

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.016

核电厂海水冷却塔填料安装方式研究

胡少华, 许波涛, 李相业, 齐文明

(深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 为开展核电厂超大型海水冷却塔的塔芯优化,采用物理模型试验方法,测试了搁置式、玻璃钢托架悬吊式和穿杆悬吊式3种填料安装方式下的热力阻力性能。结果表明,采用玻璃钢托架悬吊式和穿杆悬吊式安装方式的填料,其换热效果和通风阻力均要优于搁置式。以某滨海核电厂海水冷却塔为例,对3种填料安装方式下的综合冷却性能进行了工艺计算对比,结果表明穿杆悬吊式的冷却效果最优,对比搁置式出塔水温可降低约 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,或同样出塔水温下淋水面积可减少约 $1\,900\text{ m}^2$,能够提高经济性和建造的可行性。考虑到防冻、国产PVC填料材质水平及核电厂对稳定性和可靠性的特殊要求,推荐玻璃钢托架悬吊式作为优选方案。

关键词: 填料; 海水冷却塔; 搁置式; 悬吊式

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0093-05

Installation Method of Seawater Cooling Tower Packing in Nuclear Power Plant

HU Shao-hua, XU Bo-tao, LI Xiang-ye, QI Wen-ming

(China Nuclear Power Design Co. Ltd. <Shenzhen>, Shenzhen 518057, China)

Abstract: In order to optimize the core of super large seawater cooling tower in a nuclear power plant, thermal resistance performance of three packing installation modes (shelving type, FRP bracket suspension type and through rod suspension type) was tested by physical model test method. The results showed that heat transfer efficiency and ventilation resistance of the packing with bracket suspension and through rod suspension were better than those of the shelving type. Comprehensive cooling performance of three packing installation methods in a seawater cooling tower of a coastal nuclear power plant was compared. The results showed that the cooling effect of the through rod suspension type was the best. Compared with the shelving type, the water temperature could be reduced by about $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, or the drenching area under the same outlet water temperature could be reduced by about $1\,900\text{ m}^2$, which improved the economy and construction feasibility. Considering antifreeze requirements, domestic PVC packing material quality and special requirements of stability and reliability in nuclear power plants, the bracket suspension type is recommended as the preferred scheme.

Key words: packing; seawater cooling tower; shelving type; suspension type

1 研究背景

因厂址群堆机组温排水超出环境容量问题日益突出,环保和用海的合规性管控越来越严,国内多个

滨海核电项目开始研究采用海水循环冷却方案,如河北海兴、山东金山、广东廉江等^[1]。根据冷端优化计算,河北、山东等北方地区,海水塔的最佳淋水

面积通常在 $17\,000\text{ m}^2$ 左右,广东沿海地区则达到了约 $25\,000\text{ m}^2$ 。而我国在运最大的海水塔淋水面积为 $13\,000\text{ m}^2$,当前设计建造能力的上限通常认为在 $22\,000\text{ m}^2$ 。因此从建造运维可行性和提升经济性角度来看,有必要进一步优化机塔匹配,缩减海水塔规模。其中,塔芯优化则是有效方法之一。

填料是塔芯的核心部件,其良好的性能是冷却能力的保障。填料的安装方式主要包括搁置式和悬吊式,悬吊式又分为穿杆式和玻璃钢托架式两种,如图1、2所示。不同安装方式造成淋水填料热力阻力特性存在差异,对冷效影响亦不同^[2]。目前常用的淋水填料由多片PVC材料组合而成,其表面为复杂的波纹或多孔介质结构,填料的性能无法通过直接数值模拟获得,笔者通过室内物模试验,研究了不同安装方式下的填料热力阻力特性,以获取对冷效影响的效果和规律,在此基础上,结合某核电厂超大型自然通风高位收水海水冷却塔实际工程对填料安装方式进行优选,旨在为塔芯优化提供技术支持。

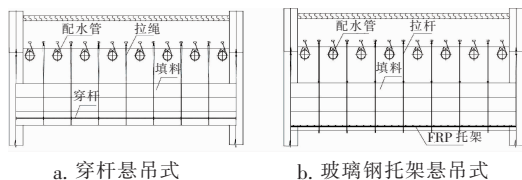


图1 填料悬吊式安装示意

Fig.1 Schematic diagram of packing installation through suspension type

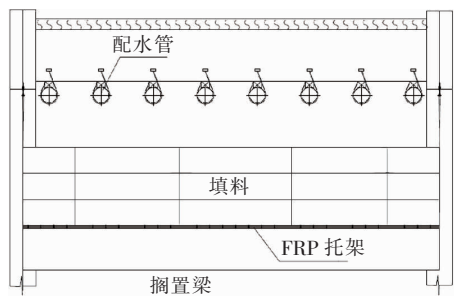


图2 填料搁置式安装示意

Fig.2 Schematic diagram of packing installation through shelving type

2 试验装置

室内物模测试平台系统布置如图3所示^[3]。试验采用国内常用的“S”波填料,塑料薄膜填料为单片结构,用黏合剂逐片粘结成横截面积为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 规格的试样。试验中,填料采用3层 1.50 m 的试验高度,填料规格及片型尺寸:片距为 25 mm ,

