

DOI: 10.19666/j.rlfed.202404088

# 水电工程 1 000 MPa 等级超高强钢埋弧 自动焊接头显微组织及力学性能研究

司广全<sup>1</sup>, 李太江<sup>2</sup>, 李巍<sup>2</sup>, 孙琦<sup>2</sup>

(1. 华能国际电力股份有限公司, 北京 100031; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**[摘要]** 为研究水电工程 1 000 MPa 等级超高强钢埋弧焊接接头的显微组织及力学性能特征, 通过扫描电子显微镜表征了焊接接头不同区域的显微组织, 通过拉伸试验、冲击试验和弯曲试验测定了焊接接头的力学性能。研究表明: 打底焊道和填充焊道焊缝金属由柱状晶、树枝晶以及等轴晶组成, 组织多为针状铁素体和少量粒状贝氏体; 热影响区形成了多个典型区域, 靠近熔合线沿厚度方向上分别出现了临界粗晶区和粗晶区; 远离焊缝出现了细晶区和临界区, 组织多为粒状贝氏体、M-A 组元和板条马氏体; 盖面焊道焊缝金属为典型的柱状晶, 组织主要为针状铁素体; 热影响区包含了粗晶区、细晶区、临界区和亚临界区, 由于没有后续焊道, 未形成临界粗晶区, 组织主要为板条马氏体、粒状贝氏体及 M-A 组元; 焊接接头的平均抗拉强度达到 980 MPa 等级, 在焊缝区和热影响区-40 °C 低温冲击吸收能量分别为 118.7、149.3 J (T/4 部位) 和 67.0、154.0 J (T/2 部位), 横向侧弯未出现裂纹。

**[关键词]** 埋弧焊接接头; 扫描电镜; 显微组织; 力学性能

**[引用本文格式]** 司广全, 李太江, 李巍, 等. 水电工程 1 000 MPa 等级超高强钢埋弧自动焊接头显微组织及力学性能研究[J]. 热力发电, 2024, 53(11): 47-55. SI Guangquan, LI Taijiang, LI Wei, et al. Microstructure and mechanical properties of 1 000 MPa grade ultra-high-strength steel submerged arc welding joints in hydropower engineering[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 47-55.

## Microstructure and mechanical properties of 1 000 MPa grade ultra-high-strength steel submerged arc welding joints in hydropower engineering

SI Guangquan<sup>1</sup>, LI Taijiang<sup>2</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, SUN Qi<sup>2</sup>

(1. Huaneng Power International, Inc., Beijing 100031, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To investigate the microstructural and mechanical properties of 1 000 MPa grade ultra-high strength steel submerged arc welding welded joints for hydroelectric engineering, the microstructure of different regions of the welded joint was characterized using scanning electron microscopy (SEM). Mechanical properties of the welded joint were determined through tensile testing, impact testing, and bending testing. The results reveals that, the weld metal of the root pass and fill passes is composed of columnar, dendritic, and equiaxed grains, with a microstructure dominated by acicular ferrite and a small amount of granular bainite. The heat-affected zone (HAZ) exhibits multiple typical regions, including a critical coarse grain zone and a coarse grain zone near the fusion line along the thickness direction. Away from the weld, fine grain zones and critical zones are observed, with a microstructure primarily consisting of granular bainite, M-A constituents, and lath martensite. The weld metal of the cap pass exhibits typical columnar grains with a microstructure primarily composed of acicular ferrite. The HAZ of the cap pass includes coarse grain, fine grain, critical, and subcritical zones. Due to the absence of subsequent welding passes, no critical coarse grain zone is formed, and the microstructure is primarily

收稿日期: 2024-04-02

第一作者简介: 司广全 (1969), 男, 正高级经济师, 主要研究方向为电力建设质量控制技术, gq\_si@chng.com.cn.

通信作者简介: 李巍 (1979), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为材料加工工程, liwei@tpri.com.cn.

composed of lath martensite, granular bainite, and M-A constituents. The average tensile strength of the welded joint reaches 980 MPa grade, the low-temperature impact absorption energy of the weld zone and the HAZ at  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  is 118.7 J and 149.3 J (at  $T/4$ ), 67.0 J and 154.0 J (at  $T/2$ ), respectively. No cracks appear in the lateral bending.

**Key words:** submerged arc welded joints; SEM; microstructure; mechanical property

水电作为可再生清洁能源,在我国实现“碳达峰、碳中和”目标和调整能源结构的发展进程中具有极其重要的地位<sup>[1-3]</sup>。随着高水头、大容量的大型水电站规划与大规模的抽水蓄能水电站建设,对水电用(超)高强钢的性能指标也提出了更严格的要求。为满足设计安全的要求,受制于钢材强度等级较低,一些大型甚至超大型水电站的压力钢管等设备构件在建设中不得不采用大壁厚设计,存在运输困难、焊接工程量大、施工难度大等问题<sup>[4-8]</sup>。因此,国内外在 800 MPa 等级水电用钢的基础上,开展了 1 000 MPa 等级超高强钢的开发及焊接技术研究,以期满足高水头水电站建设需要<sup>[9-14]</sup>。然而,1 000 MPa 等级水电用钢因其裂纹敏感性高、可焊性差、焊接接头强韧匹配难,成为制约超高强钢在水电工程现场工程化应用的行业难题<sup>[15-17]</sup>,对于 1 000 MPa 水电超高强钢的现场焊接应用目前鲜有报道。

针对高强钢焊接接头的研究,通常会选择单道焊道或局部区域的组织变化来描述整体的组织性能<sup>[18-25]</sup>。然而,实际焊接条件下,往往需要采用多层多道焊工艺来实现厚板焊接。多层多道焊工艺过程中存在复杂的热循环,后焊焊道起再热回火作用,显著影响焊接接头的组织形态。同时,冲击、

拉伸、弯曲等试样均由多层多道焊的熔敷金属构成<sup>[26-28]</sup>。有必要细分不同焊道组织构成,以完整反映焊接接头组织类型和数量变化对力学性能的影响。同时,1 000 MPa 超高强水电工程用钢不稳定的焊接性能导致多层多道焊对其影响更显著。

