

不锈钢熔丝 TIG 焊数值模拟

杨文飞, 刘爱国

(沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 采用 simufact welding 有限元软件, 以厚度为 2mm 的 304 不锈钢薄板为模拟对象, 建立其简化物理模型, 并选择双椭球热源模型, 对熔丝 TIG 焊焊接过程进行数值模拟。通过改变焊接工艺参数, 获得不同条件下的焊接温度场、应力场及焊接变形情况。结果表明: 在模拟条件下, 焊接起始处应力最为集中, 改变电流或者焊接速度大小, 应力集中区域几乎不变; 焊接电流从 120A 增大至 160A, 热循环曲线的峰值温度升高约 500K, 追踪点 C 在 z 方向的变形量增幅最大, 约 0.06mm; 焊接速度从 12cm/min 增大至 16cm/min, 峰值温度降低约 400K, 追踪点 C 在 z 方向的变形量降幅最大, 约 0.33mm。

关键词: 304 不锈钢; 熔丝钨极惰性气体保护焊; simufact welding 软件; 数值模拟

中图分类号: TG444⁺.74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2021.06.014

Numerical Simulation of Stainless Steel Molten Wire TIG

YANG Wenfei, LIU Aiguo

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: Using simufact welding finite element software, taking the 304 stainless steel sheet with a thickness of 2mm as the simulation object, its simplified physical model is established, and the double ellipsoid heat source model is selected to numerically simulate the welding process of molten wire Tungsten Inert Gas Welding. By changing the welding process parameters, the welding temperature field, stress field and welding deformation under different conditions can be obtained. The results show that: under the simulated conditions, the stress at the beginning of welding is the most concentrated. When the current or welding speed changes, the stress concentration area is almost unchanged; the welding current increases from 120A to 160A, and the peak temperature of the thermal cycle curve increases by about 500K. The deformation increase of tracking point C in the z direction is the largest, about 0.06mm; the welding speed increases from 12cm/min to 16cm/min, the peak temperature is reduced by about 400K, and the deformation of tracking point C in the z direction has the largest drop, about 0.33mm.

Key words: 304 stainless steel; molten wire tungsten inert gas welding; simufact welding software; numerical simulation

304 不锈钢在空气中及酸、盐、碱等具有腐蚀性的接触介质中呈现出钝态、耐蚀性^[1],且其具有无磁性、较高的韧性和塑性等多方面优点,广泛应用于航空航天、核工业、生物工程以及化学工程等领域^[2]。304 不锈钢作为一种使用材料,焊接是其最常用的连接方式,可将材料灵活加工成所需的几何体,并使得各个方向具有良好的力学性能,焊接质量直接影响到产品的使用情况和寿命,对 304 不锈钢焊接的研究具有重要意义。关于不锈钢焊接方面的研究较多,陈安忠等^[3]采用钨极惰性气体保护焊(Tungsten Inert Gas Welding, TIG)对双相不锈钢进行多层多道焊,分析研究焊接接头的显微组织、冲击韧性,测试结果发现,当焊接接头铁素体相与奥氏体相之比处于 0.88 ~ 2.45 范围内时,接头的韧度与铁素体的量成反比关系。Asadi P 等^[4]对 SUS304 不锈钢管多道次 TIG 焊接残余应力状态进行了数值研究,模拟结果表明,随着焊接速度的提高,管道表面的轴向拉应力减小。赵先锐等^[5]采用大型通用有限元模拟软件对 TIG 焊接过程进行模拟,将模拟获得的焊缝截面形貌与试验获得的焊缝截面形貌进行对比,并根据对比结果改善模型,为实现工艺参数优化提供参考。国旭明等^[6]研究了焊接热输入和微合金元素铌对铁素体不锈钢 TIG 焊接头组织及性能的影响,实验结果表明,随着焊接热输入的增加,焊接热影响区的粗晶区和焊缝区中铁素体晶粒明显粗化,降低了焊接接头的强度和塑性。

