

设计计算

文章编号: 1000-7466(2023)02-0030-09

环境温度对 AISI 4130 钢 TIG 堆焊 Inconel 625 合金温度场及应力场的影响

李 明¹, 詹良斌¹, 李 斌², 郭旭红³, 陈 成^{1,2,3}

(1.苏州道森钻采设备股份有限公司, 江苏 苏州 215000;

2.南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816;

3.苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215031)

摘要: 环境温度对非熔化极气体保护焊 (TIG) 堆焊过程中堆焊层的温度场与应力场有着重要影响。为了探明 AISI 4130 钢 TIG 堆焊 Inconel 625 合金过程中缺陷的产生原因, 采用 ABAQUS 有限元分析软件, 对不同热输入量和不同环境温度条件下 TIG 堆焊 Inconel 625 合金的温度场和应力场分布规律进行研究。结果表明, 当堆焊工艺参数相同时, 在较低的环境温度下 (0 °C) 焊缝残余应力高, 分布不均匀, 焊接变形大, 容易产生焊接缺陷。通过适当降低焊接电流及焊接速度, 在保证热输入量的条件下, 可降低焊接峰值温度、残余应力及应变, 从而减少裂纹、孔洞等焊接缺陷的产生, 提高焊接质量。

关键词: 非熔化极气体保护焊; 堆焊; 环境温度; AISI 4130 钢; Inconel 625 合金; 温度场; 应力场

中图分类号: TG444

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1000-7466.2023.02.006

Effect of Ambient Temperature on Temperature and Stress Fields of Inconel 625 Alloy Synthesized on AISI 4130 Steel by TIG Cladding

LI Ming¹, ZHAN Liang-bin¹, LI Bin², GUO Xu-hong³, CHEN Cheng^{1,2,3}

(1.Suzhou Douson Drilling & Production Equipment Co. Ltd.,

Suzhou 215000, China;

2.School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

3.School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University,

Suzhou 215031, China)

Abstract: The ambient temperature has important effects on the temperature and stress fields of cladding layers during tungsten inert gas welding (TIG) claddings. In order to improve welding qualities, the investiga-

收稿日期: 2022-10-18

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目: 316 不锈钢表面机械合金化制备 Ni-Ti 基耐冲刷腐蚀涂层的研究 (BK20190686)

作者简介: 李 明 (1992-), 男, 山东滕州人, 助理工程师, 学士, 从事井口采油树装置的研发工作。

通信作者: 陈 成 (1988-), 男, 湖南益阳人, 助理教授, 博士, 研究方向主要为金属材料表面工程。E-mail: chencheng2017@njtech.edu.cn。

tion on the formation reasons of microdefects during TIG cladding of the Inconel 625 alloy on the AISI 4130 steel was conducted by using the ABAQUS finite element analysis software. The temperature and stress distributions at different heat inputs and different ambient temperatures were involved. The results show that with the ambient temperature decreased to 0 °C, the residual stress levels increase and their distributions become uneven, which leads to formations of high welding deformation even cracks, holes, and other defects. Therefore, relatively low welding current and low welding speed can be selected to reduce the peak temperature, residual stress and strain level at the similar heat input, so as to reduce the formations of welding defects such as cracks and holes and improve the welding quality.

Key words: tungsten inert gas welding; cladding; ambient temperature; AISI 4130 steel; Inconel 625 alloy; temperature field; stress field

Inconel 625 合金具有优异的耐腐蚀性能,是海洋油气钻采管道及阀门等零部件的常用内衬材料,通常可采用热丝非熔化极气体保护焊(TIG)堆焊的方法加以制备^[1-2]。在 AISI 4130 钢表面堆焊 Inconel 625 合金自动化生产过程当中,焊接工艺参数(焊接电流、焊接电压、焊接速度等)^[3-7]、后续热处理工艺^[8-9]及母材的表面状态^[10]对焊接缺陷的产生有着显著影响。

在采用成熟的焊接及热处理工艺进行生产时,发现在某特定时间段焊件中会产生较多的焊接缺陷,导致产品质量不稳定。这主要是由于不同季节的环境温度对焊接温度场、应力场产生的影响。通过调研发现,夏季和冬季采用相同焊接工艺参数进行堆焊生产,堆焊层的质量往往存在一定差异,尤其冬季堆焊时更容易产生裂纹、断裂及应力集中等缺陷。其原因是焊接板材初始温度不同,导致达到目标温度后的温度差不同,而且环境温度的改变也会导致焊件冷却速率的不同。各种因素相互作用,会在很大程度上影响焊件质量^[11-14]。

环境温度降低会对焊接材料、机械设备及焊接工艺参数等因素产生直接影响,焊接时焊缝易出现未熔合、气孔等缺陷,焊口一次探伤合格率偏低,造成焊接接头质量下降。环境温度对缺陷产生的影响机理可通过对堆焊层温度场及应力场的计算及模拟进行分析,避免实际探查中人力、物力等资源的耗费^[15]。

