

# X80 管线钢水下湿法多道焊残余应力分析

严春妍<sup>1</sup>, 顾正家<sup>1</sup>, 聂榕圻<sup>1</sup>, 张可召<sup>1</sup>, 吴晨<sup>1</sup>, 王宝森<sup>2</sup>

(1. 河海大学, 常州, 213022; 2. 宝钢集团中央研究院, 上海, 200431)

**摘要:** 采用不同焊接电流对 X80 管线钢板进行水下湿法焊接, 同时利用 175 A 电流下陆地焊接试验进行对比, 获得了焊接电流对水下湿法焊接接头的显微组织、硬度分布、温度场和残余应力分布的影响规律。结果表明, 相同的电流条件下, 水下焊接接头的显微组织类型和构成与陆上焊接接头不同, 焊缝的显微组织主要为先共析铁素体、粒状贝氏体、条状贝氏体和针状铁素体, 粗晶热影响区的显微组织主要为条状贝氏体和少量粒状贝氏体; 水下湿法焊接接头比陆地焊接接头具有更高的硬度、冷却速度和残余应力水平。水下湿法焊接接头具有较高的残余应力水平, 175 ~ 205 A 范围内, 随着焊接电流增加, 焊缝中侧板条铁素体和针状铁素体数量有所增加, 焊接接头最高硬度、等效残余应力峰值和纵向残余应力峰值略有下降。

**创新点:** 实现了 X80 管线钢的水下湿法焊接, 得到了焊接电流对水下焊接接头显微组织和残余应力分布规律的影响。

**关键词:** 水下湿法焊接; 多道焊; 温度场; 应力场

**中图分类号:** TG 404

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20230321001

## 0 序言

近年来, 由于世界范围内对石油天然气需求的快速增长, 海洋油气资源 (尤其是深海油气资源) 已成为全球油气勘探和开发的重点领域, 海洋管道建设也得到快速发展<sup>[1-2]</sup>。随着海洋油气开采深度不断增加, 海洋油气输送管线用钢强度级别不断提高。目前, 国内外海洋管线用钢的强度等级已达到 X70 级, X80 级管线钢将成为未来海洋管线建设的主要用钢。海洋管线工程建设质量与焊接技术可靠性密不可分, 海洋管线钢水下焊接方法和工艺的开发对海底管道的铺设和维护具有重要意义。

水下湿法焊接技术具有设备简单、操作简便、成本低廉等优点, 广泛应用于核电设备、舰船、采油平台、海洋管道等海洋工程结构件的建造和维护。近年来, 学者针对水下湿法焊接进行了一定的研究。Li 等人<sup>[3]</sup>研究了焊接热输入对 E40 钢药芯焊丝水下湿法焊接质量的影响, 发现采用中等热输入 (22 ~ 25 kJ/cm) 可以获得优良的电弧稳定性和力学

性能。Klett 等人<sup>[4]</sup>研究了水深对 S235 JR 结构钢水下湿法焊接接头中氢含量的影响, 发现随着水深增加, 接头中残余氢含量增加、扩散氢含量下降。李志刚等人<sup>[5]</sup>研究了气泡声信号变化, 通过气泡演变行为分析水下湿法焊接电弧燃烧的特性。Xing 等人<sup>[6]</sup>对药芯焊丝水下湿法焊接的熔滴过渡和电弧行为进行了数值模拟研究, 发现电弧位于熔滴的底部, 熔滴体积增加时电弧温度下降。赵博等人<sup>[7]</sup>研究了水深和流速对水下湿法焊接热过程的影响, 发现水深增加导致等温线的形状变得窄而深, 流速增加导致等温面所包括的体积明显变小。目前为止, 针对水下湿法焊接的研究主要集中于焊接材料、焊接工艺、环境因素 (水深、流速) 等对焊接质量的影响, 以及水下焊接熔滴过渡、电弧特征和温度场的研究, 而对水下湿法焊接结构的应力分析则十分匮乏。因此对高强管线钢水下湿法焊接过程的温度场以及结构的残余应力分布进行研究, 对促进高强度钢在水下湿法焊接领域的应用具有重要的理论指导意义。

文中对板厚为 18.4 mm 的 X80 管线钢进行了水下湿法焊接, 利用 ABAQUS 软件对其多道多层焊的焊接温度场及应力场进行了数值计算。同时采用陆上干法焊接试验进行对比研究, 分析水下湿法焊接接头的显微组织、焊接过程的热循环和焊接残

