



激光应用 与安全防护

刘忠达 编著 辽宁科学技术出版社

激光应用与安全防护

Jiguang Yingyong Yu Anquan Fanghu

刘忠达 编著

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市南京街6段1里2号)

辽宁省新华书店发行 沈阳新华印刷厂印刷

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张: $17 \frac{5}{8}$ 字数: 395,000 插页: 2

1985年2月第1版

1985年2月第1次印刷

责任编辑: 王静一

封面设计: 李文章

印数: 1—2,000

统一书号: 15288·87 定价: 2.90元

前 言

激光技术是以原子物理、量子理论、光学技术为基础，在工业、农业、科学技术和国防现代化发展需要的推动下产生，并迅速发展起来的一门新技术。

大力发展和推广激光技术，不仅为加速实现四个现代化提供强有力的手段，而且对提高人民的生活、增进人民的身体健康也具有极为重要的意义。

我国激光器件研究、生产和应用发展很快，取得了可喜的成果。为了适应大力开展激光技术应用的需要，以大量成功的应用实例为素材，编著了《激光应用与安全防护》一书，书中较为系统地介绍了激光打孔、焊接、热处理；激光动平衡；激光准直、测距、精密测量与检测；激光通信；激光全息照相及激光光谱学等技术。书中还论述了激光的生物效应及有关激光在应用过程中的安全防护措施。该书能为读者学习激光技术、实现安全生产提供参考。

本书在编写过程中得到了周兴文、纪初群等同志的热情帮助，并参考或引用了蓝伟天、单圭庆、杜金波等同志的论文和有关资料，在此一并致谢。

一九八三年七月

目 录

第一章 激光打孔	1
第一节 激光打孔的基本原理	1
第二节 影响激光打孔的因素	6
第三节 激光打孔光学系统的改进	12
第四节 激光打孔用凹凸热稳腔	15
第五节 影响激光打孔因素的回归分析	21
第六节 激光打孔应用简介	28
第二章 激光焊接	42
第一节 激光焊接的特点及焊接装置	42
第二节 激光焊接性能及影响激光焊接的因素	52
第三节 激光焊接实例和效果	58
第三章 激光切割与激光动平衡	70
第一节 激光切割的基本原理	70
第二节 激光切割非金属材料	72
第三节 激光切割金属	76
第四节 激光平衡钟表摆轮	82
第五节 陀螺激光动平衡机	108
第四章 激光热处理	122
第一节 激光热处理工艺的基本原理及其特点	122
第二节 影响激光热处理的因素	123

第三节	钢、铁和铸铁的激光热处理·····	128
第四节	金属针布激光淬火·····	140
第五节	半导体的激光退火·····	146
第六节	激光退火太阳能电池·····	156
第七节	激光在化纤生产中的应用·····	158
第五章	激光准直·····	165
第一节	激光准直仪·····	165
第二节	激光准直在煤矿井掘进工程中的应用·····	173
第三节	用激光测定铅垂方向移动物体的摆动·····	177
第四节	激光准直测量中的几个问题·····	184
第五节	激光导向仪·····	189
第六节	激光准直仪、导向仪及经纬仪应用概况·····	192
第六章	激光精密测量和检测·····	194
第一节	激光干涉测长·····	194
第二节	光学平行平板的平行度的测量·····	217
第三节	用激光检查牛顿环·····	219
第四节	激光测量铝板厚度·····	222
第五节	激光前向散射法测径·····	223
第六节	双平板剪切激光干涉仪·····	228
第七节	激光无接触测电流和电压·····	233
第八节	激光衍射法测量外螺纹的参数·····	241
第九节	激光扫描测径仪·····	244
第十节	用激光进行平面光洁度检查·····	248
第七章	全息照相及其应用·····	264
第一节	全息照相的基本原理·····	264
第二节	全息照相的特点·····	270
第三节	菲涅耳全息照相与夫琅和费全息照相·····	271
第四节	静态全息照相·····	272

