

文章编号: 0253-4339(2011)06-0025-06

DOI编码: 10.3969/j.issn.0253-4339.2011.06.025

## 吸气过热度对滚动转子压缩机性能影响的实验研究

陶宏 杨军 刘春慧 叶柯嘉 胡长更

(上海日立电器有限公司技术中心 上海 201206)

**摘要** 通过第二制冷剂量热器法压缩机性能测试台,研究了吸气过热度(包括负过热度)对滚动转子压缩机(使用R22)质量流量和输入功率等性能的影响。结果表明:在一定吸气压力和排气压力下,当正吸气过热度时,滚动转子压缩机质量流量只需修正吸气密度变化的影响即可;而当负吸气过热度(吸气带液)时,还应修正容积效率减小的影响。同时,滚动转子压缩机的输入功率几乎不随吸气过热度变化。实验为滚动转子压缩机10系数多项式性能模型的吸气过热度修正提供了有价值的参考。

**关键词** 热工学;滚动转子压缩机性能;实验研究;吸气过热度

**中图分类号**: TB652; TH45

**文献标识码**: A

## Experimental Investigations on Effect of Suction Gas Superheat on Rotary Compressor Performances

Tao Hong Yang Jun Liu Chunhui Ye Kejia Hu Changgeng

(R&D Center, SHEC, Shanghai, 201206, China)

**Abstract** In order to shed light on how degree of suction gas superheat affects rotary compressor(R22) performances, elaborate experiments were conducted by means of secondary fluid calorimeter test. The results show that, while both of suction and discharge pressures are fixed, mass flowrate can be corrected only by suction gas density when the degree of suction gas superheat is positive, whereas the volume efficiency decline should also be taken into account when the degree of suction gas superheat is negative; and the input power has nothing to do with the degree of suction gas superheat. The above conclusions will help to amend the degree of suction gas superheat in 10-coefficients performance model of rotary compressor.

**Keywords** Pyrology; Rotary compressor performance; Experimental investigation; Suction gas superheat

滚动转子压缩机是目前最常见的一种房间空调器用压缩机,其在定吸气过热度情况下的变工况性能通常采用图、表法或AHRI540<sup>[1]</sup>建议的10系数多项式模型来表示,即:

$$X_{11} = C_1 + C_2 T_c + C_3 T_c^2 + C_4 T_c^3 + C_5 T_c^4 + C_6 T_c^5 + C_7 T_c^6 + C_8 T_c^7 + C_9 T_c^8 + C_{10} T_c^9 \quad (1)$$

式中,  $X_{11}$ 表示吸气过热度11.1K时压缩机的质量流量 $W$ 、输入功率 $P$ 等性能参数;  $T_c$ —排气压力对应的饱和温度或露点温度,  $T_s$ —吸气压力对应的饱和温度或露点温度。

一般,基于压缩机变工况性能的图、表或10系数多项式模型基本上可以通过作图法初步计算制冷系统运行状态<sup>[2]</sup>;为了更加准确地计算机模拟制冷循环,需要吸气过热度修正的压缩机性能模型。AHRI540虽然建议了空调用压缩机吸气过热度修正范围(8.3K~16.7K),可是并没有提供具体的修正方

法。因此,在压缩机性能实验台上进行了吸气过热度对滚动转子压缩机性能影响的实验研究,特别是进行了负吸气过热度的实验研究来解决这个问题。

### 1 研究回顾

Dabiri和Rice<sup>[3]</sup>系统地提出一套压缩机性能模型变吸气过热度的修正方法,由压缩机质量流量计算式:

$$W = \eta_v \rho_s V_d \frac{n}{60} \quad (2)$$

假设在一定蒸发温度、冷凝温度下,压缩机的转速 $n$ 和容积效率 $\eta_v$ 近似不变,那么在某吸气过热度时压缩机质量流量 $W$ 与参考吸气过热度时压缩机质量流量 $W_{ref}$ 之间的关系式:

$$W = \frac{(\rho_s)}{(\rho_s)_{ref}} W_{ref} \quad (3)$$

由压缩机输入功率定义式:

$$P = (W\Delta h_s / \eta_c) \quad (4)$$

假设在一定蒸发温度、冷凝温度下, 压缩机的电效率 $\eta_c$ 基本不变, 那么在某吸气过热度时压缩机输入功率 $P$ 与参考吸气过热度时压缩机质量流量 $P_{ref}$ 之间的关系式:

$$P = \frac{(W\Delta h_s)}{(W\Delta h_s)_{ref}} P_{ref} \quad (5)$$

Dabiri和Rice<sup>[3]</sup>特别指出, 在负过热度区间仍然需要更多的实验数据来验证上述吸气过热度修正模型。

向献红<sup>[4]</sup>通过实验以吸气温度20℃为参考点修正了不同吸气温度时开启式活塞压缩机性能。

苏顺玉<sup>[5]</sup>通过实验以吸气过热度11.1K为参考点修正了不同吸气过热度时涡旋压缩机性能。

与活塞压缩机、涡旋压缩机一般采用低背压型式不同, 滚动转子压缩机通常采用高背压型式(如图1右所示), 一般自带吸气储液器(气液分离器); AHR1540提供的吸气过热度范围(8.3K~16.7K)并不能完全覆盖滚动转子压缩机的实际运行工况。陶宏<sup>[6]</sup>实验研究了变制冷剂流量制冷

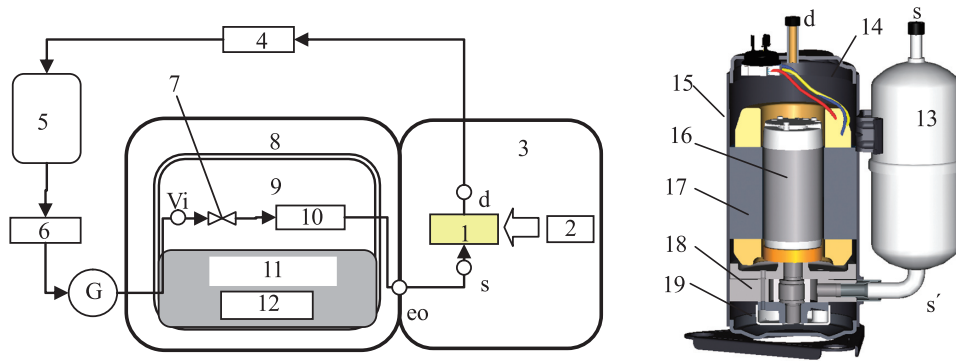
循环在“0吸气过热度”附近的性能, 韩磊<sup>[7]</sup>实验研究了回气带液(负吸气过热度)对滚动转子压缩制冷系统性能的影响, 源生一太郎<sup>[8]</sup>定性阐述了吸气过热度(包括负过热度)对压缩机质量流量、容积效率、排气温度等性能的影响。

## 2 滚动转子压缩机性能实验系统

### 2.1 实验方法

实验采用GB/T5773—2004<sup>[9]</sup>中定义的第二制冷剂量热器法(如图1左所示), 第二制冷剂量热器是一个隔热的密闭压力容器, 充注有第二制冷剂, 下部是液相区, 电加热器浸没其中, 上部是气相区, 悬置一个蒸发器; 第二制冷剂被电加热器加热沸腾蒸发为气体上升到气相区, 在蒸发器表面又被冷凝为液体滴落回下部液相区。为了使量热器的漏热损失最小, 调节量热器室温度等于量热器内第二制冷剂温度。

排气压力、吸气压力、阀前温度、吸气温度(吸气过热度大于5K)按照图2调节; 吸气过热度小于5K时, 手工设定电加热器的功率, 吸气温度(或干度)自动平衡; 其中主要参数测量仪表参见表1。压缩机室温度可调节, 同时有一风扇对着压缩机吹风。