余应力分布特征, 研究结果为管线钢水下湿法焊接工艺的优化提供理论依据和数据支持。

## 1 试验方法

为了深入分析陆上焊接和水下焊接的焊接接头的差异, 分别进行了 1 组陆上干法焊接和 3 组水下湿法焊接试验。母材采用  $250\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times$

$18.4\text{ mm}$  的 X80 管线钢板,  $A_{c1}$  和  $A_{c3}$  分别为  $695\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $855\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 每 2 块钢板为一组进行对接焊, 采用  $30^{\circ}\text{ V}$  形坡口, 钝边高度和坡口间隙均为  $2\text{ mm}$ 。陆上和水下焊接均采用 BROCO Softouch E7014 水下焊条, 打底焊用焊条直径为  $3.2\text{ mm}$ , 填充焊和盖面焊用焊条直径为  $4.0\text{ mm}$ 。水下焊接试验时的环境温度和水温均为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 水深为  $1\text{ m}$ 。X80 钢和焊条的化学成分见表 1。焊接工艺参数见表 2。

表 1 X80 钢和焊条的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of X80 pipeline steel and electrodes

材料	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Fe
X80 钢	0.030	0.207	1.650	0.008	0.002	0.265	0.022	0.250	0.190	余量
焊条	0.072	0.245	1.185	0.012	0.002	0.025	0.024	0.023	0.005	余量

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

试样编号	焊接状态	层间温度 $T_{\text{I}}/^{\circ}\text{C}$	焊接电流 $I/\text{A}$	电弧电压 $U/\text{V}$	焊接速度 $v/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$
D <sub>1</sub>	陆上	20	175	27	18
W <sub>1</sub>	水下	20	175	27	18
W <sub>2</sub>	水下	20	190	27	18
W <sub>3</sub>	水下	20	205	27	18

采用 JEOL JSM6510 扫描电子显微镜对焊接接头不同部位的显微组织进行观察, 采用 OLYMPUS SZ61 体视显微镜对盖面焊热影响区 (heat-affected zone, HAZ) 宽度进行测量。采用华银 HV-1000 显微硬度计对焊接接头进行显微维氏硬度测试, 选用  $1.96\text{ N}$  载荷, 加载时间为  $15\text{ s}$ 。采用西格玛 ASMB6-60 应力应变仪基于小孔法对焊件上表面的残余应力进行测试。

## 2 有限元分析

### 2.1 几何建模

利用 ABAQUS 有限元软件, 对 X80 管线钢在陆上和水下 2 种环境下 4 组焊件的焊接过程进行数值模拟, X80 管线钢热物理性能参数和力学性能参数参照文献 [8] 中数据进行设置。首先依据各焊件每道焊缝 (weld metal, WM) 的熔池形貌参数, 建立 4 组三维有限元模型。D<sub>1</sub> 试样的三维模型建立 4 层共 4 道焊缝, W<sub>1</sub> 试样的三维模型建立 4 层共

7 道焊缝, W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 试样的三维模型均建立 4 层共 6 道焊缝。图 1 为 W<sub>1</sub> 试样的三维有限元网格模型。

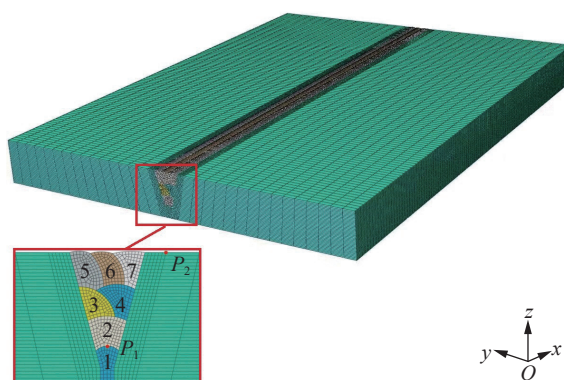


图 1 试样 W<sub>1</sub> 的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the specimen W<sub>1</sub>

