

文章编号: 1000-6893(2007)04-0796-05

模型烧蚀对尾迹电子特性影响的 计算和实验研究

程晓丽, 董永晖, 李廷林

(航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

Computational and Experimental Studies of Ablation Effect on Electronic Characteristics in Vehicle Wake

CHENG Xiao-li, DONG Yong-hui, LI Ting-lin

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

摘要: 基于气动物理研究的需要, 针对高焓风洞的来流特点, 采用计算和实验相结合的方法研究聚丙烯烧蚀对尾迹电子密度的影响。结果表明: 计算结果可以有效模拟实验状态, 电子密度的模拟精度有很大提高, 误差在一个量级内; 聚丙烯烧蚀可以降低尾迹的电子密度, 但幅度不大, 在 2 倍左右, 其与选择模型材料的催化特性降低幅度相当; 对电弧风洞的成功改进和非稀薄流静电探针诊断技术的应用, 是尾迹电子密度测试的前提保障。

关键词: 电弧风洞; 电子密度; 数值模拟; 化学反应; 催化效率

中图分类号: V211.22 **文献标识码:** A

Abstract: This study was implemented for satisfying the demand of aerodynamic physics applications. On incoming flow conditions of a high-enthalpy arc wind tunnel, the polypropylene ablation effect on electron density in a vehicle wake was investigated both computationally and experimentally. Numerical results agree well with the relevant experimental ones, and the numerical precision of electron density is largely improved with no more than one magnitude error. The polypropylene ablation can slightly decrease the wake electron density twice or so, and this decrease in electron density is similar to that caused by changing the catalyzed property of experimental model material. Moreover, for the sake of wake electron density measurement, the arc wind tunnel was reconstructed, and a non-rarefied static probe diagnosis technique was also employed.

Key words: arc wind tunnel; electron density; numerical simulation; chemical reaction; catalyzed efficiency

再入目标的光电特征是气动物理特性研究的主要研究内容, 在导弹突防和防御、目标的识别和反识别中占有重要地位。深入了解再入目标的光电特性, 找出目标光电特性的主要影响因素, 是实现目标光电特性有效控制的重要环节。

国外以美、俄为主特别注重气动物理技术研究, 围绕突防气动物理、识别和反识别及诱饵研制等问题, 做过大量研究工作。其中美国通过执行一系列大型计划, 通过理论研究、地面模拟实验和飞行试验等技术途径, 持续地开展过大规模的再入目标的雷达目标特性和光学特性研究, 并已于 1975 年基本解决了再入突防工程设计的主要问题, 建立了一系列大型再入目标特征数据库系统, 如 NASA Ames 研究中心的 NEQAIR (Non-

Equilibrium Air) 辐射数据库等。无独有偶, 前苏联在再入段突防技术方面也有很大的投入, 且拥有独特的实验技术。近年来, 为了应对美国导弹防御系统的威胁, 俄罗斯不顾军费支出严重紧张的局面, 正在秘密发展新型突防技术。其在 2004 年 2 月举行的“安全-2004 战略演习”中发射的 RS-12M “白杨”导弹采用的正是这种新型突防技术。

国内近十几年来在气动物理方面的研究有很大进展, 在弹头全目标区流场、RCS 特性、尾流辐射等方面作过相当的工作。但是由于问题的复杂性、实验模拟条件的限制及认知程度不够, 无论是数值计算和实验模拟都存在一定的局限性。本文利用电弧风洞功率大、运行时间长的特点, 采用有效手段克服电弧风洞试验设备在气动物理研究方面的缺陷, 对尾迹电子密度进行测量, 同时采用化学非平衡方程和壁面能量平衡方程对尾迹的电子密度进行计算。

收稿日期: 2006-05-25; 修订日期: 2006-11-22

基金项目: 国防预研项目

通讯作者: 程晓丽 E-mail: cheng_xiaoli@sina.com

1 数值方法

采用含化学反应源项的三维 Navier-Stokes 方程对问题进行描述,则在坐标变换 $(x, y, z) = (x, y, z)$ 下的基本方程为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial z} + \mathbf{S}$$

