

文章编号: 1001-2486 (2000) 05-0026-03

## 自由旋涡气动窗口非对称喷管的设计\*

易仕和, 姜宗福, 王承尧

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 对于高能激光器来说, 晶体材料输出窗口因吸收致热而无法正常工作。自由旋涡气动窗口利用超音速自由旋涡来密封低压的激光腔。本文提出了确定气动窗口所需自由旋涡气动特性的过程, 讨论了特征线方法在非对称超音速喷管设计中的应用, 该喷管被用来产生自由旋涡流动。

**关键词:** 自由旋涡; 气动窗口; 非对称喷管; 特征线

**中图分类号:** V45 **文献标识码:** A

## Preliminary Study of Asymmetric Nozzle of Free-vortex Aerodynamic Window

YI Shi-he, JIANG Cong-fu, WANG Cheng-yao

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The crystal window of high-power laser can not work in gear because of the heat caused by absorption of high-power beam. The supersonic free-vortex segment is usually employed to seal low-pressure laser-cavity. In this article the procedures are described for determining free-vortex segment properties. Characteristics method is used to design nozzle which produces free-vortex segment.

**Key words:** free vortex; asymmetric nozzle; characteristics

高能激光系统在工业上和军事上具有广泛的用途, 已成为许多国家优先发展的技术之一。随着激光输出功率的增大, 由于晶体材料输出窗口不可避免的部分吸收作用, 晶体窗口会产生热畸变甚至炸裂。采用冷却技术会有一定的改善作用, 但对于几十万瓦甚至兆瓦级的大功率、大口径的激光器来说, 由于热传递速率的限制, 任何型式的晶体窗口都难以满足激光输出的要求。

自由旋涡气动窗口可用于高能激光器的光束输出。如图1所示, 激光束通过一个超音速射流的气动窗口输出, 用气动窗口射流气体的动量改变来平衡激光腔与环境的压力差。选用的工作气体要求对激光波长无吸收, 以确保激光能量的完全穿透。自由旋涡气动窗口使用的非对称喷管射流能适应射流大角度的转向, 从这种喷管射出的射流具有自由旋涡速度分布的特点。对于理想无粘射流, 其流线以曲率半径  $R_1$  和  $R_2$  扫过一个角度为  $\Delta\theta$  的圆弧, 横跨激光腔的输出孔径。在喷管出口的内、外侧的压力分别与激光腔和环境压力相等, 这样避免了强波系的产生, 因而保证了输出光束的质量。并且, 大的流动转向也使平衡一定压差所需的工作气体流量的降低成为可能。

## 1 非对称喷管参数的选择

图2是自由旋涡圆弧流线的横截面图。自由旋涡气动窗口实际上是利用自由旋涡的一部分, 这部分包括在内、外半径分别为  $R_1$ 、 $R_2$  以及流动转向角  $\Delta\theta$  的范围内 (以下称之为自由旋涡的“截段”)。图2(b)中垂直于纸面的宽度由被密封的孔径宽度决定。由图2, 可对气动窗口射流条件进行计算。

对于气动窗口的设计来说, 先要确定采用的驻室压力  $p_0$ 、总温  $T_0$ 、激光腔压  $p_c$ 、环境气压  $p_{atm}$ 、以及工作气体的种类。要求工作气体对激光束是透明的。然后要确定所需的自由旋涡截段的内、外半径  $R_1$ 、 $R_2$  和气流转向角  $\Delta\theta$  的值。 $\Delta\theta$  的选择是任意的, 但应使之较大以加大射流动量的改变, 同时防止  $\Delta\theta$

\* 收稿日期: 1999-11-18  
基金项目: 国家部委基金项目资助  
作者简介: 易仕和 (1965), 男, 教授。

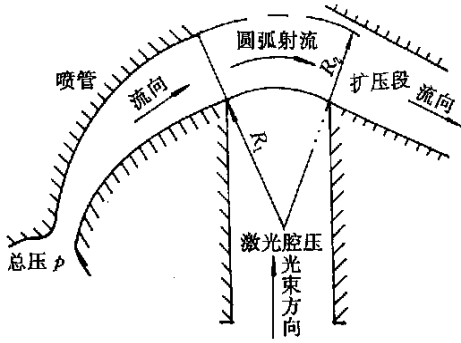


图1 自由旋涡气动窗口示意图

Fig. 1 Free-vortex aerodynamic window

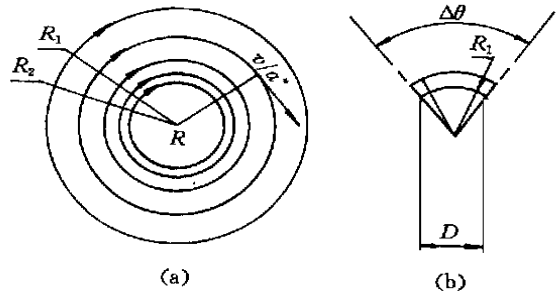


图2 自由旋涡流线

Fig. 2 Free-vortex streamlines

过大可能对激光束产生影响。 $R_1$  的值可用孔径尺寸  $D$  和流动转向角算出:

$$R_1 = (D/2)/\text{Sin}(\Delta\theta/2)$$

$R_2$  的值可由  $R_1$  的值及自由旋涡的速度分布求得。

## 2 非对称喷管的型面设计

理想的自由旋涡截段由喷管产生，因此喷管的设计将从喷管出口截面开始。如图3,  $AB$  为喷管出口平面, 从  $a$  到  $e$  的任一点速度和半径满足自由旋涡截段的条件, 且速度方向垂直于出口平面, 因而对于给定驻室压力  $p_0$ 、总温  $T_0$  以及光腔压力  $p_c$ 、环境压力  $p_{atm}$  来说,  $AB$  平面上的参数是已知的。



