

基于量纲分析的激光直接成形残余应力控制¹⁾

章 凌²⁾ 宋宏伟³⁾ 虞 钢

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 激光直接成形中, 几何参数、材料属性和工艺参数等众多参量均会对残余应力造成影响, 需要进行系统分析. 采用量纲分析的方法, 分别提取表征几何、传热和变形的 3 类关键无量纲参数, 并结合三维瞬态有限元分析模型来研究这些无量纲参数对热致残余应力的影响规律. 研究表明, 选用热膨胀系数、屈服应力较小的材料, 残余应力会较小; 工艺控制中, 可通过降低热散失、增大激光功率和提升预热温度来减小残余应力, 其中预热的效果最好.

关键词 激光直接成形, 残余应力, 量纲分析, 工艺优化

中图分类号: O343, O344 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2009)04-037-04

CONTROL OF RESIDUAL STRESS FOR LASER AIDED DIRECT METAL DEPOSITION BASED ON DIMENSIONAL ANALYSIS¹⁾

ZHANG Ling²⁾ SONG Hongwei³⁾ YU Gang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In the process of laser aided direct metal deposition (DMD), the control of thermal-induced residual stress is very difficult, because the stress is affected by many parameters including geometrical dimensions, material properties and process parameters. In this paper, dimensional analysis is employed to extract key dimensionless parameters of geometry, heat transfer and thermal deformation. In addition, a 3D transient FEA model is proposed to study the effects of these key dimensionless parameters on the residual stress. It is shown that the residual stress can be controlled by employing materials with relatively small thermal expansion coefficient or small yield stress. Furthermore, the residual stress can be reduced by decreasing heat loss, increasing laser power, especially, by increasing preheat temperature.

Key words direct metal deposition, residual stress, dimensional analysis, process optimization

激光直接成形是近年来发展起来的一种基于离散堆积原理的先进制造技术, 在航天航空领域有广阔的应用前景. 它具有传统工艺无法替代的优点: 无需模具, 具有几何柔性、材料柔性, 晶粒组织高度细化; 但是激光制造过程中极度非均匀温度场引起的热应力及冷却后的残余应力, 会严重影响零部件的几何精度和力学性能^[1].

针对激光直接成形中的热致残余应力, 已经开展了一些研究, 采用数值方法解释了实验中出现的开

裂现象^[2,3], 但是还缺乏系统方法. 包括几何参数、材料属性、工艺参数在内的数十个参量均会对残余应力造成影响, 并且物理机制复杂, 使得系统分析具有一定难度. 本文提出采用量纲分析和数值模拟相结合的方法, 提取无量纲参数并研究其对残余应力的影响, 据此提出控制残余应力的方案.

1 量纲分析

量纲分析是自然科学中的重要研究方法, 通过

2008-10-27 收到第 1 稿, 2009-01-15 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (10502049), 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助.

2) 章凌, 硕士研究生, 主要研究方向为热结构分析. E-mail: zhangling@imech.ac.cn

3) 宋宏伟, 副研究员, 主要研究方向为热结构分析. E-mail: songhw@imech.ac.cn

Pi 定理,可以减少变量数目、明晰物理意义.激光直接成形过程复杂,影响热致残余应力的关键参数众多,采用量纲分析方法能提取出反映物理本质的关键无量纲参数.

1.1 控制方程

激光直接成形是一个热-结构响应过程,为此,通过传热和热应力控制方程来提取影响热致残余应力的参数.激光直接成形的热过程包括激光热载荷的作用、边界上的热交换、固体部分的热传导和熔池内的热对流.为了简化计算,通过修正熔池区域热传导系数来考虑热对流对温度场的影响.三维瞬态热传导的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C \cdot \theta) - \nabla \cdot (k \nabla \theta) = 0 \quad (1)$$

其中, $\theta = T - T_0$ 为相对温度 (T_0 为预热温度), ρ 为密度, C 为比热容, k 为导热系数.分析时采用温度相关的材料属性,并用焓值法考虑材料的熔化潜热.成形前,基底被预热到 T_0 .由于工件表面温度高于 1100 K 的区域仅为总面积的 0.1%,表面辐射换热不及对流换热的 0.3%.加工时只考虑自然对流换热和激光热载荷作用.

