

强风作用下超大型冷却塔结构失效准则与 强健性分析

王飞天¹, 柯世堂¹, 王晓海², 吴鸿鑫³, 杨杰¹, 任贺贺¹

(1. 南京航空航天大学土木与机场工程系, 江苏 南京 211106; 2. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102; 3. 南京航空航天大学空气动力学系, 江苏 南京 210016)

摘要: 为分析超大型冷却塔在强风作用下的结构失效准则与强健性, 以超规范高度限值的世界最高 220 m 超大型冷却塔为例, 基于 ANSYS/LS-DYNA 平台建立结构三维有限元模型, 对其风致倒塌全过程进行数值仿真分析。研究了典型风速下位移响应与塔筒内力分布特性, 得出最不利响应发生的位置、数值及分布规律, 探讨了强风下塔筒结构“稳定-失稳-倒塌”全过程演化机理, 并提出了强风作用下冷却塔的失效准则。研究发现: 强风作用下超大型冷却塔结构强健性最薄弱部位为迎风面塔筒喉部区域, 与上风向夹角为 -70° 和 70° 子午向出现“褶皱变形”并导致塔顶局部结构失效破坏, 进而引起塔筒整体结构倾覆倒塌; 塔筒应变能密度呈现指数增长趋势, 以喉部相对水平位移与喉部直径百分比 $S > 1\%$ 、指数应变能密度和值破坏系数 $K \geq 0.3$ 作为结构失效判断准则可较好评价强健性指标。

关键词: 超大型冷却塔; 强风作用; 连续倒塌; 失效准则; 强健性分析

中图分类号: TU33⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)04-0739-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.04.010

引 言

结构强健性^[1]是由结构连续倒塌极限状态发展而来, 其基本含义是结构在施工和使用阶段不发生与初始破坏原因不相称的破坏。结合强风破坏属性和超大型冷却塔自身特征, 冷却塔结构强健性是指在强风环境下塔筒局部损伤失效不应导致整体结构倒塌破坏或屈曲失稳。1965 年英国渡桥电厂和 1973 年苏格兰阿德尔曼电厂大型冷却塔的风毁事件^[2-3]均是由局部风荷载过大使得塔筒局部受拉损伤, 进而引发整个塔筒结构强度破坏和屈曲失稳倒塌。事实上, 此类由局部损坏引发的整体风毁破坏均属于典型的结构强健性破坏形式。然而, 目前国内外冷却塔设计规范和已有研究文献鲜有引入强健性设计理念, 尤其是在强台风、雷暴风等极端风灾作用下超大型冷却塔的破坏极限承载力状态设计中。

针对大型冷却塔抗风稳定性研究, 目前国内外学者的研究主要集中在静风失稳^[4]、整体与局部屈曲失稳^[5-8]、施工全过程稳定性能^[9]、几何缺陷导致的失稳^[10]、不同气动措施对冷却塔稳定性影响^[11-12]等方面, 这些研究成果很好地解决了超大型冷却塔

在施工与运营期内塔筒抗风稳定性能的问题。针对结构强健性研究, 文献[13]为提升钢管混凝土拱桥体系承载能力, 从概念设计角度提出了拱桥桥面系和吊杆的强健性设计方案; 文献[14-16]针对不同形式的桥梁结构特点, 基于构件拆除计算方法, 确定桥梁的主要构件并系统研究了主要构件破坏对其余结构的静力和动力响应, 提出了增强桥梁强健性的措施; 文献[17]制定和实施了结构系统与基础设施网络性能标准, 建立了结构强健性概念及网络性能指标; 文献[18]针对中、下承式拱桥技术状况评定中的不足, 提出考虑悬吊桥面系强健性的技术状况评定方法更能反映桥梁的实际状况, 适应维护管理需求。尽管结构强健性研究已有开展, 但是国内外学者关于结构强健性的研究多针对于桥梁结构方向, 而对于大型冷却塔结构抗风强健性分析处于空白阶段。

鉴于此, 本文以已建成的世界最高的 220 m 山西潞安电厂大型冷却塔为工程背景, 基于 ANSYS/LS-DYNA 平台对超大型冷却塔进行精细化建模和风致倒塌全过程数值仿真。在此基础上, 探讨了强风作用下冷却塔结构抗风稳定性能, 分析了塔筒在强风作用下的变形、位移与内力响应规律, 揭示塔筒

收稿日期: 2020-01-13; **修订日期:** 2020-05-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878351, 52078251); 国家自然科学基金民航联合基金资助项目(U1733129); 国家自然科学基金 NSFC-RGC 国际合作研究项目(51761165022); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(fjj20190715)

结构“稳定-失稳-倒塌”全过程的强健性薄弱部位和连续性倒塌演化机理,最终提出超大型冷却塔在强风激励下的结构失效准则。

1 工程概况和有限元建模

1.1 工程概况

山西潞安电厂超大型冷却塔是目前世界已建的最高的冷却塔,主体结构由地基、环基、支柱和塔筒构成,塔高 220.0 m,进风口标高 30.75 m,喉部标高 165.0 m,底部直径 185.0 m,喉部直径 123.0 m,顶部出风口直径 128.1 m,塔筒壳体为指数变厚,最小与最大壁厚为 0.34 和 1.85 m,由 64 根 X 支柱与环板基础连接,X 型支柱采用矩形截面(尺寸为 1.70 m×1.00 m)钢筋混凝土结构,环板基础为宽 10.5 m,高 2.20 m 现浇钢筋混凝土结构。主要结构尺寸参数如表 1 所示。

表 1 超大型冷却塔主要结构尺寸

Tab. 1 The size characteristics of main components for super-large cooling tower

主要构件	离地高度/m	内壁半径/m	筒壁壁厚/m	混凝土等级
塔筒	30.50	82.77	1.85	C40
	65.43	73.85	0.50	
	102.18	66.45	0.46	
	139.42	61.19	0.38	
	217.33	64.26	0.59	
支柱	64 根断面为 1.7 m×1.0 m 的 X 型支柱			C45
环基	宽为 10.5 m,高为 2.20 m			C35

