

肋片振动对带肋矩形通道内流动和换热影响的数值研究

沈佳欢,葛利顺,宋平,王宏光

(上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093)

摘 要: 基于 Fluent 动网格及 UDF 编程技术对二维流场中振动带肋矩形直通道的流动与换热特性进行了数值模拟,分析了振幅和频率对其换热特性的影响。数值计算表明,相比于静止的带肋矩形直通道的换热,振动对其换热有一定的影响,并且随着振幅和频率的提高,振动强化换热效果越显著;振动同时也使通道内的流场结构发生了改变,振幅和频率的提高都能使通道内的静压迅速地增加,振动时静止通道内两肋片之间尺度大小不一的两个漩涡随着振幅、频率的提高,漩涡尺度相继变小,直至最后都被主流带走。

关 键 词: 振动; 强化换热; 带肋矩形直通通道; 数值模拟

中图分类号: TK124 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.004

引 言

现代燃气轮机的涡轮进口温度已远高于叶片材料的承受极限,涡轮叶片需要进行冷却,其中涡轮叶片内部的冷却广泛采用肋片强化传热。文献[1-2]采用耦合计算的方法,对不同几何结构平行肋扰流冷却通道的流动和耦合传热特性进行了研究,结果表明当倾斜扰流肋制造的侧向流动漩涡强度较大并覆盖了多数的肋间区域时,肋间区域综合冷却效率最高,且倾斜角度为 60° 肋能在最小冷气量下取得最强的换热。涡轮的动叶片在实际工作中由于受到静叶尾迹、转子不平衡等因素的激励,使其工作处于小幅高频的振动状态^[3],因此研究叶片振动对叶片内部冷却的影响很有必要。文献[4]对诱导振动弹性管束进行了传热与振动实验研究,结果表明振动有效地提高了换热器的换热系数,文献[5]对低频振动管外的流动与传热特性进行了数值模拟与实验相结合的研究,结果表明振动有利于强化传热,且其强化传热效果随着振动频率与振幅升高而增强。本研究将文献[6]中的带肋矩形通道简化为壁面可以振动的二维模型,采用 ANSYS FLUENT 软件对其流动与换热问题进行数值模拟,并将

计算结果与实验研究结果进行比较^[6];在此基础上再对冷却空气在振动矩形通道内的换热问题进行数值计算,并从流动和传热的机理上对计算结果进行分析。

1 计算模型及数值计算

1.1 计算模型

计算对象为文献[6]的实验通道,如图1所示,其中连接到实验通道进口处长方体形的压力通风系统提供了气流,总长为 $25d$,通道出口的空气直接排入大气,方形截面黄铜肋片胶粘在加热通道的顶部和底部壁面,壁面提供了均匀的热通量。将其通道简化为二维计算模型,因对称取其一半作为计算域,如图2所示。计算域几何参数:FE为对称轴,通道高度为 $d=51\text{ mm}$,则计算域出口 $DE=0.5d$,进口 $AF=1.5d$, $BC=1d$,肋片进口段 $CH=23\text{ mm}$,其后分布8个等间距肋片,肋高 $e=2.4\text{ mm}$,肋间距 $p=24\text{ mm}$,进口从实际实验段截取 $AB=6d$ 的入口段,出口向外延伸 $KD=5d$ 长。

