

凹坑凸胞板式换热器相变换热优化研究

王定标, 董永申, 向 颀, 夏春杰

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 基于 ANSYS Workbench, 以凹坑流道为研究对象, 对凹坑凸胞板式换热器相变换热进行优化研究; 以 Nu 和 f 为目标函数, 探究了 v (速度)、 R (凹坑半径)、 H_d (凹坑深度) 和 P (凹坑间距) 等参数对凹坑凸胞板式换热器相变换热的热-水力性能的影响。结果表明: 凹坑处水蒸汽体积分数明显高于附近的平板处的水蒸汽体积分数, 说明凹坑凸胞板对相变换热也有着很好的强化作用; 在研究范围内, Nu 和 f 对各参数的敏感性排序基本一致, 为 $v > R > H_d > P$, 最优参数范围为 $7\text{ mm} < R < 8\text{ mm}$ 且 $2\text{ mm} < H_d < 2.5\text{ mm}$ 。另外, 在考核范围内, 得到了热-水力性能的关联式。

关键词: 热-水力性能; 板式换热器; 优化研究; 凹坑凸胞; 相变换热

中图分类号: TK172

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.03.003

0 引言

针对烟气余热回收利用中所带来的低温腐蚀问题, 杨本洛教授提出了复合相变换热技术^[1]。相变换热的引入, 大大减小了烟气与受热壁面之间的温差, 在降低了排烟温度的同时又避免了低温腐蚀。复合相变换热器装置中所采用的换热器为板式换热器, 关于板式换热器, 国内外学者对此也已做了大量的研究。其强化形式更是层出不穷, 有波纹板片^[2-3]、肋板片^[4]、凹坑凸胞板片^[5]等等。但无论强化形式如何, 其强化机理大多在于增加扰流以增强流体的湍动, 同时诱发垂直于主流方向的二次流动, 以增强传热^[6-7]。通常, 在 Re 达到几百的时候, 板式换热器中的流体已经形成较强的湍流。但由于其结构样式繁多, 工作介质多样, 发生相变与否对结果影响较大^[8-9], 所以其热-水力特性仍然难以达到统一, 并且该行业目前仍缺少统一的标准。因此, 对于板式换热器的研究还有大量的问题亟待解决。笔者以复合相变换热器的应用为背景, 以凹坑凸胞板式换热器的凹坑流道为研究对象, 以 Nu 和 f 为目标函数, 以水为介质, 对其相变换热情况进行了优化模拟。

1 数学模型

1.1 几何模型

凹坑流道的结构参数示意图如图 1 所示。其长度 $L = 300\text{ mm}$, 宽度 $W = 120\text{ mm}$, 流道高度 $H = 12\text{ mm}$, 板面上的凹坑为正三角形分布, 即 $S = \sqrt{3}P$, 横向和纵向每排凹坑个数分别为 n_1 和 n_2 。分别研究流动参数速度 v (对应雷诺数) 与结构参数 (凹坑半径 R 、深度 H_d 、凹坑间距 P) 对流道热-水力性能的影响, 其中, $D = 2R$ 。

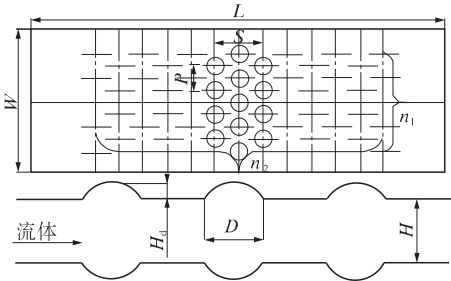


图 1 凹坑流道结构参数示意图

Fig.1 Schematic diagram of fluid passageway with dimples

1.2 优化模型与设置

基于 Design Exploration 模块的响应面方法, 以 Nu 和 f 为目标函数, 以 v 、 R 、 H_d 和 P 为设计参数进行参数优化模拟, 各设计参数间满足以下约束条件: $R_{\min} \geq H_d$; $P > D_{\max}$; $W > (n_1 - 1)P_{\max} +$

收稿日期: 2013-11-20; 修订日期: 2013-12-24

基金项目: 河南省科技创新杰出青年基金资助项目 (124100510020); 河南省自然科学基金项目 (2011A480004)。

作者简介: 王定标 (1967-), 男, 浙江杭州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 工业节能技术与装备的研究与开发, E-mail: wangdb@zzu.edu.cn。

$D_{\max}; L > (n_2 - 1) S_{\max} + D_{\max}$. 各设计参数范围如表 1 所示,共生成 25 个考核点.