层高为 500 mm ,单位体积质量为 19.19 kg/m^3 ,斜波波距为 60 mm ,斜波波长为 330 mm ,直波波距为 60 mm ,直波波长为 100 mm ,斜波角度为 30° ,填料顶部距离喷头的距离为 0.80 m 。

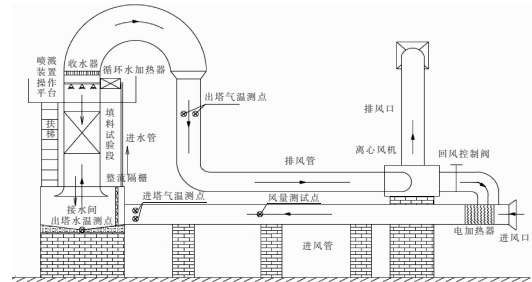


图3 填料性能试验装置示意

Fig.3 Schematic diagram of packing performance test device

试验所用的循环冷却水采用淡水,测试结果按照《核电厂水工设计规范》(NB/T 25046—2015)第9.2.2节第4条进行修正,以用于海水冷却塔的热力计算。

填料试验组件在模拟塔内采用纵横各4条钢片组成的钢网格架承托,钢片厚度为 3 mm 。与填料片间距相比,由于钢片厚度很小,且钢片间距为 120 mm ,空气经过钢片后,气流量和流向都不会发生明显改变,因此对填料热力阻力特性的影响可忽略不计。模拟塔中淋水填料布置如图4所示。

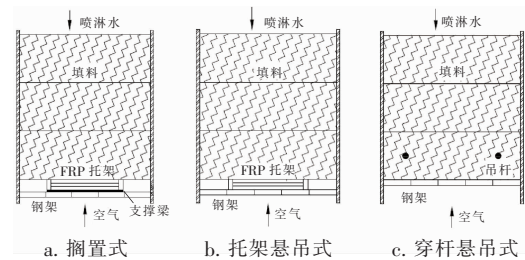


图4 模拟塔中淋水填料布置示意

Fig.4 Layout of packing in simulation tower

填料采用搁置式安装时,其安装结构主要包括:填料、玻璃钢托架、搁置梁及钢网格架。由于模拟塔尺寸限制,填料搁置梁可用薄木板代替,试验时将薄木板置于玻璃钢托架下方,填料位于玻璃钢托架上方,薄木板的横截面宽度与实际搁置梁相同,为 400 mm 。填料采用穿杆悬吊式布置时,内部穿有吊杆,在室内实验室,吊杆尺寸与原型杆相近,原型中吊杆直径约为 28 mm ,穿过填料内部,本次试验中以直径为 30 mm 的圆形木棍穿过填料样品来模拟吊杆。

填料采用玻璃钢托架悬吊式时,填料下方无搁置梁,采用原型玻璃钢托架进行模拟试验。

试验设计和测试遵守《冷却塔淋水填料、除水器、喷溅装置性能试验方法》(DL/T 993—2005)的规定,每个试验工况分别按约 $7 \sim 13 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的淋水密度和约 $1.0 \sim 2.5 \text{ m/s}$ 的填料断面风速组合进行。试验时先固定一种淋水密度,改变试验段风速,在同一风速下,当各参数相对稳定后进行数据采集并进行热平衡计算,计算误差不超过 $\pm 5\%$ 。若超过误差的控制范围,分析其原因,调整参数后重新采集数据。每次试验取3次满足热平衡误差的试验数据,计算其平均值。完成全部试验以后,将有效试验数据输入计算机进行处理,求出每一组试验的冷却数和容积散质系数,以及填料的热力阻力表达式。

