

文章编号:0253-4339(2017)06-0094-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2017.06.094

高温热泵用双螺杆压缩机内压力比调节方式

邢林芬^{1,2} 何永宁¹ 曹锋² 张业强¹ 殷叔靖³ 李耀全³

(1 郑州轻工业学院能动学院 郑州 450002; 2 西安交通大学能动学院 西安 710049;
3 江苏辛普森新能源有限公司 扬州 225000)

摘要 高温工业热泵运行时热源温度波动较大,压缩机外压比变化导致内外压比不相等,压缩机功耗上升,热泵能效下降。本文提出了采用经济器补气过程调节双螺杆压缩机内压力比的调节方式。通过向压缩腔中补充制冷剂气体,调节压缩机运行过程中的内压缩最终压力,使其与排气管道中压力相同,消除欠压缩过程,使压缩机实际压缩过程接近多变过程,降低运行附加功耗,增大热泵能效比。实验得到冷凝器90℃出水工况下不同补气压力时热泵的性能参数,结果表明:在最优补气压力下,压缩机绝热效率与热泵制热能效比同时达到最大,可实现通过调节补气压力调节压缩机内压力比的目的。

关键词 高温热泵;双螺杆压缩机;内压力比调节;补气

中图分类号:TB61+1;TB652;TQ051.5

文献标识码:A

Inner-pressure Ratio Adjustment of the Twin-screw Compressor in a High-temperature Heat Pump

Xing Linfen^{1,2} He Yongning¹ Cao Feng² Zhang Yeqiang¹ Yin Shujing³ Li Yaoquan³

(1. School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, 450002, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 3. Simpsun Air Conditioning, Yangzhou, 225000, China)

Abstract Changing the working conditions of an industrial heat pump can cause a mismatch of the inner and outer pressure ratios of the twin-screw compressor. Over-compression and under-compression increase the compressor power consumption and decrease the heat-pump's coefficient of performance (COP). Injecting refrigerant vapor into the compression chamber would increase the inner-pressure ratio and avoid under-compression. An experimental study was conducted with different injection pressures when the condenser outlet's water temperature reached 90℃. The results show that the optimal injection pressure causes the COP and adiabatic efficiency to peak at the same time. This result shows that the vapor injection changes the compression process to a quasi-polytropic compression process. Adjusting the compressor's inner-pressure ratio by changing the refrigerant-injection pressure is feasible.

Keywords high temperature heat pump; twin screw compressor; inner pressure ratio adjustment; vapor injection

高温热泵以其较高的出水温度满足工业加热需求,与传统电加热、蒸气加热方式相比,加热效率更高,使用安全,在化工过程、纺织品印染等诸多场合得到广泛应用^[1-2]。高温热泵应用于工业加热场合时,冷凝侧及蒸发侧循环水流量、温度变化较大,使得高温热泵冷凝温度及蒸发温度波动范围较大,热泵冷凝压力及蒸发压力变化较大。当运行工况在较大范围波动时,高温热泵保持高效运行存在一定困难,运行经济性较低^[3-5]。高温热泵目前多采用双螺杆压缩机^[6],作为主要的功耗元件,压缩机的功耗直接决定

着热泵的性能。由于双螺杆压缩机自身无吸、排气阀,压缩机的吸气过程及排气过程均随螺转子的转动完成。当压缩机内压缩终了压力 p_i 与排气管道中压力 p_d 不同时,将导致过压缩及欠压缩过程的发生,压缩机功耗增加,热泵能效比降低^[7]。内压缩终了压力与排气管道中压力存在的差值还会在排气过程中产生激波^[8],增加管道的振动及噪音,影响热泵运行安全。

高温工业热泵由于应用场合的限制,自身工况变化范围更大,当冷凝温度与蒸发温度温差增大时,热

基金项目:国家自然科学基金(51576152)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51576152).)

