

文章编号:1673-9469(2009)02-0032-04

## 厂房结构弹塑性动力分析与抗震性能评估

张大巍,黄薇,严衍隆

(中国核电工程有限公司深圳设计院,深圳 518031)

**摘要:**以某典型垃圾焚烧发电厂主厂房为例,通过对其进行弹塑性静力推覆分析(Push-over分析)和弹塑性时程分析,研究该结构在地震作用下的抗震性能,并对此类工业厂房在8度(0.2g)地震烈度地区的适用性进行了探讨。

**关键词:**弹塑性静力推覆分析;弹塑性时程分析;抗震性能;罕遇地震

**中图分类号:** TU311.3

**文献标识码:** A

### Dynamical elastic-plastic analysis and structural seismic capacity evaluation of municipal solid waste incineration and power generation plant

ZHANG Da-wei, HUANG Wei, YAN Yan-long

(Shenzhen Design Institute, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518031, China)

**Abstract:** With example of dynamical elastic-plastic analysis (Push-over analysis) and structural seismic analysis to municipal solid waste incineration and power generation plant, the structural seismic capacity has been researched, then its applicability under seismic intensity of 8 degree (0.2g) has been discussed.

**Key words:** elastic-plastic static push over analysis; elastic-plastic time-history analysis; structural seismic capacity; rare earthquake

垃圾焚烧发电从二十世纪初至今已经有 100 多年的历史,这项技术真正体现了垃圾处理的减量化、资源化和无害化的原则,从而成为 21 世纪垃圾处理的一个发展方向。美国、日本、英国、法国等国家,用于焚烧发电(供热)的垃圾占总垃圾量的 20%~30%,在新加坡垃圾焚烧发电的处理率达到 100%,取得了很好的经济和社会效益<sup>[1]</sup>。我国在该方面虽然起步较晚,但是发展速度很快。据不完全统计,从 1985 年在深圳建成内陆地区第一个垃圾发电厂至今,已经建成的垃圾发电项目有 50 多个。

本文通过对一典型垃圾焚烧发电厂进行弹性及弹塑性动力计算,分析工业建筑在 8 度(0.2g)地震烈度地区的适用性。

### 1 工程概况

某垃圾焚烧发电厂主厂房,建筑面积 93.6m×120m,建筑高度 42m,建筑抗震设防类别为丙类,地震烈度 8 度(0.2g),地震分组为第一组。场地类别为 II 类,特征周期为 0.35s。厂房平面布置如图 1 所示,

①~⑨轴线主要为垃圾储存、焚烧及烟气处理部分,⑩~⑭轴为汽机发电部分,由于两部分高差较大,在⑨~⑩轴线之间设置防震缝,将上部结构分开。①~⑩轴线之间设有垃圾池,储存准备焚烧处理的垃圾,其大小由储存的垃圾量来决定。垃圾池壁厚度为 250mm~300mm,为钢筋混凝土结构,高度自-5.000 至 17.430m(相对标高)。为满足工艺上对垃圾池的封闭要求,将垃圾池与主厂房结构整体浇筑。厂房顶部多采用钢结构网架结

构,与主体结构柱采用铰接连接。

根据上述的结构特点,主厂房应属于框排架剪力墙结构。由于工艺要求,垃圾池设在厂房一侧,造成结构刚度分布不均匀,刚度中心与质量中心有较大偏离。地震作用下,结构会产生扭转效应,这对整栋建筑的抗震是一个很不利的影响因素。为保证此类结构在大震作用下的安全性,宜对此类结构进行弹塑性变形分析<sup>[2]</sup>。

文中采用中国建筑科学研究院开发的多层及高层建筑结构弹塑性静力、动力分析软件(PUSH&EPDA)对主厂房结构进行弹塑性静力推覆分析和“小震、中震、大震”条件下的动力时程分析。探讨结构在不同抗震设计水准上的安全性。