表 1 设计参数及范围

| Tab. 1 Scope of input parameters | | | | |
|----------------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|
| 项目 | $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | R/mm | H_d/mm | P/mm |
| 初始值 | 0.14 | 6 | 3 | 24 |
| 上限值 | 0.25 | 8 | 4 | 30 |
| 下限值 | 0.03 | 4 | 2 | 18 |

在 Fluent 中湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型和增强壁面函数^[10],分别求解了连续性方程、动量方程和能量方程.同时,引入了 Mixture 模型,定义液态水为第一相,水蒸汽为第二相;利用 UDF,通过对发生相变的温度、汽化潜热、汽液两相的质量源项、Mixture 模型的能量源项、指向汽液两相的指针、源项对质量转移的偏导等问题的定义,实现不同相之间的质量和能量传递.

边界条件定义如下:入口为速度入口,出口为压力出口,两侧壁面为绝热壁面,上下壁面为恒壁温壁面,温度为 393 K.

以 $L = 300 \text{ mm}$ 、 $W = 120 \text{ mm}$ 、 $R = 6 \text{ mm}$ 、 $H_d = 3 \text{ mm}$ 、 $P = 24 \text{ mm}$ 的凹坑流道为例,进行了网格独立性考核.采用 10 层网格对边界层进行加密,速度入口设为 $0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.结果表明:随着网格数的增加, Nu 和 f 的波动逐渐变小,当网格数增加到 75 万以后,基本不再变化,故采用此时的网格密度,此时的网格主体尺寸为 1 mm .

2 结果分析

2.1 场态观察

限于篇幅,笔者只给出了原始输入参数下恒壁温表面上水蒸汽体积分数的云图,如图 2 所示.由图 2 可以看出,凹坑处水蒸汽体积分数明显高于附近的平板处的水蒸汽体积分数,说明凹坑凸胞板对相变换热也有着很好的强化作用.这是因为:①位于凹坑处的液态水受到的加热的影响要大于位于凹坑附近的平板上的液态水;②凹坑处容易留有残余气体,很容易成为下一步的汽化核心,从而大大地强化了传热.

2.2 单因素参数敏感性分析

参数敏感性是根据输入、输出参数的拟合结果得到的,如 f 的敏感性由 $(f_{\max} - f_{\min})/f_{\text{ave}} = S_f$ 来表示.若输出参数随输入参数的增大而增大,则为正值;反之,则为负值.

以初始参数 $v = 0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $R = 6 \text{ mm}$ 、 $H_d = 3 \text{ mm}$ 、 $P = 24 \text{ mm}$ 为基准,固定其中的 3 个参数,

探究另外一个参数对 Nu 和 f 的影响,其结果如表 2 所示,并分别以 S_{Nu} 、 S_f 表示 Nu 和 f 的敏感性.

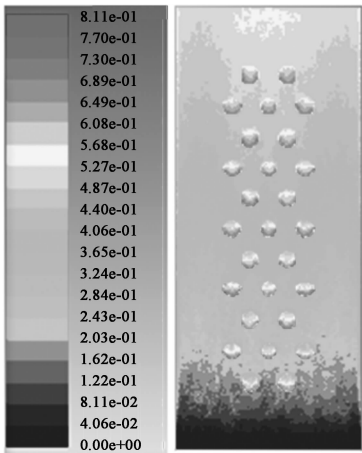


图 2 水蒸汽体积分数云图

Fig. 2 Volume fraction of water vapor

由表 2 可以看出,在基准参数下,各参数对 Nu 的敏感性排序为: $v > R > H_d > P$;各参数对 f 的敏感性排序为: $v > R > H_d > P$.

