

## S11306 铁素体不锈钢厚板焊后热处理特性

张勇<sup>1</sup>, 马青山<sup>2</sup>, 李如杨<sup>2</sup>, 胡效东<sup>2</sup>

(1. 山东百特机械设备有限公司, 山东 临沂 276600;

2. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**研究了焊接过程及两种工艺热处理后 S11306 铁素体不锈钢厚板的残余应力、微观组织及力学性能。盲孔法被用于表征热处理前后的焊接残余应力。双椭球热源及顺序耦合法被用于表征焊接的温度场和应力场。使用光学显微镜研究了热处理前后的微观组织演变规律。结果表明,热源模拟的焊接温度场误差可控制在 10% 以内,顺序耦合获得的应力结果与试验值的差值不超过 23%;热处理过程能显著降低焊缝区域的峰值残余应力;820 °C 热处理相较 770 °C 对焊缝周边 100 mm 区域的残余应力消除作用更加显著;更高的热处理温度在降低母材马氏体含量的同时,也促进了热影响区的晶粒生长,同时焊缝区下贝氏体和马氏体复合相(LB/M)的含量增加至 47.6%;母材、热影响区的硬度在热处理后呈现下降趋势,而焊缝区的硬度增加了 33 HV0.05。

**关键词:**不锈钢厚板;焊接温度场;焊接残余应力;焊后热处理;微观组织;硬度

中图分类号: TG407 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2024)05-0146-07

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2024.05.024

## Post weld heat treatment characteristics of S11306 stainless steel thick plate

Zhang Yong<sup>1</sup>, Ma Qingshan<sup>2</sup>, Li Ruyang<sup>2</sup>, Hu Xiaodong<sup>2</sup>

(1. Shandong Better Machinery Equipment Co., Ltd., Linyi Shandong 276600, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China)

**Abstract:** Residual stress, microstructure and mechanical properties of S11306 ferritic stainless steel thick plates were examined after welding and two heat treatment processes. The welding residual stress was determined both before and after heat treatment by using the blind hole method. The sequential coupling method and double ellipsoidal heat source were utilized to characterize the temperature and stress fields during welding. The microstructure evolution both before and after heat treatment was studied by using optical microscope. The results show that the error of the welding temperature field simulated by the heat source can be controlled within 10%. The difference between the stress results obtained through sequential coupling and the experimental values shall not exceed 23%. The heat treatment process can significantly reduce the peak residual stress in the weld zone. Compared to 770 °C, the heat treatment temperature of 820 °C provides a greater residual stress-relieving impact on the 100 mm area surrounding the weld zone. The higher heat treatment temperature not only reduces the martensite content of the base metal, but also promotes the grain growth of the heat affected zone, concurrently the content of lower bainite and martensite composite phase (LB/M) in the weld zone is increased to 47.6%. The hardness values of the base metal and heat affected zone show a decreasing trend after heat treatment, while the hardness value of weld zone is increased by 33 HV0.05.

**Keywords:** stainless steel thick plate; welding temperature field; welding residual stress; post weld heat treatment; microstructure; hardness

S11306 铁素体不锈钢具有焊接性能差、焊接接头脆化严重和缺口敏感性高等缺点,但因其具有良好的耐腐蚀性、不锈性、冷成形性和塑韧性而广泛用于焦炭塔、分馏塔和硫磺回收装置等压力容器<sup>[1-3]</sup>。焊接残余应力对接头的拉伸强度、塑韧性和耐腐蚀性都有不利影响,较大的残余应力还会引起应力腐蚀,大大减小

了焊接件的使用寿命<sup>[4-7]</sup>。随着有限元软件的日益成熟,对焊接温度场和残余应力场的模拟计算也越来越成熟,对于薄板焊接而言,采用不同的有限元软件可以较为准确地预测出焊接试板的残余应力分布及大小<sup>[8-11]</sup>。但对于厚板的焊接过程模拟,尤其是多道焊过程,模拟计算的工作量和误差控制更加困难。较好

收稿日期:2023-10-12 修订日期:2024-03-24

基金项目:国家自然科学基金(52305172)

作者简介:张勇(1988—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为承压设备设计与制造,E-mail:edward1226@126.com。通信作者:胡效东,教授,博士,E-mail:huxdd@163.com

引文格式:张勇,马青山,李如杨,等. S11306 铁素体不锈钢厚板焊后热处理特性[J]. 金属热处理, 2024, 49(5): 146-152.

Zhang Yong, Ma Qingshan, Li Ruyang, et al. Post weld heat treatment characteristics of S11306 stainless steel thick plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(5): 146-152.

的焊后热处理工艺可以有效消除焊接接头的残余应力,尤其对铁素体不锈钢而言,焊后热处理可以提高铁素体不锈钢焊接接头的力学性能<sup>[12-14]</sup>。但实际生产制造过程中,对铁素体不锈钢的焊后热处理工艺也缺乏认识。

本文制备 S11306 铁素体不锈钢 20 道焊的对接焊缝试样,分析了焊缝各区的金相特性和力学特性,研究了焊接残余应力及正火的作用,通过 770、820 °C 并保温 2 h 的两种热处理工艺的对比,为焊接工艺设计提供试验依据。

### 1 试验材料及方法

试验选用 25 mm 厚冷轧态 S11306 铁素体不锈钢板,尺寸为 400 mm × 300 mm × 25 mm;试板采用手工电弧焊,焊条为该种材料焊接专用  $\phi 4$  mm 的 G207 铁素体不锈钢焊条,焊前将焊条在 300 °C 下烘焙 2 h;板材和焊条的化学成分如表 1 所示。

表 1 S11306 钢和 G207 钢的化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Chemical composition of the S11306 and G207 steels (mass fraction, %)

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
S11306	0.02	0.41	0.11	0.024	0.004	12.45	0.09
G207	0.048	0.625	0.61	0.019	0.004	12.54	0.196

采用逆变式直流弧焊机对板材进行焊接。焊接参数结合生产过程的实际情况,在考虑焊接质量的同时兼顾工作效率,并通过前期对板材的预试验确定。焊接正面 18 道焊 + 背面 2 道焊;焊接接头的尺寸及焊接次序如图 1 所示,板间距为 2 mm;焊前未预热,焊接过程中层间温度控制在  $(150 \pm 5)$  °C;实际焊接过程中的相关参数如表 2 所示。

