

高温空气传输特性对边界层稳定性及转捩预测的影响

万兵兵, 韩宇峰, 樊宇, 罗纪生
(天津大学 机械工程学院 力学系, 天津 300072)

摘 要: 为了研究黏度和导热系数对边界层内基本流和流动稳定性的影响, 首先通过分析比较 Sutherland 公式和目前常用的 Gupta 等人的拟合关系式, 建立了高温气体下黏度和导热系数的计算模型, 并分别将 Sutherland 公式和新建立的计算模型应用于 7 组元化学平衡流的平板模型, 在马赫数为 10, 16 和 20, 飞行高度为 30.5 km 等条件下分别对黏度和导热系数的模型进行比较. 计算结果表明: 在高温范围内, 黏度和导热系数均影响着边界层的基本流、流动稳定性及转捩预测, 且两者影响的趋势相反, 黏度的增加、导热系数的减小都能使扰动的增长率变大, 增长区变宽, 转捩位置提前.

关 键 词: 黏度; 导热系数; 化学平衡流; 流动稳定性; 转捩预测

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Effect of transport properties of high-temperature air on boundary layer stability and transition prediction

WAN Bing-bing, HAN Yu-feng, FAN Yu, LUO Ji-sheng

(Department of Mechanics,

School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to study the effect of viscosity and thermal conductivity coefficient on the basic flow and flow stability in the boundary layer, the calculation model of the viscosity and thermal conductivity coefficient of high temperature gases was established by comparing Sutherland formula and Gupta fitting relation. Then Sutherland formula and the established model were applied to the 7-species air model for chemical equilibrium flow respectively, and these models were compared in flat-plate boundary layer of Mach number 10, 16 and 20 at the flight height of 30.5 km. The calculation result shows that, within the high temperature range, the viscosity and thermal conductivity coefficient both affect basic flow, flow stability and transition prediction. The increase of viscosity can raise the disturbance growth rate, broaden the growth zone and advance the transition location, whereas the increase of thermal conductivity coefficient leads to opposite results.

Key words: viscosity; thermal conductivity coefficient; chemical equilibrium flow; flow stability; transition prediction

收稿日期: 2015-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(11332007); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(11202147); 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)资助课题(20120032120007)

作者简介: 万兵兵(1990—), 男, 博士生, 主要从事流动稳定性研究.

引用格式: 万兵兵, 韩宇峰, 樊宇, 等. 高温空气传输特性对边界层稳定性及转捩预测的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(1): 188-195. WAN Bingbing, HAN Yufeng, FAN Yu, et al. Effect of transport properties of high-temperature air on boundary layer stability and transition prediction[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 188-195.

高超声速飞行器气动问题的研究中最基本的问题是高温下空气的热力学特性发生根本变化. 在高温下, 空气中的氧气和氮气将发生离解, 更高温度下还将发生电离, 这些将很大程度上影响空气的热力学特性. 空气的离解和电离还将影响其输运特性, 即影响黏度和导热系数. 在常温下, 其黏度和导热系数的计算常采用 Sutherland 公式, 但当温度继续升高时, Sutherland 公式就不再适用. 已有许多学者做过这方面的研究. Hansen 等^[1] (1958 年)、Svehla^[2] (1962 年) 基于 Morse 势函数理论分别研究了离解空气的黏度和导热系数. Yos^[3] (1963 年) 给出过氮气、氢气、氧气等气体的高温传输系数. Esch 等^[4] (1971 年) 也用单组分气体的拟合关系及混合法则研究了混合气体的传输系数. Blottner 等^[5] (1972 年) 用空气的 7 组元离解模型, 计算了单组分黏度和导热系数与温度的拟合关系式, 根据 Wilke^[6] 混合法则得到了高温空气传输系数的拟合关系式, 结果与 Yos^[3] 相比, 温度在 10 000 K 以下吻合较好. Gupta 等^[7] (1990 年) 考虑 11 组元离解模型的拟合关系式及 Yos 混合法则, 得到高温空气黏度和导热系数的拟合关系式, 所得结果的应用范围广于 Blottner 等^[5]. 需要指出, Yos 混合法则与 Wilke 混合法则比较相似. 目前, Blottner 等^[5] 及 Gupta 等^[7] 的单组分气体传输系数与温度的拟合关系及 Wilke^[6] 混合法则被广泛应用于高温空气黏度和导热系数的计算.

黏度和导热系数会影响流场的计算结果, 也会影响边界层流动稳定性分析的结果. 在 20 世纪 80 年代曾发生过因为热力学参数近似关系不同而导致相反结论的学术讨论. 分歧主要有两点: ①马赫数为 2.2 时, 可压缩边界层低频不稳定模态即第一模态是无黏不稳定还是黏性不稳定, Mack^[8-9] 得到的第一模态中性曲线, 在雷诺数比较大时, 流向波数随雷诺数的增大而增大, 因此 Mack 认为第一模态是无黏不稳定, 而 Wazzan 等^[10] (1984 年) 发现当雷诺数充分大时的中性曲线形状和不可压情况类似, 因此为黏性不稳定; ②马赫数为 3 时, Mack 得到的可压缩边界层高频不稳定模态中频率最低的模态即第二模态都是稳定的, 而 Wazzan 等^[10] 得到的第二模态在很低的雷诺数时也是不稳定性的. 后来赵耕夫^[11] 的研究发现, 产生歧义的原因之一是热力学参数选取的不同. Mack 采用的是拟合关系式, Wazzan 等采用的是 Sutherland 公式, 赵耕夫^[12] 根据 Cebeci

