

274-280

第14卷 第3期  
1996年9月空气动力学学报  
ACTA AERODYNAMICA SINICAVol.14, No.3  
Sep., 1996

# 高超声速小钝锥尾流化学非平衡 辐射研究

周学华 竺乃宜

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码 100080)

V211.22

**A摘要** 本文主要目的是研究化学非平衡对高超声速小钝锥尾流辐射的影响。计算结果表明: 激发发射辐射比化学发光辐射重要, 红外辐射比可见光辐射重要。结果还表明: 由化学非平衡瞬时辐射模型计算求得的  $\text{NO}_5, 3\mu$  的辐射能比由局部平衡辐射模型求得的辐射能大 30~70%。由此可知, 小钝锥尾流的化学非平衡辐射模型对辐射的影响是不能忽略的。

**关键词** 尾流辐射, 化学非平衡辐射, 红外辐射。

高超声速

## 引 言

⑤ 高超声速小钝锥飞行器具有显著的辐射特性。尾流是重要的辐射区。然而到目前为止, 小钝锥尾流辐射, 尚无公开发表的实测数据, 理论计算大多局限于化学非平衡流动的局部平衡辐射<sup>[1,2]</sup>。文献[3]指出: 对钝体来说, 化学非平衡是非常大的, 它严重地影响尾流流场及其辐射性质和强度; 对细长体来说化学非平衡是不大的, 从而对辐射的影响也不大。那么小钝锥尾流的化学非平衡在多大程度上影响了尾流辐射? 这就是本文研究的内容。

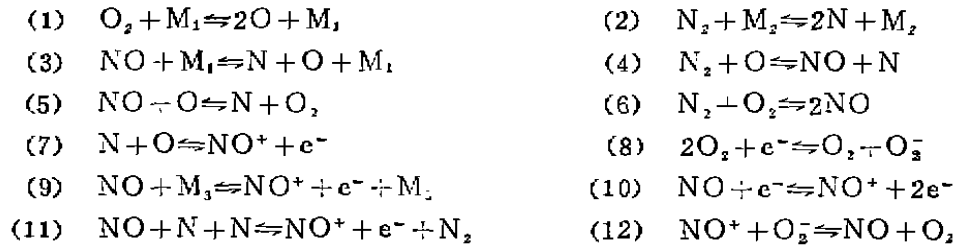
尾流辐射是相当复杂的, 有激发发射辐射和化学发光辐射。前者有多种辐射源, 后者有多种化学发光反应。它们都发射出各种波长, 这些波长大多属于可见光与红外光。本文对这两类辐射进行详细分析, 并研究化学非平衡对这两类辐射的影响。阐明两种辐射模型: 局部平衡辐射模型和化学非平衡瞬时辐射模型的概念, 并进行详细的数值计算。

## 一、流场与化学模型

本文主要分析小钝锥高超声速流场中颈部后的流动。假定尾迹是轴对称的, 并能用相应的化学非平衡定常边界层方程来描述。用  $x, y$  分别表示物理轴向坐标和径向坐标, 并引进 Von Mises 坐标, 用有限差分法进行求解<sup>[1]</sup>。求解中已采用了 Wen<sup>[4]</sup> 的涡流模型和 Goldberg 转捩准则<sup>[5]</sup>。

本文于1994年12月5日收到, 1995年6月22日收到修改稿。

化学模型 尾流中考虑8种化学组分： $O_2$ 、 $N_2$ 、 $NO$ 、 $O$ 、 $N$ 、 $NO^+$ 、 $e^-$ 和 $O_2^-$ ，12个化学反应，即



其中  $M_1 = O_2^-$ ,  $NO^+$ ,  $e^-$ ,  $N_2$ ,  $NO$ ,  $N$ ,  $O$ ,  $O_2$ ,  
 $M_2 = O_2$ ,  $NO^+$ ,  $e^-$ ,  $N_2$ ,  $O$ ,  $NO$ ,  
 $M_3 = O_2$ ,  $N_2$ ,  $NO$ ,  $N$ ,  $O$ ,

$M_1$ ,  $M_2$ 和 $M_3$ 均为第三碰撞体，反应速率取于文献[6]。

## 二、辐射模型

在化学非平衡尾流中，存在着大量粒子：原子、离子、电子与分子。它们之间不断碰撞着，不断地交换能量，其结果是有的粒子被激发而成为激发态，处于激发态的粒子随时都有可能发射出光子，这就是激发发射辐射。碰撞的另一个重要结果，导致化学反应的发生，其中有些反应能发射出光子，这种发射辐射称为化学发光辐射，尾流辐射就是由激发发射辐射与化学发光辐射所组成。