埋弧自动焊因其焊接质量易于控制并且具有较高的生产效率,是水电站压力钢管现场规模化制作安装的重要手段。本文选用手工电弧焊打底+埋弧自动焊填充盖面的焊接方法,焊接出了 1 000 MPa 超高强度水电钢接头,其力学性能符合相关技术要求,并研究分析了水电工程 1 000 MPa 等级超高强钢焊接接头不同微区的显微组织特点和力学性能,为 1 000 MPa 等级水电用钢现场焊接安装提供参考,同时为 1 000 MPa 级水电用钢的性能优化和进一步工程应用提供理论支撑。

## 1 试验材料及方法

本文试验母材选用国内某钢铁企业针对水电工程特点开发的 1 000 MPa 等级超高强钢,板厚  $T$  为 40 mm,供货状态为调质处理(淬火+高温回火),其化学成分见表 1,力学性能见表 2,母材的显微组织如图 1 所示。由图 1 可知,母材组织为回火索氏体。

表 1 试验超高强钢的化学成分(上限值)

单位: w/%

Tab.1 Chemical composition of the experimental ultra-high strength steel

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Nb	Ti	B
质量分数	0.14	0.35	1.20	0.007	0.003	2.50	0.80	0.80	0.10	0.40	0.12	0.03	0.003

表 2 试验超高强钢的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of the experimental ultra-high strength steel

性能	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	延伸率 $A/\%$	断面收缩率 $Z/\%$	屈强比/ $\%$	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收能量/J
数值	947	988	19.5	71	95.9	124

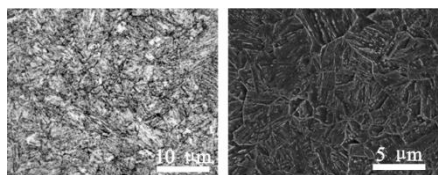


图 1 母材的金相组织

Fig.1 Metallographic structure of the base metal

焊材选择综合考虑化学成分、强度等级和韧性匹配等因素,选用国内某焊材厂生产的水工专用 1 000 MPa 等级埋弧自动焊焊丝和焊剂,型号规格分别为焊丝 S83A4U FB-SUG ( $\Phi 4.0\text{ mm}$ ) 和碱性焊剂 SA FB 1 (颗粒度为 0.25~2.00 mm)。埋弧焊焊丝的化学成分和熔敷金属力学性能见表 3 和表 4。

表 3 埋弧焊丝化学成分  
Tab.3 Chemical composition of welding material

单位: w/%

	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu
焊丝	0.10	1.85	0.32	0.003	0.006	0.50	3.11	0.78	0.05
熔敷金属	0.05	2.11	0.31	0.004	0.006	0.55	3.54	0.71	0.05

表 4 熔敷金属力学性能 (焊态)

Tab.4 Mechanical properties of deposited metal (as welded)

性能	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	延伸率 A/%	-40 °C 冲击吸收能量/J
数值	869	961	19.5	89

化学成分方面上, 该焊材与母材具有相同的成分体系, 低的碳质量分数能够减少焊缝裂纹的产生, 熔敷金属 S、P 质量分数均较低, 能够尽量避免对韧性的危害, 更高的 Ni 质量分数能够改善焊缝金属的韧性。强度方面, 焊材与母材为等强度匹配, 因为母材强度较高, 等强匹配在保证接头强度的同时, 更易于实现强度和韧性的合理匹配。

焊接试件选用尺寸为 40 mm×200 mm×600 mm (轧向) 的钢板, 为方便研究焊缝中心的组织性能, 焊接坡口形式设计为对称 X 型坡口, 坡口角度 55°, 不留钝边。焊接采用对接接头, 平焊位置施焊, 焊接坡口及焊道示意如图 2 所示。

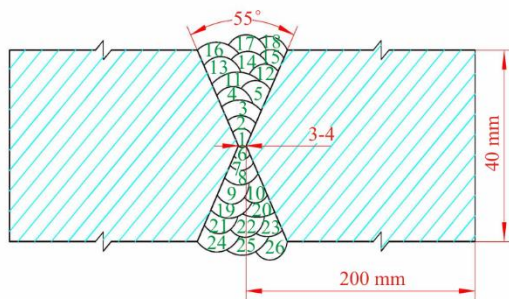


图 2 焊接坡口及焊道示意  
Fig.2 Schematic diagram of weld groove and weld bead

综合考虑焊件成分厚度、相关标准和现场条件等因素, 确定焊接试验的预热温度为 130~150 °C, 层(道)间温度控制在 110~170 °C, 焊后立即采取后热措施, 后热温度定为 250 °C (严格控制在 300 °C 以内), 保温时间 2 h。加热方式采用中频感应加热, 焊缝两侧点焊多个温度测点进行温度控制, 保温方法采用石棉包覆。

焊接工艺参数见表 5, 坡口间隙 3.0~4.0 mm, 焊接极性为直流反接。焊接时为确保根部焊接质量, 采用手工电弧焊打底, 此后采用埋弧焊正反面

交替完成焊接, 以防止焊接变形。

焊接试验结束后对焊接接头进行显微组织观察, 经打磨、抛光后, 采用 4% 的硝酸酒精进行腐蚀, 使用蔡司 Axio Vert.A1 倒置光学显微镜和捷克 TESCAN CLARA 超高分辨场发射扫描电子显微镜进行组织观察。同时, 针对上述埋弧自动焊焊接工艺条件下获得的焊接接头, 按照《《水电水利工程压力钢管制作安装及验收规范》(GB50766—2012) 进行无损检测, 无损检测合格后进行各项力学性能试验。力学性能试验取样前将焊接试板首尾两端各切去 25 mm, 再进行试验取样, 取样形式及位置如图 3 所示。

