

电弧熔丝增材制造温度场与应力场模拟

刘海华¹ 张文浩¹

1. 机械工程学院, 天津工业大学, 天津, 中国

摘要

由于在电弧增材制造过程中复杂热循环和残余应力分布, 会使沉积层产生较大的变形甚至开裂。本文建立了基于 COMSOL 软件的单道多层三维热力耦合模型, 研究了不锈钢单道多层薄壁件沉积过程中的热循环特性、变形及应力场分布。结果表明: 不锈钢单道多层沉积过程中, 前五层沉积焊缝对基板的变形影响较大, 后续的沉积层对基板影响较小; 沉积成形过程经历了快速加热、快速冷却的过程, 随着层数的增加, 热累积效应明显, 相邻两层甚至多层出现重熔; 在焊缝和基板的接头部分应力最大, 易产生裂纹等缺陷。

关键词: 增材制造; 残余应力; 单道多层; 变形

1 控制方程及数值模型

如图 1 所示, 为了减少计算量同时增强计算过程中的收敛性, 将焊缝的截面简化为 5*1mm 的矩形。网格密集部分集中在焊缝上。

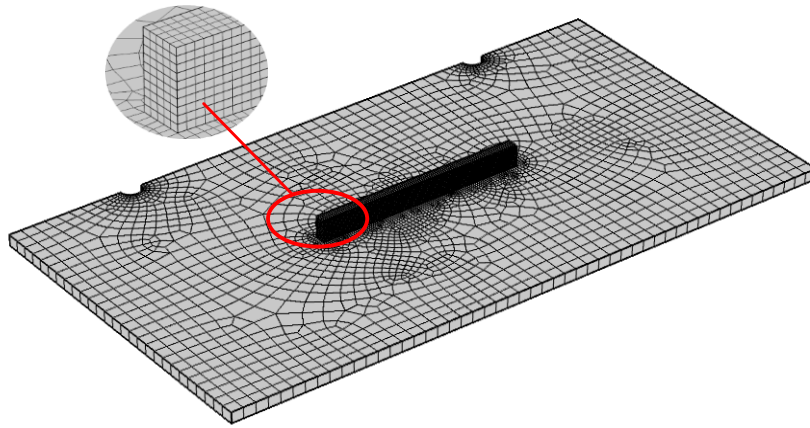


图 1 单道 10 层薄壁构件网格划分

焊接过程中的瞬态温度场由 Fourier 热传导定律和与温度相关的材料特性的能量守恒定律导出的本构热传导方程定义:

$$\rho(T)c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}_v$$

为了简化计算, 将电弧热输入与熔滴热熔合并考虑, 本文基于 Goldak 等人提出的双椭球分布模型^[1], 双椭球体热源表征, 其热流密度分布函数如下所示:

$$q_f = \frac{12\sqrt{3}Qf_f}{\pi\sqrt{\pi}a_f b_h c_h} \exp \left[-3 \left(\left(\frac{x}{a_f} \right)^2 + \left(\frac{y}{b_h} \right)^2 + \left(\frac{z}{c_h} \right)^2 \right) \right], \quad x > 0$$
$$q_r = \frac{12\sqrt{3}Qf_r}{\pi\sqrt{\pi}a_r b_h c_h} \exp \left[-3 \left(\left(\frac{x}{a_r} \right)^2 + \left(\frac{y}{b_h} \right)^2 + \left(\frac{z}{c_h} \right)^2 \right) \right], \quad x < 0$$

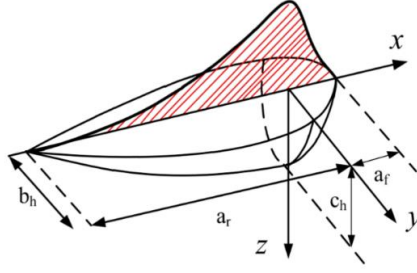


图2 双椭球热源模型

辐射换热的方程为:

$$Q = A\varepsilon\sigma(T^4 - T_a^4)$$

对流换热的方程为:

$$q_c = h(T - T_a)$$

应力和应变之间的内在关系为^[2]:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^e\}$$

式中, $\{\sigma\}$ 是应力向量; $[D]$ 是弹性矩阵; $\{\varepsilon^e\}$ 为弹性应变向量, 可表示为:

$$\{\varepsilon^e\} = \{\varepsilon\} + \{\varepsilon^p\} + \{\varepsilon^{th}\}$$

式中, $\{\varepsilon\}$ 、 $\{\varepsilon^p\}$ 和 $\{\varepsilon^{th}\}$ 分别是总应变向量、塑性应变向量和热应变向量。其中热应变 $\{\varepsilon^{th}\}$ 可用温度(T)和材料热膨胀系数(α)表示:

$$\{\varepsilon^{th}\} = \int_{T_{ref}}^T \alpha(T) dT$$

式中, T_{ref} 为参考温度。在应力演变的分析中, 采用 Mises 屈服准则表示等效应力($\bar{\sigma}$), 当等效应力超过屈服点($\sigma_{0.2}$)时, 材料即开始进入塑性状态:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

