架结构.因此,应用中也可进一步探讨采用吊入锅炉不设置止晃装置的方案.

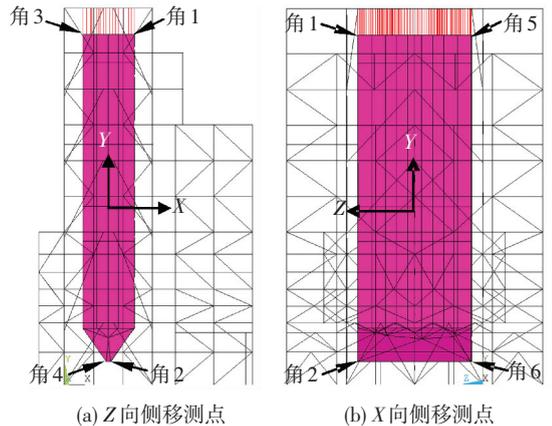
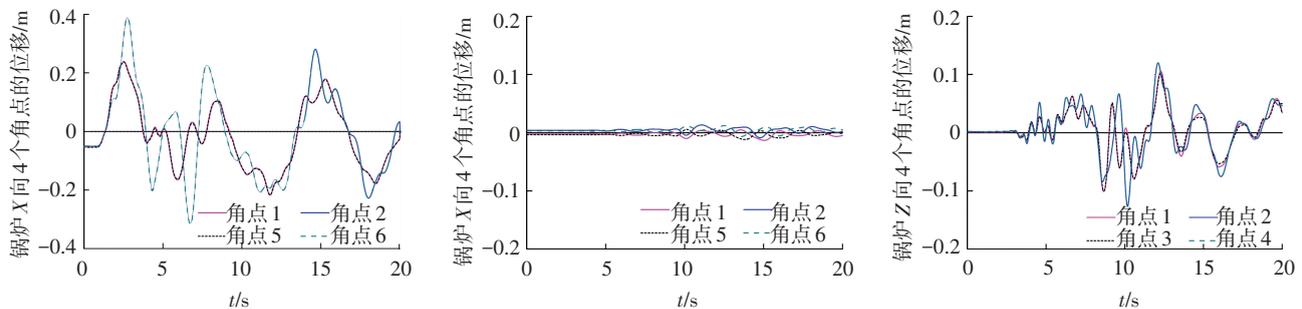


图 15 锅炉侧移的测点

分析表明,锅炉在多遇、罕遇地震作用下摆动



(a) F7 沿 X 向作用下炉体的 X 向侧移 (b) GM1 沿 Z 向作用下炉体的 X 向侧移 (c) GM1 沿 Z 向作用下炉体的 Z 向侧移

图 16 罕遇地震作用下炉体的侧移

5 结 论

1) 多、罕遇地震下, 3 个结构的主钢架层间侧移均小于规范限值. 对于结构层间侧移和楼层侧移响应, 无炉体的结构最大, 有炉体有止晃的结构与无炉体的结构较接近, 而有炉体无止晃的结构最小. 多遇地震下, 无炉体的结构主钢架杆件应力较大. 表明采用无炉体的结构进行设计稍加偏于安全. 在不需获得止晃杆应力等的分析中, 为了简化对炉体吊入等构造的建模, 可采用无炉体的简化结构模型.

2) 罕遇地震下, 3 个结构的柱子基本处于弹性, 部分钢梁有轻微屈服, 部分中心支撑受压后发生平面外失稳, 且支撑杆件中部有塑性发展. 因止晃杆传递较大的集中力, 锅炉构架中与止晃杆连接的部分杆件受力较大, 甚至发展塑性. 主钢架的偏心支撑无塑性发展, 也没有受压失稳, 部分耗能梁段屈服, 实现了偏心支撑框架的设计意图. 总体上, 结构的塑性发展程度较轻微.

3) 止晃杆的轴向应力响应表明, 多遇地震作用下, 止晃杆的应力最大值约 100 MPa; 罕遇地震作用下, 止晃杆的应力增大, 最大应力不超过 406 MPa. 表明按分析中采用的止晃杆横截面或者稍加增大杆件的横截面, 采用较常规的钢材制作止晃杆可行.

4) 吊入炉体无止晃结构的响应表明, 炉体在多遇、罕遇地震作用下摆动后, 不会碰撞到主钢架结构. 而且, 总体上, 同一地震动作用下, 与吊入炉体有止晃的结构相比, 该结构侧移响应较小; 二者的应力响应差别不大. 因此, 应用中除了采用吊入锅炉有止晃的结构方案, 也可进一步探讨采用吊入锅炉不设置止晃装置的结构方案, 发挥悬吊炉体减震的优越性.

参考文献

[1] 魏国华, 宋宝军, 夏良伟. 1 000 MW 超超临界塔式褐煤锅炉的研究[J]. 锅炉制造, 2014, 243(1): 17-20.

[2] 锅炉钢结构设计规范: GB/T 22395—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[3] 娄德奎, 赵咏梅, 杨晓春. 大型电站锅炉导向装置的应力分析[J]. 锅炉制造, 2002, 185(3): 9-10.

[4] 孟宪国, 任振业, 李大生. 电站锅炉构架设计中的荷载及其效应组合[J]. 电站系统工程, 1996, 12(6): 30-33.

[5] 田宪铭. 电站锅炉构架新型导向装置参数分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

[6] 刘广义, 王伟, 姜铭阅, 等. 电厂锅炉构架被动控制方法研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(增刊 1): 67-70, 76.

[7] 赖鹏邦, 赵金城, 刘明路, 等. 塔式锅炉钢架在地震作用下的动力响应分析[J]. 钢结构, 2009, 24, 122(7): 37-42.

[8] 熊志恒. 巨型钢管混凝土框架-支撑结构体系抗震性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[9] 杨友文. 锅炉构架若干设计问题[J]. 锅炉技术, 1987, 4: 9-16.

[10] 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[11] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[12] 建筑工程抗震性态设计通则: CECS 160: 2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.

(编辑 赵丽莹)

国家行业技术标准“钢板剪力墙技术规程”正式出版

由哈尔滨工业大学和中建四局第六建筑工程有限公司为主编单位, 哈尔滨工业大学土木工程学院范峰教授任主编的建筑行业技术标准“钢板剪力墙技术规程”于 2015 年 11 月 9 日出版, 并将于 2016 年 6 月 1 日正式实施. 钢板剪力墙是一类在多层次和超高层钢结构体系中应用的抗侧力构件, 由于其具有承载力高、耗能减震能力强、节能、经济性好等特点, 发展前景广阔. 之前, 中国尚没有一部比较全面的钢板剪力墙技术标准. 受住房和城乡建设部委托, 规程编制组经广泛调查研究, 认真总结实践经验, 参考有关国际标准和国外先进标准, 并在广泛征求意见的基础上, 编制了本规程. 本规程的出版发行, 填补了中国在钢板剪力墙技术应用领域的空白, 将会积极推动钢板剪力墙结构在中国建筑工程领域的快速发展. 本规程的主要内容包括非加劲钢板剪力墙、加劲钢板剪力墙、防屈曲钢板剪力墙、钢板组合剪力墙、开缝钢板剪力墙等各类型钢板剪力墙的设计方法、连接构造、防火与防腐以及制作与安装、质量验收等相关技术条款. 通过上述内容的规定, 可以确保钢板剪力墙在设计、制作以及安装过程中做到技术先进、经济合理、安全适用.