试验结合的优选分析对象是某核电厂超大型自然通风高位收水海水冷却塔,图3中的物模试验断面尺寸很小,但搁置梁、玻璃钢托架等都采用原型尺寸,因此没有再去设置缩小比例的收水装置。收水装置对填料进风断面前空气的流态及阻力影响通过另外的全塔阻力测试物模试验获得,见图5。应注意的是,图5(b)中的孔板已手动提起,便于观察孔板和收水装置。采用多孔孔板模拟产生淋水填料的阻力系数,通过不同孔径及孔间距模拟不同淋水填料的

阻力。该试验没有淋水,实际中的淋水雨滴通过假设为等径刚性小球开展流场数值计算获取阻力。

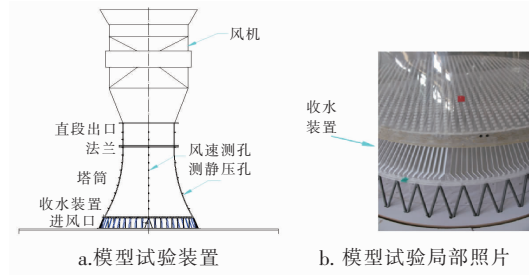


图5 收水装置阻力测试

Fig. 5 Resistance test of water collecting device

3 结果与分析

按照上述试验方法对不同安装方式下的填料热力阻力特性进行测试,结果汇总于表1。填料特性数和各系数之间的关系见式(1)和式(2)。

$$N = A_n \lambda^c \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta P / \gamma = A_p V^M \\ A_p = A_x q^2 + A_y q + A_z \\ M = M_x q^2 + M_y q + M_z \end{cases} \quad (2)$$

式中, N 为填料特性数; ΔP 为填料通风阻力,Pa; λ 为气水比; q 为淋水密度, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; V 为风速, m/s ; γ 为空气容重, N/m^3 ; A_n 、 c 、 A_p 、 M 、 A_x 、 A_y 、 A_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 为试验常数。

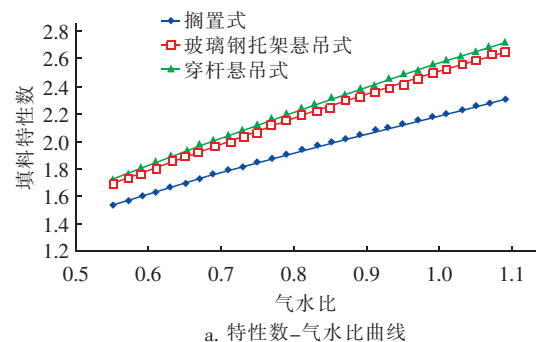
表1 填料热力阻力性能测试结果对比(淡水)

Tab. 1 Test results comparison in thermal resistance performance of packing (fresh water)

| 项 目 | A_n | c | A_x | A_y | A_z | M_x | M_y | M_z |
|----------|-------|------|----------|---------|---------|----------|---------|-------|
| 搁置式(修正前) | 2.19 | 0.59 | -0.001 1 | 0.087 9 | 1.540 8 | -0.000 7 | 0.009 | 2 |
| 搁置式(修正后) | 2.19 | 0.59 | 0.000 8 | 0.027 9 | 0.839 5 | -0.001 | 0.003 7 | 2 |
| 玻璃钢托架悬吊式 | 2.51 | 0.65 | 0.001 5 | 0.013 | 0.668 6 | -0.002 | 0.006 9 | 2 |
| 穿杆悬吊式 | 2.57 | 0.66 | 0.001 2 | 0.013 8 | 0.674 8 | -0.001 1 | -0.001 | 2 |

本研究根据实际测试结果绘制出的淋水填料热力阻力特性变化趋势如图6所示(图中“GZ”代表搁置式,“TJXD”代表玻璃钢托架悬吊式,“CGXD”代表穿杆悬吊式)。模拟塔试验断面的尺寸比较小,实际工程中填料搁置梁的数量、位置以及阻挡面积与试验台架不是完全相同的,部分区域有搁置梁,其余部分则类似于悬吊式,搁置梁对整塔淋水填料热力阻力特性的综合影响无法通过物模装置直接获得。试验依托科研单位结合工程中的实际搁置梁布置情况,对物模测试结果进行了修正。修正是结合原型观测完成的,通过对搁置式高位收水冷却塔进行热力阻力性能测试,获得实测高位塔的热力阻力