随着计算机技术的不断发展,采用数值分析的方法对焊接过程进行模拟,不但可以减少实验的盲目性,降低成本,而且可以深入理解焊接过程中温度、应力及变形的变化规律,为优化焊接工艺参数提供更多的理论依据^[7-10]。本文采用 simufact welding 软件模拟不锈钢熔丝 TIG 焊接过程,探究不同工艺参数下焊接温度场、应力场的分布特征及变形情况。

1 不锈钢熔丝 TIG 焊模型

1.1 熔丝 TIG 焊工作原理及热源模型

熔丝 TIG 焊焊接方法兼具传统 TIG 焊的高质量 and 熔化极惰性气体保护焊(Melt Inert-gas Welding, MIG)的高效率等优点,其工作原理

为:工件和焊接系统中起传送焊丝作用的 MIG 焊枪一同并联连接在直流电源的正极,TIG 焊枪连接直流电源的负极;MIG 焊枪和 TIG 焊枪以约 75° 的角度固定在一起,置于垂直焊接方向的平面内,MIG 焊枪与工件之间的夹角约为 30°,TIG 焊枪和工件的夹角约为 75°;当焊接开始时,TIG 焊枪与工件之间产生独立的电弧,使工件熔化形成熔池;同时 TIG 焊枪与焊丝之间产生另一电弧,使焊丝熔化成熔滴状,当熔滴足够大时,受到电磁收缩力、电弧等离子体力、气流力和重力的作用,脱离焊丝的尖端进入熔池,形成熔池的一部分^[11-12]。

熔丝 TIG 焊焊接过程中同时产生两个电弧,母材和焊丝同时发生熔化,且存在熔滴过渡,其物理过程比传统 TIG 焊和 MIG 焊都要复杂。考虑到实际焊接过程中的影响因素及计算成本,做如下简化假设:

(1) 熔丝电弧和焊接电弧独立燃烧,不发生耦合;

(2) 母材不受熔丝电弧热的影响;

(3) 焊丝不受焊接电弧的热影响。

在此假设基础上,采用双椭球热源模型对焊接电弧的热作用进行描述。该热源模型不仅反映了熔池头部长尾部短的特点,也反映了热源深度方向上的能量分布特征,即熔深增加时,能量会逐渐减少。双椭球热源模型如图 1 所示。该模型将热源划分为两个部分,即前半部分和后半部分,分别采用不同表达式来确定热源分布。

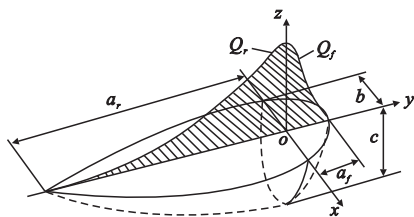


图 1 双椭球热源模型

模型的前半部分和后半部分分别为 1/4 个椭球,设前半部分椭球能量分数为 f_f ,后半部分椭球能量分数为 f_r ,且 $f_f + f_r = 2$ 。在前半部分椭球内热源分布为

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Pf_f}{\pi abc\sqrt{\pi}} \exp\left(-3\left(\left(\frac{x}{R}\right)^2 + \left(\frac{y}{R}\right)^2 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right)\right) \quad (1)$$

后半部分椭球内热源分布为

$$q(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}Pf_r}{\pi abc\sqrt{\pi}}\exp\left(-3\left(\left(\frac{x}{R}\right)^2 + \left(\frac{y}{R}\right)^2 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right)\right)^{(2)}$$

式中:参数 a 、 b 、 c 分别为双椭球体的前(后)半轴长度、熔池半熔宽、熔池半熔深,取值相互独立,在焊接不同材料时,可将椭圆分为 4 个 1/8 的椭球瓣,每个椭球瓣对应不同的 a 、 b 、 c 值; P 为电弧有效热功率; R 为相对应的热源形状参数。

