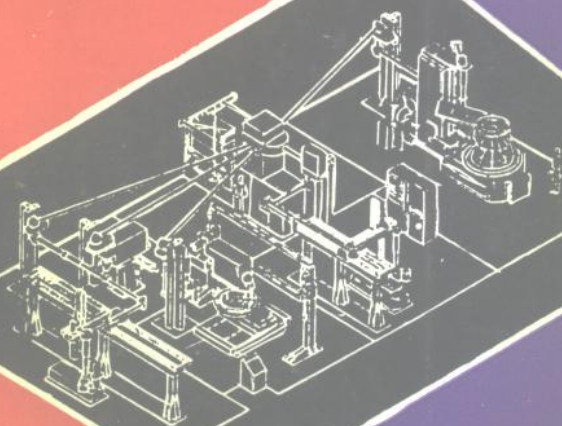


现代激光加工 及其装备

李力钧 编著



北京理工大学出版社

XIANDAI JIGUANG JIAGONG JIQI ZHUANGBEI

(京)新登字 149 号

内 容 简 介

利用激光进行加工是当前国内外迅速发展的一门制造技术,在机械制造、电子工业中得到了日益广泛的应用。现代激光加工技术的发展重点是采用千瓦以上大功率 CO_2 激光器和大功率 YAG 激光器进行的激光切割、深熔焊接和表面处理。

作者在广泛收集国内外最新资料和总结自身实践的基础上,论述了与现代激光加工有关的各个方面;论述了上述主要激光加工工艺;从激光和物质相互作用原理和激光加热过程两方面阐述了激光加工的理论基础;从激光加工工艺要求出发,讨论了加工用激光、加工用激光器、激光加工的光学系统和激光加工机等激光加工所采用的装备。

对激光加工的研究涉及激光物理学、光学、等离子体物理学、传热学、流体力学、材料学和生产工程等众多学科。本书力图从理论和实际的结合上对有关问题进行综合论述。

本书可供从事激光加工技术研究和应用的工程技术人员和有关专业高年级大学生和研究生参考。

现代激光加工及其装备

李力钧 编著

*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

湖南大学印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 8 印张 194 千字

1993 年 2 月第一版 1993 年 2 月第一次印刷

ISBN 7-81013-664-X/TN·37

印数:1--2000 册 定价:5.50 元

前 言

激光加工是一门综合技术和交叉学科,发展迅速。近年来,各种新的激光加工方法不断涌现,工业应用的规模日益扩大,人们对激光加工过程的认识也在不断深入。

近十年来,作者在国外、国内从事激光加工技术的试验研究和加工用大功率激光器的研制,深感有必要编著一本书,以最新研究和应用成果为基础,综合讨论与激光加工过程有关的各方面技术及其基本原理。

本书第 1、2 部分讨论激光加工对激光特性和激光器件的要求,以及为满足这些要求的加工用激光器的发展动向;第 3 部分讨论激光加工的光学系统,特别是 CO_2 激光的红外光学系统;第 4 部分讨论激光加工机的特点;第 5、6 两部分讨论激光加工的基础:激光和材料的相互作用和激光加热材料的原理;第 7、8、9 部分讨论几种现代重点发展的激光加工方法:切割与切削、深熔焊接和表面处理。

本书稿经下列同志评阅:赵仲黑副教授(1~3 部分),沈子信副研究员(第 5 部分),虞觉奇副教授(8、9 部分)。在图片资料准备方面,得到刘劲松等同志的帮助,在此一并表示感谢。

由于水平所限,难免缺点和错误,欢迎读者批评指正。

作 者

1992 年 11 月

目 次

绪论	1
1 加工用激光的特性	3
1.1 单色波长	3
1.2 空间分布特性	6
1.3 时间特性	21
1.4 偏振特性	23
1.5 输出功率	24
2 加工用激光器	26
2.1 二氧化碳激光器	26
2.2 YAG 激光器	36
2.3 准分子激光器	39
2.4 一氧化碳激光器	41
3 激光加工的光学系统	43
3.1 光学材料	43
3.2 聚焦光学系统	51
3.3 匀光系统	63
3.4 导光系统	73
4 激光加工机	87
4.1 激光加工机的组成	87
4.2 激光加工机的特点	89

