

# 基于风洞实验的冷却塔空腔区范围 影响因素研究

沈凡卉, 徐振, 杨光俊, 郝天明

(国电环境保护研究院有限公司, 南京 210031)

**摘要:** **目的** 基于火电厂采用“烟塔合一”排烟方式时可能由于污染物下洗造成“空腔区”内地面高浓度等问题, 分析空腔区范围, 以科学设置环境防护距离。**方法** 采用相似理论, 将10个“烟塔合一”火电厂及地形按几何比缩小至风洞实验室内, 通过测量冷却塔后方湍流度, 并对比背景湍流度的方法, 分析不同冷却塔形状以及不同下垫面条件下冷却塔空腔区的尺寸。**结果** 空腔区的高度、宽度与冷却塔高宽比存在正相关性, 山地地形更有利于湍流耗散, 而使空腔区范围较平坦地形更小, 厂区内大型建筑物位置会对冷却塔空腔区的范围产生影响。试验分析得出, 冷却塔空腔区范围基本在冷却塔高度的2倍以内, 高宽比越大, 则空腔区范围越小, 地形越复杂, 空腔区范围越小。**结论** 火电厂采用“烟塔合一”排烟方式时, 建议优先选择高宽比大的塔型, 以降低排烟冷却塔对周围环境影响的可能性。

**关键词:** 烟塔合一; 风洞实验; 空腔区; 冷却塔形状

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.012

**中图分类号:** X515      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)06-0072-06

## Influencing Factors of Cavity Area of Cooling Tower Based on Wind Tunnel Experiment

SHEN Fan-hui, XU Zhen, YANG Guang-jun, HAO Tian-ming

(State Power Environment Protection Research Institute Co., Ltd, Nanjing 210031, China)

**ABSTRACT: Objective** To analyze the range of the cavity area for setting the environmental protection distance scientifically in view that thermal power plant which use the “cooling tower with flue gas injection” may have the high concentration of the ground in the “cavity area” which caused by the downwash of the flue gas. **Methods** With the similar theory, 10 thermal power plants model with “cooling tower with flue gas injection” were shrank into the wind tunnel laboratory, and the method of measuring and comparing the turbulence and background turbulence was used to get the size of cavity area of the cooling tower with different shapes and underlying surface conditions. **Results** There was a positive correlation between the height and width of the cavity area and the aspect ratio of the cooling tower. In addition, the mountainous terrain was more favorable for the vortex dissipation, so that the cavity area was smaller than the flat terrain. The position of large buildings in the plant could affect the range of the cavity area of cooling tower. The cavity area of the cooling tower was basically within 2 times of the height of the cooling tower. The larger the aspect ratio was, the smaller the range of the cavity area was. **Conclusion** It is recommended to give priority to the use the “cooling tower with flue gas injection” of large aspect ratio for thermal power plants to reduce the possibility of the flue gas affecting the surrounding environment.

