



小型蒸汽压缩式制冷装置的研制及实验研究

钟晓晖^{①*}, 吴玉庭^②, 马重芳^②

① 河北理工大学冶金与能源学院, 唐山 063009;

② 北京工业大学环境与能源工程学院, 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100022

* E-mail: zhong_xiaohui@163.com

收稿日期: 2006-06-28; 接受日期: 2007-01-29

国家重点基础研究发展计划资助项目(编号: G2000026304)

摘要 研制了一台小型蒸汽压缩式制冷装置的样机, 该装置可用于大量的微气候控制应用中, 包括个人便携式制冷和分布式空调等. 制冷装置尺寸: 260 mm×250 mm×120 mm, 重 2.85 kg. 对装置的匹配及运行特性进行了实验研究, 得到了与压缩机相匹配的电机和传动比以及装置的最佳毛细管尺寸和最佳充注量. 实验结果表明, 在 40℃ 环境下该装置可以产生 300 W 的制冷量, COP_c (装置制冷性能系数)可以达到 2.0 以上.

关键词

蒸汽压缩制冷
三角转子压缩机
微型化
制冷量

在大量微气候控制应用中, 人们必须穿着防护服, 而防护服严重阻碍了身体热量的散发. 如暴露于危险物质中的工作人员、身着防爆服的警察、核战场的军事人员、钢铁厂的炉工、消防员等. 在炎热环境中从事高强度劳动的工作人员容易受到热应激, 特别是身穿防护服时, 炎热的环境会使工作效率大大降低, 所以应该对这些工作人员进行冷却. 然而很多国家和地区还停留在采用被动式冷却阶段, 如含有冰的背心, 它的效率和适用性差, 一直很难推广. 当前, 一些研究机构已经开展了主动式小型制冷装置的研制工作, 如美国的Natick单兵中心、Aspen公司、Foster-miller公司、PNNL国家实验室等^[1~4], 但他们都处于样机研制阶段, 装置的性能和质量还不够理想.

蒸汽压缩式制冷有质量流量低、冷凝温度低及COP高等优点^[5], 本文首先介绍小型蒸汽压缩式制冷装置的研制, 包括微型三角转子压缩机、平行流式空冷冷凝器以及微型螺旋管蒸发器等主要部件的研制, 另外, 对该制冷装置的匹配性能和运行特性进行了实验研究.

1 实验台简介

进行制冷装置实验时，将制冷装置放入人工环境柜中，用来模拟恶劣环境下的高温。图 1 为环境试验箱的实物照片，图 2 为实验系统示意图。



图 1 环境试验箱照片

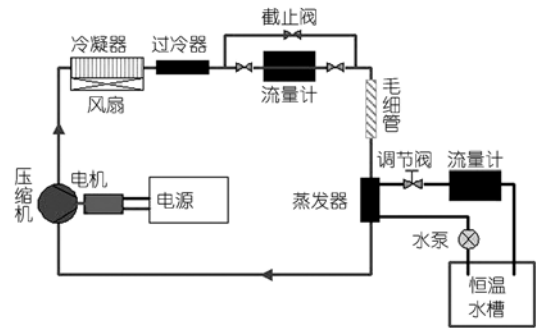


图 2 实验系统示意图

根据作用的不同，实验台主要分 4 个部分，小型制冷装置、水循环系统、环境试验箱和数
据测量与采集系统。

小型制冷装置是本文的研究对象，主要包括智能型直流稳压电源、无刷直流电机、压缩机、
冷凝器、毛细管、蒸发器、风扇等。直流稳压电源提供装置所需的动力，直流电机与压缩机通
过联轴器相连带动压缩机运转。

水循环系统主要包括恒温水槽、水泵、调节阀等。恒温水槽可以调节蒸发器进口水温，调
节阀用来调节水的流量。

环境试验箱的目的是为小型制冷装置提供一个所需要的外部运行环境，用来模拟环境温
度，温度控制精度为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