4.3	典型激光加工机	100
4.4	激光三维焊接机	104
4.5	综合激光加工机	105
5	激光和材料的相互作用	107
5.1	概述	107
5.2	激光与材料作用的一般规律	109
5.3	金属对激光的吸收	111
5.4	非金属对激光的吸收	118
5.5	光致等离子体	121
5.6	小孔效应	127
6	激光加热	130
6.1	概述	130
6.2	静止热源问题	136
6.3	移动热源问题	144
6.3	有限差分法求数值解	153
7	激光切割和切削	161
7.1	激光切割的方式与特点	161
7.2	激光切割机理	164
7.3	激光切割参数	172
7.4	各种材料的激光切割	178
7.5	YAG 激光切割	186
7.6	激光切削	187
8	激光焊接	194
8.1	概述	194

8.2	激光深熔焊接机理·····	196
8.3	焊接工艺与参数·····	204
8.4	焊缝质量与材料的可焊性·····	213
9	激光表面处理·····	217
9.1	概述·····	217
9.2	激光相变硬化·····	218
9.3	激光熔凝处理·····	234
9.4	激光表面合金化·····	235
9.5	激光涂敷·····	238

绪论

激光自 1960 年问世以来,在加工方面的应用潜力一直受到人们的高度重视。经过多年的开发,激光加工工艺已形成系列,主要运用于电子工业和机械制造两个领域;在电子工业领域,激光加工用于电阻微调、基板划片、打标和半导体处理等;在机械制造领域,激光加工用于切割、打孔、焊接、表面处理(相变硬化、涂敷、熔凝和合金化等)、切削加工等。此外,各种新的激光加工工艺还在不断涌现,如制作三维模型、轧辊刻网纹、增强电镀、化学气相沉积、物理气相沉积、磁畴控制等。

激光加工技术的发展离不开激光器件的开发。在 70 年代中期以前,激光加工的研究和应用主要是采用固体脉冲激光器进行打孔、点焊等微细加工。这些加工技术至今仍在应用并有所发展。其主力激光器为掺钕钇铝石榴石(YAG)激光器。自 70 年代千瓦以上的大功率二氧化碳(CO_2)激光器出现以来,激光加工技术的发展重点已转入采用大功率 CO_2 激光器为主的板材切割、深熔焊接和表面处理,这也是本书要讨论的主要内容。

激光加工有热加工和“冷加工”两种。现在大量用于激光加工的 CO_2 和 YAG 激光为红外光,它们辐照在金属或非金属材料上,基于热效应,使工件升温、熔化或汽化,以完成各种加工,是为热加工。准分子激光器输出紫外光,它有可能对聚合物等非金属材料进行基于光化学作用的剥蚀加工,这种“冷加工”技术正在开发,并有可能在电子工业中得到较大程度的应用。但是,激光加工的主流还是基于热效应的加工。

激光束作为一种特种加工用能源(热源),和传统的加工用

热源相比,具有一系列特点。激光束易于传输,其时间特性和空间分布容易控制;经聚焦后,可以得到很细的光斑,具有极高的功率密度;可以加热熔化以至汽化任何材料,可进行局部区域的精细的快速加工;加工过程所输入工件的热量小,热影响区和热变形小;加工效率高;容易实现自动化。但是,激光是一种比较昂贵的能源,这主要是因为激光器的价格比较高,因而只有在那些能充分发挥激光加工高质量、高效率的特点或者是其他方法不能进行加工的情况下,采用激光加工方能取得良好的经济效果。所以,激光加工是传统加工工艺的补充和发展。

对激光加工过程的研究涉及激光物理学、光学、等离子体物理学、传热学、流体力学、材料学和生产工程等众多学科。随着人们对激光加工工艺及机理认识的深化,一门自成体系的激光加工学正在形成。

1 加工用激光的特性

激光具有很多不同于普通光的特性,通常称激光有四性:单色性、相干性、方向性和高光强。这四性本质上又可归结为激光的相干性。激光可以在很大的相干体积内有很高的相干光强。

