

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20140100

喷嘴及其布置方式对冷却塔性能的影响

闵健, 王连声, 姜媛媛, 郭丽慧, 腾东玉, 赵虎军
(国电龙源电力技术工程有限责任公司, 北京 100039)

摘要: 依据旋流型中心喷嘴(XPH型)和溅水碟型伞式喷嘴(TP-II型)两种喷嘴的淋水性能实验研究,分析喷嘴各参数及不同布置方式的全塔喷嘴群布水的综合效果.结果表明:XPH型喷嘴的流量系数低,适用于工作水头压力 $p_h \geq 10$ kPa的工况,TP-II型喷嘴则需依靠喷嘴间相互组合作用达到布水均匀;冷却塔外围靠近壁面的淋水可采用XPH型喷嘴的正三角形布置;中部主空气流速区域宜采用TP-II型的正四边形布置,以增大淋水密度和均匀性;中心区域可采用TP-II型的正六边形布置,以降低淋水密度且减少投资.分析结果可为冷却塔布水的优化设计和改造提供定量参考.

关键词: 冷却塔; 流量系数; 喷溅半径; 淋水不均匀性系数

中图分类号: TK219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2015)02-0060-05

Influence of Nozzle Type and Arrangement on the Performance of Cooling Tower

MIN Jian, WANG Liansheng, JIANG Yuanyuan, GUO Lihui, TENG Dongyu, ZHAO Hujun
(GD Longyuan Power Technology & Engineering, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the spray performance experiments of XPH and TP-II nozzles, the water distribution throughout the whole tower affected by different parameters and arrangement of nozzles was analyzed. The results show that the flow coefficient of XPH is low and able to apply to the condition where pressure head is larger than 10 kPa. Groups of TP-II nozzles should be used to make water well distributed. XPH nozzles should be positioned as an equilateral triangle at the wall zone in the tower. The middle zone full of air should be controlled by TP-II nozzles arranged as a square. TP-II nozzles distributed as a regular hexagon should be used at the core of the tower to reduce the spraying consistency and investment. The results can provide quantitative references for the optimization of cooling design and transformation.

Key words: cooling tower; flow coefficient; splash radius; sprinkling non-uniformity coefficient

汽轮机做功后的乏汽在凝汽器中与循环水进行换热,火电厂多采用自然通风逆流湿式冷却塔对循环热水进行冷却降温^[1].循环热水由泵送入配水系统,通过喷溅装置将其分布在填料层上,并下行进入填料层中与逆流空气进行换热.整个冷却塔的温降在淋水区、填料区和雨区的比例约为1:7:2,故大部分研究集中在填料区的换热问题^[2].但如果淋水不均,出现重水区、轻水区或无水区,导致风阻过大和空气短路的现象并存,导致填料区负荷变化加剧,整个冷却塔的效率下降,从而影响出塔水温和凝汽器的真空度,使耗煤量增大.

目前,火电厂采用的槽式配水系统供水压力低、清理方便、操作成本低,配用的喷嘴类型可分为旋流型中心喷嘴和溅水碟型伞式喷嘴.喷溅装置的类型、分布位置和数量等是影响配水性能的重要参数,而配水的合理性与喷溅装置淋水的均匀性对冷却塔换热效率影响极大^[3].传统喷溅装置间距的设计是依据单个喷嘴的喷溅半径和其淋水均匀性,并未系统考虑全塔喷嘴群组合的喷溅淋水均匀性.文献[4]指出,在原有设计基础上增大喷嘴直径并采用菱形布置的改造方案,以满足夏季高负荷下冷却塔的出塔水温要求,但并未深入分析和研究.

收稿日期: 2014-06-25; 修回日期: 2014-11-27

作者简介: 闵健(1974—),男,山东人,高级工程师, minjian1974@163.com.

本文通过对旋流型中心喷嘴(XPH型)和溅水碟型伞式喷嘴(TP-II型)两种典型喷嘴^[5]的性能进行实验,结合理论分析探讨了喷溅装置各参数对配水性能的影响,对不同布置方式中每个喷嘴的溅落高度、覆盖范围、相近喷嘴间溅散水滴衔接、水量迭加后的分布进行综合分析,以获得全塔喷嘴群形成相互组合的综合布水效果,并据此对300 MW机组的5 000 m²换热面积的冷却塔喷嘴进行优化组合设计,以达到塔内最优配水。

1 喷嘴性能实验

1.1 实验装置

喷射实验装置由水池、水泵、供水管道、喷水池、喷溅装置、接水盘及回水沟组成,供水管上安装阀门、压力表及流量计,用以调节、测量水头压力及水流量。喷嘴喷射示意图见图1,图中1为供水管/槽,2为喷溅装置,3为接水盘; h 为工作水头高度, H 为溅落高度, d 为喷嘴内径, R 为喷溅半径。

