文章编号:0253-4339(2018) 06-0032-06 **doi**:10.3969/j.issn.0253-4339.2018.06.032

R290 直接接触冷凝制冷循环性能分析对比

宁静红 诸凯 刘圣春 董强

(天津商业大学天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

摘 要 本文分析了 R290 直接接触冷凝(DCC)制冷循环的性能,并与 R290 常规单级压缩制冷循环的热力性能进行对比,得出:在最佳主循环冷凝温度下,R290 直接接触冷凝制冷循环可获得最大性能系数和最低冷凝器热负荷。主循环过冷液体的过冷度增大,最佳主循环冷凝温度升高,最优性能系数降低,最低冷凝器热负荷增加,蒸发器的制冷剂质量流量减少。当蒸发温度为-15~-6℃,R290 直接接触冷凝制冷循环相比 R290 单级压缩制冷循环的性能系数提高了 7.5%~14.9%,冷间供冷设备蒸发器的制冷剂质量流量减少了 26.5%~36.7%,冷凝器热负荷减少了 1.5%~3.7%。结果表明 R290 直接接触冷凝制冷循环具有很好的发展前景。

关键词 R290;直接接触冷凝;制冷循环;性能 中图分类号:TB61⁺1; TB657.5

文献标识码:A

Analysis and Comparison of the Refrigeration Cycle Performance of R290 Direct Contact Condensation

Ning Jinghong Zhu Kai Liu Shengchun Dong Qiang

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

Abstract In the study, thermal performances of direct contact condensation (DCC) refrigeration cycle with R290 were analyzed and compared with conventional one stage compression refrigeration cycle with R290. The following conclusions are obtained. The maximum coefficient of performance and minimum condenser heat load of direct contact condensation refrigeration cycle with R290 are obtained at the optimum condensation temperatures of the main cycle. With the increases in the supercooling degree of the supercooled liquid in the main cycle, the optimum condensation temperature of main cycle is increased, the maximum coefficient of performance is reduced, the minimum condenser heat load is increased, and the refrigerant mass flow rate of evaporator is decreased. When compared with conventional one stage compression refrigeration cycle with R290 in the range of evaporating temperature from -15 °C to -6 °C, the coefficient of performance of direct contact condensation refrigeration cycle with R290 is increased by 7.5% - 14.9%, refrigerant mass flow rate of evaporator in cold room cooling equipment is reduced by 26.5% - 36.7%, and condenser heat load is reduced by 1.5% - 3.7%. The results indicate that the direct contact condensation refrigeration cycle with R290 is promising.

Keywords R290; direct contact condensation; refrigeration cycle; performance

科技和经济的迅猛发展造成环境和自然资源危机,严重危害人类健康和生态环境。保护人类,给子孙后代留下一个可供生存、可持续发展的环境是当今社会义不容辞的责任。自然工质是解决环境问题的最终方案^[1]。R290 的 ODP 为 0, GWP 很小,具有优良的热力性能^[2-4],价格低廉,与普通润滑油和机械结构材料具有良好的兼容性。

现有的常规制冷系统,制冷压缩机排出的高温高 压制冷剂气体在冷凝器中与冷却介质间壁式热交换 放出热量,制冷剂与冷却介质间的热量传递经两侧流 体的对流换热和传热壁面的导热、传热壁面材料特

收稿日期:2017年9月7日

性、表面特征等造成润滑油聚集、形成污垢,导致热阻 增加,传热性能下降,制冷剂与冷却介质的传热温差 增加,制冷压缩机的排气压力升高、压力比增大、容积 效率降低、功耗增加,制冷系统的运行性能下降,能耗 增大。如果采用直接接触冷凝(direct contact condensation, DCC),可在较小温差下实现高效率的换热^[5]、 传热效率高、避免和降低换热面结垢与腐蚀、节省材 料、降低投资成本与运行费用。目前,直接接触式换 热器广泛应用于工业生产中^[6-8],有许多学者进行相 关研究^[9-14],宁静红等^[15]的前期研究结果表明,DCC 制冷循环表现出良好的热力性能。 本文针对冷冻冷藏领域的果蔬冷藏保鲜运行 工况制冷系统,提出制冷压缩机排出的高温高压制 冷剂气体与制冷剂过冷液体直接接触凝结换热的 R290 制冷循环,并对 R290 直接接触冷凝制冷循环 的性能进行分析对比,结果表明,R290 直接接触冷 凝制冷循环具有很好的发展前景,为后续深入研究 奠定理论基础,对保护环境和节约能源具有重要 意义。