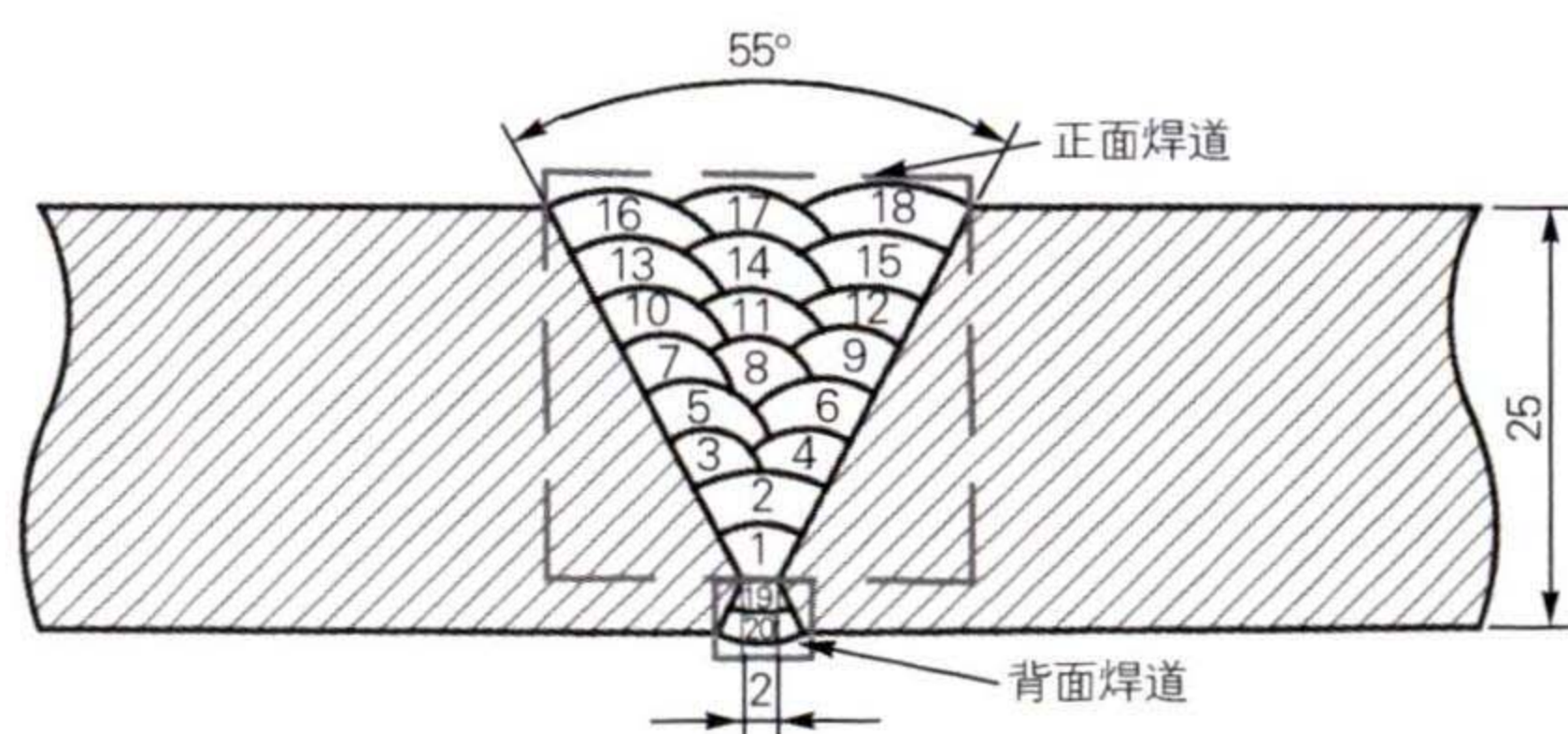


图 1 S11306 钢焊接接头示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the S11306 steel welded joint

试板在焊接过程中用 HPDJ-8125 动态数据采集分析系统采集温度场数据,传感器采用 K 型热电偶,最高承受温度是 900 °C 左右。焊接过程中共采集 5 个点的热循环曲线,分别位于焊缝焊趾 5 mm 及均布间

距为 5 mm 位置处,测试位置如图 2 所示,为了便于焊接热电偶传感器,错开布置。盲孔法(ZS21B 型残余应力检测仪)用于测量焊接残余应力,测试点分别位于焊缝中心处及均布为 20 mm 的点处,位置如图 3 所示。

表 2 焊接工艺参数  
Table 2 Welding process parameters

焊道	电压/V	电流/A	焊接速度/ (mm · s <sup>-1</sup> )	热输入/ (kJ · mm <sup>-1</sup> )
1	23 ~ 25	149	4	0.857 ~ 0.931
2 ~ 18	23 ~ 25	155	4	0.891 ~ 0.969
19 ~ 20	23 ~ 25	149	4	0.857 ~ 0.931

