

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.04.020

## 风雨耦合下大型冷却塔流场特性与表面气动力

余文林<sup>1,2</sup>, 柯世堂<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学民航/飞行学院, 南京, 211106;

2. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 南京, 211102)

**摘要:** 现行冷却塔结构抗风设计均忽略了降雨带来的影响,但在强风暴雨极端气候条件下,暴雨亦会直接影响塔筒内、外表面气动力并改变脉动风的湍流效应,而传统研究大多仅关注风驱动雨对于结构表面的冲击效应。为解决该问题,以国内已建世界最高 220 m 大型冷却塔为例,以风-雨双向耦合算法为核心,首先采用计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)技术对冷却塔周围风场进行数值模拟,并将表面风压分布与规范及实测曲线进行对比验证了风场模拟的有效性;再添加离散相模型(Discrete phase model, DPM)并进行雨滴和风场的同步迭代计算。在此基础上,系统研究了塔筒内外表面风驱雨量、雨滴附加作用力和雨致压力系数等影响规律,揭示了风雨场中塔筒表面速度流线、湍动能强度、雨滴运行速度和轨迹的作用机理。最终提出了基于风雨双向耦合算法的风-雨致等效压力系数新模型及其分布特性。研究结论可为此类冷却塔在极端气候下的表面荷载取值提供参考。

**关键词:** 大型冷却塔; 风雨耦合; 流场特性; 气动力分布

中图分类号: TU279.741

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)04-0666-09

## Flow Field Characteristics and Surface Aerodynamismic Force of Large Cooling Tower Under Coupling of Wind and Rain

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

(1. College of Civil Aviation / College of Flight, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China;

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

**Abstract:** The current wind resistance design methods for cooling towers ignore the effects of rainfall. But under extreme weather conditions with strong wind along with rainstorm, the rainstorm affects aerodynamic force on internal and external surfaces directly, and change turbulent effect of fluctuating wind. However, most traditional researches pay attention to shock effect on structure surface from wind driven rain. To solve this problem, aiming at a domestic large cooling tower which had built of the world's tallest (220 m), the wind-rain two-way bidirectional coupling algorithm is as the core. Firstly, the wind field around the cooling tower is simulated based on computational fluid dynamics (CFD) method, and the pressure distribution of cooling tower is compared with national standard and existing testing curve to verify the effectiveness of the numerical simulation. And the discrete phase model (DPM) is added and the iterative computation of raindrops and wind fields is carried out. Secondly, the influence laws on wind-driven rainfall, raindrop additional force and wind-induced pressure coefficient on internal and external surface of tower drum are studied systematically, and the action mechanism of wind speed streamline, turbulence intensity and rain drops moving speed and trajectory on

**基金项目:** 国家自然科学基金 NSFC-RGC 合作研究(51761165022)资助项目; 国家自然科学基金(51208254)资助项目; 江苏省优秀青年基金(BK20160083)资助项目; 江苏省六大人才高峰层次人才计划(JZ-026)资助项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

**收稿日期:** 2018-04-04; **修订日期:** 2018-09-10

**通信作者:** 柯世堂, 男, 教授, E-mail: keshitang@163.com。

**引用格式:** 余文林, 柯世堂. 风雨耦合下大型冷却塔流场特性与表面气动力[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(4): 666-674. YU Wenlin, KE Shitang. Flow field characteristics and surface aerodynamismic force of large cooling tower under coupling of wind and rain[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(4): 666-674.

tower drum surface are revealed. Finally, the new model and distribution characteristics of wind-rain equivalent pressure coefficient are presented based on the wind-rain two-way bidirectional coupling algorithm. The conclusions can provide the reference for surface load value of such cooling towers.

**Key words:** large cooling tower; coupling of wind and rain; flow field characteristics; aerodynamic force distribution

大型冷却塔是典型的大跨度薄壁高耸结构,风荷载是其结构设计的控制荷载<sup>[1-2]</sup>。气候条件较差时,时常伴随着暴雨的袭击,且地处东南沿海时还将遭受台风暴雨的侵袭。暴风雨天气下雨滴同时承受重力作用和脉动风与雨滴的相对速度差产生的水平风力作用,此时雨滴以较大速度撞击在塔筒壁面进而影响其表面气动性能。除此之外,暴雨亦会极大地恶化无雨状态下单纯脉动风的湍流效应,此时塔筒附近气流运动形式复杂,进而改变雨滴轨迹、附加作用力和内外压作用<sup>[3]</sup>。因此,对于此类复杂风雨共同作用下的大型冷却塔,系统研究其周围流场特性和三维气动力分布,具有重要的理论意义和工程价值。

对于风雨荷载共同作用的研究,文献[4-5]针对建筑物在风雨共同作用下的风驱雨量和风雨荷载进行了定量化的分析,同时针对各种实验方法的优缺点进行了对比;文献[6-7]采用数值模拟和有限元结合的方法对大型风力机风雨荷载特性及受力性能展开研究,结果表明雨滴对塔筒的冲击力达到风荷载的12%以上,但对于风轮、机舱和整机的受力及变形影响微弱;文献[8-9]通过数值模拟方法分析了稳态风作用下低层房屋迎风面雨荷载效应,研究表明强降雨产生的附加荷载可达风荷载的30%;文献[10-12]基于风洞试验和数值模拟的方法进行了斜拉桥拉索风雨激振机理及参数的对比研究,进而总结归纳出变化的气动力阻尼系数、水线/索运动以及脉动风之间相互作用所产生的激励力是诱发风雨激振的主要原因。综合以上发现,已有研究多集中在低矮

