

# 激光光束光斑质量诊断技术研究及其标准化进展

尹志斌 陈虹 王旭葆 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 以现代激光工业制造为应用背景,探讨激光光束光斑质量诊断技术的发展。从光束束宽的定义出发,对比了两种束宽定义方法的不同,阐述了光束质量诊断与光束束宽定义之间的关系。依据国家和国际标准,研究了光束束宽、束散角测量和计算方法的发展,以基于空心探针原理的光束光斑质量诊断技术及设备为重点研究内容,介绍了基于实测目的的测量方法。分析结果表明,以包含功率(或能量)占总功率百分比定义的束宽为基础,基于空心探针原理的激光光束光斑质量诊断技术结合双曲线拟合方法计算,能够更好地反映激光束的传输和聚焦性能,诠释激光制造系统的制造能力。

**关键词** 激光技术;激光工业制造;光束测量;束宽;空心探针

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.081406

## Research and Standardization on Diagnostic of Laser Beam Characteristics

Yin Zhibin Chen Hong Wang Xubao Zuo Tiechuan

(*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

**Abstract** Based on the background of application of modern laser industrial manufacturing, the diagnostic technology of laser beam is discussed. Starting from the definition of laser beam width, two different kinds of laser beam width definition are compared. The relationship between laser beam diagnostic technology and definition of laser beam width is described. Then, according to the development of national and international standards, the beam width, beam divergence angle measurement and calculation are presented. Focusing on the principle and equipment based on the principle of hollow needle, the method with purpose on engineering application is discussed. The analysis results show that the definition including power (or energy) defined percentage of the total power beam width is better suitable for engineering application and the beam diagnostic technology based on hollow needle combined with hyperbolic fitting method, and it will well define the lasers performance capability.

**Key words** laser technique; laser industrial manufacturing; beam measurement; beam width; hollow needle

**OCIS codes** 140.3295; 120.1880; 120.1740; 120.2830

## 1 引言

随着激光制造系统输出功率的不断提高,光束特性参数成为激光制造系统之间进行比较和满足应用要求的依据。光束的特性参数包括可以直接测量得到的参数,例如激光能量(或功率)、波长、束宽等,还包括通过这些参数计算得到的参数,例如束散角、光束传输比、光束参数积等。目前对光束特性参数的评价和测量方法有很多,互不相同,也无法统一。光束束宽的定义有很多种,例如光束半峰全宽、二阶矩半径、能量降至 $1/e$ 或者 $1/e^2$ 时的束宽等,其他光束特性参数很大程度上取决于束宽的定义和测量方法。另一方面,现代激光制造技术及其应用的迅猛发展极大地推动了激光技术领域相关国际、国内标准工作的深入开展,不仅能够

**收稿日期**: 2011-03-05; **收到修改稿日期**: 2011-03-21; **网络出版日期**: 2011-07-21

**基金项目**: 国家 973 计划(2006CB605206-3)和北京市教委科技计划(JC101012200903)资助课题。

**作者简介**: 尹志斌(1984—),男,硕士研究生,主要从事激光光束质量检测方面的研究。

E-mail: s200813009@emails.bjut.edu.cn

**导师简介**: 左铁钊(1941—),女,教授,博士生导师,主要从事激光科学与工程等方面的研究。

E-mail: neltzuo@bjut.edu.cn

了解和跟踪国际激光技术的发展前沿,还为国内激光技术领域的发展奠定了良好的基础。我国早在 1992 年就颁布了《激光辐射发散角测试方法》(GB/T 13740-1992)、《激光辐射光束直径测试方法》(GB/T 13741-1992),其中推荐了套孔法和小孔扫描法<sup>[1,2]</sup>。此外,傅里叶变换法、基于光束传播方程的束宽测量法、透镜变换法以及采用狭缝扫描装置和刀口扫描装置等是较为普遍的测量方法。本文在总结已有的激光光束光斑质量诊断技术的基础上,通过对追溯 20 世纪 90 年代以来激光技术领域光束参数测试标准的发展,提出了工业制造用激光光束质量测量方法,以包含功率(或能量)占总功率百分比定义的束宽为基础,基于空心探针原理的激光光束光斑质量诊断技术结合双曲线拟合方法计算,能够更好地反应激光束的传输和聚焦性能,诠释激光制造系统的制造能力。

## 2 光束束宽的定义和测量

激光束通常都没有清晰的锐边,所以束宽的测量很大程度上取决于束宽的定义方法。光束束宽的定义有很多种,例如光束半峰全宽、二阶矩半径、能量降至  $1/e$  或者  $1/e^2$  时的束宽等。国际标准化组织(ISO)颁布的国际标准 ISO11145<sup>[3]</sup>规定了两种束宽定义方法。