**KEY WORDS:** cooling tower with flue gas injection; wind tunnel experiment; cavity area; the shape of cooling tower

火电厂“烟塔合一”技术将烟囱设置在冷却塔内，利用冷却塔热力抬升来排放烟气<sup>[1]</sup>。该技术起源于德国，可简化火电厂的烟气系统，减少设备投资，并节约土地资源<sup>[2]</sup>，因此在世界各地得到应用<sup>[3-4]</sup>。德国采用“烟塔合一”的火电装机总容量超过  $1200 \times 10^4$  kW，最大单机容量达  $97.8 \times 10^4$  kW<sup>[5]</sup>。我国自 2005 年引进该技术，目前最大单机容量也达  $100 \times 10^4$  kW。Schatzmann 等采用风洞模拟“烟塔合一”污染物扩散特征，认为环境风速较大时，污染物会出现下洗<sup>[6]</sup>。国内采用实地勘测、风洞实验以及数值模拟等技术对冷却塔结构及烟气抬升情况的研究表明，“烟塔合一”污染物下洗的原因为冷却塔背风面会产生“空腔区”<sup>[7-9]</sup>，下洗可能造成“空腔区”内地面高浓度及小水滴呈酸性沉降等问题。空腔区是指当流体流过钝头物体时，在物体的下游边界处会发生流动分离现象，背风侧的分离区中会出现低压区。与圆柱体类似，冷却塔后方不会产生像长方体那样固定的水平涡，而是在圆柱体的两侧交替产生垂直轴的涡，且不断脱落，流向下流，形成卡门涡街。卡门涡街组成的尾迹区也是低压区，压力要比圆柱体前面的来流压力低得多，湍流强度也比较大。目前，对空腔区范围的研究主要集中在长方体和圆柱体，而冷却塔水平截面是圆形的，外形在垂直方向是双曲面，不能简单地用长方体和圆柱体的经验公式计算，通过风洞试验可提高冷却塔空腔区范围确定的准确度<sup>[11]</sup>。文中采用风洞测量湍流度的方法来确定“烟塔合一”冷却塔空腔区的范围，并分析影响空腔区范围的主要因素，为科学设置“烟塔合一”环境防护距离提供理论支撑。

## 1 物理风洞的试验理论及方法

### 1.1 试验设计

国电环境保护研究院有限公司环境风洞为双实验段风洞，主要技术性能为：第一实验段宽 3.5 m、高 2.2 m、长 20 m，风速调整范围为 0.1~6.4 m/s；第二实验段宽 1.5 m、高 1.2 m、长 20 m，风速调整范围为 0.5~25 m/s。本次试验在第一试验段中进行。

为获得空腔区的三维尺寸，需要测量空腔区的垂直范围（主要测量空腔区高度和下风向长度）和水平范围（主要测量下风向长度和宽度）。原型流动中，环境风速为 1 m/s，按冷却塔的代表性直径 120 m 计算，其流动雷诺数达到  $8 \times 10^6$ ，将会产生稳定的湍流卡门涡街。为了使模拟实验也能产生稳定的卡门涡街，应使模拟试验的雷诺数在  $300 \sim 3 \times 10^5$  范围内<sup>[12]</sup>（约相当于模拟试验的流速在 0.045~45 m/s 之间）。同时为了使模拟的空腔区更接近实际，采用塔顶处模拟试验的风速为 2.4 m/s。

## 1.2 试验相似理论

### 1.2.1 几何相似

几何相似主要指试验模型要按一定的几何缩比制作和布置，许多对流动有重要影响的细节也必须一定程度上在模型中再现。在原型流中，尺寸小于粗糙度长度的细节，不必在模型中再现；与粗糙度长度相同等级的几何形状也不必精确地再现，但要用等价粗糙度代替；尺寸大于粗糙度长度的几何形状就要精确地再现。有时还要强化粗糙度，以使流动成为充分发展的湍流。几何相似除了要求将现场地形地物按几何缩比制作模型外，还要求模拟边界层的粗糙度长度  $z_{0m}$  与其对应的真实大气边界层中粗糙度长度  $z_{0p}$  之比等于几何尺度比  $L$ ，模拟试验中采用的几何比通常为 1 : 400~1 : 600。

### 1.2.2 运动相似

运动相似是指要再现大气边界层中的风速、湍流结构分布。模拟近地层，选择对数分布的风廓线，因为在近地层中，风速在垂直方向的分布符合下述形式（中性稳定度时）：

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

式中： $\bar{u}$  为平均风速，m/s； $u_*$  为摩擦风速，m/s； $z$  为地面以上的高度，m； $z_0$  为粗糙度长度，m； $k$  为卡门常数， $k=0.4$ ；

