

高能束加工技术

刘正坝 主编

航空工业出版社

高能束加工技术

刘正坝 主编

航空工业出版社

2003.5

内 容 提 要

高能束加工技术是特种加工技术重要分支之一。通常将激光束加工、电子束加工和离子束加工称之为高能束加工,亦称三束加工。它们的共同特性是以具有很高能量密度的束流,通过一定的装置在空间传输并在工件表面聚焦,去除工件材料或作其他用途;而它们的不同之处在于所用的能量载体各异,分别为光子、电子和离子体,因而其加工机理、功能、效果和适用范围就有所不同。

本书系统地介绍了高能束加工的基本原理、设备、工艺和应用范围,使学生了解和掌握高能束加工技术概况和相应的关键技术,以扩展学生应用当代先进制造技术的思路 and 实际能力。本书为高等院校机械工程类学生教科书,亦可作为工程技术人员参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

高能束加工技术/刘正坝等编.——北京:航空工业出版社,2003.3
ISBN 7-80183-138-1

I. 高… II. 刘… III. ①激光加工②电子束加工③离子束加工 IV. TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 021928 号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

南京航空航天大学印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2003 年 4 月第 1 版

2003 年 4 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:8.125 字数:203 千字

印数:1—3000

定价:14.00 元

前 言

高能束加工技术是特种加工技术重要分支之一。通常将激光束加工(LBM)、电子束加工(EBM)和离子束加工(IBM)称之为高能束加工,亦称三束加工。它们的共同特性是以具有很高能量密度的束流,通过一定的装置在空间传输并在工件表面聚焦,去除工件材料或作其他用途;而它们的不同之处在于,所用的能量载体各异,分别为光子、电子和离子体,因而其加工机理、功能、效果和适用范围就有所不同。高能束加工是20世纪60年代迅速发展起来的工艺技术,并逐步应用于科学研究和工业生产中,尤其在难加工材料、精密微细加工、仪器仪表零件加工、微电子器件制造、微机电系统和航空航天零件制造中得到越来越广泛的应用。它可以用于材料去除、焊接、涂覆、改性等方面工艺,是当代具有代表性的先进制造技术之一,是极具生命力的一种特种加工技术。自我国“八五”计划以来,一直列为重大发展技术项目之一。因而,机械工程及相关专业的学生有必要系统地学习高能束加工技术的有关知识,以了解当代制造技术的发展前沿。本书为高等院校机械工程类学生教科书,亦可作为工程技术人员参考资料。

本书系统地介绍了高能束加工的基本原理、设备、工艺和应用范围,使学生了解和掌握高能束加工技术概貌和相应的关键技术,以扩展学生应用当代先进制造技术的思路 and 实际能力。

本书是在南京航空航天大学刘正埏和唐亚新所编写的教材《激光及其他高能束流加工》的基础上,经过数年的教学实践体会,对内容进行修改和补充。增加了高能束加工技术在微机电系统中的应用篇,以跟踪高新技术的发展,丰富教材的内容。

全书由刘正埏教授主编,共分4篇16章,第1篇激光加工由赵剑峰编写,第2篇电子束加工由刘正埏编写,第3篇离子束加工和第4篇高能束加工与微机电系统由汪炜编写,并请龚光容教授主审。

由于该书涉及内容广泛,而且高能束加工技术发展很快,受作者水平所限,难免有不当之处,欢迎读者批评指正。

目 录

第 1 篇 激光加工

第 1 章 激光技术概论	1
1.1 激光的起源	1
1.2 激光的应用领域	1
1.3 激光在材料加工中的应用	2
1.4 激光在制造技术中的应用	2
第 2 章 激光原理和特性	3
2.1 激光的产生原理	3
2.2 激光的模式	5
2.3 激光的特性	6
第 3 章 激光加工常用激光器	9
3.1 气体激光器	9
3.2 固体激光器	12
3.3 调 Q 技术	14
3.4 激光加工机	16
第 4 章 激光加工技术基础	17
4.1 激光加工的物理过程	17
4.2 激光加工的特点和应用	20
4.3 安全防护	22
第 5 章 激光加工工艺	23
5.1 激光打孔	23
5.2 激光切割	30
5.3 激光焊接	36
第 6 章 激光表面处理技术	48
6.1 激光覆照相变硬化	48
6.2 激光表面合金化	49
6.3 激光冲击强化技术	50
6.4 激光熔凝	50
第 7 章 激光快速原形制造技术	51
7.1 快速原形制造技术的原理	51
7.2 快速原形制造技术的特点	51
7.3 常用的快速原形制造工艺方法	52

第2篇 电子束加工

第8章 电子束加工的基本原理	55
8.1 电子束加工的基本原理	55
8.2 电子束加工的分类和特点	58
第9章 电子束加工设备	60
9.1 电子束精微加工机	60
9.2 电子束焊机	64
9.3 电子束曝光机	65
第10章 电子束加工应用	68
10.1 电子束打孔	68
10.2 电子束焊接	70
10.3 电子束曝光	74

第3篇 离子束加工

第11章 离子束加工的基本原理	78
11.1 离子束加工基本原理	78
11.2 离子束加工的特点	80
第12章 离子束加工设备	81
12.1 离子源的基本要求	82
12.2 考夫曼宽束离子源	82
12.3 细束离子源(双等离子体离子源)	83
第13章 离子束加工的应用	85
13.1 离子束刻蚀	85
13.2 溅射镀膜	88
13.3 离子镀	92
13.4 离子注入	94