### 2.1 束宽的定义

#### 2.1.1 二阶矩定义束宽

用功率(或能量)密度分布函数的二阶矩关系定义的光束宽度为

$$d_{ax}(z) = 4\sigma_x(z), \quad (1)$$

$$d_{ay}(z) = 4\sigma_y(z), \quad (2)$$

式中在光束位置  $z$  处功率(或能量)密度分布函数  $E(x, y, z)$  的二阶矩为

$$\sigma_x^2(z) = \frac{\iint (x - \bar{x})^2 E(x, y, z) dx dy}{\iint E(x, y, z) dx dy}, \quad (3)$$

$$\sigma_y^2(z) = \frac{\iint (y - \bar{y})^2 E(x, y, z) dx dy}{\iint E(x, y, z) dx dy}, \quad (4)$$

式中  $(x - \bar{x})$  和  $(y - \bar{y})$  是到中心  $(\bar{x}, \bar{y})$  的距离。中心坐标由一阶矩确定,即

$$\bar{x} = \frac{\iint x E(x, y, z) dx dy}{\iint E(x, y, z) dx dy}, \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{\iint y E(x, y, z) dx dy}{\iint E(x, y, z) dx dy}. \quad (6)$$

#### 2.1.2 内含功率(或能量)定义束宽

分别在两个所选的相互正交且垂直于光束轴的  $x$  和  $y$  方向上,内含功率(或能量)占总功率(或能量)规定百分数( $u\%$ )的最小缝宽,用  $d_{x,u}$ ,  $d_{y,u}$  表示。所选方向由最小束宽及其正交方向确定,对于圆形高斯光束  $d_{x,98.4} = d_{86.5}$ 。

二阶矩是辐照重心的平方,理论上讲,二阶矩定义束宽非常合理,适用于所有不同的光束形状。但是在实际应用中,为了增大模体积实现高功率,常常采用非稳腔结构,实现多模式输出。国际电工组织(IEC)出版的 IEC60825——“激光产品的安全”系列标准的第一部分——“设备分类和要求”也对光束宽度的定义做出规定<sup>[4]</sup>。对光束直径定义为:“在空间某点处的光束直径  $d_u$  是指其功率(或能量)为总激光功率(或能量)的  $u\%$  的最小圆直径”。此外,还特别指出,二阶矩的直径定义不用于剖面具有中心高辐射峰值和低背景的激光束,例如由非稳定腔产生的远场激光束。因为,当使用二阶矩和用高斯光束剖面假设计算功率时,通过孔径的功率会被显著低估。

## 2.2 束宽的测量

1992年颁布的推荐性国家标准《激光辐射光束直径测试方法》(GB/T 13741-1992)推荐了套孔法和小孔扫描法。套孔法是将孔径为 $r$ 的光阑放在光路中,并使之略小于光斑半径 $w$ ,通过测量有无光阑时的能量比计算透射率 $T$ :

$$T = 1 - \exp\left[-2\left(\frac{r}{w}\right)^2\right], \quad (7)$$

根据透射率 $T$ ,光斑半径表示为

$$w = r\{2/[-\ln(1-T)]\}^{1/2}. \quad (8)$$

小孔扫描法是用小孔探测到归一化的光强分布曲线,然后计算出该处的光斑半径。

1999年颁布的机械行业标准《二氧化碳激光器主要参数测试方法》(JB/T 9490-1999)推荐的光束直径测试方法是,首先在距离激光器输出窗口 $z(m)$ 处测量光强分布曲线,在光强分布曲线上找出光斑中心最大光强 $I_0$ 处的坐标 $x_0$ ,再找出光强下降到13.5%处的坐标 $x'$ , $z$ 处的光斑半径计算为<sup>[5]</sup>

$$w(z) = |x_0 - x'|. \quad (9)$$

2005年颁布实施的国家军用标准《固体激光器测试方法》(GJB 5441-2005)规定了三种适用于光斑宽度或光斑直径的测试方法,分别是套孔法、刀口法和CCD法<sup>[6]</sup>。

