

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-784-07

多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器与其他间接蒸发冷却器 (IEC) 的性能比较

王 鑫 孙铁柱 王 祺

(西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710600)

【摘 要】 为了改善目前间接蒸发冷却器的亲水性, 提高冷却器的湿球效率, 并实现间歇式布水, 降低循环水泵能耗。采用吸水性较好的新型多孔陶瓷材料制作管式间接蒸发冷却器, 利用其丰富的比表面积来增大水膜与工作空气的接触面积; 利用其较好的吸水性快速蓄水, 实现间接蒸发冷却器的间歇性布水, 缩短循环水泵运行时间。对其性能进行了实验研究, 对其湿球效率、温降, EER 等参数进行了测试计算。为了了解其优越性, 并与其他间接蒸发冷却器进行了性能对比。结果表明多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器的 EER 最高, 1.5m 管长时湿球效率最高。其较好的性能证明其有很好的应用前景。

【关键词】 亲水性; 间歇性布水; 多孔陶瓷; 管式间接蒸发冷却器; EER

中图分类号 TU831 文献标识码 A

Performance Comparison of Porous Ceramic Tubular Indirect Evaporative Cooler with Other IEC

Wang Xin Sun Tiezhu Wang Qi

(School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710600)

【Abstract】 In order to improve the hydrophilicity of the current indirect evaporative cooler, improve the wet bulb efficiency of the cooler, and realize intermittent water distribution, reduce the energy consumption of the circulating pump. In this paper, a new type of porous ceramic material with better water absorption is used to make a tubular indirect evaporative cooler. Its rich specific surface area is used to increase the contact area between water film and working air. The intermittent water distribution of the indirect evaporative cooler can be realized by using its good water absorption and fast water storage, and the running time of the circulating pump can be shortened. The wet bulb efficiency, temperature drop, EER and other parameters were measured and calculated. In order to understand its superiority, the performance was compared with that of other indirect evaporative coolers. The results show that the EER of the porous ceramic tubular indirect evaporative cooler is the highest, and the wet bulb efficiency is the highest when the pipe length is 1.5m. Its good performance proves that it has a good application prospect.

【Keywords】 The hydrophilic; Intermittent water distribution; Porous ceramics; Tubular indirect evaporative cooler; EER

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2021JQ-689); 西安市科技计划项目 (2020KJRC0023)

作者简介: 王 鑫 (1998.4-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 577186421@qq.com

通讯作者: 孙铁柱 (1986-), 男, 博士, 研究生导师, E-mail: suntiezhu66@163.com

收稿日期: 2021-04-15

0 引言

蒸发冷却空调技术是一种节能环保的空调技术, 间接蒸发冷却是目前蒸发冷却空调技术实现等

湿冷却的唯一方式。Tulsidasani 等^[1-3]研究了安装多功能换热器的非空调建筑的热工性能; Brooks 和 Field 等研究了一种用于制取冷风的交叉流式间

接蒸发冷却器^[4]。Ren 开发并研究了一种水平/逆流式间接蒸发冷却器^[5]。赵旭东等对一种新型逆流露点 IEC 进行了数值模式分析^[6], 并研究过无纺布、植物纤维等作为露点间接蒸发冷却器材料的性能; Duan Zhiyin 等开发一个新的逆流 IEC 传热/传质换热器, 可提供接近露点温度的送风^[7]。Riangvilaikul 等对薄膜棉片与聚氨酯材料制作的逆流露点间接蒸发冷却器进行了实验研究。Lee 等对铝质材料制成的逆流 IEC 进行了数值和实验研究。以上所研究的 IEC 制作材料为铝箔、薄膜棉片与聚氨酯等材料, 且形式多为板翅式而非管式。

本课题组黄翔、樊丽娟等人研究过金属铝作为管式间接蒸发冷却器材料的性能^[8,9]; 毛秀明、刘小文等人研究了多孔陶瓷填料和露点间接蒸发冷却器的测试, 但没有以多孔陶瓷作为材料制作管式间接蒸发冷却器, 并对其进行实验及数值模拟等研究。

为了改善目前间接蒸发冷却器的亲水性, 提高冷却器的湿球效率, 并实现间歇式布水, 降低循环水泵能耗。因此本文采用吸水性较好的新型多孔陶瓷材料制作管式间接蒸发冷却器, 利用其丰富的比表面积来增大水膜与工作空气的接触面积; 利用其较好的吸水性快速蓄水, 实现间接蒸发冷却器的间歇性淋水, 缩短循环水泵运行时间。从而使间接蒸发冷却的冷却效率提高和能耗降低, 扩大蒸发冷却空调技术在实际工程中的应用范围。

