

纵掠管束湍流对流换热的数值实验及其关联式

杨 茉¹, 吕海涛¹, 赵有生², 陆廷康³, 戴正华³

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海斯耐迪工程咨询有限公司, 上海 200233;

3. 上海市浦东新区特种设备监督检验所, 上海 200136)

摘要: 对圆管内和纵掠管束的湍流对流换热分别运用 $k-\epsilon$ 模型和雷诺应力模型(RSM)进行了数值模拟. 数值模拟结果表明, 采用现有的管内湍流换热实验关联式近似计算纵掠管束对流换热的偏差较大. 通过数值模拟研究了不同节距、不同雷诺数 Re 时纵掠管束的对流换热规律, 给出了纵掠管束流动换热的努塞尔数 Nu 与 Re 的数值实验关联式.

关键词: 纵掠管束; 湍流; 对流换热; 数值模拟; 关联式

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Numerical Investigation and Correlation Formula on the Turbulent Convection Heat Transfer in Longitudinal Tube Banks

YANG Mo¹, LÜ Haitao¹, ZHAO Yousheng², LU Tingkang³, DAI Zhenghua³

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Snerdi Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 200233, China; 3. Shanghai

Pudong New Area Special Equipment Supervision and Inspection Institute, Shanghai 200136, China)

Abstract: The turbulent convection heat transfers in a circular tube and in longitudinal tube banks were simulated with the $k-\epsilon$ model and Reynolds stress model (RSM) respectively. The simulation results show that there are valid deviations in the approximate calculations by the existing experimental correlation formula for the turbulent convection heat transfer in longitudinal tube banks. Further simulations were carried out with different pitch ratios and Reynolds numbers. Based on the numerical simulation results, a new correlation formula was presented.

Keywords: longitudinal tube banks; turbulent flow; convective heat transfer; numerical simulation; correlation formula

纵掠管束强制对流换热在工业上有广泛的应用, 对其进行准确的计算具有重要价值. 一些传热学

教科书, 例如, 杨世铭与陶文铨^[1]编著的《传理学》和《换热器设计手册》^[2], 将纵掠管束强制对流换热计

收稿日期: 2016-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476103); 上海市教委科研创新项目(14ZZ134); 上海市质量技术监督局公益科研项目(2012-41, 2012-12)

第一作者: 杨 茉(1958-), 男, 教授. 研究方向: 传热数值技术. E-mail: yangm@usst.edu.cn

算归入到非圆截面通道对流换热的计算中,推荐的方法是近似采用圆管内强制对流换热的实验关联式(D&B公式)^[3],只是将D&B公式中的圆管直径用所谓的当量直径来代替.王鹏等^[4]、Wang等^[5]采用数值方法的研究表明,利用这种当量直径加圆管内对流换热计算公式的近似处理方法得到的矩形和三角形等非圆形截面通道的努塞尔数 Nu 存在较大误差.Wang等^[5]通过数值实验进一步对方形截面、三角形截面等几种非圆截面通道中的对流换热给出了修正公式,可使其换热计算精度显著提高.但是,Wang等^[5]是针对正多边形通道对流换热进行的修正,而对纵掠管束流动换热规律没有涉及.除了文献[1-2]推荐的这种当量直径加圆管内对流换热计算公式的近似处理方法外,还没有发现其他关于纵掠管束对流换热计算的研究成果公开发表.笔者对圆管和纵掠管束对流换热进行了数值模拟,对圆管内对流换热计算所获得的数值结果与D&B公式^[3]的计算结果吻合得很好.但是,纵掠管束对流换热的数值结果与利用上述文献推荐的当量直径加管内对流换热D&B公式的方法得到的结果的最大相对误差可达到142.5%.笔者认为,纵掠管束对流换热计算一直沿用至今的当量直径加D&B公式的方法已不足以满足工程上对传热计算的更高要求,有必要给出更高精度的传热计算公式.现有的文献资料表明,采用数值模拟方法对流动和传热的计算结果与实验结果吻合得很好.如余徐飞等^[6]对密集管束的流动换热进行了数值研究;刘丽娜等^[7]针对突缩通道内的流动和换热进行了数值模拟;张光璐等^[8]对横掠单管的对流换热进行了数值研究;而Li等^[9-10]采用较新的数值方法(Lattice Boltzmann方法)对熔融问题和自然对流换热进行了数值模拟.这些数值模拟

例子表明,计算机数值模拟技术已日臻成熟,数值结果是可靠的,能够用于指导工程实践.

