

文章编号:1000-8055(2013)07-1489-06

GAO-YONG 湍流模型对湍流传热的数值模拟

王 勇, 高 歌, 李志强, 江立军, 崔树鑫

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 将 GAO-YONG 湍流模型应用于湍流传热的研究, 分别计算了平板剪切湍流和二维平面冲击射流的湍流传热问题. 边界层剪切湍流流动与换热的计算表明: 与传统的湍流模型不同, GAO-YONG 湍流模型不需要对近壁区域做任何特殊处理(比如壁面函数、低 Reynolds 数修正等)即可模拟出从壁面到主流区的全部流动与传热情况; 另外, 对于冲击射流 Nusselt 数的模拟也得到了与实验符合较好的计算结果, 准确地捕捉到了 2 种冲击高度下流场换热的不同特征, 表明了 GAO-YONG 湍流模型能够较高精度地计算湍流换热.

关 键 词: 数值模拟; GAO-YONG 湍流模型; 平板剪切湍流; 冲击射流; 湍流传热

中图分类号: V231.3; O357.5⁺3

文献标志码: A

Numerical simulation of turbulent heat transfer using GAO-YONG turbulence model

WANG Yong, GAO Ge, LI Zhi-qiang, JIANG Li-jun, CUI Shu-xin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: GAO-YONG turbulence model was applied to calculation of turbulent heat transfer. Both plate turbulent shear flow and 2-D plane impinging jet flow were calculated. The calculation result of plate turbulent shear flow indicates that, GAO-YONG model can well describe flows from near-wall region to outer area without any special near-wall treatments (such as wall-function and low Reynolds number modification). This is different from widely used turbulence models. As for impinging slot jet, the results of Nusselt number are also consistent with the experimental data and reflect different characteristics under both impingement heights, validating the ability of GAO-YONG turbulence model to calculate complex turbulent heat transfer problems.

Key words: numerical simulation; GAO-YONG turbulence model;
plate turbulent shear flow; impinging slot jet; turbulent heat transfer

当流体流动处于湍流状态时, 流场的热传导特性也将发生较大的改变. 利用数值方法研究湍流传热作为湍流研究领域的一项重要内容, 在理论研究以及工程应用方面都有着重要的意义.

GAO-YONG 湍流模型完全由 Navier-Stokes(N-S)方程的侧偏平均思想推导得来, 采用湍流的基本原理——动量传输链理论进行模化, 使得在模化处理中几乎没有引入任何的经验系

收稿日期: 2012-07-02

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130711.1810.201307.1489_011.html

作者简介: 王勇(1985—), 男, 河北吴桥人, 博士生, 主要从事湍流模型与传热理论研究.

数. 该模型通过正交各向异性假设得到了各向异性的湍流应力, 运用级数形式的漂移流机械能方程获得了涡团级联散列过程中各个量级上的长度尺度, 是一种多尺度非线性湍流模型^[1]. 前期大量的算例验证结果表明: GAO-YONG 湍流模型是一种天然的高低 Reynolds 数模型, 不需要对壁面区域采用壁面函数或者低 Reynolds 数修正等任何特殊处理即可模拟从壁面底层到主流区的整个流场^[2].

本文将 GAO-YONG 湍流模型应用于湍流传热的研究, 模拟了平板剪切湍流以及冲击射流的流动与传热问题. 其中平板剪切湍流是一种具有各向异性特性的典型剪切湍流, 常被用于作为基础算例来验证新型湍流模式. 冲击射流则具有很强的输运能力, 被广泛地应用于传热传质相关的工程领域. 冲击射流具有多重复杂流动特性, 涉及射流、滞止、回流以及壁面剪切等流动形式的存在, 极大地改变了湍流场的换热特性, 有着重要的理论研究价值. 文献[3-7]分别对湍流冲击射流传热进行了系统的实验研究, 均在各自设定的条件下证实了流动形式的复杂性以及对于传热效果的普遍增强作用. 文献[8-10]则开展了大量的数值模拟工作, 借以验证不同湍流模型对于冲击传热问题的模拟能力, 但是均没能给出精度较高的计算结果.

