

# 风-雨共同作用特大型冷却塔表面风荷载与作用机理

柯世堂<sup>1</sup>, 余文林<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学 土木工程系, 江苏 南京 210016; 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)

**摘要:** 强风暴雨极端气候条件下, 暴雨会直接影响塔筒表面气动力并改变脉动风的湍流特性, 而传统研究大多仅关注风单向驱动雨对于结构表面的冲击力。为解决该问题, 针对中国已建成的高为 210.0 m 的超大型冷却塔, 首先基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)手段采用连续相和离散相模型分别展开风、雨场的模拟计算。在此基础上, 揭示风雨场雨滴运行速度和轨迹的作用机理, 并针对 9 种不同风速和降雨强度组合的塔筒内、外表面风雨荷载, 雨压以及等效压力系数等展开定性和定量的对比分析。提出的超大型冷却塔风雨等效内、外压系数可以很好地预测此类极端条件下的表面荷载取值。

**关键词:** 超大型冷却塔; 风-雨双向耦合; 数值模拟; 风荷载特性; 作用机理

**中图分类号:** TU279.7

**文献标志码:** A

## Surface Wind Load and Action Mechanism for Super Large Cooling Towers Under Simultaneous Actions of Wind-Rain

KE Shitang<sup>1</sup>, YU Wenlin<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Jiangsu Power Design Institute Co. Ltd., China Energy Engineering Group, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Under extreme weather conditions with strong wind and rainstorm, the rainstorm will directly affect the aerodynamic force on the cooling tower surface, and change the turbulent characteristics of fluctuating wind. However, most traditional researches have only paid attention to the impact force characteristics of wind driven rain on structural surface. In order to solve this problem, aiming at the 210 m world tallest cooling tower in China, the wind field and rain field are simulated respectively by using the continuous model and the discrete phase model based on the computational fluid dynamics (CFD) method, based on which, the action mechanism of the moving speed and trajectory of rain drops in

the wind and rain fields are revealed. Besides, the qualitative and quantitative analysis of wind loads, rain loads, rain-induced pressure, and equivalent pressure coefficient of 9 different combinations of wind speed and rain intensity are conducted. The surface loads of cooling tower under such extreme conditions can be well predicted based on the equivalent pressure coefficient proposed in this paper.

**Key words:** super large cooling tower; wind-rain bidirectional coupling; numerical simulation; wind load characteristics; action mechanism

风荷载是冷却塔结构内力设计的控制荷载<sup>[1-2]</sup>, 然而在极端气候条件下, 结构需同时承受强风和暴雨的共同影响, 此时雨滴在风力和重力的共同驱使下运行速度和轨迹发生显著变化, 一部分在塔筒前缘以较大速度击打在冷却塔外表面, 另一部分穿过敞开的塔筒顶部高速撞击至塔筒内壁, 使其表面气动力分布发生显著改变。同时, 暴雨会恶化脉动风的湍流效应, 导致塔筒附近以及塔内气流运动形式、雨滴轨迹、附加力和内、外压作用发生变化。

现有针对冷却塔风荷载的研究<sup>[3-6]</sup>, 主要集中在风荷载的随机特性、极值风压和静/动力干扰效应等。我国规范<sup>[7]</sup>仅给出了冷却塔外表面风压系数分布曲线和单塔单一内压系数(-0.5), 完全忽略了内吸力沿高度和角度的变化情况。德国规范<sup>[8]</sup>根据外表面粗糙程度分别给出了外表面压力系数分布模式, 但对于内压系数亦未考虑三维特性和降雨影响。文献<sup>[9]</sup>基于  $k-\epsilon$  湍流和多相流模型模拟了冷热空气循环系统作用下的塔筒内表面风荷载, 结果表明, 塔筒内压随高度和角度变化显著。文献<sup>[10]</sup>基于刚体测压试验分析了透风率为 100% 和 30% 工况下塔筒内表面风压的三维效应, 结果表明, 内表面风压沿高度和环向角度非均匀分布。相关成果很好地解决

收稿日期: 2017-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(51878351, U1733129, 51761165022); 江苏省优秀青年基金(BK20160083)

第一作者: 柯世堂(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构工程与风洞试验。E-mail: keshitang@163.com

了常规高度冷却塔表面风压取值问题,然而对于风雨联合作用下超大型冷却塔内、外表面气动性能的研究未见报道,更缺乏不同风速和降雨强度等多参数组合对冷却塔内外压作用的定性及定量对比。

此外,已有关于风雨作用的研究<sup>[11-19]</sup>主要集中在桥梁斜拉索、房屋、风力机及输电塔等结构,然而大型冷却塔常常处于较差气候条件,其是否需要考虑风雨耦合作用的研究亟需展开。

鉴于此,以中国已建成的高为 210.0 m 的超大型冷却塔为研究对象,基于风-雨双向耦合算法,采用连续相和离散相模型分别进行风雨场的数值模拟。在此基础上,对比研究风雨耦合作用下塔筒内、外压作用机理,最终提炼出不同风速和降雨强度对塔筒内、外表面雨量、雨荷载及等效压力系数的影响规律。

## 1 风-雨双向耦合算法

### 1.1 概率统计特性

表 1 给出了降雨强度等级划分。由表 1 可知,两种降雨强度分类的采样时间不同,同一场雨的强度级别差别较大。小时降雨强度更能直观反映出工程中最为关注的极端工况,因此本文选用小时降雨强度作为标准。

