

文章编号:1007-6492(2002)01-0028-03

# 火电厂冷却塔的可靠性分析与鉴定

孙增寿<sup>1</sup>, 张浩华<sup>2</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州市市政工程管理处, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 双曲线型冷却塔是电力工业中的重要构筑物, 它的可靠程度直接关系到电力生产的稳定与安全. 结合某火电厂双曲线型冷却塔的可靠性鉴定, 根据双曲线型冷却塔的结构特点, 建立了由梁元和壳元组成的结构模型, 采用有限元方法对双曲线型冷却塔在各种荷载组合作用下的受力进行了分析计算, 提出了这类工业构筑物的可靠性分析与鉴定方法. 分析计算结果表明, 这种方法系统、全面, 符合结构实际, 同时可以考虑结构损伤对结构受力性能的影响, 并已应用于工程实际.

**关键词:** 冷却塔; 结构可靠性; 鉴定  
**中图分类号:** TU 312      **文献标识码:** A

## 1 工程概况

某火电厂冷却塔建于 1973 年, 高 70 m, 底径 56.6 m. 底部人字柱部分采用现浇钢筋混凝土结构, 混凝土强度等级为 C28, 纵筋为 8Φ22 的Ⅲ级钢筋, 箍筋为 Φ8@200 的螺旋箍. 塔壁与水冷壁支架为装配式钢筋混凝土结构, 双曲线型塔壁由 31 层钢筋混凝土大型板装配组成, 混凝土强度为 C28. 塔壁和立柱之间由高 1.5 m 的环梁过渡.

## 2 结构检测与检测结果

### 2.1 结构现状

冷却塔经过近 30 年的使用, 由于雨水和塔内壁防潮不良而导致的循环水渗漏影响, 塔壁预制板块纵、横肋中钢筋严重锈蚀, 沿纵肋和横肋方向顺主筋出现较大裂缝, 有的地方已出现混凝土保护层脱落. 如爬梯左侧第 1~2 层、第 4~5 层、第 5~6 层处横肋混凝土保护层严重脱落, 脱落、锈蚀长度达 500 mm, 沿钢筋周长已经全部锈蚀, 钢筋表面明显酥裂、膨胀和脱落, 粘结力完全丧失; 第 2 层多处纵肋混凝土保护层也严重脱落, 钢筋裸露, 混凝土与钢筋由于钢筋严重锈蚀而脱离, 粘结力已完全丧失.

### 2.2 结构混凝土强度测试

根据结构现状及工作条件, 采用超声一回弹综合法检测混凝土强度<sup>[1]</sup>. 依据《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02:88), 抽取塔

壁预制板块和人字柱共 52 个构件进行强度检测. 结构混凝土强度测试计算结果为: 塔壁预制板块的 $f_{cu,c}=24.8\text{ MPa}$ ; 人字柱的 $f_{cu,c}=29.0\text{ MPa}$ .

### 2.3 结构混凝土碳化深度测试

混凝土碳化深度是影响钢筋混凝土结构耐久性的主要指标<sup>[2]</sup>, 采用钻孔滴入 1%酒精酚酞溶液的方法测定混凝土的碳化深度. 在结构上均匀选取 52 个构件进行测试. 结果表明, 混凝土存在不同程度的碳化, 平均碳化深度为 9.8 mm.

### 2.4 钢筋锈蚀程度测试

在结构上选取 50 余个钢筋锈蚀程度测试点, 敲掉已经开裂的混凝土保护层(在钢筋已经暴露的部位直接测量), 首先用钢锉沿环向清除锈蚀的钢筋表层, 然后用游标卡尺量测锈蚀后的钢筋直径. 测试结果显示: Φ25、Φ20 的钢筋已分别锈蚀至 Φ19.8 和 Φ18.0.

## 3 冷却塔结构内力计算

为了确定双曲线型冷却塔结构在各种情况下的内力分布, 采用美国著名的 REI 公司推出的结构分析与设计软件 STAAD/Pro 对冷却塔进行计算.

### 3.1 结构系统建模

根据冷却塔的实际结构选取结构模型. 在建模过程中, 选择梁元和壳元两类构件模型, 将冷却塔的人字型支撑选择为梁元, 塔身部分选择为壳元, 结构模型如图 1 所示. 考虑到约 1%的节点和

收稿日期: 2001-06-28; 修订日期: 2001-09-01

基金项目: 河南省科技攻关项目(981140302)

作者简介: 孙增寿(1963-), 男, 河南省陕县人, 郑州大学副教授, 硕士, 主要从事结构工程方面的研究.

板蚀损、开裂严重,根据受损构件刚度计算结果,在计算程序中将评为 D 级的受损单元的刚度乘以 0.9 的折减系数进行适当弱化.

