

# 基于损伤塑性模型的核电站超大型 冷却塔损伤分析

刘立威, 马兆荣, 刘东华

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 以非线性有限元方法为基础, 采用混凝土损伤塑性模型, 对风荷载作用下核电站超大型冷却塔进行结构非线性分析, 得到了冷却塔结构塑形损伤的发生及演变规律。通过分析发现, 核电站超大型冷却塔在极端风荷载的作用下, 塔身塑形损伤首先产生在塔顶刚性环处, 随着荷载的增加, 迎风面二分之一塔高处出现平行塑性损伤带并呈 45° 向下发展, 直至塔体丧失承载能力。该研究成果对核电站冷却塔设计及安全评估有重要指导意义。

**关键词:** 核电站超大型冷却塔; 非线性; 塑性损伤;

**中图分类号:** TU347

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2015)S1-0105-03

## Damage Analysis of Nuclear Power Plant Super Cooling Tower Based on Damage Plastic Model

LIU Liwei, MA Zhaorong, LIU Donghua

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Based on nonlinear FEM method, the author adopt concrete damage plastic model, analyze the structure nonlinear behavior in different load cases, and obtain the occurrence and development of the plastic damage of cooling tower. The analysis reveals that the damage of cooling tower occur at the top firstly and some paralleling damage zones occur at the height of half the tower which will develops 45 degrees downward. The development of the damage will continue until the cooling tower losing bearing capacity. The results is very meaningful for the design of nuclear power plant cooling tower as well as the safety evaluation.

**Key words:** nuclear power plant super cooling tower; nonlinear; plastic damage

核电站超大型冷却塔是内陆核电站循环水冷却系统的重要构筑物。冷却塔一般采用双曲线型结构, 高度一般高于 200 m, 是一个大体量、受力复杂的高耸空间薄壁结构。

已有资料表明, 在强震、飓风等极端工况下, 冷却塔支柱或者塔筒的应力水平会超过材料的比例极限, 进入非线性工作状态<sup>[1]</sup>。但是目前工程界常规的冷却塔计算主要是针对燃煤机组发电厂的冷却塔, 一般只进行线弹性分析, 较少进行结构材料非线性方面的分析。

鉴于此, 本文中笔者以某核电站超大型冷却塔为例, 采用混凝土损伤塑性模型(CDP 模型),

针对极端风荷载作用下超大型冷却塔的非线性力学行为进行分析, 定量的评价了在逐级增大风荷载作用下, 超大型冷却塔塔体混凝土损伤的发生、开度及演变规律, 得出了一些有价值的结论, 对核电站超大型冷却塔的结构设计及安全评价有借鉴意义。

### 1 混凝土损伤塑性模型

混凝土材料的一个显著的特点是受压与受拉性能存在显著的力学差异。针对此特点, 规范及很多研究成果给出了不同的混凝土本构模型。笔者认为, 实际分析中适用性较好的模型是混凝土损伤塑形模型。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中给出了混凝土在双轴加载、卸载条件下的本构关系曲线, 并且引入受压损伤演化参数及受拉损伤演化参数来模拟混凝土材料的刚度及强度退化

收稿日期: 2015-12-01

作者简介: 刘立威(1985), 男, 辽宁丹东人, 工程师, 一级注册结构工程师, 硕士, 主要从事火电厂、核电站水工结构设计与分析工作(e-mail)liuliwei@gedi.com.cn。

现象<sup>[2]</sup>。此外，张劲<sup>[3]</sup>等对混凝土损伤塑性模型本构关系参数的确定方法进行了研究，采用各等级混凝土本构关系参数模拟结果与规范曲线的对比，验证 CDP 模型参数的正确性。

CDP 模型用来评价混凝土损伤程度的一个重要参数是损伤演化参数，或者称为损伤因子，其受拉时的关系式<sup>[2]</sup>：

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^5]x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x}x > 1 \end{cases}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \quad (1)$$

式中： $\alpha_t$  为混凝土单轴受拉应力应变曲线下降段的参数值，按规范取值； $\varepsilon_{t,r}$  是混凝土单轴抗拉强度代表值相应的峰值拉应变，按规范取值；

