

· 参考资料

激光

(激光在工、农、医方面的应用专集)

第七集

科学技术文献出版社重庆分社

目 录

激光加工的现状和发展.....	(1)
激光加工透明介质的动力学.....	(6)
固体激光器的基模辐射.....	(11)
激光打孔过程中运动热源动力学.....	(17)
高强度激光引起的固体材料汽化和爆炸.....	(26)
用大功率CO ₂ 激光器加工金属.....	(31)
大功率CO ₂ 气体激光加工机.....	(38)
金属的高功率激光切割.....	(43)
用CO ₂ 激光器进行薄钢板的高速焊接.....	(46)
模拟核反应堆燃料组件的激光焊接.....	(49)
激光打孔.....	(57)
用YAG激光器进行精加工.....	(65)
采用激光密封的微电子封装.....	(69)
激光, 加工陶瓷的新型工具.....	(70)
激光切纸.....	(73)
激光器在频谱分析中的应用.....	(79)
程序控制用的激光喇曼光谱计.....	(84)
用激光辐射进行钢表面的局部硬化.....	(88)
激光辐射作用下提高钢硬度和耐磨性的研究.....	(92)
超声全息照相及无损检验.....	(96)
测量纤维直径的相干光学方法.....	(103)
* * *	
激光在农业上的应用.....	(106)
用激光防除杂草.....	(109)
激光应用在除虫除草方面的可能性.....	(110)
通过激光活化植物色素在田间控制植物生长和发育.....	(113)
激光辐照细胞后对其细胞遗传学影响的研究.....	(116)

激光在生物学研究中的应用.....	(119)
-------------------	-------

* * *

激光在医学和牙科学中的应用.....	(126)
--------------------	-------

激光在外科中的应用.....	(131)
----------------	-------

激光外科器械的光学工程.....	(134)
------------------	-------

激光器作为肿瘤学研究的工具.....	(138)
--------------------	-------

激光在癌症研究中的应用.....	(139)
------------------	-------

激光用于根管治疗——初步研究.....	(142)
---------------------	-------

激光用于根管治疗——第二部分.....	(144)
---------------------	-------

义齿修复的激光焊接(初步报告).....	(145)
----------------------	-------

二氧化碳激光对牙的打孔作用.....	(146)
--------------------	-------

激光防止牙齿龋坏.....	(148)
---------------	-------

激光治疗青光眼.....	(148)
--------------	-------

* * *

用激光器测量光速.....	(149)
---------------	-------

用激光束测光速.....	(154)
--------------	-------

由直接测量甲烷稳定的激光的频率和波长得到光速.....	(156)
-----------------------------	-------

利用激光测量地震.....	(158)
---------------	-------

用激光探测岩石的状态.....	(163)
-----------------	-------

激光加工的现状和发展*

1. 激光加工种类

所谓激光加工,就是将平行性很好的高功率激光通过透镜等光学系统聚焦到待加工表面,使其部分材料蒸发或熔化而进行的一种热加工。目前,试图将此方法应用到各种微小的加工以及难加工材料的加工中去。

当平行性好的激光经过透镜聚焦时,从理论上讲可以将光束聚焦到1微米左右的小光点。光束集中到非常小面积上,因而在此面上能量就集中,功率密度也就很高。

将待加工的材料放在通过透镜聚焦的焦点位置上时,那一部分材料就吸收激光而被加热。据推测,这时能达到10000℃以上的高温。因此,无论是哪一种材料只要放在焦点位置上,几乎都是瞬间熔化或者蒸发了。激光加工就是应用这种现象。

激光加工时如图1所示,供给加工面的功率密度达 10^7 — 10^8 瓦/厘米²,比其它加工法竟高几个数量级。对于各种加工方法,每单位面积上供给的功率越多,可以切削的体积就越大,图1示出了这种比切削体积速度与功率密度的关系。

通常,作为一般加工法的切削加工,由于供给的

功率密度不那么高而比切削体积速度却相当高,因此就加工效率来说是很好的加工法。与此相反,激光加工由于供给每单位面积的功率非常高,而比切削体积速度却很小,因此是一种加工效率很差的加工法。

但是,如果着眼于供给功率密度高这点上,那末,激光加工适用于对小面积的精密加工以及采用传统加工法难以加工的材料,诸如高熔点材料、耐热合金或者陶瓷、金刚石之类的硬脆材料的加工。

激光器大致分为固体、气体、液体和半导体激光器几类。半导体激光器也属于固体激光器,然而由于它的振荡方式略有不同,因而通常又另立一类。

激光器种类繁多,其中,用于材料加工方面的主要有:红宝石、钇铝石榴石($Y_3Al_5O_{12}$)、玻璃、钨酸钙($CaWO_4$)等固体激光器和CO₂激光器等气体激光器,其中一部分加工也可应用Ar或He-Ne激光器。半导体激光器和液体激光器,由于到目前为止功率很小,不能为加工应用。表1给出了可用作加工的各种激光器性能的比较。

就激光器加工的种类而论,可以举出以下种种加工:

1) 拉丝用的金刚石拉丝模、钟表用的轴承、陶

瓷等非金属材料的打孔,超硬合金和不锈钢等金属的打孔;

2) 各种金属、木材、纸张、布匹、皮革、塑料、陶瓷等的切割;

3) 半导体和陶瓷等的划线;

4) 电阻器的修整;

5) 调转子的动平衡;

6) 金属丝和板的焊接或象玻璃那样的非金属材料的焊接;

7) 表面淬火、熔区精炼等加工处理;等等。

图2 将这些激光器加工分成几种加工类别,分别给出各自在哪一个能量范围内可以应用。

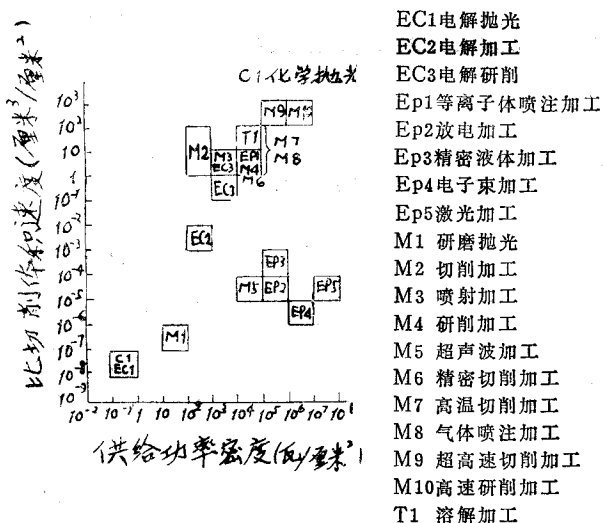


图1.精密加工的位置

表1 加工用的激光器种类

种 类		主要材料	激活离子	激光波长 (微米)	振荡方式
固 体	红 宝 石	Al_2O_3	Cr^{3+}	06943	脉冲
	钇铝石榴石	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Nd^{3+}	1065	脉冲、连续
	玻 璃	玻 璃			
	CaWO_4	CaWO_4			
气 体	CO_2	$\text{CO}_2\text{-He-N}_2$	CO_2	1063	连续

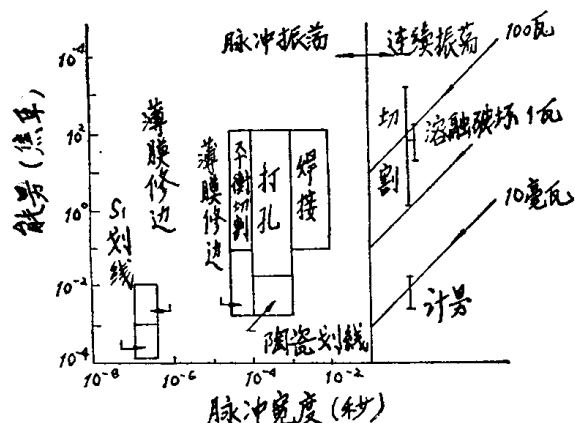


图2. 激光加工的种类

2. 激光加工机

脉冲振荡红宝石激光器，目前已研制出有最大功率超过1千焦耳的设备，然而，通常仍以20焦耳左右为多。但是，就精密加工而言，这样的功率已完全够了。对于红宝石激光器，由于功率随着多次振荡和晶体棒温度的上升而下降，因此目前的振荡频率以1赫为限。

对此，常温下作为连续振荡固体激光器的材料有钇铝石榴石晶体。而且，钇铝石榴石激光器通过Q开关有可能产生10千赫以上的重复脉冲振荡，与红宝石激光器相比，它的优点看来比较多，它的发展前途大。

红宝石激光器每一个脉冲的能量大，因此，每一个脉冲的加工量大。另一方面，钇铝石榴石激光器每一个脉冲的能量小，但是由于它的重复频率高，因此这种激光器就能获得较高的加工量。玻璃激光器的优点，是玻璃棒容易制作，但是在加工内容方面和红宝石激光器差不多或者可用钇铝石榴石激光器代替。

气体激光器，通常是连续振荡的，实质上对于加工并不利。作为加工机使用需要大功率设备，与固体激光器相比，不管怎么说设备大总是一个缺点。但是，最近出现功率超过10瓩的大功率 CO_2 激光器，

