

铅基反应堆主换热器结构优化及热工水力分析

王桂梅, 陈红丽

(中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽合肥 230027)

摘要:主换热器是铅基反应堆的关键热传输部件,直接影响反应堆的经济性与安全性.以液态铅铋冷却自然循环反应堆的管壳式主换热器为研究对象,从换热管长度 L 、外径 d_o 、壁厚 c 、管间距 P 这4方面对换热器进行热工水力分析研究,并采用 JF 因子对换热器的综合性能进行评价,在此基础上,采用贡献比 CR 及平均信噪比 \overline{SN} 评价因子得到最优的结构参数组合A1B2C1D2.研究表明,管长 L 对换热器性能影响最大,而管间距 P 对换热器性能的影响几乎可以忽略.

关键词:铅基反应堆;主换热器;热工水力分析; JF 因子

中图分类号:TK172 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.12.008

引用格式: Wang Guimei, Chen Hongli. Structure optimization and thermal-hydraulic analysis of primary heat exchanger of a lead-based reactor[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(12):1007-1013.

王桂梅, 陈红丽. 铅基反应堆主换热器结构优化及热工水力分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(12):1007-1013.

Structure optimization and thermal-hydraulic analysis of primary heat exchanger of a lead-based reactor

WANG Guimei, CHEN Hongli

(School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The primary heat exchanger is a key heat transfer component for lead-based reactors, which directly affects the economy and security of the reactor. Here, based on the model of heat exchanger of a lead-based natural circulation reactor, the influences of the tube length, outer diameter, wall thickness and tube pitch on the thermal-hydraulic analyses were discussed. JF factor was used to evaluate the comprehensive performance of the heat exchanger, on the basis of which, the best structure parameter A1B2C1D2 was determined by using CR and \overline{SN} factor. The results show that tube length makes a greatest contribution to comprehensive performance, and the influence of tube pitch is almost negligible.

Key words: lead-based reactor; primary heat exchanger; thermal-hydraulic analysis; JF factor

收稿日期:2013-12-26;修回日期:2014-03-07

基金项目:中国科学院战略先导科技专项(XDA03040000)资助.

作者简介:王桂梅,女,1988年生,硕士.研究方向:反应堆热工水力学分析. E-mail: gmeiwang@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:陈红丽,博士/教授. E-mail: hlchen1@ustc.edu.cn

0 引言

液态铅及铅合金共晶体(如铅铋合金,简称铅基材料)冷却反应堆和加速器驱动次临界系统(accelerator driven sub-critical system, ADS)由于具有良好的中子学性能、热工水力学性能和安全特性,已成为第四代核能系统的重要发展方向^[1-2]。国际上正在开展铅基反应堆概念设计工作的国家主要有俄罗斯、美国、欧盟、日本及韩国^[3-6],但铅基反应堆最终用于商业核电站还需进行大量的研究。

主换热器是铅基反应堆的关键热传输部件,直接影响反应堆的经济性与安全性。目前,铅基反应堆换热器多采用管壳式结构,换热管主要有螺旋管^[3]、套管^[4]、单管直管^[5]、双层紧密贴合直管^[6]等几种类型,但在设计过程中仍存在较多具有挑战性的科学与技术难题。

为探索换热管束结构对铅基研究堆换热器传热及流动性能的影响作用,本文以中国科学院战略性先导专项“未来先进核裂变能-ADS 嬗变系统”铅铋冷却反应堆^[7]的主换热器为研究对象,从换热管长度 L 、外径 d_o 、壁厚 c 、管间距 P 这 4 方面进行热工水力分析研究,并采用 JF 因子、贡献比 CR 及平均信噪比 SN 对主换热器性能进行评估,得到最优的换热管束结构参数。

