

高功率激光束近地面大气传输研究

郭振华 辜建辉 许德胜

(华中理工大学, 武汉)

摘要: 本文报导连续波高功率CO₂激光束的近地面大气传输特性研究, 激光功率为3kW~5kW, 传输距离为77m~107m, 获得了由于光束畸变和大气影响引起的接收光斑变化图样。

Study on the propagation of high-power laser beam in the atmosphere

Guo Zhenhua, Gu Jianhui, Xu Deshen

(Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: The propagation of high-power CW CO₂ laser beam in near-ground atmosphere is described in this paper. The laser power is from 3 to 5 kilowatts and the measured propagation distance is from 77 to 107 meters. The laser beam patterns influenced by atmosphere and the distortion patterns of the beam itself has been obtained.

一、引 言

激光束的传输特性研究开始是基于探测和信息技术的开发提出来的, 其中的某些技术目前已经相当成熟, 例如激光测距和激光制导。将激光作为军用武器研制, 美、苏等国从60、70年代就开始了, 随着1983年3月美国战略防御计划的提出, 激光就正式成为候选武器之一, 高能激光束的传输特性研究也就作为重要课题之一得到了更加广泛和深入的研究, 特别是1985年在美国白沙靶场的MIRACLE试验成功^[1], 更加使人们认识到激光战略武器已经不是遥远的将来了。

在地基激光武器系统中, 激光束通过大气时与大气中的分子、气溶胶粒子等发生相互作用, 从而产生线性和非线性效应。其中线性效应主要有: 大气中的气体分子和大气气溶胶粒子的吸收、散射导致的辐射能量损失; 大气湍流导致激光束的扩展与漂移, 以及相干变化。非线性效应主要是大气非线性热畸变效应(热晕)和受激喇曼散射。非线性效应只有在传输的激光功率密度较高时才表现出来。

目前国内尚未见到关于连续波强激光大气传输的研究报导。我们进行的高功率激光束传输特性研究, 其目的在于观测近地面大气对高功率激光束的传输特性的影响, 这对于激光在军事和民用方面的实际应用有重要意义, 特别是它可发展成为战术武器。

二、实验研究

1. 实验装置及环境条件

实验装置及环境的示意图如图1。使用10kW级CW CO₂激光器，非稳腔侧向输出，近场光斑为不均匀环形光斑。实验时激光功率为1kW~5kW可调。

实验时的室外环境为一片开阔地，地面起伏不平，杂草丛生，附近有树林、池塘、垃圾处理场、公路干线等，激光通光光路离地面的高度为0.5m~1.8m不等。因此，这种环境条件下的大气与某些地面战场上的大气条件比较接近。实验之前我们在这种较为复杂的地面开辟了一条光通道，在附近设置了安全标志，制定了可靠的操作规程，实验时使用有效的通信联络手段，对场地周围实施全方位监视，确保了人员和环境的安全。在光通道上离激光发射

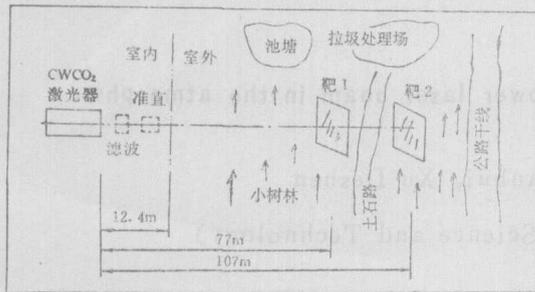


图1 实验装置布置示意图



图2 近场光斑

窗口77m和107m处分别设置接收靶标，其中到达107m处接收靶标的光路要跨过一条汽车通过的土石路。光束在室内空气中传输的距离为12.4m。

2. 高功率激光束的传输特性

将万瓦级CO₂激光器输出的光束发射到远方后用厚度4mm、面积1m²的压制箱板接收，通过分析接收板上的光斑烧样来判别激光束经过大气传输以后能量空间分布、方向性等特性的变化情况。激光束的近场光斑如图2所示，内外环的直径分别约25mm和40mm，其强度分布不均匀，且随输出功率变化。圆环的底部最强，右上角次之，其余部分就相对更弱些。

