

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-019-07

蒸发冷却用泡沫 陶瓷填料不同流道形式的性能实验

靳如意¹ 黄翔¹ 王颖¹ 罗杰任²

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;

2. 西安交通大学 西安 710049)

【摘要】 以折线型和直线型两种流道形式的新型泡沫陶瓷填料为研究对象, 利用搭建的蒸发冷却实验台, 在三种典型工况下, 对两种流道形式填料的性能参数进行试验测试与对比分析。结果表明: 折线型和直线型流道形式的泡沫陶瓷填料, 其最佳淋水密度分别为 10.0kg/(m·h) 和 6.7kg/(m·h); 在乌鲁木齐、西安、常州工况下折线型流道形式填料的最佳进口风速分别为 1.6、1.4、1.2m/s, 直接蒸发冷却效率可达 83.01%、70.74%、67.43%; 而直线型流道在 3 种工况下的最佳进口风速均为 1.0m/s, 直接蒸发冷却效率分别为 77.68%、68.56%、64.23%; 折线型流道相比于直线型流道而言, 不易受风量变化影响, 空气进出口温降稳定, 更加适用于各种不同风量大小的蒸发冷却空调系统, 但同时也需适当考虑风机的功耗问题。

【关键词】 流道形式; 泡沫陶瓷填料; 热质交换; 直接蒸发冷却效率; 淋水密度
中图分类号 TU831.4 文献标识码 A

Performance Test and Comparative Analysis of two Kinds of Flow Channel Foam Ceramic Fillers

Jin Ruyi¹ Huang Xiang¹ Wang Ying¹ Luo Jieren²

(1. College of urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)

【Abstract】 In this paper, two new types of foam ceramic fillers with broken line type and linear type are taken as the research object, using the evaporative cooling test-bed built, under three typical working conditions, the performance parameters of the two types of channel fillers are tested and compared. The results show that the optimum densities of foam ceramic fillers with broken line and straight channel are 10.0kg/(m·h) and 6.7kg/(m·h), respectively, and the optimum inlet wind speeds of folded channel packing are 1.6, 1.4 and 1.2m/s respectively under the working conditions of Urumqi, Xi'an and Changzhou, and the direct evaporative cooling efficiency can reach 83.01%, 70.74% and 67.43%, respectively. The best inlet wind speed of the linear runner under the three operating conditions is 1.0m/s, and the direct evaporative cooling efficiency is 77.68%, 68.56% and 64.23%, respectively. Compared with the linear runner, the folded runner is not easy to be affected by the change of air volume, and the temperature drop of the air inlet and outlet is stable, which is more suitable for evaporative cooling air conditioning systems with different air volume, but the power consumption of the fan should also be properly considered.

基金项目: 深圳市科技研发资金资助可持续发展专项项目名称“专 2021N033 数据中心智慧高效节能制冷系统关键技术研发”(项目编号: KCXFZ20201221173409026)

作者简介: 靳如意 (1997.09-), 女, 在读研究生, E-mail: 1520124193@qq.com

通讯作者: 黄翔 (1962.07-), 男, 教授, 博士研究生导师, E-mail: huangx@xpu.edu.cn

收稿日期: 2022-09-01

【Keywords】 flow channel form; foam ceramic filler; heat and mass exchange; direct evaporative cooling efficiency; watering density