其受压时的关系式：

$$d_c = \begin{cases} 1 - \rho_c \frac{n}{n-1+x^n}x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c(x-1)^2+x}x > 1 \end{cases}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \quad (2)$$

式中： $\alpha_c$  为混凝土单轴受压应力应变曲线下降段的参数值，按规范取值； $\varepsilon_{c,r}$  是混凝土单轴抗压强度代表值相应的峰值拉应变，按规范取值。

损伤因子可作为评价混凝土开裂程度的参数，当损伤因子达到 1.0 时，说明混凝土材料刚度完全退化，即裂缝完全产生。

本文分析时所采用的混凝土材料的单轴应力—应变关系如图 1 和图 2 所示：

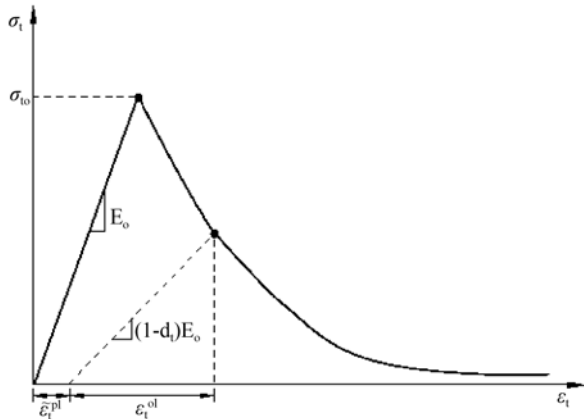


图 1 单轴拉伸应力应变曲线  
Fig. 1 Uniaxial Tensile Stress-Strain Curve

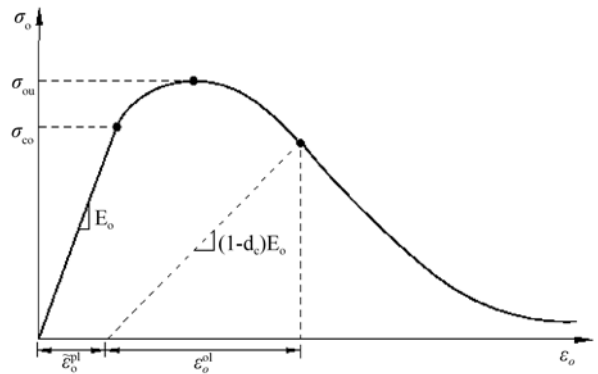


图 2 单轴压缩应力应变曲线  
Fig. 2 Uniaxial Compressive Stress-Strain Curve

## 2 工程概况

某核电站拟建冷却塔高 235 m，±0.00 m 处直径 182 m，进风口高度 18 m，最大壁厚 2 000 mm，最小壁厚 380 mm。冷却塔支柱采用人字形支柱，共 56 对。冷却塔环形基础坐落于天然微风化岩层上。

### 2.1 风荷载

本工程厂址的基本风压为 0.9 kPa。风荷载体型系数参考《火力发电厂设计规范》(DL/T 5339—2006)中给定的风载体型系数公式。考虑到设计塔形在基本风压的作用下(即 1.0 倍设计风荷载)不会发生塑形损伤，为了更好的研究风载作用下冷却塔的损伤规律，本次分析中采用线性增大风荷载的形式，直到冷却塔损伤完全发展为止。

### 2.2 材料参数

本次分析中冷却塔各结构部位均采用 C40 混凝土，其静态物理力学参数见表 1。

表 1 混凝土静态物理力学参数

Table 1 Static Physical and Mechanical Parameters			
混凝土	$E(N/mm^2)$	$f_c(N/mm^2)$	$f_t(N/mm^2)$
C40	$3.35 \times 10^4$	21.1	1.80

