

用激光处理材料

郭大浩

(中国科学技术大学物理系)

用光来作为热源,比较早的记载要算公元前三世纪阿基米德企图用大抛物镜将太阳光反射聚焦来摧毁罗马军队^[1]。现在,如果将激光束聚焦,则可以成为工业加工过程中切实可行的热源。这是因为,激光与普通光源相比,其发射的光能量在空间、时间和频率上都是高度集中的,单色亮度甚至可以成百亿倍地提高^[2]。激光具有好的方向性、单色性、相干性和瞬时性。激光束聚焦后焦点可以很小,使该点光功率密度大为提高,结果被照射材料能发生相变、熔化、气化,甚至喷射出等离子体羽状烟柱,并伴有压力波传播^[3]。

2. 快速加热和急冷: 根据激光器情况可在 10^{-3} 至 10^{-9} s 之内使材料达到熔点或沸点,而淬火速率可达 10^4 至 10^8 °C/s^[4,5]。

3. 加热范围小: 激光束聚焦有可能以精细的空间尺度(可达 μm 量级)来加热材料而不提高整体温度,这在许多情况下很有用。

4. 易于用电子线路和计算机控制。

5. 可对通常难以加工的高熔点、高硬度和脆性材料进行加工和处理。

激光加工和处理材料的工作范围如图 1 所示^[4,5],该图是用 CO_2 激光得出的结果。

一、激光处理材料的特点

1. 不接触性: 激光可以对密封在玻璃窗内的材料进行加工处理,可使污染减至最低限度,而且工件的定位和夹持可达最佳情况。

二、常用的激光加工

1. 焊接

用激光辐照两块材料相接处,使之熔化但不气化,并随即自身冷却而成为一体。激光焊 (10^4 — 10^7 W/cm²)比氩弧焊 (10^4 W/cm²) 和氧

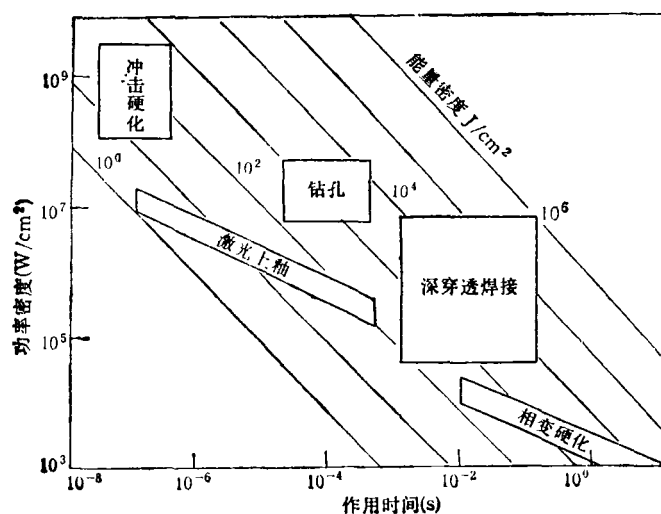


图 1 激光处理材料的工作范围

乙炔焊 (10^3 W/cm^2) 的功率密度高。用激光对熔点与沸点相差较远的材料(如金、铜、镍)进行焊接比较容易,但能焊接的厚度较薄(小于 1 mm)。

不同种类的金属,如果熔点相近,或者能形成固溶体合金的,也可用激光焊。熔点相差很远的同样也可以“焊”,如钨和铝,这实际上是铝熔化后机械地附着在钨丝上,也很牢固。

2. 钻孔、切除和切割

当激光束聚焦到功率密度足够高时,可把材料加热到沸点以上而气化,气化的材料以高速度喷射出来,利用这一效应就可对材料进行钻孔、切除和切割。

金刚石拉丝模加工,陶瓷、钨、钼、红宝石及钻石等脆硬材料的钻孔都已广泛用激光作为工具。

激光切除可用于微调容差很低的电阻器,用于加工陀螺仪以及治疗皮肤黑痣或肿瘤。

激光切割是在激光聚焦使材料气化的同时加上气体喷咀,并令被加工材料相对于激光束横向移动。这是激光加工领域中发展最快的^[6],其特点是高速、干净、无声、废料少和切痕光滑等。

三、激光处理金属表面

国外开展激光处理金属表面的研究已有十多年历史。这个领域主要包括相变硬化、合金化、非晶化和冲击硬化,其中只有相变硬化已应用于生产中。

1. 相变硬化

激光作用于工件表面,当光功率密度达到一定数值,使表面温度达到相变点以上但还没有熔化时,某些材料会产生相的转变。相变过程中,金属的相组成、温度及应力值之间有着复杂的耦合关系^[7]。由于激光加热速度比常规加热方法要快许多倍甚至几个量级,而且停留时间短,加热后靠金属自身传导进行冷却,冷却速度比最好的外加淬火介质冷却速度快,使材料表面获得超细化组织,硬度提高,耐磨性好,抗

