

文章编号: 1671-6612 (2010) 01-001-06

泡沫陶瓷填料直接蒸发冷却换热性能实验研究

冯胜山¹ 刘庆丰¹ 辛军哲² 刘群赐³ 许顺红¹

(1. 湖北工业大学机电研究设计院 武汉 430070; 2. 广州大学 广州 510006;
3. 广东省东莞市科达机电设备有限公司 东莞 523050)

【摘要】 介绍了泡沫陶瓷填料的直接蒸发冷却换热性能实验方法, 探讨了泡沫陶瓷填料换热效率和过流阻力的影响因素及其影响规律。实验结果表明: 新型泡沫陶瓷材料可用作直接蒸发冷却换热填料, 其换热效率接近纸质湿帘, 高于金属填料, 在温室空气调节领域有着广阔的应用前景。

【关键词】 泡沫陶瓷; 填料; 直接蒸发冷却; 换热效率; 过流阻力

中图分类号 TB66 文献标识码 A

The Experiment Research of Direct Evaporate Cooling Performance Using Foam Ceramic Padding

Feng Shengshan¹ Liu Qingfeng¹ Xin Junzhe² Liu Qunci² Xu Shunhong¹

(1. Research & Design Institute of Mechanical & Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, 430070;
2. Guangzhou university, Guangzhou, 510006;
3. Dongguan Keda Mechanical and Electrical Equipment s Co., Ltd., Dongguan, 523050)

【Abstract】 The experiment method of direct evaporate cooling performance using foam ceramic padding was introduced. The factors and rules that affect the efficiency of evaporative cooling and pressure drop of the new foam ceramic padding were analyzed. The results show that the foam ceramic padding can be used for padding of direct evaporate cooling. The efficiency of direct evaporative cooling using the foam ceramic padding approach to the papyery padding and preponderate over the metal padding. The new foam ceramic padding can be widely used for air conditioning of palm house.

【Keywords】 foam ceramic; padding; direct evaporative cooling; efficiency; pressure drop

0 引言

直接蒸发冷却式水源热泵型空调系统是利用水与热空气的温差, 通过多孔结构热湿交换器(亦称填料、水帘)使水与热空气直接接触, 通过水的蒸发, 将热空气进行蒸发冷却、加湿和除尘净化, 再送入室内置换原来受污染的高温空气, 达到净化室内空气和调节室内温湿度的目的。该技术与常规冷媒制冷技术相比, 具有对大气环境无污染和低耗能等优点。在全球大气逐渐变暖, 大气臭氧层破坏日益严重的情况下, 这种环保型空调技术越来越受

到人们的重视^[1,2]。

填料是直接蒸发冷却式空调技术的核心之一, 其性能直接影响到空调机的运行效果。填料分有机材质和无机材质两种, 其中有机材质主要有天然植物纤维(俗称木丝)和纸帘, 无机材质主要有玻璃纤维和铝帘。木丝和玻璃纤维均为三维通孔结构, 孔径和比表面积小, 湿挺度(吸湿后的结构刚度)低, 而且木丝的耐腐蚀性和玻璃纤维的吸湿性也差。纸帘的吸湿性和散水性好, 铝帘的防腐性高, 它们都是由波纹状的纸板或铝板以十字斜交叉形式组装

项目基金: 湖北省自然科学基金资助项目(项目编号 2007ABA093)

作者简介: 冯胜山(1965-), 男, 研究员。

投稿日期: 2009-11-11

而成,均为二维通孔结构,而且铝帘的吸湿性很低,生产成本低,纸帘的湿挺度和阻燃性低。木丝和纸帘的使用寿命短,仅2~3年。国内外对纸质填料、金属填料的直接蒸发冷却换热特性已做了较多研究^[3-7]。目前的实际应用则以纸质填料为主。