1 GAO-YONG 湍流模型方程组

GAO-YONG 湍流模型方程组是基于侧偏平均思想推导得出, 因此, 除具有统计意义的平均流连续方程和动量方程外, 还包含有代表 1 阶脉动信息的漂移流连续方程和动量方程以及用于确定湍流脉动长度尺度的机械能方程等. 本文直接给出该湍流模型的表达形式, 详细推导过程见文献[11].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j + p \delta_{ij}) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ij} + \sigma_{ij}^t) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}[(\rho E + p) u_j] = \\ \frac{\partial}{\partial x_j}[u_i(\sigma_{ij} + \sigma_{ij}^t) - (q_i + q_i^t)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i u_j + \rho \bar{u}_j u_i + \tilde{p} \delta_{ij}) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\sigma}_{ij} + \bar{\sigma}_{ij}^t) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ij} + \sigma_{ij}^t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[l_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right]^n u_i}{n!} \right] (\rho \bar{u}_i) = \\ l_i \left[-\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j u_i + \tilde{p} \delta_{ij}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\sigma}_{ij} + \bar{\sigma}_{ij}^t) - \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ij} + \sigma_{ij}^t) - \alpha \left(\frac{D(\rho u_i)}{Dt} + \frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$p = \rho RT \quad (7)$$

其中 δ_{ij} 为 Kronecker 算子, E 为单位质量总能量, l 为漂移位矢, n 为展开级数, p, ρ, e 分别为压力、密度、总能, u, v 分别为 x 方向和 y 方向的速度分量. 带有上波浪线的变量为漂移流参数, 其他为平均流参数. σ 和 q 分别为层流应力和层流热流量, $\bar{\sigma}$ 和 $\bar{q}$ 分别为湍流应力和湍流热流量, 详细求解方法参见文献[11].

2 问题模型与数值方法

2.1 平板剪切湍流

平板剪切湍流是一种具有各向异性特性的典型剪切湍流, 常被用于作为基础算例来验证新型湍流模式. 在本文研究中, 来流 Reynolds 数为 2×10^5 . 计算域取长和高为 $2 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的矩形区域. 来流速度和温度分别为 1 m/s 和 273 K ; 壁面处使用无滑移条件, 壁温为 300 K ; 出口及上边界速度、压力、温度均外推. 采用有限体积方法对控制方程进行离散, 对流项采用 QUICK (quadratic upwind interpolation of convective kinematics) 格式离散, 扩散项和源项均采用中心差分格式, 压力修正方案采用同位网格下的 Simple 算法. 计算网格采用 40×60 , 沿 y 方向壁面处加密, 第 1 层网格满足 $y^+ < 1$.

2.2 平面冲击射流

冲击射流具有多重复杂流动特性, 涉及射流、滞止、回流以及壁面剪切等流动形式, 具有重要的工程应用价值. 本文模拟的冲击射流算例为 Ashforth-Frost 等^[7]的半封闭正交冲击射流实验装置, 如图 1 所示. 在由上限制板和下冲击平板封闭成一个狭长的空间内, 射流从限制板中间的缝隙冲击而下抵到冲击平板, 继而向两侧发展. 考虑到流场的对称性, 计算区域取为从射流中心线展向一侧的半个流场.

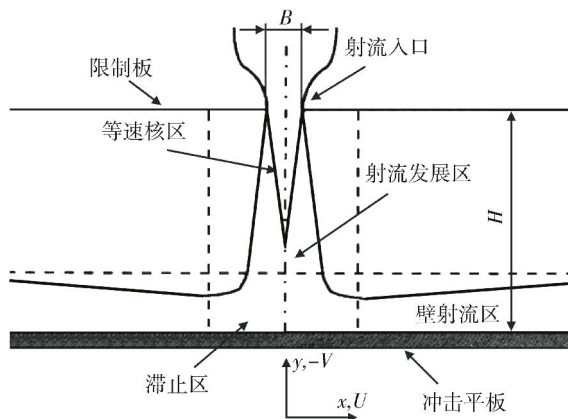
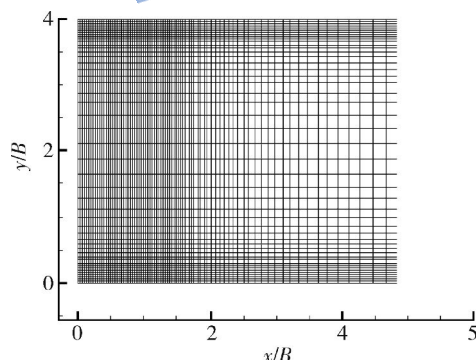


图1 冲击射流示意图

Fig.1 Diagram of impinging slot jet

计算条件完全参照文献设定,冲击高度分别取 $H/B=4$ 和 $H/B=9.2$,坐标系设置如图1所示.来流 Reynolds 数 $Re=2 \times 10^4$,计算中以喷口宽度为特征长度.进口给定速度,压力外推,出口给定大气压力,壁面采用无滑移边界条件,对称面采用对称边界条件.其中,射流进口温度与上限制板温度一致,为 300 K,冲击平板温度为 310 K.考虑到温度场变化很小,流体黏性和导热系数等物性参数不随温度发生改变.经过网格无关解检验后,采用网格数 $x \times y=150 \times 120$ 的结构网格.对壁面以及对称中心处网格进行加密,上下壁面为双曲正弦函数加密,对称中心处采用等距离加密结合双曲正弦函数向远端过渡,图2所示为 $H/B=4$ 的计算网格局部放大效果.