如果模拟整个边界层，通常选择指数风廓线，也就是风速随高度的变化符合下述形式：

$$\bar{u} = u_{10} \left( \frac{z}{z_{10}} \right)^p \quad (2)$$

式中： $u_{10}$  为参考高度  $z_{10}$  上的平均风速，m/s； $p$  为风廓线指数，与大气边界层的稳定度有关。

通常火电厂的烟囱、冷却塔以及主要设备的厂房都比较高，必须模拟整个大气边界层，因此通常都选择指数风廓线进行模拟。

## 1.3 测量方法

### 1.3.1 湍流度的测量

使用 IFA300 智能流动分析仪测量风速廓线和湍流强度，测量探头为直径 20  $\mu\text{m}$ 、长 6 mm 镀铂膜的玻璃丝，对流场基本没有干扰，响应频率可达 40 kHz 以上，非常适用于测量流动的湍流特性。相关试验单次采样时间为 8 s，采样频率为 1000 Hz。为了减少时间尺度大于 8 s 的脉动对湍流测量数据的影响，对每一个采样点，重复采样 12 次。采样后计算各轮各网格点上的湍流强度平均值和标准差。

计算每个网格点上每个样本的平均风速和湍流强度：

$$\bar{U} = \frac{1}{4000} \sum_{n=1}^{4000} u_n \quad (3)$$

$$I = \frac{1}{\bar{U}} \sqrt{\frac{1}{4000} \sum_{n=1}^{4000} (u_n - \bar{U})^2} \quad (4)$$

计算每个网格点上平均湍流强度和其标准差:

$$\bar{I} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} I_i \quad (5)$$

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{1}{11} \sum_{i=1}^{12} (I_i - \bar{I})^2} \quad (6)$$

### 1.3.2 空腔区的判定方法

由于空腔区是流动在物体表面分离后形成的,其内部有大量分离涡旋和回流,通常空腔区中的湍流强

度明显大于背景流动的湍流强度。据此,可以测量物体下风向的湍流强度,以湍流强度相对于背景湍流突然增大的位置来确定空腔区的边界。在环境影响评价中,通常取湍流强度大于背景值加上2倍标准差<sup>[14]</sup>。

### 1.3.3 坐标轴定义

$x$ 轴正方指向下风向, $z$ 轴垂直向上, $y$ 轴垂直于风向,与 $x$ 、 $z$ 轴组成右手坐标系。坐标原点设置在下游塔底边背风沿中点。

### 1.3.4 研究对象

对10个火电厂“烟塔合一”进行风洞试验分析其空腔区的范围,相关参数见表1,试验现场如图1所示。

表1 试验的“烟塔合一”火电厂冷却塔参数

序号	项目名称	建设规模/MW	地形特点	塔数量/个	冷却塔高度/m	冷却塔出口直径/m	冷却塔底部直径/m
1	A 电厂	2×1000	平坦地形	2	189	82.4	137.5
2	B 电厂	2×600	山地地形	2	180	85	138.3
3	C 电厂	2×350	近处平坦	2	130	47.89	77
4	D 电厂	2×350	平坦地形	1	165	103	171.47
5	E 电厂	2×350	平坦地形	2	140	62	112
6	F 电厂	2×350	平坦地形	2	120.3	45	105
7	G 电厂	2×300	平坦地形	2	110	52	87
8	H 电厂	2×300	平坦地形	2	120	47	85.7
9	I 电厂	2×660	平坦地形	2	176	103	148
10	J 电厂	2×1000	平坦地形	2	205	114	192



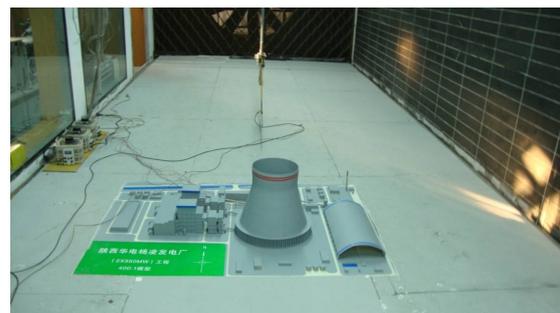
a A 电厂平坦地形冷却塔后湍流度测量 ( $\lambda_L=1:600$ )



b B 电厂复杂地形冷却塔后湍流度测量 ( $\lambda_L=1:600$ )



c C 电厂热线测量空腔区湍流度测量 ( $\lambda_L=1:400$ )



d D 电厂热线测量空腔区湍流度测量 ( $\lambda_L=1:400$ )