第五节	动态全息照相·····	283
第六节	超声全息照相·····	284
第七节	光学全息照相干涉测量技术的基本原理·····	291
第八节	振动的全息测量与应力分析·····	293
第九节	立体全息相片的印相和放映·····	301
第十节	全息录音·····	306
第十一节	采用全息照相技术保存艺术珍品·····	313
第十二节	物体表面形变的全息测量·····	314
第十三节	夹板蜂窝结构的检查·····	320
第十四节	激光全息照相技术的其它应用·····	325
第八章	激光测距 ·····	329
第一节	相位法测距·····	329
第二节	脉冲法测距·····	338
第三节	电路中产生误差的消除方法·····	344
第四节	激光地形测绘仪·····	347
第九章	激光通信 ·····	356
第一节	大气通信·····	356
第二节	半导体激光通信·····	367
第三节	卫星间二氧化碳激光通信·····	374
第四节	光导纤维通信·····	381
第五节	光纤被覆·····	398
第六节	光纤的连接·····	408
第十章	激光光谱学及其应用 ·····	417
第一节	激光线性光谱学与非线性光谱学概述·····	417
第二节	饱和光谱学·····	437
第三节	双光子光谱学·····	442
第四节	俘获粒子光谱学·····	452
第五节	喇曼光谱学·····	453

第六节	微微秒激光光谱学.....	478
第十一章	激光辐射危害及其控制措施	490
第一节	激光的生物效应.....	490
第二节	无防护的激光对眼、皮肤、神经系 统可能引起的损伤及其损伤阈值.....	494
第三节	激光器的危害评价和分类.....	503
第四节	与激光危害评价和防护标准有关的计算.....	511
第五节	激光辐射危害的控制措施.....	551

第一章 激光打孔

随着近代工业和科学技术的发展，使用硬度大、熔点高的材料越来越多，并常常需要在这些材料上打出又小又深的孔。例如化学纤维湿法纺丝的喷丝头、钟表或仪表轴承、钻石拉丝模具，以及火箭或柴油机中的燃料喷嘴等的加工任务，用通常的机械钻孔方法很困难，有的甚至是不可能的，而用激光打孔，则能比较好地完成任务。

第一节 激光打孔的基本原理

所谓激光打孔，就是将聚焦的激光束射向工件，把工件的指定范围“烧穿”。一般说来，当功率密度为 $10^5 \sim 10^6$ 瓦/厘米²时，就能使各种材料（包括陶瓷）熔化或气化，即达到“烧穿”的目的。由于激光的亮度极高，只要将中等强度的激光束用透镜聚焦，在焦面处的功率密度远远大于上述的数值，因此激光是一种强有力的打孔工具。

在焦面处的激光功率密度，等于激光输出功率除以光点面积，即

$$F = \frac{4P}{\pi d^2} \quad 1-1$$

式中 F 为焦面处的激光功率密度， P 为激光输出功率， d 为焦面处光点的直径。

虽然说激光的方向性极好，但也有一定的发散角。假设激光束的发散角为 θ ，聚焦透镜的焦距为 f ，则在焦面上的光

点的直径 d 为

$$d = f \cdot \theta$$

1—2

在一般情况下，固体激光器的光束的发散角为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 弧度，如果聚焦透镜的焦距为几厘米，那么光点的大小就是几十至几百微米。下面对经过聚焦的激光，在焦面上的功率密度作一粗略的计算。