本文模拟中忽略焊丝熔化的具体细节,直接将熔滴假设为一定温度的液态金属颗粒,添加到熔池中。

1.2 三维实体几何模型

图 2 为三维实体几何模型。利用 UG 三维建模软件,对需要焊接的两块 304 不锈钢板、填充材料进行实体建模。每块 304 不锈钢板的尺寸为 $200\text{mm} \times 100\text{mm} \times 2\text{mm}$,填充材料的规格为 $200\text{mm} \times 0.6\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。

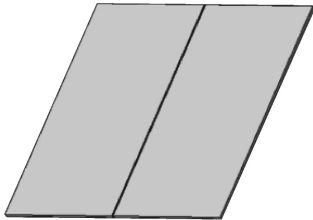


图 2 几何模型

1.3 网格划分

将三维实体模型从 UG 软件中导出,保存为 parasolid 文件,再采用有限元分析软件 HyperMesh 导入几何模型。对几何模型进行网格划分需先确定网格类型,常用网格类型有四面体网格和六面体网格。采用四面体网格能够自动划分,难度低、操作简单、划分速度快,但计算精度低、网格数量多。采用六面体网格只能手动划分,操作复杂、较为耗时,但网格数量少、计算精度相对较高。基于有限元网格的特点,本实验采用计算精度较高的六面体网格,利用 HyperMesh 软件分别对 304 不锈钢板、填充材料实体模型进行网格划分。划分六面体网格后的几何模型如图 3 所示。

1.4 边界条件及初始条件

由于在实际焊接过程中,被焊工件可能会发生一定量的位移,为避免或减轻位移量,对焊件加

以固定。每块不锈钢板上采用两个夹具固定,使其在 x 、 y 和 z 方向上都受到一定约束。

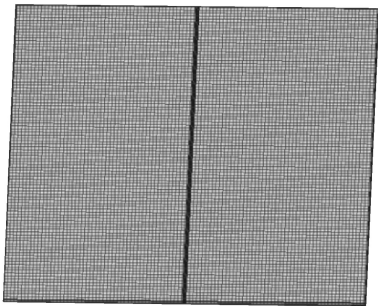


图 3 划分六面体网格后的几何模型

假设工件在焊接开始前不受其他应力作用,环境温度为 20°C ,各个组件的初始温度也为 20°C ,填充材料的温度设定为 1500°C 且保持不变,对流传热系数为 $20\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,辐射传热系数为 $0.25\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,304 不锈钢材料的热导率、密度、线膨胀系数等热物性取自软件数据库,模拟计算中自动调入。

2 模拟结果和分析

2.1 温度场模拟

2.1.1 不同时刻温度场分布

采用生死单元方法对施焊过程进行数值模拟,随着计算的进行,相应的热单元网格被激活。模拟采用的工艺参数为:焊接电流 120A、焊接电压 20V、焊接速度 16cm/min。模拟得到不同时刻温度场分布云图如图 4 所示。