### 1. 碰撞激发发射辐射

小钝锥尾流的最高温度在3500K左右，在此温度，下列辐射是重要的。

(1)  $NO_2$ 热辐射光波  $NO_2$ 热辐射是基态 $NO_2$ 分子与高能活性粒子碰撞受激发而引起的，它的波带在 $0.4 \sim 1.2\mu$ 之间，是连续谱，它的大部分辐射线位于红外。

(2)  $O_2(S-R)$ 波带 它属于 $X^3\Sigma_g^- - B\Sigma_g^-$ 辐射带，波长在 $0.2 \sim 0.47\mu$ 之间。

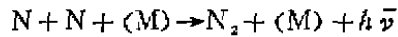
(3)  $NO$ 辐射 它的辐射带很多，本文考虑四个波带。 $NO\beta$ 波带( $B^2\Pi - X^2\Pi$ )， $NO\gamma$ 波带( $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ )，它们的光谱分布在 $0.2 \sim 0.56\mu$ 之间。另外还有两个红外波带： $5.3\mu$ 基态和 $2.7\mu$ 第一谐波带，它们是 $X^2\Pi - X^2\Pi$ 能态中振转跃迁。由于 $NO$ 振转能级的激发能很低，约为 $0.2eV$ ，所以这种碰撞激发发射是很容易发生的。

(4)  $N_{2ff}$   $N_2$ 分子与电子的自由-自由辐射。在低密度下可以忽略。但随着密度的增加，辐射强度增加很快，密度增加1倍，辐射强度增加10倍。当 $\rho/\rho_0 = 10^{-3} \sim 10^{-1}$ 时， $N_{2ff}$ 辐射也是重要的，波长在 $2 \sim 8\mu$ 之间。

### 2. 化学发光辐射

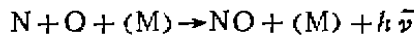
化学非平衡尾流中含有大量的原子与 $NO$ 分子。它们之间的复合反应、氧化反应是重要的化学发光反应。这些反应是放热反应，对温度是不灵敏的，主要依赖于 $N$ 、 $O$ 、 $NO$ 等组分的浓度及其寿命。主要发光反应有

## (1) Lewis-Rayleicy氮分子余辉

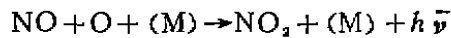


该反应的光子平均能量  $h\bar{\nu} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{J}$ 。它的光谱主要是由  $N_2$  的第一正激发态带的十个波带所组成。其波长在  $0.537 \sim 1.042 \mu$  之间。压力在  $101.3 \sim 1013 \text{Pa}$  时, 其总体反应速率服从两体速率定律, 其速率常数  $K = 3.1 \times 10^{-17} \text{cm}^3/\text{S}$ 。在其它压力时, 假定该速率常数仍然适用。

## (2) 兰色的一氧化氮余辉

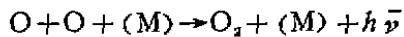


该反应机理很复杂, 反应中部分服从两体速率定律, 部分服从三体速率定律。其速率常数分别为  $1.9 \times 10^{-17} \text{cm}^3/\text{S}$  和  $2.6 \times 10^{-34} \text{cm}^6/\text{S}$ 。光子平均能量为  $8.011 \times 10^{-19} \text{J}$ , 波长在可见光范围内。

(3)  $\text{NO}_2$  连续谱

该反应总体速率服从于两体速率定律,  $K = 6.4 \times 10^{-17} \text{cm}^3/\text{S}$  光子的平均能量为  $3.313 \times 10^{-19} \text{J}$ , 其波长在  $0.38 \sim 1.4 \mu$  之间, 峰值在  $0.65 \mu$  处。

## (4) 氧的大气带与 Herzberg 带



大气带为三体反应, 速率常数为  $10^{-37} \text{cm}^6/\text{S}$ , Herzberg 带为两体反应, 其速率常数为  $10^{-21} \text{cm}^3/\text{S}$ 。光子平均能量为  $3.2044 \times 10^{-19} \text{J}$ , 波长在可见光范围内。

上述四个化学发光反应组成了本文的化学发光辐射模型。每个化学发光反应辐射量的计算公式以  $\text{NO}_2$  化学发光反应为例加以说明。单位长度尾流上的  $\text{NO}_2$  化学发光辐射量为

$$I = \frac{h\bar{\nu}}{4\pi} \int_0^\infty K[\text{NO}][\text{O}] d\sigma$$

对立体角积分并变换到 Von Mises 坐标, 可得

$$I = 2\pi h\bar{\nu} \int_0^\infty \frac{k[\text{NO}][\text{O}]}{\rho u} \psi d\psi$$