1 换热器设计相关理论计算方法

计算过程中,铅铋的物性参数采用日本九州大学 koji 学者拟合的公式进行计算^[8],水的物性参数从载热质热物性计算程序及数据手册^[9,10]中查取。

1.1 传热计算

以热量收支平衡为基础,换热管两侧冷却剂为逆流流动方式,则

$$Q = KA\Delta t_m \quad (1)$$

式中, $Q/(W \cdot s^{-1})$ 为换热器设计热功率; $K/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ 为以换热管外径为基准的总传热系数; A/m^2 为以换热管外径为基准的有效传热面积, $A = n\pi d_o L$,其中, L/m 为换热管有效长度, d_o/m 为换热管外径; $\Delta t_m/^\circ C$ 为逆流对数平均温差。

总传热系数的计算公式为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right) + \frac{1}{h_2} + R_F} \quad (2)$$

式中, $h_1/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$, $h_2/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ 分

别为铅铋合金、加压水的对流换热系数; $\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ 为换热管壁材料的热导率,换热管材为 316L 不锈钢; d_o/m , d_i/m 分别是换热管外径和内径; $R_F/(m^2 \cdot K \cdot W^{-1})$ 为污垢热阻。

1.2 对流换热系数计算

液态铅铋冷却剂在换热管束间流动,数学模型与液态重金属在堆芯燃料棒间流动的数学模型相似,因此采用液态重金属在燃料棒间流动的传热关系式进行理论计算。

铅铋传热 Nu 数经验公式:

$$Nu = A + 0.014 Pe^{0.8} \quad (3)$$

$$A = \begin{cases} 4.5, Pe \leq 1000; \\ 5.4 - 9 \times 10^{-4} Pe, 1000 \leq Pe \leq 2000 \\ 3.6, Pe \geq 2000. \end{cases}$$

二次侧冷却剂加压水在换热管内流动时没发生相变,因此单相水的 Nu 数计算采用 Dittus-Boelter 提出的经验公式,定性温度采用流体平均温度,特征长度采用换热管内径,有

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (4)$$

对流换热系数的计算公式为

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (5)$$

式中, $h/(W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1})$ 为对流换热系数; Pr 为普朗特数; Pe 为佩克莱数; $\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$ 为流体导热率; d/m 为水力直径。

1.3 单相流动压降计算

因换热管两侧冷却剂在运行过程中无相变发生,采用 Darcy 公式计算单相沿程摩擦压降:

$$\Delta P = f \frac{L}{d_e} \frac{\rho v^2}{2} \quad (6)$$

式中, d_e/m 为流体流道的当量直径; L/m 为流体流道长度; $\rho/(kg \cdot m^{-3})$ 为流体密度,取流体平均温度作为定性温度; $v/(m \cdot s^{-1})$ 为流体流速; f 为 Darcy-Weisbach 摩擦系数,它与流体的流动性质、流动状态、受热情况、通道几何形状、表面粗糙度等因素有关。

1.4 JF 因子

换热器主要是用来进行热量交换的设备,因此大多数情况下,其换热能力是我们关注的重点。本文在进行换热器结构设计时,希望用尽可能小的投入(一回路压损)获得尽可能多的效益(换热量)。

目前,基于热力学第一定律的 JF 因子评价方法使用简单、直观,因此被广泛采用;如文献^[11]提

出采用 JF 因子来分析换热器性能;文献[12]采用 JF 因子方法来评价板翅式换热器翅片结构尺寸对换热器性能的影响等。

对流换热过程中, JF 因子表达式为

$$JF = \frac{K/K_0}{(\Delta P/\Delta P_0)^{1/3}} \quad (7)$$

式中, $K/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$ 为总传热系数; $\Delta P/\text{Pa}$ 为压降损失; 下角标 0 表示计算参照量, 本文换热管束结构参照标准见表 1。

表 1 换热器结构参数的参照标准

Tab. 1 Basis reference of the structure of HX

| L/m | d_0/mm | c/m | P/mm |
|--------------|-----------------|--------------|---------------|
| 2.5 | 25 | 6 | 32 |

从式(7)看出, JF 因子是一个无量纲量, 将换热器的换热功率和压降损失的 $1/3$ 次方进行比较, 从而形成同时考虑换热效率和压损的评价准则, 同时表明 JF 因子越大, 换热器的综合性能越好。