第4篇 高能束加工与微机电系统

第14章 微机电系统概述	98
14.1 微机电系统起源与发展	98
14.2 微机电系统制造技术	100
第15章 高能束光刻技术	103
15.1 准分子激光光刻技术	103
15.2 电子束光刻技术	106
15.3 离子束光刻技术	107
第16章 高能束刻蚀技术	111
16.1 激光刻蚀	111
16.2 离子束刻蚀	114
总习题	123
参考书目	125

第 1 篇 激光加工

第 1 章 激光技术概论

1.1 激光的起源

激光(Laser)是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写,意思是受激辐射产生的光的放大。激光的发现源于量子放大器。20 世纪 50 年代,美国一位从事微波研究的科学家汤斯,发明了分离高能态分子和低能态分子的方法,即将氨分子束喷射到真空中,再给它加以高压,发现高能态分子从高电场向低电场迁移,而低能态分子与之相反地迁移,从而成功地取出了处于高能态的激励态分子。将这种高能态分子束放入谐振腔,证实了这种激励态分子自发辐射的电磁波能引起受激辐射,即受激辐射出的微波能量比自发辐射的要大得多。当时这种装置的功率很小,只有 10^{-8}W ,汤斯把它命名为 Maser,即脉冲或量子放大器。它是 Micro-wave Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写,意思是受激辐射产生的微波放大。这种量子放大器是现在的激光的发展基础。汤斯还预言,不仅微波能够放大,波长更短的可见光和不可见光区域的电磁波也能被放大。于是用 Light 代替了 Maser 中的“Micro-wave”,定名为 Laser,即激光。

汤斯的预言很快被证实。1960 年,美国休斯实验室的梅曼使用红宝石作为工作物质,成功地产生了波长为 $0.6943\text{ }\mu\text{m}$ 的红外激光。这是世界上第一台激光器,也是当代重大科学技术发明之一——激光技术的开端。

1.2 激光的应用领域

随着激光技术的发展以及各种新型激光器的研制成功,其应用范围越来越宽。目前,激光已成功地应用于科学研究、军事、计测、通信、医疗和工农业生产等各个领域。在科学研究领域,激光可以作为一种高品质光源或高能量源,用于光量子、光化学、核物理等方面的研究。在生物、农业技术领域,采用激光辐照某些作物或其种子,可以明显改善作物品性,提高产量,转基因农作物就是其一个典型的应用。在医疗领域,激光可用作新型“手术刀”和各种治疗仪。在军事领域,激光制导、激光炮、激光武器等已经成功应用于实战。可以说,激光技术已经深入到人类生活的方方面面。

然而,最令人兴奋的是激光在工程领域,特别是工业中的应用。在计测领域,由于激光所特有的相干特性,激光已经作为一种测量长度的标准;在微电子行业,微型电路的制备过程中,利

用激光改变电子元器件性能或去除元器件的部分材料以达到元器件的最佳工作性能,即所谓的“激光微调技术”,是微电子电路制造领域中不可缺少的一种工艺技术。

随着激光技术的发展,激光已逐渐应用到当代最具现代意义的新技术——计算机技术中。利用激光细微刻蚀技术,可以将调制激光所携带的信息记录到一定的存储介质上,这就是激光存储技术。我们平时所用的唱碟、影碟及光盘等都采用了激光存储技术。这种技术具有记录密度高、读取方便、耐用性好等优点。最常见的计算机上的光盘驱动器(CD-ROM),光盘刻录机(CD-RW)就是以激光为光源或能量来源进行数据的读取和记录。由于激光可以用电信号对其进行调制,因此可以作为信息的载体,通过光导纤维实现数据通信。应用激光通信的网络计算机具有计算速度更快、防干扰能力更强等突出优点。

1.3 激光在材料加工中的应用

应用激光进行材料加工,称为激光加工技术。它是随着大功率激光器的出现而发展起来的一种新型加工技术,是当代具有代表性的先进制造技术。用于激光加工的激光器一般称为工业激光器,以此为核心形成的机床,称为激光加工机。从原理上讲,自然界中几乎所有材料,包括低碳钢、中碳钢、铸铁、特殊钢、不锈钢、有色金属及其合金等金属材料,以及陶瓷、树脂、纤维等非金属材料,都能采用激光加工。从行业来说,激光加工涉及到汽车、电子电器、钢铁、有色金属、化工、纤维、精密机械以及运输机械等所有领域。在这些领域中,激光广泛用于打孔、切割、焊接、表面处理及半导体加工等。

激光加工具有不受材料限制、加工效率高、精度高等优势。在机械加工中,往往可以同时满足效率和精度这两项加工指标,这是许多其他加工方法所望尘莫及的。

1.4 激光在制造技术中的应用

随着制造技术的发展,从20世纪80年代后期开始,激光快速成形技术把激光应用技术推向了一个新的高度。快速成形,或者说快速制造技术是一种从CAD直接到CAM的集成系统技术,即在计算机控制下,根据从CAD模型中得到的运动轨迹,利用激光的高能量密度,将液体、薄材和粉末材料进行瞬时的粘结、固化,并层层叠加,从无到有,逐步累加形成实体。在整个过程中省掉了传统制造技术中的众多中间环节,如工装、模具等。快速成形/制造技术由CAD模型驱动,直接将设计思想转化为实物,不仅具有较高的柔性,最重要的是它可以大幅度缩短新产品的设计研制周期,降低成本。从这层意义上讲,激光技术迎来了它的新生命。

