AZ91D/6061 异种合金 MIG 温度 / 应力场数值模拟

娄振洋 刘春梅

(青海高等职业技术学院,青海海东810799)

摘要: DEFORM 是基于工艺过程模拟的有限元系统(FEM), 在塑性变形、金属成形等方面应用很广泛,可以用来分析金属的 流动性及温度、应力、应变等场量的分布,通过模拟计算结果来 分析材料成型工艺及相关问题。本文通过 DEFORM 对 AZ91D/6061 异种合金 MIG 焊进行温度场及应力场数值模拟,通过模拟数据进 行试验指导。

关键词: DEFORM; 温度场; 应力场; 数值模拟

一、焊接温度场理论

焊接件的结构特点、材料特性、焊接参数等是焊接加工工艺 的重要因素。这是因为在加工阶段中,热量通过焊接电弧大量被 释放,传导到被加工结构件中后,其温度变化剧烈,结构件中的 化学元素烧损和物理性能的改变均会直接导致结构件的变形、残 余应力产生等现象。

热传导方程如下:

$$\operatorname{pc}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

式中:C为比热容;p为密度;T为结构温度场分布函数;t 为传热时间;入为材料的导热率;Q为内热源。

在求解上述热传导方程时,除了已知的材料参数包括材料的 比热容、密度、热导率等,还需要环境的初始温度函数,即初始条件, 和环境与材料本身的热交换情况,称之为边界条件。

二、焊接有限元模型

(一)网格模型建立

通过 SolidWorks 软件建立模型,以 STL 文件导入 DEFORM-3D 软件,然后在 Pre 界面进行前处理,对其进行网格划分,设置 为四面体网格类型,共 112360 个元素,27153 个节点,焊缝条数 为1条,焊缝轨迹长度为 216.00mm,与焊接试样的焊缝长度基本 一致。焊缝处网格尺寸为 1mm×1mm×1mm,为了减少计算时间 同时保持计算的精度,对远离焊缝 50mm 外网格尺寸进行粗大化 处理。建立的有限元网格模型如图 1 所示。



(二)热源模型选择

在焊接过程中,热量通过电弧的形式传递到焊接件上,这个 电弧的分布形式不是均匀的,在接近电极中心的位置热流密度大 温度高,反之则温度较低,呈现不规则分布状态。热源模型可以 分为单椭球模型和双椭球模型,单椭球模型认为在焊接过程中热 源的形状不受热源移动的影响。如图 2.2 所示,双椭球热源模型 对于熔化极惰性气体保护焊而言,相当于有一个体热源作用于前 面的椭球上模拟电弧的冲击作用,以及另一个体热流密度作用于 后面的椭球上,后半部热源相对较长,模拟由于热源移动而导致 的能量分布变化。相对于单椭球热源模型,双椭球热源模型对于 热冲击敏感性较低但熔池深度较大,有效模拟了热源密度的分布 的变化,热源输入量相对单椭球热源较小,从而使峰值温度较低 更加接近实际温度。实际中,由电极释放的热源形状会随着电极 沿焊缝方向的移动产生伸长变化,因此,本文采用双椭球热源模 型对热源进行仿真,双椭球热源模型的定义如公式所示:

$$q_{f}(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_{f}(1-k)Q}{\pi^{3/2}a_{1}bc}\exp(-3(\frac{x}{a_{1}})^{2} + (\frac{y}{b})^{2} + (\frac{z}{c})^{2})$$
$$q_{b}(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_{b}(1-k)Q}{\pi^{3/2}a_{2}bc}\exp(-3(\frac{x}{a_{2}})^{2} + (\frac{y}{b})^{2} + (\frac{z}{c})^{2})$$
$$Q = U \cdot I \cdot \eta$$

式中:U表示焊接电压,I表示焊接电流,表示电源热效率, 对于MIG焊接来说n的取值范围在0.75~0.85之间,本论文取值 0.8。a1、a2、b、c分别表示高斯热源椭圆模型的半轴长,通常取 ff+fb=2。



(三)材料定义

被焊工件为 6mm 厚 AZ91D 镁合金和 6061 铝合金,其基本物 理参数见图 3。材料的热物理性能参数随温度变化而变化。在数 学模型求解过程中,为保证求解的精度,用拟合函数来定义热物 理参数。材料的密度 ρ、比热容 c 及热导率 k 是温度 T 的函数。 由于在焊接过程中,材料没有熔化,故只对在低于熔点温度的热 物理性能进行分析。

材料性能指标	AZ91D	6061
抗拉强度(MPa)	280	290
屈服强度(MPa)	160	265
延伸率(%)	8	16.5
比强度	154	128
杨氏模量(GMp)	45	69
密度(g/cm ³)	1.82	2.73
熔点 (℃)	596	650
导热系数(W/Mk)	72	23.6