数据测量与采集系统的目的是全面测试小型制冷装置在不同工况下的各项性能参数，主
要包括压力、温度、流量、转速、功率等传感器以及各种显示仪表和数据采集系统。

2 小型蒸汽压缩式制冷装置的研制

2.1 微型三角压缩机的研制

微型压缩机，作为小型制冷装置的核心部件，其设计优化有着至关重要的意义。小型制
冷装置的首要目标是质量轻，而三角转子压缩机具有结构简单、效率高、寿命长、振动小、噪音
低、体小量轻及适合高速运转等优点^[6]，所以适合微型压缩机的开发。

微型压缩机比常规压缩机的质量、体积要小很多，这相应地增大了加工难度。常规压缩
机设有排气阀，排气阀靠弹性柱体的变形使阀开启或关闭，气缸内气体压力高于排气压力时，气
缸内气体压力作用于弹性柱体，使其变形，柱面脱开排气孔口，气体排入排气管内。

微型三角转子压缩机的排气阀尺寸很小，不仅加工困难，而且弹性柱体的压力很难控制，
本文根据微型三角转子压缩机排气阀尺寸小、难以加工的特点，进行了无排气阀微型三角转子

压缩机的优化设计, 通过三角转子的轮廓线控制压缩机的进、排气. 微型三角转子压缩机进排气口位置如图 3 所示.

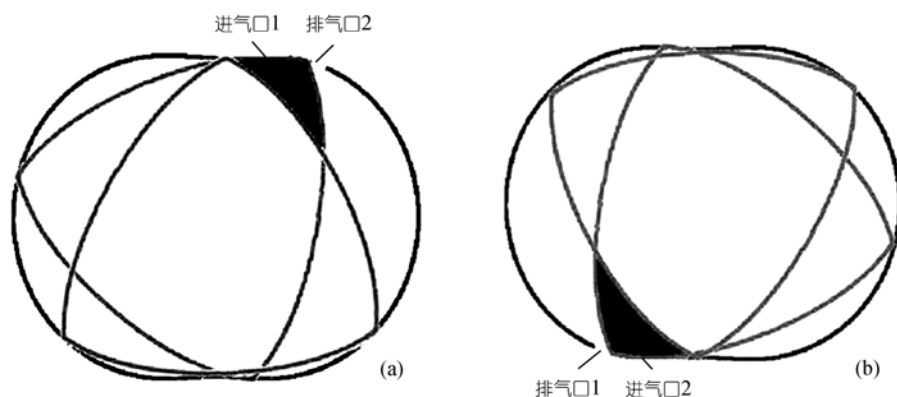


图 3 三角转子压缩机进排气口位置

(a) 进气口 1 及排气口 2; (b) 进气口 2 及排气口 1

根据设计, 利用微细电火花加工技术制造出了压缩机的各个零部件, 并装配出微型三角转子压缩机的样机(图 4), 该压缩机采用铸铁和铝合金制造, 直径为 0.05 m, 高 0.07 m. 质量只有 0.4 kg. 压缩机为半封闭式的, 通过弹性联轴器与直流无刷电机相联, 可以变转速运行. 压缩机的冷却方式为风冷, 气缸和端盖用空气冷却, 三角转子采用润滑油进行冷却.

2.2 平行流式空冷冷凝器的研制及对比实验

空冷冷凝器的热阻主要在空气侧, 因此选用空气侧换热性能良好且表面紧凑化程度高的平行流式冷凝器, 其结构先进, 换热系数高, 材料消耗低, 外形尺寸小, 是技术上较成熟的一种产品^[2]. 图 5 为本文所研制的多元平行流冷凝器, 该冷凝器的质量只有 0.42 kg, 为了进行评价, 在风洞实验台上用水代替制冷剂进行了平行流空冷冷凝器和翅片管冷凝器的对比换热实验, 实验条件为: 进水温度 35℃, 进风温度 19℃. 由于空冷冷凝器换热热阻主要在空气侧, 所以用水来做替代实验具有一定的可行性. 在同样的实验条件下, 平行流冷凝器的换热量可达 400 W 左右, 而质量为 1.7 kg 的翅片管式换热器换热量只有 300 W(见图 6), 图 7 为冷凝器空气