1.2 有限元建模

基于 ANSYS/LS-DYNA 平台建立该超大型冷却塔的三维有限元足尺模型,其中塔筒及顶部刚性环采用壳单元(Shell163),环向和子午向分别划分为 256 和 128 个单元;塔筒下部 64 根 X 型支柱均采用空间梁单元(Beam161),X 支柱上端与塔筒底部采用节点刚域耦合方式连接,支柱下端固支作为模型边界条件,如图 1 所示。

考虑到冷却塔塔筒环向与纵向配筋率较大,钢筋的强大拉接力使塔壁形成整体受力良好的联合体,此种联合体可将局部荷载“稀释”,在本构关系上塑性特点突出。因此,基于材料的塑性随动理论,塔壁与支柱均采用塑性随动材料模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC),在硬化模式上采用完全随动硬化模式,即 $\beta=0$;接触类型采用适应性较强的自动单面接触,材料摩擦系数设定为 0.25。具体参数如表 2 所示。

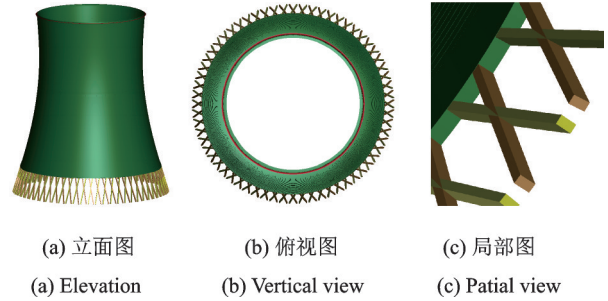


图 1 冷却塔结构有限元整体与局部模型图

Fig. 1 Finite element integral and local model diagram of cooling tower structure

表 2 钢筋混凝土模拟材料参数

Tab. 2 Material parameters of the reinforced concrete

参数	数值
材料弹性模量 E /GPa	3.25
材料屈服应力 σ_y /MPa	24
材料切线模量 E_t /GPa	0.15
材料密度 ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2500
泊松比 ν	0.2
硬化参数 β	0
失效应变 ϵ_f	0.3

1.3 动力特性分析

图 2 给出 ANSYS/LS-DYNA 与文献[19-21]中已有的超大型冷却塔模型前 100 阶自振频率随振型阶数变化对比曲线。前者采用显式单元 Shell163 和 Beam161 建立冷却塔模型,后者采用隐式单元 Shell63 和 Beam188 建立冷却塔模型。对比发现两种建模方法下自振频率趋势相同,大致呈线性增长,0-60 阶范围内两种计算结果基本一致,随着阶数的增长二者的差异有所增大,第 100 阶自振频率仅相差 4%;自振频率分布密集,基频仅为 0.58 Hz,前 50

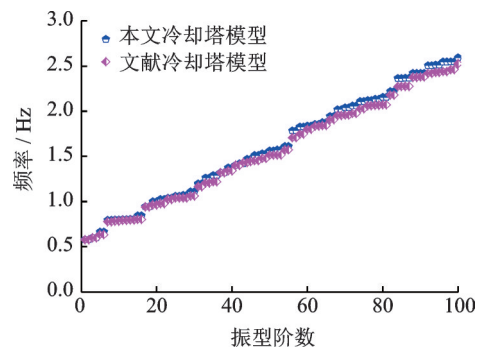


图 2 超大型冷却塔自振频率分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of natural frequency distribution of super large cooling tower

阶振型频率集中分布在 0.58-1.56 Hz 之间,说明 ANSYS/LS-DYNA 超大型冷却塔有限元模型具有一定的有效性。

图3给出冷却塔结构前100阶典型模态振型图,分析发现塔筒振型在环向和子午向差异较大,随着阶数增大,环向和子午向谐波数显著增加;低阶振型

子午向呈现1-3个谐波,环向呈现6-12个谐波,且多以塔顶振动为主。

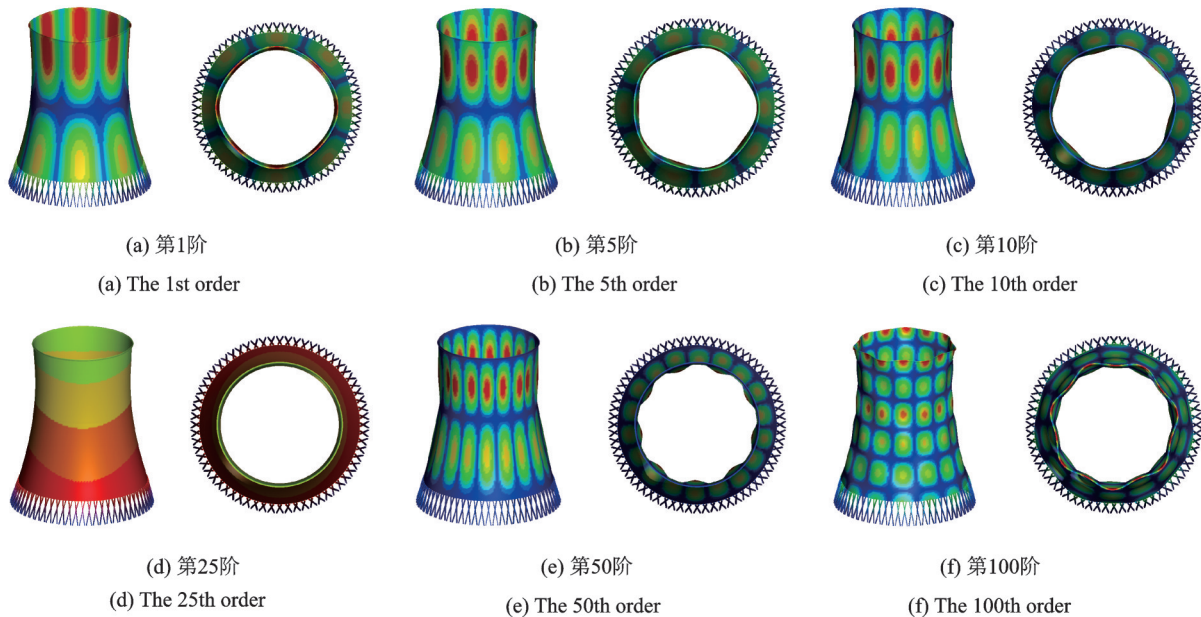


图3 超大型冷却塔典型模态振型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of typical modal shapes of super large cooling towers

