

激光热处理

译文集

湖南省机械局技术情报中心站

编辑出版：湖南省机械局技术情报站

地址：长沙市城南路长塘里24号

印刷：湖南大学印刷厂

地址：长沙岳麓山

1980.12

激光技术自问世以来，就引起各个领域的重视。激光材料加工是激光技术应用较早且较成熟的领域之一。应用初期，由于激光输出功率和能量的水平比较低，因此最先应用在材料微型加工方面。如钟表宝石、金刚石拉丝模等的打孔；硅片划线；电子行业的微型切割和焊接等方面。随着激光技术的发展，尤其是随着中、大功率激光器的出现，激光材料加工也有迅速的发展。如出现激光深穿焊接，高速切割和金属材料的热处理等。

激光热处理是七十年代中期才发展起来的新领域。最早在1971年11月美国萨吉诺转向器厂第一次试用一台250瓦的二氧化碳激光器对金属材料进行局部硬化试验，1973年初在厂内专业化研究实验室装了一台500瓦的二氧化碳激光器对耐磨条进行试验，1973年末开始设计建造一个试验性的生产专用硬化处理台，1974年9月建成后开始用激光硬化动力转向器外壳。目前美国汽车制造业中正积极地应用这种技术；日本和苏联尚处于研究阶段，还未见到实际用于生产的报告；我国有些单位也正在进行研究。激光热处理是一门崭新的科学，工业先进的国家不仅把激光作为材料研究的有力手段，而且把激光作为材料加工的工具，有人认为这是激光材料加工的第二代。

激光热处理包括：激光表面硬化；激光合金化；激光上釉等工艺。激光热处理适合于材料局部表面处理，经处理后的材料具有高强度、高耐磨性和抗腐蚀性。例如，经过激光表面硬化的可锻铸铁的铸件，其耐磨性几乎十倍于那些未经处理的铸件；激光热处理后工件不变形，因此适合于精密处理；激光能量容易控制，操作简单，能在大气中进行，不象电子束处理那样需要配备真空室，易于实现自动化生产，节约能源、成本低；激光热处理很干净、无公害、有利用环境保护；此外激光器还适合材料的选择性处理和材料的特殊处理，这是一般热处理方法所不能相比的。由于它具有以上的优越性能，所以受到人们高度的重视，其发展也是十分迅速的。

为了适应激光热处理在我国的迅速地发展的需要，我们翻译了国外有关激光热处理文章，编成这本“激光热处理译文集”供有关部门参考之用。本书可作为从事于激光热处理工作的科技人员及高等院校热处理专业的参考书。由于时间仓促，水平有限，错误之处望读者指正。

湖南省激光热处理协作组

一九八〇年八月

目 录

- (一) 用激光扫描或电子束对材料进行热处理和熔化
.....丁朝选译 (1)
- (二) 用激光幅射进行热处理和焊接
.....孙阳智译 (11)
- (三) 激光表面热处理
.....刘 钦译 (20)
- (四) 工业激光器用于金属表面硬化和合金化
.....孙素烽译 (26)
- (五) 用2KW CO₂激光器作金属表面处理
.....李昌华译 (35)
- (六) 激光在金属表面上的新作用
.....郑君翹译 (58)
- (七) 机械零件的激光表面淬火
.....张志权译 (62)
- (八) 利用激光束加工微型凸块
.....周汉兴译 (66)
- (九) 火焰喷涂再经激光熔合涂层
.....陈鸿图译 (73)

(十) 用于切割、焊接和热处理的数瓦新激光器

.....肖俊豪译 (80)

(十一) 用激光加工材料

.....丁朝选译 (81)

(十二) 激光上釉——控制和形成激冷冶金显微组织的一种新方法

.....刘 钦译 (87)

用激光扫描或电子束对材料 进行热处理和熔化

摘 要

材料的激光热处理和熔化过程的热分析式是高斯光源以恒定速度移动时导出来的。并把由此得出的温度分布、冷却速度分布及熔化深度与激光光斑的大小、速度及功率联系起来。本文叙述当功率增加到能把液体加热到超过沸点时，如何转变成深熔焊接。还介绍了对304不锈钢的计算实例，计算结果与实验一致。