图 4 微型三角转子压缩机

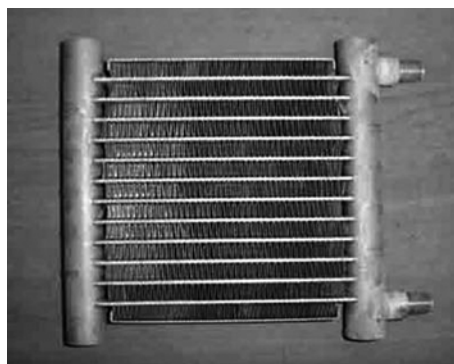


图 5 平行流式冷凝器

侧换热系数随风速变化曲线. 对比实验证明, 平行流冷凝器具有较好的轻量化性能, 适合小型制冷装置的开发.

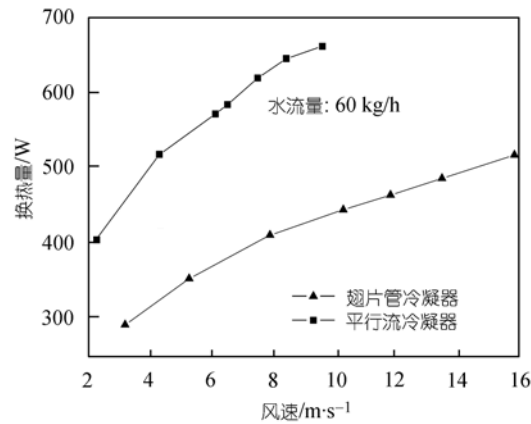


图6 冷凝器换热量随风速变化曲线

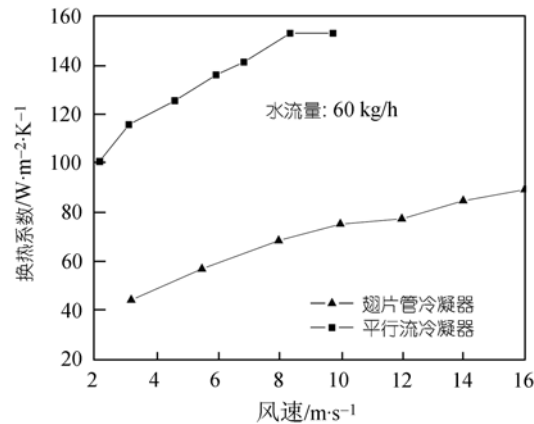


图7 冷凝器空气侧换热系数随风速变化曲线

2.3 微型蒸发器的研制及对比实验

小型制冷装置采用微型螺旋管式蒸发器(图8), 其质量只有 0.16 kg, 通过流动表面的粗糙处理及内部加扭转带来强化传热. 为了进行评价, 另外还设计两种其他形式的蒸发器: 管带式 和套管式, 它们的质量分别为 0.12 和 0.22 kg, 在相同的工况下对这三种蒸发器进行对比实验, 实验条件为: 进水温度 21.6℃, 水流量 45 kg/h, 制冷剂为 R22, 蒸发温度 5℃, 流量 $G=2$ g/s, 蒸发压力 0.58 MPa. 结果如图9所示, 螺旋管式蒸发器的制冷量可以达到 300 W, 管带式蒸发器的制冷量为 260 W, 而套管式蒸发器的制冷量只有 200 W 左右, 管带式质量最小, 但考虑到管带式为铝质, 与装置接入较难, 故而选用螺旋管式.

