

奥氏体不锈钢激光焊接温度场数值模拟

郑旺旺

(中国科技大学 精密机械与仪表系, 安徽 合肥 230026)

摘要:针对 316LN 奥氏体不锈钢的焊接温度场进行数值模拟,通过 SYSWELD 专用焊接分析软件,建立平板 V 型坡口的对接接头几何模型,选择 3D 高斯热源并进行热源校核,分析获得了 10 mm 奥氏体不锈钢多层多道焊的温度场情况,为焊接工艺提供了理论依据,具有工程实践价值。

关键词:激光焊;奥氏体不锈钢;SYSWELD 温度场

中图分类号:TG456.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)02-0036-03

Numerical Simulation of Laser Welding Temperature Field of Austenitic Stainless Steel Plate

ZHENG Wangwang

(Department of Precision machinery and precision instrument system, USTC University, Hefei 230026, China)

Abstract: The numerical simulation of the weld temperature field of 316LN austenitic stainless steel is done in this paper and SYSWELD is used as the welding analytical software to establish the geometric model of V-butt welding, then, the 3D Gaussian heat source is chosen and checked. The multi-pass welding temperature field of 10 mm austenitic stainless steel is obtained. The theoretical basis is provided for welding technology and it is of the value of engineering practice.

Keywords: laser welding; austenitic stainless steel; SYSWELD temperature field

0 引言

激光焊接是高能束焊接的一种,是一种高效精密的焊接方法,也是快速而且不均匀的热循环过程^[1]。利用高能量密度的激光束作为热源,在焊接过程中,焊接热源集中作用在焊接接头部位,使得焊件存在温度梯度,形成不均匀的温度场,这种不均匀性温度场分布所产生的工件的热胀冷缩,在工件内部产生直接热应力和间接的约束应力。本文利用 SYSWELD 软件对 316LN 奥氏体不锈钢平板对接焊的温度场进行研究。

1 激光焊接有限元模型

1.1 几何模型和坡口设计

第 1 步是几何模型的建立。本文采用带钝边的 V 形坡口,建立三维模型如下。采用 2 块尺寸为 100×50×10 mm 的 316LN 奥氏体不锈钢工件,平板对接,焊缝背部点焊设置 2 块 3×2 mm 的垫板,几何模型如图 1(a) 所示,坡口形式为带钝边的 V 型坡口,焊接坡口示意图如图 1(b) 所示:设计 3 层焊缝,每层一道焊缝形式,分别为钝边层、填充层及盖面层 3 部分组成,其中钝边层的厚度 6 mm 经过激光焊机试验验证可一次性穿透;填充层、盖面层均采用填丝焊接,填充焊丝为伯合乐 ER316LMn 焊丝,直径为 $\phi 1.2$ mm,填充层的设计需要考虑尽可能地减少焊接变形,采用窄间隙填丝焊形式;盖面层是最后一道焊缝,表面成型,起到防止焊接缺陷的作用。坡口的设计还

