

制冷系统优化及热力学分析

宋长华¹, 罗 成¹, 丁 力¹, 王德明^{1,2}, 李隆键²

(1. 重庆电力高等专科学校 动力工程系, 重庆 400053; 2. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 由于生产任务不足及工艺等方面原因, 用于生产工艺冷却的制冷机组, 常因制冷负荷偏小而停机, 严重影响了生产工艺的安全与稳定运行. 通过增设一旁路调节管路的方法, 将部分冷却水引入到冷冻水系统中, 解决了制冷机组停机问题, 也避免了因其停机造成的经济损失. 同时用热力学理论, 对冷冻水系统中引入冷却水问题进行了讨论, 获得了生产所需最小制冷负荷条件下引入冷却水量与制冷机组负荷率间的关系, 及最大和最小引入冷却水量随制冷机组负荷率的变化关系, 并最终确定了一个在整个生产波动范围内都不会停机的引入冷却水量, 保证了生产运行的安全性和稳定性.

关键词: 制冷系统; 优化; 冷却水; 冷冻水; 安全性; 稳定性

中图分类号: TU833

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)04-0548-06

某化工厂在产品的生产过程中, 需要用制冷机组制备的冷冻水对生产工艺进行冷却. 由于其生产任务不足以及工艺等方面原因, 用于生产工艺冷却降温的制冷机组, 实际运行需要的制冷负荷(以下简称所需制冷负荷)存在一定范围的波动. 在所需制冷负荷小于制冷机组额定出力的 30% 时, 制冷机组将因低温保护而停机, 停机后需要经过 20 min 的机组程序保护后才能重新启动, 严重地影响了生产工艺的安全与稳定运行, 并造成了一定的经济损失.

在制冷机组负荷波动和停机处理方面, 郝正宇等人^[1]通过对制冷主机滑阀波动等问题的处理, 解决了制冷机组的停机问题; 王洪发等人^[2]通过更换冷凝器的方法, 解决了制冷机组停机问题; 李明艳^[3]通过修改热吹程序的方法, 解决了制冷机组停机问题; EMMANUEL N C 等人^[4]对制冷系统变冷却负荷运行状态进行了实验研究; LAVRENCHE G K 等人^[5]通过改变制冷温度的方法, 对获得不同的运行负荷工况进行了研究; BUYANOV Y L 等人^[6]通过改变制冷机组冷却温度的方法, 获得了不同的制冷负荷. 在解决制冷系统停机及负荷调节运行等方面, 人们进行了大量的研究与实践^[7-21].

本化工厂制冷机组停机, 是由于其生产任务不足及生产工艺等方面的原因, 造成制冷机组出力波动并低于其调节范围下限而产生的. 为了解决这一问题, 在制冷系统中增设一旁路管路, 并在旁路上加装一流量计和调节阀门, 将部分冷却水引入到冷冻水系统中来, 并利用调节阀门将引入的冷却水控制为某一流量, 不但满足了生产所需最小制冷负荷(对应最小生产负荷)时的制冷机组运行, 同时也满足了生产所需最大制冷负荷(对应最大生产负荷)时的制冷机组运行. 在解决了制冷机组停机问题的同时, 保证了生产工艺的安全与稳定运行, 并避免了因制冷机组停机而造成的经济损失.

1 存在问题及优化措施

整个制冷系统由冷却水系统和冷冻水系统组成, 如图 1 所示. 冷却水系统由冷却塔、冷却水箱、过滤器、冷却水循环泵、以及制冷机组的冷凝器等组成. 冷冻水系统由膨胀水箱、分水器、集水器、过滤器、冷冻水循环泵、制冷机组的蒸发器、以及生产工艺的冷却换热设备组成. 图 1 和图 2 中所示的干空气和湿空气是相对的, 从冷却塔下部送入的空气湿度较小, 即图中所示的干空气, 在冷却塔内部与冷却水进行传热与传质, 湿度增大后从冷却塔顶部排出, 即图中所示的湿空气. 另外, 在图中的冷却水和冷冻水的供

收稿日期: 2012-03-02 修改稿日期: 2012-07-11

基金项目: 十五科技攻关资助项目(2004BA604A-01)

作者简介: 宋长华(1964-), 男, 重庆市人, 副教授, 主要从事热力学领域的研究工作.