刀口法是将刀口放置于激光器及功率计(或能量计)之间的光轴上,刀口在一个机械平台上沿和光束垂直的 $x$ 方向移动,逐渐遮挡住输出光斑,进入功率计(或能量计)的功率(或能量)逐渐减小,探测器测量出的透射激光功率为刀口位置的函数。记录功率计(或能量计)读数为原始功率(或能量)的84%及16%时的对应几何位置 $x_1$ 及 $x_2$ ,计算 $x$ 方向的光束直径 $d_x$ :

$$d_x = 2|x_1 - x_2|. \quad (10)$$

CCD法是将CCD探头垂直置于光轴处,选择适当的衰减量,并充分利用CCD动态范围,测量光束横截面的能量(或功率)强度分布,然后按照光强分布的二阶矩计算光束直径。

实际上,随着激光技术的进步,特别是激光工业制造领域的工程应用中,精确获得光束横截面的光强分布是非常困难的。

## 2.3 空心探针测量原理

空心探针测量方法是借助于一个转动的能传输激光束的空心针而起作用。探针的结构示意图如图1所示。

一定速电机带动一空心探针,探针转动使微孔对光斑进行扫描。空心针一端的侧表面上开有一小孔,在探针扫过光束截面的瞬时过程中,由小孔进入的激光束通过内空腔被引导至转轴上,由此处的探测器进行检测。转动系统在步进电机控制下可垂直于光束方向平动,随着整个探针支架的平移,就能划出一系列弧线来,同时,高速采样系统对热电探测器输出的信号采样后送入后续电路进行处理。采样过程在扫描光斑的瞬间完成。从而探测到光束横截面上的光强分布,由此扫描出整个光斑的功率密度分布情况。在测量不同强度和不同尺寸的光束时,可选择不同微孔孔径的探针(一般测量聚焦光斑时,微孔的直径为 $15\sim 50\ \mu\text{m}$ ;测量非聚焦光束时,微孔直径为 $100\sim 500\ \mu\text{m}$ ),同时调整平动步长,这样,即可满足测量非聚焦光束的要求,也可以实现对聚焦光斑的测量<sup>[7]</sup>。可以测量的激光功率密度范围为 $10^2\sim 10^7\ \text{W}/\text{cm}^2$ ,覆盖了其他方法可以测量的功率密度范围;更重要的是基于实测原则,这种方法更强调测量值的真实度、统一度和可信度。国家标准化管理委员会于2009年颁布的推荐性国家标准《工业用大功率激光器光束质量测试评定方法》(GB/T 24664-2009)<sup>[8]</sup>补充了基于空心探针原理的光束质量测试方法。

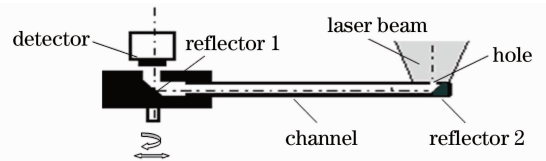


图1 探针结构示意图

Fig. 1 Detection needle structure scheme

## 3 束散角的定义和计算

1992年颁布的推荐性国家标准《激光辐射发散角测试方法》(GB/T 13740-1992)中将光束发散角描述为表征光束发散度的量,即高斯光束的直径依双曲线规律变化,其发散角(全角)为双曲线两条渐进线的夹角。

发散角的计算由束宽得出,公式为

$$\theta = \frac{2w}{f}. \quad (11)$$

1994年颁布的推荐性国家标准《固体激光器主要参数测试方法》(GB/T 15175-94)、2005年颁布实施的国家军用标准《固体激光器测试方法》(GJB 5441-2005)都将发散角的计算用光束束宽和距离的比值表示;1999年颁布的机械行业标准《二氧化碳激光器主要参数测试方法》(JB/T 9490-1999)将光束束宽和距离的比值扩展为极限形式。2008年颁布的推荐性国家标准《激光术语》(GB/T 15313-2008)<sup>[9]</sup>修改采用了国际标准 ISO11145:2006。将光束远场发散角修正为“束散角”,并与光束束宽相对应,采用了两种定义方式。分别是“光束宽度[功率(或能量)密度分布二阶矩定义的]在远场增大形成的渐近面锥所构成的全角度”,以及“光束宽度[内含功率(或能量)定义的]在远场增大形成的渐近面锥所构成的全角度”。

## 4 测量实验与结果

光束光斑质量诊断技术在激光工业应用领域中发挥着重要的作用,一方面通过实时在线测量,可以很好地了解激光光束参数和其在加工过程中的变化情况,以及对激光加工质量造成的影响;另一方面也为大功率激光器、传输聚焦系统、整形系统的研制提供了有效的检测手段。图2为采用基于空心探针测量原理 PROMETEC 公司的 LASERSCOPE UFF100 大功率光束光斑质量检测仪进行了测量。Trumpf 6000W 大功率 CO<sub>2</sub> 激光器是快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,最高输出功率 6000W,采用射频激励,可连续或脉冲输出,激光器输出激光束的模式结构为 TEM<sub>01</sub> 模。