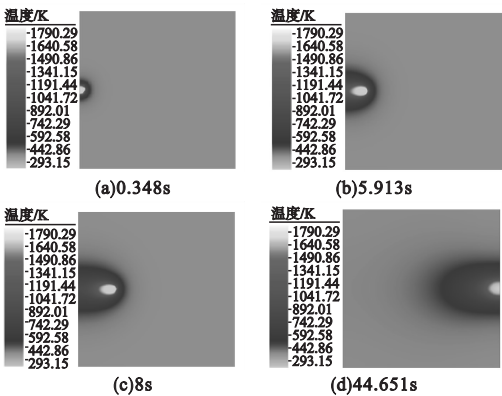


图 4 不同时刻温度场分布云图

由图 4 可以清晰看到,随着焊接过程的进行,焊接热源沿着焊接方向移动,焊缝附近各点温度

随着热源的前移而发生改变。当焊接起弧初始阶段,即焊接时间 $t=0.348\text{s}$ 时(图 4a),焊接件的温度总体处于室温状态,焊接热量集中于起始处的小区域附近,热量没有向周围快速传递,温度场处于非稳态;随着焊接继续进行,部分热量向周围母材传递,当 $t=5.913\text{s}$ 时(图 4b),焊接件的温度场趋于稳态;当 $t=8\text{s}$ 时(图 4c),焊缝附近的温度分布基本维持不变,温度场处于准稳态,此时散热量和热输入量相抵消,焊接接头的峰值温度维持不变;当 $t=44.651\text{s}$ 时(图 4d),焊接件开始冷却,此时已经没有热源加热,焊接件温度急剧降低。

2.1.2 焊接速度对温度场的影响规律

取焊接电流 120A、焊接电压 20V,采用不同焊接速度 12、14、16cm/min 模拟计算,得到焊接结束时刻温度分布云图如图 5 所示。

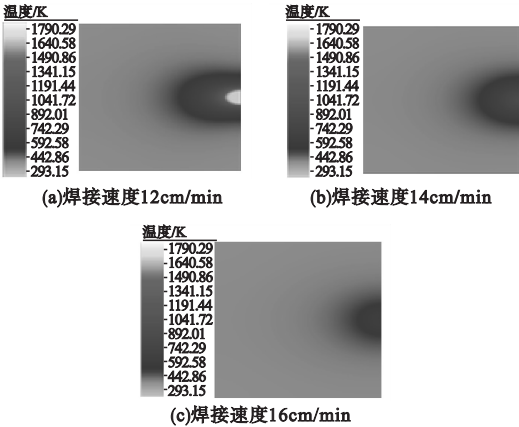


图 5 不同焊接速度下焊接结束时刻温度分布云图

由图 5 可见,随着焊接速度增加,焊缝附近换热量减少,周围母材吸收热量也减少,焊接温度分布范围逐渐变窄,高温停留时间也变短。

为进一步说明焊接速度的影响,追踪焊缝中心线上 C 点的温度变化情况。追踪点的位置见图 6。

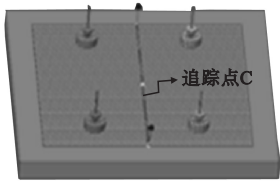


图 6 焊缝中心 C 追踪点位置

不同焊接速度下焊缝中心 C 追踪点处温度热循环曲线如图 7 所示。

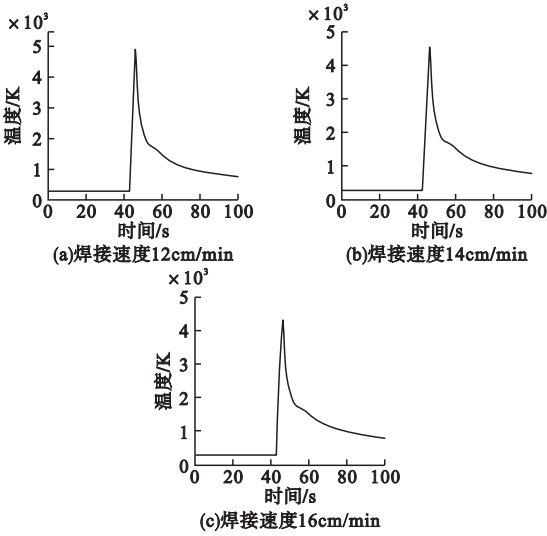


图 7 不同焊接速度下 C 追踪点处温度热循环曲线

由图 7 可见,当焊接速度从 12cm/min (图 7a) 增大至 14cm/min (图 7b) 再增至 16cm/min (图 7c),焊缝中心 C 追踪点的最高温度由约 4900K 下降至 4700K 左右再降至 4500K 左右。说明焊接速度增大时,单位长度焊缝的焊接热输入量减少,焊缝峰值温度降低。