第 2 章 激光原理和特性

2.1 激光的产生原理

2.1.1 原子结构和能级

在原子结构中,电子绕原子核作圆周运动,如图 2-1 所示。在不受外界干扰的情况下,电子总是在离核最近的半径上运动,这时原子处于一种稳定状态,叫基态。一旦原子吸收了外界能量,就会从基态激发到高能态,这个过程叫激发。处于高能态的原子一般是不稳定的,总是试图回到稳定的低能态,原子从高能态回到低能态的过程叫跃迁。

原子的各个能态可用不连续的能级来代表。以氢原子为例,其能级如图 2-2 所示。当原子从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 时,常常会以光子的形式辐射出光能,其值为 $E_2 - E_1$,所发出光的频率 γ 为

$$\gamma = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2-1)$$

式中: h 为普朗克常数($6.624 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)。

由此可见,辐射出来的光子的频率完全取决于发生跃迁的两个能级的能量差。

2.1.2 自发辐射与受激辐射

原子从高能态自发地跃迁到低能态而发光的过程称之为自发辐射(如图 2-3 所示)。自发辐射所发出的光称为荧光,电灯、日光灯、汞灯等平时所见的普通光源,都是由自发辐射跃迁而产生的。自发辐射产生的光,由于各个跃迁发生的时间不一致,而且由于激发能级有多个,所以由高能态向低能态跃迁的过程存在着多种能级差,发出的光的频率多种多样。自发辐射也叫漫辐射,光传向四面八方。因此自发辐射光的单色性、方向性都很差,是非相干光。

与自发辐射不同,如果处于高能级 E_2 的原子受到能量为 ϵ ($\epsilon = h\gamma = E_2 - E_1$) 的外来光子

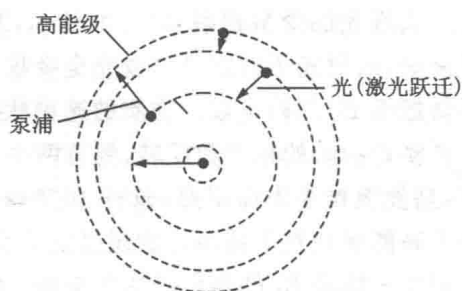


图 2-1 原子结构图

能级	能量(eV)
8	13.53
3	12.11
2	10.15

基态 1 ————— 0

图 2-2 原子能级图

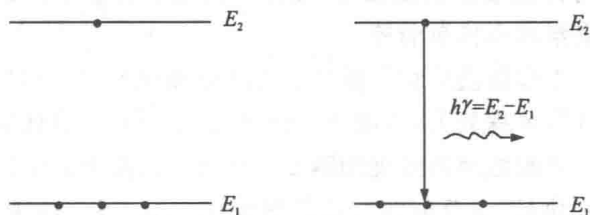


图 2-3 原子的自发辐射

诱发,原子就会从高能态 E_2 跃迁到低能态 E_1 ,并发射出一个与入射光子完全相同的光子,即它的频率、相位、传播方向、偏振方向都与入射光子相同(如图 2-4 所示),这个过程称为受激辐射,受激辐射也叫光的放大,是形成激光的重要因素。

2.1.3 粒子数反转与自激振荡

在自然状态下一般物质处于热平衡状态,各能级的粒子数按一定的统计规律分布。原子一旦被激发到高能级后,会很快地自发跃迁到低能级。因此处于高能级的粒子数远远小于处于低能级的粒子数。

实现光的受激辐射,即光的放大,原子本身要处于高能级 E_2 ,而对于处于低能级的 E_1 原子来说,入射光子的能量会被完全吸收。因此要求物质中处于高能级 E_2 的粒子数远远大于处于低能级 E_1 的粒子数。物质的这种状态称为粒子数反转。

实现物质的粒子数反转,要有两个基本条件:一是粒子处于高能级的寿命要长。通常情况下,高能级粒子寿命很短,只有 10^{-8} s,粒子一旦被激发,又很快回到稳定的低能级状态,因此处于高能级的粒子数不可能超过处于低能级的粒子数。但是有些物质的高能级状态寿命较长,如铬离子能级 E_2 的寿命长达数毫秒。我们把寿命较长的能级叫亚稳态能级。除铬离子外,钕离子、氦原子、二氧化碳分子、氪离子、氙离子等粒子中都有亚稳态能级。具有亚稳态能级的物质(称为激光工作物质)才能在亚稳态能级与低能级间实现粒子数反转,使特定频率的光辐射得到放大。二是要对粒子进行能量激发,使大量处于低能级的粒子转移到高能级上去,这个过程叫激励,或称泵浦,就好像用水泵把水从低处抽到高处一样,如图 2-5 所示。

目前,人们已掌握了实现粒子数反转的各种有效的激励(泵浦)方法,常见的有:对固体工作物质(掺铬刚玉、掺钕玻璃、掺钕钇铝石榴石等)采用强光照射,称为光激励或光泵浦;对气体工作物质(氦-氖、二氧化碳等)采用高压放电的方法,称为电激励。这两种激励方法如图 2-6 所示,其他还有化学激励、热激励、电子束泵浦和核泵浦等。

工作物质中粒子数处于反转分布状态,只是创造了产生激光的必要条件。这种系统只能对光进行单程放大,不能产生激光,还必须产生自激振荡。

自激振荡的原理如图 2-7 所示。在激光工作物质的两侧,放置两块相互平行的反射镜,其中一块是“全反射镜”,反射率为 99.8%,另一块为“部分反射镜”,反射率为 40%~60%,通常把这两块反射镜组成的腔叫光学谐振腔。

