
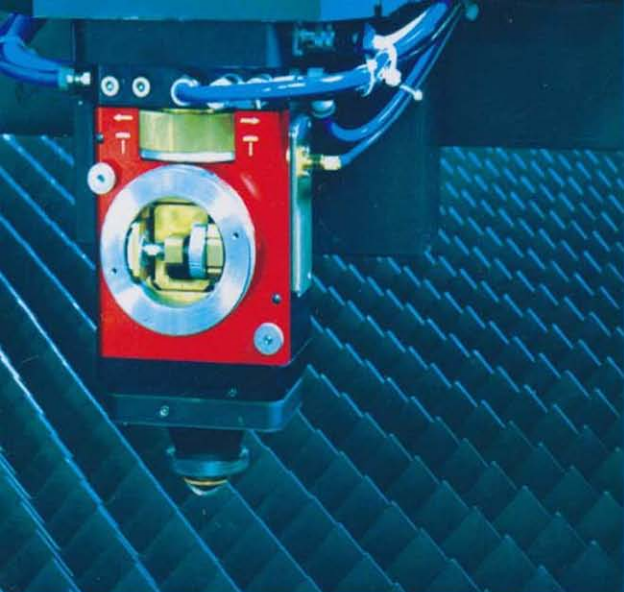


中国光谷高新技术丛书



# 高功率

# 激光切割设备与工艺

HIGH POWER LASER CUTTING  
EQUIPMENT AND TECHNOLOGY

◎吴让大 主编

湖北科学技术出版社

中国光谷高新技术丛书

# 高功率激光切割设备与工艺

主 编 吴让大  
副主编 王中林 杨 晟  
参 编 冷长荣 蔡艳平 蔡卫刚 张 晶  
[意]Martino Burlamacchi 丁 琼  
屈清娟 李 丹

湖北科学技术出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

高功率激光切割设备与工艺/吴让大主编. —武汉:  
湖北科学技术出版社, 2010. 8  
(中国光谷高新技术丛书)  
ISBN 978-7-5352-4533-5

I. ①高… II. ①吴… III. ①大功率激光器-激光切割-切割设备  
②大功率激光器-激光切割-生产工艺  
IV. ①TG485

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 145381 号

责任编辑:李海宁  
责任校对:邓 冰  
封面设计:喻 杨

出版发行:湖北科学技术出版社  
地 址:武汉市雄楚大街 268 号  
(湖北出版文化城 B 座 12-13 层)  
网 址:<http://www.hbstp.com.cn>  
电话:027-87679468  
邮编:430070

印 刷:湖北睿智印务有限公司  
邮 编:430011

787×1092  
2010 年 8 月第 1 版  
1/16  
2010 年 8 月第 1 次印刷  
13.25 印张  
268 千字  
定价:26.00 元

本书如有印装质量问题 可找本社市场部更换

## 内 容 提 要

本书是一本非常具有针对性,实用性的书籍。全书共分6章,全面系统地介绍了轴快流CO<sub>2</sub>激光发生器原理,平面激光切割机结构及原理,激光切割机操作与编程,自动编程套料软件,激光切割工艺方法,三维激光切割技术,用于切割的其他激光发生器以及激光切割机的工业应用等。

# 序

激光加工技术的发展和在我国已经形成了独立的产业领域,极大地推动了激光产业和上下游产业的迅猛发展。高功率激光加工技术是融合了激光光学、电子、机械、工艺和材料等学科的复合型先进制造技术。它与现代数控技术相结合构成的高效自动化加工设备,可以突破许多传统制造方法无法实现的技术瓶颈,在能源、交通运输、钢铁冶金、船舶与汽车制造、电子电气工业和航空航天等国民经济支柱产业发挥了不可替代的作用。

目前,高功率激光切割设备在我国汽车、船舶、机械制造、航空、航天、钢铁和能源设备等领域得到广泛应用。在这些装备中,有早期从欧美发达国家引进最新的高端技术产品,到目前国内大量不断进步及完善自主创新设备。纵观目前市场上涉及到激光原理、激光技术及应用的相关书籍较多,而真正系统介绍激光切割设备与加工工艺的书籍还不多见。随着高功率激光加工设备应用的不断普及,越来越多的人士希望得到有关这方面的应用技术知识和最新的信息。

本书具有技术的先进性:本书具体介绍了欧美最新的激光切割制造技术及加工工艺,以国际知名激光企业意大利 El. En(艾伦)集团为例,对迄今为止国际上最先进的激光切割设备功能进行了重点的阐述,如高速切割设备、智能穿孔技术、新型激光器等。这些内容有助于读者了解国际最新切割技术的进展,也对国内制造厂家提升国产设备的整体性能起到一定的借鉴作用。

本书具有知识的系统性:全书以高功率激光切割设备及加工工艺为主线,全面介绍了适于高功率切割应用的激光发生器的分类及原理;激光切割设备结构及原理;CNC 控制系统及其软件功能,激光切割机操作及编程;自动编程套料软件;切割工艺方法,三维激光切割技术;高功率激光切割工业应用等相关知识,力求使读者对高功率激光切割技术和应用有一个更全面的了解。