图2 $H/B=4$ 冲击流场的局部计算网格Fig.2 Partial calculation grids of impinging jet flow field for $H/B=4$

冲击射流计算采用5步 Runge-Kutta 显式时间推进方案,对流项使用 AUSM+-up(advection upstream splitting scheme, u 和 p 分别代表速度和压力)格式,配合引入 MUSCL(monotone upstream-centred schemes for conservation laws)插

值公式用以提高计算精度,扩散项使用2阶中心差分格式.另外为了使得本文所使用的可压缩流动求解方法适用于求解低速流动问题,在计算时选择对时间导数进行了预处理用以改变方程的条件数,从而开发出一套针对全速流动的统一求解程序.

3 计算结果与分析

3.1 平板剪切湍流

图3所示为计算所得平板速度型分布.从图中可以看出:在没有对壁面附近做任何特殊处理的情况下,GAO-YONG 湍流模型能够高精度地计算壁面湍流的线性底层和对数率层,并和线性底层 ($u^+ = y^+$) 和对数率层 $\left[u^+ = \frac{1}{0.41} \ln(y^+) + 5.15 \right]$ 的理论解吻合很好.

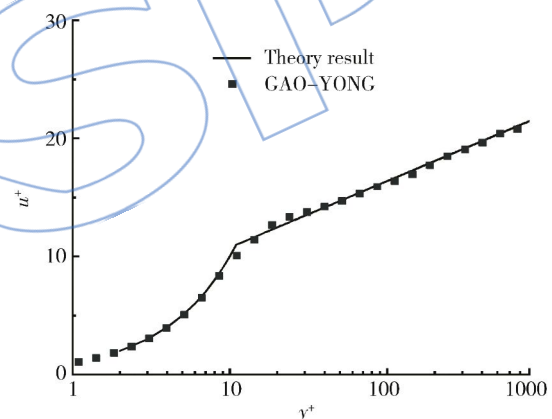


图3 平板壁面附近速度型

Fig.3 Velocity profile nearby plate wall surface

在壁面剪切流场获得高精度模拟的同时,能否准确的模拟出壁面温度型分布也是评价一个湍流模型模拟能力的重要标准.图4所示为壁面的温度型分布,其中理论值在线性底层为 $T^+ = Pr \times y^+$,在对数率层为 $T^+ = \frac{1}{0.482} \ln(y^+) + 3.8$.从图中可以看出,GAO-YONG 湍流模型的计算结果与理论解几乎一致.表面传热系数 h_x 沿流动方向的分布曲线如图5所示,可以看出,计算结果与理论值 $h_x = 0.0288 \frac{\kappa}{x} Pr^{1/3} \left(\frac{U_e x}{\nu} \right)^{0.8}$ 符合较好,式中 κ , Pr 和 ν 分别代表导热系数、普朗特数和运动黏度,注意图中结果已经过无量纲化处理.