为提高 AISI 4130 钢堆焊 Inconel 625 合金的焊接质量,文中采用 ABAQUS 有限元分析软

件,对不同环境温度条件下(冬季 0 °C、夏季 30 °C)堆焊层的温度场及应力场以进行模拟,以探明环境温度对焊接质量的影响规律。针对低温环境,通过优化焊接工艺参数来提高焊接质量,以保证 0 °C 低温环境下堆焊层的成型,减少焊接缺陷的发生。

1 AISI 4130 钢堆焊 Inconel 625 合金试验模拟

1.1 有限元模型建立

采用 ABAQUS 有限元分析软件,建立了尺寸(长度×宽度×厚度)100 mm×100 mm×3 mm 的 AISI 4130 钢板材几何模型(图 1),用于进行堆焊试验模拟。

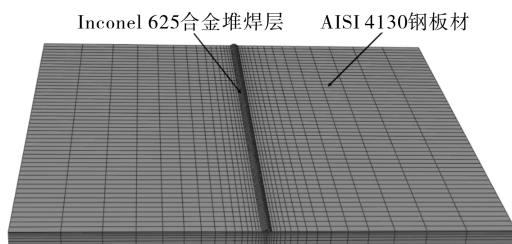


图 1 AISI 4130 钢板材堆焊几何模型

为了提高计算的精度,同时减少非关键区域的计算量,对堆焊层采用密集且均匀的网格划分,对母材区域从焊缝中心到两端以及从界面到底部均采用由密到疏的网格划分。堆焊层材料为 Inconel 625 合金,不同温度下 AISI 4130 钢、Inconel 625 合金的物理及力学性能参数见表 1、表 2^[2],Inconel 625 合金密度见表 3^[2]。将各表中的数据导入至 ABAQUS 有限元软件,完成材料的创建和函数拟合。

表 1 不同温度下 AISI 4130 钢的物理及力学性能参数^[2]

温度/℃	导热系数/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	线膨胀系数/(×10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
20	47.1	461	—	212	0.283	7 859
100	47.1	496	12.1	207	—	—
200	45.9	533	12.7	199	—	—
300	43.8	568	13.2	192	—	—
400	41.3	611	13.6	184	—	—
500	38.7	677	14.0	175	—	—
600	36.0	778	14.4	164	—	—
700	24.2	610	19.1	142	—	—
800	25.6	609	19.4	134	—	—
900	25.6	615	19.7	127	—	—
1 000	25.6	641	20.0	120	—	—
1 100	32.0	544	19.5	111	—	—

表 2 不同温度下 Inconel 625 合金的物理及力学性能参数^[2]

温度/℃	导热系数/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	线膨胀系数/(×10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)	弹性模量/GPa	泊松比
21	10	410	—	207.5	0.278
93	11	427	12.8	204.1	0.280
204	13	456	13.1	197.9	0.286
316	13	481	13.3	191.7	0.290
427	14	511	13.7	185.5	0.295
538	16	536	14.0	178.6	0.312
649	18	565	14.8	170.3	0.314
760	19	590	15.3	160.6	0.305
871	21	620	15.8	147.5	0.289
937	25	645	16.2	—	—
1 093	—	670	—	—	—

表 3 不同温度下 Inconel 625 合金密度^[2]

温度/℃	20	50	100	200	300	400	450	500	600
密度/(kg·m ⁻³)	8 440.0	8 430.7	8 414.6	8 138.8	8 348.7	8 341.6	8 293.9	8 278.6	8 211.3

1.2 模拟参数设定

进行模拟时将焊接环境温度,即初始温度设定为夏季 30℃、冬季 0℃,通过改变冬季焊接时的工艺参数优化焊接,达到提高焊接质量的目的。优化前后 AISI 4130 钢板材的 TIG 焊接工艺参数

见表 4。

从表 4 所列的各项焊接工艺参数数值可以看出,优化后的焊接工艺参数比原工艺参数均有所降低,焊接热输入量减少了大约 4.8%。对原焊接工艺,在初始温度 0℃和 30℃条件下进行模拟,

分别记作 1-0 和 1-30;对优化工艺,在初始温度 0 °C 条件下进行模拟,记作 2-0。

表 4 AISI 4130 钢板材 TIG 焊接工艺参数

参数	原工艺	优化工艺
焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	350	300
电弧电压 U/V	10.5	9.5
焊接电流 I/A	163	147
热输入量 $E/(J \cdot mm^{-1})$	2.445 0	2.327 5

热输入量 E 的计算公式为:

$$E=UI\eta/v \quad (1)$$

式中, I 为焊接电流,A; U 为电弧电压,V; v 为焊接速度, $mm \cdot min^{-1}$; η 为热效率系数,取 $\eta=0.5$ 。

采用双椭球热源模型进行有限元模拟计算,该热源模型能够很好地反映 TIG 焊接 AISI 4130 钢板材的过程,可以对焊接过程中的温度场进行精确计算。

模型前半椭球的体热流密度 $q_{前}(x,y,z)$ 分布表示为:

$$q_{前}(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}f_fQ}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} \times \exp\left(-\frac{3x^2}{c_f^2}-\frac{3y^2}{a^2}-\frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (2)$$

