

文章编号: 1001-3806(2014)05-0608-06

## 单放电盒 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器气体流动特性研究

杨卫红<sup>1</sup>, 唐霞辉<sup>1\*</sup>, 肖龙胜<sup>1</sup>, 周泳全<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074; 2. 深圳信息职业技术学院 机械工程系, 深圳 518000)

**摘要:** 为了解决传统双放电盒横流 5kW CO<sub>2</sub> 激光器双风道、风速小、体积庞大等问题, 研究开发了单放电盒横流 5kW CO<sub>2</sub> 激光器, 采用气体动力学、放电区气体流场分析的方法, 在保证风机强度的前提下根据通风机原理设计了一款铝质轻型离心风机, 风机的进口直径为 382mm, 出口直径为 451mm, 蜗壳宽度为 160mm, 并进行了实验验证。结果表明, 配置该风机的单放电盒的 5kW CO<sub>2</sub> 激光器提高了功率稳定性, 放电区气体平均流速从 60.8m/s 提高到 75.5m/s, 缩小了弧光放电的面积, 改善了近场光斑的强度及均匀性, 采用铝制风机及单放电盒减小了激光器的整体重量和体积。这对 CO<sub>2</sub> 激光器向高功率、小体积、紧凑型发展具有重要意义。

**关键词:** 激光器; 横流 CO<sub>2</sub> 激光器; 气体动力学; 离心风机; 流场分析

中图分类号: TN248.2+2 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.007

## Study on gas flow characteristics in 5kW transverse flow CO<sub>2</sub> laser with single discharge box

YANG Weihong<sup>1</sup>, TANG Xiahui<sup>1</sup>, XIAO Longsheng<sup>1</sup>, ZHOU Yongquan<sup>2</sup>

(1. School of Optics and Electronics Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of a traditional 5kW transverse CO<sub>2</sub> laser with double discharge boxes, i. e., small wind entrance, low wind velocity and large size, a 5kW CO<sub>2</sub> transverse laser with single discharge box was developed. Based on analysis of the flow field in the discharge area and gas dynamics, a lightweight aluminum centrifugal fan was designed on the premise of the same fan strength with entrance diameter of 382mm, outlet diameter of 451mm and volute width of 160mm. Then it was validated in experiments. The results show that, comparing with 5kW transverse laser with double discharge boxes, the power stability of 5kW CO<sub>2</sub> transverse laser with single discharge box is improved. The average wind velocity of discharge area increases from 60.8m/s to 75.5m/s, the arc discharge area is reduced and the near-field intensity and uniformity is improved. The selection of lightweight aluminum fan and single discharge box decreases the weight and volume of the laser. The study is important and instructive for development of compact CO<sub>2</sub> lasers with high power and small volume.

**Key words:** lasers; transverse flow CO<sub>2</sub> laser; gas dynamics; centrifugal blower; fluid analysis

### 引 言

CO<sub>2</sub> 激光器腔内工作气体密度低, 因为激光的小信号增益正比于反转粒子数, 而 CO<sub>2</sub> 激光器工作过程中由于气体放电电离以及工作时间长, 不能时

刻保持工作气体新鲜程度。工作物质密度低是气体放电激光器输出功率不高的主要原因之一<sup>[1]</sup>。提高 CO<sub>2</sub> 激光器工作物质的密度的方法中除了稳定工作气体的温度之外, 最关键的还是提高工作气体的流速。虽然在气体流道设计中, 可以通过拉开电极阴极和阳极间的距离使气流喉道加大, 从而气流很容易通过, 可以获得更高的注入功率。但是风道设计和风机的能力有关, 当极间距离加大后气流速度会降低, 使得工作气体在放电区停留时间变长, 引起工作气体温度升高, 反而引起激光功率下降。为了让工作气体在放电区停留的时间减少从而限制气

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60808005)