采用 DC3D8 单元对三维模型进行温度场计算, 之后采用 C3D8R 单元在温度场计算结果的基础上进行应力场的顺序耦合计算。

### 2.2 热源模型

对于陆上干法焊接和水下湿法焊接, 由于焊件均开  $30^{\circ}\text{ V}$  形坡口, 受坡口角度的限制, 打底、填充

和盖面焊的各道焊缝的熔深较大,故采用双椭球热源模型以体现电弧对熔池的搅拌作用<sup>[9]</sup>.在 ABAQUS 软件中,通过程序二次开发将双椭球热

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Qf_f \sin\beta \sin\gamma}{\pi a_f b c \cos\theta \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{3x^2}{a_f^2 \cdot \sin\beta^{-2}} - \frac{3y^2}{b^2 \cdot \sin\gamma^{-2}} - \frac{3z^2}{c^2 \cdot \sin\theta^{-2}}\right] \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Qf_r \sin\beta \sin\gamma}{\pi a_r b c \cos\theta \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{3x^2}{a_r^2 \cdot \sin\beta^{-2}} - \frac{3y^2}{b^2 \cdot \sin\gamma^{-2}} - \frac{3z^2}{c^2 \cdot \sin\theta^{-2}}\right] \quad (2)$$

式中: $f_f$ 和 $f_r$ 分别为热源前、后部分的能量分配比例,满足 $f_f + f_r = 2$ ;  $Q$ 为热输入,  $Q = \eta UI$ ,  $\eta$ ,  $U$ ,  $I$ 分别为热效率、电弧电压和焊接电流;  $a_f$ 和 $a_r$ 分别为熔池长度方向的参数;  $b$ 为 1/2 熔宽;  $c$ 为熔深;  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$ 分别为  $x$ ,  $y$ ,  $z$  三个方向和电弧主轴的夹角。

### 2.3 边界条件

对于热边界条件,对流、辐射热流密度<sup>[11]</sup>分别为

$$q_{\text{conv}} = h(T - T_0) \quad (3)$$

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (4)$$

式中: $q_{\text{conv}}$ 为对流热;  $h$ 为对流换热系数;  $T$ 为焊件表面温度;  $T_0$ 为环境温度;  $q_{\text{rad}}$ 为辐射热;  $\varepsilon$ 为热辐射系数;  $\sigma$ 为 Stefan-Boltzmann 常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

空气自然对流条件下,对流换热系数  $h$  为 5 ~ 25  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ <sup>[7]</sup>; 水的自然对流条件下,  $h$  为 200 ~ 1 000  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ , 文中陆地干法焊接计算用  $h$  取 20  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ , 对于水下湿法焊接,  $h$  取 250  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。

源模型进行公式编译,根据焊道具体尺寸参数在子程序中对热源模型参数进行调整.双椭球热源的热流密度函数为<sup>[10]</sup>

热辐射系数  $\varepsilon$  为材料的属性参数,受环境的影响不大,两种焊接条件下均取 0.8。

## 3 结果与讨论

### 3.1 显微组织

为研究焊接工艺参数对接头显微组织的影响,对陆上干法焊接试样  $D_1$  和 水下焊接试样  $W_1$ ,  $W_3$  盖面焊缝的显微组织进行分析.不同焊接条件下接头的显微组织如图 2 所示.可以看出,陆上干法焊接试样  $D_1$  的焊缝显微组织主要由先共析铁素体 (proeutectoid ferrite, PF)、侧板条铁素体 (ferrite side plate, FSP) 和较多的针状铁素体 (acicular ferrite, AF) 组成,其粗晶热影响区 (coarse grained heat affected zone, CGHAZ) 显微组织主要由较多的粒状贝氏体 (granular bainite, GB) 和少量的条状贝氏体 (lath bainite, LB) 组成.对于试样  $W_1$ ,焊缝显微组织由 PF, GB, LB 和 AF 组成,相比试样  $D_1$ ,由