房屋、桥梁斜拉索以及风力机等结构,且研究结果表明风雨共同作用对结构的气动力和抗风性能大多会产生不利影响,而位于气候条件较差的大型冷却塔结构,是否需要考虑风驱雨对其塔筒表面流场特性和气动力分布的影响,目前鲜有文献研究。

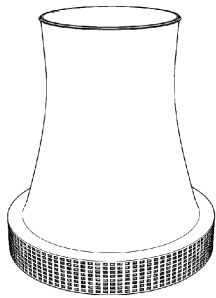
鉴于此,以国内某建成世界最高大型冷却塔(高220 m)为研究对象,首先基于计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)和离散相模型(Discrete phase model, DPM)手段分别对冷却塔周围风场和雨场进行模拟。在此基础上,系统研究了塔筒内外表面风驱雨量、雨滴附加作用力和雨致压力系数等影响规律,揭示了风雨场中塔筒表面速度流线、湍动能强度、雨滴运行速度和轨迹的作用机理,最终提出了风-雨致等效压力系数新模型及其分布特性。

## 1 工程概况

该建成超大型冷却塔高为220 m,喉部标高165 m,进风口标高30.5 m,塔顶中面直径128.1 m,喉部中面直径123 m,底部直径为185 m。冷却塔塔筒采用指数变厚,最小厚度位于喉部断面,壁厚为0.39 m,最大壁厚在下环梁位置,壁厚为1.85 m。塔筒由64对X型支柱支撑且与环板基础连接,X形柱采用矩形截面,尺寸为1.7 m×1.0 m。环板基础为钢筋混凝土结构,宽为10.5 m,高为2.2 m。考虑到冷却塔百叶窗常规工作状态,按30%透风率考虑百叶窗开启效应<sup>[13]</sup>。表1给出了该工程冷却塔的主要结构尺寸及示意图。

表1 大型冷却塔主要结构尺寸及示意图

Table 1 Size characteristics of main component and sketch map of large cooling tower

结构	标高/m	内部半径/m	塔筒壁厚/m	混凝土等级	示意图
塔筒	30.50	82.77	1.85	C40	
	77.13	71.43	0.49		
	100.70	66.92	0.46		
	148.40	61.87	0.39		
	172.40	61.57	0.39		
	218.83	64.05	0.66		
支柱	64对矩形截面1.7 m×1.0 m的X形柱			C45	
环基	宽10.5 m,高2.2 m			C35	

## 2 风-雨双向耦合算法

### 2.1 降雨强度

与气象中常用的12 h和24 h平均降雨量相比,小时降雨量更能直观反映出工程中最为关心的极端气候条件下瞬时雨强对结构的影响。表2给

出了降雨强度分类列表<sup>[14]</sup>,可以看出雨强分类的采样时间不同,同一场雨的测量结果差别较大,采用小时雨强进行结构验算相对日雨强更安全,因此本文采用小时雨强。同时考虑内陆地区常见的暴雨情形,本文取降雨强度为64 mm/h。

表2 降雨强度等级划分

Table 2 Grades of rainfall intensity

雨强等级	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨			
					弱	中	强	极值
日雨强/(mm·(24 h) <sup>-1</sup> )	10	25	50	100	200			
小时雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	2.5	8	16	32	64	100	200	709.2

### 2.2 雨滴谱分布

雨滴谱近似服从负指数分布,常用模型<sup>[15]</sup>有Best谱、Marshall-Palmer谱及Gamma谱。本文选用Marshall-Palmer谱,表达式如下

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

式中: $D_p$ 为雨滴直径,单位为mm; $n(D_p)$ 为不同直径雨滴个数浓度谱; $N_0$ 为浓度,取常数值8 000; $\lambda$ 为尺度参数,其表达式为

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

式中: $R$ 为降雨强度,单位为mm/h。

采用1.0~6.0 mm范围内6种直径的雨滴来模拟连续直径分布的降雨(见表3),每种直径雨滴数量和体积占有率采用Marshall-Palmer谱确定。

表3 雨滴直径分组

Table 3 Groupings of raindrops diameter

雨滴直径/mm	1	2	3	4	5	6
控制范围/mm	0~1.5	1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~4.5	4.5~5.5	5.5~6.0

### 2.3 雨滴末速度

雨滴受重力作用下落速度不断增加,空气阻力随之加大,当重力与阻力平衡时,雨滴以最终速度匀速下落,该速度称为雨滴末速度。文献[16]指出降落高度 $\geq 20$  m即可使几乎所有粒径雨滴达到最终末速度。文献[17]认为小直径雨滴在降落过程中可忽略变形,从而近似为球体下落。

### 2.4 壁面碰撞方程

雨滴冲击到塔筒壁面过程服从动量守恒定律,求解冲击力的关键在于碰撞时间。计算中忽略雨滴在冲击过程中可能发生的蒸发、飞溅和破裂等现象,认为雨滴与结构间相互作用遵循牛顿第二定律。由动量定理得