作者简介: 杨卫红(1976-), 女, 博士研究生, 主要研究领域为高功率气体 CO<sub>2</sub> 激光器及其应用。

\* 通讯联系人。E-mail: txh1116@hust.edu.cn

收稿日期: 2013-10-17; 收到修改稿日期: 2013-11-12

体温度的升高,实现长时间稳定运行,提高气体风速非常关键。中国科学院力学研究所的专家研究了不同气压下,气体流速对激光器输出功率的影响。结果认为,当气压低于 11.98kPa 时,气体流速对激光功率的影响不明显,但当气压大于 26.66kPa 时,气体流速对激光功率影响显著并且没有一定的规律,工作气压一定时输出功率最初随流速的增加而增加,在某一速率时,输出功率达到最大值,然后随流速的增加,又渐渐减小。激光器运行中,要在具体条件下,优化气体流速与输出功率之间的关系<sup>[2]</sup>,然后稳定气体流速,以实现稳定的高功率输出。横流 CO<sub>2</sub> 激光器气体流过放电区的距离较短,功率/风速最优配比为 5kW/(75m/s)。以往横流激光器采用的横流风机的风速一般停留在 60m/s,不能满足激光器长时间大功率稳定输出。为了达到风速优化值,华中科技大学激光加工国家工程研究中心开发了 HUST-5000 型单放电盒 5kW 横流电激励连续 CO<sub>2</sub> 激光器,作者利用通风机原理设计了一款实用新型激光器离心风机,实现了风速优化值并且使该激光器输出功率可稳定在 5kW。

## 1 单放电盒横流气体激光器风机参量设计

### 1.1 横流 CO<sub>2</sub> 激光器气体流动

图 1 为华中科技大学激光加工国家工程中心生产的单放电盒 5kW 横流电激励连续 CO<sub>2</sub> 激光器结构图,其中图 1a 为激光器结构图,图 1b 为激光器梯形放电区截面图。

MARIA 指出:使混合气体在器件中快速流动,就能带走因气体放电而残存的废热,从而有利于 CO<sub>2</sub> 的 10<sup>0</sup> 和 02<sup>0</sup> 能级的去空,有利于 00<sup>0</sup>1 与 10<sup>0</sup> 之间形成粒子数反转,增加 10.6μm 的激光辐射,MARIA 通过能级分析得到:

$$\frac{P_{f \rightarrow \infty}}{P_{f \rightarrow 0}} = \frac{\tau_2 + \tau_1}{2\tau_f} \left( \frac{1 + \frac{\sigma I}{\tau_2} + \frac{\tau_1}{h\nu}}{1 + \frac{2\sigma T}{\tau_f}} \right) \quad (1)$$

式中,  $P_{f \rightarrow \infty}$  和  $P_{f \rightarrow 0}$  分别为轴快流激光器放电区轴方向趋于无穷大和趋于 0 时的最大抽提功率密度;  $\tau_f$  为气体流经放电区的时间;  $\tau_1$  和  $\tau_2$  为碰撞弛豫时间;  $\sigma$  为受激发射截面;  $I$  为激光束强度;  $h\nu$  为光子能量;  $T$  为气体绝对温度。

