

文章编号:0253-4339(2013) 06-0048-04
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.06.048

毛细管网在闭式冷却塔中的应用分析

章立新^{1,3} 刘婧楠¹ 林宗虎¹ 尹 证^{1,2} 范志远³ 刘 跃¹ 陈永保¹ 李瑞雄¹

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 北京玻璃钢研究设计院 北京 100831;
3 浙江金菱制冷工程有限公司 诸暨 311802)

摘 要 为解决闭式冷却塔在冬天停机时排水不尽易冻裂和遇腐蚀性工质易损坏的问题,将工程塑料毛细管网技术引入闭式冷却塔。根据理论计算设计了毛细管网闭式冷却塔,并且进行了实物模块的性能实验。研究表明:在单台塔体大小相同的条件下,两台毛细管网闭式冷却塔能够达到一台常规管径紫铜管闭式冷却塔的散热能力,且换热器部分的成本相差无几,由于毛细管网闭式冷却塔具有防腐、抗冻、阻垢、降噪的优势,所以具有良好的技术经济性。

关键词 闭式冷却塔;毛细管网;热性能;实验

中图分类号:TB657.1;TU991.42

文献标识码:A

Analysis of Capillary-network Applied in the Closed Cooling Tower

Zhang Lixin^{1,3} Liu Jingnan¹ Lin Zonghu¹ Yin Zheng^{1,2} Fan Zhiyuan³
Liu Yue¹ Chen Yongbao¹ Li Ruixiong¹

(1. School of Energy and Power Engineering of University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. National Quality Inspection & Test Center of FRP Product, Beijing, 100831, China; 3. Zhejiang Jin-Ling Refrigeration Engineering Co., Ltd., Zhuji, 311802, China)

Abstract In order to solve the frost crack problem in winter and the tube corrosion problem of corrosive medium in closed cooling towers, engineering plastic capillary-network technology is introduced to the tower. A capillary-networked closed cooling tower was designed by theoretical calculation and the performance of real model has been tested. Research indicates that the heat-exchange ability of two capillary-networked closed cooling towers is similar to a normal closed cooling tower's with copper-tubes of the same size. The cost of the heat-exchanger for both towers is almost the same. On account of the capillary-networked closed cooling towers can prevent corrosion, frost crack, foreign matters, and reduce noise. The capillary-networked closed cooling towers have better technical and economic performance.

Keywords closed cooling tower; capillary network; thermal properties; test

随着工业生产工艺的进步,特别是高效换热技术的发展,对冷却水质的要求越来越高,因此,闭式冷却塔(以下简称闭塔)的应用越来越广泛。然而,目前闭塔的使用中存在两个突出的问题:1)天气寒冷时,对部分间歇使用的闭塔,其停用后在盘管中的积水会结冰从而冻裂盘管;2)金属易腐蚀,闭塔盘管在冷却含有腐蚀性物质的工质时极易被腐蚀穿透。这两种常见情况都会影响闭塔的使用,进而影响整个系统的运行,缩短闭塔的使用寿命。

为解决上述两大问题,则拟在闭塔中引入毛细管网作为换热的核心组件,并从理论和实验两方面验证了其可行性。

1 毛细管网的发展

如同人体的毛细血管一样,毛细管网的使用使得空调地暖等系统的能量可以均匀高效地输送到系统的最末端,创造一个舒适宜人的生活环境。

毛细管网在欧洲已经应用 20 多年,柏林 Trep-tower Allainz 保险公司、维也纳双子大厦、布鲁塞尔 UCB 药厂、汉诺威 2000 展览会展馆等项目都采用毛细管网^[1]。自 2005 年毛细管网传入中国以来,在很多项目上也有毛细管网的应用。

2009 年之前的几十年间,毛细管网的制造和应用技术一直被德国所垄断,是德国技术的标榜、科技地产的标榜和高端项目的标榜。随着毛细管在我国

应用的逐渐推广,2010 年出台的新国家标准《民用建筑采暖通风与空气调节设计规范》(GB50736—2012)将毛细管网的设计使用作为了一项主要的增编内容,国家十一五科技支撑计划中有多个课题与毛细管网有关。特别是毛细管网的国产化,显著降低了使用成本,为这项先进技术在我国的推广应用提供了条件。

2 毛细管网用于闭塔的理论研究

毛细管网的材料为塑料,塑料有耐腐蚀的天然优势,如聚乙烯管可抗醋酸、氨水、硼酸、纯碱等^[2],因此,其应用于闭塔时,可以将闭塔的应用领域推广到一些有腐蚀性的场合中。