收稿日期:2016年12月22日

泵系统冷凝压力与蒸发压力差值增大,压缩机排气管道压力增大,压缩机内、外压力不平衡程度增加,导致功耗增加,热泵能效比下降^[4]。为保持热泵高效运行,需对压缩机的内压力比进行调节。

1 内压力比调节方式

双螺杆压缩机吸、排气孔口的位置和形状决定内压力比,而热泵运行中的实际吸气压力 p_s 、排气压力 p_d 决定压缩机的外压力比。在压缩机设计过程中,多采用设置滑阀的方式调节压缩机的内压力比。通过滑阀调节方案,获得变化的排气孔口面积,进而实现内容积比及内压力比的调节。该类调节方式仅影响压缩机的内压力比,并不会改变压缩机的容积流量。该类调节方式多用于压缩机制冷、制热工况的转换,实际运行时调节内压力比范围有限且实时响应较差,不能根据工况变化实时调节压缩机的内压力比。

针对高温热泵用双螺杆压缩机,借鉴带经济器补气热泵工作过程^[9-12],提出了采用经济器过程调节双螺杆压缩机内压力比,改善热泵性能的方案。补气双螺杆高温热泵系统如图 1 所示:在热泵中设置经济器,通过压缩机上的补气孔口,向压缩机压缩腔中补充制冷剂气体,通过增加压缩腔内制冷剂的质量,改变压缩机的内压缩过程,进而调节压缩机压缩终了的内压力^[13-17]。

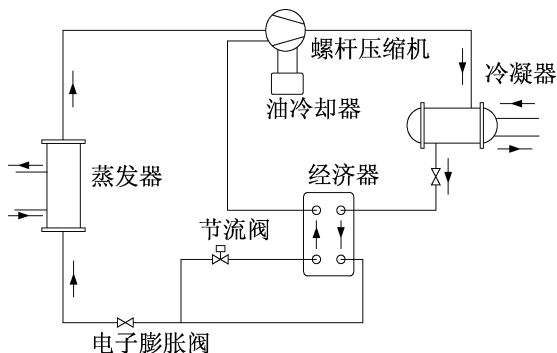


图 1 补气双螺杆高温热泵系统

Fig. 1 The system of high temperature heat pump with vapor injection

2 压缩机性能分析

固定内压力比压缩机容积效率与绝热效率随外压比的变化如图 2 所示。压缩机内压比为固定值 3,随着外部工况的变化,当热泵外压比由 1.5 增加至 4 时,压缩机容积效率随外压比的增加而降低,绝热效率先增加后降低;当压缩机外压比偏离内压比时,增大或减小外压比均降低了压缩机绝热效率。当热泵

外压比为 3 时,压缩机内外压比相同,此时压缩机绝热效率达到最大。

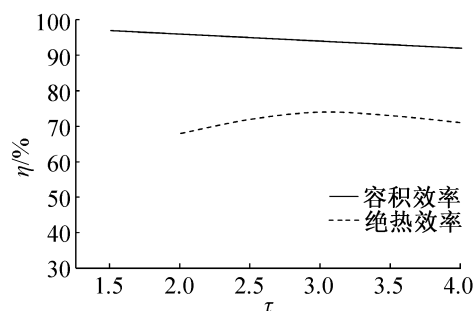


图 2 内压力比为 3 的压缩机性能随外压比变化

Fig. 2 Performance variations of compressor with constant inner pressure ratio

当压缩机内外压比不相等时,内压力比 ε_i 与外压力比 ε_d 差值 $\Delta\varepsilon$ 及压比差值百分比 δ_ε 为:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_d \quad (1)$$

$$\delta_\varepsilon = \Delta\varepsilon / \varepsilon_i \quad (2)$$

以压缩腔与排气管道连通作为分界,将压缩过程功耗计算分两步:内压缩部分指示功及内外压力连通时外压缩部分指示功。将吸气压力压缩至内压缩终了压力过程,压缩机内压缩部分指示功:

$$W_n = \frac{n}{n-1} p_s (\varepsilon_i^{\frac{n-1}{n}} - 1) \quad (3)$$

内压缩终了压力与排气管道压力连通时,压缩机外压缩部分指示功:

$$W_a = \frac{V_i (p_d - p_i)}{\bar{V}} = p_s \varepsilon_i^{-\frac{1}{n}} (\varepsilon_d - \varepsilon_i) p_d > p_i \quad (4)$$

$$W_a = \frac{V_i (p_i - p_d)}{\bar{V}} = p_s \varepsilon_i^{-\frac{1}{n}} (\varepsilon_i - \varepsilon_d) p_i > p_d \quad (5)$$