另外,湍流传热和表面摩擦力之间有着重要

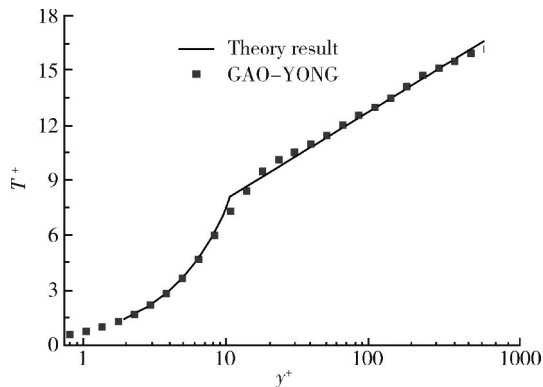


图 4 平板壁面附近温度型

Fig. 4 Temperature profile nearby plate wall surface

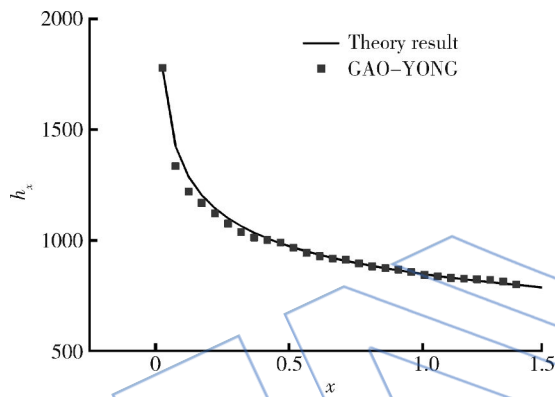


图 5 平板剪切湍流壁面表面传热系数

Fig. 5 Surface heat transfer coefficient of wall plate turbulent shear flow

的比拟关系^[12],这种关系不仅适用于平板表面的剪切流动,也适用于其他湍流流动形式,并且已经被大量的实验研究所证实. Reichardt 给出的 Nusselt 数(Nu)与摩擦阻力系数 C_f 之间的函数表达式为^[13]

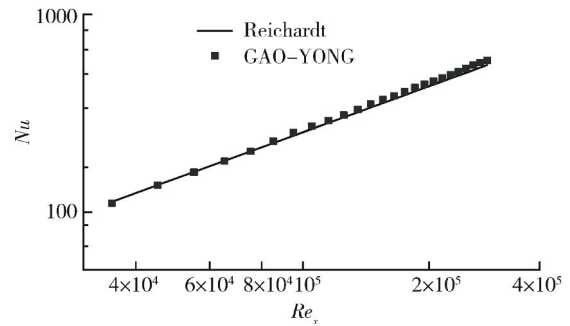
$$Nu = \frac{\frac{1}{2} C_f Re_x Pr}{Pr_1 + \sqrt{\frac{1}{2} C_f [(Pr - Pr_1) a + A]}} \quad (8)$$

其中 Pr_1 为湍流普朗特数, Re_x 为当地 Reynolds 数,常数 a 取 9.55, A 可以近似的认为 $A \approx 4(1 - Pr_1)$ ^[14].

局部 Nusselt 数和 Re_x 之间的关系如图 6 所示. 可以看出,计算结果与 Reichardt 给出的函数表达式几乎完全符合.

3.2 平面冲击射流

不同冲击高度下的冲击射流,其换热效果有着显著不同的特点. 当冲击高度较低时,射流等速核心区还没有来得及充分发展即接触到壁面,湍

图 6 局部 Nusselt 数关于 Re_x 分布Fig. 6 Distribution of Local Nusselt number with Re_x

流脉动的急剧变换以及不同特征尺度涡团间的扩散掺混使得下游壁面与流体的换热效果复杂多变;而当冲击高度足够高以后,射流得以充分发展,这时的冲击效果比较缓和,换热特性也变得相对简单. 文献[7]指出:射流核心区长度约为射缝宽度的 5~8 倍,本文计算所选取的 2 种冲击高度 $H/B=4$ 和 $H/B=9.2$ 分别低于和高于这个长度区间,因此具有典型的意义. 文中选取的对比结果包括 GAO-YONG 模型、DNS (direct numerical simulation)^[15]、标准 $k-\omega$ 模型 WX (wilcox)^[10] 以及显式代数应力模型 AMGS (Abid, Morrison, Gatski, and Speziale model) 和 ARG (Abid, Rumsey, and Gatski model)^[10]. 其中,AMGS 是由湍动能 k 和湍动能耗散率 ϵ 作为湍流尺度,ARG 则是由 k 和比湍流耗散率 ω 提供湍流尺度. 2 个模型既反应了其各自尺度方程的约束特征,又能够在一定程度上体现湍流脉动的各向异性,常用于评估湍流模型对于流动与换热问题的模拟能力.

首先讨论冲击高度为 $H/B=4$ 时的情况. 冲击平板表面的 Nusselt 数分布如图 7 所示,实验结果显示 Nusselt 数呈现出了含有 2 个峰值的复杂曲线. 其中第 2 处峰值可以看作是向下射流强烈冲击到壁面后的反弹,体现了对上游历史的记忆效应. 从图中可以看出:只有 GAO-YONG 湍流模型能够 and DNS 一样给出与实验值相似的计算结果,得到了传热的二次峰值,而其他湍流模型却预报不出给出这一现象. GAO-YONG 模型之所以能够预测到双峰现象,主要是得益其漂移流的动量输运方程保证了上游历史影响向下游的传递. 整体上,GAO-YONG 湍流模型预报的 Nusselt 数分布接近实验水平,其 2 个峰值以及谷值与实验结果基本相当. 但在谷底所处的位置上,GAO-YONG 湍流模型所给结果比实验结果和 DNS 结果靠后,这表明在估计壁面射流外层的剪

切应力时出现了一定的滞后,反应了 q' 比拟理论的局限性,而对 q' 进行输运或许是一种解决之道;对于二次峰值的位置,GAO-YONG 湍流模型则给出了近似于 DNS 的结果,较实验值略微推迟.

