

压水堆核电站工业供汽系统技术可行性研究

张玉祯[✉], 廖佰凤, 汪静, 陈晓娟

(东方电气(广州)重型机器有限公司, 广东 广州 511455)

摘要: [目的] 为研究压水堆核电站为周边工业区提供工业用蒸汽的技术可行性。[方法] 以某1 000 MW压水堆核电站主蒸汽为热源, 为周边提供工业蒸汽需求量300 t/h, 蒸汽压力为1.8 MPa, 蒸汽温度为250 °C为例, 论证了利用压水堆核电站二回路蒸汽加热工业用水产生满足工业需求的蒸汽转换系统的技术可行性。从热力学第一定律和第二定律理论出发, 设计了该系统的工艺流程, 计算了系统中关键换热设备的热力参数。[结果] 得出热源疏水温度的合理值为65 °C, 如疏水温度低于60 °C, 在二级预热器中将出现热源温度低于工业水温度的情况, 将违背热力学第二定律。[结论] 研究成果可为压水堆核电站工业供汽提供技术参考。

关键词: 压水堆核电站; 工业供汽; 核能供热; 分级利用; 蒸汽转换系统; 热源疏水温度

中图分类号: TL4; TM623.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)02-0120-05

开放科学(资源服务)二维码:



Feasibility Research in the Technology for Industrial Steam Supply by PWR Nuclear Power Plant

ZHANG Yuzhen[✉], LIAO Baifeng, WANG Jing, CHEN Xiaojuan

(Dongfang (Guangzhou) Heavy Machinery Co., Ltd., Guangzhou 511455, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] The paper aims to research the technology feasibility of steam conversion system for industrial steam supply by pressurized water reactor (PWR) nuclear power. [Method] we took a 1 000 MW (PWR) nuclear power plant as an example, supplying industrial steam 300 t/h, 1.8 MPa and 250 °C. This paper demonstrated the technical feasibility of a steam conversion system which could meet the industrial steam needs by using steam in the secondary loop of PWR nuclear power plant to heat industrial water, based on the first law and the second law of thermodynamics. This paper designed the process flow of the system, calculated the thermodynamic parameters of the key heat exchangers in the system. [Result] The reasonable value of the heat source drainage temperature was analyzed. Our data suggest heat source drainage temperature is 65 °C for the industrial steam supply of PWR nuclear power plants. The temperature of heat source would be lower than the industrial water if the drainage temperature was lower than 60 °C, which would violate the second law of thermodynamics. [Conclusion] The research results can provide technical reference for industrial steam supply of PWR nuclear power plant.

Key words: pressurized water reactor nuclear power plant (PWR); industrial steam supply; nuclear energy heating; hierarchical utilization of energy; steam conversion system; heat source drainage temperature

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

钢铁、石油、化工等行业对蒸汽需求量大, 这些企业是国家基础设施建设和发展的重要支持性企业。为支持实现国家“碳达峰、碳中和”的战略目标, “十四五”是中国实现“碳达峰、碳中和”的关键时期, 探

索这些重点高排放企业的减排方案是目前迫切的行动项次。

核能技术在中国已得到广泛成熟地发展, 是一种公认的安全可靠的零碳排放清洁能源, 国内多家

收稿日期: 2022-01-05 修回日期: 2022-04-25

基金项目: 东方电气(广州)重型机器有限公司科研项目“压水堆核电站蒸汽转换系统设计研究”(DFHMK0123)

企业已开展了“碳中和”目标性核能的发展策略研究^[1-3],研究核能作为绿色能源更广泛的服务于社会能源需求的可能性;俄罗斯已在核能供热技术方面开展了深入的研究^[4];我国也开展了相关的研究,探讨核能集中供热的技术可行性^[5-10];国电投集团以AP1000核电机组为例,深入地研究了核电汽轮机抽汽供民用采暖供热方案的可行性^[11-13];以上的这些研究重点在于利用核能为周边居民提供采暖用热水,我国目前还没有核能供工业蒸汽技术方面的研究成果。