本书具有很强的实用性:全书由长期从事激光切割设备设计制造的工程技术人员所组成的团队编写而成,其内容深入浅出,实用性强。如高功率激光切割机的结构配置、各集成单元的工作原理和参数设置、编程操作、切割工艺方法、设备维护保养等方面都进行了详细的阐述。对从事激光切割设备设计制造,使用操作和维护保养的专业工程技术人员具有实际的指导意义。

随着我国激光加工技术的日益普及和应用,越来越多的传统加工方式已逐渐被性能无比优越的激光加工所取代。激光加工已经成为国际上工业制造业的新型加工手段。激光加工显示出无限广阔的市场前景。本书对于加快普及和推广激光加工技术,推动我国激光产业的发

展无疑是有裨益的。我希望无论是从事激光技术和设备的研发制造人员,还是从事设备应用的人士,都来共同关注和推动我国激光加工产业的发展,为努力缩短我国先进制造技术与发达国家之间的距离,提高我国装备制造业水平做出我们的贡献。



中国光学学会激光加工专业委员会主任

2010年8月15日

# 前 言

自 1960 年美国梅曼先生首先研制成功红宝石激光器以来,激光作为一门新颖科学技术发展极快,迄今已渗透到几乎所有的自然科学领域,如激光加工、激光医疗、激光通讯、激光存储、激光印刷、激光光谱、激光分离同位素、激光检测和计量等等。对物理学、化学、生物学、医学、工艺学以及检测技术、通信技术、军事技术等都产生了深刻的影响。

20 世纪 70 年代开始研究的大功率 CO<sub>2</sub> 激光器,在焊接、热处理、切割等领域得到了越来越广泛的应用。大功率激光器 1 000 ~ 4 000W 的基模和低阶模、高光束质量、圆偏振态的激光加工机完善,促进了激光切割技术飞速发展和广泛应用。随着大功率激光器光束质量的不断提高,激光切割的加工对象范围之广,包括了大量的金属和非金属材料。例如,汽车制造业和机械制造业都采用激光切割进行钣金零部件的加工。

激光束被证明为一种优异的切割工具,并有以下几项重要优点:加工中不向工件施加任何外力、热影响区小;对于一定范围厚度的板材能进行高精度和高速度的任意轮廓切割,并具有出色的边口质量和狭窄切口。从现今人们所掌握的各种切割技术来看,激光切割技术无疑是质量最好的一种方法。除了上面所述的特点外,激光切割还具有噪声小、无污染等优点。随着人们环保意识的不断增强,加之激光源制造成本的下降,激光切割技术优势就显得更为突出。利用激光切割技术代替传统加工方法将成为一种必然趋势。

本书由我国知名激光企业——楚天激光集团从事高功率激光切割设备研发的工程技术人员、意大利 Elen 集团研发人员和我国著名高校和研究所教师合作编写。主要内容来源于激光切割设备设计制造企业及工艺生产一线,具有很强的针对性和实用性。本书对从事激光技术领域的科技人员和工程技术人员,以及大专院校激光类的本科生、研究生是一本十分有益的参考书。

鉴于高功率激光切割应用技术方面的专著国内空白,编者借鉴和参考了欧美许多知名激光制造公司已公开的技术资料,结合国内企业的生产实践,作了一些大胆的探索。由于编者水平有限,书中难免还存在缺点和不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

吴让大  
2010 年 8 月 1 日

# 目 录

第 1 章 轴快流二氧化碳激光发生器 .....	( 1 )
1.1 CO <sub>2</sub> 激光原理 .....	( 1 )
1.1.1 CO <sub>2</sub> 激光器的激发机理 .....	( 2 )
1.1.2 轴快流激光器的弛豫过程 .....	( 4 )
1.1.3 工作物质在轴快流激光器中的作用 .....	( 6 )
1.1.4 高功率 CO <sub>2</sub> 激光器的技术要求 .....	( 7 )
1.1.5 高功率轴快流 CO <sub>2</sub> 激光器发展历程 .....	( 9 )
1.2 轴快流 CO <sub>2</sub> 激光器结构 .....	( 10 )
1.2.1 整体结构 .....	( 10 )
1.2.2 激光谐振腔 .....	( 11 )
1.2.3 真空泵 .....	( 11 )
1.2.4 控制单元 .....	( 11 )
1.2.5 风机 .....	( 11 )
1.2.6 激光电源 .....	( 11 )
1.2.7 激励方式 .....	( 13 )
1.2.8 C3000 轴快流 CO <sub>2</sub> 激光器 .....	( 15 )
1.3 激光安全 .....	( 18 )
习题 1 .....	( 20 )
第 2 章 平面激光切割机结构及原理 .....	( 21 )
2.1 CO <sub>2</sub> 激光切割机的几项关键技术 .....	( 21 )
2.1.1 焦点位置控制技术 .....	( 21 )
2.1.2 切割穿孔技术 .....	( 21 )
2.1.3 喷嘴设计及气流控制技术 .....	( 22 )
2.2 平面激光切割机 .....	( 23 )
2.2.1 激光切割机的结构和应用范围 .....	( 23 )
2.2.2 平面激光切割机的结构 .....	( 25 )
2.2.3 平面激光切割机产品系列及主要技术参数 .....	( 26 )
2.2.4 平面激光切割机外光路 .....	( 27 )
2.2.5 设备的安全使用和调试 .....	( 27 )
2.2.6 龙门结构激光切割机介绍 .....	( 32 )
2.3 激光切割头结构与原理 .....	( 39 )
2.3.1 激光切割头的作用和工作原理 .....	( 39 )
2.3.2 激光切割头使用的几个问题 .....	( 47 )
2.3.3 电气部分 .....	( 50 )
2.3.4 Penta 新型激光切割头 .....	( 50 )
2.4 数控系统工作原理 .....	( 53 )