### 1.2 雨滴谱分布

常用雨滴谱模型<sup>[20]</sup>有 Best 谱、Marshall-Palmer 谱及 Gamma 谱。本文选用 Marshall-Palmer 谱,如式(1)所示。

$$n(D_p) = N_0 e^{-\lambda D_p} \quad (1)$$

式中: $D_p$  为雨滴直径,mm; $n(D_p)$  为不同直径雨滴数量; $N_0$  为雨滴浓度,取 8 000; $\lambda$  为尺度参数,表达式如式(2)所示。

$$\lambda = 4.1R^{-0.21} \quad (2)$$

式中: $R$  为降雨强度, $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 1 降雨强度等级划分

Tab.1 Grades of rainfall intensity

| 等级 | 日降雨强度/<br>( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 小时降雨强度/<br>( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) |
|----|---|--|
| 小雨 | 10  | 2.5  |
| 中雨 | 25  | 8.0  |
| 大雨 | 50  | 16.0   |
| 暴雨 | 100   | 32.0   |
| 弱  |   | 64.0   |
| 中  |   | 100.0  |
| 强  | 250   | 200.0  |
| 极值 |   | 709.2  |

### 1.3 壁面碰撞方程

雨滴撞击结构壁面过程忽略可能发生的蒸发、

飞溅、破裂等,近似服从动量守恒定律。

$$\int_0^\tau f(t) dt + \int_{v_s}^0 m dv = 0 \quad (3)$$

式中: $f(t)$  为单个雨滴冲击力; $\tau$  为碰撞时间; $v_s$  为雨滴末速度; $m$  为雨滴质量。

单位时间内雨滴对结构的冲击力  $F(\tau)$  为

$$F(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau f(t) dt = \frac{mv_s}{\tau} \quad (4)$$

雨滴下落过程近似看作球体,则

$$F(\tau) = \frac{mv_s}{\tau} = \frac{1}{6\tau} \rho_p \pi D_p^3 v_s \quad (5)$$

由于雨滴撞击前速度相对较大,为简化计算,碰撞时间  $\tau$  取为

$$\tau = \frac{D_p}{2v_s} \quad (6)$$

则雨滴对结构的冲击力为

$$F(\tau) = \frac{1}{6\tau} \rho_p \pi D_p^3 v_s = \frac{2v_s}{6D_p} \rho_p \pi D_p^3 v_s = \frac{1}{3} \rho_p \pi D_p^2 v_s^2 \quad (7)$$

式(4)~(7)中: $\rho_p$  为雨滴密度; $D_p$  为雨滴直径。

## 2 工程简介与工况设置

该超大型冷却塔塔高 210.0 m,喉部高 157.5 m,进风口高 32.5 m,零米直径 180.0 m。冷却塔塔筒最小壁厚为 0.37 m,最大壁厚为 2.00 m。塔筒下部有 52 对 X 型支柱支撑。

该塔位于 B 类地貌,按 30% 透风率模拟百叶窗效应<sup>[21]</sup>,对比研究风速和降雨强度组合对塔筒表面气动力的影响。其中小、中和大风分别以重现期为 10 年、50 年和 100 年最大风速划分,降雨强度以大暴雨气候条件的弱、中和强大暴雨为基准划分,共 9 种计算工况,如图 1 所示。

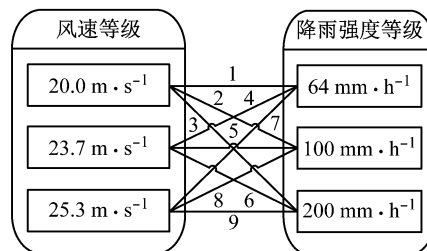


图 1 对比工况组合示意图

Fig.1 Sketch map of contrast working conditions

## 3 风-雨双向耦合数值模拟

### 3.1 建立风雨场模型

数值风洞计算域尺寸设置为顺风向 3 000 m,横

风向 1 500 m,高度 600 m,并取塔底中心为坐标原点. 模拟时采用局部加密技术进行网格划分,局部风雨场采用非结构化网格划分,外围风雨场采用结构化网格划分. 图 2 给出了整体计算域网格划分.

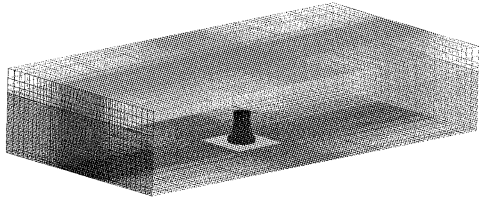


图 2 整体计算域网格划分

Fig.2 Grid division of total computation domain

### 3.2 风-雨场耦合计算

整体计算域入口设为速度入口,出口设为压力出口,侧壁及顶面采用对称边界,地面及冷却塔设为壁面边界,局部与外围区域重合面设为交界面.

数值计算中空气流速为绝对速度,湍流模型选取  $k-\omega$  剪切应力模型 (shear stress transfer, SST). 流场求解采用 SIMPLEC 二阶算法实现速度与压力的耦合,计算时启用增强壁面函数模型,可保证底层网格对数律成立,然后初始化风场进行迭代计算. 风场计算稳定后加入离散相模型继续进行风雨场迭代运算,然后释放雨滴,重力和空气阻力的共同影响使得雨滴在足够大的高度范围内达到模拟末速度.

## 4 结果对比分析

### 4.1 雨场分析

图 3 给出了 9 种工况下冷却塔内、外表面收集到的各直径雨滴数量分布,对比可知塔筒内、外表面雨滴附着数量随风速的增大而减少,随降雨强度的增大而增多,且外表面雨滴收集数量显著多于内表

面,约为内表面的 10 倍.

