

交变压力波强化传热

张东伟, 蒋二辉, 周俊杰*

(郑州大学 化工与能源学院 热能系统节能技术与装备教育部工程研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 节能、高效、紧凑已经成为制冷空调行业的发展趋势, 其中强化换热技术尤为关键。因此, 本文采用 COMSOL 软件对微型错排管换热器进行了建立二维模型, 基于瞬态模型, 采用流动和传热模块进行有无交变压力波的数值模拟分析。结果发现随着交变压力波的添加大大增加了速度场、压力场及温度场的波动情况, 使得管内工质边界层受到破坏, 从而降低了传热的热阻综合“空化链式理论”, 交变压力波能够起到强化传热的作用, 提高了制冷效率, 有利于推动制冷行业的发展。

关键词: 交变压力波; 强化传热; 数值模拟

0 前言

换热器作为一种能够将冷热流体进行交换的换热设备, 在石油化工、低温制冷、火力发电、制药以及冶金等众多领域中得到广泛应用, 因此提高换热器的换热效率在节约能源、降低生产成本方面表现出十分重要的作用^[1]。在高效、紧凑、节能制冷空调行业的发展趋势下, 世界各国都开始聚焦于对新型强化换热技术的提出, 以求快速、大幅度的改善换热器的换热效率, 从而缓解能源危机的压力^[2]。大力的开展强化换热技术, 不仅起到了设备运行的效率, 也起到了节约成本、环境友好, 随之而来也会增加经济效益^[3]。

强化传热技术通常可分为两大类: 主动式强化(有源强化)和被动式强化(无源强化)。主动式强化传热是在系统中外加动力, 需要外部提供能量, 如采用磁场、电场、光照射、喷射、搅拌等手段。被动式强化传热则是除了输送流体的所需要消耗的能量外, 不需要消耗外部的附加动力, 如改变换热管的形状、对换热管的表面进行处理、管内添加插入装置, 改变支撑构件等。表 1 列举了多种强化传热技术及其传热效率, 可对比其强化效果^[4]。当前大部分研究都着重于被动式强化, 然而越来越复杂的表面结构不但使生产成本不断提高, 而且制造也越来越困难^[5]。

表 1 强化传热技术分类

强化传热技术	强化措施	描述	强化率
	翅片	利用在边界层上安装翅片以产生二次流或非定常流	50%-100%
被动式强化传热(无源强化)	换热面粗糙	加速流体从层流到湍流的转变, 同时还能增强流体在处于湍流时的传热过程	最高可达300%
	换热面突起	通过突起物(立方体、锥体等)产生二次流或非定常流	50%-500%
主动式强化传热(有源强化)	强制非定常对流	在换热面上震动或用声波使边界层变薄或者诱导产生二次流可忽略不计	可忽略不计
	电水动力学(EHD)	在平板中施加高于 1kV 的高压电场能在边界层诱导产生二次流	300%
	喷射	强化多相流	50%-500%

目前, 各种无源强化技术都能提高换热设备的换热效率, 但是换热效率的提高空间较为有限, 同时, 其效率的提高一般会带来流动阻力的增加, 增加了额外的驱动功, 这使得无源强化技术在工程实际中的应用受到限制。因此, 基于交变压力波等外场的强化传热技术, 基本不增加流体的流动阻力, 且可大幅提高换热器效率, 在强化换热领域具有广阔的应用前景, 探索交变压力波强化传热技术有着实际的工程意义。本研究主要是通过利用 CFD 软件中的 comsol 来进行数值模拟, 通过对比, 显示强化效果。

1 交变压力强化的机理

1.1 交变压力强化的综述

交变压力波用于强化传热领域仅仅只有半个世纪的历史。1961 年 Lemlich 等^[6]研究了声波在振动和非振动频率下对强制对流传热的影响。Lemlich 研究发现声波被施加在雷诺数为 560 至 5900 的水平双管式的热交换器中, Nu 最多可以提高 51%。1964 至 1965 年, Bergles^[7]和 Newell^[8]通过实验发现交变压力波可以强化传热; 实验发现在不发生沸腾相变并且流体流速较低时, 传热效果最多可以提高 40%, 还发现不凝性气体导致传热效果的下降。为了弄清楚交变压力波的位置和多股交变压力波对强化换热的影响, Rahimi 等^[9]设计了相关的试验。试验中, 高频交变压力换能器分别被安装在不同的位置, 同时对多个换能器的干扰影响进行了研究, 研究发现, 安装在侧壁工作的单个换能器比安装在其他位置时的强化换热的效果更好。刘宜波^[10]研究了外加磁场、电磁、声场对海水蒸发的影响; 实验表明三种外场均能促进海水的蒸发且彼此之间能够相互促进。付本威^[11]研究了交变压力波对脉动热管传热