从而使高速切割钢板或焊接都成为可能，于是对于激光加工来说可能开辟新的加工领域。另外，玻璃、木材、纸、布匹、塑料等对于 CO_2 激光吸收很好，因此还将开辟高速切割这些非金属材料加工领域。

作为典型的固体激光器的红宝石激光加工机如图3所示。图4给出了它的结构。激光加工机根据用途不同有所区别，但它的主要部分仍由激光振荡部分、电源部分、冷却系统、对准和观察用的光学系统、加工台等部分组成。

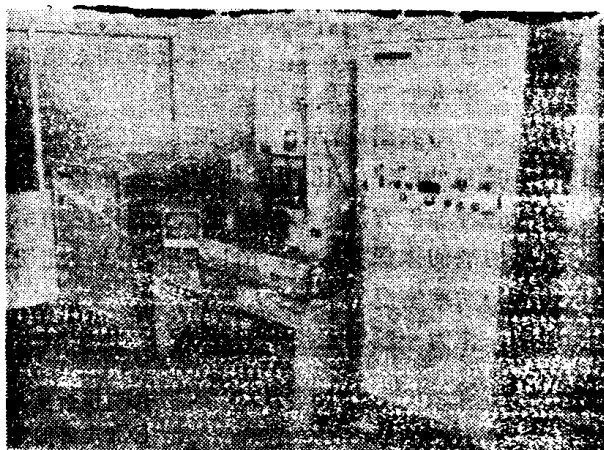


图3. 红宝石激光加工机（日本东芝公司制LAR-502型）

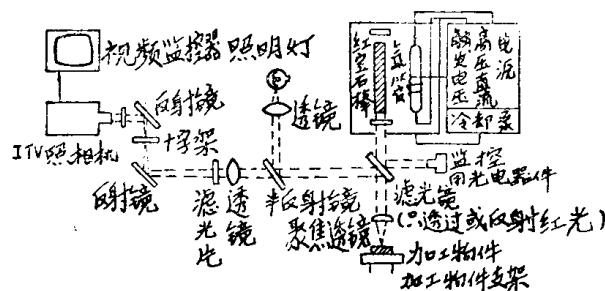


图4. 红宝石激光器加工机的结构

CO_2 激光加工机的结构和固体激光器的设备几乎一样。然而，通常 CO_2 激光器的功率与激光管的长度成正比，因此欲获得大功率输出，管的长度应当加长。另外，振荡波长较长，为10.6微米，所以反射

镜和透镜应采用Ge、GaAs、NaCl、KCl等特殊材料制作。

进行切割和焊接时，加工点的移动最通常的一种是使加工物移动，但是，如图5所示，最近还研制出使激光器移动：即用两个平面镜移动，用大口径的凹面镜转动。

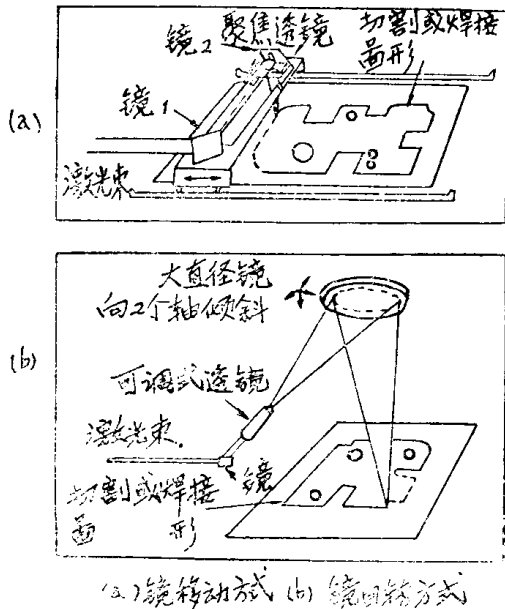


图5.激光束的偏向方法

3. 激光打孔

采用连续振荡或脉冲振荡的激光器都有可能进行激光打孔，但考虑到热传导时，采用脉冲加热的加工是有效的。还有，热影响区也小，但是，应用脉冲振荡的激光器进行打孔时，一次照射孔的深度不深，因此需要反复照射进行加深。

在激光打孔中，聚焦用的透镜焦距、焦点位置、照射能量对被加工孔的深度、加工量和孔的形状有很大影响。因此应当选择适宜的加工材料和尺寸或者根据加工目的选择适宜的加工条件。

在激光打孔加工中，达到实际应用的有拉丝用的金刚石拉丝模的孔和钟表轴承的孔。对于金刚石拉丝模打孔来说，因为用激光加工很容易得到的圆锥状孔，再用激光对孔下缘加工，然后进行抛光。

对于金刚石拉丝模打孔而言，主要采用红宝石激光器，但是如果激光器照射能量过分加大，金刚石就有破裂危险，因此要降低照射能量，必须反复进行照射。目前可用于0.05~1毫米直径的拉模孔的加工，与过去的机械加工法相比较，激光加工时间就可大幅度缩短。今后，为了进行更微小直径的打孔，或者为了进一步提高加工效率起见，趋于采用钕铝石榴石激光器。图6示出了采用红宝石激光器、一边转动金

石一边打孔时的孔形状的实例。



图6. 金刚石打孔

大部分用于钟表轴承的宝石都是人造红宝石，孔的尺寸、形状也是各种各样的，但最常用的是在直径1毫米、厚0.3毫米的宝石中心打出直径为70微米的孔。因此，对于下孔加工来说，把加工余量考虑在内将需要有40~60微米大的直孔。最早利用激光对钟表轴承打孔的是瑞士钟表公司，目前，装有钕铝石榴石激光器的专用机已在生产线上开始使用。

在金属材料打孔方面，采用激光加工最有进展的是不锈钢打孔，苏联在制作化学纤维用的喷嘴孔方面也广泛采用激光打孔，可以说激光打孔在提高生产率方面的用途是很多的。图7示出了采用红宝石激光器加工机，在厚2毫米的不锈钢SUS27上打孔的一个例子。在这种情况下，大约10个脉冲、时间10~30秒内就可打出直径为20~80微米的孔。另外，可以用来对各种光学设备的针孔板和电子显微镜的缝隙等的小孔进行加工。

玻璃、陶瓷等非金属材料，由于对10.6微米波长的CO₂激光有很好吸收性能，因此对于这些材料的加工来说，看来CO₂激光器是相当有用的。目前，就连塑料打孔在某程度上业已达到实用阶段，发表了以下几个例子：以每分钟1000个的速度打出尼纶的4个孔的钮扣，以0.1秒时间内打出缩醛树脂的喷嘴孔、或在厚度为0.25毫米的聚酯树脂薄膜上以每分钟10000个速度打出直径为0.3毫米的小孔。另外，还试图对乳瓶的橡皮口和接触透镜通气孔打孔。

4. 激光切割

激光切割是一种切削加工，原理和激光打孔一样，往往采用脉冲振荡或连续振荡进行连续打孔。在大功率方面最常采用连续振荡的CO₂激光器，金属

薄膜或薄板切割采用钇铝石榴石激光器，细导线的切割采用红宝石激光器。

CO₂激光器由于振荡波长较长，为10.6微米，因此，一般来说不适合于精细加工。然而可以用来以非接触的方式进行与普通机械加工相同程度的加工，看来这种激光器对切割玻璃、陶瓷、塑料、木材、布、纸等非金属材料相当有用。在这种情况下，激光切割的主要优点是几乎没有切屑和噪声。

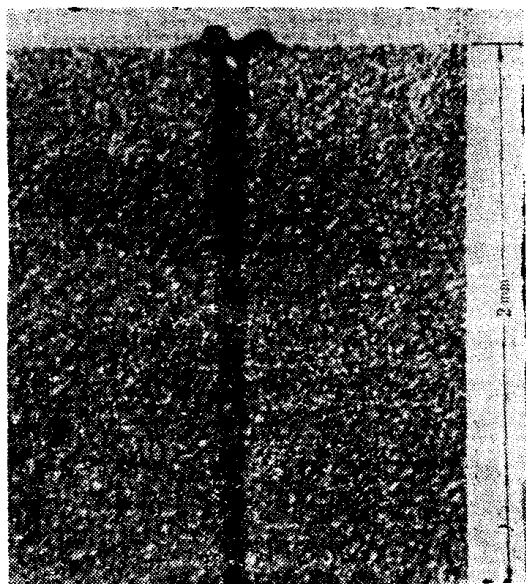


图7. 不锈钢打孔

CO₂激光器也经常用于切割金属材料。过去，金属表面上的反射率比较大，加工效率低，当一边经常吹入O₂气一边加工时就可以高效率的切割。例如，用300瓦功率的CO₂激光器，吸入O₂气，就可以对厚度为2.5毫米的钢板，以切割宽度为0.5毫米、速度为1米/分钟进行切割。