1 压缩机 2 风扇 3 压缩机室 4 冷凝器 5 高压储液器 6 过冷器 7 电子膨胀阀 8 量热器室 9 量热器 10 蒸发器  
11 第二制冷剂 12 电加热器 13 吸气储液器 14 腔体 15 壳体 16 转子 17 定子 18 泵体 19 油池  
Vi 阀前 eo 量热器出口 s 压缩机吸气口 s' 泵体吸气口 d 压缩机排气口 G 质量流量计

图1 压缩机性能实验装置原理图

Fig.1 Compressor performance test installation schematic diagram

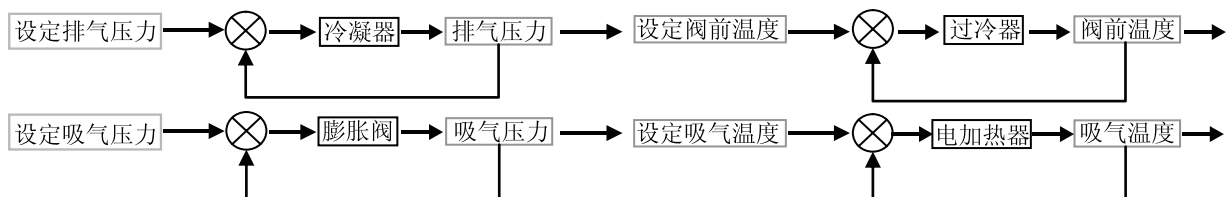


图2 压缩机性能实验装置主要调节回路框图

Fig.2 Key regulation loops block diagram of compressor performance test installation

表1 主要测量仪表  
Tab.1 List of principal measuring instruments

| 型号       | 厂商品牌           | 量程                                                                                                                                                                         | 精度          |
|----------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 温度传感器    | R040-32/Pt100  | CHINO<br>$T_d=50\sim150\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_{vi}=33\sim63\text{ }^\circ\text{C}$<br>$T_{eo}=10\sim42\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_s=10\sim42\text{ }^\circ\text{C}$ | 0.2%        |
| 压力传感器    | FP101A-Z21-L20 | 横河电机<br>$p_d=1.10\sim3.00\text{ MPa}$<br>$p_s=0.164\sim1.192\text{ MPa}$                                                                                                   | 0.25%       |
| 质量流量计    | CMF025         | MicroMotion                                                                                                                                                                | 0~300kg/h   |
| 功率计(量热计) | WT130          | YOCOGAWA                                                                                                                                                                   | 1000~10000W |
| 功率计(压缩机) | WT2030         | YOCOGAWA                                                                                                                                                                   | 500~5000W   |
|          |                |                                                                                                                                                                            | 0.1%        |

eo-s连管采用保温棉隔热, 几乎无漏热, 那么吸气口比焓近似等于量热器出口比焓。

为了消除压缩机自带吸气储液器漏热对压缩机性能的影响, 设定压缩机室温度等于吸气温度 $T_s$ , 吸气储液器几乎无漏热 $\Phi_{acc} \approx 0$ 。

$$Wh_s + \Phi_{acc} = Wh_s' \quad (6)$$

$$\Phi_{acc} = (KF)_{acc} (T_{amb} - T_{acc}) \quad (7)$$

由公式(6)和(7)得

$$h_s' \approx h_s \quad (8)$$

质量流量计在过冷段直接测量制冷剂的质量流量 $W$ ; 另外, 也可以通过量热器法间接测量制冷剂的质量流量 $W'$ , 即:

$$\Phi_e = W'(h_{eo} - h_{vi}) \quad (9)$$

$$W' = \frac{\Phi_e}{h_{eo} - h_{vi}} \quad (10)$$

式中的 $\Phi_e$ 等于直接测量的电加热功率 $\Phi_H$ 和量热器漏热量 $\Phi_{loss}$ 的代数和,

$$\Phi_e = \Phi_H + \Phi_{loss} \quad (11)$$

式中, 量热器漏热量 $\Phi_{loss}$ 根据量热器室与量热器内部的温差大小修正<sup>[9]</sup>。

阀前的比焓 $h_{vi}$ 通过阀前的压力 $p_{vi}$ 和温度 $T_{vi}$ 计算; 当量热器出口制冷剂为过热蒸汽时, 通过当地压力 $p_{eo}$ 和温度 $T_{eo}$ 可计算当地比焓 $h_{eo}$ 。

当主辅侧测量偏差 $\frac{|W' - W|}{(W' + W)/2} < 1\%$ 时, 说明制冷剂质量流量的测量是准确的。

压缩机在一定吸气压力 $p_s$ 、吸气温度 $T_s$ 、排气压力 $p_d$ 条件下, 某膨胀阀前温度 $T_{vi}$ 时的制冷量为:

$$\Phi_0 = \frac{h_s - h_{vi}}{h_{eo} - h_{vi}} \Phi_e \quad (12)$$

其中包括从量热器出口eo到压缩机吸气口s之间连接管路的损失。

当量热器出口制冷剂为气液两相时, 当地压

力 $p_{eo}$ 和温度 $T_{eo}$ 不独立, 无法计算当地比焓 $h_{eo}$ ; 另外, 当量热器出口制冷剂过热度小于0.5K时, 由于压力传感器和温度传感器的测量误差, 也不能计算当地比焓 $T_{eo}$ ;  $W$ 和 $W'$ 之间差异很小, 即 $W=W'$ ,

$$h_{eo} = \frac{\Phi_e}{W} + h_{vi} \quad (13)$$

由 $h_s \approx h_{eo}$ 和当地压力 $p_s$ 可以计算压缩机吸气口s处的制冷剂状态,

$$x_s = x(p_s, h_s) \quad (14)$$

或

$$T_s = T(p_s, h_s) \quad (15)$$

那么, 吸气过热度定义为:

当吸气口过热时(正过热度),

$$\Delta T_{SH} = T_s - T_{sat}(p_s) \quad (16)$$

当吸气口两相时(负过热度),

$$\Delta T_{SH} = \frac{h_s - h(p_s, x=1)}{c_p(p_s, x=1)} \quad (17)$$

## 2.2 实验对象

海立(HIGHLY)压缩机SL211, 制冷剂R22, 冷冻油4GSI。

压缩机理论排量 $V_d=21.1\text{ mL}$ 。

## 2.3 实验工况

实验工况参照GB/T15765—2006<sup>[10]</sup>选定, 为了比较压缩机室环境温度对压缩机性能的影响, 一种工况设定压缩机室温度等于吸气温度 $T_s$ , 另一种工况设定压缩机室温度为35℃。

表2 测试工况  
Tab.2 Test operating conditions

| 工况号 | 排气压力 $p_d$<br>/MPa<br>/饱和(露点)<br>温度/℃ | 吸气压力 $p_s$<br>/MPa<br>/饱和(露点)<br>温度/℃ | 阀前温度<br>$T_{vi}$ /℃<br>/过冷度/K | 环境<br>温度<br>/℃ |
|-----|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------|
| 1   | 2.146/54.4                            | 0.625/7.2                             | 46.7/7.7                      | =吸气温度          |
| 2   | 2.146/54.4                            | 0.625/7.2                             | 46.7/7.7                      | 35             |