特性,再与本试验的研究结果进行对比,分析实测结果与原型观测结果的偏差,进而完成对物模测试结果的修正。



a. 特性数—气水比曲线

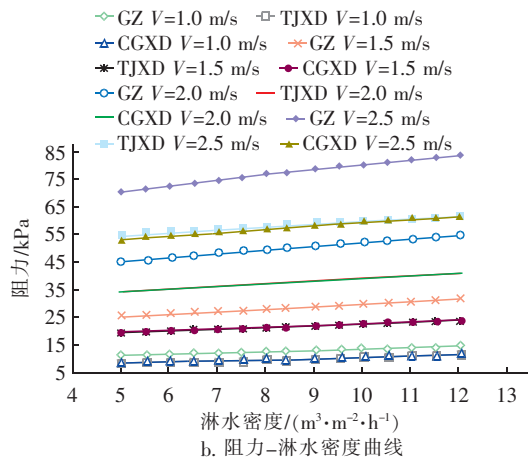


图6 填料热力阻力特性变化趋势

Fig. 6 Change of thermal resistance characteristics of packing

核电厂超大型海水冷却塔的气水比通常约为0.6~0.9,淋水密度通常约为 $8 \sim 10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,填料断面处的平均风速约为 $0.8 \sim 1.8 \text{ m/s}$ 。如按后续工程应用分析中典型核电超大型海水冷却塔考虑,在风速为 1.5 m/s 、淋水密度为 $8.4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、气水比为0.75的情况下,由图6可知,采用玻璃钢托架悬吊式和穿杆悬吊式的换热效果和通风阻力均要优于搁置式,表征热力性能的填料特性数分别增加了约12%和15%;表征阻力性能的风阻损失分

别减少了约23%和24%,悬吊式的综合热力阻力特性优势明显。

在两种悬吊式淋水填料安装方式下,按上述对比条件,穿杆悬吊式相比玻璃钢托架悬吊式,其热力性能提升了约2.1%,阻力减小约1.05%,综合热力阻力特性差别很小。

4 工程应用分析

某核电厂位于我国南方滨海地区,其年平均干、湿球温度分别为 22.9 和 19.8°C ,大气压为 101.2 kPa ,年平均环境风速取 3 m/s 。因直流方案受温排水和用海管控限制,拟定冷却方式为“一机一塔”配置超大型自然通风高位收水海水冷却塔。根据核电厂二、三回路冷端优化匹配专题计算结果,推荐的冷却倍率为55倍,循环水量为 $51.13 \text{ m}^3/\text{s}$ 。冷却塔最佳淋水面积计算值为 $26\,000 \text{ m}^2$,受建造规模可行性限制,最终优化为 $22\,000 \text{ m}^2$,塔总高为 224 m ,采用高为 1.5 m 的S波填料。

对3种淋水填料安装方式下的冷却塔工艺性能进行计算,结果见表2。可以看出,穿杆悬吊式填料对应的出塔水温比搁置式降低了约 0.7°C ,相当于综合冷却性能提升了约7.2%。如果保持相同的出塔水温,则穿杆悬吊式填料能够减少冷却塔淋水面积 $1\,900 \text{ m}^2$ 。

表2 计算结果对比

Tab. 2 Comparison of calculation results

| 项 目 | 搁置式 | 玻璃钢托架悬吊式 | 穿杆悬吊式 | |
|--|----------|-----------|-----------|-----------|
| 淋水面积/ m^2 | 22 000 | 22 000 | 22 000 | 20 100 |
| 淋水密度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$ | 8.37 | 8.37 | 8.37 | 9.18 |
| 阻力/ Pa | 97.28 | 94.45 | 94.31 | 98.42 |
| 填料处平均风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 1.452 | 1.490 | 1.491 | 1.500 |
| 气水比 | 0.729 | 0.748 | 0.749 | 0.686 |
| 冷却数 | 1.786 | 2.020 | 2.059 | 1.948 |
| 散质系数/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1})$ | 9 961.83 | 11 264.68 | 11 487.48 | 11 919.48 |
| 出塔水温/ $^\circ\text{C}$ | 26.05 | 25.44 | 25.36 | 26.05 |
| 出塔气温/ $^\circ\text{C}$ | 32.14 | 31.86 | 31.84 | 32.74 |
| 进出塔水温差/ $^\circ\text{C}$ | 9.57 | 9.57 | 9.57 | 9.57 |

搁置布置方案下的搁置梁自身高度约为 0.8 m ,因此将导致循环水泵静扬程增加约 0.8 m ,电价按 $0.246 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、运行时间按 $7\,000 \text{ h}$ 考虑,冷却塔的运行费用还将增加约90万元/年。

当前世界上已建成运行的最大湿式冷却塔淋水面积约为 $16\,500 \text{ m}^2$,我国当前投运的最大冷却塔淋水面积为 $13\,000 \text{ m}^2$ 。此外我国咸宁和彭泽核电厂