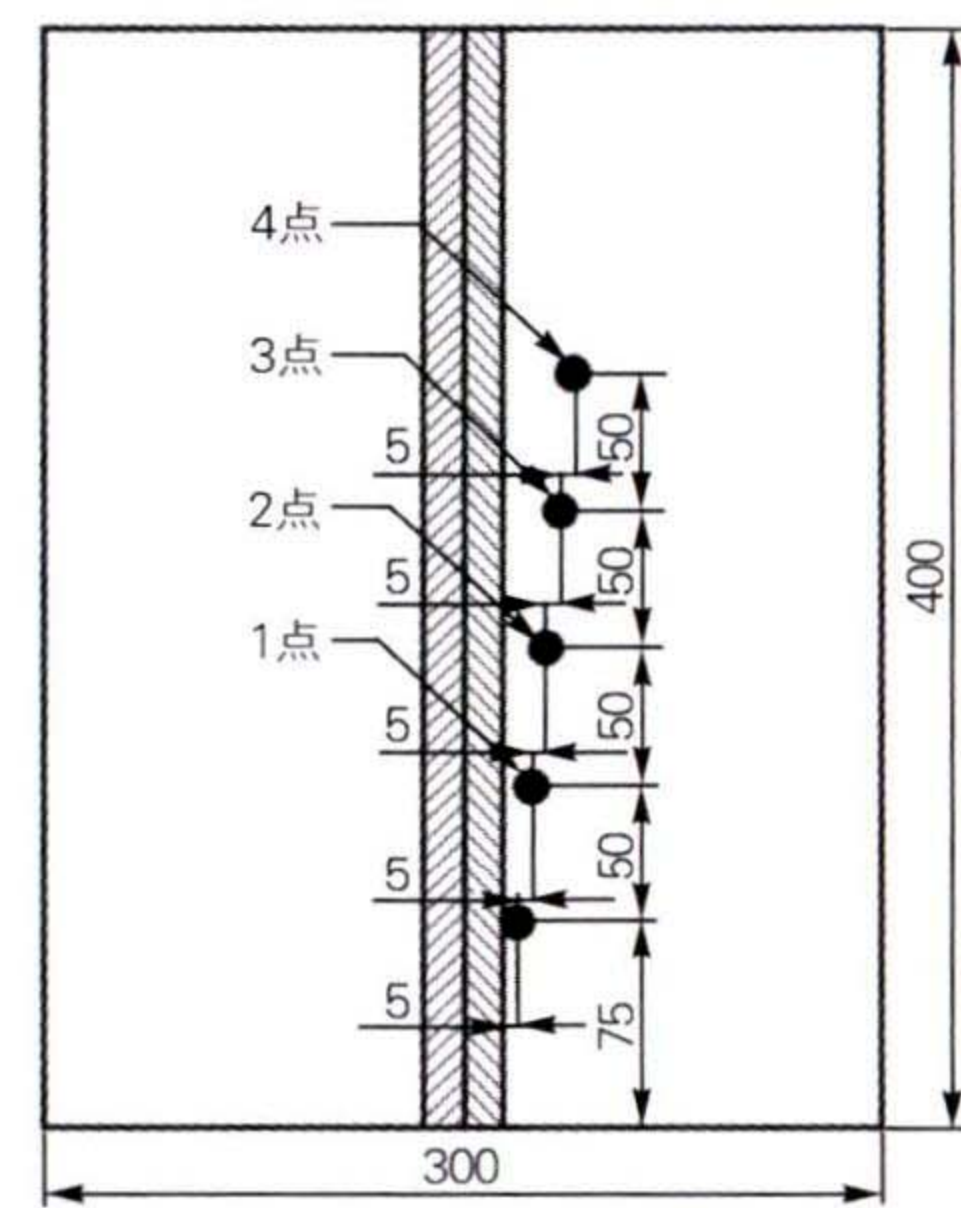


图 2 焊接热循环曲线测试点

Fig. 2 Test points of welding thermal cycle curve

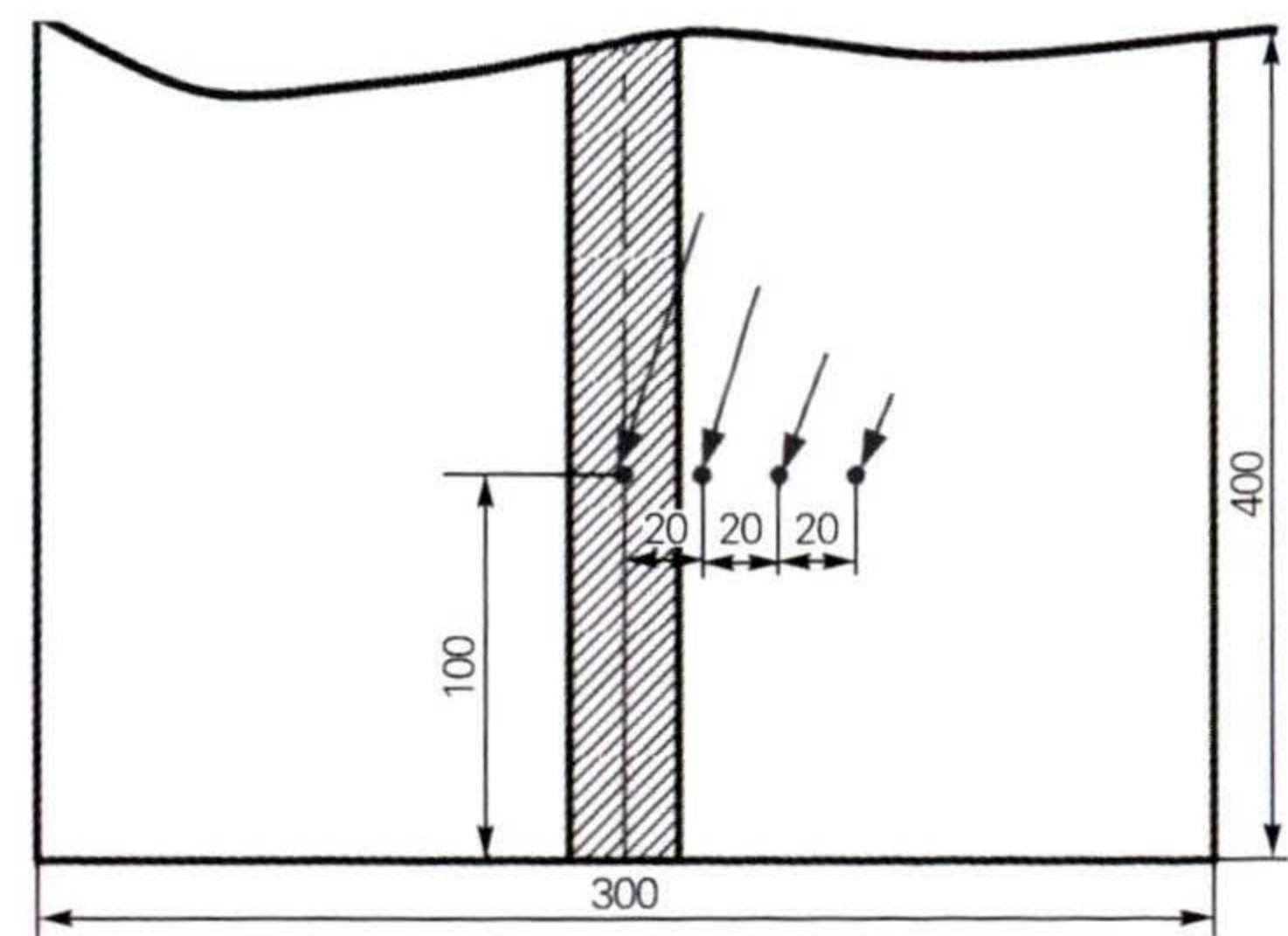


图 3 残余应力测量位置

Fig. 3 Test points of residual stress

根据 GB/T 30583—2014《承压设备焊后热处理规程》以及实际工作情况,本文对焊接接头进行 770、820 °C 保温 2 h 的热处理,如图 4 所示。

根据 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》用自动显微维氏硬度计测量焊接接头的显微硬度,工作温度为室温 20 °C,工作载荷和保载时间分别为 0.49 N 和 15 s,在距接头上端面 4 mm 处取一条平行于端面的线,从母材到焊缝每隔 1 mm 取一个测试点。打点示意图如图 5 所示。