由(1)式可知,在气体配比为最佳、气体流速很

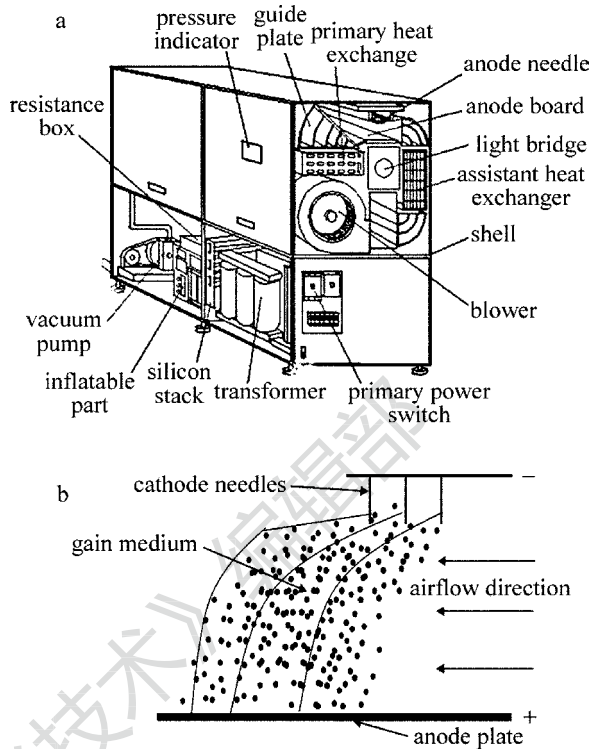


Fig. 1 Transverse-flow 5kW CO<sub>2</sub> laser

a—internal construction b—laser discharge section

大情况下,最大的抽提功率密度的比值随气体的流速而线性增加<sup>[3]</sup>,因此,缩短气体流经放电区的时间即提高气体流速是提高横流激光器功率的有效途径。

### 1.2 风机参量设计

离心风机的主要性能参量有:流量、全压(扬程)、功率、转速和效率。风机工作时是叶轮带动气流一起旋转产生离心力,使流体获得能量,因此叶轮是实现机械能转换为流体能量的主要部件。由于蜗壳形状和大小的限制,蜗壳内流场存在大量的旋涡和二次流,而这正是造成离心风机效率低、噪声高的主要原因。因此对于风机的设计关键是叶轮和蜗壳的设计,对于叶轮而言就是叶轮进口直径、出口直径、叶轮中叶片出口角,以及计算过程中一些参量的选取。而对于蜗壳的设计,关键是蜗壳最大张开度的尺寸设计。本节中根据通风机设计原理对叶轮和蜗壳关键参量的尺寸进行了分析和计算。

1.2.1 叶轮尺寸计算 风机设计给定条件:风机流量  $q_v = 15120\text{m}^3/\text{h}$ ,全压  $p = 500\text{Pa}$ ,风机转速  $n = 2800\text{r}/\text{min}$ ,风机叶轮圆周速率  $u = 873\text{m}/\text{s}$ ,工作介质密度  $\rho = 0.103\text{kg}/\text{m}^3$ 。图 2 为风机叶轮示意图,图 3 为全压系数  $\bar{p}$  与叶轮叶片出口安装角  $\beta$  间的关

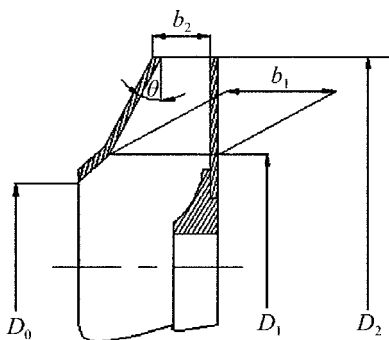


Fig. 2 Schematic diagram of the impeller

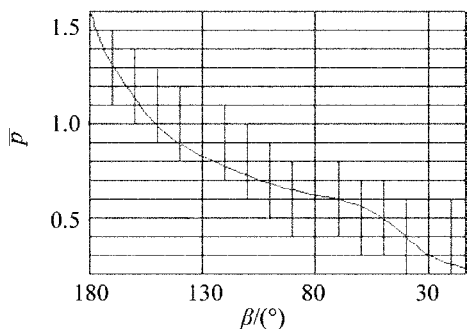


Fig. 3 Relation curve between whole pressure and blade outlet

系曲线,由 $\bar{p} = \frac{p}{\rho u^2}$ 解得 $\bar{p} = 0.6$ 。风机叶轮外径 $D_2$ 的计算公式如下<sup>[4]</sup>:

$$D_2 = \frac{60}{\pi n} u = \frac{60}{\pi n} \sqrt{\frac{p}{\rho \bar{p}}} \quad (2)$$

解得 $D_2 = 451\text{mm}$ 。

根据流量系数公式:

$$\bar{q}_v = \frac{q_v}{Fu} = \frac{q_v}{\frac{\pi D_2^2}{4} \times \frac{\pi D_2 n}{2}} \quad (3)$$