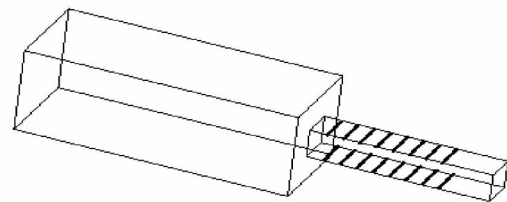


图 1 文献[6]的实验通道

Fig. 1 Experimental channel adopted by the literature No. 6

1.2 数值计算

1.2.1 壁面静止时的数值模拟

近壁面区域采用 20 层结构化网格,总高度为 1

收稿日期: 2014-03-25; 修订日期: 2014-05-04

作者简介: 沈佳欢(1990-),男,上海崇明人,上海理工大学硕士研究生。

mm, 网格在贴壁面处加密, 其他区域采用三角形网格, 第一层网格距离壁面 0.05 mm, 此时 $y^+ < 5$, 网格总数约为 30 万。肋片处的网格如图 3 所示, 由于实验中电阻加热器布置在壁面而非肋片表面, 所以需采用共轭换热, 即流体区和固体区分开画网格, 并在两区交界面进行网格连接。采用 ANSYS FLUENT 软件, 湍流模型为 standard $k - \epsilon$ 模型, 近壁采用 Scalable 壁面函数处理, 对流项采用二阶迎风离散格式, 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。进口 AF 给定总压, 出口 DE 采用压力出口边界条件, 冷却工质为空气, 通道壁面为无滑移边界条件, 区域 CK 的换热条件为均匀热流量 $q = 1\ 800\ \text{w/m}^2$, 其余为绝热边界。

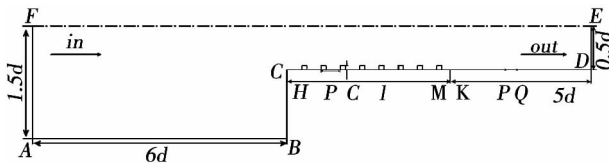


图 2 简化计算模型

Fig. 2 Simplified calculation model

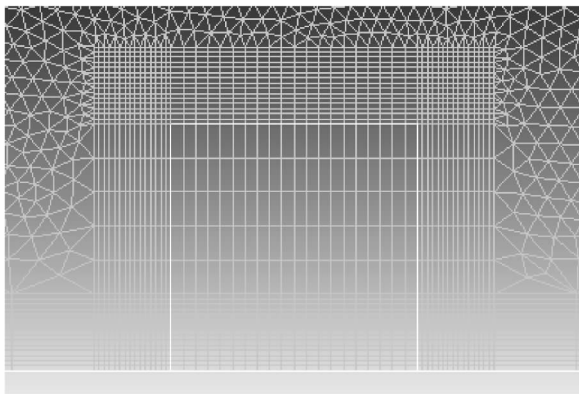


图 3 肋片附近局部加密网格图

Fig. 3 Chart showing the grid refined partially around the ribs

1.2.2 壁面振动时的数值模拟

当壁面 OJ 段以正弦函数形式垂直于来流方向做简谐振动时, 函数形式为:

$$y = A \sin(\omega t) = A \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

式中: A —壁面振动的振幅, mm; ω —振动角频率, s^{-1} ; f —振动频率, Hz。

振动段 COJK 为直线时是振动起始位置, 设该相位角为 0° , 向上振动到虚线 $CO'J'K$ 时相位角达到 90° , 向下振动到虚线 $CO''J''K$ 时相位角达到

270° , 如图 4 所示, 其中 $CO = JK = 10\ \text{mm}$, 振动段 OHMJ 的近壁面结构化网格随壁面一起运动并保持不变, CO 段和 JK 段的近壁网格随壁面运动并发生相应变化。湍流模型同样采用 standard $k - \epsilon$ 模型, 对流项采用二阶迎风离散格式, 压力与速度耦合方式采用 PISO(压力隐式算子分裂) 方法, 进出口、壁面条件同静止时一样, 振动段 COJK 的位移和速度边界条件采用 UDF(用户自定义函数) 控制^[7-8], 收敛标准为各计算残差都小于 10^{-6} 。

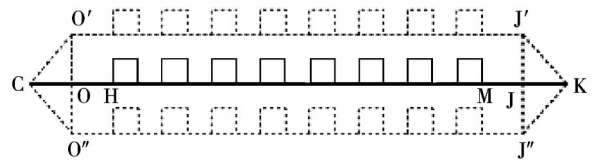


图 4 肋片振动形式

Fig. 4 Vibration mode of ribs

2 计算结果分析

2.1 稳态数值模拟与实验结果对比

内冷通道 Re 数、平均 Nu 数的定义:

$$Re = \frac{UD}{\nu}, Nu = \frac{h_0 D}{\lambda} \quad (2)$$

式中: ν —按冷却工质进出口平均温度计算的运动粘度 m^2/s ; U —入口平均速度 m/s ; D —内冷通道的当量直径, mm; h_0 —按光通道面积计算的平均换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; λ —冷却工质的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 。