表 2 和表 3 分别给出了塔筒内、外表面不同高度范围雨荷载以及内表面不同高度范围雨荷载与该区域风荷载的比值( $H$  为塔高,210.0 m). 对比发现: ①不同工况下冷却塔外表面雨荷载均随着高度的增加先减小后增大,均在  $0.23H\sim0.31H$  高度范围内最小,在塔底或塔顶处最大;②各工况冷却塔内表面雨荷载均随高度的增加而增大, $0.69H$  高度以下

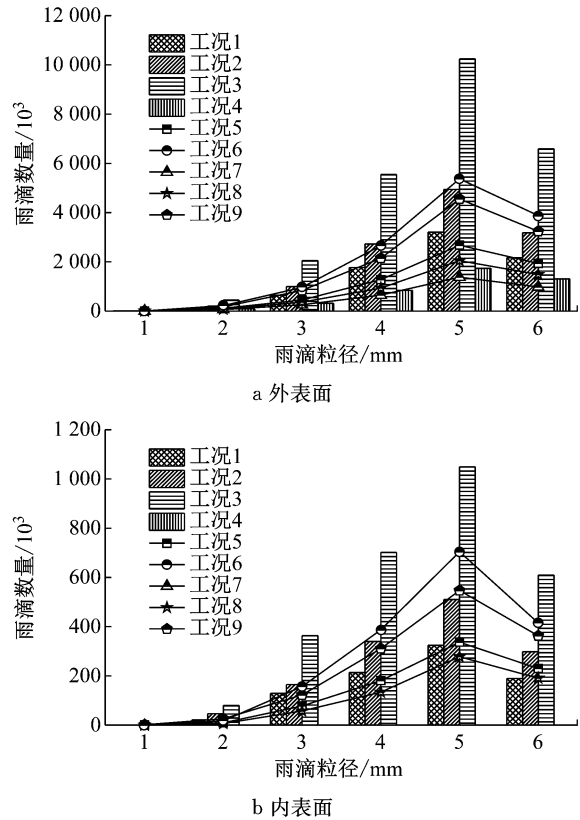


图 3 工况 1~9 中塔筒内、外部雨滴附着数量分布曲线  
Fig.3 Distribution curves of raindrop number on internal and external surfaces of cooling tower under conditions 1 to 9

表 2 工况 1~9 中塔筒外表面不同高度范围雨荷载

Tab.2 Rain load at different height ranges of external surface under conditions 1 to 9

| 高度          | 雨荷载/N |       |        |       |       |        |       |       |        |
|-------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
|             | 工况 1  | 工况 2  | 工况 3   | 工况 4  | 工况 5  | 工况 6   | 工况 7  | 工况 8  | 工况 9   |
| 0.15H~0.23H | 37.36 | 57.25 | 117.58 | 21.72 | 30.83 | 67.90  | 18.74 | 24.66 | 48.31  |
| 0.23H~0.31H | 6.08  | 7.99  | 18.45  | 4.17  | 6.05  | 12.09  | 2.82  | 4.94  | 10.25  |
| 0.31H~0.38H | 7.58  | 10.69 | 22.30  | 4.53  | 8.00  | 15.54  | 4.57  | 6.77  | 13.14  |
| 0.38H~0.45H | 7.69  | 12.07 | 26.47  | 6.09  | 8.83  | 18.33  | 4.94  | 7.85  | 17.14  |
| 0.45H~0.53H | 8.81  | 12.87 | 28.90  | 7.63  | 10.73 | 22.12  | 6.75  | 9.05  | 19.81  |
| 0.53H~0.61H | 8.66  | 13.87 | 28.60  | 8.78  | 13.64 | 27.29  | 6.06  | 10.88 | 22.18  |
| 0.61H~0.69H | 9.74  | 15.72 | 33.58  | 10.70 | 14.13 | 31.31  | 8.44  | 11.47 | 30.29  |
| 0.69H~0.76H | 11.03 | 15.74 | 32.82  | 11.41 | 16.63 | 35.62  | 9.41  | 15.27 | 32.86  |
| 0.76H~0.83H | 12.33 | 18.18 | 40.51  | 14.45 | 21.65 | 45.05  | 13.81 | 21.35 | 43.34  |
| 0.83H~0.90H | 18.31 | 27.10 | 52.15  | 20.18 | 26.71 | 59.75  | 17.88 | 29.69 | 66.24  |
| 0.90H~1.00H | 33.54 | 51.64 | 105.64 | 38.53 | 58.96 | 115.88 | 35.56 | 56.91 | 115.31 |

表 3 工况 1~9 塔筒内表面不同高度范围风雨荷载特征值

Tab.3 Eigenvalue of wind and rain load at different height ranges of internal surface under conditions 1 to 9