图1 不同塔型、不同下垫面类型烟塔现场测试图

### 3 结果与分析

#### 3.1 下垫面条件对空腔区范围的影响

以 A 和 B 电厂为例，分析下垫面条件对空腔区范围的影响，其中 A 电厂位于平坦地形，B 电厂为山地地形，两电厂冷却塔的高度比较接近（如图 1a、b 所示）。根据冷却塔后湍流速度测量数据（表 2、表 3），分析冷却塔空腔区的范围。

1) 空腔区高度。在紧邻塔下游的  $x=0$  处，湍流发展比较旺盛，最高值可达 43.4%，空腔区的高度边界较明显，高度可至 380 mm（相当于 1.2 倍塔高）。下风向距离 315 mm（相当于 1 倍塔高）处，湍流强度略有降低，但空腔区的高度没有变化，高度仍保持在 380 mm。下风向距离 630 mm（相当于 2 倍塔高）处，空腔区高度降低为 250 mm，相当于原型高度 150 m。下风向距离 1260 mm（相当于 4 倍塔高）处，湍流速度为背景湍流速度加上 2 倍标准差的范围内，空腔区消失。

表 2 下风向不同距离处、不同高度的平均湍流速度（模型）

%

下风向距离 $x/\text{mm}$	离地高 $z/\text{mm}$									
	110.0	157.5	200.0	250.0	315.0	340.0	360.0	380.0	400.0	420.0
0	30.6	37.4	38.6	37.4	43.4	40.9	32.8	27.3	19.8	19.6
150	38.2	35.6	35.8	31.8	36.7	32.0	30.7	26.7	20.2	17.3
315	35.5	33.0	30.2	28.0	28.4	25.3	24.3	23.4	19.5	15.9
450	33.1	27.4	26.6	26.4	24.4	23.0	20.9	21.9	18.0	16.9
630	29.9	29.1	22.7	22.3	19.4	20.1	19.0	18.4	16.7	14.2
700	28.6	26.1	23.3	23.9	19.6	18.2	20.2	17.1	16.1	16.6
800	25.9	23.3	23.8	21.2	19.5	18.0	17.3	17.6	16.4	14.3
900	25.2	22.3	22.9	20.0	18.6	20.5	16.3	17.1	17.3	16.4
1000	22.3	22.2	21.6	19.8	18.2	17.2	17.1	15.8	14.8	15.5
1100	23.0	23.0	19.8	21.7	20.0	16.1	17.5	15.6	13.7	13.5
1260	19.4	18.8	21.5	18.9	18.5	17.5	17.8	16.8	12.9	14.9
背景湍流速度	13.6	14.6	13.0	13.7	12.0	13.2	11.9	9.7	9.7	9.7
标准差 $\sigma_t$	2.4	3.1	1.6	3.6	2.8	4.9	4.2	1.9	2.1	1.8

表 3 2/3 塔高处冷却塔下风向不同距离处水平宽度  $y$  方向的平均湍流速度

%

下风向距离 $x/\text{mm}$	水平宽度 $y/\text{mm}$									
	-200	-180	-160	-140	-120	-90	-60	-30	0	0
0	12.7	13.8	17.2	22.3	23.9	28.3	35.3	44.0	36.3	
315	18.9	21.1	24.5	27.2	31.5	31.1	32.5	26.8	29.8	
630	19.1	23.4	23.9	24.3	25.3	23.6	22.8	26.4	23.0	
1260	16.8	17.0	18.1	19.3	20.7	18.5	19.7	19.7	19.3	
	30	60	90	120	140	160	180	200		
0	39.7	36.0	31.0	30.1	23.4	22.5	18.2	12.9		
315	27.5	28.2	27.4	23.2	21.5	20.4	20.6	17.6		
630	24.4	26.7	26.1	22.9	25.4	19.4	22.4	20.8		
1260	19.2	21.8	20.7	20.2	22.3	19.0	19.0	18.0		