其中  $k$  为反应速率常数,  $[\ ]$  表示所示组元的数密度。其他化学发光反应的辐射量的计算公式可以类似地求得。

## 3. 化学非平衡辐射模型

令  $\tau_f$  为高超声速小钝锥尾流流动的特征时间,  $\tau_v$  为振动能趋于平衡的特征时间,  $\tau_c$  为化学反应特征时间,  $\tau_r$  为辐射组元辐射的弛豫时间。当  $\tau_f \gg \tau_v$  时, 假设流动为化学平衡流, 当  $\tau_f \ll \tau_v$  时, 流动为冻结流。除此以外的其它情况, 反应流为化学非平衡流<sup>[7]</sup>。问题是怎么求化学非平衡流中各种机制的辐射强度。本文提出了两种计算方法。在物理上, 这两种计算方法对应两种辐射模型。其一由化学非平衡流的温度和总密度求辐射机制的辐射强度。这是工程计算的一种近似方法。与该方法相对应的物理模型, 通常称

为局部平衡辐射模型。用平衡空气辐射表就可以求出各种辐射机制的辐射强度。当非平衡偏离平衡不太大时，该方法是一个很好的近似。目前平衡空气辐射表缺少2000K以下的的数据。而温度在1000~2000K之间的区域是尾流辐射的重要区域。用高温数据外推会产生较大的误差。本文应用NO在300、600、1200和1800K的光谱发射率<sup>[6]</sup>计算求得了四个点上的辐射强度，把它们作为源数据的内插点。从而使低温源数据变得可靠，增加了局部平衡辐射计算结果的可靠性。其二由化学非平衡流中的温度和辐射组元的浓度直接计算各种机制的辐射。当 $\tau_c \gg \tau$ 时称为化学非平衡瞬态辐射模型。

对于化学非平衡瞬态辐射模型，显然，单位体积的辐射强度为

$$I = I_p \cdot [M]$$

其中 $I_p$ 为单个分子的辐射强度， $[M]$ 为辐射组元的数密度。若上式再乘以尾流的体积就可以求出该组元在尾流中的辐射量。数密度与体积由化学非平衡流场计算求得。

单个NO分子辐射强度的源数列于表1<sup>[6]</sup>。

表 1 辐射强度

辐射体	频带 $\mu$	TK					
		500	1000	1500	2000	3000	4000
NO	5.3	$3.2 \times 10^{-22}$	$2.4 \times 10^{-21}$	$6.8 \times 10^{-21}$	$1.1 \times 10^{-20}$	$2.2 \times 10^{-20}$	$3.2 \times 10^{-20}$

### 三、计算结果与分析

本文计算的飞行器模型：半锥角为 $8^\circ$ ，底部直径为80cm，飞行速度为6.7km/s，飞行高度为45、50、58、64和70km。本文以两个典型高度：50和70km的计算结果加以说明。其特点是，后者的流动状态为层流，前者的流动状态既有层流又有湍流。

图1、图2表示高度为50km时，尾流的局部平衡辐射和化学发光辐射。由图1、图2可见，NO基态 $5.3\mu$ 和第一谐波带 $2.7\mu$ 的红外激发发射辐射比其它激发发射要大1个量级左右，比化学发光辐射要大1~2个量级。70km计算结果示于图3、图4。

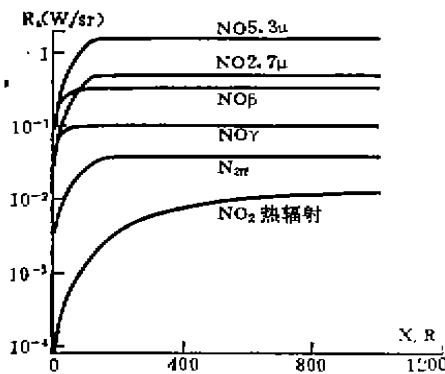


图 1 50km高度时尾流重要辐射源的光辐射  
Fig.1 Wake spectral radiation in important emission sources for 50km altitude

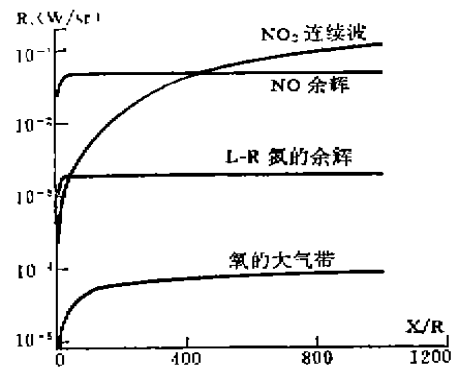


图 2 50km高度时尾流重要辐射源的化学发光辐射  
Fig.2 Wake chemiluminescence in important source of radiation for 50km altitude