2 风致响应分析

该超大型冷却塔平均风压系数按光滑塔取值,地貌类型为B类,设计基本风速为23.7 m/s。以-0.5的内压系数考虑塔筒内吸力效应^[22],以10 m高度处25 m/s的初始风速为基础进行逐级加载,加载风速步长为5 m/s,时程分析步长为0.5 s。大型冷却塔在强风作用下,其结构的破坏形式是类似屈曲模态下的材料破坏,可将风荷载视为一种等效静风荷载。为了降低加载过程中的动力效应,防止出现类似冲击荷载的效应,将平均风压在20 s内线性递增形成时程分析输入所需的风荷载,再以点荷载加载到塔筒相应的加载点。

2.1 位移响应

图4分别给出25 m/s,50 m/s和75 m/s三种典型风速下塔筒顺风向位移三维图和最大位移时程曲线。分析可知三种典型风速只引起壳体的结构变形,冷却塔未发生倒塌;变形主要发生在与上风方向夹角-70°-70°的喉部区域,塔筒背风面变形较小;25和50 m/s风速下的塔筒最大位移均出现在迎风面喉部,随着壳体厚度的增加,喉部上、下变形逐渐减小;75 m/s风速下最大位移位置有所下降但依然出现在迎风面塔筒中上部;冷却塔塔筒在风荷载激励的初始阶段会出现外加瞬态激励引起的瞬态

振动,最大位移-时程曲线表现出明显的波动状态。风荷载作用5 s后,随着系统阻尼的影响,瞬态振动逐渐衰弱,最大位移-时程曲线趋于平稳,且最大位移分别为0.08,0.3和2.0 m,表明超大型冷却塔塔筒在风荷载的作用下处于稳定状态。

2.2 内力响应

图5和6分别给出了25,50和75 m/s三种典型风速下塔筒子午向应力三维等势线图和0°子午向应力随高度的变化曲线,图中正值表示拉应力,分析可知不同风速下的子午向应力三维等势线图具有对称性,分布模式相同,变化幅度不同,塔筒子午向应力随风速的增加而增大。0°子午向应力主要集中于塔体中下部,且三种风速下应力均未超过屈服应力,塔筒仍处于直立稳定状态;沿子午向高度,塔筒底部至中部应力较大,顶部应力较小,接近于零值;沿环向角度,0°-45°子午线应力为正,45°-110°应力为负,背风面110°-180°子午向应力为较小的正值。

3 强健性分析与失效准则

3.1 强健性分析

3.1.1 临界倒塌风速

首先,给出超大型冷却塔的结构强健性定义:冷却塔结构在承受强(台)风、雷暴风或龙卷风等极端事件时,局部构件的损伤失效或破坏不应导致塔筒

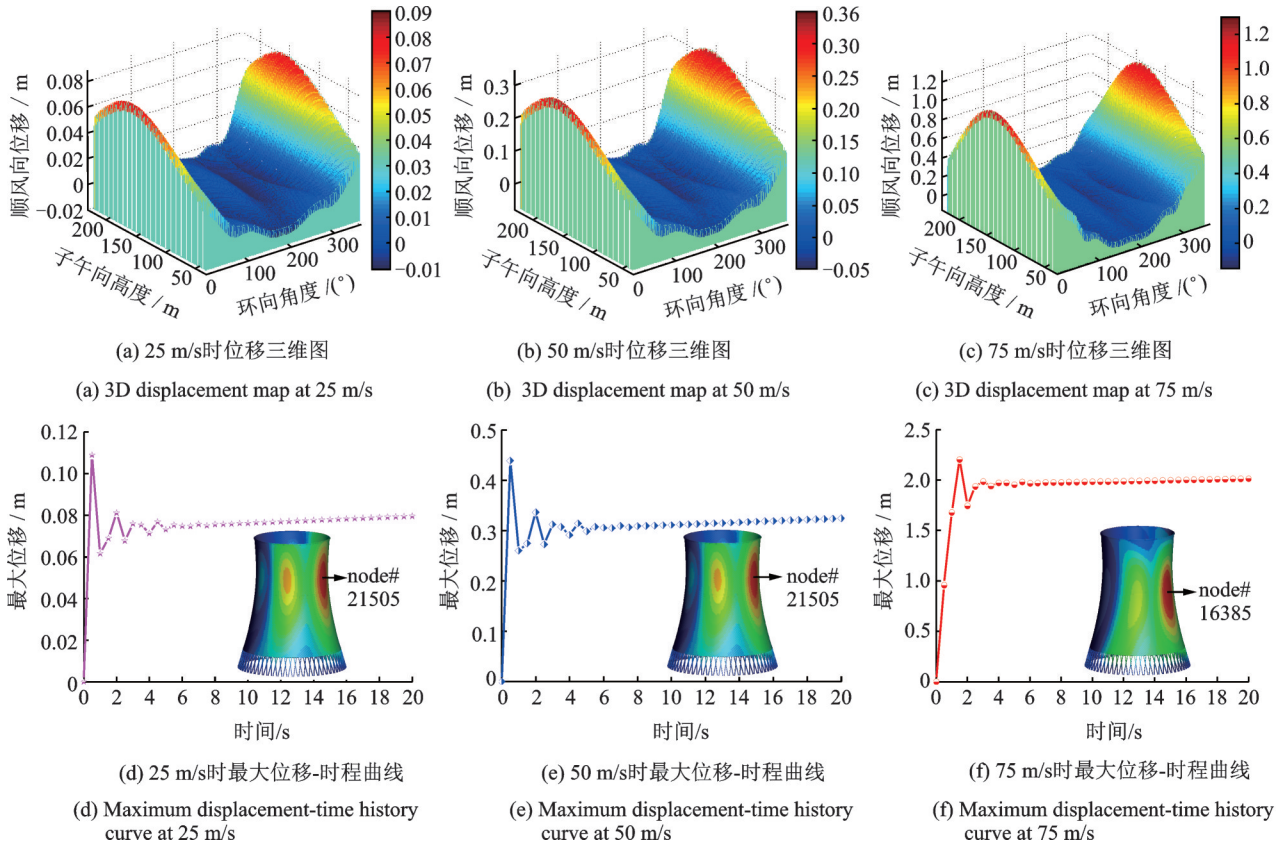


图4 不同风速下顺风向位移三维图与最大位移-时程曲线示意图

Fig. 4 3D Map of downwind displacement and diagram of maximum displacement time-history curve under different wind speed