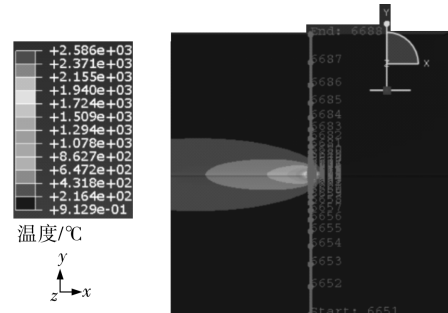
模型后半椭球的体热流密度 $q_{后}(x,y,z)$ 分布为:

$$q_{后}(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}f_bQ}{abc_b\pi\sqrt{\pi}} \times \exp\left(-\frac{3x^2}{c_b^2}-\frac{3y^2}{a^2}-\frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (3)$$

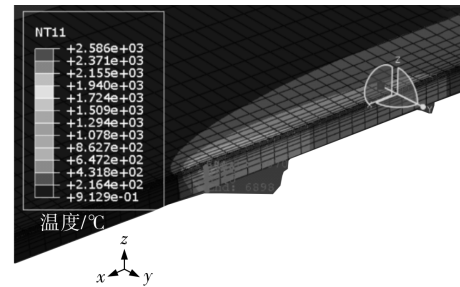
式(2)和式(3)中, a 为 y 向半轴长度, b 为 z 向半轴长度, c_f 为前半椭球的 x 向半轴长度, c_b 为后半椭球的 x 向半轴长度,mm; f_f 、 f_b 为前后 2 个 1/4 椭球的能量分配系数; Q 为有效热输入功率,W。这些参数中, a 、 b 、 c_f 及 c_b 为模型的形状参数, Q 、 f_f 及 f_b 为模型的热输入参数。

为准确观察试验结果,在堆焊模型中央处建立 2 条采样路径。路径 1 建立在 $x=50$ mm 处垂直于焊接方向的 y 方向(图 2a),跨度为 0~100 mm。路径 1 采样点数 38 个,紧密程度与网格划分大小呈正相关,更有利于观察焊接接头处实际情况。路径 2 建立在 $x=50$ mm、 $y=50$ mm 处且沿板材厚度 z 方向(图 2b),焊接面记为 $z=0$, z 轴跨度为 0~3 mm。路径 2 采样点数 7 个,紧密程度与网格划分

大小呈正相关,故靠近焊接面的采样点密集。当热源移动至模型中央 $x=50$ mm 处时,测得路径 1、路径 2 下母材 AISI 4130 钢的温度、变形、应变及残余应力。



(a) 路径1



(b) 路径2

图 2 AISI 4130 钢板材堆焊模型采样路径

2 AISI 4130 钢堆焊 Inconel 625 合金试验模拟结果与讨论

2.1 温度场

路径 1 和路径 2 下热源移至 $x=50$ mm 时焊件温度曲线见图 3。图 3a 中,3 条曲线关于 $y=50$ mm 呈对称分布,远离热源处焊件温度几乎等于环境温度。在 y 为 40~50 mm 和 50~60 mm 区间内曲线发生陡增和陡降,说明 TIG 焊热源功率大,对附近母材温度影响较大。Inconel 625 合金熔点为 1 350 °C,3 组模拟条件下均能完全焊透。图 3b 中,焊件在焊接面 $z=0$ 的温度最高,且由于母材厚度较薄,热源扫过母材的瞬间底板温度也会瞬间增高,2-0 条件下的板底温度最低,但是也接近 800 °C。

图 3a 中的 3 条曲线在 $y=50$ mm 左右达到温度最大值,分别为 2 436 °C、2 569 °C、2 204 °C。1-0 条件和 1-30 条件采用的工艺参数相同,初始温度仅相差 30 °C,但在焊接过程中某时刻最高温度却相差 133 °C。1-30 条件相当于对 1-0 条件进行焊前预热处理,这符合实际工况且对焊接有利。2-0 条件的温度曲线明显低于 1-0 条件的,结