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

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。

雨滴在单位时间内对结构的冲击力 $F(\tau)$ 为

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

将下落时雨滴近似看作球体,则

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

由于雨滴直径一般在6 mm以下,且撞击前水平末速度相对较大,故为简化计算,将碰撞时间 $\tau$ 取为

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

则雨滴对结构的冲击力可简化为

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

式中: $\rho_p$ 为雨滴密度, $D_p$ 为雨滴直径。

## 3 风-雨双向耦合数值模拟

### 3.1 计算域与网格划分

为同时保证冷却塔处于降雨区和尾流充分发展,计算域尺寸设置为顺风向 $30D \times$ 横风向 $10D \times$ 竖向 $3H$ ,其中 $D$ 为冷却塔零米直径, $H$ 为塔高,计算模型中心距离计算域入口为3 500 m,模型最大堵塞度不超过3%。为了兼顾计算效率和精度,将整个计算域划分为外围区域和局部加密区域,形状规整的外围区域采用高质量的结构化网格划分,而内含冷却塔模型的局部加密区域采用非结构化网格划分。核心区最小网格尺寸为0.2 m,整体模型总网格数量超过1 500万,网格最小正交质量大于0.4(要求大于0.1且杜绝出现负体积<sup>[18]</sup>),网格数目及质量均满足计算要求。计算域及模型网格划分如图1所示。

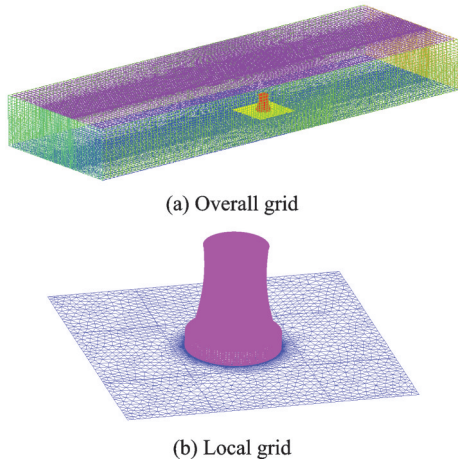


图1 整体与局部网格划示意图  
Fig.1 Overall and local grid generation

### 3.2 模型选取

本文计算方法采用三维稳态隐式算法,空气风场选用不可压缩流场,湍流模型选择标准的  $k-\epsilon$  模型<sup>[19]</sup>,采用SIMPLEC算法解决动量方程中速度分量和压力的耦合问题,计算中湍流动能、湍流耗散项和动量方程都采用二阶迎风格式离散。同时计算过程中设置了网格倾斜校正以提高混合网格计算效果。模拟时选用了标准壁面函数,其中壁面  $y^+$  值为 39.6,可保证底层网格位于对数律层中,满足常见工程要求。

### 3.3 边界条件设置

定义计算域入口为速度入口边界(Velocity inlet),出口为压力出口边界(Pressure outlet),相对压力为 0,地面以及冷却塔采用无滑移壁面(Wall),两侧壁及顶面采用等效于自由滑移壁面的对称边界条件(Interface)。对雨滴进行“面”释放,选择计算域顶部为释放面,初始释放速度为 0,重力和阻力共同作用使得雨滴在足够大的高度范围内达到末速度。风雨场计算域及其边界条件如图 2 所示。

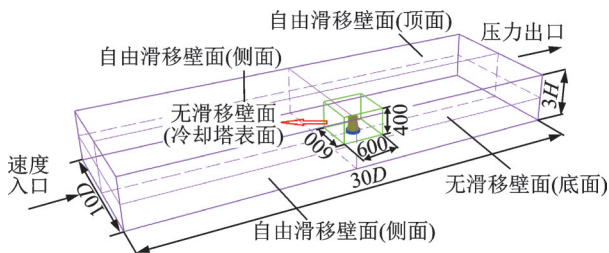


图2 计算域边界条件示意图  
Fig.2 Boundary conditions of computational domain

按照中国规范<sup>[20]</sup>设置 B 类地貌对应的速度和湍流强度分布,其中该冷却塔所在地区 10 m 高度处 100 年重现期 10 min 最大平均风速为 28.3 m/s,10 m 高名义湍流强度取为 0.14,地面粗糙度系数为 0.15,且通过用户自定义函数实现上述入流边界条

件与 FLUENT 的连接。图 3 给出了冷却塔前方风速、湍流度剖面模拟值与理论值的对比曲线,结果表明平均风速和湍流度剖面均与理论值吻合良好,风场模拟标准满足工程要求。

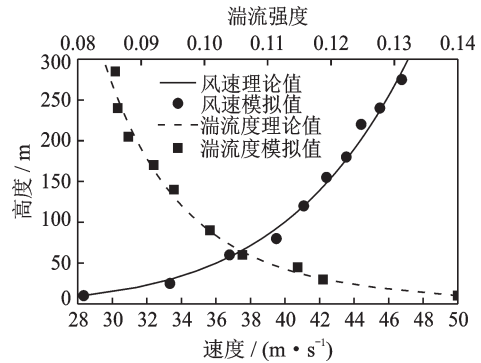


图3 速度及湍流度剖面示意图  
Fig.3 Velocity and turbulence profiles

### 3.4 有效性验证

图 4 给出了冷却塔喉部断面平均风压系数与规范<sup>[21]</sup>及实测<sup>[22]</sup>曲线对比示意图。分析可知,冷却塔喉部断面平均风压分布曲线的负压极值点和分离点对应角度与规范和西热曲线完全一致;迎风区和背风区域风压系数数值吻合较好,侧风区负压略大于规范值,与西热曲线数值基本吻合。综上认为本文数值模拟结果具有一定的有效性。