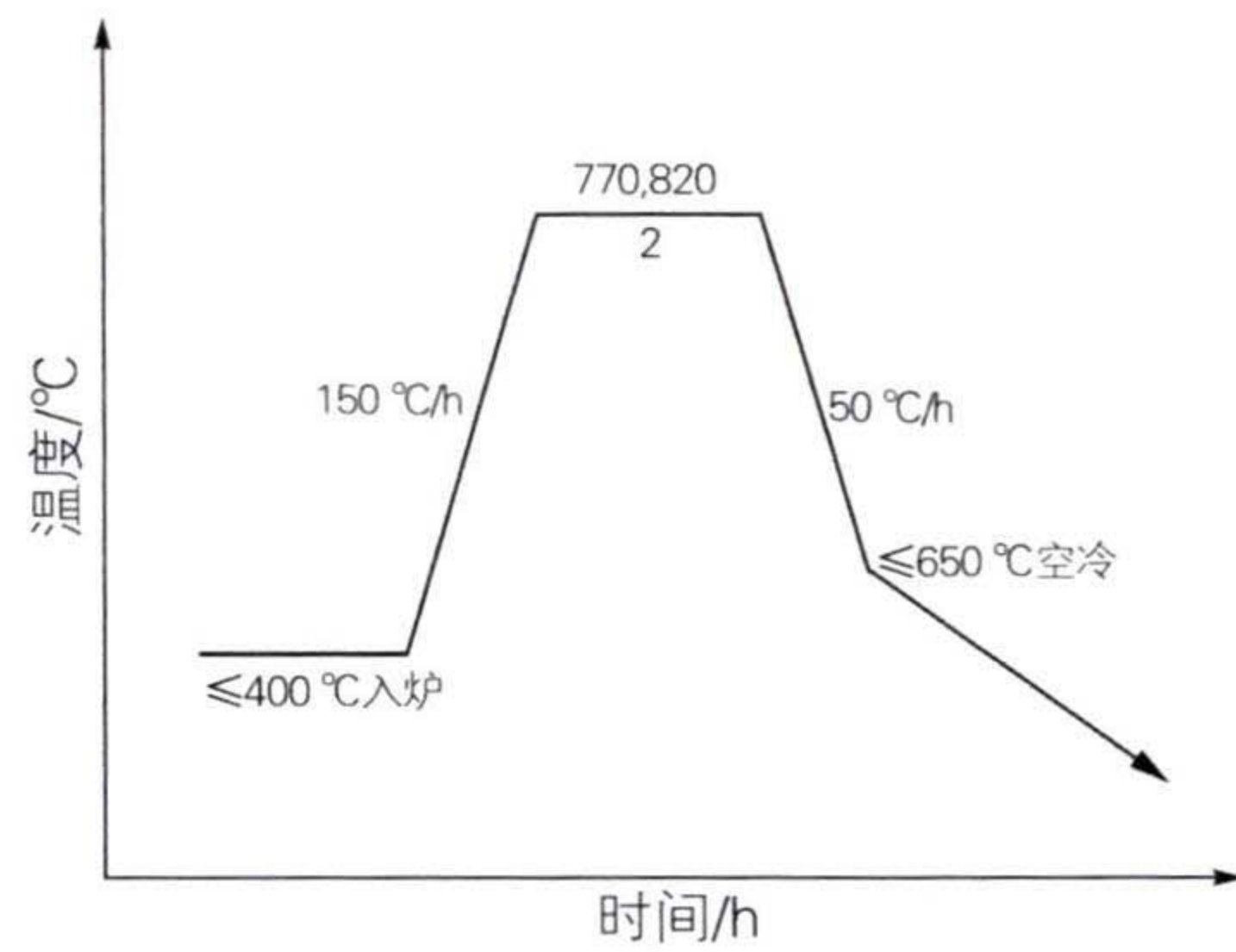


图4 热处理工艺  
Fig. 4 Heat treatment process

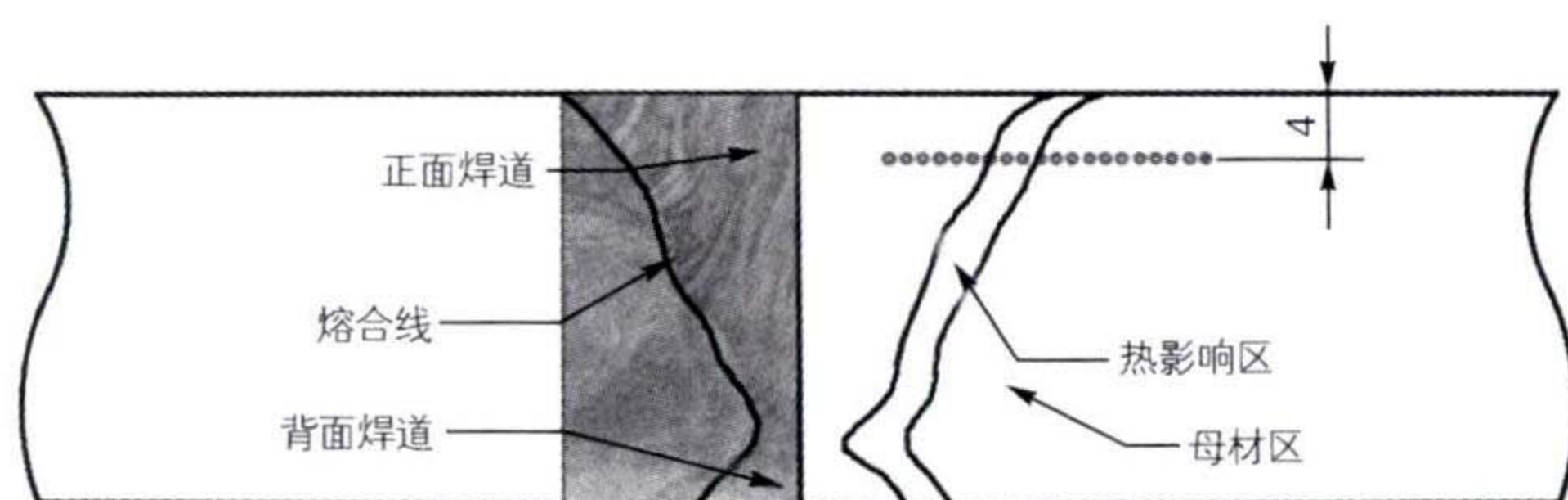


图5 硬度取样示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of hardness sampling

## 2 有限元模拟计算

### 2.1 有限元模型的建立

使用 ABAQUS 软件建立了如图 6 所示的三维有限元模型,模型尺寸为 400 mm × 300 mm × 25 mm,所有网格均采用六面体单元,单元总数为 24 240,节点总数为 28 044。

边界条件的设定参照了 Newton 法则和 Stefan-Boltzmann 定律考虑模拟过程中的热对流和热辐射,

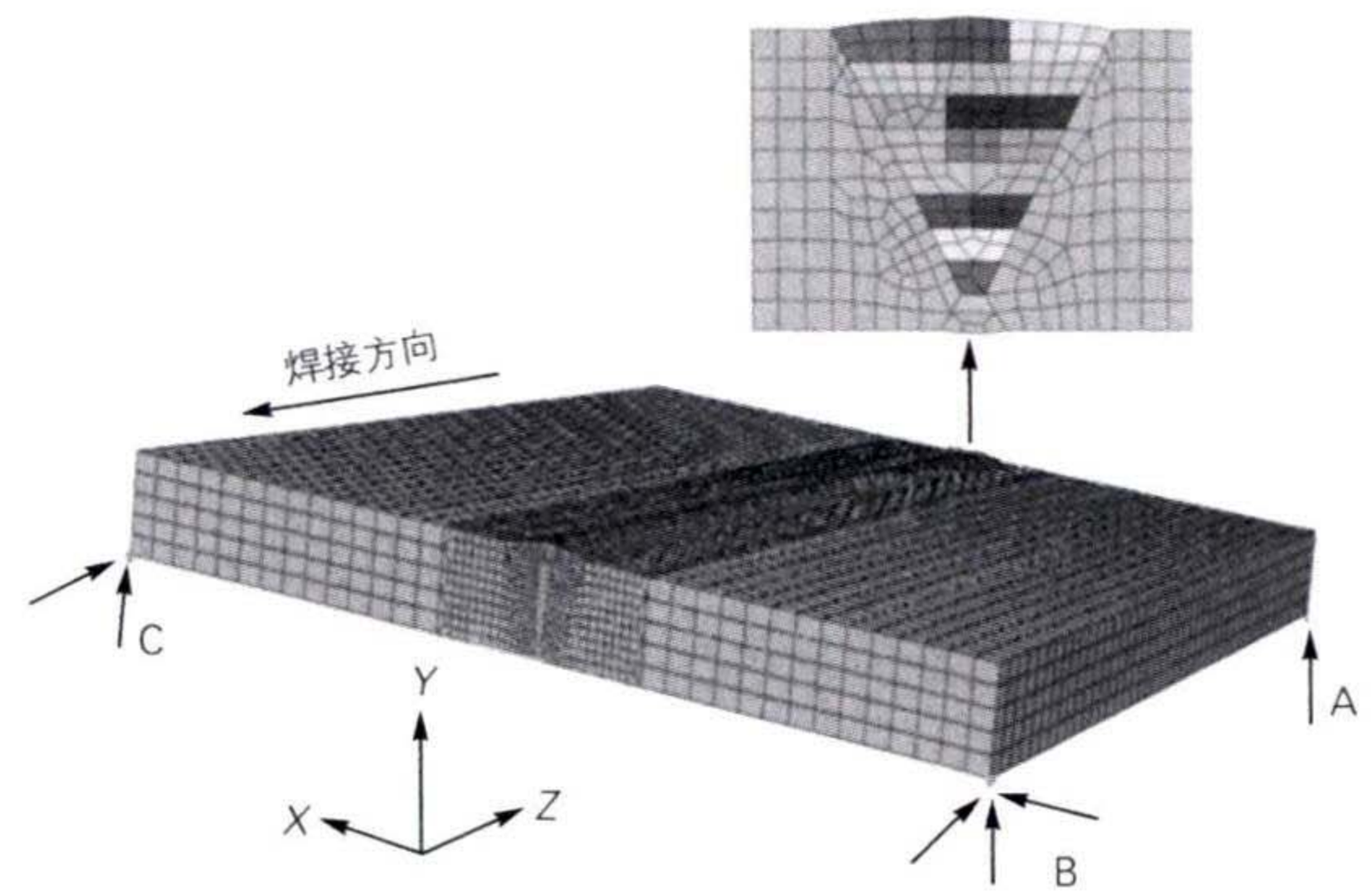


图6 三维有限元模型  
Fig. 6 3D finite element model

并定义环境温度为 30 °C。A、B 和 C 三点是对模型施加的拘束条件,由于试板在实际焊接过程中无外部约束,所以模拟过程中在 A、B 和 C 处添加的约束只是为了防止模拟过程中模型出现刚性位移。