泡沫陶瓷是一种新型的三维连通网络结构材料,具有通孔率高(75%~85%)、比表面积大、强度高、阻燃性和耐腐蚀性及防霉性好、使用寿命长等特点。采用泡沫陶瓷作为直接蒸发冷却式空调机的热湿交换填料的研究尚未见公开报道。如果泡沫陶瓷能够用作直接蒸发冷却式空调机的热湿交换填料,其耐腐蚀、耐高温性能和对空气的过滤净化能力将比波纹板型纸质填料和金属填料高得多。为此,我们对泡沫陶瓷填料的直接蒸发冷却换热特性进行了以下实验研究。

1 实验方法

1.1 实验材料



图1 泡沫陶瓷填料形貌

本实验采用的泡沫陶瓷填料是采用常温固化方法试制的免烧结泡沫陶瓷,其主要成分为硅铝酸盐,其形貌如图1所示,其主要物理性能如表1所列。表中泡沫陶瓷孔径以每英寸即25.4mm长度上的孔数表示,单位为ppi。孔数ppi越大,则孔径越小。试件的外形尺寸为500mm(长)×500mm(宽)×(40~90)mm(厚)。在泡沫陶瓷材料表面预涂吸水性树脂涂层,可改善泡沫陶瓷填料的吸湿性和散水性。

表1 泡沫陶瓷填料的主要物理性能

孔径 (ppi)	开口孔隙率 (%)	骨架直径 (mm)	表观密度 (g·m ⁻³)	常温抗压强度 (MPa)
8	80~85	0.6~1.0	0.25~0.30	0.7~1.0
10	78~82	0.5~0.8	0.28~0.32	0.8~1.1
15	75~80	0.4~0.6	0.30~0.35	1.0~1.2

1.2 测试装置

本研究采用的直接蒸发冷却试验装置为环形密闭风道结构,其示意图如图2所示。

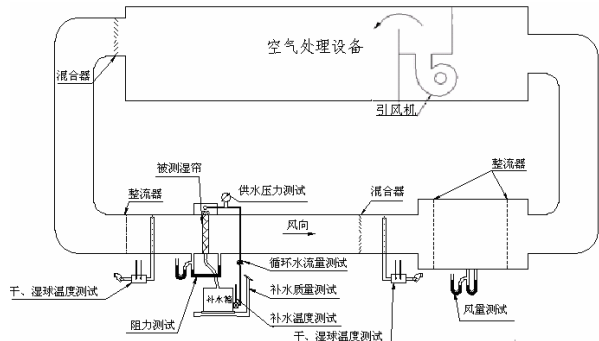


图2 直接蒸发冷却试验装置示意图

该装置由空气处理、取样和测量三部分组成。空气处理部分主要由风机、表冷器、空气加热器、超声波加湿器、压缩冷凝机组和恒温水箱组成,其作用是将空气处理到所要求的工况;取样部分主要由空气混合器、均流板、连接风管、被测试件样品及取样装置组成;测量部分主要由干湿球温度计、U形微压计、流量计等测量装置组成。

本测试装置设计通过填料试件表面风速 v 为0~4m/s、布水流量 w 为0~1.5m³/h;能模拟的自然环境条件为:进风干球温度 $T_0 \leq 45^\circ\text{C}$,进风相对湿度 $R \geq 15\%$ 。

1.3 性能表征及测试方法

1.3.1 蒸发冷却换热效率

对于直接蒸发冷却换热过程,其换热程度可用换热效率来描述。蒸发冷却换热效率即在设计过帘风速下,空气通过填料实际达到的饱和程度与理想过程空气可能达到的饱和程度之间的比率,数值上等于空气通过湿帘前后干球温度的差值与空气通过填料前干球温度与湿球温度差值的比值,即:

$$E = (T_0 - T_1) / (T_0 - T_w) \times 100\% \quad (1)$$

式中: E —蒸发冷却换热效率, %;

T_0 —进口空气的干球温度, $^\circ\text{C}$;

T_1 —出口空气的干球温度, $^\circ\text{C}$;

T_w —进口空气的湿球温度, $^\circ\text{C}$ 。

测试时,一般情况下控制进口空气干球温度 T_0 为 $38^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,空气出口的湿球温度 T_w 为 $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,待系统运行平衡后(要求进口空气湿球温度与出口空气湿球温度的差值为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内),读取空气进口的干球温度 T_1 值,代入上式即可计算