0 引言

蒸发冷却技术以干空气能为驱动势,利用空气与水在填料中的热湿交换进行冷却降温。因此填料是实现热质传递的媒介物质,填料的材质和结构形式对冷却效果有着决定性的影响^[1]。对于节能低碳环保的蒸发冷却空调而言,更加要求填料能够尽可能把水变成细小的水滴或水膜,使其均匀铺在表面,降低淋水密度的同时提高润湿率。填料的内部结构还应能保障空气与水在填料中的接触时间要长,空气的流动阻力要小,以减少风机的功耗。目前工程应用的填料主要有植物纤维材料、金属材料、PVC 材料等。泡沫陶瓷是由陶瓷抛光废渣二次烧制而成,是一类具有功能和结构双重属性的新型多孔材料,化学性能稳定,物理和力学性能优异^[2]。将其升级制备为陶瓷填料,应用到制冷空调领域,解决城市工业垃圾的同时,也为寻找新型蒸发冷却换热填料创造条件。泡沫陶瓷填料因其特有的高孔隙率、低密度、大比表面积和高热导率等特点,可以从根本上提高表面亲水性、增加空气与水膜间的传热传质面积、同时多孔结构可作为储水装置,有效的降低淋水密度和水泵的运行能耗,改善蒸发冷却装置的换热性能,提升系统整体的冷却效率^[3,4]。冯胜山等人^[5,6]采用多孔陶瓷作为直接蒸发冷却器的换热填料,建立了相应过程的热质传递模型对其进行理论与实验研究。Kulkarni R K^[7]等人对蒸发冷却器中填料的不同流道形式和材质进行了研究。并运用人工模拟的方法得出白杨木丝材质的六角形流道形式填料的效率最高。黄翔等人^[8]分析对比了 GLASdek 填料的冷却效率,给出了迎面风速、填料流道形式等参数的优化方法。王鑫等人^[9]采用多孔陶瓷材料制成的管式间接蒸发冷却器进行换热性能实验。得出多孔陶瓷管式间接蒸发冷却器的 EER 最高。

蓝笛等人^[10]将泡沫陶瓷填料应用于蒸发式冷凝器进行换热性能实验。实验结果表明,泡沫陶瓷填料的格栅结构使得空气流经时的过流阻力显著减小,同时填料的容积散质系数明显高于金属填料和水泥格网板填料。

但目前针对此种新型泡沫陶瓷填料的结构形

式设计 and 不同形式下的性能实验与对比分析还有待研究,本文采用抛光废渣制成的新型泡沫陶瓷填料作为蒸发冷却空调换热填料,将其设计组装成折线型和直线型两种流道形式。选取乌鲁木齐、西安、常州三种典型工况,在泡沫陶瓷填料蒸发冷却实验台上,对两种流道形式填料的性能参数进行实验测试与对比分析。分别研究确定了折线型和直线型填料在不同运行工况下的最佳淋水密度、最佳进口风速以及温降和压降的变化情况。

1 泡沫陶瓷填料

泡沫陶瓷填料的制备过程如图 1 所示。首先将陶瓷生产厂家提供的陶瓷抛光废渣加热,当其水分低于 10%时,粉碎,然后过 250 目筛,制成抛光废粉。取适量抛光废粉,加入 20%的水,混合均匀后用压片机压制成厚度 0.5cm 的试片,置于 200℃ 下干燥 30min。最后将试件放入高温炉中,在 1200℃ 下煅烧 30min,制成泡沫陶瓷填料^[10]。

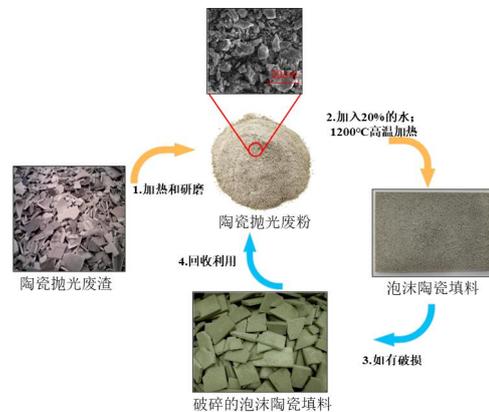


图1 抛光废渣泡沫陶瓷填料的制备工艺

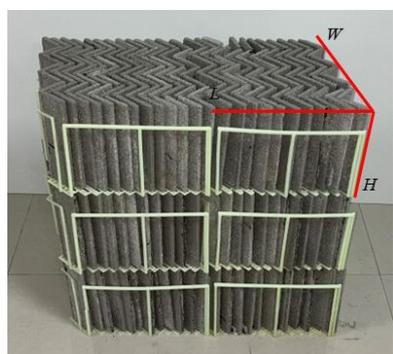
Fig.1 Preparation process of polishing waste ceramic foam packing