就激光加工而言,这些特性并不是同等重要的。而且,它还必须满足特殊的要求。对于加工用激光,人们所关心的主要是:单色波长、空间特性、时间特性、偏振性和功率。

1.1 单色波长

激光具有高度的单色性。其实激光加工本身对激光的单色性并没有特别的要求,只是在用透射光学系统处理激光时,由于它的单色性而不会存在色差,是一优点。

各类激光器均输出一定波长的单色光,如表 1.1 所示。波长的大小对激光加工过程有强烈的影响,它决定激光加工的基本原理、决定物质对激光的吸收和激光束精细聚焦的极限可能性。

激光加工有热加工和“冷加工”之分,决定的因素是光子能量的大小,其值为 $\epsilon = h\nu$, h 为普朗克常数 ($6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$), ν 为光波频率。光子能量与光波频率成正比,与其波长成反比。表 1.1 给出了激光加工常用激光的光子能量。

CO_2 、 CO 、和 YAG 激光器均输出红外光。红外光的光波长而光子能量小。红外光子作用于固体物质,一般只能激发其振转能级,受激电子通过碰撞使晶格振动,导致被辐照物体温度升高,以至熔化或汽化,从而产生各种加工效果。在红外光作用下

的激光加工过程本质上都是热作用过程,即这种激光是作为特种加热工具而使用的。

表 1.1 加工用激光器的主要性能

性 能	CO ₂ 激 光 器	CO 激 光 器	YAG 激 光 器	准分子 (KrF)激光器
波长(μm)	10.6	5.4	1.06	0.249
光子能量(eV)	0.12	0.23	1.16	4.9
最高(平均)功率(W)	25000	10000	1800	250
输出方式	连续或脉冲	连续或脉冲	连续或脉冲 闪光灯或	脉冲
调制方式	气体放电	气体放电	电光调Q或 声光调Q	气体放电
脉冲功率(kW)	<10		<10 ³	<2 $\times$ 10 ⁴
脉冲频率(kHz)	<5		<1(闪光灯)或 <50(声光调Q)	<1
模 式	基模或多模		多模	多模
发散角全角(mrad)	1~3		5~20	1~3
总效率%	12	8	3	2

准分子激光器则不同,它输出紫外光,其光子能量达 5eV 的水平,高于某些物质(如聚合物)分子的结合能。物质在紫外光光子的作用下可以发生电子能带跃迁,对于某些聚合物,还可以出现互斥的电子状态,打破或削弱分子间的结合键,从而实现对该种材料进行剥蚀加工。其作用机理是光化学作用,可以排除热影响,得到极高的加工质量。

图 1.1 为采用三种典型激光在 75 μm 厚聚酰亚胺板上打出的三个 300 μm 直径孔的扫描电镜照片^[1]。图示的左、中、右三孔是分别依次用 YAG 调 Q 激光、脉冲输出快速轴流 CO₂ 激光、KrF 准分子激光打成的。可见,基于光化学作用的准分子激光

打孔,具有高的加工精度,而且对周围材料不存在任何热破坏。可惜能够应用光化学作用进行加工的工程材料不多,除聚合物外,还可部分应用于陶瓷材料的加工。对于以金属材料为主体的绝大部分工程材料,激光加工都是热作用过程,这也是本书讨论的重点。

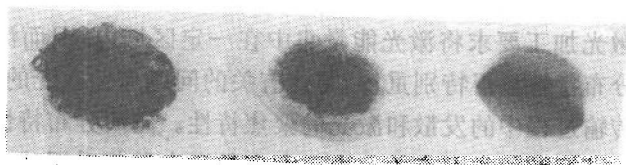


图 1.1 不同波长激光打孔比较

激光波长对激光加工的热作用过程的影响是多方面的。

首先,物质对光的吸收率与波长间有强烈的依存关系。对金属而言,一般地说,随着入射光波波长的增加,表面对光的吸收率减小,反射率增加。如果材料在激光作用下汽化,长波长激光容易形成激光维持的等离子体云,阻隔激光向工件的传输。