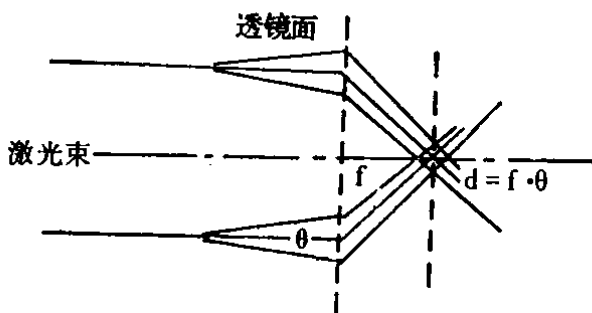


图 1—1 激光束的发散角

假设脉冲固体激光器输出的能量为 5 焦耳，激光脉冲宽度是 1 毫秒，激光束的发散角为 10^{-2} 弧度，聚焦透镜的焦距为 2 厘米，则焦面上的功率密度为

$$\begin{aligned} F &= \frac{4P}{\pi d^2} \\ &= \frac{4 \times 5}{3.14 \times 2^2 \times (10^{-2})^2 \times 10^{-3}} \\ &= 1.6 \times 10^7 \text{ 瓦/厘米}^2 \end{aligned}$$

如果激光器输出能量是 10 焦耳，激光脉冲宽度为 1 毫秒，激光束发散角为 10^{-3} 弧度，聚焦透镜的焦距为 1 厘米，则焦面上的功率密度为

$$\begin{aligned} F &= \frac{4 \times 10}{3.14 \times 1 \times (10^{-3})^2 \times 10^{-3}} \\ &= 1.3 \times 10^{10} \text{ 瓦/厘米}^2 \end{aligned}$$

从上面粗略的计算，我们可以看出，在焦面上的激光的功率密度均在 $10^7 \sim 10^{10}$ 瓦/厘米² 之间。即使这些能量损失 90%，也大于 $10^5 \sim 10^6$ 瓦/厘米²，因此仍可使各种材料（包

括陶瓷) 熔化或气化, 达到打孔的目的。在不同材 质 上 打 孔, 所需要的功率密度不同, 可根据 1—1 式选择输出功率密度适当的激光器。

一、激光打孔的优点

1. 效率高。激光打孔, 仅在千分之一秒左右 就 能 完 成。这样做不仅生产效率高, 而且可在工件移动过程中进行打孔, 便于自动化加工。另外, 激光打孔过程与工 件 不 接 触, 这就省去了一般机械加工方法所造成的钻头断裂、磨损、更换等问题。工件的装夹、固定也很简单。

2. 可加工各种材料的微孔。一般机械钻头只能钻出直径大于250 微米的孔, 而激光则能加工出 10 微米以下的小孔。就加工种类来看, 不仅可对金属而且可对非金属甚至橡胶等进行钻孔。从深径比来看, 用激光打出的孔, 其深度与孔径之比, 可高达 50 以上, 这是用其它加工方法难以达到的。如用一般方法在极硬的氧化铝陶瓷上加工小孔所得到的深径比为 2, 超声波法只有 4, 而激光可达25。