考虑到激光焊的特点,坡口钝边宽度要保证激光能照射到坡口底部,且与焊丝直径相匹配。

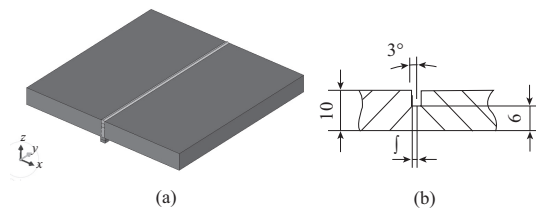


图 1 工件几何模型和坡口示意图

1.2 建立有限元网格模型

建立尺寸 100×50×10 mm 的 316LN 平板焊接试件模型后,以平板对接接头为研究对象,焊缝形式为带钝边的 V 形焊缝。焊接方法为激光热丝多层多道焊。由于激光焊接急热急冷的特点,焊接试件的温度梯度分布很大。网格划分细密程度以及时间步长的设定影响软件仿真的精度和速度,采取分区域划分网格的办法,解决精度和速度的问题;在焊缝及其热影响区域附近采用细密的网格划分,可以获得更高精度的计算结果;采用粗大网格划分试件上远离焊缝的位置,可以解决计算机的计算时间过长,提高运算速度。如果在焊缝处使用的网格粗大,则计算的精度变差,很容易发生“跃阶”现象^[2],这是仿真分析时需要特别考虑的情况。为了满足焊接瞬时温度场更加符合实际焊接状况,将焊缝的网格单元划分 <2 mm^[3],焊缝以外区域可根据试件尺寸适当加粗划分。

网格划分后的工件模型如图 2 所示,设定的网格单元大小为 0.4 mm。将焊缝及热影响区附近划分成均匀细小的网格,在除了焊缝、热影响区以外的其它区域划分模型实体使用粗大的网格。划分后的模型统计得到:网格单元最大为 2 mm,总共获得 92 213 个节点,104 948 个单元,84 400 个实体。

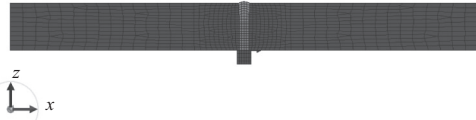


图 2 焊接试件的有限元网格模型

1.3 定义材料性能参数

焊接温度场模拟高度非线性的过程,金属力学性能参数和材料热物性参数一般伴随着焊接接头温度场发生的变化而持续不断地变化^[4],模拟分析必须有 316LN 奥氏体不锈钢材料的热物性随温度变化的参数。但许多材料在高温尤其是近熔化状态,热物理性质参数几乎是空白^[5]。对此,采用一定温度下的参数外推法和插值法计算。316LN 密度为 7.87 kg/m³,比热容为 0.502(20℃)J/(g·℃)。

1.4 焊接热源作用模式校核

在 SYSWELD 软件中配置了 3 种热源作用模型。3 种热源模式中,带锥形的三维高斯分布的热源模型充分考虑了激光焊接中的小孔效应,被认为是最接近实际的激光焊接的热源模型,因此采用了 3D 高斯圆锥形热源模拟分析激光自熔焊接这一过程。本文采用的 3D 高斯热源作用模式是将平面高斯热源沿工件厚度方向叠加的立体作用的热源模式,热流分布在每一垂直 z 轴截面上将沿着 z 向厚度方向线性衰减^[6]。

建立 xoz 坐标系,以热源中心为坐标原点,模型如图 3 所示,该模型的热流密度函数可用下面的公式表达:

$$qv(r, z) = \frac{9e^3 Q}{\pi(e^3 - 1)} \frac{1}{(z_e - z_i)(r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \quad (1)$$

式中:Q 为热源有效功率; r_e, r_i 为工件上、下表面的热流分布半径; z_e, z_i 为工件上、下表面的 z 轴坐标。

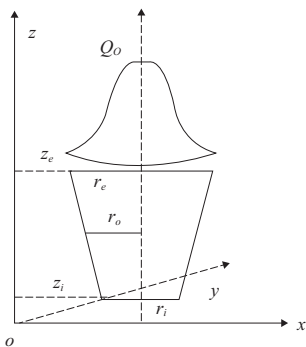


图 3 3D 高斯热源分布模型

下面将对 V 型接头的焊接热源进行校核。利用 SY-

SWELD 软件提供的热源校核工具,通过所拟定的焊接工艺参数和金属材料的热物性参数输入,观察工件焊缝熔池区域的实际形状与尺寸以及熔池区域,不断修正参数设置,对热源进行校核,以便确定最佳的热源模式。采用激光自熔焊接方法进行焊接,实验获取的焊接剖面与热源校核的截面对比,实验获取截面在第一道焊缝位置与软件模拟截面稍有偏差,总体上轮廓相近,表明软件所选取的热源模式校核成功,可以使用。