其次,激光波长与激光束精细聚焦的极限有关,大多数激光加工过程都需要将激光束聚焦。对于某些加工过程,聚焦越精细,激光能量越集中,效果越好。聚焦的精细程度可通过提高光学系统的质量、减少像差来提高,但最后受衍射极限的限制。衍射极限与波长成正比,波长越短,越有利于精细聚焦。

值得注意,YAG 激光所发出的 $1.06\mu\text{m}$ 波长近红外光,可以通过现有光纤传输,可以采用普通光学玻璃透射系统导光。而 CO_2 激光则不能透过光学玻璃,只能采用有限的红外透射光学材料,且不能通过光纤传输。有关问题将在后文详述。

综上所述,对于激光加工,特别是对于金属材料的激光加工,激光波长越短越有利。然而现实的情况是,激光加工中应用

最广泛的一类激光器是 CO_2 激光器,其次是 YAG 激光器。这是因为它们的输出平均功率较大、效率较高,而且 CO_2 激光器输出光束的质量比较好。

1.2 空间分布特性

激光加工要求将激光能量集中在一定区域内,因而激光的空间分布特性显得特别重要。与此有关的问题包括激光的横模、激光传输过程中的发散和激光的聚焦特性。空间分布特性与所采用的谐振腔的类型有关。由于大多数激光器都采用球面稳定腔,本节主要讨论采用稳定腔时激光的空间分布,再讨论非稳腔的特点。

1.2.1 横模

激光器都有由两个相隔一定距离的反射镜组成的谐振腔。光波在反射镜之间的多次衍射传播形成稳定的电磁场,这个电磁场只能存在于一系列分立的本征状态之中,场的每一个本征状态具有一定的振荡频率和一定的空间分布。这种谐振腔内可能存在的电磁场的本征态称为激光的模式。通常把光波场的空间分布分解为沿传播方向的分布和垂直于传播方向的横截面内的分布。分别称之为纵模和横模。

谐振腔内光场是二个镜面反射的沿相反方向的两列行波在腔内叠加而形成的驻波,而激光器输出腔外的光场则是腔内沿一个方向传播的行波透过输出镜的部分。光腔理论证明,在稳定光腔内外沿光轴传播方向的任意位置处,光场的横向分布规律不变,但光束的大小变化。光腔的横模代表了激光束光场的横向分布规律,它对激光加工影响极大。而光腔的纵模主要影响激光的频率,与激光加工关系很小。

通常用 TEM_{mn} 表示不同横模的光场分布,TEM 是横电磁

波“Transverse Electromagnetic Wave”的缩写, m, n 为小正整数。横模可以是轴对称的, 也可以是对光轴旋转对称的。对于轴对称的情况, m, n 分别表示沿两个互相垂直的座标轴光场出现暗线的次数。采用稳定腔, 典型的轴对称横模及其相应的 m, n 值如图 1.2。

实际的气体激光器, 经常运行于轴对称模式, 但也存在出现旋转对称模式的边界条件。若干旋转对称横模及其相应的 m, n 值如图 1.3。 m 表示光场沿柱座标的径向方向出现的暗环数, n 表示沿角向方向出现的暗直径数。

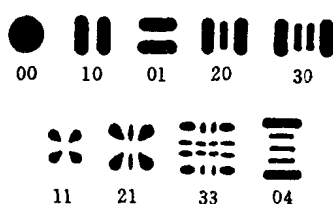


图 1.2 轴对称横模

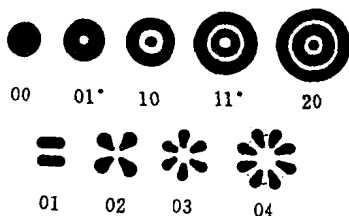


图 1.3 旋转对称横模

带 * 标记表示该旋转对称横模为两个相似的轴对称横模的叠加, 这两个轴对称横模中, 一个是另一个旋转 90° 的结果。如 TEM_{01}^* 模是轴对称 TEM_{01} 和 TEM_{10} 模的叠加。 TEM_{01}^* 模常称为环形模, 是采用非稳腔的高功率激光器经常输出的模式。