1 R290 直接接触冷凝制冷循环

图 1 所示为 R290 直接接触冷凝制冷循环原理, 该 DCC 制冷循环由 R290 主循环和 R290 辅助循环 组成。主循环由主循环制冷压缩机、直接接触冷凝 器、蒸发-过冷器、主循环节流阀和冷间设备蒸发器组 成,低温低压的 R290 制冷剂液体在蒸发器内蒸发吸 热,为果蔬冷藏保鲜空间提供冷源。R290 辅助循环 为 R290 主循环直接接触冷凝器的饱和液体(3 点) 过冷(至4 点)提供冷源,由辅助循环制冷压缩机、冷 凝器、蒸发-过冷器、辅助循环节流阀组成,冷凝器向 外界环境散发热量。





图 2 所示为 R290 直接接触冷凝制冷循环的 p-h 图,直接接触冷凝器出口的饱和液体(3)经过蒸 发-过冷器过冷后(4)分成两路:一路进入直接接触 冷凝器,另一路经过主循环节流阀节流降压后(5) 进入蒸发器,吸热蒸发的饱和气体(1)进入主循环 制冷压缩机,经压缩后排出的高温高压制冷剂气体 (2)与过冷液(4)接触换热冷凝至饱和液体(3)。 辅助循环中制冷压缩机排出的高温高压制冷剂气 体(7)进入冷凝器与外界环境空气热交换放出热量 冷凝至饱和液体(8),经辅助循环节流阀节流降压 后(9)进入蒸发-过冷器(9-6吸热过程)吸收主循 环液体(3-4放热)的热量,使主循环液体过冷,蒸 发的饱和气体(6点)进入辅助循环制冷压缩机。 R290辅助循环的9-6蒸发过程为R290主循环的 3-4过程提供冷源,保证液体的过冷度,使主循环 制冷压缩机排出的高温高压气体全部凝结。相比 常规单级制冷循环,主循环制冷压缩机的排气压力 降低,压力比减小。R290直接接触冷凝制冷循环 与复叠式制冷循环相比,蒸发-过冷器较冷凝蒸发器 的传热温差减小,制冷压缩机的压力比减小,功耗 降低,运行性能提高。



图 2 R290 直接接触冷凝制冷循环 p-h 图 Fig. 2 p-h diagram of R290 direct contact condensation

2 制冷循环热力性能

制冷循环热力性能计算时利用 Engineering Equation Solver 编程和调用制冷剂物性数据,为了便于 分析对比,热力计算时假设:1)R290 主循环制冷压缩 机的入口气体(1)、R290 辅助循环制冷压缩机的入 口气体(6)、直接接触冷凝器出口液体(3)、冷凝器出 口液体(8)均为饱和状态;2)直接接触冷凝换热混合 过程为等压过程;3)蒸发-过冷器、直接接触凝结器与 外界无热量交换;4)制冷剂在换热器和管路中的压 降为0。

制冷循环制冷量 $Q_0 = 5 \text{ kW}$, 冷凝温度 $t_k = 45 \text{ } \mathbb{C}_{\circ}$

2.1 DCC 制冷循环的热力计算

DCC 制冷循环的相关计算公式如下: 换热器的质量平衡方程:

$$m_3 = m_2 + m_4 \tag{1}$$

换热器的能量守恒方程:

$$m_3h_3 = m_4h_4 + m_2h_2 \tag{2}$$

蒸发器制冷剂流量($m_{\text{DCC}} = m_2$):

$$n_2 = \frac{Q_0}{(h_1 - h_5)} \tag{3}$$

冷凝器散热量:

— 33 —

$$Q_{k,DCC} = m_{f}(h_{7} - h_{8})$$

$$\text{ (4)}$$

$$\text{ (4)}$$

$$m_{\rm f} = m_3 \, \frac{(h_3 - h_4)}{(h_6 - h_9)} \tag{5}$$

主循环制冷压缩机功耗:
$$W = m_0(h_0 - h_0)$$
 (6)

$$W_{\rm f} = m_{\rm f} (h_7 - h_6) \tag{7}$$

$$\Delta t = t_3 - t_4 \tag{8}$$

$$\eta_z = 1.003 - 0.021 \ (p_2/p_1) \tag{9}$$

制冷循环性能系数:

$$COP_{DCC} = \frac{Q_0}{W_z + W_f}$$
(11)