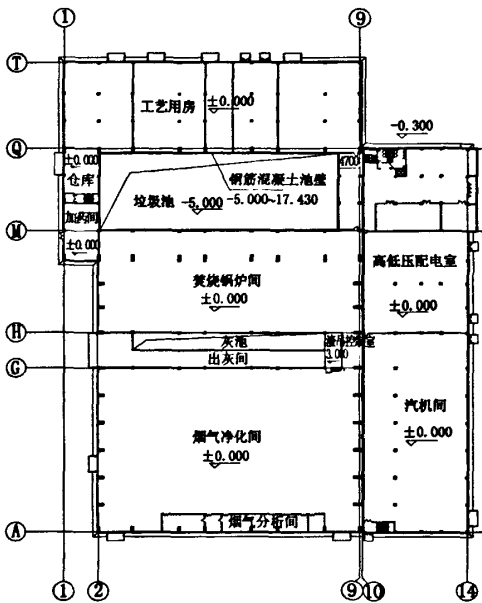


图1 垃圾焚烧发电厂首层平面布置图

Fig.1 First floor disposal drawing of municipal solid waste incineration and power generation plant

鉴于汽机部分与锅炉部分设有防震缝,故建模计算时可分开建模。汽机部分结构较为规则,文中不做进一步分析,这里仅对结构形式较为复杂的垃圾池、锅炉及烟气净化部分,即①~⑨轴线部分进行分析。结构建模采用9个标准层,屋顶钢结构网架结构采用平屋顶假设,将与屋面连接的柱顶设为铰接,以便将屋顶的荷载传递给主体结构。

## 2 弹性阶段地震分析

弹性计算采用多、高层建筑结构三维分析设计软件 SATWE 设计计算,并通过基于广义协调技术的复杂多、高层分析软件 PMSAP 进行校核,初步选型时,结构采用单梁结构,计算振型数为42个。结果反映,地震作用下,结构以扭转效应为主,这将严重影响结构在地震作用下的安全。为改善结构的受力特性,减小结构的扭转效应,结构方案优化时,将锅炉及烟气净化部分厂房周围的单梁改为双梁。采取这样措施的目的主要是增大厂房空旷部分的刚度,以减小结构在地震作用下的扭转作用,同时还可以有效减小框架梁与框架柱间的偏心,从而改善结构受力特性。

优化后的计算模型,进行结构抗震整体性分析,结果反映结构的抗震特性得到了明显的改善。地震作用下结构的前两个振型均为平动,有效质量系数也均能够达到90%以上。

楼层层间最大位移角: SATWE 计算结果为 1/984; PMSAP 计算结果为 1/1 032, 产生在第⑦标准层。计算结果均满足规范框架—抗震墙弹性层间位移角 1/800 的要求。两种程序计算结果较接近,说明计算是可信的。

从弹性位移计算结果上分析,部分楼层在某些工况条件下,层最大位移与层平均位移比(或层间最大位移与平均位移比)超过规范规定的 1.5 的限值<sup>[2]</sup>。按照《抗震规范》要求,在高烈度地区,宜对该类不规则结构进行罕遇地震作用下弹塑性变形分析,以确定在大震作用下结构的安全性。

## 3 弹塑性变形分析

### 3.1 弹塑性静力推覆分析(Push-over 分析)

弹塑性静力推覆分析原理。Push-over 方法是近年来在国内外广泛应用的一种结构抗震能力评价的新方法,这种方法从本质上说是一种采用静力模拟地震侧向作用力的非线性计算方法,通过反复对结构施加侧向力,使结构分批次产生塑性铰,从而发现结构的薄弱层,并且根据结构的变形情况分析结构的抗震性能<sup>[3]</sup>。

计算中,钢材认为是理想弹塑性模型,采用双折线的弹塑性本构关系,混凝土材料受压本构关系采用三折线滞回本构关系<sup>[4]</sup>。

将每个不同的结构自振周期及其对应的地震影响系数(能力曲线)和场地的反映谱线(需求谱线)同时绘在同一个图形中,通过能力曲线和需求谱曲线之间的关系评价结构的抗震能力。若能力曲线和需求谱曲线交点所对应的层间位移角不超过规范限值,变形验算即为通过<sup>[5]</sup>。

本工程通过 Push - Over 计算,绘制出罕遇地震作用下的能力曲线与需求谱线如图 2 所示。从图中可以看出,能力曲线与需求谱线相交,交点对应的层间最大位移角为 1/182,小于规范规定的框一剪结构弹塑性层间位移角限制 1/100 的要求,说明结构在 8 度(0.2g)罕遇地震作用下结构整体能够保持直立,即保证“大震不倒”。

