

激光在工艺中的应用

〔苏〕Ф.Ф.沃道瓦托夫 В.П.维依柯 著
А.А.契尔南 М.Н.利宾逊

机械工业出版社



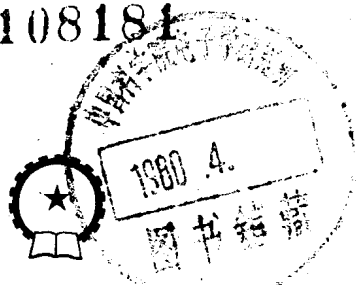
73.77184
234

激光在工艺中的应用

〔苏〕 Ф. Ф. 沃道瓦托夫 B. П. 维依柯 著
A. A. 契尔南 M. H. 利宾逊

朱裕栋 译 缪家鼎 校

1108181



机械工业出版社

本书论述激光在材料加工和焊接工艺中的应用,包括激光焊接、打孔、切割及薄膜加工等。书中阐明了激光工艺的物理过程,介绍了几种有关的工艺设备,并对激光工艺的现况和前景作了综述。

本书可供有关激光加工的工人、技术人员和高等学校师生参考。

Лазеры В Технологии

Ф. Ф. Годоватов

А. А. Чельный

В. П. Вейко

М. Н. Либенсон

《Энергия》 1975

* * *

激光在工艺中的应用

[苏] Ф. Ф. 沃道瓦托夫 В. П. 维依柯

А. А. 契尔南 М. Н. 利宾逊 著

朱裕栋 译 缪家鼎 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 6¹/₂·字数 142 千字

1980年3月北京第一版·1980年3月北京第一次印刷

印数 00,001—11,000·定价 0.53 元

*

统一书号: 15033·4755

152/31



前言

最近十余年，用激光对被加工材料的局部加热工艺大有发展。现在可以充分肯定，用于材料加工和焊接工艺中的这种新方法已经完全成熟，并被赋予一个专门的术语——“激光工艺”。已经研究了这种新工艺的基本的物理现象，掌握了成批生产有关设备的技术，解决了工业上一系列重大的工艺问题。激光的应用，将显著地提高劳动生产率，改进产品质量，提高产品可靠性。如今，某些生产项目已非用激光不可。激光早已用作集成电路的电阻微调；一些生产金刚石拉丝模、钟表用宝石、电真空器件、继电器等产品的企业也都离不开激光。

各类专业人员（工艺师、设计师、研究工作者）越来越重视激光工艺，他们迫切需要一种专门文献，以求迅速掌握这方面的基本知识。

有关激光工艺的主要资料，大都分散在各种期刊的文章和报导中，初学者自然不易查阅。几种可供使用的专门著作仅论述了用激光控制尺寸的问题。其中值得推荐的有С. И. 阿尼西莫夫（Анисимова）等人合写的《大功率辐射对金属的作用》一书（苏联科学出版社，1970年），它可视为激光加工的物理基础的良好导论。但此书并不涉及激光在工艺中的实际应用。前几年出版的В. М. 苏敏诺夫（Суминова）等人所著《零件的激光加工》一书（苏联机械制造出版社，1969年），着重介绍了激光在打孔方面的应用，只局限于反映这一

项目的研究成果。此书问世以来,工艺发展的步伐较快,自然又有了许多新成果,但在专门著作中尚无足够的反映。关于用激光控制尺寸时在加工中的物理和工艺问题的一些新成果,在B. П. 维依柯和M. H. 利宾逊 (Вейко, Либенсона) 合著的《激光加工》一书中已作介绍。至于激光焊接和激光工艺设备的问题,迄今仍无专著论及。另外虽还出了几种激光工艺的小册子〔3~7、119〕[⊖],但有的只是谈到几个狭隘的专题,有的已经过时;当初的印数又少,即使想用也不易查到。

本书作者竭力想填补激光工艺文献上的现有空白,以期有关的专业人员提供激光工艺方法的概念,并使他们熟悉这种新工艺的特点、现状和主要的问题。全书内容可分三部分:工艺设备;激光工艺的物理基础;几种具体的工艺过程。