出蒸发冷却换热效率 E 。

1.3.2 过流阻力

采用微压计测量填料试件前、后的气压, 以前、后气压的差值表示填料试件的过流阻力。

2 实验结果及分析

2.1 泡沫陶瓷填料性能对蒸发冷却换热效率和过流阻力的影响

2.1.1 泡沫陶瓷填料厚度对蒸发冷却换热效率和过流阻力的影响

在泡沫陶瓷填料孔径为 10ppi、通过填料试件表面风速 v 为 1.0m/s、布水流量 w 为 0.135 m³/h 的条件下, 泡沫陶瓷填料厚度对蒸发冷却换热效率的影响如图 3 所示。随泡沫陶瓷填料厚度的增大, 出口空气的干球温度显著下降, 蒸发冷却换热效率 E 显著提高, 其中当泡沫陶瓷填料厚度 h 为 50mm~70mm 时, 泡沫陶瓷填料的蒸发冷却换热效率增长率最大。

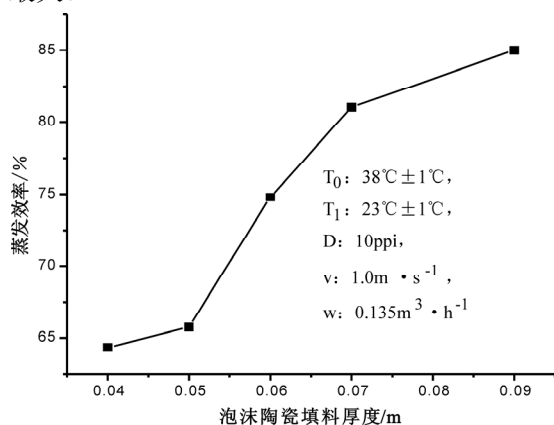


图 3 换热效率随填料厚度的变化

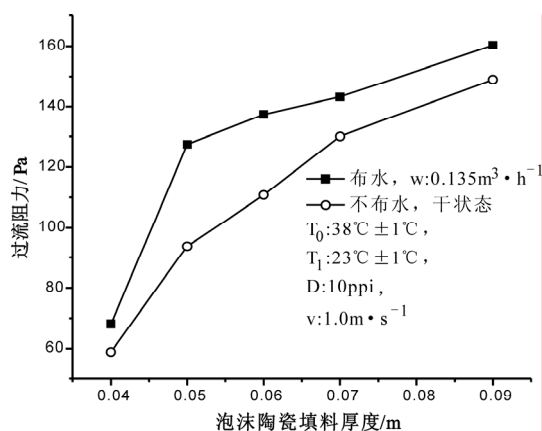


图 4 过流阻力随填料厚度的变化

由图 4 所示的过流阻力曲线可以看出: 随泡沫

陶瓷填料厚度的增大, 过流阻力也明显增大; 当泡沫陶瓷填料的厚度 h 超过 70mm 后, 虽然蒸发冷却换热效率 E 增长速度减缓, 但是泡沫陶瓷填料过流阻力继续高速增长。因此, 泡沫陶瓷填料的厚度不宜超过 70mm。

从图 4 还可看出泡沫陶瓷填料表面布水对过流阻力的影响: 在泡沫陶瓷填料表面直接布水时 (布水流量 w 为 0.156m³/h), 泡沫陶瓷的过流阻力比不布水时增加了 10Pa~35Pa。这证明泡沫陶瓷填料在布水情况下形成了水膜。

2.1.2 泡沫陶瓷填料孔径对蒸发冷却换热效率和过流阻力的影响

在泡沫陶瓷填料厚度 h 为 50mm、通过填料试件表面风速 v 为 1.0m/s、布水流量 w 为 0.135 m³/h 的条件下, 泡沫陶瓷填料孔径对蒸发冷却换热效率的影响如图 5 所示。随泡沫陶瓷填料孔径的减小, 出口空气的干球温度下降, 蒸发冷却换热效率 E 提高, 但是变化不明显。泡沫陶瓷填料孔径由 8ppi 减小到 15ppi 后, 其换热效率仅从 64.75% 提高到 69.4%。

