

严彦,高秀峰.热压式蒸馏水机节能优化分析[J].净水技术,2022,41(4):115-120.

YAN Y, GAO X F. Analysis of energy saving optimization on VCD water distiller[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(4): 115-120.



扫我试试?

热压式蒸馏水机节能优化分析

严彦¹,高秀峰²

(1.西安工程大学机电工程学院,陕西西安 710048;2.西安交通大学化学工程与技术学院,陕西西安 710049)

摘要 热压式蒸馏(VCD)水机相对于多效蒸馏(MED)水机具有效率高、流程简单、占地面积小等优点,在国内外很多场合已经有取代传统蒸馏水机的趋势。文中基于质量和能量守恒方程,设计了一套VCD水机生产流程,建立了相应的热力学模型,研究了产水温度、换热温差、压缩机绝热效率、管道损失对产水能耗、节能率及能效比(COP)的影响。研究表明,VCD水机更适用于产水温度较低场合,且应当选择合适的换热器和压缩机,通过换热温差和提升绝热效率来提高综合性能。

关键词 蒸馏水 药用 热压式蒸馏 热泵 节能

中图分类号: TQ460.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)04-0115-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.04.018

Analysis of Energy Saving Optimization on VCD Water Distiller

YAN Yan¹, GAO Xiufeng²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Compared with the multi-effect distillation (MED) water distiller, vapor-compression distillation (VCD) water distiller has many advantages, and has been a trend to replace the traditional distilled water distiller. Based on the conservation equations of mass and energy, this paper introduced a set of production flow chart of VCD water distiller, and established the corresponding thermodynamic model. Effects of produced water temperature, heat exchange temperature difference, compressor adiabatic efficiency, and pipeline loss to the produced water energy consumption, energy saving rate and coefficient of performance (COP) were studied. Research shows that VCD water distiller is more suitable for occasions with low water production temperature. Appropriate heat exchangers and compressors should be selected to improve comprehensive performance through heat exchange temperature differences and improving adiabatic efficiency.

Keywords distilled water medicinal utility vapor-compression distillation (VCD) heat pump energy saving

在制药行业,药品生产工艺中使用的水主要有饮用水、注射用水、纯化水、无菌注射用水。其中,注射用水常用于溶解或稀释注射用的药物或制剂等,并在药品生产中大量使用^[1]。现阶段制取注射用

水的方法有离子交换法、电渗析法、反渗透法、超过滤器法和蒸馏法^[2-7]。离子交换法不涉及相变、无运动设备、成本低、可去除热原体,但由于无法降低细菌密度,一般需配合其他的工艺方法设计使用。电渗析法能耗低、环境污染小、操作简单、水利用率高,一般作为注射用水生产工艺流程的水预处理方法使用^[8]。反渗透法和超过滤法通常联合使用,超滤对进水进行预处理,以延长反渗透膜的使用寿命,但仍然不能达到注射用水的要求。根据《中国药典》2010年版规定,注射用水必须使用蒸馏法

[收稿日期] 2020-02-23

[基金项目] 国家自然科学基金(51375286);陕西省教育厅科研计划项目(19JK0374);西安工程大学博士科研启动项目(BS201807);西安市现代智能纺织装备重点实验室(2019220614SYS021CG043)

[作者简介] 严彦(1988—),女,博士,研究方向为净水节能技术,E-mail:yy8923507@163.com。

制备^[9]。

采用多效蒸馏(multi-effect distillation, MED)水机制备注射用水仍然是目前应用最为广泛的方法,其技术成熟、无运动设备,所生产的蒸馏水满足现行欧洲、美国、日本和中国药典中关于注射用水的要求^[10-11]。但是, MED 水机仍然存在一些问题,例如换热器数量多、占地面积大、设备自动化程度低、运行压力及温度高,特别是为了减少蒸汽耗量,需要增加效数,进一步放大了上述问题。