设备一章介绍了激光工艺装置的工作原理及主要部件结构的一般知识。至于激光器的构造,作者仅限于叙述本领域内所用的一些器件,着重说明它们应用于工艺时所特有的性能。有关激光器的比较详细和完整的资料,可参阅近年出版的几种专门著作〔8~11〕。

在阐述用激光加工材料时所发生的物理过程的章节中,作者力图做到内容系统化,并集中列出分析和实验的结果,以利读者对这些过程有个总的概念。同时分析了若干工艺项目的特点,包括焊接、打孔和切割。此外还介绍了某些计算关系,以供估计辐射的必要参量、焊接时的熔化深度、加工孔的深度和直径,以及实践中需要决定的其他数据。

⊖ 方括内的数字为参考资料序号——译者。

在介绍具体的工艺过程（焊接、打孔、薄膜加工、切割）的几章中，讨论了使用各种激光器的可能性，列举了实际应用的例子，提供了选择加工方式的建议，叙述了几种专门的工艺装置。

本书并不企求对迄今所发表的有关激光工艺的全部资料作综合分析，也不包罗原则上可望采用激光工艺的一切领域。作者以各自的工作成果为依据，同时参考其他的文献资料，力求对激光工艺的潜力作一概述，着重介绍了激光在工艺中应用的几个发展较快和普及较广的方面。必须指出，书中对这几种激光加工问题的叙述，深度并不相同，因为在某些问题上作者的经验有限，而现有的一些参考文献也往往满足不了这方面的要求。

本书第一章由А. А. 契尔南〔Чельный (§ 1-1, 1-2, 1-5)〕和 Ф. Ф. 沃道瓦托夫〔Воловатовым (§ 1-3, 1-4)〕合写；第二章由М. Н. 利宾逊编写。三、四两章主要由契尔南写成（其中 § 4-1及 § 4-3与М. Н. 利宾逊合写）；第五章由В. П. 维依柯主编（§ 5-1与М. Н. 利宾逊合写，§ 5-2与Ф. Ф. 沃道瓦托夫合写，§ 5-3与А. А. 契尔南合写）；第六章由Ф. Ф. 沃道瓦托夫撰写。

本书编写过程中，承Я. А. 依玛斯（Имас）、В. С. 阿列依尼科夫（Алейников）、В. М. 瓦库林柯（Вакуленко）和Э. Н. 索鲍列夫（Соболев）等多次提出建议和意见，给予极大帮助，作者谨向他们深表谢意。Т. Н. 列肖特尼科夫（Решетникову）积极参加了手稿的整理，也谨此一并致谢。

作 者

目 录

前言

第一章 激光工艺设备	1
1-1 激光工艺装置的结构原理	1
1-2 固体激光器	3
1-3 气体激光器	10
1-4 电源	18
1-5 激光工艺装置的光学系统	28
第二章 激光加工材料的物理过程	39
2-1 光的吸收及能量的传输	39
2-2 材料的无损伤加热	42
2-3 材料的破坏	51
2-4 金属在激光作用下熔化的某些特点	61
2-5 不稳定蒸发	65
2-6 激光切割的物理过程的某些特点	69
第三章 焊接	81
3-1 激光在焊接中用作加热源的一些特性	81
3-2 辐射特性对焊接结果的影响	86
3-3 金属丝的焊接	88
3-4 块状零件和片状零件的焊接	93
3-5 激光焊接装置	99
第四章 打孔	104
4-1 在非透明材料上打孔	104
4-2 用单脉冲打孔的精度	111
4-3 多脉冲加工法	119

VI

4-4	用激光制作金刚石拉丝模	128
4-5	钟表用宝石的激光打孔	135
第五章	薄膜加工	139
5-1	激光和金属薄膜相互作用的特点	139
5-2	薄膜电阻器的微调	145
5-3	在薄膜上制作图案	154
第六章	材料切割	162
6-1	材料激光切割规范的计算	163
6-2	激光气割	172
6-3	用热应力法切割脆性介质材料	181
6-4	激光切割装置	186
结束语		191
参考资料		195

第一章 激光工艺设备

1-1 激光工艺装置的结构原理

材料加工和焊接，一般都用固体和气体激光器。激光工艺装置不论其所用的激光器类型和用途如何，主要构件大都类似，结构原理也基本相同（图1-1）。激光器1是保证加工过程的主要能源。激光2通过光学系统3形成具有一定空间特性的光束，投射到工件