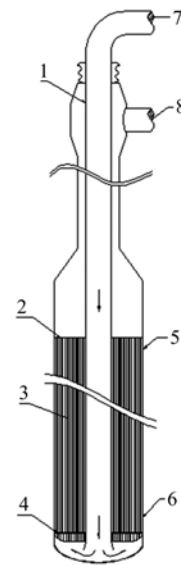
2 换热器设计及性能影响因素研究

铅铋冷却自然循环反应堆是液态重金属冷却池式快堆, 额定热功率为 10 MW。4 台主换热器在主容器内轴对称布置, 一回路液态铅铋从一次侧进口流入换热器, 在换热管外自上而下流动, 从一次侧出口流出, 运行压力为 0.05 MPa, 进出口温度分别为 390, 260 °C; 二回路冷却剂加压水从二次侧入口流入中心下降管, 流入混合腔后折流向上流入换热管, 然后在换热管内自下而上流动, 最后从二次侧出口流出换热器, 运行压力为 4 MPa, 进出口温度分别为 215, 230 °C。

本文研究的换热器采用管壳式、逆流式结构, 换热管为单管、直管, 呈正三角形排列, 采用 316L 不锈钢材料, 如图 1 所示。本节根据节 1 介绍的换热器设计相关的理论计算公式及方法, 采用软件编制了液态铅铋冷却剂与液态加压水在主换热器中的热工水力程序, 对换热管长度 L 、外径 d_0 、壁厚 c 及管间距 P 这 4 个因素对换热器总传热系数 K 、沿程压降损失 ΔP 的影响作用进行研究, 并采用 JF 因子对换热器综合性能进行分析评价, 采用贡献比 CR 及平均信噪比 \overline{SN} 对换热器结构进行优化。

2.1 换热管长度对换热器性能影响

换热管长度 L 对换热器传热性能有较大影响, 由于主换热器安装在反应堆主容器内, 因此换热管有效长度分别选取 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 m, 管束其余



1—中心下降管; 2—上管板; 3—换热管束; 4—下管板;
5—一次侧进口; 6—一次侧出口; 7—二次侧进口; 8—二次侧出口

图 1 主换热器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of main heat exchanger

结构参数分别为 $d_0=30 \text{ mm}$, $c=3 \text{ mm}$, $P=38 \text{ mm}$ 。

图 2 表明, 换热管长度 L 增加, 换热管根数 N 非线性减小。因为当换热器其余结构参数不变时, L 增加, 单根管的换热面积增大、换热量增加; 而总换热量不变, 因此换热管数减小。从可靠性角度分析, 换热管与管板接头处因失效引起的泄漏是导致换热器可靠性降低的关键因素。因此, L 增加, N 减小, 则接头数减小, 换热器的可靠性提高, 即管长 L 增加有利于换热器安全运行。但 L 增加到一定程度后, N 减小的程度并不明显, 反而使换热器体积增大, 制造成本增加。

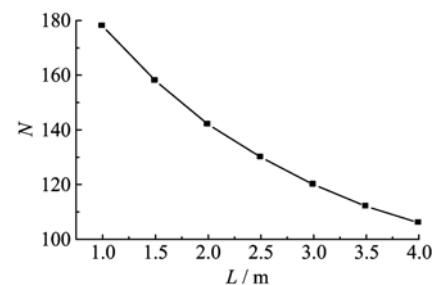


图 2 换热管数目随长度的变化曲线

Fig. 2 Tube number changes with length

图 3 表明, 总传热系数 K 随换热管长度 L 增加而增大。因为管长 L 增大, 管数 N 显著减少, 换热管两侧冷却剂的总流通截面减小, 导致冷却剂的流速增大, 因此对流换热系数增大; 同时由于壁厚 c 不变, 则壁面热阻不变, 因此总传热系数增加。因此 L

越长, K 越大, 换热器的传热性能越好.