1. 前 言

大功率激光器在工业上越来越多地使用于材料的热处理，焊接和机械加工方面⁽¹⁻⁷⁾。近来，连续CO₂激光器的功率已达到20千瓦已成为通用的商品⁽²⁾。激光热量集中的特点在冶金加工中有若干种应用。其中包括合金表面硬化热处理，焊接钢板及熔化表面层以改进其耐磨性或耐腐蚀性。在许多应用中，用激光加工并不是生成新的冶金组织；使用激光只是由于比常规热源容易控制。激光热处理或表面熔化后产生的快速冷却可以产生独特的冶金组织⁽⁴⁾。以前曾根据材料的热传导模型对脉冲激光热处理⁽⁸⁾，激光打孔⁽⁹⁾，和激光深熔焊接⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾，进行了分析。我们把这些计算方法扩大到用高斯光源对材料扫描的问题以确定在冶金组织中起着重要作用的热分布和冷却速率。这时热处理和激光熔化两者都考虑。并把温度、功率、熔化深度和激光光斑大小之间的关系同以前的实验相比较⁽²⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。虽然这些计算是在假设应用大功率激光器的前提下进行的，但是这种分析方法同样很适合于用电子束的情况。

2. 热 处 理

用大功率激光束对合金的表面进行扫描加热后快速冷却所产生相变可以使金属的合金表面硬化。对一定的合金，其硬度和加热历史之间有一定的关系，它们的变化依赖于扫描速度 V ，激光光斑尺寸，以及激光功率的大小。另外一些性质如应力腐蚀破裂、耐磨性和疲劳性也取决于热分布与时间的关系。

快速运动的大功率激光的热流量是由固体热传导所决定⁽⁸⁻¹⁰⁾，而后者决定于热扩散系数 D 和单位容积的比热 C_v 。如果同要进行热处理的物体相比，激光束是很小的

话, 那么用半无限的几何模型的近似程度是十分好的。实际上, 用喷砂和涂上胶状石墨的方法, 可使其表面强烈地吸收激光辐射。我们将根据表面所吸收的功率 P (它取决于表面的吸收率, 而且比激光输出功率小些) 来进行分析。材料的温度分布 T 与功率密度 Q 之间关系可用扩散方程表示:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - D \nabla^2 T = \frac{Q}{C_p} \quad (1)$$

我们使用固定在材料中的坐标系, 激光束是平行于 Z 轴, 在时间 $t=0$ 时激光打在 $Z=0$ 的表面上; 激光沿 x 方向以速度 v 运动 (图 1)。我们采用更逼真的高斯强度分布的激光束, 而不是采用均匀的圆形光束, 这样数学上不仅比较精确而且比较简单。归一化后给出半径 R 的光斑功率 P 的运动高斯光束具有下列形式:

$$Q = P \frac{\exp[-((x-vt)^2 + y^2)(2R)^{-1}]}{2\pi R^2} \frac{h(z)}{\lambda} \quad (2)$$

式中 λ 是吸收深度, 在 $0 < z < \lambda$ 时 $h(z) = 1$, 而 $Z > \lambda$ 时, $h(z) = 0$ 。为了解上述方程

以求出温度, 我们把位于表面上坐标为 x' , y' , t' 的单位点光源 G 的热分布的已知解叠

加起来⁽¹²⁾。在表面上坐标为 x' , y' , t' 的激光的热流在后一个时间 t , 对材料的点

(x', y', z') 温度 T 的影响用下式表示

$$T = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (Q/C_p)(x'y'z't') \times G(x'y'z't'|xyz) dx' dy' dz' dt' \quad (3)$$

在表面, 扩散方程的格林 (Green's) 函数为:

$$G = \frac{\exp[-r^2\{4D(t-t')\}^{-1}]}{4[\pi D(t-t')]^{3/2}} \quad (4)$$

式中: $r^2 = (x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2$

(且在表面 $z'=0$ 时)。当 $t=0$ 时, 激光束的温度分布是位于 $x'y'$ 的激光在前一个时刻 t' 时的高斯分布的迭加。幸运地, 对 x' 和 y' 的积分是已知的高斯形式:

$$T = \frac{P}{C_p} \times \int_0^\infty \frac{\exp[-\{(x+vt')^2 + y^2\}(2R^2 + 4Dt')^{-1} + (z^2)(4Dt')^{-1}]}{(\pi^3 Dt')^{1/2}(2R^2 + 4Dt')} dt' \quad (5)$$

此式是我们的主要结果, 由此我们可以导出温度分布和冷却速率。在光斑尺寸为零的极限情况下, 上面式子等价于一个移动的点光源^(11, 14)。 $R=0$ 的点光源这一特例还可以用 $Q=r/4Dt$ 进行化换, 然后, 对 t' 积分而得到进一步简化以获得已知的形式; 从

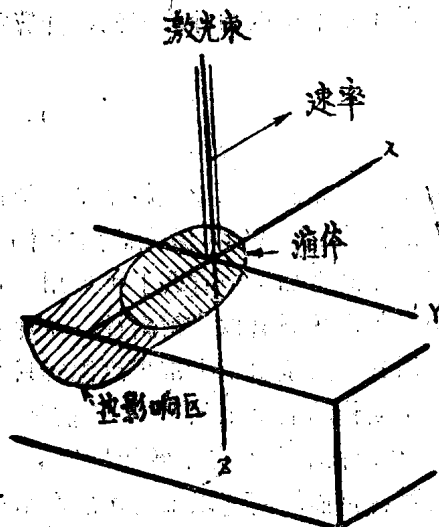


图 1 说明用沿 x 方向以匀速运动的扫描激光束进行加热的示意图

而绘出简单结果如下:

$$f = \frac{1}{C_p D \sqrt{2\pi r}} \exp\left(\frac{-V}{2D(r+x)}\right) \quad (6)$$