压水堆一回路是含放射性物质的高压水,考虑到运行人员及周围环境的安全性,不能直接利用压水堆一回路的热量;压水堆二回路中从蒸汽发生器中出来的主蒸汽参数为5.3 MPa, 267.6 °C^[3],如直接用二回路低压缸排汽作为工业供汽,将导致二回路介质流失或因流经过长的管道回收的水质不满足电厂要求。本文借鉴压水堆核电站厂内用蒸汽转换技术方案^[14],考虑增加一个专门的工业用汽回路,用核电厂的二回路蒸汽作为热源,产生工业用汽回路的蒸汽作为工业供汽。

1 蒸汽转换系统工艺流程布置

如果用主蒸汽热源来将常温工业用水直接加热到250 °C的工业用蒸汽,从热力学第二定律来看,将造成大量的熵增和烟损,热量品质下降,热效率低。另外,常温工业用水中溶解有大量矿物质和氧气,在加热蒸发过程中矿物质和氧气将解析出来,如果直接加热成蒸汽,解析出的矿物质将集聚在设备表面,形成一层厚厚的污垢,将影响到设备的换热性能,由于污垢与设备材料的差异,也将影响设备的性能和寿命;加热蒸发过程中解析出来的大量氧气将腐蚀设备的碳钢材料,加速设备的损坏,影响设备的寿命;另一方面,若直接将进口温度为常温的水加热到250 °C的蒸汽,设备各部分的温差大,热应力和热冲击大,不利于设备的安全稳定运行。

因此,利用压水堆二回路热源产生1.8 MPa、250 °C的工业用汽的蒸汽转换工艺应综合考虑热的利用率、设备的安全性及经济性。

工业供水回路通过两级水泵进行升压,第一级泵位于供水入口,将水升压到除氧器工作压力,第二级泵位于除氧器的出口,目的是将水进一步升压至

需求的供汽压力及克服管道的压损。分级升压有三个好处,首先,分级升压有利于降低泵的单机负荷,提高泵的可靠性;其次,分级升压可以降低除氧器加热蒸汽压力,加热蒸汽可以是来自自己做过部分功的低压缸抽汽,实现热源的分级利用;最后,可降低除氧器及一级预热器的的工作压力,从而节省除氧器及一级预热器的设备成本。

工业供热回路的冷凝回水经泵1后进入一级预热器,一级预热器的目的是利用较低温度的加热蒸汽疏水余热,将工业供水加热到接近除氧器饱和温度,因此可减少除氧器的蒸汽消耗量,提高热量的利用效率。

从除氧器出来的饱和水经二级泵加压后过冷度约为90 °C,如直接进入蒸发器,蒸发器内部需设置预热段,将使蒸发器的内部结构复杂,换热性能差。因此,设置了外置式二级预热器,二级预热器是利用蒸发器排出的疏水的余热将水加热到接近工作压力1.82 MPa下的饱和温度。为维持水在管道中的稳定流动,消除汽蚀,二级预热器出口水温应至少预留5 °C的过冷度。

二级预热器出口水进入蒸发器壳体,吸收加热蒸汽凝结热而转化为蒸汽,在蒸发器中,为大空间沸腾换热,出口的蒸汽为饱和蒸汽,温度为207.6 °C。

因蒸发器的加热蒸汽凝结水的饱和温度比壳侧的蒸汽温度高50 °C,为充分利用疏水余热,将蒸发器设置为两级,一级蒸发器为利用疏水余热进行加热蒸发产生工业蒸汽,二级蒸发器为加热蒸汽凝结换热产生工业蒸汽,一级蒸发器和二级换热器的壳侧工业蒸汽管道为并联结构,管程的热源流体管道为串联结构。为简化管道的布置,节省设备成本,一级和二级蒸发器在设备设计时也可融合设计到一个壳体中。