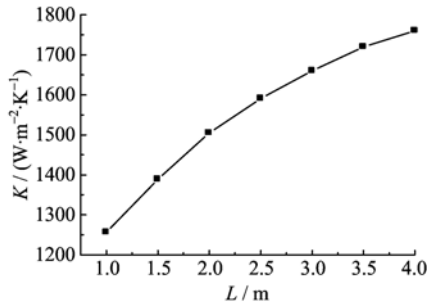


图 3 总传热系数随长度的变化曲线

Fig. 3 Total heat transfer coefficient changes with length of tube

图 4 表明, 换热管长度 L 增大, 管程及壳程冷却剂的压损均增大, 导致一次侧冷却剂自然循环能力降低, 同时二次侧冷却剂循环泵功耗增加, 运行成本提高.

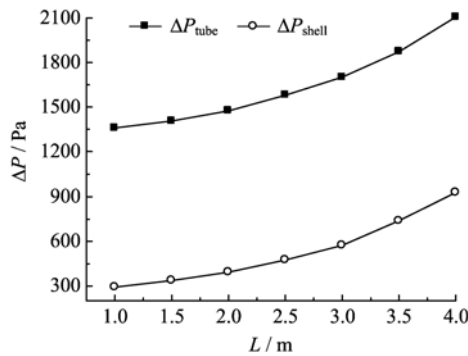


图 4 换热管长度对壳程及管程压降的影响

Fig. 4 Tube and shell side pressure drop changes with length of tube

图 5 说明, 当二次侧冷却剂流量相同时, JF 因子随 L 增大而减小, 综合性能降低. 原因如下: L 增大, K 和壳程压损 ΔP 均增加, 但 ΔP 增大的程度大

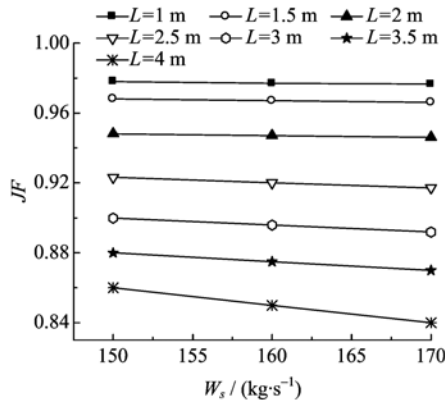


图 5 换热管长度对 JF 因子影响

Fig. 5 JF factor changes with length of tube

于 K 增大的程度, 因此 JF 因子减小, 导致换热器性能降低. 从提高换热性能角度分析, 换热管长度应取较小值; 但减小管长 L 会导致管数 N 增大, 会降低换热器可靠性. 因此, 综合考虑换热器性能及可靠性, 换热管长度取 2 m 较为合理.

2.2 换热管外径对换热器性能影响

当换热器冷却剂流量一定时, 换热管外径 d_o 对壳程及管程流体的流速有较大影响. 采用固定变量法进行分析研究, 换热管外径 d_o 分别取值 15, 20, 25, 30, 35 mm, 其余结构参数分别为 $L=2$ m, $c=3$ mm, $P=38$ mm.

图 6 表明, 当换热管束其余结构参数不变时, 外径 d_o 增大, 总传热系数 K 逐渐减小. 因为 d_o 增大, 换热管内冷却剂流速降低, 因此湍流剧烈程度降低, 不利于冷却剂换热, 故换热器的总传热系数 K 降低.

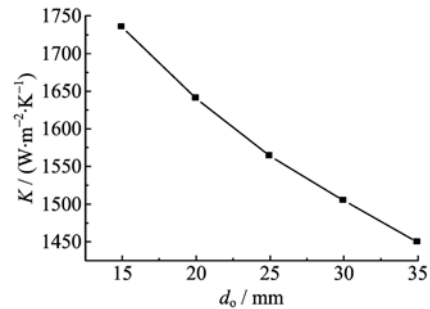


图 6 总传热系数随外径变化

Fig. 6 Total heat transfer coefficient changes with diameter of tube

图 7 显示出换热管外径 d_o 对壳程、管程压降的影响. d_o 增大, 壳程冷却剂流通截面减小, 流速增大, 因此壳程压降增大, 不利于一回路冷却剂自然循环的建立; 同时, d_o 增大使管内冷却剂流速减小, 管程压降减小, 可减小二回路冷却剂系统泵的功耗, 运

