

用数值计算技术和试错法确定金属材料 表面对激光的吸收率*

邹德宁 雷永平 梁工英 苏俊义

(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

摘要 提出了一种激光重熔条件下确定金属材料激光吸收率的方法。通过改变输出功率、控制试样表面状态, 利用计算机数据采集系统对激光表面重熔的试样进行定点温度采集; 按不同表面状态假定材料对激光的吸收率, 采用经过验证的激光表面重熔数值模拟程序计算温度场并与实测结果对比, 以试错法修正所假定的吸收率, 确定了 DL31 合金表面对激光的吸收率, 与文献中实验得到的吸收率值较为接近。用所测吸收率值计算不同功率条件下试样定点温度的变化, 与实测温度变化规律基本吻合。

关键词 激光表面加工、吸收率、数值计算、试错法

中图分类号 TG221

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2001)07-0737-04

DETERMINATION OF LASER ABSORPTIVITY OF METAL BY NUMERICAL CALCULATION TECHNIQUE AND TRIAL-AND-ERROR METHOD

ZOU Dening, LEI Yongping, LIANG Gongying, SU Junyi

School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Correspondent: ZOU Dening, associate professor, Tel: (029)2201074, Fax: (029)2202923,

E-mail: Zoudening@263.net

Manuscript received 2000-07-24, in revised form 2001-02-26

ABSTRACT A method of determining the laser absorptivity of metallic surface is presented. Under changing power to control the state of the surface of sample (solid state or liquid state), the temperature at a certain point in the sample is measured and treated by using a computer data acquisition system. The temperature field in the sample is calculated by a simulation software of laser surface remelting under an assumed absorptivity. Then the assumed absorptivity was adjusted and the numerical calculation is repeated again until the calculated result is coincident with experimental one. The obtained absorptivity of the DL31 alloy surface is in good agreement with that in a literature. Using the obtained value of the absorptivity, the temperature-time curves calculated at a certain point under different conditions are basically coincident with experimental ones.

KEY WORDS laser surface processing, absorptivity, numerical calculation, trial and error

了解和掌握激光加工过程中材料的温度场及其随时间的变化规律, 对于研究、开发和应用激光表面加工技术具有重要的意义。材料表面对激光的吸收率, 直接影响到被加工工件的温度分布。吸收率与激光波长、温度、表面粗糙程度、表面涂层等诸多因素有关^[1]。近年来, 测定金属材料固态表面激光吸收率的方法已有报道^[2,3], 主要采用

Calorimetry 法或 Ellipsometry 算法。但测定金属材料液态激光吸收率的报道尚少见, 且已有的方法^[4]也因与金属材料实际加工过程的条件相差较大(如需超真空条件、激光功率只有 3—5 W 等), 应用受到限制; Frenk^[4]等的原位法可以测定激光重熔过程金属材料的吸收率, 但该方法只适用于金属试样的导热能力远高于外界环境冷却能力的前提条件下。由于金属材料液态吸收率难以确定, 在模拟激光表面处理过程的数值计算中, 一般将固态及液态吸收率均按一常数对待, 从而会影响温度场及流场模拟结果的准确性。

本文以 DL31 合金为实验材料, 采用波长为 10.6 μm

* 国家自然科学基金 59871038、西安交通大学科研基金及华中理工大学激光技术国家重点实验室基金资助项目

收到初稿日期: 2000-07-24, 收到修改稿日期: 2001-02-26

作者简介: 邹德宁, 女, 1964 年生, 副教授, 博士生

的 CO₂ 激光器, 对相同表面处理状态的试样通过选取不同的激光功率, 控制试样表面的熔化状态, 利用计算机数据采集系统对试样进行定点温度采集, 得到激光表面重熔试样中定点温度随时间的变化曲线。先假定一个吸收率, 用经过验证的激光表面重熔过程数值模拟程序进行计算得到计算区域的温度场, 将测温点的实测温度与计算温度进行比较, 采用试错法不断调整吸收率, 经过多次计算, 使计算结果与实测结果相接近, 从而分别确定固态及液态表面对激光的吸收率。本研究可为确定不同激光表面加工条件下(如激光熔覆、激光熔凝、激光合金化)材料对激光的吸收率提供一种实验与计算相结合的方法。