等^[13] 给出数据, 采用多项式拟合得出黏度和导热系数, 并考虑普朗特数和比定压热容随温度变化, 得到了与 Mack 一致结果. 由此可见, 超声速边界层中, 热力学参数近似关系对稳定性问题的影响是很复杂的. 因此, 准确表达气体的热力学参数及研究其对流动稳定性的影响是超声速边界层稳定性分析首先要解决的问题.

对于更高的马赫数, 空气将发生离解, 气体的组分因发生化学反应而变得更加复杂, 热力学性质需要考虑高温真实气体效应, 黏度和导热系数的计算不能再使用 Sutherland 公式, 而需要采用近似的拟合关系式.

Malik 等^[14] (1991 年) 针对完全气体和真实气体分析了平板边界层的基本流, 并进行了稳定性分析, 结果表明真实气体的边界层厚度比完全气体的减少 20%, 绝热壁的壁面温度降近一半. 真实气体效应下, 第一模态更稳定, 第二模态更不稳定, 最大增长率向低频偏移, 效果类似于冷壁对稳定性的影响. Malik^[15] (2003 年) 又对化学平衡流和化学非平衡流进行稳定性分析. 在 400 K 以下采用 Sutherland 公式, 400 K 以上黏度采用 Blottner 拟合关系式, 导热系数采用 Eucken 公式和 Wilke 混合法则, 化学平衡流模型的结果与 1991 年的结果吻合. Marxen 等^[16] (2010 年) 求解化学反应的 N-S 方程得到基本流剖面, 结果与 Malik 的基本一致. 范民等^[17] (2011 年) 针对马赫数为 6~8 的工况, 比较了完全气体模型和只考虑振动能被激发的真实气体模型对平板边界层基本流和稳定性的影响, 黏度和导热系数均选择 Sutherland 公式, 结果表明, 真实气体模型的转捩位置比完全气体模型提前约 30%. 樊宇等^[18] (2016 年) 计算马赫数为 20 的化学平衡真实气体模型, 黏度和导热系数采用拟合关系式, 结果表明, 真实气体模型的转捩位置滞后于完全气体模型. 这里又出现了原则的不同. 因此, 采用什么样的黏度和导热系数与温度的关系, 对高马赫数边界层的稳定性及转捩预测有重要的影响, 有必要对这一影响进行较为系统的研究.

本文也选取平板为计算模型, 分别以完全气体和真实气体为研究对象, 选择不同的黏度和导热系数的计算公式, 分析所得的基本流和稳定性, 希望解释文献^[17-18]的结果存在差异的原因, 同时较系统地分析黏度和导热系数对基本流和流动稳定性及转捩预测的影响.

1 物理模型

1.1 热力学参数的求解

本文选取空气作为研究的流体介质,温度较低时,不存在化学反应,空气的组分摩尔分数不变,采用完全气体模型.求解黏度和导热系数时,一般选用 Sutherland 公式,其无量纲形式如下:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T_0 + T_{c\mu}}{T + T_{c\mu}} \right); \quad (1)$$
$$\kappa = \kappa_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T_0 + T_{c\kappa}}{T + T_{c\kappa}} \right)$$

其中 T, μ, κ 分别表示温度、黏度和导热系数,下标 0 表示 273.16 K(摄氏零度),且 $T_0 = 273.16$ K; $\mu_0 = 1.7161 \times 10^{-5}$ Pa · s; $\kappa_0 = 2.415 \times 10^{-2}$ W/(m · K), $T_{c\mu}$ 为黏度的参考温度,取 $T_{c\mu} = 110.4$ K, $T_{c\kappa}$ 为导热系数的参考温度,一般取 $T_{c\kappa} = 194$ K,有时为了理论分析方便,保证普朗特数为常数,也取 $T_{c\kappa} = 110.4$ K.

当温度升高,空气中的分子振动自由度开始激发,温度继续升高,氧气、氮气开始离解,温度再上升开始电离.此时, Sutherland 公式不再适用,可以采用拟合关系式计算各个组分 i 的黏度 μ_i 和导热系数 κ_i ,其表达式为

$$\ln \mu_i = A_{\mu i} (\ln T)^2 + B_{\mu i} \ln T + C_{\mu i} \quad (2)$$

$$\ln \kappa_i = A_{\kappa i} (\ln T)^4 + B_{\kappa i} (\ln T)^3 + C_{\kappa i} (\ln T)^2 + D_{\kappa i} \ln T + E_{\kappa i} \quad (3)$$

系数 A, B, C, D, E 的值取自 Gupta 等^[7].另外,各组分 i 导热系数也可采用 Eucken 公式计算

$$\kappa_i = \frac{R_0}{M_i} \left(\frac{c_{pi} M_i}{R_0} + 1.25 \right) \mu_i \quad (4)$$

