

# 窄间隙TIG摆动焊侧壁热-力耦合仿真及参数优化研究

高辉<sup>1,2</sup>, 屈嘉俊<sup>1,2</sup>, 李献辉<sup>1,2</sup>

(1.北京石油化工学院 机械工程学院,北京 102600;2.北京市高等学校 能源工程先进连接技术中心,北京 102600)

**摘要** 针对窄间隙TIG摆动焊接过程中出现的咬边缺陷,本研究通过Abaqus热-力顺序耦合仿真与响应面法(RSM)优化,提出了多工艺参数协同控制策略。建立基于双椭球热源的动态摆动模型,分析摆动宽度、焊接速度及侧壁停留时间对温度场及残余应力分布与熔池行为的影响规律,结合Box-Behnken实验设计筛选最优参数组合,在最优参数指导下开展实际的单道多层焊试验并对焊缝截面进行观察及硬度测试。结果表明:在摆动宽度为16 mm,焊接速度为0.75 mm/s,侧壁停留时间为2 s的工艺参数下不易出现咬边,各焊层与母材熔合良好,焊缝硬度均匀性提升。本研究为窄间隙摆动单道多层焊接工艺的优化提供了理论依据。

**关键词** 窄间隙;咬边;有限元仿真;参数优化;焊接试验

中图分类号 TP23

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2026)02-0147-06

DOI:10.14024/j.cnki.1004-244x.20250924.001

## Thermo-mechanical coupling simulation and parameter optimization of narrow gap TIG oscillation welding side wall

GAO Hui<sup>1,2</sup>, QU Jiajun<sup>1,2</sup>, LI Xianhui<sup>1,2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102600, China;

2.Advanced Connection Technology Center of Energy Engineering, Beijing Colleges and Universities, Beijing 102600, China)

**Abstract** This study addresses undercut defects in narrow-gap TIG oscillating welding through thermo-mechanical sequential coupling simulations (Abaqus) and response surface methodology (RSM) optimization, to develop a coordinated multi-parameter control strategy. A dynamic oscillation model using a double-ellipsoid heat source was established to analyze how oscillation width, welding speed, and dwell time affect temperature distribution, residual stress patterns, and molten pool dynamics. Through Box-Behnken experimental design, optimal parameters were identified and validated through practical multi-layer single-pass welding trials, followed by cross-sectional analysis and hardness measurements. The results show that parameters of 16 mm oscillation width, 0.75 mm/s welding speed, and 2 s dwell time effectively prevent undercuts, ensure proper fusion between layers and base material, and improve weld hardness consistency. This research establishes a theoretical framework for optimizing narrow-gap oscillating single-pass multi-layer welding processes.

**Keywords** narrow gap; undercut; finite element simulation; parameter optimisation; welding experiments

窄间隙摆动焊接(narrow gap swing welding, NG-SW)凭借其低热输入、高材料利用率及优异的厚板连接性能,在核压力容器、船舶厚壁管道等关键领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。相较于传统多道焊,其通过窄坡口设计与电弧动态摆动协同作用,显著减少焊材消耗并改善侧壁熔合质量。近十年研究聚焦于工艺参数优化与多物理场耦合机理:LI等<sup>[2]</sup>通过旋转电弧模型揭示了摆动幅度对焊缝成形的影响规律;WAN等<sup>[3]</sup>在78 mm厚钛合金焊接中验证了窄间隙工艺的可靠性。徐望辉等<sup>[4]</sup>提出了摆动频率与熔池流动行为的定量关系模型;陈鹏等<sup>[5]</sup>在CAP1400 CV模块钢板窄间隙自动焊中,通过参数优化获得了满足力学性能的焊接接头,并揭示了各参数对焊缝成形的影响规律;这些研究为窄间隙

摆动焊接技术的进一步发展奠定了理论基础。

咬边作为窄间隙摆动焊接的典型缺陷,主要表现为侧壁与母材交界处出现凹陷或沟槽。其成因可归结为3点:电弧热力分布不均导致熔池金属回填不足;侧壁停留时间过短造成熔合区金属润湿性不足;焊接速度与摆动参数失配引发熔池流动失稳<sup>[6]</sup>。此类缺陷不仅会降低接头有效承载面积,更会引发应力集中效应。研究表明,深度超过0.3 mm的咬边可使Q235钢焊接接头疲劳寿命降低40%<sup>[7]</sup>,且在循环载荷下易成为裂纹扩展源<sup>[8]</sup>。咬边会严重影响焊缝的机械性能,尤其是耐冲击性和抗拉强度,甚至可能导致焊缝开裂,危害焊接结构的安全性和可靠性。

本文作者针对窄间隙摆动焊接中的咬边问题,提

出了一种基于参数优化的解决方案。通过利用Abaqus仿真软件对摆动宽度、焊接速度及侧壁停留时间等关键参数进行优化,提出了一套适用于窄间隙TIG摆动焊接的优化参数组合,并结合实际焊接实验验证优化效果,对焊缝处进行金相观察及硬度测试。

## 1 有限元模型的构建

### 1.1 几何模型构建

用Abaqus软件建立窄间隙焊接模型,用长度为130 mm,直径为220 mm的中空圆管。顶部开有间隙为20 mm,深度为40 mm,坡口角度为2°的U形坡口,几何示意图如图1所示。