将制备的泡沫陶瓷填料切割成高 170mm、厚 8mm 的陶瓷片,拼接组装成直线型流道和折线型流道两种不同结构形式的直接蒸发冷却填料,填料切片与切片之间的间距为 6.24mm,均匀地布置在塑料框架内。组装完成后,单块泡沫陶瓷填料的外形尺寸为 250mm×210mm×170mm (长(L)×(W)×高(H))的长方体状格栅。直接蒸发冷却器的填料段由这样 6 块填料拼装而成,填料的结

构形式如图 4 所示。



(a) 直线型



(b) 折线型

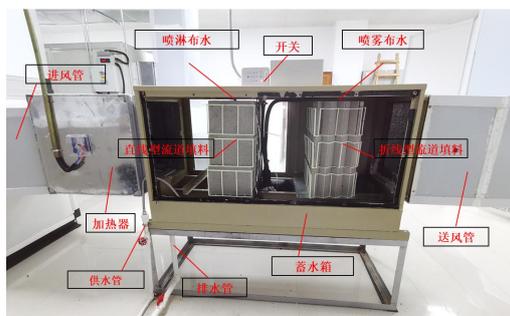
图 2 泡沫陶瓷填料的结构形式

Fig.2 Structural form of foam ceramic packing

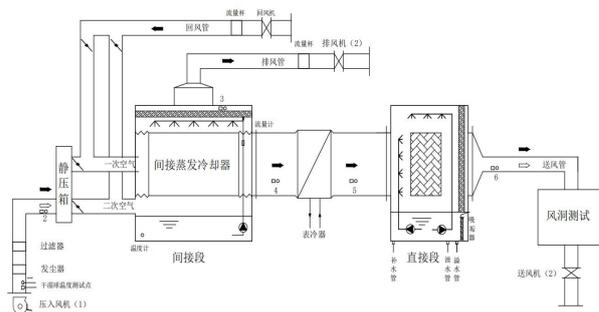
2 实验系统

2.1 实验测试系统

泡沫陶瓷填料蒸发冷却实验系统如图 3 所示, 主要包括压入风机、静压箱、间接蒸发冷却器、加热段、泡沫陶瓷填料直接蒸发冷却试验台、风洞试验等部分。可根据具体测试需要维持实验台内空气状态参数的稳定。表 1 列出了不同测量仪器的规格。



(a) 泡沫陶瓷填料蒸发冷却实验系统实物图



(b) 泡沫陶瓷填料蒸发冷却实验系统示意图

图 3 泡沫陶瓷填料蒸发冷却实验系统

Fig.3 Foam ceramic packing evaporative cooling experimental system

表 1 各种测量仪器的规格

Table 1 Specification of various measuring instruments

测试内容	测试仪器	测试范围	测量精度
干球温度	RHLOG-T-H	-25~55℃	±0.3℃
相对湿度	RHLOG-T-H	2~98%RH	±2.5%RH
风速	SwemaAir300	0.1~30m/s	±0.1m/s
风压	Setra266	0~250Pa	±1%FS
水流量	LYH-8	0~600L/h	±0.05L

2.2 实验参数的确定

根据 GB 50736-2012^[1]中规定的夏季空气调节室外计算干湿球温度, 分别取乌鲁木齐市、西安市、常州市为实验的 3 种典型工况, 在焓差实验室内进行不同模拟工况的参数调节, 实验模拟工况如表 2 所示, 误差在±0.5℃以内。

表 2 焓差实验室内模拟工况

Table 2 Simulation of working conditions in the experimental chamber

工况	干球温度/℃	湿球温度/℃	露点温度/℃
乌鲁木齐	33.5	18.2	8.64
西安	35.0	25.8	22.64
常州	34.6	28.1	26.19