1 实验方法

1.1 试样及热电偶制备

实验材料选用 DL31 合金, 其成分(质量分数, %)为: Si 0.20—0.60, Fe 0.35, Cu 0.10, Mn 0.10, Mg 0.45—0.90, Cr 0.10, Zn 0.10, Ti 0.10, 其它 0.15, 余量为 Al。

试样尺寸为 31 mm × 29 mm × 12 mm。将加工好的试样用丙酮清洗后在抛丸机上进行喷砂粗化, 为增加试样表面对激光的吸收率, 粗化后的表面还需经黑化处理。再在距粗化表面 2 mm 的一侧中央钻一个 2.4 mm × 14 mm 的孔。测温热电偶采用套装陶瓷绝缘管, 直径为 2.2 mm, 陶瓷管上的双孔可分别穿过直径为 0.2 mm 的 Ni-Cr 和 Ni-Si 丝, 通过储能焊将热电偶丝焊接在一起; 再将校验过的热电偶插入钻孔中, 通过储能焊机将热电偶与 Al 合金试样焊合到一起, 以备测定激光加热时试样在焊点处的温度变化。

1.2 数据采集系统

数据采集系统是对输入的连续模拟量信号每隔一定时间进行一次采样, 然后进行量化和编码, 将连续的模拟量信号转化为连续的数值量信号, 输入微机进行处理。实验中为使来自热电偶工作端的热电势信号放大, 与 A/D 接口卡范围相适应, 选用了放大 150 倍的 16 通道信号放大端子板, 模数转换器采用 PS-2116 16 路 A/D 卡, 配接 IBM-PC486 微机。A/D 转换时间约为 25 μs, 数据采集通道数、通道号及数据采集时间间隔均可任选。

1.3 激光表面处理

为了确定材料固态和液态表面的吸收率, 控制激光功率大小, 以保证试样表面分别保持未熔化和熔化状态。实验采用 5 kW 的 RS850 型快速横流 CO₂ 激光器, 光斑直径选为 2 mm, 光斑模式为多模分布。

将试样分为两组, 每组 3 个, 分别采用低功率(500 W, 试样编号为 d1—d3)和高功率(2500 W, 试样编号为 g1—g3)进行激光定点照射, 照射时间均为 13 s, 在照射过程中对各试样进行定点温度数据采集。对数据进行分析处理后即得到相同表面处理状态及相同激光波长、不同

激光功率条件下 DL31 合金试样在激光定点照射过程中温度随时间的变化曲线(图 1), 反映出在同一激光功率条件下, 所测试样温度曲线良好的再现性。

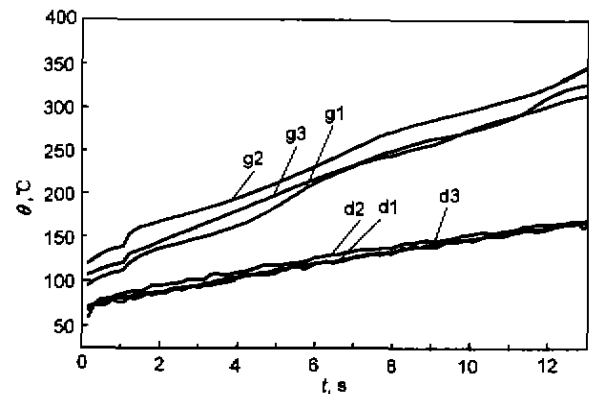


图 1 不同激光功率时测得两组试样的定点温度曲线

Fig.1 Measured curves of temperature vs time in two groups of samples d1, d2, d3 (500 W) and g1, g2, g3 (2500 W)

由激光加工后两组试样的表面状态可以看出: 500 W 功率照射后试样表面未熔化; 2500 W 功率照射后, 试样表面有明显熔化痕迹。材料表面熔化和未熔化对激光的吸收率不同^[1], 因此, 可利用激光表面重熔数值模拟程序按所假定的吸收率, 分别计算不同功率条件下试样的温度场, 用试错法分别确定材料为固态和液态时对激光的吸收率。