不论是轴对称还是旋转对称, 其 TEM_{00} 模是一致的, 称为基模。光波的强度与光波电矢量振幅的平方成正比。一束沿 z 方向传播的基模光束的光强可表示为

$$I(x, y, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} \exp \left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w^2(z)} \right] \quad (1.1)$$

式中 P 为激光束的功率。基模光束在任意截面内的光强分布按

高斯函数 $e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{w^2(z)}}$ 所描述的规律从中心向外平滑地降落,故称为高斯光束。由光强降落到中心值的 $1/e^2$ 的点所定义的光斑半径为 $w(z)$,在这个半径值的圆内包含了光束总能量的 86.5%。中心处最大光强为 $\frac{2P}{\pi w^2(z)}$ 。

光斑半径随传播距离 z 而增加,有

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2} = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad (1.2)$$

式中, $w_0 = \sqrt{\lambda f / \pi}$ 为腰斑半径,它处在共焦腔的中心,该中心也是 z 座标的原点, λ 为光波波长, f 为共焦腔反射镜的焦距,对于非共焦稳定腔, f 为其等效共焦腔反射镜的焦距。

由式(1.2)可见,基模高斯光束的光斑半径以(等效)共焦腔中心处的腰斑半径为最小。随着远离腔心,即随着 z 座标的增大,光斑半径加大,如图 1.4。波阵面的曲率半径为

$$R = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (1.3)$$

随着 z 的增大, R 趋近于 z 。

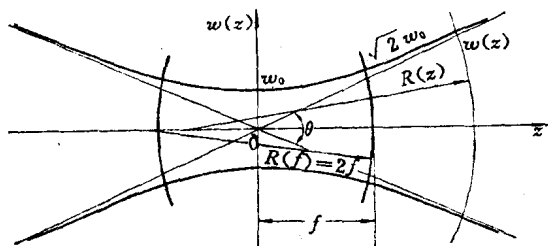


图 1.4 高斯光束及其参数

在轴对称的情况下, m, n 取不同时为零的一系列整数时,得到高阶横模 TEM_{mn} ,轴对称高阶模光束的场振幅是基模高斯光

束场振幅与厄米多项式的乘积,称为厄米-高斯光束。一般 $m \neq n$, 光束在两个座标方向的尺寸不等。定义光束在一个方向的半轴长为厄米-高斯函数最外边的拐点到中心的距离,则其在 x 方向的半轴长为相应的基模光斑半径的 $\sqrt{m + \frac{1}{2}}$ 倍,在 y 方向的半轴长为相应的基模光斑半径的 $\sqrt{n + \frac{1}{2}}$ 倍。在旋转对称的情况下,高阶模光束横断面为拉盖尔-高斯分布,定义最外边光斑光强下降至其极大值的 $1/e^2$ 处至中心的距离为光斑半径,则高阶模光斑半径近似为相应的基模光斑半径的 $\sqrt{2m + n + \frac{1}{2}}$ 倍。

上述激光模式是在假定腔内不存在激活物质的前提下导出的,它和实际的激光器输出模式有差别。气体激光器的激活物质为气体,其光学性质和增益的空间分布比较均匀,常常输出

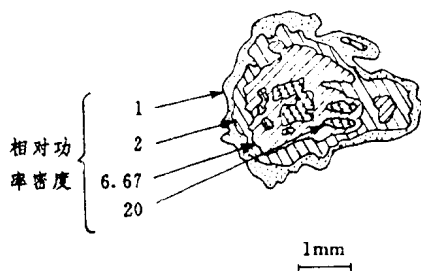


图 1.5 固体激光的光能横向分布

接近前述理想状况的横模,也可能出现若干横模叠加在一起而使光场分布变得相当复杂的情况。

对于 YAG 等固体激光器,其光能的空间分布则远为复杂,而不能用简单的数学公式描述。这是因为固体激光棒不可避免地存在很多缺陷,折射率不均匀,在光泵作用下受热而产生光程变化和双折射等。高功率固体激光器输出光束典型的横向分布图样如图 1.5^[2]。通过选模,固体激光器也可以在接近基模或低阶模下运行,但其输出功率将显著下降。