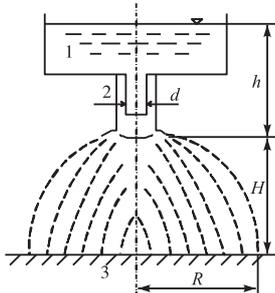


图1 喷嘴喷射示意图

Fig. 1 The sketch of nozzles to spray

喷嘴喷溅的液滴用接水盘测量其沿半径的分布情况,接水盘为横截面0.1 m×0.1 m的方格,每个方格所接水量由漏斗引入量筒测量。置接水盘于喷嘴下半径方向,即可测得沿半径方向的水量分布。用流量计读取喷嘴在不同工作水头压力下一定时段的流量,计算喷嘴的平均流量系数,可得喷嘴出水流量与工作水头压力的关系。

1.2 流量系数

喷溅装置由喷嘴和溅水碟组成,喷溅装置的结构特性和喷嘴内直径决定其流量和流量系数。单个喷嘴的流量可采用式(1)计算。

$$q = \frac{1}{4} \pi \varepsilon d^2 \sqrt{2gh} \quad (1)$$

式中: q 为单喷嘴流量,m³/h; ε 为喷嘴的流量系数; d

为喷嘴内径,m; g 为重力加速度,m/s²; h 为工作水头高度,m。采用容积器量水法^[6]测定喷嘴的流量及流量系数,流量测量结果如图2所示。

由图2可知,同样操作工况下,XPH型喷嘴的流量较TP-II型低,导致其在使用上有一定局限性,常用于中高压水头($p_h \geq 10$ kPa)。通过式(1)可换算得到流量系数。实验表明,各类型的喷嘴在不同工作水头压力下所得流量系数的数值变化不大,可近似为喷嘴内径的单参数函数,可取其平均值作为该类型喷嘴的平均流量系数,用于工程设计。通过计算,TP-II型的流量系数($\varepsilon = 0.921$)较大,且不产生横向水幕,适用的压力范围广。

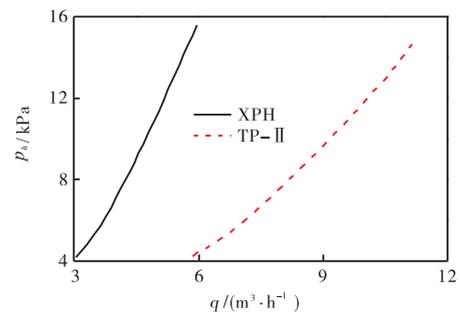


图2 喷嘴流量与工作水头压力的工作曲线

Fig. 2 The curve of water from nozzles and the head

1.3 喷溅半径

喷溅装置的喷溅半径随工作水头压力和溅落高度等的变化而变化,其中溅落高度是主要影响因素。XPH型喷嘴在水压的作用下,水流以旋转方式离开喷嘴出口,在离心力的作用下向四周洒开,溅散水流在淋水填料上呈圆形覆盖,无中空,主要靠喷嘴本身溅散达到均匀一致。XPH型喷嘴主要集中向喷嘴正下方布水,定义喷嘴中心到溅水范围外缘的水平距离为其喷溅半径。TP-II型喷嘴的溅散水流在淋水填料上呈圆环状覆盖,故定义喷嘴中心到水环水量最高峰处的水平距离为其喷溅半径。表1给两种类型喷嘴在不同工作水头压力 p_h 和溅落高度 H 条件下的喷溅半径实验值。

由表1可见:在相同工况条件下,TP-II型喷嘴较XPH型喷嘴的喷溅半径大,当工作水头压力 $p_h = 10$ kPa、溅落高度 $H = 0.8$ m时,喷溅半径 R 分别为1.1 m(XPH型)和1.6 m(TP-II型)。两种类型喷嘴的喷溅半径 R 均随着工作水头压力 p_h 和溅落高度 H 的增大而逐渐增加,但TP-II型喷嘴布水主要在喷溅半径的圆环区域,中空部分需靠相近喷嘴溅散的水环相互交迭,达到整体布水均匀。

