

矩形通道内脉动层流阻力特性实验研究

刘宇生^{1,2}, 谭思超¹, 高璞珍¹, 张虹³

(1. 哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100082;

3. 中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 针对简谐脉动层流条件下矩形通道内的阻力特性进行理论和实验研究。基于脉动条件下矩形通道内层流流动的数学模型, 分析了脉动周期、脉动振幅等因素对摩阻常数的影响, 并进行实验验证。结果表明: 脉动层流摩阻常数与脉动周期、脉动振幅、通道高宽比和流体性质有关; 层流摩阻常数理论值与实验值相吻合, 脉动周期越小或相对振幅越大, 层流摩阻常数的峰值越大、谷值越小, 层流摩阻常数脉动的幅度越大。

关键词: 脉动流; 矩形通道; 阻力特性

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)02-0223-06

doi: 10. 7538/yzk. 2013. 47. 02. 0223

Experimental Study on Resistance Characteristics of Pulsating Laminar Flow in Rectangular Channel

LIU Yu-sheng^{1,2}, TAN Si-chao¹, GAO Pu-zhen¹, ZHANG Hong³

(1. *National Key Discipline Laboratory of Nuclear Safety and Simulation Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;*

2. *Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China;*

3. *Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)*

Abstract: Resistance characteristics of pulsating laminar flow in a rectangular channel were investigated analytically and experimentally. Mathematical model of laminar flow was established. The influences of the flow fluctuation period and relative amplitude on friction constant were analyzed. Analytical results were verified by experiment. The results show that friction constant in pulsating laminar flow is a function of pulsating period, relative amplitude, aspect ratio and fluid properties. The friction constants deduced by theoretical analysis are consistent with experiment results, and the pulsating amplitude of friction constant will become large as the pulsating period becomes short or the relative amplitude becomes large.

收稿日期: 2011-08-07; 修回日期: 2012-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50806014); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCFZ1008); 核反应堆系统设计技术重点实验室基金资助项目(KZAKA1101)

作者简介: 刘宇生(1986—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 核能科学与工程专业

Key words: pulsating flow; rectangular channel; resistance characteristics

流量波动现象广泛存在于核动力系统中,泵和风机等装置的启停、地震和海洋条件造成的附加惯性力均会使反应堆冷却系统的流量出现脉动,使冷却剂的流动和换热特性发生改变,进而影响反应堆的安全运行^[1-3]。同时,矩形通道由于具有结构紧凑、换热面积大、设计应用灵活等热工水力特性,目前广泛应用于航空航天、微电子冷却及动力工程等领域。但矩形通道几何特征特殊,宽窄边尺寸相差较大,流动阻力特性复杂,现有的矩形通道热工水力分析模型所采用的计算关系式仍是基于稳态流动条件下所获得的^[4-6],这势必影响结果的准确性。因此,有必要对矩形通道内脉动流的阻力特性及其影响因素展开研究,以提高反应堆安全分析的可靠性,为其他不稳定流动,如海洋条件或泵阀因素造成的流量波动的研究提供参考。

1 实验装置及现象

1.1 实验装置

实验装置简图如图 1 所示,流体从循环水泵流出,经管路各控制阀的调节和电磁流量计后进入试验段,回到循环水泵,完成循环,由变频器带动循环水泵使回路流体产生流量波动,压差传感器和流量计分别测量试验段的压差和流量,并将数据传送给高性能的数据采集系统,由计算机生成数据表格。实验工质为去离子水,实验参数为:实验压力 0.1 MPa,试验段前后压降范围 0~1.5 kPa,雷诺数范围 0~4 000,实验过程流体温度 14.0~15.0 °C,流量脉动周期 5~120 s,矩形通道的截面尺寸 40.38 mm×3.1 mm。