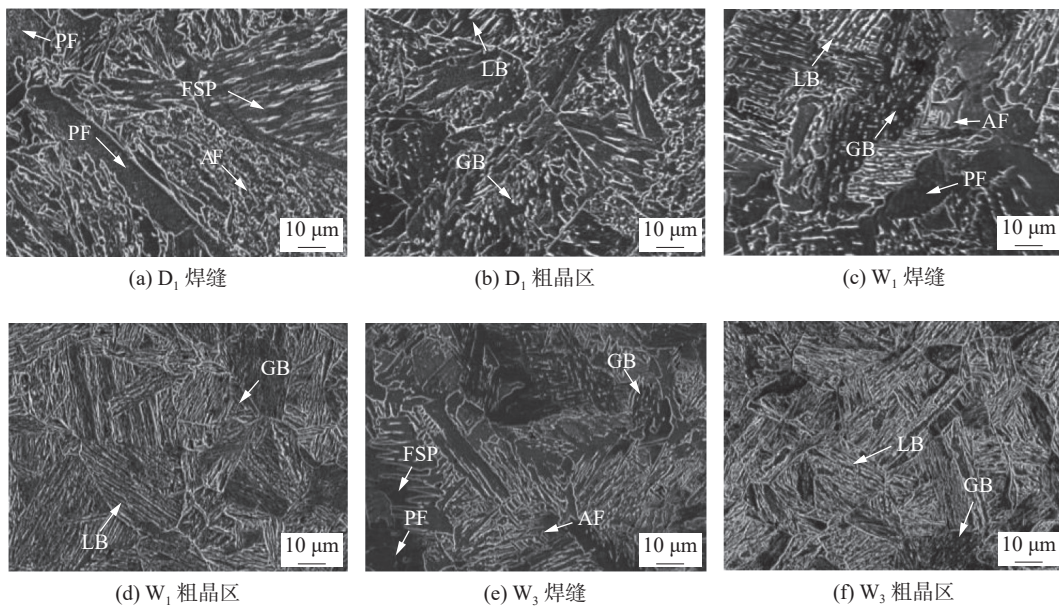


图 2 不同焊接条件下接头的显微组织

Fig. 2 Microstructures of joints under different welding conditions. (a)  $D_1$  WM; (b)  $D_1$  CGHAZ; (c)  $W_1$  WM; (d)  $W_1$  CGHAZ; (e)  $W_3$  WM; (f)  $W_3$  CGHAZ



于水环境的存在, 冷却速度更大, 焊缝显微组织中出现了较多的 GB 和一定量的 LB, AF 数量明显减少; CGHAZ 显微组织为大量的 LB + 少量的 GB, LB 的贝氏铁素体板条细长、平直. 对于焊接电流更大的水下焊接试样  $W_3$ , 焊缝显微组织由 PF、FSP、GB 和 AF 组成, 由于焊接热输入增加, 相对试样  $W_1$ , 其 FSP 和 AF 数量更多, GB 含量较少; CGHAZ 的显微组织也是由 LB + GB 组成, 但 GB 数量相比  $W_1$  试样有所增加.

### 3.2 硬度结果

4 组焊接接头的硬度分布如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 4 组焊接接头的最高硬度均出现在熔合线附近的粗晶热影响区位置. 水下焊接试样中的最高硬度高于陆上焊接接头, 这是因为水下焊接冷却速度较大, 其接头的 CGHAZ 含有大量的 LB 和少量 GB, 而陆上焊接接头 CGHAZ 显微组织则主要为 GB. 相对于 GB, LB 的形成温度更低, 其板条铁素体宽度小, 板条铁素体内具有大量高密度位错, 可以获得更高的强度和硬度水平<sup>[12]</sup>. 在水下焊接试验组中, 随着焊接电流的增大, 焊接接头最高硬度有所下降; 试样  $W_1$  的硬度水平最高, 最高硬度为 324 HV, 接近 DNV-OS-F101 规定的非酸性条件下最高硬度 325 HV.

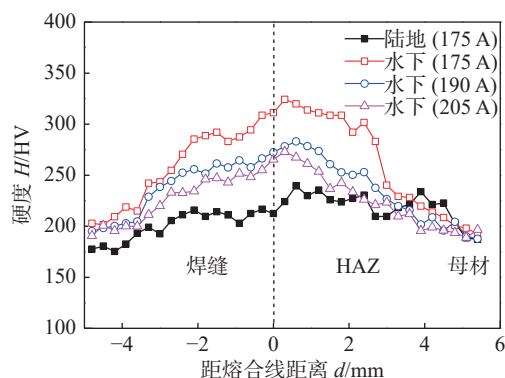


图 3 硬度分布

Fig. 3 Hardness distribution

### 3.3 温度场计算结果

图 4 为水下焊接试样  $W_1$  焊缝填充过程的温度场云图. 可以看出, 当焊接过程进入稳定状态后, 打底焊道的最高温度为 2 134 °C, 第 3 道 (填充 2 层第 1 道) 焊接的最高温度为 2 383 °C, 第 7 道 (盖面层第 3 道) 焊接的最高温度为 2 288 °C. 由焊接熔池的尺寸可以看出, 温度场计算结果较为合理, 可以实现母材与焊缝的熔合.