### 3 实验结果分析

#### 3.1 质量流量、容积效率、制冷量

如图3所示, 压缩机的质量流量随吸气过热度的增大而减小; 曲线2低于曲线1, 且在高吸气过热度区域, 曲线2距离曲线1较近, 而在低吸气过热度区域, 曲线2距离曲线1较远; 这是由于当压缩机室温度为35℃, 吸气储液器被加热, 泵体吸气口s吸气过热度高于吸气口s过热度, 温差越大吸气储液器被加热效果越强。如图3所示, 曲线2上A点质量流量比曲线1上低A-AU, 曲线2上B点质量流量比曲线1上低B-BU, 低吸气过热度时质量流量损失大于高吸气过热度时; 曲线2上A点实际吸气过热度相当于曲线1上AR点, 曲线2上B点实际吸气过热度相当于曲线1上BR点, 低吸气过热度时过热度变化大于高吸气过热度时。另外, 根据曲线1和曲线2实验数据, 通过公式(12)和(13)可以标定吸气储液器漏热系数 $KF_{acc}$ 。

在吸气过热度区间[-20K, 20K], 压缩机的质量流量与吸气过热度之间符合二次多项式拟合关系:

$$W = -0.0053(\Delta T_{SH})^2 - 0.2993(\Delta T_{SH}) + 82.269 \quad (18)$$

在正吸气过热度区间[0K, 20K], 压缩机的质量流量与吸气过热度之间符合线性拟合关系:

$$W = [1 - 0.005059(\Delta T_{SH} - 11.1)]W_{11.1} \quad (19)$$

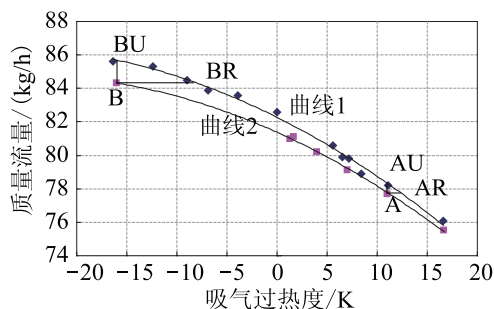


图3 质量流量随吸气过热度的变化  
Fig.3 Mass flowrate varie with degree of suction gas superheat

曲线1为压缩机室温度等于吸气温度时, 曲线2为压缩机室温度等于35℃;

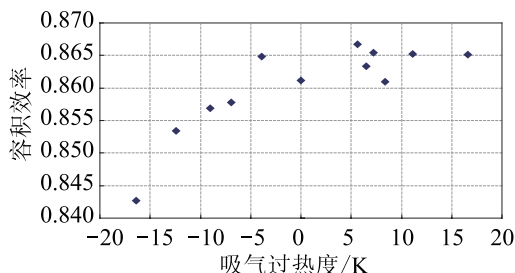


图4 容积效率随吸气过热度的变化  
Fig.4 Volume efficiency varies with degree of suction gas superheat

由实测压缩机转速 $n = (2855 \pm 5) \text{ r/min}$ 和实测质量流量, 按照公式(2)计算压缩机容积效率(图4), 可见, 正吸气过热度[0K, 20K]时, 压缩机容积效率处于0.86~0.87之间, 按照公式(3)估算质量流量误差小于1.25%; 但是负吸气过热度[-20K, 0K]时, 压缩机容积效率下降较快, 按照公式(3)估算质量流量误差将达到3%。

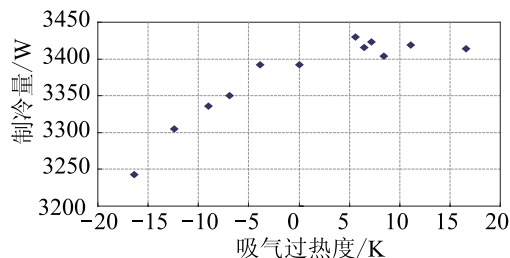


图5 制冷量随吸气过热度的变化  
Fig.5 Refrigerating capacity varies with degree of suction gas superheat