3. 由于加工过程与工件不接触, 因此加工出来的工件清洁, 没有污染。由于加工时间短, 所以对被加工的材料氧化、变形、热影响区域均较小, 不需要特殊保护。

4. 激光不仅能对置于空气中的工件打孔, 而且也能对置于真空中或其它条件下的工件进行打孔。

二、激光打孔机的结构

激光打孔机一般由激光器; 激光电 源; 聚 焦、瞄 准 系 统; 控制系统; 精密工作台等部分组成, 如图 1—2 和图 1—3。

目前激光打孔所使用的激光器, 除红宝石激光器外, 还有钕玻璃激光器、钇铝石榴石激光器和二氧化碳激光器等。

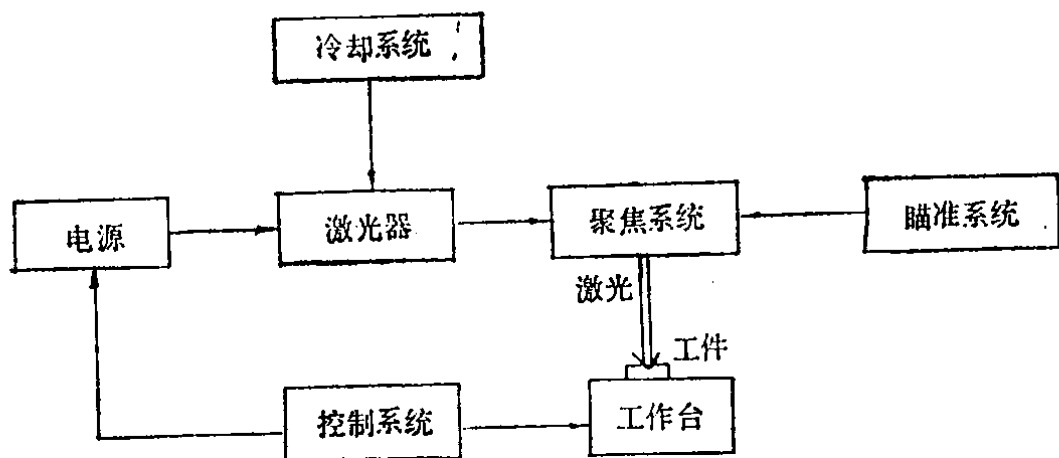
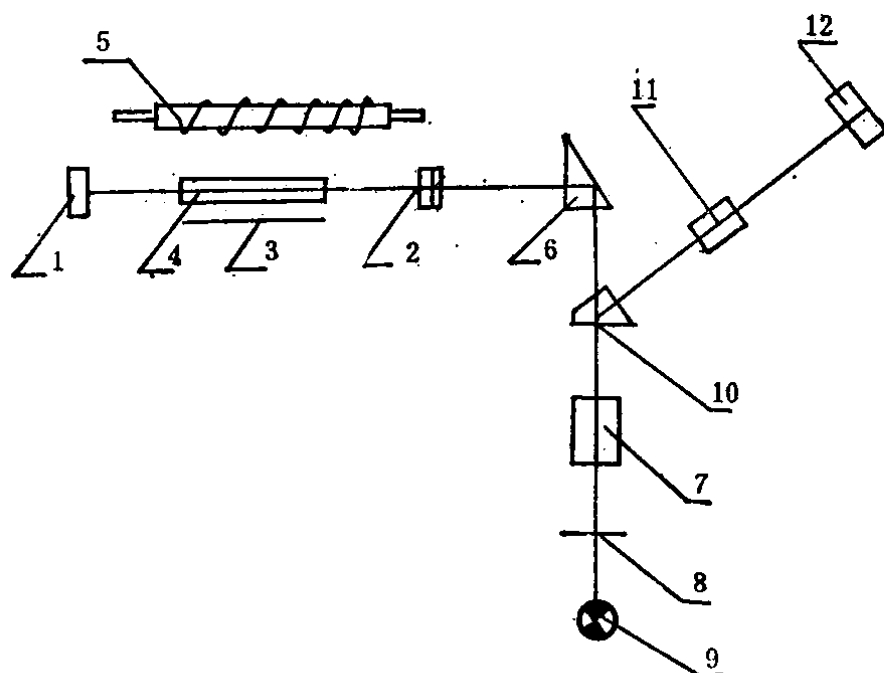


图 1—2 激光打孔机结构图



1. 全反射镜； 2. 半反射镜； 3. 聚光腔； 4. 红宝石棒；
5. 氙灯； 6. 有角棱镜； 7. 聚焦物镜； 8. 工件； 9. 照明
灯泡； 10. 半五角棱镜； 11、12. 组成光学观察瞄准系统

· 图 1—3 红宝石激光打孔机光路示意图

激光打孔机所使用的电源，一般由电容器、脉冲触发电路和控制电路组成，以确保激光器处于脉冲工作状态。其瞄

准、聚焦系统，是用来观察工件，瞄准所要打孔的位置，而聚焦系统则将激光束会聚于瞄准点。

激光打孔机的精密工作台，用来安放工件和沿水平、垂直的方向移动工件；控制系统在大量生产的情况下，用来协调工件的送料与激光脉冲之间的动作。

在打孔时，先将棱镜（半五角棱镜）移入光路，通过观察瞄准系统，调节工作位置及其与聚焦镜之间的距离，找到在工作上需要打孔的位置，并能清楚地观察工件表面。然后将棱镜移出，这时触发激光器，射出的脉冲激光经聚焦物镜聚焦在工件上，并打出孔来。