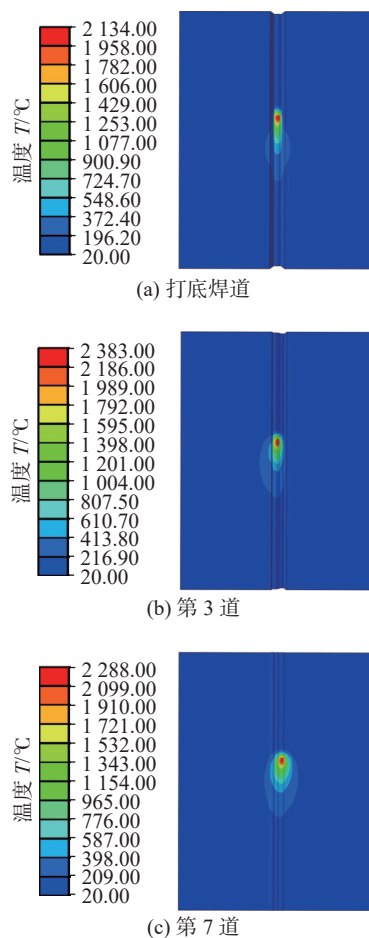


图 4 试样  $W_1$  焊接温度场云图

Fig. 4 Welding temperature field of specimen  $W_1$ . (a) root pass; (b) 3<sup>rd</sup> pass; (c) 7<sup>th</sup> pass

为了研究焊接环境和焊接电流对焊接热循环曲线的影响, 取陆上干法焊接试样  $D_1$  和水下焊接试样  $W_1$ ,  $W_3$  打底焊道上表面中心线上一点  $P_1$  和离熔合线 3 mm 一点  $P_2$  (图 1), 得到 3 个试样的热循环曲线 (图 5).

由图 5 中热循环曲线可见, 对应焊道数量, 试样  $D_1$ 、 $W_1$  和  $W_3$  的热循环曲线分别出现 4, 7 和 6 个峰. 相同的焊接电流下, 由于水环境的影响, 水下焊接试样的冷却速度大于陆地焊接试样, 点  $P_1$  和点  $P_2$  的热循环冷却速度均大于陆地焊; 水下焊接试样  $W_1$  的点  $P_1$  一次热循环峰值温度 (1 804.8 °C) 明显低于陆上干法焊接试样  $D_1$  的峰值温度 (2 018.7 °C). 对于点  $P_2$ , 水下焊条件下点  $P_2$  温度更低, 陆上干法焊接试样  $D_1$  在第 4 道时热循环出现最高峰值温度 (893.9 °C), 而水下焊接试样  $W_1$  上点  $P_2$  在第 7 道时热循环出现最高峰值温度 (501.4 °C).