表 5 焊接工艺参数  
Tab.5 Welding process parameters

焊接方法	焊条(丝)直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm·min <sup>-1</sup> )	热输入/(kJ·cm <sup>-1</sup> )
SMAW	3.2	110	25	130	13
SAW	4.0	500~550	30~35	42~44	20~25

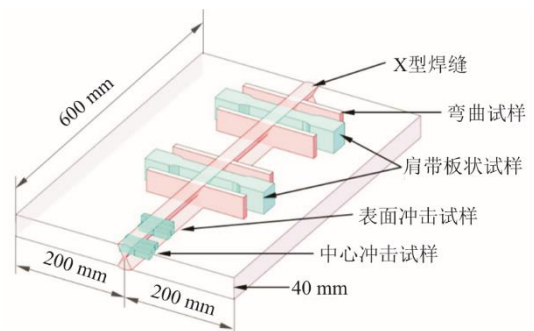


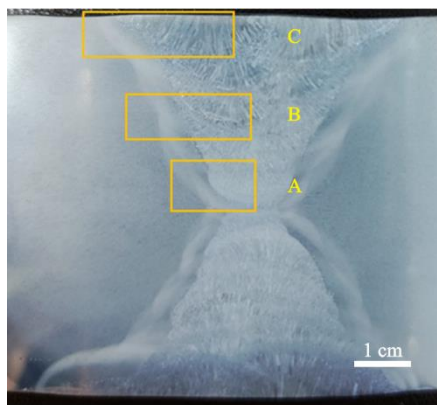
图 3 焊接接头及检测试样取样位置示意  
Fig.3 Schematic diagram of welded joints and sampling points

拉伸试验在 SHT4106 微机控制电液伺服万能试验机上进行, 试样为带肩板状试样, 沿厚度方向将试样线切割为 2 个 20 mm 厚的薄试样, 覆盖全厚度试样。冲击试验试样通过线切割取料后, 再通过

机床制成 10 mm×10 mm×55 mm 的标准 V 型冲击试样, 试验温度为 -40 ℃。低温冲击试验时先将待冲击的试样放置在低温槽中冷却 30 min, 确保冲击试样完全冷透, 再将冷却好的试样放置在试验台上进行冲击试验, 低温槽的冷却液为无水乙醇。冲击试验在 NI500C 冲击试验机上进行。弯曲试验选择横向侧弯试验, 试样厚度为 10 mm, 弯心直径为 40 mm, 在 SHT4106 微机控制电液伺服万能试验机上进行。显微硬度采用 HV1150 数显维氏硬度计测量接头横截面显微硬度  $HV_{10}$ , 测试载荷 10 kg, 保载时间 15 s。

## 2 焊接接头微区组织特征

埋弧焊焊接接头的宏观形貌如图 4 所示。由图 4 可以看出, 本次埋弧焊接采用多层多道双面焊的方法, X 形焊缝轮廓清晰可见。焊接接头由焊缝区、熔合线和热影响区组成, 焊缝组织主要取决于冷却条件以及母材和焊丝的化学成分, 试验用超高强钢属于低合金高强钢, 主要合金元素有 Mn、Ni、Cr、Mo 等, 焊接过程中母材与熔化的焊丝进行充分的冶金结合, 从而发生复杂的相转变, 而热影响区组织在焊接热循环的作用下同样发生了不同程度的组织转变<sup>[18]</sup>。



区域A—T/2处打底焊道; 区域B—T/4处填充焊道; 区域C—盖面焊道。

图 4 焊接接头宏观形貌及表征区域

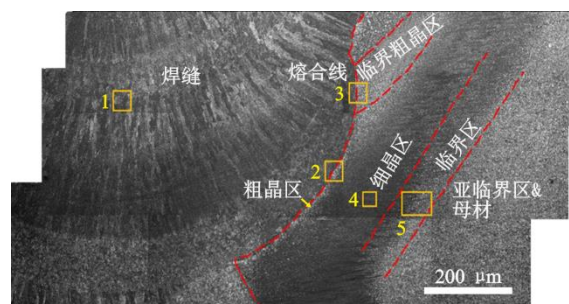
Fig.4 Macroscopic morphology and characterization area of welded joints

为全面分析超高强钢焊接接头不同位置不同微区的显微组织特征, 分别选取 T/2 处打底焊道(图 4 区域 A)、T/4 处填充焊道(图 4 区域 B)和盖面焊道(图 4 区域 C)进行组织观察。同时, 为了更加精确地进行不同区域组织演变和特征分析, 在金相观察结束后, 采用显微维氏硬度在所观察区

域进行打点标记, 方便在 SEM 表征时进行准确定位。

### 2.1 打底焊道显微组织特征

图 5 为焊接接头 T/2 处打底焊道由焊缝中心至熔合线、热影响区和母材的横截面金相图(图 4 区域 A)。由图 5 可以看出, 焊缝金属由柱状晶、树枝晶以及等轴晶组成, 柱状晶垂直于熔合线生长, 这是由于焊缝金属结晶从熔池底部开始, 并沿着温度梯度最大的方向生长。热影响区形成了多个典型区域, 靠近熔合线沿厚度方向上分别出现了粗晶区和临界粗晶区; 远离焊缝出现了细晶区和临界区。经过测量, 埋弧焊接头 T/2 处的粗晶区, 在靠近根部时宽度极小, 约 0.079 mm, 这是因为根部最先焊接, 此时试板初始温度低, 冷却速度最高, 粗晶区温度范围变窄; 而靠近下一焊道处粗晶区较宽, 宽度约为 0.563 mm, 呈现临界粗晶区特征, 这是由于后续焊道的热作用形成的; 细晶区宽度约为 0.656 mm, 临界区宽度约为 0.412 mm。



微区1—焊缝中心; 微区2—熔合线和粗晶区; 微区3—临界粗晶区; 微区4—细晶区; 微区5—临界区。

图 5 焊接接头 T/2 处打底焊道金相照片及表征区域  
Fig.5 Microscopic morphology and characterization area of the bottom bead at T/2 of the welded joint