解得 $\bar{q}_v = 24.32 \frac{q_v}{n D_2^3} = 0.4$ 。其中, $\bar{q}_v$ 为风机流量系数; $q_v$ 为风机流量; $F$ 为叶轮的面积(出口); $b_1$ 和 $b_2$ 为叶片进、出口宽度; $D_0$ 为叶轮进口直径; $D_1$ 为叶片进口直径; $\theta$ 为叶片前盘倾角。叶片进口直径 $D_1$ 的计算公式如下<sup>[5]</sup>:

$$\frac{D_1}{D_2} \geq 1.194 \sqrt[3]{\bar{q}_v} \quad (4)$$

根据 $\bar{q}_v > 0.3$ , $\frac{D_1}{D_2}$ 可在0.85~0.95范围内选取,

叶轮选 $D_1 = 382\text{mm}$ 。

1.2.2 蜗壳参量计算 本实验离心式风机的蜗壳采用矩形截面,设计时蜗壳的宽度比叶轮的出口宽度大,同时蜗壳矩形开口的长度大于蜗壳与叶轮的

径向距离,使得气流流出叶轮后流场体积得到扩大并促进流速发生相应改变,蜗壳示意图见图4。

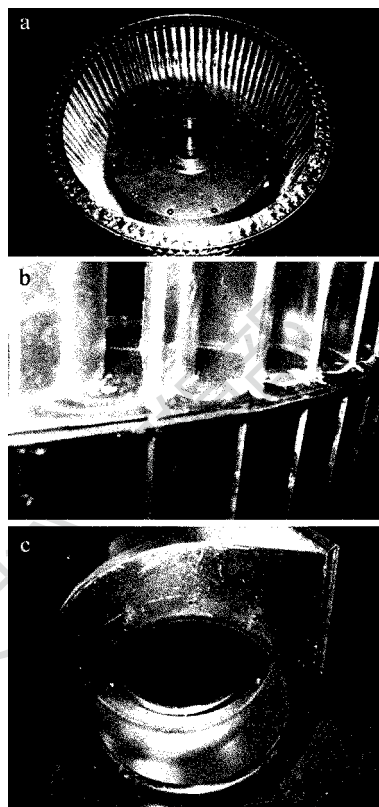


Fig. 4 Picture of fan and volute

a—axial impeller b—partial amplifier fan picture c—axial volute

(1) 蜗壳出口最大张开度 $A$

蜗壳最大张开度 $A$ 由下式计算:

$$A = \frac{D_2}{2} \left[ 2\pi m + \frac{1}{2} (2\pi m)^2 + \frac{1}{6} (2\pi m)^3 \right] \quad (5)$$

式中, $A$ 的单位为 $\text{mm}$ ;  $m$ 为蜗壳系数,随风机的比转速 $n_y$ 而定:

$$n_y = \frac{n \sqrt{q_v}}{\left( \frac{1.2}{\rho} p \right)^{\frac{3}{4}}} \quad (6)$$

解得 $n_y = 6.1$ ,根据蜗壳计算经验取 $m = 0.2$ ,由(5)式、(6)式计算得 $A = 195\text{mm}$ 。

(2) 蜗壳宽度 $B$

蜗壳宽度 $B$ 按经验公式计算,经验公式为:

$$\frac{B}{D_2} = \frac{n_y}{20.3} + \delta \quad (7)$$

式中, $\delta$ 为附加余量,取值范围为0~0.06,低 $n_y$ 取下限,高 $n_y$ 取上限。结果算得 $B = 160\text{mm}$ ,风机叶轮及蜗壳实物图见图4。

## 2 实验设备及方法

### 2.1 实验系统

单放电盒横流5kW CO<sub>2</sub>激光器气体流动特性实验系统包括高功率横流CO<sub>2</sub>激光器整机,如图5所示,该激光器是一种高功率工业用气体激光器,主要应用于金属焊接、表面合金化、热处理等。