2 数值计算

2.1 模拟程序及计算方法

激光表面重熔数值模拟程序采用了对流-扩散固/液相变单相统一模型, 利用固定网格、熔-孔隙度方法较好解决了熔化和凝固过程中固相区、液相区及固-液两相区的统一问题, 计算中采用控制容积积分法离散控制方程, 采用交错网格技术, 使速度控制容积的节点位于主控容积的界面上, 以抑制压力波动, 保证流体流动数值计算的稳定性。速度压力耦合采用 SIMPLE 算法。激光热源的影响分别体现在能量和动量方程边界条件中。程序中详细的边界条件及源项处理方法见文献[5]。

2.2 计算条件

用数控线切割机切割和砂纸打磨试样, 以找出试样上热电偶测温点及光源照射点的准确位置。

计算所用试样的几何尺寸如图 2 所示(以低功率组 d1 及高功率组 g2 试样为例, 其它试样与之相似)。图 2 以激光照射点 O 为坐标原点建立三维坐标系, y 方向长度以 O 点为对称点取试样实际尺寸的一半, 计算区域尺寸为 31 mm × 14.5 mm × 12 mm, 在 x, y, z 方向上均匀剖分网格数为 62 × 32 × 30; 根据试样实测位置, d1 的光

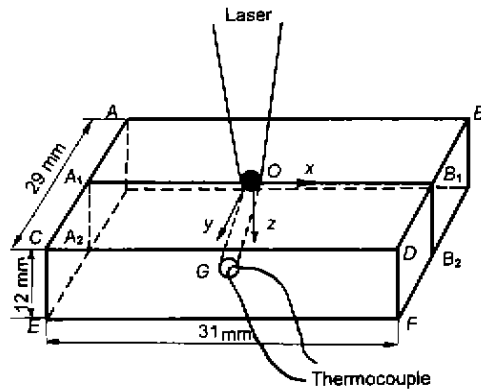


图 2 进行吸收率测定实验的试样尺寸

Fig.2 Size of sample used in absorption experiment

源照射点及测温点对应的剖分网格分别为 (29, 2, 2) 和 (30, 2, 8); g2 的光源照射点及测温点对应的剖分网格分别为 (30, 2, 2) 和 (31, 3, 7)。

计算使用的 DL31 合金的热物理性能及其它主要参数如下: 热膨胀系数 $\beta=10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 密度 $\rho=2700\text{ kg/m}^3$, 液、固相导热系数 κ_l, κ_s 分别为 108 和 209 $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, 液、固相温度 θ_l 和 θ_s 分别为 652 和 582 $^{\circ}\text{C}$, 熔化潜热 $L=395\text{ kJ/kg}$, 液、固相比热容 $c_{p,l}$ 和 $c_{p,s}$ 均为 1066 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$, 液态金属的动力粘度 $\mu=10^{-3}\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 表面张力温度系数取为 $-3.5\times 10^{-4}\text{ kg}/(\text{s}^2\cdot^{\circ}\text{C})$, 环境温度 $\theta_a=28^{\circ}\text{C}$, 试样与外界换热系数 $\alpha=100\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$, 光斑直径为 2 mm, 光源能量密度近似按 Gauss 分布, 辐射系数 $e=0.4$, δ 取 Stefan-Boltzmann 常数。在放置热电偶小孔处, 依据孔内不同位置材料的不同分别选取物性参数进行计算。

对试样 d1 及 g2 分别调整吸收率后计算出温度场, 相应监测点的计算温度变化曲线与实测平滑处理过的温度曲线如图 3 所示。

激光加热功率为 2500 W 时, 能量密度较高, 试样表面相变过程在瞬间完成, 激光照射在液态表面上, 依此实测温度曲线为准, 调整吸收率值, 用数值模拟程序计算温度场, 计算温度曲线与测定温度曲线相重合时所用到的吸收率可作为 DL31 合金材料表面为液态时的吸收率, 对 g1—g3 三试样分别计算后, 确定液态吸收率的平均值约为 0.15 ± 0.01 ; 激光功率为 500 W 时试样表面没有熔化, 计算温度曲线与实测温度曲线相近时所确定的吸收率可作为 DL31 合金材料固态表面经过处理的激光吸收率, 对 d1—d3 三试样分别计算后确定的吸收率值近似为 0.30 ± 0.01 。这里需要说明的是, 此时测定的固态吸收率为试样表面经粗化及黑化处理未熔的固态表面吸收率, 而测定的液态吸收率为 DL31 合金熔化后表面对激光的吸收率。所以, 尽管得到的固态吸收率值要比液态吸收率值