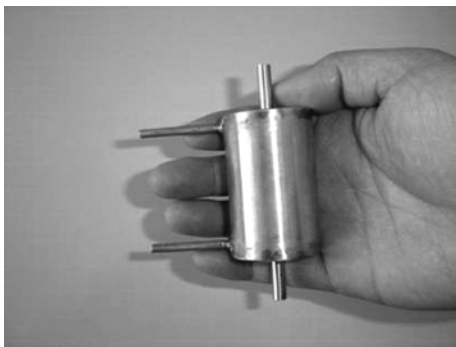


图8 微型螺旋管蒸发器

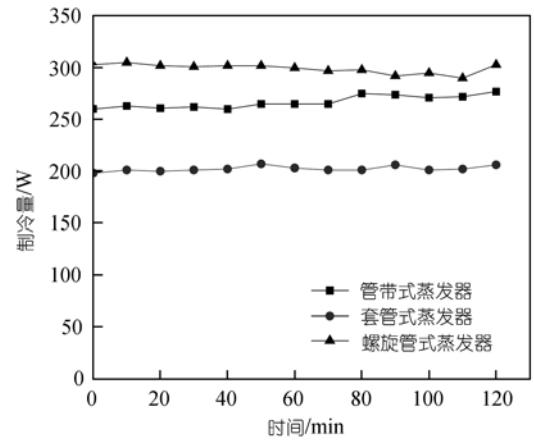


图9 蒸发器制冷量对比实验

环境温度: 40℃; 冷凝器迎面风速: 3 m/s; 蒸发器进水温度: 21.6℃; 压缩机转速: 1650 r/min; 水流量: 45 kg/h

2.4 小型制冷装置装配

小型制冷装置由微型电机、微型三角转子压缩机、平行流式冷凝器、毛细管、微型螺旋管式蒸发器、干燥过滤器、风扇、水泵、水箱等组成, 压缩机通过弹性联轴器与微型电机相联, 风扇、水泵以及电机均是由高能锂离子聚合物电池驱动的, 电池重 2 kg, 容量为 300 Wh, 可以持续运行 2 h. 冷凝器的热量通过风扇向外排出, 蒸发器产生的冷量通过水泵向外输出, 为防止水路循环中气泡产生, 在水路循环中加设了一个水箱, 可以及时为水路补水.



图 10 小型蒸汽压缩式制冷装置样机

图 10 为装配好的小型蒸汽压缩式制冷装置的样机——工大微冷 I 型, 该装置大小为 265 mm×250 mm×120 mm, 加上电池, 总质量约 4 kg.

3 小型制冷装置匹配及运行特性实验

3.1 压缩机与动力系统的匹配

本文所研制的压缩机为半封闭式, 需要与之相匹配的动力系统. 考虑到小型制冷装置轻量化的要求, 动力系统选用直流无刷电机, 电机与压缩机的优化匹配问题是制冷装置的关键技术之一. 电机与压缩机的匹配方法: 首先根据压缩机额定工况下的轴功率需求, 选择标定功率基本相等或稍大些的电机, 然后根据压缩机与电机各自额定工况下的转速确定合适的传动比.

在测定压缩机的轴功率时, 选用一个标定功率较大的直流电机带动压缩机运转, 用直流电参数测量仪测定电机的输入功率, 再根据电机的工作特性曲线就可以得出压缩机的轴功率, 选用 R22 作制冷剂, 在环境温度为 40℃ 时, 对压缩机的轴功率进行了测试, 图 11 为不同充注量下压缩机轴功率随转速的变化曲线.

另外, 对不同充注量下装置制冷量随转速的变化进行了测试, 测试条件为: 蒸发器进水温度 21.6℃, 水流量 45 kg/h, 根据装置制冷量随转速的变化曲线(图 12), 可以得出一定制冷量输出时压缩机的额定转速和轴功率. 本文设计的制冷装置的制冷量为 300 W, 因此, 压缩机的额定转速为 1650 r/min, 轴功率为 95 W. 电机选用的 GS B36-40 电机, 该电机质量只有 0.15 kg, 额定功率为 120 W, 额定转速为 23000 r/min, 考虑联轴器的传动损失, 电机的额定功率比压缩机的轴功率大 10%, 可以满足微型压缩机的需求, 另外, 根据压缩机的额定转速, 为电机配备传动比为 14:1 的减速箱.

