

# 直流激励轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器非正常放电研究

司立众

(南京工程高等职业学校电子工程系, 江苏 南京 211135)

**摘要** 以 NEL-A 系列直流激励轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器为例, 研究谐振腔非正常放电问题。通过化学实验的方法验证了谐振腔内主要腐蚀物为碱式碳酸铜, 运用物理和化学理论分析了腔内碱式碳酸铜的成因及其影响谐振腔放电的微观机理。实验结果证明, 腔内主要腐蚀物碱式碳酸铜是造成激光器谐振腔湍流放电功率下降的主要原因。该结论可作为直流激励轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔和气体单元改进设计的参考, 同时也为设备现场维护提供了一条新的途径。

**关键词** 激光技术; CO<sub>2</sub> 激光器; 腐蚀; 碱式碳酸铜; 湍流放电

**中图分类号** TN244; TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.021403

## Research on Abnormal Discharge of DC Excitation Fast-Flow Axis CO<sub>2</sub> Laser

Si Lizhong

(Electronic Engineering Department, Nanjing Engineering Vocational College, Nanjing, Jiangsu 211135, China)

**Abstract** Abnormal discharge of laser resonator is studied by using the NEL-A series high-power fast-flow axis CO<sub>2</sub> laser. By chemical experiment, it is verified that the main corrosion of laser resonator is the basic carbonate copper. Based on physics and chemistry theory, the causes of basic carbonate copper and the micro-mechanism of abnormal discharge of laser resonator are analyzed. The testing results show that the basic carbonate copper is the main reason of abnormal discharge. The conclusion can be used as a reference to improve the design of laser resonator and gas supply unit. At the same time, it provides a new way for equipment maintenance on the spot.

**Key words** laser technique; CO<sub>2</sub> laser; corrosion; basic carbonate copper; turbulent discharge

**OCIS codes** 140.3425; 140.3450; 140.3470

### 1 引言

自 1960 年激光器问世以来, 激光技术已在多个领域获得了成功的应用, 如激光切割技术已成为激光加工领域最成功的应用技术之一。就目前的大功率激光切割应用市场而言, 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光发生器仍然是主流产品, 如德国 Trumpf 公司、北美 CP 公司、瑞士 Bystronic 公司、日本 FUNAC 公司、日本三菱公司、美国 PRC 公司以及国内的南京东方、深圳大族等均以轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器供应市场<sup>[1]</sup>。

南京东方激光有限公司于 1993 年从德国 Rofin-Sinar 公司引进 1500 W 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器制造技术, 形成了以 NEL-A 激光器代表的轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器产品。与国外激光器相比, 国产轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器存在着输出功率低、功率稳定性差等缺点<sup>[2]</sup>。为此, 本文对这类轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器放电问题进行了研究, 在排除了漏气等干扰因素之后, 找出了导致其输出功率低、功率稳定性差的一个主要原因, 即碱式碳酸铜的腐蚀。这一结果将有助于轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔和气体单元的改进设计。

### 2 谐振腔结构

图 1 所示为 NEL-A 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器谐振腔结构示意图, 这类激光器 1000 W 以上的机型均为单折叠腔结构, 均采用铜作为电极基座材料, 在后端板折反镜处的通孔内嵌铜套。2 kW 的机型共有 8 根放电管, 采

收稿日期: 2011-08-10; 收到修改稿日期: 2011-09-25; 网络出版日期: 2011-11-28

基金项目: 江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(2010-GZ-003)资助课题。

作者简介: 司立众(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事激光技术与自动化技术等方面的研究。

E-mail: threeman1968@163.com

用阳极接地、负高压直流激励的放电方式工作,高速流动的工作气体从阳极流进,从阴极流出;放电管分上下两路,输出窗在上路放电管前端板处,全反镜在下路放电管前端板处,此两处是两个阳极,是高速气流的盲道;在后端板处是两块折反镜,上下两路放电管在此处也是阳极,但不是盲道,可以通过后端板角块内通道连接;在上下放电管中部各有两个阳极,它们通过以铜为基材的中夹板相连,由于固定中夹板的支架是绝缘的,故要另加导线连接到阳极地。因为阴极是高压,所以均用绝缘树脂板固定。