为了验证数值模拟结果的可靠性, 对相同工况下的数值计算结果和文献 [6] 实验结果进行比较。图 5 是在不同网格数下进行的网格无关性验证, 表明 30 万的网格数目能符合计算要求; 图 6 是在 $Re = 30\ 000$ 下, 90° 直肋冷却通道内壁面 Nu 数的计算值与实验值的比较曲线, 横坐标以 C 点为原点, 向右为正方向, 纵坐标为 Nu 数。可以看出在 $Re = 30\ 000$ 下, 气流经过前几个肋片后, Nu 数呈周期性变化。按以上数值模型计算的结果与实验值之间的误差为 15%, 表明数值模拟的结果可以接受。

2.2 壁面振动矩形通道内换热计算结果分析

以 $Re = 30\ 000$ 为例来说明振动对矩形通道内换热的影响。壁面振动区域 COJK 做简谐振动, 振动的频率和振幅如表 1 所示, 分别计算了 6 个算例,

比较振幅、频率和相位对流动的影响。

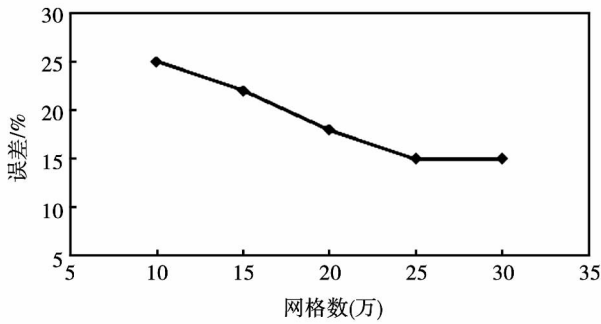


图 5 网格无关性验证

Fig. 5 Verification of independence of the grid

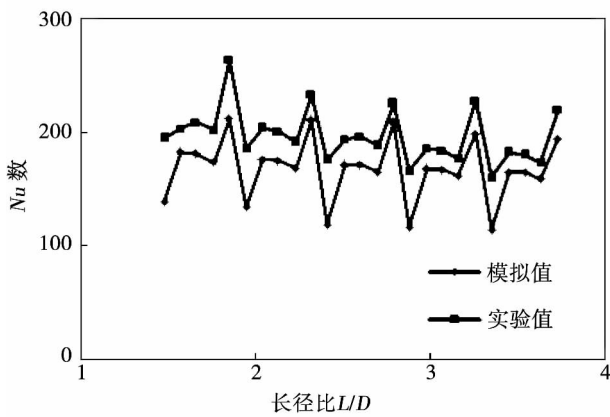


图 6 肋片在 $Re = 30\ 000$ 时 Nu 随长径比变化的对比图

Fig. 6 Chart showing the contrast when $Re = 30\ 000$

表 1 区域 COJK 的振动边界条件

Tab. 1 Boundary conditions for the vibration in the area COJK

算例	I	II	III	IV	V	VI
振幅 A/mm	0.5	1	1.5	1	1	1
频率 f/Hz	100	100	100	50	100	200

计算过程中监测了出口边界上的平均速度随时间的变化情况,如图 7 所示。可以看出:6 个周期后,该速度基本呈周期性变化,认为 6 个周期后数据基本稳定。研究选取第 7 个周期的数据进行比较分析。

2.2.1 频率、振幅对静压的影响

为了说明振动对肋片下游流动的影响,故在下游流动参数相对稳定区域壁面上截取一段 PQ 进行分析,此时 $MP = 208.6\ \text{mm}$, $PQ = 20\ \text{mm}$ 。图 8(a) 是振幅为 1 mm 相位角为 0° 频率分别为 50、100、200 Hz 时流域下游 PQ 段的静压对比图。可以看出随