2.4.1	数控系统的发展现状 .....	( 53)
2.4.2	数控技术的发展趋势 .....	( 54)
2.4.3	数控系统的构成及工作原理 .....	( 55)
2.4.4	意大利 Z32 数控系统的基本构成和功能介绍 .....	( 66)
2.4.5	几种主要数控系统介绍 .....	( 73)
2.4.6	数控系统选型的基本依据 .....	( 79)
2.5	伺服驱动系统 .....	( 80)
2.5.1	伺服驱动系统介绍 .....	( 80)
2.5.2	安川伺服控制系统介绍 .....	( 83)
2.6	激光切割机辅助设备 .....	( 87)
2.6.1	辅助设备功能介绍 .....	( 87)
2.7	激光切割机的维修 .....	( 90)
2.7.1	数控机床安全工作条件 .....	( 90)
2.7.2	激光切割机机床故障分类 .....	( 91)
2.7.3	激光切割机的故障诊断及排除方法 .....	( 92)
	习题 2 .....	( 93)
<b>第 3 章</b>	<b>激光切割机操作与编程 .....</b>	<b>( 94)</b>
3.1	激光切割机操作指南 .....	( 94)
3.1.1	激光切割机安全操作规程 .....	( 94)
3.1.2	激光切割机操作基础知识 .....	( 94)
3.1.3	激光切割机操作流程 .....	( 97)
3.1.4	激光切割机维护保养流程 .....	( 98)
3.2	激光切割机操作面板及操作界面 .....	( 99)
3.2.1	Hype Cut 激光切割机操作面板简介 .....	( 99)
3.2.2	激光与机床控制软件 Smart Manager 介绍 .....	( 100)
3.3	激光切割机编程指南 .....	( 119)
3.3.1	Smart Manager 编程指南 .....	( 119)
3.3.2	ISO 指令 .....	( 120)
3.3.3	高级指令 .....	( 130)
3.3.4	结构编程 .....	( 132)
3.4	激光切割机自动编程套料 .....	( 137)
3.4.1	数控加工自动编程简介 .....	( 137)
3.4.2	激光切割机自动编程套料步骤 .....	( 137)
	习题 3 .....	( 138)
<b>第 4 章</b>	<b>激光切割工艺 .....</b>	<b>( 139)</b>
4.1	激光切割分类 .....	( 139)
4.1.1	激光熔化切割 .....	( 139)
4.1.2	激光火焰切割 .....	( 139)
4.1.3	激光气化切割 .....	( 139)
4.2	激光切割过程 .....	( 140)

4.2.1	切割过程	(140)
4.2.2	材料特性	(140)
4.2.3	不同材料的可切割性	(141)
4.2.4	激光脉冲模式	(143)
4.2.5	辅助气体参数	(143)
4.2.6	辅助气体流动的基本特性	(144)
4.2.7	关于辅助气体的消耗量	(145)
4.3	激光切割	(146)
4.3.1	加工质量	(146)
4.3.2	加工精度	(146)
4.3.3	关于尺寸变化	(146)
4.3.4	金属切割中的坡度	(149)
4.3.5	非金属切割中的坡度	(150)
4.3.6	切断面的粗糙度	(152)
4.3.7	热影响	(153)
4.3.8	沾渣	(154)
4.3.9	碳化	(155)
4.3.10	加工条件	(156)
4.3.11	激光输出功率对切割的影响	(160)
4.3.12	脉冲频率(低频率)对切割的影响	(161)
4.3.13	脉冲频率(高频率)对切割的影响	(161)
4.3.14	脉冲比例对切割的影响	(164)
4.3.15	切割速度对加工的影响	(164)
4.3.16	辅助气体压力对切割的影响	(164)
4.3.17	开孔时间的影响	(164)
4.3.18	焦点位置的影响	(164)
4.4	切口质量评估	(165)
4.5	激光切割工艺参数数据库	(170)
	习题4	(171)
<b>第5章</b>	<b>用于切割的其他激光发生器</b>	<b>(172)</b>
5.1	Nd:YAG 激光器	(172)
5.1.1	Nd:YAG 激光器的基本结构	(172)
5.1.2	Nd:YAG 激光器切割应用	(174)
5.2	高功率光纤激光器	(174)
5.2.1	双包层光纤激光器基本结构及特点	(174)
5.2.2	掺镱双包层光纤激光器在激光加工中的应用	(177)
5.2.3	光纤激光器的其他应用	(178)
5.3	扩散冷却型大功率二氧化碳激光器	(180)
5.3.1	扩散冷却 CO <sub>2</sub> 激光器基本结构	(180)
5.3.2	扩散冷却 CO <sub>2</sub> 激光器应用	(182)