| 高度          | 工况 1    |           |         | 工况 2    |           |         | 工况 3    |           |         |
|-------------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|
|             | 雨荷载/N   | 风荷载/kN    | 比值/%    | 雨荷载/N   | 风荷载/kN    | 比值/%    | 雨荷载/N   | 风荷载/kN    | 比值/%    |
| 0.15H~0.69H | 0       | -9 331.4  | 0       | 0       | -9 298.6  | 0       | 0       | -9 023.5  | 0       |
| 0.69H~0.76H | 2.1     | -1 101.7  | 0.000 2 | 3.1     | -1 103.0  | 0.000 3 | 5.4     | -1 096.0  | 0.000 5 |
| 0.76H~0.83H | 9.5     | -1 011.3  | 0.000 9 | 18.4    | -1 014.8  | 0.001 8 | 32.9    | -1 007.8  | 0.003 3 |
| 0.83H~0.90H | 42.6    | -1 020.8  | 0.004 2 | 85.0    | -1 026.5  | 0.008 3 | 157.3   | -1 018.6  | 0.015 4 |
| 0.90H~1.00H | 1 264.1 | -1 081.9  | 0.116 8 | 2 265.8 | -1 091.0  | 0.207 7 | 3 955.7 | -1 082.2  | 0.365 5 |
| 高度          | 工况 4    |           |         | 工况 5    |           |         | 工况 6    |           |         |
|             | 雨荷载/N   | 风荷载/kN    | 比值/%    | 雨荷载/N   | 风荷载/kN    | 比值/%    | 雨荷载/N   | 风荷载/kN    | 比值/%    |
| 0.15H~0.69H | 0       | -12 932.8 | 0       | 0       | -12 856.9 | 0       | 0       | -13 082.5 | 0       |
| 0.69H~0.76H | 1.7     | -1 655.1  | 0.000 1 | 4.9     | -1 597.8  | 0.000 3 | 12.1    | -1 614.9  | 0.000 7 |
| 0.76H~0.83H | 13.7    | -1 519.7  | 0.000 9 | 19.8    | -1 469.8  | 0.001 3 | 40.6    | -1 485.4  | 0.002 7 |
| 0.83H~0.90H | 26.7    | -1 533.0  | 0.001 7 | 50.0    | -1 485.2  | 0.003 4 | 80.3    | -1 501.6  | 0.005 3 |
| 0.90H~1.00H | 845.1   | -1 629.3  | 0.051 9 | 1 425.3 | -1 584.1  | 0.089 9 | 2 781.0 | -1 601.9  | 0.173 6 |
| 高度          | 工况 7    |           |         | 工况 8    |           |         | 工况 9    |           |         |
|             | 雨荷载/N   | 风荷载/kN    | 比值/%    | 雨荷载/N   | 风荷载/kN    | 比值/%    | 雨荷载/N   | 风荷载/kN    | 比值/%    |
| 0.15H~0.69H | 0       | -15 368.8 | 0       | 0       | -14 985.9 | 0       | 0       | -15 297.4 | 0       |
| 0.69H~0.76H | 2.6     | -1 782.3  | 0.000 1 | 4.1     | -1 868.8  | 0.000 2 | 7.1     | -1 723.9  | 0.000 4 |
| 0.76H~0.83H | 10.5    | -1 640.1  | 0.000 6 | 17.6    | -1 714.7  | 0.001 0 | 25.0    | -1 582.2  | 0.001 6 |
| 0.83H~0.90H | 38.6    | -1 663.4  | 0.002 3 | 63.0    | -1 734.0  | 0.003 6 | 104.2   | -1 600.8  | 0.006 5 |
| 0.90H~1.00H | 726.9   | -1 777.1  | 0.040 9 | 1 389.8 | -1 846.8  | 0.075 4 | 2 693.1 | -1 706.6  | 0.157 8 |

均没有雨滴附着,且绝大部分雨滴主要集中在 0.90H~1.00H 高度范围内;③不同高度范围内内表面雨荷载显著小于风荷载,最大仅为风荷载的 0.365 5%,同时各工况下冷却塔外表面荷载均显著大于内表面荷载;④不同风速下塔筒内、外表面雨荷载随降雨强度的变大而增大,固定降雨强度下风速

的增大将导致塔筒内表面和中下部外表面雨荷载减小。

图 4 和图 5 分别给出了工况 1~9 中冷却塔内、外表面雨滴以及雨压系数分布.由图 4、5 可知:①各工况雨滴附着位置主要分布在塔筒外表面迎风区域和内表面上部背风区域,受气流大尺度涡旋驱动作

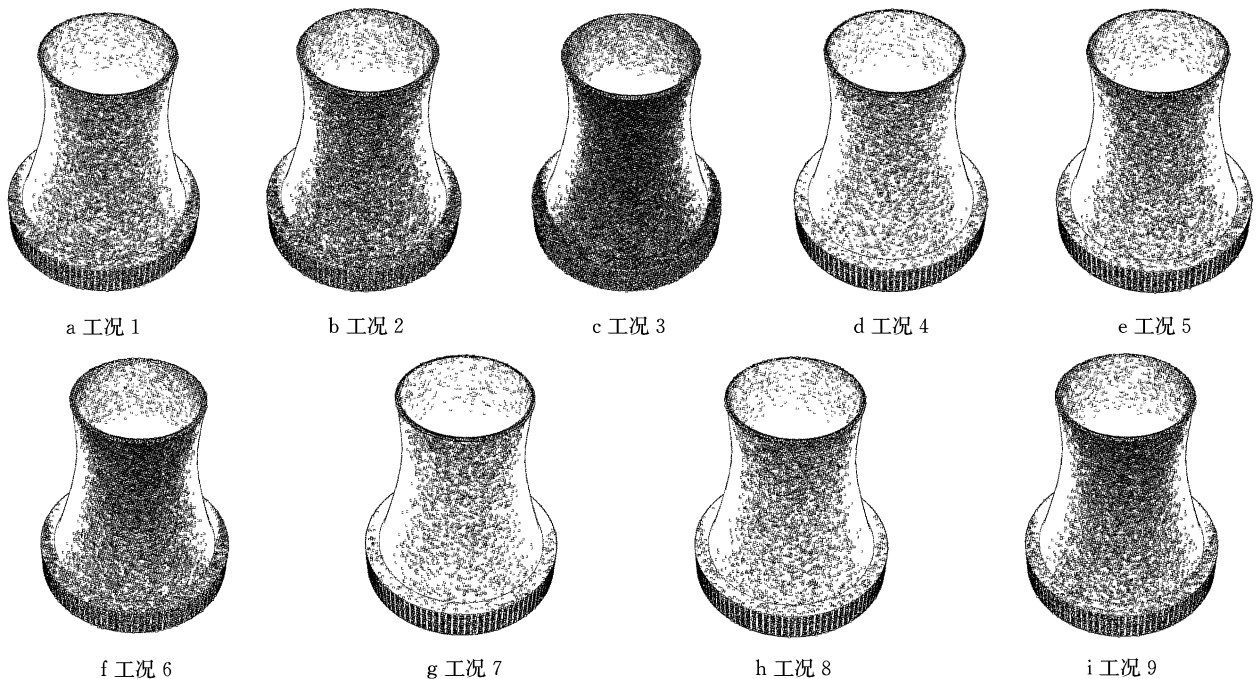
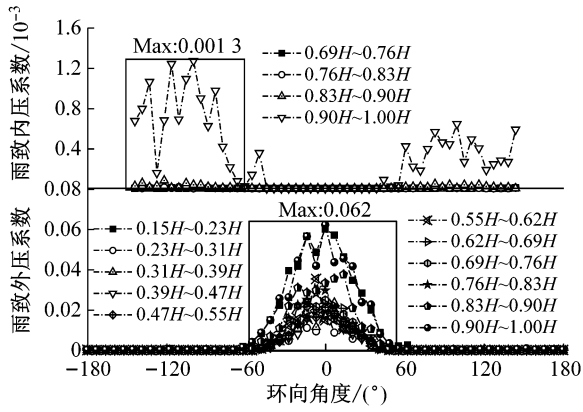
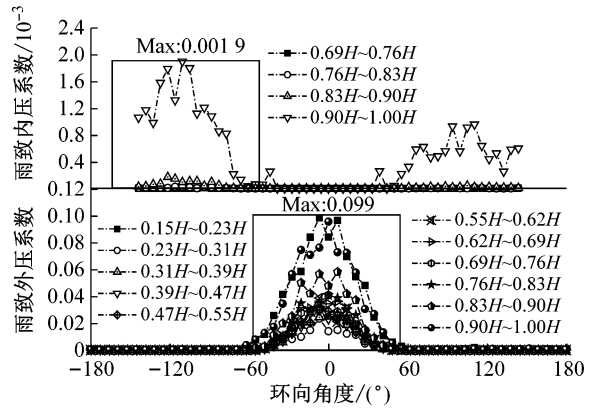