2 温度场计算结果和分析

2.1 温度场分布特征

图 4 是焊件从焊接初始到焊后 1 800 s 过程中的某一时刻的温度场分布情况,焊接过程总体上分为 3 个过程:0~600 s,钝边层第 1 道焊缝的焊接及冷却过程;600 s~1 200 s 时间内,填充层第 2 道焊缝的焊接及冷却过程,在 1 200 s~1 800 s 时间内,盖面层第 3 道焊缝的焊接及冷却过程。其中,图 4(a)、图 4(d)、图 4(f) 分别表示钝边层、填充层、盖面层焊缝焊接时的温度场分布。从图 4 可以看出,在 $t=0.494$ s 时,第 1 层焊缝最高温度达到 1 713.8℃,即已经超过 316LN 奥氏体不锈钢的熔点,母材开始融化,表明在激光焊接中,通过粒子间的互相碰撞以及带电粒子的谐振作用,光能转换为热能的过程只需要很短的时间,说明材料吸收激光实现热能转换是瞬间完成^[7],这与普通电弧焊起始焊接区别较大,普通的电弧焊起弧的温度从室温达到金属材料熔点需要一个过程,初始阶段存在一段未焊透,而激光焊接的初始起弧阶段不存在未焊透现象。而第 2,3 层焊缝提高了热输入,采用较高的激光器功率,其最高温度超过了钝边层的温度,达到了 2 200℃,焊件处于准稳态的温度场状态。图 4(b)、图 4(c)、图 4(e) 显示的是第 1,2 层焊缝焊后的焊件温度场分布,焊件稳定后的温度场分布相同。从整体上看,焊接试件温度场随着热源的移动,一直处于动态变化的过程中,分为加热升温 and

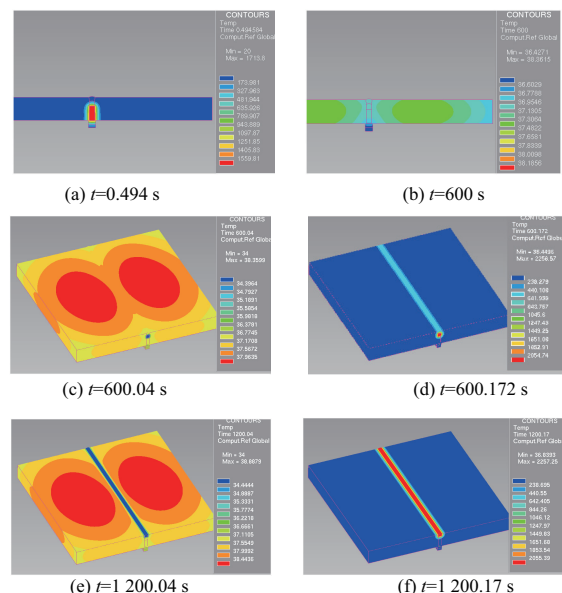


图 4 不同时刻的焊接温度场

降温冷却两大过程,焊件各点的温度随时间而不断变化。另外,从结果可以发现,激光焊接区域升温明显,与非焊接区域温差明显,较大的温度阶梯发生在较窄的尺寸范围内,说明激光焊接加热迅速,具有急热特点,说明高能束焊的影响区域较小,焊件的材料组织变化小和变形较小,焊接质量高;而焊后的温度云图又表明整个焊件由于热传导和表面散热等热传递特性,温度均匀分布焊件两侧非焊接区域的现象。