本文采用数值方法,首先对圆管内湍流对流换热进行了数值模拟,并将数值模拟结果与经典的实验关联式(D&B公式)的计算结果进行了比较,两者吻合得很好,确认了所采用的数值模拟方法可靠.然后进一步通过数值模拟对纵掠管束端流对流换热进行数值实验,给出了不同工况换热的 Nu ,并进行了数据处理,给出了数值实验关联式.

1 问题描述与数值方法

1.1 问题

研究纵掠管束换热情况,部分管束排列的截面示意图如图1(a)所示,抽象出的一个典型通道模型如图1(b)所示.取通道的当量直径 $d = 4f/U$, f 为通道截面积, U 为湿周. $f = S_1 S_2 - \pi D^2/4$, $U = \pi D$. S_1, S_2 为管中心间距; D 为管道直径.取管长 $L = 140d$,以消除入口段和出口局部单向化边界条件对计算结果的影响,保证流动和传热达到充分发展.图1(b)中的 a 边取为恒壁温边界条件, b 边取为对称边界条件.

1.2 数学模型

采用液态水作为模拟工质.假设:a.流体为牛顿流体;b.流动为三维、定常、不可压缩湍流流动;c.不计重力等体积力的影响.

采用标准 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型和雷诺应力模型(RSM)进行数值模拟.这两种模型的控制方程可参见文献[1]. k 为湍流脉动动能, ϵ 为湍流脉动动能的耗散率.通道进口速度和温度均匀,出口取局部单向化条件.

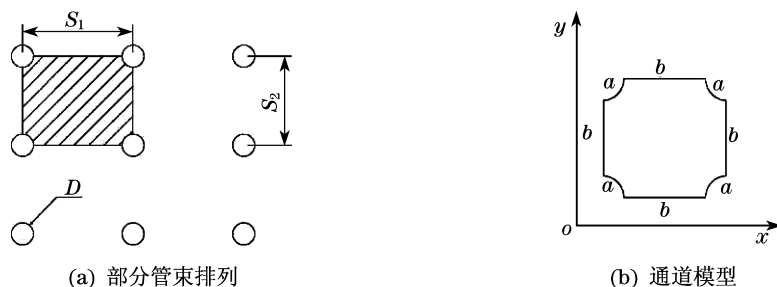


图1 管束及流动截面示意图

Fig.1 Schematic of tube bundle and flow section

1.3 网格独立性和可靠性验证

针对雷诺数 $Re = 46\,403$ 的情况,采用雷诺应力模型计算管束对流换热,对网格独立性进行验证.如

图2所示(见下页),当截面周向网格节点数 n 大于150时,计算结果与网格无关.

为了确认计算结果可靠,模拟了 $Re = 13\,368$,

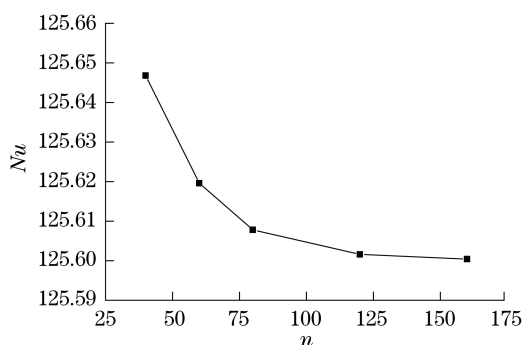


图2 圆管内的 Nu 随周向网格节点数的变化趋势

Fig.2 Changing trend of Nu in circular tube along with the change of the number of circumferential nodes

25 666, 38 115, 50 568, 62 998, 75 364, 99 588, 124 101, 共 8 组情况的圆管内对流换热, 将得到的努塞尔数 Nu 与对应 8 组工况由 D&B 实验关联式求得的 Nu 进行对比, 两者吻合得较好, 最大偏差在 11.9% 之内, 如图 3 所示。