其中 M_i 为组分 i 的摩尔质量, c_{pi} 为组分 i 的比定压热容,通用气体常数 $R_0 = 8.314$ J/(mol · K).空气的黏度和导热系数利用 Wilke^[6] 混合法计算,其形式如下:

$$\mu = \frac{\sum_i \frac{x_i \mu_i}{\sum_j x_j \phi_{\mu ij}}}{\sum_j \frac{x_j \mu_j}{\sum_i x_i \phi_{\mu ij}}}; \quad \kappa = \frac{\sum_i \frac{x_i \kappa_i}{\sum_j x_j \phi_{\kappa ij}}}{\sum_j \frac{x_j \kappa_j}{\sum_i x_i \phi_{\kappa ij}}} \quad (5)$$

其中 x_i, x_j 分别为组分 i, j 的摩尔分数.

$$\phi_{\mu ij} = \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{1/4} \right]^2 / \left[8 \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{1/2};$$

$$\phi_{\kappa ij} = \left[1 + \left(\frac{\kappa_i}{\kappa_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{1/4} \right]^2 / \left[8 \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{1/2}$$

本文选取 $O_2, N_2, O, N, NO, NO^+, e^-$ 等 7 组分模型考虑化学平衡流,利用化学反应平衡方程、道尔顿分压定律和元素守恒定律求解不同压力、

温度下各组分 i 的质量分数 w_i ,从而得到混合气体的各热力学参数,如质量焓、压缩因子、摩尔质量等.

本文选取平板为计算模型,基本流的控制方程为不考虑体积力和对外辐射热的边界层方程,其中的导热系数为

$$\kappa = \kappa_f + \rho D \sum_i h_i \left(\frac{\partial w_i}{\partial T} \right) \quad (6)$$

式中 ρ 为密度, κ_f 为冻结热导率,后一项为化学反应导致质量扩散而引起能量传递, D 为质量扩散系数, h_i 为组分 i 的质量焓, w_i 为组分 i 的质量分数.设路易斯数 $Le = \rho D c_{pf} / \kappa_f$,冻结普朗特数 $Pr_f = \mu C_{pf} / \kappa_f$, c_{pf} 为冻结比定压热容,则导热系数可写为

$$\kappa = \kappa_f + \frac{\mu Le}{Pr_f} \sum_i h_i \left(\frac{\partial w_i}{\partial T} \right)_p = \kappa_f \left[1 + \frac{Le}{c_{pf}} \sum_i h_i \left(\frac{\partial w_i}{\partial T} \right)_p \right] \quad (7)$$

在本文中 Le 取 1.对于完全气体, $\kappa = \kappa_f$.

1.2 控制方程

本文选取平板为计算模型,稳定性分析时采用可压缩的线性稳定性方程,设小扰动由行进波的形式表示,即

$$\varphi' = A_p \hat{\varphi}(y) \exp[i(\alpha x + \beta z - \omega t)] + c. c. \quad (8)$$

其中 A_p 为扰动幅值, α 和 β 分别为流向和展向波数, ω 为频率, $\hat{\varphi}(y)$ 表示关于法向坐标的函数, c. c. 表示共轭复数.线性稳定性方程为特征值问题.具体的化学平衡方程、基本流的控制方程、可压缩的线性稳定性方程及计算方法和验证,参考文献^[18].

2 黏度和导热系数计算公式的选择

之前的研究可以发现 Sutherland 公式可以应用于低温范围,但并不清楚适用的具体温度范围, Gupta 拟合关系式和 Eucken 公式及 Wilke 混合法则也是很多学者在计算高温化学平衡流模型时常用的计算模型,但并未考虑到其在低温范围是否适用.为了对比选择合适的计算公式,确定公式之间合适的连接温度,图 1 给出了不同方法得到的黏度和导热系数随温度 T 的变化,其中 Gupta 拟合关系式和 Wilke 混合法则的结果用 G&W 表示,对于导热系数, G&W 加上扩散项得到平衡导热系数,表示为 G&W_e; Sutherland 公式的黏度结果用 S 表示,导热系数的 Sutherland 公式中参考温度分别为 110.4 K 和 194 K 的结果

表示为 S_110.4 和 S_194;另外导热系数 Eucken 公式和 Wilke 混合法则的结果用 E&W 表示. 同时还给出了 Cebeci 和 Bradshaw^[13] 的数据结果作为参考,用 C&B 表示. 从图 1 可以发现,对于黏度,当温度在 1000 K 以下时,S 的结果与 C&B 吻合较好,G&W 的结果偏小于 C&B. 超过 1000 K, S 的结果开始明显偏小,G&W 的结果与 C&B 的基本吻合. 对于导热系数,S_110.4 偏离 C&B 比较远,温度在 1000 K 以下,S_194 与 C&B 的结果吻合较好,G&W_e 与 C&B 偏差很大,1000 K 以上,G&W_e 与 C&B 吻合得比较好,但在 2000 K 以上,G&W_e 和冻结导热系数 G&W 有明显的区别,C&B 的结果位于两者之间. E&W 与 C&B 的结果偏离太多,故 Eucken 公式不宜使用.