式中: h_1 、 h_2 分别为主循环制冷压缩机进、出口 的焓,kJ/kg; h_3 为主循环饱和液体的焓,kJ/kg; h_4 为 主循环过冷液体的焓,kJ/kg, h_5 为主循环蒸发器进口 的焓,kJ/kg, h_6 、 h_7 为辅助循环制冷压缩机进、出口的 焓,kJ/kg; h_8 为冷凝器出口的焓,kJ/kg; h_9 为辅助循 环蒸发器进口的焓,kJ/kg; m_2 、 m_3 、 m_4 为直接接触冷 凝器过热气体进口、饱和液体出口、过冷液体进口的 质量流量,kg/s; m_f 为辅助循环的质量流量,kg/s; $Q_{k, DCC}$ 为冷凝器的热负荷,kW; Q_0 为制冷循环制冷 量,kW; W_f 、 W_z 分别为辅助循环、主循环制冷压缩机 的功耗,kW; Δt 为主循环过冷液体的过冷度, \mathbb{C} 。

2.2 DCC 制冷循环热力性能分析

通过对 DCC 制冷循环的热力计算,得到的结果 如图 3~图5所示。由图 3可知,DCC 制冷循环的性 能系数 COP_{DCC}随主循环冷凝温度 t₃的升高,呈先增 大后减小的趋势,在最佳 t₃下,获得最优 COP_{DCC}。主 循环过冷液体过冷度增大,最优 COP_{DCC}降低,获得最 优 COP_{DCC}的最佳 t₃升高。原因是在相同的蒸发温 度、冷凝温度和过冷液体的过冷度下,t₃升高,主循环 的压比增大,主循环制冷压缩机功耗 W_z增大,相应 的辅助循环的压比降低,辅助循环的功耗 W_f降低。 当 W_f降低趋势小于 W_z增大的趋势时,制冷循环的 COP_{DCC}增大,随着 t₃的进一步升高,当 W_f降低趋势 小于 W_z增大的趋势时,COP_{DCC}随之降低。而主循环 过冷液体的过冷度增大,辅助循环的蒸发温度降低、 辅助循环的制冷负荷增大,W_f增大,制冷循环的 COP_{DCC}降低。

由图 4 可知, DCC 制冷循环的冷凝器热负荷 - 34 ---



图 3 DCC 制冷循环的 COP_{DCC}随主循环冷凝温度 t₃ 的变化 Fig. 3 COP_{DCC} of DCC refrigeration cycle versus main cycle condensing temperature t₃



图 4 DCC 制冷循环冷凝器热负荷随主循环 冷凝温度 t₃ 的变化

Fig. 4 Heat load of condenser in DCC refrigeration cycle versus main cycle condensing temperature t_3



图 5 DCC 制冷循环蒸发器制冷剂质量流量 随主循环冷凝温度 t₃ 的变化

Fig. 5 Refrigerant mass flow rate of evaporator in DCC refrigeration cycle versus main cycle condensing temperature t_3

 $Q_{k, DCC}$ 随主循环冷凝温度 t_3 的升高呈先减小后增大的趋势,在获得最优 COP_{DCC}的最佳 t_3 下,得到最低的 $Q_{k, DCC}$,随着主循环过冷液体过冷度的增大, $Q_{k, DCC}$ 增大,得到最低 $Q_{k, DCC}$ 的 t_3 升高。原因是当蒸发温度、冷凝温度和过冷液体的过冷度相同时, t_3 升高,辅助 循环的压缩机功耗 W_f 减小、辅助循环的制冷负荷增

大。前期 W_{f} 减小的趋势大于辅助循环制冷负荷增大的趋势, $Q_{k, DCC}$ 减少。随着 t_3 的进一步升高, W_{f} 减小的趋势小于辅助循环制冷负荷增大的趋势,导致 $Q_{k, DCC}$ 增加。主循环过冷液体的过冷度增大,辅助循环的制冷负荷增大, $Q_{k, DCC}$ 增加,导致所需的传热面积增大,外形尺寸增大,耗材增多。