表 1 不同工况条件下两种类型喷嘴的喷溅半径

Tab. 1 Radius of nozzles in different working conditions

喷嘴类型	p_p/kPa	$q/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	R/m			
			$H=0.6\text{ m}$	$H=0.8\text{ m}$	$H=1.0\text{ m}$	$H=1.2\text{ m}$
XPH 型 ($\varepsilon=0.368$)	8	4.2	0.8	1.0	1.1	1.2
	10	4.7	0.9	1.1	1.2	1.3
	12	5.2	1.0	1.2	1.3	1.4
TP-II 型 ($\varepsilon=0.921$)	8	8.0	1.4	1.5	1.6	1.7
	10	9.0	1.5	1.6	1.7	1.8
	12	9.9	1.6	1.7	1.8	1.9

2 淋水不均匀性系数

2.1 淋水不均匀性系数的计算

在喷溅范围内各点淋水是否均匀用流量的均方差 σ 衡量, 计算公式为

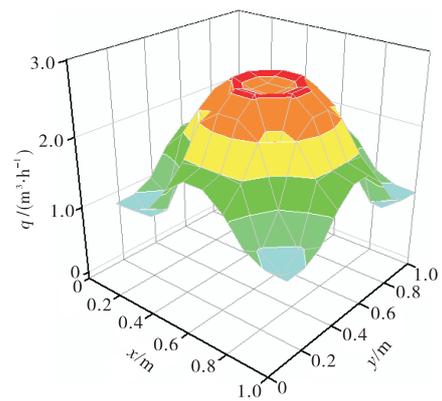
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}$$

式中: A_i 为各点的水流量, m^3/h ; \bar{A} 为各点水流量的平均值, m^3/h ; n 是总计量点数. 均方差 σ 即为不均匀性系数, 其值越大表示淋水越不均匀. 冷却塔配水的均匀合理是靠每个喷嘴之间相互配合、影响和作用完成的, 不能用单个喷嘴的喷溅效果来衡量整个冷却塔配水的均匀程度, 需要通过分析喷嘴的空间布置方式, 将相近相互影响的喷嘴的溅散水量有机迭加, 并考虑喷溅装置类型、工作水头压力和溅落高度等因素的综合影响, 使整个配水系统的工作性能最优.

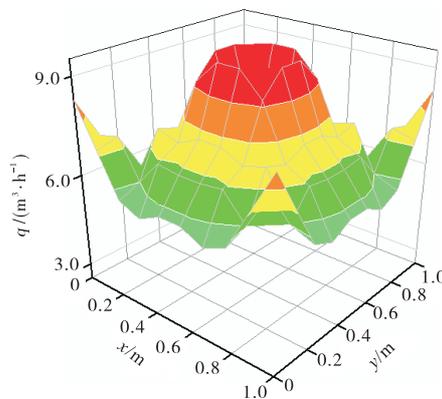
2.2 综合空间布水分布

选取喷嘴间距为 1 m, 采用正四边形方式布置, 喷嘴相围内部空间细化为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 共 100 个小区域, 综合各喷嘴的迭加影响计算出该区域的淋水不均匀性系数 σ , 利用布置的对称性原则可得全塔淋水分布情况. 当溅落高度 $H=0.8\text{ m}$ 时, 正四边形布置的 4 个喷嘴之间区域的综合淋水分布情况如图 3 所示, 喷嘴的 (x, y) 坐标分别为 $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 和 $(1, 1)$.

由图 3 可见: XPH 型喷嘴的整体布水量小, 因其单喷嘴喷溅集中在 1.1 m 的喷溅半径之内, 外围喷嘴的相互交叠能力很弱, 所以整个区域的淋水量仅为 $1.8 \sim 2.7\text{ m}^3/\text{h}$; TP-II 型喷嘴的流量系数大, 重水区集中在半径 1.5 m 处, 喷嘴之间彼此交叠, 整体淋水覆盖效果较好, 整个区域的淋水量为 $6.8 \sim 9.5\text{ m}^3/\text{h}$, 喷嘴中心区域平均淋水量大, 主要源于外围相邻喷嘴的贡献.



(a) XPH 型



(b) TP-II 型

图 3 喷嘴综合空间淋水分布

Fig. 3 Distribution of nozzles in the space

改变喷嘴的间距, 在不同操作工况下测算喷嘴交互区域的淋水均匀性, 具体数值见表 2.

由表 2 可见: 随工作水头压力的增加, 淋水不均匀性系数降低, 分布更加均匀; 但随喷嘴间距的增加, 淋水分布急剧恶化. 如淋水存在重水区和轻水区, 淋水不均匀性系数由 0 增至 0.4, 出塔水温升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$; 若淋水不均匀性系数达到 0.7, 水温可升高 $4\text{ }^\circ\text{C}$, 冷却塔的效率急剧下降^[4]. 工程设计中, 喷嘴间距宜选 1 m 左右; 溅落高度可根据淋水喷嘴和填料层布置高度考虑采用 $0.6 \sim 0.8\text{ m}$; 冬季低负荷循环水量

降低时, 可通过控制水泵开机台数或利用旁通管保证工作水头压力 $p_h \geq 10$ kPa (XPH 型) 和 $p_h \geq 8$ kPa (TP-

II 型); 综合作用的淋水不均匀性系数一般适宜取 0.2 ~ 0.35.