4上。利用光学系统，尚可对工件与光线的相对位置作目视检查，观察工件加工过程，评价加工结果。工件的固定和位移装置5可把工件以必要的精度固定在工作位置上，保证其在加工过程中的位移和工序结束后的更替。

有些加工和焊接过程，要求对工作区域输送某种工艺介质（例如惰性气体），此时可在装置中设一相应的附件6。有时，

为了求得必要的工艺效果，须对加工区域施加补充能量（机械能、电磁能等等），以便更好地实现加工过程（即综合

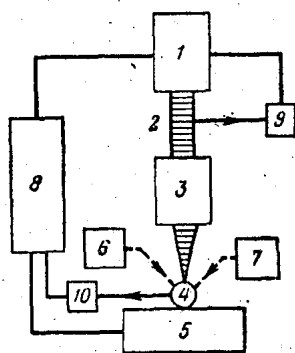


图1-1 激光工艺装置的结构原理

- 1—激光器 2—激光 3—光学系统 4—工件 5—工件的固定和位移装置 6—工艺介质的输送系统 7—辅助能源 8—程序装置 9—辐射参数传感器 10—工艺过程参数传感器

法)。这时则应增加辅助能源7。气体激光切割、激光电火花打孔等加工，都是应用综合法的例子。装置中可配备程序装置8来控制工件的位移和激光的辐射。传感器9供检测辐射的各种参数。工艺过程参数传感器10则供检查加工区域的温度、工件的表面状况及等离子体区的发光亮度，并向控制装置发出改变辐射参数或中断该工序的信号。

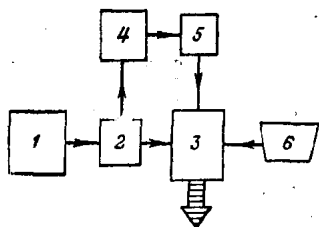


图1-2 脉冲固体激光器结构

1—电源 2—储能电容 3—辐射器 4—控制系统 5—触发器 6—冷却系统

现在来介绍激光器的结构原理。图1-2是一脉冲固体激光器的结构图。

电源1对储能电容2充电，储能电容则向辐射器3的脉冲泵浦灯供电。控制系统4可调整 and 显示电容的电压，控制储能电容的充电和脉冲灯触发器5的工作。触发器可保证处于储能电容电压下的脉冲灯的放电间隔。冷却系统6的作用是排除辐射器各元件在脉冲灯工作时所受的热。图1-3所示是一低速抽运气体的激光器结构图。工作混合气体的传输系统1保证对辐射器2的气体放电管充入一定成分的混合气。用预真空泵4建立管内所要求的真空。辐射器的气体放电管由电源3供电，后者包含控制和

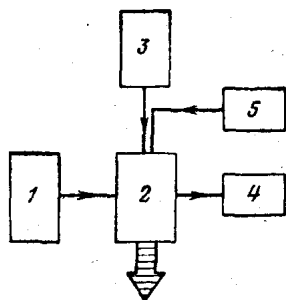


图1-3 气体激光器结构

1—工作混合气体输送系统 2—辐射器 3—电源 4—预真空泵 5—冷却系统

调节辐射状态用的组件。放电管用冷却系统 5 冷却。在辐射器中同样可利用具有必需的混合气体的密封气体放电管。在这种场合下，图 1-3 所示结构中就没有充气系统 1 和预真空泵 4。

1-2 固体激光器

固体激光器可分三个主要部分：工作物质、照明系统和谐振腔。

在现有的带固体激光器的工艺装置中，都用红宝石棒、钕玻璃棒和钇铝石榴石棒作为工作物质〔12〕。红宝石在最初几批激光加工及焊接装置中用得较广〔5〕，但近几年来已被更有发展前途的材料——钕玻璃和钇铝石榴石所排挤。这些材料比红宝石优越，它们的激励阈值较小，能够保证激光器的较高效率。由于这个优点，便可降低泵浦的工作能量，显著延长脉冲灯的寿命，减小电源的轮廓尺寸。