如图5所示压缩机制冷量等于质量流量与单位质量制冷量的乘积; 当过冷温度一定时, 吸气过热度增大, 单位质量制冷量增大; 但随着吸气过热度的增大压缩机吸气密度减小, 质量流量减小(如图3所示); 综合起来, 在负吸气过热度区间[-20K, 0K], 压缩机制冷量随着吸气过热度的增大而增大, 而在正吸气过热度区间[0K, 20K], 压缩机制冷量基本不变(如图5所示)。

#### 3.2 功耗、电效率

如图6所示, 压缩机的功耗随吸气过热度的变化幅度小于10W(1%), 考虑到功率测量的误差(参见表1), 认为压缩机的功耗基本不随吸气过热度的变化而变化。

按照公式(4)计算压缩机的电效率, 在正吸气过热度区间[0K, 20K], 压缩机电效率处于0.655~0.665之间, 按照公式(5)估算压缩机功耗误差小于2%; 在负吸气过热度区间[-20K, 0K], 压缩机电效率下降较快, 按照公式(5)估算压缩机功耗误差将达到6%。

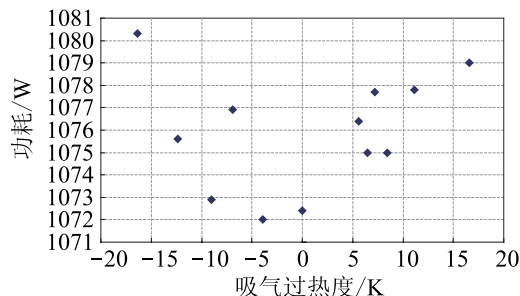


图6 功耗随吸气过热度的变化  
Fig.6 Input power varies with degree of suction gas superheat



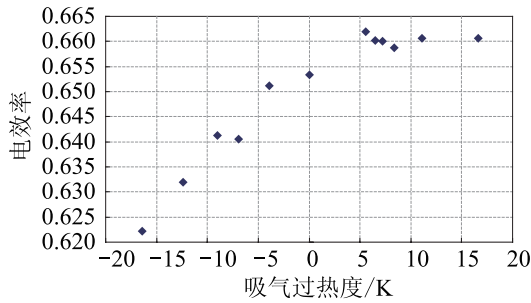


图7 电效率随吸气过热度的变化

Fig.7 Electrical efficiency varies with degree of suction gas superheat

### 3.3 排气温度

在吸气过热度区间 $[-20\text{K}, 20\text{K}]$ , 压缩机排气温度随吸气过热度近似线性变化。另外, 根据压缩机排气状态实验数据, 通过能量守恒方程

$$Wh_s + P - \Phi_{\text{comp}} = Wh_d \quad (20)$$

和

$$\Phi_{\text{comp}} = (KF)_{\text{comp}} (T_{\text{comp}} - T_{\text{amb}}) \quad (21)$$

可以标定压缩机壳体的传热系数 $KF_{\text{comp}}$ 。

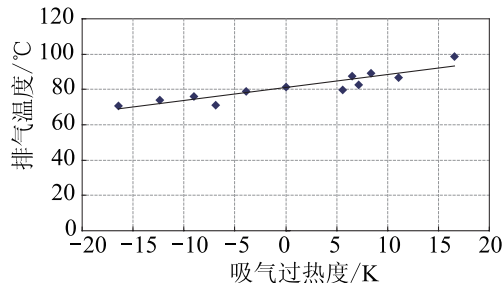


图8 排气温度随吸气过热度的变化

Fig.8 Discharge gas temperature varies with degree of suction gas superheat

## 4 结论

在一定吸气压力和排气压力下, 当正吸气过热度时, 滚动转子压缩机的转速 $n$ 和容积效率 $\eta_v$ 近似不变, 其质量流量在公式(1)的基础上按照公式(3)修正吸气密度变化的影响即可; 而当负吸气过热度(吸气带液)时, 滚动转子压缩机的容积效率 $\eta_v$ 有所减小, 还应修正容积效率 $\eta_v$ 减小的影响。