在这种和喷气合用的加工中，图8所示的设备用的最多。亦即，将水平发射的激光用倾斜的反射镜折

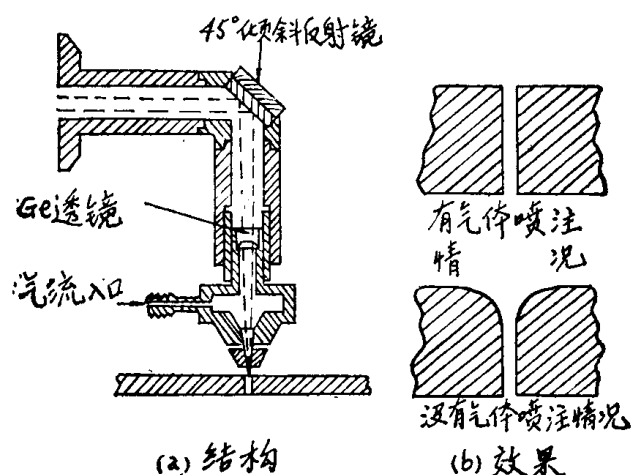


图8. 气体激光喷注切割

射成垂直方向，再利用聚焦透镜将焦点调到加工件表面。这时从横向喷嘴进入气体，喷射到加工点上。

当采用气体喷注时，不仅能提高加工效率，而且能吹掉加工屑，切割面也美观。另外还使切割面的边缘圆角很小，除此之外切口小对材料的热影响也小。尤其是还有使之不受来自加工面表面飞溅出来的飞溅物和蒸气影响起保护透镜的作用，还可对透镜冷却。

采用气体喷注的激光切割法中，为提高加工效率起见，采用O₂或压缩空气，但为了提高切割面质量时，可采用N₂或Ar这样不活泼的气体。

对于象玻璃和陶瓷那样硬脆材料而言，它们的切割加工法和一般的切割加工法稍有不同。图9给出了它的原理图。当激光照射到材料表面微小部分上时，由于在它的附近产生急剧的温度梯度，而引起热应力，从而产生切割。把加工件相对于激光束移动时切割也就随之移动。产生切割的范围极为有限，采用移动激光束时可以控制切割。因此，不仅可以切割直线条，而且也能切割任意的曲线条。

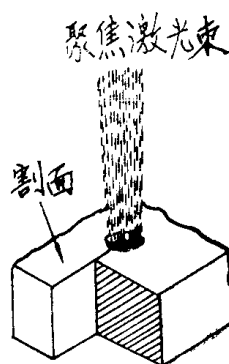


图9. 激光切割

这样，这种切割就巧妙地利用了热应力小的无机材料特性，因此它是一种不伴随材料切屑的受控破坏。大多数无机材料对红外区域的光吸收率大、焦点直径不需要那么小，控制连续振荡方向切割很方便等理由，因此，用于这种切割的激光器以CO₂激光器最合适。

5. 激光焊接

目前，微小焊接多用脉冲振荡激光器。而连续振荡激光器，加热时间长，由于热传导使加热范围加宽，从而不适宜于微小焊接。但是，对于需要大的熔区的厚板等的焊接来说，连续振荡的大功率CO₂激光器仍然有效。

激光焊接就是熔融焊接，用过去的焊接法能够焊接的材料用激光也完全可以焊接。尤其是象采用过去焊接法不能焊接的那些材料，用激光也可焊接。

激光焊接时，为了得到恰当的熔融区起见，根据

加工件的尺寸、形状和性质等，需要给出最佳的条件。激光的功率峰值、脉冲宽度、透镜焦距、焦点位置等对熔接的好坏有影响，另外，周围条件对熔融区和焊接状态都有很大影响。

采用激光焊接时，又分单脉冲的点焊和连续脉冲的缝焊两种情况，然而这两种焊接的通常焊透深度都不那么深。导线的焊接中直径从10微米左右到1毫米为止，另外，板焊接中厚度从0.1毫米左右到大约3毫米为止。图10是直径为30微米的镍铝丝和直径100微米的镍铬丝交叉焊接的例子。



图10. 镍铝丝和镍铬丝的焊接

作为特殊的焊接例子是：在微型继电器的接片板上焊接未剥去环氧树脂涂层的线圈铜线；以及从真空管外部焊接内部的灯丝、栅极和屏极。还有，二根分开的导线的焊接方法如下：首先在一根导线上照射激光，然后再把这根导线弯曲使之和另一根导线接触，然后在接触点上照射从而就使两根分开的导线焊接起来（图11）。

最近，由于采用大功率CO₂激光器，从而使焊接厚度超过10毫米的钢板也成为可能。例如，有报告指出：利用17瓩的CO₂激光器焊接不锈钢的情况，[在焊接速度为0.75米/分钟情况下可以得到焊透深度为16毫米。还是这种情况，在焊接速度为5米/分钟情况

下焊透深度约为5毫米。从这种趋势来看，无疑今后将试图发展CO₂激光器在钢板焊接方面的应用。

另外，使用CO₂激光器焊接诸如玻璃或塑料等非金属材料也是可能的。图12给出进行玻璃小瓶前端封口的例子。

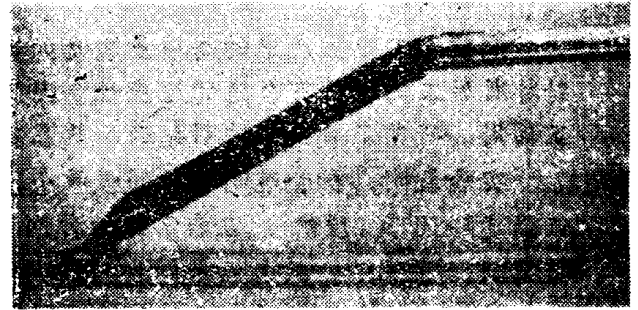


图11. 两根分开导线的焊接（不锈钢线，线径为0.75毫米）

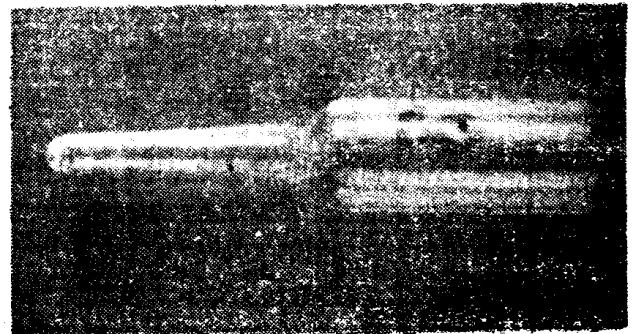


图12. 玻璃小瓶封口

6. 激光在其它加工上的应用

如果采用Q开关钇铝石榴石激光器，那么在Ta、Ti等薄膜上就有可能开出最小宽度为1微米的槽。这种沟槽在集成电路的电阻值调整以及在制作缝隙电容器方面都有用。另外Q开关钇铝石榴石激光器还可用于在Si片上所形成的集成电路小芯片的分离和划线上，以50—100毫米/秒的速度进行宽30微米、深100—200微米开槽。这样的激光修整机和激光划线针，作为专用的加工机已在市场上出售。

除此之外，研制了采用脉冲振荡的激光器使旋转部件微量除重的精密方法获得动平衡。采用这种方法一次照射能除重大约10毫克的金属。采用同样方法还研究了对振动器进行频率调整的方法。另外，还试验了利用激光器使试样表面微量蒸发、分光分析蒸发物的激光微量探测、瞬时加热金属表面、表面热处理，或在光刻中的激光曝光等。

激光加工透明介质的动力学

摘要 工业生产中的高质量激光加工,除了要求合适的光光源外,还要求激光发射对所加工的材料有合适的适应性。因此,讨论了高强度激光束和固体透明物质的相互作用。研究了激光脉冲引起的加热和蒸发的动力学。

实验表明,尽管透明物质的吸收小,还是可以用激光把它蒸发。第一个尖峰(峰值强度 $\sim 10^8$ 瓦/厘米 2) 在非常短的时间($\sim 10^{-7}$ 秒)内即将表面层的吸收系数从 10^{-2} 提高到 10^3 厘米 $^{-1}$ 。接着而来的发射在加热层中被完全吸收,而且以大致为常数的速率蒸发材料。提出了解释激光加热透明材料的一种模型,并用它说明实验观测结果。讨论了形成孔的形状。

1. 导 言

使用高强度激光辐射,在材料加工中已将范围宽广的各种材料熔化并蒸发。在工业生产中激光已在很多方面被作为一种经济实用的工具^[1]。加工质量取决于激光发射的能量-时间特性,以及工件材料的化学,热学,和机械性能。孔的质量受到孔周围加热区域的结构和去除材料在工件上的再堆积的限制。为将这些附带的影响减至最小,激光发射必须适应所加工的材料。对于高质量的加工,要求激光发射能够长期重复。

很多金属的加工问题已经解决,相应的材料去除机理也被讨论^[2]。强激光束对透明固体的加热和蒸发已有下面几种解释:由于各种非线性光学过程产生的损伤造成的^[3],或由于表面缺陷、晶体的不完美性和杂质^[4]等原因所引起的局部吸收中心产生加热作用造成的。但根据这些机理来解释加热和蒸发的动力学方面是困难的。在已发表的论文中,只有利用大量激光脉冲才能达到令人满意而且可以重复的质量^[5]。