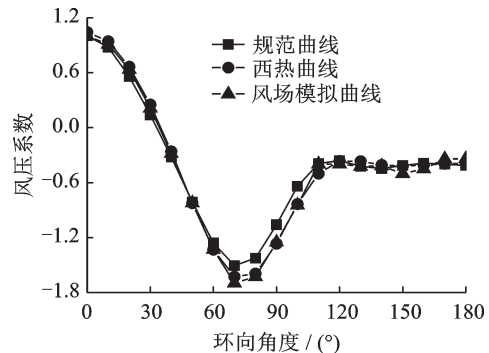


图4 冷却塔喉部断面风场数值模拟结果与规范及实测曲线对比示意图  
Fig.4 Contrast among code values, actual measuring results and numerical simulation results on throat section of cooling tower

## 4 结果对比分析

### 4.1 风场分析

图 5 给出了加入雨滴前冷却塔风场三维速度流线、压力-速度云图以及湍动能分布,由图 5 可知:(1)来流流经塔筒在迎风面产生分流,进而沿塔筒两侧外壁加速流动至背风面形成尺寸不同的涡旋,部分气流透过百叶窗进入塔筒内部,气流产生回流并在喉部形成较大尺度的涡旋;(2)塔筒外部湍动

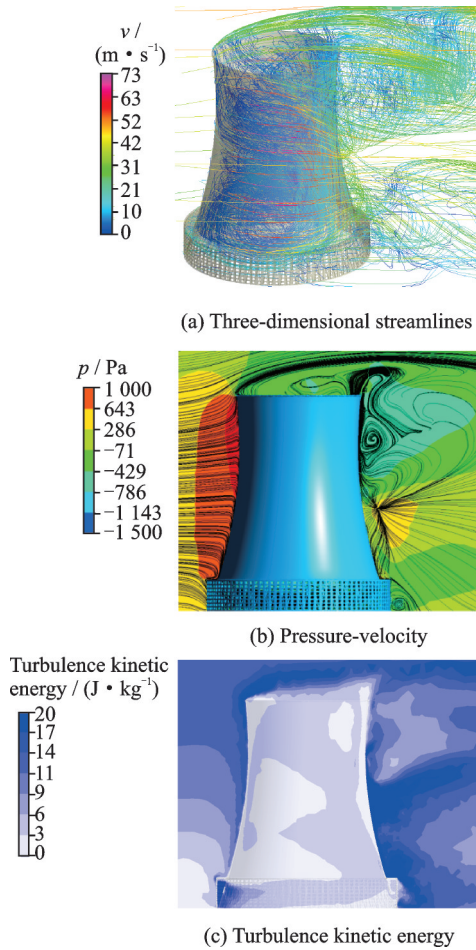


图5 冷却塔风场数值模拟结果示意图

Fig.5 Numerical simulation results of wind field of cooling tower

能强度显著大于内部,峰值主要位于塔筒迎风区顶部、背风区喉部、百叶窗迎风区内部及背风区外部。

#### 4.2 雨场分析

基于颗粒合速度对雨滴轨迹进行追踪,图6给出了风雨场中雨滴运动轨迹示意图。由图6中可以看出雨滴运动轨迹受风荷载影响显著,均以一定斜向速度击打在冷却塔壁面。部分雨滴在风力作用下击打至冷却塔迎风面,其余雨滴沿气流在结构两侧发生分离,少量附着在冷却塔侧壁面。冷却塔上部前端风雨场中的雨滴在风力、重力和空气阻力共同作用下,穿过冷却塔出风口进入冷却塔内部,并以较大速度撞击至冷却塔内表面中上部背风区域。

图7给出了冷却塔内、外表面收集到的各直径雨滴数量、撞击速度及速度占有率对比曲线。由图7对比可知:

(1)塔筒内、外表面收集到的雨滴直径均主要分布在3~6 mm之间,且以5 mm直径雨滴占比最大,外表面雨滴收集数量显著多于内表面,约为内表面的10倍。

(2)塔筒外表面收集到的雨滴水平速度占有率分布规律一致,速度占有率随着水平末速度的增大先增加后减小,其中5~15 m/s范围的速度占有率最大,为60%左右,而内表面雨滴撞击速度主要分布在0~5 m/s范围内,占有率可达近95%。

