

# 流动激光器喷管的无逆压 特性曲线及选型

盛 家 宁

(中国科学院力学研究所)

**提要:** 本文以“无逆压特性曲线”的形式, 表示了圆弧型喉部二维跨超音速喷管流动无逆压时各参数间的相互定量关系, 为喉部大曲率、快膨胀、无逆压的激光喷管提供了设计指南, 配合本文的五参数可调跨超音速喷管型线联合计算程序, 可进行这类喷管的计算机选型。在判断其他方法得到的该类喷管喉部流动逆压特性时, 本文的特性曲线也可用作参考。

## Characteristic curves without reverse pressure gradient and contour selection in flowing laser nozzles

Sheng Jianing

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** Quantitative relations between parameters of two dimensional transonic-supersonic nozzle flow of circular throat are expressed through the form of “characteristic curves without reverse pressure gradient”. These relations can be regarded as a guide for design of laser nozzles of big throat curvature in rapid expansion without reverse pressure gradient. To Combine with the associated calculation program of transonic-supersonic nozzle contours in which the value of five parameters can be changed, it is possible to select nozzle contours of this type on computer. These characteristic curves can also be used as a reference, for estimating character of reverse pressure gradient of this type of nozzle obtained by other ways.

### 引 言

圆弧型喉部喷管, 其喉道  $AO$  上下游型壁  $\widehat{DA}$  和  $\widehat{AB}$  都由圆弧构成(图1)。它和文献[2]的双曲型喉部喷管相比, 整个跨音速型壁  $\widehat{DA}$  及超音速初始膨胀段型壁  $\widehat{AB}$  都不需计算, 其曲率半径可根据设计要求任意选择, 加之流动激光器的性能对喷管喉部曲率半径

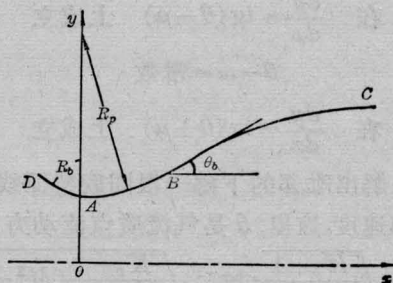


图 1

收稿日期: 1979年8月27日。

十分敏感,故设计者多乐于采用这类喷管。

这类喷管的主要形状参数有跨音速段型壁  $\widehat{DA}$  的曲率半径  $R_b$ 、超音速初始膨胀段型壁  $\widehat{AB}$  的曲率半径  $R_p$  和超音速段壁面最大膨胀角  $\theta_b$ 。另外,还有影响形状和流场的因素——跨音速段的比热比  $K_b$ 、超音速段的比热比  $K_p$  和喷管出口马赫数  $Me$ 。这六个参数,原则上都是可以任意选取的,这对于要求喉部大曲率快膨胀的激光喷管设计是很有利的。但若取值不当,喷管流动中将会出现逆压减速激波,影响了激光器的性能。因此,这六个参数如何选择是设计激光喷管的一项重要工作。

文献 [1] 以统一的形式给出了二维跨音速圆弧型喷管流动的一般解。本文以这个解为初始条件,计算  $R_b$ 、 $R_p$ 、 $K_b$ 、 $K_p$  和  $Me$  等五个参数与跨超音速喷管型壁和流场的联系,用“喷管无逆压特性曲线”的形式示出了喉部无逆压时这六个参数之间的关系,再配以本文的计算程序,就可按具体问题的要求,进行该类喷管的计算机选型。

## 方法简解

### 1. 求喷管型线

以文献 [1] 结果中某根喉部处的顺时特征线  $EF$  作为已知的起始特征线(要求  $E$  点位于喉道  $A$  点之上游),由于  $EF$  的坐标及其上速度参量均为已知,按照特征关系

$$\theta + \omega = \text{常数}$$

$$\text{在 } \frac{dy}{dx} = \text{tg}(\theta - \mu) \text{ 上成立}$$

$$\theta - \omega = \text{常数}$$

$$\text{在 } \frac{dy}{dx} = \text{tg}(\theta + \mu) \text{ 上成立}$$

便可以解出毗邻的下游一根同族特征线上的坐标和速度。这里,  $\theta$  是气流质点流动方向角,

$$\omega = \sqrt{\frac{K_p + 1}{K_p - 1}} \cdot \text{tg}^{-1} \sqrt{\frac{K_p - 1}{K_p + 1}} (M^2 - 1) - \text{tg}^{-1} \sqrt{M^2 - 1}$$

是气流质点的普朗特-迈耶膨胀角,  $M$  是气流质点马赫数,  $\mu$  是马赫角,  $y$ 、 $x$  是纵横坐标(见图 2)。如此重复进行,直至解出特征线  $BG$ ,  $BG$  上应成立关系:  $\theta + \omega = \omega_e$ ,  $\omega_e$  是对应于已知的出口马赫数  $Me$  的普朗特-迈耶角。求解过程中令  $EA$  段作为圆心位于  $y$  轴、半径为  $R_b$  的圆弧;而令  $AB$  作为圆心位于  $y$  轴、半径为  $R_p$  的圆弧。这里的  $x$ 、 $y$  坐标均以半喉高  $AO$  作了无量纲化。接着解单波区  $BGC$ , 求得消波段  $BC$ , 整个  $EABC$  曲线即是所求的型壁。