多,所需制冷机组的制冷负荷将会超过其额定出力,则满足不了生产工艺的冷却降温要求。

在制冷机组额定出力情况下,如表1所示,蒸发器冷冻水回水和出水温度分别为10℃和5℃,对应的制冷量为220kW,即额定制冷量,用 Q_{net} 表示。在某一生产条件下对应的制冷量为 Q (即生产所需制冷负荷),引入冷却水量 Δq 后制冷机组的实际制冷量为 Q_{rea} ,根据能量守恒有:

$$\rho c \Delta q (t_{11} - t_{21}) + \rho c (q_2 + \Delta q) (t_{21} - t_{22}) = Q_{\text{rea}} \quad (1)$$

式中: ρ 为水的密度,kg/L; c 为水的比热容,kJ/(kg·℃); Δq 为从冷却水系统引入冷冻水系统的冷却水量,L/s; t_{11} 为冷却水回水的温度,℃; t_{21} 为冷冻水回水的温度,℃; t_{22} 为冷冻水供水的温度,即制冷机组蒸发器出水温度,℃; q_2 为冷冻水循环量,L/s; Q_{rea} 为引入冷却水量后制冷机组的实际制冷量,kW。

式(1)中左边第一项表示引入的冷却水降温到冷冻水回水温度时所需要的制冷量,第二项表示引入的冷却水和原冷冻水从回水温度降温到制冷机组蒸发器出水温度所需要的制冷量。在某一生产负荷(没有引入冷却水)下对应的制冷量,即生产所需制冷负荷,可表示为:

$$Q = \rho c q_2 (t_{21} - t_{22}) \quad (2)$$

式中: Q 为当时生产负荷下对应的制冷量,kW; ρ 为水的密度,kg/L; c 为水的比热容,kJ/(kg·℃); q_2 为冷冻水循环量,L/s; t_{21} 为冷冻水回水的温度,℃; t_{22} 为冷冻水供水的温度,即制冷机组蒸发器出水温度,℃。

联立方程(1)和(2)可得:

$$\Delta q = \frac{Q_{\text{rea}} - Q}{\rho c (t_{11} - t_{22})} \quad (3)$$

式中: Δq 为从冷却水系统引入冷冻水系统的冷却水量,L/s; Q_{rea} 为引入冷却水量后制冷机组的实际制冷量,kW; ρ 为水的密度,kg/L; c 为水的比热容,kJ/(kg·℃); t_{11} 为冷却水回水(即制冷机组冷凝器进水)的温度,℃; t_{22} 为冷冻水供水(即制冷机组蒸发器出水)的温度,℃; Q 为当时生产负荷下对应的制冷量,即生产所需制冷负荷,kW。

由于制冷机组的负荷调节范围为30%~100%,于是在不同所需制冷负荷(即不同生产负荷)条件下的最大和最小引入冷却水量分别为:

$$\Delta q_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{net}} - Q}{\rho c (t_{11} - t_{22})} \quad (4)$$

$$\Delta q_{\text{min}} = \frac{0.3Q_{\text{net}} - Q}{\rho c (t_{11} - t_{22})} \quad (5)$$

式中: Δq_{max} 为最大引入冷却水量,L/s; Δq_{min} 为最小引入冷却水量,L/s; Q_{net} 为制冷机组的额定制冷量,kW; ρ 为水的密度,kg/L; c 为水的比热容,kJ/(kg·℃); t_{11} 为冷却水回水的温度,℃; t_{22} 为冷冻水供水的温度,℃; Q 为当时生产负荷下对应的制冷量,kW。