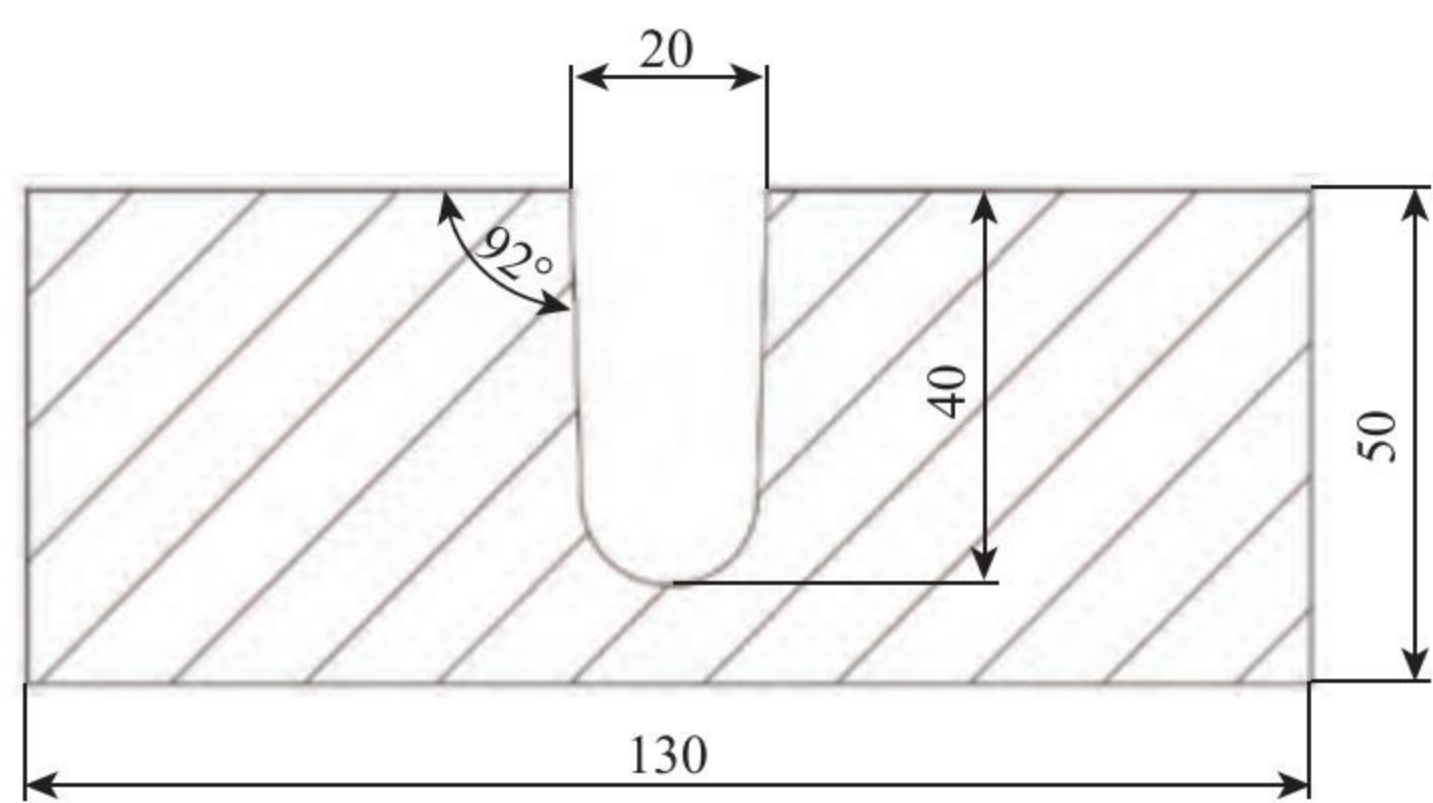


图1 几何示意图(mm)

Fig.1 Geometric model drawing(mm)

### 1.2 网格划分

在窄间隙焊接时,焊件的焊缝附近热量变化幅度比焊件的其余部分变化幅度大,因此焊缝附近要划分为细密的网格形式,焊件的其余部分划分为稀疏的网格形式,可以在满足计算精度的要求下同时降低计算时间<sup>[9]</sup>。此外网格形式选为六面体网格,六面体元素的形状和体积相对均匀,使用六面体网格通常能减少数值耗散,提供更好的模拟结果<sup>[10]</sup>。划分网格后的窄间隙模型如图2所示。

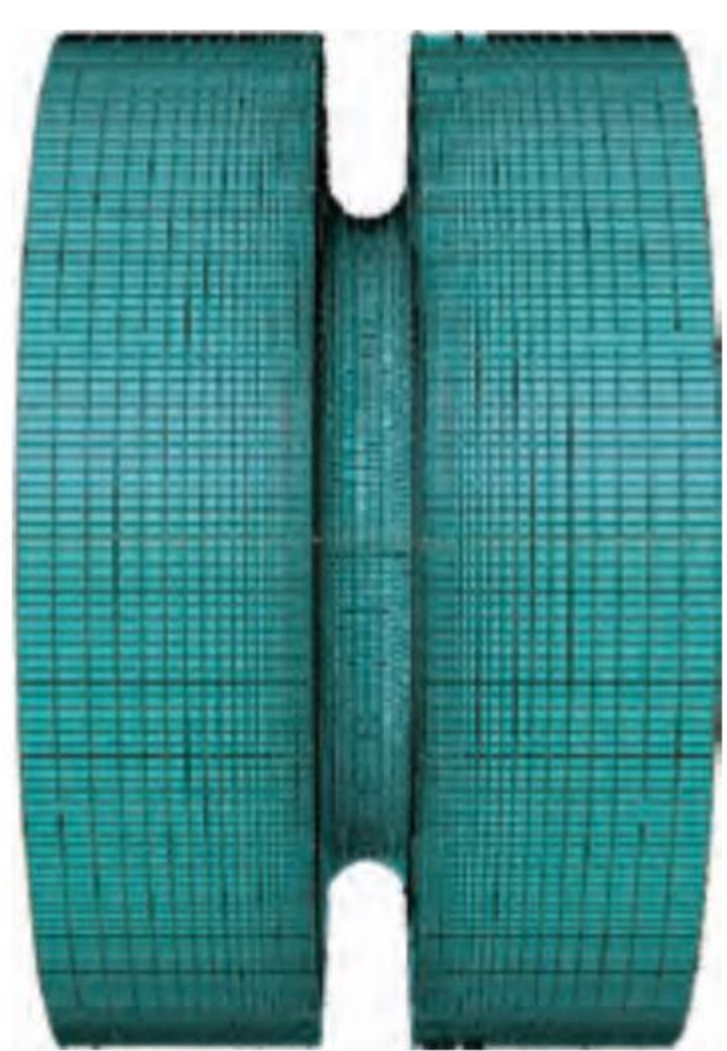


图2 管道三维网格

Fig.2 Pipeline 3D grid

### 1.3 材料属性

在数值模拟过程中,材料物理性能参数对仿真计算结果有很大影响。除了Q235碳钢的密度取定为

7.85 g/cm<sup>3</sup>外,还需要用到该材料的热物理性能参数如比热容、导热系数等,热物理属性一般会随着温度的变化而变化<sup>[11]</sup>。表1为Q235钢在不同温度下的热物理参数。

表1 Q235钢的热物理参数

Table 1 Thermophysical parameters of Q235 steel

参数	20 °C	250 °C	500 °C	750 °C	1 000 °C	1 500 °C
导热系数/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.050	0.047	0.040	0.027	0.030	0.035
比热容/ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	460	480	530	675	670	660

### 1.4 窄间隙摆动电弧热源模型的建立

在焊接温度场数值模拟中,热源模型的选择对计算精度及与实际焊接情形的匹配至关重要,需综合考虑焊接方式、速度与厚度等因素。焊接过程中,热源对局部区域进行高温加热,形成不均匀的温度分布,进而引发应力与应变。实际焊接中,热流密度不仅作用于焊件表面,也影响其纵向分布。为此,本研究采用双椭球热源模型<sup>[12]</sup>,以更准确模拟实际焊接过程。双椭球热源模型的前半部分和后半部分分别是2个不同的1/4椭球,双椭球热源模型示意图如图3所示。计算公式:

$$q_f(x,y,z) = \frac{12\sqrt{3}f_f Q}{a_f b_h C_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{a_h^2}\right), x \geq 0; \quad (1)$$

$$q_r(x,y,z) = \frac{12\sqrt{3}f_r Q}{a_r b_h C_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{a_h^2}\right), x < 0. \quad (2)$$

式中:  $q_f$ 、 $q_r$  为前后椭球体内的热流分布;  $a_f$ 、 $a_r$  为前后椭球的半轴;  $a_h$  为熔池沿宽度方向的半熔宽;  $b_h$ 、 $C_h$  为前后半椭球的另2个半轴;  $f_f$ 、 $f_r$  为前后半椭球内热输入份额,  $f_f + f_r = 2$ 。

