

激光熔凝加工中瞬时温度场及 残余应力数值模拟*

姚国凤 陈光南

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 以激光熔凝表面强韧化处理为背景,应用空间弹塑性有限单元和高精度数值算法同时考虑材料组织性能的变化模拟工件的温度场及残余应力,研究激光熔凝加工中瞬时温度场及残余应力数值模拟,同时考虑相变潜热及相变塑性的影响,用算例验证了模型的正确性,给出了不同时刻温度场分布及残余应力分布。

关键词 激光熔凝加工,温度场,残余应力,数值模拟

Numerical Simulation of Transient Thermal Field and Residual Stress in Laser Melting Process

Yao Guo-Feng, Chen Guang-Nan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract The present paper study numerical simulation of thermal field and residual stress in laser processing. The 3-D finite element model of transient thermal calculation is given by thermal conductive equation. It considers the effects of phase transformation latent. Numerical example is given to verify the model. Finally the example of transient thermal field and residual stress is given.

Key words laser melting process, thermal field, residual stress, numerical simulation

随着对材料表面的高硬度、耐腐蚀、抗氧化、抗疲劳等性能的要求,表面强化处理及表面改性的研究已成为世界的研究热点之一,主要采用高能束流表面改性技术,其中激光束占有重要地位,激光熔凝加工是材料表面强韧化处理的一种手段,激光熔凝加工是一个快速加热快速冷却的过程,与普通表面处理有本质区别,现在激光熔凝加工技术还不够完善,主要表现是加工过的表面常出现微裂纹,从而使表面加工达不到工艺要求,其主要诱导原因之一是残余应力,为了使激光熔凝加工具有可控性,就必须研究在不同工况、不同激光参数和不同加工参数条件下,材料的组织形态及残余应力的分布状态,在国内外,研究低能量注入焊接的熔凝

过程比较多,而研究高能束注入的熔凝过程相对比较少,因为二者的熔凝速度有明显差别,而残余应力主要是由材料组织结构转变和温度梯度引起的。

本文由热传导方程应用有限元方法建立三维瞬时温度计算模型,同时考虑液固、固固相变潜热的影响^[1,2],用热弹塑性增量有限元法计算残余应力,这为激光材料表面改性提供力学指导奠定了良好的基础。为开发高能束强化加工工艺技术提供理论依据,从而为开发出更好的应用领域提供良好条件。

1. 温度场有限元模型建立

根据热传导方程及泛函表达式,并应用伽辽金方法或变分原理,假定 t 时刻的一切条件

* 国家自然科学基金项目(59836220)资助

已经得到,可得到关于温度在 $t + \Delta t$ 时刻的平衡方程为^[1,3]:

$$\int_V \delta \theta' T_{t+\Delta t} k^{t+\Delta t} \theta' dv = {}^{t+\Delta t}Q + \int_S \delta \theta^{st+\Delta t} \cdot h({}^{t+\Delta t}\theta_e - {}^{t+\Delta t}\theta^s) ds + \int_{S_r} \delta \theta^{st+\Delta t} \cdot \kappa({}^{t+\Delta t}\theta_r - {}^{t+\Delta t}\theta^s) ds \quad (1)$$

其中 θ 是温度变量; θ^s 是表面温度; θ_e 是环境温度; h 是表面对流换热系数; κ 是辐射换热系数; θ' 是温度梯度; K 是热传导系数矩阵。

将方程(1)线性化,并应用改进的 N—R 算法和隐式积分格式,得到增量形式的迭代公式;采用 8 结点块体单元进行有限元离散化,得到增量形式的有限元方程^[4]:

$$({}^tK^K + {}^tK^c + {}^tK^r) \Delta \theta^{(i)} = {}^{t+\Delta t}Q + {}^{t+\Delta t}Q^{c(i-1)} + {}^{t+\Delta t}Q^{r(i-1)} - {}^{t+\Delta t}Q^{K(i-1)} \quad (2)$$