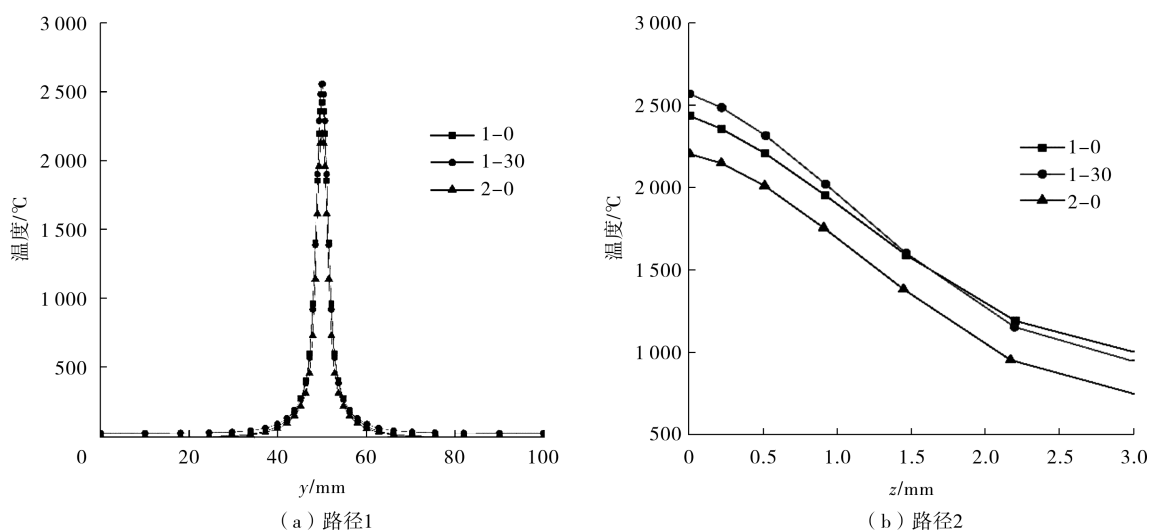


图 3 不同路径下热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时焊件温度曲线

合图 4 所示的热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时路径 1 下各焊件温度场剖面情况可以看出, 在设置相同最高温度阈值下, 2-0 条件下 $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的高温区域

面积明显减少, $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的区域温度有所下降, 考虑是由于焊接工艺参数改变, 热输入量减少的缘故。

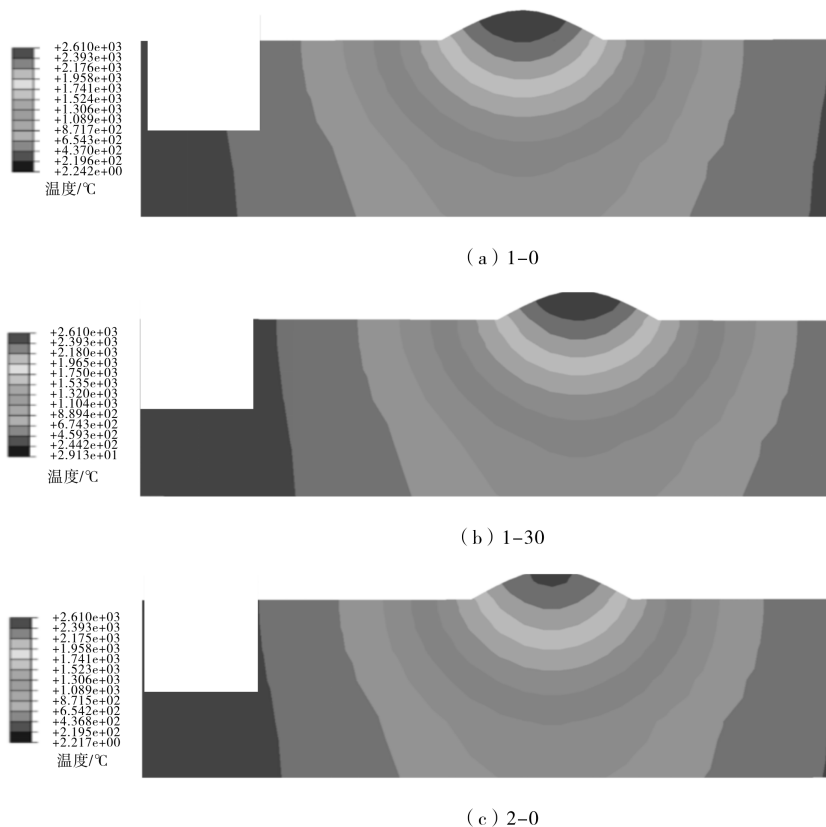


图 4 3 种工艺条件下热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时沿路径 1 焊件温度场剖面图

3 种焊接工艺条件下模拟得到的堆焊层温度场云图见图 5。

由图 5 所示的堆焊层温度场云图可以看出, 热源在开始阶段和结尾阶段不太稳定, 形状类似

于椭圆形。行进一段距离后逐渐稳定, 热源中心前方温度场梯度较大, 而热源中心后方温度场梯度较小, 符合 TIG 焊热源模型, 证明所进行的模拟是可靠的。

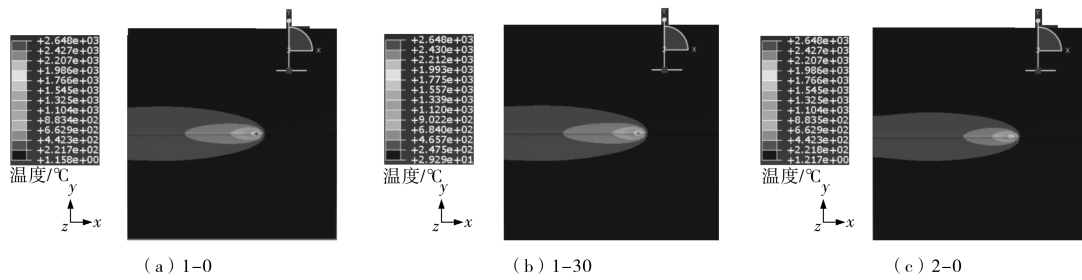
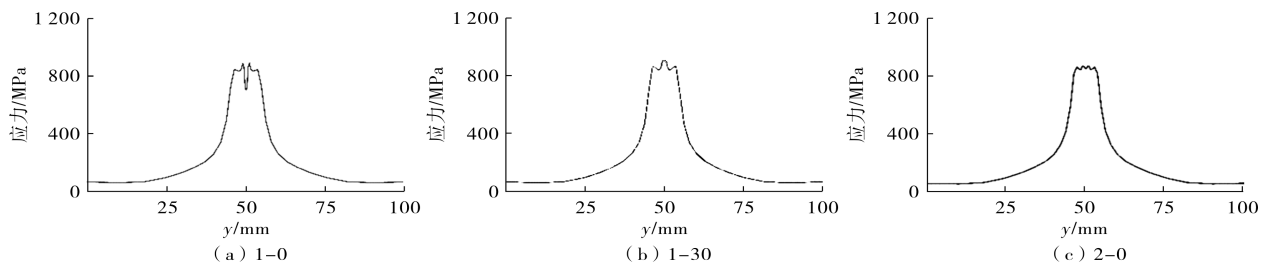