习题5 .....	(182)
<b>第6章 激光切割机的工业应用</b> .....	(183)
6.1 激光切割机的优点 .....	(183)
6.2 激光切割机的工业应用 .....	(184)
6.3 激光切割机在典型行业的应用 .....	(185)
6.3.1 激光切割在农业机械领域的应用 .....	(186)
6.3.2 激光加工在汽车行业的应用 .....	(187)
6.3.3 激光加工在工程机械行业的应用 .....	(188)
6.3.4 激光切割在船舶制造中的应用 .....	(189)
6.4 激光切割机工业应用的市场前景 .....	(190)
6.5 三维激光切割技术 .....	(190)
6.5.1 三维五轴激光切割机介绍 .....	(191)
6.5.2 三维五轴激光切割机的构造单元 .....	(191)
6.5.3 三维激光切割机的特点及其应用 .....	(194)
6.5.4 三维激光切割的研究与发展现状 .....	(197)
6.5.5 三维激光切割的发展趋势 .....	(197)
习题6 .....	(198)
参考文献 .....	(199)
鸣谢 .....	(200)

# 第 1 章 轴快流二氧化碳激光器

## 1.1 CO<sub>2</sub> 激光原理

CO<sub>2</sub> 激光器效率高,不造成工作介质损害,发射出 10.6μm 波长的不可见激光,是一种稳定而又实用的激光器。按气体的工作形式可分为封闭式及循环式,按激励方式可分为电激励、化学激励、热激励、光激励与核激励等。CO<sub>2</sub> 激光器工作原理和受激发射过程也较复杂。分子有三种不同的运动,即分子里电子的运动,其运动决定了分子的电子能态;二是分子里的原子振动,即分子里原子围绕其平衡位置不停地作周期性振动,决定了分子的振动能态;三是分子转动,即分子作为一整体在空间连续地旋转,分子的这种运动决定了分子的转动能态。分子运动极其复杂,因而能级也很复杂。CO<sub>2</sub> 分子为线性对称分子,两个氧原子分别在碳原子的两侧。根据分子振动理论,CO<sub>2</sub> 有三种不同的振动方式:①两个氧原子沿分子轴向相反方向振动,即两个氧原子在振动中同时达到振动的最大值和平衡值,而此时分子中的碳原子静止不动,因而其振动被称为对称振动。②两个氧原子在垂直于分子轴的方向振动,且振动方向相同,而碳原子则向相反的方向垂直于分子轴振动。由于三个原子的振动是同步的,又称为变形振动。③三个原子沿对称轴振动,其中碳原子的振动方向与两个氧原子相反,又称为反对称振动能。在这三种不同的振动方式中,确定了具有不同组别的能级。

在 CO<sub>2</sub> 分子中,已发现有 200 条谱线。这些谱线都是 CO<sub>2</sub> 分子的基电子态中振动能量  $E_v < 1\text{eV}$  的振动能级之间的振转跃迁。谱线波长的范围在 9 ~ 18μm 之间,其中最强有两组:  $00^0_1 \rightarrow 10^0_0$  和  $00^0_1 \rightarrow 02^0_0$ ,见图 1-1。 $00^0_1$  是激光上能级, $10^0_0, 02^0_0$  是激光下能级。表 1-1 给出了 CO<sub>2</sub> 激光器有关能级的辐射寿命与能量的数据。由表中可以看到,CO<sub>2</sub> 分子各能级的自发辐射寿命都较长,且激光上能级粒子的自发辐射寿命比下能级粒子的寿命短。由粒子数反转阈值条件可知,靠纯 CO<sub>2</sub> 气体产生的激光,输出功率一定会很小。

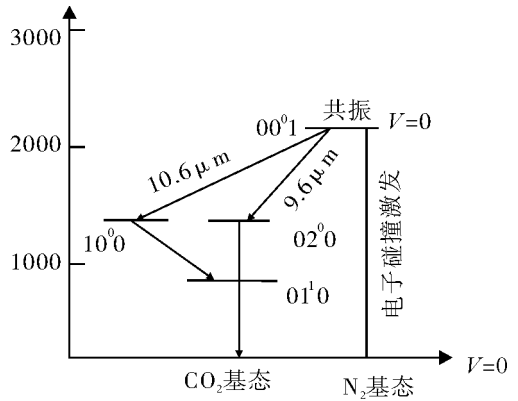


图 1-1 CO<sub>2</sub> 分子激光跃迁能级图

表 1-1 CO<sub>2</sub> 分子振动能级的辐射寿命和能量

能级	辐射寿命/s	振动能量/eV
00 <sup>0</sup> <sub>2</sub>	$1.3 \times 10^{-3}$	0.582
00 <sup>0</sup> <sub>1</sub>	$2.4 \times 10^{-3}$	0.291
10 <sup>0</sup> <sub>0</sub>	1.1	0.172
02 <sup>0</sup> <sub>0</sub>	1.0	0.159
01 <sup>1</sup> <sub>0</sub>	1.1	0.082