式中 $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$, 于是当 $r=0$ 时移动点光源的温度成为无限大, 并且温度随离光源的距离增大而下降。分立的高斯光源的迭加形成了移动光源的温度分布的情况示于图2中。我们发现移动光源的温度分布相对于 x 轴是不对称的。为了使移动光源的热扩散的解形象化我们来考虑静风下, 从烟窗里排出的烟的类似的扩散问题, 在这种情况下扩散在空气中的烟的密度就表示温度。

换成无量纲的变量后, 方程(5)可简化为:

$$T(x, y, z) = P(C_p D R)^{-1} f(x, y, z, \vartheta). \quad (7)$$

式中分布函数 f 是

$$f = \int_0^\infty \frac{\exp(-H)}{(2\pi^3)^{1/2}(1+\mu^2)} d\mu,$$

$$H = \frac{(x + P/2\mu^2)^2 + Y^2}{2(1+\mu^2)} + \frac{Z^2}{2\mu^2}$$

$\mu^2 = 2Dt'/R$, $P = R/Dv$, $X = x/R$, $Y = y/R$, $Z = z/R$, 上面所作的形式上的变化更便于数值计算。

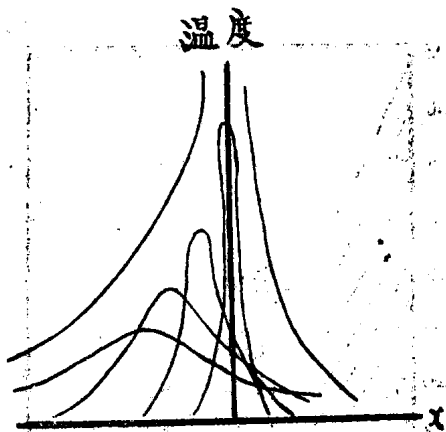


图2 在不同时间和位置上的点光源的迭加, 组成移动光源的解。

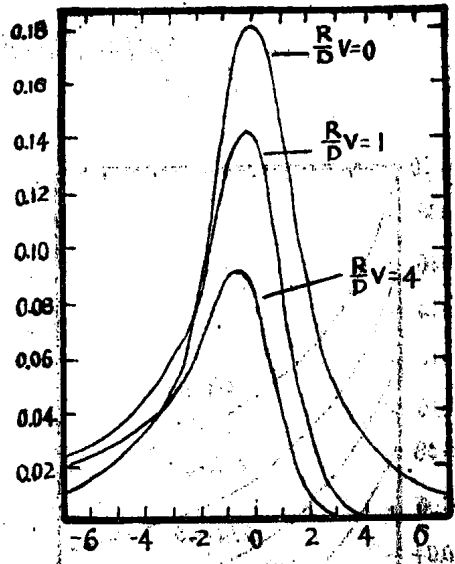


图3 在不同扫描速度下, 激光沿 x 轴扫描时, 计算得出的温度分布函数 f 。

在不同速度下沿着 x 轴的温度分布是根据方程式(7)计算出来的(图3)。若速率增加, 则最大温度就减小, 而且在激光中心的后面移动, 在表面以下不同深度的温度依次