性能的影响；实验发现，交变压力波能够改善脉动热管的传热性能，改善程度和工质的物性参数、操作温度以及脉动热管的空间位置有关。

1.2 空化理论

交变压力波在液体中以声波的形式传播（图 1-1），存在这周期性变化的高压区和低压区，当局部声压低于蒸汽的饱和蒸汽压力时，工质内部的空化核心，会出现空化泡的拉伸和压缩，发生空化现象，使得局部产生高温高压^[12]。交变压力空化效应在一定范围内可以促进交变压力波的强化换热效果；另一方面，交变压力波崩溃过程中产生的冲击力有可能破坏金属设备。因此研究交变压力空化的机理可以为研究交变压力波强化换热打下理论基础。

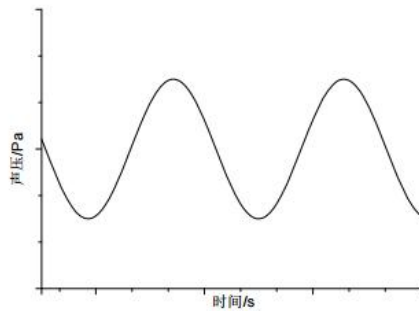


图 1-1 声波波动图

1.3 空化的强化效应

液体内部的某些区域，在某种外部因素的作用下，使得该区域的压力低于该液体对应温度下的饱和蒸汽压，该区域会发生液体的汽化现象，该现象称为空化。因交变压力波波动产生的空化现象称为交变压力空化。大交变压力空化和液体沸腾类似，但前者在形成原因上不同于后者，后者是因为液体温度升高导致的液体汽化。空化泡破裂过程中将会对周围的流体产生作用力，其力的大小具有作用范围窄，作用强度的特点。空化作用强化换热的过程可以结合过增元的场协同理论解释。交变压力波强化传热是因为交变压力波可以引起流体的波动以及空化泡破裂过程中可以在小范围内引起流体的振动，无论是波动还是振动都是扰乱了流体的流场，使得流体的速度矢量和温度矢量的平均夹角减小，达到了强化传热的目的。

2 模型的建立与选择

2.1 物理模型的建立

本研究主要是把换热对象作为研究对象，从未研究交变压力波对传热的影响，其几何模型的建立在 SOLODWORKS 中进行，其几何模型如图 2-1 所示：

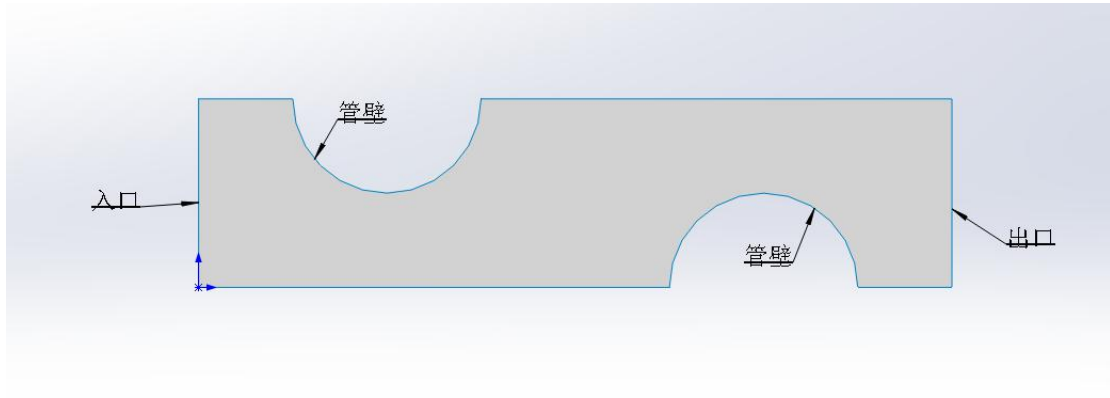


图 2-1 几何模型

图中的两个半圆表示恒温壁，其他区域表示流体，左侧为流体的进口，右侧为流体的出口。在研究交变压力波对流体的影响时，在左侧的恒温壁上加入交变压力波。在考虑到交变压力波的频率高、波长小的特点，为了更好的研究交变压力波对传热的影响，本研究的几何模型的尺寸单位的级别为微米级的，从而研究微米级别的传热强化问题。