式中, σ_1 、 σ_2 和 σ_3 为3个相互垂直方向上的主应力。同理, 等效应变($\bar{\varepsilon}$)定义为:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

式中, ε_1 、 ε_2 和 ε_3 为3个方向上的主应变; μ 为 Poisson 比。求解前, 将基板底部温度设定为室温, 并将基板底部节点的 x 、 y 和 z 方向位移约束设置为零。

2 模拟结果

2.1 温度场分布

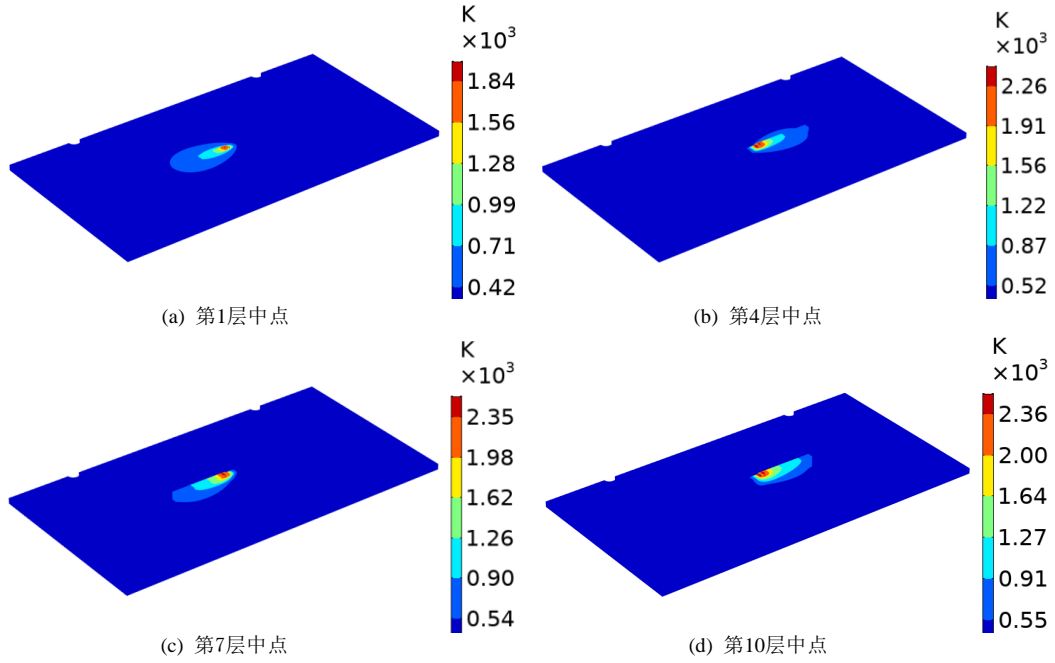


图 3 1-10 层温度场分布

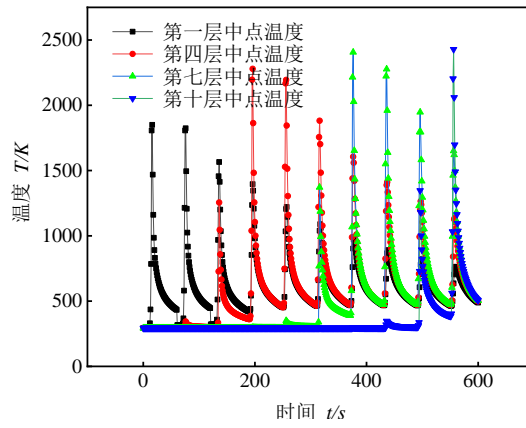


图 4 1-10 层中点热循环曲线

2.2 应变场分布

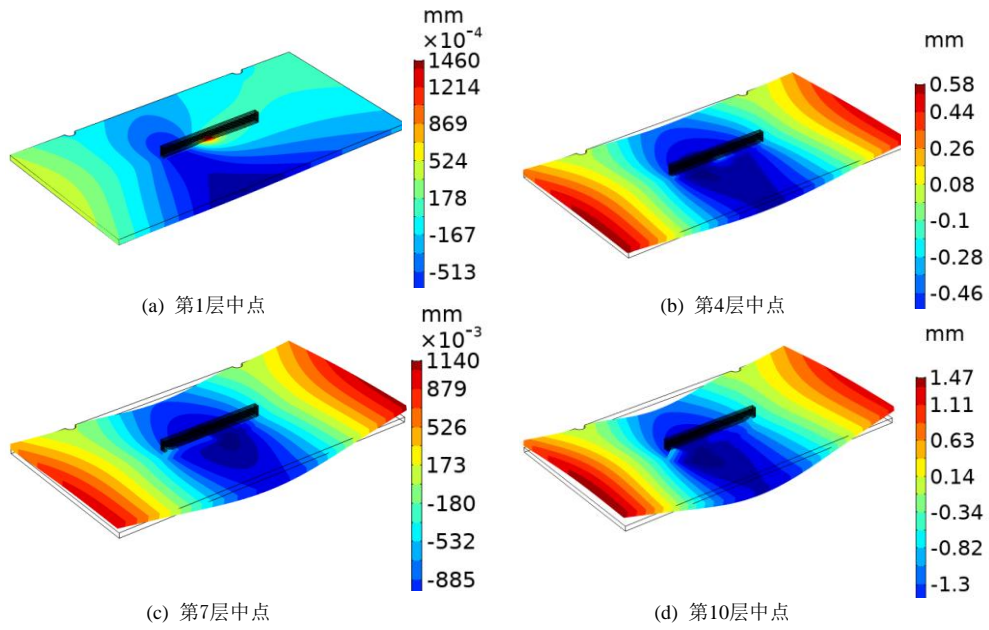


图 5 1-10 层变形场分布

2.3 应力场分布

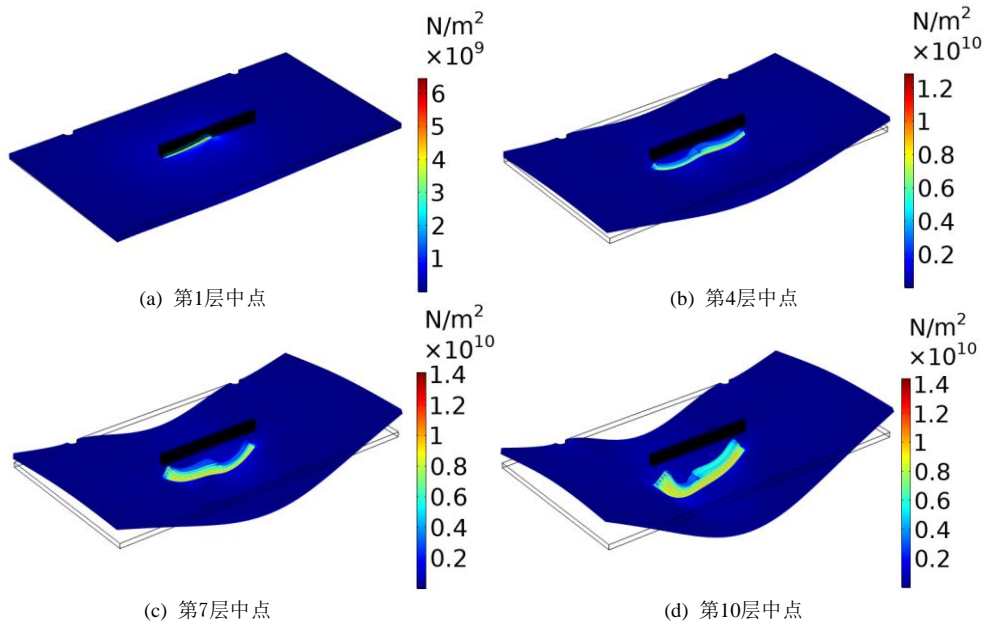


图 6 1-10 层应力场分布

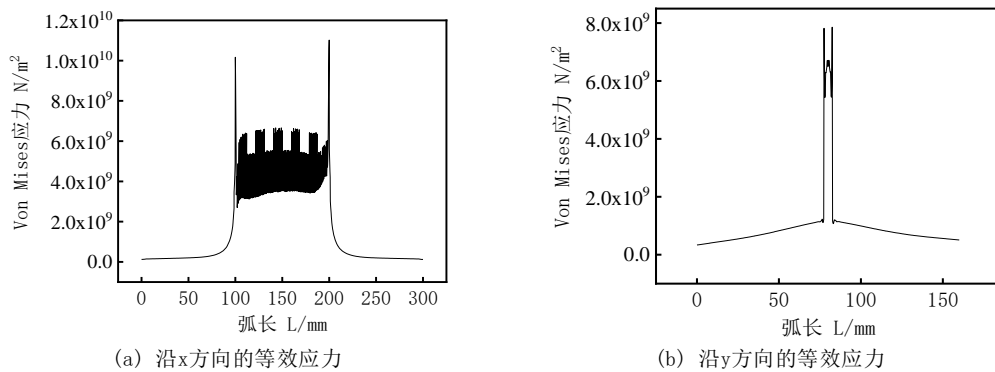


图7 沉积结束后纵向应力与横向应力

结论

- 1) 不锈钢单道多层沉积过程中，前五层沉积焊缝对基板的变形影响较大，后续的沉积层对基板影响较小；
- 2) 在单道 10 层沉积成形过程中，随着薄壁件层数的增加，热累积效应增强，冷却速率下降，相邻两层乃至多层之间出现重熔；
- 3) 薄壁件最大的残余应力集中在沉积层两端与基板的交界位置，且纵向应力高于横向应力，最大值为 $1.1 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 。沉积层中部区域残余应力分布相对均匀，故沉积构件在扫描方向上易产生裂纹等缺陷。

参考文献

1. Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources, Metall Trans B, 15, 299-305 (1984)
2. Chen C P, Yin J, Zhu H H, et al. Effect of overlap rate and pattern on residual stress in selective laser melting, Mach. Tools Manuf, 145, 103433 (2019)