式中:

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= J^{-1} \mathbf{U}; \quad \mathbf{S} = J^{-1} \mathbf{S} \\ \mathbf{E} &= J^{-1} (x E + y F + z G) \\ \mathbf{F} &= J^{-1} (x E + y F + z G) \\ \mathbf{G} &= J^{-1} (x E + y F + z G) \\ \mathbf{E}_v &= J^{-1} (x E_v + y F_v + z G_v) \\ \mathbf{F}_v &= J^{-1} (x E_v + y F_v + z G_v) \\ \mathbf{G}_v &= J^{-1} (x E_v + y F_v + z G_v) \end{aligned}$$

各向量及生成速率的具体形式见文献[1]。

采用二阶精度的 NND 差分格式对流场进行求解^[2]。

在非烧蚀壁面计算中,化学反应模型采用 7 个组元、6 反应模型。7 个化学组元分别是 $N_2, O_2, NO, NO^+, N, O, e^-$; 6 个反应方程见文献[3]。

聚丙烯模型采用的是 26 组元,51 个化学反应方程式。26 个组元依次为:O, N, $O_2, N_2, NO, NO^+, O^-, O_2^-, C, H, C_2, H_2, C_3, CN, CO, CO_2, OH, H_2O, CH, CH_2, C_2H, C_2H_2, HCO, Na, Na^+, e^-$ 。组分的热化学参数见文献[3],黏性系数和热传导系数见文献[4, 5]。51 个化学反应方程式及其化学反应速率见文献[6, 7]。

上游边界:给定来流条件。为避免引入不必要的初始误差,从燃烧室开始对气体进行跟踪求解。通过与出口处的压力及电子密度的对比^[8],验证程序的可靠性。图 1 给出了试验段流场压力

和电子密度等值线及云图。

下游边界:流场参数采用外插处理。

轴线上采用对称轴边界条件,即

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial r} / r_0 = 0, \frac{\partial u}{\partial r} / r_0 = 0 \\ v = w = 0, \frac{\partial i}{\partial r} / r_0 = 0 \end{cases}$$

物面边界条件分 2 种情况:

物面无烧蚀时,采用无滑移边界条件,物面组分的质量分数满足物面的催化特性。

物面有烧蚀时,物面速度只存在法向速度,大小为 $\frac{\dot{m}_w}{w}$,其中 \dot{m}_w 为表面质量烧蚀速率。

烧蚀速率和物面温度由物面热平衡方程及质量烧蚀速率表达式联合求解^[9],物面组分的质量分数确定按非催化壁考虑。

2 实验简介

实验系统见图 2,模型在电弧风洞的高温高超声速流场进行实验的同时,在整流罩内形成了较长的尾迹流动,由多点静电探针耙构成的电子密度测量系统从后向前扫过模型尾迹流场,通过测量流场不同截面处的电子温度和饱和离子电流得到尾迹流场的电子密度分布特征。实验在 FD-04 电弧风洞上进行,它是一座压力真空式电弧风洞,由电弧加热器、稳压混合室、喷管、实验段、扩压段、稳压箱、冷却器及真空系统等组成。电弧加热器采用的是长分段式电弧加热器,为确保电弧加热器的纯净,将整个电弧加热器解体后进行清洗,并更换了全部的内电极。为保证加热介质的纯净,实验采用高纯氮气作为电弧加热器的工作介质。原有混合稳压室较小,因此对混合稳压室重新进行了设计,尺寸为 $\varnothing 80 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,氧气的注入方式从环形注入改为垂直注入,以保证稳压室内氮气和氧气混合均匀,使流场更加均匀和稳定。喷管采用锥形轴对称喷管,出口 $\varnothing 250 \text{ mm}$,