表 2-1 模型的几何尺寸

符号	含义	数值	单位
W	宽度	4	μm
H	高度	1	μm
R	半径	0.5	μm

2.2 数学模型的建立

流体在换热管中流动遵循能量守恒定律、质量守恒定律和动量守恒定律，其对应的控制方程如下：

(1) 质量守恒方程（连续性方程）

任何流动问题都会满足质量守恒定律，其基本含义是指单位时间内流体微元体中质量的增加等于同一时间间隔内流入该微元体的静质量，由于其密度为恒定值，所以其控制方程如下：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

(2) 动量守恒方程

动量守恒定律实际上就是牛顿第二定律，其基本含义是指外界作用在微元体上的各种力之和等于该微元体中流体动量对时间的变化率。

其积分形式表示为：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{V} d\Omega + \oint_S \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot d\vec{S}) = \int_{\Omega} \rho \vec{f} d\Omega - \oint_S P \cdot d\vec{S} + \oint_S \vec{\tau}_{ij} \cdot d\vec{S}$$

其微分形式可表示为：

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla \cdot P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} + \rho \vec{f}$$

式中， $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ 为剪切应力张量， $\boldsymbol{\tau}_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) \delta_{ij} \right]$

(3) 能量守恒方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_f T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f w T)}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda_f}{\rho_f c_f} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda_f}{\rho_f c_f} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda_f}{\rho_f c_f} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \end{aligned}$$

T 表示温度； C_f 表示比热容； λ_f 表示热传导系数； S_T 表示粘性耗散项。

引入矢量符号，上面的式子变化为：

$$\frac{\partial(\rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f U T) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda_f}{\rho_f c_f} \text{grad} T \right) + S_T$$

(4) 波动方程

振动是交变压力产生的本质原因，波动是交变压力传播的本质原因。交变压力波作用于流体，即波动作用于流体。影响声学的几个变量都是非线性的，但是在一般的问题中，声学问题都可以当作线性问题来讨论。在不考虑阻尼的情况下，根据傅立叶分析，任何稳定的函数都可以分解成简谐函数之和。故而，沿 x 方向传播的正弦函数可以写成：

$$p = p_0 \cos(\omega t - kx)$$

其中， P_0 表示为幅值， ω 表示角频率， K 表示波数。

3 数值模拟

由于交变压力研究的数值模拟，基本上算是空白，我们此次主要是采用 COMSOL 来进行，交变压力强化的数值模拟，本次计算采用稳态求解器进行研究，用水作为流动介质的层流探究传热。

3.1 网格的划分

使用 COMSOL 软件内置的网格划分功能。COMSOL 预定义的网格划分类型有极细化、超细化、细化、常规、粗化、较粗化、超粗化和极粗化。网格划分的精度在一定的程度上影响求解时间和求解精度。在论文中，为了获得更高的求解精度，采用极细化的网格划分类型。

网格划分如图 3.1 所示：

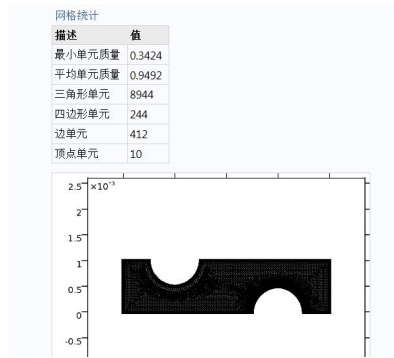


图 3.1 网格划分图

3.2 边界条件

边界条件设置：模型的进口温度为 300K，进口压力为 500Pa，管壁的温度选择为 400K。

具体设置如表 3-1 所示：

表 3-1 边界条件设置

T_{in}	进口温度	300	K
P_{in}	进口压力	$5000 \sin(\omega \cdot t)$	Pa
T_{wall}	管壁温度	400	K
q_m	进口质量流量	0.006	Kg/s
ω	频率	30000	Hz

4 模拟结果和对比分析

交变压力波对流动和传热的影响是一个动态的过程，在求解的过程中采用瞬态求解器，通过分析速度场分布云图、温度场分布云图、压力场分布云图。不加交变压力波的情况下，以模型出口水温稳定定义为求解结束的标志，在加入交变压力波的时候，以模型出口的水温周期性稳定变化为结束的标志。