1 多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器及评价指标

1.1 多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器实验样机规格

根据目前工程上采用的金属多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器的管间距管径标准, 来确定本样机的相应参数; 因多孔陶瓷材料的易碎性, 其管长不宜超过 1 米。其详细参数如下:

(1) 选用 $\Phi 30 \times 5$ 的多孔陶瓷管, 管内表面为密闭不可渗透多孔陶瓷膜, 目的是阻止水分渗透到管内, 保证管内产出空气等湿冷却。

(2) 多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器垂直方向共有 17 排多孔陶瓷管, 奇排管为 18 根多孔陶瓷管, 偶排管为 17 根多孔陶瓷管, 共 297 根多孔陶瓷管。

(3) 多孔陶瓷管布置时, 横向、纵向管间距按照 $S_2=S_3=40\text{mm}$, 正三角形错列布置。

(4) 产出空气迎面尺寸为 $720\text{mm} \times 720\text{mm}$, 工作空气迎面尺寸为 $720\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 。

(5) 每根管长为 1.0m, 总传热面积为 27.9m^2 。

(6) 产出空气风机: 风量 $5000\text{m}^3/\text{h}$, 风压 183.2Pa ; 工作空气风机: 风量 $5500\text{m}^3/\text{h}$, 风压 200Pa 。

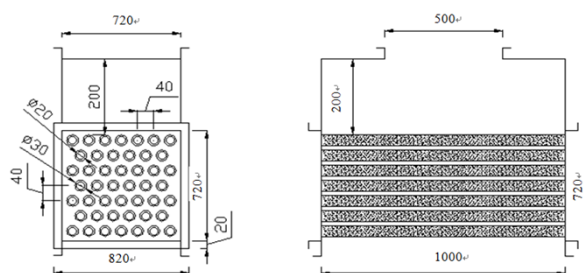


图 1 多孔陶瓷管式露点间接蒸发冷却器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of porous ceramic tubular dew

point indirect evaporative cooler



(a) 陶瓷管



(b) 样机

图 2 多孔陶瓷管及成品实物图

Fig.2 Porous ceramic tube and finished product

1.2 试验台、测试仪器介绍

实验台工作流程: 室外空气作为工作空气从进风口进入多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器管外侧, 与陶瓷管壁上的水分进行热湿交换冷却管内产出空气, 通过③④测点监测工作空气状态。室外空气作为产出空气从进风口进入多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器管内等湿冷却, 通过①②测点监测工作空气状态。通过调节变频器调节风机频率, 来改变风机风量大小, 通过调节循环水管阀门调节淋水密度。

工作空气的温度和湿度对多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器效率和温度的降低有很大的影响。所以实验台刻意设计可采用三种工作空气，包括室外空气，室内回风和经 IEC 处理后的产出空气。因此，工作空气输送管道的设计是为了提供三种空气供给，为后期实验做预设。

测点①②③④ 分别是采集多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器产出空气和工作空气的干球温度、湿球温度、空气流速及管道的总压和静压力。详见表 1 所列的测试参数、位置和仪器。表 2 列出了不同测量仪器的规格。

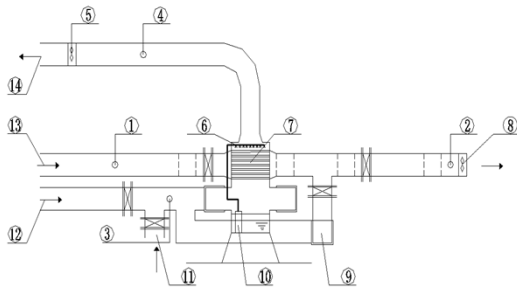


图 3 实验台原理图

Fig.3 Experimental bench schematic diagram

图 3 中,①产出空气进风口测点($t_{p,in}, t_{wb,p,in}, v_p, P$); ②产出空气出风口测点 ($t_{p,out}, t_{wb,p,out}, v_p, P$); ③工作空气进风口测点 ($t_{s,in}, t_{wb,s,in}, v_s, P$); ④工作空气排风口测点 ($t_{s,out}, t_{wb,s,out}, v_s, P$); ⑤工作空气输送风机; ⑥喷淋装置; ⑦多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器; ⑧产出空气输送风机; ⑨产出空气再作为工作空气输送管道; ⑩水泵; ⑪室内空气作为工作空气风口; ⑫室外空气作为工作空气风口; ⑬产出空气进风口; ⑭产出空气排风口。