为得到工业所需的250 °C的过热蒸汽,还需要设置过热器进行进一步换热,加热蒸汽为压水堆二回路中蒸汽发生器的主蒸汽(参数为5.3 MPa, 267.6 °C)。

分级加热的蒸汽转换系统工艺流程如图1所示。

2 蒸汽转换系统热力参数计算方法

2.1 加热蒸汽消耗量计算

为论证上一章节布置的蒸汽转换系统的可行性,

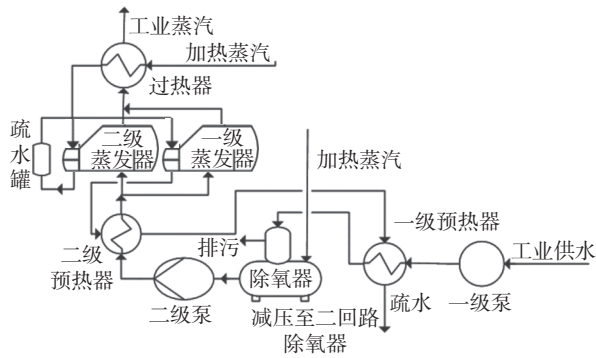


图1 蒸汽转换系统工艺流程图

Fig. 1 The process of steam conversion system

需要依据能量守恒原理计算加热蒸汽消耗量以及各个设备的热力参数,确保各设备的热力参数符合热力学第二定律。

对于本文论证的蒸汽转换系统,已知的条件是加热蒸汽温度和压力,工业用汽压力、温度和流量,工业供水为常温常压自来水。

为计算蒸汽转换系统的蒸汽消耗量,需要先假设加热蒸汽侧的最终疏水温度。疏水温度越高,越有利于各换热器的换热,但将消耗更多的蒸汽,不利于蒸汽转换系统的热效率。疏水温度越低,虽然有利于提高蒸汽转换系统的热效率,但换热设备的端差过小,将增加换热设备的成本。参考相关文献^[15],水-水换热器的最小端差为5℃,汽-汽换热器的最小端差为15℃。

加热蒸汽消耗量由以下热平衡公式(1)计算:

$$w_h = w_c(h_{co} - h_{ci}) / \eta(h_{hi} - h_{ho}) \quad (1)$$

式中:

h_{co} ——冷侧流体出口焓值(kJ/kg);

h_{ci} ——冷侧流体进口焓值(kJ/kg);

h_{hi} ——热侧流体入口焓值(kJ/kg);

h_{ho} ——热侧流体出口焓值(kJ/kg);

w_c ——冷侧流体流量(kg/s);

w_h ——热侧流体流量(kg/s);

η ——蒸汽转换系统热效率,即工业用蒸汽回路吸热与加热蒸汽放热之比。

2.2 换热设备热力参数计算

对于各换热设备的热力参数,根据运行经验及各设备的工作机理,可确定如下参数:为避免工业管道的汽蚀,推荐除氧器进口工业供水过冷度为20℃^[16];蒸发器入口水过冷度为5℃;二级蒸发器的加热蒸

汽出口为饱和水。

对于一级预热器,已知工业供水压力、出水过冷度、进水温度、工业供水流量以及热侧疏水出口温度,根据已知的水的温度和压力可查水的物性参数表获得工业供水侧进出口及疏水出口比焓,由此可根据能量守恒公式(2),计算出热侧疏水入口焓值,由焓值和压力即可查水物性表获得温度参数。

$$h_{hi} = \frac{w_c(h_{co} - h_{ci})}{\eta w_h} + h_{ho} \quad (2)$$

式中各变量含义与公式(1)相同。

对于二级预热器,已知冷侧流体压力、进口焓值、出口水过冷度、流体流量以及热侧疏水出口焓值,同样根据能量守恒公式可计算二级预热器热侧疏水入口焓值,由焓值和压力即可查水物性表获得疏水入口温度参数。

对于过热器,已知冷侧流体压力、进口焓值、出口蒸汽温度、流体流量以及热侧加热蒸汽进口温度、压力,出口焓值,根据能量守恒公式(3)可计算过热器热侧流体出口焓值,由焓值和压力即可查水物性表获得热侧流体出口温度。

$$h_{ho} = h_{hi} - \frac{w_c(h_{co} - h_{ci})}{\eta w_h} \quad (3)$$

3 计算结果

本文以工业蒸汽需求量300 t/h,蒸汽压力为1.8 MPa,蒸汽温度为250℃,加热蒸汽为压水堆二回路中蒸汽发生器的主蒸汽(参数为5.3 MPa,267.6℃)为例,分别计算了热侧疏水最终温度为65℃、70℃、80℃的热力参数,加热蒸汽耗汽量计算结果如表1所示,各设备的流体温度值如图2~图4所示。