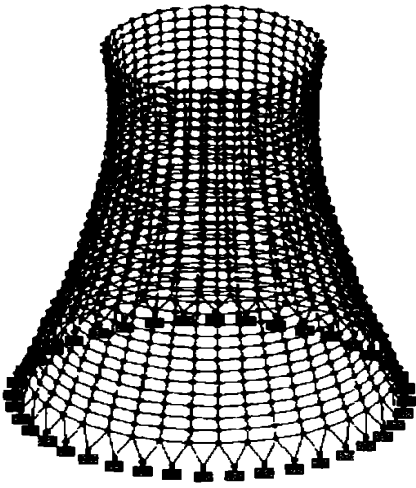


图 1 结构分析模型

Fig. 1 The model of structure analysis

3.2 冷却塔的作用

冷却塔所受的作用包括:结构自重、风荷载、温度作用及地震作用.考虑下列几种作用组合方式:组合 1 =  $\gamma_G S_{Gk} + 1.4 S_{wk}$ ;组合 2 =  $\gamma_G S_{Gk} + 1.3 S_{Egk}$ ;组合 3 =  $\gamma_G S_{Gk} + 1.4 S_{tk}$ ;组合 4 =  $\gamma_G S_{Gk} + 1.3 S_{Egk} + 0.35 S_{wk} + 0.6 S_{tk}$ .组合式中,  $\gamma_G$  为重力荷载分项系数,对于结构倾覆、滑移和拉力控制的工况采用 1.0,对于压力控制的工况采用 1.2;  $S_{Egk}$  为地震荷载标准值效应;  $S_{tk}$  为计入徐变系数的温度作用标准值效应;  $S_{wk}$  为计入风振系数的风荷载标准值效应,按当地的基本风压  $25 \text{ kN/m}^2$ ,并根据双曲线型冷却塔的特殊体型和实际高度进行修正,得到冷却塔的风荷载标准值.

采用振型反应谱法进行地震作用计算.按我国 1990 年颁布的地震烈度设防区划的规定,双曲线型冷却塔地处基本烈度 7 度区,同时考虑 II 类场地条件,近震.

3.3 主要计算结果

利用有限元方法,计算得到冷却塔在上述各种荷载组合条件下的最大内力及结构动力特征.计算结果显示,弱化单元刚度对结构动力特性、结构内力和变形均有影响,但影响程度取决于受损单元的位置、数量和受损程度.本文所述工程的受损单元主要集中在塔身底部 1~7 层,对高阶振型和壳元的内力有一定影响,最大影响幅度达 3%.

板单元的最大内力:  $M_x = 0.59 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$ ,  $M_y = 1.312 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$ ;底层人字柱的最大内力:  $N_{\max} = 366.411 \text{ kN}$ ,  $M = 4.319 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ;  $N = 162.671 \text{ kN}$ ,  $M_{\max} = 7.438 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,  $V_{\max} = 12.683 \text{ kN}$ .

结构特征值为:  $T_1 = 1.658$ ,  $T_2 = 1.787$ ,  $T_3 = 1.854$ ,  $T_4 = 2.013$ ,  $T_5 = 2.105$ ,  $T_6 = 2.273$ .

4 冷却塔的分析鉴定

目前我国已经颁布了《工业厂房可靠性鉴定标准》<sup>[3]</sup>和《民用建筑可靠性鉴定标准》<sup>[4]</sup>,但火电厂双曲线型冷却塔不是一般的工业厂房和民用建筑,属于特种结构.对于这种特殊结构我国还没有制定专门的鉴定标准,所以在鉴定评估中,参照《工业厂房可靠性鉴定标准》和《民用建筑可靠性鉴定标准》(以下简称鉴定标准),在冷却塔上部结构现场调查、资料分析、结构实测和计算分析的基础上,结合双曲线型冷却塔的结构特点进行鉴定评估.钢筋混凝土结构的评定可以分为单元、项目和子项三个层次.

4.1 子项评定

4.1.1 承载能力评定

根据实际测定的结构的材料强度、材料老化碳化程度以及钢筋的锈蚀情况,按蚀损后的有效截面面积和钢筋面积,分别对冷却塔的人字型底部支柱和塔身部分进行结构承载能力计算.采用现行《混凝土结构设计规范》(GBJ 10-89)所给出的计算表达形式,计算实际材料性能情况下结构的抵抗能力,并与有限元法计算的结构上的作用效应进行比较,即  $\gamma_u = R / (\gamma_0 S)$ .其中:  $\gamma_u$  为承载能力鉴定系数;  $R$  为根据实测结果计算出的结构抗力;  $S$  为构件的作用效应;  $\gamma_0$  为结构重要性系数.

计算结果表明,人字柱的承载能力由受压承载力决定:  $R / (\gamma_0 S) = 4.78$ .

塔身钢筋混凝土板的承载能力由抗弯承载力决定:  $R / (\gamma_0 S) = 1.24$ .