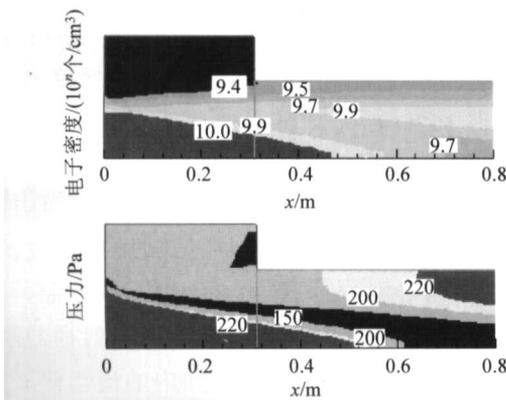


图 1 电弧风洞试验段等值线

Fig. 1 Contours in the test section of the arc wind tunnel

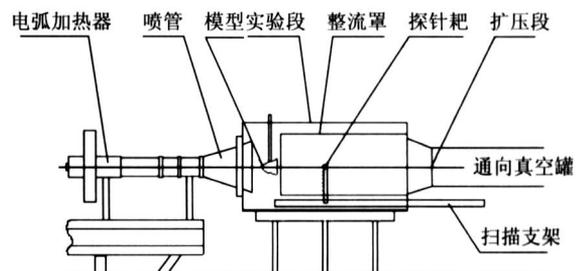


图 2 实验系统简图

Fig. 2 Schematic plot of the experimental system

喉道 $\varnothing 17$ mm, 喷管半锥角 7° 。

采用静电探针测量模型烧蚀尾迹电子密度的分布,同时采用微波穿透法测量流场平均电子密度,与静电探针的数据进行比较,来确定较好的探针数据处理方法,实验中采用了 2 cm 和 5 cm 2 套微波测试系统。静电探针的测量原理,通过分析探针上电流随电压变化的 $I-V$ 曲线,来获得等离子体参数。实验中使用多个静电探针组成的探针阵列测量系统,可以同时测量流场某一截面处的等离子体参数。为解决探针在高温流场中的生存问题,探针采用 $\varnothing 1.5$ mm 的钨丝制成,外表面镀金来防止在高温流场中氧化,探针安装在探针耙上,探针耙安装在扫描支架上,扫描支架通过液压机构来控制探针的移动。扫描支架不同位置上安装有位置开关来触发采集系统的工作。

静电探针的数据处理采用 Laframboise 自由分子流理论进行计算,然后根据 CTW 理论和 Talbot-Chou 分析进行了修正。在电弧风洞高温高超声速流场条件下,还考虑了探针端部效应、探针与气流夹角、电子发射等因素对电子密度测量结果的影响。

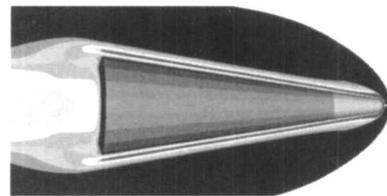
模型表面温度采用 Avoi2000 红外热像仪进行测量,其工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,分辨率 8 bit。采用红外热像仪非接触测温手段主要问题是缺乏材料在高温下的表面发射系数,资料显示塑料类材料常温下的表面发射率通常在 $0.8 \sim 0.9$ 左右,为进一步验证,在常温下采用红外热像仪对聚丙烯材料的表面发射率进行了测量。测量方法为将聚丙烯材料切成 1 mm 厚的薄片,固定在控温底板上,当温度达到稳定时采用表面温度计测量聚丙烯材料的表面温度,同时用热像仪进行测量,记录显示温度与实际温度一致时的发射率,测量结果当材料表面温度为 28 时,材料发射率为 0.90;当材料表面温度为 57 时,表面发射率为 0.92。

实验来流条件为: N_2 与 O_2 的质量比 4 : 1,流量 0.15 kg/s,总压 1.23 MPa,总焓 7 200 kJ/kg。实验模型距喷管出口 20 mm,分为紫铜和聚丙烯模型 2 种,球头半径 4 mm,半锥角 8° ,底部直径 56 mm。紫铜模型主要用于流场的堵塞和校测实验,模型采用腰部支撑。

