

综 述

激光打孔误差分析及提高 打孔质量的工艺措施

李儒荀 曹伟明

(机械工程系)

激光打孔的质量可用下面几个指标来衡量:孔的几何尺寸精度,孔的横截面和纵向截面形状与所要求形状的符合程度,孔的表面粗糙度以及表层的结构状态、成分和性能。

从工艺观点来看,加工精度决定于所加工出的一批工件尺寸的分散域,取决于加工的综合误差。

影响综合误差和加工结果重复精度的基本因素分为三类:一类为与激光射线各参数(功率、能量、发散角以及它的时间和空间结构等)不稳定性有关;一类是工艺过程的各种误差(安装误差、工件在射线作用区的位移误差、聚焦误差、激光装置本身的不精确性及调整误差等);还有一类是与工件材料的性能和结构的不均匀性,以及射线同材料相互作用过程的不稳定性有关的误差。误差的分类及产生的原因如下^[1]。

为了提高激光打孔精度和质量,必需减少各种原始不稳定因素对加工综合误差的影响。总的来说有五方面:(1)工艺上改善作为加工刀具的激光本身的特性;(2)完善加工方法;(3)在激光加工的同时供给辅助能量以强化孔的形成过程;(4)激光打孔后的校准和后序精加工;(5)建立自动调整和适应系统,以便自动保证所要求的加工结果。

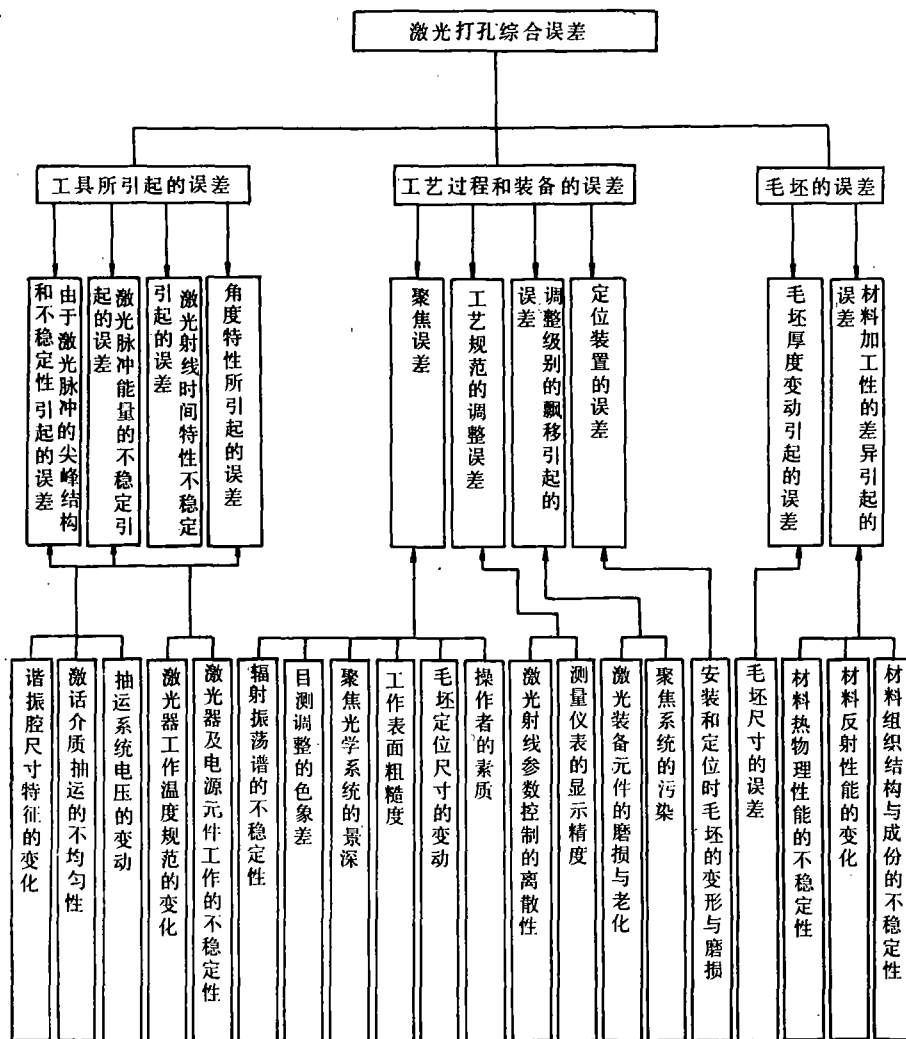
1 改善激光射线的特性

1.1 优化激光打孔的热规范

减少被加工孔内被加工材料光蚀产物中的液相数量,可改善加工质量,为此必须减少因传热机理从孔壁散失的激光脉冲能量,限制激光功率密度的下限值,可以缩短建立准稳定气化的时间^[2],即激光打孔要求:

$$W_p \geq 30 \frac{L_0 a}{r_0} \ln^{-1} \frac{\bar{u} \cdot r_0}{30a} \quad (1)$$