本实验风机的额定风量为 2500m³/h, 配有变频器, 共设置 7 个档位, 通过调节转速来控制风量的大小, 进风口有效截面积为 0.32m², 通过风机运转时测得的变频器各档位风速来计算其送风量, 风机各档位与风量之间的对应关系如表 3 所示。

表3 风机风量与变频器档位对应表
Table 3 Fan air volume and inverter gear correspondence table

档位	1	2	3	4	5	6	7
风速 (m/s)	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
风量 (m ³ /h)	920	1150	1380	1610	1840	2070	2300

2.3 实验测试过程

- (1) 启动实验装置，开启风机，关闭门窗，等待测试工况稳定。
- (2) 放置折线型泡沫陶瓷填料，开启布水装置。
- (3) 调节风机变频器。稳定运行 10min 后，测量并记录各测点的空气状态参数。
- (4) 分别设置进出风测点。测量并采集数据。
- (5) 更换直线型填料，重复步骤 (2) ~ (4)。
- (6) 完成实验测试工作，关闭实验系统。

2.4 性能评价指标

2.4.1 直接蒸发冷却效率

用热力学第一定律分析直接蒸发冷却器对环境温度的冷却能力，其直接蒸发冷却效率^[2]计算式为：

$$\eta_{DEC} = \frac{t_{g1} - t_{g2}}{t_{g1} - t_{s1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： t_{g1} 为进风干球温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_{g2} 为出风干球温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_{s1} 为进风湿球温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

2.4.2 淋水密度

淋水密度 (Γ) ^[2]是将转子流量计测量的每单位小时的循环水流量除以淋水管的总长度来计算。

$$\Gamma = \frac{M_w}{nZ} \quad (2)$$

式中： Γ 为淋水密度， $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$ ； M_w 为循环水质量流量， kg/h ； n 为布水管个数，个； Z 为单个布水管道长度， m 。

3 实验结果与讨论

3.1 能量平衡校核和不确定性分析

在实验测量过程中，一些不可避免的人为误差和实验测试仪器的精度误差都有可能影响最后的实验结果，因此在正式实测前有必要对所有测量数据和实验中计算的性能评价指标进行不确定性分

析，以检查测量设备收集数据的有效性。假设函数 R 根据一组 n 个测量值（自变量）计算得出，表达式如下：

$$R = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3)$$

因此，结果 R 的不确定度可以结合各个项的不确定度使用平方根法来进行确定。

$$\delta R = \sqrt{\sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} x_i\right)^2} \quad (4)$$

方程 δR 、 x_i 、 δx_i 分别是与因变量 R 、影响 R 的自变量和变量 x_i 的不确定度相关的总不确定度。不同指标的不确定性分析结果如表 4 所示。为确保测试结果的可靠性，对实验台进行能量平衡校核。在绝热条件下，直接蒸发冷却过程是一个等焓降温的过程，空气入口和出口状态的焓值相等。