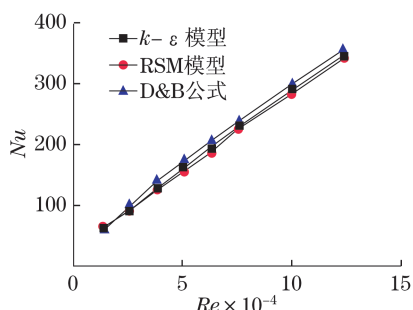


图3 标准 $k-\varepsilon$ 模型与 RSM 对圆管内换热的 Nu 模拟结果

Fig.3 Comparison of Nu in circular tube between the uses of standard $k-\varepsilon$ model and RSM

1.4 数值方法比较

为了选择合适的方法, 本文通过模拟计算对比了 $k-\varepsilon$ 模型和 RSM 在圆管内的 Nu 的结果, 如图 3 所示. D&B 公式为

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

采用 RSM 与标准 $k-\varepsilon$ 模型模拟后, 得到的圆管内 Nu 的计算结果的相对误差在 5% 以内, 这说明 RSM 计算结果是可靠的. 由于 RSM 中的主观因素较少, 因此, 在进行管束对流换热计算时, 采用了 RSM. 数值计算方法为基于原始变量的有限差分控制容积方法, 对流扩散项采用延迟修正的 QUICK 差分格式^[11], 并用 SIMPLE 方法处理压力与速度耦合。

1.5 数据处理

定义截面流体平均温度

$$T_m = \frac{\int_0^A \rho u c_p T dA}{\int_0^A \rho u c_p dA} \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; u 为流体来流速度; c_p 为流体比定压热容; T 为流体温度; A 表示异形截面通道的截面积。

局部对流换热系数 h 定义为

$$h = q / (T_w - T_m) \quad (2)$$

式中: q 为管壁热流密度; T_w 为管壁温度。

局部换热努塞尔数定义为

$$Nu_b = h d / \lambda \quad (3)$$

式中, λ 为流体热导率。

2 计算结果与分析

2.1 数值模拟结果与传统方法计算结果对比

数值研究了 $Re = 15\ 055, 29\ 056, 42\ 480, 55\ 497, 68\ 354, 81\ 231, 94\ 370, 107\ 702, 121\ 152$, 这 9 组工况下纵掠管束的流动换热特性. 充分发展截面的平均 Nu 与采用当量直径和 D&B 实验关联式求得的 Nu 如图 4 所示。

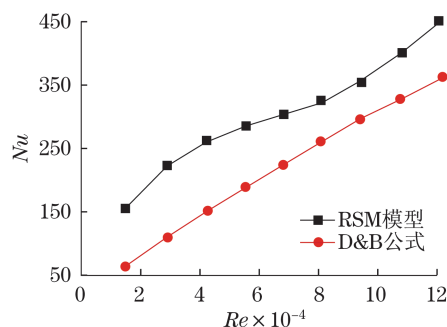


图4 RSM 与实验关联式的 Nu 对比

Fig.4 Comparison of Nu between the uses of RSM and experimental formula

由图 4 可见, 模拟结果和经典实验关联式的最大相对误差为 142.5%, 最小相对误差为 20.9%。

由以上的比较可以看出, 对于纵掠管束端流换热的数值模拟结果与采用当量直径和 D&B 公式的近似处理方法的计算结果相差很大. 笔者认为, 数值模拟方法对于纵掠管束端流换热的模拟结果是可靠的, 而经典实验关联式运用当量直径作为特征尺度的方法只是一种近似的处理. 因此, 有必要给出纵掠管束新的数值实验关联式. 数值模拟结果与用 D&B

公式计算的具体数值如表1所示。

表1 RSM与实验关联式的 Nu 随 Re 的变化

Fig.1 Change of Nu with Re by the use of RSM and experimental formula

$Re \times 10^{-4}$	Nu		相对误差/%
	模拟结果	实验关联式	
1.51	156.7	64.6	142.5
2.91	224.8	110.5	103.4
4.25	262.3	152.2	72.3
5.55	286.2	189.9	50.7
6.84	303.3	226.2	34.0
8.12	322.9	260.9	23.8
9.44	356.3	294.7	20.9
10.77	399.7	327.7	21.9
12.12	449.3	360.1	24.8