误差的分类及产生的原因



式中

L_0 ——在 0°C 时工件材料单位体积的气化能

\bar{u} ——固体中的平均声速

a ——导温系数

r_0 ——聚焦后的光斑半径

对于很多金属材料 $L_0 = (1 \sim 5) \times 10^4 \text{ J/cm}^3$, $a = 1 \text{ cm}^2/\text{S}$, $\bar{u} = 10^5 \text{ cm/S}$, 当 $r_0 = 100 \mu\text{m}$ 时, $W_{p\text{min}} = (1 \sim 5) \times 10^7 \text{ B/cm}^2$.

必须指出,按(1)式选择功率密度并不能消除产生液相等原因,而只是有利于减小孔的锥度。

1.2 完善激光脉冲结构

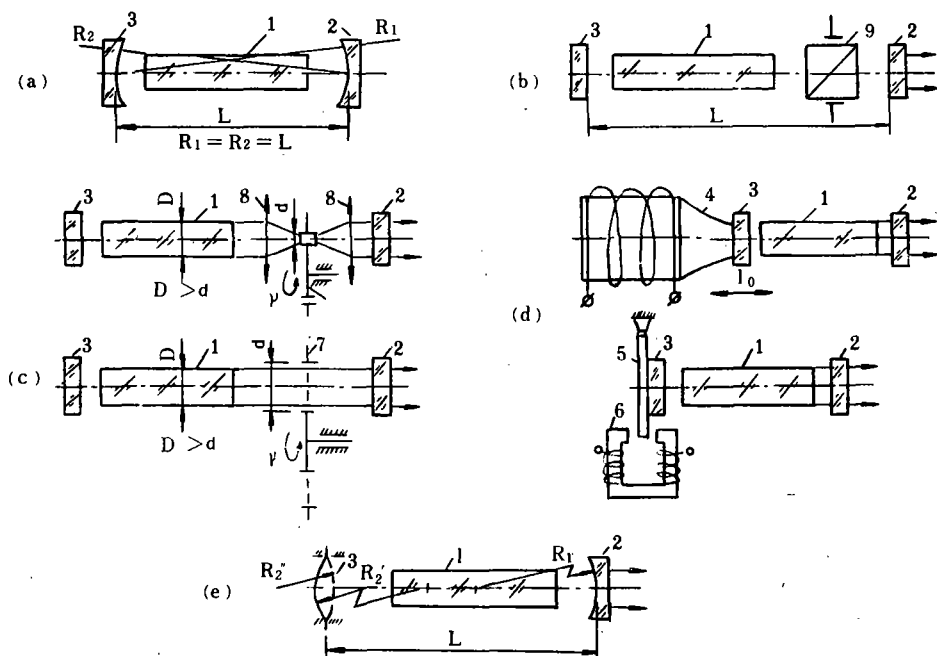


图1 使激光脉冲有序化的谐振腔结构

1. 激光介质 2, 3. 谐振腔反射镜 4. 超声振动头 5, 6. 电磁系统 7. 孔板 8. 望远装置透镜 9. 光开关

完善激光宏观和微观时间结构,就要求采用一定形状和结构的脉冲。首先,在于微观上有序化尖峰脉冲的时间与强度(即自由振荡的每一个尖峰脉冲都具有相同的形状,相同的脉宽和能量,尖峰脉冲之间的时间间隔也为常数,具有均匀的空间分布);其次在宏观上,脉冲应具有较陡的前沿和较短的后沿(即缩短脉冲后沿时间),选择的脉冲系列参数足以使每个尖峰脉冲都引起材料气化而使熔融物的数量最小。为此尖峰脉冲之间的最佳间隙系数应满足下式^[3],

$$\begin{cases} \frac{\tau_1}{\tau_0} \geq 3.2 \times 10^{-3} \left(\frac{L_0}{\rho C T_m} \right) \\ \frac{W_{p1}}{T_0} = \frac{10k}{\sqrt{a\tau_0}} \end{cases}$$

τ_0, τ_1 ——尖峰的持续时间和它们间的时间间隔(S)。

W_{p1} ——单个尖峰脉冲功率密度(W/cm²)