Fig. 5 High power transverse flow CO<sub>2</sub> laser

### 2.2 实验方法及结果分析

2.2.1 风速研究 实验中风速仪所放位置分别为阳极上沿光轴方向310mm的喉道处、阴极放电针处、光轴方向1230mm放电区中心处以及光轴方向2350mm处<sup>[6-11]</sup>。将不同气压下各测量点风速测量值相加取平均列表,见表1和表2。测量时放电区平均温度为25℃左右,风速数据为风机开启至风速稳定每隔15s记录数据,风速随气压变化关系曲线见图6。

Table 1 Wind velocity in laser flow field with new fan

air pressure/Pa	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000
time/s	wind speed/(m·s <sup>-1</sup> )								
t <sub>1</sub>	77.1	72.5	73.1	72.5	75.3	73.9	75.6	74.4	77.2
t <sub>2</sub>	76.6	73.7	73.9	74.1	75.9	75.1	76.4	75.4	76.3
t <sub>3</sub>	77.5	74.8	73.5	75.1	75.6	75.3	76.3	75.6	78.4
t <sub>4</sub>	78.3	74.8	73.5	75.7	75.9	75.9	76.7	77.3	80.5
average value/(m·s <sup>-1</sup> )	75.5								

Table 2 Wind velocity in laser flow field with old fan

air pressure/Pa	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000
time/s	wind speed/(m·s <sup>-1</sup> )								
t <sub>1</sub>	62.7	63.7	54.9	36.7	59.6	43.1	74.6	70.1	72.6
t <sub>2</sub>	69.4	65.0	53.0	17.0	58.8	68.4	80.2	72.9	73.1
t <sub>3</sub>	69.4	53.0	51.4	19.4	57.3	65.7	78.2	71.5	69.4
t <sub>4</sub>	61.7	63.7	54.9	22.0	59.6	69.3	80.2	73.9	75.1
average value/(m·s <sup>-1</sup> )	60.8								

的风速最优值相比有差距<sup>[10]</sup>,这也是激光器不能大功率稳定输出的原因之一。

2.2.2 放电均匀性研究 5kW横流CO<sub>2</sub>激光器属于大体积放电,其放电均匀性与稳定性是影响注入功率提高的关键因素。气体放电过程中,由于CO<sub>2</sub>

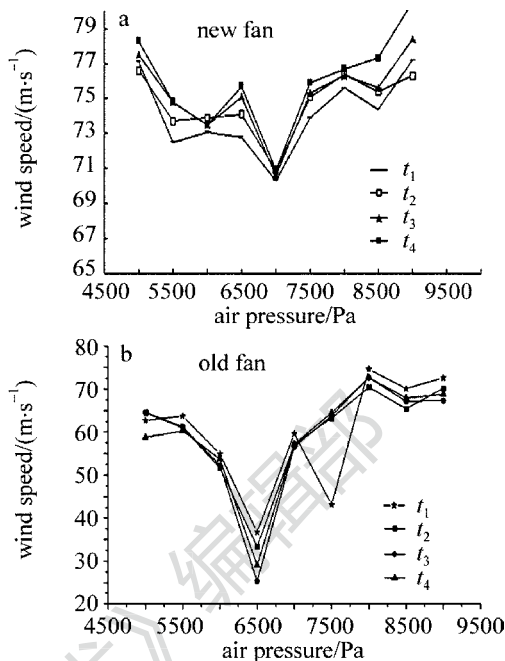


Fig. 6 Curve of wind speed vs. changing pressure

图6a中曲线变化平稳,大都集中在71m/s~79m/s范围,其平均风速为75.5m/s,这与5kW横流CO<sub>2</sub>激光器所要求的风速最优值比较接近。而图6b中风速曲线变化范围很大,风速最高处可达80.2m/s,而风速最低处仅为17.0m/s,整个放电区平均风速仅为60.8m/s,与5kW横流CO<sub>2</sub>激光器所要求

气体本身的热分解和热电离,使得工作气体中的CO<sub>2</sub>的含量减少,导致反转粒子的数量减少,因此激光器输出功率的下降,缩短激光器的连续运转时间,产生弧光放电。新风机的采用提高了风速,加速了气体冷却速度,有利于保持CO<sub>2</sub>的含量,降低了放