根据以上结果分析,可以选择 Sutherland 公式和 Gupta 拟合关系式及 Wilke 混合法则组合使用,连接温度为 1000 K,即温度在 1000 K 以下,

黏度和导热系数计算采用 Sutherland 公式,其中参考温度分别为 110.4 K 和 194 K,1000 K 以上,采用 Gupta 拟合关系式及 Wilke 混合法则. 针对黏度和导热系数的以上两种公式组合使用的模型,称之为黏度和导热系数的 Sutherland-Gupta&Wilke 计算模型.

3 传输系数对基本流、流动稳定性及转捩预测的影响

3.1 导热系数中参考温度的影响

导热系数的 Sutherland 公式中参考温度有时取得不同,会影响基本流及流动稳定性分析的结果. 为了研究文献[17-18]在比较真实气体模型和完全气体模型时的结果形成差异的原因,同时注意文献[17-18]在选择完全气体模型时 T_∞ 的不同,即文献[17]选用的 T_∞ 为 194 K,文献[18]选用的 T_∞ 为 110.4 K,故这里分别用黏度和导热系数计算模型为 Sutherland-Gupta&Wilke 的真实气体模型及黏度和导热系数计算模型为 Sutherland 公式但 T_∞ 分别为 110.4 K 和 194 K 的两个完全气体模型. 对绝热平板,分别计算了马赫数为 4.5,飞行高度为 25 km;马赫数为 8,飞行高度为 30 km;马赫数为 20,飞行高度为 40 km 的 3 种工况,其中两个 T_∞ 分别为 194 K 和 110.4 K. 图 2 给出了结果的对比,为了方便分析,Sutherland-Gupta&Wilke 真实气体模型的结果记为 S_G&W,完全气体模型分别记为 S_194 和 S_110.4,另外 U_{non} , T_{non} 分别表示以来流值无量纲化的速度和温度, $Re_\delta = Re_u \delta$, $Re_X = (Re_u X)^{1/2}$, Re_u , δ , X 分别表示单位雷诺数(m^{-1})和边界层厚度(m)和流向位置(m), Y_{non} 表示以 δ 无量纲化的法向位置, N 表示幅值放大因子, $N = \ln(A_p/A_{p,n})$, $A_{p,n}$ 为中性点的扰动幅值. 从基本流的对比可以看出,S_110.4 的边界层较厚,S_194 的次之,S_G&W 的最薄. 在高马赫数下,S_G&W 的结果与 S_194 和 S_110.4 的差别较大,是因为 S_G&W 考虑了化学反应平衡的热力学关系,而 S_194 和 S_110.4 仍然采用完全气体的热力学关系. 从图 1 结果就已经看出 T_∞ 的不同,直接改变导热系数的大小,S_194 的导热系数较大,S_110.4 的导热系数较小. 可以分析出,导热系数变小可以使边界层中的速度变小,温度升高,特别是壁面温度升高较明显.

由第二模态的 N 值包络线可以看出,马赫数

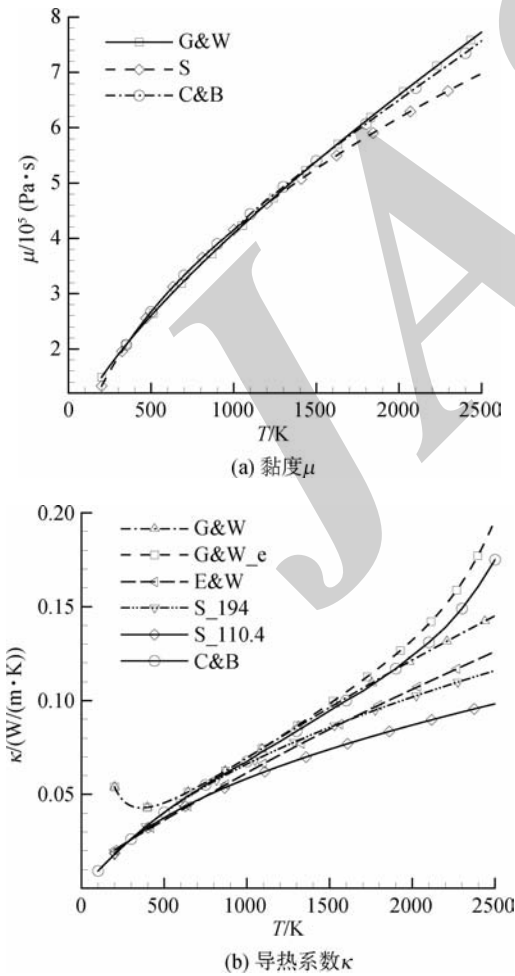


图 1 一个大气压下各种传输系数公式的对比
Fig. 1 Comparisons of formulas for various transmission coefficients at atmospheric pressure