ρ, C, k, T_m ——分别为被加工材料的密度、热熔、导热系数和溶化温度

T_0 ——气化表面的温度(°K)。

对于许多金属来说($L_0/\rho C T_m \approx 20$)，所有尖峰脉冲间隙系数大于1的激光脉冲，一般即能满足上述条件，就能稳定被加工孔内的热规范，消除尖峰间隔内的热积累，从而减少恶化加工结果的熔融物的数量。

为了稳定激光脉冲的时间结构，可以采用下列工艺方法：

采用无论单模振荡还是多模振荡都同时具有高Q值的光学谐振腔(图1(a))^[4]，采用Q开关技术，用转镜Q开关，声光Q开关，染料Q开关等调节谐振腔的品质因数Q值(图1(b))^[5]，用具有孔系的回转圆盘来周期性地改变谐振腔的Q值(图1(c))^[6,7]，使一个反射镜作超声振动以部分调节谐振腔的Q(图1(d))^[8]率，改变具有超声频率的一个反射镜的曲率也可部分调节谐振腔的Q值(图1(e))。

完善激光脉冲时间和模式结构的一些辅助方法是：增加前面尖峰脉冲(1~2个)的强度，以便加快被加工材料表面对辐射能量的吸收；在输出反射镜后采用具有二极管特性的光学元件，以便消除由于在谐振腔内的反辐射而诱发的虚假模。

1.3 减小激光射线束的发散度

可以采用如下方法：在谐振腔内安装选模光阑(图2(a))，此时，装置的参数为：

$$d_g = 1 \sim D \text{mm}$$

$$\theta_d/d_g \approx \theta/D$$

在谐振腔外采用一个伽利略望远镜系统(图2(b))， $\theta_r = \theta_r + [D/2 + (X + \Delta)\theta]r\Delta/F_1^2$ ^[3]

Δ ——望远镜散焦

$$r = -F_1/F_2$$

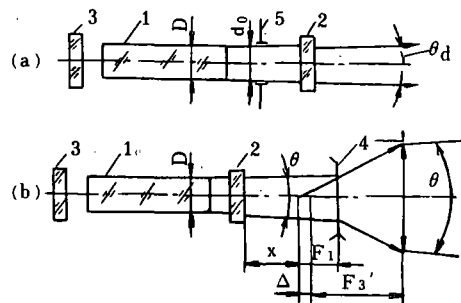


图2 可调发散的激光谐振腔结构

1. 激光介质 2, 3. 反射镜 4. 散焦望远镜 5. 选模光阑

2 完善加工方法

加工方法是指构成工艺过程和技术服务的一些操作，它包括为保证在加工区获得必需的尺寸和能量特征值而实行的激光射线的聚焦方法；把工件放在焦散面内所要求的位置上，以及其它一些稳定加工过程和改善加工

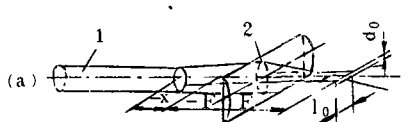
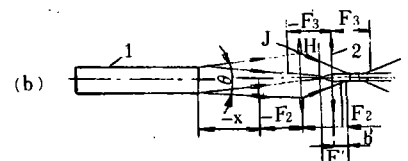
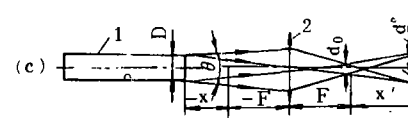
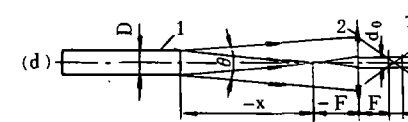
结果的辅助方法。

2.1 激光射线的聚焦

激光束的几何特性对孔的精度和质量有很大影响,为了获得精密的孔除了其它因素之外,还必须把工件放在光学聚焦散面内的一定位置上,以便在工件厚度的加工区内,在纵向和横向截面都具有最大均匀的激光功率密度分布,在焦散面内有两个和被加工零件表面并存的特殊平面,即焦平面与激光器端面的象平面。

焦平面和象平面之间的距离以及焦散面的形状,决定于光学系统与激光器之间的距离,在它们的某个相对位置上,在焦散面内的光斑大小和工作物质端部(或者光阑)的象平面上的光斑大小相等,即当激光束的交叉点与光学系统的前焦点相重合时,在焦平面与象平面之间形成了一个圆柱形的通道(又称圆柱形光管),圆柱光通道的长度为 $X' = F^2\theta/D$, 直径为 $d_0 = d' = \theta \cdot F$, F 为焦距, θ 为发散角, D 为激光束直径(工作物质或光阑的发光区的直径),见表 1 和图 2(d)。

表 1 激光聚焦参数的计算^[9]