结构被加热或冷却时,体积会发生变化,热变形取决于热膨胀系数和温度变化量

$$\epsilon^T = \alpha \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

结构内不均匀的温度场引起热变形不协调,导致热应力.当热应力超过屈服极限时,材料进入塑性,变形由弹性、塑性、热变形组成.为了考虑金属材料塑性强化的影响,采用基于 Mises 屈服准则和随动强化的塑性增量理论来分析瞬态应力应变.

由于高于 1100°C 的流变区域无明显应力,求解热致残余应力时不考虑熔池流动.本文假设送入熔池的粉末都能被熔化并且均匀混合,因而送粉条件只影响工件的生长速度和组织结构,不作为热致残余应力的影响因素.

1.2 无量纲函数关系

从方程 (1),(2) 可以看出,结构内的热致残余应力是工艺参数、材料属性、几何参数的函数

$$\sigma_R = f(P_t, P_m, P_g) \quad (3)$$

其中,工艺参数包括激光有效功率 βP ,扫描速度 v ,对流换热系数 h ,环境温度 θ_e ;材料参数包括弹性模量 E ,切线模量 E' ,屈服应力 σ_s ,泊松比 μ ,导热系

数 k ,比热容 ρC ,热膨胀系数 α ,熔点 θ_m ,熔化潜热 L ;几何参数包括熔覆层长度 l ,单熔覆层高度 H_c ,熔覆层总高度 H_d ,激光光斑直径 d ,基底长度 S_l ,基底宽度 S_w ,基底高度 S_h .

式 (3) 涉及质量、长度、时间、温度 4 个基本量纲,选取 E, l, v, θ_e 作为基本量纲,进行无量纲化

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_s} = f\left(\frac{k}{\rho C v d}, \frac{\beta P}{h \theta_e l^2}, \frac{\beta P}{L v d^2}, \frac{\beta P}{\rho C v \theta_m d^2}, \frac{\theta_m}{\theta_e}, \frac{\sigma_s}{E}, \alpha \theta_m, \frac{d}{l}, \frac{H_c}{l}, \frac{H_d S_l}{H_c l}, \frac{S_w}{l}, \frac{S_h}{l}, \frac{E}{\rho v^2}, \frac{E'}{E}, \mu\right) \quad (4)$$

1.3 参数分析

方程 (4) 中,需要提取影响应力的关键参数进行分析.由于钢的弹性模量和泊松比对材料成分不敏感,而且切线模量一般小于弹性模量的 1/10,因而忽略 E'/E 和 μ 的影响;由于熔化潜热主要影响熔池的尺寸,而熔池附近处于流变状态,不影响热应力,忽略 $\beta P/L v d^2$ 的影响;几何尺寸中,由于基底比热影响区的尺寸大一个量级,而且平板厚度可以忽略,只需考虑高度 H_d/H_c 对应力的影响;本文不涉及冲击变形,忽略 $E/\rho v^2$.式 (4) 被简化为

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_s} = f\left(\underbrace{\frac{H_d}{H_c}}_{\text{几何}}, \underbrace{\frac{k}{\rho C v d}, \frac{\beta P}{h \theta_e l^2}, \frac{\beta P}{\rho C v \theta_m d^2}}_{\text{传热}}, \underbrace{\frac{\theta_m}{\theta_e}, \frac{\sigma_s}{E}, \alpha \theta_m}_{\text{变形}}\right) \quad (5)$$

自变量分别记为 $\Pi_1 \sim \Pi_7$.其中 Π_1 为几何参数,表征熔覆层数,也即热载荷的周期数.