随着煤炭和蒸汽价格上升,而电力价格相对平稳,加之国家对环保问题的重视,利用热泵技术来蒸发物料的流程在各行各业日益普及,通常这种技术称为机械蒸汽再压缩(mechanical vapor recompression, MVR)^[12],而在蒸馏水制取和海水淡化等领域通常称为热压式蒸馏(vapor-compression distillation, VCD)^[13]。VCD 水机就是将蒸馏产生的二次蒸汽压缩提升饱和温度后回用,仅需补充一定压缩功和少量热就可以达到蒸发物料的目的^[14-15]。

相较于 MED 水机, VCD 水机的主要优势如下。(1) 节能潜力高。MED 水机蒸汽消耗量与效数相关, 受限于设备成本、控制复杂性等因素, 大多效数小于七, 常用的水机多为四效。而 VCD 水机一次能源利用系数高于八效 MED 水机。(2) 设备简单。VCD 水机相当于单效 MED 水机加一台压缩机, 换热器数量大大减少, 正常运行时也无需大量冷却水来维持背压, 公用工程配套少。(3) 其他优点。VCD 水机具有占地面积小、自动化程度高的优点, 其主要能源来自电能, 碳排放量少, 生产医用蒸馏水时洁净度更高, 且非压力设备, 对于生产安装等资质要求低。

国外诸如 Aqua-Chem、Meco、Stilmas、Bram-Cor 等公司从 20 世纪就开始在全世界销售 VCD 水机, 取得了很好的节能效果, 而国内近年来也有很多公司开发了 VCD 水机, 但是相较于国外的产品还存在一定的差距。

Aqua-Chem 公司计算的 VCD、MED 水机在不同产水量下和不同产水温度下年运行费用的比较, 如图 1 所示^[11]。VCD 水机运行费用明显低于 MED 水机, 但是当最后蒸馏水产物温度越高, 节能效益越低。此外, 比较 Aqua-Chem 公司和 Bram-Cor 公司单位产水量蒸汽耗量发现, 两者差异很大, 前者生蒸汽:蒸馏水约为 0.104, 后者生蒸汽:蒸馏水达到

0.15, 其原因在于两者流程有差异, 特别是压缩机类型不同。

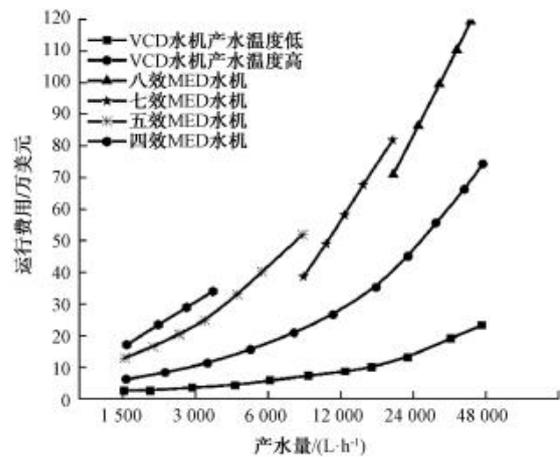


图 1 VCD 和 MED 水机运行费用比较

Fig. 1 Comparison of Operation Cost between VCD and MED Water Distiller

目前, 国内外对 VCD 水机更多集中在产品的介绍、流程分析, 或者直接给出各自的节能效益, 而没有详细的理论分析, 有鉴于此, 本文在合理假设的前提下, 建立了 VCD 水机的热力学模型, 分析产生温度、压缩机绝热效率、蒸发-冷凝换热温差、进排气压力损失等对能效比(COP)和节能效益的影响。

1 VCD 水机数学模型

1.1 VCD 水机流程

图 2 为 VCD 水机工作流程, 图 3 为温熵图。由图 2~图 3 可知, 经过过滤反渗透等处理的低温原水(位点 1)首先与来自主换热器(HEX4)内侧的蒸馏水(位点 6)在热回收换热器(HEX1)中换热, 原水温度升高至位点 2, 而温度降低到位点 9, 达到所需温度的蒸馏产品水, 然后原水在预热器(HEX2)中进一步由一次蒸汽预热, 达到饱和状态(位点 3)后进入蒸馏器塔底, 塔底的饱和水由循环泵抽吸后达到位点 3', 从布水器喷淋下来, 在主换热器(HEX4)外表面蒸发吸热, 形成二次蒸汽(位点 4)由压缩机加压达到位点 5 后进入 HEX4 内侧, 冷凝释放热量蒸发 HEX4 的喷淋水。在蒸馏器底部放置有由一次蒸汽补热的换热器(HEX3), 用于补充 HEX4 内侧不足的热量。