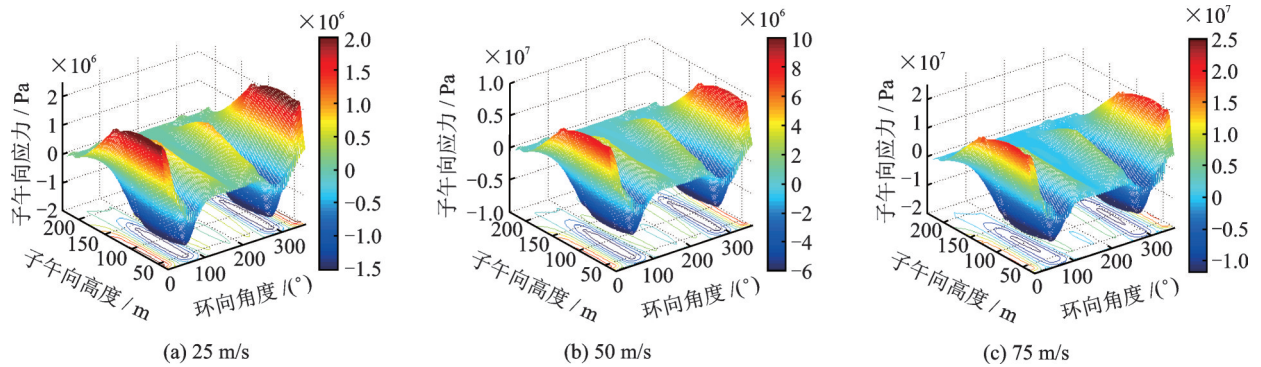


图5 不同风速下塔筒子午向应力三维等势线图

Fig. 5 Three-dimensional isopotential diagram of meridional stress of tower tube under different wind speeds

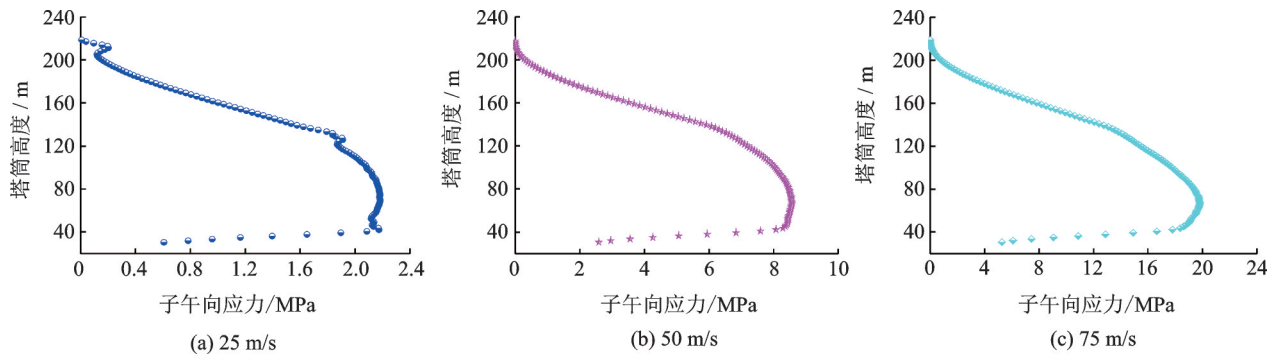


图6 不同风速下0°子午向应力随高度变化曲线示意图

Fig. 6 Diagram of 0° meridional stress change with height under different wind speeds

整体出现影响使用的连续倒塌或屈曲失稳。然后，确定冷却塔结构强健性分析的内容，包括强风作用

下塔筒倒塌机理、塔筒结构的临界倒塌风速、塔筒连续倒塌全过程及强健性薄弱位置。

基于增量动力分析(IDA)方法对塔筒结构进行非线性分析,图7给出不同风速下0°子午线塔顶、喉部和塔底部位的顺风向位移变化曲线。分析可知风速低于70 m/s时,三个不同部位的顺风向位移随风速基本呈线性关系,70-80 m/s风速范围内顺风向位移随风速呈非线性关系,风速为85 m/s时三个不同部位的顺风向位移出现4-10倍突增,并且在80 m/s风速时三个不同部位的顺风向位移均出现明显拐点(图中U点)。同时,数值模拟结果显示当风速大于80 m/s时超大型冷却塔塔筒出现失稳而整体倒塌,可判定超大型冷却塔的临界倒塌风速为80 m/s。

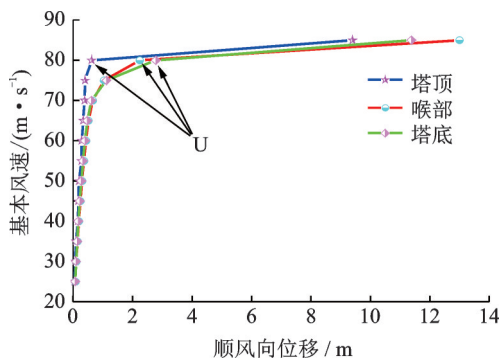
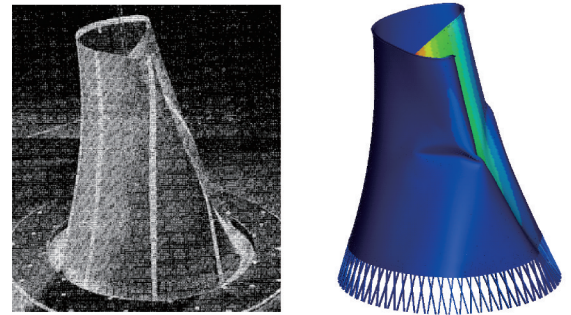


图7 0°子午线塔顶、喉部和塔底顺风向位移变化曲线

Fig. 7 Curve of displacement of the top, the throat and the bottom of the tower under 0° meridian

为验证冷却塔数值模拟倒塌的有效性,以文献[4]对英国研究者Der的冷却塔高压风洞稳定性试验的介绍和再现计算进行对比。图8给出Der试验模型失稳形态与本文数值模拟失稳形态对比图。可知二者具有相同的失稳形态,环向变形均与塔筒风压分布曲线类似,并且Der风洞试验模型的原型失