表1 加热蒸汽耗汽量与疏水温度的关系表

Tab. 1 The relationship between required heat steam and drain temperature

疏水温度/℃	加热蒸汽耗汽量/(t·h ⁻¹)
65	340.0
70	342.8
80	348.5

4 结果讨论

由热力学第二定律可知,对于换热器而言,为使热量从压水堆二回路蒸汽(热源流体)传递给工业供水回路(冷源流体),热源流体的温度应始终高于冷

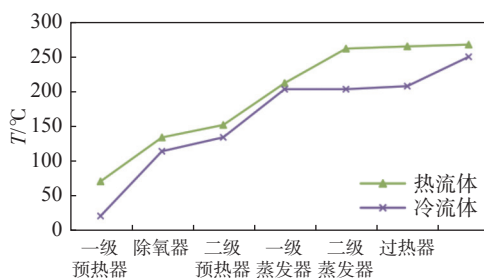


图2 疏水温度为 65 °C 时各换热设备的流体温度
Fig. 2 The fluid temperature of exchange at 65 °C drain temperature

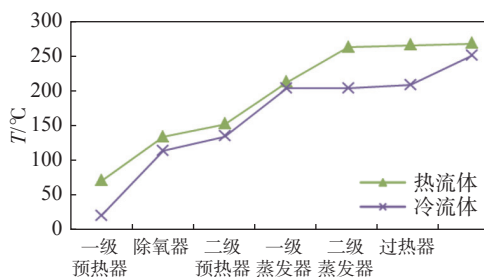


图3 疏水温度为 70 °C 时各换热设备的流体温度
Fig. 3 The fluid temperature of exchange at 70 °C drain temperature

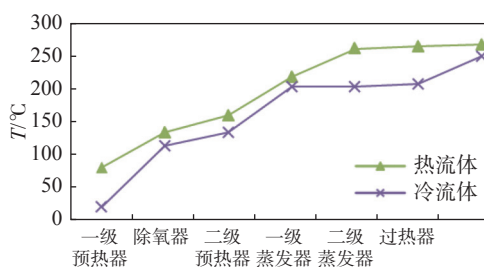


图4 疏水温度为 80 °C 时各换热设备的流体温度
Fig. 4 The fluid temperature of exchange at 80 °C drain temperature

源流体的温度。本文计算考虑的疏水温度在 65~80 °C 的范围均符合热力学第二定律的要求。

由表 1 可知, 如将热源疏水温度从 80 °C 降低到 65 °C, 加热蒸汽消耗量从 348.5 kg/s 降低到 340.0 kg/s, 加蒸汽耗汽量相对减少了 2.5%, 降低热源疏水温度, 可减少加热蒸汽的消耗量, 提高了蒸汽转换系统的经济性。

由图 3~图 4 可知, 设备的最小端差位置是在二级预热器的下端差(热流体入口温度与冷流体出口温度之差)以及一级蒸发器的上端差(热流体出口温度与冷流体入口温度之差)。

当疏水温度为 80 °C 时, 最小端差值为 15.4 °C;

当疏水温度为 65 °C, 最小端差值为 5.4 °C; 疏水温度从 80 °C 降低到 65 °C, 将导致二级预热器的传热温差减少为 1/3, 在其他条件不变的情况下, 疏水温度为 65 °C 时二级预热器需要的换热面积约为疏水温度为 80 °C 时的 3 倍, 其他换热器面积也将成倍的增加。

由以上结果可知, 蒸汽转换系统最低疏水温度为 65 °C, 如继续降低疏水温度, 最小端差值将小于 5 °C, 疏水温度如降低 2 °C, 二级预热器设备换热面积将增加一倍, 而且结构变得更复杂, 设备成本增加。如疏水温度降低到 60 °C, 在二级预热器中将出现热源温度低于冷源温度的情况, 将违背热力学第二定律, 该系统技术上不可行。