表 2 不同工况条件下两种喷嘴的淋水不均匀性系数
Tab. 2 The flow coefficient of nozzles in different conditions

喷嘴类型	p_h/kPa	$q/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	σ			
			喷嘴间距 = 1.0 m		喷嘴间距 = 1.2 m	
			$H = 0.6$ m	$H = 0.8$ m	$H = 0.6$ m	$H = 0.8$ m
XPH 型 ($\varepsilon = 0.368$)	8	4.2	0.47	0.28	0.48	0.37
	10	4.7	0.30	0.28	0.42	0.39
	12	5.2	0.25	0.23	0.30	0.28
TP-II 型 ($\varepsilon = 0.921$)	8	8.0	0.14	0.17	0.43	0.39
	10	9.0	0.15	0.16	0.36	0.23
	12	9.9	0.14	0.16	0.24	0.18

3 喷嘴布置方式

随喷溅半径 R 的增大, 淋水环形面积加大, 流量的权重则相应增加. 在设计喷嘴布置时必须考虑面积权重的影响, 以正确计算淋水密度. 固定各喷嘴的间距为 1 m, 空间布置可采用正三角形、正四边形和正六边形三种方式, 分析喷嘴数量、交互区域的淋水不均匀性及淋水面积权重分布, TP-II 型喷嘴的空间流量分布见图 4. 其中, 正三角形喷嘴的 (x, y) 坐标分

别为 $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 和 $(0.5, 0.866)$; 正六边形的坐标为 $(0, 1)$ 、 $(0, -1)$ 、 $(0.5, 0.866)$ 、 $(-0.5, 0.866)$ 、 $(0.5, -0.866)$ 、 $(-0.5, -0.866)$.

由图 4 可见: 在 $x-y$ 坐标系内, 喷嘴内部区域的流量分布基本呈现对称性; 对于正三角形和正六边形的 x/y 数值为 0.866, 即 x 和 y 方向的对称略有不同. 以 300 MW 机组冷却面积 $5\,000\text{ m}^2$ 的冷却塔为基准, 正四边形布置的喷嘴数量为 5 000 个, 正三角形和正六边形布置则分别需要 5 773 和 4 330 个, 结合图 4 结果的具体分析数据见表 3.

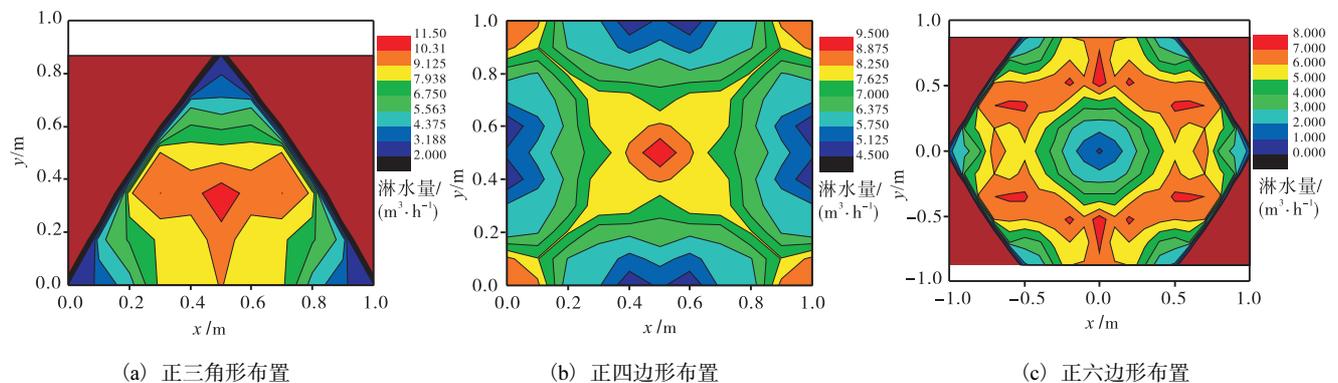


图 4 TP-II 型喷嘴不同布置方式的空间淋水分布

Fig. 4 The flow distribution of TP-II nozzles in different arrangement

表 3 TP-II 型喷嘴不同空间布置的淋水分析

Tab. 3 Sprinkling analysis of TP-II nozzles in different arrangements

布置方式	面积/ m^2	喷嘴数量/个	控制面积/ m^2	淋水量区间/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	平均淋水量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	σ
正三角形	0.43	5 773	0.87	8.2 ~ 11.0	7.2	0.34
正四边形	1.00	5 000	1.00	6.8 ~ 9.5	6.7	0.17
正六边形	2.60	4 330	1.15	5.5 ~ 7.6	5.0	0.35