2.1.3 焊接电流对温度场的影响规律

取焊接速度 16cm/min、焊接电压 20V,采用不同焊接电流 120、140、160A 模拟计算,得到焊接结束时刻温度分布云图如图 8 所示。

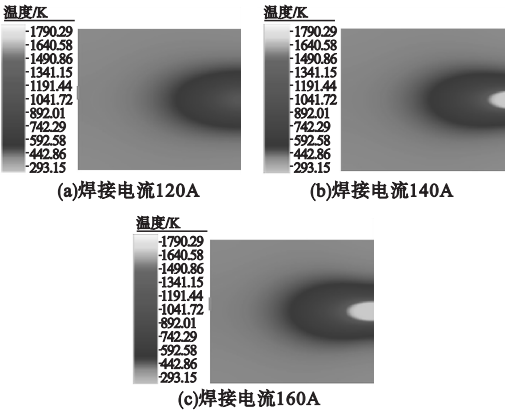


图 8 不同焊接电流下焊接结束时刻温度分布云图

由图 8 可以看出,焊接电流的改变对焊接温度场有较大影响。当焊接电流增加时,焊接熔池的尺寸增大,焊接温度场的温度分布区域也随之增大。

不同焊接电流下焊缝中心 C 追踪点处的热循环曲线如图 9 所示。

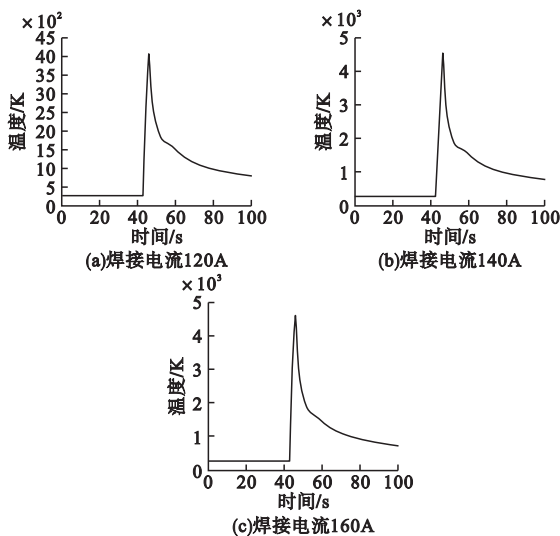


图 9 不同焊接电流下焊缝中心 C 追踪点处热循环曲线

由图 9 可见,当焊接电流从 120A(图 9a)增大至 140A(图 9b)再增至 160A(图 9c)时,C 追踪点热循环曲线的峰值温度从约 4100K 增加至 4400K 再增至 4600K 左右。说明焊接电流增加,单位长度焊缝的焊接热输入量增大,焊缝峰值温度升高。

2.2 应力场模拟

2.2.1 焊件整体应力分布

采用 2.1.1 的计算参数,模拟得到焊件整体应力分布云图如图 10 所示。

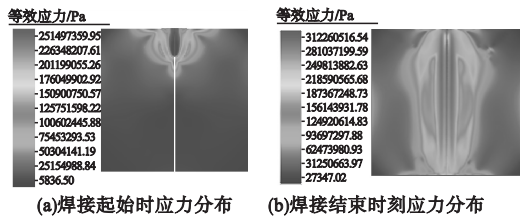


图 10 应力分布云图

由图 10 可见,应力分布处于动态变化中。焊接开始时(图 10a),焊接起始处在热源作用下,焊缝温度快速上升,因不锈钢导热性较差,焊缝附近母材的温度来不及上升,使得焊缝起始处存在较大的等效应力,而在远离起始部位的母材未受到热源的直接加热,等效应力较小。热源随着焊接的进行向前移动,等效应力也逐渐向前蔓延扩散。焊接结束后(图 10b),焊缝附近存在较大的残余应力,远离焊缝部位的应力较小,焊接起始处焊缝应力集中最为明显。