(a) Der试验模型失稳形态 (b) 本文数值模拟失稳形态
(a) Instability form of Der test (b) Instability form of proposed numerical simulation

图8 Der试验与本文数值模拟对比图

Fig. 8 Comparison diagram of Der's test and proposed numerical simulation

稳风速均达到87 m/s以上甚至达到百米级风速,由此可知本文的冷却塔数值模拟临界倒塌风速为80 m/s具有一定的有效性。

3.1.2 连续性倒塌全过程

图9给出超大型冷却塔塔筒连续性倒塌发展全过程。在强风作用初始,塔筒中部最先产生变形,与上风向夹角-70°-70°范围内塔筒呈现凹形,横风向两侧呈现凸形,环向变形与风压分布曲线一致;t=5.99 s至t=9.49 s塔筒顺风向凹陷程度增大,最大变形位置逐渐上升,内吸力作用导致环向70°-110°和250°-290°范围沿横风向凹陷;t=9.49 s时最大变形部位由塔筒中部上升至喉部区域,且与上风向夹角-70°和70°子午线的塔筒中部出现“褶皱变形”,塔筒因剪切撕裂出现竖向裂缝,但冷却塔整体仍保持直立状态;t=10.49 s至t=12.49 s喉部结构单元失效,塔筒变形凹陷程度不断增大,最大变形位置逐

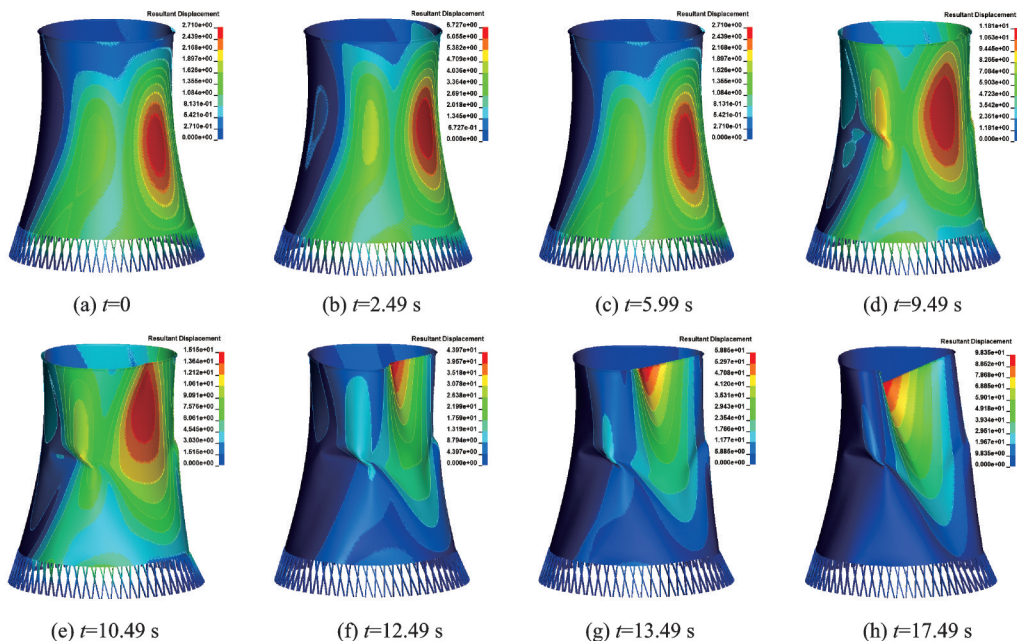


图9 超大型冷却塔强风下连续性倒塌过程示意图

Fig. 9 Diagram of progressive collapse process of super large cooling tower under strong wind

渐上升,最终引起塔顶局部构件破坏,塔筒和支柱出现明显的几何大变形,冷却塔整体进入倾覆状态; $t=17.49$ s时塔筒传力路径发生严重破坏,超大型冷却塔塔筒因无法继续承受强风作用而发生连续性倒塌。

由此可以得知,在强风作用下,塔筒喉部区域为超大型冷却塔的强健性最薄弱部位。喉部结构局部破坏失效使冷却塔整体承载力降低,导致大型冷却塔整体从直立稳定状态迅速进入倾覆倒塌状态。

3.2 失效准则

进行超大型冷却塔在强风作用下的结构强健性分析,必须判断出在何种条件下塔筒结构出现失效而破坏。目前,主要通过以下几种分析准则来判断结构的失效:变形失效准则^[23]、强度失效准则、能量失效准则^[24]、变形和能量双重失效准则。本文从变形和能量两个角度提出超大型冷却塔的结构失效判别准则。其中,变形失效准则以塔筒喉部相对水平位移为目标,分析不同风速下的喉部相对水平位移与喉部直径的比例关系;能量失效准则以塔筒整体所有单元的应变能密度和值为目标,分析塔筒应变能密度和值增长速度在不同风速下的发展规律。

3.2.1 变形失效准则

大型冷却塔的强健性薄弱位置为迎风面塔筒喉部区域,塔筒喉部的相对变形直接影响冷却塔的完整性。美国DOD2010规范^[25]将结构连续倒塌判定准则定义为部分构件发生初始破坏后,剩余结构中的结构构件不能出现规定的极限变形。文献[23]依据该规范对混凝土框架的连续倒塌失效准则规定为梁两端的相对竖向位移达到跨度的1/5,依据DOD2010规范及文献[20]的研究思路分析超大型冷却塔喉部相对水平位移与喉部直径的比例关系。

表3给出不同风速、不同时间点塔筒喉部迎风

表3 喉部相对水平位移与喉部直径的百分比/%

Tab. 3 Percentage of relative horizontal displacement and laryngeal diameter/%

基本风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	时间			
	$t=5$ s	$t=10$ s	$t=15$ s	$t=20$ s
25	0.06	0.06	0.06	0.06
30	0.10	0.11	0.11	0.13
35	0.13	0.13	0.13	0.15
40	0.16	0.17	0.17	0.18
45	0.20	0.22	0.22	0.23
50	0.24	0.25	0.25	0.25
55	0.30	0.31	0.31	0.31
60	0.35	0.36	0.36	0.37
65	0.42	0.43	0.43	0.44
70	0.54	0.54	0.54	0.56
75	0.85	0.85	0.86	0.86
80	1.85	1.86	1.86	1.87