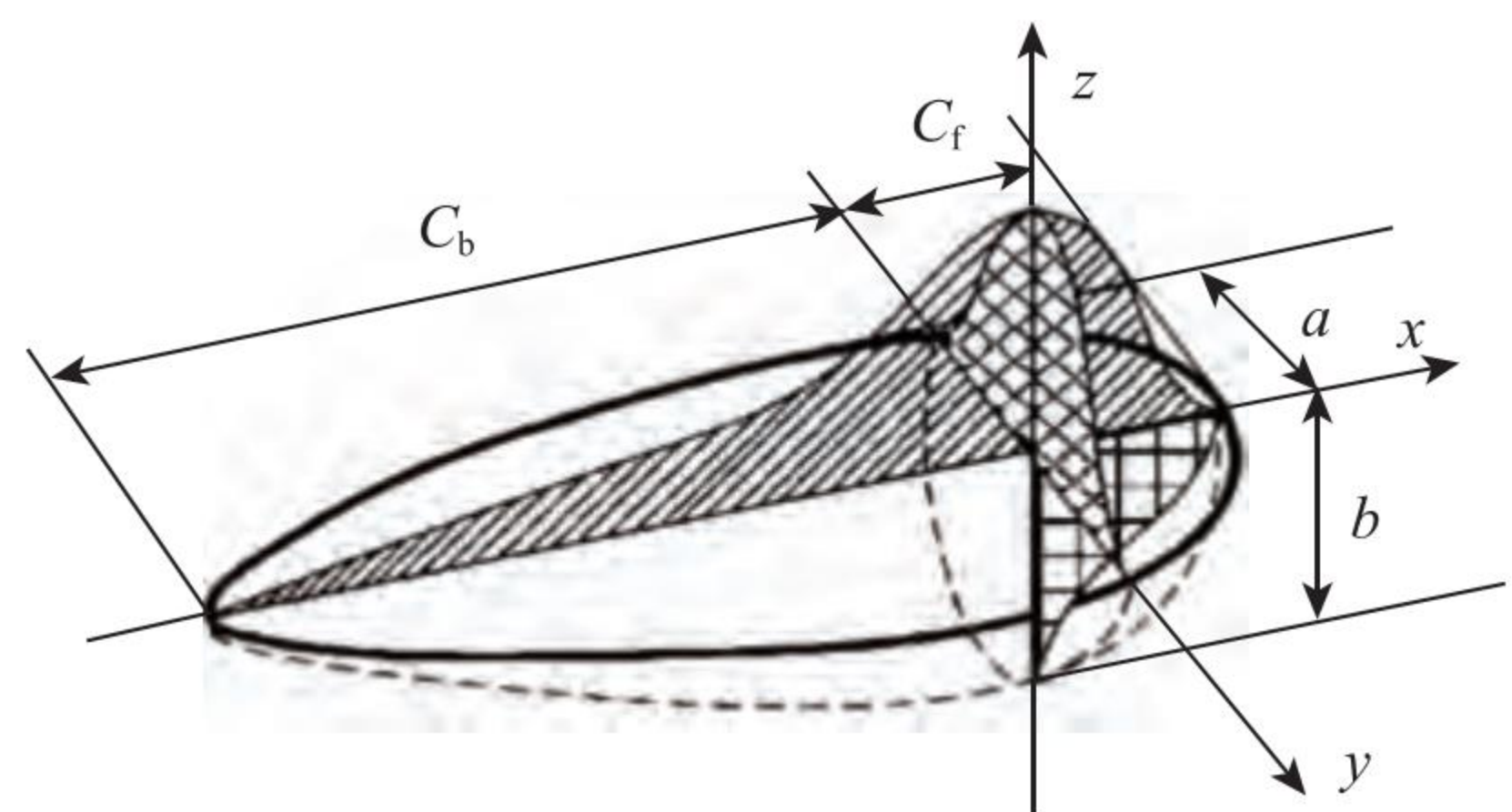


图3 双椭球热源模型

Fig.3 Double-ellipsoidal heat source model

### 1.5 边界条件

在模型边界条件设定中,主要考虑焊件在焊接过程中向周围空气散失热量的情况,其中包括表面对流传热和辐射传热,在计算过程中,将热对流及热辐射作为接触边界条件分别加载在管道的内外表面<sup>[13]</sup>。对流传热系数为20 W/(m<sup>2</sup>·°C),辐射发射率设为0.85。此

外,为模拟真实焊接环境,焊前初始温度设为20℃。

### 1.6 热源模型校核

为了验证所建立的焊接热源模型的可靠性,运用熔池边界准则对实际焊接接头的横截面熔池的上下表面进行测量,并将其与数值模拟获得的熔池形貌进行对比。评估数值模拟的准确性和可靠性<sup>[14]</sup>,以验证模型的适用性和精度。焊接接头熔池形貌对比如图4所示。左侧是数值模拟得到的焊接接头形貌,右侧是实际焊接接头形貌。可以看出,实际焊接熔池的形状与数值模拟得到的熔池形状相似,误差在允许范围内。因此当 $a_r=5\text{ mm}$ ,  $a_r=10\text{ mm}$ ,  $b_h=4\text{ mm}$ ,  $C_h=3\text{ mm}$ 时,熔池形状与实际较为吻合。

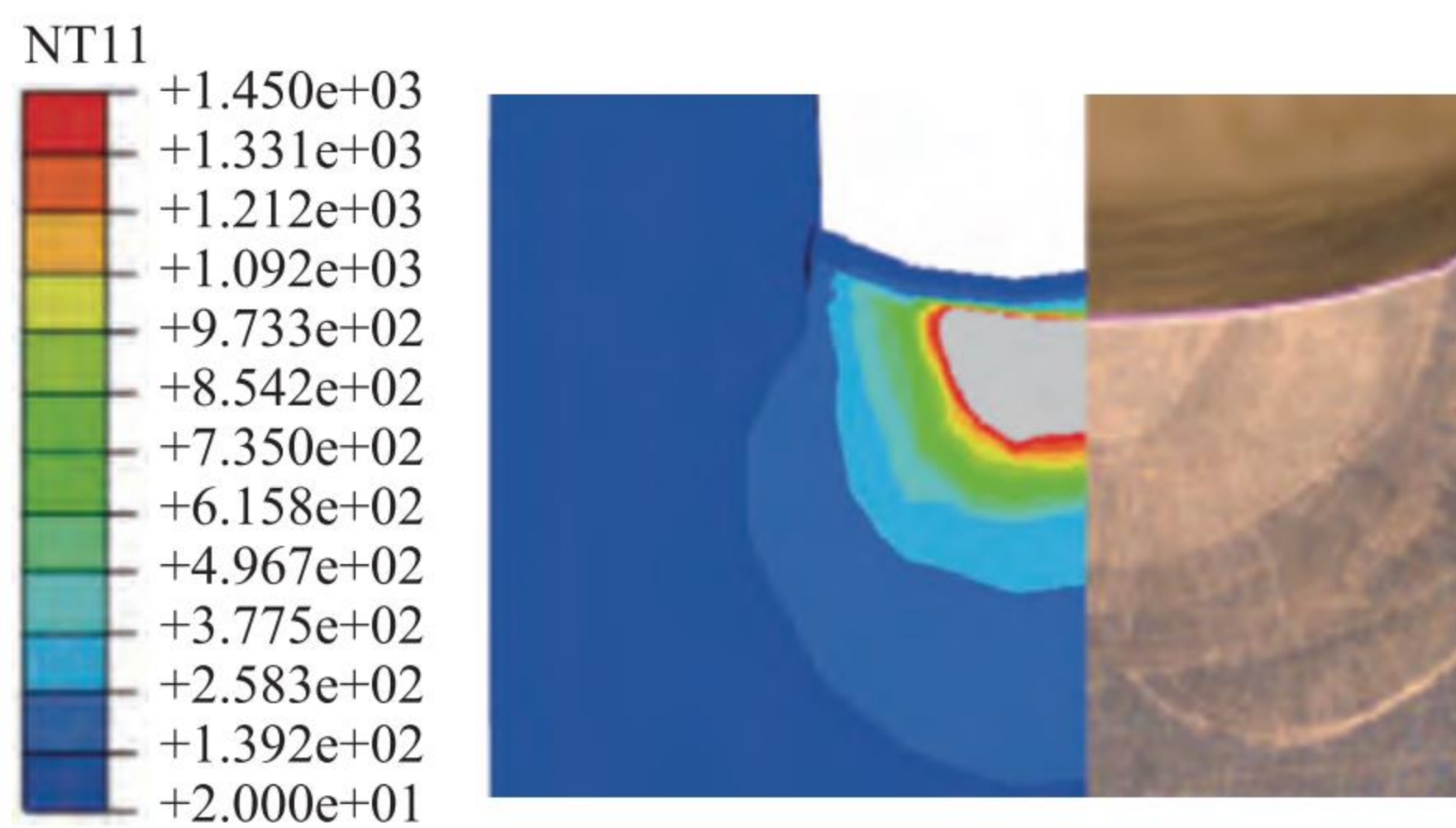


图4 焊接接头熔池形貌对比

Fig.4 Comparison of welding joint molten pool morphology

### 1.7 焊接模拟参数设计

根据实际焊件情况,摆动宽度应小于焊缝宽度,测量出坡口底部宽度为17.8 mm,故摆动宽度选定为15~17 mm;在实际焊接过程中,当焊接速度小于1 mm/s时,摆动焊接产生的热量能刚好熔化焊丝,故焊接速度选为0.5~1 mm/s,侧壁停留时间选为1~3 s。其中焊接电流为160 A,焊接电压为10 V,摆动频率为0.1 Hz,送丝速度为500 mm/min,保护气为15 L/min。为探究最佳焊接工艺参数,利用Design Expert软件进行仿真方案设计。在Box-Behnken设计(BBD)的基础上,通过响应曲面法(RSM)评估一组受控试验因素与测量响应之间的相关性,由3因素(摆动宽度,焊接速度,侧壁停留时间)3水平组成的实验因素水平如表2所示。