图5 3种焊接工艺条件下堆焊层温度场云图

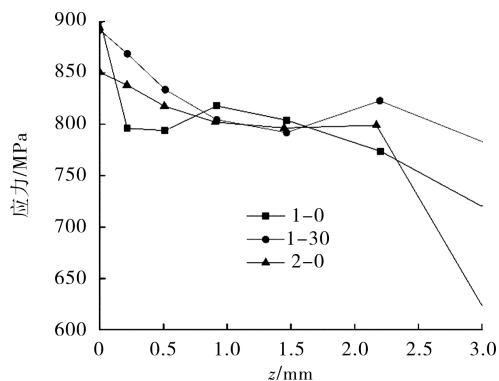
2.2 应力场

在焊接开始阶段,焊件温度升高与降低趋势急剧,随后渐趋平缓,最后降至室温。靠近焊缝区域温度变化比较快,远离焊缝区域温度变化比较慢。加热温度太高会影响晶粒的大小,温度越高,晶粒越大,会造成晶粒脆化,容易形成较大的焊接应力。3种焊接工艺条件下,热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时沿路径1(垂直焊接方向)的焊件残余应力分布曲线见图6。

从图6可知,3种焊接工艺条件下焊件的残余应力分布曲线走势相似,均在焊缝处有较大残余应力,沿背离焊缝中心的方向残余应力逐渐减小。其中1-30条件和2-0条件下获得的堆焊层残余应力分布较均匀,且均在焊缝中心位置应力达到最大,分别为895 MPa及872 MPa。而1-0条件下堆焊层残余应力分布不均匀,在离焊缝中心 $\pm 2\text{ mm}$ 的位置应力达到最大(约893 MPa),而在焊缝中心骤减至约700 MPa。

图6 3种焊接工艺条件下热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时沿路径1焊件残余应力分布曲线

3种焊接工艺条件下热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时沿路径2(焊缝深度方向)的焊件残余应力分布曲线见图7。

图7 3种焊接工艺条件下热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时沿路径2焊件残余应力分布曲线

从图7中所示的各曲线可以知道,3种焊接

工艺条件下焊件的残余应力均在焊接面达到最大值,在2 mm深度范围内均有较大的残余应力。其中1-30条件和2-0条件下堆焊层沿焊缝深度方向的残余应力变化较平缓,而1-0条件下堆焊层残余应力变化较大,在0.2 mm深度残余应力从893 MPa快速降至约790 MPa。在这些残余应力水平较高且发生骤变的区域极易产生焊接缺陷。当采用2-0条件的工艺参数进行堆焊时,焊件残余应力明显下降,应力变化也较为平缓,因此能有效控制焊接裂纹。

3种焊接工艺条件下热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时沿路径1的焊件应力场剖面图见图8。

从图8可以看出,3种焊接工艺条件下焊件的应力场分布相似,只是数值有所不同。2-0条件下高应力区域明显小于1-0和1-30条件的,说

明降低热输入量后,晶粒得到细化,应力状况有所改善。母材厚度较薄,若应力过高,易发生弯曲和断裂等焊接缺陷。结合图 7 可知,3 条曲线所示应力大体上随着 z 的增加而逐渐下降,2-0 条件下的应力明显低于 1-0 和 1-30 条件的,尤其是远离热源的板底区域,2-0 条件下的应力比 1-0 条件下的应力减少了将近 300 MPa,对减少焊接缺陷起到了重要作用。