聚焦加工简图	参数的计算方式
	$d_0 \approx \theta F$ $l_0 \approx D[1 + (x + F) \times \frac{\theta}{2}]$
	$d_0 \approx \theta F$ $F' = \frac{F_2 F_3}{F_2 + F_3 - d}$ $b' = F'(1 - d/F_2)$
	$d' = Dx / F;$ $x' = F^2 / x$
	$d_0 = d' \approx \theta F;$ $x' = F^2 \theta / D;$ $x = D / \theta$

(1)激光器 (2)聚焦透镜 (3)透镜

因此,目前激光打孔有三种不同的方式:(1)工件表面位在物镜(透镜)的焦平面上;(2)工件表面位在激光器和光阑的象平面上;(3)工件位于圆柱形光通道中。

在加工圆孔时,后两种方法比在焦平面上加工有一定的优点,这是因为在焦平面上,激光束的能量(功率密度)的分布是高斯形状,在光束斑边缘的功率密度不足以使材料气化,大部分激光脉冲能量消耗在材料的熔化上。在照射面和中心部位气化压力作用下,被熔化的材料从孔中心向外蠕动,其结果使孔的入口部分变成锥形。用投影光阑可以切去激光束外缘功

率密度低于气化阈值的部分,又由于激光照射区比较小,故可大大减小孔的入口锥度。

在圆柱形导光管内加工时,为了调节圆柱形光管的直径与长度,可在聚焦物镜与激光器之间安装一个望远镜系统和二个可变光阑——一个装在望远镜系统的物镜焦点处,另一个装在离它的出口光瞳不远的地方。调整圆柱形光管的直径可用同时改变两个光阑直径的方法来实现。当第二个光阑沿光轴移动并同时改变该光阑直径,就能调整导光管的长度,用这样的系统还可以得到一系列圆锥形光管,而且它们的变化范围相对于某尺寸来说是比较大的。采用圆柱形光管加工材料,可大大降低(在个别情况下可消除)孔壁对激光功率的直接吸收,这就可以提高加工精度,同时可以消除由于孔深的加大,由于散焦而带来的功率密度下降。

聚焦激光射线可采用单一的透镜(球面、圆柱面或锥面的),也可采用透镜组(例如物镜组)。聚焦的几何参数的计算,如表2所示。

图2(a)为工件表面放在焦平面内的情况;(b,c)为把工件表面放在光阑象平面的情况;(d)为在圆柱光导管中加工,为把工件放在焦散面上所要求的位置上,可采用各种目测聚焦系统。如图3所示,图3(a)所示的方法经常采用,但不适应大批量生产中生产率和精度方面的要求。

视角(能见度)放大倍数为 $r = F_{\text{物}} / F_{\text{目}}$, $F_{\text{物}}$ 为物镜焦距, $F_{\text{目}}$ 为目镜焦距。分辨率 $\delta = \lambda / 2\alpha$, λ 为射线波长, α 为孔径角,量深 $2l = \lambda / 2\alpha^2$

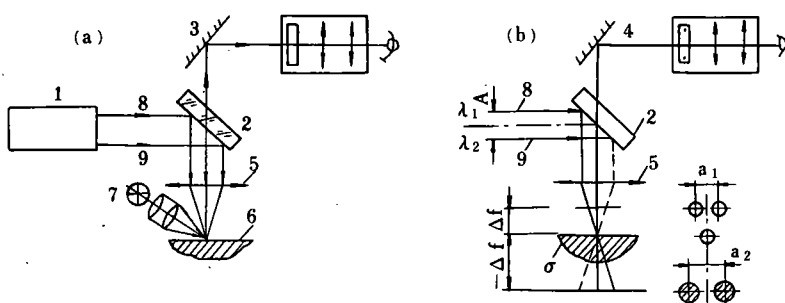


图3 目测聚焦系统

1. 激光器 2,3. 反射镜 4. 目镜 5. 物镜 6. 工件 7. 照明器
8,9. 波长为 λ_1 与 λ_2 由辅助激光器发射出的激光射线

图3(b)中聚焦误差 $\sigma = 0.4 \frac{\lambda_{\max} \cdot F^2}{D A r}$ D 为光瞳直径, λ_{\max} 为波长 λ_1 与 λ_2 中最大者, A 为物镜孔径角, r 为观察系统放大倍数。

