

基于电弧增材制造薄壁件的温度场与应力场模拟

刘海华¹, 张文浩¹

1. 天津工业大学, 机械工程学院, 天津, 中国

简介: 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。

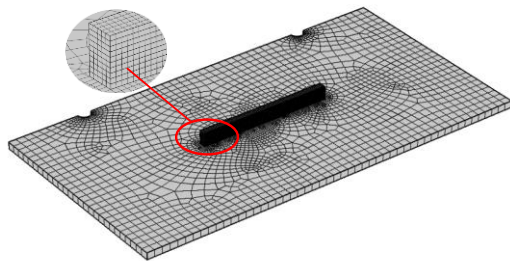


图 1. 单道10层薄壁构件网格划分

计算方法: 基于COMSOL Multiphysics固体传热模块和固体力学模块建立了单道多层沉积模型。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焓合并考虑, 本文基于Goldak等人提出的双椭球分布模型, 双椭球体热源表征, 其热流密度分布函数如下所示:

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

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

辐射换热的方程为:

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

对流换热为:

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

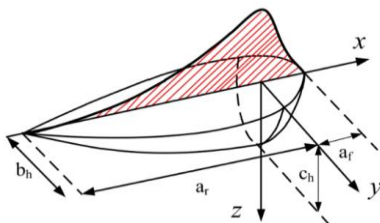


图 2. 双椭球热源模型

结果: 1、第十层中点温度场云图及变形

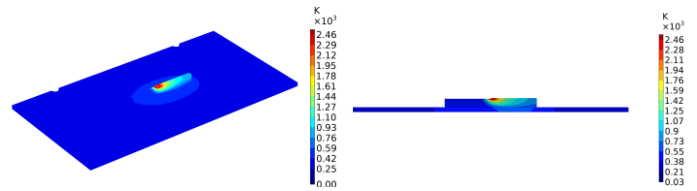


图 3. 第十层温度场

图 4. 第十层切面温度

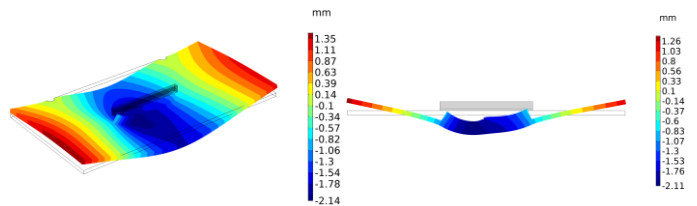


图 5. 第十层变形

图 6. 第十层切面变形

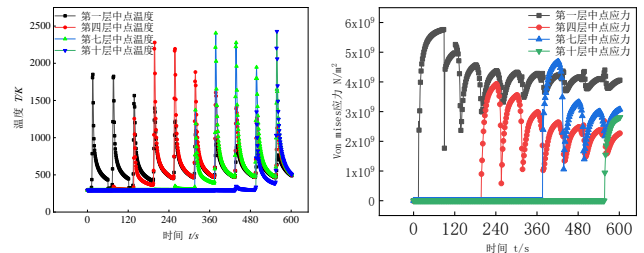


图 7. 1, 4, 7, 10层中点热循环

图 8. 1, 4, 7, 10层中点应力循环

2、沉积结束后纵向应力与横向应力

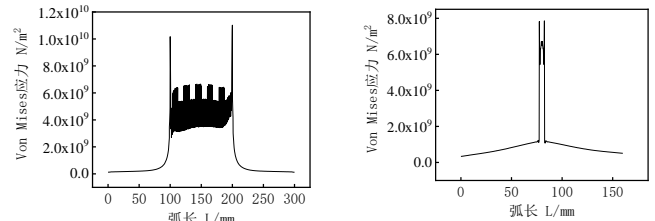


图 9. 纵向残余应力

图 10. 横向残余应力

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:

- Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources, Metall Trans B, 15, 299-305 (1984)
- Mukherjee T, Zhang W, Debroy T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing, Computational Materials Science, 126, 360-372 (2017)