1.2 基本假设

为了简化数学模型难度, 略去一些不重要的因素, 做以下合理假设: (1) 不考虑排污过程, 原水和

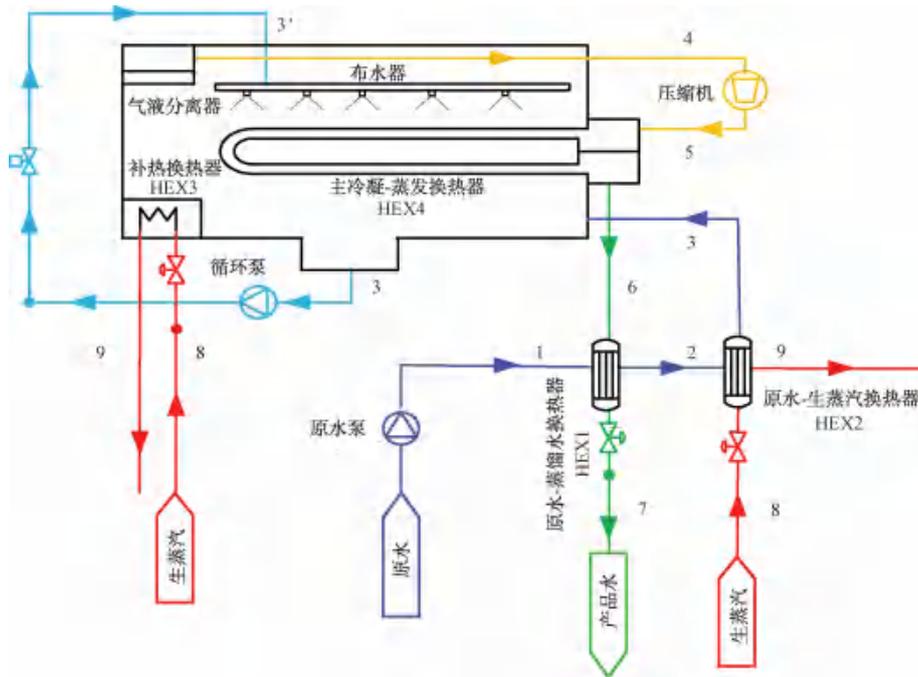


图2 VCD水机流程示意图

Fig. 2 Diagram of VCD Water Distiller

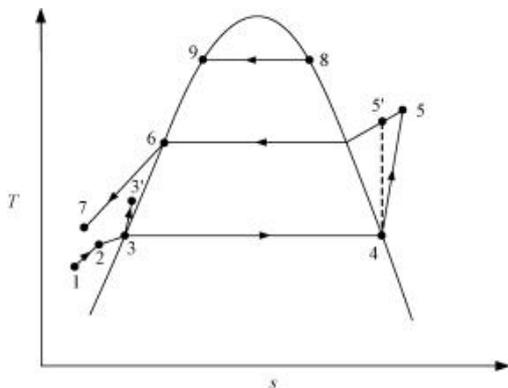


图3 VCD水机温熵图

Fig. 3 Temperature Entropy Diagram of VCD Water Distiller

蒸馏水流量相同;(2)不考虑热损失,不考虑流动阻力;(3)不考虑换热器效率,仅按照热焓平衡关系来计算换热量;(4)机械效率和电机效率为90%,热损失为10%,电费为1元/(kW·h),蒸汽价格为240元/t,一次蒸汽压力为0.3 MPa,一次蒸汽入口为饱和蒸汽,出口为饱和水;(5)计算中忽略水泵的功耗及冷凝水费用;(6)MED水机选择某公司六效水机,并认为其蒸汽耗量固定。