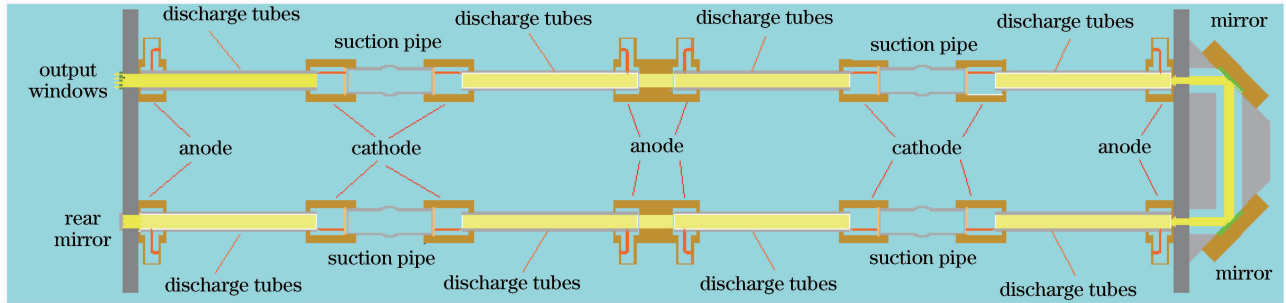


图1 NEL-A 激光器谐振腔结构示意图

Fig.1 Resonator structure of NEL-A series laser

### 3 谐振腔异常放电与腔内腐蚀成因分析

#### 3.1 异常放电

轴快流  $\text{CO}_2$  激光器放电,其主要的发光区是正柱区<sup>[3]</sup>。正常放电时它呈现明亮的紫红色,光色均匀,无明显的丝状或湍流。对于 NEL-A 系列轴快流  $\text{CO}_2$  激光器,在工作一段时间之后一般会发现它的放电出现丝状或湍流现象。其中丝状放电是由于流量计工作异常或漏气而致  $\text{He}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  比例失调引起的,而湍流放电(湍流放电必有丝状放电伴随,而丝状放电则不一定有湍流放电伴随)除腔结构本身的原因外,主要是由于腔内腐蚀所致,也是致使谐振腔非正常放电的主要原因。NEL-A 系列轴快流  $\text{CO}_2$  激光器中的湍流放电现象主要发生在阳极,具体表现为阳极附近铜质材料内表面也有放电,这样的放电呈现多阳极特点,即铜质材料内表面受腐蚀点位都可能放电,而且由于放电面积大且不稳定,于是便表现为湍流放电。对于轴快流  $\text{CO}_2$  激光器,虽然需要气流呈现湍流流动,这样利于保持气体放电的空间均匀性<sup>[4~6]</sup>,但不需要放电也呈现湍流状,这是明显的空间放电不均匀的表现,会导致激光器输出功率的明显下降,严重时会使激光器不能正常使用。

#### 3.2 碱式碳酸铜的形成过程

图 2(a)为后端板上折反镜处铜套腐蚀情况,图 2(b)为中部阳极座铜质固定夹板腐蚀情况,图 2(c)为阳极座腐蚀情况。从图 2 可以看到,在这些铜质材料的内表面或多或少地都附着一层绿色的絮状物,通过化学分析知其主要成分为碱式碳酸铜。在对谐振腔的拆解过程中,发现在阴极附近不存在这样的腐蚀,因此,下面主要分析阳极附近的碱式碳酸铜是如何形成的。

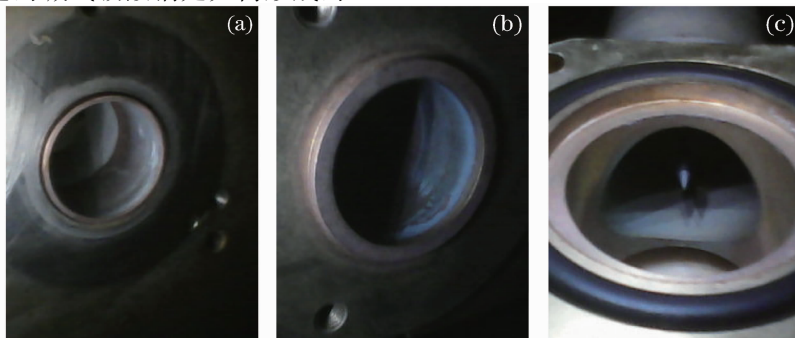
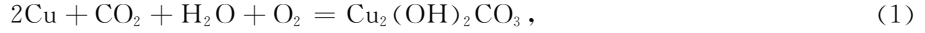