从钢筋混凝土人字柱和塔身钢筋混凝土板的承载能力来看,结构目前仍属于 a 级.

4.1.2 连接和构造

冷却塔塔身为钢筋混凝土装配结构,由 31 层钢筋混凝土大型板装配组成,所以连接对于冷却塔结构非常重要.而冷却塔塔壁各个大型板的连接处,主要在塔身底部的 1~7 层受腐蚀较重,特别是在冷却塔的西北部分.据统计,近 1% 的节点处有严重腐蚀现象,出现混凝土保护层崩落,内部钢筋外露,钢筋腐蚀最严重的也在这些节点.根据鉴定标准中对混凝土构造连接子项的评定等级,这些受腐蚀严重区域的板件连接,应该评定为 c 级.其他连接部位也有一些侵蚀现象(大约有 2%),评定为 b 级.

人字形支柱、基础及上部环梁均为现浇,连接

锚固可靠,但支柱的配筋不符合现行《混凝土结构设计规范》的抗震构造要求,所以将人字柱的构造子项评定为b级.

4.1.3 混凝土结构或构件裂缝

混凝土结构或构件裂缝子项的评定包括两大类:一类是构件受力主筋处非腐蚀产生的裂缝;另一类是由于钢筋腐蚀产生的顺筋裂缝.

对冷却塔的实际勘察表明,冷却塔没有出现由于受力产生的裂缝,所以荷载裂缝项评定为a级.但塔身钢筋混凝土大型板板肋部分存在沿板肋方向的裂缝,有的混凝土保护层已经脱落,这些钢筋锈蚀膨胀产生的顺筋裂缝,已有一部分大型板肋处裂缝宽度超过2 mm,所以对于局部区域(约占1%)评定为d级;还有部分钢筋混凝土大型板(约1%),除了板肋出现沿钢筋的顺筋裂缝外,在板内也出现了宽度小于2 mm的顺筋裂缝,所以这部分板件评定为c级.冷却塔的人字支柱,由于采用了有效的防腐处理措施,没有出现受力裂缝和沿柱子纵向的裂缝,所以评定为a级.

4.2 构件的评定

根据冷却塔子项的评定结果,按照鉴定标准对混凝土构件的评定等级的要求,冷却塔支架部分的评定等级为B级.对于塔身部分,由于裂缝的评定等级比承载能力评定等级低三级,比构造部分低一级,所以塔身部分的评定等级为C级.

4.3 冷却塔整体结构的综合评价

根据冷却塔主要构件的评定结果,冷却塔的可靠性评定等级为三级.这说明冷却塔不满足国家现行规范的要求,结构单元的可靠度降低幅值

达10%~20%,应采取加固补强措施,个别项目应立即采取措施.

5 结论

(1) 经过近30年的使用,塔身混凝土受侵蚀严重,局部节点已经出现了较严重的混凝土崩裂、受力钢筋外露现象,受力钢筋严重锈蚀;有的板肋沿整个肋方向混凝土保护层几乎全部脱落;在大型板的腹部,也有一些板出现了裂缝,并有钢筋外露和渗水现象.前期对于冷却塔的加固,已有相当一部分脱落或出现新的裂缝.由于加固所用混凝土、砂浆当前性能较差,变得松软,给整个冷却塔的寿命增加了隐患.

(2) 现场实测表明,塔身混凝土板的强度比原设计值下降34%,受腐蚀部分钢筋的强度下降达37%,混凝土平均碳化深度为9.8 mm.

(3) 冷却塔的有限单元法分析和可靠性鉴定评估表明:冷却塔目前还可以承受现在的设计荷载,但构造上不能满足现行GB 50191-93的要求;塔身结构有些板块已经完全不满足结构规范的设计要求,一些板块被评定为d级,整体评价为三级,应采取一定的加固补强措施.

参考文献:

[1] 湖南大学. 建筑结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.  
[2] 朱伯龙. 建筑改造工程学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.  
[3] GBJ 144-90, 工业建筑可靠性鉴定标准[S].  
[4] GB 50292-1999, 民用建筑可靠性鉴定标准[S].

The Analysis and Appraisal of Hyperbola Cooling Tower of Power Plant

SUN Zeng-shou<sup>1</sup>, ZHANG Hao-hua<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Municipal Engineering Administration, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The hyperbola cooling tower is an important structure in power industry. It directly affects the stability and reliability of power system. Combining the reliability appraisal of hyperbola cooling tower of certain power plant, bases on the structural characteristics of hyperbola cooling tower, this paper has established the structural pattern making of beam units and shell units. Using finite element method, the effect in some load working is analyzed and calculated. And the method of reliability analysis and appraisal of the same structures have been put forward. The calculation results show that the method is systematic and comprehensive and corresponds to the reality of structures. And for this method the structure damages may be taken into considerations. And the method has been applied in real projects.

**Key words:** cooling tower; reliability of structure; appraise