

大通光孔径气动窗口光学特性研究

张耀宁 程祖海 李 锋 杜泽明

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

金元俊

(金策工业综合大学物理系, 朝鲜平壤)

摘要: 实验研究了引射式大通光孔径气动窗口光学特性。由哈特曼激光光束诊断仪采集的数据给出了激光束通过气动窗口后的 Strehl 比, 波像差, Zernike 多项式各系数。从这些光学特性参数可以分析引射气压、气动窗口结构对通光光束质量的影响。研究表明随引射气压增加使通光光束发散, 这和环形喷嘴喷出的气流形成的轴向气体密度分布的梯度变大有关。非均匀分布的抽口使波阵面偏斜, 这会使光束漂移。

关键词: 气动窗口 光束质量 波像差

Determination of optical characteristics of aerodynamic window with big exit aperture

Zhang Yaoning, Chen Zuhai, Li Feng, Du Zeming

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Kim Wenjun

(Department of Physics, Kim Cheak Technical University,
Pyongyang, The Democratic People's Republic of Korea)

3 结 论

在分析了激光切割石英玻璃的可行性基础上, 建立了确定石英晶体激光切割参数的数学模型, 通过大量的试验, 验证了模型的正确性。实践表明: 在不同生产条件下切割石英晶体, 运用所建立的模型可以比较理想地选择激光器功率和切割速度。

参 考 文 献

- 1 王昆林. 激光杂志, 1996; 17(3): 105~ 109
- 2 Belic I. Opt & Laser Technology, 1989; 21(4): 277~ 278
- 3 Belic I, Stanic J. Opt & Laser Technology, 1987; 19(6): 309~ 311
- 4 Vologdina S G, Ganyuchenko V M, Kalinin N A. Glass and Ceramics, 1992; 48(9/10): 434~ 435

* * *

作者简介: 周 岩, 女, 1968 年 10 月出生。博士生。现从事非金属材料激光切割、化学蚀刻加工等方面的研究工作。

Abstract: The optical characteristics of jet injecting aerodynamic window with big exit aperture have studied experimentally. The Strehl ratio, wavefront aberration and coefficients of Zernike polynomial of laser beam, passed through the aerodynamic window, were given up from the data, collected by HARTMANN diagnostic apparatus. From these optical characteristics it can be analyze, that the injection flow pressure and the structure of aerodynamic window influence on the passed beam quality. It was shown that the passed beam will be divergence, as the injection flow pressure becomes large. It is related to that the axial grads of air density distribution, caused by gas flow from circular nozzle, become large. And heterogeneous distribution of air bleed hole makes the wavefront tilt so that the passed laser beam will shift.

Key words: aerodynamic window beam quality wavefront aberration

引 言

高功率激光器的窗口可以用晶体窗口也可以用气动窗口。在激光束通过晶体窗口时,晶体窗口会产生热畸变。对于输出功率很高的激光器,这种热畸变使光束质量变差^[1]。气动窗口的热畸变较小,但以前气动窗口的光通道中有湍流和气体横向折射率梯度分布,影响通光光束质量。近年来,为改善气动窗口的通光光束质量,发展了无旋气动窗口、分级气动窗口^[2~4]。文献[4]还介绍了用 CO₂ 激光探针测量气动窗口的通光光束质量。我们研制了一种新型气动窗口,结合引射和节流,可调节密封气压。这里介绍了用哈特曼激光光束诊断仪对它的通光光束质量的分析。

1 激光束通过气动窗口的波前畸变

气流通过喷嘴后产生了扰动,使通光光束波前发生了畸变,其中产生的激波和湍流的影响最大。光束波前畸变通常用泽尼克(Zernike)多项式描述。圆域上的泽尼克多项式为

$$\begin{aligned} Z_q &= (n+1)^{1/2} R_n^0(\rho) \\ Z_q &= [2(n+1)]^{1/2} R_n^m(\rho) \cos m\theta, q = 2j \\ Z_q &= [2(n+1)]^{1/2} R_n^m(\rho) \sin m\theta, q = 2j-1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, n 和 m 为整数并满足关系 $n-m=2p, p=0,1,2,\dots$

q 是模序数,且为 n 和 m 的函数。径向多项式

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!} \quad (2)$$

气动窗口出口处半径为 R' 的圆孔平面上的波前 $\varphi(R', \rho, \theta) = \sum_q \alpha_q Z_q(\rho, \theta)$ (3)