$$i_{in} = i_{out} \quad (5)$$

表4 不确定性分析结果

测试参数	正常值	相对不确定度
进风量	2070m ³ /h	±3.5%
换热效率(直线型)	54%	±5.4%
换热效率(折线型)	64%	±5.8%

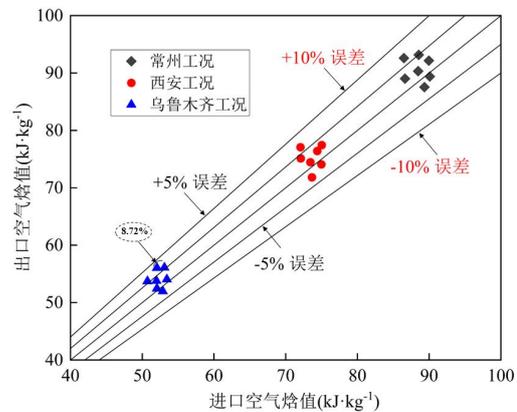


图4 蒸发冷却器进出风焓值比较

Fig.4 Comparison of enthalpy of air inlet and outlet of evaporative cooler

图 4 为进风口和出风口的焓值变化对比图。所有实验结果的误差均在±10%以内。因此，该设备被认为是可靠的实验设备，其测得的数据真实有效。

3.2 填料最佳淋水工况

润湿率对填料的蒸发冷却性能具有关键性影响，为了确定泡沫陶瓷填料的最佳淋水密度，在不同的喷淋水量和不同的进口空气流量(1380, 1610,

2070m³/h) 下进行了一系列试验。

在西安工况下, 分别设置喷淋水流量为 2、5、10、15、20、25L/h, 对两种不同流道形式的泡沫陶瓷填料进行试验测试, 通过填料直接蒸发冷却效率的比对分析, 确定两种流道形式填料的最佳淋水工况。淋水流量对两种流道形式泡沫陶瓷填料直接蒸发冷却效率的影响如图 5 所示。

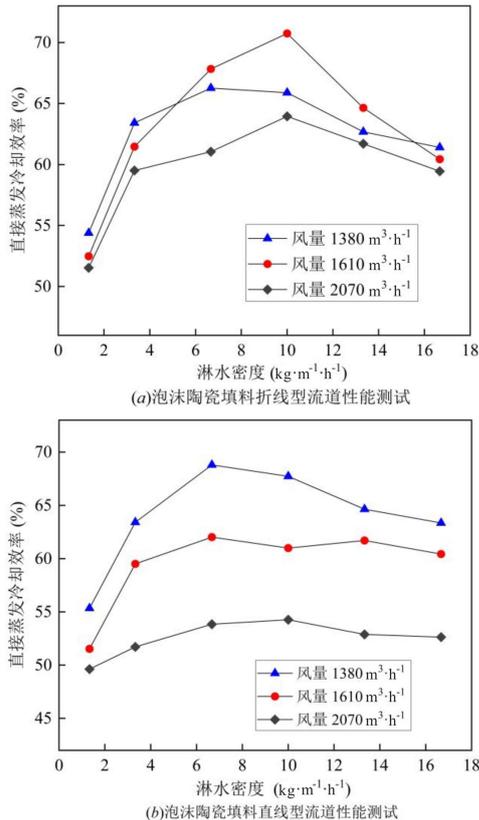


图 5 淋水密度对两种流道形式泡沫陶瓷填料直接蒸发冷却效率的影响

Fig.5 Effect of watering density on direct evaporative cooling efficiency of two kinds of foam ceramic fillers

由图 5 可知, 随着喷淋水量的增大, 两种流道形式泡沫陶瓷填料的直接蒸发冷却效率均呈现先升高后降低的趋势。这是因为泡沫陶瓷材料本身特有的孔隙结构, 使其具备良好的蓄水能力, 而蒸发冷却技术恰恰是依靠水的汽化潜热对空气进行冷却降温。当淋水量较小时, 水与泡沫陶瓷填料接触的表面存在大量干点, 导致直接蒸发冷却效率较低。随着喷淋水量的增加, 填料被充分润湿, 当淋水量增加到超过泡沫陶瓷填料本身所能容纳的体积时, 形成流道堵塞, 热质交换效果降低。在对两种流道形式的泡沫陶瓷填料进行最佳淋水工况测

试时可以发现, 折线型填料的换热效率增幅较大整体高于直线型, 且不易受进风风量变化的影响, 填料中空气与水的热质交换效果更加显著, 三种不同风量下的直接蒸发冷却效率较为相近。而直线型填料的换热效率受风量变化的波动较大, 当风量一定时, 增加填料的喷淋水量, 换热效果变化不明显。同一淋水密度下, 风量越大, 泡沫陶瓷填料的直接蒸发冷却效率反而越小。折线型流道的泡沫陶瓷填料在淋水密度为 10.0kg/(m·h)时, 三种风量下的换热效果最好, 此时填料刚好被完全润湿。直线型流道的泡沫陶瓷填料则在淋水密度为 6.7kg/(m·h)时完全湿润, 达到良好的热交换效果。