图3 喷管设计过程

Fig. 3 Nozzle design procedure

图3 中由  $A-B-C-A$  包围的区域是由左行和右行特征线相交而成, 该区域的参数可计算出来。这里  $AB$  平面上只取 5 个点, 而实际用计算机计算时可取更精细的网格。

在得到以上区域的参数后, 下一步是选择内外轮廓线。显然, 内、外轮廓线只要其斜率在  $A$ 、 $B$  点是垂直于  $AB$  平面即能满足要求。可以看出, 如果选择壁面轮廓线为圆弧, 且其曲率中心位于出口平面, 则可以满足要求。

设内、外圆弧的曲率半径分别为  $R_1$ 、 $R_2$ , 则由  $AC$  上的流动参数和内轮廓线即可确定  $A-C-D-A$  区域的流动参数。同样的方法可确定外轮廓线附近的流动参数。在选择内、外轮廓线时必须确保无同族特征线相交, 且应确保马赫数随流线而单调增加。

内、外轮廓线的圆弧可一直向左延伸到  $E$  点和  $D$  点, 当然如果有必要的话,  $BE$  弧线和  $AD$  弧线的左段也可采用其它曲率半径的圆弧线或其它线型。过  $ED$  线往左进入单波区, 其区域只有左行或右行特征线存在。在  $EF$  线上的流动参数处处为常数。

$EF$  线的左端可采用传统的收缩-扩张型喷管, 且该传统的喷管流场在  $EF$  线的流动参数就是非对

称喷管在  $EF$  线的流动参数。这样,由  $EF$  线左边的传统喷管型线和右边的弧线一起,就组成了产生自由旋涡流动的非对称喷管的初步型线。

这种设计方法还须考虑粘性影响。在得到初步的型线后,须对喷管型线进行附面层修正。按照参考文献 [3] 的方法得到附面层位移厚度分布,然后将喷管型线向外扩张一个位移厚度,从而得到最后的喷管型线。

### 3 设计结果

按照以上的方法,选择  $p_0 = 10\text{atm}$ ,  $p_c = 1/20\text{atm}$ ,  $\Delta\theta = 60^\circ$ , 工作气体为空气,设计了喷管型线,如图 4 所示。图中的曲线已进行了附面层修正。射流上下剪切层会使激光束产生畸变,而喷管出

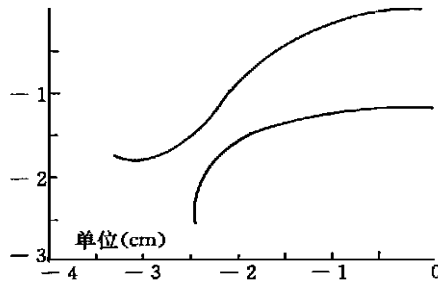


图 4 设计的非对称喷管型线

Fig. 4 Asymmetric nozzle curve

口壁面的附面层厚度会对射流剪切层产生影响。为减少激光束的畸变,应使喷管出口壁面的附面层厚度尽可能小。本文在型面曲线的设计过程中,在不影响气动参数的前提下,通过缩短喷管的长度来降低喷管出口壁面的附面层厚度。

图 5 是根据以上型线加工的自由旋涡气动窗口的照片。该气动窗口的两侧装有光学玻璃观察窗,可用于纹影观测和干涉测量。来流总压、光腔压力、扩散段表面压力等采用压力传感器测量。图 6 是记忆示波器记录的该气动窗口的驻室压力和光腔压力曲线的照片。初步的测试表明,该喷管设计方法是可行的,设计是成功的。

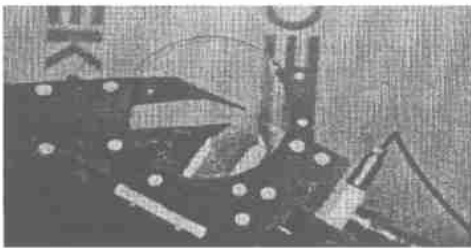


图 5 自由旋涡气动窗口的照片

Fig. 5 The photo of free vortex aerodynamic window

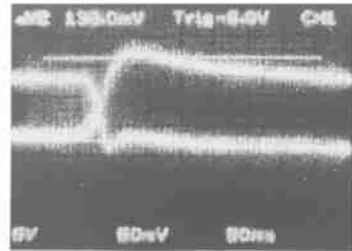


图 6 示波器记录的气动窗口的驻室压力和光腔压力曲线的照片

Fig. 6 The photo of curve line of  $p_0$  and  $p_c$

### 参考文献:

- [1] Masuda W, Yuasa. M. Journal De Physique. 1980
- [2] Klalein, C A. Laser' s80. New Orlands, 1980.
- [3] Flaherty R J, AIAA Paper 73-700, 1973
- [4] KemingDu. Tenth Int. sym. 1995.