为了提高工件的定位精度,最好采用各种自动聚焦装置,如图4所示。

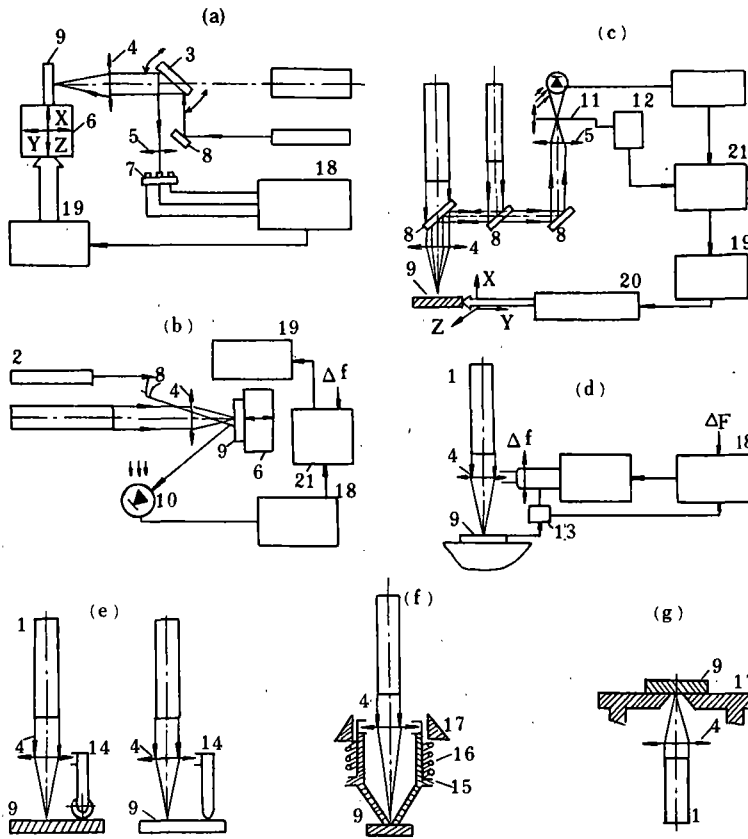


图4 自动聚焦系统

1. 激光器 2. 辅助激光器 3. 扫描反射镜 4. 透镜(物镜) 5. 辅助透镜 6. 工作台 7. 光电二极管
8. 反射镜 9. 工件 10. 光电元件 11. 穿孔带 12. 振动发生器 13. 辅助部件 14. 探头
15. 可动心轴 16. 弹簧 17. 壳体 18. 放大器 19. 信息处理装置 20. 传动装置 21. 资料分析仪

2.2 改善孔的纵向形状

为了减小孔的锥度和防止液相产物的飞溅,可采取:

(1) 在工作表面涂覆一层具有较低表面张力系数的液相薄膜,作为液态涂层的液体应具有下列性质:即能在工作表面形成一层较薄的涂层,并不影响激光射线的聚焦,在高温下气化极慢,例如石油,它可减少出入口处的沉积物,硅油可以减小孔的锥度。

(2) 可在工件表面覆盖上一层屏蔽层,例如铝泊或用工件材料制成 $0.2\sim 0.6\text{mm}$ 的薄片。屏蔽层的厚度根据被加工孔的锥部尺寸选取,过大过小都不合格。由于有覆盖层,使得打出的孔的锥部在覆盖层里面而不是在工件上,而且孔的入口边缘也不会产生修缘现象,并可消除工件表面的沉积物。

(3) 在多脉冲加工时,为了获得圆柱形的孔可周期地把激光射线聚焦到孔底某位置,移动聚焦透镜与工件的相对位置或依次地改换带不同光阑的聚焦透镜或改变工作射线的工作

频率的方法取得。

2.3 改善透光材料的加工性

在玻璃、宝石和金刚石等透光材料上打孔时,为改善它们的加工性,可在其表面涂覆一层具有很好的光吸收性能的涂层,例如碳黑,墨汁、气体碳黑液等。把金刚石放在水银里以便导出金刚石——介质边界上的机械和热振荡,从金刚石四周吹氧气以减少石墨化,在熔融金属里预热金刚石,以便增加钻孔速度。