1.3 数学描述

HEX1~HEX4 换热量及压缩机的功耗计算如式

(1)~式(5)。

$$Q_1 = m_w(h_2 - h_1) = m_w(h_6 - h_7) \quad (1)$$

$$Q_2 = m_w(h_3 - h_2) = m_{s2}(h_8 - h_9) \quad (2)$$

$$Q_3 = m_{s3}(h_8 - h_9) \quad (3)$$

$$Q_4 = m_w(h_5 - h_6) \quad (4)$$

$$W = m_w(h_5 - h_4) = m_w \left(\frac{h_5' - h_4}{\eta_c} \right) \quad (5)$$

其中: m_w ——原水的质量流量,kg/s;

m_{s2} ——HEX2 中一次蒸汽的质量流量,kg/s;

m_{s3} ——HEX3 中一次蒸汽的质量流量,kg/s;

h_5' ——等熵压缩后的焓值,J;

$h_1 \sim h_9$ ——位点1~9焓值,J;

η_c ——压缩机绝热效率;

$Q_1 \sim Q_4$ ——HEX1~HEX4 换热量的功耗,J;

W ——压缩机功耗,J。

根据能量守恒关系,可得 HEX3 换热量与其他换热器换热量的关系如式(6)。

$$Q_3 = m_w(h_4 - h_3) - Q_2 - Q_4 \quad (6)$$

上述各式中,只要原水流量、蒸馏产品水的焓值(h_7)及压缩机等熵效率就可以求得各点焓值、换热器热量和压缩机功耗。

热泵和系统的性能系数计算如式(7)~式(8),定义节能率计算如式(9)。

$$COP_c = \frac{Q_4}{W} = \frac{h_5 - h_6}{h_4 - h_5} \quad (7)$$

$$COP_s = \frac{m_w(h_4 - h_3)}{W + Q_2 + Q_3} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{M_{MED} - M_{VCD}}{M_{MED}} \quad (9)$$

- 其中: M_{MED} ——MED 水机产水能耗费用,元/t;
- M_{VCD} ——VCD 水机产水能耗费用,元/t;
- COP_c ——热泵性能系数;
- COP_s ——系统性能系数;
- ε ——节能率。

2 VCD 水机性能分析

2.1 MED 与 VCD 水机节能对比

表 1 为产水量为 1 t/h 的 VCD 水机在额定设计工况下的计算结果,并将其与某公司的六效 MED 水机进行了对比。由表 1 可知,吨产水量蒸汽消耗量减少 53.6%,但压缩机要消耗电功,因此,实际节能效益为 23.1%。

表 1 额定设计工况及每吨产水量下的计算结果
Tab. 1 Calculation Results of Rated Design Conditions and Unit Water Production

项目	参数	数值
额定设计点	原水温度/°C	25.0
	HEX4 的蒸馏温差/°C	5.0
	管外蒸发温度(t_3)/°C	100.0
	管内冷凝温度(t_6)/°C	105.0
	蒸馏水出口温度(t_7)/°C	92.0
计算结果	冷凝压力/MPa	0.12
	蒸发压力/MPa	0.10
	压缩机入口温度/°C	105.0
	压缩机出口温度/°C	126.2
	压缩机压比	1.19
	压缩机功率/kW	14.1
	压缩机排气量(进口)/($m^3 \cdot \min^{-1}$)	28.3

(续表1)

项目	参数	数值
	原水蒸发所需热量/kW	714.1
	热泵能提供的热量/kW	650.4
	一次蒸汽需补热量/kW	63.6
	需消耗电量/(kW·h)	14.1
	需补充的一次蒸汽量/($t \cdot h^{-1}$)	0.118
	压缩机电费/元	11.3
	一次蒸汽费用/元	25.9
	单位产水量总费用/元	37.2
	某公司 MED 一次蒸汽量/($t \cdot h^{-1}$)	0.220
	某公司 MED 一次蒸汽费/元	48.4
	VCD 水机产水节约/($元 \cdot t^{-1}$)	11.2
	节能效率	23.1%