递减如图 4 所示。

激光束下的温度随着扫描速度的增加而降低 (图 5)，因为用于加热材料的时间较短。我们用曲线拟合法得出的穿透曲线可用下列关系式表示 (图 6)。

$$T = T_0 \exp(-z/z_0) \quad (8)$$

式中 T_0 是光束照射下的表面温度值，而深度参数 z_0 近似等于 $10Rf$ ($0, 0, 0, v$)。指数式的穿透关系最近已由实验证实。⁽¹⁷⁾

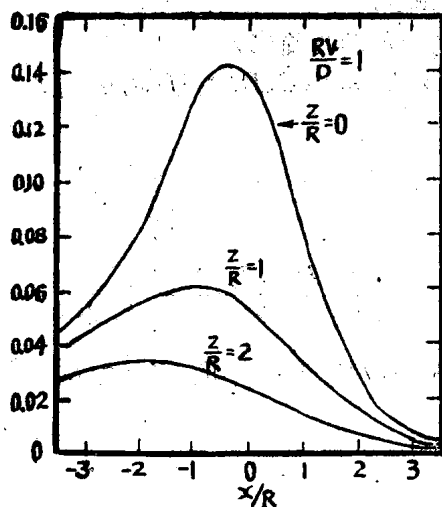


图 4 在一定的扫描速度时在表面下不同深度处的温度分布 f

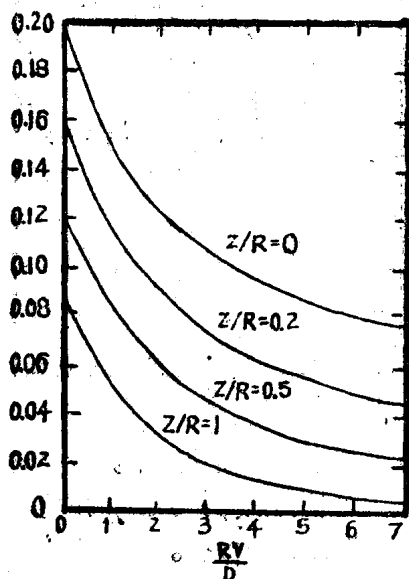


图 5 速度对表面上不同深度处的温度分布的影响

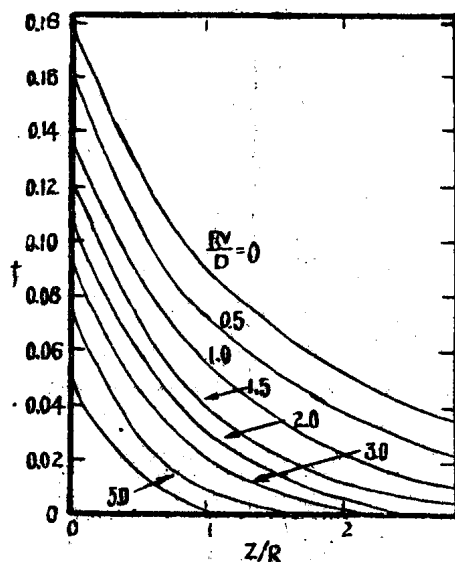


图 6 在不同速率下材料内的分布函数 f

3. 冷却速率

我们从随激光作稳态移动的温度分布导出冷却速率。

冷却速率与运动方向的热梯度有如下关系：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (9)$$

这是联系一个固定坐标系统与一个运动坐标系统的关系式。由(7)方程式对 x 求偏导数得到梯变，从而得出一个可以进行数值解的积分式。

然而，相对于光斑尺寸而言远离光束中心的地方梯度近似于点光源的梯度〔方程式(6)〕，冷却速率为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{VP}{C_p D 2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\exp[-V/2D(r+x)]}{r} \right)$$

对 x 求导之后，冷却速率为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \left[\frac{x}{r^2} + \frac{V}{2D} \left(1 + \frac{x}{r} \right) \right] T \quad (11)$$

对304不锈钢用100瓦点光源，运动速度为0.5厘米/秒的，所得的温度分布曲线和冷却速率曲线表明其冷却速率的分布是与温度的分布十分相似的(图7)。在温度最大值(即 $\partial T/\partial x=0$)处其冷却率是零。

4. 激光熔化

在固体热处理中，其极限温度 T_0 是低于熔点 T_m 。本节我们考虑表面的极限温度超过熔点而没有超过沸点的情况。激光扫描在材料表面产生熔坑，这时接近表面的材料在光束移动时，先熔化紧接着又重新凝固。在熔化界面上吸收的潜热在凝固界面上释放出来，因此温度分布稍有变动，但对穿透的深度没有大的影响。我们不考虑潜热的影响或液体和固体之间的不同热传导的差别的影响。根据这些简化，我们应用第2节关于热处理的结果。固-液等温线从下式给出：

$$T_m = P(c_p D R)^{-1} f(x, y, z, v), \quad (12)$$

而液态穿透深度为

$$Z_m = Z_0 I_0 (P/P_m) \quad (13)$$

式中 P_m 是刚好发生熔化之前所吸收的功率，而 $Z_0 = 10f(0, 0, 0, v)R$ 。这些方程式用于估算304不锈钢在不同穿透深度下的速率与吸收功率的曲线(图8)。