与红宝石激光器相比，温度对钕玻璃和钇铝石榴石激光器的辐射参数影响较少。这就使它们有较高的稳定性，也便于解决工作物质的冷却问题，因而也不必十分担心温度的稳定性了。

用钕玻璃和钇铝石榴石晶体做工作物质，促进了激光工艺的实际应用。

钕玻璃和钇铝石榴石晶体激光器均可产生同一波长（1.06微米）的辐射。在工业装置中，它们的效率彼此接近（1.5~2%）。

钕玻璃激光棒具有较高的光学均匀性，因此，在各种固体激光器中，玻璃激光器的辐射结构最完善，光线的发散角也最小。由于这一优点，钕玻璃便较适用于要求对材料作特

殊的局部照射的精密加工的场合，例如小直径（5~20微米）打孔。

钽玻璃的另一优点是能够制作很大尺寸且光学性能良好的工作物质，而要拉制这样大尺寸的晶体工作物质是很难达到的。在工业用工艺装置的激光器中，激光棒的长度可达260毫米（直径10~15毫米）。所以，如果激光棒的寿命为 10^6 次闪光，便可获得能量为数十焦耳的脉冲。钽玻璃的缺点是导热性比晶体低。这就严重影响了光学泵浦过程中工作物质受热后热量的排除，限制了泵浦的平均功率和脉冲的重复率。工艺装置用钽玻璃激光器的脉冲重复率一般不超过几赫（有时仅为1赫）。这对完成点焊工序和不少打孔操作已完全足够。但对缝焊和切割说来，用玻璃激光器却不经济，往往限于其脉冲的重复率低，故生产率不高。

钇铝石榴石比钽玻璃有较大的导热性，且膨胀系数较小，机械强度较高，所以，钇铝石榴石晶体能承受极大的热负荷而不致受损。这样就使泵浦脉冲的重复率有可能提高十倍或更多。从而有可能制造脉冲重复率为10~100赫和平均辐射功率为100瓦左右的经济实用的缝焊和切割装置。

由于钇铝石榴石的热物理性能好、激励阈值低，故可实现连续泵浦。并且，在自由振荡状态下，连续辐射的功率可达100瓦，这就为切割和焊接上的应用进一步创造了条件。连续泵浦时用声光Q开关，在峰值功率1~5千瓦、平均功率50瓦以内，可取得极高的脉冲重复率（1~40赫）。这样的辐射特性，可确保薄膜加工及半导体材料刻槽的高效率〔13、14〕。

在如何合理使用钽玻璃和钇铝石榴石的问题上，必须考虑后者的成本较高。显然，在重复率1~5赫已足够的场合

下，宜用钽玻璃作工作物质。

对脉冲灯和反射器组成的泵浦照明系统应考虑的特性有：脉冲灯的辐射在工作物质上的会聚效率；光场的均匀程度；灯和反射器的寿命。工艺装置中用得较广的是直管或脉冲灯和圆柱形反射器的照明系统(图1-4, a~1)。这种系统

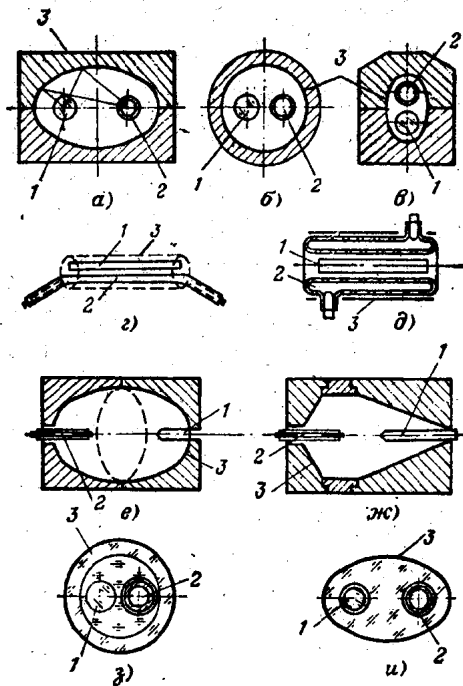


图1-4 固体激光器光学泵浦用照明系统图

1—工作物质 2—脉冲灯 3—照明腔(聚光腔)

的辐射利用率大。但因系统的结构不对称，致使光场也不对称，造成激光的结构也不均匀。这就会降低加工精度。因此，设计者在研制某些装置时，宁愿降低效率上的要求，而仍采用对称的照明器。例如，在《Квант-3》型装置中的成套激