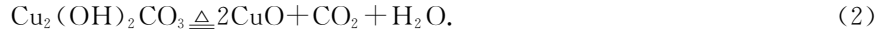
图2 阳极附近铜质材料内表面腐蚀情况

Fig.2 Corrosion about the inner surface of the copper material near the anode

碱式碳酸铜是铜与空气中的氧气、二氧化碳和水蒸气发生化学反应所产生的物质,又称铜锈,颜色翠绿。其生成的化学方程式为



碱式碳酸铜按  $\text{CuO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$  物质的量比值的不同存在十几种形式的化合物,其分子式也可写为  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ,分解温度为  $200\text{ }^\circ\text{C} \sim 220\text{ }^\circ\text{C}$ ,在空气中加热会分解为氧化铜、二氧化碳和水。其分解化学方程式为



由(1)式知,生成碱式碳酸铜所必须的物质有铜、二氧化碳、水和氧气<sup>[7]</sup>。在 NEL-A 系列轴快流  $\text{CO}_2$  激光器中,阴极基座、阳极基座等附件是用铜材加工而成的,另外激光器的工作气体中含有二氧化碳,水主要来源于工作气体,因为国内厂商提供的气体含水量大多数都偏高,氧气主要来源于二氧化碳的电离<sup>[8]</sup>(电离的主要产物之一是氧原子,它的氧化性比氧气分子还强),



这样就具备了生成碱式碳酸铜的物质条件。当然水和氧的另一来源是谐振腔漏气。

由于碱式碳酸铜的生成在常温下就能进行,而激光器阳极是经过冷却的放电电流流进的电极,附近温度较低,所以在阳极附近的铜基材表面就生成了碱式碳酸铜。当然,在激光器放电管放电时,由于高压电场的作用,在阳极附近的铜容易失去电子,而混在气体中的氧是各种原子、分子( $\text{CO}_2, \text{CO}, \text{N}_2, \text{He}$ )中得电子能力最强的粒子,于是得电子并带负电的氧离子在电场作用下向阳极运动,在阳极附近与水、二氧化碳和失去电子的铜离子结合,生成了碱式碳酸铜,这其中高压电场便成了碱式碳酸铜生成的一个催化条件。在阴极,由于放电形成的带负电的氧离子会远离阴极向阳极运动,同时阴极的铜基材不会失去电子,再由于阴极是高温放电气流流出的电极,所以温度偏高,较难具备碱式碳酸铜的生成条件,因而阴极基材表面没有碱式碳酸铜生成。

### 3.3 碱式碳酸铜对激光器正常放电的影响分析

碱式碳酸铜很容易分解。在高电压、强电场的作用下,它会失去电子,这些电子经过金属导体并在电源的作用下向阳极流动,而由于失去电子,碱式碳酸铜的结构也变得不稳定,于是便会分裂形成铜离子、二氧化碳分子、水分子和氧原子、氧分子以及它们的正离子等。当然铜离子会附着在基材表面,但二氧化碳分子、水分子和氧原子、氧分子以及它们的正离子等会游离到工作气体中,它们不带电或带正电,在电场的作用下会向阴极运动,并在此过程中吸收电子而变成阴离子或中性粒子。这个过程很快,大部分发生在离开阳极铜基材表面  $5 \sim 10\text{ mm}$  的空间,这样这些阴离子在高压电场的作用下又回到阳极铜基材表面,二氧化碳分子、水分子形成的阴离子在这里又失去电子变成分子,并与阴性氧离子和阳性铜离子结合重新生成碱式碳酸铜。这一过程循环往复,就可看到湍流放电。湍流放电对激光器的显著影响是造成放电管局部放电抖动、紊乱,当电流进一步加大时会形成全部放电管放电抖动、紊乱,最终导致输出功率大幅下降,直至不能正常工作。