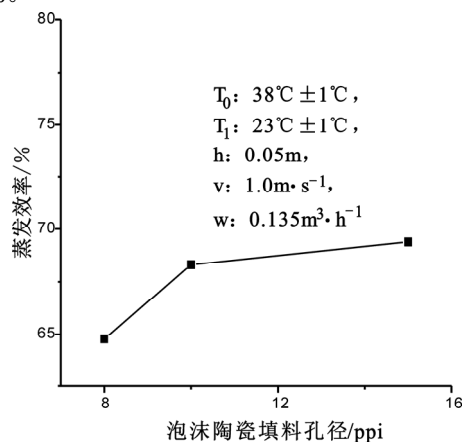


图 5 换热效率随泡沫陶瓷孔径的变化

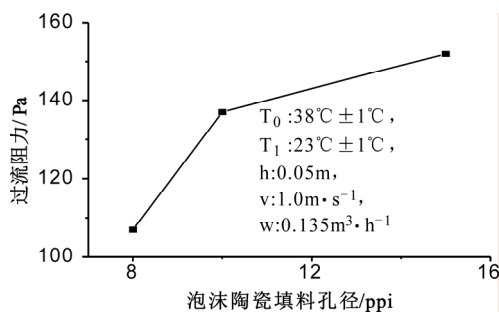


图 6 过流阻力随泡沫陶瓷孔径的变化

由图 6 所示的过流阻力曲线可以看出: 随泡沫陶瓷填料孔径的减小, 过流阻力增大。泡沫陶瓷填

料孔径由 8ppi 减小到 15ppi 后, 其过流阻力由 107Pa 增加到 152Pa。

由上可知: 泡沫陶瓷填料孔径减小, 换热效率增长较为缓慢, 但过流阻力增幅较大, 故泡沫陶瓷填料孔径不宜过小。

2.1.3 泡沫陶瓷填料孔径梯度对换热效率和过流阻力的影响

表 2 泡沫陶瓷孔径梯度对换热效率和过流阻力的影响

孔径梯度	进口空气		出口空气		换热效率 (%)	过流阻力 (Pa)
	干球温度/湿球温度 (°C)	干球温度/湿球温度 (°C)	干球温度/湿球温度 (°C)	干球温度/湿球温度 (°C)		
10ppi+10ppi+10ppi	38.3/23.3	27.0/23.4	38.3/23.3	27.0/23.4	74.8	137
8ppi+10ppi+15ppi	38.0/23.0	26.3/23.1	38.0/23.0	26.3/23.1	78.7	142

试验表明: 加大泡沫陶瓷填料的孔径梯度, 虽然过流阻力略有增加, 但是泡沫陶瓷填料的换热效率提高。

2.1.4 泡沫陶瓷材料表面预涂吸水性树脂涂层对换热效率的影响

在泡沫陶瓷填料厚度 h 为 50mm、孔径均为 10ppi、通过填料试件表面风速 v 为 1.0m/s、布水流量 w 为 0.135 m³/h 的条件下, 泡沫陶瓷材料表面预涂吸水性树脂涂层对蒸发冷却换热效率和过流阻力的影响如表 3 所列。

测试结果表明: 泡沫陶瓷材料表面预涂吸水性树脂涂层后, 可改善泡沫陶瓷填料的吸湿性和散水性, 使换热效率从 65.8% 提高到 68.0%, 但是过流阻力略有增加。

表 3 泡沫陶瓷填料表面预涂吸水性树脂涂层对换热效率和过流阻力的影响

填料表面条件	进口空气		出口空气		换热效率 (%)	过流阻力 (Pa)
	干球温度/湿球温度 (°C)	干球温度/湿球温度 (°C)	干球温度/湿球温度 (°C)	干球温度/湿球温度 (°C)		
无吸水性涂层	39.0/23.2	28.6/23.3	39.0/23.2	28.6/23.3	65.8	127
有吸水性涂层	38.1/23.1	27.9/23.2	38.1/23.1	27.9/23.2	68.0	130