根据实验因素水平表建立了15组实验参数,如表3所示。

表2 实验因素水平表

Table 2 Experimental factor level table

水平	摆动宽度 $A/\text{mm}$	焊接速度 $B/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	侧壁停留时间 $C/\text{s}$
-1	15	0.50	1
1	16	0.75	2
0	17	1.00	3

表3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

试验组	$A/\text{mm}$	$B/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$C/\text{s}$
1	16	0.75	2
2	16	1.00	3
3	16	1.00	1
4	15	0.50	2
5	15	0.75	1
6	17	0.75	3
7	16	0.50	3
8	15	1.00	2
9	16	0.75	2
10	17	0.50	2
11	17	1.00	2
12	15	0.75	3
13	17	0.75	1
14	16	0.50	1
15	16	0.75	2

## 2 仿真结果及分析

### 2.1 窄间隙摆动焊接温度场分布

基于已建立的热源模型与材料参数,对电弧摆动下的温度场分布进行了数值模拟。半个周期内焊件表面温度场分布,如图5所示。以第2组工艺参数为例,仿真结果(图5)显示温度场呈动态演化特征。在半个摆动周期内,热源运动分为2个阶段:先从坡口左侧移向中心,再由中心移向右侧。数值模拟结果显示,热源移动轨迹前端呈现显著的温度梯度特征,等温线呈高密度聚集形态;而轨迹后端温度梯度趋于平缓,等温线分布较为离散,这种非对称温度分布特征主要源于热源移动方向与材料热传导的耦合作用。图6为焊接过