我们在12m, 20m, 77m, 100m以外分别进行了观测，现将于77m和107m处接收到的远场光斑烧样分别示于图3、图4。现场观察到的基本现象是激光作用2s~3s后硬纸板上开始发黑，4s~5s后开始冒出浓烟，并局部着明火（图5），火苗越来越大，烧蚀越来越深，这时周围光强较弱的部分也开始在压制箱板上显露出来，呈零星分布的小点，但达不到着明火的程度，其中一次的气象条件是晴天，下午3点半钟开始实验，气温25℃，微风。在小雨和其它气象条件下也做过多次。

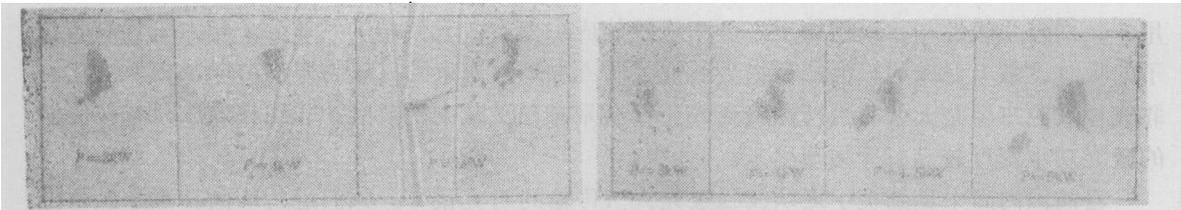


图3 接收距离为77m时不同激光功率的烧蚀花样

图4 接收距离为107m时不同激光功率的烧蚀花样



图5 强激光在野外远距离引起靶标着火

由实验得到的结果看, 未经准直的激光束经过大气传输一段距离后, 光斑形状变化较大, 已经看不出近场的那种环形分布。在图3所示情况下, 激光功率为3kW时, 光斑的中心部分功率密度很大, 大部分的激光能量主要集中在30mm×70mm的区域; 当激光功率升到4kW时, 光斑的总体尺寸变化不大, 但其光强度的空间分布却出现了明显的变化, 光斑由4个较强的光点连成一片组成, 这种分布可以从光斑烧样的形成过程清楚地分辨出来, 开始是分立的4个点同时发黑、冒烟, 随着时间的积累, 发黑面积不断扩展, 最后着火连成一片; 当激光功率为5kW时, 光斑分布变化更大, 成为散开分布的不规则形状, 从激光作用的时间和烧蚀程度来看, 此时局部的激光功率密度比4kW时还要低, 这是由于激光器输出镜的热畸变在近处产生聚焦效应, 使得远场光束发散角很大且不规则, 激光功率在大气中的传输和衰减也更为复杂化了。

接收靶标位于107m处时(图4), 激光功率分别为3kW、4kW、4.5kW和5kW, 得到了与图3所示结果基本相似的趋势, 只是这时光强度明显减弱, 光斑有更明显的发散。为了得到比较明显的光斑烧样: 距离拉长后我们将激光作用时间延长到10s左右。

3. 实验结果分析

对于图3、图4所示激光束通过大气传输之后引起的变化, 经过分析初步认为可能由以下几种因素引起。

(1) 实验所用的激光束本身具有一定的不均匀性和较大的光束发散角, 通过大气传输之后, 边缘较弱的部分就因大气的吸收和散射而在接收靶上短时间显示不出来, 只有功率密度较高的部分才能很快在靶上烧出图样来, 但其强度比近场时减弱较多。因而即使对于10.6μm远红外光, 大气的吸收和散射造成的能量衰减也是重要因素。

(2) 根据已有的研究资料, 大气的折射率 n 可以用下式表示:

$$n \approx 1 + 77.6 \times (1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) (P/T) \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中, λ 为光波长, P 为大气压力, T 为大气温度。