2.2 空气及水对泡沫陶瓷填料换热效率和过流阻力的影响

2.2.1 空气流速对蒸发冷却换热效率和过流阻力的影响

在通过填料试件表面风速 v 为 1.0m/s、布水流量 w 为 0.135 m³/h 的条件下, 泡沫陶瓷填料孔径梯度对换热效率和过流阻力的影响如表 2 所列。泡沫陶瓷填料总厚度均为 60mm, 孔径梯度通过改变三块厚度均为 20mm 的叠加泡沫陶瓷的不同孔径而调整。

图 7 和图 8 示出了空气流速对蒸发冷却换热效率和过流阻力的影响。试验条件为: 泡沫陶瓷填料厚度 h 为 50mm、孔径为 10ppi、布水流量 w 为 0.135 m³/h。

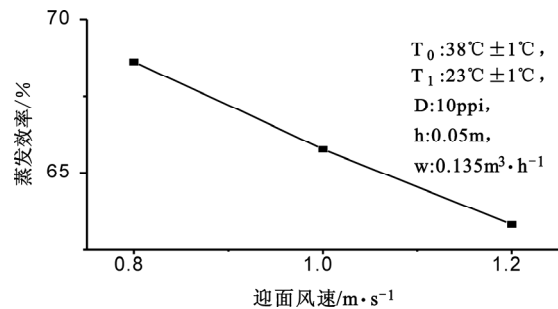


图 7 换热效率随风速的变化

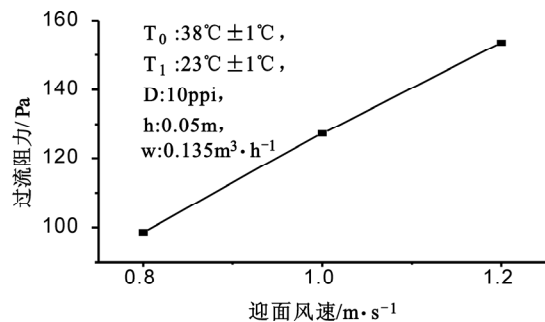


图 8 过流阻力随风速的变化

空气流速 v 愈大, 则蒸发冷却换热效率 E 愈小, 过流阻力愈大。空气流速的增大加强了空气的扰动, 可提高空气与水的换热效率, 但空气与水接触时间的缩短会减小换热效率, 而后者的作用要明显大于前者, 故随着空气流速的增大, 泡沫陶瓷填料换热效率呈下降趋势。

实验发现: 随着风速的增加, 水在填料内的分布均匀度降低。当风速大于 1.5m/s 后, 填料进风端几乎看不到水膜的存在, 即有少部分填料对换热没有贡献, 仅仅增加了空气的流动阻力, 还带来填料出风口空气带水问题。但是, 风速较小时, 为保证处理风量, 将会使填料断面尺寸过大。因此, 空气流速 v 应适中。

2.2.2 布水流量对蒸发冷却换热效率的影响

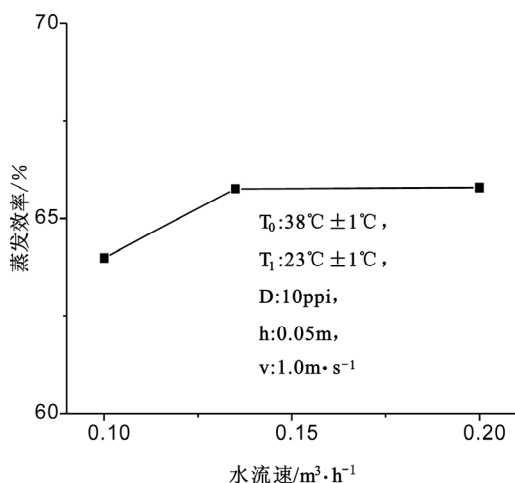


图 9 换热效率随布水流量的变化

图 9 示出了布水流量对蒸发冷却换热效率的影响。试验条件为: 泡沫陶瓷填料厚度 h 为 50mm、孔径为 10ppi、通过填料试件表面风速 v 为 1.0m/s。