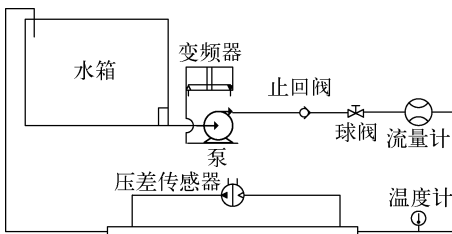


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

1.2 系统验证与典型实验现象

实验之前进行了矩形通道内稳定流动实验,得到相应的摩擦系数 λ 和 Re 的关系,结果示于图 2。层流区的摩擦理论值由凯斯公式^[7]计算得到,对于本实验段,摩擦常数为 $\lambda Re=87.3$ 。紊流区采用了 Sadatomi^[8]和勃拉休斯^[9]公式作为对比,可知,实验值与理论值符合得很好,表明实验系统稳定可靠。启动实验装置,运行一段时间后,系统处于流量波动状态,试验段内的流量和压降均呈周期性波动,结果示于图 3。

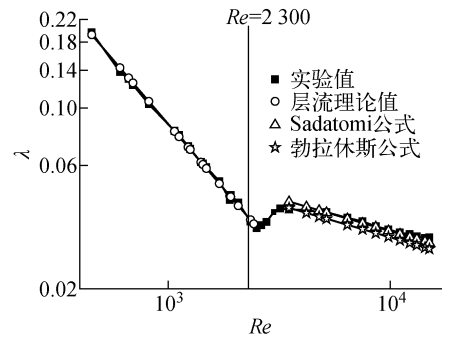


图 2 实验系统验证

Fig. 2 Verification of experimental system

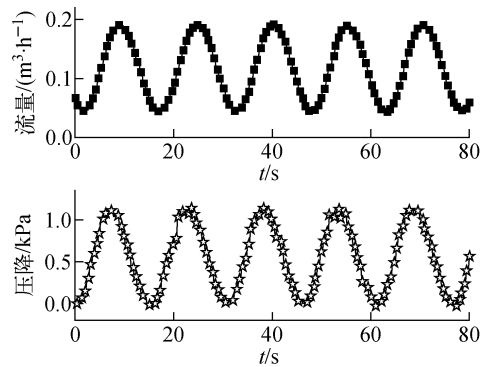


图 3 典型实验现象

Fig. 3 Typical experimental phenomena

2 层流脉动流摩擦常数的数学模型

对于矩形通道内不可压缩黏性流体充分发展的层流,当通道内压力在管道截面上均匀分布,且整个通道上压力梯度随时间以余弦规律变化时,可应用分离变量法和复分析法得到矩形通

道截面上的无量纲脉动速度 u^* 的分布^[10]:

$$u^* = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{48(-1)^{k+1}}{(2k-1)^3 \pi^3} \left(1 - \frac{\cosh \frac{2k-1}{2\alpha} \pi y^*}{\cosh \frac{2k-1}{2\alpha} \pi}\right) \cdot \cos\left(\frac{2k-1}{2} \pi z^*\right) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{12A_p(-1)^{k+1} \sqrt{B_1^2 + B_2^2}}{\pi(2k-1)M^2} \cos(\omega^* t^* + \theta - \phi) \cos\left(\frac{2k-1}{2} \pi y^*\right) \quad (1)$$

其中: A_p 为压降相对振幅,用以表征压力脉动; α 为矩形通道高宽比; ω^* 为无量纲脉动频率; t^* 为无量纲时间; y^* 、 z^* 为关于矩形通道的无量纲长度; M 为关于矩形通道高宽比和脉动周期的无量纲参数; ϕ 、 θ 、 B_1 、 B_2 为常数。

ϕ 、 θ 、 B_1 、 B_2 的计算公式分别为:

$$\phi = \arctan \frac{B_2}{B_1}$$

$$\theta = \arctan \frac{-4\omega^*}{\alpha^2(2k-1)^2 \pi^2}$$

$$B_1 = \left(2\cosh\left(M\sin\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(M\cos\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cosh\left(z^* M\sin\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(z^* M\cos\frac{\theta}{2}\right) + 2\sinh\left(M\sin\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(M\cos\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sinh\left(z^* M\sin\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(z^* M\cos\frac{\theta}{2}\right)\right) / \left(\cos\left(2M\cos\frac{\theta}{2}\right) + \cosh\left(2M\sin\frac{\theta}{2}\right)\right) - 1$$