由表 3 可知: 正三角形布置的喷嘴数量最多 (5 773), 单个喷嘴分配的控制面积最小, 三角形区域的平均淋水量 ($7.2\text{ m}^3/\text{h}$) 最大, 但淋水不均匀性系数

(0.34) 增大, 布水不如正四边形均匀. 实际工程设计中, 有电厂冷却塔的喷嘴设计曾采用过密的喷嘴布置, 虽然喷淋量增大, 但重水区和轻水区淋水密度相

差过大,空气出现短路,冷却塔效率偏低^[7]. 相比于其他两种布置方式,正六边形喷嘴投资最少,单个喷嘴的控制面积增大,平均淋水量($5.0 \text{ m}^3/\text{h}$)降低. 由于空间距离增加,相邻外围喷嘴对正六边形的中心区域贡献量小,整体淋水不均匀性系数(0.35)增大.

实际工程设计时,不仅要满足夏季高负荷情况,还需考虑冬季低负荷的极端工况,最低负荷甚至不足设计负荷值的20%,设计时可采用2或3台循环泵送水,分3区布水,即冷却塔外围、内部和中心区域采用不同的喷溅装置类型和布置. 外围靠近壁面可采用XPH型喷嘴的正三角形布置,喷嘴间距可和其喷溅半径相当;内部主空气流速区域可采用TP-II型的正四边形布置,以增大淋水密度和均匀性;而中心区域一般是空气低流量区域,可采用TP-II型的正六边形布置,以降低淋水密度和减少投资.

从优化配水角度考虑,不能脱离开冷却塔内的风场分布而简单地研究淋水均匀性,有机双向地协调配水与塔内空气动力场才是提高冷却塔冷却效率的关键. 还需结合流体力学数值模拟技术对冷却塔空气动力场不均匀分布进行研究,进而调整喷嘴布置方式,使得塔填料断面的气水比趋于常数,以达到风水双向优化匹配的目的.

4 结 论

(1)XPH型喷嘴的流量系数(0.368)较TP-II型喷嘴的流量系数(0.921)小;XPH型喷嘴在喷嘴的正下方布水,喷溅半径偏小,适用于工作水头压力 \geq

10 kPa 的工况;TP-II型喷嘴在喷溅半径的圆环区域布水,靠整体喷嘴群相互交迭达到布水均匀.

(2)当工作水头压力为10 kPa、溅落高度为0.8 m时,XPH型喷嘴的喷溅半径为1.1 m,TP-II型喷嘴的喷溅半径为1.6 m;喷溅半径随着工作水头压力和溅落高度的增大而逐渐增加;TP-II型喷嘴的淋水不均匀性系数(0.16)优于XPH型喷嘴(0.28).

(3)TP-II型喷嘴正三角形布置的平均流量最大,淋水不均匀性系数反而增大;正四边形布置的淋水量控制在 $6.8 \sim 9.5 \text{ m}^3/\text{h}$,淋水均匀性最好;相比于其他方式,正六边形布置的投资最少,单个喷嘴的控制面积增大,平均淋水量略有降低.

参考文献:

- [1] 赵振国. 冷却塔[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1997:1-21.
- [2] 徐跃芹,屠珊,黄文江,等. 火电厂自然通风冷却塔性能研究[J]. 汽轮机技术,2005,47(5):357-359.
- [3] 牛修富,孙奉仲,陈友良. 自然通风逆流湿式冷却塔配水的发展[J]. 电站系统工程,2008,24(3):1-3.
- [4] 宋家斌. 冷却塔喷溅装置及布置方式改造提高冷却塔配水均匀性[C]//第五届电力工业节能减排学术研讨会论文集,2010:41-46.
- [5] 孙世宏,孙立春,樊岩. 华能巢湖电厂1#机组冷却塔喷溅装置节能改造[J]. 节能,2013,10:74-76.
- [6] 郁金余,周华康. 冷却塔更换新型喷淋装置[J]. 华东电力,1988,12:10-13.
- [7] 杨凯利,邓爱祥,张海峰,等. 自然通风冷却塔喷溅装置节能改造[J]. 电力学报,2012,27(4):345-348.

责任编辑:常涛