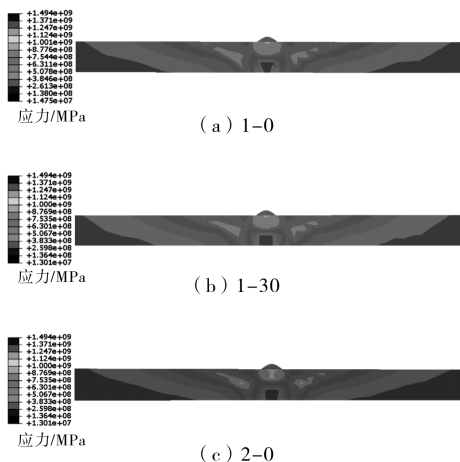


图 8 3 种焊接工艺条件下热源移至 $x=50$ mm 时沿路径 1 焊件应力场剖面图
因金属受热时会产生压缩和塑性变形,所以

焊接结束时最终的金属长度比未加热金属的长度短,但由于周边金属会阻碍其收缩,因此在加热的焊缝金属上会形成拉伸应力,在周围的金属中会形成压应力。残余应力对强度、刚度、加工精度、尺寸稳定性及耐腐蚀性都有影响。3 种焊接工艺条件下焊件焊后残余应力云图见图 9 (文中焊后指热源刚好扫完母材)。从图 9 可以看出,残余应力集中处为近椭圆形,与 TIG 焊热源模型符合。堆焊层应力较为集中,主要是因为母材和堆焊层材料力学性能不同,2 种材料的体积收缩率存在较大差异,从而产生应力集中。此外,不同材料组织在冷却相变的过程中,相变驱动力的大小不同也会引起局部应力集中。

堆焊层两侧残余应力较为集中,这主要是 TIG 焊热源的中心能量高,两侧逐渐减少,造成热源影响范围内的温度不均匀,从而导致熔池的循环搅拌不够均匀。固相和液相之间的扩散能力不足,熔融合金无法建立平衡状态,造成熔池结晶速度不一致,进而导致焊接应力的产生。结合图 8a、图 8b、图 9a 和 9b 可以发现,1-30 条件下高应力区应力值明显小于 1-0 条件的,可见随着初始环境温度的提高,焊件整体的残余应力降低。此外,经过焊接工艺参数优化后,2-0 条件下的焊件残余

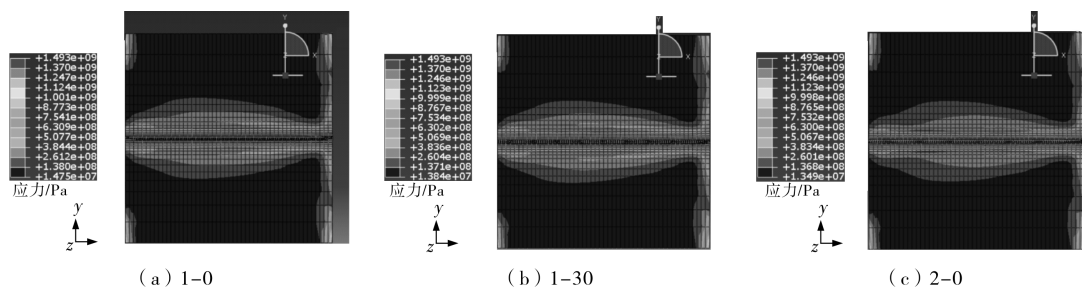


图 9 3 种焊接工艺条件下焊件焊后残余应力云图

应力比 1-0 条件甚至 1-30 条件下的大幅降低,说明降低热输入量后,温度不均匀得到了明显改善,焊件质量得到了提高。

2.3 焊接应变

3 种焊接工艺条件下热源移至 $x=50$ mm 时沿路

径 1 的焊件应变曲线见图 10。TIG 焊热源中心温度较高,两侧温度逐渐降低,故在热源作用范围形成非均匀温度场,从而造成局部相对变形,即应变。

从图 10 可以看出,只有堆焊层附近 (y 为 44~55 mm) 发生了应变,靠近中心 ($y=50$ mm) 时,

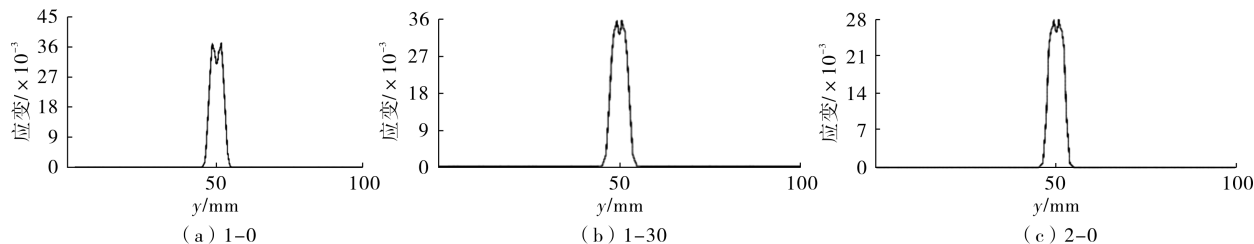


图 10 3 种焊接工艺条件下热源移至 $x=50$ mm 时沿路径 1 焊件应变曲线

焊件的应变呈现下降趋势。其原因是中心堆焊层处温度比两侧温度高且集中,温度分布均匀。3种焊接工艺条件下焊件最高应变分别为 0.037、0.036 和 0.028,可见采用优化堆焊工艺之后,焊件的应变明显降低。

3种焊接工艺条件下热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时沿路径 2 焊件应变曲线见图 11。