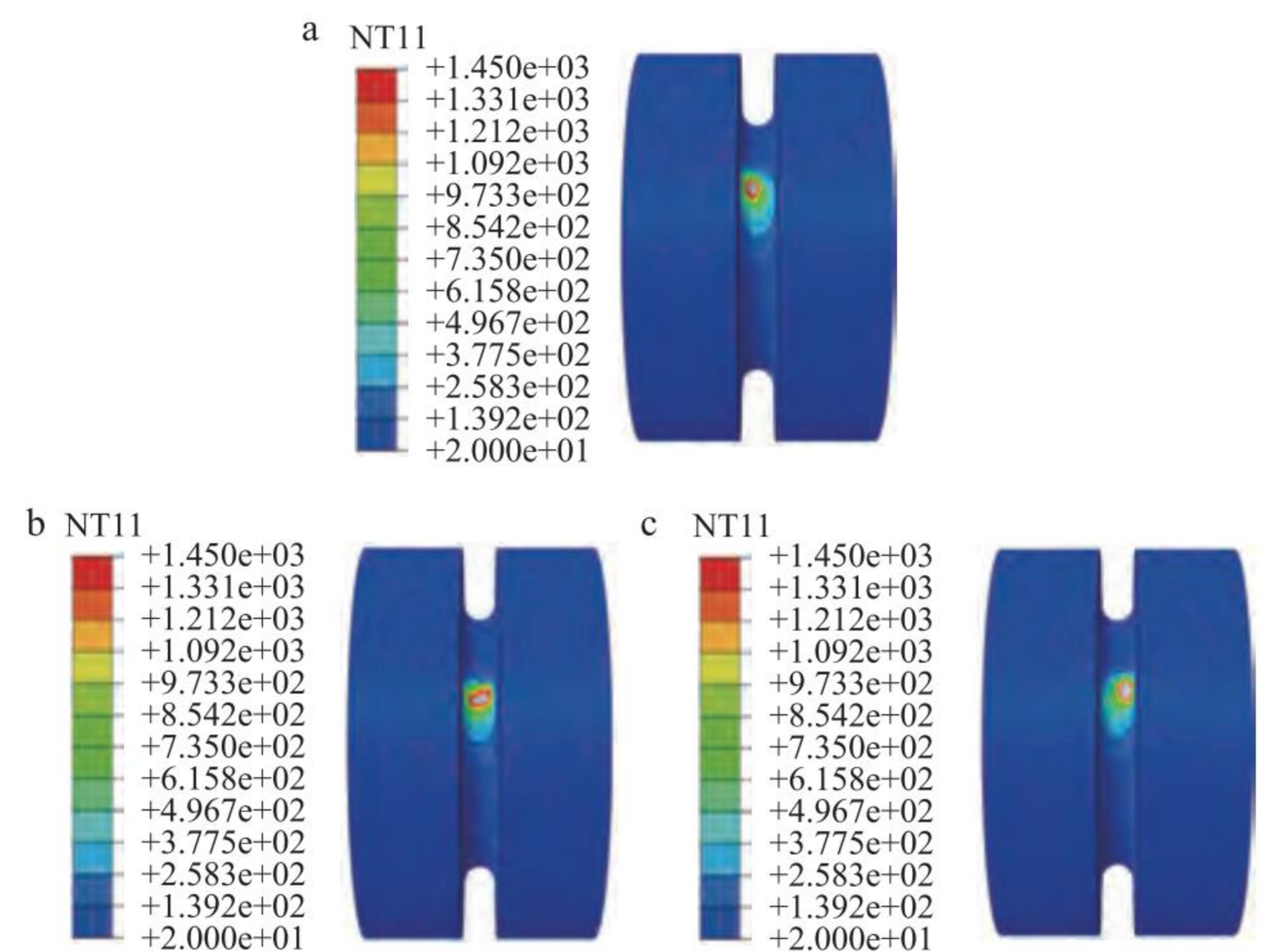


图5 半个周期内焊件表面温度场分布情况

Fig.5 Surface temperature field distribution of weldment in half cycle

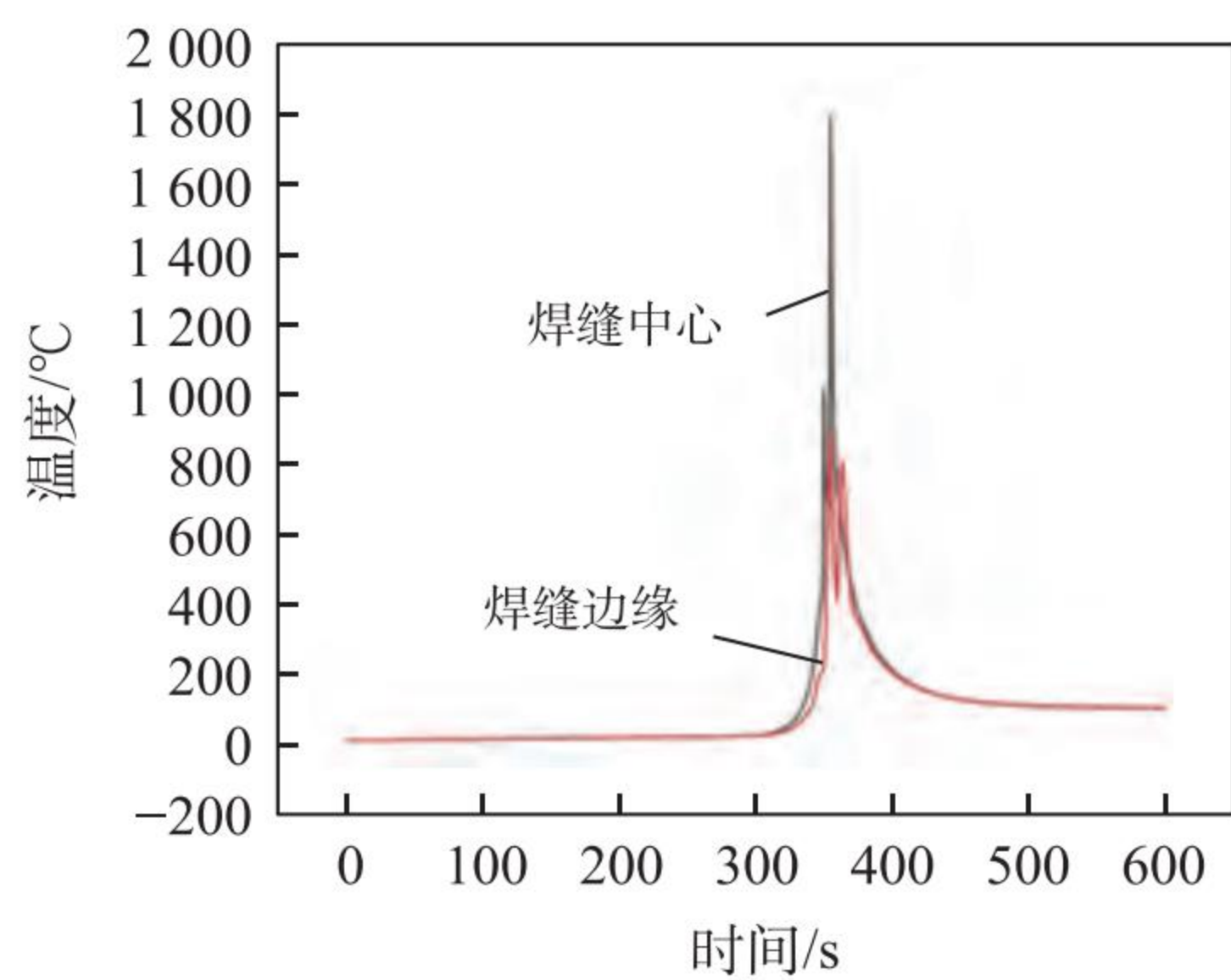


图6 焊接过程的热循环曲线

Fig.6 Thermal cycle curves of welding process

程中焊缝中心与边缘剖面的热循环曲线。可以看出,温度曲线呈现与电弧摆动周期同步的热振荡现象。在0~60 s电弧趋近阶段,监测点温度急剧上升至峰值,其升温速率分别达到40.1,24.6 °C/s;当热源远离监测区域时,热输入中断导致温度呈指数衰减。定量分析表明,冷却过程中温度下降速率随时间呈现非线性衰减特征:初始阶段(60~150 s)平均冷却速率约为25.83 °C/s,而后阶段(150~400 s)降至0.25 °C/s。这种动态热响应与工件内部三维热传导机制密切相关,符合焊接物理过程的实际特征<sup>[15]</sup>。

## 2.2 侧壁的热循环曲线及应力分析

Q235钢的相变温度约为1 310 °C,当Q235钢加热到1 310 °C时,原有的组织开始消耗,进入奥氏体的形成阶段,在冷却阶段,当温度降至800~500 °C时,奥氏体开始分解生成铁素体。如果冷却速率较慢,通常会形成珠光体;如果冷却速率较快,可能会形成贝氏体或马氏体。对于Q235钢而言,理想的工艺窗口应满足:侧壁峰值温度控制在固相线温度以下(1 400~1 450 °C),在确保填充金属与母材充分熔合的前提下避免母材边缘过度熔化;同时,在800~500 °C关键温度区间控制冷却速率,以降低残余应力导致的咬边风险<sup>[5-6]</sup>,考虑到焊接材料属性及焊件厚度,自然冷却的时间控制在5~10 s之间即可。

图7为15组实验的侧壁热循环曲线。其特征可归纳为:

1)第2,3,4,7,8,10,11,14组实验显示峰值温度都超过了1 450 °C,超过母材固相线温度,可能导致晶界液化形成咬边缺陷。其中第4,7,10,14组都出现了异常双峰热循环曲线:第1峰值的过高温度引发局部过烧,第2峰值的高温对应重复相变过程,可能会产生贝氏体/马氏体混合组织,这与焊接速度过低引发的热累积效应相关。

2)第1,5,6,12组及第13组的峰值温度满足要求,

其中第1,9,15组工艺参数一样。因此选取第1组热循环曲线进行分析。第1组参数在800~500 °C间冷却时间约为8.7 s,第5组约为9.8 s,第6组约为8.8 s,第12组约为8.5 s,第13组约为9.6 s。

为了进一步筛选出最佳的焊接工艺参数,本研究采用等效应力测试交叉验证。基于有限元分析方法,首先将满足峰值温度要求的第1,5,6,12,13组对应的温度场求解结果导入应力分析模块,通过热-力顺序耦合实现应力场的数值模拟。提取相同侧壁路径下的等效应力值,如图8所示。在30 mm节点前,各组参数的等效应力随着离焊接起始点距离的增加降至100 MPa附近,在30 mm节点后,各组参数的等效应力升至234 MPa,随后在430 mm节点处降至120 MPa,在