3.2 制冷剂充注量和毛细管长度的匹配

毛细管尺寸和制冷剂充注量对制冷装置的性能有很大影响, 小型制冷装置选用内径为 0.64 mm 的毛细管, 图 13 为毛细管长度和充注量对装置制冷量的影响, 图 14 为毛细管长度和

充注量对装置制冷性能系数(COP_c)的影响. 装置制冷性能系数由以下公式计算:

$$COP_c = \frac{Q_0}{W}, \tag{1}$$

式中 Q_0 为装置的制冷量, W 为制冷装置的输入功率, $W = W_{\text{motor}} + W_{\text{fan}} + W_{\text{pump}}$. W_{motor} 为电机的输入功率, W_{fan} 为风扇的输入功率, W_{pump} 为水泵的输入功率.

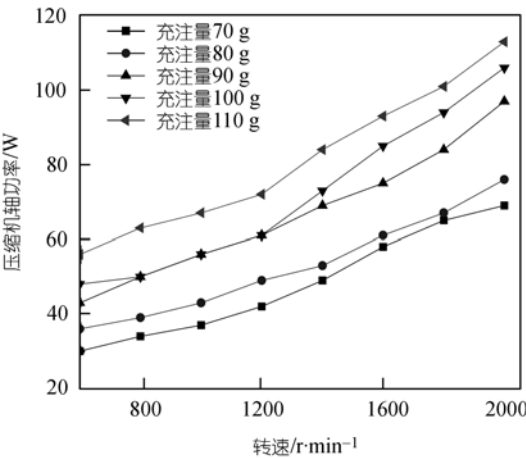


图 11 压缩机轴功率随转速变化曲线

环境温度: 40℃; 蒸发器进水温度: 21.6℃; 冷凝器迎面风速: 3 m/s; 水流量: 45 kg/h

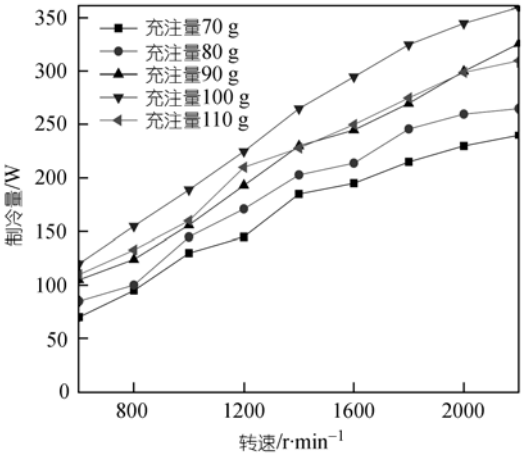


图 12 装置制冷量随转速变化曲线

环境温度: 40℃; 蒸发器进水温度: 21.6℃; 冷凝器迎面风速: 3 m/s; 水流量: 45 kg/h

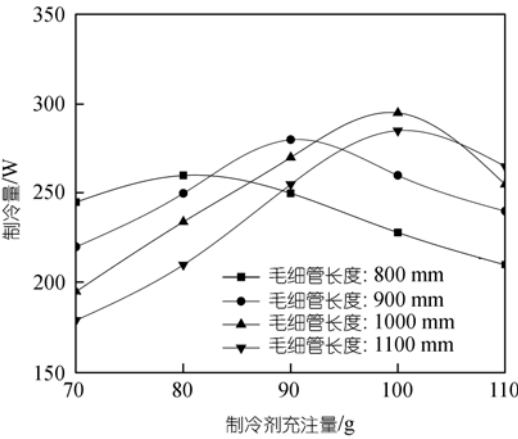


图 13 制冷量随毛细管长度和充注量的变化曲线

环境温度: 40℃; 冷凝器迎面风速: 3 m/s; 蒸发器进水温度: 21.6℃; 水流量: 45 kg/h; 压缩机转速: 1650 r/min