面与背风面的相对水平位移(D_r)与喉部中面直径(R)的百分比(S)。图10给出不同风速、不同时间点 $S-V_0$ 变化曲线。分析可知不同时间点的相对水平位移与风速基本呈线性关系,塔筒处于弹性变形阶段,冷却塔整体处于小变形范围。风速低于75 m/s时,喉部相对水平位移与喉部直径的百分比均小于1%。当风速大于75 m/s时,喉部相对水平位移与喉部直径的百分比呈现急剧增加,表现出明显的拐点(图中P点),冷却塔结构的单元开始出现失效,强风持续作用将导致塔筒出现连续倒塌。

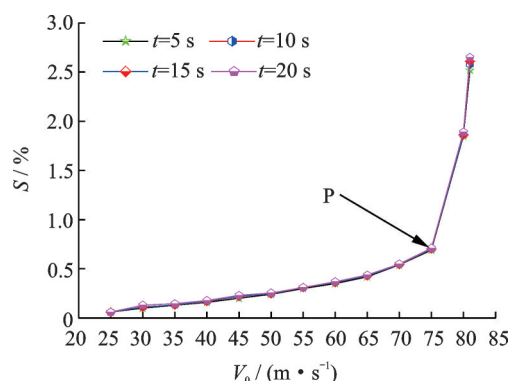


图10 不同风速和时间作用下 $S-V_0$ 变化曲线

Fig. 10 $S-V_0$ curve under different wind speeds and time

基于变形失效准则,以塔筒喉部的相对水平位移为目标,将所研究的超大型冷却塔在强风作用下结构失效准则定义为下式

$$S = \frac{D_r}{R} = \frac{D_1 - D_2}{R} \times 100\% \begin{cases} \leq 1\% & \text{稳定} \\ > 1\% & \text{失稳} \end{cases} \quad (1)$$

式中 D_1 为喉部迎风面水平位移; D_2 为喉部背风面水平位移。

3.1.1节的数值模拟结果表明风速达到80 m/s时超大型冷却塔塔筒出现失稳而整体倒塌,在此基础上,以1%作为临界点来判断超大型冷却塔塔筒是否出现失稳而倒塌。即冷却塔塔筒处于正常工作状态时,塔筒喉部迎风面、背风面的相对水平位移与喉部直径的百分比 $S \leq 1\%$;当 $S > 1\%$ 时,塔筒进入结构单元失稳状态。

3.2.2 能量失效准则

考虑到能量可以较好表征地震、强风作用下结构的真实弹塑性性能,引入能量法研究强风作用下超大型冷却塔结构倒塌破坏与失效准则。依据文献[26]对弦支穹顶结构失效准则的研究,分析超大型冷却塔塔筒在不同风速激励下的塔筒应变能密度和值 P_d 。基于LS-Prepost有限元软件提取不同荷载域、不同时间下塔筒全部单元的应变能及应变能密度。

表4列出数值模拟过程中 $t=20$ s时不同风速(V_0)下冷却塔模型所有单元的应变能密度和值(P_d)。并采用MATLAB对不同风速下所有单元的

表 4 冷却塔结构应变能密度统计

Tab. 4 Statics about cooling tower structural strain energy density

$V_0/(m \cdot s^{-1})$	$P_d/(10^7 J \cdot m^{-3})$
25	0.052
30	0.108
35	0.201
40	0.342
45	0.547
50	0.833
55	1.219
60	1.723
65	2.372
70	3.204
75	4.265
80	5.709
85	26.252

应变能密度和值分布规律进行拟合,得到拟合公式如下式所示

$$P_d = -0.603 + 0.107e^{0.051V_0} + 0.98e^{-0.051V_0} \quad (2)$$

图 11 给出不同风速下数值模拟与拟合公式(2)的 P_d-V_0 对比关系曲线。

分析可知数值模拟与拟合公式(2)的应变能密度和值关系曲线基本吻合,拟合效果较好;超大型冷却塔在强风作用 $t=20$ s 时所有单元的应变能密度随着风速的增大而增加;当风速低于 80 m/s 时,冷却塔在不同风速作用下的应变能密度和值 P_d 符合指数律增长趋势,应变能密度增长速度较小;当风速增大至某一值,冷却塔应变能密度和值出现突增现象,表现出明显的拐点(图中 T 点),此时,数值模拟的 P_d-V_0 关系曲线斜率从 0.30 突变为 4.11。

基于 P_d-V_0 关系曲线的分析,以 P_d-V_0 关系曲线的斜率进行度量,提出判别超大型冷却塔结构失效的指数应变能密度和值破坏系数 K ,表达式如下式所示

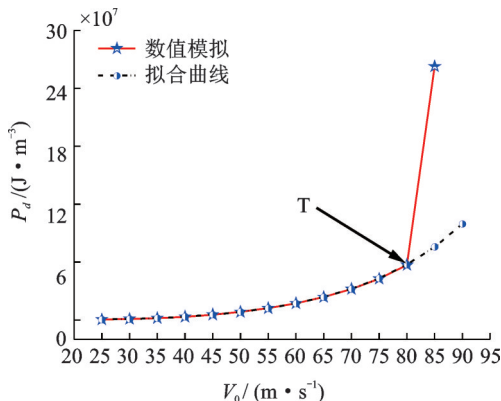


图 11 不同风速下 P_d-V_0 对比关系曲线

Fig. 11 P_d-V_0 contrast relation curve under different wind speeds

$$K = 0.005e^{0.051V_0} - 0.05e^{-0.051V_0} \begin{cases} < 0.3 & \text{稳定} \\ \geq 0.3 & \text{失稳} \end{cases} \quad (3)$$

图 12 给出不同风速下的 $K-V_0$ 关系曲线。可以发现风速达到 80 m/s 时,破坏系数 K 出现明显的拐点(图中 V 点),3.1.1 节的数值模拟结果表明风速达到 80 m/s 时超大型冷却塔塔筒出现失稳而整体倒塌。因此,以拐点处破坏系数作为临界点来判断超大型冷却塔塔筒是否出现失稳而倒塌。即当冷却塔塔筒处于稳定工作状态时, K 位于 0-0.3 之间。 $K \geq 0.3$ 时,超大型冷却塔在强风作用下进入结构单元失稳状态。