水下焊接条件下, 增加焊接电流至 205 A 时, 点  $P_1$  的一次热循环峰值温度上升至 1 882.2 °C,

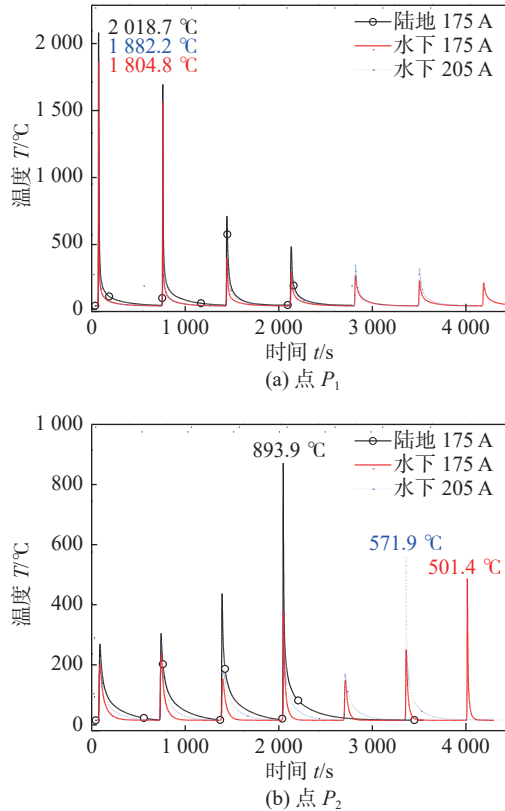
图5 点  $P_1$  和点  $P_2$  的热循环曲线

Fig. 5 Thermal cycles at P1 and P2. (a) P1; (b) P2

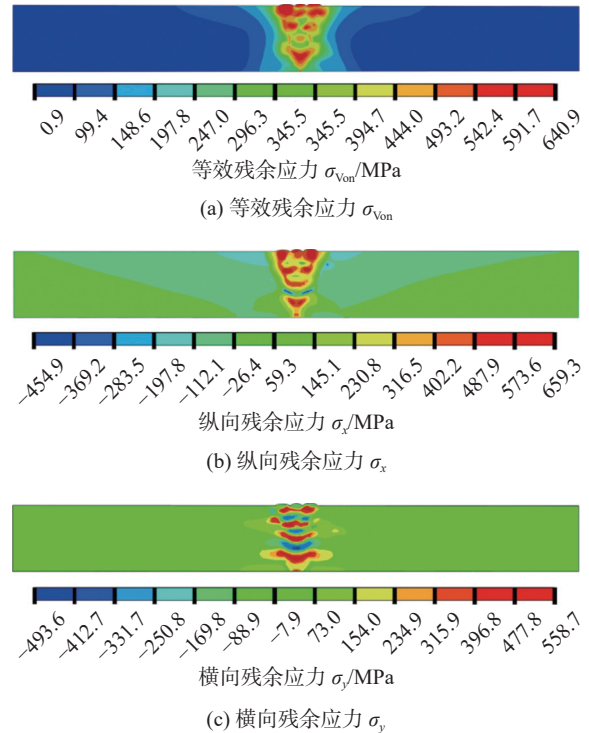
点  $P_2$  热循环曲线最高峰值温度上升至 571.9 °C, 但低于  $A_{c1}$ ; 相对于试样  $W_1$  的热循环曲线, 焊后冷却速度有所降低。  $W_1$ ,  $W_2$  和  $W_3$  组试样盖面焊道 HAZ 宽度分别为 2.07, 2.16 和 2.31 mm, 远小于陆地焊接试样  $D_1$  的 HAZ 宽度 (4.42 mm), 可见离熔合线 3 mm 处的点  $P_2$  处于热影响区以外, 故第 7 道热循环峰值温度已降到  $A_{c1}$  以下, 计算结果合理。

### 3.4 应力场计算结果

以 175 A 电流水下焊接试样  $W_1$  为例, 其横截面残余应力分布如图 6 所示。 4 组焊件上表面在 1/2 焊件长度处的残余应力分布如图 7 所示。

由图 6 可以看出, 水下 175 A 焊接试样  $W_1$  的等效残余应力  $\sigma_{von}$  在焊缝和 HAZ 部位出现了较大的应力集中, 峰值达到 640.9 MPa。 纵向残余应力  $\sigma_x$  在焊缝和热影响区部位出现了较高的拉应力, 峰值拉应力达到 659.3 MPa。 横向残余应力  $\sigma_y$  在板厚方向出现了应力性质的变化, 峰值拉应力出现在焊缝, 达到 558.7 MPa。

由图 7 看出, 4 组焊接试样上表面  $\sigma_{von}$  均在焊缝及 HAZ 表现出较高的应力水平, 水下 175 A 焊接试样  $W_1$  的  $\sigma_{von}$  峰值 (589.8 MPa) 高于陆地干

图6 试样  $W_1$  横截面残余应力分布Fig. 6 Residual stress distribution in the cross section of specimen  $W_1$ . (a)  $\sigma_{von}$ ; (b)  $\sigma_x$ ; (c)  $\sigma_y$ 

法 175 A 焊接试样  $D_1$  (559.3 MPa); 随着焊接电流增加, 水下焊接试样的  $\sigma_{von}$  峰值应力略有下降。 4 组焊接试样的纵向残余应力  $\sigma_x$  在 HAZ 部位表现出高值拉应力, 水下 175 A 焊接试样  $W_1$  的峰值拉应力值 (573.4 MPa) 最高, 高于陆地干法焊接试样  $D_1$  (557.9 MPa); 随着焊接电流增加, 水下焊接试样的  $\sigma_x$  峰值拉应力略有下降。 4 组焊接试样上表面的横向残余应力  $\sigma_y$  水平较低, 对于陆地干法焊接试样  $D_1$ ,  $\sigma_y$  在焊缝出现较低水平的拉应力值; 但对于 3 组水下焊接试样, 由于焊件上部有一定的水层, 上表面受到指向内部的压力,  $\sigma_y$  在上表面焊缝呈现出较低水平的压应力值, 随着焊接电流增加, 峰值压应力略有下降。 由图 7 还可以看出, 水下 175 A 焊接试样中, 小孔法测得的残余应力  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  在数值和分布规律上和计算结果较为接近, 有限元计算结果较为合理。