图 5 中埋弧焊接头 T/2 处打底焊道的不同微区的显微 SEM 组织如图 6 所示。图 6(a)是焊缝中心组织(微区 1), 可以看出组织形貌主要为针状铁素体, 有利于改善焊缝中心金属的强韧性。图 6(b)为熔合线区域组织(微区 2), 熔合线左右两侧组织形貌差别明显。图 6(c)是熔合线左侧焊缝区域组织, 可以看出, 临近熔合线的焊缝区域仍为针状铁素体。紧贴熔合线右侧的狭长粗晶区组织如图 6(d)所示, 其具有粗大的晶粒, 内部为板条马氏体和粒状贝氏体组织, 碳化物含量较少。图 6(e)是熔合线右侧临界粗晶区组织(微区 3), 该区域位于粗晶区靠近下一焊道的位置, 在多层多道焊中热影响区温度位于加热转变临界点温度  $A_{c1}$  到  $A_{c3}$  之间, 在晶界处形成块

状的 M/A 组元，并串联成链，晶内板条束间同样分布有块状的 M/A 组元，由于 M/A 组元在晶界及晶内的分割作用，导致材料韧性明显下降<sup>[29-33]</sup>。图 6f) 是细晶区的组织（微区 4），该区域远离焊缝，峰值温度降低，在焊接过程中被加热到加热转变临界点温度  $A_{c3}$  以上，组织发生完全奥氏体化，但峰值温度尚未达到晶粒快速长大粗化的温度，得到的奥氏体晶粒较小，在冷却过程中形成粒状贝氏体组织。M/A 尺寸细小、形状比较规则，呈块状分布于边界处，形成了细晶区。继续向远离焊缝的区域移动，峰值温度进一步降低，母材只能发生部分重结晶，显微组织由发生重结晶的小晶粒和未发生重结晶的大晶粒组成，形成了图 6g)所示的临界区组织（微区 5）。随着与焊缝的距离继续增大，峰值温度降低至临界温度  $A_{c1}$  以下，该温度范围下母材的组织不产生实质性转变，亚临界区组织与母材相似（图 6h)）。

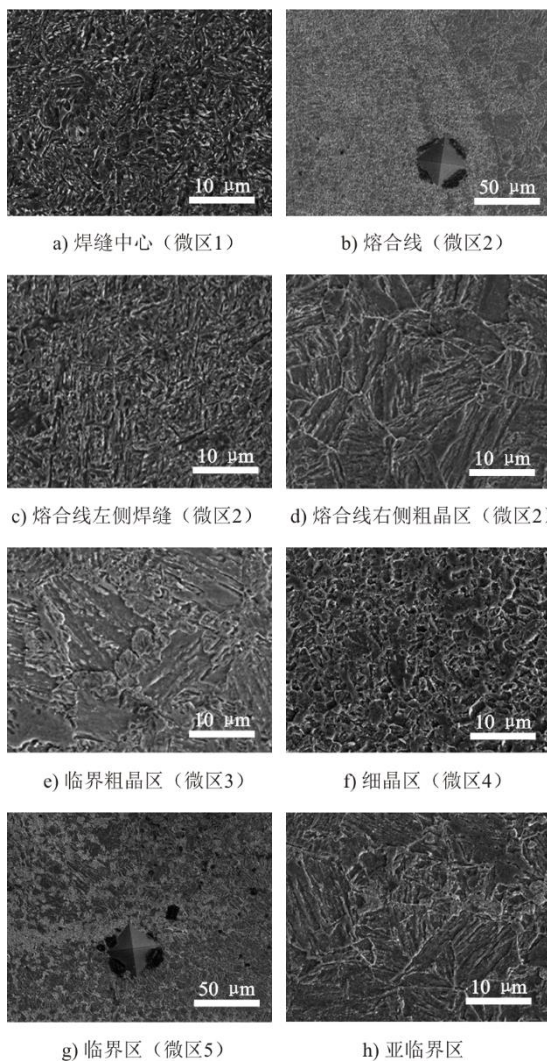


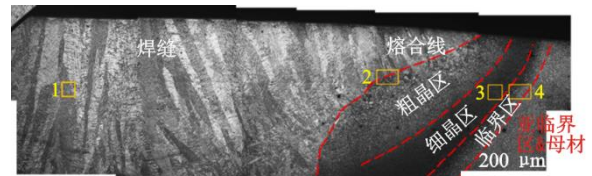
图 6 T/2 处打底焊道各微区微观 SEM 组织  
Fig.6 Microstructure of the root weld bead at T/2

## 2.2 填充焊道组织特征

焊接接头厚度  $T/4$  处为填充焊道，其横截面不同位置区域金相组织变化与打底焊缝相似。经过测量，埋弧焊  $T/4$  处填充焊道粗晶区宽度约 0.568 mm，细晶区宽度约为 0.916 mm，临界区宽度约为 0.419 mm。

## 2.3 盖面焊道组织特征

图 7 是盖面焊道由焊缝中心至熔合线、热影响区和母材的横截面金相图。与打底焊道和填充焊道相比，焊缝金属为典型的粗大柱状晶，由于没有后续焊道的热作用，没有临界粗晶区。各典型区域的形状及面积大小与打底焊道和填充焊道不同。经过测量，粗晶区宽度约为 1.374 mm，细晶区宽度约为 0.661 mm，临界区宽度约为 0.391 mm。



微区1—焊缝中心；微区2—熔合线和粗晶区；  
微区3—细晶区；微区4—临界区。

图 7 焊接头盖面焊道宏观形貌及表征区域标记  
Fig.7 Macroscopic morphology and characterization area marks of weld beads on cover surface of the welding head