### 2.3 分析模型

采用通用有限元程序建模，冷却塔风筒、刚性环、支柱、环板基础全部采用实体单元，单元数量共计 165 360 个。冷却塔有限元模型见图 3。

## 3 计算结果

### 3.1 1.5 倍设计风载的结果

当施加的风荷载线性增大到 1.5 倍设计风压

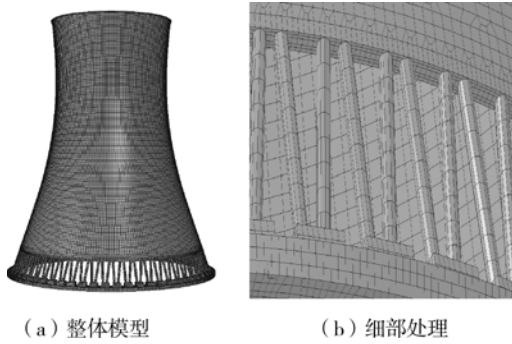


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model

时, 冷却塔的塑性损伤开始发生, 首个损伤出现在塔顶上环梁处, 与设计来风方向左右各呈 75 度, 损伤值约 0.6。塔体其他部位并未发生损伤。



图4 1.5 倍风荷载时损伤云图

Fig. 4 Cloud Chart of Damage Under 1.5 Times of Wind Load

### 3.2 2.0 倍设计风荷载的计算结果

随着风荷载继续增大至 2 倍的设计风荷载, 冷却塔的塔身开始出现水平平行的带状损伤, 位置在塔体高度的 1/2 处, 长度约为该高度圆周周长的 1/6, 伤损值。原上环梁的损伤由上至下发展, 长度约为塔体总高度 1/15。

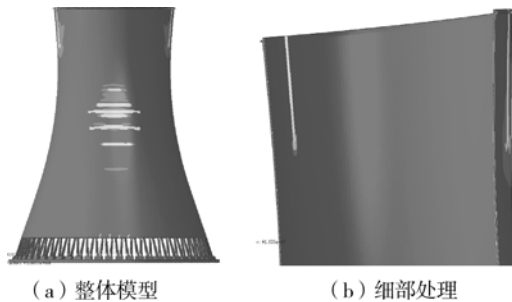


图5 2.0 倍风荷载时损伤云图

Fig. 5 Cloud Chart of Damage Under 2.0 Times of Wind Load

### 3.3 2.5 倍设计风荷载的计算结果

风荷载增大至 2.5 倍的设计风荷载时, 冷却塔的塔身损伤带增加, 原损伤带迅速发展。首先塔顶

上环梁的损伤带损伤值全部达到 1, 即可以认为该处混凝土已完全失效, 宏观裂缝产生。而塔身迎风面的每条水平损伤带呈 45 度向下发展, 其中中部区域的损伤值也达 1.0, 宏观裂缝形成。除此之外, 在冷却塔的下环梁与支柱交界处, 支柱的上端混凝土损伤值达 1.0, 总计约 10 对, 即这 10 对支柱已经丧失抗拉承载能力。

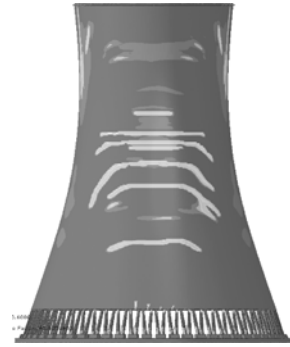


图6 2.5 倍风荷载时损伤云图  
Fig. 6 Cloud Chart of Damage Under 2.5 Times of Wind Load

## 4 结语

- 1) 引入损伤因子的混凝土损伤塑形模型, 可以很好的模拟混凝土开裂的力学行为。
- 2) 1.0 倍设计风荷载作用下, 塔身处于线弹性阶段, 未发生塑形损伤。
- 3) 随着风荷载持续增大, 首先塔顶刚性环处出现垂直向混凝土损伤, 说明环向拉应力超出材料抗拉极限; 继而在迎风面 1/2 塔高处出现多条水平向损伤带, 说明子午向拉应力超出材料抗拉极限。
- 4) 核电站的超大型冷却塔可参考以上结论进行加强设计, 适当增加上环梁处的环向刚度、环向配筋以及塔身 1/2 高度处的子午向配筋。

### 参考文献:

[1] 黄志龙. 大型冷却塔结构分析的若干问题[J]. 力学与实践, 2012, 34(5): 1-5.  
 [2] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范 [S].  
 [3] 张劲, 王庆扬, 胡守营. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证 [J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.

(责任编辑 郑文棠)