其中 ${}^tK^K$ 、 ${}^tK^c$ 和 ${}^tK^r$ 分别对应热传导、对流传热和辐射传热矩阵; ${}^{t+\Delta t}Q$ 是有关外部热输入、内部热源、潜热及热导率的向量; ${}^{t+\Delta t}Q^{c(i-1)}$ 是迭代第 $i-1$ 步关于对流传热的向量; ${}^{t+\Delta t}Q^{r(i-1)}$ 是迭代第 $i-1$ 步关于辐射传热的向量; ${}^{t+\Delta t}Q^{K(i-1)}$ 是迭代第 $i-1$ 步关于热传导系数的向量。

假设在 t 时刻的温度分布及 $t + \Delta t$ 时刻的第 $i-1$ 次迭代的温度分布已得到,解方程(2)就可得到第 i 次迭代的温度分布:

$$\theta^{t+\Delta t} = {}^{t+\Delta t}\theta^{(i-1)} + \Delta \theta^{(i)} \quad (3)$$

根据以上算法就可以计算出瞬时温度分布状态,以此为基础我们编制了一套激光熔凝加工的温度场的数值模拟软件分析程序。

2. 数值算例

为了验证所建模型和程序的正确性,由于对激光熔凝过程中温度的测量是非常困难的,在公开发表的文献中还没有发现合适的验证模型,采取文献[5]所提供的实验数据作依据来验证本模型,文献[5]提供的是电弧焊输入焊接模型,它与激光输入模型的差别在于输入模型、熔凝速度及相变模型,除了相关几个子模块外,其它运算模型是一样的,实验采用宽 20cm、长 8cm、厚 10cm 的低碳结构钢(含碳量 0.23%),电弧焊在加工件的宽度中点沿长度方向以

5mm/s 速度移动,输入模型为^[1]:

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{ab_1 c \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b_1^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c^2} \quad (4)$$

$$q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{ab_2 c \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b_2^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c^2} \quad (5)$$

其中 $q_f(x, y, z, t)$ 和 $q_r(x, y, z, t)$ 分别为前四分之一椭圆和后四分之一椭圆热输入; $\xi = z + v(\tau - t)$ 为动坐标与静坐标之间的坐标变换; $f_f + f_r = 2$; 本模型 $f_f = 0.6$, $f_r = 1.4$; $a = 2.0\text{cm}$, $b_1 = 1.5\text{cm}$, $b_2 = 3.0\text{cm}$, $c = 2.0\text{cm}$; $Q = 36563.35\text{w}$; 将基体块分成 3968 个单元,应用本文模型计算这一过程的瞬时温度,在电弧焊中心点通过加工件表面与其移动方向垂直的面上 11.5 秒后,所得到的相应结点的温度与文献[5]所提供结果相比较如图 1,计算结果是在中国科学院网络中心巨型机上得到的。

从图中可以看出本文结果与实验结果是比较接近的,证明所建模型是正确的。

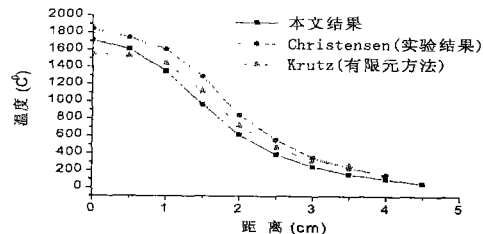


图 1 沿着垂直电子弧移动方向的几种表面温度分布结果

3. 激光熔凝加工温度场的分布

利用所建模型计算材料表面激光熔凝加工瞬时温度场的分布,所用材料与上一节相同,构件长 24mm,宽 20mm,厚 10mm,激光最大输出功率 1000w,吸收率 0.70,光斑直径 4mm,光斑在构件上表面宽度中间沿长度方向以 20mm/s 速度移动,由模型可计算构件任意一点的瞬时温度,本文只给出距加工面 0.5mm 处的截面的温度分布如图 2—5。