有限元分析过程中采用生死单元法模拟焊道的加热过程,即在焊接开始前杀死所有焊缝区的单元,然后逐步激活每道焊缝的单元并施加热源,最后进行一段时间的冷却;按此顺序依次进行 20 道焊的焊接模拟。

### 2.2 焊接温度场模拟

本章采用了双椭球热源模型模拟了焊接的温度场和应力场。模型由前后两个 1/4 椭球组成。每一道焊的热源形状对应一组参数,通过调节参数来改变熔池的大小。在有限元计算过程中考虑了材料热物理性能的变化。根据 JMatPro 软件计算得到试验材料 30 ~ 1400 °C 的热物理性能参数,如表 3 所示。

表3 S11306 钢的热物性  
Table 3 Thermophysical properties of the S11306 steel

温度/°C	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	泊松比	比热/ (J · kg <sup>-1</sup> · °C <sup>-1</sup> )	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	导热系数/ (W · m <sup>-1</sup> · °C <sup>-1</sup> )	热膨胀系数/ (× 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> )
30	7742	0.292	456	213	205.0	62.35	9.29
200	7693	0.298	586	204	150.0	42.67	10.45
400	7629	0.306	835	186	128.0	24.90	11.41
600	7560	0.314	793	162	112.0	25.04	12.11
800	7884	0.322	774	134	17.0	26.57	12.39
1400	7234	0.346	739	53	0.4	32.78	13.32

### 2.3 焊接残余应力场模拟

文中通过热-力顺序耦合的有限元计算方法模拟焊接过程的残余应力场,即将温度场的模拟结果作为预定义场加载到应力场中,最后得到焊接残余应力场的模拟结果。焊接残余应力的计算过程中不考虑加工

硬化对结果的影响。

## 3 结果分析

### 3.1 试验值与模拟值的比较

为了验证模拟结果的准确性,在计算得到的温度

场中选取了与实际测量点相同位置的点对比分析试验值与模拟值的结果,由于焊接过程中需要清理熔渣等原因导致第五个测试点的热电偶脱落,故只测得了前4个点的焊接热循环曲线。

正面18道焊中4个点的峰值温度误差均小于10%,且每个点模拟和试验的热循环曲线的升温 and 降温速率基本一致。图7为4个点(见图2)的温度场模拟和试验测试对比,验证了双椭球热源温度场模拟结果的准确性。

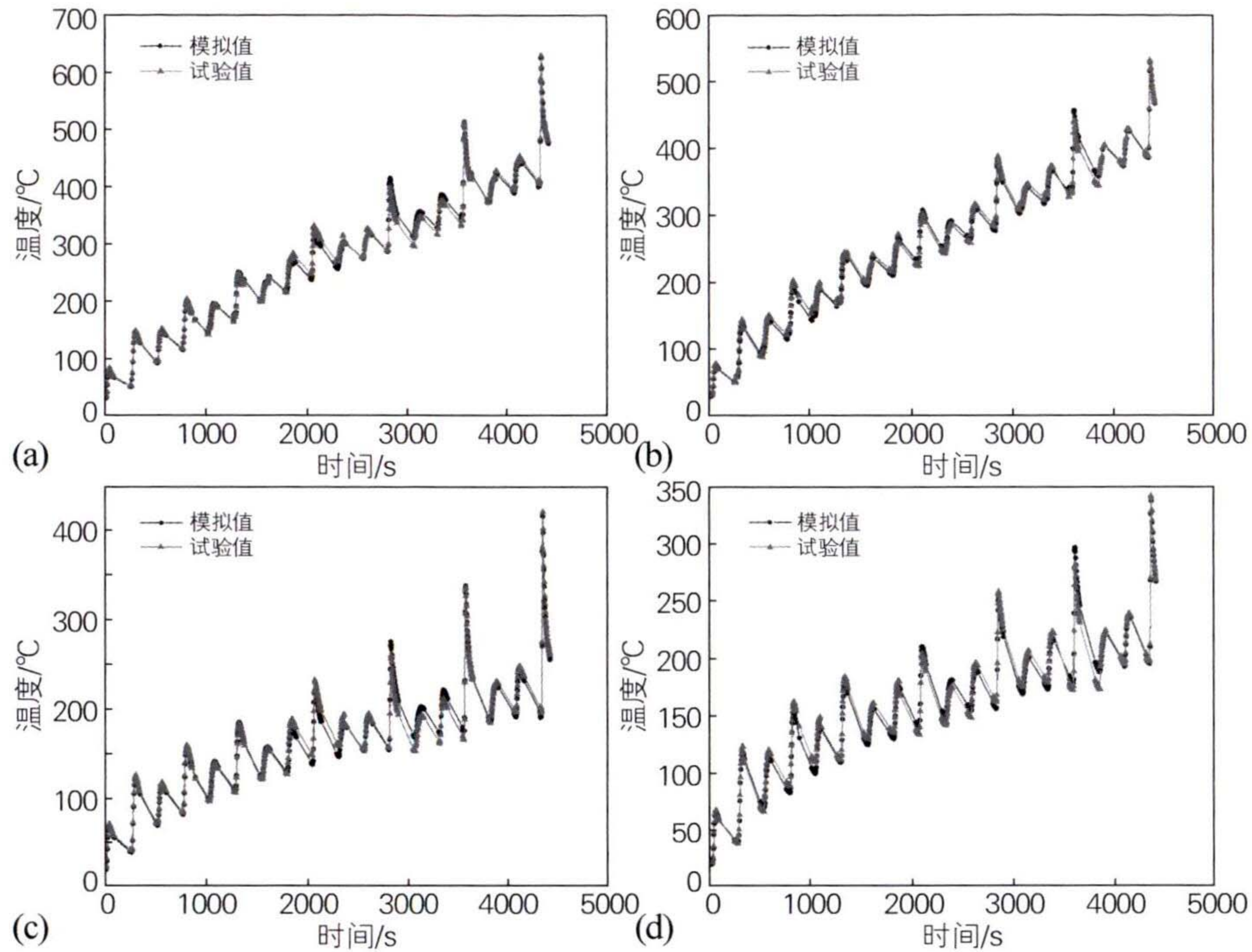


图7 不同测温点试验与模拟热循环曲线对比  
(a)1点;(b)2点;(c)3点;(d)4点

Fig. 7 Comparison between experimental and simulated thermal cycle curves at different temperature test points  
(a) point 1; (b) point 2; (c) point 3; (d) point 4

焊接过程危害较大的拉伸残余应力集中于焊缝上表面<sup>[15]</sup>。在计算得到的应力云图中,选取了与试验测量位置相同的点进行应力比较,结果如表4所示。数值的正负代表了应力的拉压状况,焊缝附近的拉应力和母材处的压应力使得整个板件的应力达到平衡。

表4 距焊缝中心不同距离处试验与模拟残余应力场的对比  
Table 4 Comparison between experimental and simulated residual stress fields at different distances from weld center

位置	距焊缝中心距离/ mm	方向	试验值/ MPa	模拟值/ MPa
5点	0	横向	+54.73	+59.82
		纵向	+168.95	+183.01
6点	20	横向	+38.15	+37.96
		纵向	+94.74	+104.80
7点	40	横向	+19.86	+22.45
		纵向	-21.31	-20.37
8点	60	横向	+13.49	+12.93
		纵向	-39.86	-30.93