本文叙述了工业生产在兰宝石园片上打高质量孔的研究结果。讨论了激光发射对激光打孔质量的影响。

2. 实验结果

A. 材料去除的动力学过程

用来研究激光脉冲加热和蒸发透明物质的实验装

置如图1所示。激光束被透镜系统聚焦在靶上。监视信号由光电倍增管 PM_1 取得,透射光被准直并由 PM_2 测量。这两个信号在双线示波器上比较。蒸发过程由高速照相机通过园片的抛光侧面被照相,这就给出了一个动态过程的条纹照片。条纹速度可以从 2.5×10^{-4} 厘米/秒到 10^7 厘米/秒改变。激光器,示波器和照相机由泵浦脉冲同步触发。

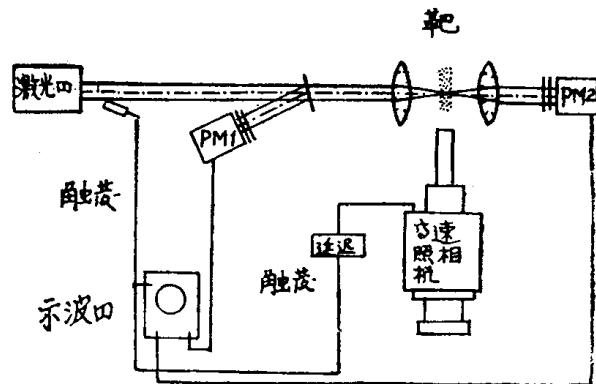


图1. 测量透明材料加热过程的实验装置。由 PM_1 和 PM_2 取得入射光和透射光的示波照片。打孔过程的照片由高速照相机摄取(测量反射光的装置没有画出来)。

实验使用了一台脉冲基模YAG-Nd $^{3+}$ 激光器,此激光器产生可重复出现的脉冲尖峰,其结构如图2(a)^[6]所示。激光脉冲重复率可达每秒20个脉冲(20pps),激光脉冲能量达到200毫焦耳,脉宽从 8×10^{-8} 秒到 10^{-6} 秒可变。聚焦到半径为20微米的点上后,尖峰强度达到 10^8 瓦/厘米 2 。条纹照片与入射和透射光的示波照片同步摄取。图2(a)表示一次

* "Dynamics of Laser Processing in Transparent Media," Ernst Kocher....., 《IEEE J. Quant. Electron.》, 1972, 8, No2, 120-125. 李世译译, 向立人校

典型激光脉冲 I_L 的时间展开照片， I_T 是在打孔过程中通过园片的透射光。 I_L 和 I_T 有相同的强度标度。可以看出在 t_0 时刻到达靶面的第一个尖峰只有部分透射。以后的每一个尖峰几乎完全吸收。在 t_1 时刻（图2）孔被打穿，透射光变得和入射光完全相等。【图2（b）表示0.3毫米厚的兰宝石园片打孔过程的条纹照片。水平尺度代表时间。激光束从上面入射，在 t_0 时刻射到平面的表面上。第一个尖峰产生一个很小的发光蒸气云。以后的每一个尖峰向材料内穿透一些深度而且蒸气边界以一个近似为常数的速度向材料内部移动。即使在发射的连续部分这个打孔速度也保持大约 ~ 5 米/秒的常数值。蒸气云朝着光束方向以 $\sim 10^8$ 米/秒的速度从所形成的孔中喷射出。这个数值是在大气条件下测得的。

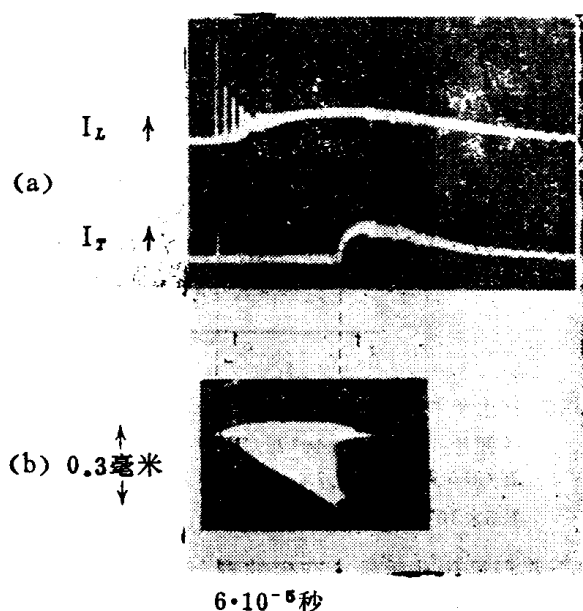


图2. (a) 入射光和透射光的时间特性，(b) 由条纹照相机摄取的打孔过程的相片。激光束从上面会聚在0.3毫米厚的靶上。

图3表示了扩展时标的过程。上面是监视器（入射光）和透射光的踪迹，起初透射信号跟随监视器信号到达一定强度数值，然后，它开始减小而且在 10^{-7} 的时间消失。相应的条纹照片表示予前五个尖峰对材料单独作用的影响。每一个尖峰蒸发恒定厚度的材料（ ~ 10 微米），而与尖峰的强度无关。第一个尖峰具有特殊的重要性；它将材料由一个非吸收状态变为吸收状态。这个强度必须大于观察到的产生吸收时所必须的阈值 I_{th} 。这个阈值取决于打孔材料，尤其取决于表面状态和脉宽^[7]。此外，实验表明，由于这个脉冲的影响，材料的去除主要是由于蒸发，而不是液状颗粒的喷出。

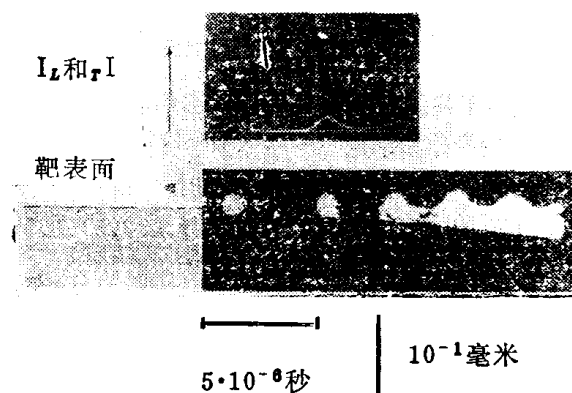


图3. 扩展时标的示波器照片和条纹照片。

B 实验数据分析

上述材料工件所吸收的能量可以通过测量入射、透射、反射和散射的能量来确定

$$E_A = E_L - E_T - E_R - E_s \quad (1)$$

这里

- E_L 入射脉冲能量，
- E_T 透射脉冲能量，
- E_R 反射脉冲能量，
- E_s 散射脉冲能量，

对于单尖峰和连续发射都应达到能量平衡。例如， $E_L \approx 0.6$ 毫焦耳的每一尖峰都蒸发相应的材料元。图4表示第一个尖峰入射光和透射光的大小。图4（a）表示入射光强 I_L 和透射光强 I_T 。图4（b）是入射光强 I_L 和反射光强 I_R 。测得的透射光能量为

$$E_T = \int I_T(t) dt \approx 0.3 E_L$$

开始时反射强度 I_R 正比于 I_L ，当吸收过程开始后， I_R 减小到0；以后的发射期间内它一直都测不出来。反射光的总和是

$$E_R = \int I_R(t) dt \approx 0.03 E_L$$

对在蒸气中散射和吸收的光的测量表明， E_s 小于入射能量的5%

$$E_s = \int I_s(t) dt \leq 0.05 E_L$$

按照这些数值，第一尖峰被吸收的能量〔(1)〕是 $E_A \approx 0.37$ 毫焦耳。这个能量 E_A 对于蒸发 $\sim 10^{-5}$ 毫米³体积的兰宝石是充分的。假设材料常数与温度无关，蒸发这样多的材料必须的能量是

$$E_v = E_H + E_{LO} \quad (2)$$

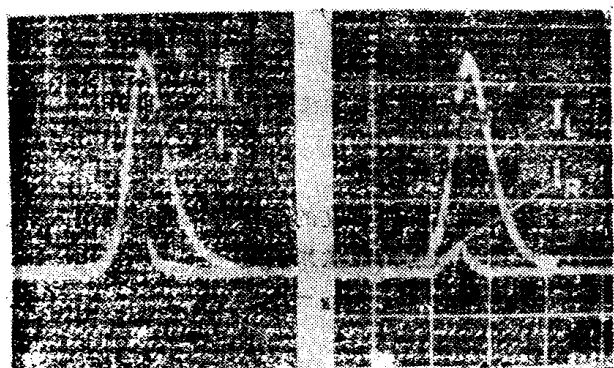
这里

- $E_H = [C(T_v - T_0) + Q_m + Q_v] \cdot V \cdot \rho$
- C 比热
- T_v 蒸发温度
- T_0 初始温度
- Q_m 熔化热，
- Q_v 蒸发热