$$B_2 = \left(2\sinh\left(M\sin\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(M\cos\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cosh\left(z^* M\sin\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(z^* M\cos\frac{\theta}{2}\right) - 2\cosh\left(M\sin\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(M\cos\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sinh\left(z^* M\sin\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(z^* M\cos\frac{\theta}{2}\right)\right) / \left(\cos\left(2M\cos\frac{\theta}{2}\right) + \cosh\left(2M\sin\frac{\theta}{2}\right)\right)$$

$$M = \left(\frac{(2k-1)^4 \alpha^4 \pi^4}{16} + \omega^{*2}\right)^{1/4}$$

将无量纲瞬态脉动速度沿整个通道截面做积分并取截面平均,可求得随时间变化的截面平均速度 \bar{u} :

$$\bar{u} = -\frac{\alpha^2 \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_s}{3\mu} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{96}{(2k-1)^4 \pi^4} -$$

$$192\alpha \tanh \frac{(2k-1)\pi}{2\alpha} / \left((2k-1)^5 \pi^5\right) + 24A_r \left(\left(D_2 \cos\left(\omega t + \frac{3\theta}{2}\right) + D_1 \sin\left(\omega t + \frac{3\theta}{2}\right) - M\cos(\omega t + \theta)\right)\right) / \left(\pi^2(2k-1)^2 M^3\right) \quad (2)$$

式中: A_r 为相对幅值; 下标 s 表示稳态; D_1 、 D_2 为常数。

D_1 、 D_2 的计算公式分别为:

$$D_1 = \frac{\sinh\left(2M\sin\frac{\theta}{2}\right)}{\cos\left(2M\cos\frac{\theta}{2}\right) + \cosh\left(2M\sin\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$D_2 = \frac{\sin\left(2M\cos\frac{\theta}{2}\right)}{\cos\left(2M\cos\frac{\theta}{2}\right) + \cosh\left(2M\sin\frac{\theta}{2}\right)}$$

因管道水平放置,且压力梯度为负,可知:

$$\frac{\partial p(t)}{\partial x} = -\frac{\Delta p(t)}{L} = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_s (1 + A_p \cos \omega t) \quad (3)$$

又知:

$$\Delta p_f(t) = \Delta p(t) - \Delta p_a(t) = \Delta p(t) - \rho L \frac{d\bar{u}}{dt} \quad (4)$$

式(2)~(4)结合,有:

$$\Delta p_f = \Delta p(t) \left(1 - \frac{8\omega^* A_p}{(1 + A_r \cos \omega t)}\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \left(\left(M\sin(\omega t + \theta) - D_2 \sin\left(\omega t + \frac{3\theta}{2}\right) + D_1 \cos\left(\omega t + \frac{3\theta}{2}\right)\right) / \left(\pi^2(2k-1)^2 M^3\right)\right) \quad (5)$$

又由达西公式知:

$$\Delta p_f(t) = \lambda \frac{L}{D_e} \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \quad (6)$$

式中: p 为压力; x 为长度方向; L 为管长; Δp_f 为摩擦压降; Δp_a 为加速压降; ρ 为密度; D_e 为当量直径。

式(5)与式(6)联立,有:

$$C_p = \frac{4}{(1 + \alpha)^2} \left(1 + A_p \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8\omega^* A_p}{(2k-1)^2 \pi^2 M^3} \cdot \left(M\sin(\omega t + \theta) - D_2 \sin\left(\omega t + \frac{3\theta}{2}\right) + D_1 \cos\left(\omega t + \frac{3\theta}{2}\right)\right) / \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{4}{(2k-1)^4 \pi^4} - \frac{8\alpha}{(2k-1)^5 \pi^5} \cdot$$

$$\tanh \frac{(2k-1)\pi}{2\alpha} + \frac{A_p}{\pi^2(2k-1)^2 M^3} \cdot \left(D_2 \cos\left(\omega t + \frac{3\theta}{2}\right) + D_1 \sin\left(\omega t + \frac{3\theta}{2}\right) - M \cos(\omega t + \theta) \right) \quad (7)$$

式中, C_p 定义为脉动层流摩阻常数。

利用式(7)对周期为 10 s、相对振幅为 0.56 的工况进行计算, 并采用图 1 所示实验装置进行验证, 实验和理论摩阻常数随时间变化的情况示于图 4。图 4 中同时给出稳定流动的层流摩阻常数曲线。