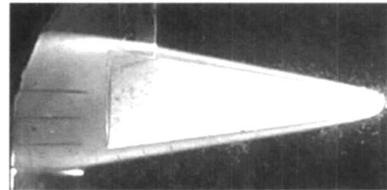
3 结果及分析

图 3 为实验条件下聚丙烯模型周围等离子体壳套的温度等值线云图与实验过程中模型周围高温气体的发光照片对比。从图中可见,模型周围

的等离子体壳套温度和发光强度都比尾迹的高和强,数值计算真实再现了模型周围的高温气体厚度及由于物面的烧蚀传热而导致的边界层内温度下降的现象。由于固体比气体存在较高的光辐射系数,因此模型表面的等离子体发光强度较头部以外的其他部位强。而且随着到模型底部距离的增加,计算和实验结果都显示了尾迹内高温区域渐渐缩小的趋势。实验照片中,靠近底部的锥面上方光辐射异样是由于支架干扰引起的。



(a) 流场的温度等值线云图



(b) 烧蚀过程照片

图 3 聚丙烯模型周围等离子体壳套对比

Fig. 3 Comparison of plasma layers around the polypropylene model

图 4 为计算所得的聚丙烯模型壁面温度及质量烧蚀率沿物面的变化,得到的钝头壁面温度在 1 000 K 左右,而锥面温度在 $800 \sim 900$ K 之间,其与地面实验结果 800 K(图 5)在测量误差内符合得较好。而端头与锥面温度变化规律与实验的差异主要是由于计算中没有考虑材料在高温下的融化造成的。从质量烧蚀率沿物面的变化曲线可以看出,物面的烧蚀率随温度的降低是减少的。将质量烧蚀率沿物面积分得到单位时间内的烧蚀量为 0.165 g/s,低于实验结果的测量值 0.298 g/s。原因在于地面实验时,由于支杆的干扰在上游产生激波,使支杆附近的烧蚀量增大,导致测量值偏大。

图 6 给出了模型周围及尾迹流场内的速度矢量、流线及电子数密度等值线图。从图中可见,模型底部存在分离涡,绕流气体在模型底部形成的膨胀波向下游和径向伸展,打在引射桶的壁面,与边界层内的黏性流动形成干扰。由于引射桶的限制,模型的尾迹流动没有自由空间内的流动伸展。从速度矢量图中可以清楚地看出壁面边界层、底部混合层的存在及混合层沿轴线的发展。同时从

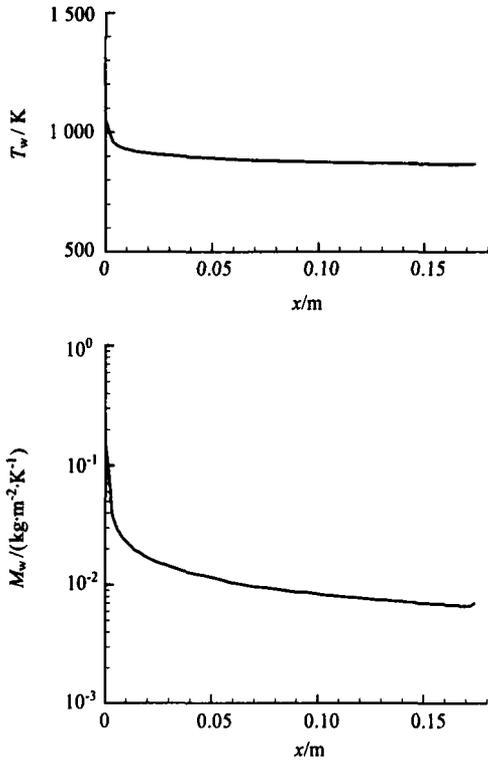


图 4 聚丙烯模型壁面温度及质量烧蚀率沿物面的变化

Fig. 4 Variations of wall temperature and mass ablation rate along the surface of the polypropylene model