Π_2 是传热学中经典的 Fourier 数 (Fo),是导热率和储热率的比值,也可以理解为热载荷特征时间和热扩散特征时间的比值

$$\Pi_2 = \frac{k}{\rho C v d} = \frac{d/v}{\rho C d^2/k} \quad (6)$$

其表征结构内的瞬态导热程度, Fo 越大,热扰动越快速深入到结构内部,温度场越均匀.

Π_3 是热输入和热散失的比值,也可以理解为结构和环境间的热平衡温差和初始温差的比值

$$\Pi_3 = \frac{\beta P}{h \theta_e l^2} = \frac{\beta P/h l^2}{\theta_e} \quad (7)$$

其表征结构的热平衡特性,当值接近 1 时,预热温度接近热平衡温度,结构能很快达到热平衡.

Π_4 是热输入和热容量的比值,也是通常所说的线能量 ($\beta P/vd$) 的无量纲形式

$$\Pi_4 = \frac{\beta P}{\rho C v \theta_m d^2} = \frac{\beta P / v d}{\rho C \theta_m d} \quad (8)$$

现有研究表明, 线能量是影响熔池尺寸的主要参数, 也即 Π_4 是影响局部热状态的重要因素.

Π_5 是相对熔点与相对环境温度的比值, 表征了预热温度对温度场特征的影响. Π_6 和 Π_7 为热变形参数, 分别表征材料的弹塑性变形特性和热膨胀特性. 另外, $\Pi_2 \Pi_3 / \Pi_4$ 是经典的 Biot 数, 是导热性和换热性的比值. 激光直接成形中, 壁面上的自然对流换热导致的热流要远小于结构内的热传导热流, 因而 Biot 数只影响壁面局部的温度场特征, 对热影响区温度场及应力场影响很小.

2 数值模型

为了研究无量纲参数对热致残余应力的影响, 本文采用与文献 [2] 相似的有限元模型, 基于控制方程 (1),(2) 来求解结构内的残余应力. 分析时, 考虑材料温度相关的材料属性, 并用死生单元控制熔覆层生长. 数值模拟中采用与实验相同的几何模型, 基底尺寸为 $90 \times 50 \times 20$ mm, 材料为 A3 钢; 平板尺寸为 $90 \times 3 \times 10$ mm, 材料为 316L 不锈钢. 图 1 为瞬态温度场的计算结果.

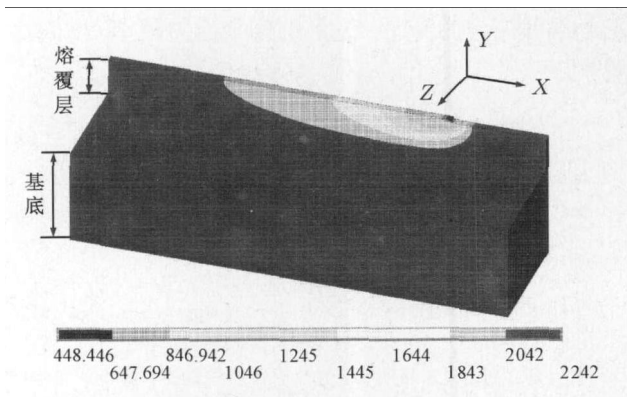


图 1 数值模型 (半模型)

实验表明 [3], 宏观热裂纹主要沿 Y 方向扩展, 因而 X 方向应力为影响成形质量的关键参数, 需要重点分析. 选取过基底上表面中点且平行于 Y 轴的直线, 来分析基底和熔覆层中的 X 方向残余应力. 如图 2 所示, 在基底中 ($Y < 0$) 随着远离交界面, 残余应力先增大后减小; 在成形件中 ($Y > 0$), 随着远离交界面, 残余应力快速增长到峰值, 随后趋于稳定. 分布趋势与实验测得的结果能很好符合 [2].