2.2.2 焊接速度和焊接电流对焊接应力场的影响

采用 2.1.2 的计算参数,模拟得到不同焊接速度下焊接结束时刻应力分布云图如图 11 所示。

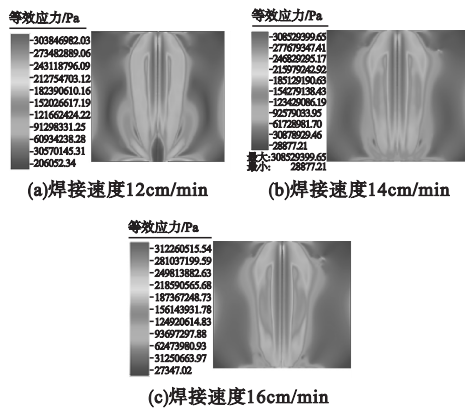


图 11 不同焊接速度下焊接结束时刻应力分布云图

由图 11 可见,当焊接速度从 12cm/min(图 11a)增大至 14cm/min(图 11b)再增至 16cm/min(图 11c),应力分布逐渐变得均匀,焊接结束时刻最大应力增幅约为 8MPa,焊接起始处仍然是应力最为集中的区域。

采用 2.1.3 的计算参数,模拟得到不同焊接电流下焊接结束时刻应力分布云图如图 12 所示。

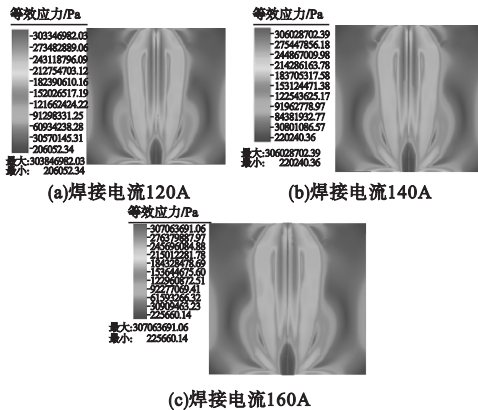


图 12 不同焊接电流下焊接结束时刻应力分布云图

由图 12 可见,当焊接电流从 120A(图 12a)增大至 140A(图 12b)再增至 160A(图 12c),应力分布变化较小,最大、最小应力增幅分别约 1MPa、0.2MPa,焊接起始处应力集中的区域几乎不变。

2.3 焊接变形模拟

2.3.1 焊接变形总体分布

与其他碳钢材料相比,304 不锈钢热膨胀系数较大,且导热性差,在焊接热源作用下,焊接接

头易发生焊接变形。采用2.1.1的计算参数,模拟得到焊接变形分布区域如图13所示,由图中可明显看到焊接起始处焊接变形较大。

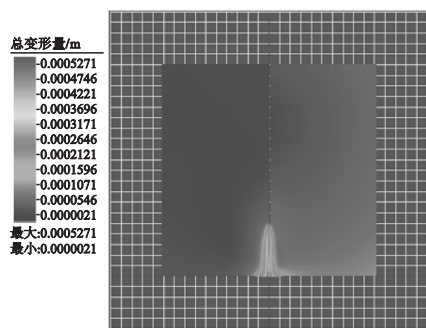


图13 焊接变形分布区域

焊接过程中C追踪点各方向上的焊接变形量如图14所示。

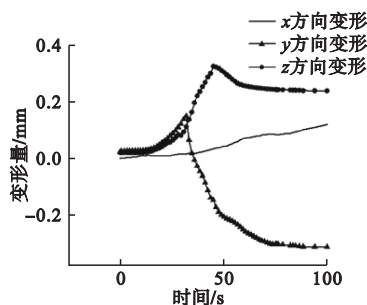


图14 焊接过程中C追踪点在各方向上的焊接变形量

由图14可见,追踪点C在 x 、 y 、 z 三个不同方向均发生了一定量的变形, x 方向的焊接变形量约0.02mm, y 方向的焊接变形量约0.15mm, z 方向的变形量最大,约为0.3mm。