2.4 防护光学元件免受激光光蚀产物的污染

(1) 可采用机械遮蔽物(图5)。例如带孔的圆盘式叶片的回转($n=24000r/min$),图5

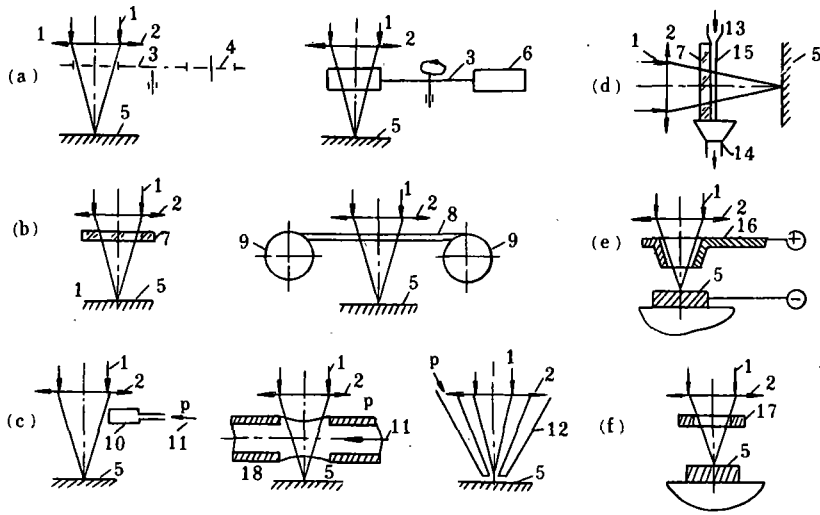


图5 防护光学元件的方法

1. 激光器 2. 透镜(物镜) 3. 圆盘 4. 孔 5. 工件 6. 叶片 7. 玻璃 8. 电影底片 9. 传动轴
10. 喷嘴 11. 防护气体 12. 锥形喷嘴 13, 14. 漏斗 15. 液体 16. 电极 17. 永久磁铁 18. 管子

(a);在聚焦透镜被加工表面之间放置透光遮蔽物,例如玻璃,电影胶片等,如图5(b);采用吹气(空气)装置如图5(c);采用液体保护层,如图5(d)。

(2) 利用场能,例如加电场或者电磁场如图5(e);利用磁场,如图5(f)。

3 强化孔的形成过程

在激光加工过程中,同时供给其它形式的辅助能量,不但能强化孔的形成过程,提高生产效率,而且能扩大孔的加工范围(深度和直径)和改善加工质量。常用的强化激光加工方法有如下几种:

3.1 预热加工区

用等离子火焰、电流、电磁感应等预热加工区,可以改善孔的质量与纵向廓形,减小表面粗糙度。

3.2 利用气体能量

有三种方法：

(1) 在工件后表面上(即工件上与支承相接触的表面上)涂覆一层气化温度大于工件材料熔化温度的材料。当由于激光射线的作用而形成孔时,这种易熔物开始气化,并形成蒸气,可阻止金属熔融物自由流动,从而改善孔的廓形,涂层种类的选择决定于在被加工材料熔化温度时以具有最大蒸气压力来确定。如甘油、二甲苯、雪松油、石蜡等。

(2) 在吸收性能较差的透光材料(例如半导体等)上打孔时,可把激光射线经过工件聚焦到具有很高吸收能力的底座上,这可减轻孔的形成过程,改善孔的纵向形状。

(3) 吹气(图6(a)),即在激光打孔时,同时吹压缩空气,可以清除孔腔内的熔融物,校准孔的尺寸和减小孔的表面粗糙度。

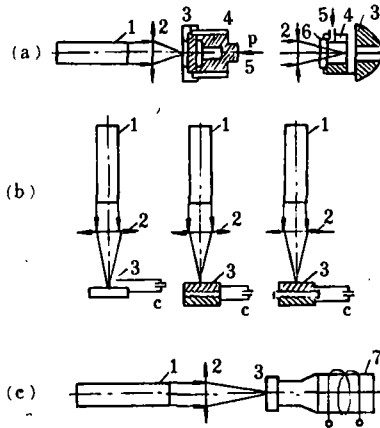


图6 强化孔形成过程的方法

- 1. 激光器 2. 透镜 3. 工件 4. 压力室
- 5. 工作气体 6. 玻璃 7. 超声振动头

3.3 采用复合加工方法

即把激光加工与其它特种加工方法同时使用,例如 采用电火花——激光加工(图6(b)),可提高孔的尺寸精度,控制孔的纵向形状,减小孔的表面粗糙度。超声——激光加工(图6(c))可改善孔的纵向形状,提高孔的尺寸精度。

4 孔的后序加工

在加工一些高质量的孔,特别是在难加工材料上打孔时,若用激光加工和前述的方法都不能满足精度和表面质量要求时,可把激光加工作为粗加工,然后再用下面一些方法进行孔的修正(后序加工)。

4.1 气力校正

如前所述,在激光加工时,同时吹入压缩空气可减小孔的几何形状误差和提高表面质量(图7(a,b)). 利用激光的反作用来校准孔(图7(c)). 在工件下面一定距离处安装一个反射镜,从工件出来的激光射线经反射镜再作用于工件,这样可以校准的质量决定于激光能量及工件与反射镜之间的距离,选择适当,可以获得相当准确的出口直径及形状。