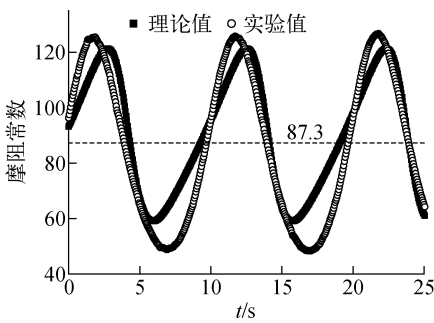


图 4 摩阻常数随时间的变化

Fig. 4 Change of friction constants with time

结合式(7)可知: 矩形通道内脉动层流摩阻常数与稳定层流摩阻常数不同, 稳定流动时, 摩阻常数仅与流道高宽比有关; 流量脉动时, 层流的摩阻常数 C_p 与脉动周期、脉动相对振幅、流道高宽比和流体性质有关, 且随时间周期性脉动, 存在脉动峰值和谷值。

结合摩阻常数随时间的变化情况可知, 实验值与理论公式计算的结果吻合得较好, 在半个周期时间内, 脉动流的摩阻常数比同流速下稳定流动的摩阻常数高; 在另外半个周期内, 脉动流的摩阻常数比同流速下稳定流动的摩阻常数低。

受实验条件所限, 本工作仅对脉动周期和脉动相对振幅两个因素对摩阻常数峰值和谷值的影响进行实验研究。对得到的实验摩阻常数的峰、谷值进行处理, 并与式(7)的计算结果进行对比, 结果示于图 5。由图 5 可见, 理论预测值与实验值的相对偏差在 $\pm 25\%$ 之内。产生偏差的可能原因为: 理论模型对截面压力分布、流体性质、试验段压降均进行了理想化处理, 而实

际实验过程中, 流体的温度会缓慢变化, 流体的性质也会变化, 试验段的压降也不是理想的余弦变化; 实验过程中, 对流量和压差两个参数进行动态测量, 测量结果存在偏差。当然, 产生偏差的具体原因还需进一步实验研究。

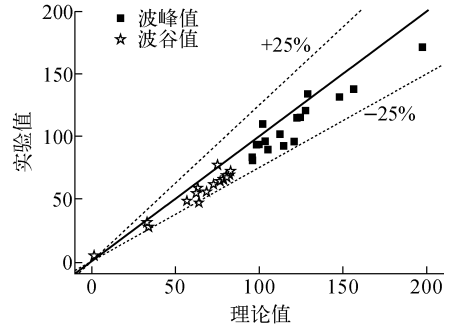


图 5 脉动流摩阻常数理论值与实验值的对比

Fig. 5 Comparison of theoretical and experimental friction constants

3 层流脉动流的阻力特性

3.1 脉动周期对摩阻常数的影响

根据式(7)计算得到脉动层流摩阻常数随脉动周期变化的情况, 结果示于图 6, 同时进行不同脉动周期的验证实验, 结果示于图 7。

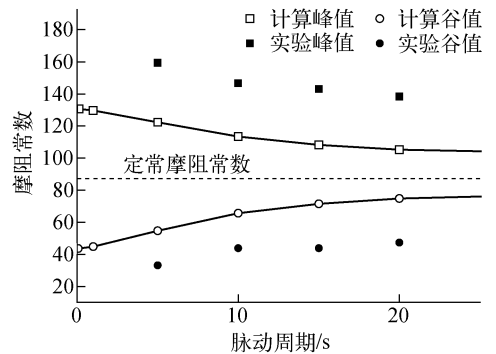


图 6 脉动周期对摩阻常数的影响

Fig. 6 Influence of pulsating period on friction constant

由图 6 可知, 随着脉动周期的不断增大, 摩阻常数的脉动峰值不断变小, 脉动谷值不断增大, 波峰、波谷的差值(即摩阻常数脉动的幅值)逐渐变小, 摩阻常数的峰值和谷值均向定常流动的摩阻常数靠近。对于本实验, 根据 Ohmi 等^[11]对脉动流的分区原则, 周期 T 大于 100 s