5 结论

本文研究了利用压水堆核电站二回路蒸汽进行加热产生工业用汽的蒸汽转换系统方案具备技术可行性, 以某压水堆参数为例, 假设加热蒸汽参数为 5.3 MPa, 267.6 °C, 工业用汽参数为 1.8 MPa、250 °C、300 t/h, 可得出以下结论:

蒸汽转换系统内设置预热器、除氧器、蒸发器以及过热器等设备进行分级加热, 对热源进行分级利用, 不仅可提高加热蒸汽的有效利用率, 而且可提高设备运行的安全性。

降低疏水温度可减少加热蒸汽的消耗量, 可提高蒸汽转换系统的经济性, 但将增加设备的成本。

计算结果显示, 热源疏水温度最合理值为 65 °C, 如疏水温度低于 60 °C, 在二级预热器中将出现热源温度低于冷源温度的情况, 将违背热力学第二定律。

参考文献:

- [1] 郭天超, 孙善星, 张文娟. “碳中和”目标下核能积极有序发展策略研究 [J]. 中国能源, 2021, 43(5): 44-50. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.05.007.
GUO T C, SUN S X, ZHANG W J. Research on the active and orderly development strategy of nuclear energy under the goal of carbon neutrality [J]. Energy of China, 2021, 43(5): 44-50. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.05.007.
- [2] 王晓丁, 李太斌, 孙磊, 等. 低碳经济下我国新能源产业的现状及展望 [J]. 新型工业化, 2021, 11(5): 20-21+24. DOI: 10.19335/j.cnki.2095-6649.2021.5.009.
WANG X D, LI T B, SUN L, et al. The present and prospect of Chinese new energy industry under the low carbon economy [J]. The Journal of New Industrialization, 2021, 11(5): 20-21+24. DOI: 10.19335/j.cnki.2095-6649.2021.5.009.
- [3] 王海洋, 荣健. 碳达峰、碳中和目标下中国核能发展路径分析 [J]. 中国电力, 2021, 54(6): 86-94. DOI: 10.11930/j.issn.