V 蒸发材料的体积

ρ 密度

E_{Lo} 由于热扩散和热辐射而引起的能量损耗。然而,一个尖峰作用期间 ($\sim 5 \times 10^{-7}$ 秒),这个能量损耗是小的。在所讨论的情况下,时间常数(温度减小到初始值的一半的时间)对热传导是 2.5×10^{-5} 秒而对温度辐射是 8×10^{-3} 秒。



(a) (b)

图1. 在第一个尖峰的相互作用期间,监视器信号 I_L 和相应同步摄取的透射光 I_T 和反射光 I_R

对体积为 10^{-5} 厘米³ 的兰宝石蒸发能量 E_V [(2)] 是 $E_V = 0.35$ 毫焦耳。能量差 $E_E = E_A - E_V$ 使蒸气分子过热,破坏和电离。 E_E 称之为剩余能量。

第二个和以后的尖峰的峰值强度比第一个尖峰的强度小很多,但它们的能量大致相同。只要孔底还保留有加热材料层,这些尖峰的能量都会被完全吸收(图2)。但是实验表明这些尖峰蒸发的材料体积和第一个尖峰蒸发的相同;因而它们产生比第一个尖峰更多的剩余能量。明显的兰色蒸气云的发射光谱表明了AlO原子团的兰-绿振动带。被加热的材料膨胀前的热辐射极大值在6000度,假定是黑体辐射的话,它相应于 $5000K$ [8]。

实验所观察到的打孔速度,在整个过程中基本上保持常数。在辐射的连续部分,蒸发以不变的速率发生。对连续部分的能量平衡,热传导必须考虑(2)。当入射光被完全吸收 ($I_A \approx I_L$) 时,蒸发界面移向材料内部,所具有的速度 v 近似地由下式给出

$$v \sim \frac{\bar{I}_L}{(E_V + E_E) / V} \quad (3)$$

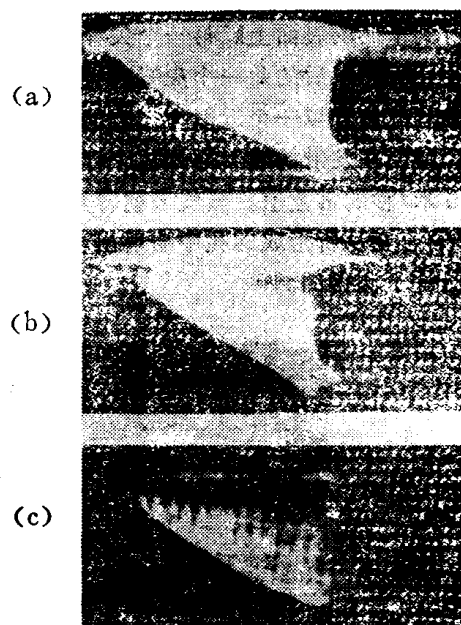
这里

$\bar{I}_L$ 平均入射强度

$(E_V + E_E) / V$ 每厘米³ 材料消耗的能量。

实验表明,即使平均入射强度从 1.7×10^7 瓦/厘米² 改变到 5×10^7 瓦/厘米²,打孔速度(3)也基本保持常

数。图5示出了在不同的平均强度 $\bar{I}_L$ 下,打孔过程的条纹照片。增加入射强度时,蒸发速率不增加,但是剩余能量 E_E 和孔直径变大。从图5上能够看出 $\bar{I}_L$ 对蒸气云亮度的影响。在入射强度大约为 1.7×10^7 瓦/厘米² 时,剩余能量最小 ($E_E \approx 0$)。在激光强度低于这个数值时,打孔过程不能发生。



$6 \cdot 10^{-5}$ 秒

图5. 产生于不同平均激光强度 $\bar{I}_L$ 的三张打孔过程的条纹照片: (a) 5×10^7 瓦/厘米²; (b) 3×10^7 瓦/厘米²; (c) 1.7×10^7 瓦/厘米², 激光脉 1.5×10^{-6} 秒。

为获得最佳孔质量,产生的剩余能量必须小;最小的入射强度 $\bar{I}_L$ 由下列条件确定:第一个尖峰的峰值强度必须大于阈值强度 I_{th} ,以产生吸收;打孔的速度必须快,以致于热传导对周围材料无显著影响。对于兰宝石,第二个条件是容易满足的(热传导 $K \approx 10^{-1}$ 焦耳/厘米·秒·度)

3. 吸收模型

假定热学常数与温度无关,由于光吸收而使红宝石园片加热是非常小的。然而,实验(图3和4)指出吸收系数在第一个尖峰期间增加到 10^3 厘米⁻¹。使用高强度光场(峰值强度相应于 $\sim 4 \times 10^5$ 伏/厘米)初始吸收系数比低强度场时为高。Belikova等人[9]用Q开关脉冲对 $\mu \approx 10$ 厘米⁻¹ 的红宝石测定了初始破坏时的吸收系数,此吸收系数在短时间内(大约2毫微秒)增高。假定,初始破坏时,吸收系数较小,并且 μ 的温度关系满足于

$$\mu(T) = ae^{-b/T} \quad (4)$$

这样,所观察到的加热过程就能得到解释。上式中的系数a和b可以依照实验数据确定

$$\mu(T = T_V) = 10^3 \text{厘米}^{-1}$$

而对于初始值

$$\mu_0(T = T_0) = 10 \text{厘米}^{-1}$$

$$a \approx 10^3 \text{厘米}^{-1}$$

$$b \approx 10^3 \text{K}.$$

离前表面Z处厚度为 ΔZ 的层中,在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 期间内吸收的第一个尖峰的能量是

$$E_s(\Delta t, Z) = \int_{t_1}^{t_2} \mu(T, Z, t) I(Z, t) V dt, \quad (5)$$

同时假设为矩形的径向强度分布

$$I(r) = \begin{cases} I & |r| \leq r_0 \\ 0 & |r| > r_0 \end{cases}$$

被加热的体积则为 $V = \pi r_0^2 \cdot \Delta Z$ 。

在Z点处的强度由吸收定律确定

$$I(Z, t) = I(Z=0, t) \exp \{ -\mu[T(Z, t)] \cdot Z \} \quad (6)$$

第一个尖峰的时间关系近似于高斯分布

$$I(Z=0, t) = I_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

这里

I_0 入射峰值强度

2σ 尖峰持续时间,半宽度(典型数值 $\sim 3.3 \times 10^{-7}$ 秒)

τ 达到 I_0 的时间(典型数值 $\sim 5 \times 10^{-7}$ 秒)

温度 $T(Z, t)$ 利用迭代法以(2), (4) — (7)式计算,从 $Z=0$ 和 $t=0$ 算起。

图6(a)画出了计算所得的园片表面层的温度 $T(t)$ 和吸收系数 $\mu(t)$ 与时间的关系。 $T(t)$ 和 $\mu(t)$ 的两个台阶相应于熔化和蒸发热,图6(b)表示入射强度 I_L 和通过0.3毫米厚的园片后的透射强度 I_T 的踪迹。当 I_T 与 I_L 不重合时,温度开始升高。起初温度增加是缓慢的,然后温度急剧上升并迅速地增加到熔化和蒸发温度。这个温度增加的持续时间大约为 $\sim 10^{-7}$ 秒。

按(2), (4) — (7)在不同的时间计算了沿光束轴线的一维局部温度曲线,并绘于图7。起初整个厚度内的温度增加非常缓慢; 5×10^{-7} 秒之后可观察到一个小的温度梯度;然后曲线的斜率迅速地增加。因此入射能量的大部分被表面层吸收。在尖峰的末尾,厚 ~ 8 微米一层被蒸发,并且同样厚的一层被熔化。这些计算没有考虑蒸气的膨胀;这意味着假定,在尖峰结束之前,物质尚未被去除掉。由于兰宝石的热传导小,加热层的温度在后面尖峰到达表面时基

本上未减小。对于这些尖峰当过程开始时的温度分布是与图7的($t = 6 \times 10^{-7}$ 秒)曲线相似的。在第一个尖峰后发射的整个能量差不多都被转换为热。在发射的连续部分蒸气的膨胀必须按照(3)式来考虑。