由图 5 可知, DCC 制冷循环流过蒸发器的制冷 剂质量流量随主循环冷凝温度 t₃ 的升高而增大,随 着主循环过冷液体过冷度的增大,流过蒸发器制冷剂 质量流量 m_{DCC}减少。原因是,在相同的蒸发温度、冷 凝温度和过冷液体的过冷度下,t₃ 升高,主循环节流 降压后的焓值升高,蒸发器进出口的焓差减小,为用 冷空间内制取相同的制冷量所需的 m_{DCC}增加,当蒸 发温度、t₃ 相同时,主循环过冷液体过冷度增大,主循 环节流降压后的焓值降低,蒸发器进出口的焓差增 大,为用冷空间内提供相同的制冷量所需的 m_{DCC}减 少。流过蒸发器的 m_{DCC}减少,冷间内 R290 泄漏的可 能性减少,造成的危害降低。

综上所述:当满足运行工况要求时,理论设计或 实际运行 DCC 制冷系统时,选取适宜的 t₃ 和主循环 过冷液体的过冷度,可以获得最佳性能系数、最小的 冷凝器结构尺寸及较小的 m_{DCC},保证系统安全可靠 运行。

2.3 与单级压缩制冷循环热力性能对比

将 R290 直接接触冷凝制冷循环与 R290 常规单 级压缩(one stage compression, OSC)制冷循环的热力 性能进行分析对比, R290 单级压缩制冷循环的制冷 量为5 kW,冷凝温度为45 °C,冷间内设备蒸发器的 制冷剂质量流量为 m_{osc} , kg/s;冷凝器的热负荷为 $Q_{k,osc}$, kW;制冷循环的性能系数为 COP_{osc}, 假设制冷 压缩机的入口气体、冷凝器出口液体为饱和状态。 R290 直接接触冷凝制冷循环的制冷量为5 kW、冷凝 温度为45 °C、过冷液体过冷度为6 °C, 当蒸发温度为 $-15 \sim -6$ °C时, 设计或运行时控制在最佳的主循环 冷凝温度下, 获得最优性能系数和最低冷凝器热负 荷, 在同样工况下得到蒸发器的制冷剂质量流量, 对 比结果如图 6~图 8 所示。

由图 6 可知,两个制冷循环的性能系数随蒸发温度的升高而增大,与 OSC 制冷循环相比,DCC 制冷循环的性能系数明显升高,当蒸发温度为-15~-6℃时,升高了 7.5%~14.9%,因此采用 DCC 制冷循环,能效提高,能源消耗明显降低。

由图 7 可知,与 OSC 制冷循环相比,DCC 制冷循 环的蒸发器制冷剂流量明显减少。原因是 R290 直 接接触冷凝制冷循环蒸发器入口的焓值降低,蒸发潜



图 6 制冷循环性能系数随蒸发温度的变化

Fig. 6 The COP of refrigeration cycle change with evaporating temperature



图 7 蒸发器制冷剂流量随蒸发温度的变化

Fig. 7 Evaporator refrigerant mass flow rate change with evaporating temperature



图 8 冷凝器热负荷随蒸发温度的变化 Fig. 8 Condenser heat load change with evaporating temperature

热增大,为用冷空间提供相同的制冷量所需的制冷剂 流量减少。当蒸发温度为 – 15 ~ –6 ℃时,制冷剂质 量流量减少了 26.5% ~ 36.7%。因此采用 DCC 制冷 循环,冷间供冷设备蒸发器的制冷剂质量流量大大减 少,可以有效降低因泄漏造成的危险。

由图 8 可知,两个制冷循环的冷凝器热负荷均随

— 35 —

蒸发温度的升高而降低,与 OSC 制冷循环相比,DCC 制冷循环的冷凝器热负荷明显减少,当蒸发温度为 -15~-6℃时,减少了 1.5%~3.7%。因此 DCC 制冷循环对环境的热污染更小,冷凝器的结构尺寸减 小,投资成本降低。