在一定吸气压力和排气压力下, 滚动转子压缩机的输入功率几乎不随吸气过热度变化, 按照公式(1)计算即可。

### 符号说明

| 符号  | 名称   | 单位   | 符号     | 名称      | 单位                |
|-----|------|------|--------|---------|-------------------|
| $W$ | 质量流量 | kg/s | $h$    | 比焓      | J/kg              |
| $P$ | 功耗   | W    | $\rho$ | 密度      | kg/m <sup>3</sup> |
| $p$ | 压力   | Pa   | $n$    | 压缩机转速   | r/min             |
| $T$ | 温度   | °C   | $V_d$  | 压缩机理论排量 | m <sup>3</sup>    |
| $x$ | 干度   | —    |        |         |                   |

| 下标   | 名称    | 下标  | 名称 |
|------|-------|-----|----|
| acc  | 吸气储液器 | sat | 饱和 |
| comp | 压缩机   |     |    |

### 参考文献

- [1] AHRI. ANSI/AHRI Standard 540 (formerly ARI Standard 540) 2004 Standard For Performance Rating of Positive Displacement Refrigerant Compressors and Compressor Units[S]. USA: AHRI, 2004.
- [2] 缪道平, 吴业正. 制冷压缩机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001, 37-39.
- [3] Daribi A E, Rice C K. A compressor simulation model with correlations for the level of suction gas superheat[J]. ASHRAE Transactions, 1981, 187(3): 771-782.
- [4] 向献红, 丁力行. 制冷压缩机性能曲线拟合方程及应用[J]. 制冷与空调(四川), 1997, (1): 21-24. (Xiang Xianhong, Ding Lixing. Research on Simulation Model of FK4 Refrigerating Compressor[J]. Refrigeration & Air-condition, 1997, (1): 21-24.)
- [5] 苏顺玉, 秦妍, 赵之海, 等. 涡旋压缩机的实验研究及其工作性能分析[J]. 流体机械, 2006, 34(10): 1-4. (Su Shunyu, Qin Yan, Zhao Zhihai, et al. Experimental Study of a Scroll Compressor and Analysis of its Performance[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(10): 1-4.)
- [6] 陶宏. 变制冷剂流量制冷循环“0过热度”问题的实验研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2008年12月.
- [7] 韩磊, 陶乐仁, 郑志皋, 等. 回气带液对滚动转子压缩制冷系统性能影响实验研究[J]. 制冷学报, 2010, 33(4): 22-25. (Han Lei, Tao Leren, Zheng Zhigao, et al. Experimental Studies on the Effect of Liquid-Refrigerant Return on the Rotary Refrigerant System Performance[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 33(4): 22-25.)
- [8] 源生一太郎. 制冷机的理论和性能[M]. 北京: 农业出版社, 1981, 66-69, 84.
- [9] 中国国家标准化管理委员会全国冷冻设备标准化技术委员. GB/T5773-2004容积式制冷剂压缩机性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [10] 中国国家标准化管理委员会全国家用电器标准化技术委员会. GB/T15765-2006房间空气调节器用全封闭型电动机-压缩机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

### 作者简介

陶宏, 男(1969—), 博士/系统工程师, 上海日立电器有限公司, 上海市浦东新区金桥开发区宁桥路888号, 201206, (021) 50554560, E-mail: taoh@shec.com.cn. 研究方向: 管内沸腾和冷凝传热, 变流量蒸汽压缩式制冷循环。正在进行的研究项目: 蒸汽压缩式制冷循环稳态仿真。

### About the author

Tao Hong (1969—), male, Ph. D./system engineer, Shanghai Hitachi Electrical Appliance Co. Ltd., 888, Rd. Ningqiao, Pudong, Shanghai. 201206, (021) 50554560, E-mail: taoh@shec.com.cn. Research fields: inner-tube boiling/condensation heat transfer, VRF vapor-compression refrigeration cycle. The author is doing a research on vapor-compression refrigeration cycle steady simulation.