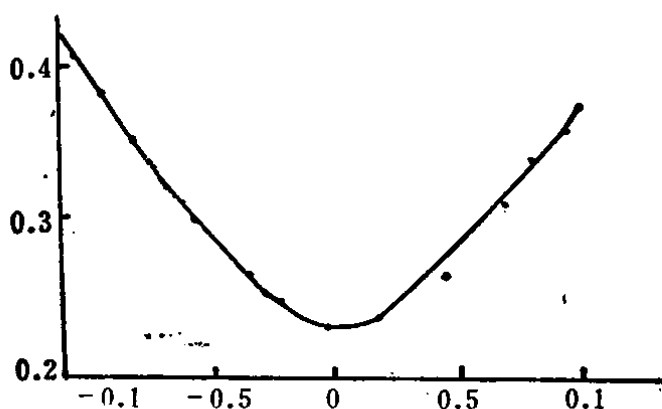
我国生产的 6601 型激光打孔机的最大输出能量为 5 焦耳；电源电压为 220 伏，50 周；电容器容量为 4000 微法；高压脉冲电压小于 1200 伏；工作物质为红宝石 $\phi 8 \times 120$ 毫米，反射镜反射率为 40%、98% 的多层介质膜；聚光腔为内径 252 毫米的玻璃球；激励源为 $\phi 14 \times 130$ 毫米的直管氙灯；光学系统由打孔光路、观察光路、照明光路组成，并具有三套聚焦物镜 NA0.1、NA0.15、NA0.2。

激光打孔机发展很快，国外一些较先进的激光打孔机都采用闭路电视对加工过程和加工质量进行监视。通过瞄准光学系统，用视频监视器来决定工件的位置。因此，可以同时调节焦点，将工件表面置于聚焦透镜的焦面上。所以操作和观察都是通过视频监视器来进行的，因此很安全。

三、激光打孔的孔径和深度

要根据对工件孔径和深度的实际需要，选择相应的激光打孔机。激光打孔的大小，取决于激光束在聚焦透镜焦平面上的光斑的大小。据 1—2 式， $d = f \cdot \theta$ 可知，在一般情况下，激光的发散角越大，透镜的焦距越大，打出的孔也就越

大。在激光器输出能量一定的情况下，孔径的大小还与聚焦透镜的聚焦状况有关。当激光束的焦点位置偏离加工物件的表面时，孔的直径变大。



加工表面和焦点的距离 (毫米)

(材料铝，输出能量1.1焦耳，脉冲宽度0.5毫秒，焦距25 毫米)

图 1—4 孔的直径与焦点距离的关系

如果在焦面处激光功率密度足够高时($\sim 10^7$ 瓦/厘米²)，并假定孔深的形成速度接近于稳态值的话，那么最大孔深的近似公式为

$$X = \frac{F \cdot t}{(L + cT_p)} \quad 1-3$$

式中 F 为功率密度， t 为激光脉冲宽度。

另外，孔深与聚焦透镜的焦距也有很大关系，一般短焦距的透镜，打出的孔小而深。孔的深度也和焦点的位置有关。如把焦点调到物体表面的下面，打出的孔较深。对于不同的材料，焦点向表面下面偏移的距离也各不相同，越是容易加工的材料，这个距离越大。