3 结论

本文针对冷冻冷藏领域的果蔬冷藏保鲜工况,提 出制冷压缩机排出的高温高压制冷剂气体与制冷剂 过冷液体直接接触凝结换热的 R290 制冷循环,对 R290 直接接触冷凝制冷循环的性能进行分析,并与 R290 常规单级压缩制冷循环的热力性能进行对比, 得到如下结论:

1) R290 直接接触冷凝制冷循环在最佳主循环冷凝温度下,获得最优性能系数和最低冷凝器热负荷; 主循环过冷液体过冷度增大,最优性能系数降低、最低冷凝器热负荷增大、蒸发器的制冷剂质量流量减少,获得最优性能系数和最低冷凝器热负荷的最佳主循环冷凝温度升高。

2) 当蒸发温度为-15~-6℃时,与 R290 单级 压缩制冷循环相比, R290 直接接触冷凝制冷循环的 性能系数提高了 7.5%~14.9%, 冷间供冷设备蒸发 器的制冷剂质量流量减少了 26.5%~36.7%, 冷凝 器热负荷减少了 1.5%~3.7%。

3)采用 R290 直接接触冷凝制冷循环,可以降低 制冷系统的能源消耗,减少对环境的热污染,减小设 备的投资成本,同时有效降低因 R290 泄漏造成的危 险,对节约能源和保护环境具有重要意义,具有很好 的应用前景。

本文受天津市自然科学基金(18JCYBJC22200)项目资助。(The project was supported by the Tianjin Natural Science Foundation (No. 18JCYBJC22200).)

参考文献

- [1] LORENTZEN G. Revival of carbon dioxide as a refrigerant
 [J]. International Journal of Refrigeration, 1993, 17(5):
 292 301.
- [2] 宁静红,刘圣春,叶庆银. 自然工质 R290 与 R22 滴状凝结换热特性的对比分析[J]. 化工学报,2013,64(8):
 2827 2832. (NING Jinghong, LIU Shengchun, YE Qingyin. Contrast and analysis on heat transfer characteristic of natural refrigerant R290 and R22 dropwise condensation[J]. CIESC Journal, 2013, 64(8): 2827 2832.)
- [3] 宁静红,刘圣春,李惠宇. 自然工质 R290 管内凝结换热 特性的数值模拟[J]. 化工学报, 2012, 63(4):1038 -

1043. (NING Jinghong, LIU Shengchun, LI Huiyu. Simulation on condensation heat transfer characteristic of natural refrigerant R290 inside tube[J]. CIESC Journal, 2012, 63 (4): 1038 - 1043.)

- [4] 宁静红,李惠宇,彭苗. R290/CO₂ 复叠式制冷系统的性 能实验[J]. 制冷学报,2007,28(6):57-60. (NING Jinghong, LI Huiyu, PENG Miao. Performance experiment of R290/CO₂ cascaded refrigeration system[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(6):57-60.)
- [5] MAHOOD H B, THORPE R B, CAMPBELL A N, et al. Experimental measurements and theoretical prediction for the transient characteristic of a two-phase two-component direct contact condenser [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87(1): 161 – 174.
- [6] MAHOOD H B, CAMPBELL A N, THORPE R B, et al. Heat transfer efficiency and capital cost evaluation of a three-phase direct contact heat exchanger for the utilisation of low-grade energy sources [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106: 101-109.
- [7] WANG Weilong, LI Hailong, GUO Shaopeng, et al. Numerical simulation study on discharging process of the directcontact phase change energy storage system [J]. Applied Energy, 2015, 150: 61-68.
- [8] DAVIS J, YADIGAROGLU G. Direct contact condensation in Hiemenz flow boundary layers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(8/9): 1863 – 1875.
- [9] GULAWANI S S, DAHIKAR S K, MATHPATI C S, et al. Analysis of flow pattern and heat transfer in direct contact condensation [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64 (8): 1719 - 1738.
- [10] HEINZE D, SCHULENBERG T, BEHNKE L. A physically based, one-dimensional three-fluid model for direct contact condensation of steam jets in flowing water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 106: 1041-1050.
- [11] APANASEVICH P, LUCAS D, BEYER M, et al. CFD based approach for modeling direct contact condensation heat transfer in two-phase turbulent stratified flows[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 95: 123 – 135.
- [12] LI Shuqian, WANG Ping, LU Tao. CFD based approach for modeling steam-water direct contact condensation in subcooled water flow in a tee junction[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 85: 729 - 746.
- [13] LI Shuqian, WANG Ping, LU Tao. Numerical simulation of direct contact condensation of subsonic steam injected in a water pool using VOF method and LES turbulence model
 [J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 78: 201 215.