表 2 Nu 和 f 的参数敏感性

| Tab. 2 Sensitivity of Nu and f | | |
|------------------------------------|----------|--------|
| 参数条件 | S_{Nu} | S_f |
| v 变化,固定 R 、 H_d 、 P | 0.464 | -2.327 |
| R 变化,固定 v 、 H_d 、 P | 0.07 | 0.067 |
| H_d 变化,固定 v 、 R 、 P | 0 | 0.053 |
| P 变化,固定 v 、 R 、 H_d | 0 | 0 |

2.3 三维响应面分析

Nu 和 f 的三维响应面如图 3、4 所示.从图 3 (a)可以看出,当 $H_d < 2.5 \text{ mm}$ 、 Nu 随着 R 的增大呈现先减小后增大的规律,当 $H_d > 2.5 \text{ mm}$ 时, Nu 随着 R 的增大而增大,并且其增长率呈上升趋势;由图 3(b)可知, Nu 随着 R 的增大而增大;由图 3(c)可知,当 R 一定时, Nu 随着 v 的增大而增大,但增长率有所减小,这说明,随着质量流量的增加,总的换热量增大,但是其单位质量流量换热量有所减少;结合图 3(e)、(f),发现三者的 Nu 响应面趋势基本相同,由于 R 对 Nu 有着较明显的影响,所以 H_d 、 P 对 Nu 的影响较小,这一点从图 3 (d)中也可以看出,两者相互作用时,对 Nu 影响很小.

由图 4(a)可知,当 $H_d < 3 \text{ mm}$ 时, f 随 R 的增大而下降,当 $H_d > 3 \text{ mm}$ 时, f 随 R 的增大呈上升趋势;由图 4(b)可知,当 P 一定时, f 随 R 的增大呈上升趋势,但增长率有所下降;由图 4(c)可知,当 R 一定时, f 随 v 的增大而减小,特别地, f 与 v

呈负指数关系;图 4(e)、(f)中的 f 响应面趋势与一定的影响,这从图 4(d)可以看出,两者变化时, f 仍有较大的变化,但其对 f 的影响要弱于 v 和 R .