在谐振腔中,初始的光辐射,来自自发辐射,即处于高能级 E_2 的粒子自发地跃迁到低能级 E_1 时发射出光子。这种光射向四面八方,在相位、方向上都是无规律的,是产生激光的“火种”。自发辐射产生的光子在传播过程中不断引发高能态的粒子向低能态跃迁,产生受激辐射。这些

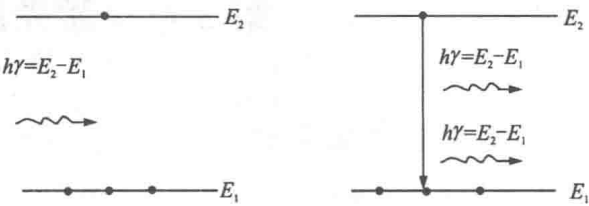


图 2-4 原子的受激辐射

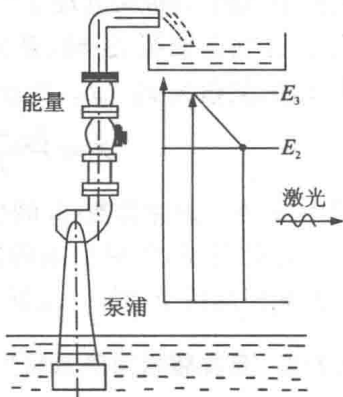


图 2-5 激励(泵浦)示意图

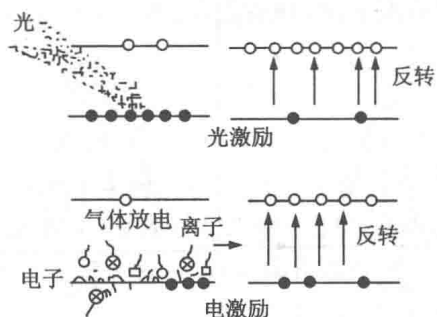


图 2-6 光激励和电激励

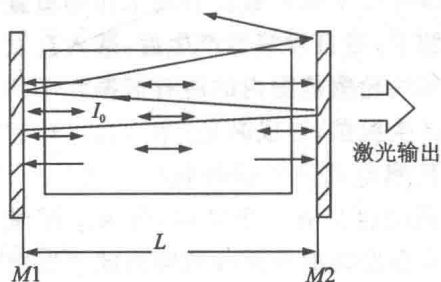


图 2-7 自激振荡原理

受激辐射的光子,如果没有谐振腔,就会迅速向四处跑掉。由于有了谐振腔,就使沿着谐振腔轴向传播的光子,又重新回到工作物质中来,再次引发其他高能态粒子向低能态跃迁,产生新的光子。而那些不沿着谐振腔轴向传播的光子,很快通过谐振腔透明侧面而逸出腔外,它们与腔内的工作物质不再有什么接触。那些沿轴向传播的光子,经过两块反射镜面的反射,不断地在腔内往复传播,受激辐射强度越来越大,使处于高能态的大部分粒子相互关联地发光,以至受激辐射强度远远超过自发辐射强度。这样,在谐振腔内沿轴线方向便积累了很强的受激辐射,其中一部分通过“部分反射镜”射出,即激光。

2.2 激光的模式

2.2.1 纵模

如前所述,在光学谐振腔内,处于粒子数反转的工作物质自发辐射产生的频率为: $\gamma_{21} = (E_2 - E_1)/h$,该频率的光通过受激辐射得到放大,并沿轴线方向传播,形成激光。根据量子力学的测不准原理,各能级的能量是不定值,应具有一定宽度 ΔE ,即高能级 E_2 具有宽度为 ΔE_2 ,低能级 E_1 同样具有本身的宽度 ΔE_1 ,因此自发辐射产生的光频率 γ_{21} 同样也具有一定的宽度。我们通常所说的粒子自发辐射产生的频率为 γ_{21} 的光,实际上它是以 γ_{21} 为中心,半宽度为 $\Delta\gamma_n$ 的光。其光强 I 随频率 γ 的分布如图 2-8 所示。这种光谱线分布形状称为洛伦兹分布曲线。

根据光的干涉理论,只有当光学谐振腔长度是光半波长的整数倍时,光才能得到加强,才能在谐振腔内来回振荡。这时有

$$l = \frac{\lambda}{2} K, \lambda = \frac{C'}{\gamma}, \gamma_K = \frac{C' K}{2l} \quad (2-2)$$

式中:频率 γ_K 称为谐振频率,每一个 K 值对应一个谐振频率,即对应一种“振荡方式”,称为纵向模(或纵模)。一个谐振腔具有多个振荡频率,即对应多个“振荡模式”。

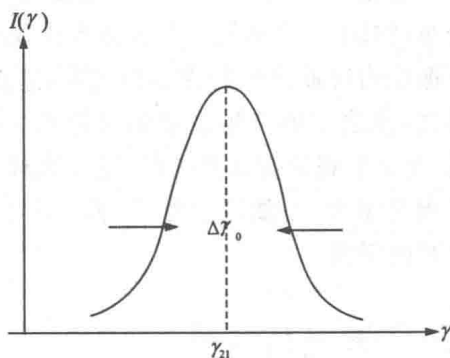


图 2-8 洛伦兹分布曲线

如果将处于粒子数反转的工作物质置于谐振腔中,当自发辐射产生后,落入自发辐射光谱线轮廓范围内的所有谐振频率的光都能产生振荡,形成激光。落入自发辐射光谱线轮廓范围内的谐振频率只有一个,产生的激光也只有一个频率,称为单模激光。落入自发辐射光谱线范围内的谐振频率有多个,产生的激光包含多个频率,称为多模激光,如图 2-9 所示。

