



交变压力波强化换热

汇报人：蒋二辉
单 位：郑州大学
化工与能源学院

2018-11-02

CONTENTS



1

背景与研究现状

2

交变压力波的强化理论

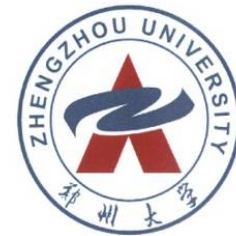
3

前处理和控制方程

4

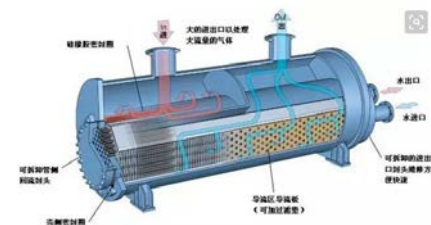
结果对比分析

Research Background



背景

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、热力发电、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。世界各国都致力于开发新型强化换热技术，以便对换热器的换热效率在一定程度上有较大改善，从而减少资源的过度消耗。大力发展换热器强化传热技术，不仅可以取得很好的经济效益，还具有可观的环境效益和节能效益。



背景和研究现状



背景

强化传热技术	强化措施	描述	强化率
被动式强化传热（无源强化）	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%
	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%

背景和研究现状



现状

- 1 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%。
- 2 2013 年刘宜波[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。
- 3 2013 年付本威[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。

CONTENTS



1

背景与研究现状

2

交变压力波的强化理论

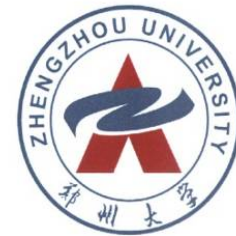
3

前处理和控制方程

4

结果对比分析

交变压力波的强化理论



空化理论

交变压力波在液体中以压力波的形式传播，存在交替出现的**高压区**和**低压区**，当**局部声压低于蒸汽的饱和蒸汽压力**时，液体微粒克服外在压力形成**空化气泡**；随之发生**震荡、成长、崩溃**的现象。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。

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。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。

CONTENTS



1

背景与研究现状

2

交变压力波的强化理论

3

前处理和控制方程

4

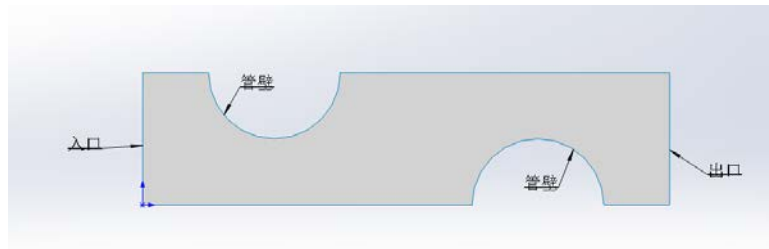
结果对比分析

前处理和控制方程



几何模型

在SOLIDWORKS进行几何模型的建立，几何尺寸和模型如图所示：



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

前处理和控制方程



控制方程

(1) 质量守恒方程（连续性方程）

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

(2) 动量守恒方程

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

式中, τ_{ij} 为剪切张量

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) \delta_{ij} \right]$$

前处理和控制方程



控制方程

(3) 能量守恒方程

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

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

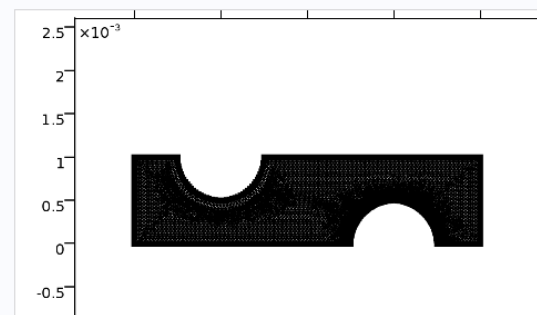
$$p = p_0 \cos(\omega t - kx)$$

网格划分

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。

网格统计

描述	值
最小单元质量	0.3424
平均单元质量	0.9492
三角形单元	8944
四边形单元	244
边单元	412
顶点单元	10



CONTENTS



1

背景与研究现状

2

交变压力波的强化理论

3

前处理和控制方程

4

结果对比分析

结果对比分析



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。

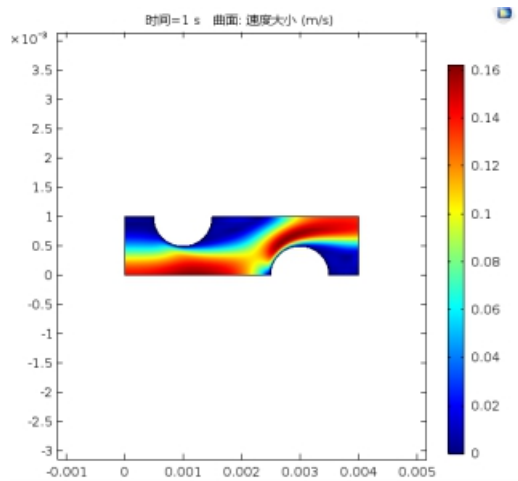
T_{in}	进口温度	300	K
P_{in}	进口压力	$5000 \times \sin(\omega * t)$	Pa
T_{wall}	管壁温度	400	K
q_m	进口质量流量	0.006	Kg/s
ω	频率	30000	Hz