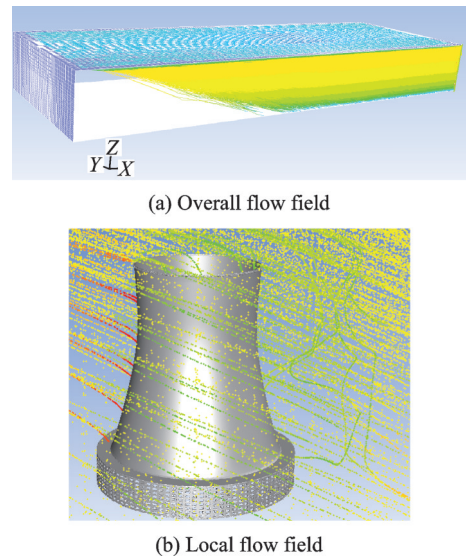


图6 风雨场中雨滴运动轨迹示意图

Fig.6 Motion trajectory of raindrop in rain and wind field

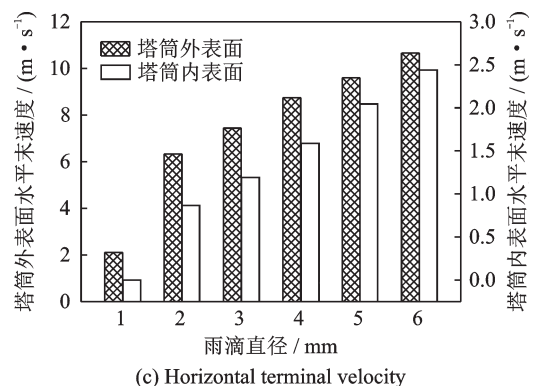
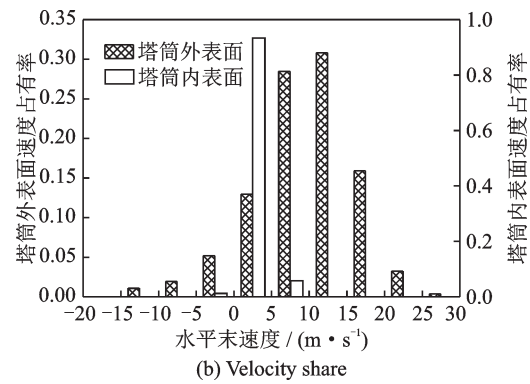
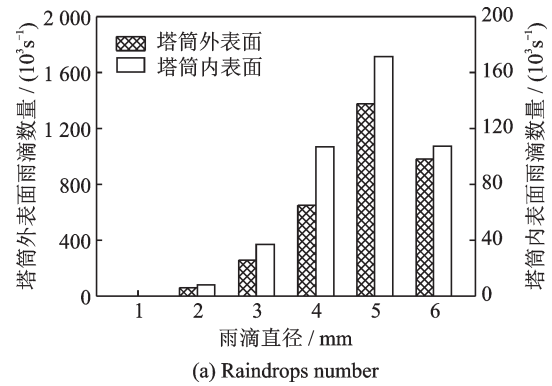


图7 雨滴数量与水平末速度分布曲线

Fig.7 Distribution of raindrop number and horizontal terminal velocity

(3)塔筒内外表面雨滴平均水平速度远小于基准风速,外表面雨滴水平速度主要分布在3~10 m/s范围内,而内表面主要分布在1~3 m/s范围内,雨

滴水平撞击速度均随着雨滴直径的增加而增大。

表4和5给出了塔筒内外表面风雨荷载特征值( $H$ 为塔高220 m)。

表 4 塔筒外表面不同高度范围雨荷载特征值列表

**Table 4 Eigenvalue table of rain load on different height range of external surface of tower body**

高度	0.15H~0.23H	0.23H~0.31H	0.31H~0.39H	0.39H~0.47H	0.47H~0.55H	0.55H~0.62H	0.62H~0.69H	0.69H~0.76H	0.76H~0.83H	0.83H~0.90H	0.90H~1.00H
雨荷载/N	18 737	2 825	4 573	4 945	6 753	6 058	8 438	9 408	13 805	17 878	35 559

表 5 塔筒内表面不同高度范围风雨荷载特征值列表

**Table 5 Eigenvalue table of rain load on different height range of internal surface of tower body**

高度	0.15H~0.69H	0.69H~0.76H	0.76H~0.83H	0.83H~0.90H	0.90H~1.00H
雨荷载/N	0	2.6	10.5	38.6	726.9
风荷载/kN	-15 368.8	-1 782.3	-1 640.1	-1 663.4	-1 777.1

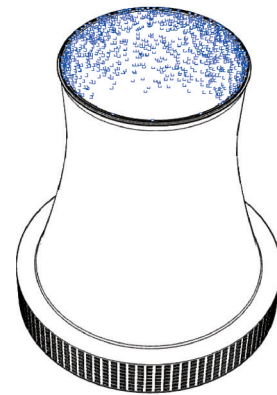
由表4,5可知:

(1)冷却塔外表面雨荷载整体上随着高度的增加先减小后增加,在0.15H~0.23H高度范围内最小,在塔顶处最大。

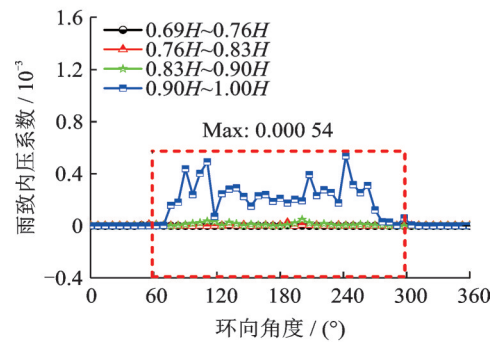
(2)冷却塔内表面雨荷载随高度的增加而增大,大部分雨荷载主要集中在0.90H~1.00H高度范围内,比值约为93%。