图 3 AZ91D 镁合金、6061 铝合金材料性能指标

三、数值模拟结果分析

(一)不同焊接参数对焊接温度场的影响

从对接焊接温度场计算结果文件中选取 10s、20s、30s、40s 的焊接温度云图如图 2.3 所示。由图可以发现,在焊接的过程中, 由于电极热源的输入,在焊缝部位会产生一个温度高度集中的区 域,在仿真中最高温度发生在焊接接头端部,约为1117℃,这是 由于该热源模型没有模拟收弧的效果,导致端部热输入量过大, 实际最高温度应发生在焊接稳定阶段,如图4(a),最大温度约 为780℃,最高温度在母材的熔点以上,使材料达到融化状态并 在后续的过程中冷却凝固成为一个整体,从而达到将两个焊接件 连接为一个的效果。在焊接过程中,熔池部位以及周围母材的温 度梯度极大,会导致焊缝部位的膨胀与母材的膨胀大小有所不同, 这也是焊接应力产生的来源。在冷却的过程中,热源已经从焊接 件移除,温度迅速向周围扩散,如图4(d)所示,进入冷却阶段 20s温度降低为143℃,剩余温度将会从焊缝区域向母材区域继续 传递,母材的温度会向周围环境传递,温度梯度越大传递速度越快, 随着温度急速降低到接近室温时,焊接件冷却的速度下降为最小。



图 4 不同时间段温度场分布图

(二)不同焊接参数对焊接应力场的影响

图 2.4 为在焊接稳定阶段,对接接头焊缝中部位置的温度场 与此时的应力场云图。在焊接的过程中,材料的力学属性随温度 变化较明显,母材的屈服强度会随着温度的上升不断下降,当温 度场引起的应力场大小超过该温度的母材屈服强度时,当冷却后 焊接位置就会产生一定的残余应力,使焊接区域的寿命以及力学 性能显著低于母材。

在 10s 时热源移动到焊缝中部,由应力场云图可以看到,在 这个时刻温度场热源所在的位置有一个相对周围较小的应力,此 时焊缝位置的材料已经达到熔化状态,而母材所受的热量小于焊 缝位置的热量,还未达到熔点,导致最高温度的膨胀大于母材部 分的膨胀大小,从而受到母材的压缩作用;在 20s 时热源移动到 焊缝终点处,由于该模型对焊接没有对收弧阶段进行模拟,所以 温度有所上升。在该时刻,热源移动到焊缝终点,热量输入量大 于在稳定焊接阶段的热量,所以温度场的最大值有所增大,但依 旧满足对焊缝的焊接温度条件,由于热输入量的增大,焊缝区域 融化的母材范围也相对大于稳定焊接阶段,会导致焊缝区域的材 料膨胀大于远离焊缝区的母材,导致焊缝区域受到来自于母材的 压应力。同时可以看到,在10s处焊接过的位置处,由于热源的 加热效果已经消失,该点进入冷却阶段,在这个阶段,温度继续 向母材和空气中传导,同时焊缝区域的温度剧烈下降,焊缝区域 收缩变形量又大于母材的变形量,导致该点受到压应力有所减小, 并逐渐变为拉应力。其中焊接残余应力的大小也与焊缝的形状、 夹具的位置以及焊件的尺寸有关。



图 5 不同时间段温度、应力场分布

四、总结

(1)利用 DEFORM-3D 模 拟 AZ91D 镁合金 /6061 铝合金 MIG 焊焊接过程中的温度场,焊接试板上表面温度场近似圆形,最高温度出现在熔池中心区且呈现月牙状并向前进侧倾斜,温度场在板厚方向上呈盆状并向焊接方向倾斜。电弧在行走过程中,温度场沿着焊接方向前移,温度沿板厚方向变化不明显,随着焊接速度逐渐增大,工作温度呈上升趋势。

(2)利用 DEFORM-3D 模拟 AZ91D 镁合金 /6061 铝合金 MIG 焊焊接过程中的应力场,图 5 为在焊接稳定阶段,对接接头

焊缝中部位置的温度场与此时的应力场云图。在焊接的过程中, 材料的力学属性随温度变化较明显,母材的屈服强度会随着温度 的上升不断下降,当温度场引起的应力场大小超过该温度的母材 屈服强度时,当冷却后焊接位置就会产生一定的残余应力,使焊 接区域的寿命以及力学性能显著低于母材。

参考文献:

[1] 李阳.大型中空铝合金 MIG 焊接结构件残余应力及变形仿 真研究 [D].大连交通大学,2020.