2) 空腔区长度。在模型高度 110 mm 处，空腔区的长度为 700~800 mm；在半塔高 157.5 mm 处，空腔区长度最远可延伸到 700 mm（相当于 2.2 倍塔高）；在模型高度 250 mm 处，空腔区的长度约为 630 mm；在模型高度 340 mm 处，空腔区的长度为 450 mm。

3) 空腔区的宽度。2/3 塔高下风向不同距离处，

水平方向（ $y$  方向）平均湍流速度变化见表 3。由于 A 电厂冷却塔旁有两个体积较大的煤仓，若测试位置较低，煤仓会影响空腔区宽度的测试，因此选择在 2/3 塔高处进行测量，以消除煤仓对空腔区宽度测试的影响。在  $x=0$  mm 处，空腔区的模型宽度介于 -140 mm 与 +160 mm 之间，此处湍流发展比较旺盛，最高湍流速度达到 44%，为整个空腔区内最高水平；在  $x=315$  mm

(相当于1倍塔高)处,湍流强度有所降低,但空腔区的宽度略有增加,正负方向模型宽度分别达到-180 mm与+180 mm;在 $x=1260$  mm,下风向距离相当于4倍塔高处,湍流强度已降到背景湍流度加标准差2倍范围内,空腔区消失。空腔区最宽处位于下风向189 m处,介于 $\pm 108$  m之间,根据空腔区长度的测量结果,原型高度126 m处,空腔区的长度为400 m。

根据测试结果,确定A、B电厂空腔区的范围(见

表4)。山区地形冷却塔后的空腔区长度明显低于平坦地形,主要是因为冷却塔位于山脉背风侧形成的大空腔区内,背景湍流强度较高,冷却塔后形成的卡门涡与背景湍流能量交换强烈,卡门涡衰减较快,在很短的距离内就与背景湍流融合了。由于山脉的作用,使得气流发生爬坡及绕流作用,山体本身就会产生一定的空腔区,山体背风侧气流的不均匀性对厂区冷却塔背风侧气流的干扰作用较大,对冷却塔背风侧气流湍流有一定的削弱作用。

表4 A、B电厂空腔区的尺寸

m

项目名称	冷却塔尺寸			空腔区尺寸		
	高度	出口直径	底部直径	长度	高度	宽度
A 电厂	189	82.4	137.5	450	228	216 (最大半宽 108)
B 电厂	180	85	138.3	330	250	330 (最大半宽 120)