蚀性好,疲劳强度提高等。

我们强激光实验室在 1985 年初开始用钹玻璃激光辐照 4Cr13 不锈钢工件^[8],在 $6-8 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 的功率密度下,工件表面产生了相变硬化,硬化区是细化的隐针马氏体组织,硬度优于产品技术要求,并取得经济效益。这是国内首次将钹玻璃激光淬火工艺用于正式生产中,至今工厂仍继续采用这一工艺。

2. 合金化

在一种金属基体表面上,涂覆适当的其它金属粉末,再用激光辐照加热到所有元素熔点以上但不发生气化。由于熔化层紧接着被快速冷却而凝固,固液界面以每秒几米的高速扩展,界面上溶质原子来不及在液相中扩散开而被正在凝固中的固相捕获或部分捕获,使固溶体浓度不均匀性基本上保持下来,所以在材料表面形成一层合金层^[9],它具有抗磨性、赤硬性和抗蚀性等新性能。

制造合金的古老方法是铸造,它有两个局限性:(1) 高熔点的相难于熔化;(2) 熔化后的合金冷却是缓慢的,有时间发生合金分离和析出。激光合金化克服了铸造的这两个短处,因为高功率激光能使所有合金相熔化,而熔化被限制在表面,深层基体没有被加热,因而建立起高的冷却速率,极快的冷却速率使得没有时间发生合金相的分离和析出。

合金涂料如镍基粉、钴基粉和铁基合金等已有商品。近年来国内也开展了激光合金化研究^[10]。

3. 非晶化(激光上釉)^[11]

当激光束聚焦到 10^3-10^7 W/cm^2 的范围,若作用时间 ($10^{-3}-10^{-7} \text{ s}$) 短,则热能限制在较浅表层内,出现了快速的表面熔化。这时,在固液二相间产生极锐的温度梯度,而固液又紧密接触,这又使薄的熔化区有极快的急冷速率 (10^4-10^6 K/s)。这种快速凝固使液相向固相转变延伸到很低温度,从而无法结晶,产生了极均匀的金相显微结构,即无定形的非晶态或玻璃态。激光上釉可作为产生许多新奇表面显微组织及性能的一种灵活手段。目前,首先把它

用于材料表面处理工艺,但也可以通过连续的层层上釉的方法来处理整体材料。若材料是合金时就会形成无定形的非晶态合金。

4. 冲击硬化

金属在功率密度为 10^8 — 10^{10} W/cm² 且作用时间在 10^{-6} — 10^{-8} s 的激光作用下^[4],随着急速的表面气化,除去了一定质量的材料(对于 6061-T6 铝,除去的质量约为若干 mg/cm²^[11]),同时有一个冲击波(应力波或压力波)作用在材料中^[11-14]。冲击应力主要来源于两方面:(1)巨大的温度梯度及温度变化率造成热膨胀应力(称热传导效应);(2)强烈气化时高速高温蒸汽流喷射造成反冲力(称为气化效应)。冲击应力可超过弹性限度,引起材料位错密度提高,从而增强表面硬度及其它机械性能。

实验结果表明,冲击波的脉冲宽度与激光脉宽基本上相同^[12,13],冲击应力可达几十 kBar^[14,15],有时会使材料背面冲破一部分^[11]。

对 6061 合金和 5086 合金的实验^[16]都表明,二块同种合金采用气体弧光法焊接后,焊缝处的屈服强度和抗拉强度降低了,而在采用一定强度的激光处理后,却能使上述二指标得到较好的恢复。

我们实验室最近在纯铁和纯铝两种材料上,采用 5.5×10^8 W/cm² 的钹玻璃激光辐照,也初步得到冲击硬化效应:纯铁表面硬度从 HV110 提高到 321,纯铝是从 HV85 提高到 230。

四、激光加热模型

在多数激光加工或处理过程中,激光主要是作为一个热源。开始时,激光束被材料表面薄层吸收,然后通过热传导把热能传递到材料内部。加热速率由热通量表征。当然,入射光束会有一部分被表面反射,若反射系数为 R ,则热通量可取为光通量的 $(1 - R)$ 倍。

加热速率足够高时,表面熔化,熔融界面将向内部扩展,用于焊接加工时要控制熔融的深

度。

热通量较高或加热时间较长时,表面将发生气化,并伴有熔化材料喷溅出来。加热速率更高时会有严重气化,即发光的高速蒸气和微粒的羽状烟柱,有时还有压力波传出。有些文献指出^[17,18],喷溅机理导致从表面发射高能离子和电子,并形成等离子体羽状烟柱,以 10^7 cm/s 的速度离开表面,羽状烟柱密度可以很大,能使随后的激光被烟柱吸收相当的部分。

加热速率较低时,例如用连续激光器焊接、钻孔加工时,通常要求热通量刚好低于引起等离子体的程度,此时可运用经典的热传递模型来研究加热问题。目前,对于理想条件下的加热理论研究得比较充分,利用这种理论可了解表面达到熔化温度时的温度分布。例如,当用恒定的热通量加热半无限大物体时,表面温度 T 可以由下式^[3]给出:

$$T = \frac{2H}{k} \left(\frac{Kt}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}},$$