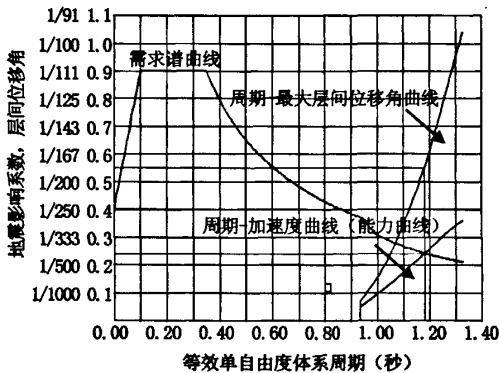


图2 防侧塌验算图

Fig.2 Checking computations drawing of preventing collapsibilit

### 3.2 弹塑性动力时程分析

弹塑性动力时程分析原理。结构弹塑性动力时程分析是将建筑物作为弹塑性振动系统,直接输入地面地震加速度记录,对运动方程直接积分,从而获得计算系统各质点的位移、速度、加速度和结构构件地震剪力的时程变化曲线。通过计算还可以分析出结构的薄弱层和构件塑性铰位置。所以这种分析方法能更准确而完整地反映结构在强烈地震作用下的变形特性,可以认为,它是改善结构抗震能力、提高抗震设计水平的一项重要措施<sup>[6]</sup>。本文采用 EPDA 对结构进行弹塑性时程分析,梁、柱等一维构件采用纤维束模型模拟,剪力墙采用考虑弹塑性变形的弹性墙单元模型进行模拟。钢材认为是理想弹塑性模型,采用双折线的弹塑性本构关系,混凝土材料受压本构关系采用三折线滞回本构关系。

地震波选择。地震波的选择对计算结果的影响较大,不同的地震波分析的结果可能有较大的差别。因此在选择地震波时,应使输入的地震波

在频谱特征性、有效峰值和持续时间上与工程的实际条件相符。频谱特征性由场地类别和地震分组确定,即应使选择的地震波符合实际计算的场地和地震分组;有效峰值可按规范取值,要使每条记录在统计意义上符合场地特征谱线;持续时间一般为结构基本周期的 5 ~ 10 倍。

实际进行分析时,为了防止计算的偶然性,一般选择不少于符合场地类别和地震分组的两组实际强震记录 and 一组人工模拟加速度时程曲线,先进行弹性时程分析,若每条地震波计算得到的底部剪力不小于振型分解反应谱法计算结果的 65%,多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值不小于振型分解反应谱法计算的 80%,可以认为选择的地震波能够满足计算要求<sup>[2]</sup>。本工程按照上述原则选择三组地震波进行计算,即 RH3TG035(人工波);TH2TG035(天然地震波);TH4TG035(天然地震波)。特征周期  $T_g = 0.35s$ 。8 度(0.2g)地震作用下,多遇地震(小震)、设防地震(中震)、罕遇地震(大震)作用下峰值加速度的取值分别采用  $70cm/s^2$ 、 $196 cm/s^2$ 、 $400 cm/s^2$ 。振动持续时间 20s。

计算结果分析。通过计算得到三个地震波,在多遇地震、设防地震、罕遇地震作用下层间位移角变换曲线如图 3 所示。从结果分析,三组地震波在不同的峰值加速度条件下结构的薄弱层为第 ⑥标准层。多遇地震计算层间位移角平均值为 1/1758,小于 1/800 限值,满足规范要求弹性层间位移角的要求;罕遇地震作用下,计算的平均层间位移角为 1/187,小于规范要求 1/100 限值,说明结构在 8 度(0.2g)罕遇地震作用下,结构整体能够保持直立,即保证“大震不倒”,这与弹塑性静力推覆分析的结果一致。

图 4 为位于厂房 ⑩轴代表性的一幅框架破坏图。从图中可以看出:结构在多遇地震作用下,结构仍能保持弹性状态,没有构件发生塑性变形,说明在“小震”条件下结构没有发生破坏;设防地震作用下,垃圾池有 1% ~ 3% 面积上出现了裂缝,2% ~ 4% 的框架梁在梁端出现塑性铰,框架柱未发生塑性变形,说明在“中震”作用下,结构发生了局部破坏,但是破坏的规模有限,主要竖向承重构件没有破坏,经过加固修缮后可以继续使用;在罕遇地震作用下垃圾池有 6% ~ 10% 面积上出现了裂缝,主要集中在第 ②标准层,5% ~ 7% 的框架梁,梁端出现塑性铰,仅有 2% ~ 3% 的框架柱在梁