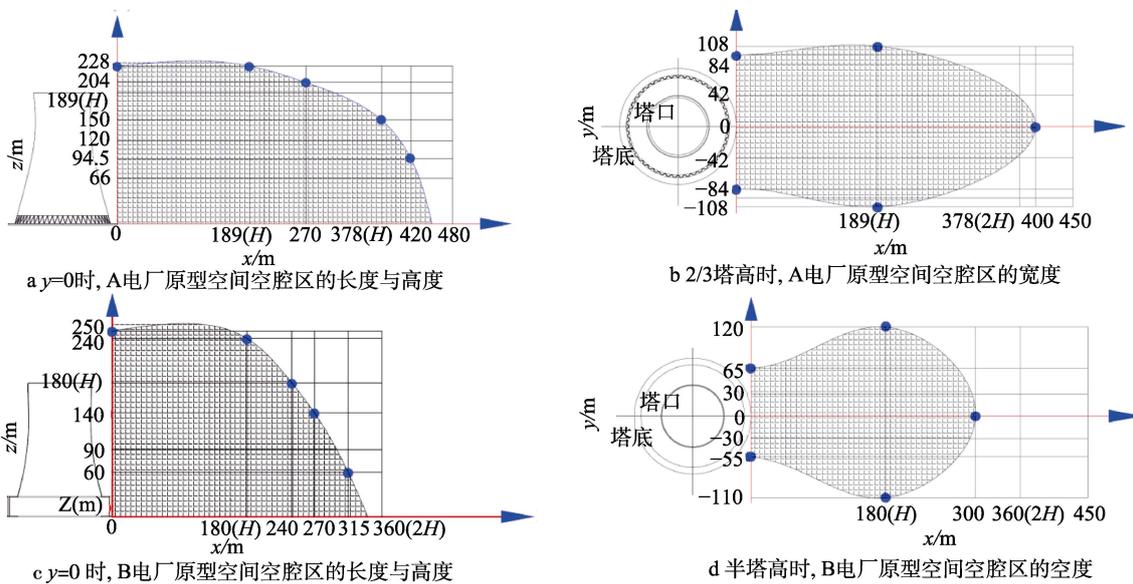


图2 原型空间内冷却塔下风向空腔区范围

### 3.2 冷却塔塔型对空腔区范围的影响

以C和D电厂为例,分析不同塔型对空腔区范围的影响。其中C电厂冷却塔属于典型的瘦高型,塔的高度和直径的比值为2.98;D电厂冷却塔属于典型的短粗型,高度与直径的比例为1.04(见图1c、d)。采用同样的分析方法确定C、D电厂空腔区的尺寸(见表5),C电厂空腔区长度为塔高的2.15倍,而D电厂空腔区长度为塔高的3.15倍。由于D电厂出口直径和底部直径较大,造成冷

却塔后空腔区宽度明显大于C电厂,空腔区内湍流衰减较慢,同时显著增大空腔区的长度范围(如图3所示)。因此,选用高宽比较大的塔型可降低空腔区范围。

### 3.3 空腔区范围与冷却塔尺寸的关系

采用上述研究方法对E—J电厂进行测试(见表6),由于塔型的差异造成空腔区的尺寸有较大变化,其长度从1.83~3倍塔高,高度从1.17~1.39倍塔高。

表5 C、D电厂空腔区的尺寸

m

项目名称	冷却塔尺寸			空腔区尺寸		
	高度	出口直径	底部直径	长度	高度	宽度
C 电厂	130	47.89	77	280	152	112 (最大半宽 64)
D 电厂	165	103	171.47	520	221	198 (最大半宽 108)