### 3.4 湍流放电的形成

碱式碳酸铜的密度为  $3.85 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ ,分子量约为 221,若有 221 g 碱式碳酸铜按(2)式分解,则将生成 44 g  $\text{CO}_2$  和 18 g  $\text{H}_2\text{O}$ ,即 1 mol  $\text{CO}_2$  和 1 mol  $\text{H}_2\text{O}$ 。由于谐振腔中气体纯度很高,几乎不含水,且腔压低(约为  $1 \times 10^4\text{ Pa}$ ),所以生成的水必然气化,则 221 g 碱式碳酸铜在谐振腔中分解后能产生 2 mol 的气体。设这部分气体在标准状况下所占空间体积为  $V_2$ ,在谐振腔内所占体积为  $V_3$ ,参与反应的碱式碳酸铜的体积为  $V_1$ ,则有

$$\begin{cases} V_1 = (221\text{g} \div 1000) \div (3.85 \times 10^3\text{ kg/m}^3) = 5.74 \times 10^{-5}\text{ m}^3, \\ V_2 = 2\text{ mol} \times 22.4 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{mol} = 4.48 \times 10^{-2}\text{ m}^3, \\ V_3 = V_2 \times P_a \div P_c \approx 4.48 \times 10^{-1}\text{ m}^3, \end{cases} \quad (4)$$

式中  $P_a$  和  $P_c$  分别为大气压和谐振腔内气压。由此可得

$$V_3 \div V_1 = (4.48 \times 10^{-1}\text{ m}^3) \div (5.74 \times 10^{-5}\text{ m}^3) \approx 7805. \quad (5)$$

可见,在谐振腔中由于碱式碳酸铜的分解而产生的气体体积约为原碱式碳酸铜体积的 7805 倍;即由于强电场作用而使碱式碳酸铜电离并进一步分解出来的气体呈爆炸波状向谐振腔内的工作气体中迅速扩散。这一部分气体中也含有带电粒子,参与谐振腔的放电过程,但由于其分解爆炸的瞬间难以获得满足  $\text{CO}_2$  激光器

平稳放电所需的合适的气体配比和气体纯度,所以,它的放电并不稳定,并且在碱式碳酸铜分解爆炸瞬间体积急速膨胀,于是便呈现出紊乱的湍流状放电。

由分析可知,碱式碳酸铜爆炸分解出来的气体,在工作气体中会因捕获电子而带负电,在电场的作用下又会回到阳极,与铜或氧化铜化合,重新生成碱式碳酸铜。在这一过程中,以气态存在的二氧化碳和水等物质因碱式碳酸铜的生成而减少或消失,其体积变化倍数是其分解时倍数的倒数,因此在碱式碳酸铜的生成过程中必然也伴有阳极附近工作气体的急剧内缩过程,从宏观上看也是一种紊乱的湍流状放电。

(2)式的分解过程是在没有考虑强电场作用的纯化学分解过程,如果考虑强电场作用时,还会有氧气生成,则其生成的气体的体积将更大,这样湍流放电现象也会更显著。

## 4 对比实验

湍流放电与因气体比例失调或漏气而导致的丝状放电相比,在阳极附近有明显的湍流。从维修的角度考虑,因气体比例失调或漏气而导致的丝状放电可以通过重调气体比例和检漏来解决,较为容易。而因电极腐蚀所致的湍流放电,则必须通过电极清洗来解决,这样就需要对谐振腔进行解体与重新装调。这一修复过程的技术难度高,一般需要安排大修。为了验证碱式碳酸铜对谐振腔放电的影响,选择了一台在用的 NEL-2000 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器,在 2009 年 10 月初对这台激光器进行了谐振腔清洁、准直、选模和气体配比较正等维护工作,并更换了新镜片,保存了当时模式,记录功率最大值约为 2090 W,作为设备开始实验时的初始情况。