图 4 实验台实物图

Fig.4 Physical drawing of the experimental platform

表 1 测点、测试内容及测试仪器

Table 1 Measurement points, test contents and test instruments

测点编号	测点位置	测试内容	测试仪器
①	产出空气入口	干球温度、相对湿度、风速、全压、静压	RHLOG-T-H、SwemaAir300、DP-2000
②	产出空气出口		
③	工作空气入口	干球温度、相对湿度、风速、全压、静压	RHLOG-T-H、SwemaAir300、DP-2000
④	工作空气出口		

表 2 测量仪器

Table 2 Measuring instrument

参数	仪器	测量范围	精确度
空气干球温度	RHLOG-T-H	-25~55°C	±0.3°C
空气相对湿度	RHLOG-T-H	15~85% RH	±3% RH
空气流速	SwemaAir300	0.1~30 m/s	±0.1m/s
压力	DP-2000	0~1999Pa	1.0 级; 分辨率: 1Pa
水流量	LZB-40	150~1600L/h	2.5/4.0

1.3 间接蒸发冷却性能评价指标

间接蒸发冷却器 (IEC) 的性能指标主要用热湿交换效率 (湿球效率) 和能效比 EER 进行评价。

所谓湿球效率, 即板翅式、管式、热管式 IEC 的产出空气的进出口干球温度之差与产出空气干

球温度和工作空气湿球温度之差的比值。

$$\eta_{IEC} = \frac{t_{g1} - t_{g2}}{t_{g1} - t'_{s1}} \quad (1)$$

转轮式间接蒸发冷却器的热湿交换效率是用产出空气进口干球温度和出口干球温度之差, 与工

作空气的出口干球温度和经过直接蒸发冷却器降温处理后的干球温度差之间的比值表示:

$$\eta_{IEC} = \frac{t_{g1} - t_{g2}}{t_{g3} - t_{g4}} \quad (2)$$

式中, t_{g1} 为产出空气进口干球温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{g2} 为产出空气出口干球温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{s1} 为工作空气湿球温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{g3} 为工作空气出口干球温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{g4} 为工作空气与直接蒸发冷却器热湿处理后的干球温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

间接蒸发冷却器 EER 即 IEC 的全热制冷量与水泵风机能耗的比值。所谓 IEC 全热制冷量表征冷却器向用户制取供应的冷量:

$$Q_{IEC} = q_m (h_1 - h_2) \quad (3)$$

式中: Q_{IEC} 为 IEC 全热制冷量, kW; q_m 为产出空气的风量, kg/s; h_1 为产出空气进入间接蒸发冷却器的进口焓值, kJ/kg; h_2 为产出空气离开间接蒸发冷却器的出口焓值, kJ/kg。

则间接蒸发冷却器的 EER:

$$EER_{IEC} = \frac{Q_{IEC}}{W_{IEC}} \quad (4)$$

式中: W_{IEC} 为 IEC 风机和水泵的功率, kW。

2 测试分析与其他 IEC 的性能比较

2.1 测试结果分析

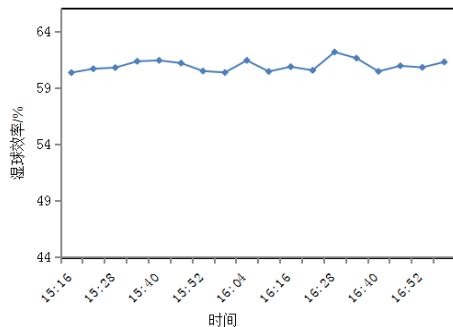


图 5 测试周期内 IEC 效率变化情况

Fig.5 Changes in IEC efficiency during the test cycle

在经过测试样机得到最佳空气比、最佳淋水密度和水泵起停时间后, 在最后参数情况下, 在西安地区选择了较为干燥的气候某时段 (在测试期间干球温度在 36.5°C , 湿球温度的 19°C), 对样机进行了测试。如图 5 和图 6 为典型实验条件下多孔陶瓷管式 IEC 的湿球效率和温降变化情况。