### 3.5 讨论

可以看出, 相同焊接电流下, 水下焊接试样  $W_1$  的冷却速度远大于陆地焊接试样  $D_1$ , 因此焊缝中出现了转变温度较低的 GB 和 LB, 而转变温度较高的 AF、PF 和 FSP 数量较少; 对于 CGHAZ, 由于冷却速度大、高温停留时间较短, 试样  $W_1$  的

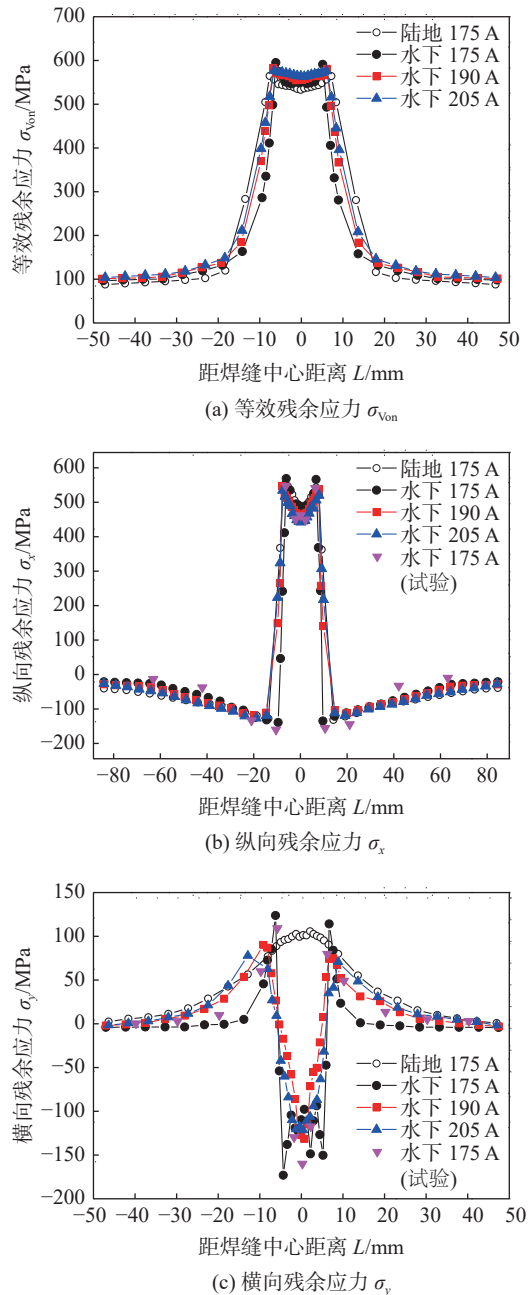


图 7 4 组试样残余应力在宽度方向的分布

Fig. 7 Residual stress distribution in four specimens along the width direction. (a)  $\sigma_{von}$ ; (b)  $\sigma_x$ ; (c)  $\sigma_y$

晶粒尺寸明显小于  $D_1$ , 且显微组织中 LB 数量相对较多, GB 数量相对较少, 因此硬度高于陆地焊接试样。

温度场计算结果表明, 相同焊接电流下, 水下焊接试样  $W_1$  上 P1、P2 点的冷却速度大于陆地焊接试样  $D_1$ ; 水下焊接条件下电弧被压缩, 加热范围和 HAZ 宽度小于陆地焊接试样  $D_1$ , 具有较大的温度梯度, 因此焊件内等效残余应力峰值高于陆地焊接试样  $D_1$ 。当焊接电流从 175 A 增加至 205 A 时, 焊件的冷却速度有所下降, 温度梯度减小, 因此水

下焊试样中等效残余应力峰值有所下降。

## 4 结论

(1) 水环境焊接对焊接接头的显微组织分布具有很大的影响。175 A 电流下, X80 管线钢陆地焊接试样中, 焊缝的显微组织主要为粗大的 PF, FSP 和较多的 AF, CGHAZ 的显微组织为粗大的 GB 和少量的 LB。水下湿法焊接试样中, 焊缝显微组织相对较细, 为 PF, GB, LB 和 AF, CGHAZ 组织为较多的 LB 和少量的 GB。