大气的温度、湿度和压力在小范围和短时间内是随机变化的, (1)式中略去了湿度的影响, 因为它仅占0.5%~1.0%。所以大气折射率主要随温度随机变化, 使得通过大气传输的激光束产生一系列畸变效应。另外根据前面介绍的实验环境条件, 引起激光传输路径上的大气参数随机变化的外界扰动因素还较多如垃圾场垃圾燃烧、公路上车辆来往及周围树木摇动等。由于所做的是强激光近地面的大气传输, 而地面的湍流强度比高空要强得多。湍流效应能引起光束扩展、光斑抖动和相干性退化。在通常情况下, 湍流扩展比衍射极限大2~3个数量级, 使光束质量严重下降, 也造成通过大气传输的激光强度大大降低。目前国外较普遍的是用相干光学自适应技术对光束扩展和光斑抖动所造成的光束畸变进行补偿。对强激光我们尚未做到这一步。

(3)湍流效应是由于大气的固有因素影响出现的。另外一种效应就是强激光通过大气时,大气中的分子以及气溶胶粒子吸收激光辐射能量而导致自身加热,从而改变了光路上大气的折射率,这种大气和激光的非线性相互作用所造成的光束扩展、畸变就是热晕。根据J.L.Walsh等人的研究^[3],连续光波在理想气体中传播时,产生热晕的阈值激光功率 P_{th} 可用下式表示:

$$P_{th} = 0.1v/\alpha a \quad (2)$$

式中, v 为垂直于光束传输方向的流体速度, α 为大气对光波的吸收系数, a 为光束的横向特征长度,这里 P_{th} 是传播激光束的总功率。选取适当值代入,一般可得到 $10.6\mu\text{m}$ 激光产生热晕的阈值激光功率是 10^3W 量级。

我们实验中使用的激光功率已经达到热晕的阈值激光功率。将图3、图4与图2进行比较可知,虽然激光束通过大气传输后都发生了畸变,但随功率的升高畸变越来越厉害,畸变的形式也不一样,但同一激光功率在不同距离处的畸变形式基本相似。可以看出大气热晕效应使激光束发生了明显的畸变。

实验测量时,激光束停止发射后,用手可以明显地感觉到光路中的空气很热,空气的温度升高约 $2^\circ\text{C}\sim 3^\circ\text{C}$,可见在整个100多米长的光路上空气因吸收激光能量而被加热了。因此,大气吸收也是激光功率损耗的一个很重要方面,并且由此而产生的热晕效应直接引起激光束扩展和畸变,严重影响传输效果。同其它波长的激光相比,尽管 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光是大气传输的理想窗口,但是对于高功率激光束的传输,大气的吸收仍是一个不容忽视的因素。

关于激光对大气的加热,据报导^[3],1989年苏联库尔恰托夫研究所利用电子束泵浦的 CO_2 激光器的光束可在大气中烧出一个通道来,其激光功率为 1MW ,光束直径为 $13\text{cm}\sim 20\text{cm}$,这种激光器的输出功率使它进入了高能激光武器的范畴,同时这种预先用激光束在大气中烧出的通道,可以用来传输其它激光束,它为激光通过大气的传输提供了另外一种新的技术和途径。

三、结论及讨论

从实验观察和结果分析来看,强激光的近地面大气传输因大气分子的吸收使激光功率损耗较大,大气湍流效应和非线性热晕效应引起的光束扩展与畸变是严重影响高功率激光束大气传输的重要因素。尽管我们用以上大气效应对实验结果进行了一些初步的解释,但强激光大气传输的详细机理和效应有待更进一步研究。

这次在国内首次实现了千瓦级连续波高功率激光束的大气传输,取得了宝贵的第一手材料,为强激光的远场打靶及破坏机理研究打下了实验基础。为了得到更理想的传输效果,必须进一步改善光束质量、改进激光发射装置、完善光斑接收和相应的测试手段。

参 考 文 献

- [1] 吴健, 王俊波, 胡志平等(译)。高能激光非线性传播。成都: 成都电讯工程学院, 1986
- [2] Strohbehn J W edit. Laser beam propagation in the atmosphere. New York; Springer-Verlag, 1982
- [3] Laser & Optonics, 1989; 8(10); 19