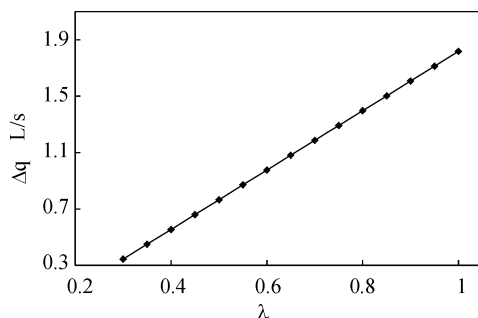


图3 最低生产负荷时可引入的冷却水量

Fig. 3 Led cooling water quantity at minimum refrigerating load

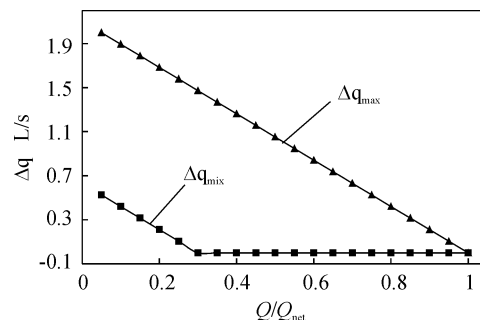


图4 不同生产负荷下可引入的冷却水量

Fig. 4 Led cooling water quantity at different refrigerating loads

在生产过程中,冷冻水供水温度 t_{22} 基本上恒定为5℃,冷却水的回水温度 t_{11} 约为30℃,取水的比热容 $c=4.18$ kJ/(kg·℃),取水的密度 $\rho=1$ kg/L,由式(3)可得在最小生产负荷($Q=30$ kW)时引入冷却水量,如表2和图3所示;由式(4)和(5)可得在不同生产负荷条件下可引入的冷却水量,如图4所示。

表 2 最小生产负荷时引入冷却水情况
Tab. 2 Water replenishment at minimum needed refrigerating load

| | | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 机组负荷率/ λ | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 1.00 |
| 引入水量/L/s | 0.34 | 0.56 | 0.77 | 0.98 | 1.19 | 1.40 | 1.61 | 1.82 |

注:1.表中引入水量为从冷却水系统引入冷却水补充到冷冻水系统中的量。

为了保证生产的连续稳定运行,制冷机组不会停机的实际运行负荷必须在其额定负荷的 30%~100%之间,为了便于讨论,下面引入制冷机组负荷率的概念,制冷机组负荷率用 λ 表示,即:

$$\lambda = \frac{Q_{\text{rea}}}{Q_{\text{net}}}$$

(6)

式中: λ 为制冷机组负荷率; Q_{rea} 为引入冷却水量后制冷机组的实际制冷量,kW; Q_{net} 为制冷机组的额定制冷量,kW。

从图 3 可看出,在最小生产负荷条件下,由于制冷机组的最小运行实际负荷为其额定负荷的 30%,即最小机组负荷率从 0.3 开始,随着机组负荷率的增加,冷冻水系统需要引入冷却水的量也在不断增加,直到制冷机组负荷率为 1.0,即额定负荷时;从图 4 可看出,最小引入冷却水量随生产负荷的增大而逐渐减小,到达制冷机组运行负荷调节下限(即 30%的额定负荷)以后,最小引入冷却水量为 0;最大引入冷却水量也随生产负荷的增加而逐渐减小,只有到达制冷机组额定运行负荷时,最大引入冷却水量才为 0。

3 例 证

该化工厂在最大生产负荷条件下,生产所需要的制冷量(即最大生产所需制冷量)约为 175 kW,在最小生产负荷条件下,生产所需要的制冷量(即最小生产所需制冷量)约为 30 kW。

在最大生产负荷条件下所需的制冷负荷约为 175 kW,它处于制冷机组的制冷负荷调节范围,即额定负荷的 30%~100%之间,此时可不引入冷却水,即最小引入冷却水量为 0;由式(4)可得此时可引入的最大冷却水量为:0.43 L/s,即最大生产负荷时可引入的冷却水量为 0~0.43 L/s。

在最小生产负荷条件下所需的制冷负荷约为 30 kW,将 $Q=30$ kW 代入式(3)可得此时的引入冷却水量,如表 2 和图 3 所示,最小引入冷却水量为 0.34 L/s,最大引入冷却水量为 1.82 L/s。在制冷机组连续正常运行的同时考虑节约能源,将最小引入冷却水量考虑 1.1 倍的安全系数,即设置引入的冷却水量为 0.38 L/s,它不但满足了最小生产负荷时的制冷机组运行,同时也满足了最大生产负荷时的制冷机组运行,因为最大生产负荷时可引入的冷却水量为 0~0.43 L/s。

在制冷系统增设一旁路调节管路后,将部分冷却水引入到冷冻水系统中来,并将引入的冷却水量控制为 0.38 L/s 的流量,不但满足了最小生产负荷时的制冷机组运行,同时也满足了最大生产负荷时的制冷机组运行,解决了以前低生产负荷下制冷机组停机问题。根据现场实际运行情况统计,制冷机组每月非正常停机约 2 次,每次造成的经济损失约 10 万元。系统优化后,每年可避免因机组非正常停机而产生的 240 万元经济损失。