这些曲线与焊接304不锈钢的实验曲线形状相似。而曲线与实验准确地进行比较是困难的，因为反射率和光斑大小是不确定的。这些曲线与实验相当一致。

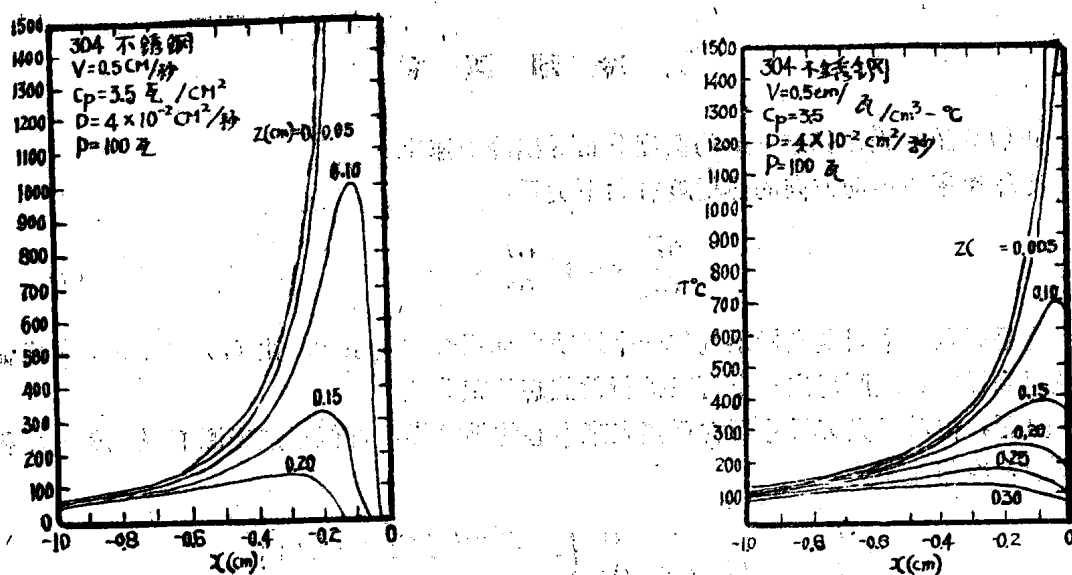


图7 在304不锈钢中不同深度沿 x 轴方向的冷却速率和温度

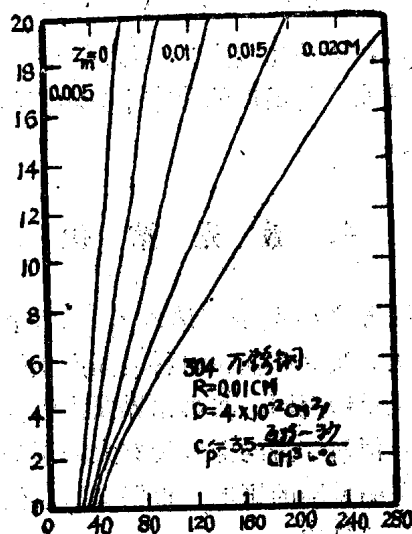


图8 在304不锈钢中液态区中不同穿透深度时速度与吸收功率之间的计算关系

5. 深熔焊接

大功率密度下液体的表面温度接近于沸点。可观察到液态区向材料内延伸的深度相对于焊缝是很深的。这只有在热源穿透表面时才有可能。有人认为蒸汽压把液体和蒸汽的界面推到了表面以下深度为 Z_0 的地方从而形成一凹孔，使激光束深深地穿入到材料

的内部(图9)。如果激光功率增加,那么穿透深度也增加。理论模型假设激光光源放出的热量可以用一个以速度为 V 运动的线光源来逼近。这有二维模型在功率,焊接深度和焊接厚度方面是与实验很一致的。

对照实验⁽¹⁰⁾表明在深熔焊接的条件下,激光功率是完全被吸收的。这可以用液体中的空腔出现多次反射从而增加了光的吸收来解释。为了计算温度分布,我们可以不用无限的线光源解,因为在蒸汽穿入区, ($Z=Z_0$) 的顶部,其热流是球形对称的而不是圆柱状的,蒸汽穿入区 Z_0 的深度决定于顶部的蒸汽压力与毛细管作用力和浮力之间的平衡。力的平衡是与液体的密度 P_l ,重力加速度 g ,液体和蒸汽界面的表面张力 r_{lv} 和蒸汽穿入区端部的半径 r_0 有关的。

$$\text{压力} = P_l Z_0 g + (r_{lv}/r_0) \quad (15)$$

例如,凹孔长一厘米而顶部半径一毫米,表面张力500尔格/厘米²,而密度8克/厘米³时,压力仅需0.05大气压。顶部压力的动力学解依赖于蒸汽的穿入区的流动阻力、界面上液体的温度及液体空腔中的辐射分布。还预测,形状的稳定性的深熔焊接现象中将起着重要作用。为了简单起见,我们假设,在顶部的温度等于液体沸点 T_0 。因此,在一定功率 P_0 下表面温度达到沸点 T_0 时开始出现深熔焊。

在大功率下激光束穿入焊件;这可以用从表面至深度为 Z_0 的凹孔内均匀分布的一系列光源来表示。在表面下距离为 Z' 的光源是利用镜象法来凑成没有热量流过 $Z=0$ 的表面这一边界条件而求出来的。这个解需要在一 Z 处有一个相同强度的虚光源从零到 Z_0 的分布光源则需要一个从0到 $-Z_0$ 的虚光源。如图8所示。温度分布由方程式(3)给出,这里方程式(2)中的吸收深度变为 Z_0 。