电不均匀性。横流 CO<sub>2</sub> 激光器的直流放电特性与工作气压、气体成分等有关,实验中采用混合气体的体积比为  $V(\text{O}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}) = 1:8:7$ 。对总气压分别为 7.5kPa,8.0kPa 及 8.45kPa 时进行了放电实验,图 7 为稳定放电的  $V-i$  性曲线。可以看出,放电的  $V-i$  特性曲线平坦,放电电压基本稳定,随电流变化的起伏不大,放电电压随气压的增加而升高,说明放电属于正常辉光放电(见图 8)。

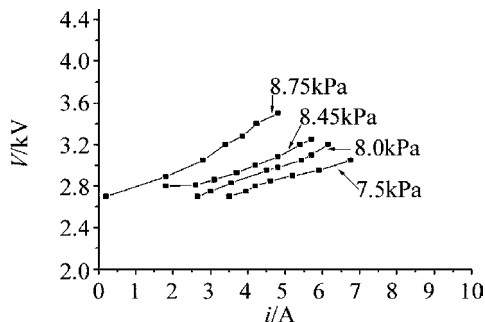


Fig. 7 Stable discharge  $V-i$  characteristic curves

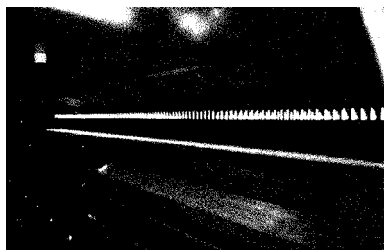


Fig. 8 Laser uneven discharge picture

### 2.2.3 环形光斑均匀性研究 在放电条件和输出

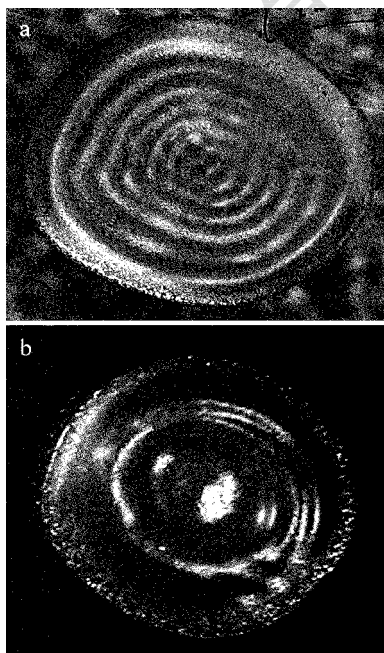


Fig. 9 The near field intensity distribution of laser ring spot  
a—with new fan b—with old fan

功率相同的情况下,采用有机玻璃烧斑法对激光器采用新风机前后非稳环形光斑近场强度进行了比较,烧斑取样图见图 9,输出光阑半径为 16mm 的平凹稳定腔离输出镜 1m 处的光斑,光束模式为 TEM<sub>06</sub> 模,光斑直径为 29mm。从图 9a 和图 9b 比较中可以清楚看出,由于新风机对风速的提高及其平稳性的改善,使得谐振腔振荡模体积两侧处于激活介质区域的有效长度基本相等,因而环形光斑近场强度分布均匀性和几何形状对称性较改善风机前有了明显改善。

2.2.4 功率特性研究 图 10 为 5kW 横流电激励连续 CO<sub>2</sub> 激光器 8h 拷机功率曲线,其中气压变化范围 5500Pa ~ 8800Pa,对应原风机的激光器功率曲线变化呈逐步下降趋势,激光功率不能稳定输出,且最低值在 4kW 以下;而采用新的风机激光器功率对应各时间段始终维持在 4.8kW ~ 5.5kW 之间稳定输出,其平均功率达到 5kW,实现了大功率稳定输出。按照老风机运转状态下激光器的电光转换效率为 13%,可得出新风机的电光转换效率为 18%。从曲线可以明显看出,新风机对应的激光器功率曲线稳定性为  $\pm 2\%$ ,优于老风机所对应的激光器功率稳定性  $\pm 3\%$ 。