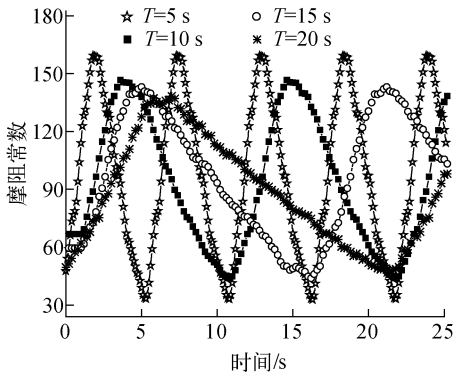


图7 不同脉动周期下摩阻常数随时间的变化
Fig. 7 Change of friction constant with time under different pulsating periods

时,处于类稳流区,流体的流动与稳定流动类似,因此脉动周期对摩阻常数的影响不明显;周期在 $0.2 \sim 100$ s 范围内时,流动处于过渡状态,流体的黏性和惯性两种作用相当,随着脉动周期减小,惯性作用越来越居于主导地位,因此摩阻常数的脉动幅值急剧增加;周期小于 0.2 s 时,为惯性主导区,流体的流动主要受惯性影响,摩阻常数随流动惯性的增加而增加。图7中同时用散点标示了实验摩阻常数的波峰和波谷值,实验值的变化趋势与理论值的变化趋势一致,但数值有一定的偏差,原因如上所述。

图7所示实验结果与图6中模型计算的结果一致,随着脉动周期的增大,摩阻常数的脉动峰值变小,脉动谷值增大,摩阻常数脉动的幅值变小。原因与图6相同,均是因周期增大,流体的黏性作用逐渐显著,流动向类稳流区靠近,摩阻常数变化幅值不断减小,向定常流动的摩阻常数靠近。

3.2 脉动振幅对摩阻常数的影响

脉动周期保持 20 s 不变,利用式(7)计算摩阻常数 C_p 随相对振幅的变化,结果示于图8。由图8可知:随着相对振幅的不断增大,摩阻常数的波峰值不断增加,波谷值不断减小,摩阻常数的脉动幅值不断增加。对该工况进行实验,得到不同相对振幅下摩阻常数的实验值,结果示于图9。由图9可知:随着相对振幅的不断增大,波峰点的实验摩阻常数更高,波谷点的实验摩阻常数更低,摩阻常数的脉动幅值不断增加。图8中实验摩阻常数 C_p 峰谷值的变化趋势与理论峰谷值的变化趋势吻合,且理论结果表明,

在相对振幅为 $0 \sim 1$ 时,随着相对振幅增加,摩阻常数的峰值不断增加,谷值不断降低,摩阻常数的脉动幅值不断变大,当相对振幅超过 0.9 后,摩阻常数的变化幅值急剧增加。这主要是因压力相对振幅越大,流体速度的变化幅度越大,流体微层之间的切应力越大,进而导致摩阻压降增大,摩阻常数增大。

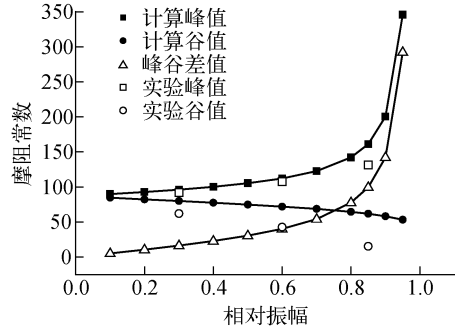


图8 脉动振幅对摩阻常数的影响
Fig. 8 Influence of relative amplitude on friction constant

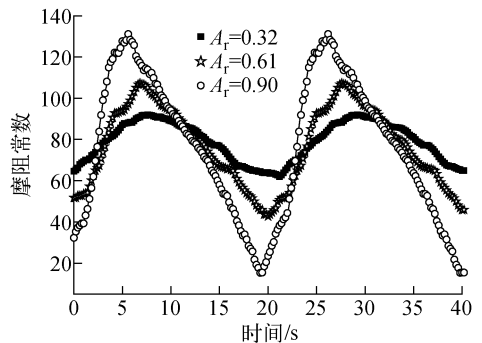


图9 不同相对振幅下摩阻常数随时间的变化
Fig. 9 Change of friction constant with time under different relative amplitudes