图 4 冷却塔内外表面雨滴三维分布

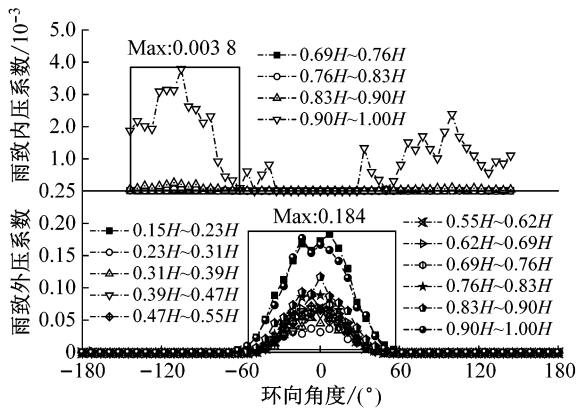
Fig.4 3D distribution of raindrops on internal and external surfaces of cooling tower



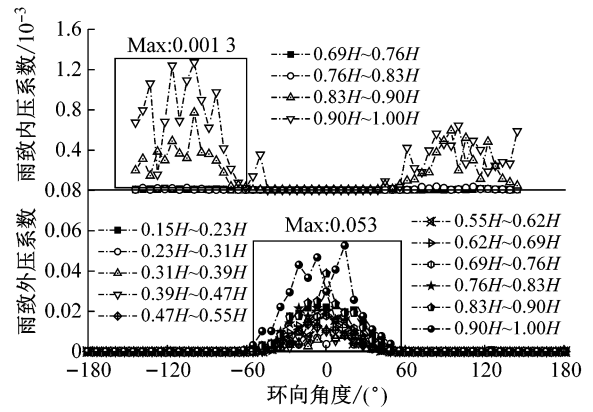
a 工况 1



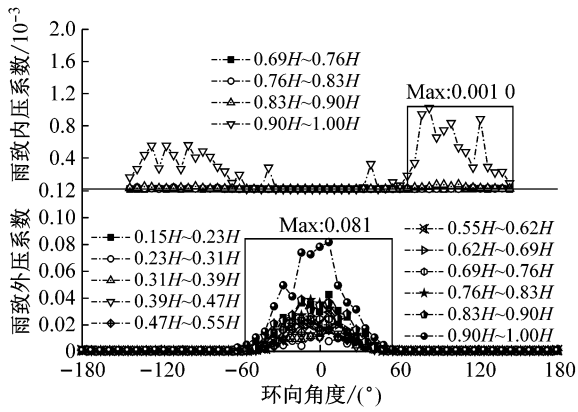
b 工况 2



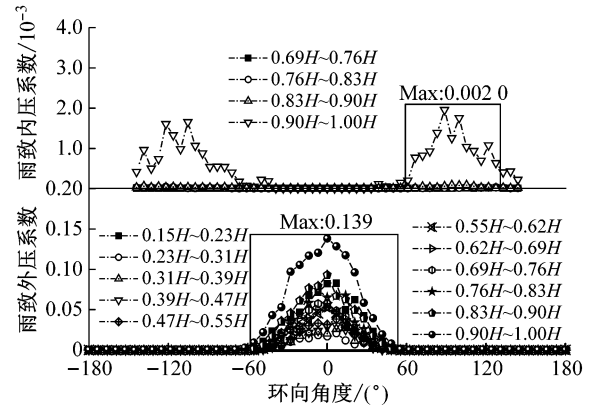
c 工况 3



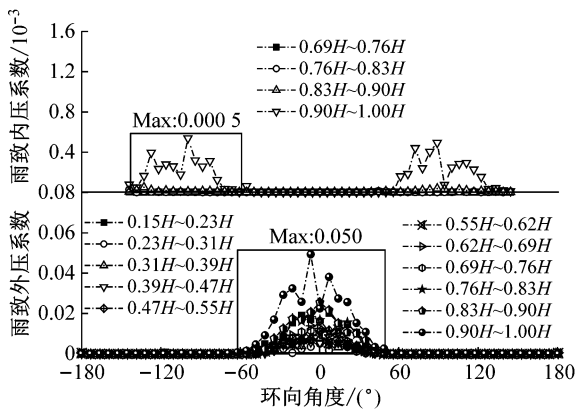
d 工况 4



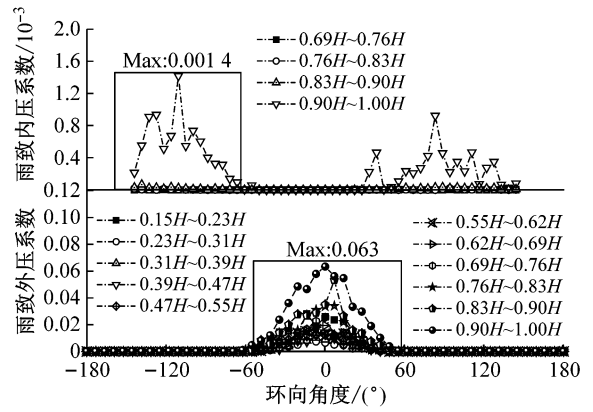
e 工况 5



f 工况 6



g 工况 7



h 工况 8

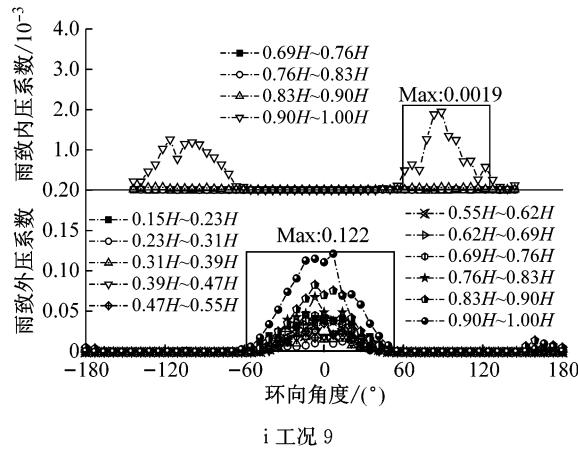


图 5 冷却塔内外表面雨致压力系数分布

Fig.5 Distribution of rain induced pressure coefficient on internal and external surfaces of cooling tower

用,外表面背风区壁面和内表面迎风区壁面有少量雨滴附着;②塔筒内、外表面收集到的雨量均以工况 3 最多,且随风速的增大逐渐减少,随降雨强度的增大逐渐增多,同时塔筒外表面收集的雨滴远多于内表面;③各工况雨致外压系数均主要分布在迎风面两侧各 60°范围内,雨致外压系数最大值为 0.184,出现在工况 