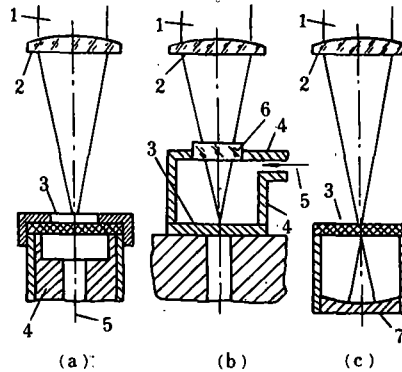


图7 校准孔的方法

- 1. 激光射线 2. 透镜 3. 工件 4. 高压室
- 5. 气体 6. 玻璃 7. 反射镜

4.2 机械研磨校准

在陶瓷、耐酸钢、合金及钽上打孔时,可用钨丝、高速钢或硬质合金制成的工具进行机械

研磨,这可减小孔的表面粗糙度,提高孔的精度,在全长上打出要求的横截面形状的孔。

4.3 超声波精加工

在宝石、金刚石、陶瓷、硬质合金材料上打孔时,用弹簧钢、金属结构钢及钛金属等作工具,采用超声校准可以降低孔的表面粗糙度,去除变质层,提高孔的精度和改善它们的廓形。

4.4 化学腐蚀

在铜及铜合金、铝及铝合金、碳钢或合金钢上打孔时,可用70%的硝酸溶液进行化学腐蚀,可以改善孔的横截面形状,减小表面粗糙度以及孔壁的波纹。

4.5 用磨粒悬浮液加工

在硅微晶玻璃、夹布玻璃胶板等复合材料上打孔,可用细的研磨粉加工,从而能减小孔的表面粗糙度,改善孔的纵面形状。

5 提高重复精度的方法

在利用激光打孔时,除了要保证单独孔的精度和表面质量之外,还要求有很好的各孔的重复精度,重复精度决定于激光射线参数的稳定性、加工规范等因素。因为在自由振荡脉冲时间内和它结束之后,熔融物的形成及重新分布过程都不仅影响孔的精度,而且大大影响孔的尺寸和形状的重复性,前述提高孔的精度和表面质量的方法,也可改善重复精度,但同时还应该减小激光脉冲参数(能量、脉宽及形状、时空结构等)的不稳定性,这时有两种情况:第一种是在脉冲数目比较少的过程中加工具有孔数不多的一个或几个零件,这时激光发生器的元件没有发生严重老化和损耗;第二种情况则相反,加工时间或周期很长,激光发生器的元件发生了严重的磨损与老化,这时为了提高重复精度可采用如下措施。

(1) 利用激光器在射线参数不稳定性最小时的稳定工作状态下加工。

(2) 激光器在抽运能量大大高于阈值的状态下工作,以便提高射线参数的稳定性。

(3) 建立反馈系统和自适应系统,这样可以随着激光基本元件的磨损和老化而自动不断提高抽运能量,保证激光射线的稳定。

图8是一些行之有效的自适应系统原理图,它们的区别只在于传感器(压敏元件)及控制元件有所不同。图8(a)采用光电传感器(光电发生器)控制工作脉冲数。图8(b)采用光电控制(组合的光电二极管)控制脉冲能量。图8(c)采用声光传感器(传声器)控制脉冲能量。图8(d)采用光电传感器(光电发生器)控制脉冲能量。图8(e)采用光电传感器(光电发送器)综合控制各参数(脉宽、能量、聚焦条件及发散度)。图8(f)采用电动气压传感器,控制聚焦条件。

用多脉冲加工也可以减小各种参数不稳定的影响,可提高加工结果的重复精度,例如:如果用能量为 W/n 的几个激光脉冲代替能量为 W 的一个激光脉冲,并且激光器的不稳定性特性相同就可以减小能量变动的绝对值,导致孔尺寸的均方根偏差随着 n 的增加而减小到 $n^{1/2}$ 。

因此,在设计激光打孔方案时,必须按如下方法进行:

(1) 确定激光射线的参数值——能量、脉宽、发散度、脉冲数。

(2) 选择加工条件——聚焦系统工作物镜的焦距、观察目镜系统的放大倍数,加工方法(在物镜的焦平面内加工,还是在圆柱光管内加工)。

(3) 选择激光工艺装置。

(4) 确定激光装置工艺规范的调节方法。例如调节脉冲能量可用改变激活介质的抽运能量;改变射线光阑直径;采用滤光片或以上方法的综合。调整脉冲宽度,可采用改变抽运线路的参数(如电感、电容、抽运灯电压),或采用光开关,改变气体混合比,或综合采用上述方法。调节激光射线的发散度,可采用改变激活介质的抽运能量,改变谐振腔内部或外部的光阑直径,或利用光学元件(望远系统或透镜)或综合采用上述方法。