图 8 是图 7 中埋弧焊接头盖面焊道不同微区的显微 SEM 组织。

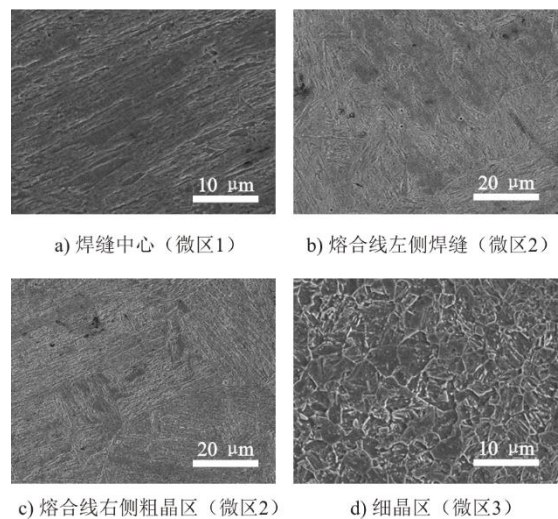


图 8 盖面焊道组织形貌  
Fig.8 Microstructure and morphology of the weld bead on the cover surface

图 8a)是焊缝中心的 SEM 组织，与打底焊道和填充焊道相比，焊缝中心组织除了铁素体之外还含有少量粒状贝氏体组织。图 8b)显示熔合线左侧焊

缝区域晶粒变大, 内部为板条马氏体和粒状贝氏体组织。熔合线右侧粗晶区具有粗大的晶粒, 晶粒尺寸明显大于打底焊和填充焊, 板条马氏体组织含量增多, 长度增加, 排列更加细密(图 8c)。随着继续远离焊缝峰值温度降低, 进入细晶区, 母材发生完全重结晶, 形成细小晶粒, 其组织形貌如图 8d) 所示, 与打底焊和填充焊道相比, 晶粒尺寸增大。继续远离焊缝, 临界区和亚临界区组织与打底焊道相似。对比可知, 盖面焊缝柱状晶区、热影响区粗晶区、细晶区晶粒尺寸相比打底焊和填充焊道更大, 主要是因为盖面焊接时热量传递变慢, 冷却速度相比较小, 给各区域晶粒长大创造了条件。

表 6 为各焊道的不同区域宽度测量数据。由表 6 可以发现, 盖面焊道粗晶区宽度显著大于 T/2 和 T/4 处 2 个焊道, 3 层焊道细晶区和临界区宽度相当。

表 6 不同焊道宽度测量数据 单位: mm  
Tab.6 Measurement data for different weld bead widths

焊道区域	(临界)粗晶区宽度	细晶区宽度	临界区宽度
T/2 打底焊道	0.079	0.656	0.412
T/4 填充焊道	0.568	0.916	0.419
盖面焊道	1.374	0.661	0.391

### 3 焊接接头力学性能

#### 3.1 拉伸性能

埋弧焊接头的拉伸试验结果见表 7。由表 7 可以看出, 焊接接头的拉伸性能较为优异, 抗拉强度平均值为 984.5 MPa, 与母材强度等级相当。每个试样的抗拉强度均在 960.0 MPa 以上, 且每组数据之间彼此差异不大, 最大值与最小值差为 25.0 MPa, 表明焊接接头性能稳定, 这是因为焊接接头组织多为板条马氏体、粒状贝氏体和块状铁素体组织。

表 7 焊接接头拉伸试验数据  
Tab.7 Tensile strength of welded joints

试样 宽度/mm	试样 厚度/mm	横截 面积/mm <sup>2</sup>	最大 载荷/kN	断裂 部位	抗拉 强度/MPa	强度均 值/MPa
20.13	20.04	410.85	408.35	熔合线	994.0	984.5
20.09	20.15	404.81	392.19	熔合线	969.0	
20.09	20.25	406.82	404.03	熔合线	993.0	
20.07	20.06	402.60	395.25	熔合线	982.0	

图 9 为拉伸断口的宏观形貌。由图 9 可以看出, 最上方和最下方断口平齐、光亮, 属于脆性断裂。中间大部分断口形貌灰暗无光泽, 表面粗糙, 存在韧窝, 为明显的韧性断口特征。

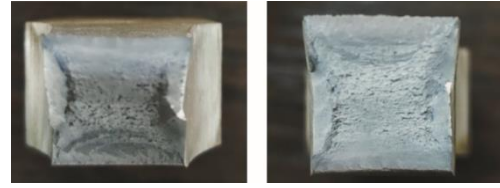


图 9 拉伸断口宏观形貌  
Fig.9 Macroscopic morphology of the tensile fracture

#### 3.2 冲击性能

焊接接头 -40 °C 低温冲击试验结果如图 10 和表 8 所示。由表 8 可以看出: 焊缝区 T/4 和 T/2 部位的低温冲击吸收能量平均值分别为 118.7、67.0 J, 焊缝区近表面的冲击吸收能量大于心部; 热影响区 T/4 和 T/2 部位的低温冲击吸收能量平均值分别为 149.3、154.0 J, 两者相差不大。在 T/2 处的焊缝中心位置冲击性能最低, 这是由于 X 型坡口最中心位置所受热循环次数最多, 最为复杂, 后续焊道的加热回火作用对于焊缝心部的冲击韧性改善作用有限<sup>[34-36]</sup>。

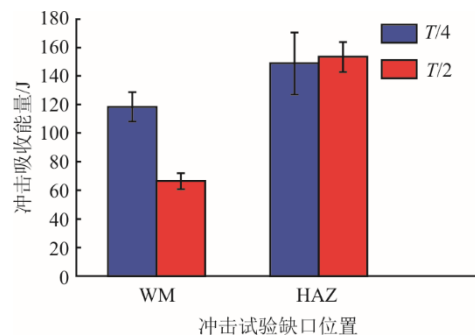


图 10 焊接接头 -40 °C 低温冲击试验结果  
Fig.10 Low temperature impact test results of welded joint at -40 °C

表 8 焊接接头 -40 °C 低温冲击试验数据 单位: J  
Tab.8 Low temperature impact test data of welded joint at -40 °C

部位	焊缝区		热影响区	
	样本值	平均值	样本值	平均值
T/4	112	118.7	124	149.3
	113		163	
	131		161	
T/2	71	67.0	163	154.0
	61		142	
	69		157	