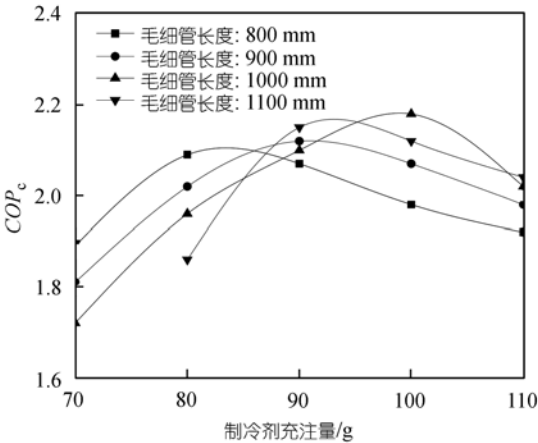


图 14 COP_c 随毛细管长度和充注量的变化曲线

环境温度: 40℃; 冷凝器迎面风速: 3 m/s; 蒸发器进水温度: 21.6℃; 水流量: 45 kg/h; 压缩机转速: 1650 r/min

可见, 随着毛细管的增加, 制冷量增加, 但增加到一定程度制冷量开始下降. 这是因为毛细管的加长, 意味着流量减少. 对于一个固定的制冷装置, 制冷剂的总量是一定的, 流量的减

少必然导致制冷量的降低. 从实验结果我们可以得出小型制冷装置的最佳毛细管尺寸为内径 0.64 mm, 长度 1000 mm.

3.3 小型制冷装置的运行特性实验

3.3.1 转速对装置性能的影响

图 15 给出了装置制冷量随压缩机转速的变化. 可以看出, 制冷量随转速增加基本上呈线性增长, 这是因为三角转子压缩机的余隙容积很小, 且余隙膨胀对气体的吸入量影响不大, 压缩机输气量随转速增加也基本上呈线性增长.

图 16 给出了 COP_c 随转速的变化, COP_c 的计算方法采用公式(1). 可以看出, 随着压缩机转速的增加, COP_c 一开始随之增加, 当达到某一峰值时, 便呈现下降趋势, 这是因为输入功率基本上与转速成正比(图 17), 转速越大, 装置所需要的功率越大; 而一开始随着转速的增加, 制冷剂的流量增大, 制冷量增大, 但当制冷剂流量增大到一定值后将超过装置的最佳运行工况, 制冷量的增加趋于平缓, 所以形成 COP_c 呈下降的趋势.