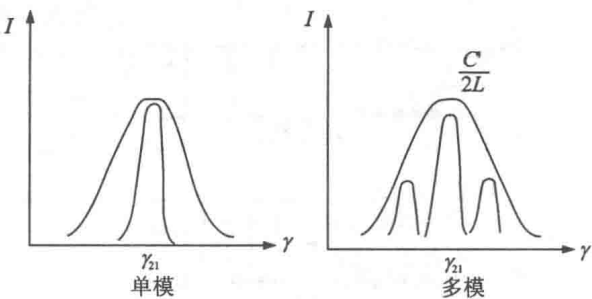


图 2-9 单模、多模激光示意图

怎样获得单模激光呢?通常采取的办法是:减小谐振腔的长度 l ,使谐振腔的频率间隔变大,以致在自发辐射光谱线轮廓范围内只有一个谐振频率,此时产生的激光即为单模激光,如图 2-10 所示。

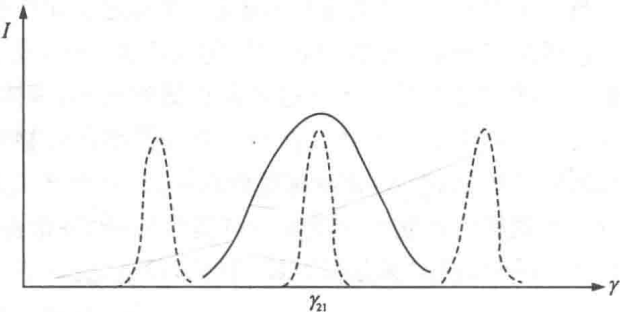


图 2-10 单模激光示意图

2.2.2 横模

激光谐振腔由两个反射镜组成。由于反射镜直径的大小有限,对腔内激光会起一定的衍射作用。这种衍射作用改变了光束原来的径向分布,使激光光斑出现各式各样的分布花样。光束垂直分布于腔轴方向的形式,称为激光的横向模式(或横模)。

横模一般用 TEM_{mn} 表示,其中 TEM 表示横向光束分布,而 m, n 是一系列整数,表示在 x 轴和 y 轴上零点(从花样上看是暗点)的数目。如图 2-11 所示。当 m, n 都等于零时,称为基横模或基模,并用符号 TEM_{00} 表示。当 $m=0, n=1$ 或 $m=1, n=0$ 时,称为低次模或次基模,并用符号 TEM_{01} 或 TEM_{10} 表示。其余的模,如 TEM_{11} 、 TEM_{20} 、 TEM_{02} 、 TEM_{22} 等均称为高次模。

基模 TEM_{00} 的光强分布比较均匀,在光斑直径上呈高斯分布(如图 2-12 所示),发射角也比较小,是较理想的光束。从谐振腔内可能产生的许多模式中,选出 TEM_{00} 基模,抑制其他模式,使之不能产生振荡的过程称为选模。一般采用的办法是:在反射镜附近放置光栏,适当选择光栏的孔径,使高次模衍射损耗增大,不能产生振荡,而 TEM_{00} 模的衍射损耗较小,可在腔内振荡。

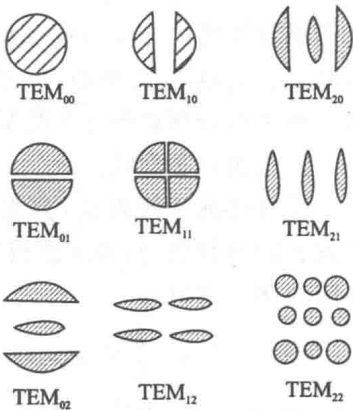


图 2-11 横模示意图

2.3 激光的特性

首先,激光也是一种光,因此具有一般光的共性,即具有反射、折射、干涉、衍射等性质。此外,由于激光的光发射是以受激辐射为主,因而发光物质中基本上是有组织地、相互关联地产生光发射的,发出光波的频率、方向、偏振状态相同和位相关系严格。由此产生了激光的四大

特性:亮度(强度)高、单色性好、相干性好和方向性强。

2.3.1 强度高

激光的强度高,主要是由于激光在空间上和时间上可以实现光能的高度集中。就光能在空间上的集中而论,如果能将分散在 180° 立体角范围内的光能全部压缩到 0.18° 立体角范围内发射,则在不必增加总发射功率的情况下,发光体在单位立体角内的发射功率就可提高一百万倍,亦即其亮度提高一百万倍。就光能在时间上的集中而论,如果把一秒钟时间内所发出的光压缩在亚毫秒数量级的时间内发射,形成短脉冲,则在总功率不变的情况下,瞬时脉冲功率又可以提高几个数量级,从而大大提高了激光的亮度。从表 2-1 中可以看出,一台输出功率为 10^6 KW/cm^2 的红宝石巨脉冲激光器所发出的激光的亮度要比高压脉冲氙灯高 370 亿倍,比太阳表面的亮度也要高出 200 多亿倍。