### 4.1 清洁前设备工作情况采样

2011 年 1 月,该设备的最大功率只能达到 1300 W,当放电电流达 40 mA 时阳极附近就有明显的湍流放电现象,进行模式调节没有改观,当进一步增大电流时,会出现整个放电管放电抖动、紊乱,功率上升很慢,甚至下降,直至不能正常工作。经 24 h 漏率检测,平均每小时漏率约为 300 Pa,不会影响放电。检查流量计,气体配比符合要求,并对不同电流时的激光器输出功率和放电管放电情况进行了记录,如表 1 所示。

表 1 清洁前后谐振腔放电与输出功率表

Table 1 Discharge conditions and output power of laser resonator before and after cleaning

Discharge		Before cleaning		After cleaning	
current /mA	Power /W	Discharge conditions		Power /W	Discharge conditions
20	560	Stable		540	Stable
30	880	Stable		890	Stable
40	1150	Turbulent discharge		1190	Stable
50	1250	Turbulent discharge, disordered obviously		1455	Stable
60	1310	Turbulent discharge, disordered seriously		1690	Stable
70	1150~1280	Not working normally		1885	Slight filiform discharge, no turbulent discharge
80	1000~1200	Not working normally		2060	Filiform discharge, no turbulent discharge

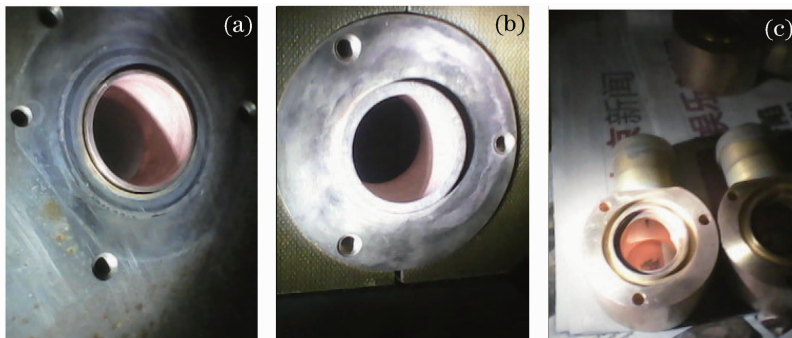


图 3 清洁后的阳极附近铜质材料内表面

Fig. 3 Inner surface of the copper material near the anode after cleaning

## 4.2 清洁情况与对比条件保证

2011年2月,对这台设备进行了电极清洁工作。主要拆卸了阳极(为了便于拆卸阳极,也拆卸了几个阴极),为保证电极位置不变,维持了中部4个阳极和8个阴极的固定支架的位置,并记录了各个电极的相对位置,拆下阳极后对阳极及其附近铜基材表面的碱式碳酸铜腐蚀检视情况如图2所示。对拆下的阳极进行了清洁,并对不能拆下的阳极附近腔内铜基材表面也进行了清洁。如图3所示,清洁后的阳极座及其附近铜基材的内表面露出了亮红色的光泽。

为使实验具有可比性,保持了原有的气体配比,没有对谐振腔进行重新准直,也未更换镜片,只是对镜片进行了清洁。在谐振腔重新装配完毕后,检测了24 h漏率,结果约为320 Pa/h,各项指标与清洁前基本一致。

## 4.3 清洁后设备工作情况采样

清洁后,当放电电流达到最大值80 mA时,放电管放电有轻微拉丝现象,但不是湍流放电;当电流降到70 mA时,放电拉丝现象消失。进行模式微调后,最大功率能达到2060 W,经模式比对,与2009年10月的模式相似。表1为清洁前后不同放电电流下的放电情况。从表1可以看出,在清洁后,当电流达到70 mA时才有轻微拉丝现象,当电流达到最大值80 mA时,功率也达到最大,放电过程没有湍流,拉丝较少,能正常工作。