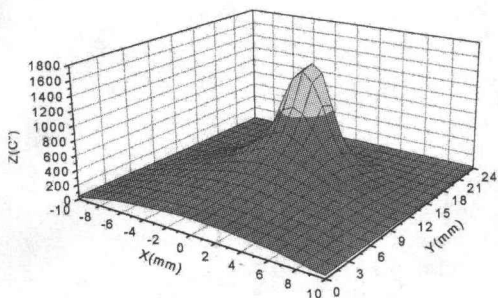


图2 1秒时0.5mm处界面温度场

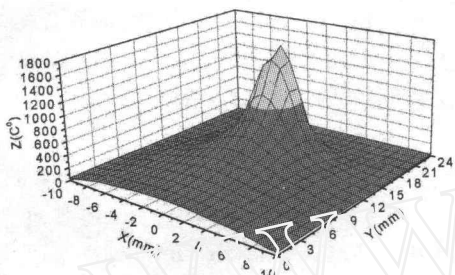


图3 1秒时表面温度场

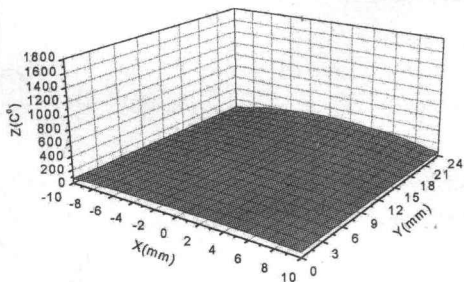


图4 2秒时0.5mm处界面温度场

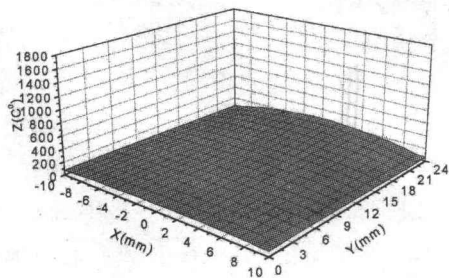


图5 2秒时表面温度场

4. 残余应力数值模拟

根据激光熔凝加工的特点,应用热弹塑性增量有限元法编制了一套瞬时热应力及残余力

的数值模拟程序,本程序与瞬时温度场数值模拟程序组成完整的激光熔凝加工中瞬时温度场及残余应力数值模拟程序,应用此程序计算图6所示的模型,得到上表面距熔池中面不同距离的残余应力的分布如图7。

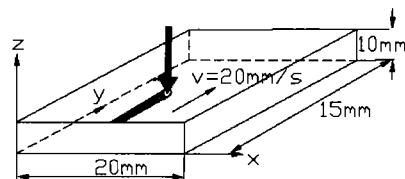


图6 激光熔凝加工模型

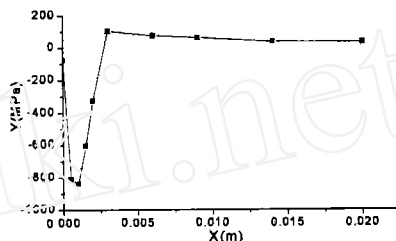


图7 x方向残余应力 σ_x 分布

5. 结果与讨论

从图1中可以看出本文结果与实验结果是比较接近的,但有一定误差,误差的主要来源是1)八结点块体元本身的误差;2)随温度变化的热物性参数选取误差;3)模型误差的积累,主要原因是前两个因素,首先高温热物性参数的测量是很困难的,所以热物性参数选取本身就有一定误差,高温热物性参数的测量是很困难的,另外单元的选取虽有一定自由度,但除了八结点块体元外的其它协调元与非协调元的自由度很高,使计算量成倍增长,所以在一定误差范围内工程上一般选择八节点块体元。以后还要尝试应用其它块体元和选取合适的热物性参数来提高计算精度。从图2-5可以看出所得到的温度分布与定性描述是符合的;从图7可看出,熔池的上部产生压残余应力,这说明马氏体相变在产生残余应力中起主要作用;热影响区有较大拉应力产生,这是产生微裂纹的主要区域。