2.2 产水温度对系统性能的影响

图 4 为产水温度与压缩机消耗电费、一次蒸汽费用及节约费用的关系。随产水温度升高,压缩机

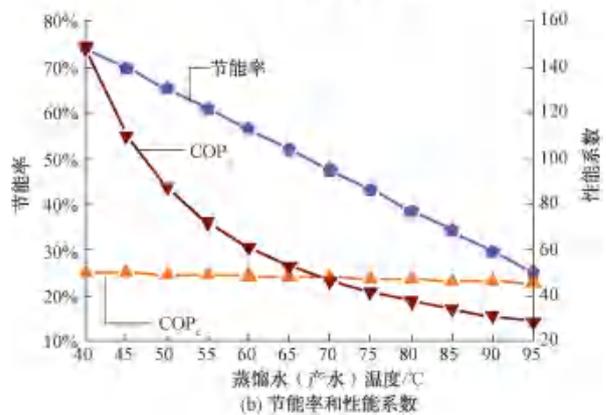
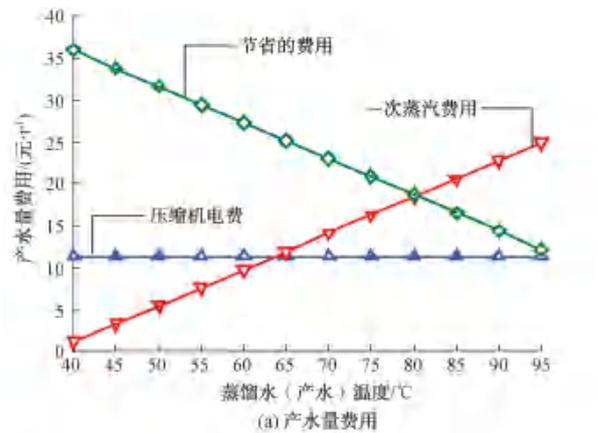


图 4 产水温度对 VCD 水机的影响

Fig. 4 Effect of Water Temperature on VCD Water Distiller

电费不变,但在不同压力下,蒸汽潜热不同,压缩机升压后的二次蒸汽不能蒸发相同流量原水,需要由 HEX3 补充蒸发一定量的二次蒸汽,以维持物料平衡,因此,一次蒸汽费用线性增加。特别是原水入口温度仅为 25.0 °C,离饱和温度(100.0 °C)较远,因此,需额外热量。如产品蒸馏水温度较低,则 HEX4 出口高温蒸馏水的热量可回收用于提升原水温度。但如果产品蒸馏水温度较高,则需要额外的一次蒸汽来提升原水温度。

由图 4 可知,当产品蒸馏水温度低于 70.0 °C 时,一次蒸汽的能耗费低于压缩机电费,但是当高于 70.0 °C 时,则一次蒸汽能耗费高于电费。当产品蒸馏水温度为 40.0 °C 时,无需补充一次蒸汽,节能效益很高。因此,认为 VCD 水机更适用于产品蒸馏水温度较低场合。

2.3 HEX4 换热温差对系统性能的影响

图 5 为当产品蒸馏水温度为 92.0 °C 时,HEX4 管内外换热温差对 VCD 水机节能效益的影响。

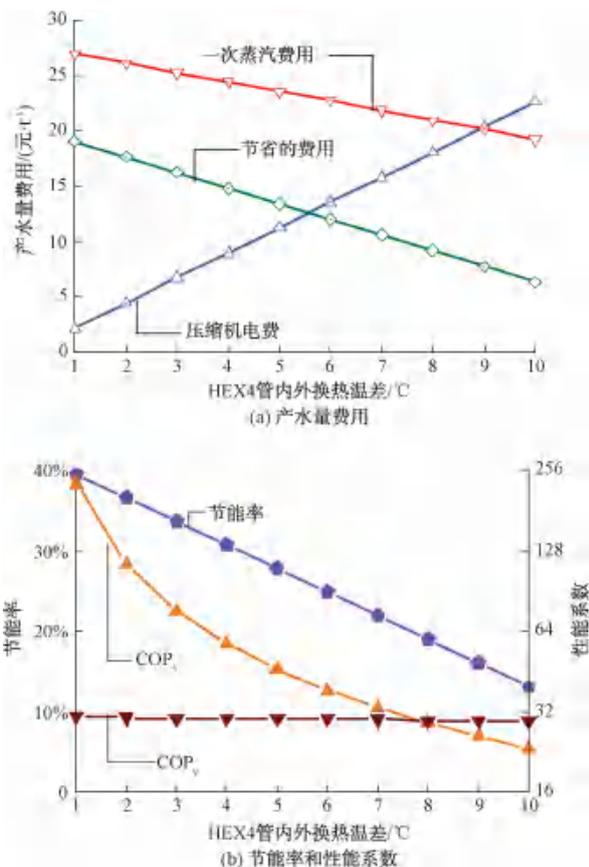


图 5 蒸发-冷凝换热温差对 VCD 水机的影响
Fig. 5 Effect of Evaporation-Condensation Temperature Difference on VCD Water Distiller