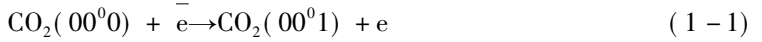
### 1.1.1 CO<sub>2</sub> 激光器的激发机理

#### 1. 激光上能级的激发

CO<sub>2</sub> 激光器中把 CO<sub>2</sub> 分子激发到 00<sup>0</sup>1 能级大致有四个途径。

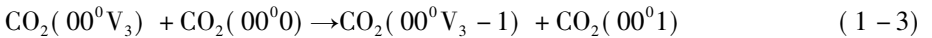
##### (1) 电子直接碰撞激发

具有一定能量的电子基态 CO<sub>2</sub> 分子发生非弹性碰撞,使基态 CO<sub>2</sub> 分子直接激发到 00<sup>0</sup>1 能级



##### (2) 串级激发

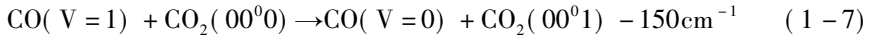
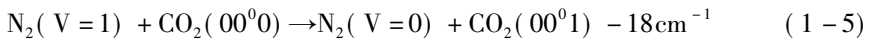
气体放电中,一些能量略大的电子会将 CO<sub>2</sub> 分子激发到更高的反对称能级 V<sub>3</sub> > 1(如: 00<sup>0</sup>2、00<sup>0</sup>3 等)的能级上去,处在这些能级上的粒子极易与基态 CO<sub>2</sub> 分子碰撞,使其跃迁到 00<sup>0</sup>1 能级,而自己弛豫到下一级(V<sub>3</sub> - 1)的能级。经过多次这样降级的碰撞直到能量全部转移到 00<sup>0</sup>1 能级为止。反应过程如下:



由于 CO<sub>2</sub> 分子反对称振动能级是一系列等能量间隔分布的分子级,间隔能量大小与 00<sup>0</sup>1 能级能量几乎相等,使这种反应具有共振性质。再加上电子直接激发 CO<sub>2</sub> 分子至 00<sup>0</sup>2、00<sup>0</sup>3 …,这些能级的激发截面也较大,所以串级激发对 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1) 能级的贡献是较大的。

##### (3) 共振转移激发

慢电子对分子振动能级的激发截面都很大,而且激发函数有明显的谐振点。这是由于电子在分子碰撞过程中先与分子形成一个负离子中间态,然后在极短的时间内(10<sup>-15</sup>s)将入射电子的能量转化为分子的激发能。对 N<sub>2</sub> 分子、CO 分子同样如此,电子直接激发的截面也非常大。电子能量在 2.3eV 时,N<sub>2</sub>(V = 1 ~ 8)的激发截面最高,可达 3 × 10<sup>-16</sup>cm<sup>2</sup>,在 1.7eV 时,CO(V = 1 ~ 8)可达 8 × 10<sup>-16</sup>cm<sup>2</sup>。N<sub>2</sub>分子和 CO 分子在 V = 1 的振动能级与 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1) 能级间能量差(-18cm<sup>-1</sup>, -150cm<sup>-1</sup>)远小于气体常温下的平动动能 kT(209cm<sup>-1</sup>),所以,它们之间很容易发生能量的共振转移。



N<sub>2</sub> 与 CO 分子对 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1) 共振转移激发截面较大是和它们本身的分子结构有关的。N<sub>2</sub> 与 CO 都是双原子分子,它们振动的自由度只有一个(分子轴方向),只需用一个量子数 V 来表征。它们的振动态也是由一系列近似等距分布的能级组成的。

N<sub>2</sub> 是同核原子组成的非极性分子,它作振动运动时,分子正负电荷中心始终重合在一起(电偶极矩 = 0),不会吸收或辐射电磁波。当它们被激发到某一振动态时,是不能通过辐射跃迁回到基态或较低能级的。正由于这种性质决定了 N<sub>2</sub> 分子振动激发态的寿命较长。再加上所有的 N<sub>2</sub>(V > 1) 能级的粒子与基态 N<sub>2</sub> 分子相碰可以形成 N<sub>2</sub>(V < 1) 的粒子使 N<sub>2</sub>(V = 1) 粒子大量集居,从而有效地对 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1) 能级进行选择性的激发,并延长了粒子在该能级的寿命。

CO 与 N<sub>2</sub> 不同,它是极性分子。当振动运动时,其分子的正负电荷中心不重合,随着正负电偶极矩的变化,它会吸收和辐射电磁波。CO 分子振动激发态之间可辐射跃迁,所以,CO(V

=1) 时粒子寿命相应短些。不过,它仍可以使  $\text{CO}_2(00^01)$  粒子的寿命延长一倍。

(4) 复合激发

气体放电中,能量大于 2.8eV 的电子碰撞  $\text{CO}_2$  分子能使它离解为 CO 和 O。与此同时,分解了的 CO 和 O 也存在复合过程。复合时,它们所释放的复合能可使  $\text{CO}_2$  分子由  $00^00$  态跃到  $00^01$  态。