3 的 0.15H~0.23H 高度范围内;④各工况雨致内压系数均主要分布在子午向 0.9H~1.00H 以及背风区域两侧各 90°范围内,雨致内压系数最大值为 0.003 8,出现在工况 3 的 0.90H~1.00H 高度范围内。

4.2 等效压力系数分析

为定量比较不同工况组合下塔筒风-雨致压力分布,定义等效内外压系数,其计算步骤为:①将内、外表面各测量点雨荷载转化成雨压强;②计算测量点雨压与对应参考高度处风压比值,即雨致内、外压系数;③将雨压系数与风压系数矢量相加,即为风雨共同作用下等效内、外压系数。

图 6 和图 7 分别给出各工况塔筒内、外典型断面等效内、外压系数对比曲线,分析可知:①不同工况下相同高度截面处等效外压系数分布规律及数值基本相同;②同一工况下不同断面等效内、外压系数略有差异,但均呈现较好的对称性,各断面等效内压系数均在冷却塔背风区域出现减小现象。

图 8 和图 9 分别给出了塔筒典型子午线的等效内、外压系数对比曲线,分析可得:①塔筒 0°子午线等效外压系数数值基本稳定,180°子午线等效外压系数随着高度的增加先增大后减小;②不同子午向

内压系数分布趋势基本一致,均随着高度的增加逐渐减小,最大值为-0.574,最小值为-0.282,180°子午线内表面底部等效内压系数显著减小,顶部等效内压系数减小微弱。

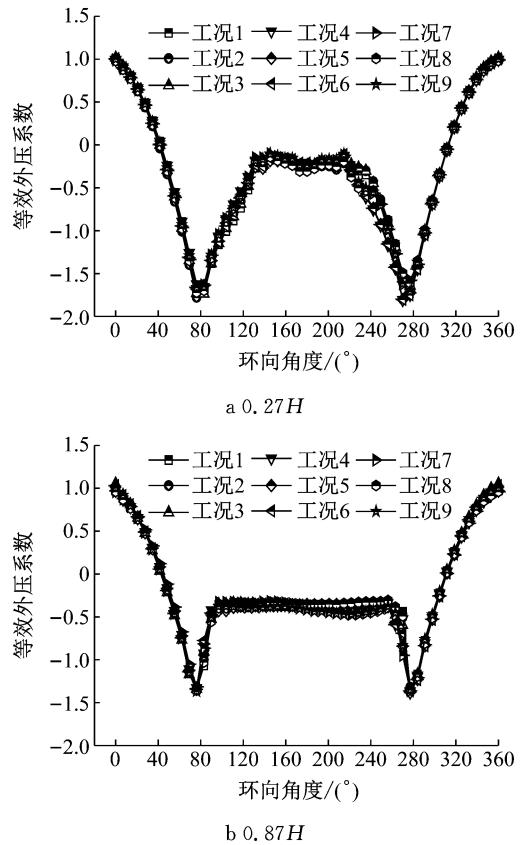


图 6 冷却塔典型高度断面等效外压系数对比曲线  
Fig.6 Comparison of equivalent external pressure coefficient on typical height sections of cooling tower