4 结论与讨论

通过增设一旁路调节管路,将部分冷却水引入到冷冻水系统中来,并将其量控制为 0.38 L/s,不但满足了最小生产负荷时的制冷机组运行,同时也满足了最大生产负荷时的制冷机组运行,在解决了以前低生产负荷下制冷机组停机问题,保证了生产运行的安全性和稳定性,同时也避免了因制冷机组停机而造成的经济损失。

另外,如图 2 所示,冷却水从冷却水循环泵后引出,它经过了冷却水系统的过滤器,相对来说比较清洁,从冷却水循环泵后引出,它具有一定的压力,可以用它来克服流量计和调节阀门的压力损失;将冷却水引入到冷冻水系统过滤器前,以便于该过滤器对其进一步地除去杂质,以延长冷冻水系统的清洗周期。

并且,由于冷却水的引入,多余的冷冻水将从膨胀水箱溢流管流出,为了避免这部分水的流失,将此溢流管接到冷却水箱,从膨胀水箱溢流管流出的冷冻水引入到冷却水箱作为冷却水的补充水。由于溢流

到冷却水系统中的冷冻水与冷却循环水相比,其量较小,再加上膨胀水箱、溢流管和冷却水箱均无保温,优化后的制冷系统在运行过程中,冷却水的运行参数与优化前相比没有明显的变化,制冷机组也再没有出现停机而影响生产工艺正常运行的现象。

参考文献 References

- [1] 郝正宇, 刘建宇. 约克制冷机组停机原因的分析及解决[J]. 数字石油和化工, 2009(11): 47-50.
HAO Z Y, LIU J Y. Solution of a York refrigerator machine halts[J]. Digit Petrochemical Industry, 2009(11): 47-50.
- [2] 王洪发, 刘彦辉, 胡龙军, 等. 高温冷藏机组高压报警停机故障分析与排除[J]. 中国修船, 2011, 24(2): 32-34.
WANG H F, LIU Y H, HU L J, et al. Solution of high temperature refrigeration unit halts[J]. China shiprepair, 2011, 24(2): 32-34.
- [3] 李明艳. 减少制冷系统膨胀机故障停机[J]. 油气田地地面工程, 2006, 25(12): 48.
LI M Y. Depress the halts of arefrigeration expander[J]. Oilfield Surface Engineering, 2006, 25(12): 48.
- [4] EMMANUEL N C, AZRAIL A. Thermal response of thermoacoustic refrigerating system to variable loading[C]// Collection of Technical Papers - 5th International Energy Conversion Engineering Conference. New Jersey USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. 2007(2):657-665.
- [5] LAVRECHENKOG K, ZMITROCHENKO J V, NESTERENKO S M, et al. Characteristics of voorhees refrigerating machine with hermetic piston compressor producing refrigeration at one or two temperature levels[J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20(7):517-527.
- [6] BUYANOV Y L, VESELOVSKII A S, BAEV V P. Determination of the refrigerating capacity of cryogenic gas machines for cooling current leads containing high-temperature superconductors[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2011, 84(3): 678-688.
- [7] ANDREY R, VJACHESLAV N. Investigation of the starting modes of the low-temperature refrigerating machines working on the mixtures of refrigerants[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(5): 901-910.
- [8] LATRA B, ANDRE L. Modeling of an ejector refrigerating system operating in dimensioning and off-dimensioning conditions with the working fluids R142b and R600a[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(2/3):265-274.
- [9] McClain, RODNEY L. ARTURO P V, et al. Neural network analysis of fin-tube refrigerating heat exchanger with limited experimental data[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(4):763-770.
- [10] MASTRULLO R, MAURO A W, TINO S et al. A chart for predicting the possible advantage of adopting a suction/liquid heat exchanger in refrigerating system[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14/15):2443-2448.
- [11] CABELLO R, SANCHEZ D, LLOPIS R. Experimental evaluation of the energy efficiency of a CO₂ refrigerating plant working in transcritical conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(13):1596-1604.
- [12] RISTO C, ZAHID A H. New technologies in ammonia refrigerating and air-conditioning systems[J]. Heat Transfer Engineering, 2009, 30(4):324-329.
- [13] CHEN H, LEE W L, YIK F W H. Applying water cooled air conditioners in residential buildings in Hongkong [J]. Energy Conversion and Management, 2008(49): 1416-1423.
- [14] LIANG X, CHAN M Y, DENG S M. Development of a method for calculating steady-state equipment sensible heat ratio of direct expansion air conditioning units[J]. Applied Energy, 2008(85): 1198-1207.
- [15] YU J H, YANG C Z, TIAN L W, et al. Evaluation on energy and thermal performance for residential envelopes in hot summer and cold winter zone of China[J]. Applied Energy, 2009(86):1970-1985.
- [16] TECHARUNGPAISAN P, THEERAKULPISUT S, PRIPREM S. Modeling of a split type air conditioner with integrated water heater[J]. Energy Conversion and Management, 2007(48): 1222-1237.
- [17] GAO C F, LEE W L. Optimized design of floor-based air-conditioners for residential use[J]. Building and Environment, 2009(44): 2080-2088.
- [18] YU B F, HU Z B, LIU M, et al. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health[J]. International Journal of Refrigeration, 2009(32): 3-20.
- [19] XU Z J, YANG Z. Saving energy in the heat-pump air conditioning system driven by gas engine[J]. Energy and Buildings, 2009(41): 206-211.