(下转第60页)

— 36 —

- [16] 胡韩莹,朱冬生. 热电制冷技术的研究进展与评述
 [J]. 制冷学报, 2008, 29(5):1-7. (HU Hanying, ZHU Dongsheng. Review of recent thermoelectric refrigeration technology [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29 (5):1-7.)
- [17] ASTRAIN D, ARANGUREN P, MARTÍNEZ A, et al. A comparative study of different heat exchange systems in a thermoelectric refrigerator and their influence on the efficiency [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 1289-1298.
- [18] HE Wei, ZHANG Gan, LI Guiqiang, et al. Analysis and discussion on the impact of non-uniform input heat flux on thermoelectric generator array [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 98:268 - 274.
- [19] ADMASU B T, LUO Xiaobing, YAO Jiawei. Effects of temperature non-uniformity over the heat spreader on the outputs of thermoelectric power generation system [J]. Energy Conversion & Management, 2013, 76 (30):533 – 540.
- [20] MING Tingzhen, WANG Qiankun, PENG Keyuan, et al. The influence of non-uniform high heat flux on thermal stress of thermoelectric power generator [J]. Energies, 2015, 8(11):12584 - 12602.
- [21] 许生龙,何丹. 半导体制冷器件温度不均匀性的研究
 [J]. 中国测试, 1996(2):8 12. (XU Shenglong, HE Dan. Research of temperature nonuniformity of semiconductor refrigeration devices [J]. Practical Measurement Technology, 1996(2):8 12.)

(上接第36页)

- [14] KADI R, AISSANI S, BOUAM A. Numerical simulation of the direct contact condensation phenomena for PTS-related in single and combined-effect thermal hydraulic test facilities using TransAT CMFD code [J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 293: 346 - 356.
- [15] 宁静红,诸凯,刘圣春. R404A 直接接触凝结制冷循环的性能分析[J]. 低温工程, 2017(3): 38-42,54. (NING Jinghong, ZHU Kai, LIU Shengchun. Analysis on the performance of R404A direct contact condensation refrigeration cycle[J]. Cryogenics, 2017(3): 38-42,54.)
- [16] WANG Zheng, LI Tao, WU Kongxiang, et al. The new refrigeration system with vortex tube and ejector[J]. Journal

- [22] 潘海俊,刘明群. 热电制冷器在第三类边界条件下的 非均匀内热源工程求解[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(2):63-66. (PAN Haijun, LIU Mingqun. Engineering analysis of nonuniform internal generation base on thermoelectric cooler under the third boundary condition[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(2):63-66.)
- [23] 朱仁江,潘英俊,蒋茂华,等. 热电制冷热传导模型及 其在非均匀热流中的应用[J]. 华南理工大学学报(自 然科学版), 2015,43(4):143 – 148. (ZHU Renjiang, PAN Yingjun, JIANG Maohua, et al. Heat conduction model of thermoelectric cooler and its application to nonuniform heat flux [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015,43(4):143 – 148.)
- [24] SUZUKI R O, ITO K O, OKI S. Analysis of the performance of thermoelectric modules under concentrated radiation heat flux [J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45 (3):1827-1835.

通信作者简介

黄晓明,女,副教授,华中科技大学能源与动力工程学院, (027)87559470,E-mail:xmhuang@hust.edu.cn。研究方向:工 程热物理。

About the corresponding author

Huang Xiaoming, female, associate professor, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, + 86 27-87559470, E-mail: xmhuang@hust.edu.
cn. Research fields: engineering thermal physics.

of Engineering Thermophysics, 2012, 33 (11): 1843 – 1848.

通信作者简介

宁静红,女,博士,教授,天津商业大学机械工程学院, 18602665322,E-mail: ningjinghong@126.com。研究方向:制冷 系统节能与优化。

About the corresponding author

Ning Jinghong, female, Ph. D., professor, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, +86 18602665322,E-mail: ningjinghong@ 126. com. Research fields: energy saving and optimization of refrigeration system.