1.2.2 发散角

激光的一个重要优点在于它是高度准直的,有良好的方向性,能够远距离传输而不显著扩束并能聚焦于一个小的光斑内。实际的激光都有一定的发散,发散角的最小值由光束的衍射所决定。下面讨论这个发散角的衍射极限。

高斯光束在自由空间传输仍维持高斯光束,但其横向尺寸扩大。基模高斯光束光斑半径随传输路程的变化按式(1.2)计算,由此可求其发散角的半角为

$$\theta = \frac{dw(z)}{dz} = \frac{\lambda z}{\pi w(z)f} \quad (1.4)$$

发散角随 z 的增大而加大。在 $z=0$ 时, $\theta=0$,表明在共焦腔的中心处,即在光束的束腰处,光束是平行的。

当 $z=f$ 时, $w(f)=\sqrt{2}w_0$, $\theta=\sqrt{\lambda/(2\pi f)}$,后者是光束在共焦腔镜面处的发散角。

当 $z\rightarrow\infty$ 时,有

$$\theta_{\infty} = \frac{\lambda}{\pi w_0} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi f}} \quad (1.5)$$

发散角达最大值,称为远场发散角。

高阶横模光束的发散角比基模光束的大。对于轴对称情况, x 方向的半轴长 $x_m(z)=\sqrt{m+\frac{1}{2}}w(z)$,由式(1.4),其发散角

$\theta_m=\sqrt{m+\frac{1}{2}}\theta_{00}$, θ_{00} 为相应的基模光束的发散角。在 y 方向,有

$\theta_n=\sqrt{n+\frac{1}{2}}\theta_{00}$ 。对于旋转对称情况,则 $\theta_{mn}=\sqrt{2m+n+\frac{1}{2}}\theta_{00}$ 。

由于整个激光系统不可避免地存在各种缺陷,实际激光的发散角均大于以至远大于其衍射极限。加工用激光器光束发散角的典型值也已列入表1.1。

1.2.3 聚焦特性

在激光加工中,聚焦后的光斑尺寸常常是很重要的,它决定所能得到的功率密度和热作用区域。

高斯光束经薄透镜或球面反射镜变换后仍为高斯光束。如图 1.6 所示。

已知腰斑半径 w_0 及束腰至透镜的距离 l , 由式 (1.2)、

(1.3) 可求出透镜上的入射光斑半径 $w(l)$ 及波面 M 的曲率半径 R 。由于是薄透镜, 出射光斑半径 $w'(l) = w(l)$, 光强的高斯分布也不变, 按透镜成像变换规律, 有

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} - \frac{1}{F} \quad (1.6)$$

式中 F 为透镜焦距。

已知出射光斑半径 $w'(l)$ 及像方波面 M' 的曲率半径 R' , 即可求出像方腰斑半径 w'_0 及其与透镜的距离 l' , 有

$$\frac{1}{w'^2_0} = \frac{1}{w^2_0} \left(1 - \frac{l}{F} \right)^2 + \frac{1}{F^2} \left(\frac{\pi w_0}{\lambda} \right)^2 \quad (1.7)$$

$$l' = F + \frac{(l - F)F^2}{(l - F)^2 + f^2} \quad (1.8)$$

对于 $l \gg F$ 的通常情况, 有

$$w'_0 \approx \frac{\lambda F}{\pi w(l)} \quad (1.9)$$

$$l' \approx F \quad (1.10)$$

以上计算以整个高斯光束不受阻碍地通过聚焦透镜为前提。理论上高斯光束断面扩展至无穷空间。实际上透镜的孔径

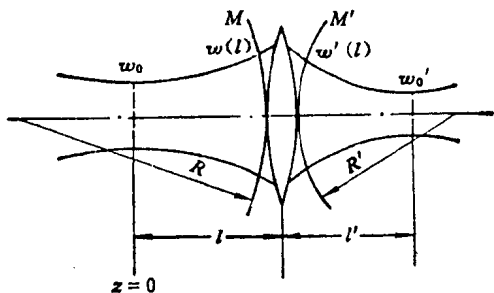


图 1.6 薄透镜对高斯光束的变换