### 4.1 光束传输系统的检测

Trumpf 6000W 大功率 CO<sub>2</sub> 激光器常常要实现远距离激光加工,在激光传输过程中,受附加相移的影响,在不同的传输距离,光束横截面能量分布将发生变化。文献[10]研究了这种变化,如图3所示。

由于空心探针较细(一般直径小于 3 mm),在扫过光束时,只挡住极小部分光,且测量时间短,损失的能量 1% 以下,故可以实现在激光加工过程中对光束实时在线测量。在加工过程中,通过周期地对光束进行测量,可以了解加工过程中激光器输出的稳定性。

### 4.2 光束聚焦变换系统的检测

在某些加工过程中,需要使用特定的光束整形系统来达到加工目的。例如积分镜在熔覆加工中的应用就非常广泛。为了验证整形系统对光束的实际整形效果,就需要采用检测工具对经过整形系统前后的光束进行测量和比较。图4是利用大功率光束光斑质量测量仪对使用积分镜前后的激光束的测量结果。从图中可看出,测量结果显示积分镜基本实现了把光斑形状从圆形整形成带状的要求。

## 5 结 论

激光光束光斑质量诊断技术是现代激光制造技术应用过程中不可或缺的重要手段,严格意义上讲,应该有效地遵循国家标准的相关规定统一而有效地进行。本文以历年来颁布的推荐性国家标准、机械行业标准和国家标准为依据,以光束束宽和束散角为重点,探讨了光束光斑质量诊断技术的方法及其标准化进展。通过对比两种不同的光束束宽定义方法,指出在工业制造应用背景下,以包含光束功率(或能量)百分比定义的光束束宽更符合实际工程应用的需求,基于空心探针原理的测量方法以其不需要衰减,符合实测目的,在 2009 年补充进入推荐性国家标准关于光束质量的测量方法中。我国激光制造技术领域的标准化工作

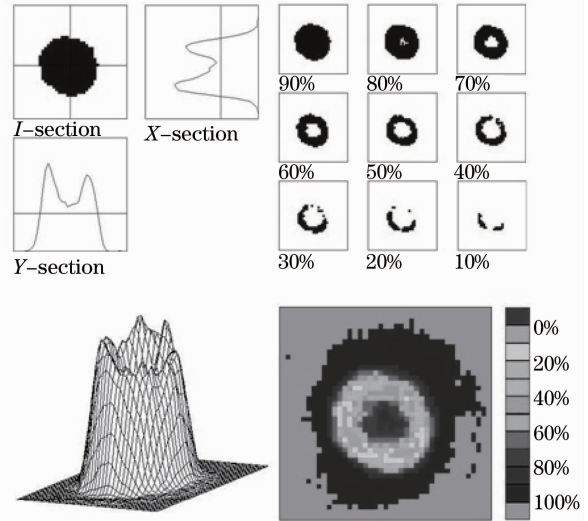


图2 Trumpf 6000W CO<sub>2</sub> 激光器的光束横截面功率密度分布图

Fig.2 Trumpf 6000W CO<sub>2</sub> laser beam cross section power density distribution diagram