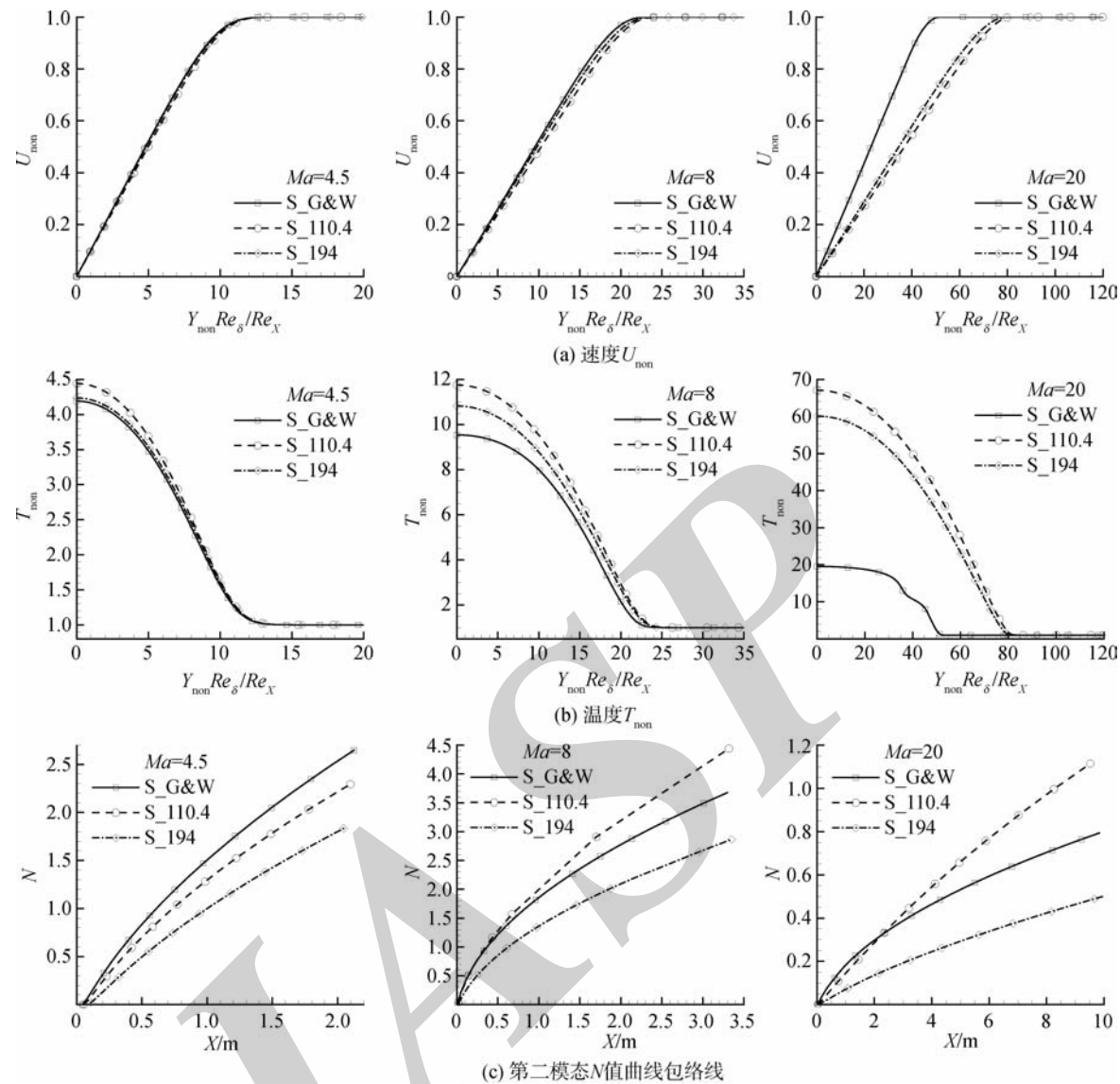


图 2 真实气体模型与完全气体模结果的对比

Fig. 2 Comparisons of the real gas model and the perfect gas model

较小时, $S_{G\&W}$ 的 N 值较大, 马赫数较大时, $S_{110.4}$ 的 N 值较大, S_{194} 的 N 值始终最小, 也就是说真实气体模型的 N 值包络线处于两种完全气体模型之间. 因而通过对比发现, 在高马赫数下, 因为导热系数参考温度的不同, 两种完全气体模型分别与真实气体模型的对比结果可能会有相反的结论, 在工程预测时这是需要注意的, 也是文献[17-18]关于真实气体模型的转捩位置提前于还是滞后于完全气体模型的问题结论不一致的原因.

3.2 高温空气黏度和导热系数对流动稳定性及转捩预测的影响

为了研究高温空气中黏度和导热系数分别对流动稳定性及转捩预测的影响, 在热力学关系中考虑化学反应平衡的基础上, 黏度和导热系数计

算模型采用 Sutherland-Gupta&Wilke 计算模型, 同时 Sutherland 公式作为比较对象, 分别进行基本流计算和流动稳定性分析, 比较两种计算模型对结果的差异, 分析真实气体模型的黏度和导热系数对流动稳定性及转捩预测的影响.

设平板壁面条件为绝热壁, 空气参数值为高度为 30.5 km, 来流马赫数分别取 10, 16, 20. 为了说明方便, 以下用 $S_{G\&W}$ 表示黏度用 Sutherland-Gupta&Wilke 计算公式、导热系数用 Sutherland 公式得到的结果, $S_{G\&W_S_{G\&W}}$ 表示黏度和导热系数都用 Sutherland-Gupta&Wilke 计算公式得到的结果, 其他符号的含义类似. 由图 1 可知 Sutherland-Gupta&Wilke 计算公式中黏度和导热系数在高温范围内都比 Sutherland 公式大. 因此在接下来的研究中, 通过

使用两种不同的黏度和导热系数计算模型来分析比较黏度和热传导对基本流和流动稳定性的影响.