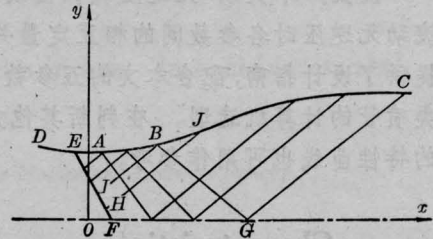


图 2

### 2. 逆压特性判断

由跨音速流场的解可知,初始特征线  $EF$  上各点的  $(\theta - \omega)$  值,必在某处达到极大。设该处为  $H$  点(见图 2)。另外,  $BI$  是通过  $B$  点的逆时特征线和  $EF$  相交于  $I$  点。由特征线的性质容易推知,当  $R_b$ 、 $R_p$ 、 $K_b$ 、 $K_p$  和  $Me$  等五个参数给定后,若  $I$  点位于特征线  $EF$  的  $H$  点之上,则壁面  $BJ$  段必要出现逆压减速,此时可调整(扩大)  $R_p$ ,使  $I$  点下降和  $H$  点重合,或者降至  $H$  点以下,逆压即可消除;但若  $R_p$  调得过大,则  $AB$  段不能顺应跨音速流场的膨胀要求,又将出现逆压。这样,我们就可在  $R_b$ 、 $K_b$ 、 $K_p$  和  $Me$  给定时,得到  $R_p$  的无逆压范围,即特性曲线 1。

另外,当上述五个参数给定时,  $\theta_b$  是不独立的,因而又能得到  $\theta_b = f(R_b, R_p, K_b, K_p, Me)$  的数值关系,即特性曲线 2、3、4、5。

由计算发现,当  $1.3 \leq K_b \leq 1.4$  时,  $K_b$  的变化几乎不影响各项结果。另外,我们取  $K_p = 1.4$ ,这是因为在平衡流或冻结流的情况下,取  $K_p = 1.4$  都是合理的。这样,特性

曲线就简化为由  $R_b$ 、 $R_p$  和  $M_e$  三个参数组成, 而  $\theta_b$  也简化成  $\theta_b = f(R_b, R_p, M_e)$ 。关于  $R_b$  的选择, 按常规风洞喷管常选取  $R_b \approx 6 \sim 10$  (即 6 倍至 10 倍半喉高)。激光喷管选取的值应小些, 甚至小到接近于零<sup>[3]</sup>。但从加工、装配、气流质量和冻结效果等方面来权衡, 选  $R_b \approx 2$  为宜。综合上述各项结果, 我们给出如下五幅特性曲线图表。

$R_p$  之极大值

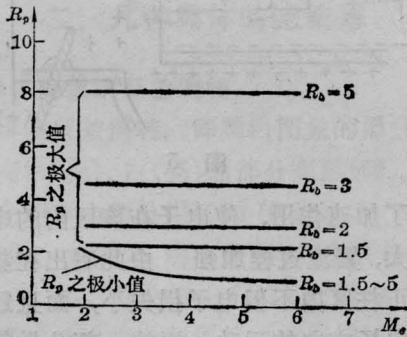
$\frac{K_b}{M_e}$	1.5	2	3	5
2~6	2.30	3.05	4.60	8.20

$K_b = 1.3 \sim 1.4$

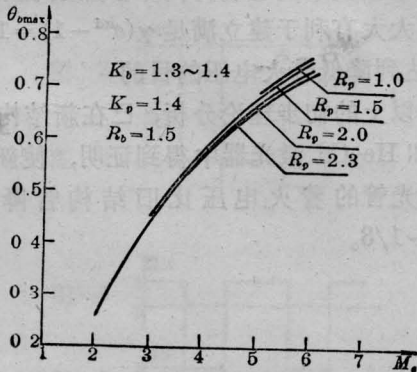
$K_p = 1.4$

$R_p$  之极小值

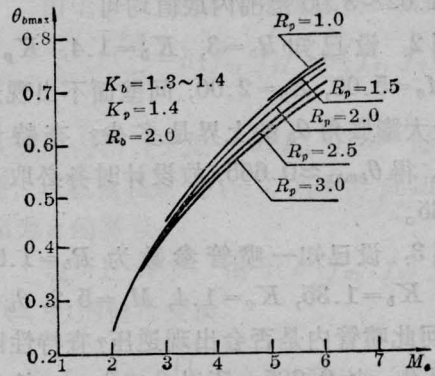
$\frac{M_e}{R_b}$	2	2.5	3.25	4	4.5	5	6
1.5	2.09	1.58	1.26	1.08	1.03	1.01	0.93
5	2.05	1.54	1.20	1.03	1.00	0.97	0.90