2.2 纵掠管束对流换热的数值实验关联式

对表1的数据进行拟合,最大回归误差为4.95%,拟合公式为

$$Nu = (0.019\,72Re^{0.8} + 88.882\,95)Pr^{0.4},$$

$$Re \in (1 \times 10^4, 1.2 \times 10^5) \quad (4)$$

式中, Pr 为流体普朗特数。

图5给出了数值结果和拟合曲线。

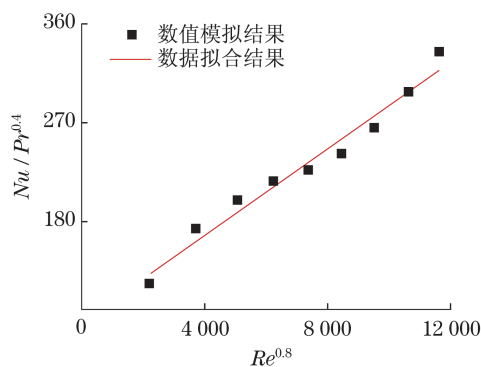


图5 数值模拟结果与数据拟合结果比较

Fig.5 Fitting diagram of the processed data

本文对不同节距的情况进行了数值模拟,对结果进行了数据处理,并以式(4)为基础进行了修正。

$$Nu = C(0.019\,72Re^{0.8} + 88.882\,95)Pr^{0.4} \quad (5)$$

其中, $Re \in (1 \times 10^4, 1.2 \times 10^5)$, $C = 0.99$, $m < 4$; $C = 0.91$, $m = 4$; $C = 1.066$, $4 < m < 8$ 。

3 结 论

以液态水为流动介质,利用雷诺应力模型对圆管纵掠管束湍流对流换热进行了数值模拟。对于圆

形通道,数值模拟结果同已有文献的实验结果吻合得较好,验证了本文数值模拟结果的可靠性。在所计算的 Re 范围内,利用经典圆形通道湍流换热实验关联式计算纵掠管束对流换热系数的结果与数值模拟结果存在较大偏差,在本文的工况范围内,最高可达142.5%。提出了关于纵掠管束湍流对流换热的数值实验关联式,其中包括了管束节距变化的影响。

参考文献:

- [1] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].4版.北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 钱颂文.换热器设计手册[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [3] DITTUS F W, BOELTER L M K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1985, 12 (1): 3-22.
- [4] 王鹏,杨茉,王治云,等.非圆通道内变物性流体湍流换热的数值模拟[J].工程热物理学报,2014,35(11): 2269-2273.
- [5] WANG P, YANG M, WANG Z Y, et al. A new heat transfer correlation for turbulent flow of air with variable properties in noncircular ducts[J]. Journal of Heat Transfer, 2014, 136(10): 101701.
- [6] 余徐飞,王治云,李起耘,等.横掠周期性密集管束流动换热的数值模拟[J].上海理工大学学报,2015,37 (6): 563-567.
- [7] 刘丽娜,杨茉,王治云,等.扩缩通道内流动和换热非线性特性的数值模拟[J].上海理工大学学报,2015, 37(5): 440-444.
- [8] 张光璐,李起耘,王治云,等.受限方腔内绕流两圆管强制对流换热的数值研究[J].上海理工大学学报, 2015, 37(6): 551-556.
- [9] LI Z, YANG M, ZHANG Y W. Numerical simulation of melting problems using the Lattice Boltzmann method with the interfacial tracking method[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2015, 68 (11): 1175-1197.
- [10] LI Z, YANG M, ZHANG Y W. Lattice Boltzmann method simulation of 3-D natural convection with double MRT model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 94: 222-238.
- [11] 杨茉,李学恒,陶文铨,等.QUICK与多种差分方案的比较和计算[J].工程热物理学报,1999,20(5): 593-597.

(编辑:石 瑛)