温度与穿入材料的深度的关系决定着熔化的深度 Z_m 。利用近似的指数温度关系即方程式(8)可求出分布源的上述关系是:

$$T = (T_0/2Z_0) \int_{-Z_0}^{Z_0} \exp[-(Z-Z')/Z_0] dZ' \quad (16)$$

凹孔深度为 Z_0 时,假设温度等于沸点 T_0 。对 Z' 求积分,并用功率与温度之间的关系式, $P/P_0 = T/T_0$,那么功率与凹孔深度 Z_0 的关系是

$$\frac{P}{P_0} = \frac{2(Z_0/Z_0)}{1 - \exp[-2(Z_0/Z_0)]} \quad (17)$$

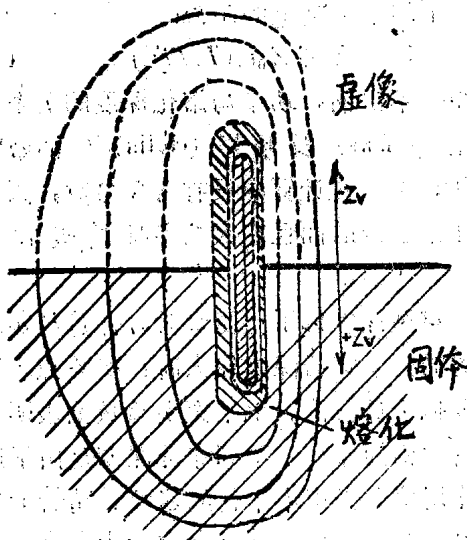


图9 深熔焊接简图,说明液体和蒸汽界面的凹陷深度 Z_0 和熔化深度 Z_m 。长度为 Z_0 的运动的有热源被用于确定热分布。

若功率从材料表面材料蒸发所需要的功率 P_v 开始增加, 那么凹孔深度即从零增加到 Z_v , 图10。当大功率照射时其熔化深度是在凹孔的深度以下的某个确定的距离。

$$Z_m = Z_v + Z_0 I_0 (T_v/T_m) \quad (18)$$

对于 304 不锈钢, 功率与熔化深度的关系曲线与洛克 (Locke) 及哈莱 (Hella) ⁽⁷⁾ 的数据对比于图 11。在计算中没有可变参数, 因为光斑尺寸是已知的而且在大功率时其吸收率是 100%。

在穿透深度低于一厘米时, 计算与实验是很一致的。当穿透深度较大时, 实验点表明穿透深度低于计算值。电子束实验数据表明, 其穿透深度稍为深些。不同穿透深度是由于聚焦镜的作用使激光束不平行的缘故。随着大功率激光器的发展, 穿透深度会进一步提高, 从而使激光束焊接和电子束焊接在相同的功率下定可等价。

6. 讨 论

上述对激光熔化和激光热处理的分析可以一成不变地应用于电子束热处理和熔化。高斯功率分布可以用来逼近电子束的功率分布。激光热处理与电子束热处理相比较, 电子束热处理有其优点, 因为电子束是高斯效率地被吸收的。相反, 激光热处理是对样品表面的制备状态很敏感的, 因为表面状态影响到反射率。反射率随着温度而变化取决于表面形态。

近来, ⁽¹⁷⁾ 电子束焊接已发展到不用真空也能产生深熔焊接的转变。例如, 用 56 千瓦功率以 10 厘米/秒速度可在 304 不锈钢上产生一厘米的深熔焊接。根据我们计算, 在 0.04 厘米的光斑下吸收功率仅需 20 千瓦就可得到以上的结果。在同样功率下在真空中电子束可以瞄准与聚焦到使穿透的深度比在空气中深一些。电子束在真空中得到的计算结果与实验的一致性要比图 11 所示的激光数据更好一些, 特别是对