从图 11 可以看出,应变曲线走势与图 7 所示的焊接应力曲线走势相似。焊件的应变整体上呈下降趋势,2-0 条件下的应变明显低于 1-0 和 1-30 条件的。

3种焊接工艺条件下焊件焊后应变云图见图

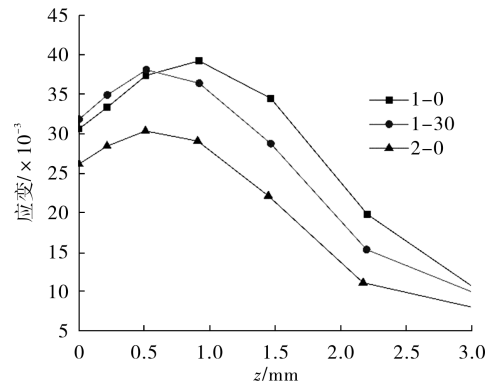


图 11 3种焊接工艺条件下热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时沿路径 2 焊件应变曲线

12。从图 12 看到,只有堆焊层及附近母材发生了应变,3种焊接工艺条件下的应变分布类似。

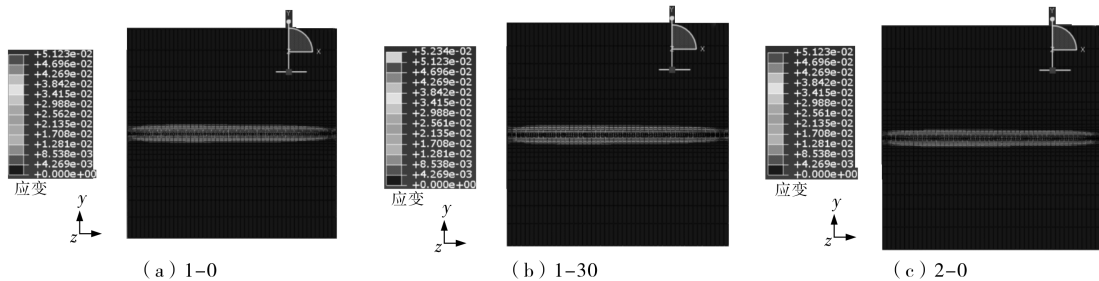


图 12 3种焊接工艺条件下焊件焊后应变云图

2.4 焊接变形

在焊后冷却过程中,发生压缩变形的材料(焊缝周围的材料)受到各种制约,不能自由收缩,在某种程度上又被拉伸而卸载。同时,熔池会因温度降低而凝固,金属收缩产生变形,因此总变形开始减小直到达到稳定值。不同路径下热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时焊件变形曲线见图 13。图 13a 中的 3 条曲线均呈 M 型,变形曲线与应力曲线、应变曲线紧密相关。应变是物体局部相对变形,而焊接变形肉眼可观察到,很大程度上影响着焊件质量。观察图

13a 中的 3 条曲线发现,母材在不同程度上都发生了变形,距离堆焊层最远的 $y=0\text{ mm}$ 处变形也达 0.045 mm 。1-0、1-30 和 2-0 条件下焊件的焊接变形最大值为 0.496 、 0.483 和 0.388 mm ,但并未在 $y=50\text{ mm}$ 处达到最大值,而是像应变一样在 $y=50\text{ mm}$ 左右两侧出现最大值。采用 TIG 焊热源模型,堆焊层两侧焊缝处的温度场极不均匀,产生的焊接变形较大。堆焊层材料与母材材料不同,其体积收缩率不同,因此也会产生变形。因为后者变形程度小于前者,因此最大变形并未出现在中央处。

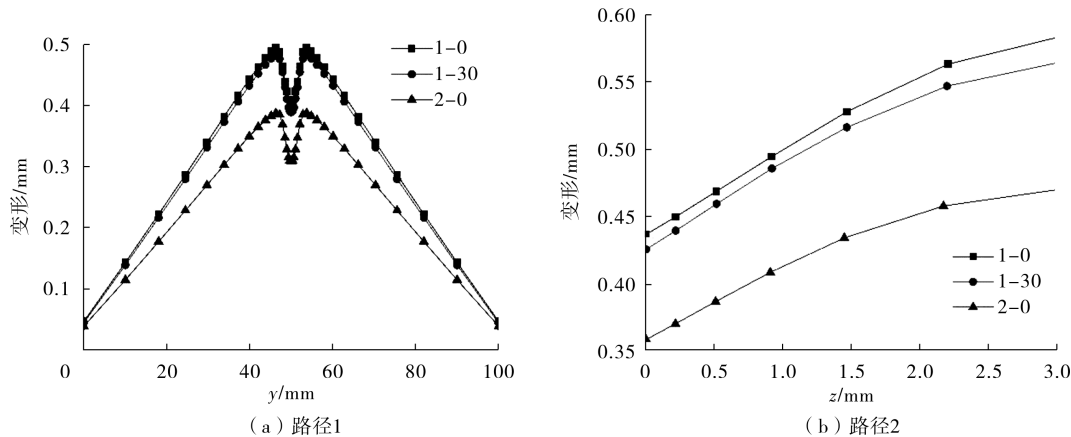


图 13 不同路径下热源移至 $x=50\text{ mm}$ 时焊件变形曲线

同理,图 13b 中,离焊接面越远,温度分布越不均匀,发生的变形越大。从图 13 明显看出,2-0 条件下 2 条路径的焊件变形均比 1-0 和 1-30 条件的低得多,焊件性能得到明显改善。