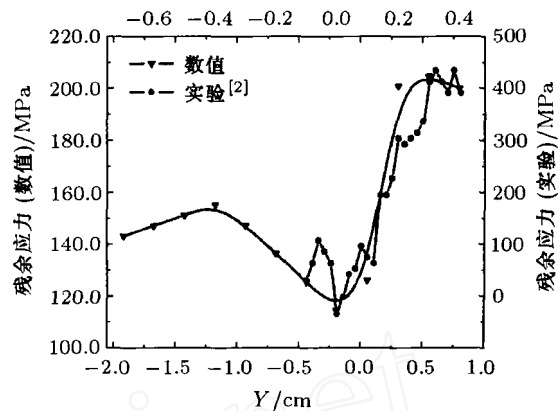


图 2 残余应力在基底和成形件中的分布

3 无量纲参数对残余应力的影响

采用量纲分析和数值模拟相结合的方法, 来分析参数对残余应力的影响. 当无量纲参数取不同值时, 用数值模拟方法计算结构最大残余应力, 从而确定函数关系 (5), 基于此提出激光直接成形中控制残余应力的方案.

3.1 几何参数对应力的影响

图 3 描述了几何参数 Π_1 对残余应力的影响, 当 $H_d/H_c < 15$ 时, 由于塑性应变的积累, 最大残余应力随着高度增加显著增大; 随后趋于稳定. 图 3 说明, 当熔覆层数达到一定值时, 就可以确定结构内的最大残余应力, 因此, 不需要模拟全部熔覆过程即可估算出激光直接成形的残余应力状态, 从而有效地指导残余应力控制.

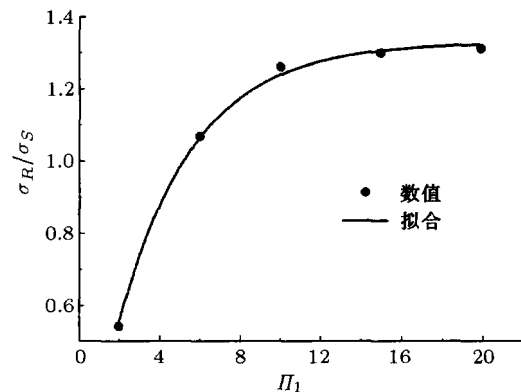


图 3 几何参数对残余应力的影响

3.2 传热参数对应力的影响

图 4 描述了无量纲传热参数 $\Pi_2 \sim \Pi_5$ 对残余应力的影响. 为了比较对应力影响大小, 将横坐标归一化为 $\Pi^* = (\Pi - \Pi_{\min}) / (\Pi_{\max} - \Pi_{\min})$. 从图中可以看出, 残余应力随 Π_3, Π_4 和 Π_5 的增大而减小,

基本不受 Π_2 的影响. 这是因为热影响区在基底中所占体积比小于 10%, 以外部较冷结构的温度 T_{sub} 为参考温度, 热影响区受到刚性约束, 应力水平取决于相对温度 $T - T_{\text{sub}}$, 而不是温度梯度. Π_2 主要影响温度分布, 而对结构的平均温度 T_{sub} 影响很小, 所以对残余应力的影响也很小. Π_3 影响结构的平衡温度, 因而对 T_{sub} 影响较大; Π_3 增大时, 热积累使得 T_{sub} 增大, 导致相对温度降低, 热致残余应力减小. Π_4 增大时, 热输入和热容量的比值增大, 结构温度 T_{sub} 升高, 残余应力也会降低. Π_5 增大, 使得预热更充分, 结构温度 T_{sub} 增大, 也导致残余应力降低.