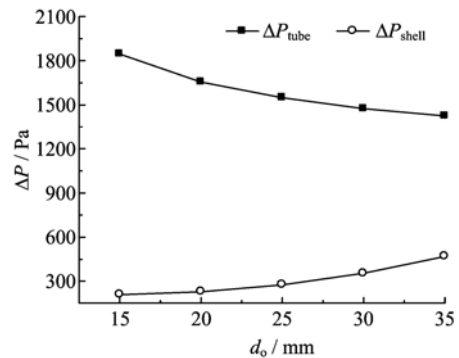


图 7 壳程及管侧压降随外径变化

Fig. 7 Tube and shell side pressure drop changes with diameter of tube

行成本降低。

图 8 表明,当壳程冷却剂流量一定时, JF 因子随 d_o 增大而减小. 因为外径 d_o 增大,壳程摩擦压降增大,总传热系数减小,因此 JF 因子减小,换热器综合性能变差.

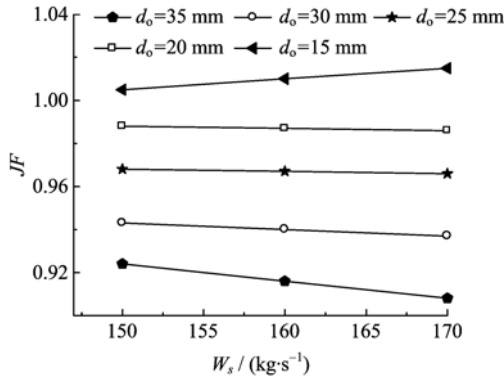


图 8 JF 因子随外径的变化

Fig. 8 JF factor changes with diameter of tube

铅基反应堆运行在高温高压环境下,因此换热管需承受较高的热应力和压力. 从可靠性角度分析, d_o 增大,换热管承压能力降低,容易失效;同时一回路冷却剂自然循环能力降低. 因此,综上所述,在换热管承压能力范围内可适当选用较小的外径.

2.3 换热管壁厚对换热器性能影响

本小节主要研究壁厚对换热性能的影响. 换热器的壁厚分别取 2, 2.5, 3, 3.5, 4 mm, 其余结构参数分别为 $L=2$ mm, $d_o=30$ mm, $P=38$ mm.

图 9 说明,换热管壁厚 c 增大,总传热系数 K 逐渐减小,管程压降 ΔP 逐渐增大. 因为当外径 d_o 不变时, c 增大,换热管内径减小,管内冷却剂流速增大,管侧对流换热系数增大,但 K 减小,说明此时换热管壁的导热热阻增大,并在此传热过程中占主要地位;由于管内冷却剂流速增大,增大了湍流耗散

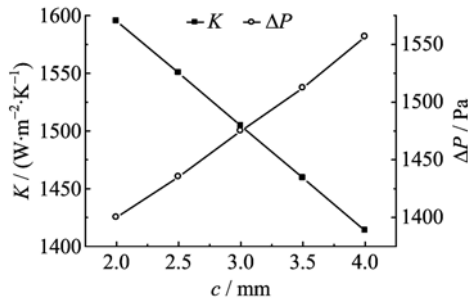


图 9 壁厚对总传热系数及管程压降的影响

Fig. 9 Total heat transfer coefficient and tube side pressure drop change with thickness of tube

程度,因此阻力明显增大. 由于外径 d_o 没变,因此壳程冷却剂流速不变,摩擦压降不变. 图 9 中两条曲线有交点,说明在一般情况下,换热管壁厚小于 3 mm 左右时,换热器的综合性能比较好.