(5) 必要时,还要事先确定提高激光打孔质量的辅助措施和过程自动化的方法。

(6) 确定所采用方法的经济效益。激光打孔的机动时间可用下式计算:

$$\text{单脉冲打孔时: } t_m = k \cdot \tau$$

$$\text{多脉冲打孔时: } t_m = k \cdot n + \left(\tau + \frac{1}{F}\right)$$

k 为孔数, n 为脉冲数, τ 为激光脉宽, F 为物镜焦距。

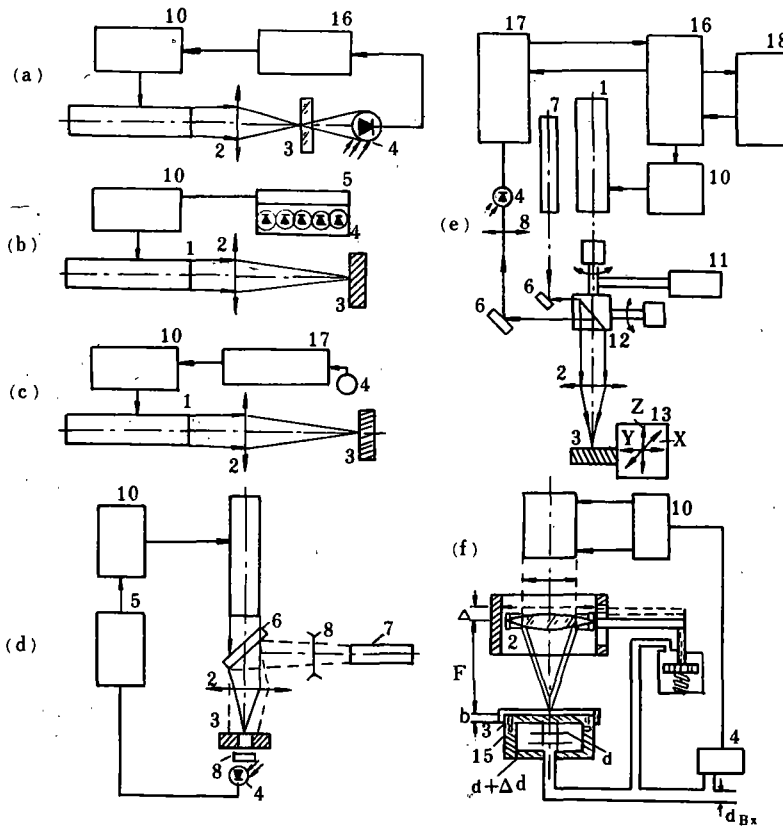


图8 自适应激光工艺系统

- 1. 激光器 2. 透镜(物镜) 3. 工件 4. 传感器 5. 加法器 6. 反射镜 7. 辅助激光器
- 8. 辅助透镜 9. 滤光片 10. 电源 11. 传动系统 12. 双坐标扫描反射镜 13. 工作台
- 14. 气压管路 15. 密封装置 16. 转换器 17. 测量机构 18. 信息处理装置

参 考 文 献

- 1 Коваленко В С, Котляров В П, Дюмин В В. Анализ погрешность при лазерной обработке материалов. Технология и автоматизация машиностроения, 1976; 17
- 2 Либенсон М Н, Суслов Г П, Кокора А Н, иду Методы повышения точности лазерной размерной обработки, 1973
- 3 Вейко В П, Либенсон М Н. Лазерная обработка, 1973
- 4 Суслов Г П. Исследование точности лазерной обработки непрозрачных материалов, 1972
- 5 Рябов С Г, Торопкин Г Н, У сольцев И Ф. Приборы квантовой электроники, 1976
- 6 Басон Н Г, Зуев В С, Крюков П Т. У величение мощности импульсного оптического квантового генератора На рубине модуляцией Д обротности резонатора, ЖЭТФ 1962; 1
- 7 У глов А А, Орехов М В, Кокора А Н. У величение эффективности размерной обработки излучением ОКГ-ФХОМ, 1976; 4
- 8 Белова Г Н. Лазер на неодимовом стекле с управляемой ультразвуком интенсивностью излучения. Квантовая электроника, 1979; 8
- 9 Коваленко В С. и др. Справочник по технологии лазерной обработки. 1985
- 10 Рыкалин Н Н, У глов А А, Зуев И В, Кокора А Н. Лазерная и Электронно-лучевая обработка Материалов, 1985