压缩机压缩过程整体指示功:

$$W_l = W_n + W_a \quad (6)$$

压缩机将制冷剂蒸气由 p_s 压缩至 p_d 的整个过程可理想化为多变指数为 n 的多变压缩过程,多变压缩功:

$$W_d = \frac{n}{n-1} p_s (\varepsilon_d^{\frac{n-1}{n}} - 1) \quad (7)$$

附加功耗的大小可用于衡量实际压缩过程接近多变过程的程度,由于压缩机内外压不同造成的附加功耗:

$$\Delta W = W_l - W_d \quad (8)$$

对由于内外压力不相等导致的附加功百分比 δ_w 定义如下:

$$\delta_w = \Delta W / W_d \quad (9)$$

双螺杆压缩机内压比分别为2、3、4时,不同多变指数 n 与不同内、外压比差值 δ_ε 百分比的关系如图3所示。当 δ_ε 为正值时,即内压力比大于外压力比,压缩机处于过压缩状态;当 δ_ε 为负值时,即内压力比小于外压力比,压缩机处于欠压缩状态。随着 δ_ε 偏离0

点程度的增加,压缩机附加功耗均增加,即过压缩及欠压缩过程均增加了压缩机的功耗;当 δ_ε 相同时,即内外压差值为定值时,不同多变指数下,过压缩过程造成的压缩机功耗附加值均远大于欠压缩过程导致的功耗附加值。

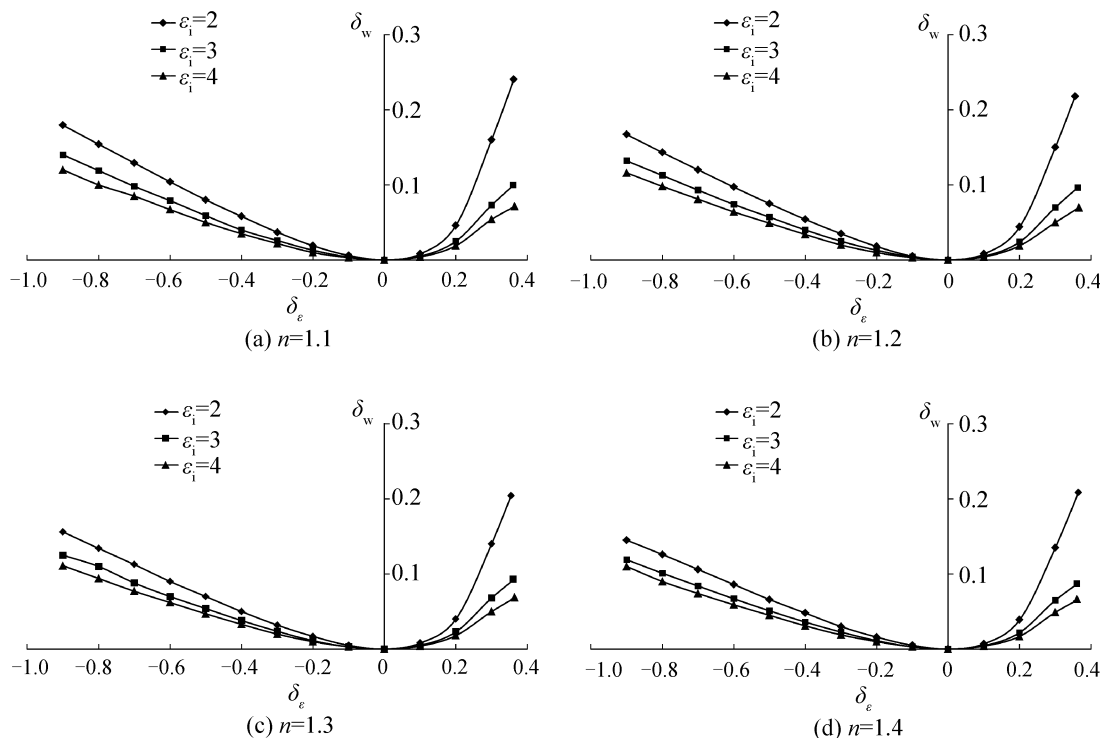


图3 附加功百分比 δ_w 与压比差值百分比 δ_ε 关系曲线

Fig. 3 Variations of δ_w at different δ_ε

高温热泵中,当工况改变使冷凝压力及蒸发压力之间差值增大时,压缩机外压力比增大,而内压力比受压缩机自身几何结构的限制,其值不随工况的改变而变化,导致压缩机内外压比之间的差异变大。随着压差百分比的增加,压缩机附加功耗上升,压缩机总功耗增加。