图 3 给出了马赫数为 10,16,20 的基本流分布. 可以看到,黏度的不同对基本流的影响比导热系数的大. 黏度较大时边界层的速度较小,速度边界层较厚,使得温度较高,温度边界层也较厚. 热传导的差异导致速度和温度的名义边界层厚度的差距不大,但边界层近壁区的温度差距较大,热传导较小时,壁面温度较高,从而导致整个近壁区的温度较高,且边界层内的速度较小.

图 4 给出了不同马赫数的中性曲线结果,黏

度和导热系数影响不稳定区域的分布和大小. 图中 ω_{non} 为无量纲频率,特征量为 $2\pi U_e/\delta_x$, U_e 为来流速度 (m/s), $Re = Re_u \delta_x$, δ_x 为当地位移厚度 (m). 黏度和导热系数计算模型的不同对第二模态中性曲线的下支界移动影响较少,对第二模态中性曲线的上支界及更高阶模态影响较大,这表明第二模态中性曲线上支界对参数较敏感. 黏度较大,热传导较小,第二模态中性曲线上支界及高阶模态范围的增大最多;相反,黏度较小,热传导较大,第二模态中性曲线的上支界及高阶模态范围的减小最多.

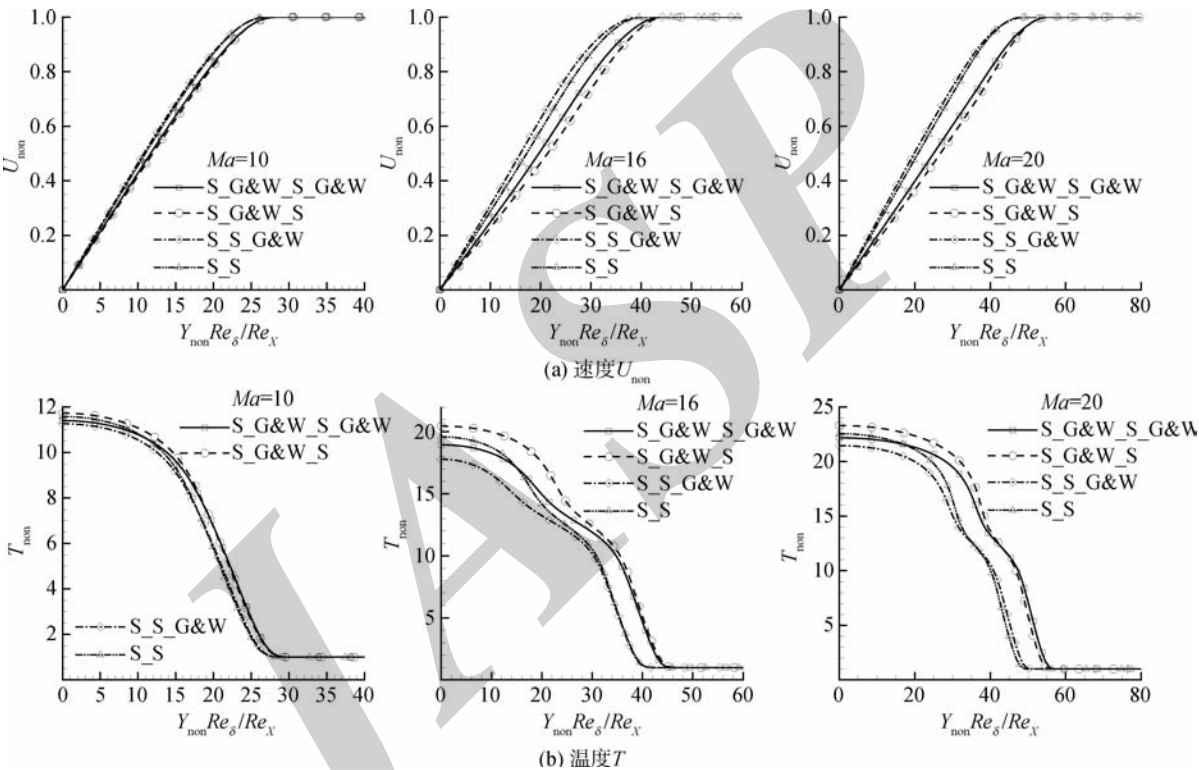


图 3 不同马赫数的基本流分布
Fig. 3 Basic flow distributions of different Mach numbers

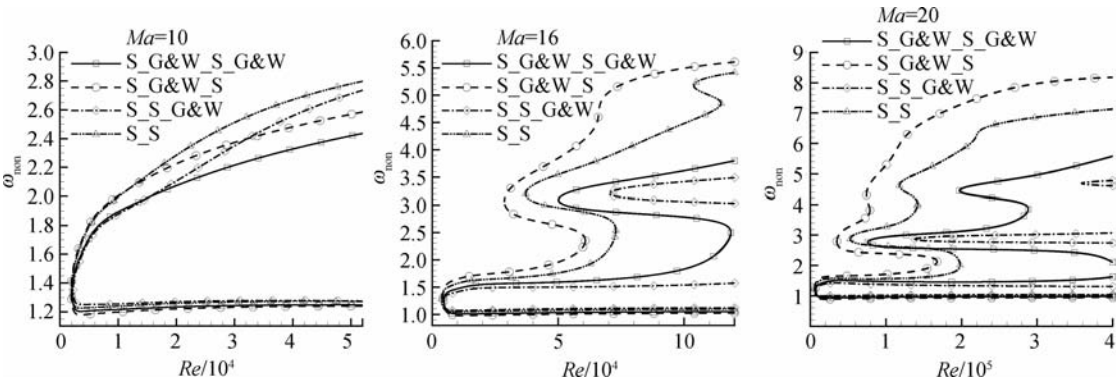


图 4 不同马赫数的中性曲线
Fig. 4 Neutral curves of different Mach numbers