其它高度计算也具有类似情况。由此可知,在小钝锥尾流中碰撞激发发射辐射大于化学发光辐射,NO 红外激发发射辐射大于可见光的发射辐射。

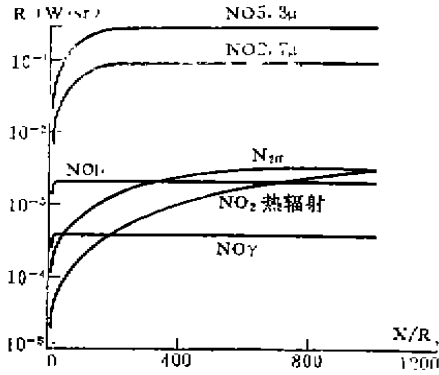


图3 70km高度时尾流重要辐射源的光辐射  
Fig.3 Wake spectral radiation in important emission sources for 70km altitude

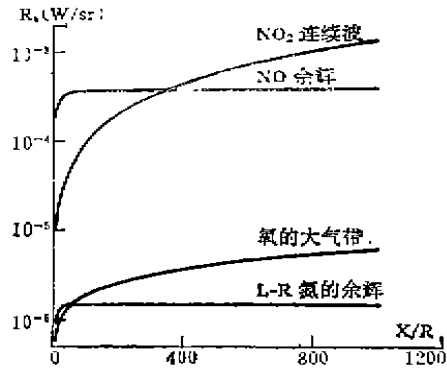


图4 70km高度时尾流重要辐射源的化学发光辐射  
Fig.4 Wake chemiluminescence in important sources of radiation for 70km altitude

图5为不同高度时,用化学非平衡组元瞬时辐射模型计算求得的NO5.3μ的激发发射辐射。从图中可以看到辐射量随高度的变化不是单调的,有可能在某个高度下,例如50km左右会出现一个极大值。

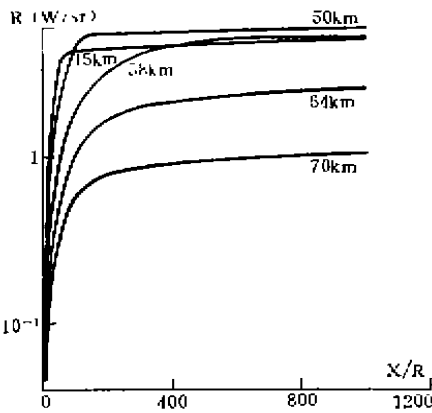


图5 不同高度时尾流中NO5.3μ的辐射量  
Fig.5 Wake Radiation in No5.3μ for various altitude

图6(a)、(b)分别为50和70km时化学非平衡瞬时辐射模型与局部平衡辐射模型计算结果之间的比较。图6中曲线1为NO5.3μ的化学非平衡瞬时辐射模型计算的辐射通量,曲线3为NO5.3μ的局部平衡辐射模型计算的辐射通量。由这两条曲线比较可知,前者约为后者的3.6~3.8倍。两者的差别是比较大的。引起这种差别的原因:1.辐射源数据来源不同即由源数据之间的不同而引起计算结果的差别,2.不同辐射模型导致的差别。我们仔细检查了两种源数据之间的差别,发现在不同温度、

密度区间,两种源数据约差1.5~2.5倍,以 $T=3000K$ ,  $\rho/\rho_0=10^{-3}$ 时求NO5.3μ的单位体积单位立体角的辐射强度为例加以说明。查阅空气热力学性质表,经换算得 $[NO]=3.38 \times 10^{13}$ 。由单个分子辐射强度求单位体积单位立体角的辐射强度 $(I_{NO})_1$ ,显然

$$(I_{NO})_1 = I_p \cdot [NO] = 7.436 \times 10^{-7} W/cm - \Omega$$

由平衡辐射表<sup>[10]</sup>得NO总的(包括5.3μ和2.7μ)半空间辐射量为 $1gI_{NO} = -5.5 W/cm^3$ 经换算 $I_{NO} = 3.16 \times 10^{-6} W/cm^3$ 。显然由辐射平衡表求得的NO5.3μ的辐射强度为

$$(I_{NO})_2 = I_{NO} \times 0.76 / 2\pi = 0.382 \times 10^{-6} W/\Omega - cm^3$$