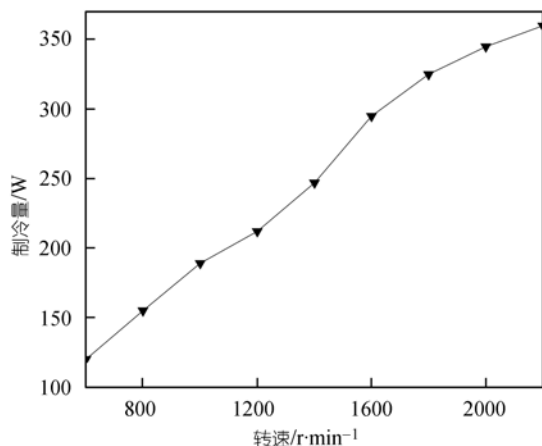


图 15 制冷量随转速变化曲线

环境温度: 40℃; 冷凝器迎面风速: 3 m/s; 蒸发器进水温度: 21.6℃; 水流量: 45 kg/h

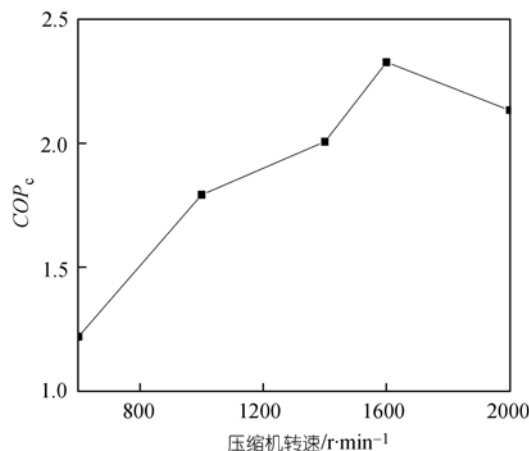


图 16 COP_c 随转速变化曲线

环境温度: 40℃; 蒸发器进水温度: 21.6℃; 水流量: 45 kg/h

3.3.2 温度对装置性能的影响

图 18 为制冷量与环境温度及蒸发器出水温度的关系, 可以看出, 在同样的环境温度下, 制冷量随蒸发器出水温度的上升而增大; 而在蒸发器出水温度不变时, 制冷量随环境温度的上升而减小的趋势非常明显.

图 19 和 20 分别为输入功率、 COP_c 与环境温度及蒸发器出水温度的关系, 在蒸发器出水温度不变的情形下, 随着环境温度的上升, 输入功率上升, 制冷性能系数下降; 而在环境温度不变、蒸发器出水温度上升时, 输入功率缓慢增大, 增长的幅度约为 2%, 但同时制冷量的增幅会超过 10%, 所以制冷性能系数在逐渐增加. 当环境温度为 40℃, 蒸发器出水温度为 16℃时, 制冷量可以达到 300 W, 制冷性能系数达到 2.0 以上.

通过对装置的噪声测试, 运行时的噪声级约 65 dB, 有些偏大, 这与压缩机的驱动方式有关, 且装置没有采取降噪措施, 经过降噪处理以后可望降低到一个较低的标准。