光头之一中, 采用真空同轴管型灯 ИФПП-7000, 靠环形放电来保证工作物质的对称照明 (图1-4, б)。但是, 这个激光头的效率, 要比装置中另一个采用照明系统结构的激光头 (见图1-4, в) 低两三倍。

激光装置在工业上的应用, 须加考虑的一个决定性因素是脉冲灯的寿命长短, 它和激光头的效率密切相关[⊖]。因此, 目前用得最广的乃是将工作物质与脉冲灯平行排列的单管照明器。苏联近几年制成的一些装置, 是用玻璃块或石英块作照明腔 (图1-4, у)。看来, 在工艺装置中较有前途的, 乃是工作物质和脉冲灯置于同一轴线上、反射器为一旋转椭圆体或由锥面构成的照明器 (图1-4, е、ж)。这类照明器既可保证高的辐射利用率, 也可保证泵浦对称的光场。

照明器的效率在很大程度上取决于反射器的反射系数 R 。液体冷却时, 一般都用镀银反射器 ($R = 0.9 \sim 0.94$)。反射器做成玻璃或石英管 (或块), 外表面镀银或氧化镁, 则其寿命和效率最大[15]。这时反射面不与冷却液接触。

表 1-1 列出苏产工艺装置所用的几种脉冲灯的特性。灯管工作状态的参数和寿命与装置中所完成的具体工序有关。必须指出, 这些规范与灯管说明书上的规定相比, 要求降低了些, 所以灯管的实际寿命一般高于保险的寿命。应该注意, 说明书中所列的灯管寿命, 是指管子在不变的泵浦电压下发光能量 (闪光能量) 降低到起始值25%时所经过的时间。在激光工艺装置中, 因为必须保持激光的能量恒定不变, 所以泵浦电压一般是随着灯管的老化逐渐提高的, 直至该装置达到泵浦的极限电压 (可能接近于灯管的自击穿电压) 时才更

⊖ 脉冲灯的电负荷较小时, 照明器的效率越高, 便越能保证获得某种泵浦的光能, 从而有利于延长管子的寿命。

表1-1 泵浦脉冲灯特性

管 型	灯管直径 及电极距 (毫米)	激光装置 类 型	电容 器容 量 (微法)	起始工 作电压 (千伏)	极限 电压 (千伏)	放电持 续时间 (微秒)	脉冲 频率 (赫)	寿命 (一千 次闪光)	激光辐 射能量 (焦耳)
ИФП-800	7 × 80	Корунд	100	0.9	1.25	0.2	5	500	0.3
		Квант-11	75	0.6	1.0	0.2	100	2500	0.2
ИФП-1200	7 × 120	Квант-9	800	1.3	1.7	0.7	1	100	8.0
ИФП-5000	11 × 250	Квант-9	800	0.7	1.7	0.7	1	200	2.0
		Квант-10	2000	1.7	2.2	6.0	1	300	15.0

换管子。这就充分利用了灯管的物理寿命（比说明书规定的寿命长得多）。

激光器的谐振腔决定着激光的空间结构、光谱成分和方向性〔9, 11, 17〕。工艺装置中的谐振腔反射镜，既有平面的也有球面的。要求激光的发散度小，因而聚焦光束的直径也较小的工艺过程，一般都用平面反射镜。辐射的结构要能保证平面反射镜的平行度不小于 $10''$ ，且长期保持良好的校正。增大谐振腔的长度，由于衍射损失增多而减小了横模振荡的品质因数，从而可使发散度减小，便于在加工表面上获得光点的最小直径。多数工艺装置的谐振腔长度为300~500毫米。按照不同的泵浦能量，红宝石及钇铝石榴石的辐射发散角的变化范围为 $5' \sim 30'$ ，钽玻璃的辐射发散角的变化范围则为 $1' \sim 10'$ 。

当加工表面上要求激光作用区域的直径超过0.1毫米时，宜用凹球面反射镜。增大横模振荡的品质因数，有助于提高振荡器的效率，改善激光沿光束截面分布的均匀性。这时辐射的发散度就较大（达 $1^\circ \sim 1.5^\circ$ ）。