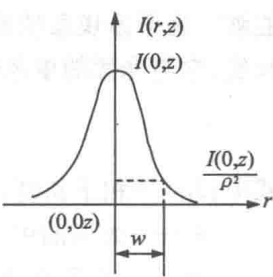


图 2-12 TEM₀₀ 的光强分布

表 2-1 光源亮度比较

光源	亮度(熙提) ^①	光源	亮度(熙提)
蜡烛	约 0.5	太阳	约 1.65×10^5
电灯	约 470	高压脉冲氙灯	约 10^5
碳弧	约 9000	每平方厘米输出功率为 1000 mW、发散角为毫弧度的红宝石巨脉冲激光器	约 3.7×10^{13}
超高压水银灯	约 1.2×10^5		

① 1 熙提(sb) = 10^4 坎/米²(cd/m²)

一束光经过聚焦后可能达到的温度,主要取决于光源的亮度,一束高亮度的激光,经聚焦后,在焦点附近能产生数千度甚至数万度的高温,所以激光的亮度和强度特别高。

2.3.2 单色性好

大家知道,太阳光包含红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等 7 种颜色,每一种颜色的光对应一定的波长与频率,激光往往是只有一种频率的光,因此激光是单色光。

在光学领域中,“单色”是指光的波长(或者频率)为一个确定的数值,实际上严格的单色光是不存在的,波长为 λ_0 的单色光都是指中心波长为 λ_0 、谱线宽为 $\Delta\lambda$ 的一个光谱范围。 $\Delta\lambda$ 称为该单色光的谱线宽,是衡量单色性好坏的尺度, $\Delta\lambda$ 越小,单色性就越好。

激光器所发出的激光具有其他光源难以达到的、极高的单色性。这是由于构成激光的谐振腔的反射镜对波长选择性极佳,并且利用原子固有能级跃迁的结果。激光是受激辐射的,它的谱线宽度很窄,如单纵模稳频激光的谱线宽度可以小于 10^{-8} nm ,而在激光出现以前单色性最好的光源——氪灯,所发出的单色光 $\Delta\lambda$ 为 0.00047 nm 。激光的谱线宽度比普通光源的谱线宽度要窄几个数量级,即单色性比氪灯提高了上万倍。因此,激光单色性比普通光源单色性好得多。激光是颜色最纯、色彩最鲜的光。

2.3.3 相干性好

光源的相干性可以用相干时间或相干长度来度量。相干时间是指光源先后发出的两束光

能够产生干涉现象的最大时间间隔。在这个最大的时间间隔内光所走的路程(光程)就是相干长度,它与光源的单色性密切相关,即

$$L = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (2-3)$$

式中: L ——相干长度;

λ_0 ——光源的中心波长;

$\Delta\lambda$ ——光源的谱线宽度。

这就是说,单色性越好, $\Delta\lambda$ 越小,相干长度就越大,光源的相干性也越好。某些单色性很好的激光器所发出的光,采取适当措施以后,其相干长度可达到数十千米。而单色性很好的氪灯所发出的光,相干长度仅为 78 cm,用它进行干涉测量时最大可测长度只有 38.5 cm,其他光源的相干长度就更小了。

2.3.4 方向性强

光束的方向性是用光束的发散角表征的。普通光源由于各个发光中心是独立地发光,而且方向各不相同的,所以发射的光束很发散。即使是加上聚光系统,要使光束的发散角小于 0.1 mrad,仍然是十分困难的。激光则不同,它的各个发光中心是互相关联地定向发射,所以可以把激光束压缩在很小的立体角内,发散角实际可以小到 0.1×10^{-3} mrad 左右。用发散角如此小的高度平行的激光,经过光学系统射到月球上去,光束扩散的截面直径不到 1 km(注意:月球离地球距离约 38×10^5 km),而设想用最好的探照灯光束射到月球上(这实际上是不可能的),则探照灯光束扩散的直径将达数百千米。这就是说,激光光束的发散角仅为最好的探照灯系统的几百分之一。

应当指出,上述激光的四个特性不是相互无关的,而是相互联系、相互渗透的。正是由于激光具有这些特性,使得它的巨大能量汇聚到很小的面积(焦点光斑直径可小于 0.01 mm)上并通过透镜加以聚焦,形成极高的能量密度,从而使激光加工成为可能。

第3章 激光加工常用激光器

3.1 气体激光器

气体激光器一般采用电激励,工作物质为气体介质。因其效率高,寿命长,连续输出功率大,因此广泛应用于切割、焊接、热处理等加工领域。用于材料加工的常见的气体激光器有二氧化碳激光器、氩离子激光器等。

3.1.1 二氧化碳激光器

二氧化碳激光器以二氧化碳气体为工作物质,是目前连续输出功率最高的气体激光器,连续输出功率可达上万瓦,输出的激光波长为 $10.6\text{ }\mu\text{m}$,属于红外激光。

二氧化碳分子是一种线性对称排列的三原子分子。三个原子排列成一条直线,碳原子在中间,氧原子在两边。分子的能级比一般原子的能级复杂得多,其中分子的振动能级对产生激光起主要作用,其基本振动形式有以下三种。

(1)对称振动。碳原子保持不动,氧原子沿分子连线作方向相反的振动,如图 3-1(a)所示。

(2)弯曲振动。氧原子和碳原子均作沿垂直分子连线方向振动,且它们的运动方向相反,如图 3-1(b)所示。

(3)非对称振动。三个原子沿分子连线运动,碳原子与氧原子的运动方向相反,如图 3-1(c)所示。

常用 100、200、300 等表示对称振动的各能级;用 010、020、030 等表示弯曲振动的各能级;用 001、002、003 等表示非对称振动的各能级。图 3-2 是二氧化碳分子振动的部分能级图。图中还画出了 N_2 的基态和第一激发态。通过电极放电,高速电子与 CO_2 分子碰撞,把 CO_2 分子激发到高能级(001)上,然后在(001)和(100)能级之间实现分子数反转条件。但是纯 CO_2 激光器的功率很低,必须加入 N_2 和