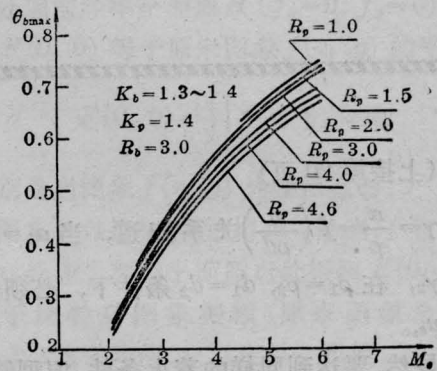
特征曲线 1: 不同  $R_b$ 、 $M_e$  时,  $R_p$  的取值范围



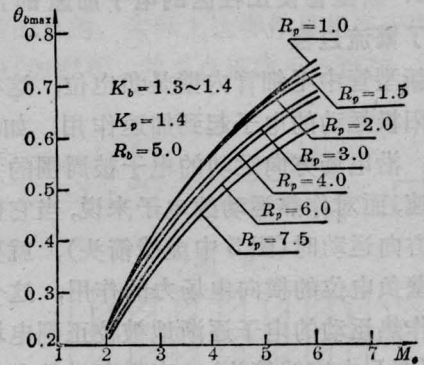
特性曲线 2



特性曲线 3



特性曲线 4



特性曲线 5

### 应用举例

例 1: 设已选定喷管的  $R_b = 2$ ,  $K_b = 1.37$ ,  $K_p = 1.4$ ,  $M_e = 4.5$ , 问  $R_p$  在何范围内取值, 喷管不致出现逆压? 查特性曲线 1, 得

$R_p$  在 1.02~3.05 范围内取值均可。

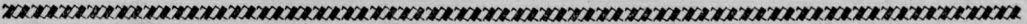
例 2: 设已知  $R_b=3$ ,  $K_b=1.4$ ,  $K_p=1.4$ ,  $M_e=5.00$ ,  $R_p=2.00$ , 问壁面不出现逆压的最大膨胀角  $\theta_b$  的上界是多少? 查特性图表 4, 得  $\theta_{bmax} \approx 0.665$ , 故设计时务必取  $\theta_b \leq 0.665$ 。

例 3: 设已知一喷管参数为  $R_b=1.5$ ,  $R_p=2$ ,  $K_b=1.35$ ,  $K_p=1.4$ ,  $M_e=5.2$ ,  $\theta_b=0.75$ , 问此喷管内是否会出现逆压? 查特性图表 2, 得  $\theta_{bmax} \approx 0.685$ , 所以  $\theta_b > \theta_{bmax}$ , 故此喷管必产生逆压。

另外, 当根据特性图表, 选定既符合设计要求, 又互不矛盾的六个参数后, 采用本程序, 用计算机即可算得整个喷管形状。限于篇幅, 本程序从略。

### 参 考 文 献

- [1] 林同骥, 贾振学; “亚跨超音速喷管流场,” 《力学学报》, 1978 年, 第 1 期。
- [2] 盛家宁: “高速流动型激光器喷管计算”, 《激光》, 1979 年, 6, 第 4 期, 6。
- [3] Greenberg *et al.*; Papid expansion nozzles; *AIAA J.*, 1972, 10, No. 11。



(上接第 20 页)

$\gamma = \frac{\alpha}{\rho} = f\left(\frac{v}{\rho d}\right)$  关系知道, 当  $\alpha_1 = \alpha_2$ ,  $\gamma_1 = \gamma_2$ , 在  $\rho_1 = \rho_2$ ,  $d_1 = d_2$  条件下, 必须使:  $u_{s1} > u_{s2}$ 。

显然, 要达到同样的着火条件, 旧型管着火电压  $u_{s1}$  必定要高于新型管的着火电压  $u_{s2}$ 。

### 2. 新型管使正柱区的电子加速的同时增大了繁流过程

新型管中毛细管内壁是负电位, 这样就对向阳极运动的电子起到加速作用, 如图 5 所示。沿电场方向运动的电子被周围的负电位加速, 而对作热运动的电子来说, 当它们向管壁方向运动时(图 5 中虚线箭头), 就要受到管壁负电位的横向电场力的作用, 这个分力使作热运动的电子逐渐地被校正到电场的方向(图 5 中实线箭头), 直到穿过整个正柱区, 达到阳极位降区为止。

新型管的阳极位降区中, 因正离子浓度的减小使得该区形成了正的阳极位降, 对电

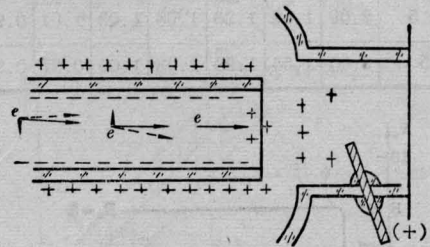


图 5

子起了加速作用, 使电子在该区内的电离能量加大, 繁流过程加强。由此看出在新型管中的正柱区内不但电子损失小, 而且还加速了沿电场方向的运动, 更使一部分做热运动的电子被校正到电场方向来参加繁流过程, 故而大大有利于建立满足  $\gamma(e^{ad} - 1) = 1$  的条件, 达到降低着火电压的目的。

以上的初步理论分析, 已在新结构 He-Ne 和 He-Cd 激光器中得到证明, 使新结构的激光管的着火电压比旧结构管降低了 1/2~1/3。