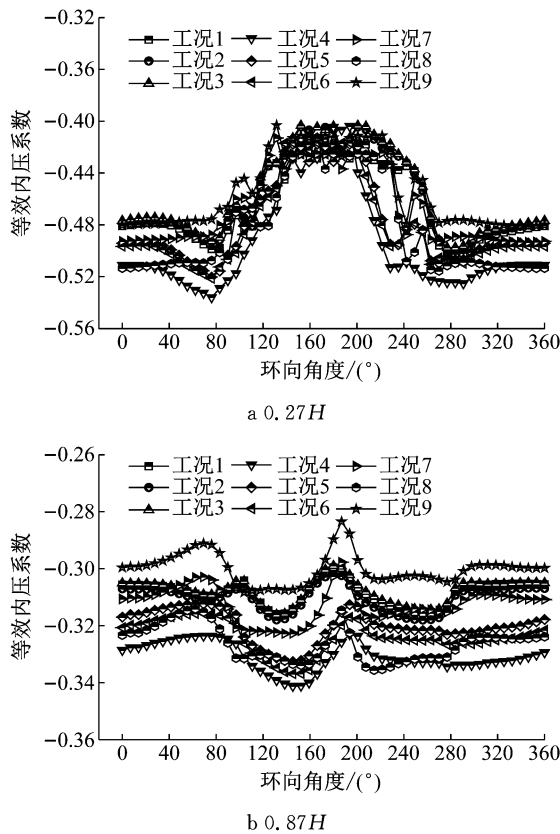


图 7 冷却塔典型断面环向等效内压系数对比曲线

Fig. 7 Comparison of equivalent internal pressure coefficient on typical height sections of cooling tower

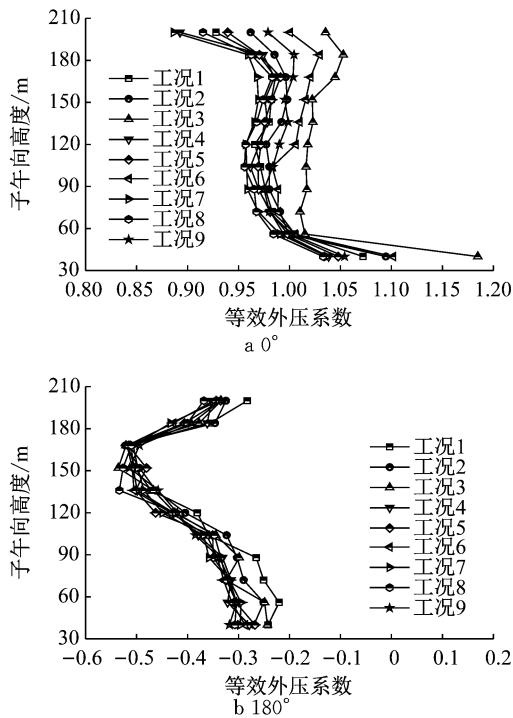


图 8 冷却塔典型子午线等效外压系数对比曲线

Fig. 8 Comparison of equivalent external pressure coefficient on typical meridians of cooling tower

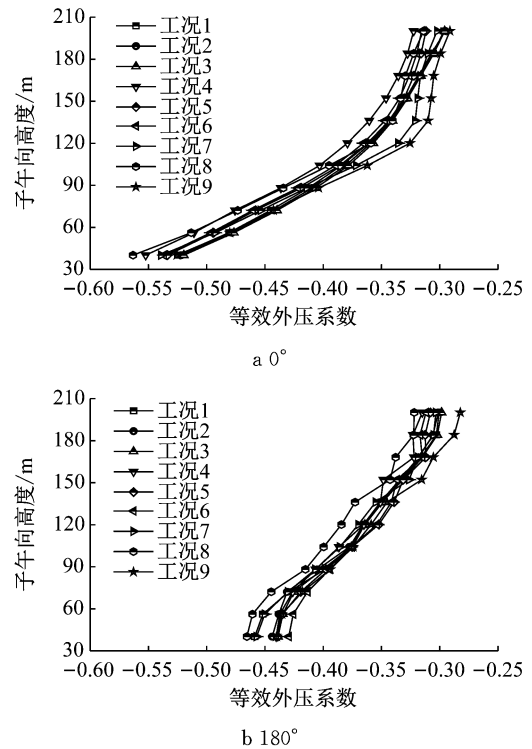


图 9 冷却塔典型子午线等效内压系数对比曲线

Fig. 9 Comparison of equivalent internal pressure coefficient on typical meridians of cooling tower

## 5 结论

(1)雨场中雨滴水平力随风速增大而增大,多数雨滴掠过塔顶并在塔筒两侧分离,仅有少数雨滴附着在塔筒外表面以及进入塔内随气流撞击至内壁面。

(2)塔筒内外表面雨滴附着数量随风速的增大而减少,随降雨强度的增大而增多,雨滴捕捉数量最多的为工况 3(风速为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、降雨强度为  $200 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),且外表面雨滴收集数量显著多于内表面。

(3)各工况雨滴主要附着在外表面迎风区域两侧各  $60^\circ$ 范围和内表面塔顶附近背风区两侧各  $90^\circ$ 范围内,且外表面雨荷载和雨压系数显著大于内表面,其中雨致外压系数最大值为 0.184,雨致内压系数最大值为 0.003 8,均发生于工况 3。