文献[3]中,对导热塑料管进行的抗冻实验及后续系列研究,表明以 PE 为基底掺石墨的导热塑料等可用于制作毛细管网的材料,不仅具有良好的抗冻性,也不易结垢。实验证明,采用 PE-RT(耐热聚乙烯材料)毛细管网制作的实验闭塔,经过浙江山区一整个冬天的存水室外放置后,依然可以正常运行并且保持管外清洁,显示了毛细管网优良的抗冻性能和阻垢性能。

另外,塑料密度为金属的 1/3 左右,做成盘管后会大大降低盘管的自重。塑料管有弹性,淋水撞击塑料管的声音小于撞击金属管,所以导热塑料管和毛细管网应用于闭塔及换热器有降噪作用。

但是,塑料的导热系数毕竟明显低于金属材料,塑料管应用于闭塔的技术经济性,主要取决于总体的传热效果。经过理论分析计算,对一个 80t/h 的标准型闭塔来说,相同工况下和等径及等耐压条件下与紫铜管比,如果管材的导热系数大于 10W/(m·K),需要增加换热面积 8% 左右;如果管材的导热系数达 3W/(m·K),需要增加换热面积 33% 左右;如果管材的导热系数达 0.5W/(m·K),需要增加换热面积 215%。然而,相对成熟的塑料材料(例如聚乙烯、聚丙烯等)的导热系数仅仅能达到 0.2~0.4 W/(m·K)左右,即使采用一般的导热塑料,也未见有导热系数大于 3 W/(m·K)的报道,故仅仅用塑料代替金属是不够的。采用了毛细管网后,在相同的换热体积内,闭塔的换热面积会大大增加,因此有更大的可行性。

2.1 毛细管网在闭塔中的传热系数和换热面积分析

闭塔的换热过程如下:在换热盘管外喷淋水并且强制通风,热从盘管内的被冷却流体经壁面传给管壁面外的喷淋水,再通过喷淋水与空气的强制对流传给空气,而喷淋水向空气的传热,主要是由喷淋水蒸发的潜热和喷淋水与空气的显热交换组成的。因此,闭

塔的换热模型有两个过程,一是管内流体被管外喷淋水冷却,换热驱动力为温差,管的作用为间壁式换热器;二是喷淋水与空气换热,换热驱动力为空气中水蒸汽的分压差和空气与水的温差,管外壁的作用相当于开式冷却塔的填料。换热面积取决于管表面上所形成的喷淋水膜向空气的散热与同一面积下管内流体向管外喷淋水传热之间的热平衡。

为比较毛细管网与传统盘管冷却塔的区别,现以导热系数较低的 PE-RT 材料制成毛细管网,分析其对闭塔热阻的影响。由以上传热过程分析得知,总的传热过程由六部分热阻组成:管内对流换热热阻、管内污垢热阻、管壁导热热阻、管外污垢热阻、管外对流换热热阻。以管外壁面为基准传热面,设 α_i 、 α_o 分别为管内流体与管内表面之间以及管外喷淋水与管外表面之间的对流换热系数, r_i 、 r_o 分别为管内壁以及管外壁上的污垢热阻, d_i 、 d_o 分别为管的内外径,则从盘管内流体直到喷淋水的传热系数 K_o 为:

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{d_o}{d_i} \right) + r_i \left(\frac{d_o}{d_i} \right) + \frac{\delta}{\lambda} \left(\frac{d_o}{d_m} \right) + r_o + \frac{1}{\alpha_o}$$

式中: $d_m = (d_o - d_i) / \ln(d_o / d_i)$ 为传热管的对数平均直径, α_i 和 α_o 的计算参见文献[4]。

取外径为 20mm,壁厚为 1mm,管内流速为 1m/s,喷淋水的单位宽度流量为 100kg/(m·h),管材分别为紫铜、碳钢、黄铜、导热塑料管,以及外径为 4.3mm,壁厚为 0.8mm 的 PE-RT 毛细管(管内流速为 0.7m/s,喷淋水的单位宽度流量为 25kg/(m·h)),冷却工质均为水(特征温度为 34.5℃),用上式分别计算 K_o (计算时考虑相同的管内外污垢热阻,分别取 0.0001W/(m·℃)和 0.00017W/(m·℃))得到表 1。

表 1 不同管材的计算总传热系数对比
Tab.1 Contrast to the overall heat transfer coefficient for different pipe

管材	导热系数/ (W/(m·K))	总传热系数/ (W/(m ² ·℃))
紫铜	398	800.88
黄铜	109	796.40
碳钢	49	788.96
导热塑料	1	434.86
PE-RT 毛细管	0.4	260.25