(3)各高度范围内表面雨荷载相对风荷载比值极小,最大仅为风荷载的0.409%,在塔筒0.90H~1.00H高度范围内,同时冷却塔外表面雨荷载显著大于内表面。

为更清晰展示各高度和角度雨滴位置、数量和对应的压力系数,图8和9分别给出了冷却塔外表

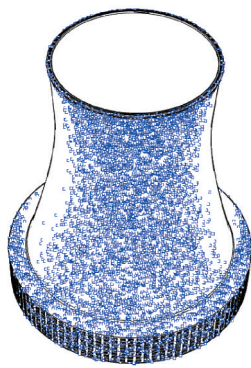


(a) Raindrop attachment point

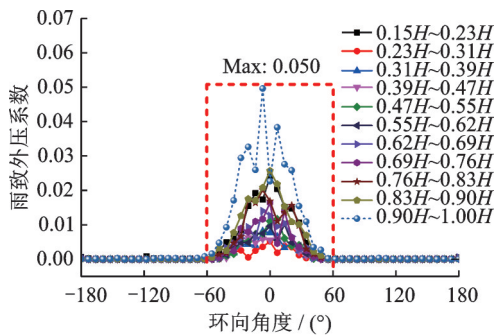


(b) Rain-induced internal pressure coefficient

图9 冷却塔内表面雨滴和雨致内压系数三维分布示意图  
Fig.9 Three-dimensional distribution of raindrop and rain pressure coefficient on internal surfaces of cooling tower



(a) Raindrop attachment point



(b) Rain-induced external pressure coefficient

图8 冷却塔外表面雨滴和雨致外压系数三维分布示意图  
Fig.8 Three-dimensional distribution of raindrop and rain pressure coefficient on external surfaces of cooling tower

面和内表面雨滴以及雨致压力系数三维分布示意图。由图9可知:

(1)雨滴撞击位置多集中分布在冷却塔外表面迎风区域和内表面上部背风区域,受气流漩涡驱动作用,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)雨致外压系数均主要集中于迎风面两侧各60°范围内,雨致外压系数最大值为0.05,发生在塔顶接近。

(3) 雨致内压系数均主要集中于塔筒  $0.9H \sim 1.0H$  高度的背风区两侧各  $120^\circ$  范围内, 雨致内压系数数值相对雨致外压系数较小, 最大值为 0.000 54, 发生在塔筒  $0.90H \sim 1.0H$  高度范围内。

### 4.3 等效压力系数分析

为定量比较塔筒表面压力分布, 定义等效压力系数, 见式(8)~(10), 其中  $Cp_{ei}$  为风雨耦合作用下第  $i$  个监控点等效压力系数,  $Cp_{wi}$  为监控点风压系数,  $Cp_{ri}$  为雨压系数;  $p_{ri}$  为雨压,  $p_{wz0}$  为参考高度处风压, 本文各监控点参考高度为该监控点远前方同高度;  $F_{ri}$  为雨荷载,  $S_i$  为计算面积。

$$Cp_{ei} = Cp_{wi} + Cp_{ri} \quad (8)$$

$$Cp_{ri} = \frac{p_{ri}}{p_{wz0}} \quad (9)$$

$$p_{ri} = \frac{F_{ri}}{S_i} \quad (10)$$

图 10 给出了冷却塔等效内、外压系数三维分布。由图 10 对比可知:

(1) 塔筒等效外压系数均沿环向角度的增大先减小后增大, 直至在背风区附近平稳发展, 其中在迎风区数值变化较小, 在侧风区和背风区域基本上随着高度的增加先增大后减小。

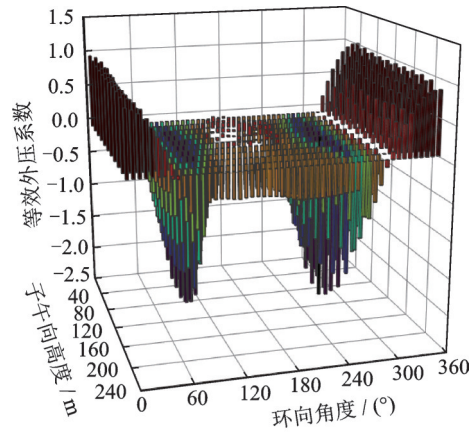
(2) 等效内压系数整体上随着高度的增加逐渐减小, 但因受穿过百叶窗的气流影响, 塔筒底部风致内压系数沿环向跳跃剧烈, 背风面数值显著小于其他区域, 随着内部气流从塔底逐渐攀升, 塔筒中上部受气流环向随机撞击影响较小。

图 11 给出了塔筒内、外表面 6 个典型断面的等效内、外压系数对比曲线, 分析可得:

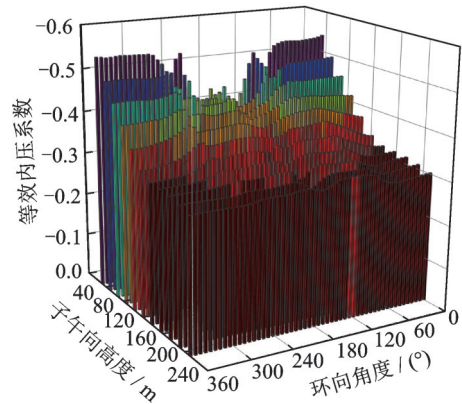
(1) 不同高度截面等效外压系数沿环向分布规律基本一致, 从迎风面到背风面均呈现先减小后增大再减小直至平稳的分布规律, 背风区域负压值也基本呈先增大后减小的趋势, 且背风面负压平稳区域逐渐变宽;

(2) 等效内压系数三维分布效应显著, 每个典型断面等效内压系数均不相同, 随着高度的增加逐渐减小, 且各断面等效内压系数均在冷却塔背风区域出现减小现象, 主要原因为气流穿过百叶窗进而撞击在冷却塔背风区内表面, 同时雨滴受来流风的影响会冲击冷却塔上部内表面, 且可发现前者对内压系数影响程度相对后者较强。