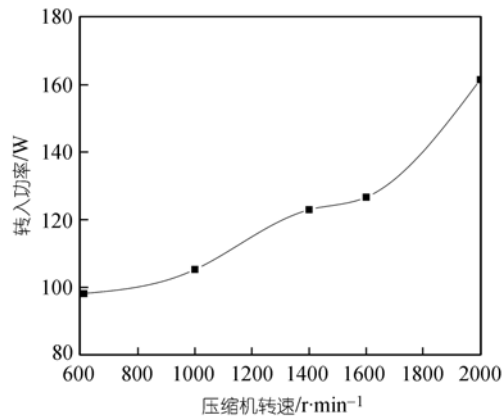


图 17 输入功率随转速变化曲线

环境温度: 40℃; 冷凝器迎面风速: 3 m/s; 蒸发器进水温度: 21.6℃; 水流量: 45 kg/h

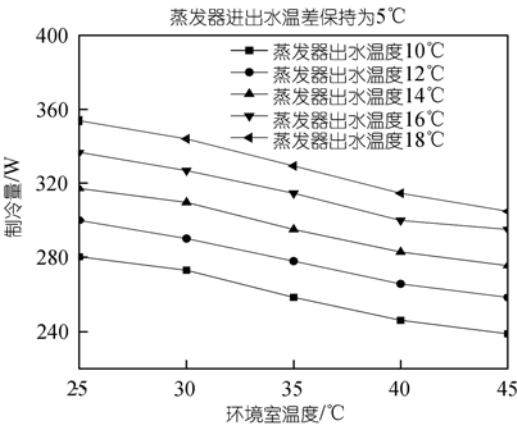


图 18 制冷量随环境温度及蒸发器出水温度变化曲线

压缩机转速: 1650 r/min; 冷凝器迎面风速: 3 m/s; 水流量: 45 kg/h

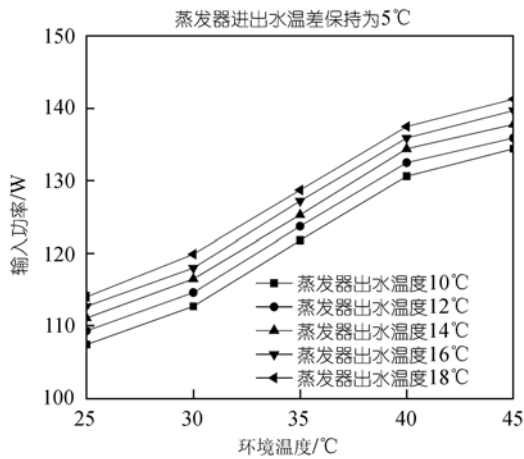


图 19 输入功率随环境温度及蒸发器出水温度变化曲线

压缩机转速: 1650 r/min 冷凝器迎面风速: 3 m/s; 水流量: 45 kg/h

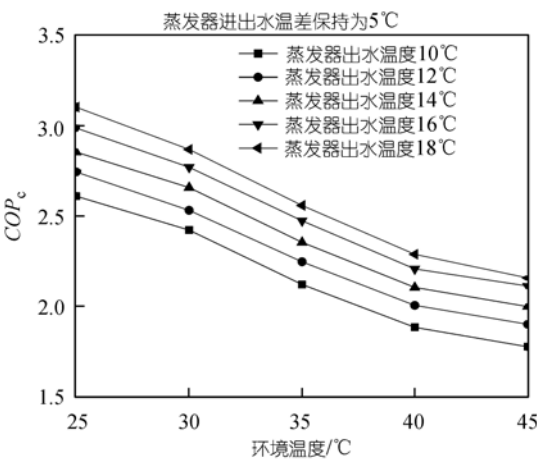


图 20 COP_c 随环境温度及蒸发器出水温度变化曲线

压缩机转速: 1650 r/min; 冷凝器迎面风速: 3 m/s; 水流量: 45 kg/h

4 结论

本文介绍了小型蒸汽压缩式制冷装置的研制, 包括微型三角转子压缩机、平行流式空冷冷凝器以及微型螺旋管蒸发器的研制等。制冷装置尺寸: 260 mm×250 mm×120 mm, 质量 2.85 kg, 通过微结构所引起的强化传热来缩小制冷装置的质量和体积。对装置的匹配及运行特性进行

了实验研究,并得出以下结论.

(i) 根据压缩机的轴功率及制冷量与转速的关系,确定了与压缩机相匹配的直流电机及传动比.

(ii) 在设计工况下,小型制冷装置的最佳毛细管尺寸: 内径 0.64 mm, 长度 1000 mm, 装置最佳充注量为 100 g.

(iii) 在 40℃ 环境下,压缩机转速为 1650 r/min 时,装置的制冷量可以达到 300 W 左右, COP_c 可以达到 2.0 以上.

参考文献

- 1 Drost M K, Friedrich M. Miniature refrigeration systems for portable and distributed space conditioning applications. AIChE 1997 Spring Nat Meet, 1997. 1271—1274
- 2 Wegeng R S, Drost M K, Brenchley D L. Processintensification through miniaturization or micro thermal and chemical systems in the 21st century. In: 3rd International Conference on Microreaction Technology. Berlin: Springer-Verlag, 2000. 2—13
- 3 Drost M K, Friedrich M, Martin C, et al. Mesoscopic heat-actuated refrigeration system development. ASME IMECE, 1999. 9—14
- 4 Drost M K, Friedrich M, Martin C, et al. Recent developments in microtechnology-based chemical refrigeration systems. In: 3rd International Conference on Microreaction Technology. Berlin: Springer-Verlag, 2000. 394—401
- 5 Peeples J W. Vapor compression cooling for high performance applications. Electron Cooling, 2001, 7(3): 16—24
- 6 马国远, 李红旗. 旋转压缩机. 北京: 机械工业出版社, 2003. 1—3
- 7 Wu X M, Webb R L. Thermal and hydraulic analysis of a brazed aluminum evaporator. Appl Therm Eng, 2002, 2(22): 1369—1390 [DOI](#)