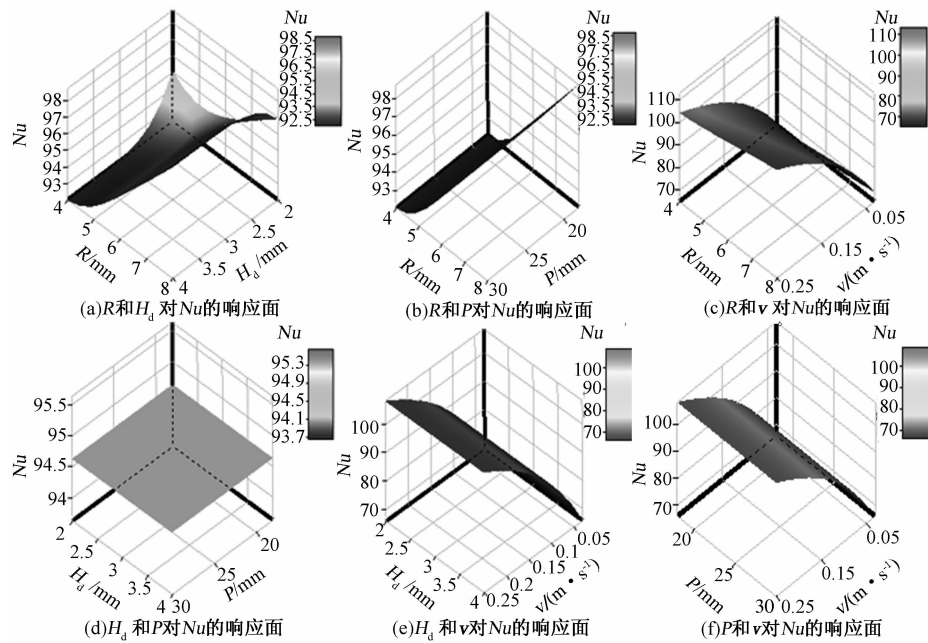


图 3 各参数对 Nu 的响应面

Fig. 3 Response surface of parameters on Nu

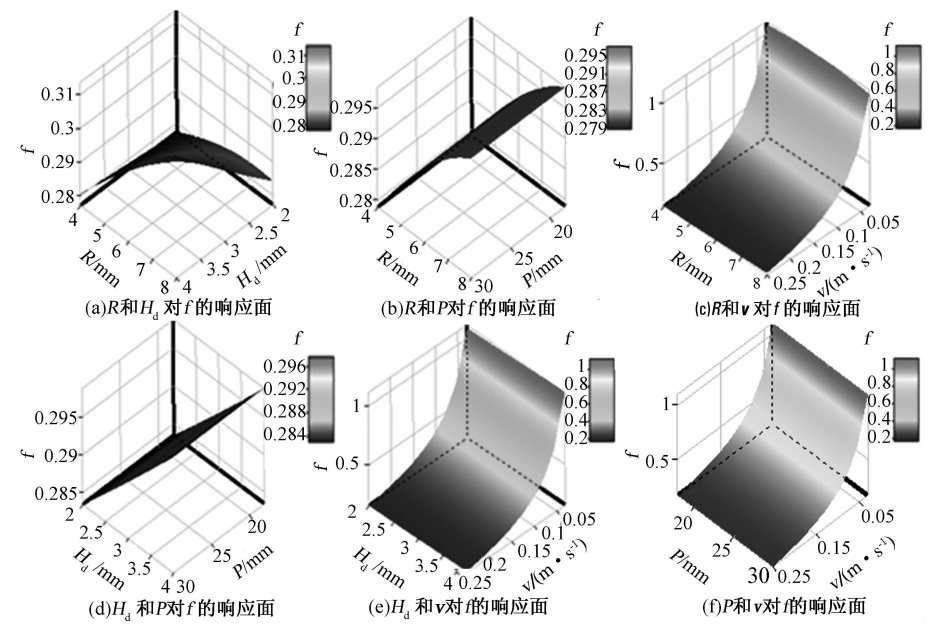


图 4 各参数对 f 的响应面

Fig. 4 Response surface of parameters on f

综上,单就结构参数而言,应优先考虑 R 的影响, H_d 次之,最后为 P .就本研究而言,在考核范围内,当 $7\text{ mm} < R < 8\text{ mm}$ 且 $2\text{ mm} < H_d < 4\text{ mm}$ 时有较好的 Nu ,但当 $7\text{ mm} < R < 8\text{ mm}$ 且 $2.5\text{ mm} < H_d < 4\text{ mm}$ 时, f 也较大,因此综合 Nu 、 f 两者考虑,最优范围应为 $7\text{ mm} < R < 8\text{ mm}$ 且 $2\text{ mm} < H_d < 2.5\text{ mm}$.由于 P 的影响较小,所以其取值大小可根据凹坑凸胞排列方式及 R 的大小而定.

2.4 关联式拟合研究

为了更全面地描述所有输入参数对热-水力性能的影响,笔者对计算结果进行了数据关联.对参数进行无量纲化后,得到形式如下的关联式:

$$Nu = a_0 Re^{a_1} (H_d/D)^{a_2} (D/D_H)^{a_3} (P/D_H)^{a_4};$$
$$f = b_0 Re^{b_1} (H_d/D)^{b_2} (D/D_H)^{b_3} (P/D_H)^{b_4}.$$

两边同时求对数:

$$\lg Nu = \lg a_0 + a_1 \lg Re + a_2 \lg (H_d/D) +$$

$$\begin{aligned} & a_3 \lg(D/D_H) + a_4 \lg(P/D_H); \\ \lg f = & \lg b_0 + b_1 \lg Re + b_2 \lg(H_d/D) + \\ & b_3 \lg(D/D_H) + b_4 \lg(P/D_H). \end{aligned}$$

根据最小二乘法拟合得到:

$$\begin{aligned} Nu = & 10.393 Re^{0.244} (H_d/D)^{0.00039} \cdot \\ & (D/D_H)^{0.095} (P/D_H)^{0.00061}; \\ f = & 2.072 Re^{-0.928} (H_d/D)^{0.075} \cdot \\ & (D/D_H)^{0.166} (P/D_H)^{-0.001}. \end{aligned}$$

式中:当量直径 $D_H = 2H$; 雷诺数 $Re = \frac{\rho v D_H}{\mu}$; ρ 为流体密度; μ 为流体动力黏度.