(下转第 562 页)

Experiment on treatment of high concentration of undegradable organic wastewater in semi coke production

HAO Ya-long^{1,2}, LÜ Yong-tao¹, MIAO Rui¹, WANG Lei¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Municipal Environmental Protection Bureau of economic and Technological Development Zone Branch Bureau, Xi'an 710018, China)

Abstract: Based on testing of semi-coking wastewater quality, Fenton oxidation, distillation, stripping and anaerobic/aerobic treatment were used for treatment of semi-coking wastewater. The results showed that the semi-coking wastewater biodegradability could be greatly improved by Fenton oxidation method, and both ammonia and volatile phenol could be removed by distillation method, and only ammonia could be removed by blowing off method. After pre-treatment of semi-coking wastewater by Fenton oxidation method, COD and ammonia could be further removed by a combination of both anaerobic and aerobic biological methods. Eventually, a better technical scheme was put forward for treatment of semi-coking wastewater.

Key words: *Semi-coking wastewater; physicochemical treatment; anaerobic and aerobic biological treatment; technical scheme*

Biography: HAO Ya-long, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-015991657440, E-mail: 46035917@qq.com.

(上接第 552 页)

- [20] DESIDERI U, PROIETTI S, SDRINGOLA P. Solar-powered cooling systems: Technical and economic analysis on industrial refrigeration and air-conditioning applications[J]. *Applied Energy*, 2009(86): 1376-1386.
- [21] CHIOU C B, CHIOU C H, CHU C M, et al. The application of fuzzy control on energy saving for multi-unit room air-conditioners [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009(29): 310-316.

Optimization and thermo-dynamic analysis of the refrigerating system

SONG Chang-hua¹, LUO Cheng¹, DING Li¹, WANG De-ming^{1,2}, LI Long-jian²

(1. Department of Power Engineering, Chongqing Electric Power College, Chongqing 400053, China;
2. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Owing to underproduction and processes, the refrigerating equipment, by which the production processes are cooled, often stops. The production runs seriously bad. To solve this problem, a bypass is installed in the refrigerating system, and some cooling water is led to the chilled water system. Then, even if the production load changes greatly, the refrigerating equipment will not stop any more, and the production loss caused by the refrigerating stop has been avoided. According to thermodynamic theory, the issue about cooling water quantity, which is led from the cooling water system into the chilled water system, is analyzed. The led cooling water quantity at the minimum needed refrigerating load is obtained, and the maximum and minimum led cooling water quantities at different needed refrigerating loads are obtained too. Also, a certain led cooling water quantity, at which the refrigerating equipment will not stop any more on any needed refrigerating load, is determined. And the production running stability and security are ensured.

Key words: *refrigerating system; optimization; cooling water; chilled water; security; stability*

Biography: SONG Chang-hua, Associate professor. Chongqing 400053, P. R. China, Tel: 0086-02361373277, E-mail: cqdlsh@163.com.