从图 5 和图 6 可以看出, 多孔陶瓷管式 IEC 在 1.5 小时的测试周期内稳定运行。湿球效率在小范围内波动, 从 60.3% 到 62.2%。计算的平均效率为 61.0%, 平均温度降低为 10.2°C 。之所以这里的效率会比测试最佳淋水密度、最佳空气量比实验时效率和温降高, 是由于本次的样机运行是在较为干燥的天气条件下进行的, 室外空气的干球温度与湿球温度差值较大, 水分蒸发的驱动势较大, 所以提高本次样机运行时湿通道的水分蒸发, 现场实验的效率比实验室实验的效率。

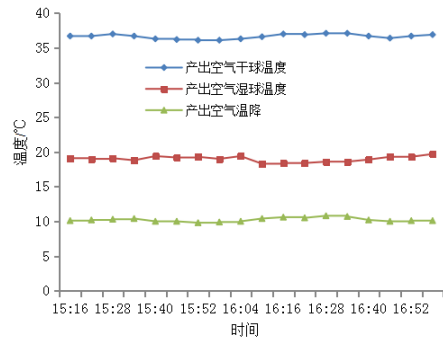


图 6 西安干燥天气下多孔陶瓷管式 IEC 温降变化

Fig.6 Temperature drop variation of porous ceramic tubular IEC under dry weather in Xi'an

2.2 与其他 IEC 性能比较

2.2.1 不同材料管式 IEC 性能比较



图 7 应用在西安某数据机房的蒸发冷却与机械制冷机组

Fig.7 It is applied in evaporative cooling and mechanical refrigeration unit of a data room in Xi'an

图 7 是应用在西安某数据机房的铝管管式间接蒸发冷却与机械制冷相结合的机组, 机组风量为 $42000\text{m}^3/\text{h}$, 单独运行管式间接蒸发冷却器冷却段所需功率 4.45kW 。2013 年 8 月 27 日对该机组进行了单独运行铝管管式间接蒸发冷却器的测试, 测试数据如表 3 所示, 测试时室外干球平均温度为 31.3°C , 湿球平均温度为 24.1°C [11,12]。经过铝管管式间接蒸发冷却器处理后, 干球温度降为 24.8°C ,

温降 6.5℃，效率达 65%；全热制冷量为 60.7kW，EER 为 7.9。与多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器详细对比如表 4 所示。经过对比可知多陶瓷管式间接蒸发冷却器在效率和 EER 方面对比现在的铝管 IEC 具有优势。



图 8 应用在西安某数据机房采用的管式 IEC 芯体

Fig.8 It is applied to the tubular IEC core used in a data room in Xi'an

表 3 应用在西安某数据机房管式间接蒸发冷却器测试数据

Table 3 It was applied to test data of pipe type indirect evaporative cooler in a data room in Xi'an

测试项目	干球平均温度/℃	湿球平均温度/℃	相对湿度/%	测试时刻
室外气相条件	31.3	24.1	56.2	
单独运行管式 IEC 段	24.8	—	81.3	14:24-16:04

表 4 多孔陶瓷管式 IEC 与其他管式 IEC 性能比较

Table 4 Comparison of performance of porous ceramic tubular IEC with other tubular IEC

IEC 管	铝管	多孔陶瓷(模拟)	多孔陶瓷
测试地点	西安	西安	西安
管长(mm)	1500	5000(管长 1.5m)	1000
喷淋模式	连续	间歇	间歇
湿球效率	65%	79.2%	61%
能耗(kWh/h)	4.45	1.11	1.11
EER	7.9	17	13.1

2.2.2 不同形式 IEC 性能比较

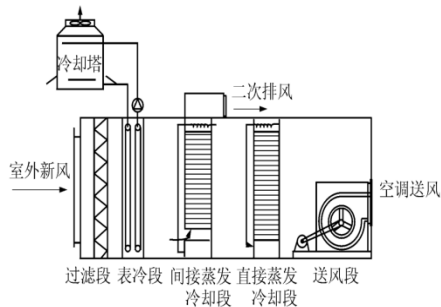


图 9 乌鲁木齐市某培训中心采用的机组结构图

Fig.9 Unit structure diagram adopted by a training center in Urumqi



图 10 乌鲁木齐市某培训中心采用的机组照片

Fig.10 Photo of a training center in Urumqi City

表 5 乌鲁木齐市培训中心机组测试数据

Table 5 Unit test data of Urumqi training center

测试项目	干球平均温度/℃	湿球平均温度/℃	干球平均温降/℃	测试时刻
室外气相条件	31.5	18.3	—	16:30
单级表冷段	22.1	15.1	9.4	16:30
单级板翅式 IEC	21.5	15.3	10	17:00
直接蒸发冷却段	20	19.3	11.5	17:00