- 1004-9649.202103141.
WANG H Y, RONG J. Analysis on China's nuclear energy development path under the goal of peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality [J]. *Electric Power*, 2021, 54(6): 86-94. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202103141.
- [4] ALEKSANDR S, 赵金玲. 俄罗斯核能供热技术与现状分析 [J]. *区域供热*, 2019(5): 126-132. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2019.05.020.
ALEKSANDR S, ZHAO J L. Development and status analysis of nuclear heating technology in Russia [J]. *District Heating*, 2019(5): 126-132. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2019.05.020.
- [5] 李小斌, 张红娜, 曲凯阳, 等. 核能集中供热系统优越性分析 [J]. *华电技术*, 2020, 42(11): 69-82. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.11.011.
LI X B, ZHANG H N, QU K Y, et al. Analysis on the superiority of nuclear energy district heating systems [J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(11): 69-82. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.11.011.
- [6] 程忠志, 李永红, 杜志锋. 核能供热发展及威海市未来供热规划的设想 [J]. *区域供热*, 2021(4): 137-142. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2021.04.022.
CHENG Z Z, LI Y H, DU Z F. The development of nuclear power heating and the assumption of future heating planning in Weihai City [J]. *District Heating*, 2021(4): 137-142. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2021.04.022.
- [7] 杜欣, 王冰, 杨冬. 核能集中供暖的可行性分析 [J]. *区域供热*, 2021(2): 49-53+67. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2021.02.010.
DU X, WANG B, YANG D. Feasibility analysis of nuclear energy central heating [J]. *District Heating*, 2021(2): 49-53+67. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2021.02.010.
- [8] 曾斌, 李言瑞, 屈凡玉, 等. 核能供热发展模式研究 [J]. *能源*, 2022(3): 68-71.
ZENG B, LI Y R, QU F Y, et al. Research on the development model of nuclear energy heating supply [J]. *Energy*, 2022(3): 68-71.
- [9] 吴放, 聂海亮, 范晓君, 等. 辽东半岛能源结构分析与核能应用展望研究 [J]. *中国能源*, 2021, 43(5): 66-72. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.05.010.
WU F, NIE H L, FAN X J, et al. Analysis of energy structure in Liaodong peninsula and prospect of nuclear energy application [J]. *Energy of China*, 2021, 43(5): 66-72. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.05.010.
- [10] 陈聪, 曾畅, 宋丹戎, 等. 压水堆核能热电多联产运行模式的经济性分析 [J]. *节能技术*, 2021, 39(6): 556-560. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2021.06.016.
CHEN C, ZENG C, SONG D R, et al. Economic analysis of combined heat, power and water operation mode for pressurized water reactor nuclear energy [J]. *Energy Conservation Technology*, 2021, 39(6): 556-560. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2021.06.016.
- [11] 于航, 耿文龙. AP1000核电机组核能供热示范项目综合评价 [J]. *山东电力技术*, 2021, 48(12): 72-76. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2021.12.013.
YU H, GENG W L. Comprehensive evaluation for a nuclear heating demonstration project of AP1000 nuclear power unit [J]. *Shandong Electric Power*, 2021, 48(12): 72-76. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2021.12.013.
- [12] 周正道, 华志刚, 包伟伟, 等. AP1000核电机组供热方案研究及分析 [J]. *热力发电*, 2019, 48(12): 92-97. DOI: 10.19666/j.rlfid.201905153.
ZHOU Z D, HUA Z G, BAO W W, et al. Study on heat supply scheme for AP1000 nuclear steam turbine [J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(12): 92-97. DOI: 10.19666/j.rlfid.201905153.
- [13] 武心壮, 夏栓. AP1000核电机组抽汽供热经济性分析 [J]. *汽轮机技术*, 2020, 62(6): 475-477. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2020.06.020.
WU X Z, XIA S. Thermo-economics analysis for extraction heat supply of AP1000 nuclear power plant unit [J]. *Turbine Technology*, 2020, 62(6): 475-477. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2020.06.020.
- [14] 苏明远. 核电厂蒸汽转换系统给水泵振动问题分析 [J]. *科技资讯*, 2016, 14(6): 27-28+30. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2016.06.027.
SU M Y. Analysis on vibration problem of feed pump in steam conversion system of nuclear power plant [J]. *Science & Technology Information*, 2016, 14(6): 27-28+30. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2016.06.027.
- [15] 藏希年. 核电厂系统及设备 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
ZANG X N. Nuclear power plant systems and equipment [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [16] 蔡锡琮. 高压给水加热器 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
CAI X Z. High pressure feed water heater [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995.
- [17] 蔡锡琮, 蔡文钢. 火电厂除氧器 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
CAI X Z, CAI W G. Thermal power plant deaerator [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

作者简介:



张玉祯

张玉祯 (第一作者, 通信作者)

1979-, 女, 四川资中人, 高级工程师, 中科院广州能源研究所热能专业硕士, 从事核电站各类换热器及压力容器研发工作 (e-mail) zhangyz@dongfang.com。

项目名称 压水堆核电站蒸汽转换系统设计研究

承担单位 东方电气(广州)重型机器有限公司科研项目 (DFHM-K0123)

项目概述 项目主要针对现有的 CPR1000、AP1000 等压水堆对周边工业供汽技术改造的可行性进行研究, 研究三回路的热平衡参数计算方法及各设备节点参数选取, 对各设备进行设备选型设计, 为项目系统设计提供设备可行性支撑。

主要创新点 与现有的民用供热水供热方案相比, 本项目研究的是提供参数达 250 ℃ 以上的工业蒸汽的技术可行性, 系统更复杂。本项目创新地设计了一套利用压水堆主蒸汽或高压缸抽汽加热三回路工业水系统提供工业蒸汽的工艺流程及热平衡设计计算方法, 评估了各换热设备选型设计的可行性。

(责任编辑 李辉)