泽尼克多项式各系数反映了波前畸变的种类和大小。例如:

$Z_2 = 2\rho \cos\theta, Z_3 = 2\rho \sin\theta$	波面倾斜
$Z_4 = \sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	离焦(纵向)
$Z_5 = \sqrt{6}\rho^2 \sin 2\theta, Z_6 = \sqrt{6}\rho^2 \cos 2\theta$	3 阶像散
$Z_7 = \sqrt{8}(3\rho^2 - 2\rho) \sin\theta, Z_8 = \sqrt{8}(3\rho^2 - 2\rho) \cos\theta$	3 阶慧差
$Z_9 = \sqrt{8}\rho^3 \sin 3\theta, Z_{10} = \sqrt{8}\rho^3 \cos 3\theta$	5 阶像差
$Z_{11} = \sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	3 阶球差
$Z_{12} = \sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2) \cos 2\theta, Z_{13} = \sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2) \sin 2\theta$	5 阶像差

$$Z_{14} = \sqrt{10} \rho^4 \cos 4\theta, Z_{15} = \sqrt{10} \rho^4 \sin 4\theta$$

5 阶像差

$Z_1 = 1$ 是常数项。如果将测出的畸变了波前以泽尼克多项式展开, 则从泽尼克多项式各系数可以诊断气动窗口造成波前畸变的性质和大小。

2 波前畸变的探测

在我们的气动窗口上波前畸变的探测用哈特曼-谢克子透镜阵列方法。子透镜阵列将通过气动窗口的光束波面分割成若干个子波面, 然后聚焦到 CCD 靶上。测出它们相对于不加引射和节流(静态)时焦点的漂移, 就可算出畸变了波前。然后将畸变了波前以泽尼克多项式展开, 用以诊断气动窗口的通光光束质量。气动窗口波前畸变探测系统如图 1 所示。

He-Ne 激光束经显微物镜发散后, 照亮针孔, 形成“点光源”。该“点光源”

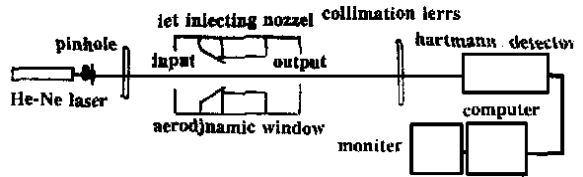


Fig. 1 Scheme of determining wavefront distortion system with hartmann method

发出的球面波通过 $f = 500\text{m}$ 焦距的透镜会聚, 进入气动窗口, 模拟高功率激光器中自气动窗口输出激光的光路。以点光源通过 $f = 500\text{mm}$ 透镜成像后的像点为准直透镜的焦点, 则由准直透镜输出的光束就是一束平面波光束。这束平面波进入哈特曼探测器, 探测各子波面在子透镜阵列后聚焦焦斑的中心位置。焦点阵图像及焦斑中心位置的计算、存储则由采集卡和计算机完成。然后由数据处理软件计算出气动窗口在工作时焦点位置相对于静态的漂移量并拟合出畸变了

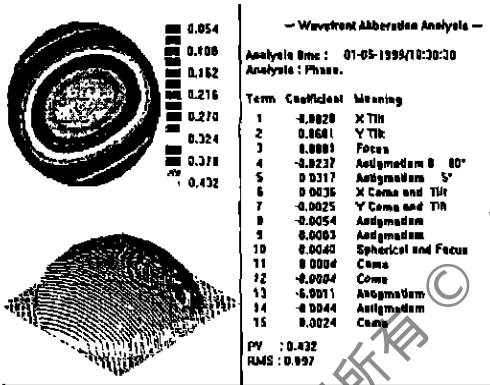


Fig. 2 Coefficients of Zernick polynomial of wavefront

波前。系统中哈特曼探测器及相关的软件由成都光电所研制。焦斑阵列图像的采集程序自编, 采集卡初始化过程由采集程序自动完成, 便于快速连续采集不同工况时的焦斑图像。成都光电所的数据处理软件有较强的功能, 除计算焦斑中心位置外, 还提供拟合后波前的伪彩色等高图、三维波前图等显示方式; 泽尼克多项式 $\varphi(R, \rho, \theta)$ 的各项系数; Strehl 比及光学传递函数等各项被测气动窗口的光学特性参数。