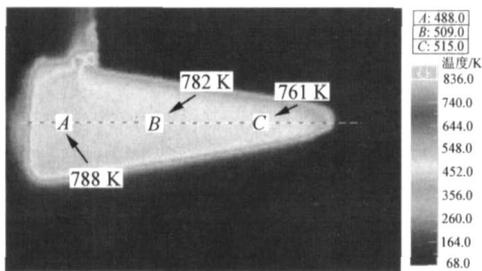


图 5 聚丙烯模型壁面温度沿物面的变化

Fig. 5 Wall temperature distribution on the surface of the polypropylene model

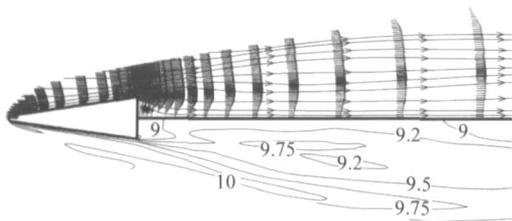


图 6 流场速度矢量、流线和电子数密度等值线

Fig. 6 Velocity vectors, streamlines, and electron density contours

电子数密度等值线可以看出尾迹内电子密度较其他部位低,轴线附近较其他部位低。

图 7 给出了尾迹内不同截面处电子密度沿径向变化的对比图。从图中可见,除个别点外

计算和实验的规律基本相同,其误差在一个数量级以内,实验值普遍比计算值偏高。分析原因可能是地面实验状态下高温空气在混合室没有达到完全热力学平衡状态,电子温度高于气体温度,而数值模拟中没有考虑热的非平衡的影响所导致的

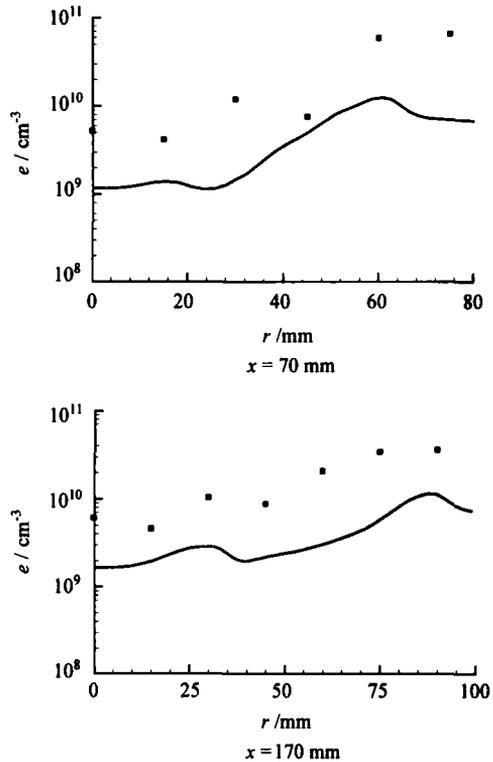


图 7 聚丙烯模型尾迹内各截面电子密度沿径向的变化

Fig. 7 Variations of electron density along radial direction in different wake sections of the polypropylene model

图 8 为聚丙烯烧蚀对尾迹电子密度影响的对比曲线。从图中可见,尾迹区内电子密度的实验值较计算值偏高,误差在一个量级内。在壁面催化特性相同的情况下,聚丙烯的烧蚀导致尾迹的电子密度降低,降低幅度不大,在 2 倍左右。而壁面催化特性的影响也能达到同样的大小,即非催化壁的结果较完全催化壁的结果也大 2 倍左右。只不过材料烧蚀和催化壁的影响沿轴线变化规律不同,即完全催化壁对近尾迹的影响较大,由于尾流的混合作用,随着到模型底部距离的增加影响逐渐变小;而材料烧蚀对电子密度的减小量不随轴线位置而变化。由于聚丙烯模型为非催化壁,而紫铜模型为完全催化壁,很巧合的,两种模型都降低了尾迹的电子密度,且降低的幅度基本相同,因此实验结果大致相同,而计算结果也基本一致。