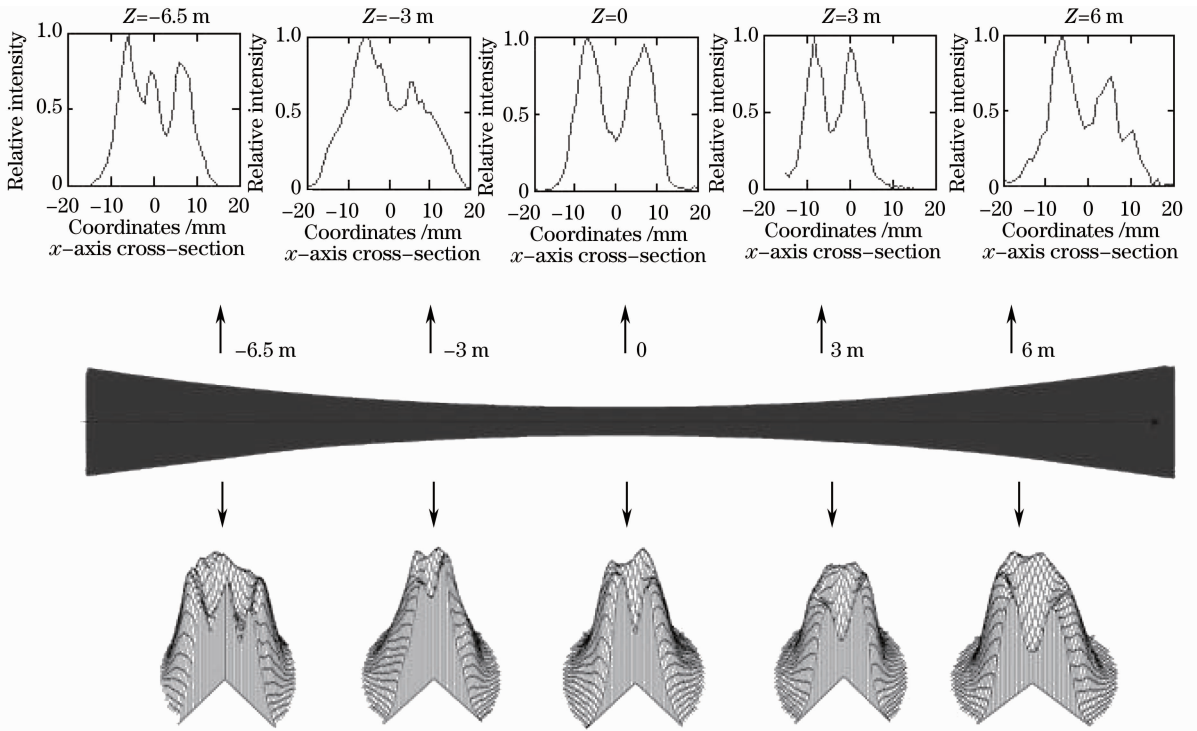


图3 UFF100 测量仪测得的 6000W CO<sub>2</sub> 激光器光束传播变化图

Fig. 3 6000W CO<sub>2</sub> laser beam propagation variation diagram measured by UFF100

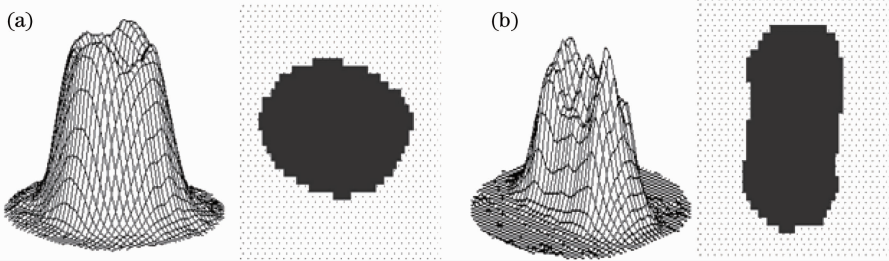


图4 采用积分镜前后的横截面的功率密度分布图。(a)原始光束强度分布;(b)积分后光斑强度分布

Fig. 4 Power density distribution diagram before (a) and after (b) adopting integrating mirror

已经逐渐得到重视并呈现快速发展的趋势,从基础术语和定义出发,积极跟踪国际标准和国外先进标准,为推动激光制造领域的发展奠定良好的基础。

### 参 考 文 献

- 1 GB/T 13740-1992, Testing Method of Divergence Angle of Laser Radiation[S]  
GB/T 13740-1992, 激光辐射发散角测试方法[S]
- 2 GB/T 13741-1992, Testing Method of Beam Diameter of Laser Radiation[S]  
GB/T 13741-1992, 激光辐射光束直径测试方法[S]
- 3 ISO11145, Optics and Optical Instruments-Lasers and Laser-Related Equipment-Vocabulary and Symbols. [S]. 2006
- 4 IEC60825-1; Safety of Laser Products-Part 1; Equipments classification and requirements[S]. 2007
- 5 JB/T 9490-1999, Measuring Method of Major Parameter for CO<sub>2</sub> Lasers[S]  
JB/T 9490-1999, 二氧化碳激光器主要参数测试方法[S]
- 6 GJB 5441-2005, Measuring Method for Solid-State Lasers[S]  
GJB 5441-2005, 固体激光器测试方法[S]
- 7 Lei Hong. Research on High Power Laser Beam and Focus Transverse Intensity Distribution Measuring Technology[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003  
雷 甸. 大功率激光光束光斑质量测量技术的研究[D]. 北京; 北京工业大学, 2003

- 8 GB/T24664-2009, Evaluation and Measurement Methods for Beam Quality of High Power Laser System for Manufacturing [S].  
GB/T24664-2009, 工业用大功率激光器光束质量测试评定方法[S]
- 9 GB/T 15313-2008, Terminology for Laser[S].  
GB/T 15313-2008, 激光术语[S]
- 10 Wang Zhiyong. High-Power CO<sub>2</sub> Laser Beams Propagation & Focus and Its Influence Upon Laser Processing Quality[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 1997  
王智勇. 大功率 CO<sub>2</sub> 激光光束传输与聚焦及其对加工质量的影响[D]. 北京: 北京工业大学, 1997