结果对比分析

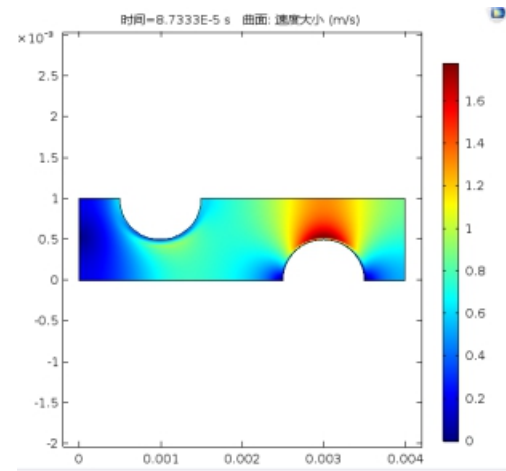


结果对比

速度云图



(a) 不加交变压力波



(b) 加入交变压力波

结果对比分析



结果分析

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。

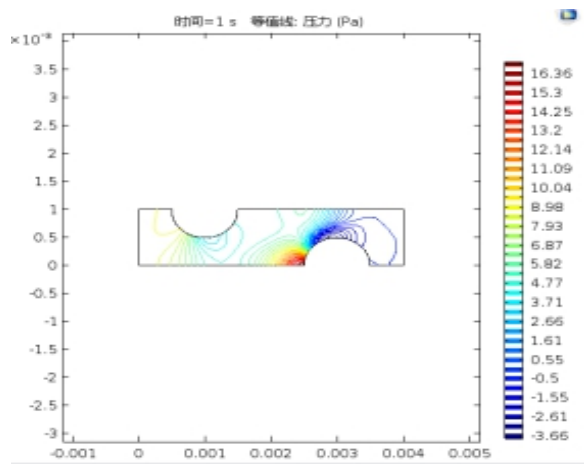
图b) 所示的云图，我们看到在管壁侧的速度最大，说明在加入交变压力的情况下，速度云图发生明显的变化，并呈现周期性的分布规律，但是我们显示的最后时刻的速度云图。

结果对比分析

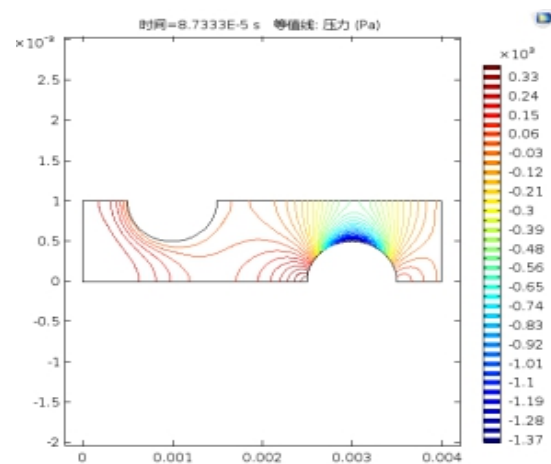


结果对比

压力等值线图



(a) 不加交变压力波



(b) 加入交变压力波

结果对比分析



结果分析

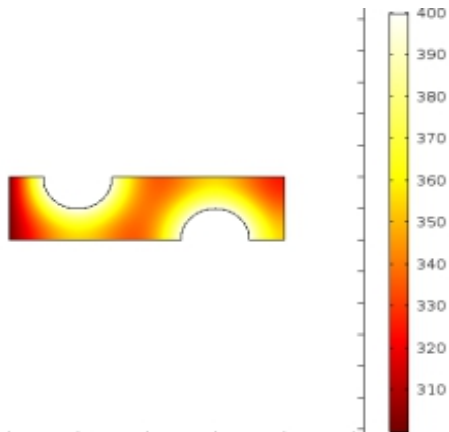
(a) 所示压力等直线云图，我们可以清晰的看到在圆柱体的正前方收到入口来流的正面冲击，流体的部分动能转化为压力势能，压力值较大；在圆柱体的背侧，压力值较低。绕流到流体两侧的流体在驱动力的驱动下，继续向前流动，遇到另一个圆柱体。从整体的模型来看，流体受到沿程阻力和局部阻力的影响，压力从模型的进口处到出口处逐渐降低。(b) 所示的压力等值线图，我们可以观察到，压力值左边较大，在第二个圆柱体的上部出现了压力较低的值，分布大致和速度云图一样。

结果对比分析

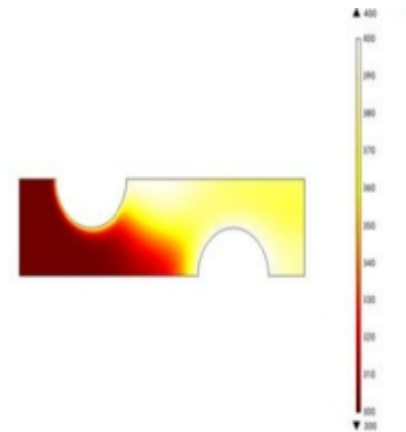


结果对比

温度云图图



(a) 不加交变压力波



(b) 加入交变压力波

结果对比分析



结果分析

(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。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，起到强化换热的效果，其分布情况和速度场、压力场保持一致。

结果对比分析



结果分析

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。



Thank you !