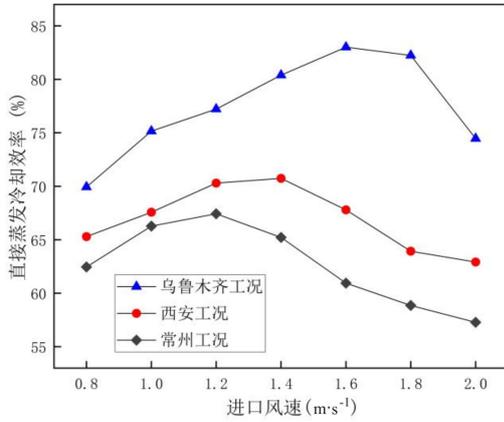
3.3 直接蒸发冷却效率

在测得的最佳淋水工况下, 选取三种典型代表地区(乌鲁木齐、西安、常州工况), 分别控制两种流道形式泡沫陶瓷填料的进口空气流量保持在 920m³/h, 通过变频器调节使两种结构填料的进风量从 920m³/h 递增至 2300m³/h, 单次增量为 230m³/h, 完成三种运行工况下进口风速在 0.8~2.0m/s 范围内的实验测试, 通过测试数据计算其对应的直接蒸发冷却效率, 以此来比较两种流道形式的填料在不同运行工况下的热质传递性能。

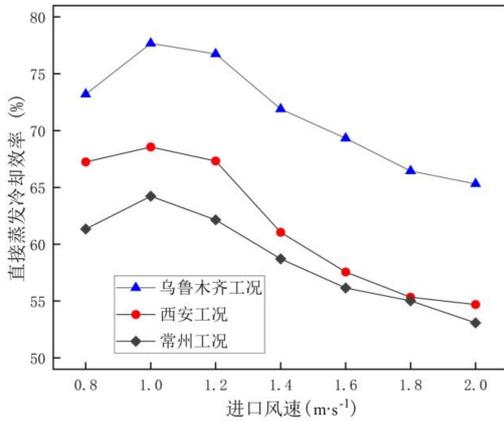
图 6 为在 3 种运行工况下测得的进风量对两种流道形式泡沫陶瓷填料直接蒸发冷却效率(η_{DEC})的影响。由图 6 可知: 三种运行工况下, 随着进风量的增加, 两种流道形式填料的直接蒸发冷却效率均呈现先升高后降低的趋势, 其中折线型填料在风量变化时, 其效率变化趋势较直线型更为稳定。折线型流道的泡沫陶瓷填料, 在乌鲁木齐工况下, η_{DEC} 为 83.01%, 最佳进口风速为 1.6m/s; 西安工况下 η_{DEC} 为 70.74%, 最佳进口风速为 1.4m/s; 常州工况下 η_{DEC} 为 67.43%, 最佳进口风速为 1.2m/s。直线型流道的泡沫陶瓷填料, 在乌鲁木齐工况下 η_{DEC} 为 77.68%; 西安工况下 η_{DEC} 为 68.56%; 常州工况下 η_{DEC} 为 64.23%, 三种工况下的最佳进口风速均为 1.0m/s。

通过对两种流道泡沫陶瓷填料的性能测试发现, 同一工况下, 折线型流道的 η_{DEC} 和最佳进口风速均要高于直线型流道。主要是因为折线流道的结构形式相比于直线流道, 增大了填料中空气与水的接触面积, 延长了热湿交换时间, 增强了直接蒸发冷却的热质交换效果。同时, 折线型流道不易受风