着频率的增加,静压迅速上升;图 8(b) 是频率为 100 Hz 相位角为 0° 振幅分别为 0.5、1、1.5 mm 时的静压对比图,同样可看出,随着振幅的增加,静压迅速上升,但静压上升的幅度较图 8(a) 缓慢些。从这两幅图中可以看出,由于振动能量的输入,流场中的能量迅速增加,说明振动起到了对流场做功的效果,功最后转化为流场自身的能量。

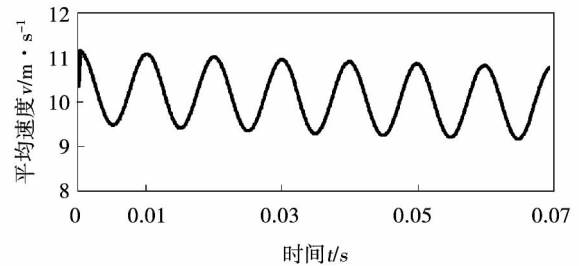
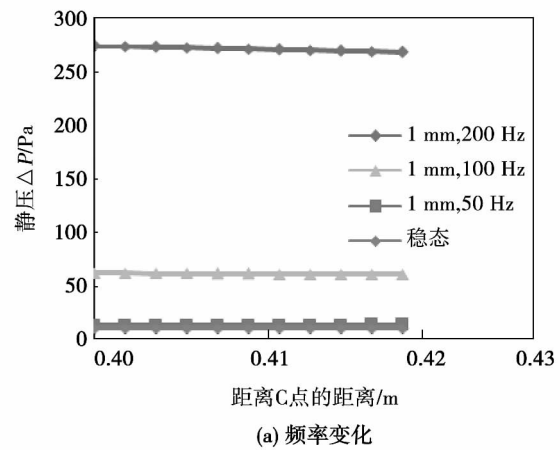
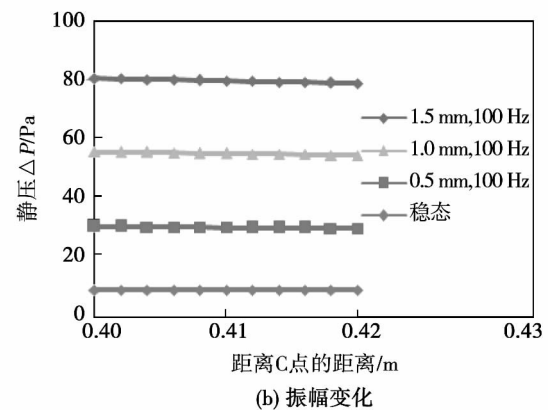


图 7 出口边界上平均速度随时间变化图

Fig. 7 Chart showing changes of the average speed with time at the outlet boundary



(a) 频率变化



(b) 振幅变化

图 8 简谐振动时静压图

Fig. 8 Chart showing the static pressure when a simple harmonic vibration takes place

2.2.2 Nu 数随相位角、振动频率、振幅的变化

从图 9 可看出 振动对换热有一定的影响 在一定条件下能强化换热 且随着振动相位角的变化而变化 同时随着频率的提高或者振幅的加大 强化换热区也在不断增大。以相同工况下静止的平均努赛尔数 Nu_0 作为标准来衡量振动强化换热的效果:

$$\delta = \frac{Nu - Nu_0}{Nu_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Nu_0 —静止矩形通道一个振动周期内对流换热平均努赛尔数; Nu —相同工况下振动矩形通道一个振动周期内对流换热平均努赛尔数。