2.2 焊接热循环特征曲线

在第1层焊缝的上表面平行的直线上选取两个特征点,一个在焊缝上的节点48412点,另一个在热影响区上的37047节点。提取温度-时间曲线,其热循环曲线如图5所示。从图5可见,48412点的热循环曲线中3段曲线,分别代表3道焊缝的3次焊接过程,即钝边层、填充层和盖面层热循环曲线,一段曲线显示的是一道焊缝焊接过程中的温度变化。填充层激光器功率高,热输入高,温度大,热循环曲线峰值比钝边层要高,钝边层、填充层峰值温度分别为1700℃和2300℃,超过316LN奥氏体不锈钢的熔点,说明该节点经历了两次重熔过程;对于盖面层焊接时,由于所提取的点在钝边层的上表面,远离焊接区域,而第2层热量已经散失,故该点的受热较小,所以温度较低。从中可见,焊接过程中,同一特征点的热循环过程趋势相同,焊件上节点随着焊接热源沿焊缝的移动发生了温度的显著变化,总体上图线呈现先升后降现象,接着中间某时刻出现温度峰值,温度变化均发生在很短时间内,升温 and 降温的曲线曲率较陡。在热循环曲线后半程阶段随着焊接热源的离开,节点处的熔池开始冷却凝固。由于316LN不锈钢的热导率低,散热比较缓慢,冷却趋于稳定时,温度将稳定在某一数值左右,即温度下降到焊件的平均温度为止。

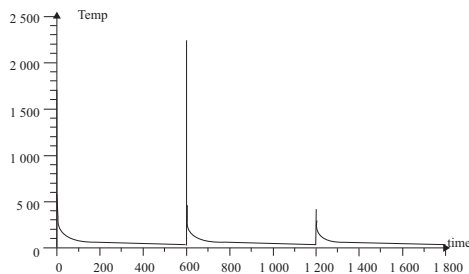


图5 节点48412的热循环曲线

选取位于热影响区37047的节点为对象,对比48412节点的热循环曲线过程,37047节点经历了48412节点相同的3次热循环过程,钝边层焊接时该节点的最高温度达到1200℃,低于奥氏体不锈钢的熔点,原因是焊接热源

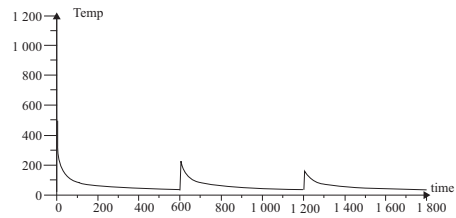


图6 节点37047的热循环曲线

不对热影响区域直接加热,热源通过热传导的方式进行间接加热,因而热影响区峰值温度明显比焊缝熔池区域低,而且焊填充层、盖面层时已经冷却了600s和1200s,该点的位置没有改变,故温度较低。

3 结语

本文通过对316LN奥氏体不锈钢10mm厚板激光多层多道焊的模拟,得出以下几点结论:

- 1) 数值模拟获得了平板焊接瞬态温度场分布情况,了解了工件在焊接过程中温度变化情况及分布情况。
- 2) 选取焊缝和热影响区节点,进行热循环曲线分析,可以获取焊接过程中某一时刻该节点的温度具体数值,不同区域的热源影响情况差异较大。
- 3) 通过316LN不锈钢温度场数值模拟,表面三维有限元技术可以掌握激光焊接温度场分布规律、变化特点,软件仿真分析可以为工程实际中焊接方法的选取、焊接质量的提高,提供理论上的支撑和依据。

参考文献:

- [1] 陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [2] 张书权. 基于SYSWELD的T型接头焊接温度场和应力应变场的数值模拟[D]. 芜湖:安徽工程大学硕士学位论文,2011.
- [3] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2013:19-20.
- [4] kiyoshima S, Deng D, Ogawa K, et al. Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint [J]. Computational Materials Science, 2009, 46(4):987-995.
- [5] 张亮. 中厚板激光多层焊温度场和应力应变场的数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学硕士学位论文,2011.
- [6] 李振江. 基于SYSWELD的焊接接头温度场和残余应力场的研究[D]. 北京:北京交通大学硕士学位论文,2010.
- [7] Alexandre Mathieu, Sebastien Pontevicci, Jean-claude Viala, et al. Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si) [J]. Materials Science and Engineering, 2006, 435(11): 19-28.

收稿日期:2017-11-24