图 10 为壁厚 c 变化对 JF 因子的影响曲线,当壳程冷却剂流量一定时, c 增加, JF 因子减小,说明换热器的综合性能降低. 因为, c 增大,总传热系数 K 减小而壳程压降不变,故 JF 因子减小. 此外,从可靠性角度分析, c 过小,换热管承压能力减弱,容易失效,反应堆安全性降低. 结合换热器传热性能、可靠性分析,壁厚 c 取 5 mm 较为合理.

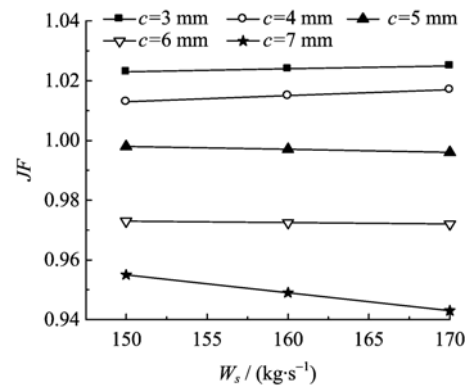


图 10 壁厚对 JF 因子的影响

Fig. 10 JF factor changes with thickness of tube

2.4 换热管间距对换热器性能影响

换热管间距 P 直接影响换热管束间流道截面大小,对壳程冷却剂压降产生较大影响. 因此,当一次侧冷却剂为自然循环流动方式时,需考察 P 对主换热器的影响. 间距 P 分别取 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 50 mm, 主换热器的其余结构参数分别为 $L=2$ m, $d_o=30$ mm, $c=3$ mm.

图 11 为换热管间距 P 对壳程压降的影响. 从图 11 可以看出,壳程压降随换热管间距的增大而非线性减小,当间距 P 小于 40 mm 时,壳程压降随着 P 增

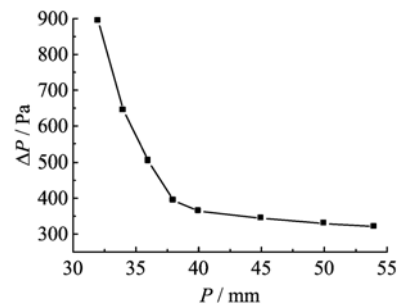


图 11 换热管间距对壳程压降的影响

Fig. 11 Shell side pressure drop changes with pitch of tube

大而减小,且变化幅度较大,说明此时壳程压降随间距变化较敏感;当间距 P 大于 40 mm 后,壳程压降随间距 P 增大同样减小,但减小幅度较小,几乎可忽略。

图 12 为换热管间距 P 对 JF 因子的影响曲线,随着换热管间距 P 增大, JF 因子逐渐减小;同时从 JF 因子的数值减小程度来看,间距 P 对换热器综合性能的影响比较小。此外,再结合目前换热器工程制造水平,换热管外径取 30 mm 时,换热管间距应取 38 mm 较为合适。

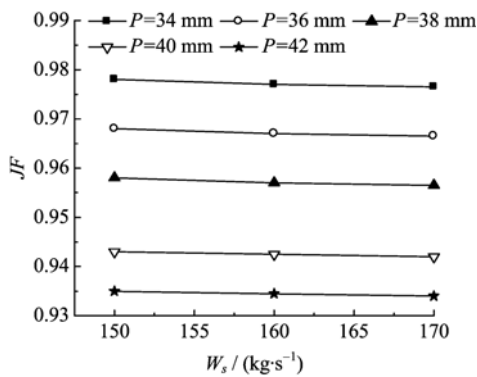


图 12 换热管间距对 JF 因子的影响
Fig. 12 JF factor changes with pitch of tube

2.5 主换热器结构几何尺寸优化

在换热器实际工程设计及建造中,需要将上述 4 个影响因素综合分析,方可得到换热管束最优结构。

为有效地选择最优参数组合,需采用贡献比 (CR)^[13] 来寻求对换热器综合性能影响最大的因素,以便在设计中抓住主要影响因素;然后将各影响因素的 JF 因子转化为平均信噪比 (\overline{SN})^[13],得到最优的换热管束结构参数。 \overline{SN} 与 CR 的功能类似,数值越大,代表换热器综合性能越好,结构越优化。