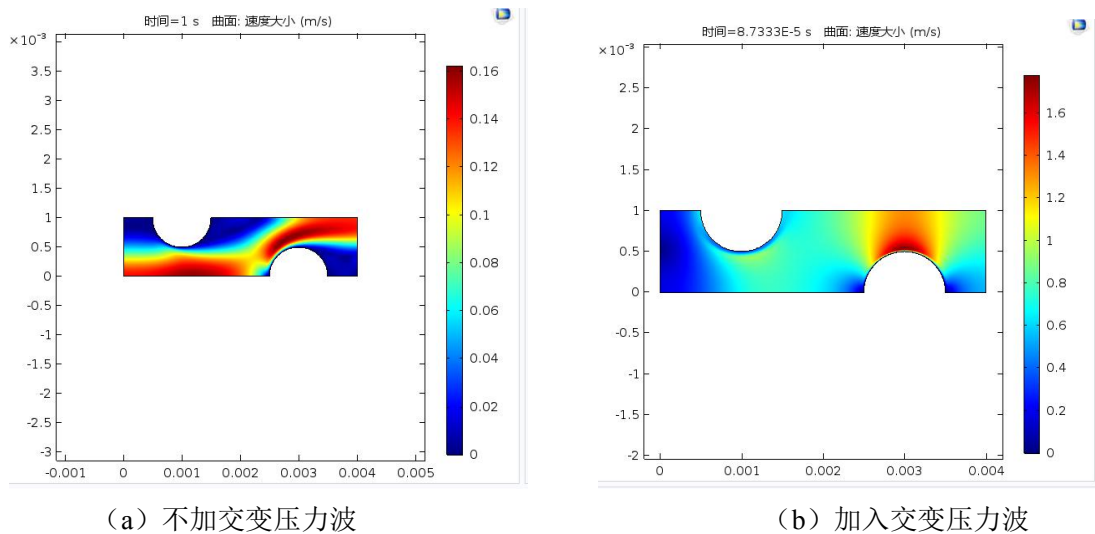


图 4.1 两种工况的速度云图

由图 4.1 (a) 所示的云图，我们可以看到，流速在边界层处的数值为 0m/s ，在远离边界层的法线方向上速度逐渐增大。流体流过圆管壁时，受到圆管的阻挡，速度从来流速度降低到边界层速度，流体绕过圆管，速度逐渐增大，最终从圆管的一侧流出。流速从模型进口处逐渐减小。图 4.1 (b) 所示的云图，我们看到在管壁侧的速度最大，说明在加入交变压力的情况下，速度云图发生明显的变化，改变了流场的速度分布，使得整个流场更具有稳定性，有利于强化整个流场的换热。

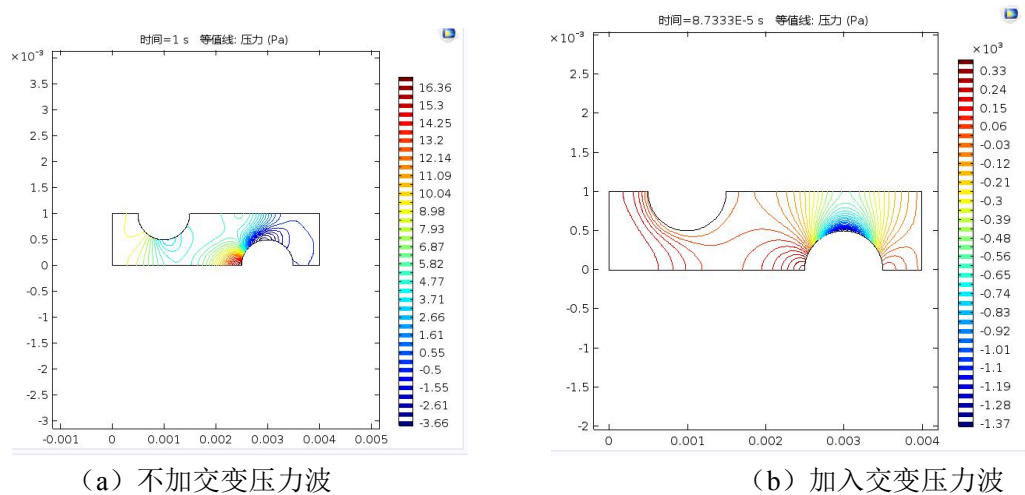


图 4.3 两种工况下的压力等值线图

由图 4.3 (a) 所示压力等直线云图，我们可以清晰的看到在圆柱体的正前方收到入口来流的正面冲击，流体的部分动能转化为压力势能，压力值较大；在圆柱体的背侧，压力值较低。绕流到流体两侧的流体在驱动力的驱动下，继续向前流动，遇到另一个圆柱体。从整体的模型来看，流体受到沿程阻力和局部阻力的影响，压力从模型的进口处到出口处逐渐降低。图 4.3 (b) 所示的压力等值线图，我们可以看到，随着压力波的加入弥补了由于左侧圆柱面形成的压差，使得左侧压力场具有较为稳定的压力值，在右侧出现了局部的压降，分布大致和速度云图一样，起到了强化压力场的作用。随着交变压力的加入，激活了空化核心，触发链式反应，产生高压，有利于提高整个模型的换热效率。