图 2 是当引射气压为 0.6MPa, 气动窗口密封压力达 505.4Pa 时探测到的波前伪彩色等高图, 三维波前图及泽尼克多项式各系数。图 3 是该工况下光束通过引射节流气动窗口后远场斑峰值的 Strehl 比。

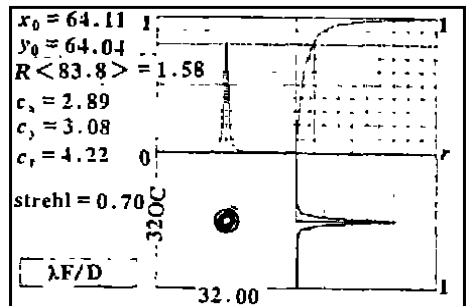


Fig. 3 Computed Strehl ratio

3 引射节流式气动窗口波前畸变分析

引射节流式气动窗口改变其引射压力就可调整密封压力的高低,故就各种工况用哈特曼法测量了它的波前畸变,供使用时在发射系统中加以补偿和改进气动窗口结构用。表 1 给出了不同引射压力下 Zernick 多项式中前几项的系数。

Table 1 Coefficients of Zernick Polynomial at different injecting pressure

injecting pressure (MPa)	sealing pressure (Pa)	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5 ($\times 10^{-4}$)	Z_6	Z_7	Z_8
0.49	2500.4	-316	-6140	374	-102	-9	34	40
0.50	2128.0	-80	-2966	353	-125	28	35	41
0.52	1423.1	-396	-2296	416	-171	32	18	62
0.54	771.4	255	-3310	500	-171	29	30	20
0.56	532.0	-1096	-214	679	-275	91	40	16
0.58	465.5	-934	1435	899	-345	233	26	0
0.60	505.4	-828	681	881	-237	317	36	-25

从各系数的量级可以看出目前这种结构的气动窗口主要造成激光束漂移、增大发散角,同时还有较大的慧差。注意到 Z_4 (离焦)项系数随引射压力增大变大,这是由于引射气流通过环形喷嘴喷出后,在扩压腔中形成正激波,正激波后由附面层作用造成气流的径向密度分布。光束通过扩压腔时,相当于通过一发散透镜。引射压力增加将增加气流中的径向密度分布梯度,因此,离焦项系数将随引射压力增大而变大。这是由环形喷嘴结构所决定的,只能通过发射系统中加以补偿。其次, Z_2, Z_3 (波面倾斜)项系数较大,这是由于现在引射节流气动窗口的抽口只安排了一个,非轴对称分布的抽口将造成 y 方向或 x 方向气流密度分布。引射气压增加时,扩压腔气流中的紊流更减重,因此,反而减少了某一方向上的密度分布梯度。这两项系数总和随引射气压增加而减小。如果将抽口改为轴对称多个抽口,减少横向气流密度分布,估计可以减少这一类型波前畸变,从而改善气动窗口的通光光束质量。

这次测量的 $f 13\text{mm}$ 通光孔径的引射节流式气动窗口较原 $f 6.5\text{mm}$ 通光孔径的相同结构的气动窗口产生的波前畸变严重一些^[6]。这说明要实现相同的密封气压,大通光孔径的气动窗口所使用的气流量要大于小通光孔径的气动窗口。因此,气流中密度分布梯度相应也大一些。

参 考 文 献

- 1 陈金宝,刘泽金,蒋志平 *et al.* 强激光与粒子束, 1994; 6(2): 243~ 249
- 2 Timothy S. USP, 4, 777, 426, 1988
- 3 Bruce V J. USP, 4, 559, 628, 1985
- 4 Du Kemin, Franck J, Lossen P *et al.* 8th International symposium on gas flow and chemical laser. Madrid, Spain, 1990: 639~ 643
- 5 周仁忠主编. 自适应光学. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 6 朱松林,程祖海,李再光. 强激光与粒子束, 1997; 9(2): 161~ 166

作者简介: 张耀宁,男,1941年出生。副教授。现从事高功率激光器关键光学元器件及其光学特性研究。