量变化影响, 相比于直线型流道更能适应各种不同风量大小的蒸发冷却空调系统, 对风量要求不高, 其应用范围更加宽广。



(a)泡沫陶瓷填料折线型流道性能测试



(b)泡沫陶瓷填料直线型流道性能测试

图6 进风量对两种流道形式泡沫陶瓷填料直接蒸发冷却效率的影响

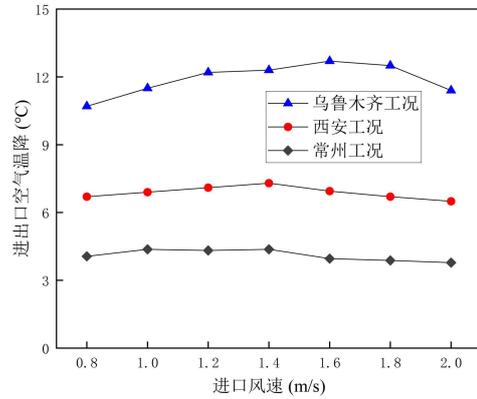
Fig.6 Effect of Inlet Air Volume on Direct evaporative cooling efficiency of two kinds of foam Ceramic packing

3.4 空气进出口温降

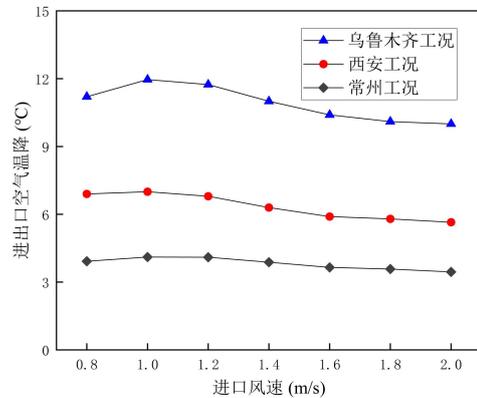
图7所示为3种运行工况下, 两种流道形式泡沫陶瓷填料的空气进出口温降随进风量的变化。由图7可知, 进出口温降随着进口风量的增加先缓慢升高后又逐渐下降。折线型流道在最佳进口风速下, 乌鲁木齐工况、西安工况、常州工况的温降峰值分别为12.7、7.3和4.37℃。而直线型流道在最佳进口风速下, 乌鲁木齐工况、西安工况、常州工况的温降峰值分别为11.96、7和4.11℃。

由图7可知, 随着填料进口风速的逐渐增大, 折线型流道的温降更加平缓稳定。由于泡沫陶瓷填料折线型流道与直线型流道相比, 其结构形式复杂, 有效流通距离长, 同时曲折的流道使得空气在

其中停留的时间变长, 热质交换更加充分。



(a)泡沫陶瓷填料折线型流道性能测试



(b)泡沫陶瓷填料直线型流道性能测试

图7 进风量对两种流道形式泡沫陶瓷填料进出口温降的影响

Fig.7 Effect of Inlet Air Volume on Inlet and outlet temperature drop of two kinds of foam Ceramic fillers

3.5 填料层压降

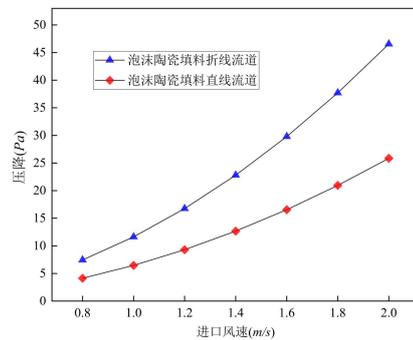


图8 进风量对两种流道形式泡沫陶瓷填料压降的影响

Fig.8 Effect of Inlet Air Volume on pressure drop of two kinds of foam Ceramic packing

图8为进口风速对两种流道形式泡沫陶瓷填料压降的影响(三种工况下的压降变化图相同),

填料的压降反应了气液介质通过泡沫陶瓷填料层时气相所克服的阻力。由图 8 可知, 两种流道形式填料的压降均随进风量的增大而增大, 且折线型填料的压降整体高于直线型。对于折线型流道而言, 其局部阻力系数大, 使得空气在流道中所需克服的沿程阻力和局部阻力变大。从另一方面也变相增加了风机的能耗。