图 5 给出了离平板前缘 1.5 m 处,雷诺数分别约为 5.5×10^4 , 1.1×10^5 和 1.5×10^5 , 不同马赫数的增长率(α_i)随频率的变化. 可以看出,黏度较大时,各阶模态的增长率较大,增长区较宽,峰值的位置向低频方向移动,而导热系数较小时,增长率较大,增长区较宽,但峰值的位置基本没有差别.

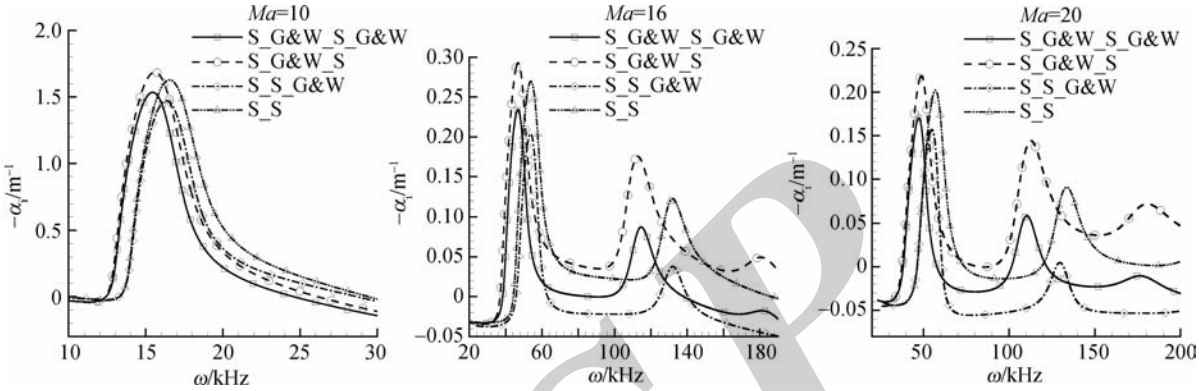


图 5 不同马赫数下 1.5 m 处增长率随频率变化

Fig. 5 Growth rate varies with frequency of different Mach numbers at the location of 1.5 m

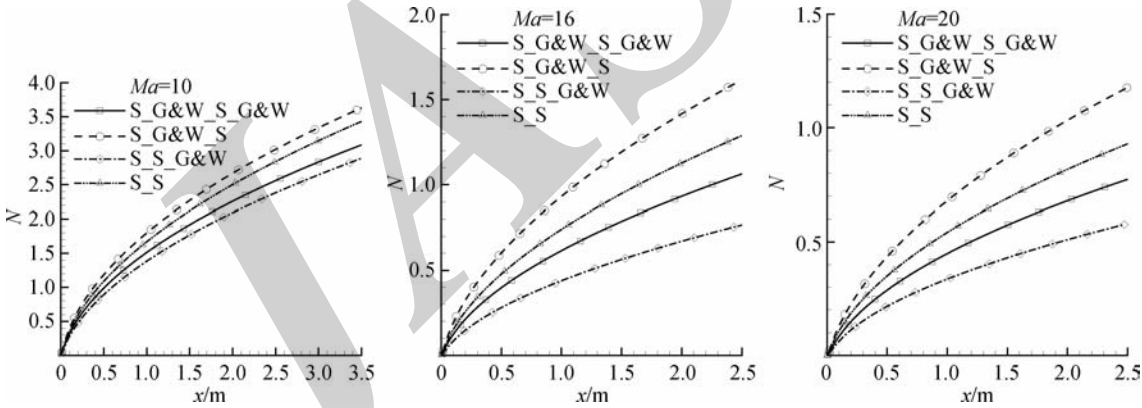


图 6 不同马赫数下 N 值的包络曲线

Fig. 6 Envelope curves of N values of different Mach numbers

4 结 论

本文确定了高温真实空气的黏度和导热系数的计算方法,在此基础上,研究了黏度和导热系数对边界层基本流计算、流动稳定性分析及转捩预测的影响,结果表明,黏度和导热系数对边界层的基本流、流动稳定性及转捩预测均有影响,但影响的趋势不同. 所得结论如下:

1) 在计算黏度和导热系数时可选用 Sutherland 公式和 Gupta 拟合关系式及 Wilke 混合法则组合使用的计算模型,即温度为 1 000 K 以下

图 6 给出了不同马赫数下的 N 值包络曲线. 在马赫数较小时,黏度的影响起主要作用,黏度较大时,包络曲线的 N 值较大,热传导的影响较小;当马赫数变大时,热传导的作用开始体现,导热系数较小时, N 值较大. 总之,黏度最大,热传导最小时 N 值包络最大;黏度最小,热传导最大时 N 值包络最小,其他的在两者中间.