(4)各工况等效外压系数在迎风和背风区数值略有差异,喉部区域最大外压系数约为  $-1.500$ 。等效内压系数均在冷却塔背风区显著减小,不同子午线等效内压系数均随着高度的增加逐渐减小,最大值和最小值分别为  $-0.574$  和  $-0.282$ 。

综上所述,在大暴雨环境下,考虑风-雨耦合作用对于此类大型冷却塔筒外表面迎风区域和内表面塔顶背风区域的压力系数影响不能忽略,但是对其他区域的影响可以不计。同时,工程人员考虑塔筒气动性能指标进行此类大型冷却塔结构设计时可采用文中相应结论作为参考依据。

### 参考文献:

- [1] 柯世堂,余文林. 高度 200 m 特大型冷却塔二维风振系数取值方法及分布规律研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(10): 78.  
KE Shitang, YU Wenlin. Research for value obtained methods and distribution of two-dimensional wind vibration coefficient of super large cooling towers with 200m height level[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(10): 78.
- [2] 赵林,展艳艳,陈旭,等. 基于配筋率包络指标的冷却塔群塔风致干扰准则[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 65.  
ZHAO Lin, ZHAN Yanyan, CHEN Xu, *et al.* Wind-induced interference criterion for cooling tower group towers based on envelope index of reinforcement ratio [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 65.
- [3] ZHANG J F, GE Y J, ZHAO L. Influence of latitude wind pressure distribution on the responses of hyperboloidal cooling tower shell[J]. Wind & Structures: An International Journal, 2013, 16(6): 579.
- [4] CHEN X, ZHAO L, CAO S, *et al.* Extreme wind loads on super-large cooling towers[J]. Journal of the International Association for Shell & Spatial Structures, 2016, 57(1): 49.
- [5] NIEMANN H J, KOPPER H D. Influence of adjacent buildings on wind effects on cooling towers[J]. Engineering Structures, 1998, 20(10): 874.
- [6] KE S T, GE Y J. The influence of self-excited forces on wind loads and wind effects for super-large cooling towers[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 132(33): 125.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工业循环水冷却设计规范: GB/T50102—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Industrial circulating water cooling design specification: GB/T50102—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [8] VGB PowerTech. VGB-guideline: structural design of cooling tower-technical guideline for the structural design, computation and execution of cooling towers: VGB-R610Ue [S]. Essen: BTR Bautechnik Bei Kuhlurmen, 2005.
- [9] 沈国辉,张陈胜,孙炳楠,等. 大型双曲冷却塔内表面风荷载的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(4): 104.  
SHEN Guohui, ZHANG Chensheng, SUN Bingnan, *et al.* Numerical simulation of wind load on inner surface of large hyperbolic cooling tower[J]. Journal of Haerbin Institute of Technology, 2011, 43(4): 104.
- [10] 邹云峰,牛华伟,陈政清. 特大型冷却塔单塔内表面风荷载三维效应及其设计取值[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 32(1): 76.  
ZOU Yunfeng, NIU Huawei, CHEN Zhengqing. Three-dimensional effect of wind load on the single tower of the special large cooling tower, and its design value[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2015, 32(1): 76.
- [11] PETERSSON K, KRAJNOVIC S, KALAGASIDIS A S, *et al.* Simulating wind-driven rain on building facades using Eulerian multiphase with rain phase turbulence model[J]. Building and Environment, 2016, 106: 1.
- [12] 于淼. 低矮建筑风雨作用效应的数值与实测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
YU Miao. Numerical and practical research on wind and rain effects of low-rise buildings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [13] 孟超. 输电导线风雨致振机理的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.  
MENG Chao. Research on wind and rain induced vibration mechanism of transmission wires [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [14] FU X, LI H N. Effect of raindrop size distribution on rain load and its mechanism in analysis of transmission towers [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2018, 18(9): 1.
- [15] 毕继红,乔浩玥,关健,等. 带有纵向肋条斜拉索的风雨激振减振机理研究[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 168.  
BI Jihong, QIAO Haoyue, GUAN Jian, *et al.* Research on wind-rain induced vibration damping mechanism with longitudinal rib cable [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 168.
- [16] 王修勇,蒋乾超,孙洪鑫,等. 斜拉桥拉索风雨激振参数联合概率分布模型[J]. 土木工程学报, 2017, 50(10): 69.  
WANG Xiuyong, JIANG Qianchao, SUN Hongxin, *et al.* Joint probability distribution model of wind-rain induced vibration parameters of cable-stayed bridge cables [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10): 69.
- [17] DOUVI E, MARGARIS D. Aerodynamic performance investigation under the influence of heavy rain of a NACA 0012 airfoil for wind turbine applications[J]. International Review of Mechanical Engineering, 2012, 6(6): 1.
- [18] CASTORRINI A, CORSINI A, RISPOLI F, *et al.* Computational analysis of wind-turbine blade rain erosion[J]. Computers and Fluids, 2016, 141: 175.
- [19] ARASTOPOUR H, COHAN A. CFD simulation of the effect of rain on the performance of horizontal wind turbines[J]. Aiche Journal, 2017, 63(12): 169.
- [20] MCFARQUHAR G M, LIST R. The raindrop mean free path and collision rate dependence on rainrate for three-peak equilibrium and Marshall-Palmer distributions[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2010, 48(3): 1999.
- [21] 柯世堂,杜凌云,侯宪安. 考虑百叶窗透风率超大型冷却塔内吸力风振系数研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(8): 36.  
KE Shitang, DU Lingyun, HOU Xian'an. Study on wind vibration coefficient of suction force in ultra-large cooling tower considering louver permeability[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(8): 36.