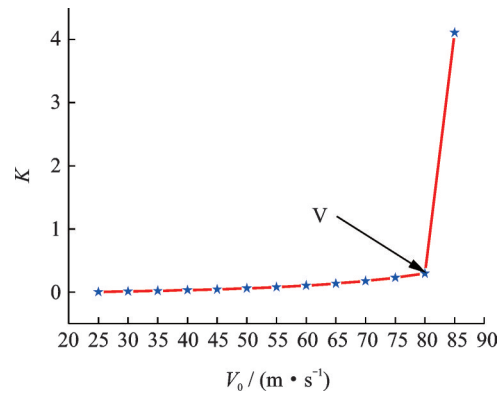


图 12 不同风速下 $K-V_0$ 关系曲线

Fig. 12 $K-V_0$ curve under different wind speeds

4 结 论

本文系统开展了强风作用下超大型冷却塔倒塌全过程数值模拟与破坏机理研究,内容涉及动力特性、风致响应、结构强健性和失效判别准则。主要结论如下:

(1) 基于 ANSYS/LS-DYNA 显式结构单元建立超大型冷却塔有限元模型,与已有的超大型冷却塔模型自振频率结果基本一致,发展趋势相同,最大差异仅为 4%,验证了本文 ANSYS/LS-DYNA 冷却塔模型的有效性。

(2) 最不利顺风向位移响应位置出现在超大型冷却塔迎风面喉部区域,沿高度方向塔筒子午向应力逐渐减小,不同风速下 0° 子午向应力集中分布于塔筒中部,塔顶应力最小,接近于零值。

(3) 超大型冷却塔临界倒塌基本风速达到 80 m/s,结构强健性最薄弱部位发生在喉部区域;喉部结构单元局部破坏失效引发与上风向夹角为 -70° 和 70° 子午向塔筒中部发生“褶皱变形”,冷却塔从直立状态进入倾覆状态,塔顶局部结构失效破坏激发超大型冷却塔出现连续性倒塌。

(4) 超大型冷却塔塔筒应变能密度随风速增加呈指数增长趋势,喉部相对水平位移与喉部直径百分比(S)和塔筒应变能密度和值(P_d)在风速增长过程中均出现明显的转折点;基于变形和能量失效准

则,初步提出了喉部相对水平位移与喉部直径百分比 $S>1\%$ 、指数应变能密度和值破坏系数 $K\geq 0.3$ 作为超大型冷却塔在强风作用下的结构失效准则。

参考文献:

- [1] Gharaibeh E S, Dan M F, Onoufriou T. Reliability-based importance assessment of structural members with applications to complex structures[J]. Computers & Structures, 2002, 80(12): 1113-1131.
- [2] Report of the COI into collapse of cooling towers at Ferrybridge, Monday 1 November 1965[R]. Central Electricity Generating Board, 1966.
- [3] Pope R A. Structural deficiencies of natural draught cooling towers at UK power stations. Part 1: Failures at Ferrybridge and Fiddlers Ferry[J]. Proceedings of the ICE—Structures and Buildings, 1994, 104(1): 1-10.
- [4] 张军锋,葛耀君,赵林.基于风洞试验的双曲线冷却塔静风整体稳定研究[J].工程力学,2012,29(5):68-77.
Zhang Junfeng, Ge Yaojun, Zhao Lin. Study on global aerostatic stability of hyperboloidal cooling tower based on the wind tunnel tests[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(5): 68-77.
- [5] Ke Shitang, Wang Hao, Wang Tongguang, et al. Comparison of comprehensive stress performances of super-large cooling tower in different four-tower arrangements under 3D asymmetric wind loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 179: 158-172.
- [6] 张军锋,葛耀君,赵林.群塔布置对冷却塔整体风荷载和风致响应的不同干扰效应[J].工程力学,2016,33(8):15-23.
Zhang Junfeng, Ge Yaojun, Zhao Lin. Interference effects on global wind loads and wind induced responses for group hyperboloidal cooling towers[J]. Mechanics in Engineering, 2016, 33(8): 15-23.
- [7] Sabouri-Ghoumi S, Kharrazi M H K, Javidan P. Effect of stiffening rings on buckling stability of R.C. hyperbolic cooling towers[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(2): 152-158.
- [8] 赵林,李鹏飞,葛耀君.等效静风荷载下超大型冷却塔受力性能分析[J].工程力学,2008,25(7):79-86.
Zhao Lin, Li Pengfei, Ge Yaojun. Numerical investigation on performance of super large cooling towers under equivalent static wind load[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 79-86.
- [9] Ke Shitang, Xu Lu, Ge Yaojun. Study of random characteristics of fluctuating wind loads on ultra-large cooling towers in full construction process[J]. Wind and Structures, 2018, 26(4): 191-204.
- [10] 肖南,苗永志,赵文争.子午向几何缺陷冷却塔的结构性能分析[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(4):819-825.
Xiao Nan, Miao Yongzhi, Zhao Wenzheng. Structural performance analysis of a cooling-tower shell with meridional geometric imperfections[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(4): 819-825.
- [11] 邹云峰,牛华伟,陈政清.基于完全气动弹性模型的冷却塔风致响应风洞试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(6):60-67.
Zou Yunfeng, Niu Huawei, Chen Zhengqing. Wind tunnel test on wind-induced response of cooling tower based on full aero-elastic model[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 60-67.
- [12] 柯世堂,杜凌云.不同气动措施对特大型冷却塔风致响应及稳定性能影响分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(5):79-89.
Ke Shitang, Du Lingyun. Impact study on wind-induced response and stability for super large cooling tower with different aerodynamic measures[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(5): 79-89.
- [13] 陈宝春,范冰冰,余印根,等.钢管混凝土拱桥强健性设计[J].桥梁建设,2016,46(6):88-93.
Chen Baochun, Fan Binghui, Yu Yingen, et al. Robustness design of concrete-filled steel tube arch bridges[J]. Bridge Construction, 2016, 46(6): 88-93.
- [14] 郑小博,赵煜,贺拴海,等.双塔钢桁斜拉桥结构强健性计算方法[J].交通工程运输学报,2017,14(5):27-38.
Zheng Xiaobo, Zhao Yu, He Shuanhai, et al. Calculating method of structural robustness of double-tower cable-stayed bridge with steel truss girder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 14(5): 27-38.
- [15] 邓海斌,陈文,王晓明.基于AP法的无背索斜拉桥强健性分析[J].石家庄铁道大学学报,2016,29(3):13-20.
Deng Haibin, Chen Wen, Wang Xiaoming. Research on structural robustness for cable-stayed bridge without back-stays[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University, 2016, 29(3): 13-20.
- [16] 沈锐利,房凯,官快.单根吊索断裂时自锚式悬索桥强健性分析[J].桥梁建设,2014,44(6):35-39.
Shen Ruili, Fang Kai, Guan Kuai. Robustness analysis of self-anchored suspension bridge with loss of a single sling[J]. Bridge Construction, 2014, 44(6): 35-39.
- [17] Ghosn M, Duenas-Osorio L, Frangopol D M, et al. Performance indicators for structural systems and infrastructure networks[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(9): F4016003.
- [18] 范冰冰,陈宝春,吴庆雄.考虑强健性的中、下承式拱桥技术状况评定[J].桥梁建设,2018,48(5):64-68.
Fan Binghui, Chen Baochun, Wu Qingxiong. Technical condition evaluation of half-through and through arch bridges considering robustness[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 48(5): 64-68.
- [19] 柯世堂,徐璐,朱鹏.基于大涡模拟超大型冷却塔施工期风荷载时域特性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(11):62-72.
Ke Shitang, Xu Lu, Zhu Peng. Analysis on time domain characteristics of wind loads during construction

