

文章编号: 1007-6735(2001)03-0252-03

两种渐扩渐缩通道内层流传热特性的比较

张东升, 王秋旺, 陶文铨

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘要: 利用贴体坐标系计算了等壁温工况下水在线型及波纹型渐扩渐缩通道内周期性充分发展的对流换热特性. 两种通道进口高度相同, 沿流动方向截面积相等. 在相同质量流量、相同压力降和相同泵功率等条件下, 比较了两种通道的换热特性. 计算结果表明, 在相同质量流量与相同泵功率条件下, 波纹型通道的换热特性优于线型通道, 而在相同压力降情况下波纹型通道不如线型通道.

关键词: 充分发展对流换热; 线型通道; 波纹型通道; 贴体坐标系

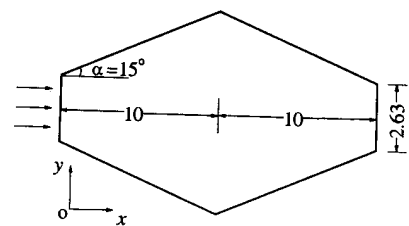
中图分类号: TK 124 文献标识码: A

对流换热现象及其强化方法由于其广泛的应用背景一直是人们关注并不断研究的课题. 采用复杂的换热表面是最为常用的、有效的强化手段之一. 在工业领域中, 许多流动通道的截面形状沿流动方向呈周期性变化^[1]. 在这种截面形状呈周期性变化的通道中的流动和换热称为周期性充分发展的流动与换热, 这个概念是 Patankar 等人^[2]于 1977 年首先提出的, 周期性充分发展流动与换热问题受到很多研究者的关注, 对其进行数值模拟是计算传热学应用研究中的一个重要课题^[3]. 对于复杂的边界形状, 计算传热学与计算流体力学中常利用曲线坐标系或阶梯形逼近来处理. 相对于阶梯形逼近而言, 适体坐标系的通用性与准确性高. 在适体坐标系中求解动量方程时, 在选择求解速度分量方面, 直角坐标系下的速度分量 u 、 v 、 w , 速度逆变分量 U^1 、 U^2 、 U^3 , 速度逆变物理分量 V^1 、 V^2 、 V^3 以及速度协变分量 U_1 、 U_2 、 U_3 都得到了广泛的应用. 本文采用贴体坐标系下的有限容积方法模拟计算了两种不同截面形状(线型和波纹型)通道内流动和换热处于层流周期性充分发展状态下的传热特性, 并对计算结果进行了对比.

1 物理模型及数值方法

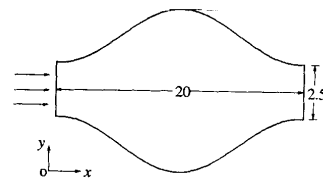
图 1 为两种所要计算的物理模型. 假定流动

为二维稳态的层流, 已周期性充分发展并且不计截面上自然对流的影响. 流动介质为水, 物性为常数(取 20℃ 时水的物性), 通道处于恒壁温边界条件.



(a) 线型通道

$$y=0.0025+0.00125\sin(100\pi x)$$



(b) 波纹型通道

图 1 渐扩渐缩通道内周期性充分发展流动和换热
Fig.1 Fully developed laminar flow and heat transfer in periodically converging-diverging passages

在上述条件下, 流动与换热的通用控制方程为

连续方程
$$\frac{\partial(ru_i)}{\partial x_i} = 0$$

收稿日期: 2001-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59995460-2)

作者简介: 张东升(1974-), 男, 博士研究生.

$$\text{动量方程} \quad \frac{\partial(\mathbf{r}u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mathbf{h} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

$$\text{能量方程} \quad \frac{\partial(\mathbf{r}u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mathbf{h}}{\text{Pr}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$$