同时, 结合金相分析, 由于采用 X 型坡口, 热影响区沿坡口边缘产生, 而冲击试样是沿焊缝垂直方向切取试样, 因此试验得到的热影响区冲击性能应为热影响区细晶区或临界区、亚临界区的冲击性

能, 相对较高。因此, 热影响区在  $T/2$  和  $T/4$  处的低温冲击吸收能量均高于焊缝区, 焊缝中心为焊接接头的韧性低谷。

### 3.3 显微硬度

焊接接头不同厚度位置维氏硬度的变化趋势如图 11 所示。由图 11 可知, 每一层的硬度分布趋势相似, 从焊缝中心、熔合线到热影响区再到母材, 硬度先增加, 最大硬度值均位于熔合线附近, 而后在热影响区内降低至低谷, 之后再次升高并趋于稳定。熔合线附近硬度最高与该位置存在复杂的化学成分、组织以及碳迁移有关。在焊接热影响区, 随着到熔合线距离的增加, 焊接热循环造成的残余应变和应力集中降低, 进而造成其性能的不均匀分布。虽然在热影响区出现了局部硬度下降的软化现象, 综合力学性能试验结果, 该软化微区尺寸较小, 受拘束强化的作用, 对焊接接头整体强度影响有限<sup>[37]</sup>。

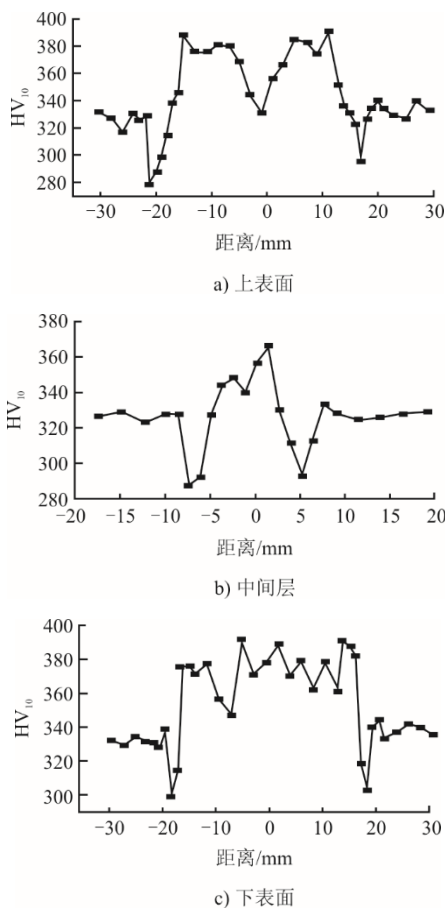


图 11 不同位置显微硬度

Fig.11 Microhardness at different locations

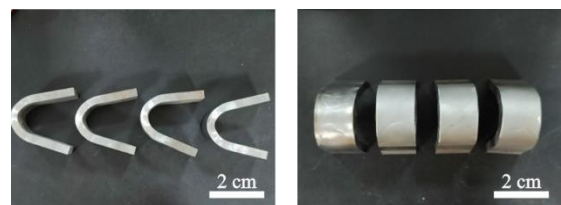
### 3.4 弯曲性能

为准确评价焊接接头的弯曲性能, 弯曲试样类型选取为试验条件较为严格的横向侧弯试样, 弯心

直径选定为 4 倍的试样厚度。焊接接头弯曲试验结果见表 9, 弯曲后试样如图 12 所示。由图 12 可以看出, 4 组弯曲试样在侧弯至 180°后均未出现裂纹, 说明埋弧焊接头具备良好的抗弯曲能力。

表 9 焊接接头弯曲试验结果  
Tab.9 Bending test results of welding joints

试样类型	试样厚度/ mm	弯心直径/ mm	弯曲角度/ (°)	试验结果
横向侧弯	10	40	180	合格
横向侧弯	10	40	180	合格
横向侧弯	10	40	180	合格
横向侧弯	10	40	180	合格



a) 试样正面照片

b) 试样侧面照片

图 12 焊接接头弯曲试验照片

Fig.12 Photographs of bending test of welded joints

## 4 结 论

本文通过对水电工程 1 000 Mpa 等级超高强钢埋弧焊接头不同区域的微区显微组织研究和接头力学性能试验, 得出如下结论。

1) 焊接接头不同焊道所形成的焊缝区、熔合线和热影响区存在不同的组织和分布特点, 热影响区均包含粗晶区、细晶区、临界区和亚临界区。打底和填充焊道在多层多道焊的影响下形成了临界粗晶区, 盖面焊道粗晶区宽度最宽。

2) 焊缝区组织呈现较为明显的柱状晶特点, 主要包含针状铁素体和少量粒状贝氏体组织。粗晶区由粗大的板条马氏体和贝氏体组织组成, 临界粗晶区晶粒同样粗大, 同时在晶界处形成链状 M/A 组元。

3) 焊接接头的细晶区由粒状贝氏体和形状规则、尺寸细小的 M-A 组元组成。焊接接头的临界区由多为马氏体和贝氏体组织; 亚临界区组织不发生实质性变化, 与母材相似。

4) 制备的 1 000 MPa 等级超高强钢埋弧焊接接头平均抗拉强度达到 980 MPa 等级, 在  $T/4$  和  $T/2$  部位的焊缝区和热影响区 - 40 °C 低温冲击吸收能量分别为 118.7、149.3、67.0、154.0 J, 横向侧弯未出现裂纹。