VCD 水机对换热温差十分敏感,随着换热温差上升,压缩机压比增加,所需功率也增加,能耗线性增加。这与其他热泵蒸发系统中的结论一致,即在设计条件允许的情况下,应尽可能减少换热温差以降低压缩机的功耗,提高系统的性能系数。

2.4 压缩机绝热效率对系统性能的影响

图 6 为压缩机绝热效率对 VCD 水机的影响,显然绝热效率越低,压缩机功耗越大。但由于绝热效率反映了压缩机中的磨损摩擦等因素,而这些摩擦损失总是转换成热量被压缩机排气带走,最终用于蒸发原水,因此,一次蒸汽量反而会略有减少,但是减少量没有压缩机功耗增加多,所以总节能效益下降。相比图 5~图 6,压缩机绝热效率对 VCD 水机的影响并不大。

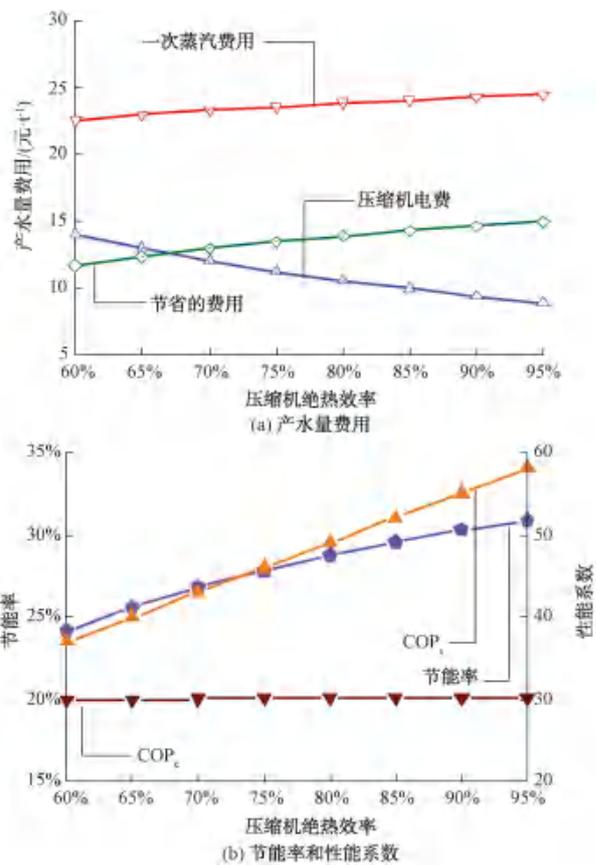


图 6 压缩机绝热效率对 VCD 水机的影响
Fig. 6 Effect of Compressor Adiabatic Efficiency on VCD Water Distiller