图 12 给出了塔筒  $0^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $120^\circ$  及  $180^\circ$  4 条典型子午线的等效内、外压系数对比曲线, 由图 12 可知, (1)  $0^\circ$  子午线等效外压系数数值基本稳定;  $75^\circ$  和  $180^\circ$  子午线等效外压系数随着高度的增加基本呈现先增大后减小的趋势。  $120^\circ$  子午线等效外压



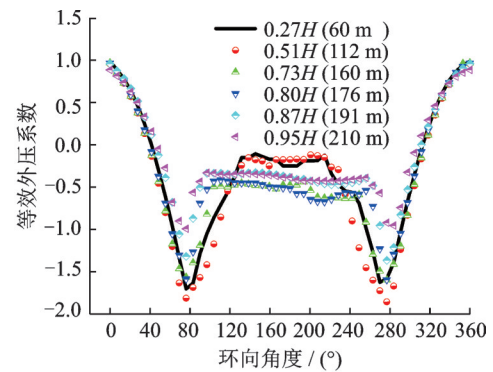
(a) External surface of tower body



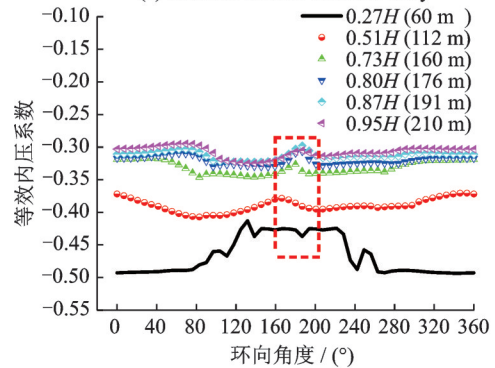
(b) Internal surface of tower body

图 10 冷却塔等效内、外压系数三维分布图

Fig.10 Three-dimensional distribution of equivalent internal and external pressure coefficient of cooling tower



(a) External surface of tower body



(b) Internal surface of tower body

图 11 冷却塔典型断面环向等效内、外压系数对比曲线

Fig.11 Comparison of equivalent internal and external pressure coefficient on typical sections of cooling tower

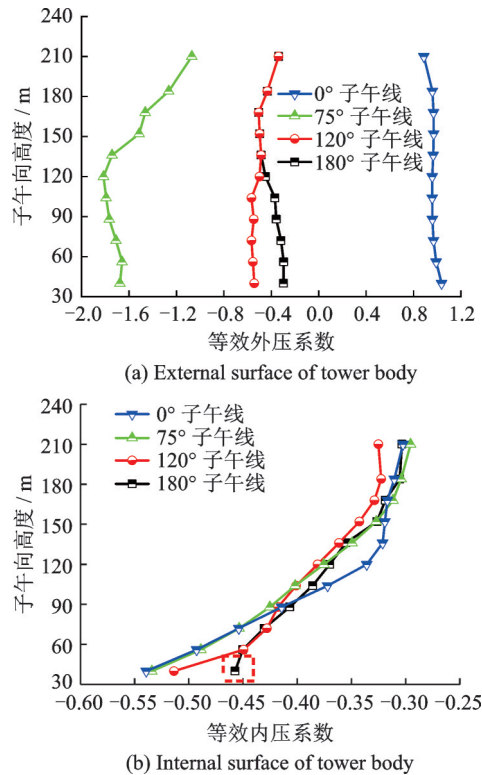


图12 冷却塔典型子午线等效内、外压系数对比曲线

Fig.12 Comparison of equivalent internal and external pressure coefficient on typical meridians of cooling tower

系数随着高度的增加不变,在塔顶区域处数值减小。(2)不同子午线方向等效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 $-0.539$ ,发生在 $0^\circ$ 子午线方向的进风口高度处,最小值为 $-0.295$ ,发生在 $75^\circ$ 子午线方向的塔顶处。(3)相比于其他子午线方向, $180^\circ$ 子午线的内表面底部等效内压系数显著减小(图中红色虚线框内所示),顶部等效内压系数减小微弱,主要原因为底部受穿过百叶窗的气流撞击在冷却塔内壁面影响,顶部则由背风区内表面雨滴冲击荷载造成。

## 5 结 论

(1)雨滴水平方向作用力推动雨滴加速运行,受冷却塔前缘和内部流出气体的驱动和包裹作用,大量雨滴掠过塔顶以及在塔筒两侧发生流动分离进入尾流区,仅有部分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、外表面收集到的雨滴直径主要分布在 $3\sim 6\text{ mm}$ 之间,且以 $5\text{ mm}$ 直径雨滴占比最大,但外表面雨滴水平速度主要分布在 $5\sim 15\text{ m/s}$ 范围内,而内表面雨滴主要分布在 $0\sim 5\text{ m/s}$ 范围内,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。

(3)冷却塔外表面雨荷载整体上随着高度的增

加先减小后增加,内表面雨荷载主要集中在 $0.90H\sim 1.0H$ ( $198\sim 220\text{ m}$ )高度范围内,且外表面雨荷载显著大于内表面雨荷载,在塔顶处为内表面雨荷载的50倍左右,同时内表面雨荷载相对内表面风荷载比值极小,最大仅为风荷载数值的 $0.409\%$ 。