He 才能提高输出功率和效率。加入 N_2 时,它的第一能级($r=1$)和 CO_2 的(001)能级的能量几

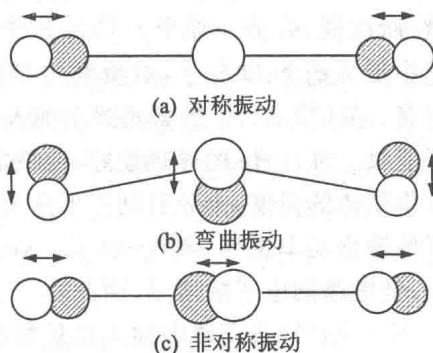


图 3-1 二氧化碳分子的振动形式

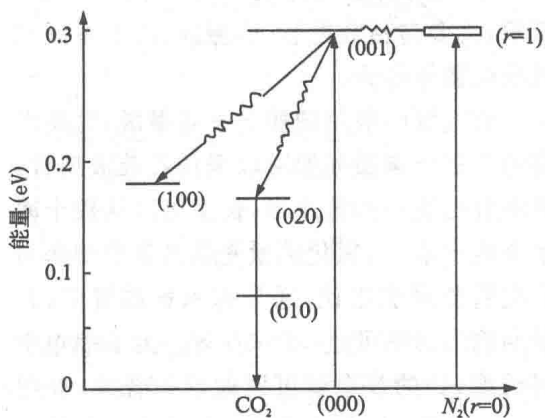


图 3-2 CO_2 和 N_2 的部分振动能级

乎相等,符合共振转移条件,即当气体放电时,电子与 N_2 分子碰撞,把 N_2 分子激发到第一级能级,然后处于激发态的 N_2 分子与 CO_2 分子碰撞时就发生共振转移,把能量交给 CO_2 分子,使 CO_2 分子激发到(001)能级上去,实现 CO_2 分子在高低能级间的分子数反转。当(001)能级的 CO_2 分子向(100)能级跃迁时,就发射出波长为 $10.6\ \mu m$ 的激光。其他能级的跃迁,如从(001)能级向(020)能级跃迁,发射波长为 $9.6\ \mu m$ 的激光也有可能,但是,由于波长 $10.6\ \mu m$ 比波长 $9.6\ \mu m$ 的激光的强度大的多,在通常情况下,认为 CO_2 激光器输出激光波长为 $10.6\ \mu m$ 。

二氧化碳激光器的效率可以高达 20% 以上。这是因为二氧化碳激光器的工作能级寿命较长,大约在 $10^{-1}\sim 10^{-3}\ s$ 范围内,而原子或离子气体激光器的工作能级寿命比较短,大约为 $10^{-6}\sim 10^{-7}\ s$ 左右。工作能级寿命长有利于粒子束反转的积累。另外,二氧化碳的工作能级离基态近,激励阈值低,而且电子碰撞分子,把分子激发到工作能级的机率比较大。

为了提高激光器的输出功率,二氧化碳激光器一般都加进氮(N_2)、氦(He)、氙(Xe)等辅助气体和水蒸气。 N_2 和 CO_2 混合后,可使输出功率提高一倍左右。 N_2 分子是双原子分子,电子激发 N_2 分子的机率很大,当 CO_2 分子与受激 N_2 分子碰撞时,能量可以迅速转移,使 CO_2 分子受激,所以说 N_2 分子能增大 CO_2 分子的激发速率,从而增大它的输出功率。但是, N_2 在放电过程中形成的 N_2O 分子,对激发的 CO_2 分子有抵消激发的作用,所以 N_2 和 CO_2 的混合比不能太高。在 $CO_2 + N_2$ 的激光器中加入大量的 He,可使输出功率提高 5~10 倍。它的作用是抽空低能级。因为 He 的导热性好,使放电管内热量向管壁传递的速率提高,使激光介质冷却,降低工作气体的温度,十分有利于提高激光器的输出功率。在 $CO_2 + N_2 + He$ 的激光器中加进 Xe,可使输出功率提高 25%~30%。Xe 的作用是降低放电管内的电子温度,使高能级的电子数减少,低能级的电子数增多,因此减少了 CO_2 分子的分解,使 CO_2 分子保持一定的浓度。在 $CO_2 + N_2 + Xe$ 的激光器中加入适量的水蒸气,可使输出功率增大 2~3 倍,水蒸气的主要作用是抽空低能级,但也要注意比例适当。气体混合比对输出功率有很大影响,一般采用的比例是:

$$CO_2 : N_2 : He : Xe : N_2O = 1 : 1.5 \sim 2 : 6 \sim 8 : 0.5 : 0.1$$

二氧化碳激光器的一般结构如图 3-3 所示,主要包括放电管、谐振腔、冷却系统和激励电源等部分。

放电管一般用硬质玻璃管做成,对要求高的二氧化碳激光器可以采用石英玻璃管。放电管的直径约数厘米,长度可以从数十厘米至数十米。二氧化碳激光器的输出功率与放电管长度成正比,通常每米长的管子,其平均输出功率可达 40~50 W。为了缩短空间长度,长的放电管可以做成折叠式,如图 3-3(b)所示。折叠的两段之间用全反射镜来耦合光路。