由图 9 可以看出: 在布水流量较小的情况下, 换热效率 E 随布水流量 w 的增大而明显提高; 但布水流量增大到一定程度后, 换热效率趋于稳定。

在本实验中, 布水盘盘底均匀密布直径为 3 毫米的小园孔, 水在重力作用下自流到填料表面。前述图 4 已显示: 泡沫陶瓷填料表面布水后过流阻力增加 10Pa~35Pa, 表明泡沫陶瓷填料表面的三维连续骨架可以促进水膜形成。泡沫陶瓷填料表面的三维连续骨架还可有效延缓水的流动速度, 同时加强水流的横向扩散, 有利于水在填料内部的均匀分布, 从而使换热效率提高。在本实验条件下, 泡沫陶瓷填料表面润湿情况良好, 迎风侧和背风侧填料表面均形成水膜, 体现出良好的散水性能。

当布水流量较大时, 空气与水的接触面积和水膜厚度均增加。前者可提高换热效率, 但是后者对蒸发冷却效果的影响不明显。另外, 布水流量较大时其过流阻力增加很快, 冷空气出风流量降低, 不利于换热效率的提高。以上因素的综合作用结果

是: 当布水流量较大时, 泡沫陶瓷填料换热效率基本不变。因此, 对泡沫陶瓷材料而言, 布水流量也应适中, 本实验条件下宜取 0.10~0.15 m^3/h 。

2.2.3 进口空气温度对蒸发冷却换热效率的影响

在泡沫陶瓷填料厚度 h 为 50mm、孔径均为 10ppi、通过填料试件表面风速 v 为 1.0m/s、布水流量 w 为 0.135 m^3/h 、空气出口湿球温度 T_w 控制为 23°C \pm 1°C 的条件下, 进口空气干球温度对蒸发冷却换热效率的影响如图 10 所示。

由图可知: 蒸发冷却换热效率随进口空气干球温度的升高而下降。空气入口干球温度 T_0 提高, 在其它实验条件不变的情况下, 空气出口干球温度 T_1 也随之提高, 其差值 ($T_0 - T_1$) 变化不大; 但是进口空气干球温度 T_0 与空气出口的湿球温度 T_w 的差值 ($T_0 - T_w$) 随进口空气干球温度的升高而同步升高, 因此蒸发冷却换热效率降低。

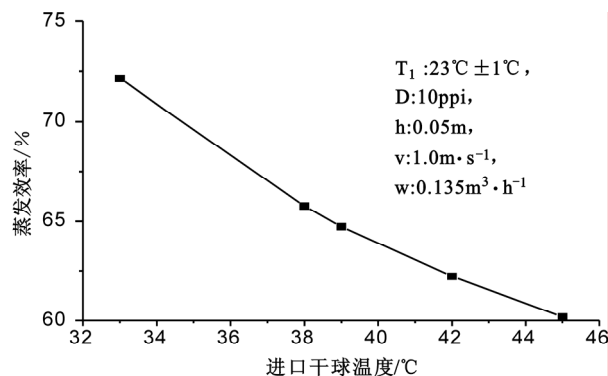


图 10 换热效率随进口空气干球温度的变化

2.2.4 布水方式对蒸发冷却换热效率和过流阻力的影响

在尺寸为 478mm (高) \times 50mm (厚) \times 500mm (长) 的泡沫陶瓷填料顶面贴放尺寸为 22mm (高) \times 50mm (厚) \times 500mm (长) 的疏水纸帘, 考察了疏水纸帘对泡沫陶瓷填料的散水能力的影响。实验条件为: 泡沫陶瓷填料孔径为 10ppi、通过填料试件表面风速 v 为 1.0m/s、布水流量 w 为 0.135 m^3/h 。

表 4 泡沫陶瓷填料布水方式对换热效率和过流阻力影响

布水方式	进口空气干球温度/湿球温度 (°C)	出口空气干球温度/湿球温度 (°C)	换热效率 (%)	过流阻力 (Pa)
直接布水	39.0/23.2	28.6/23.3	65.8	127
加疏水纸帘	37.9/23.2	30.0/23.2	67.4	136