4 结论

(1) 实验结果表明, 两种流道形式泡沫陶瓷填料的直接蒸发冷却效率随淋水密度的增加均呈现先升高后降低的趋势, 在西安工况下, 折线流道形式泡沫陶瓷填料的最佳淋水密度为 $10.0\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$, 直线流道形式为 $6.7\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$ 。

(2) 相同实验条件下, 折线型流道形式填料的最佳进口风速和压降都要高于直线型流道。在乌鲁木齐、西安、常州工况下折线型流道形式填料的最佳进口风速分别为 1.6 、 1.4 、 $1.2\text{m}/\text{s}$, 直接蒸发冷却效率可达 83.01% 、 70.74% 、 67.43% ; 而直线型流道在 3 种工况下的最佳进口风速均为 $1.0\text{m}/\text{s}$, 直接蒸发冷却效率分别为 77.68% 、 68.56% 、 64.23% 。两种流道形式泡沫陶瓷填料在乌鲁木齐工况下的制冷性能达到最高水平, 表明蒸发冷却技术在干燥地区更加具有节能潜力与应用前景。

(3) 随着进口空气干湿球温差的减小和空气质量流量的增大, 两种流道形式泡沫陶瓷填料的直接蒸发冷却效率均有下降的趋势。但折线型流道相比于直线型流道而言, 不易受风量变化影响, 空气进出口温降稳定, 更加适用于各种不同风量大小的蒸发冷却空调系统, 应用范围广泛。但也需适当考虑风机能耗问题。

参考文献:

[1] 黄翔. 蒸发冷却空调原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
[2] 刘树元, 杨焱明, 刘庆, 等. 多孔陶瓷材料在环境工程中的应用[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2008, 22(1):

66-70.

[3] Fenghao Wang, Tiezhu Sun, Xiang Huang. Experimental research on a novel porous ceramic tube type indirect evaporative cooler [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 1191-1199.
[4] Tiezhu Sun, Xiang Huang, Yueying Qu. Theoretical and experimental study on heat and mass transfer of a porous ceramic tube type indirect evaporative cooler[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 173: 115211.
[5] 冯胜山, 刘庆丰. 泡沫陶瓷填料表面的热、质传递过程研究[J]. 洁净与空调技术, 2007, (4): 11-14.
[6] 冯胜山, 刘庆丰, 辛军哲, 等. 泡沫陶瓷填料直接蒸发冷却换热性能实验研究[J]. 制冷与空调, 2010, 24(1): 1-6.
[7] Kulkarni R K, Rajput S P S. Comparative performance analysis of evaporative cooling pads of alternative configurations and materials[J]. International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2013, 6(4): 1524.
[8] 黄翔, 武俊梅, 宣永梅. 两种填料直接蒸发冷却式空调机性能的实验研究[J]. 制冷学报, 2001, 22(3): 33-40.
[9] 王鑫, 孙铁柱, 王祺. 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[J]. 制冷与空调, 2021, 35(6): 784-790.
[10] 蓝笛, 辛军哲. 结构化灰渣泡沫陶瓷蒸发冷却填料性能的实验研究[J]. 广东化工, 2019, 46(19): 11-13.
[11] 黎涛, 熊祖鸿, 郭华芳, 等. 陶瓷抛光废渣的化合物相分析[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2346-2351.
[12] GB 50736-2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
[13] 许为全. 热质交换过程与设备[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
[14] 黄翔. 空调工程(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
[15] 樊丽娟, 黄翔. 多孔陶瓷立管式间接蒸发冷却器的设计与性能分析[J]. 流体机械, 2019, 47(7): 85-88.
[16] 王庚, 张小松, 陈瑶, 等. 陶瓷泡沫填料逆流直接蒸发冷却热质传递特性的实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(3): 457-462.