二氧化碳激光器的谐振腔多采用平凹腔,一般以凹面镜作为全反射镜,而以平面镜做输出端反射镜。全反射镜一般镀金属膜,如金膜、银膜或铝膜。这三种膜对波长为 $10.6\ \mu m$ 的激光的反射率都很高,金膜稳定性很好,所以

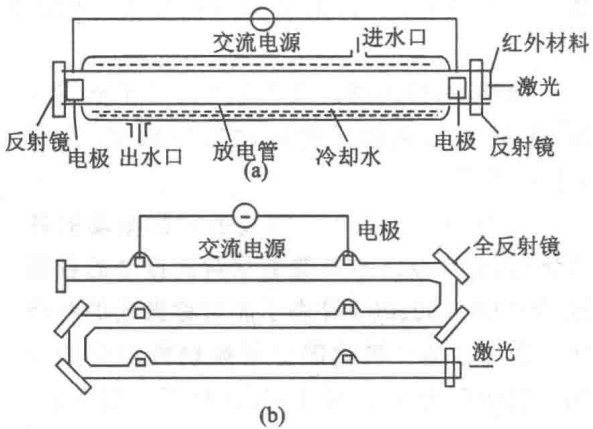


图 3-3 二氧化碳激光器的结构示意图

用的最多。输出端的反射镜可能有几种形式。第一种形式是在一块全反射镜的中心开一小孔，外面再贴上一块能透过 $10.6\ \mu\text{m}$ 波长的红外材料，激光就从这个孔输出。第二种形式使用锗或硅等能透过红外线的半导体材料做成反射镜，表面也镀上金膜，而在中央留一个小孔不镀金，效果和第一种差不多。第三种形式是用一块能透过 $10.6\ \mu\text{m}$ 波长的红外材料，加工成反射镜，再在它上面镀以适当反射率的金膜或介质膜。目前第一种形式用的较多，贴上去的红外材料有三种，一种是碱金属的氯化物，如氯化钾、氯化钠等。优点是对 $10.6\ \mu\text{m}$ 波长附近的光吸收系数很小，但机械强度低，晶体温度稍高于室温时，容易破坏，容易潮解，加工困难。另一种是锗、硅、砷化镓等半导体材料，他们有更好的加工性能，但是对 $10.6\ \mu\text{m}$ 波长附近的光的吸收系数大一些，且随温度的变化而变化，不易稳定。第三种是红外玻璃，对 $10.6\ \mu\text{m}$ 波长的光吸收系数介于前两种之间，但其导热系数差，易于破碎。

二氧化碳激光器的电源可以用射频电源、直流电源、交流电源和脉冲电源等。其中交流电源用的最为广泛。二氧化碳激光器一般都采用冷阴极，常用电极材料有镍、铝和钼。因为镍发射电子的性能比较好，溅射比较小，而且在适当温度下还有使 CO 还原为 CO_2 分子的催化作用，有利于保持功率稳定和延长寿命。因此，现在一般都采用镍做阴极材料。

(1) 普通放电管密封式激光器

如图 3-3 所示，工作气体不流动且密封在放电管内，通过管壁来冷却气体，其输出功率与管长成正比，而与放电管直径关系不大，大功率激光器可以做成折叠式(如图 3-3(b)所示)。这种纵向密封式激光器结构简单，是目前中小功率激光器最常见的一种。但它的连续输出功率不高，一般工业用功率水平大多在 500 W 以下。我国曾制成一台 32 m 长的放电管(两根 16 m 折叠管)输出功率达 1400 W 的试验装置，国外曾做成的最长试验装置约 220 m，输出功率达 8800 W。

(2) 普通放电管气体轴向流动式激光器

这种激光器的气体流动方向、放电电流方向、光轴方向在同一轴线上，如图 3-4 所示。气体从一端进入，在另一端由抽气机抽走，提高气流速度，有利于带走废热，加快冷却效果。这类激光器的输出功率一般可达 $200\ \text{W/m}$ 。

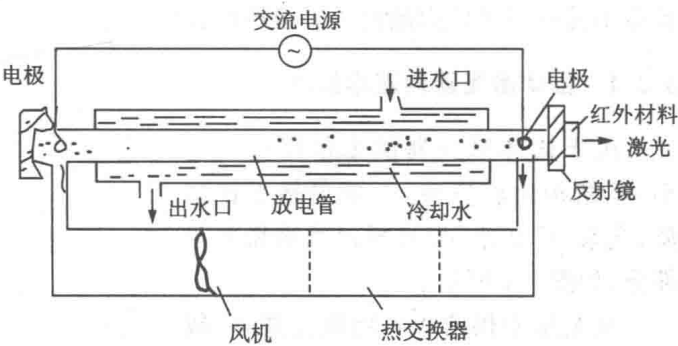


图 3-4 轴向流动式激光器

(3) 气体闭合循环横向流动式激光器

这类激光器的特点是气流方向与放电电流方向及光轴方向相互垂直，如图 3-5 所示。其主要优点是 CO_2 气体在光腔中的停留时间比轴向流动的时间短，能量密度高，因而光腔单位长度的功率大，每米输出功率可高于 1000 W。由于此类激光器功率大，占地面积小，特别适用于工业激光热处理，这类激光器近期发展较快。

3.1.2 氩离子激光器

氩离子激光器是惰性气体 Ar 通过气体放电，使氩原子电离并激发，实现粒子数反转而产