移动热源模型在预测残余应力和变形方面有更大的优势,尽管其所需要的计算时间也更长<sup>[16]</sup>。从表4可以看出,5点处横向残余应力的试验值与模拟值误差为5.09 MPa,而纵向残余应力的误差为14.06 MPa,因为在进行试验之前对焊道进行了打磨,进而导致残余应力得到一定的释放;6点处横向残余应力的试验值与模拟值吻合较好,纵向残余应力的试验值与模拟值的误差为10.06 MPa;7点处横向残余应力的试验值比模拟值小2.59 MPa,纵向残余应力的试验值比模拟值大0.94 MPa;8点处横向残余应力的试验值比模拟值吻合良好,纵向残余应力的试验值比模拟值大8.93 MPa。验证了ABAQUS软件模拟残余应力场的准确性。

### 3.2 热处理后残余应力场的消除

由于焊接完成后纵向残余应力值较大,因此为了能够更为清晰地分析热处理后试板纵向残余应力的消除效果。在试板的中间截面选取了三条路径下的纵向残余应力作为对比,结果如图8所示。

由图8可知,对试板进行热处理后,沿三条路径下

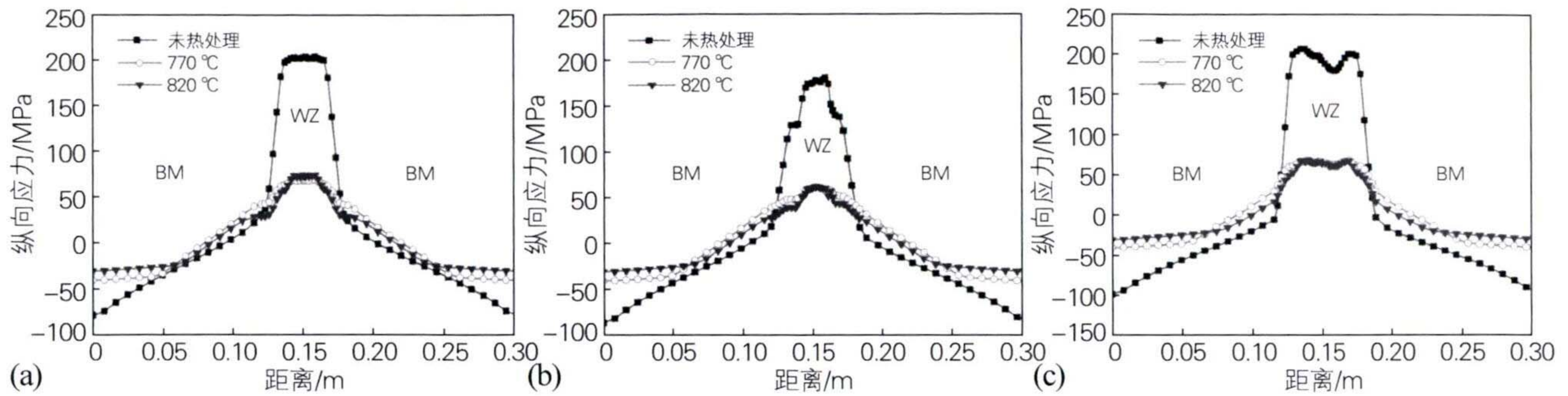


图8 热处理后纵向模拟残余应力沿不同路径的分布  
(a)焊道背面;(b)焊道中心;(c)焊道正面

Fig. 8 Distributions of simulated longitudinal residual stress along different paths after heat treatment  
(a) back of weld bead; (b) center of weld bead; (c) front of weld bead

的纵向残余应力在焊缝区(WZ)及热影响区的消除作用最为明显,沿焊道背面路径下,焊缝区和热影响区的消除效果在61.5%~70.2%,沿焊道中心路径下,焊缝区和热影响区的消除效果在60.2%~72.3%,沿焊道正面路径下,焊缝区和热影响区的消除效果在60.7%~74.2%;三条路径下相对于焊缝区和热影响区而言,

母材区(BM)应力消除效果不显著,只有在母材最远端应力消除在50 MPa左右。

### 3.3 金相分析

观察3组试样的母材区、粗晶区和焊缝区的显微组织。图9(a~c)是不同热处理温度下母材区的显微组织。

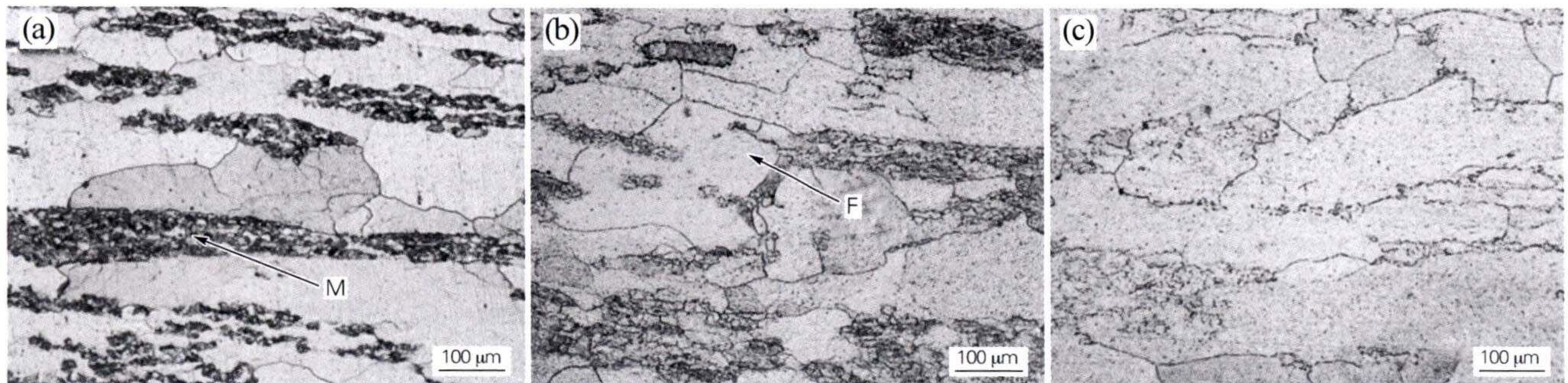


图9 不同热处理温度下试样母材区的微观组织  
(a)未处理;(b)770 °C;(c)820 °C

Fig. 9 Microstructure of base metal zone of the specimens heat treated at different temperatures  
(a) untreated; (b) 770 °C; (c) 820 °C

热处理导致碳化物的析出沉淀及形态变化,影响着材料的性能<sup>[17]</sup>。无热处理时母材区沿轧制方向分布着大量的马氏体组织,占比达到了38.6%;770 °C热处理时,晶界处马氏体组织已发生明显的分解,铁素体晶粒内部析出少量碳化物,主要是高温时固溶在铁素体中的碳的溶解度随着温度的降低而降低,过饱和的碳在晶粒内部析出,形成碳化物;820 °C时,母材区铁素体晶界和晶粒内碳化物进一步增多,晶界处已无明显的马氏体组织,且此温度下再结晶过程基本完成。

图10(a~c)为不同热处理温度下试样粗晶区的显微组织。无热处理时粗晶区的铁素体晶粒尺寸相对较小,平均晶粒尺寸约为152 μm,且沿晶界分布有少

量的马氏体组织;随着热处理温度的升高,粗晶区的铁素体晶粒尺寸逐渐变大,晶界处马氏体数量减少;820 °C时铁素体平均晶粒尺寸约为260 μm,马氏体组织逐渐分解为碳化物溶解到铁素体晶粒中。

图11(a~c)为不同热处理温度下焊缝区的显微组织。焊后热处理能改善焊缝处粗大组织,提高强度和韧性<sup>[18]</sup>。更高的热处理温度对不锈钢的性能有更明显的改善作用<sup>[19]</sup>。在无热处理和两组不同热处理温度下,焊缝区的显微组织均以铁素体为基体,从图11中可以看出,无热处理时,焊缝区主要为铁素体、马氏体以及冷却过程中未转变成马氏体的残留奥氏体;随着热处理温度的增加,残留奥氏体受热分解,又由于焊缝本身存在的马氏体会促进残留奥氏体转变为下贝