从中看出,紫铜的导热系数是 PE-RT 毛细管的 995 倍,但总传热系数却仅为 3.1 倍,这一结果说明了在闭塔内,换热的主要热阻不是管壁的导热热阻。

再比较在相同通流量下及流速分别取为 0.7m/s

和 1m/s 时单位时间内流体在上述毛细管与紫铜管内经过的管外换热面积,前者为后者的 9.6 倍。

可见,在相同体积内,毛细管网的传热能力不一定比金属管差。

2.2 毛细管网闭塔的经济性分析

作为一种成熟的工业产品,闭塔不仅要保证换热效果,还要综合考虑其体积、重量及成本等直接关系到其销售的重要因素,并且也受管内流阻和气侧风阻等技术指标的制约。现设计两个塔体框架、风机和淋水泵基本相同的全盘管逆流闭塔(见表 2),设计参数如下:空气干球温度为 31.5℃、湿球温度为 28℃、大气压力为 99.4 kPa,被冷却水进塔水温为 37℃、出塔水温为 32℃,取相同的喷淋水量(24 m³/h)和相同的风量(19354m³/h),集管都在换热器的宽度方向,其中一个以紫铜管(外径 16mm,壁厚 0.5 mm)作为核心换热组件,另一个以 PE-RT 毛细管网(外径 4.3mm,壁厚 0.8 mm)作为核心换热组件,不考虑管内外污垢热阻的设计余量,对其单位散热冷吨的占地面积、质量、成本与能耗等经济性参数进行比较。

表 2 对两个不同换热组件闭塔的比较

Tab. 2 Comparison of two different heat exchanger components closed tower

换热管材质	PE-RT	紫铜	单位
被冷却水量	8	16	m ³ /h
散热冷吨	11.8	23.6	CRT
盘管流程	3	15	程
每流程的管层数	4	1	层
盘管总层数	12	15	层
每排管数(上下错排)	100	20	
换热器长	2.519	2.782	m
换热器宽	1.001	0.804	m
换热器高	0.183	0.501	m
管内流速	0.98	1.26	m/s
需要的换热管面积	40.821	41.825	m ²
实际的换热管面积	40.836	41.955	m ²
空气侧阻力	64.449	74.458	Pa
管内侧阻力	56.888	73.258	kPa

不考虑系统中设备的效率,可分别将水或空气的流量与流动阻力的乘积作为运行能耗,分别计算两个闭塔管内水流能耗、管外空气经过换热器段的能耗和喷淋水能耗,其中喷淋水的能耗按单位时间内将喷淋

水从下水盆运至喷头克服喷淋水重力所作功计。另外取紫铜的密度为 8900 kg/m³, PE-RT 的密度为 920kg/m³;取紫铜管 63 元/kg,毛细管网 200 元/m²(指单层管网的占地面积)。则所比两个闭塔单位散热冷吨的占地面积、总能耗、换热器管质量、换热器管成本见表 3。

表 3 对闭塔经济性数据的比较
Tab.3 Comparison of the closed tower's economic

换热管材质	PE-RT	紫铜	单位
闭塔占地面积	0.239	0.109	m ² /CRT
总能耗	48.076	35.649	W/CRT
换热器管质量	2.552	7.928	kg/CRT
换热器管成本	513.94	499.45	元/CRT

从上述比较可以看出,基本上两台塑料毛细管网闭塔的散热冷吨近似于一台差不多大小的大管径紫铜管闭塔。按单位冷吨计算,在合理设计前提下,塑料毛细管网闭塔换热管质量与传统的大管径紫铜管闭塔比明显减轻,所需管面积虽然有较大增加,但比塑料管与铜管等径设计时显著减少;毛细管网闭塔的占地面积、成本与能耗都略高于传统的大管径紫铜管闭塔。但相对于毛细管在抗冻、防腐、阻垢、降噪方面的特点,总体还是具有相当的优势,尤其是毛细管网闭塔可以应用在高寒或者有腐蚀性工质的特殊场合,其不可替代性更是不可小觑。

3 毛细管网闭塔的实验研究

对上文中设计的 PE-RT 毛细管网闭塔(见图 1)进行了性能实验。该实验塔的平面尺寸、管排列方式与表 2 完全一致,不同之处是每流程间有 20mm 的间隙可用于放填料。其结构是由单幅 100 根 8m 长的毛细管并联组成的毛细管网(管间距 10mm),上下四幅并联,通过自动张紧装置构成 3 个流程。该装置能随时适应毛细管热胀冷缩引起的长度变化以保证其一直处于拉紧状态。

实验于 8 月底 9 月初的时候在浙江进行,气候比较潮湿、闷热。实验时环境条件为:大气压 101.1kPa,干湿球温度实时监测结果见图 2,实验用风机可变频,该实验工况下其电机的实测功率为 1kW,环境基本无风。将毛细管网闭塔放置在 CTI 实验台上直接进行测试,实验中干湿球温度采用铂电阻温度计和带铂电阻温度计的阿斯曼温度计测试,精度为 ±0.1℃。冷却水流量使用浮子流量计(非 CTI 规范)测试,精