图 13 为不同因素影响换热器综合性能的程度,

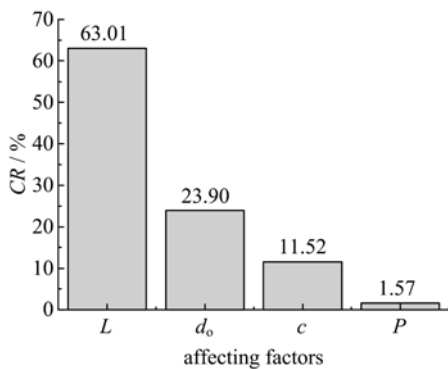


图 13 影响因素的贡献比
Fig. 13 CR of control factors

可以看出,长度 L 、外径 d_o 、壁厚 c 及管间距 P 所占比例分别为 63.01%, 23.90%, 11.52%, 1.57%, 说明 L 对换热器综合性能影响最大,而 P 对换热器综合性能影响最小,因此在管束结构设计中要选择合理的换热管管长。

表 2 为换热管长度 L 、外径 d_o 、壁厚 c 及管间距 P 这 4 个影响因素及其水平,基于试验次数考虑,后 3 个影响因素选用的水平较少,计算中所用的参照基准见表 1,壳程冷却剂流量分别选择 150, 160, 170 kg/s 进行计算分析。

表 2 影响因素及水平
Tab. 2 Affecting factors and their levels

| 水平 | 因素 | | | |
|----|-------|----------|-------|--------|
| | L/m | d_o/mm | c/m | P/mm |
| 1 | 2 | 20 | 5 | 34 |
| 2 | 2.5 | 30 | 7 | 38 |
| 3 | 3 | | | |
| 4 | 3.5 | | | |
| 5 | 4 | | | |

对换热管束不同影响因素的不同水平进行试验研究,试验次数为 $5 \times 2 \times 2 \times 2 = 40$ 次,得到在管侧冷却剂流量不同时每个影响因素的 JF 因子,然后转化为平均信噪比 \overline{SN} ,以寻求换热器最佳结构参数组合,如表 3 和图 14 所示。

表 3 影响因素水平的平均信噪比
Tab. 3 \overline{SN} of levels of affecting factors

| \overline{SN} | A(L) | B(d_o) | C(c) | D(P) |
|-----------------|----------|------------|----------|----------|
| 1 | 29.094 8 | 26.059 7 | 27.455 1 | 26.805 7 |
| 2 | 28.532 2 | 27.299 3 | 26.205 4 | 26.984 4 |
| 3 | 27.510 4 | | | |
| 4 | 25.783 1 | | | |
| 5 | 25.089 2 | | | |

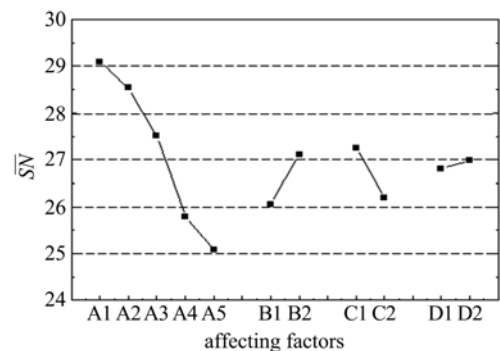


图 14 不同影响因素的 \overline{SN}
Fig. 14 \overline{SN} of each level of every affecting factors

图 14 说明,平均信噪比 \overline{SN} 随管长 L 增加而逐渐减小,这表明换热器的综合性能降低,这同 2.1 节中采用 JF 因子评价法得到的结论一致. 因此,根据平均信噪比 \overline{SN} 越大,换热器综合性能越好的准则,得到换热器管束最优结构参数组合为 A1B2C1D2.