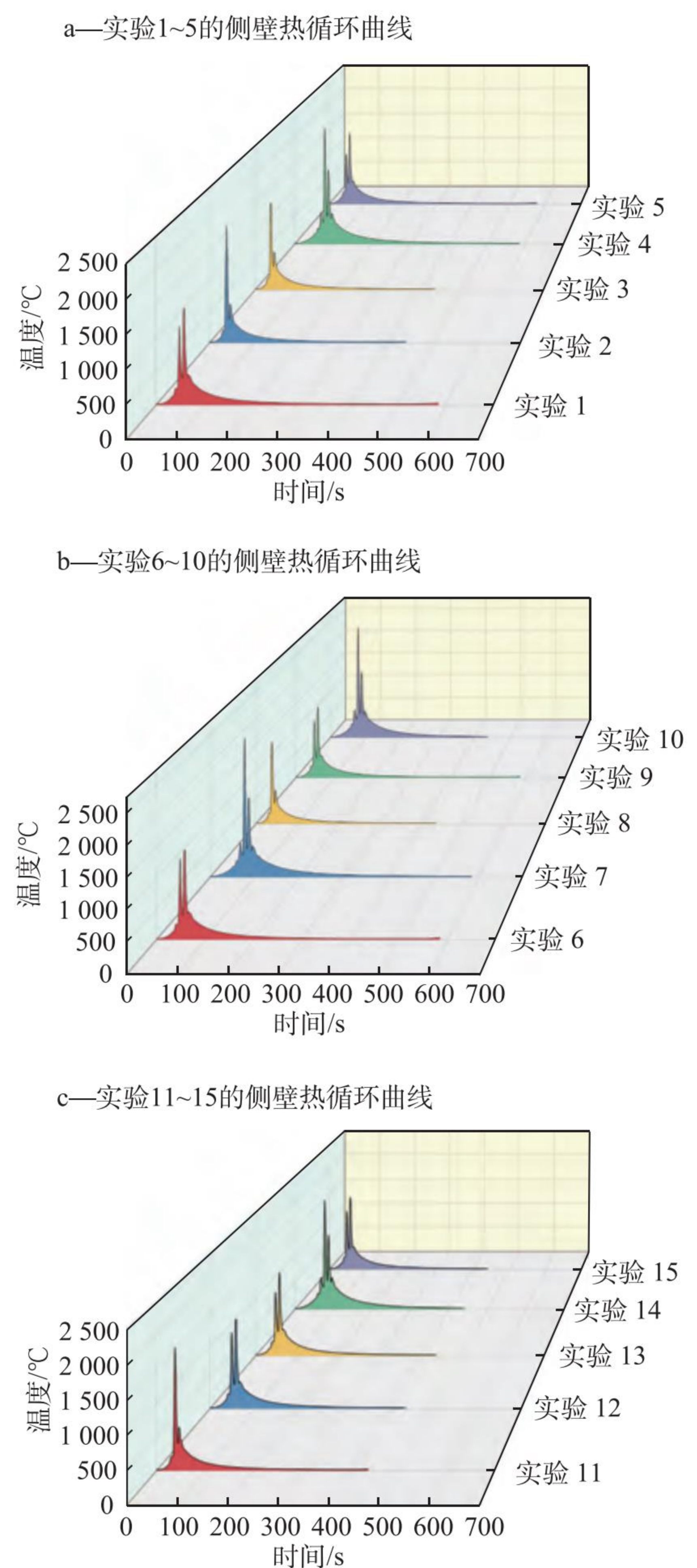


图7 侧壁温度循环曲线

Fig.7 Sidewall temperature cycling curve

450 mm 节点处,各组参数的等效应力不再发生变化。可以看出,在焊接终点处各组参数的等效应力值最小,为157 MPa。

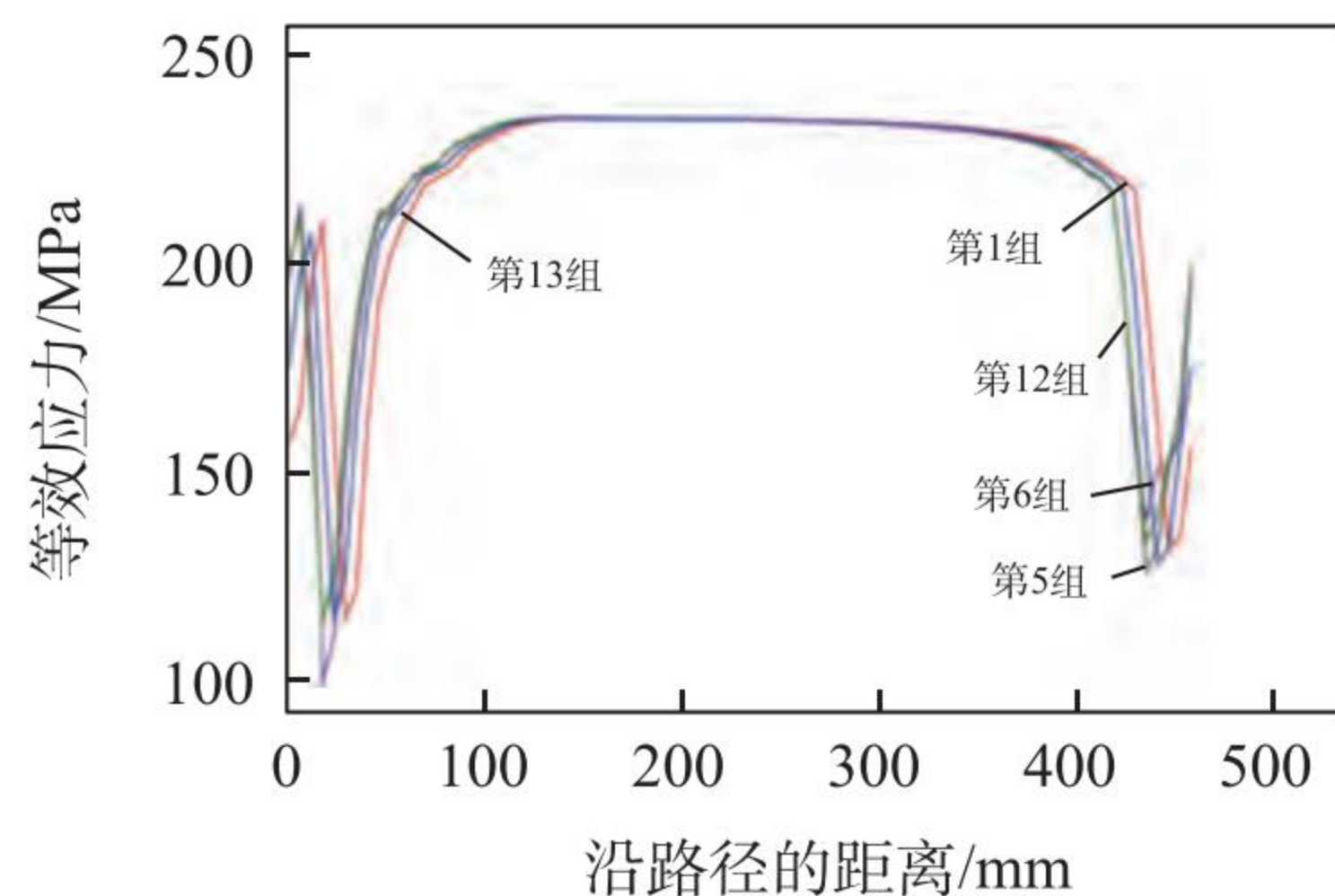


图8 等效应力对比图

Fig.8 Comparison chart of equivalent stress

等效应力通常是在复杂应力状态下,将多个方向的应力分量综合成一个单一的应力值。咬边缺陷与应力之间存在正反馈关系。咬边导致应力集中和残余应力积累,而残余应力又可能加剧咬边的形成,导致母材在焊接过程中产生局部变形,间接影响焊枪的角度和熔池稳定性,增加咬边产生的概率。为减少应力导致的咬边风险,优化后的焊接工艺参数:摆动宽度为16 mm,焊接速度为0.75 mm/s,侧壁停留时间为2 s。

### 3 窄间隙摆动堆焊实验

#### 3.1 焊接设备

窄间隙电弧摆动焊枪如图9所示。NG-Tig摆动电弧焊接系统由窄间隙焊枪、焊接滑台及EWM Tetrix 551型焊接电源、EWM TigSpeed drive 45 hotwire型送丝机、DMC-E5032多轴运动控制卡、人机界面显示器等部分组成。其中窄间隙焊枪为焊接系统的主要执行机构,NG-Tig焊枪主体应采用扁平式结构。



图9 窄间隙电弧摆动焊枪

Fig. 9 Narrow gap swing arc welding gun

#### 3.2 实验结果分析

在数值模拟优化参数下开展单道多层焊接工艺实验。通过动态调节焊枪摆动宽度精确匹配不同坡口尺寸,实现坡口填充的自适应控制。考虑到堆焊的热累积效应,堆焊时确保每一层焊缝均降至室温再进行下一层焊接。图10为典型焊道形貌。焊缝边缘过渡区呈现光滑的几何连续性,未观察到咬边缺陷,母材界面处无氧化变色现象,表明热输入控制有效抑制了过度热影响。