反射镜类型选得是否恰当，对激光脉冲时间特性也有极大影响。采用平面反射镜时，通常呈现为一束混乱的尖峰。

若用球面反射镜，则视其曲率、相互位置和泵浦能量的不同，按时间而言的脉冲形式便会呈现为许多衰减的或不衰减的有规则尖峰；也可能呈现无尖峰波形。

对谐振腔反射镜的基本要求是：反射率要高，吸收系数要最小。谐振腔的品质因数和反射镜耐辐射作用的强度取决于这两种参数。在可见和近红外谱段，用真空蒸发或真空阴极溅射对玻璃或石英底板镀多层介质干涉膜，即可满足这个要求。

选择谐振腔输出反射镜的反射率，要考虑到工作物质的类型、长度和泵浦条件。在激光工艺装置中，反射率一般为50~80%。谐振腔的第二个反射镜的反射率要力求最大，通常在98~99.5%之间。干涉反射镜的吸收系数不超过0.3%。

图1-5所示是一固体激光器的构造。其主要元件均安装在牢固的基座上。为了精确校正谐振腔反射镜的平行度和共

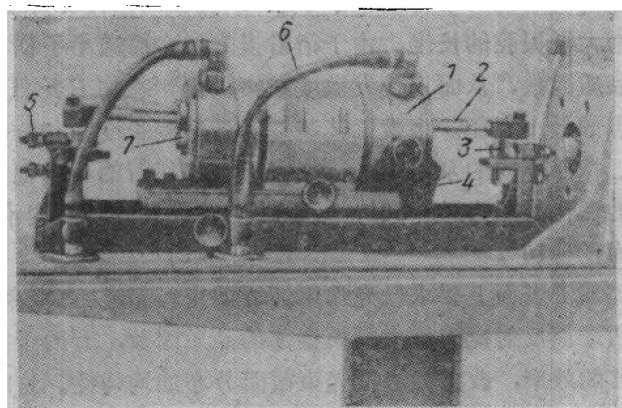


图1-5 固体激光器（装置《Квант-9》）

- 1—照明腔 2—脉冲灯 3—谐振腔反射镜 4—照明腔的校正机构
5—谐振腔反射镜的校正机构 6—冷却管
7—固定工作物质用的环形螺帽

轴度，设有校正机构 4 和 5，它们各用一个可靠的固定器来保证校正始终不变。谐振腔的反射镜 3 一般安装得与光线的轴偏心。如果反射镜直径大于光线直径 3 ~ 4 倍并围绕自己的轴转动，便可逐步做到利用反射镜的全部面积，即在光线的作用位置上发生反射涂层损伤时，可把反射镜转动一个角度，因而能延长反射镜的寿命 6 ~ 10 倍。

固体激光器在原理和结构上的许多问题都与其辐射器工作的热状态有关，后者则由泵浦功率和工作物质的冷却效能所决定。由于泵浦灯的辐射加热的结果，使辐射器的温度普遍提高了。又因光场是集中在工作物质的正中，其表面经过强烈冷却，从而使中心区的温度较高。工作物质的温度增高，会降低它的光谱和发光性能，因为这时振荡的线宽增大，放大系数降低，亚稳能级上的寿命缩短，结果减小了发光的量子输出。这样就要引起振荡阈值的增大和输出能量的减少。工作物质的温度普遍提高，特别会影响到红宝石激光器的辐射特性，所以，对于这类激光器的冷却系统，要求使工作物质保持在 15 ~ 20℃ 的平均温度间。在泵浦功率约为几个千瓦的石榴石激光器和钕玻璃激光器中，工作物质的一般加热对其光谱-发光性能影响不大。

工作物质受热不匀，可使通过激光棒的中心和边缘的光线的光程大有差别。这种差别是由于折射率与温度有关以及工作物质不均匀线性膨胀所造成。这相当于有了一个正透镜，利于减小减光器谐振腔内的衍射损耗。

在泵浦功率小的情况下，以及在激光器工作的最初瞬间，这种透镜的焦距很大，对谐振腔品质因数的影响不显著。工作物质在承受泵浦脉冲加热的过程中，沿其截面的温差逐渐提高，焦距逐渐减小，衍射损耗逐渐降低。衍射损耗

1108181