注：测试时间为 2004 年 8 月 24 日

如图 9 和图 10 所示，为乌鲁木齐某培训中心应用的外置式冷却塔+板翅式间接蒸发冷却器+直接蒸发冷却三级蒸发冷却空调处理机组，该机组产出空气风量 40000m³/h。测试条件：产出空气进口干球平均温度 31.5℃，湿球平均温度为 18.3℃，相对湿度平均值为 28.4%。单独运行板翅式间接蒸发冷却器后产出空气出风干球平均温度 21.5℃，相对湿度平均湿度为 53.3%。详细测试结果如表 5^[10]所示。

板翅式间接蒸发冷却器工作空气和产出空气同为室外空气，根据表 5 经过计算得出该板翅式间接蒸发冷却器温降为 10℃，湿球效率 76%，全热制冷量为 104kW。



(a) 结构图



(b) 样机测试图

图 11 转轮式间接蒸发冷却器测试样机

Fig.11 Testing prototype of rotary type indirect evaporative cooler

图 11 是课题组为南通某空调公司开发的一台转轮式间接蒸发冷却样机, 样机效率为 2.36kW。并在 2012 年 8 月江苏南通对其进行了测试, 如图 12 所示。测试时室外干球平均温度为 30.1°C, 湿球平均温度为 26.1°C, 相对平均湿度 72.5%。风量为 3000m³/h, 转轮式间接蒸发冷却器工作时, 产出空气出风干球温度为 23.2°C, 相对湿度 95.5%^[12]。湿球效率平均 74%, 全热制冷量为 11.8kW, 其 EER 仅为 5。

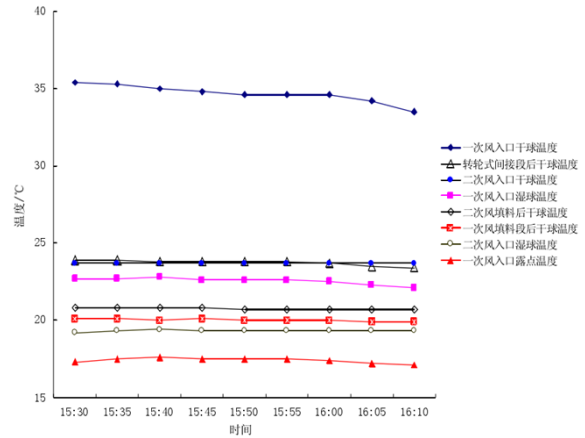


图 12 转轮式 IEC 样机各段出风温度变化图

Fig.12 Variation diagram of the outlet air temperature in each section of the rotating IEC prototype

板翅式和转轮式与多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器的具体相关参数对比如表 6 所示。

表 6 板翅式和转轮式 IEC 与多孔陶瓷管式 IEC 性能比较

Table 6 Comparison of performance between plate-fin and rotary IEC and porous ceramic tubular IEC

项目	板翅式 IEC	转轮式	多孔陶瓷 (模拟)	多孔陶瓷 (样机)
测试地点	乌鲁木齐	南通	西安	西安
风量 (m ³ /h)	40000	3000	5000 (管长 1.5m)	5000 (管长 1m)
喷淋模式	连续	连续	间歇	间歇
湿球效率	76%	74%	79.2%	61%
能耗 (kWh/h)	19.6	2.36	1.11	1.11
EER	6.7	5	17	13.1

经过对比可知多陶瓷管式间接蒸发冷却器在效率和 EER 及耗能方面对比现在的板翅式和转轮式 IEC 具有优势。

2.3 多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器能效对比

通过以上多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器与其他间接蒸发冷却器对比分析可以得知, 模拟 1.5m 管长的多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器的湿球效率要高于其他类型的间接蒸发冷却器, 如图 13 所示。如图 14 所示, 1.5m 管长的多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器 EER 高达 17。与其他间接蒸发冷却器相比其最高。可见多孔陶瓷材料制作间接蒸发冷却器具有更大的节能应用前景。