第二节 影响激光打孔的因素

激光打孔比机械钻孔在原理上复杂得多，因此，影响打孔的因素也就比较多。比如

一、激光脉冲能量

在一般情况下加工的孔径越大、越深，工件材料的导热性越好、熔点越高、硬度越大，所需要的激光能量也就越大。反之，则小。目前，一般采用短焦距聚焦透镜来提高激光的能量密度。但是，由于短焦距聚焦透镜与工件之间的距离近，打孔时蒸汽或金属熔渣飞溅在透镜上，使镜片污染，影响连续生产。为了拉长聚焦透镜与工件之间的距离，而又能保证生产时所需要的孔径，可以采用长焦距聚焦透镜和缩小激光发散角 θ 的办法，这就要求激光束的方向性好，能量密度分布均匀。就激光打孔效率而言，并不是能量密度越高越好，激光打孔的最佳效率，被限定在一个相当窄的强度范围内。以 Nd—YAG 激光器来说，大多数金属打孔的最佳效果的功率密度大约在 $5 \sim 50$ 兆瓦/厘米² 左右。如果能量密度较低，热传导和反射损耗就要增加。如果功率密度太高，诸如蒸汽雾中的光束散焦现象或感生的空气击穿效应，就会降低打孔效率和打孔过程的重复性。

二、激光脉冲时间

激光脉冲持续时间为零点几毫秒到2.3毫秒时，打孔的效果比较好。时间太长，会使热量散失掉。时间太短，则对工件的作用太浅。

三、工件材料的影响

如果材料对激光波长的吸收率高，则打孔的效率就高。如果吸收率低，激光能量大部分被反射或透过工件而散失掉，那么打孔的效率就低。而且不同材料对不同激光波长的吸收和反射率也不同，因此要根据工件材料的性质来选择激光器。例如，对宝石轴承的打孔，选用波长为6943埃的红宝石激光器和波长为10.6微米的二氧化碳激光器；而对玻璃、石

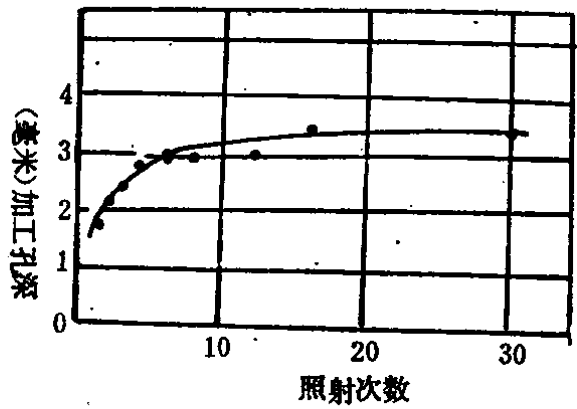
英、陶瓷等材料的打孔，则应用波长10.6微米的二氧化碳激光器。

四、多次重复打孔

若激光能量有限，而又要求打出较大、较深的孔，或者打微小的深孔，一般采用多次重复打孔的方法较为适宜。因一次激光照射的加工深度只有表面直径的3—4倍，如果增加激光器输出功率(或输出能量)，打孔的深度也随之增加，表面直径也随之增大，因此采用单次照射的加工方法不能打微小的深孔。如果采用激光反复照射的加工方法，则表面直径几乎不变，而延深中间粗的部分，从而增加孔的深度。因此，多次重复打孔，是打微小直径深孔的有效途径。

此外，在加工红宝石、金刚石和陶瓷等脆性材料时，如加大一次激光的输出能量，则会因热变形造成裂纹，甚至破裂。因此，在加工这类脆性材料时，应减小每次照射的能量，而采用多次重复打孔的加工方法，以免损坏工件。实验表明，在对做轴承用的蓝宝石打孔时，只要输出能量超过1.4焦耳，几乎所有工件均产生裂纹或破裂。

这里需要指出的是，虽然多次重复照射是打微小深孔和加工脆性材料的有效方法，但照射次数有一定限度，当超过这一限度时，即使再次照射，小孔并不加深。图1—5是加工碳素钢的情况，大约在5个脉冲以前，深度呈直线增加，以后就增加缓



试料为碳素钢，输出能量为6.3焦耳

图1—5 照射次数与孔深的关系示意图

慢，以致出现饱和趋势。这是因为随着孔深的增加，由于散射或吸收，使孔尖端部分的能量密度减少，限制了孔深的继续增加。

五、焦点附近的能量分布

激光能量在焦点附近的分布情况，对激光打孔质量的好坏影响很大。如果激光在焦点附近的能量分布比较均匀、对称，则打出的孔比较圆，如果分布得不对称，那么打出来的孔将呈单边形状，即偏向一边。若激光在焦点附近除一个主要光点之外，还有一个光点，则打出的孔也对应为两个，使加工的工件成为废品。实践表明，激光能量在焦点附近的分布状况与激光器工作物质的光学均匀性以及谐振腔的振荡模式有密切关系。如果对孔的圆度要求特别高，那么就必须对激光器进行选模，应使其仅在基模振荡。