不同焊接工艺条件下焊件焊后变形云图见图

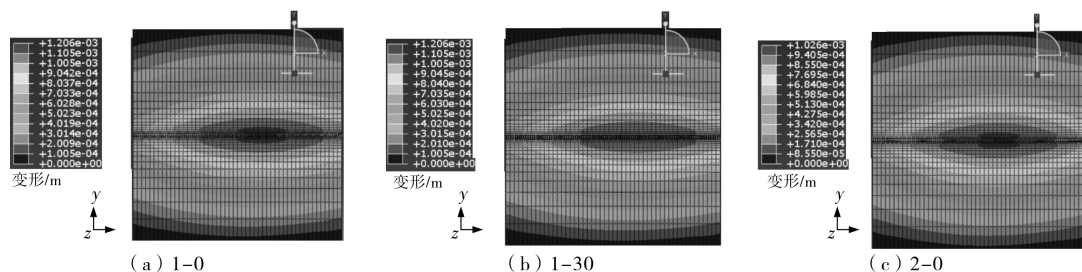


图 14 不同焊接工艺条件下焊件焊后变形云图

1-30 条件的,说明适当减小焊接热输入量可以明显改善焊件质量。

3 结语

利用 ABAQUS 软件建立了焊接有限元模型,模拟研究了环境温度对 AISI 4130 钢表面 TIG 堆焊 Inconel 625 合金温度场及应力场的影响,以解决冬季在较低温度条件下(0°C)堆焊时堆焊层易出现焊接缺陷的问题,并通过优化工艺参数,采用降低热输入量的方法来提高焊接质量。模拟结果表明,①随着环境温度的降低,焊接峰值温度降低,但残余应力分布不均匀,整体残余应力增大,焊后残余变形增大。②适当降低焊接电流及焊接速度,使焊接热输入量减少 4.8%,可使焊接峰值温度维持在合适的堆焊温度,同时显著降低残余应力和变形,有效防止或减少堆焊层中裂纹、孔洞等焊接缺陷的产生。

参考文献:

- [1] 沈根平. LCC 的阀体通道堆焊 Inconel 625[J]. 焊接技术, 2019, 48(10): 101-103.
- [2] 郭龙龙. 脉冲 TIG 堆焊 Inconel 625 工艺及堆焊层组织性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [3] 段江丽, 刘禹. 复杂曲面堆焊 Inconel 625/925A 焊接工艺与分析[J]. 新技术新工艺, 2021(11): 15-19.
- [4] Guo L, Zheng H, Liu S, et al. Formation quality optimization and corrosion performance of Inconel 625 weld overlay using hot wire pulsed TIG [J]. Rare metal materials and engineering, 2016, 45 (9): 2219 - 2226.
- [5] 杨眉, 张军磊, 魏鹏程, 等. 热丝 TIG 堆焊 Inconel 625 层组织成形研究[J]. 材料导报, 2016, 30(20): 85-88.
- [6] 卿颖. 焊接工艺对 Inconel 625/Q235B 堆焊层组织性能的影响[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [7] 王匀, 陈英箭, 许桢英, 等. 小孔内壁热丝 TIG 堆焊 Inconel 625 参数优化研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (19): 1-4.
- [8] 王丹, 康全, 杨眉, 等. X90 钢堆焊 Inconel 625 合金不同固溶温度下的组织演变及性能 [J]. 金属热处理, 2018, 43(7): 73-78.
- [9] 刘伟, 康全, 李阳, 等. 热处理对 Inconel 625/X90 堆焊层组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 83-88.
- [10] 王匀, 陈英箭, 许桢英, 等. 基体表面粗糙度对热丝 TIG 堆焊 Inconel 625 组织和耐腐蚀性能的影响 [J]. 材料工程, 2018, 46(7): 94-99.
- [11] 郭必永. ASTM 4130 自动氩弧焊堆焊 Inconel 625 焊接工艺[J]. 石油化工设备, 2014, 43(S1): 44-46.
- [12] Fesharaki M N, Shoja - Razavi R, Mansouri H A, et al. Microstructure investigation of Inconel 625 coating obtained by laser cladding and TIG cladding methods [J]. Surface and coatings technology, 2018(353): 25-31.
- [13] Fesharaki M N, Shoja - Razavi R, Mansouri H A, et al. Evaluation of the hot corrosion behavior of Inconel 625 coatings on the Inconel 738 substrate by laser and TIG cladding techniques [J]. Optics & laser technology, 2019(111): 744-753.
- [14] Wang Y, Chen X, Su C. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire -arc additive manufacturing [J]. Surface and coatings technology, 2019(374): 116-123.
- [15] 吴泽兵, 赵海超, 郭龙龙, 等. 随焊激光冷对 Inconel 625 合金堆焊温度场的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41 (6): 183-189.

(张编)