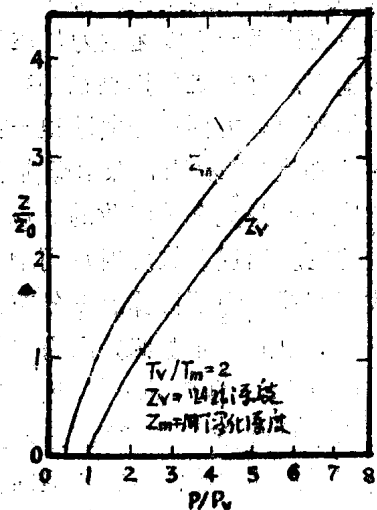


图10 用大功率时 304 不锈钢穿透深度的计算值, 在这种情况下, 液体和蒸汽界面的凹陷深度取决于沸点。

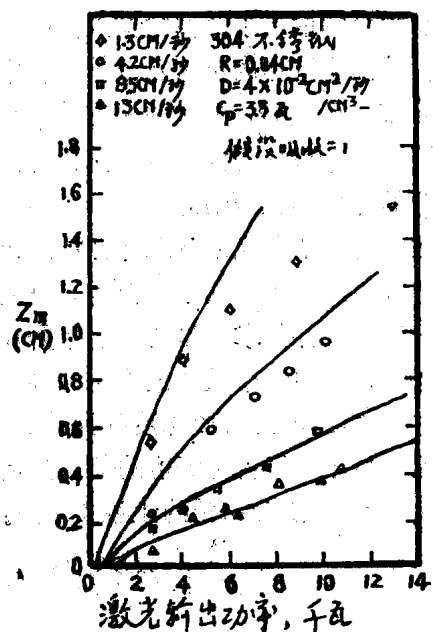


图11 在 304 不锈钢上用不同的激光输出功率得出的计算及实验的液体穿透的距离

于深度焊接。

分析表明光斑大小对所能达到的极限温度和深熔的机理有很大影响。在深熔焊接的情况下，在不甚了解其作用机理时我们也能够计算其穿透深度。虽然计算结果与实验相一致，但是如果功率增加或光斑减小，则液体与蒸汽界面就会变得不稳定。在非常高的功率时，液体可以强烈沸腾，以致于使熔融金属溅出焊件。

我们用高斯功率分布得到没有奇点的温度分布。因此，样品的任何部位在光束的作用下，我们可以确定其温度并且得到均匀变化的冷却速率。这种分析实际上比前面那种用均匀光源或点光源逼近的分析方法要简单些。温度分布对光斑大小是敏感的，正如热的穿透对光斑大小也是敏感的那样。总之我们已经从一个运动的高斯光源出发分析了从简单的热处理到深熔焊接这一大系列的条件下的热分布。

符 号 一 览 表

- V 沿 x 方向激光的扫描速度 (厘米/秒)。
- D 热扩散率 (厘米²/秒)。
- C_p 单位容积比热 (瓦/厘米² °C)。
- Q 单位容积的吸收率 (瓦/厘米²)。
- T 温度 (°C)。
- t 时间 (秒)。
- x 激光移动的方向 (厘米)。
- y 与激光束和移动方向垂直的方向 (厘米)。
- z 激光束方向。(厘米)
- P 总吸收功率 (瓦)。
- G 格林 (Green) 函数。
- (x', y', t') 光源的坐标。
- R 激光束的半径。
- r 与光源的距离。
- Q 积分变量
- μ 无量纲变量。
- P 无量纲速率。
- f 无量纲温度分布函数。
- X 无量纲 X 坐标。
- Y 无量纲 Y 坐标。
- Z 无量纲 Z 坐标。
- H 无量纲指数数自变量。
- Z_0 穿透深度。
- T_m 熔化温度。
- Z_m 熔化深度。

P_m 表面熔化功率。

K_0 修正的零阶贝塞尔 (Bessel) 函数。

Z_0 液体——蒸汽界面凹陷的深度。

r_v 柱状蒸气穿入区的半径。

P_l 液体密度。

g 重力加速度。

σ 液体——蒸汽表面张力。

T_0 材料的沸点。

P_0 达到沸点的功率。

丁朝选 译自 Journal of Applied physics, Vol. 48, No. 9, 1977

周日新 校

用激光辐射进行热处理和焊接

非透明不发生反射的材料加热

激光束的效果可以用一个等效热源的效果来模拟,这个热源可在材料的表面或在其内部作用,并具有扩大或缩小的特征,依据课题的内容、材料的组成和物理性能激光加热的特殊性能在于等效热源典型地具有显著可变的时间和空间的特征。因此热源性质单一化,常常用数学模型简化它的复杂性,就会导致予计与实验结果之间的明显差别。所以当研究用激光束对材料加热时,应该细心地注意分析激光参数和等效热源的时间与空间的特征。

在激光加热的大多数情况下,热源在非透明材料中可以假设在加热表面上的分布按照一定的函数关系(吸收系数 α 大约是 10^4-10^5cm^{-1})。激光脉冲的时间结构是由激光器的类型和激光振荡方式确定的。通常在材料表面上热源的功率密度是坐标和时间的复杂函数

$$q=q(x,y,\tau) \quad (1)$$

方程(1)中函数 q 可近似用时间函数和平面坐标函数的乘积来表示。

$$q(x,y,\tau)=A\varphi(\tau)q^*(x,y) \quad (2)$$

式中 A 是吸收系数,通常取决于表面状态(光洁度)和它的温度, $\varphi(\tau)$ 描述激光脉冲的时间结构,而 $q^*(x,y)$ 是辐射强度的空间分布。