2.3.2 焊接速度对焊接变形的影响

采用2.1.2的计算参数,模拟得到不同焊接速度下C追踪点在焊接过程中不同方向的焊接变形量如图15所示。

由图15可见,焊接速度不同,焊接变形量也随之变化。当焊接速度从12cm/min(图15a)增大至14cm/min(图15b)再增至16cm/min(图15c),C追踪点在 x 、 y 方向的焊接变形量变化较小,在 z 方向的变形量变化最大,变形量减小,降幅约为0.33mm。

2.3.3 电流对焊接变形的影响

采用2.1.3的计算参数,模拟得到不同焊接电流下C追踪点在焊接过程中不同方向的焊接变形

量如图16所示。

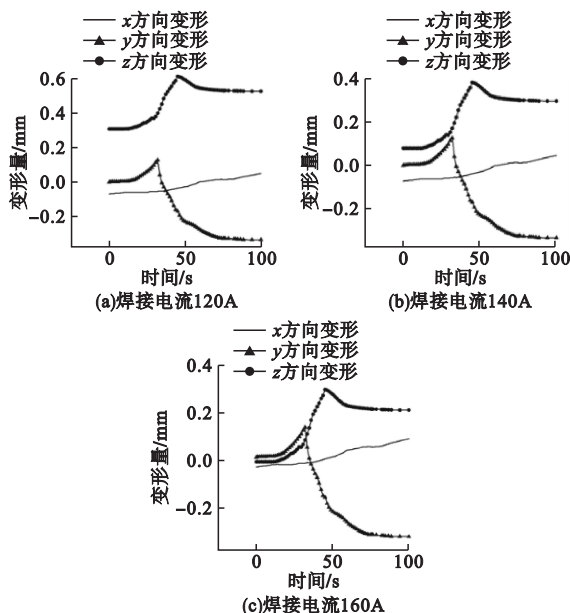


图15 不同焊接速度下C追踪点的焊接变形量

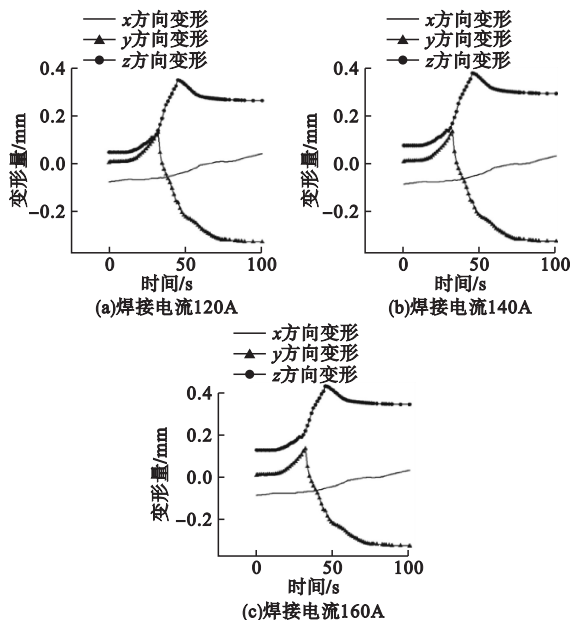


图16 不同焊接电流下C追踪点的焊接变形量

从图16可以看出,随着焊接电流增大,C追踪点在 x 和 y 方向上的变形量变化较小,在 z 方向的变形量变化最大,变形量增大,增幅为0.06mm。

3 结论

采用有限元方法对不锈钢熔丝TIG焊缝的
(下转第91页)