- period of super large cooling towers based on large eddy simulation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(11): 62-72.
- [20] 徐璐,柯世堂.加劲环和子午肋对特大型冷却塔静风响应的影响研究[J].特种结构,2016,33(6):23-31.
Xu Lu, Ke Shitang. The influence study of stiffening ring and meridian rib for the static wind-induced responses on super large cooling towers[J]. Special Structures, 2016, 33(6): 23-31
- [21] 柯世堂,王浩.考虑不同四塔形式特大型冷却塔群风荷载极值分布特征与取值探讨[J].空气动力学学报,2020,38(1):48-57.
Ke Shitang, Wang Hao. Distribution characteristics and value of extreme wind loads of four super-large cooling towers considering different layouts [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(1): 48-57.
- [22] 电力规划设计总院.DL/T 5339-2018,火力发电厂水工设计规范[S].北京:中国计划出版社,2006.
China Electric Power Planning & Engineering Institute. DL/T 5339-2018, Code for hydraulic design of fossil fuel power plants [S]. Beijing: China Planning Power Press, 2006.
- [23] 程小卫,李易,陆新征,等.基于多尺度模型的RC框架撞击倒塌响应数值分析[J].振动与冲击,2016,35(5):82-88.
Cheng Xiaowei, Li Yi, Lu Xinzheng, et al. Numerical analysis for collapse response of a RC frame subjected to impact loading based on multi-scale model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5): 82-88.
- [24] 刘红军,李洪江.基于能量法的锚杆失效模糊判别方法研究[J].岩土工程学报,2013,35(8):1435-1441.
Liu Hongjun, Li Hongjiang. Fuzzy identification method for failure of anchors based on energy principle [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1435-1441.
- [25] DoD2010. Design of structures to resist progressive collapse[S]. Washington, D.C: Department of Defense.
- [26] 张明,田始轩,刘占辉,等.基于指数应变能密度的弦支穹顶结构失效准则研究[J].振动与冲击,2018,37(11):145-152.
Zhang Ming, Tian Shixuan, Liu Zhanhui, et al. Failure criterion for suspension domes based on exponential strain energy density [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11): 145-152.

Structural failure criterion and robustness analysis of super-large cooling towers subjected to strong winds

WANG Fei-tian¹, KE Shi-tang¹, WANG Xiao-hai², WU Hong-xin³, YANG Jie¹, REN He-he¹

(1.Department of Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2.China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co. LTD., Nanjing 211102, China;

3. Department of Aerodynamics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Wind load is the control load in the design of large cooling tower structure, and the current wind-resistant guiding ideology is based on strength design theory. However, several wind-damaged events in history indicate that excessive local wind load may also lead to local tension damage of the tower tube, which leads to progressive collapse and buckling instability of the whole tower tube structure. The structural damage caused by local wind-induced damage is a typical form of structural robustness damage, and this kind of problem has become a new challenge for the development of cooling towers. In order to analyze the structural failure criteria and robustness of super-large cooling towers subjected to strong winds, a three-dimensional finite element model of super-large cooling towers with the highest height limit of 220 m in the world is established based on ANSYS/LS-DYNA platform and the whole process of wind-induced collapse is simulated. The displacement response and the internal force distribution of the cooling tower under typical wind speed are studied, and the location, numerical value and distribution rule of the most unfavorable response are extracted. The whole process evolution mechanism of "stability-instability-collapse" of the cooling tower under strong wind is discussed, and the structural failure criterion of the cooling tower under strong wind is put forward. It is found that the weak position of structural robustness of super-large cooling towers under strong wind is the throat area of the tower tube on the windward side, where "fold deformation" occurs in the meridional direction of -70° and 70° , leading to the failure of the local structure on the top of the tower and the collapse of the overall structure of the tower tube. The strain energy density of the tower tube shows an exponential trend. The percentage of the relative horizontal displacement of the throat to throat diameter $S > 1\%$, failure coefficient of exponential strain energy density $K \geq 0.3$ can be used as the criterion for judging structural failure, and the robustness index can be well evaluated.

Key words: super-large cooling tower; strong wind action; progressive collapse; failure criteria; robustness analysis

作者简介:王飞天(1991-),男,硕士研究生。电话:17635453162;E-mail:wangfeitiannuaa@163.com

王晓海(1994-),男,硕士研究生。电话:17368017474;E-mail:wangxiaohainuaa@163.com

吴鸿鑫(1996-),男,硕士研究生。电话:15217336888;E-mail:wuhongxin_nuaa@163.com

杨杰(1976-),男,博士,教授。电话:15190495056;E-mail:yangjie@nuaa.edu.cn

任贺贺(1990-),男,博士,讲师。电话:13100962198;E-mail:renhehe@nuaa.edu.cn

通讯作者:柯世堂(1982-),男,博士,教授,博士生导师。电话:13621581707;E-mail:keshitang@163.com