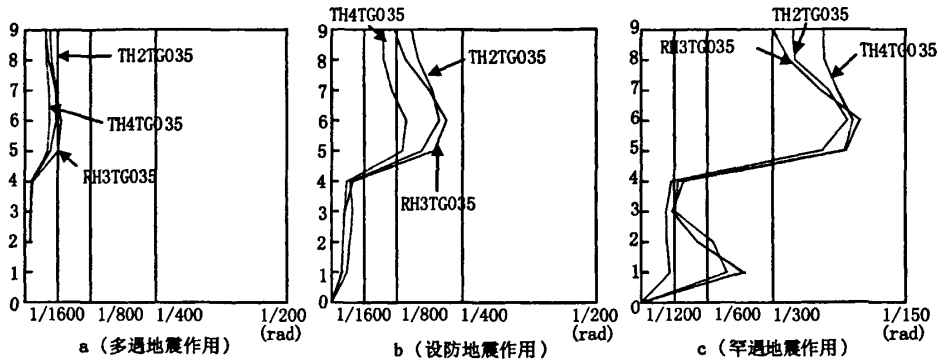


图3 地震作用下层间位移角  
Fig. 3 Displacement angle under earthquake

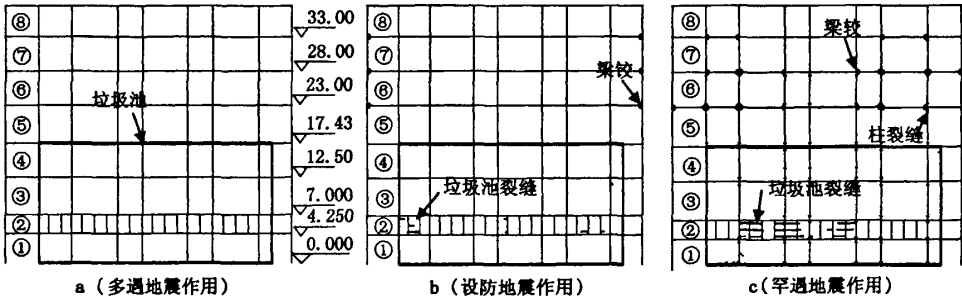


图4 地震作用下结构的破坏图  
Fig. 4 Demolishment drawing under earthquake action

柱交接位置出现塑性铰,而多数竖向构件未破坏,说明在“大震”下结构仍能够保持直立。从破坏位置上分析,“大震”作用下垃圾池的破坏较为严重,其主要原因是该部位的刚度较大,吸收了大部分的地震能量所致。

#### 4 结论

1) 该种结构形式的厂房在 8 度(0.2g)地区,采取适当的加强措施,能够满足我国抗震设计三阶段设计标准的要求。

2) 根据以往设计经验和本次分析,对于该类结构,在框架柱之间采用双梁结构,可减小框架梁与框架柱的偏心,并且对平衡结构的刚度,减小地震作用下结构的扭转有较明显的效果。

3) 弹性分析中结构层最大位移与平均位移超过了 1.5 的限值,分析原因,主要由于垃圾池偏于厂房一侧,造成结构在①~⑤标准层发生扭转所致。

4) 由于⑤、⑥标准层的刚度与下部垃圾池部

分的刚度相差较大,造成该两层在强震作用下,多根柱在梁与柱交界处出现裂缝,因此,设计中应加大该两层柱加密区的箍筋配筋量,减少由于地震剪力造成的柱的破坏。

#### 参考文献:

[1] 时丽,张成. 垃圾焚烧发电技术在我国的应用及发展趋势[J]. 可再生能源, 2005, (2): 63-66.  
 [2] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范[S].  
 [3] 邓胜江,汪梦甫. 高层建筑结构几种抗震弹塑性分析方法的比较[J]. 湖南文理学院学报, 2004, (2): 63-66.  
 [4] 吕西林,周德源,李思明,等. 建筑结构抗震设计原理及实例[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.  
 [5] 莫庸,钱铭,安炳,等. 某高层工业框架结构弹塑性分析及性能化抗震加固设计[J]. 工程抗震及加固改造, 2006, (5): 91-98.  
 [6] 张鹏,周德源. 多层框架结构弹性和弹塑性动力响应比较分析[J]. 地震工程与工程振动, 2007, (5): 40-47.

(责任编辑 刘存英)