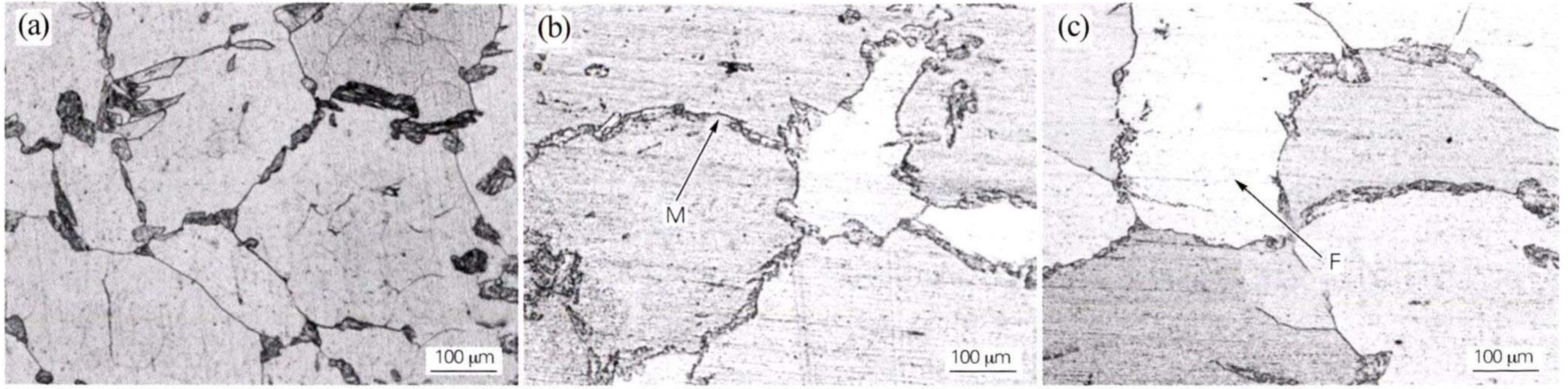


图 10 不同热处理温度下试样粗晶区的微观组织  
(a) 未处理; (b) 770 °C; (c) 820 °C

Fig. 10 Microstructure of coarse grain zone of the specimens heat treated at different temperatures  
(a) untreated; (b) 770 °C; (c) 820 °C

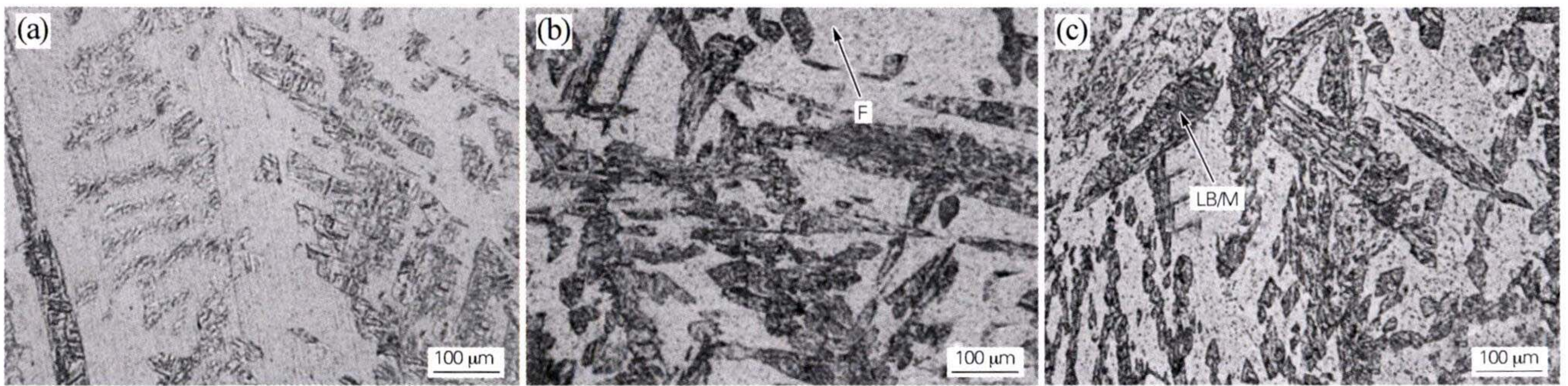


图 11 不同热处理温度下试样焊缝区的微观组织  
(a) 未处理; (b) 770 °C; (c) 820 °C

Fig. 11 Microstructure of weld zone of the specimens heat treated at different temperatures  
(a) untreated; (b) 770 °C; (c) 820 °C

氏体,进而导致焊缝区出现下贝氏体和马氏体的复合相(LB/M),并且随着热处理温度的升高,LB/M 的含量随之增加;当热处理温度达到 820 °C 后,LB/M 的含量达到最大值,约占总体积分数的 47.6%。

### 3.4 硬度分析

本文测量了 3 组焊接接头的维氏硬度,从母材到焊缝每隔 1 mm 取一个测试点,每组接头取 20 个点,结果如图 12 所示。由图 12 可知,在热处理后,从母材区(BM)到热影响区(HAZ)的硬度值显著增大,主要

是因为在热循环的作用下粗晶区的铁素体晶界处分布有大量的马氏体,由于马氏体本身的高强度和硬度,造成热影响区的硬度大大提高<sup>[20]</sup>;随着热处理温度的升高,母材区的硬度平均值呈下降趋势,焊缝区(WZ)的硬度值呈上升趋势,而热影响区的硬度值变化很小;在无热处理时,焊缝区的硬度平均值为 200 HV0.05,在 770 °C 和 820 °C 时,焊缝区的硬度平均值分别为 219 HV0.05 和 233 HV0.05,而母材区的硬度平均值分别为 181 HV0.05 和 171 HV0.05。通过图 12 还可以看出,