- 究,2019,34(3):25-35.
- [3] 黄晶. 货币政策的利率传导机制及其有效性研究[J]. 云南财经大学学报,2020,36(8):55-67.
- [4] 杨金鹏,刘艳华. 基于SVAR的常备借贷便利工具对短期利率影响研究[J]. 巢湖学院学报,2020,22(2):78-86.
- [5] 邓海清,万祥勇,汪术勤. 创新型货币政策工具对基准利率的影响[J]. 金融与经济,2020(8):89-92.
- [6] 刘姗,朱森林. 借贷便利货币政策工具能有效引导市场利率走势吗[J]. 广东财经大学学报,2017,32(6):21-32,57.
- [7] 黄威. 我国传统型与创新型货币政策工具有效性比较研究[J]. 新金融世界,2020(3):10-11,35.
- [8] 陈丽英,乐明浚. 我国创新型货币政策工具有效性研究[J]. 浙江金融,2018(2):3-11.
- [9] 邓伟,袁小惠. 中国货币政策创新工具:产生、比较与效果分析[J]. 江西财经大学学报,2016(4):23-30.
- [10] 战明华,李帅,姚耀军,等. 投资潮涌、双重金融摩擦与货币政策传导——转型时期货币政策的结构调控功能探究[J]. 金融研究,2021(3):1-17.
- [11] Giorgio E Primiceri. Time Varying Structural Vector Autoregressions and Monetary Policy[J]. The Review of Economic Studie,2005,72(3):821-852.

(责任编辑:赵丽琴)

(上接第76页)

温度场、应力场和变形进行数值模拟,结论如下:

(1)焊接速度、焊接电流是影响不锈钢熔丝TIG焊焊接温度场、焊接变形的重要因素。随着焊接速度增加,熔池最高温度下降,追踪点在 z 方向的变形量减小;随着焊接电流增加,焊缝升温速度加快,熔池最高温度升高,追踪点在 z 方向的变形量增大;

(2)焊缝附近存在较大的残余应力,远离焊缝部位应力较小,焊接起始处焊缝应力集中最为明显;

(3)焊接变形量在 z 方向最大,实际焊接中应注意采用合理的工艺减少 z 方向的焊接变形,在焊件满足基本要求的前提下,应尽量减小焊接电流、增大焊接速度,以减少变形及提高焊接效率。

参考文献:

- [1] 李庆. SUS304 不锈钢薄板激光焊接工艺及接头性能研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
- [2] 任英. 304 不锈钢中夹杂物的控制[D]. 北京:北京科技大学,2017.
- [3] 陈安忠,王军伟,李玉峰. 2205 双相不锈钢厚板 TIG 焊工艺研究[J]. 焊接,2017(9):64-67,71.
- [4] Asadi P, Alimohammadi S, Kohantorabi O, et al. Numerical investigation on the effect of welding speed and heat input on the residual stress of multi-pass TIG welded stainless steel pipe[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(6-7):1007-1021.
- [5] 赵先锐,左敦稳,张强勇,等. 304 不锈钢 TIG 焊接工艺及数值模拟[J]. 电焊机,2021,51(5):49-55,117.
- [6] 国旭明,柳春恕,袁进伟. 铁素体不锈钢 TIG 焊接头组织与性能研究[J]. 航空材料学报,2011,31(3):56-59.
- [7] 褚元召. 基于 MARC 的典型焊接结构件残余应力预测及应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [8] 郑旺旺. 奥氏体不锈钢激光焊接温度场数值模拟[J]. 机械制造与自动化,2019,48(2):36-38.
- [9] 刘兆全,张玉妥,董文超. 310S 奥氏体不锈钢 TIG 自熔焊热源模型与温度场模拟[J]. 沈阳理工大学学报,2017,36(5):53-56.
- [10] 胡亚光,汪选国,段爱琴,等. 焊接参数对 304 不锈钢激光焊接温度场分布特征的影响[J]. 中国机械工程,2017,28(11):1367-1374.
- [11] 张兴品. 熔丝钨极氩弧焊工艺研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2017.
- [12] Liu A G, Zhang X P, Zheng C B, et al. A novel molten wire tungsten inert gas welding process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019, 24(11):1-8.

(责任编辑:宋颖韬)