在热泵中增加经济器后,通过补气管路向压缩机容积腔内补充部分制冷剂气体,增加压缩机内压缩终了压力,此时压缩机附加功百分比与压比差值百分比 δ_ε 关系如图4所示。由于制冷剂质量流量的增加,固定内压力比压缩机容积腔内制冷剂压力上升,内压缩终了压力升高。当压缩机处于欠压缩状态时,压比差值百分比为负值区域,增加经济器过程有效的降低了压缩机功耗增量,该区域内,增加经济器过程明显降低了压缩机功耗增量,对增加热泵热力特性有利;当系统处于过压缩状态时,如图4中压比差值百分比为正值区域,通过增加经济器过程继续增大了压缩机的压缩终了压力,增大了过压缩的程度,极大增加了压缩机功耗增量,该区

域内,增加经济器过程明显增加了压缩机功耗增量,此时,在热泵系统中加入经济器补气过程无助于增加热泵热力特性。

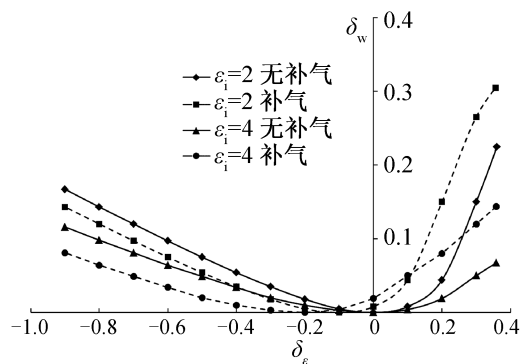


图4 经济器过程附加功百分比 δ_w 与压比差值百分比 δ_ε 关系

Fig. 4 Variations of δ_w with economizer at different δ_ε

针对双螺杆压缩机补气过程在高温热泵工况下的性能,实验研究了蒸发器进出口水温为45℃/40℃,冷凝器进出口水温为85℃/90℃时,采用

R124 制冷剂的高温热泵在补气压力为 0.5 ~ 1.3 MPa 时高温热泵性能参数变化。压缩机的轴功及指示功随补气压力的变化如图 5 所示。随补气压力的增加,压缩机中制冷剂的质量流量增加,压缩机轴功及指示功随之增加。压缩机的绝热功先增加后减小。

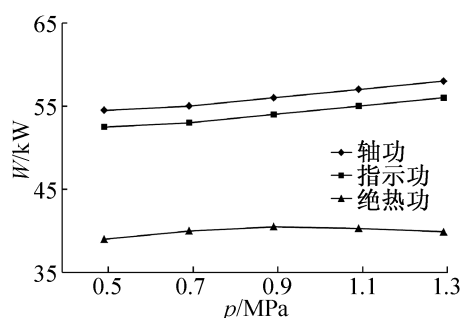


图 5 不同补气压力下压缩机功耗变化
Fig. 5 Variations of power consumption at different injection pressure

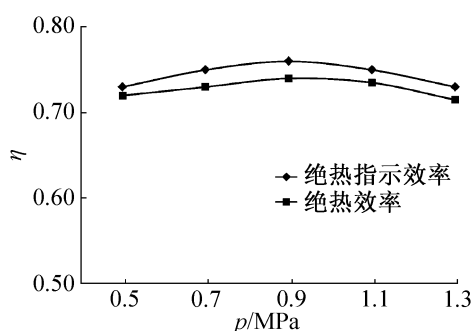


图 6 不同补气压力下压缩机性能参数变化
Fig. 6 Variations of compressor performance at different injection pressure