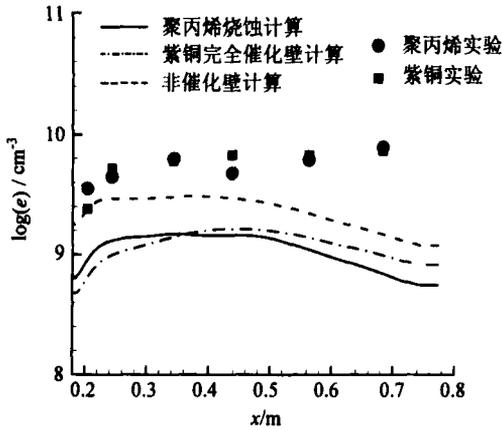


图8 聚丙烯模型尾迹内电子密度沿轴线的变化

Fig 8 Variations of electron density along axial line in the wake of the polypropylene model

4 结论

从气动物理研究的需要出发,采用理论计算和地面实验相结合的方法,研究了聚丙烯材料烧蚀对尾迹电子密度的影响。结果表明:

计算结果可以有效模拟实验状态,电子密度的模拟精度有很大提高,误差在一个量级内;聚丙烯烧蚀可以降低尾迹的电子密度,但幅度不大,在2倍左右,其与选择模型材料的催化特性降低幅度相当;对电弧风洞的系列改造是成功的,在考虑非稀薄修正的基础上,静电探针是等离子体诊断的有效测试手段,其基本满足气动物理研究的需要。

参 考 文 献

- [1] Miner E W, Lewis C H. Hypersonic ionizing air viscous shock-layer flows over nonanalytic blunt bodies[R]. NASA CR-2550, 1998.
- [2] Zhang H X, Zhuang F G. NND scheme and their applica-

tion to numerical simulation of two-and three-dimensional flows[J]. Advances in Applied Mechanics, 1992, 29:193-256.

- [3] Stull D R, Prophet H. JANAF thermochemical tables[R]. 2nd ed. N71-38775, 1971.
- [4] Bhutta B A, Lewis C H. New technique for low-to-high altitude predictions of ablative hypersonic flow fields[J]. JSR, 1992, 29(1): 35-50.
- [5] Svehla R A. Estimated viscosities and thermal conductivities of gases at high temperatures[R]. NASA TR R-132, 1962.
- [6] Blottner F G. Prediction of electron density in the boundary-layer on entry vehicles with ablation[R]. NASA SP-252, 1970.
- [7] Cresswell J, Kaplan B, Orter R, et al. Material effects of low temperature ablators on hypersonic wake properties of slender bodies[R]. N67-37521, 1967.
- [8] 程晓丽,刘杰平,李廷林. 高焓实验风洞流场的数值仿真[C] 第十二届高超声速论文集. 2003: 152-155. Cheng X L, Liu J P, Li T L. Numerical simulations of flows in a high-enthalpy wind tunnel[C] Proceedings of the 12th Chinese Conference on Hypersonic Fluid Mechanics. 2003: 152-155. (in Chinese)
- [9] 程晓丽,董永晖,李廷林. 电弧风洞内聚丙烯烧蚀对尾迹电子特性的影响研究[C] 气体物理研究论文集. 2005: 298-306. Cheng X L, Dong Y H, Li T L. Study of polypropylene ablation effect on electronic characteristics in a vehicle wake by arc wind tunnel[C] Collection of Gas Physics Research. 2005: 298-306. (in Chinese)

作者简介:



程晓丽(1968 -) 女,研究员、硕士。主要研究方向:气动物理与稀薄流理论与数值研究。

Tel: 010-68375013

E-mail: cheng_xiaoli@sina.com

(责任编辑:刘振国)