式中 H 为热通量, k 为热导率, K 为热扩散率, t 是加热时间。此式表明,使用峰值功率高、持续时间短的脉冲,可以更有效地加热表面。

近来有人对相变硬化过程中的温度、相成分和应力值之间的耦合作用进行了理论计算^[7]。

高能过程的理论处理看来还不太成熟,一些文献报道的多半是定性研究或给出某些实验结果。

五、适用于材料处理的激光器

激光器的波长、功率、模式、运转方式以及被处理材料的种类、表面状况及环境条件等都会影响激光和材料间的作用效果。例如波长和表面状况影响能量吸收率,辐照时间影响热穿透深度等。

表 1 是适用于材料加工和处理的一些激光器^[3,5,8,10,11,16]。

表 1 用于材料加工和表面处理的激光器

激光器	波长 (μm)	工作方式	功率 (W)	重复率 ($\frac{1}{s}$)	脉冲宽度	应 用
红宝石	0.6943	脉 冲	2×10^3 (峰值)	低	0.2—5ms	在一个脉冲内除去大量材料, 金刚石模钻孔, 点焊
铍玻璃	1.06	脉 冲	2×10^4 (峰值)	低	0.5—10ms	在一个脉冲内除去大量材料
铍玻璃	1.06	脉 冲	$6-8 \times 10^4 \text{W/cm}^2$ (峰值)	低	2—4ms	4Cr ₁₃ 等材料相变硬化
铍玻璃	1.06	脉 冲	$5 \times 10^3 \text{W/cm}^2$ (峰值)	低	1—30ns	铝合金等材料冲击硬化
YAG	1.06	连续波	200	—	—	焊接
YAG	1.06	重复Q开关	10^4 (峰值) 10 (平均)	5000	200ns	电阻器微调, 电路制造
CO ₂	10.6	连续波	375	—	—	切割有机材料, 加氧的金属切削, 刻划易碎材料
CO ₂	10.6	重复Q开关	75000 (峰值) 1.5 (平均)	400	5—200ns	电阻器微调
CO ₂	10.6	超长脉冲	100 (平均)	500	10—100 μs	焊接、钻孔、刻划
CO ₂	10.6	连续波	1200	—	—	表面合金化
CO ₂	10.6	连续波	300 $1.5 \times 10^6 \text{W/cm}^2$	—	—	惰性气体保护, 非晶化

[1] 比斯利著, 曹秋生译, 刘学恣校, 激光及其应用, 国防工业出版社, (1976), 174.
 [2] <激光>编写组, 激光, 上海人民出版社, (1971), 5.
 [3] F. T. 阿雷克, E. O. 舒尔茨-杜波依斯主编, <激光手册> 翻译组译, 激光的技术应用, 科学出版社, (1983), 150, 151, 153, 152, 190, 191.
 [4] Edward M. Breinan et al., *Physics Today*, Nov. (1976), 44.
 [5] B. H. Kear et al., 张光钧译, 国外激光, No. 1, (1982), 34.
 [6] M. James 等人著, 张玉清译, 卿光校, 激光, 7-6 (1986), 297.
 [7] 姚善长, 中国激光, 14-6(1987), 321.
 [8] 郭大浩等, 应用激光, 5-6(1985), 261.

[9] Gray C. Lrons, *Welding Journal*, No. 10 (1978), 29.
 [10] 苏宝熔等, 中国激光, 14-1(1987), 52.
 [11] Jay A. Fox and Dallas N. Barr, *Appl. Phys. Lett.*, 22-11 (1973), 594.
 [12] N. C. Anderholm, *Appl. Phys. Lett.*, 16-3(1970), 113.
 [13] J. D. O'Keefe and C. H. Skeen, *Appl. Phys. Lett.*, 21-10 (1972), 464.
 [14] B. P. Fairand et al., *Appl. Phys. Lett.*, 25-8 (1974), 431.
 [15] L. C. Yang, *J. Appl. Phys. Lett.*, 45-6 (1974), 2601.
 [16] 关学丰, 应用激光, 5-4(1985), 155.
 [17] J. F. Ready, *Phys. Rev.*, 137 (1965), A620.
 [18] J. F. Ready, *J. Appl. Phys.*, 36 (1965), 1522.

(上接第 301 页)

在成象技术方面, 继 X 射线 CT 之后, 核磁成象及正电子成象显示了更大的优越性. 1982 年报道, 利用 d 葡萄糖经同位素标记后的正电子成象技术, 成功地测定了人大脑在休息、学习或音乐欣赏等不同功能状态下的图谱, 这对脑结构功能研究提供了无损直观分析条件. 在

信号分析或成象技术中利用标记也带来了无可估量的效果.

生物物理学是一门还比较不成熟的学科. 它的发展依赖于物理、数学和其它技术科学, 同时在它的成长过程中又必然促进了这些学科的发展.