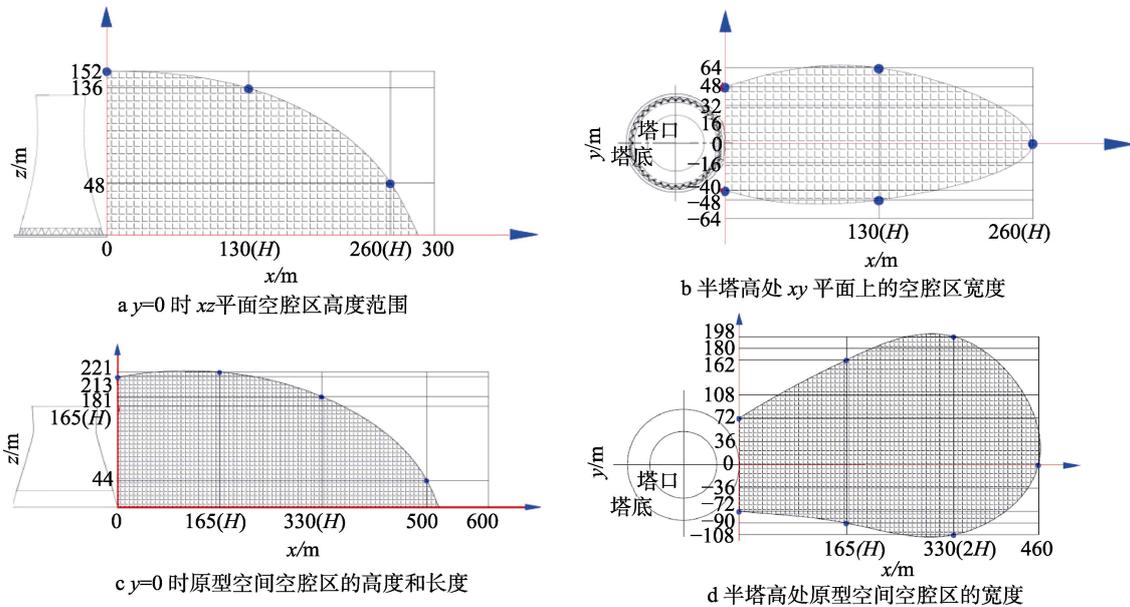


图 3 C、D 电厂冷却塔空腔区范围

表 6 试验的“烟塔合一”火电厂空腔区范围

序号	项目名称	冷却塔高度/m	冷却塔出口直径/m	冷却塔底部直径/m	空腔区长度/冷却塔高度	空腔区高度/冷却塔高度
1	E 电厂	140	62	112	2.21	1.20
2	F 电厂	120.3	45	105	2.70	1.13
3	G 电厂	110	52	87	2.00	1.30
4	H 电厂	120	47	85.7	2.00	1.20
5	I 电厂	176	103	148	2.30	1.36
6	J 电厂	205	114	192	2.24	1.34

## 4 结论

1) “烟塔合一”冷却塔的空腔区范围对科学设置环境防护距离有重要意义, 风洞试验表明的空腔区范围基本在 3 倍塔高范围内。

2) 空腔区范围主要受冷却塔塔型影响, 空腔区宽度和高度与冷却塔的直径/高度比有关。一般情况下, 同样高的冷却塔, 其直径越大, 空腔区的长度也越长。塔的曲线形状也会在一定程度上影响空腔区的长度。

3) 空腔区范围与冷却塔附近的地形密切相关, 背景湍流强度大会造成脱体涡更快地耗散, 从而使空腔区长度变短, 但冷却塔附近有其他大型物体的湍流影响时会激发脱体涡增强, 从而使空腔区变长。

### 参考文献:

[1] SCHATZMANN M, POLICASTRO A J, An Advanced Integral Model for Cooling Tower Plume Dispersion[J]. Atmos Environ. 1984, 18(4): 663-674.  
 [2] 秦松波. 烟塔合一技术[J]. 上海电力, 2007(5): 493-495.  
 [3] BUSCH D, HARTEB R, KRATZIG W, et al. New Natural Draft Cooling Tower of 200 m of Height[J]. Eng Struct, 2002, 24(12): 1509-1521.  
 [4] ROTH M, GERBER R, NIEPEL A. Commissioning and Operation of the World-wide Largest Natural Draught Wet Cooling Tower of a Lignite-fired Power Plant with Flue

Gas Discharge[C]// Natural Draught Cooling Towers, Pro-ceedings of the Fifth International Symposium on Natural Draught Cooling Towers. London: CRC Press, 2004.

[5] 林勇. 烟塔合一技术特点和工程数据[J]. 环境科学研究, 2005, 18(1): 35-39.  
 [6] SCHATZMANN M, LOHMEYER A, ORTNER G. Flue Gas Discharge from Cooling Towers. Wind Tunnel Investigation of Building Downwash Effects on Ground-level Concentrations[J]. Atmos Environ, 1987, 21(8): 1713-1724.  
 [7] 顾明. 土木结构抗风研究进展及基础科学问题[C]// 第七届全国风工程和空气动力学学术会议论文集. 成都: 西南交通大学, 2006.  
 [8] 崔克强, 李浩. 燃煤发电厂烟塔合一环境影响之一: 烟气抬升高度的对比计算[J]. 环境科学研究, 2005, 18(1): 27-30.  
 [9] 崔克强, 柴发合. 燃煤发电厂烟塔合一环境影响之二: 华能北京热电厂烟塔合一设计环境影响估算[J]. 环境科学研究, 2005, 18(1): 31-34.  
 [10] 莫华, 刘思涓. 燃煤电厂“烟塔合一”技术在环评技术评估中存在的问题与建议[J]. 电力环境保护, 2009, 25(3): 48-50.  
 [11] CERMAK J E. Application of Fluid Mechanics to Wind Engineering, a Freeman Scholar Lecture[J]. J Fluids Engineering, 1975, 97: 9-38  
 [12] 环境保护部环境工程评估中心. 烟塔合一排烟方式火力发电项目大气环境影响研究报告[R]. 北京: 环境保护部环境工程评估中心, 2017.