在微分法生成的适体坐标系下,选择速度逆变分量 U^1 、 U^2 作为求解变量,离散方法详见文献[4]。将通道向两头略为扩展,进出口的流速、无量纲温度分布取对应几何位置上的值来实现周期性边界条件^[5],并保证在入口、出口截面上无回流。先假定一个初始流场进行迭代计算。计算进行到一定程度后,按照对应位置速度、无量纲温度分布相同的原理重新给出进出口的速度、温度,并对进出口的速度作适当的修正,使之满足已知进出口流量。不断进行迭代,直至周期性条件满足。

比较通道换热性能的优劣可以有不同的评价指标,文献中广为采用的比较原则有 3 种: 相同质量流量、相同泵功率和相同压降。依据这 3 种原则有限制关系式^[6]

相同质量流量准则

$$(ARe/D_h)_1 = (ARe/D_h)_w$$

相同泵功率准则

$$(fRe^3 A/D_h^4)_1 = (fRe^3 A/D_h^4)_w$$

相同压降准则

$$(fRe^2/D_h^3)_1 = (fRe^2/D_h^3)_w$$

其中,下标 1 表示线型通道,下标 w 表示波纹型通道。A 为流体与通道的换热面积,此处即通道两侧面面积之和, D_h 为当量直径。 f 、 Re 的定义为

$$Re = \frac{\mathbf{r}U_a D_e}{\mathbf{h}} \quad f = \frac{-\Delta p/l \cdot D_e}{\mathbf{r}U_a^2/2}$$

2 计算结果及讨论

图 2 比较了线型渐扩渐缩型通道($\alpha = 15^\circ$)与波纹型通道在相同质量流量、相同压力降和相同泵功 3 种工况下的换热特性。其中 h 为对流换热系数, A 为换热面积,即通道两侧面积之和。由图中可见,在 $Re < 1000$ (按线型渐扩渐缩型通道定义)时,在相同质量流量、相同泵功两种工况下,波纹型通道的换热特性优于线型渐扩渐缩型通道,而在相同压力降前提下,波纹型通道则不如线型通道。由文献[7]可知,在相同的质量流量下,波纹型通道的阻力系数大于线型通道,这表明换热强化的同时阻力系数增加。因此,如果在阻力损失(即压力降)要求苛刻的场合,宜采用线型通道,而