1 实验用填料 2 毛细管网 3 毛细管网张紧装置

图1 毛细管网闭塔内部结构

Fig.1 The internal structure of capillary network closed tower

度为 $\pm 0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。喷淋水量和风量分别使用超声波流量计和转轮风速仪测试,由于该两项及其它项均为实验的参考参数,故不一一列出精度。

待实验工况稳定后,每间隔10min采集一次数据,共测试90min,未加填料实验模式的温度实时监测结果见图2,其平均值分别为:进口温度 39.6°C ,出口温度 29.7°C ,干球温度 26.9°C ,湿球温度 23.7°C 。

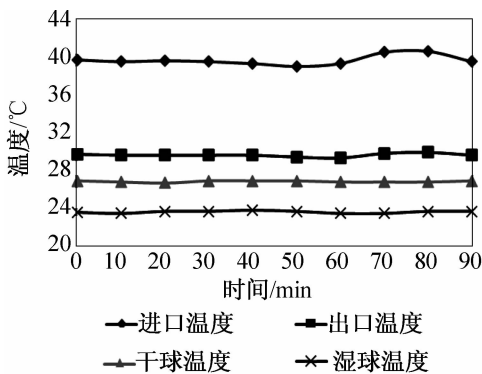


图2 毛细管网闭塔温度实时监测结果

Fig.2 The tower temperature real-time monitoring results capillary network closed tower

该实验闭塔因热熔工艺不善造成进出支管及总管的接口内变形较大导致进出塔的局部阻力陡增,加之实验台的泵功有限,故实验时流量实测值为 5.8 t/h ,此时风量实测值为 $17863.3 \text{ m}^3/\text{h}$,淋水量 $16.5 \text{ m}^3/\text{h}$,均基本稳定。

按实验的实际条件对出口温度的理论预测为 29.8°C ,比实测结果 29.7°C 略高,是因为每流程间有20mm的间隙预留给放置填料,毛细管网的长度比计算时要大些,所以实验结果好于理论预测;实验结果的当量散热冷吨数为11.3CRT,小于设计的11.7CRT,究其原因,虽然实际管面积比设计管面积还大些,但实验的风量、淋水量和管内流速都低于设

计值,所以冷却能力有所下降在情理之中。

4 结语

综上所述,理论设计和实验的结果可信且吻合较好,说明在前文3.2中关于“两台塑料毛细管网闭塔的散热冷吨近似于一台差不多大小的大管径紫铜管闭塔”的结论,能作为工程设计的可靠依据。

可见,毛细管网应用于闭塔,不仅具有防腐、抗冻、阻垢、降噪的优良效果,其换热效率也能保证在较高的水平,应用前景广阔,具有良好的推广价值。目前,尚需进一步改进的是热熔工艺以尽量减小管内压损,同时在技术经济性较高的条件下,尽量增加管材的导热系数。

本文受上海市大学生创新基金(SH1110252005)资助。
(The project was supported by Innovation Fund for College Students in Shanghai(No. SH1110252005).)

参考文献

- [1] 中国建材采购网,毛细管热泵空调系统发展趋势[EB/OL]. <http://www.jiancai365.cn/news/35314.htm>, (2010-4-1).
- [2] 北京塑料工业协会. ISO/TR10358. 塑料管材和管件—耐化学腐蚀等级表[S]. 北京:中国标准出版社,1993.
- [3] 章立新,白亮,范志远,等. 导热塑料管应用于闭式冷却塔的实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2012(4):75-79. (Zhang Lixin, Bai Liang, Fan Zhiyuan, et al. Experimental Research of Heat-conducting Plastic Pipes Applied in the Closed Cooling Tower[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2012(4):75-79.)
- [4] 尾花英朗. 热交换器设计手册[M]. 第1版. 北京:石油工业出版社,1987:379-382.

通信作者简介

章立新,男(1964-),副教授,中国通用机械工业协会冷却设备分会理事,金菱冷却技术浙江省级高新技术企业研发中心主任,上海理工大学能源与动力工程学院热工程研究所,(021)55272106, E-mail: zhanglixin@usst.edu.cn. 研究方向:蒸发冷却设备研发、热力系统优化、热物理光测技术研究。

About the corresponding author

Zhang Lixin (1964-), male, associate professor, the director in the CCTI of the CGMA, the head of Zhejiang-provincial-level Jinling Cooling technology R & D Center, (021) 55272106, E-mail: uzlx1@126.com. Research fields: Evaporative cooling equipment R & D, Thermal system optimization, the research of thermophysical by laser test technology.