这种激发过程比前三种过程作用小得多。

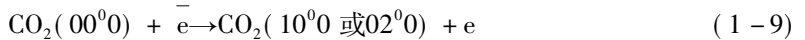
2. 激光下能级的激发

$\text{CO}_2$  分子  $10^00$ 、 $02^00$  能级是  $\text{CO}_2$  激光器的激光下能级。这两能级上的粒子有以下四个来源。

(1) 电子碰撞激发

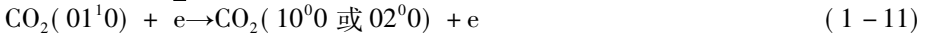
电子碰撞基态  $\text{CO}_2$  分子使其跃到  $10^00$  和  $02^00$  能级有两种激发途径。

1) 直接激发——电子使基态  $\text{CO}_2$  分子一次跃迁到  $10^00$  或  $02^00$  能级



根据量子力学中与基态无光学联系的能级电子碰撞激发概率较小的论点,电子对  $\text{CO}_2$  分子  $10^00$  与  $02^00$  两能级直接激发概率很小,因为它们对基态是禁戒跃迁的。

2) 逐级激发——电子先将  $\text{CO}_2$  分子由基态激到  $01^10$  能级,然后电子再与  $01^10$  能级上的分子碰撞,使它跃到  $10^00$  或  $02^00$  能级。



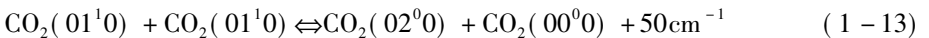
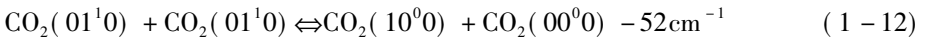
由于  $10^00$ 、 $02^00$  能级与  $01^10$  能级间以及  $01^10$  能级与基态间都存在光学联系,根据电子碰撞激发速率的规律,逐级激发的概率较前者要大。

(2) 串能激发

这是由高能级(包括  $01^10$  能级)上的粒子辐射跃迁或碰撞弛豫到  $10^00$  或  $02^00$  能级的激发,这种激发概率较小。

(3) 分子碰撞激发

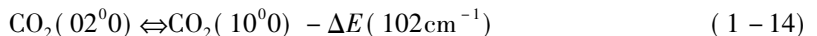
两个处于  $01^10$  能级的  $\text{CO}_2$  分子相互碰撞后,其中一个激发至  $10^00$  能级或  $02^00$  能级,另一个回到基态,即



这种激发比前几种激发截面要大得多,因为这两个过程都是接近共振碰撞( $\Delta E \ll$  很小)。

(4) 费密共振激发

所谓费密共振,是分子在同一电子态中具有相近能量的两个振动能级,如果它们振动角量子数 L 相同,那么它们相碰撞时会出现激烈的相互作用,两个能级上的分子能量交换十分频繁,这种现象称为费密共振。这种共振只有三原子以上的分子才有,而且  $\Delta E$  愈大,共振愈强,反应过程为



我们称  $\text{CO}_2(10^00)$  或  $\text{CO}_2(02^00)$  这种激发为费密共振激发。

由于  $\text{CO}_2$  激光器下能级  $10^00$ 、 $02^00$ 、 $01^10$  三个能级上的  $\text{CO}_2$  分子之间能量交换频繁,且反

应过程可逆,所以在这三个能级上的 CO<sub>2</sub> 分子是按玻耳兹曼形式分布的,即

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (1-15)$$

若 01<sup>1</sup>0 能级粒子数增多,在 10<sup>0</sup>0 或者 02<sup>0</sup>0 能级上的粒子数也会增多。

若放电管内气体温度  $T_g$  升高,在这两能级上粒子数也随之增加。

### 1.1.2 轴快流激光器的弛豫过程

气体放电时,激光器内气体的各个能级除有激发过程外,同时还有弛豫(消激发)过程。由粒子数反转分布阈值条件可知,对激光上能级,我们希望激发速率大,消激发要尽量少,以保证上能级有较大的粒子集居数。对于激光下能级则相反,希望激发速率小,弛豫速度快,使下能级处于排空状态。

在 CO<sub>2</sub> 激光器中,引起激发态能级粒子弛豫的原因除对激光输出有益的自发辐射、受激辐射之外,还有与气体碰撞而弛豫的体积弛豫和因扩散到管壁处与管壁碰撞而弛豫的管壁弛豫(又称管壁效应)。对不同能级这两种弛豫随气体种类、气体压强和气体温度改变产生的效果是不同的。

#### 1. 激光上能级的弛豫

CO<sub>2</sub> 激光器的上能级 00<sup>0</sup>1 能级的弛豫是由体积弛豫和管壁弛豫两部分合成的,即其弛豫速率关系为

$$K_{\text{总}} = K_V + K_W \quad (1-16)$$

在 CO<sub>2</sub> 气压较低时,放电管内管壁弛豫速率较大。随 CO<sub>2</sub> 气体气压增高,激发态粒子因与气体碰撞而不易扩散到管壁,使管壁弛豫速率大大下降。而体积弛豫则随气压的增大而线性增长。