在同样质量流量和泵功率的前提下,采用波纹型通道既强化了换热,又增加了阻力,应综合考虑。

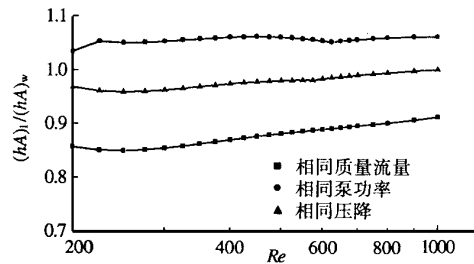


图 2 两种通道的换热特性比较

Fig.2 Thermal performance comparison of the two kinds of passages

图 3 给出了在相同质量流量下, $Re = 200, 800, 1200$ 时两种通道内的流线与等温线。由图可以看

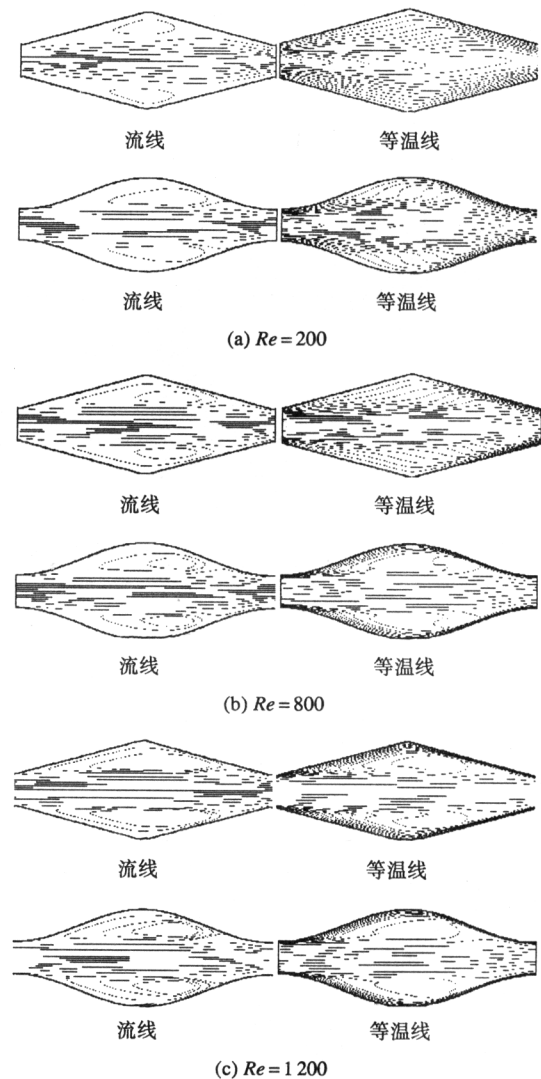


图 3 不同 Re 下两种通道的流函数与等温线
Fig.3 Streamlines and isothermals for both kinds of passages at different Reynolds number

出,随着 Re 的增大,通道内涡的影响区增大,且波纹型通道内壁面附近等温线加密,强化了换热效果.

3 结论

本文通过对两种渐扩渐缩通道的计算表明,当 Re 相同时,在相同质量流量和相同泵功情况下,波纹状通道与线型通道相比,可强化换热. 在对压力降要求比较严格的场合,宜采用线型通道,而在对换热能力要求比较高的场合,则可选用波纹型通道.

参考文献:

- [1] Shyy W, Mittal R. Solutions methods for the incompressible Navier-Stokes equations. In: Johnson R W, ed. *The Handbook of Fluid Dynamics*[M]. Boca Baton: CRC Press LLC, 1998.
- [2] Patankar S V, Liu C, Sparrow E M. Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of corss-sectional area. *ASME J Heat Transfer*, 1977, **99**: 180~186.
- [3] 陶文铨. 计算传热学的近代进展. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] Kelkar K M, Choudhury D. Numerical method for the computation of flow and scalar transport using non-orthogonal grids[J]. *Int J Numer Methods Fluids*, 1993, **18**: 449~469.
- [5] Amano R S. A numerical study of laminar and turbulent heat transfer in a periodically corrugated wall channel[J]. *Trans ASME*, 1985, **107**: 564~569.
- [6] Yu B, Nie J H, Wang Q W, et al. Experimental study on the pressure drop and heat transfer characteristics of tubes with internal wave-like longitudinal fins[J]. *Heat & Mass Transfer*, 1999, **35**(1): 65~73.
- [7] 张东升, 王秋旺, 陶文铨. 两种渐扩渐缩通道内周期性充分发展层流流动的研究[J], 水动力学研究与进展, 待发表.

Fully developed laminar flow and heat transfer in two kinds of periodically converging-diverging passages

ZHANG Dong-sheng, WANG Qiu-wang, TAO Wen-quan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Flow and heat transfer characteristics of fully developed laminar forced convection in two kinds of periodically converging-diverging passages are studied numerically in the body-fitted coordinates. In the computation, the water is severed as the working fluid and the wall temperatures are kept constant. The periodical boundary conditions are implemented by extending the computational domain and mutually replacing the variables in the corresponding locations. The entry height and the cross area of the both passages are identical. The heat transfer characteristics of the both passages are compared under the conditions of the identical mass flux, identical pressure drop and identical pumping power. It is found that the wave-like passage is superior to the linear passage under the condition of the identical mass flux and pumping power and inferior to the linear passage under the condition of the identical pressure drop when the Reynolds is less than 1 000.

Key words: *fully developed flow and heat transfer; linear passage; wave-like passage; body-fitted coordinates*