## [参考文献]

- [1] 冯路路, 吴开明, 余宏伟, 等. 高强韧水电站用钢的生产现状及发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(3): 175-185.  
FENG Lulu, WU Kaiming, YU Hongwei, et al. Production status and developing tendency of high strength and toughness steel for hydropower station[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(3): 175-185.
- [2] 冯伟, 于庭祥, 徐锴, 等. 1 000 MPa 级高强钢埋弧焊熔敷金属组织及性能[J]. 焊接, 2023(11): 6-12.  
FENG Wei, YU Tingxiang, XU Kai, et al. Microstructure and properties of submerged arc weld metal of 1 000 MPa grade high-strength steel[J]. Welding & Joining, 2023(11): 6-12.
- [3] 雷清华, 夏政海, 刘心阳, 等. 水电工程用 1 000 MPa 级高强钢的研发与应用[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(4): 65-70.  
LEI Qinghua, XIA Zhenghai, LIU Xinyang, et al. Development and application of 1 000 MPa high strength steel for hydropower project[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(4): 65-70.
- [4] 程惠, 赵爽, 宋建军. 800 MPa 高强钢在白鹤滩右岸压力钢管工程中的应用[J]. 水电与新能源, 2017(7): 1-7.  
CHENG Hui, ZHAO Shuang, SONG Jianjun. Application of the 800 MPa high-strength steel in right-bank penstocks in Baihetan hydropower station[J]. Hydropower and New Energy, 2017(7): 1-7.
- [5] 康丹丹, 万天明, 王高见, 等. 水电用 1 000 MPa 级超 高强钢焊接的研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(15): 11-13.  
KANG Dandan, WAN Tianming, WANG Gaojian, et al. Research progress of 1 000 MPa ultra-high strength steel for hydropower[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(15): 11-13.
- [6] 姜在伟, 刘心阳, 汪晶杰. 水电工程用 800 MPa 级高 强钢焊接性能研究[J]. 宽厚板, 2022, 28(2): 5-10.  
JIANG Zaiwei, LIU Xinyang, WANG Jingjie. Study on Weldability of 800 MPa grade high strength steel for hydropower engineering[J]. Wide and Heavy Plate, 2022, 28(2): 5-10.
- [7] 侯博, 赵毅. 白鹤滩水电站压力管道 800 MPa 级高 强钢设计应用[J]. 大坝与安全, 2022(1): 24-26.  
HOU Bo, ZHAO Yi. Design and application of 800 MPa high-strength steel in penstocks of Baihetan hydropower station[J]. Dam & Safety, 2022(1): 24-26.
- [8] 邱福祥, 罗松云, 程浩轩, 等. 800 MPa 水电用高强 钢焊接性能研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2021, 49(2): 16-23.  
QIU Fuxiang, LUO Songyun, CHENG Haoxuan, et al. Study on welding performance of 800 MPa high strength steel for hydropower[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2021, 49(2): 16-23.
- [9] 赖世强, 康丹丹. 水电用 1 000 MPa 级高强钢焊接冷 裂纹敏感性研究[J]. 焊接技术, 2020, 49(8): 37-39.  
LAI Shiqiang, KANG Dandan. Study on cold crack sensitivity of welding of 1 000 MPa high strength steel for hydropower station[J]. Welding Technology, 2020, 49(8): 37-39.
- [10] 任希乐, 万天明, 康丹丹. 1 000 MPa 水电用高强 钢埋弧焊材试验研究[J]. 电焊机, 2021, 51(4): 62-66.  
REN Xile, WAN Tianming, KANG Dandan. Saw experimental study on 1 000 MPa high strength for hydropower[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(4): 62-66.
- [11] 康丹丹, 万天明, 王高见, 等. 不同热输入对 1 000 MPa 级水电工程用高强钢 B950CF 焊接接头 组织及力学性能的影响研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(17): 221-224.  
KANG Dandan, WAN Tianming, WANG Gaojian, et al. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of welded joint of 1 000 MPa high-strength steel B950CF for hydropower engineering[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(17): 221-224.
- [12] 范晨阳, 包晔峰, 韦尚志, 等. 水电高强钢成分设计 与制造工艺研究进展[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(3): 54-58.  
FAN Chenyang, BAO Yefeng, WEI Shangzhi, et al. Research progress in composition design and manufacturing process of hydropower high-strength steel[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2023, 9(3): 54-58.
- [13] CHEN J, LI C S, JIN X, et al. Effect of quenching process on microstructures and mechanical properties of Fe-0.9Mn-0.5Cr-2.4Ni-0.5Mo-C steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(4): 1505-1513.
- [14] QIAN Y, YU W, WU H, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 1 000 MPa grade structural steel for construction machinery[J]. Journal of University Science and Technology Beijing, 2010, 32(5): 599-604.
- [15] 杨联东, 邹振忠. 水电站压力钢管埋弧自动横焊施 工技术与运用[C]. 水利水电工程建设与运行管理技 术新进展——中国大坝工程学会 2016 学术年会论 文集, 2016: 7.  
YANG Liandong, ZOU Zhenzhong. Research and application of automatic horizontal welding construction technology of pressure steel pipe submerged arc in hydropower station[C]//New Progress in Construction and Operation Management Technology of Water Conservancy and Hydropower Projects. Proceedings of the 2016 Academic Annual Conference of the Chinese Society of Dam Engineering, 2016: 7.
- [16] 张建新, 陈爱国, 李丽丽, 等. 水电站用 1 000 MPa 级 高强钢焊接性技术应用研究[J]. 焊接技术, 2015, 44(9): 41-47.  
ZHANG Jianzhong, CHEN Aiguo, LI Lili, et al. Research on the application of weldability technology of 1 000 MPa grade high-strength steel for hydropower station[J]. Welding Technology, 2015, 44(9): 41-47.
- [17] 申超男, 张庆亚, 王江超. 中厚板高强钢双面双弧对 接焊的焊接残余应力分析[J]. 武汉理工大学学报(交 通科学与工程版), 2021, 45(6): 1102-1107.  
SHEN Chaonan, ZHANG Qingya, WANG Jiangchao. Analysis of welding residual stress in double-sided double-arc butt welding of medium and heavy plate[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2021, 45(6): 1102-1107.
- [18] 朱志勇. 脉冲激光对 B950CF 高强钢复合接头组织 及性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2021: 1.  
ZHU Zhiyong. Effect of pulsed laser on microstructure and properties of B950CF high strength steel hybrid welding joint[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021: 1.
- [19] 张翠红, 李畅. 低合金高强钢的焊接工艺与组织性能 研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2023, 35(4): 67-72.