当 $H/B=9.2$ 时,Nusselt 数的计算如图 8 所示,由于文献中没有 DNS 的相关模拟,所以仅

引用了部分湍流模型的结果作为对比.在该冲击高度条件下,由于冲击流动相对缓和,实验结果中二次峰值的强换热现象已经完全消失.与其他湍流模型相比,GAO-YONG 湍流模型的计算结果与实验结果吻合很好,只是在 $x/B=5\sim 10$ 之间略有起伏.

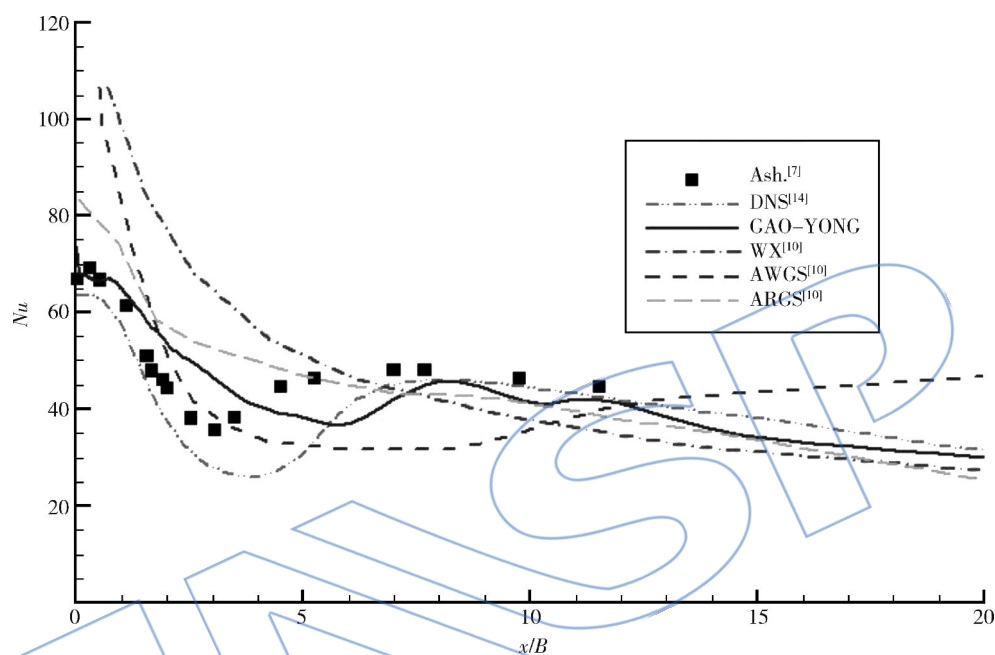


图 7 $H/B=4$ Nusselt 数分布曲线

Fig. 7 Distribution of Nusselt number for $H/B=4$

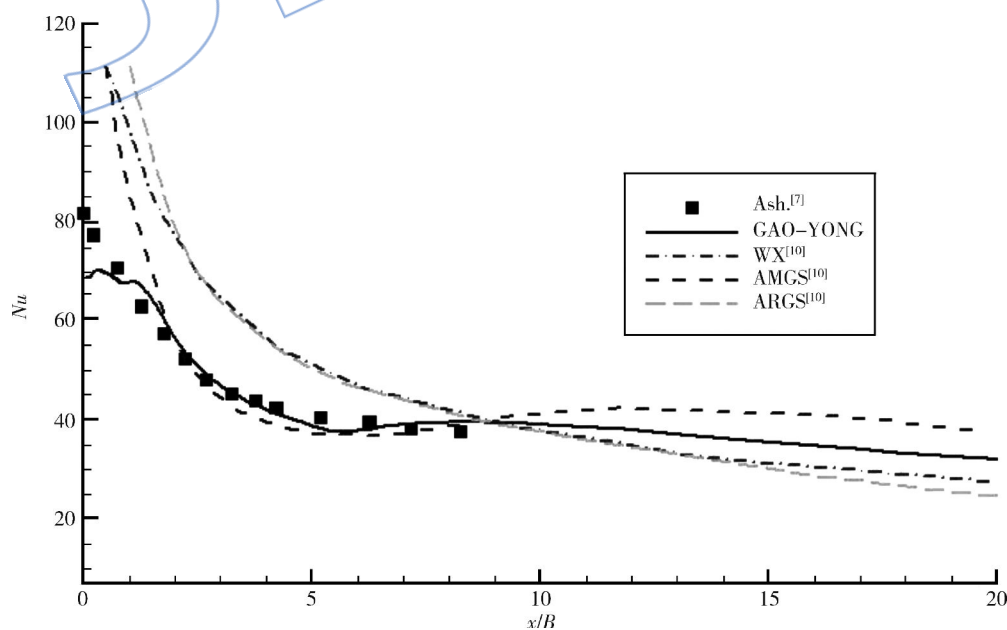


图 8 $H/B=9.2$ Nusselt 数分布曲线

Fig. 8 Distribution of Nusselt number for $H/B=9.2$

4 结 论

本文将 GAO-YONG 湍流模型应用于湍流传热的研究,计算了2种典型的湍流传热问题.对于平板剪切边界层的计算得到了温度型以及壁面的表面传热系数和 Nusselt 数的分布.计算结果均与理论值相吻合,表明 GAO-YONG 湍流模型无需壁面特殊处理即可统一求解从壁面到主流区的湍流传热问题.而对于冲击射流传热的模拟也取得与实验较为一致的计算结果.此外,GAO-YONG 湍流模型还较为全面地捕捉到了由于冲击高度改变所带来的流场传热特性的变化,在一定程度上给出了反应物理实际的结果.初步证实了 GAO-YONG 湍流模型在模拟湍流传热综合问题方面的能力.

参考文献:

- [1] GAO Ge, YONG Yan. Partial-average-based equations of incompressible turbulent flow[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2004, 39(9): 1407-1419.
- [2] 陈广业,高歌,尹幸愉.使用 GAO-YONG 方程组对不可压转捩/湍流平板边界层的计算[J].航空动力学报,2003,18(1):2-7.
CHEN Guangye, GAO Ge, YIN Xingyu. The calculation of incompressible wall boundary layer using GAO-YONG turbulence equations[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 2-7. (in Chinese)
- [3] Gardon R, Akfirat J C. Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jets[J]. Transactions of the ASME Heat Transfer, 1966, 88(1): 101-108.
- [4] Van Heiningen A R P. Heat transfer under an impinging slot jet[D]. Montreal: McGill University, 1982.
- [5] Lin Z H, Chou Y J, Hung Y H. Heat transfer behaviors of a confined slot jet impingement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(5): 1095-1107.
- [6] Zhou D W, Lee S J. Forced convective heat transfer with impinging rectangular jets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(9/10): 1916-1926.