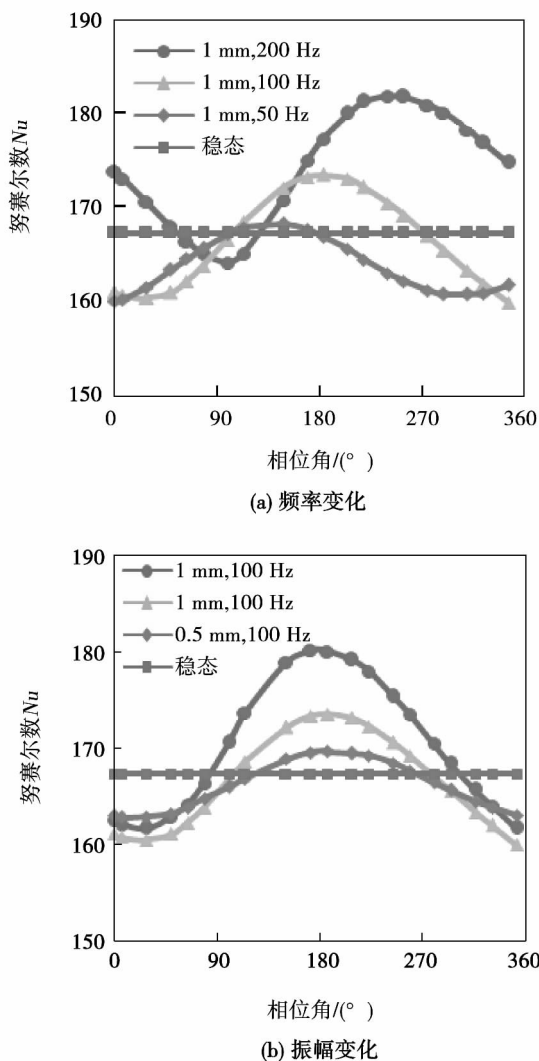


图 9 相位角变化下的 Nu 数图

Fig. 9 Chart showing the Nu number under the condition of the phase angle being changed

从图 9 (a) 中可计算出 当振幅为 1 mm 频率为 50、100 Hz 时 换热反而减弱 当达到 200 Hz 时 换热增强 振动强化换热为 4.2%; 从图 9 (b) 中可计

算出 当频率为 100 Hz 时 增幅为 0.5、1 mm 时 换热也减弱 当达到 1.5 mm 时 换热增强 振动强化换热为 1.6%。由此可说明当振幅或者频率达到一定数值时 其振动换热效果优于不振动时的换热效果 且随着振动频率的增加和振幅的提高 换热效果得到改善。分析原因: 矩形通道的振动使得通道表面附近的流体流动边界层发生扰动 进而导致热边界层的扰动 传热效果得到改善; 频率增大时 换热板的振动响应加快 从而使得通道表面的流体流动边界层及热边界层扰动更加充分 使得传热效果增强 振幅增大时 换热通道的形状变化增加 通道内流体速度场及温度场的变化幅度增加 从而使得传热效果增加。

2.2.3 振动对流场的影响

为了使矩形通道在振动状态和静止状态下作比较 分析振动给流场所带来的影响 需保持静止时所给的边界条件。从图 10 (a) 静止矩形通道中的流线图可以看出 通道内壁面附近的流体经过肋片时 由于肋片的绕流作用 在两个肋片之间的内壁面区域产生两个漩涡。沿流向看 第一个漩涡存在于前面肋片的下游 第二个漩涡存在于下一个肋片的上游 在两个肋片的内壁面中间区域为边界层的再附着区域。与图 10 (a) 相比 图 10 (b) - 图 10 (f) 分别是各自振动状态下相位角为 0° 时的流线图。从这些图中可以看出 当区域振动时 流场结构发生了变化 当小振幅、低频率时 原来前面肋片下游的大尺度漩涡由于流场振动变成了一个小尺度漩涡 而肋片上游的小尺度漩涡发生了破碎 被主流带走; 随着振幅的提高和频率的加大 较大尺度的漩涡也发生破碎 直至也被主流带走; 振幅越大 频率越大 对原有的流场影响也越大 流线也越陡; 相对于稳态时的内壁面 振动破坏了壁面附近流动边界层 使流动紊乱程度加剧 进而影响到了壁面与空气的换热 振幅、频率越大 流动也越紊乱 流线偏离原流动方向程度也越大 强化换热区也越大 这与文献 [9] 中振动平板随着振幅、频率的增加 改善换热效果的结论基本一致。

3 结 论

运用 ANSYS FLUENT 软件的动网格技术和 UDF 编程方法对带肋矩形通道振动对于对流换热和流场的影响作了分析 得出以下结论:

(1) 振动对换热的影响随着相位角的变化而变化; 振幅、频率足够大时能强化换热且随着频率、振

幅增加, 强化换热区也在不断增大。在本研究计算范围内, 当振幅为 1 mm, 频率为 200 Hz 时, 振动强化换热为 4.2%, 当振幅为 1.5 mm, 频率为 100 Hz 时, 振动强化换热为 1.6%。

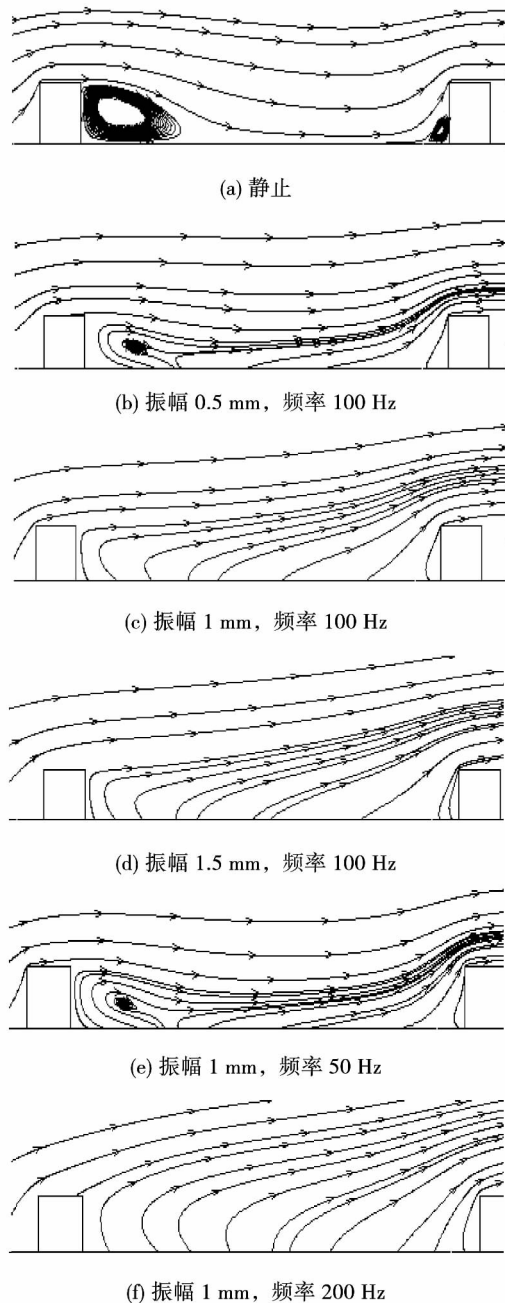


图 10 冷却通道内空气流线图

Fig. 10 Chart showing the air streamlines inside the cooling channel

(2) 由于振动能量的输入, 流场中的静压迅速增加。稳态时肋间的两个漩涡随着振幅、频率的提高相继变小, 直至都被主流带走; 振幅越大、频率越高, 对流场的影响也越大, 壁面附近流线也越陡。

参考文献:

- [1] 迟重然, 任静, 蒋洪德. 燃机叶片平行肋扰流内冷通道传热特性研究 Part 1: 流动传热机理[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(4): 624-627.
CHI Zhong-ran, REN Jing, JIANG Hong-de. Study of heat transfer characteristics of flow disturbance inner cooling channels formed by parallel ribs on turbine blades, Part 1: mechanism governing the flow and heat transfer [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(4): 624-627.
- [2] 迟重然, 任静, 蒋洪德. 燃机叶片平行肋扰流内冷通道传热特性研究 Part 2: 耦合传热特性[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(1): 42-45.
CHI Zhong-ran, REN Jing, JIANG Hong-de. Study of heat transfer characteristics of flow disturbance inner cooling channels formed by parallel ribs on turbine blades, Part 2: coupled heat transfer characteristics [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(1): 42-45.
- [3] 艾书民, 王克明, 廖辉, 等. 稳态温度场下涡轮叶片振动特性的研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2011, 28(4): 17-21.
AI Shu-min, WANG Ke-ming, LIAO Hui, et al. Study of the vibration characteristics of turbine blades in a steady-state temperature field [J]. Journal of Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 28(4): 17-21.
- [4] 程林, 田茂诚, 张冠敏. 一种复杂非线性传热元件的传热及污垢特征[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 130-132.
CHENG Lin, TIAN Mao-cheng, ZHANG Guangmin. The heat transfer and fouling characteristics of a kind of complex nonlinear heat transfer element [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(1): 130-132.
- [5] 姜波, 田茂诚, 程林. 低频振动管外流动与传热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(5): 811-813.
JIANG Bo, TIAN Mao-cheng, CHENG Lin. Study of the flow and heat transfer characteristics outside the low frequency vibration tubes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(5): 811-813.
- [6] Han J. C. Heat Transfer and Friction Characteristics in Rectangular Channels With Rib Turbulators [J]. ASME Journal of heat transfer, 1988, 110: 321-328.
- [7] 宿艳彩, 葛培琪, 闫柯, 等. 流体扰流不同方向振动圆柱换热特性数值分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 221-223.
SU Yan-cai, GE Pei-qi, YAN Ke, et al. Numerical analysis of the heat transfer characteristics of a cylinder vibrated by fluid turbulence in different directions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(10): 221-223.
- [8] 裘进浩, 李大伟, 聂端, 等. 增加翼型升力的局部振动流动控制技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(5): 638-644.
QIU Jin-hao, LI Da-wei, NIE Duan, et al. Local vibration and flow control technology for enhancing the airfoil lift [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 44(5): 638-644.
- [9] 王一平, 卢艳华, 朱丽, 等. 振动平板的传热性能试验[J]. 天津大学学报, 2010, 43(6): 549-552.
WANG Yi-ping, LU Yan-hua, ZHU Li, et al. Heat transfer performance test of a vibrating plate [J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(6): 549-552.

(姜雪梅 编辑)

ature on turbine blades. **Key Words:** finite volume method ,weighted least square method ,gas-heat coupling ,transition

肋片振动对带肋矩形通道内流动和换热影响的数值研究 = **Numerical Study of the Influence of the Rib Vibration on the Flow and Heat Exchange in a Rectangular Channel with Ribs** [刊 汉] SHEN Jia-huan ,GE Li-shun ,SONG Ping ,WANG Hong-guang (College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(6) . -617 -621

Numerically simulated were the flow and heat exchange characteristics of a rectangular straight channel with ribs being vibrated in a two-dimensional flow field based on the Fluent mobile grid and UDF (user defined function) programming technology and analyzed was the influence of the amplitude and frequency on the heat exchange characteristics. The numerical calculation results show that compared with the heat exchange in a static rectangular straight channel with ribs ,the vibration has a certain influence on the heat exchange and with an increase in the amplitude and frequency ,the heat exchange effectiveness intensified by the vibration becomes more and more evident. In the meantime ,the vibration can also force the configuration in the flow field inside the channel to be changed and to increase either amplitude or frequency can make the static pressure in the channel quickly increase. During the vibration ,the two vortices in different sizes existing between the two ribs inside the channel will become smaller and smaller one after another with an increase of the amplitude and frequency until they are all finally carried away by the main stream. **Key Words:** vibration ,intensified heat exchange ,rectangular straight channel with ribs ,numerical simulation

竖直矩形窄通道内水沸腾换热的流型研究 = **Study of the Water Boiling Heat Exchange Flow Pattern in a Vertical Rectangular Narrow Channel** [刊 汉] YANG Li-hui ,TAO Le-ren ,HUANG Li-hao (Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) ,WANG Xiao-song (Ingersoll Rand Asia and Pacific Ocean Engineering Technology Center ,Shanghai ,China ,Post Code: 200051) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(6) . -622 -626

By employing the visualization method ,observed was the two-phase pattern of a water flow heated at a single side in a vertical narrow channel. It has been found that there mainly exist four kinds of flow pattern ,namely ,isolated bubble flow ,combined bubble flow ,agitation flow and annular flow. Contrasted with the flow pattern charts under the similar operating conditions given in the literatures ,it has been discovered that the flow pattern transition has some-