图10 某一层焊道形貌

Fig.10 Weld bead morphology of a certain layer

为进一步验证工艺可靠性,对焊缝界面进行金相分析,如图11所示。结果显示,各焊层与母材界面呈连续冶金结合,熔合线曲率半径为0.15~0.25 mm,界面扩散层厚度均匀,未发现微观裂纹或未熔合缺陷。该结果证实经仿真优化的焊接参数能有效维持熔池动态平衡,从而避免局部成分过冷导致的咬边缺陷。通过维氏显微硬度评估焊接接头力学性能,如图12所示。可以看出,各层的热影响区(HAZ)硬度平均为243HV,较母材182HV提升了约33%,并且母材与焊层过渡区域未出现硬度突变或异常分布。图13为金相组织。可以看到,焊缝区含有大量细小的等轴铁素体晶粒,晶界清晰,研究认为,这是因为摆动电弧促进了熔池扰动,抑制柱状晶的生长。少量珠光体分布在铁素体晶



图11 截面宏观形貌

Fig.11 Macromorphology of section

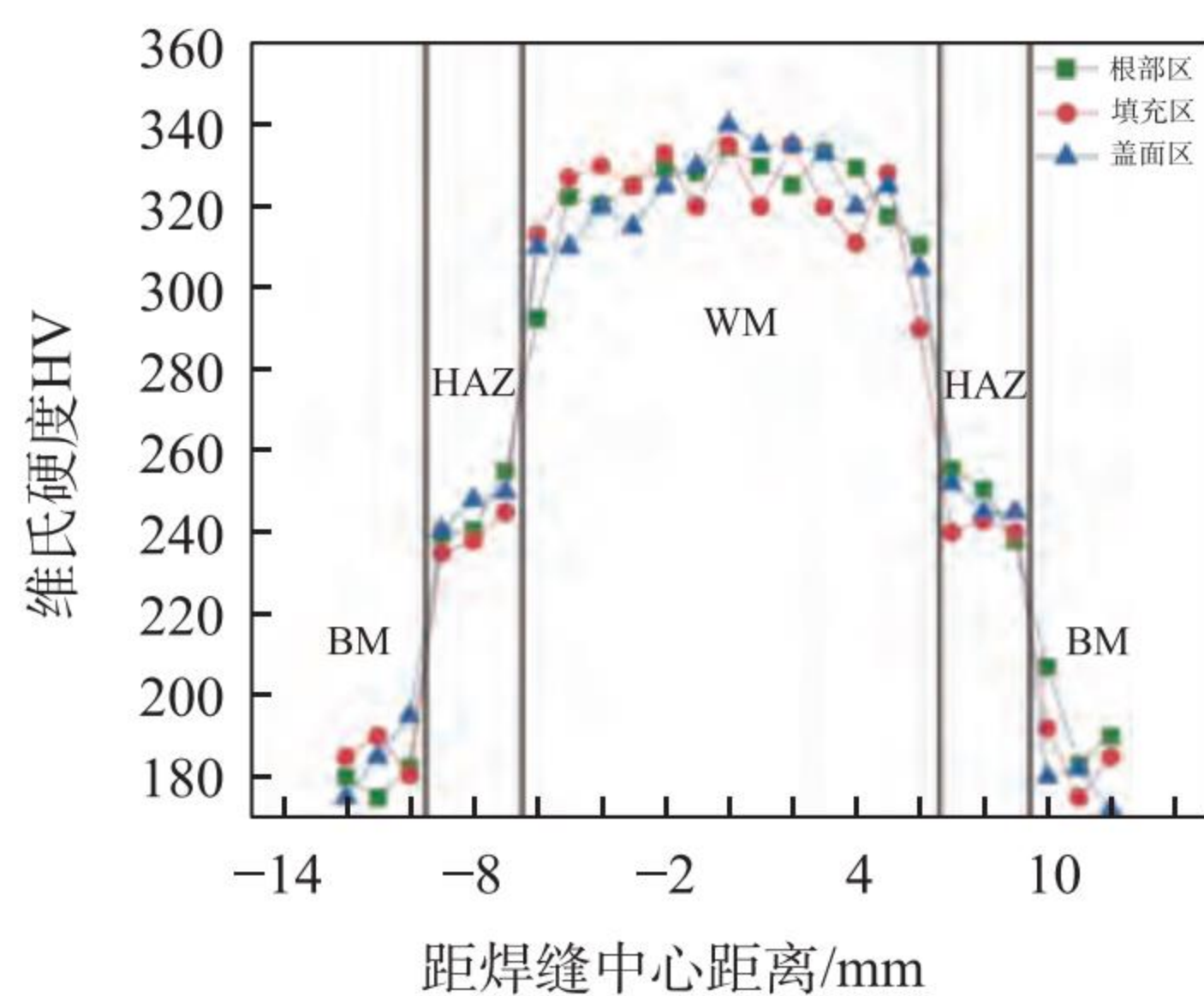


图12 硬度测试

Fig.12 Hardness test

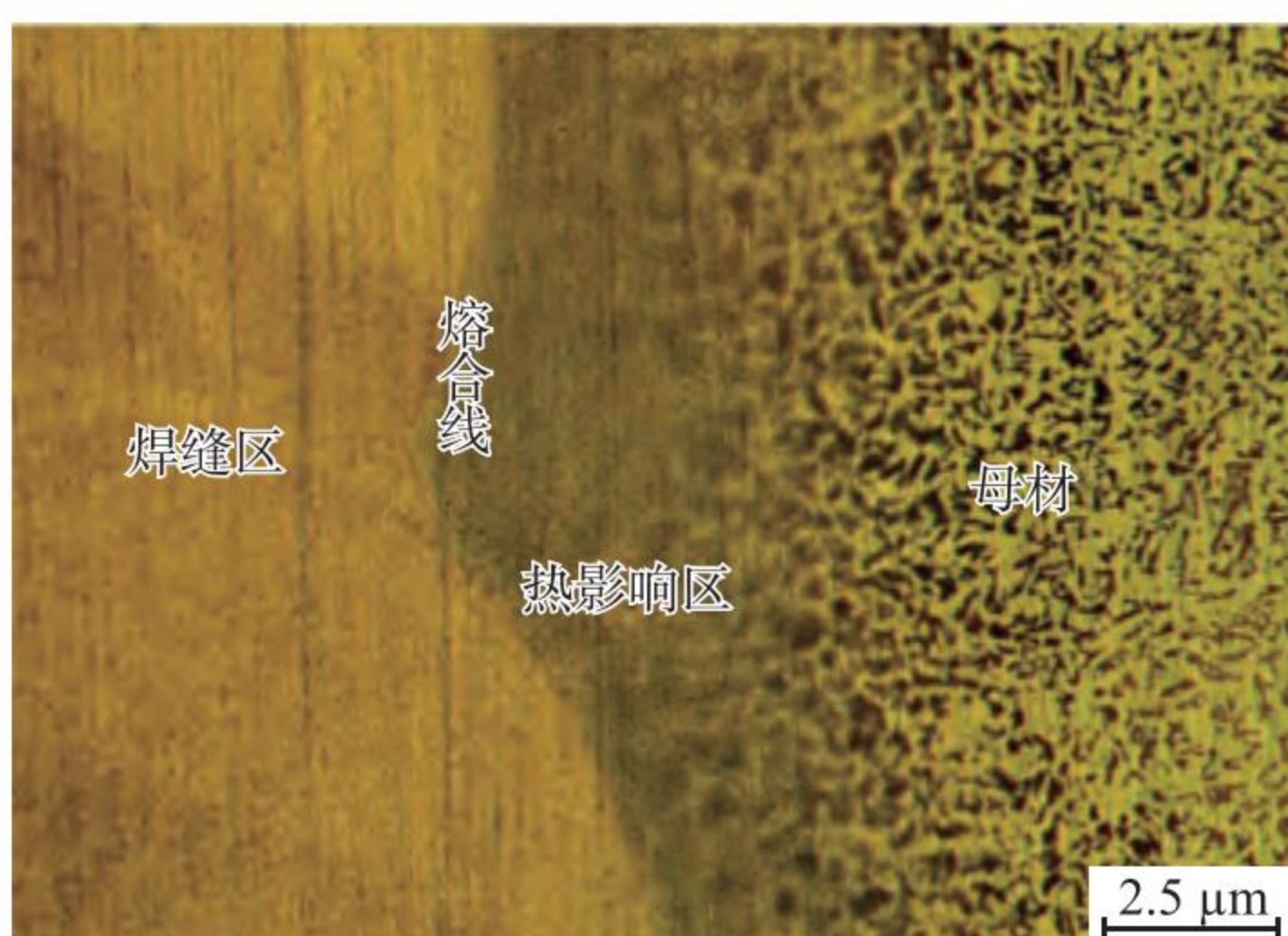


图13 金相形貌

Fig.13 Metallographic morphology

界,呈层片状结构。在熔合线附近可以观察到沿原奥氏体晶界析出的先共析铁素体,呈网状或条状分布,熔合线平滑。热影响区的粗晶区紧邻熔合线的高温区,原奥氏体晶粒粗化,冷却后可以看见含有粗大的铁素体及少量珠光体,还伴随着魏氏组织,因为摆动的高温停留时间短,粗晶区宽度较窄。