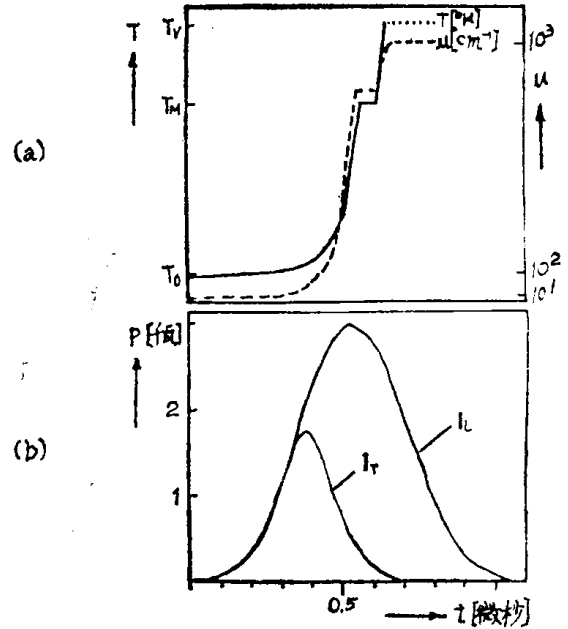


图6. (a) 理论计算出的平面表面上吸收系数 $\mu(t)$ 和相应的温度 $T(t)$ 的时间关系。(b) 实验得到的第一个尖峰的入射和透射光。

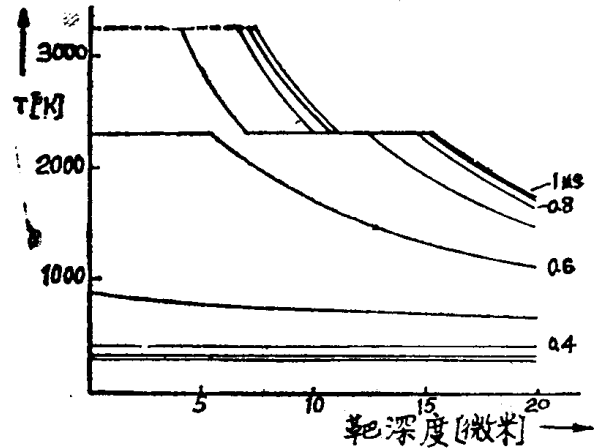


图7. 第一个尖峰期间,靶中温度分布 $T(Z)$ 的计算曲线;时间参数与第一个尖峰同时开始

4. 激光打孔的外形

为了讨论激光打孔的几何形状,(5)式所描述的矩形强度分布 $I(r)$ 必须由激光束的径向强度分布代替。这一点由辐射的横向模次来决定^[10]。对于基模发射是

$$I(r) = \frac{c}{\pi w^2} \exp \left\{ -2 \frac{r^2}{w^2} \right\} \quad (8)$$

这里

w 光束半径

r 与光轴正交的径向坐标

c 标准常数

孔的形成主要取决于第一个尖峰之后的发射。根据实验结果,这些发射的吸收系数可以假定是常数。在这种情况下每秒钟吸收能量的总和正比于入射强度(5)。这个能量供给必须大于热传导损失的能量总和;蒸发速率必须足够地高(3)。按照这种描述,孔的形状由半径 r_h 确定,在 r_h 内入射强度 $I(r_h)$ 是这样地大,使得吸收的能量等于所要求的 $E_v[(2)]$ 。这个条件确定了为使材料充分地蒸发所必须的 阈值强度 I_{th}^* 。打孔的形状能够由 I_{th}^* 的局部依赖关系来描述。

$I(r)$ 沿光束轴 Z 的关系按传播定律为[10]

$$w^2(Z) = w_0^2 \left\{ 1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right\} \quad (9)$$

这里

Z 光束的轴($Z=0$ 相应于束腰)

w_0 在 $Z=0$ 位置时光束的半径(束腰半径)

在阈值强度 I_{th}^* 处,径向强度分布宽度就是孔的半径 r_h

$$r_h^2(Z) = \frac{1}{2} w^2(Z) \ln \left(\frac{2P(t)}{\pi w^2(Z) I_{th}^*} \right) \quad (10)$$

这里

$P(t)$ 激光功率

图8画出了所计算的三个散焦点处的基模强度分布 $I(r)$ 以及光点尺寸 $w(Z)$ (实线)和沿 Z 的 I_{th}^* (虚线)。输入数值 $w_0=20$ 微米, $P(t) \approx 320$ 瓦。阈值强度 I_{th} (I节)和 I_{th}^* 由实验确定。对于实验中所使用的表面抛光的红宝石靶,我们发现

$$I_{th} \approx 5 \times 10^7 \text{ 瓦/厘米}^2$$

$$I_{th}^* \approx 2 \times 10^7 \text{ 瓦/厘米}^2$$

纯红宝石和兰宝石晶体的数值约高 $\sim 10^2$ 倍[7]。

利用(8) — (10)式能解释所形成孔的形状。

图9表示用不同时间关系的激光功率 $P(t)$ 在0.3毫米厚的兰宝石园片上打出的两个孔。园片浸在液体中从侧面照相。此外,这些考虑还使我们能够根据预先要求的孔形去计算激光器的参数。深度与直径之比达30:1的园柱形孔是能达到的。

5. 结 论

激光打孔的热过程产生了各种不希望的附加效

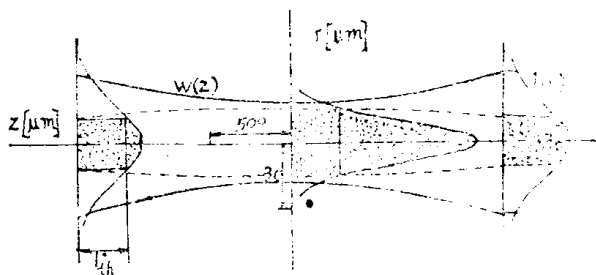


图8. 在聚焦范围内三个点的基模光束的强度分布 $I(r)$; 光束半径 $w(z)$ (实线)和 I_{th}^* 的局部形状(虚线)

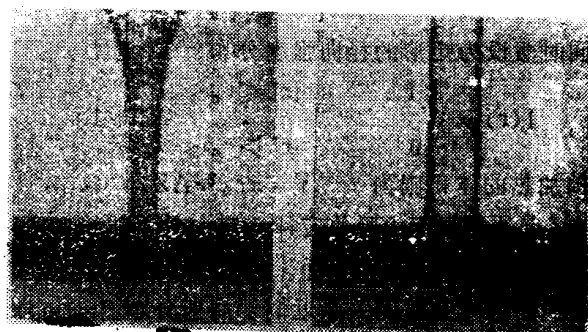


图9. 使用不同时间关系的激光功率 $P(t)$ 在0.3毫米厚的兰宝石园片上打的两个孔,以证实(10)式中所计算出的不同几何形状。

应。使用非常强的激光脉冲时,将出现强的超声波和随后的晶格破坏,甚至是宏观的破坏。用太弱的强度,材料加热缓慢而且大量能量由于热传导而散失。因为热扩散而在孔的周围产生加热和熔化层。由于这个温度梯度而产生的热应力能使周围的材料破坏。由于强尖峰在熔化材料层上的冲击,高压波可能扩大,喷射出液体颗粒并且重新堆积在工件表面。高的反冲动量可能弄坏材料基底。使用具有无规则重叠尖峰的激光辐射,材料蒸气膨胀被扰乱,蒸气过热产生爆炸,打出的孔的形状像个火山口或其他的不规则形状。

本实验表明,使用如图2所示的激光脉冲,蒸发连续发生而且没有液体颗粒喷出。若使关键性的第一个尖峰具有很高的强度 $I \geq I_{th}$,透明材料就会转为吸收。后面强度较低的尖峰也足以蒸发一定体积的材料。使用这种分离的尖峰,热传导对周围材料的影响最小。在孔内,加热了的材料停留的时间远小于热传导的时间常数。

在发射的连续部分,材料去除速度也应充分地大,以致于热散逸不影响周围的材料。由于使用了稳定的基模辐射,就避免了局部过热和相应的热应力。此外,周围材料也不因焦点径向位置的波动而被加

热。强度分布是完全确定的并且可以多次重复。

我们实验中所用到的关于激光发射方面的论述，也同样能应用于金属加工。关键的第一个尖峰降低了金属的高反射率^[11]。以后的材料去除过程和透明物质的情况是大致相同的。

所谈到的理想形状的光脉冲，能由一台稳定的

TEM₀₀模固体激光器产生。用一台高重复率 YAG-Nd³⁺激光器，在红宝石上能打出重复生产的圆柱形孔。满足了工业生产中所提出的容限很高的要求。孔的直径为50微米，热损伤区域的厚度小于5微米，圆片的厚度是0.3毫米。

参考资料（略）

固体激光器的基模辐射[†]

摘要 固体激光器的光泵在激光晶体中引起了热透镜。这个透镜确定了谐振腔中的光束性质；TEM₀₀模辐射被限制在一个很小的而且取决于泵浦功率的激光棒体积内。尤其是，在脉冲泵浦系统中，获得稳定的基模辐射的效率极低。对考虑了热透镜的具有最佳TEM₀₀模输出的激光谐振腔进行了研究。找到一种谐振腔，它的辐射对于温度畸变是不灵敏的。该腔由参数 g_1 ， g_2 所确定：

$$1/g_1 = 2g_2 + 1/g_2 (a/b)^2 + 2(a/b)$$

此处 a 和 b 是棒端和膜片的距离， a 和 b 现在是在两个膜片和透镜间的距离。预言的光束行为已由高重复频率YAG激光器的实验证实。照这种设计制成了一高精度的激光打孔机。因为这种不灵敏性质，能重复的材料加工已在工业上使用了。

1. 导 言

对大量的激光应用而言，使用TEM₀₀模辐射有重大优点。由于消除了不同横向模式的竞争，光输出有最小的发散以及发射有较小的波动。透镜系统焦点处的空间强度沿光轴方向上在一适当大的范围内是完全确定和均匀的。