(2) 水下焊接试样中的最高硬度高于地上焊接接头, 采用 175 A 电流的水下焊接试样硬度水平最高, 最高硬度为 324 HV。

(3) 采用 175 A 电流时, 水下焊接试样的冷却速度大于陆地焊接试样, 等效残余应力  $\sigma_{von}$  最大值和纵向残余应力  $\sigma_x$  峰值拉应力高于陆地焊接试样。

(4) X80 管线钢水下焊接试样具有较高的残余应力水平, 纵向残余应力  $\sigma_x$  在焊缝和热影响区部位出现了较高的拉应力, 横向残余应力  $\sigma_y$  的峰值拉应力出现在焊缝。在 175 ~ 205 A 范围内增大焊接电流, 水下湿法焊接接头的等效残余应力  $\sigma_{von}$  最大值和纵向残余应力  $\sigma_x$  峰值拉应力有所下降, 横向残余应力  $\sigma_y$  的峰值压应力略有降低。

## 参考文献

- [1] Fu C W, Nian T K, Guo X S, *et al.* Investigation on responses and capacity of offshore pipelines subjected to submarine landslides[J]. Applied Ocean Research, 2021, 117: 102904.
- [2] Xia Peipei, Yang Liuqing, Wu Linen, *et al.* Thermal simulation of single thermal cycle for high strength steel pipe[J]. China Welding, 2022, 31(4): 59 – 66.
- [3] Li H L, Liu D, Yan Y T, *et al.* Effects of heat input on arc stability and weld quality in underwater wet flux-cored arc welding of E40 steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 833 – 843.
- [4] Klett J, Hecht-Linowitzki V, Grünzel O, *et al.* Effect of the water depth on the hydrogen content in SMAW wet welded joints[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(7): 1269.
- [5] 李志刚, 祝林, 黄卫, 等. 水下湿法药芯焊丝焊接气泡动态演变与其声脉冲分析 [J]. 焊接学报, 2021, 42(4): 36 – 41.

- Li Zhigang, Zhu Lin, Huang Wei, *et al.* Study on dynamic evolution and acoustic pulse of bubbles in underwater welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(4): 36 – 41.
- [6] Xing C J, Jia C B, Han Y F, *et al.* Numerical analysis of the metal transfer and welding arc behaviors in underwater flux-cored arc welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 153: 119570.
- [7] 赵博, 武传松, 贾传宝, 等. 水深和流速对水下湿法焊接热过程影响的数值模拟 [J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 55 – 58.
- Zhao Bo, Wu Chuansong, Jia Chuanbao, *et al.* Numerical simulation of influence of water depth and flowing speed on thermal process of underwater wet welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(8): 55 – 58.
- [8] Yan C Y, Liu C Y, Yan B. 3D modeling of the hydrogen distribution in X80 pipeline steel welded joints[J]. Computational Materials Science, 2014, 83: 158 – 163.
- [9] Pan J J, Yang L J, Hu S S, *et al.* Numerical analysis of thermal cycle characteristics and prediction of microstructure in multi-pass UWW[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5-8): 1095 – 1102.
- [10] 严春妍, 张浩, 朱子江, 等. X80 管线钢多道激光-MIG 复合焊残余应力分析 [J]. 焊接学报, 2021, 42(9): 28 – 34, 41.
- Yan Chunyan, Zhang Hao, Zhu Zijiang, *et al.* Analysis of welding residual stress in multi-pass hybrid laser-MIG welded X80 pipeline steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(9): 28 – 34, 41.
- [11] Singh B, Singhal P, Saxena K K, *et al.* Influences of latent heat on temperature field, weld bead dimensions and melting efficiency during welding simulation[J]. Metals and Materials International, 2021, 27: 2848 – 2866.
- [12] 林乙丑, 张彦敏, 张广威, 等. 1.25Cr0.5MoSiNb 钢过冷奥氏体连续冷却转变 [J]. 材料热处理学报, 2021, 42(1): 119 – 125.
- Lin Yichou, Zhang Yanmin, Zhang Guangwei, *et al.* Continuous cooling transformation of supercooled austenite of 1.25Cr0.5MoSiNb steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(1): 119 – 125.
- 
- 第一作者:** 严春妍, 博士, 副教授; 主要从事金属材料焊接性及先进焊接技术的科研和教学工作; Email: yancy\_hhu@163.com.

(编辑: 周珍珍)