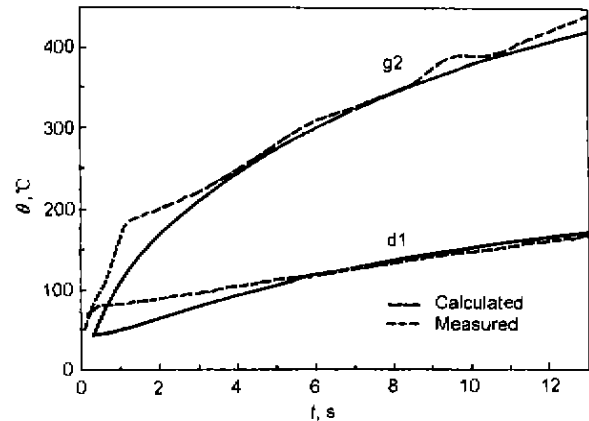


图 3 不同激光功率时试样 d1 和 g2 测定与计算的定点温度曲线

Fig.3 Measured and calculated curves of temperature, θ , vs time, t , for samples d1 and g2 under different laser powers (laser powers: 500, 2500 W)

大, 但是并不与液态吸收率值高于固态吸收率值的规律相矛盾。

3 验证

Kou 等人^[6]用实验法测得的 DL31 合金液态激光吸收率为 0.142, 与本文计算所得结果吻合。另外, 计算了 1500 W 激光照射时试样 m1(试样条件、表面处理方法等与前述相同)的温度场, 由于激光照射的表面经历了由固态到液态的转变, 其吸收率分别采用本文所求得的固态吸收率和液态吸收率, 图 4 将计算所得的监测点温度曲线与实测的温度曲线进行了对比, 可见两条曲线基本一致, 证明了本文介绍方法的可行性。

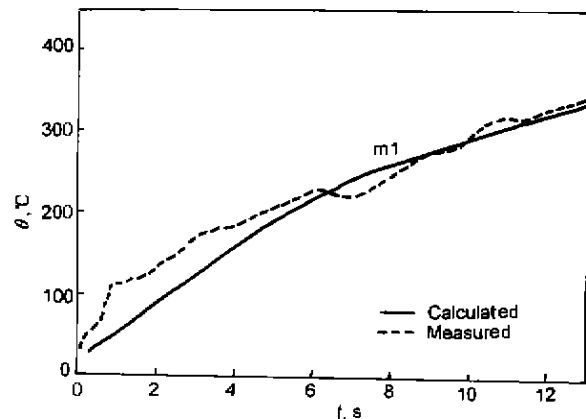


图 4 激光功率为 1500 W 时试样 m1 中测定和计算的定点温度曲线

Fig.4 Measured and calculated curves of the spot temperature, θ , vs time, t , for sample m1 under laser power 1500 W

4 结论

通过数值计算与实测温度的结合,用试错法确定了DL31合金固态处理表面及液态表面对激光的吸收率,计算值与实测值基本一致.

参考文献

- [1] Wang J J. *Laser Processing Technique*. Beijing: China Measurement Press, 1992: 112
- [2] Khan P, Debory T. *Metall Trans*, 1985, 16B: 853
- [3] Bruckner M, Schaefer J H, Uhlenbusch J. *J Appl Phys*, 1989; 66: 1326
- [4] Frenk A, Hoadley A F A, Wagniere J D. *Metall Trans*, 1991; 22B: 139
- [5] Zou D N, Lei Y P, Huang Y L, Su J Y. *Acta Metall Sin*, 2000; 36: 387
(邹德宁, 雷水平, 黄延祿, 苏俊义. 金属学报, 2000; 36: 387)
- [6] Kou S, Wang Y H. *Metall Trans*, 1986; 17A: 2265
(王家金. 激光加工技术 北京 中国计量出版社, 1992: 112)