CO<sub>2</sub> 激光器中的体积弛豫速率不仅与管内的 CO<sub>2</sub> 气体本身有关,还与充入管内的辅助气体的种类及气压有关。表 1-2 列出不同的混合气体中 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1) 的弛豫速率常数  $k_1$ 。从表中看到 H<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 对 00<sup>0</sup>1 能级弛豫速率较大不利于 00<sup>0</sup>1 粒子的积累。要减弱对上能级粒子的弛豫就要对充入放电管内的气体种类以及它们的含量和纯度加以选择和控制在。因上能级主要是靠 N<sub>2</sub> 选择激发实现粒子数反转的,所以气体温度下降所造成上能级粒子数的减少与其相比可略而不计。

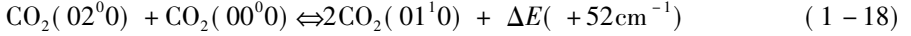
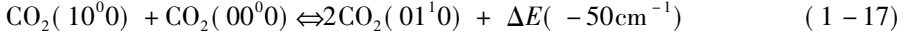
表 1-2 不同混合气体中 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1) 能级的弛豫速率常数  $k_1$  (300K)

混合气体	$p_{\text{CO}_2} / (10^2 \text{ Pa})$	$p_M / (10^2 \text{ Pa})$	$k_1 / ((133 \text{ Pa})^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	
CO <sub>2</sub>	1.33 ~ 10.6	—	2.89 <sup>(1)</sup>	2.63 <sup>(2)</sup>
CO <sub>2</sub> ~ H <sub>2</sub>	4	0.67 ~ 4	33.8	28.57
CO <sub>2</sub> ~ He	1.33	1.33 ~ 10.6	0 ~ 0.376	0.639
CO <sub>2</sub> ~ H <sub>2</sub> O	2.66	0.067	$3.15 \times 10^2$	$1.8 \times 10^2$
CO <sub>2</sub> ~ N <sub>2</sub>	1.33	1.33 ~ 9.31	0.865	0.797
CO <sub>2</sub> ~ CO	2.66	1.33 ~ 6.7	1.45	—
CO <sub>2</sub> ~ Xe	2.66	0.133 ~ 1.33	0 ~ 0.376	0.226

(1)脉冲增益法测量数据;(2)荧光法测量数据。

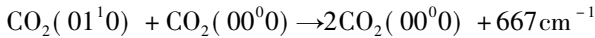
## 2. 激光下能级的弛豫

$\text{CO}_2$  激光器  $10^0_0, 02^0_0$  两能级对基态是禁戒跃迁的, 它们只能辐射跃迁到  $01^1_0$  能级, 再由  $01^1_0$  能级辐射跃迁到基态。这三个能级寿命都很长, 辐射弛豫速率很小, 远不及与气体分子碰撞而弛豫的过程(见表 1-3)。因能量近似共振,  $10^0_0, 02^0_0$  粒子与基态  $\text{CO}_2$  分子碰撞, 极易弛豫到  $01^1_0$  能级。

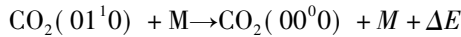
表 1-3  $\text{CO}_2(10^0_0)$  的碰撞弛豫速率常数  $k_2$ 

混合气体	$p_{\text{CO}_2} / (10^2 \text{ Pa})$	$p_M / (10^2 \text{ Pa})$	$k_2 / \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{CO}_2$	1.33 ~ 10.6	—	16.54
$\text{CO}_2 \sim \text{H}_2$	4	0.67 ~ 4	24.81
$\text{CO}_2 \sim \text{He}$	1.33	1.33 ~ 10.6	35.34
$\text{CO}_2 \sim \text{H}_2\text{O}$	2.66	0.067	$9.02 \times 10^3$
$\text{CO}_2 \sim \text{N}_2$	1.33	1.33 ~ 9.31	0.195
$\text{CO}_2 \sim \text{CO}$	2.66	1.33 ~ 6.7	30.83
$\text{CO}_2 \sim \text{Xe}$	2.66	0.133 ~ 1.33	37.59

但这一过程不能完全解决下能级的弛豫问题。因为  $\text{CO}_2(01^1_0)$  粒子与基态  $\text{CO}_2$  分子的碰撞弛豫是振动能转化为平动动能的过程(常称 V-T 过程)



这一过程  $\Delta E > kT$ , 反应速率常数较小, 所以在  $01^1_0$  能级上出现了粒子的“堆积”(常称这种低能级阻塞现象为瓶颈效应)。“堆积”的  $01^1_0$  粒子是很活跃的, 它可以俘获辐射的光子跃回  $10^0_0, 02^0_0$  能级, 又可以通过弛豫逆过程而使  $10^0_0$  和  $02^0_0$  能级粒子增多, 反转粒子数减少。严重时, 还可以使激光停止振荡。为了解决粒子的“堆积”, 排空激光下能级, 常用的方法是在激光器内加适量的辅助气体  $M$ , 通过它们与  $\text{CO}_2(01^1_0)$  分子碰撞来消耗  $01^1_0$  粒子的能量, 使它弛豫。同时降低管内气体的温度使下能级粒子减少。