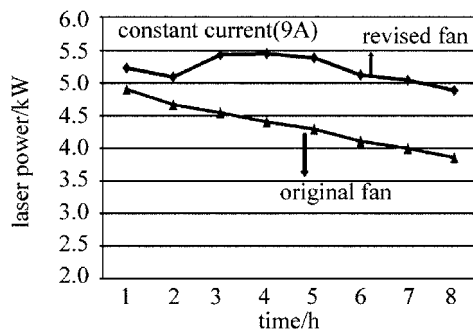


Fig. 10 Power vs. time (pressure: 5500Pa ~ 8800Pa)

## 3 结 论

通过对传统 5kW 横流电激励连续 CO<sub>2</sub> 激光器风机设计,并对采用的单放电盒的研究,得出如下结论:

(1) 根据横流 5kW CO<sub>2</sub> 激光器工作性能需要,铝制离心风机参量为:  $D_2 = 451\text{mm}$ ;  $D_1 = 382\text{mm}$ ;  $B = 160\text{mm}$ 。

(2) 采用新风机的单放电盒 5kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器通过拷机实验得出电光转换效率从 13% 提高到 18%;功率稳定性从  $\pm 3\%$  提高到  $\pm 2\%$ 。

(3) 从拷机实验可得出:单放电盒 5kW 横流

CO<sub>2</sub>激光器风速实现了最优化值,风速平均值为75.5m/s,并且在保证风机强度的前提下采用铝制风机减轻整个激光器重量。单放电盒的采用减小了激光器的体积。

(4)采用新风机的5kW横流CO<sub>2</sub>激光器无论在近场光斑强度、光斑均匀性还是在抑制辉光放电方面都优于配置老风机的5kW横流CO<sub>2</sub>激光器。

#### 参 考 文 献

- [1] TANG X H. High power transverse CO<sub>2</sub> laser and its applications [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2008;51-53 (in Chinese).
- [2] CHU Z X, CHENG L Y. The flow rate of high-pressure electric incentive impact of the CO<sub>2</sub> laser output power [J]. Chinese Journal of Lasers, 1990, 17(5):302-305 (in Chinese).
- [3] GAO Y G, MA Sh Y, MENG P, *et al.* Experiment study on gas kinetics of the kilo-watt fast-axial flow CO<sub>2</sub> laser [J]. Laser Journal, 1989, 10(6):246-248 (in Chinese).
- [4] SHA Y, WEN J L. Pump and fan [M]. 3th ed. Hefei: China Science and Technology Press, 2005;231-235 (in Chinese).
- [5] WU Y L, CHENG Q G, LIU Sh H. Fan and compressor [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005;57-80 (in Chinese).
- [6] ADLER D, LEVY Y A. Laser-doppler investigation of the flow inside a backswept, closed, centrifugal impeller [J]. Journal of Mechanical Engineering, Science, 1979, 21(1):1-9.
- [7] SHENYANG BLOWERE RESEARCH INSTITUTE, NORTHEAST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY DEPARTMENT OF FLUID MECHANICS. Edited by centrifugal fan [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986;360-385 (in Chinese).
- [8] FURUKAWA M, INOUE M, SAIKE K, *et al.* The role of tip leakage vortex breakdown in compressor rotor aerodynamics [J]. Asme Journal of Turbo Machinery, 1999, 121(13):469-480.
- [9] ADAMCZYK J J. Aerodynamic analysis of multistage turbo machinery flows in support of aerodynamic design [J]. Asme Journal of Turbo Machinery, 2000, 122(2):189-217.
- [10] CHENG Z H. 10kW CO<sub>2</sub> laser flow field tuning device [J]. Chinese Journal of Lasers, 1994, 21(1):11-15 (in Chinese).
- [11] YANG W H. Study on characteristics of gas flow for new type 5kW transverse flow CO<sub>2</sub> laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007;18-20 (in Chinese).