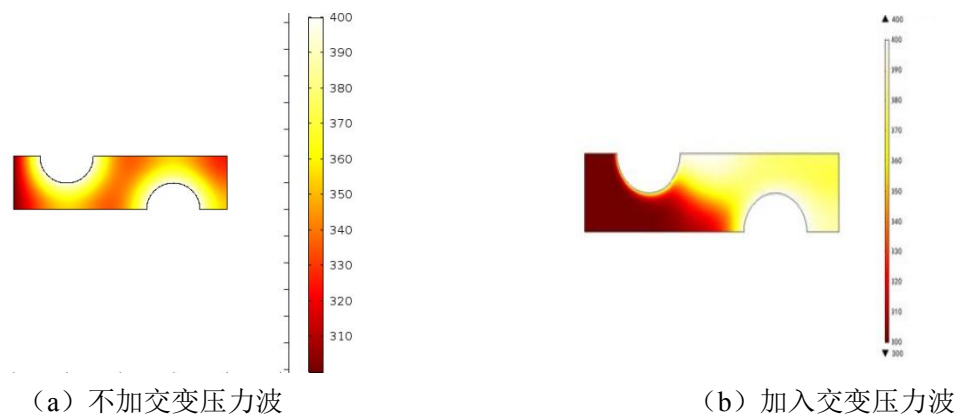


图 4.4 两种工况下的温度云图

由图 4.4 (a) 所示的无交变压力波的温度云图, 模型中入口处的温度为 300K, 管壁面温度为 400K, 并且为一恒定值。从流体进口到流体出口, 来流冲刷管壁, 受到高温管壁的影响, 温度逐渐上升, 出口温度达到最大值。图 4.4 (b) 为加入交变压力波的情况的温度云图, 从图中可以清晰的看到出口处的温度较高, 且出口温度明显高于无交变压力波的温度, 说明加入交变压力波能够促进空化泡的拉伸和湮灭, 使得局部产生高温, 进而提高了换热效率, 强化了换热效果, 其分布情况和速度场、压力场保持一致。

交变压力波强化传热, 主要原因在于交变压力波破坏了层流边界层, 减少了边界层的传热热阻, 另一方面, 交变压力波的扰动使得流体内部发生了空化现象, 空化作用加速了流体的扰动, 根据空化泡链式反应的原理, 这种促进作用进一步加强了流场的传热效果。

参考文献

- [1] 林宗虎, 汪军, 李瑞阳等. 强化传热技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007, 1
- [2] 董超, 黄烜, 李瑞阳. EHD 强化沸腾换热研究的进展与现状(I)——机理与理论研究[J]. 上海理工大学学报, 2000, 22(4): 308-314
- [3] Paper R A, Ohadi M M, Kumar A, et al. Effect of electrode geometry on EHD-enhanced boiling of R123/oil mixture[J]. ASHRAE Trans, 1993, 99(1): 1237-1243
- [4] Shahram Niazi, Seyed Hasan Hashemabadi, Meysam Mirab Razi. CFD simulation of acoustic cavitation in a crude oil upgrading sonoreactor and prediction of collapse temperature and pressure of a cavitation bubble[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(1):166-173.
- [5] Anton Žnidarčič, Robert Mettin, Matevž Dular. Modeling cavitation in a rapidly changing pressure field - application to a small ultrasonic horn[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015,22(3):482-492.
- [6] Bogdan Niemczewski. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(1):354-359.
- [7] Lemlich R, Hwu C K. The effect of acoustic vibration on forced convective convective heat transfer[J]. AIChE Journal, 1961, 7 (1) :102-106.
- [8] Bergles A E. The influence of flow vibrations on forced-convection heat transfer[J]. Journal of Heat Transfer, 1946, 68 (4) : 559-560.
- [9] Bergles A E, Newell Jr P H. The influence of ultrasonic vibrations on heat transfer to water flowing in annuli[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1965, 8 (10) :1273-1280.
- [10] Rahimi M, Dehbani M, Abolhasani M. Experimental study on the effects of acoustic streaming of high frequency ultrasonic waves on convective heat transfer: Effect of transfer position and wave interface[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39 (5) : 720-725.
- [11] 刘宜波. 多场辅助太阳能露点法海水淡化关键技术研究[D]. 青岛理工大学供热、供燃气、通风及空调工程, 2013.
- [12] 张宝芝. 声空化强化沸腾传热及渗透脱水过程传质研究[D]. 陕西师范大学, 2013.