3 结论

本文采用了一套合理并经过验证的换热器性能优化方法对铅铋合金冷却池式反应堆主换热结构进行了优化设计与热工水力分析,分别考虑了换热管长度 L 、外径 d_o 、壁厚 c 及管间距 P 对换热器性能的影响,采用 JF 因子方法对换热器进行综合性能分析,并采用贡献比(CR)和平均信噪比(\overline{SN})对换热器结构进行最终优化. 所得结论如下:

(I) 换热管长度 L 对换热器综合性能影响较大,约占 63.01% 的比例. L 增大, JF 因子减小,换热器综合性能降低;但 L 增大减小了换热管数目,可提高换热器可靠性.

(II) 在其余结构参数不变时,换热管外径 d_o 越大,壳程压降增大,不利于一回路自然循环建立;壁厚 c 增加, JF 因子减小,综合性能降低;间距 P 对换热器综合性能的影响几乎可以忽略,但是间距过小会增大壳程冷却剂压降,降低一回路自然循环特性.

(III) 从换热器综合性能角度分析,最优的换热管结构参数组合为 A1B2C1D2.

本文为液态重金属反应堆主换热器结构优化设计提供了理论指导. 然而,在实际反应堆设计与建造过程中,还需统筹考虑各项影响因素,以获得最优的主换热器结构设计方案,因此下一阶段还需进行下述工作:①开展换热器管束热应力的优化分析工作,从热应力方向对换热器进行结构设计优化;②开展瞬态工况下的热工水力设计分析工作,形成一个完整的主换热器热工水力学分析内容,并开展各种工况下换热器的数值模拟分析工作.

致谢 特别感谢中国科学院核能安全技术研究所的老师与同学在课题研究工作中的指导与帮助!

参考文献(References)

- [1] HeLiMnet. State of development of LFR and ADS technologies and R&D needs [R]. Italy: ENEA, 2012.
- [2] MacDonald P E, Buongiorno J. Design of an actinide burning, lead or lead-bismuth cooled reactor that produces low cost electricity [R]. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2002; FY-02 Annual Report.
- [3] Onea A, Boettcher M, Struwe D. Lead pressure loss in the heat exchanger of the ELSY fast lead-cooled reactor by CFD approach[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 242(9): 3 470-3 480.
- [4] Antysheva T. SVBR: New generation power plants for small and medium-sized power applications [C]// Technical Meeting on Innovative Heat Exchanger and Steam Generator Designs for Fast Reactors. Vienna: IAEA, 2011.
- [5] Maes D. Mechanical design of the small-scale experimental ADS:MYRRHA [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(17):2 710-2 723.
- [6] Hayafune H. Japan double walled-tube SG for future SFRs in Japan[C]// Technical Meeting on Innovative Heat Exchanger and Steam Generator Designs for Fast Reactors. Vienna: IAEA, 2011.
- [7] Wu Y C, Bai Y Q, Song Y, et al. Overview of lead-based reactor design and R&D status in China[C]// International Conference on Fast Reactor and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR 13), Paris, France, March 4-7, 2013.
- [8] Morita K, Maschek W, Flad M. Thermophysical properties of lead-bismuth eutectic alloy in reactor safety analyses[J]. Nuclear Science and Technology, 2006, 44(5): 526- 536.
- [9] 居怀明. 载热质热物性计算程序及数据手册[M]. 北京:原子能出版社,1990: 26-30.
- [10] AP1700 物质物性计算查询平台:水和水蒸气[EB/OL]. [2014-02-10] <http://www.ap1700.com/ShowDetail1.htm>.
- [11] Kays W M, London A L. Compact Heat Exchangers [M]. New York: McGraw-Hill, 1984.
- [12] Guo L, Qin F, Chen J, et al. Influence of geometrical factors and pressing mould wear on thermal-hydraulic characteristics for steel offset strip fins at low Reynolds number[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46:1 285-1 296.
- [13] Yun J Y, Lee K S. Influence of design parameters on the heat transfer and flow friction characteristics of the heat exchanger with slit fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(14):2 529-2 539.
- [14] 史美中,王中铮. 热交换器原理与设计 [M]. 4 版. 南京:东南大学出版社,2009.