在固体激光器中能重复出现的基模辐射的产生受到光泵热效应的限制，这种热效应在激光棒内感应起一径向温度梯度

$$T(R) = T_0 - DR^2/4k \quad (1)$$

这里

T_0 沿棒轴向的温度，

k 热传导系数，

D 内热发生量，

R 径向坐标，

内热量 D 正比于泵浦功率，对于脉冲泵浦系统只有高重复率时，稳态分布(1)才能达到($>20\text{pps}$)，

$T(R)$ 的变化在50毫秒时小于10%) 在低重复率时 T_0 在泵浦脉冲之间减小而且温度分布并不总是与(1)符合，但是这个变化在激光作用期间内是小的。

由于热伸长、折射率的温度感应变化和更多的其他效应，棒内的光程长度发生改变。假定自由膨胀和热膨胀稳态，光程变化正比于径向温度分布^[1]

$$\begin{aligned} \Delta(nd) &= d \left(\alpha n + \frac{\partial n}{\partial T} + \dots \right) \Delta T \\ &= d \left(\alpha n + \frac{\partial n}{\partial T} + \dots \right) \frac{DR^2}{4k} \quad (2) \end{aligned}$$

这里

n 折射率

α 热膨胀系数

d 棒长

这个热效应的结果相当于原来的平行平面棒端畸变到一个有效半径为 r 的近似球面：

$$r = \frac{4k}{D \left(\alpha n + \frac{\partial n}{\partial T} + \dots \right) d}, \quad r \gg R \quad (3)$$

[†] "Fundamental mode Radiation with Solid-State Lasers", Jürg Steffen等, «IEEE J. Quant. Electron.», 1972, QE 8, 2, 239-245, 李世译, 杨克大校

结果激光棒可被当作一个有效焦距为 f 的正厚透镜:

$$f = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{r^2}{2nr-d(n-1)}$$

$$\approx \frac{r}{2(n-1)}, \quad \frac{d(n-1)}{nr} \ll 1 \quad (4)$$

对于通常的泵浦腔结构, 焦距和泵浦功率的反比关系已由实验很好地证实^[2], 在泵浦功率接近 1 瓦时典型的 f 值为 4~5 米。

聚焦效应确定了腔内的光束形状(图1)。图1上部示出了在未泵浦时激光谐振腔内的光束外形。在泵浦状态(图1下)激光棒形成一透镜并确定了在腔内的光束膨胀。基模被限制在沿光轴周围的很小范围内而大量的高次模能够振荡。此外, 激光发射取决于运转条件并由于泵浦功率不可避免的波动以及在两次泵浦脉冲之间棒内的温度平衡而变化。

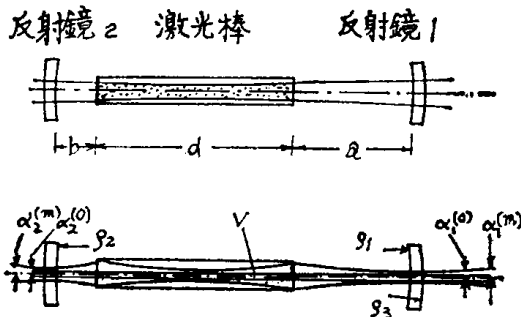


图1. 在未泵浦(上)和泵浦(下)状态下, 固体激光谐振腔内的光束轮廓, V — TEM_{00} 的有效模体积;

$\alpha_{1,2}^{(0)}$ — TEM_{00} 在两个膜片上的发散; $\alpha_{1,2}^{(m)}$ —由激光棒确定的最大横向模的发散 $\rho_{1,2}$ —反射镜的曲率; $\rho_3 \approx \rho_1 \frac{n-1}{n}$ 。

如图1所示, 光束的发散 α 和横向模结构, 以及由棒内辐射体积所定义的有效基模体积 V 可以表征包含有热聚焦激光棒的谐振腔的辐射。对于材料加工方面的应用, 从效率和重复性方面来说, 要求有最大的基模体积和稳定的光束发散。

2. 运转特性对一般谐振腔结构的激光发射的影响

若干著者研究了球面谐振腔^[3]和有内透镜的谐振腔^[6]的光束性质。

光束在反射镜上的半径 w_1, w_2 , 可以用射线转换矩阵方法来研究, 即光束沿谐振腔中传播一个来回应该自协(高斯光学近似)。当横截面比显现出的曲率小时这个方法是有效的。

辐射的参数值 α, V 由在谐振腔镜面上的基模尺

寸 w_1 和 w_2 用高斯光束的传播定理推演出来(图1):

$$w_3^2 = w_1^2 \cdot \left[\left(1 - a/\rho_1 \right)^2 + \left(a \frac{\lambda}{\pi w_1^2} \right)^2 \right]$$

$$w_4^2 = w_1^2 \cdot \left[\left(\xi - \frac{1}{\rho_1} (a\xi + d/n) \right)^2 + \left((a\xi + d/n) \lambda / \pi w_1^2 \right)^2 \right]$$

$$V \approx \pi d / 3 (w_3^2 + w_3 w_4 + w_4^2)$$

$$\xi = (1 - d/nf)^{1/2} \quad (5)$$

这里

d 激光棒长,

λ 激光波长,

$w_{3,4}$ 在棒端光点尺寸,

ρ_1 反射镜曲率(对凹面反射镜 $\rho > 0$)

a 反射镜1和棒端之间的距离,

如果输出反射镜的曲率 ρ_3 和 ρ_1 的匹配是使得光束离开谐振腔时具有一平面相前(图1), 那末, 输出光束的发散变成最小:

$$\rho_3 \approx \rho_1 \frac{n-1}{n} \quad (6)$$

在这种情况下光束的发散是:

$$\alpha_1 = \lambda / \pi w_1 \quad (7)$$

对于高阶横模结构斑点尺寸和发散随 m 增加:

$$w^{(m)} = w (2m+1)^{1/2}$$

$$\alpha^{(m)} = \alpha (2m+1)^{1/2} \quad (8)$$

这里, m 是横向模的阶次。

通过考查激光棒各种热聚焦作用下的束散和模体积, 研究了运转特性的影响。例如, 一个长度 $L = 9$ 厘米的平行平面谐振腔, 具有热透镜厚度 $d = 5$ 厘米, 直径为 6 毫米, 对其辐射参数 V 和 α 进行了计算。

图2以指数坐标画出了这两个参数相对焦距长度 f 的曲线。模体积随着 f 的减小而减小到被棒体积所确定的最大体积的百分之几。对于 $f \leq f_{min}$, 谐振腔的几何形状是不稳定的^[10]。光束的发散随 f 的减小而增加。上边的曲线相应于被激光棒孔径所确定的最高次模结构; 下边的曲线相应于基模。表现出的发散在最小和最大数值间相差10倍。对很小的 f 数值, 在两个反射镜上的发散 α_1, α_2 由于激光棒的非对称排列而不同^[14]。

通常是利用在激光腔内插入一个孔径以至于高次模的衍射损耗大大增加而获得 TEM_{00} 模输出。在这种情况下, 效率是低的, 而且光束的特性取决于激光棒的热透镜。具有这种行为的激光器是不能用于工业上的。

使用负透镜补偿热聚焦或者适当地选择一个反射镜的曲率^[4]，能够增加TEM₀₀模的功率。TEM₀₀模输出的这种改善只可能是固定的热焦距长度在运转周期内保持常数才可能获得。当稍微偏离这个数值时，光束的行为可变为非稳定的或者接近于一个非补偿系统的行为如图2所示。这就是这种补偿只对固定泵浦功率才是有用的，而不能用在工业上的原因。以下的考虑中，图2所示的光束行为将作为最坏情况的参考。

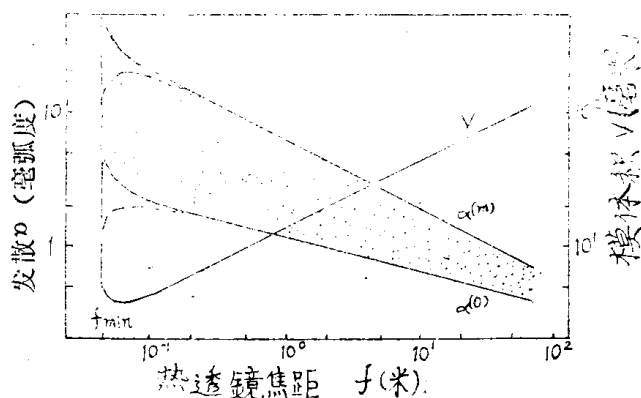


图2. 模体积V和束散α作为热聚焦激光棒焦距f的函数。平行平面谐振腔；镜间距L=9厘米；棒长L=5厘米；镜1到棒端距离a=1厘米。α⁰—TEM₀₀模发散，α^m——最高次横向模的发散。（...在镜1上，——在镜2上）。对于f ≤ f_{min}谐振腔是非稳定的。（指数坐标的交点是1、2、5、10、...）

3. 具有内透镜的谐振

腔——稳态和等效化

引入谐振腔参数^[5]

$$g_1 = 1 - \frac{L}{\rho_1}$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{\rho_2} \quad (9)$$