参考文献

(下转第222页)

$$\sum_{y \neq x} V_{xi} V_{yi} + \frac{C}{2} (\sum_x \sum_i V_{xi} - N)^2$$

其中 A,B,C 是正数, V_{xi} 的下标 x 是轨迹编号, i 表示轨迹 x 的加工顺序。

(2) 提供一个解释策略来解释输出状态是如何表示问题的。在上式右边,增加一项,这一项包含路径的长度信息,其形式可选为:

$$\frac{D}{2} \sum_x \sum_{y \neq x} \sum_i d_{xy} V_{xi} (V_{y,i+1} + V_{y,i-1})$$

该式数值上等于加工的长度。总能量函数是上述两式之和。只要 A,B,C 足够大,这个函数所描述网络的低能量状态则既能表示合法的加工路线,又能计算路径总长度。具体求解 TSP 的程序,可参见有关文献[3]

2. 加工轨迹数目大于 30 个,用最短路径法。即加工头由起点出发,找与该点最近的一条轨迹进行加工,加工完毕,从安全平面上走到下一条与之最近的加工轨迹,直到加工完所有轨迹。具体算法见流程图 3。

结束语

随着三维五轴联动激光加工系统的发展和日益完善,三维激光切割已在汽车制造(如车身原形和汽车覆盖件的切割等)、航空航天等领域日益得到广泛的应用,尤其是 CAD 技术的普及和“虚拟制造”的实现,三维激光加工离线自动编程系统比手工示教编程越来越显示出优越性,在实际加工前,就能够了解到最后的加工结果。上述介绍的方法已经用于我们开发的计算

机辅助激光三维加工离线自动编程的软件 LaserCAM2000 中,该软件在一汽集团大红旗轿车的生产中发挥了巨大作用,极大地提高了生产率,受到用户的高度赞扬。

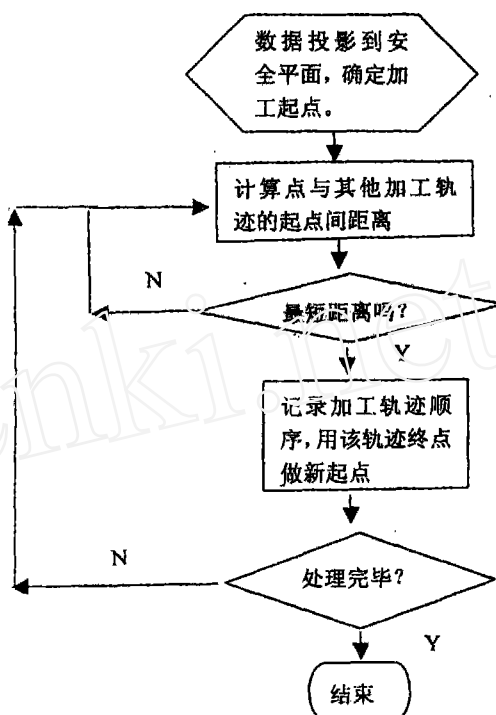


图3 最短路径法程序流程图

参考文献

- [1] 吴海等. 机械制造, 1999, 3, 17
- [2] 黄开金等. 激光技术 1998, 6, 353
- [3] 庄镇泉等. 《神经网络与神经计算机》, 科学出版社, 1992
- [4] X. B. Liu Proc. SPIE, 1999, 3682, 423
- [5] X. B. Liu, Proc. SPIE, 2000, 3888, 312
- [6] G. H. Liu, Water, 1993, 160, 181
- [7] H. E. Sliney, ASLE Trans., 1966, 9, 336
- [8] H. E. Sliney, J. Lubrication Tech. 1975: July, 500

(上接第 243 页)

- [2] C. Dellacorte, Lubrication Engineering, 1991, 47, 298
- [3] M. S. Bogdanski and H. E. Sliney, Lubrication Engineering, 1995, 51, 675

- [4] X. B. Liu Proc. SPIE, 1999, 3682, 423
- [5] X. B. Liu, Proc. SPIE, 2000, 3888, 312
- [6] G. H. Liu, Water, 1993, 160, 181
- [7] H. E. Sliney, ASLE Trans., 1966, 9, 336
- [8] H. E. Sliney, J. Lubrication Tech. 1975: July, 500