图 6 所示为不同补气压力下,热泵绝热效率的变化。随着补气压力的增加,压缩机绝热效率先增加后减小,在补气压力达到 0.95 MPa 时,系统绝热效率达到最大。该规律与压缩机内外压比相同时,绝热效率达到最大相吻合。压缩机绝热效率在压缩机内外压比相同时达到最大,在经济器系统中,通过调节补气压力,增大压缩机内压缩终了压力,使其与系统外压比相同,压缩机的绝热效率达到最大。同时,如图 8 所示,系统的制热 COP 在补气压力为 0.95 MPa 时达到最大。

在系统 COP 达到最大的最优补气压力下,系统的绝热效率同时达到了最大,此时,压缩机内、外压比相同,无欠压缩过程及过压缩过程的出现,压缩机附加功耗最低。采用经济器过程显著改善了压缩机在变工况运行时的性能,提高了热泵制热能效比,可用于优化高温工业热泵运行性能。

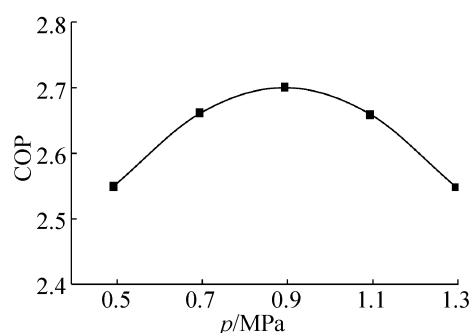


图 7 不同补气压力下系统 COP 变化
Fig. 7 Variations of COP at different injection pressure

3 结论

高温热泵用于工业场合加热时,由于工况不稳定性造成双螺杆压缩机内外压比不相等,压缩机过压缩及欠压缩都将引起压缩功耗的上升,压缩机处于过压缩时,功耗增加量明显大于欠压缩时,高温热泵运行时应严格限制压缩机处于过压缩状态。

当高温热泵用双螺杆压缩机处于欠压缩状态时,可通过向压缩机容积腔中补充制冷剂气体,削弱压缩机运行时的欠压缩程度。进行的高温热泵在 90 °C 出水工况下,通过压缩机补气过程调节压缩机性能参数实验表明:当压缩机补气压力处于热泵制热 COP 最大时,绝热效率也达到最大值。补气过程可降低压缩机欠压缩时的附加功耗,使压缩过程接近多变压缩过程,压缩机绝热效率增大。压缩机功耗达到该工况下的最小值,高温热泵能效比达到最大。与采用滑阀调节内压比的方式相比,该方式实时调节效果明显,利于操作,可用于调节高温热泵制热能效比。

在热泵用双螺杆压缩机设计过程中,可通过适当减小压缩机内压力比的设计方案,为实际运行中,增加压缩机补气过程,留出一定裕度。当采用经济器过程时,通过补气过程调节内压力比,保证高温热泵变工况下的高效运行。

本文受食品生产与安全河南省协同创新中心(FCIC201614)和江苏省科技计划(BA2016051)项目资助。(The project was supported by the Collaborative Innovation Center of Food Production and Safety of Henan Province(No. FCIC201614) and Jiangsu Science and Technology Project (No. BA2016051).)

参考文献

- [1] 胡斌,王文毅,王凯,等. 高温热泵技术在工业制冷领域的应用[J]. 制冷学报, 2011, 32(5): 1-5. (HU Bin, WANG Wenyi, WANG Kai, et al. The application of high-temperature heat pump in industrial refrigeration field[J].