这里

L 反射镜间距，

ρ_{1,2}，反射镜的曲率，

光学谐振腔的稳态条件可以表述如下：

$$0 < g_1 g_2 < 1 \quad (10)$$

众所周知的稳态图（图3）指出了各种稳定和 非稳定谐振腔的几何形状^[5]。非稳定系统的谐振腔参数指出在阴影区内。一个不含内透镜的等效谐振腔可以相应地由一含有内透镜的谐振腔来确定，它们在

相应的反射镜上具有相同的斑点尺寸。图4（a）指出了热聚焦的实际情况；图4（b）中激光棒被一薄透镜替代。图4（c）表示了不含透镜的等效谐振腔，它的几何形状选择得使在相应反射镜上的斑点尺寸等于图4（a）和4（b）上对应的那些尺寸。等效谐振有不同的反射镜曲率和谐振腔长度。

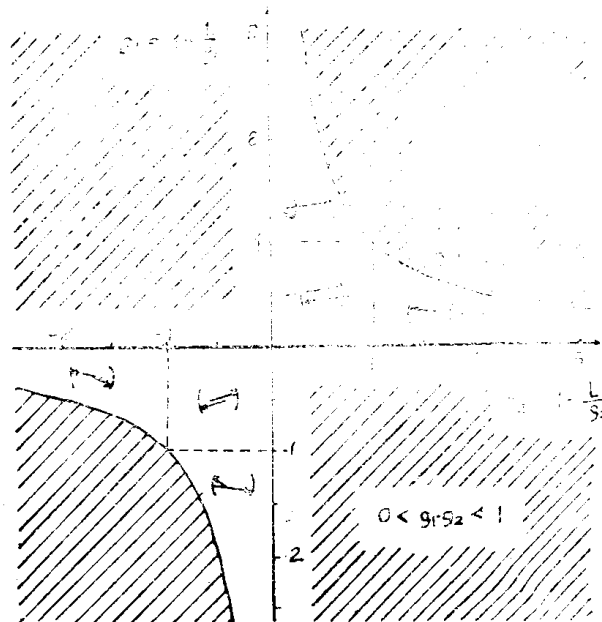


图3. 稳态图。非稳定谐振腔由在阴影面积内的 (g₁, g₂) 点表示，L——镜间距；ρ_{1,2}——镜曲率。
(g₁, g₂) = (1, 1) ——平行平面谐振腔，
(g₁, g₂) = (0, 0) ——共焦谐振腔，
(g₁, g₂) = (-1, -1) ——同心谐振腔。

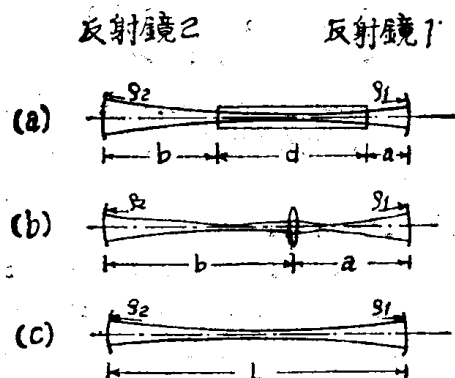


图4. 等效谐振腔系统，（a）带有内热会聚透镜的谐振腔，（b）带有内薄透镜的谐振腔，（c）有不同镜间距和曲率的等效谐振腔。

用下式描述一个等效于带有内薄透镜的谐振腔，

$$g_1 = 1 - \frac{L}{\rho_1} - \frac{b}{f}$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{\rho_2} - \frac{a}{f}$$

$$L = a + b - \frac{ab}{f} \quad (11)$$

这里

f 内透镜的焦距

a, b 反射镜 1, 2 与透镜的距离,

带有内厚透镜 (热聚焦激光棒) 的表达式稍微有些不同,

$$g_1 = \left(1 - \frac{d}{nf}\right)^{1/2} - \frac{L}{\rho_1} - \frac{b}{f}$$

$$g_2 = \left(1 - \frac{d}{nf}\right)^{1/2} - \frac{L}{\rho_2} - \frac{a}{f}$$

$$L = \left(1 - \frac{d}{nf}\right)^{1/2} (a+b) + \frac{d}{n} - \frac{ab}{f} \quad (12)$$

这里

d 透镜的厚度

n 透镜材料的折射率,

可以用变换的 (g_1, g_2) 图来完成带有与反射镜斑点尺寸有关的内透镜的谐振腔之考虑。稳态条件 (10) 仍然是不变的。这个图对于讨论热聚焦对谐振腔特性的影响也是方便的。

4. 对热畸变不灵敏的谐振腔

在任意一个谐振腔中, 在一个反射镜上的 TEM_{00} 模的斑点尺寸可表示为谐振腔参数的函数,

$$w_1 = \frac{\lambda L}{\pi} \left[\frac{g_2}{g_1 (1 - g_1 g_2)} \right]^{1/2} \quad (13)$$

对于由在稳态范围界外的 (g_1, g_2) 参数表达的谐振腔 (图3), w_1^2 成为无限大或虚数。在两个反射镜上斑点尺寸之比由 (13) 得:

$$w_1^2 / w_2^2 = g_2 / g_1 \quad (14)$$

图5画出了斑点尺寸 w_1 为一常数的曲线。 g_2 的数值大的谐振腔斑点尺寸 w_1 大。而且, w_1 随 L 的增加而增大 (13)。图5还表明了对于由点线划出的双曲线上的 (g_1, g_2) 值表示的谐振腔, 它的斑点尺寸对于 g_1 和 g_2 的变化是不灵敏的。

$$g_1 \cdot g_2 = 1/2 \quad (15)$$

在点线上如果在 g_2 保持常数的情况下, 改变 g_1 , w_1 的变化是很小的, 在同样的线上 g_1 保持常数 g_2 改变, w_1 的变化也是很小的。热焦距 f 对于 g_1 和 g_2 的影响取决于由 (11) 和 (12) 给出的几何尺寸。

第一象限 ($g_1 > 0, g_2 > 0$) 通常优于第三象

限, 因为在第一象限中激光棒上和输出反射镜上斑点尺寸之比 w_2/w_1 是更有利的 (图3)。

如果一个谐振腔的光束发散和模体积对激光棒的平均热焦距 f 的变化是不灵敏的, 这种谐振腔就称为对热畸变不灵敏的谐振腔 (热不灵敏腔)

$$d\alpha_1/df \approx 0$$

$$dV/df \approx 0 \quad (16)$$

微分不但对确定的平均 f 数值可以为零, 而且在一个合理的平均值附近范围内必须是小的。此外, TEM_{00} 模体积 V 要最大, 光束发散 α 要最小, 在实际应用中这也是很重要的。若对 TEM_{00} 模辐射来说, 斑点尺寸相对于激光棒所具有的孔径足够大, 那么这个激光谐振腔就是一个好的设计。

在具有内薄透镜的模型 (11) 中, 模体积的表达式 (5) 被简化为:

$$V \approx \pi d w_2^2 = \pi d w_1^2 \left[\left(1 - \frac{a}{\rho_1}\right)^2 + \left(a - \frac{\lambda}{\pi w_1^2}\right)^2 \right] \quad (17)$$

模体积 V 和发散 α_1 (7) 由输出反射镜上斑点尺寸 w_1 确定。因此, 如果满足

$$dw_1/df \approx 0 \quad (18)$$

那么方程 (16) 也成立。

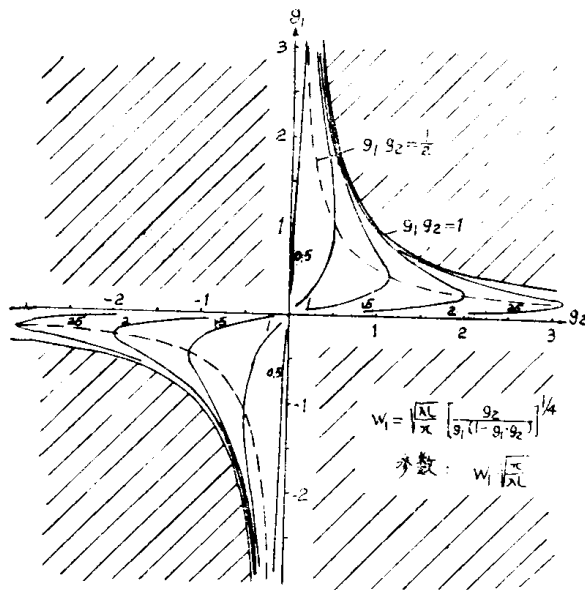


图5. 由 (13) 式计算的, 在 (g_1, g_2) 图上斑点尺寸为常数的曲线, 参数 $w_1 (\pi/\lambda L)^{1/2} = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5$.

这个微分表达为谐振腔参数 (11) 的函数:

$$\frac{dw_1}{df} = \frac{\partial w_1}{\partial g_1} \cdot \frac{\partial g_1}{\partial f} + \frac{\partial w_1}{\partial g_2} \cdot \frac{\partial g_2}{\partial f} + \frac{\partial w_1}{\partial L} \cdot \frac{\partial L}{\partial f} \quad (19)$$

对应用而言, 研究 (19) 式的有关表达式是很有用