气体种类  $M$  不同, 反应的截面差别很大, 表 1-4 列出不同气体弛豫  $01^1_0$  粒子的速率常数  $k_3$  及  $\text{CO}_2(01^1_0)$  对应的弛豫时间。由表可以看出,  $\text{H}_2\text{O}$  对下能级  $01^1_0$  弛豫要比  $\text{CO}_2$  大 1 000 倍, 倘若增高管内气压, 下能级的弛豫效果会更好。但对激光上能级  $\text{H}_2\text{O}$  产生的影响也比其他气体要高 10 ~ 1 000 倍。因此, 确定哪种气体作激光器的辅助气体要从上、下能级对粒子数的要求及各种气体对它们的影响来综合考虑。

在  $\text{CO}_2$  激光器激光下能级的排空主要靠气体碰撞, 它对管壁弛豫的要求不同于 He-Ne 激光器, 故它能在放电管管径较粗(几毫米 ~ 几十毫米), 管内气压在较高的情况下获得大的输出功率。



表 1-4 CO<sub>2</sub>(01<sup>1</sup>0) 的弛豫速率常数  $k_3$  与混合气体中 CO<sub>2</sub>(01<sup>1</sup>0) 的弛豫时间

混合气体	$k_3 / \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$t / \text{s}$
CO <sub>2</sub>	1.45	$4.4 \times 10^{-3}$
CO <sub>2</sub> ~ H <sub>2</sub>	$4.89 \times 10^2$	$2.6 \times 10^{-5}$
CO <sub>2</sub> ~ He	24.6	$2.26 \times 10^{-4}$
CO <sub>2</sub> ~ H <sub>2</sub> O	$3.38 \times 10^3$	$3.2 \times 10^{-6}$
CO <sub>2</sub> ~ N <sub>2</sub>	4.89	$1.04 \times 10^{-4}$
CO <sub>2</sub> ~ CO	$1.88 \times 10^2$	$2 \times 10^{-5}$

### 1.1.3 工作物质在轴快流激光器中的作用

CO<sub>2</sub> 激光器中,主要的工作物质由 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、He 三种气体组成。其中 CO<sub>2</sub> 是产生激光辐射的气体,N<sub>2</sub>及 He 为辅助性气体。加入其中的 He,可以加速 01<sup>1</sup>0 能级热弛豫过程,因此有利于激光能级 10<sup>0</sup>0 及 02<sup>0</sup>0 的抽空。N<sub>2</sub> 加入主要在 CO<sub>2</sub> 激光器中起能量传递作用,为 CO<sub>2</sub> 激光上能级粒子数的积累与大功率高效率的激光输出起到强有力的作用。

实验发现,有许多气体如 N<sub>2</sub>、CO、He、Xe、H<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等能显著提高 CO<sub>2</sub> 激光的输出功率和效率,也有些气体则不利于激光的输出。为了合理地选用辅助气体,我们分别介绍各种气体的作用。

#### 1. N<sub>2</sub> 和 CO

在 CO<sub>2</sub> 激光器中,N<sub>2</sub> 和 CO 的作用如前所述是通过共振能量转移提高 CO<sub>2</sub> 分子 00<sup>0</sup>1 粒子的激发速率和增大对于 10<sup>0</sup>0、01<sup>1</sup>0 粒子的弛豫速率,尤其是 CO 气体此作用特别突出。不过这两种气体在器件中的含量要适中。对 N<sub>2</sub> 而言,含量太少,激光上能级的积累效果不明显,太多则会减少 CO<sub>2</sub> 气体本体的含量,同时还会增大上能级的消激发过程。放电过程中 N<sub>2</sub> 极易与 CO<sub>2</sub> 分解出来的氧原子结合形成负电性气体 N<sub>2</sub>O、NO<sub>2</sub> 等氮化物,使 00<sup>0</sup>1 能级粒子消激发。CO 是极性分子,在选择激发 00<sup>0</sup>1 方面它要比 N<sub>2</sub> 差些,但它不会产生有害气体,而且还可以抑制 CO<sub>2</sub> 分子的离解。国外也有用 CO 替代 N<sub>2</sub>,只要气体配比适当,输出功率不会降低多少,相应激光器的运转寿命还有所增长。

#### 2. He

He 是质量小、热导率高( $14.38 \times 10^{-4} \text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 的气体。对以管壁水冷却方式来降低管内气体温度的封离型 CO<sub>2</sub> 激光器来说,如在工作气体中加入大量 He 可大大提高放电管中心处的热量向管壁传递的速率,使管内气体温度明显下降,达到减少下能级的粒子和增快它们弛豫的效果。它的存在也减少了其他气体或管壁与 00<sup>0</sup>1 能级粒子的碰撞机会,缓冲上能级粒子的消激发速率,从而改善激光的输出特性。

#### 3. Xe

在小型封离式 CO<sub>2</sub> 激光器中加入适量的 Xe,可提高输出功率 20% ~ 30%,能量转换效率提高 10% ~ 15%。这是因为管内的 Xe 电离电位较低(12.127eV),若在管内注入少量的 Xe,可增加管内电离度,降低电子平均能量,既能提高上能级 00<sup>0</sup>1 的激发速率,又可防止 CO<sub>2</sub> 分子的离解。

#### 4. H<sub>2</sub>O 和 H<sub>2</sub>