4 结论

1) 对脉动层流摩阻常数的理论分析表明,摩阻常数 C_p 与脉动周期、脉动振幅、流道高宽比和流体性质有关,且摩阻常数随时间周期性脉动,存在峰值和谷值。

2) 脉动流的阻力特性与稳定流动差别很大,在半个周期的时间内,脉动流的摩阻常数比同流速下稳定流动的摩阻常数大;在另外半个周期内,脉动流的摩阻常数比同流速下稳定流动的摩阻常数小。

3) 使用本文得到的脉动层流摩阻常数理论公式与实验结果进行对比,理论预测结果和实验结果一致,但存在偏差。同时理论和实验结果均表明:脉动周期增大,摩阻常数的脉动峰值变小,脉动谷值增大,脉动波峰与脉动波谷的差值减小;脉动相对振幅增加,摩阻常数的波峰值增加,摩阻常数的波谷值减小,摩阻常数的脉动幅值不断增加。

参考文献:

- [1] 阎昌琪. 核反应堆工程[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2004:243-251.
- [2] 谭思超,庞凤阁. 摇摆运动引起的波动与自然循环密度波型脉动的叠加[J]. 核动力工程,2005,26(2):140-143.
TAN Sichao, PANG Fengge. Overlapped flow of flow oscillation caused by rolling motion and density wave oscillation of natural circulation[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(2): 140-143(in Chinese).
- [3] 高璞珍,刘顺隆,王兆祥. 纵摇和横摇对自然循环的影响[J]. 核动力工程,1999,20(3):228-231.
GAO Puzhen, LIU Shunlong, WANG Zhaoxiang. Effects of pitching and rolling upon natural circulation[J]. Nuclear Power Engineering, 1999, 20(3): 228-231(in Chinese).
- [4] 蒋洁,郝英立,施明恒. 矩形微通道中流体流动阻力和换热特性实验研究[J]. 热科学与技术,2006,5(3):189-194.
JIANG Jie, HAO Yingli, SHI Mingheng. Experimental study on flow and heat transfer characteristics in rectangular microchannel[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2006, 5(3): 189-194(in Chinese).
- [5] 郑慧凡,秦贵棉,范晓伟,等. 微通道内单相流

动特性的实验研究进展[J]. 节能技术,2008,26(147):32-36.

ZHENG Huifan, QIN Guimian, FAN Xiaowei, et al. Development of experimental study on single-phase flow characteristics of micro-channels[J]. Energy Conservation Technology, 2008, 26(147): 32-36(in Chinese).

- [6] 秦文波,程惠尔,牛禄,等. 大高宽比微小宽度矩形通道内的水力特性实验研究[J]. 热科学与技术,2002,1(1):38-41.
QIN Wenbo, CHENG Huier, NIU Lu, et al. An experimental study on the hydraulic characteristics in side rectangular channel with big aspect ratio and small width[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2002, 1(1): 38-41(in Chinese).
- [7] HARTNRTT J P, KOSTIC M. Heat transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids in rectangular ducts[J]. Advances in Heat Transfer, 1989, 19: 247-356.
- [8] SADATOMI Y, SATO Y, SARUWATARI S. Two-phase flow in vertical noncircular channels[J]. Int J Multiphase Flow, 1982, 8: 641-655.
- [9] 孔珑. 工程流体力学[M]. 3版. 北京:中国电力出版社,2007:108-113.
- [10] 刘宇生,谭思超,高璞珍. 矩形通道内脉动层流场特性理论研究[J]. 原子能科学技术,2012,46(11):1 318-1 323.
LIU Yusheng, TAN Sichao, GAO Puzhen. Analytical study of pulsating laminar flow field in rectangular channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(11): 1 318-1 323(in Chinese)
- [11] OHMI M, IGUCHI M, USUI T. Flow pattern and frictional losses in pulsating pipe flow: Part 5. Wall shear stress and flow pattern in a laminar flow[J]. JSME, 1981, 24(187): 75-80.