(4)雨滴撞击位置主要集中在塔筒外表面迎风区域两侧各 $60^\circ$ 范围和内表面 $0.9H\sim 1.0H$ 高度的背风区两侧各 $120^\circ$ 范围内,且雨致外压系数显著大于雨致内压系数,其中雨致外压系数最大值为 $0.05$ ,雨致内压系数最大值为 $0.00054$ 。

(5)塔筒外表面最大负价值和背风区域负价值均随高度增加先增大后减小,其中喉部区域最大负价值为 $-1.5$ ;内表面压力系数整体上随着高度增加逐渐减小,最大值为 $-0.539$ ,最小值为 $-0.295$ ,在背风区负价值会显著减小,且塔筒底部减小趋势显著大于塔筒顶部。

## 参考文献:

- [1] 柯世堂,侯宪安,赵林,等.超大型冷却塔风荷载和风振响应参数分析:自激力效应[J].土木工程学报,2012,45(12):45-53.  
KE Shitang, HOU Xian'an, ZHAO Lin, et al. Super large cooling tower wind load and wind vibration response parameters analysis: Effect of self-excited force[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12): 45-53.
- [2] 柯世堂,侯宪安,姚友成,等.大型冷却塔结构抗风研究综述与展望[J].特种结构,2012,29(6):5-10.  
KE Shitang, HOU Xian'an, YAO Youcheng, et al. Large cooling tower structure wind resistance research review and prospect[J]. Special Structures, 2012, 29(6): 5-10.
- [3] HANGAN H. Wind-driven rain studies: A C-FD-E approach[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1999, 81(1/2/3): 323-331.
- [4] BLOCKENA B, CARMELIET J. A review of wind-driven rain research in building science[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(13): 1079-1130.
- [5] CHOI E C C. Simulation of wind-driven-rain around a building[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1993, 46(52): 721-729.
- [6] 董辉,高乾丰,邓宗伟,等.大型风力机风雨荷载特性数值研究[J].振动与冲击,2015,34(15):17-22.  
DONG Hui, GAO Qianfeng, DENG Zongwei, et al. Large wind turbine wind load characteristics of the numerical study[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(15): 17-22.



- [7] 高乾丰,董辉,邓宗伟,等.大型风力机风雨结构三场耦合分析[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(3):1011-1016.  
GAO Qianfeng, DONG Hui, DENG Zongwei, et al. Large wind turbine wind structure in three coupling analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 1011-1016.
- [8] 吴小平.低层房屋风雨作用效应的数值研究[D].杭州:浙江大学,2008.  
WU Xiaoping. Numerical studies of low-rise building wind and rain effect[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [9] 陈博文.低矮房屋表面风雨压力CFD数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.  
CHEN Bowen. Low building surface wind pressure CFD numerical simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [10] 唐善然,陈文礼,李惠.斜拉索风雨激振的数值模拟研究[J].工程力学,2012,29(3):124-132.  
TANG Shanran, CHEN Wenli, LI Hui. Rain vibration of the stay cables of the numerical simulation study[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 124-132.
- [11] 王凌云,徐幼麟.斜拉桥斜拉索的风雨振动:参数研究[J].工程力学,2009,26(7):147-154.  
WANG Lingyun, XU Youlin. The storm of the stay cables of cable-stayed bridge vibration: Parameter study[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (7): 147-154.
- [12] 顾明,李寿英,杜晓庆.斜拉桥拉索风雨激振理论模型和机理研究[J].空气动力学学报,2007,25(2):169-174.  
GU Ming, LI Shouying, DU Xiaoqing. Cable-stayed bridge cable vibration theory model and mechanism study[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25(2): 169-174.
- [13] KE Shitang, LIANG Jun, ZHAO Lin, et al. Influence of ventilation rate on the aerodynamic interference for two IDCTs by CFD[J]. Wind and Structures, 2015, 20(3): 449-468.
- [14] 杨俊涛,楼文娟.风驱雨CFD模拟及平均雨荷载计算方法研究[J].空气动力学学报,2011,29(5):600-606.  
YANG Juntao, LOU Wenjuan. The wind drive rain CFD simulation and average rain load calculation method research[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(5): 600-606.
- [15] 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): 1999-2004.
- [16] GUNN R, KINZER G D. The terminal fall velocity for water droplets in stagnant air[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1949, 6(4): 243-248.
- [17] MARSHALL J S, PALMER W M. The distribution of raindrops with size[J]. Journal of Meteorology, 1948, 38(5): 165-166.
- [18] 江帆. Fluent高级应用与实例分析[M].北京:清华大学出版社,2008.  
JIANG Fan. Fluent advanced application and instance analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [19] GENC M S. Numerical simulation of flow over a thin aerofoil at a high reynolds number using a transition model[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 1(C10): 1-10.
- [20] 中国工程建设标准化协会. 建筑结构荷载规范: GB50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
China Engineering Construction Standardization Association. Load code for the design of building structures: GB50009—2012[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [21] 中华人民共和国建设部. 火力发电厂水工设计规范: DL/T5339—2006[S].北京:中国电力出版社,2006.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for hydraulic design of coal-fired power plants: DL/T5339—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [22] 孙天凤,周良茂.无肋双曲线型冷却塔风压分布的全尺寸测量和风洞研究[J].空气动力学学报,1983,12(4):12-17.  
SUN Tianfeng, ZHOU Liangmao. Without ribs the elliptic wind pressure distribution of the cooling tower full size measurement and wind tunnel study[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1983, 12(4): 12-17.

(编辑:陈璐)