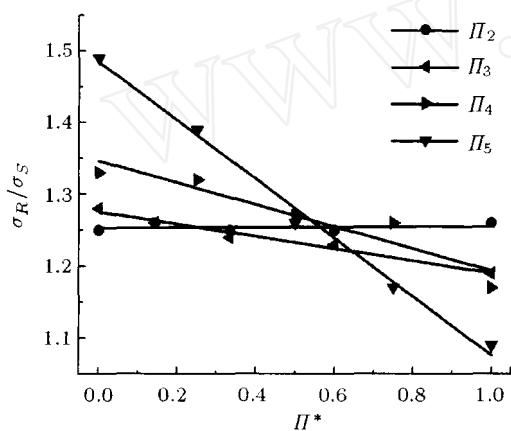


图4 传热参数对残余应力的影响

根据 Π_3 , Π_4 , Π_5 对残余应力的影响可知, 通过减少热散失、增大激光功率和预热可以降低热致残余应力, 其本质都是增大结构平均温度 T_{sub} , 减小结构内温差.

3.3 热变形参数对应力的影响

图5描述了无量纲变形参数对残余应力的影响. Π_6 是从材料性能角度表征变形的影响, 当其增大时, 虽然残余应力会增大, 但是无量纲形式会减小. 这说明采用强度更高的材料, 结构会更安全. 当 Π_7 增大时, 无量纲残余应力增大. 这是由于结构热膨胀能力较大时, 导致了更严重的变形不协调, 最终导致较大的残余应力. 可见采用热膨胀系数较小的材料, 会得到较好的工件质量.

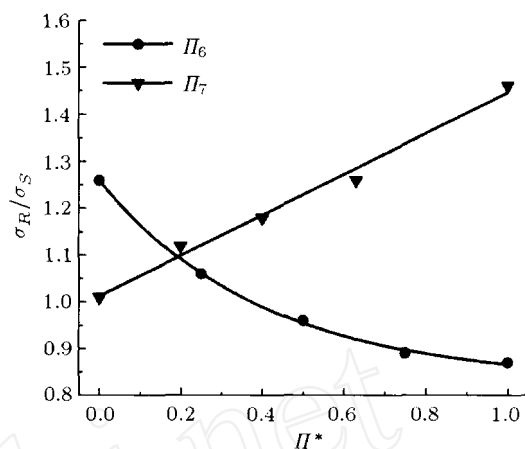


图5 变形参数对残余应力的影响

4 结论

通过提取关键无量纲参数并将其归类分析, 可以深刻理解激光直接成形的热结构响应的物理本质, 并指导残余应力控制.

(1) 当表征几何的无量纲参数 Π_1 较小 ($\Pi_1 < 15$) 时, 最大残余应力随其增大而迅速增大; 而后趋于稳定.

(2) 表征传热的无量纲参数中, Π_2 对残余应力的影响很小; 当 Π_3 , Π_4 和 Π_5 增大时, 残余应力减小, 其中 Π_5 的影响最大. 可通过降低热散失、增大激光功率和提升预热温度来减小残余应力;

(3) 表征热变形的无量纲参数中, 当 Π_6 增大时, 无量纲残余应力减小; 无量纲残余应力随 Π_7 增大而增大.

参考文献

- 1 Mazumder J, Choi J, Nagarathnam K, et al. The direct deposition of H13 tool steel for 3-D components. *JOM-J Min Met Mat S*, 1997, 49(5): 55~60
- 2 Labudovic M, Hu D, Kovacevic R. A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping. *J Mater Sci*, 2003, 38(1): 35~49
- 3 石力开, 高士友, 席明哲. 金属直薄壁件激光直接沉积过程的有限元模拟 II. 沉积过程中热应力场的模拟. *金属学报*, 2006, 42(5): 454~458 (Shi Likai, Gao Shiyu, Xi Mingzhe. Finite element simulation for laser direct depositing processes of metallic vertical thin wall parts II. The simulation for thermal stress field during depositing processes. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(5): 454~458(in Chinese))
- 4 Lampa C, Kaplan AFH, Powell J, et al. An analytical thermodynamic model of laser welding. *J Phys D Appl Phys*, 1997, 30(9): 1293~1299

(责任编辑: 陶彩军)