如果激光系统的不均匀性小,分布函数 $q^*(x,y)$ 由衍射分布函数得出

$$\left[\text{方程 } q(r)=q_0\left\{\frac{2J_1(Br)}{(Br)}\right\}^2 \right], \text{ 实际上激光辐射强度的分布与方程 } q(r)=q_0\left\{\frac{2J_1(Br)}{(Br)}\right\}^2$$

有区别,这是由于工作物质末端的振幅周相和振幅分布的不均匀性的关系,而这些又是由许多因素引起的(光学共振腔的多模振荡、激振的不对称,晶体的光学缺陷等等)。因此在分析激光加热的过程中似乎有理由使用激光脉冲的空间构造的一个较简单的近似值(高斯分布或在焦点上 q 为均匀分布)。

激光辐射强度的空间分布、(或功率密度)取决于激光作用的模式。有各种实验技术用来确定函数 $q^*(x,y)$,激光脉冲的空间和瞬时构造,我们往往并不一定能

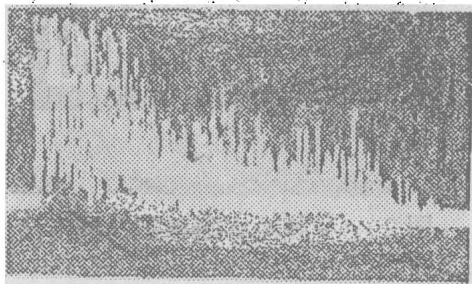


图1 窄脉冲混乱振荡的波形图

表示为方程 (2) 的形式。在这些情况中激光脉冲的结构采用文献 [1] 中所分析的技术进行讨论。

吸收系数和反射系数取决于辐射波长和辐射强度，甚至在辐射强度相对低时（少于 10^6 瓦/厘米²），它们的数值也是了解得很不准确的，特别是温度高于材料的熔点，吸收系数随温度的增加而变化。为了简单地分析，通常假定吸收系数与温度无关，而取其一定温度范围面的平均值。

让我们比较详细地讨论激光脉冲时间上的结构。固体激光器有几种典型的振荡辐射方式。最广泛使用的方式是混乱的窄脉冲组成的辐射、有序的窄脉冲构成的辐射、和准连续波的辐射和准连续波的振荡。如果不考虑减少或增加测量的时间，这些方式振荡的持续时间 τ ，大约是 10^{-3} 秒。Q 开关可能产生高功率的脉冲波，辐射时间 τ ，约 10^{-8} 秒。最后存在专门的技术设备，用于产生超短激光脉冲（ $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 秒），到目前为止还没有用于激光加工。

持续时间约 10^{-3} 秒的辐射脉冲，是由一系列持续时间约 1 微秒和负载比约为 0.2 的窄脉冲组成（图 1）。不同的窄脉冲的振幅是不同的。在尖峰脉冲中有混乱的振荡，我们可以区分前沿以一定速率上升和在脉冲后沿振幅减少的某些规律性。因此脉冲尖峰的包络可能形成类似钟样的非对称曲线。例如尖峰的包络能够用指数函数和幂函数的乘积来描述：

$$\varphi(\tau) = \tau^n \cdot \exp(-b\tau^m) \quad (3)$$

式中 n 和 m 是整数或分数

窄脉冲有规律的振荡（图 2），是单个尖峰与负载比约 0.2 和总持续时间约 10^{-3} 秒的有序排列，类似于混乱振荡。但是个别尖峰的振幅和连续尖峰之间的时间间隔在大部分脉冲下保持不变。这种激光辐射方式可用一个周期函数来描述。

例如：

$$\varphi(\tau) = 1 - \cos \omega \tau \quad (4)$$

式中 ω 是脉冲尖峰的重复率。

用热源加热一个半无限大的物体或板的瞬时构造关系 [方程 4] 在文献 [2] 中进行分析。

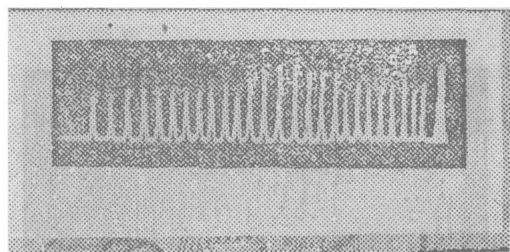


图 2. 窄脉冲有规律振荡波形图



图 3 准稳激光辐射波形图

文献 [3]、[4] 中描述了脉冲激光器的准稳辐射，（图 3）初周期除外实际上不包含尖峰，在一级近似中准稳辐射脉冲的瞬时构造能够用阶跃函数来描述。