其中0.76为NO5.3μ在NO总辐射中所占比例,2π为半空间的角。

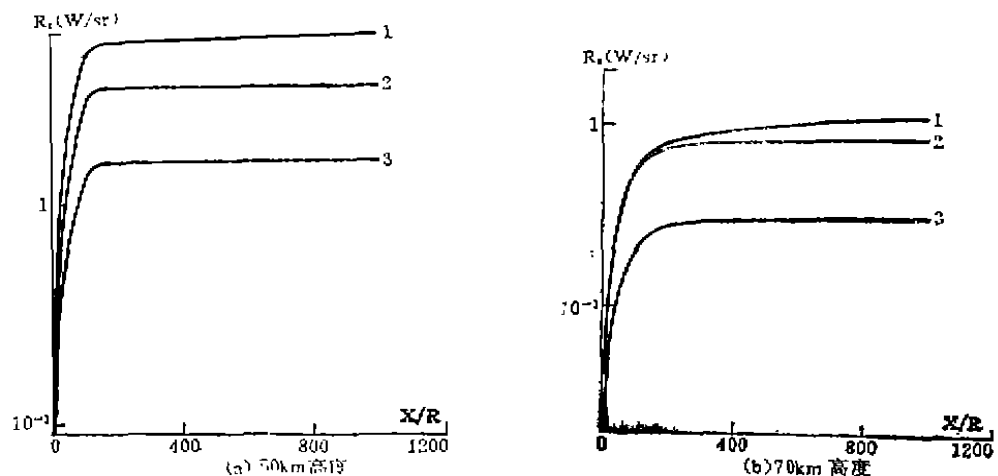


图6 两种模型对 $\text{NO}_5, 3\mu$ 辐射量计算结果的比较  
Fig.6 The comparison of radiation energy calculated between two models

$$(I_{\text{NO}})_1 / (I_{\text{NO}})_2 = 7.436 \times 10^{-7} / 3.82 \times 10^{-7} = 1.946$$

上述差别基本上是在实测误差范围之内，但是为了去掉不同源数据差别对计算结果的影响，突出不同辐射模型的影响，本文调节局部平衡源数据，使它与化学非平衡瞬时辐射模型所使用的源数据有相同的数值。这样计算出来的局部平衡辐射量示于图6中的曲线2。由曲线1与2比较可知，前者是后者的1.3~1.7倍。在其它三个高度下，计算结果也具有类似情况。由此得出初步结果，化学非平衡瞬时辐射模型计算求得的NO红外辐射比用局部平衡辐射模型计算的要大30~70%。由此可知，小钝锥尾流的化学非平衡辐射模型的差别对辐射的影响是不能忽略的。

### 参 考 文 献

- 1 赵国英，力学学报，1987，17(2):114
- 2 周学华，赵国英，锥体高超声速尾流辐射特性，空气动力学学报，1989，7(2):240~244
- 3 Hundley R O, et al, AD-441139, 1964.
- 4 Wen K S, Chen T, Hayami R A. AIAA Paper 67-21, 1967.
- 5 Goldberg A. AIAA Paper 67-33, 1967.
- 6 Schexnayder Jr, et al., AIAA J., 1974, 12(6):805~811
- 7 Anderson J D. Hypersonic and High Temperature Gas Dynamics Mc-Graw-Hill, Inc., USA, 1987.
- 8 Malkmus J, Thomson A. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 1962, 2:17~39
- 9 Young L A et al, AD-691022, 1969.
- 10 Allen R A. NASA CR-556

## The Study of Chemical Nonequilibrium Wake Radiation From Hypersonic Slightly Blunt Cone

Zhou Xuehua Zhu Naiyi

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science)

**Abstract** The purpose of the paper is to begin the study of radiation with chemical nonequilibrium wakes of slightly blunted cone which includes various collisional excitation radiations emitted and chemiluminescent radiations. The paper adopts two radiation models, chemical nonequilibrium instantaneous radiation model and local equilibrium radiation ones. The results calculated show: collisional excitation radiations emitted are more important than chemiluminescent radiations; infrared radiations are more important than visible radiation. The results also show: radiative energy calculated from chemical nonequilibrium instantaneous radiation model is 30~70% larger than radiative energy calculated from local equilibrium radiation model. As a consequence the effect of chemical nonequilibrium radiation models on radiation is not negligible in the hypersonic slightly blunted cone wakes.

**Key words** wake radiation, chemical nonequilibrium radiation, infrared radiation, local equilibrium radiation.