所拟合公式的适用范围为: $2441 \leq Re \leq 20338$, $0.125 \leq H_d/D \leq 0.5$, $0.333 \leq D/D_H \leq 0.667$, $0.75 \leq P/D_H \leq 1.25$.

3 结论

- (1)凹坑处水蒸汽体积分数明显高于附近的平板处的水蒸汽体积分数,说明凹坑凸胞板对相变换热也有着很好的强化作用.
- (2)在研究范围内, Nu 和 f 对各参数的敏感性排序基本一致,为 $v > R > H_d > P$; 综合 Nu f 两者考虑,最优结构参数范围为 $7\text{ mm} < R < 8\text{ mm}$ 且 $2\text{ mm} < H_d < 2.5\text{ mm}$, P 的取值大小可根据凹坑凸胞排列方式及 R 的大小而定.
- (3)通过数据关联,得到热 - 水力性能的关联式,并给出了适用范围.

参考文献:

[1] 杨本洛. 复合相变换热器: 中国, CN 1078033A

[P]. 1993.

[2] CIOFALO M, DI P I, STASIEK J A. Investigation of flow and heat transfer in corrugated - undulated plate heat exchangers [J]. Heat and Mass Transfer, 2000, 36(5): 449 - 462.

[3] REINHARD W, NIKOLAI O. Experimental investigations of heat transfer and pressure drop during the condensation process within plate heat exchangers of the herringbone - type [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(1): 59 - 68.

[4] LI Xiao-wei, MENG Ji-an, LI Zhi-xin. An experimental study of the flow and heat transfer between enhanced heat transfer plates for PHEs [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34: 1194 - 1204.

[5] MAHMOOD G I, LIGRANI P M. Heat transfer in a dimpled channel: combined influences of aspect ratio, temperature ratio, Reynolds number, and flow structure [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45: 2011 - 2020.

[6] 郭春生. 新型复合人字形板式换热器传热与流动理论分析与实验研究 [D]. 青岛: 山东大学能源与动力工程学院, 2012.

[7] 曲宁. 板式换热器传热与流动分析 [D]. 青岛: 山东大学能源与动力工程学院, 2005.

[8] 谷芳, 刘春江, 袁希钢, 等. 倾斜波纹板上液膜流动的 CFD 研究 [J]. 化工学报, 2005(3): 462 - 467.

[9] 师晋生. 波纹壁面降膜过程的一种近似模型 [J]. 工程热物理学报, 2006(2): 310 - 312.

[10] 梁珍祥. 凹坑凸胞板式换热器性能的数值研究 [D]. 郑州: 郑州大学化工与能源学院, 2012.

Optimization Study on Phase-change Heat Transfer
of Plate Heat Exchanger with Dimples

WANG Ding-biao, DONG Yong-shen, XIANG Sa, XIA Chun-jie

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: ANSYS Workbench is applied to the optimization study on phase-change heat transfer of plate heat exchanger with dimples. And the influence of v , R , H_d and P on thermal-hydraulic performance is explored with Nu and f serving as the objective function. Results show that the volume fraction of water vapor in the dimples is significantly higher than that on the plate near the dimples, which proves that the plate with dimples has the very good strengthening effect on phase-change heat transfer; and, within the scope of the study, the sensitivity of Nu and f on input parameters is basically the same, with a rank of $v > R > H_d > P$, and the optimal structure parameters is $7\text{ mm} < R < 8\text{ mm}$ and $2\text{ mm} < H_d < 2.5\text{ mm}$. In addition, within the test range, the correlation of thermal-hydraulic performance is fitted.

Key words: thermal-hydraulic performance; plate heat exchanger; optimization study; dimples; phase-change heat transfer