六、激光照射表面的表面温度

激光加工是一种热加工，应尽可能减少热传导所损失的能量，必须使投射到工件上的能量有效地用于加工。因此，用脉冲激光加工较为有效。目前大多采用红宝石脉冲激光器和掺钕钇铝石榴石脉冲激光器。在激光打孔时，光能穿透到工件中的深度大约为 10^{-2} 微米，这表明光能大部分为材料表面所吸收而变成热能。

如把激光视作功率密度为 P 的均匀的圆形热源，而把工件看作是半无限大的物体来处理，则激光照射面上的温度 T 可由下式决定

$$T = 0.48 \frac{P}{K} \sqrt{\frac{kt}{\pi}} \quad 1-4$$

式中 K 为热传导系数， k 为温度扩散系数， t 是照射时间。根据上式来估算，把工件加热到沸点以上所需的功率密度对

于大多数金属均为 $10^5 \sim 10^6$ 瓦/厘米²。金属表面对激光反射率随材料而异，大至在50%以上。因此，即使考虑到反射损失等因素，金属打孔所需的激光输出能量也仅为几个焦耳。

七、焦点位置对加工孔的影响

激光聚焦的位置对孔的形状和深度影响很大。用焦距为20毫米的聚焦透镜给碳素钢打孔的时候，其断面如图1—6所示。如果焦点在工件表面的内侧，则孔呈圆锥形。如果焦点在表面上，则中间稍微粗点。当焦点在加工面以外时，则中间粗的位置向表面靠近。这里孔深、孔径和加工量都随散焦距离 L 而改变。这一点可从图1—7所示的焦点位置同小孔深度的关系来说明。从图1—7中可以看到，为了提高加工量，应将工件置于焦点上，或稍靠近焦点内侧。加工量最大的散焦距离，因工作材料而异。

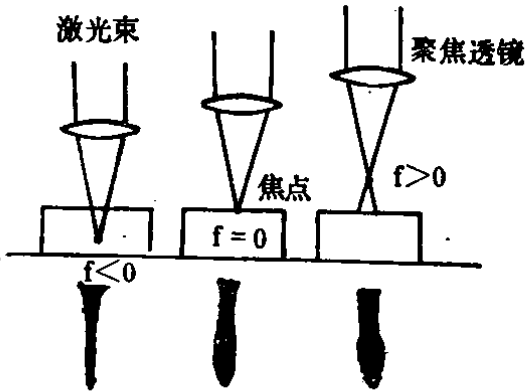


图1—6 焦点位置不同所引起的孔断面的变化

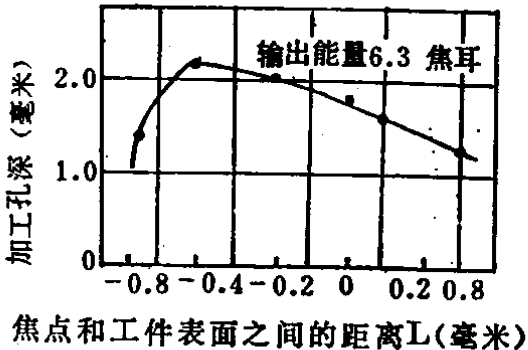


图1—7 加工面位置和孔深的关系示意图

图1—8所示为用输出能量2焦耳，脉宽为1毫秒的红宝石激光（用焦距为39毫米的透镜聚焦），以30个照射脉冲来加工（厚度为3.2毫米）的铝板的孔形示意图。图1—8(a)是焦点一开始就固定在表面上，加工时焦点位置并不改