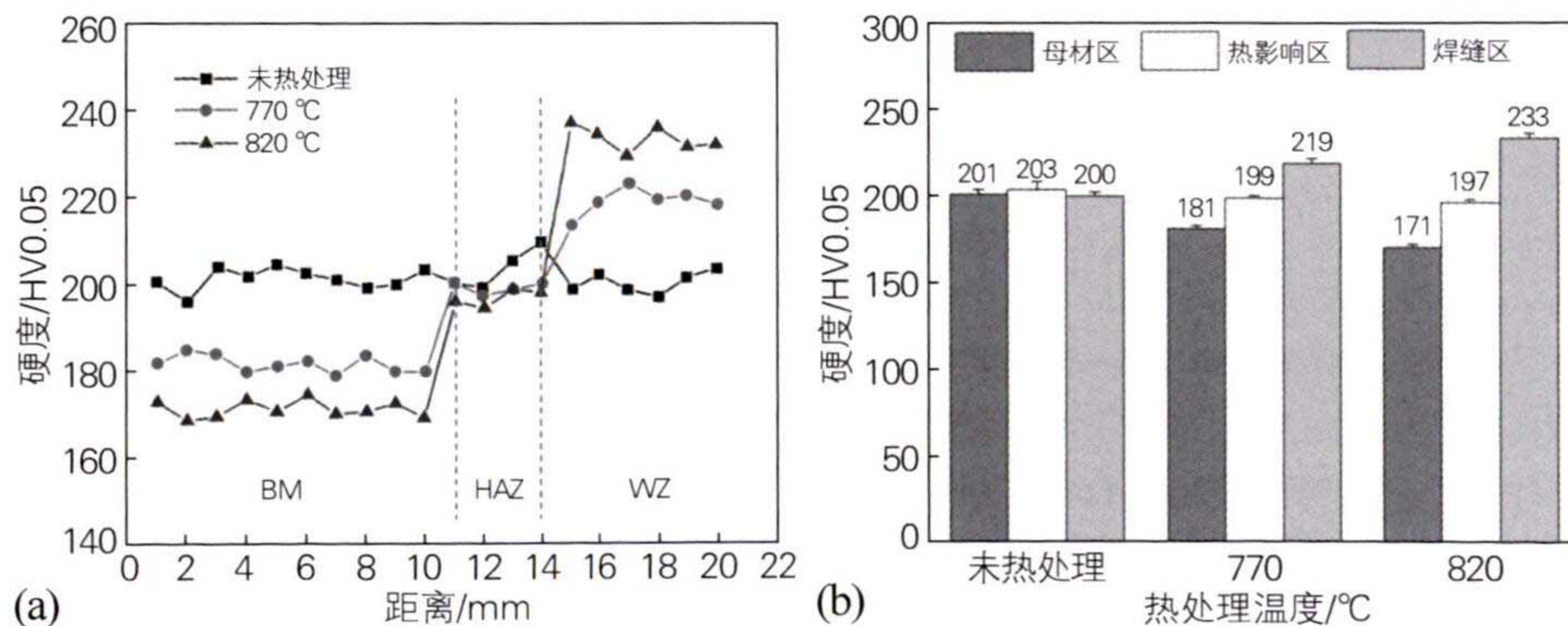


图 12 不同热处理温度下焊接接头的硬度分布(a)及均值(b)

Fig. 12 Distribution(a) and mean(b) of hardness of the welded joints heat treated at different temperatures

无论哪种热处理温度,母材区、热影响区和焊缝区的硬度值测量误差都很小。

## 4 结论

1) 采用双椭球热源模型能够较为准确地预测试板焊接过程中的温度场和应力场,且模拟结果与试验结果吻合良好。

2) 试板经热处理后,其焊缝区和热影响区的残余应力消除效果均达到60%以上,母材区的应力消除效果不明显。

3) 焊接接头经770℃和820℃热处理后,母材区的马氏体数量急剧减小,铁素体晶粒内部碳化物增多,820℃热处理时焊缝区的LB/M的含量增加到47.6%。

4) 热处理后母材区平均硬度值从201 HV0.05降低到171 HV0.05,焊缝区硬度值增加了33 HV0.05,而热影响区的硬度值整体变化不大。

### 参考文献:

- [1] 刘小平, 刘家雪. 14Cr1MoR + S11306 材质焦炭塔复合钢的焊接工艺[J]. 金属加工(热加工), 2014(20): 71-72.
- [2] 马凌文. S11306/Q245R 不锈钢复合钢板焊接工艺[J]. 石油化工建设, 2016, 38(1): 65-66.
- [3] 王小华. 热处理制度对 S11306-Q345R 复合钢板组织和性能的影响[J]. 压力容器, 2011, 28(5): 1-6, 27.  
Wang Xiaohua. Effect of heat processing on metallurgical structure and mechanical behavior of S11306-Q345R clad plate[J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(5): 1-6, 27.
- [4] Jang C, Cho P Y, Kim M, et al. Effects of microstructure and residual stress on fatigue crack growth of stainless steel narrow gap welds[J]. Materials & Design, 2010, 31(4): 1862-1870.
- [5] Ghosh S, Rana V, Kain V, et al. Role of residual stresses induced by industrial fabrication on stress corrosion cracking susceptibility of austenitic stainless steel[J]. Materials and Design, 2011, 32(7): 3823-3832.
- [6] Mochizuki M. Control of welding residual stress for ensuring integrity against fatigue and stress-corrosion cracking[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(2): 107-123.
- [7] 黄卫东, 王璐, 黄旭, 等. 热处理对 SLM 成形 TiN/AlSi10Mg 合金复合材料组织性能及残余应力的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(11): 161-167.  
Huang Weidong, Wang Lu, Huang Xu, et al. Effect of heat treatment on microstructure, properties and residual stress of TiN/AlSi10Mg alloy composites fabricated by SLM[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(11): 161-167.
- [8] Chen Q, Yang J, Liu X, et al. Effect of the groove type when considering a thermometallurgical-mechanical model of the welding residual stress and deformation in an S355JR-316L dissimilar welded joint[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 290-303.
- [9] Almeida D F, Rui F M, Cardoso J B. Numerical simulation of residual stresses induced by TIG butt-welding of thin plates made of AISI 316L stainless steel[J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 5: 633-639.
- [10] Chunbiao Wu, Jae-Woong Kim. Analysis of welding residual stress formation behavior during circumferential TIG welding of a pipe[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 132: 421-430.
- [11] 薛景宏, 白晨旭. X80 钢管道焊接致氢富集及热处理数值模拟[J]. 金属热处理, 2023, 48(10): 285-290.  
Xue Jinghong, Bai Chenxu. Numerical simulation of hydrogen enrichment induced by welding and heat treatment for X80 steel pipe[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(10): 285-290.
- [12] Mallaiah G, Reddy P R, Kumar A. Influence of titanium addition on mechanical properties, residual stresses and corrosion behavior of AISI 430 grade ferritic stainless steel GTA welds[J]. Procedia Materials Science, 2014, 6: 1740-1751.
- [13] 王长波, 胡昱轩, 王军伟, 等. 热处理温度对 SUS430 不锈钢热轧板焊后组织和力学性能的影响[J/OL]. 热加工工艺, 2022, DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212315.  
Wang Changbo, Hu Yuxuan, Wang Junwei, et al. Effect of heat treatment temperature on microstructure and mechanical properties of SUS430 stainless steel hot-rolled plate after welding[J/OL]. Hot Working Technology, 2022, DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212315.
- [14] 李钺, 彭其春, 童志博, 等. 不同热处理工艺对 9Ni 低温容器用钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(2): 98-103.  
Li Cheng, Peng Qichun, Tong Zhibo, et al. Effects of different heat treatment processes in microstructure and properties of 9Ni cryogenic vessel steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(2): 98-103.
- [15] Liu C, Zhang J, Xue C. Numerical investigation on residual stress distribution and evolution during multipass narrow gap welding of thick-walled stainless steel pipes[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86(4): 288-295.
- [16] 徐坤, 范彩霞, 韩二阳, 等. 热源模型对 Q420 厚板焊接残余应力和变形预测精度的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(23): 222-226.  
Xu Kun, Fan Caixia, Han Eryang, et al. Influence of heat source models on prediction accuracy of residual stress and deformation in Q420 thick plate welding[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(23): 222-226.
- [17] Xin Y, Feng X, Lippold J C. Strength increase in the coarse-grained heat-affected zone of a high-strength, blast-resistant steel after post-weld heat treatment[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 585(15): 149-154.
- [18] 张敏, 孟强, 张恩华, 等. 热处理工艺对 0Cr13Ni5Mo 钢焊接接头组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2012, 37(5): 70-73.  
Zhang Min, Meng Qiang, Zhang Enhua, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of welded joints of 0Cr13Ni5Mo steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(5): 70-73.
- [19] 李明娜, 刘峰, 于洪森. 焊后热处理对 308L 不锈钢焊缝  $\delta$ -铁素体形态及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(9): 9-11.  
Li Mingna, Liu Feng, Yu Hongmiao. Effect of post weld heat treatment on  $\delta$ -ferrite structure and properties of 308L weldment stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(9): 9-11.
- [20] Zhou J, Shen J, Hu S, et al. Microstructure and mechanical properties of AISI 430 ferritic stainless steel joints fabricated by cold metal transfer welding[J]. Materials Research Express, 2019, 6(11): 116536.