2.5 压力损失对节能率的影响

图 7 为进排气压力损失对节能率的影响。进排气压力损失每增加 1 kPa,则节能率会降低 1%。压

压缩机排气压力远高于进气压力,因此,进气损失的影响更大,应该增加进气管道尺寸、减少距离。

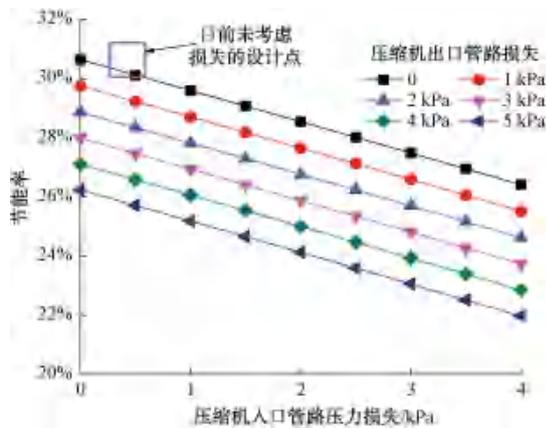


图7 管路压力损失对VCD水机的影响

Fig. 7 Effect of Pipeline Pressure Loss on VCD Water Distiller

3 结论

VCD水机可以回收二次蒸汽热量,减少蒸汽耗量。本文在选择合理假设的基础上,建立了VCD水机的热力学模型,计算VCD水机一次蒸汽耗量、压缩机功耗、节能率等参数,得出如下结论。

(1)在本文选择的设计工况下,VCD水机的蒸汽耗量仅需六效MED水机一半左右,但是VCD水机需要消耗压缩机电功,综合节能率达到23.1%,具有良好节能效果。

(2)产生温度对VCD水机节能率不利,随着温度升高,节能率逐渐下降,其原因在于二次蒸汽的利用率降低,VCD水机更适用于产水温度较低场合。

(3)增加主冷凝-蒸发换热器的温差、降低压缩机的绝热效率、进排气管路流动损失均会造成VCD水机压缩机功耗上升、节能率下降,选择水平管降膜等低温差换热器和高绝热效率的离心式压缩机,均可提升VCD水机性能。此外,进气损失的影响较排气损失大,因此,压缩机应当尽可能靠近及二次蒸汽并增加管道直径。

(4)目前,研究中所建立的数学模型仅考虑了

主冷凝-蒸发换热器HEX4的温差,而没有考虑其他换热器温差,同时并没有建立MED水机模型,而是直接选用了厂家实际参数,因此,需要在未来进一步展开相关研究。

参考文献

- [1] 李光达,石秀菊,刘永刚. 注射用水的制备工艺、设备及质量控制研究[J]. 机电信息, 2015(29): 1-11.
- [2] 张放,时艳. 小型反渗透纯水制备系统工艺设计[J]. 工业加热, 2021, 50(7): 16-21.
- [3] 张洪渠. 制药纯水制备和分配的工艺优化措施[J]. 化工设计通讯, 2021, 47(7): 70-74.
- [4] 许金秋,许晶晶,范义凤,等. 反渗透技术在制药用纯化水制备中的应用分析[J]. 山东化工, 2021, 50(13): 157-159.
- [5] 陈冬. 反渗透膜及在水处理中的应用[J]. 山东化工, 2021, 50(18): 269-270.
- [6] 吴宏卫. 超滤技术制备注射用水及其质量考察[J]. 药学实践杂志, 2001, 45(5): 290-291.
- [7] 黄东月,罗建中,邹锦元,等. 电去离子新技术及其制备注射用水的可行性分析[J]. 水处理技术, 2012, 38(10): 107-111.
- [8] MOHAMMADI T, RAZMI A, SADRZADEH M. Effect of operating parameters on Pb^{2+} separation from wastewater using electrodialysis[J]. Desalination, 2004(4): 379-385.
- [9] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010.
- [10] COLLENTRO W V. Pharmaceutical water system fundamentals [J]. Journal of Validation Technology, 2011, 17(3): 17-23.
- [11] 王立江. 制药用水质量标准及制备系统技术的探讨[J]. 中国医药工业杂志, 2018, 49(9): 39-42.
- [12] 李伟,朱曼利,洪厚胜. 机械蒸汽再压缩技术(MVR)研究现状[J]. 现代化工, 2016, 36(11): 1230-1238.
- [13] 陈刚. 热压式蒸馏水机节能实质及节能效益[J]. 建筑工程技术与设计, 2015, 34(14): 19-25.
- [14] 任红雨,周立法. 蒸汽压缩工艺制备注射用水的水质与节能降耗探析[J]. 化工与医药工程, 2016, 37(5): 54-58.
- [15] WANG Z F, WANG Y J, XU G Y, et al. Sustainable desalination process selection: Decision support framework under hybrid information[J]. Desalination, 2019, 465: 44-57. DOI: 10.1016/j.desal.2019.04.022.