由表 4 的测试结果可知: 在泡沫陶瓷填料上面

贴放疏水纸帘，可改善泡沫陶瓷填料的散水性能，换热效率比直接布水时有所提高，但是过流阻力也增大。

2.3 不同材质填料的蒸发冷却换热效率和过流阻力对比

国内外直接蒸发冷却式空调机目前常用纸质填料及金属填料。这两类填料结构上都设计了特殊的波纹角度，可以控制水与空气交叉流动的方向，从而可以提供水流与空气之间较大的接触面积以及较小的流动阻力。

表5列出了瑞典蒙特公司 CELdek5090 型纸质填料和我国天津某公司 BY-500Y 型金属填料的主要性能参数。

表5 典型纸质填料和金属填料的主要性能参数

填料种类	空隙率 (%)	比表面积 (m ² /m ³)	波纹夹角	波纹高度 (mm)
BY-500Y 金属填料	94	500	45°	6.3
CELdek5090 纸质填料	95	680	90°	7.0

我们以 CELdek5090 型纸质填料和 BY-500Y 型金属填料作为对比对象，对孔径为 10ppi 的泡沫陶瓷填料进行了对比测试。测试条件为：材料厚度均为 50mm、通过填料试件表面风速 v 为 1.0m/s、布水流量 w 为 0.135 m³/h、进口空气干球温度 T₀ 为 38℃ ± 1℃、进口空气的湿球温度 T_w 为 23℃ ± 1℃。对比测试结果如表 6 所列。

表6 不同种类填料的换热效率和过流阻力对比

填料种类	换热效率 (%)	过流阻力 (Pa)
泡沫陶瓷填料	65.8	127
BY-500Y 金属填料*	61.0	15
CELdek5090 纸质填料*	69.1	10

注：数据来源于天津某公司和蒙特公司相关产品手册

由表 6 可知：泡沫陶瓷填料的蒸发冷却换热效率接近 CELdek5090 型纸质填料，高于 CB-500Y

型金属填料；但是目前试制的泡沫陶瓷填料的过流阻力较大。增大泡沫陶瓷填料的孔径可解决过流阻力过大的问题。这是后续改进研究的主要内容。

3 结论

(1) 影响泡沫陶瓷填料直接蒸发冷却换热效率的主要因素有：填料厚度、进口空气温度、空气流速、填料孔径、填料表面是否预涂吸水涂层、布水均匀程度等。

(2) 泡沫陶瓷填料具有强度高、阻燃性和耐腐蚀性及防霉性好、使用寿命长等特点，其直接蒸发冷却换热效率接近纸质填料，高于金属填料，用作直接蒸发冷却换热填料是可行的，在直接蒸发冷却式水源热泵型空调领域有着广阔的应用前景。

参考文献：

- [1] 樊丽娟,黄翔,吴志湘,等.直接蒸发冷风机在西安地区应用的性能测试及方案改进[J].制冷与空调,2008,22(3): 69-72.
- [2] 辛军哲,何淦明,周孝清.室外气象条件对直接蒸发冷却式空调机使用功效的影响[J].流体机械,2007,(10): 79-81.
- [3] M Feddaoui, A Mir, E Belahrnidi. Numerical simulation of mixed convection heat and mass transfer with liquid film cooling along an insulated vertical channel[J]. Heat and Mass Transfer,2003,(39):445-453.
- [4] V M Sobin, G V Dashkov. Heat and mass transfer under cooling of flowing water sheets by an aircounter flow[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2005, 78(4):651-661.
- [5] 秦继恒,刘忠宝,王志敏,等.一种新型直接蒸发冷却空调机的性能测试[J].制冷与空调,2007,(7): 69-72,104.
- [6] 由世俊,华君,涂光备.金属填料表面热质传递实验研究[J].制冷学报,2000,(4): 35-39.
- [7] 张庆民,陈沛霖.空气经过淋水纸质填料时的热湿交换过程[J].同济大学学报,1995,(12): 648-653.