- [7] Ashforth-Frost S, Jambunathan K, Whitney C F. Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet[J]. Experimental Thermal Fluid Science, 1997, 14(1): 60-67.
- [8] Behnia M, Parneix S, Durbin P A. Prediction of heat-transfer in an axisymmetric turbulent jet impinging on a flat plate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(12): 1845-1855.
- [9] Chen Q, Modi V. Mass transfer in turbulent impinging slot jet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(5): 873-887.
- [10] Jaramillo J E, Pérez-Segerra C D, Rodríguez I, et al. Numerical study of plane and round impinging jets using RANS models[J]. Numerical Heat Transfer: Part B, 2008, 54(3): 213-237.
- [11] 闫文辉. GAO-YONG 可压缩湍流模式数值研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2008.
YAN Wenhui. The numerical study of GAO-YONG compressible turbulence model[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [12] Schlichting H. Boundary-layer theory [M]. 7th ed. New York: McGRAW-HILL Book Company, 1979.
- [13] WANG Yong, GAO Ge, LI Zhiqiang. Calculation of plate turbulent shear flow and heat transfer using extended GAO-YONG model [C]//Proceedings of 4th International Symposium on Jet Propulsion and Power Engineering. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2012: 263-267.
- [14] Rotta J C. Temperaturverteilungen in der turbulenten grenzschicht an der ebenen platte[J]. International Journal of Heat and mass Transfer, 1964, 7(2): 215-228.
- [15] Jaramillo J E, Trias F X, Gorobets A, et al. DNS and RANS modelling of a turbulent plane impinging jet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(4): 789-801.