配置的超大型自然通风冷却塔淋水面积为 $20\,000 \text{ m}^2$,但仅完成了初设,并未建造实施。因此,在亚热带高温高湿厂址开展直流和海水循环冷却方案比选时,如果超大型海水冷却塔的淋水面积在 $20\,000 \text{ m}^2$ 的基础上继续增加,对建造运维的可行性将带来挑战与风险^[4]。故从塔芯优化入手,采用悬吊式填料提高冷效,相当于减小冷却塔的规模和尺寸,降低循

环水泵运行功耗,提升建造可靠性和运维经济性,对海水循环方案能否通过技术经济比选影响很大。

在运维方面,已有多个运行的工程表明,防冻设计不合理、填料底部挂冰将导致悬吊式填料出现脱落现象。对于有冰冻情况的厂址,做好防冻设计是悬吊式填料应用的前提条件。对于穿杆悬吊式,由于填料组装块的自重悬挂在穿过填料中部的两根横杆上,填料的塑料材质需要有良好的结构稳定性和耐久性,否则塑料老化后容易产生碎片,碎片脱落进入循环水系统,会对循环水泵吸水端滤网及凝汽器产生不良影响。采用托架承托,则上述运行问题相对可以减轻。尽管本厂址位于南方地区,冬季没有冰冻,但考虑到我国目前的填料材质水平、核电厂寿期内对可靠性的要求,并结合试验结果,穿杆悬吊式的出塔水温比玻璃钢托架悬吊式仅低了约 0.08°C ,故采用玻璃钢托架悬吊式。

5 结论

① 海水冷却塔填料安装方式采用玻璃钢托架悬吊式和穿杆悬吊式的换热效果以及通风阻力均要优于搁置式,结合某典型核电厂超大型海水冷却塔设计条件,采用穿杆悬吊式填料比搁置式的出塔水温通常要低约 0.7°C ,或者同样出塔水温下,淋水面积可以减少约为 $1\,900\text{ m}^2$ 。

② 因搁置梁自身高度的影响,搁置式方案的循环水泵静扬程将增加约 0.8 m ,导致每座塔的运行费用增加约90万元/年。

③ 对冷端优化推荐最佳淋水面积 $>20\,000\text{ m}^2$ 的超大型海水冷却塔,采用悬吊式方案可以缩减海水塔规模,提升建造及运维的可靠性、经济性,对海水循环冷却方案进行技术经济比选能起到关键推动作用;对于 $20\,000\text{ m}^2$ 以内的超大型海水冷却塔,也能较好地改善经济性。故悬吊式安装方式可作为主推方案。

④ 穿杆悬吊式与玻璃钢托架悬吊式的出塔水温偏差仅约为 0.08°C ,尽管HAMON等国际知名冷却塔公司采用的是穿杆悬吊式,但考虑到防冻、国产PVC填料材质水平及核电厂寿期内对稳定性和可靠性的特殊要求,采用玻璃钢托架悬吊式是当前较优的方案。

参考文献:

- [1] 赵云驰,王东海,李京,等. 二次循环冷却系统应用于滨海核电厂可行性分析[J]. 给水排水,2012,38(10):67-70.
Zhao Yunchi, Wang Donghai, Li Jing, *et al.* Feasibility analysis of application of second cyclic cooling system on the coastal nuclear power station [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(10): 67-70 (in Chinese).
- [2] 王锋. 填料支承方式对冷却塔面积的影响分析[J]. 给水排水,2014,40(8):51-54.
Wang Feng. Analysis on the influence of the filler construction on the cooling tower surface [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(8): 51-54 (in Chinese).
- [3] 赵顺安,廖内平,宋志勇,等. 海水冷却塔淋水填料热力阻力特性研究[J]. 工业用水与废水,2007,38(2):65-68.
Zhao Shun'an, Liao Neiping, Song Zhiyong, *et al.* A study of thermal characteristics of water drenching fillers of seawater cooling tower [J]. Industrial Water & Wastewater, 2007, 38(2): 65-68 (in Chinese).
- [4] 曾建柱. 天津北疆发电厂 $12\,000\text{ m}^2$ 海水冷却塔设计[J]. 电力建设,2009,30(2):58-60.
Zeng Jianzhu. Design of $12\,000\text{ m}^2$ seawater cooling tower of Tianjin Beijiang power plant [J]. Electric Power Construction, 2009, 30(2): 58-60 (in Chinese).



作者简介:胡少华(1983-),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要从事核电厂及新能源的水工工艺设计研究工作。

E-mail: daotianhsh@163.com

收稿日期:2020-06-08