时,黏度和导热系数随温度的变化可以用 Sutherland 公式计算,黏度的 Sutherland 公式中参考温度取 110.4 K,导热系数的 Sutherland 公式中取 194 K. 在温度为 1000 K 以上,采用 Gupta 拟合关系式得到单质气体的黏度和导热系数,然后采用 Wilke 混合法则得到混合气体的黏度和导热系数.

2) 黏度计算模型的不同改变整个边界层基本流的速度和温度的分布,同时影响着流动稳定性及转捩位置. 采用的计算模型中黏度较大时,则各模态增长率较大,增长区较宽,增长率的峰值偏向低频区域. 黏度较大时使转捩位置提前.

3) 导热系数同样影响着稳定性和转捩位置,采用的计算模型中导热系数较小时,各模态增长率较大,增长区较宽,但对增长率峰值位置影响不大. 导热系数较小时也会使转捩位置提前.

总之,黏度较大、导热系数较小时,扰动增长率较大,增长区较宽,转捩位置提前.

参考文献:

[1] Hansen C F, Heims S P. A review of the thermodynamic, transport, and chemical reaction rate properties of high-temperature air[R]. NACA TN-4539, 1958.

[2] Svehla R A. Estimated viscosities and thermal conductivities of gases at high temperatures[R]. NASA TR-R-132, 1962.

[3] Yos J M. Transport properties of nitrogen, hydrogen, oxygen and air to 30000 K[R]. Wilmington, US: Aviation Corporation RAD-TM-63-7, 1963.

[4] Esch D D, Pike R W, Engel C D, et al. Stagnation region heating of a phenolic-nylon ablator during return from planetary missions[R]. NASA CR-112026, 1971.

[5] Blottner F G, Johnson M, Ellis M. Chemically reaction viscous flow program for multi-component gas mixture[R]. Albuquerque, New Mexico, US: Sandia Laboratories SC-RR-70-754, 1972.

[6] Wilke C R. A viscosity equation for gas mixtures[J]. Journal of Chemical Physics, 1950, 18(4): 517-519.

[7] Gupta R N, Yos J M, Thompson R A, et al. A review of reaction rates and thermodynamic and transport properties for an 11-species air model for chemical and thermal nonequilibrium calculations to 30000 K[R]. NASA RP-1232, 1990.

[8] Mack L M. Boundary-layer linear stability theory[R]. Advisory Group for Aerospace Research and Development, AGARD 709, 1984.

[9] Mack L M. Remarks on disputed numerical results in compressible boundary layer stability theory[J]. Physics of Fluids, 1984, 27(2): 342-347.

[10] Wazzan A R, Taghavi H, Keltner G. The effect of Mach

number on the spatial stability of adiabatic flat plate flow to oblique disturbances[J]. Physics of Fluids, 1984, 27(2): 331-341.

[11] 赵耕夫. 论可压缩平板边界层线性稳定性的分歧[J]. 力学学报, 1997, 29(1): 24-29.

ZHAO Gengfu. On the dispute with regard to viscous linear stability of compressible boundary layer flow over flat plate[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1997, 29(1): 24-29. (in Chinese)

[12] 赵耕夫. 空气热力学参数对可压缩边界层线性流动稳定性的影响[J]. 空气动力学学报, 1996, 14(1): 98-103.

ZHAO Gengfu. The effect of thermodynamics parameters of air on the instability of compressible boundary layer flow[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1996, 14(1): 98-103. (in Chinese)

[13] Cebeci T, Bradshaw P. 对流传热的物理特性和计算[M]. 朱自强, 邓学莹, 陈炳永, 译. 北京: 清华大学出版社, 1988.

[14] Malik M R, Anderson E C. Real gas effects on hypersonic boundary-layer stability[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1991, 3(5): 803-821.

[15] Malik M R. Hypersonic flight transition data analysis using parabolized stability equations with chemistry effects [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2003, 40(3): 332-344.

[16] Marxen O, Magin T, Iaccarino G, et al. Hypersonic boundary-layer instability with chemical reactions [J]. AIAA-2010-707, 2010.

[17] FAN Min, CAO Wei, FANG Xiaojie. Prediction of hypersonic boundary layer transition with variable specific heat on plane flow[J]. Science China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2011, 54(11): 2064-2070.

[18] 樊宇, 万兵兵, 韩宇峰, 等. 平衡空气模型的流动稳定性及转捩预测[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1658-1668.

FAN Yu, WAN Bingbing, HAN Yufeng, et al. Hydrodynamic stability and transition prediction with the chemical equilibrium gas model[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(7): 1658-1668. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)