## 4 结论

通过数值模拟不同参数下侧壁的热循环曲线及峰值温度,可得出摆动宽度、焊接速度和侧壁停留时间是影响侧壁与母材界面质量的主要因素。通过实验验证发现,第1组实验参数:摆动宽度为16 mm,焊接速度为0.75 mm/s,侧壁停留时间为2 s时,侧壁与母材熔合良好,无咬边缺陷。

1) 在一定摆动宽度和侧壁停留时间下,焊接速度过慢会导致侧壁区域出现温度双峰现象,引起局部过烧,易形成咬边缺陷。

2) 在关键的冷却区间,适当的冷却速率可以减少应力集中及残余应力积累,从而降低发生咬边风险。

3) 在最优参数下进行的焊接实验结果表明,焊缝熔合线平滑,焊缝内部为大量细小的等轴铁素体晶粒,

提高了焊缝硬度,改善了接头性能。

## 5 参考文献

- [1] LI W, HE C, CHANG J, et al. Modeling of weld formation in variable groove narrow gap welding by rotating GMAW [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 57: 163-173.
- [2] 李渊博,麻帅川. 窄间隙焊接变形研究现状及进展[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(21): 9-15.  
LI Yuanbo, MA Shuaichuan. Research status and progress of narrow gap welding deformation [J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(21): 9-15. (in chinese)
- [3] WAN L, HUANG Y, LV S, et al. Narrow-gap tungsten inert gas welding of 78-mm-thick Ti-6Al-4V alloy [J]. *Materials Science and Technology*, 2016, 32(15): 1545-1552.
- [4] 徐望辉,林三宝,杨春利,等. 摆动电弧窄间隙立向上GMAW焊缝成形[J]. *焊接学报*, 2015, 36(4): 56-60.  
XU Wanghui, LIN Sanbao, YANG Chunli, et al. Weld bead formation in oscillating arc narrow gap verticalup GMAW process [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(4): 56-60. (in chinese)
- [5] 陈鹏,刘一搏,王亚峰,等. 核电CV厚板窄间隙摆动自动焊接工艺参数研究[J]. *电焊机*, 2020, 50(3): 11-17.  
CHEN Peng, LIU Yibo, WANG Yafeng, et al. Study on welding process parameters of narrow swing automatic welding of CV thick plate in nuclear power plant [J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(3): 11-17. (in chinese)
- [6] XU G, PAN H, WANG J. Numerical analysis model of temperature field in swing-arc narrow gap GMAW [J]. *Hanjie Xuebao/Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(10): 55-60.
- [7] NOMUR A, HIROKAZ U, SUGITAN I, et al. Development of automatic fillet welding process with high speed rotating arc [J]. *Transactions of the Japan Welding Society*, 1987, 4: 502-507.
- [8] IWATA S, MURAYAMA M, KOJIMA Y. Application of narrow gap welding process with high speed rotating arc to box column joints of heavy thick plates [J]. *Jef Technical Report*, 2009, 14(14): 16-21.
- [9] 余刚,丁敏,崔海超,等. 10Ni5CrMoV钢旋转电弧窄间隙GMAW研究[J]. *焊接技术*, 2010, 39(11): 12-15.  
YU Gang, DING Min, CUI Haichao, et al. Study on rotation arc narrow gap gas metal arc welding of 10Ni5CrMoV steel [J]. *Welding Technology*, 2010, 39(11): 12-15. (in chinese)
- [10] 陈崇龙,周继辉,李侃,等. 核电321不锈钢旋转电弧窄间隙GTAW工艺[J]. *焊接*, 2022(4): 17-22.  
CHEN Chonglong, ZHOU Jihui, LI Kan, et al. Investigation on rotating arc narrow groove GTAW process of 321 stainless steel for nuclear plants [J]. *Welding & Joining*, 2022(4): 17-22. (in chinese)

(下转第196页)

- mance[J]. *Materials Science and Technology*, 2023, 31(6): 63–70. (in Chinese)
- [47] 明越科, 王奔, 周晋, 等. 基于3D打印的连续纤维增强热固性复合材料性能及其应用探索[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(15): 58–65.  
MING Yueke, WANG Ben, ZHOU Jin, et al. Exploration of properties and applications of continuous fiber reinforced thermosetting composite materials based on 3D printing[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2021, 64(15): 58–65. (in Chinese)
- [48] 刘陶欣, 鲍崇高, 董文彩, 等. 连续碳纤维增强热固性酚醛树脂复合材料的3D打印工艺及性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(7): 2494–2501.  
LIU Taixin, BAO Chonggao, DONG Wencai, et al. Research on 3D printing process and properties of continuous carbon fiber reinforced thermosetting phenolic resin composite materials[J]. *Silicates Bulletin*, 2022, 41(7): 2494–2501. (in Chinese)
- [49] YANG Chuncheng, WANG Bingjie, LI Dichen, et al. Modeling and characterization for the responsive performance of CF/PLA and CF/PEEK smart materials fabricated by 4D printing[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12(1): 69–76.
- [50] WANG Yaohui, YE Haitao, HE Jian, et al. Electrothermally controlled origami fabricated by 4D printing of continuous fiber-reinforced composites[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 2322–2328.
- [51] WANG Qingrui, TIAN Xiaoyong, ZHANG Daokang, et al. Programmable spatial deformation by controllable off-center free-standing 4D printing of continuous fiber reinforced liquid crystal elastomer composites [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(3869): 2494–2501.

(上接第152页)

- [11] 郭宁, 林三宝, 张亚奇, 等. 旋转电弧横向GMAW接头组织及成形特点[J]. *焊接学报*, 2009, 30(8): 101–104.  
GUO Ning, LIN Sanbao, ZHANG Yaqi, et al. Microstructure and formation characteristics of rotating arc horizontal GMAW joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(8): 101–104. (in Chinese)
- [12] WEI B, JIA C, WU W, et al. Stirring effect of the rotating arc on the molten pool during non-axisymmetric tungsten NG-TAW[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 285: 116769.
- [13] MEI Yinxi, GUO Dengcheng, DING Min, et al. Study on rotating GMAW technology of big thickness steel with narrow groove[J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(9): 166–168.
- [14] 王士军, 孙增光, 周永鑫, 等. 基于ANSYS的焊接温度场仿真分析[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(9): 120–121.  
WANG Shijun, SUN Zengguang, ZHOU Yongxin, et al. Simulation analysis of welding temperature field based on ANSYS [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(9): 120–121. (in Chinese)
- [15] KARTHIKEYAN R, BALASUBRAMANIAN V. Predictions of the optimized friction stir spot welding process parameters for joining AA2024 aluminum alloy using RSM[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 51: 173–183.