## 5 解决方案探讨

NEL-A系列轴快流CO<sub>2</sub>激光器谐振腔结构与SM-2000系列轴快流CO<sub>2</sub>激光器谐振腔结构相同。在SM-2000系列轴快流CO<sub>2</sub>激光器部分产品中,有用铝代替铜作为电极基座材料的用法,经过多家客户多台设备的运行观察,发现谐振腔放电稳定性并无明显改善。虽然碱式碳酸铜的问题得到了解决,但新的物化反应也在进行,放电稳定性不如铜作为电极基座材料的激光器,选用铝作为电极基座材料对谐振腔放电的正面和负面影响还需进一步分析和研究。当然,也可以进行其他选择,如金属活动顺序表中比铜活动性更弱的金属、非金属、氧化物陶瓷等,但每一种选择都需要有大量的、长期的实验研究作支撑。在现有的技术基础上,仍可认为阳极基座材料用铜是一个理想的选择,只是在激光器的设计上应做一些改进。

由分析可知,水的存在是生成碱式碳酸铜的必要条件,于是首先可以通过选用纯度高而含水量低的气体来降低碱式碳酸铜的生成速度,进而减少设备非正常放电工作的几率;其次可以增加气体单元的吸湿干燥功能,降低工作气体的含水量;再次,可以对气体单元进行改进,把气体单元的整体工作气压稳定保持在标准大气压的1.1倍以上,这样,向谐振腔内漏气的可能漏点数就减少了,进而也减少了由于漏气而带入的水份。根据设备正常工作允许漏率与谐振腔允许换气速度计算,漏入气体所占谐振腔分压比小于1%,所以工作气体的含水量及其处理过程是工作的重点。

## 6 结 论

采用铜基材作为阳极基座材料的直流激励轴快流CO<sub>2</sub>激光器,阳极附近铜基材内表面以碱式碳酸铜为主的腐蚀物是导致谐振腔非正常放电的主要原因,它对激光器放电的影响主要表现为湍流放电、输出功率下降、工作不稳等现象。在生产制造环节,应考虑谐振腔的防腐能力,为此在气体单元部分应加强对工作气体的干燥处理能力,同时也应在腔内部件基材的选择上进行研究,在不产生新的有害腐蚀物的情况下,尽力延缓或杜绝碱式碳酸铜的形成;在维护上,应把定期检查或更换干燥剂纳入设备日常维护和保养的范围,当谐振腔出现湍流放电、功率下降严重时,应首先考虑碱式碳酸铜的影响,必要时清洗谐振腔。

## 参 考 文 献

- 1 Deng Honglin. The technology, market and industry of the high power CO<sub>2</sub> NC laser cutting machine of China[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(7): 66~71
- 2 邓鸿林. 我国大功率CO<sub>2</sub>激光数控切割机技术、市场及产业[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(7): 66~71
- 3 Zuo Duluo, Li Shimin. Review of fast axial flow CO<sub>2</sub> laser[J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(1): 4~8

- 左都罗,李适民. 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器评述[J]. 激光技术, 2000, **24**(1): 4~8
- 3 Li Bo. Study on Stable High-Effective Discharge of High Power Fast Axial Flow CO<sub>2</sub> Laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010
- 李 波. 高功率快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器高效稳定放电方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010
- 4 Lü Xinbin, LI Yutian. Simulation of turbulence genetator in fast axial flow CO<sub>2</sub> laser[J]. *Computer Simulation*, 2009, **26**(7): 286~289
- 吕新宾,李雨田. 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器湍流发生器的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2009, **26**(7): 286~289
- 5 Qing Li, Youqing Wang. Kinetic modeling of a high power fast-axial-flow CO<sub>2</sub> laser with computational fluid dynamics method [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(7): 513~516
- 6 Hongyan Huang, Youqing Wang. Computational fluid dynamic modeling of gas flow characteristics of the high-power CW CO<sub>2</sub> laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(1): 011401
- 7 Zou Jiqiang, Zhang Lihua. Examination of corrosion failure of crude benzene reaction heat exchanger in ethylene plant[J]. *Corrosion & Protection in Petrochemical Industry*, 2009, **26**(4): 60~64
- 邹积强,张丽华. 乙烯装置粗苯反应换热器腐蚀失效检测分析[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2009, **26**(4): 60~64
- 8 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Chourong *et al.*. Principles of Laser[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009. 285
- 周炳琨,高以智,陈倜嵘 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. 285