- Journal of Refrigeration, 2011, 32(5):1-5.)
- [2] 赵力. 高温热泵在我国的应用及研究进展[J]. 制冷学报, 2005, 26(2): 8-13. (ZHAO Li. Application and development of high temperature heat pumps in China [J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(2): 8-13.)
- [3] 沈希, 王晓燕, 黄跃进, 等. 制冷压缩机变工况运行的热力性能研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(6): 15-19. (SHEN Xi, WANG Xiaoyan, HUANG Yuejin, et al. Thermodynamic performance of refrigeration compressor running at variable condition [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(6): 15-19.)
- [4] 丁国良, 伏龙, 苏祖坚, 等. 螺杆式冷水机组性能分析[J]. 制冷学报, 2002, 23(3): 57. (DING Guoliang, FU Long, SU Zujian, et al. Performance analysis of screw chillers [J]. Journal of Refrigeration, 2002, 23(3): 57.)
- [5] 王朝鑫, 朱兴旺, 邢林芬, 等. 静态加热式空气源热泵热水器运行性能的试验研究[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2011, 26(5): 5-7. (WANG Chaoxin, ZHU Xingwang, XING Linfen, et al. Experimental study of operating performance on static air-source heat pump water heater [J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Natural Science), 2011, 26(5): 5-7.)
- [6] 邢子文. 螺杆压缩机: 理论、设计及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. (XING Ziwen. Screw compressor: theory, design and applications [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.)
- [7] 顾泽波, 吴伟烽. 回转式制冷压缩机内外压比不相等对性能影响的计算分析[J]. 压缩机技术, 2014(2): 15-18. (GU Zebo, WU Weifeng. Calculation and analysis of influence of excessive compression and inadequate compression on performance of rotary refrigerating compressors [J]. Compressor Technology, 2014(2): 15-18.)
- [8] HUANG P X, YONKERS S, HOKEY D. Gas pulsation control using a shunt pulsation trap [C] // The 22st International Compressor Engineering Conference. Purdue: Purdue University, 2014.
- [9] 马敏, 黄波, 耿玮, 等. 滚动转子式补气压缩机在热泵系统中的实验研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(4): 52-54, 60. (MA Min, HUANG Bo, GENG Wei, et al. Performance investigation of the vapor-injection rotary compressor for residential heat pump systems [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(4): 52-54, 60.)
- [10] 李玉春, 蔡志鸿, 何永锋. 带经济器的热泵性能特征研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(6): 40-43. (LI Yuchun, CAI Zhihong, HE Yongfeng. Study on performance characteristic of heat pump with economizer [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(6): 40-43.)
- [11] 王文毅, 毛晓倩, 胡斌, 等. 中间补气量对经济器热泵系统性能的影响[J]. 制冷学报, 2013, 34(4): 40-46. (WANG Wenyi, MAO Xiaoqian, HU Bin, et al. Effects of the intermediate gas injection on the performance of heat pump with an economizer [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(4): 40-46.)
- [12] 何永宁, 杨东方, 曹锋, 等. 补气技术应用于高温热泵的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 103-108. (HE Yongning, YANG Dongfang, CAO Feng, et al. Experimental investigation on vapor injection in high temperature heat pump [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 103-108.)
- [13] 郭志敏. 经济器螺杆制冷压缩机补气 and 排气孔口的确定[J]. 制冷学报, 1984, 5(2): 10-17. (WU Zhimin. Suction and discharge design of screw compressor with economizer in refrigerant [J]. Journal of Refrigeration, 1984, 5(2): 10-17.)
- [14] 邓定国. 带节能器螺杆制冷循环及其热力学分析[J]. 西安交通大学学报, 1987, 21(1): 53-61. (DENG Dingguo. Cycle characteristics and thermodynamics analysis of screw compressor with economizer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1987, 21(1): 53-61.)
- [15] 吴华根, 彭学院, 邢子文, 等. 经济器补气压力对双螺杆制冷压缩机性能影响的试验研究[J]. 制冷学报, 2003, 24(4): 10-13. (WU Huagen, PENG Xueyuan, XING Ziwen, et al. Experimental study on effects of superfeed pressure of economizer on twin-screw refrigeration compressor performance [J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(4): 10-13.)
- [16] WU Huagen, PENG Xueyuan, XING Ziwen, et al. Experimental study on p - V indicator diagrams of twin-screw refrigeration compressor with economizer [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(10): 1491-1500.
- [17] 马一太, 刘忠彦, 李敏霞. 可变内容积比螺杆式压缩机的性能分析[J]. 制冷与空调(北京), 2012, 12(6): 15-18, 23. (MA Yitai, LIU Zhongyan, LI Minxia. Performance analysis on variable internal volume ratio screw compressor [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2012, 12(6): 15-18, 23.)

通信作者简介

邢林芬, 女, 讲师, 郑州轻工业学院能源与动力工程学院, 18837166281, E-mail: xlf@zzuli.edu.cn。研究方向: 空调与热泵。

About the corresponding author

Xing Linfen, female, lecturer, School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, +86 18837166281, E-mail: xlf@zzuli.edu.cn. Research fields: air conditioner and heat pump.