目前样机实际做成 1m 管长的多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器,从图 13 和 14 可以得知,采用间歇式布水工作时,其效率可达 61%左右,湿球效率虽然略低,但 EER 可以达到 13 左右。

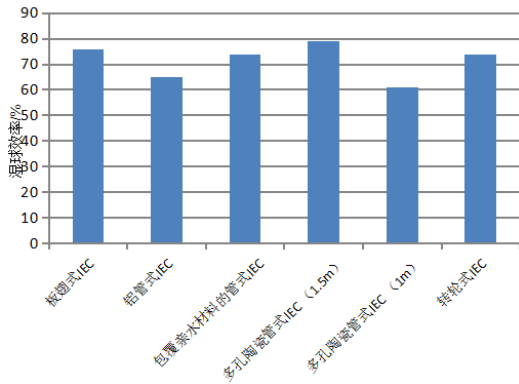


图 13 多孔陶瓷管式 IEC 与其他 IEC 效率对比图

Fig.13 Efficiency comparison diagram of porous ceramic tubular IEC with other IEC

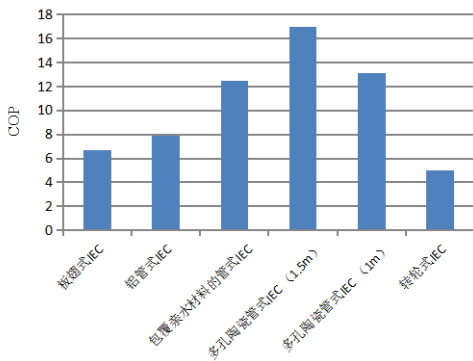


图 14 多孔陶瓷管式 IEC 与其他 IECEER 对比图

Fig.14 Porous ceramic tubular IEC compared with other IECEER

3 结语

在对比的这几类间接蒸发冷却器中,多孔陶瓷因其表面积最大,使得工作空气与水分接触的面积最大,1.5m 管长做成的管式 IEC 效率最好。另外多孔陶瓷具有很多孔隙,具有很好的储水性,可采用间歇式布水方式,降低循环水泵的能耗,具有较高 EER。

参考文献:

- [1] Martín R H, Martínez F R, Gómez E V. Thermal comfort analysis of a low temperature waste energy recovery system SIECHP[J]. Energy and Buildings, 2008,40(4): 561-572.
- [2] eng S, Liu Q. Research of Heat and Mass transfer Process on Foam Ceramic Fillers Surface[J]. CC&AC, 2007,(4):11-14.
- [3] Chen W, Liu S, Lin J. Analysis on the passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramic pipes with water sucking ability[J]. Energy and Buildings, 2015,86:541-549.
- [4] 郝航,黄翔,盛晓文,等.对于管式间接蒸发冷却器改进流程的分析与验证[J].流体机械,2013,41(6):65-69.
- [5] 刘小文,黄翔,吴志湘.多孔陶瓷露点间接蒸发冷却器传热质机理分析[J].洁净与空调技术,2009,(2):11-14.
- [6] 樊丽娟,黄翔.管式间接蒸发冷却器增强传热的研究[J].价值工程,2011,30(11):29-30.
- [7] 王思琴,李宏哲,牛晓文,等.蒸发冷却空调技术在节能减排中的作用分析[J].中国设备工程,2017,(2):125-126.
- [8] Tiezhu Sun, Xiang Huang, Yi Chen, et al. Experimental investigation of water spraying in an indirect evaporative cooler from nozzle type and spray strategy perspectives[J]. Energy and Building, 2020,214:1-10.
- [9] Tiezhu Sun, Xiang Huang, Yueying Qu, et al. Theoretical and experimental study on heat and mass transfer of a porous ceramic tube type indirect evaporative cooler[J]. Applied Thermal Engineering, 2020,(173):1-10.
- [10] 王兴兴,黄翔,邱佳.不同间接蒸发冷却器工程实验分析及应用探讨[J].制冷与空调,2015,15(7):92-97.
- [11] 黄翔,樊丽娟,吴志湘.管式间接蒸发冷却器性能测试与分析[J].建筑科学,2009,25(6):49-53.
- [12] 罗绒,黄翔,靳贵铭.转轮式两级蒸发冷却空调机组的试验研究[J].流体机械,2013,41(1):63-67.