- ZHANG Cuihong, LI Chang. Study on welding process and microstructure properties of low alloy high strength steel[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology), 2023, 35(4): 67-72.
- [20] 谢胜利, 于淑敏, 黄志强, 等. 水电站用 XDB620 高强度钢焊接性能研究[J]. 中国设备工程, 2023(19): 211-213. XIE Shengli, YU Shumin, HUANG Zhiqiang, et al. Research on welding performance of XDB620 high-strength steel for hydropower station[J]. China Plant Engineering, 2023(19): 211-213.
- [21] 曹志龙, 朱浩, 安同邦, 等. 1 400 MPa 级超高强度钢 SH-CCT 曲线及其热影响区组织和性能[J]. 焊接学报, 2023, 44(8): 109-115. CAO Zhilong, ZHU Hao, AN Tongbang, et al. SH-CCT diagram and microstructure and properties of heat-affected-zone of 1 400 MPa ultra high strength steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(8): 109-115.
- [22] 谭操, 高翔. 低合金高强度钢厚板一次成型焊接技术研究[J]. 广船科技, 2023, 43(2): 58-61. TAN Cao, GAO Xiang. Research on one-time forming welding technology of low-alloy high-strength steel thick plate[J]. GSI Shipbuilding Technology, 2023, 43(2): 58-61.
- [23] 骆文泽, 成慧梅, 刘红艳, 等. 高强度 Q960E 对接接头残余应力与焊接变形的数值模拟[J]. 中国机械工程, 2023, 34(17): 2095-2105. LUO Wenze, CHENG Huimei, LIU Hongyan, et al. Numerical simulation of residual stress and welding deformation for high strength steel Q960E butt-welded joints[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(17): 2095-2105.
- [24] 马彦龙, 陈辉, 赵旭, 等. 1 000 MPa 级超高强度钢激光复合焊接头力学性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 163-174. MA Yanlong, CHEN Hui, ZHAO Xu, et al. Mechanical properties of laser hybrid welded joint of 1 000 MPa ultrahigh-strength steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 163-174.
- [25] 王伟光, 张天理, 于一帆, 等. 高强度钢焊接接头显微组织的研究进展[J]. 理化检验(物理分册), 2021, 57(3): 50-55. WANG Weiguang, ZHANG Tianli, YU Yifan, et al. Research progress on microstructure of welded joint of high strength steel[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2021, 57(3): 50-55.
- [26] 卓晓. 420 MPa 级高韧耐候焊条熔敷金属组织和性能研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020: 18-30. ZHUO Xiao. Research on microstructure and properties of deposited metals for 420 MPa grade weathering bridge steel[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2020: 18-30.
- [27] 李少峰, 马成勇, 宋志刚, 等. 800 MPa 级高强度钢焊接接头组织及力学性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(5): 91-96. LI Shaofeng, MA Chengyong, SONG Zhigang, et al. Study on the welding joint microstructure and mechanical properties of 800 MPa grade high stress steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(5): 91-96.
- [28] 水电水利工程压力钢管制作安装及验收规范: GB 50766—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012: 93-105. Code for manufacture installation and acceptance of steel penstocks in hydroelectric and hydraulic engineering: GB 50766—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012: 93-105.
- [29] 温长飞, 邓想涛, 王昭东, 等. 1 300 MPa 级超高强度钢临界粗晶热影响区组织和韧性[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(8): 650-656. WEN Changfei, DENG Xiangtao, WANG Zhaodong, et al. Microstructure and toughness of critical coarse-grained heat-affected zone of 1 300 MPa grade ultra-high-strength steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(8): 650-656.
- [30] 刘恒, 高惠临, 丁学光. 焊接热循环对 X80 管线钢粗晶区组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2007, 36(7): 4-6. LIU Heng, GAO Huilin, DING Xueguang. Influence of welding thermal cycle on structure and properties in grain-coarsening region of X80 pipeline steels[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(7): 4-6.
- [31] QI X N, DI H S, WAN X N, et al. Effect of secondary peak temperature on microstructure and toughness in ICCGHAZ of laser-arc hybrid welded X100 pipeline steel joints[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 7838-7849.
- [32] CUI J J, ZHU W T, CHEN Z Y, et al. Microstructural characteristics and impact fracture behaviors of a novel high-strength low-carbon bainitic steel with different reheated coarse-grained heat-affected zones[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(12): 6258-6268.
- [33] DI X J, AN X, CHENG F J, et al. Effect of martensite-austenite constituent on toughness of simulated inter-critically reheated coarse-grained heat-affected zone in X70 pipeline steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(5): 366-373.
- [34] 杨江. 低温高锰钢焊接热影响区组织演变与力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021: 1. YANG Jiang. Microstructural evolution and mechanical properties in heat-affected zone of cryogenic high-Mn steel[D]. Dalian. Dalian University of Technology, 2021: 1.
- [35] QI X, DI H, WAN X, et al. Effect of secondary peak temperature on microstructure and toughness in ICCGHAZ of laser-arc hybrid welded X100 pipeline steel joints[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 7838-7849.
- [36] CUI J, ZHU W, CHEN Z Y, et al. Microstructural characteristics and impact fracture behaviors of a novel high-strength low-carbon bainitic steel with different reheated coarse-grained heat-affected zones[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(12): 6258-6268.
- [37] 吴东晓, 王蓬, 李冬玲, 等. 高热输入船体结构用钢焊接接头显微组织与硬度的统计分布表征[J]. 金属功能材料, 2023, 30(5): 30-37. WU Dongxiao, WANG Peng, LI Dongling, et al. Statistical distribution characterization of microstructure and hardness of welded joints of high heat input hull structural steel[J]. Metallic Functional Materials, 2023, 30(5): 30-37.

(责任编辑 邓玲惠)