

# 水环境对磁控 Plasma-FCAW 水下复合焊成形组织特征及熔滴过渡行为的影响

张洪涛<sup>1,2</sup>, 杨帆<sup>1,2</sup>, 于佳<sup>1</sup>, 李连波<sup>3</sup>, 孙宇<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海), 山东 威海 264209)

(2. 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150000)

(3. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

**摘要:** 磁控等离子-药芯焊丝电弧复合焊 (plasma-flux cored arc welding, Plasma-FCAW) 作为一种高效的复合电弧焊接方法, 具有深熔性好、飞溅小等优势, 但由于水下环境复杂, 焊接过程易受干扰, 为此, 本研究采用自主设计的励磁装置对 Plasma-FCAW 复合水下焊施加横向磁场进行调控, 促进两电弧间的柔性耦合, 有效改善复合焊接过程及焊缝成形的稳定性。在此基础上进行不同盐度、温度水环境下的焊接工艺实验, 并研究了水环境对熔滴过渡行为及焊缝成形和组织性能的影响。结果表明, 盐度提高会使熔滴过渡周期缩短、冷却速度提高、焊缝熔宽下降, 水温对电弧稳定性和熔滴过渡行为影响显著, 低温下熔滴过渡周期缩短, 高温时熔滴过渡周期不规则。盐度增加和水温降低都会导致焊缝区侧板条铁素体和针状铁素体含量提高, 而水温升高会使热影响区珠光体含量有所增加, 从而对焊缝硬度产生影响。

**关键词:** 水下焊接; Plasma-FCAW; 熔滴过渡; 盐度; 水温

中图法分类号: TG456.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)03-0702-11

## 1 引言

近年来, 我国将先进装备制造业确立为战略性发展领域, 在《中国制造 2025》纲领性文件中明确提出重点突破海洋工程装备及高技术船舶领域的关键技术。政策层面着重强调深海探测装备、海洋资源开发系统及海上作业保障技术的自主研发, 并通过“十四五”海洋经济发展规划等系列政策, 系统推进海洋产业结构优化与船舶工业技术升级<sup>[1]</sup>。

作为海洋工程建设的核心工艺, 水下焊接技术对核电站维护、海底管网敷设、舰船修复及海上油气平台建造具有不可替代性。尽管国内外学者已在电弧物理机制<sup>[2]</sup>、熔池动态行为<sup>[3]</sup>、冶金相变调控<sup>[4]</sup>、力学性能失效机制<sup>[5]</sup>等基础研究领域取得突破性进展, 并成功实现部分理论成果的工程转化, 但相较于陆地焊接, 水下环境的高压、低温及流体扰动特性仍导致焊接质量稳定性面临严峻挑战<sup>[6]</sup>。特别值得注意的是, 传统水下药芯焊丝电弧焊 (flux cored arc welding, FCAW) 虽具有设备简易、成本可控等优势, 却因水体快速导热引发的熔池凝固失稳问题, 导致焊缝成形质量难以满足深海工程严苛标准<sup>[7]</sup>。

针对上述技术瓶颈和目前传统单一热源水下焊接存在的焊接效率低、成形能力差等问题<sup>[8]</sup>, 本研究创新性提出磁控等离子-药芯焊丝复合电弧焊接 (plasma-flux cored arc welding, Plasma-FCAW) 工艺。通过自研的复合焊炬结构设计实现了两种独立焊接工艺的优势互补<sup>[9]</sup>, 通过在等离子弧与 FCAW 电弧连线平面两侧施加外部磁场装置对复合焊接工艺中由于电源极性不同产生的电弧排斥现象进行优化, 该工艺在保留等离子弧焊 (PAW) 工艺深熔特性与 FCAW 工艺高效、高熔敷率的同时, 可通过辅助磁场实现两电弧间的柔性耦合并实现以下性能突破: 磁场作用下耦合的双电弧具有更高的能量密度使深熔性提高 40%, 有效提高焊接过程稳定性的同时具备更高的焊接效率。焊缝成形和微观组织均匀性显著改善<sup>[10]</sup>。

将 Plasma 电弧和熔化极惰性气体保护焊 (MIG) 电弧二者复合到一起的高效复合焊接方法, 最早由荷兰 Philips 公司研究试验中心首次提出。此后国内外学者对电弧分布、温度场、电信号、显微组织结构以及焊接接头的力学性能进行了不同的研究<sup>[11]</sup>。韩蛟等<sup>[12]</sup>研究了等离子-熔化极气体保护电弧焊 (Plasma-GMAW) 复合焊接过程中的电弧特性以及熔滴过渡行为, 结果表明, 不同电流

的等离子弧通过改变GMAW电弧的导电以及受力状态来影响GMAW电弧形态以及熔滴过渡行为。Yang等<sup>[13]</sup>研究了在等离子体与MIG电弧混合焊接过程中,铜与钢不同合金的界面行为。研究表明外等离子体弧对内部MIG弧有很大的压缩作用,使等离子体-MIG混合电弧电流密度增强。同时,随着外加等离子体电流的增加,电磁的搅拌效应减小,热输入增大。铜与钢的界面厚度先减小后增大,电磁搅拌作用的减小使界面扩散减慢。Yurtisik等<sup>[14]</sup>利用Plasma-GMAW复合焊接技术对双相不锈钢进行焊接。研究结果表明复合焊接与单纯的GMAW相比,焊接效率有所提高,并且由于复合焊接的深熔效果好,可以一次焊透工件,更不易出现焊接缺陷。国外的Mamat等<sup>[15]</sup>研究了Plasma-MIG焊接相较于单独进行MIG焊接时,等离子体流对热影响区组织的影响。结果发现,等离子体流的存在使得热影响区的组织细化,尤其是粗晶粒热影响区。焊接接头的粗晶粒热影响区和细晶粒热影响区域的晶粒尺寸差异几乎消除,而传统MIG焊粗晶粒热影响区和细晶粒热影响区域的晶粒尺寸存在明显差异。

有学者研究了水环境对水下焊接的影响,对比淡水和海水情况下的焊接,发现随着盐度增加,焊接过程的稳定性增加,此外,盐中的钠、钾、钙等元素进入蒸汽泡时,促使弧柱宽度增加,造成焊接电弧压力增大,熔宽增加,但熔深会变小<sup>[16]</sup>。在不同盐度下进行水下焊接试验发现,当水的盐度较高时,焊缝金属中氢的含量会降低<sup>[17]</sup>。海水的温度也会随着海域、季节、天气等因素不断变化,在焊接过程中会产生大量的热量,因水温不同热量损失程度也不同<sup>[18]</sup>,会对焊接工艺参数和焊接质量造成影响。Chen等人<sup>[19]</sup>研究了不同流向与流速的水流对电弧稳定性及熔滴过渡过程的影响,研究发现,在水流环境中,无论是逆流方向还是顺流方向进行焊接作业,水流流速的增加都会降低电弧燃烧的稳定性,同时增加熔滴排斥型过渡比例以及焊接飞溅的比例,水流速度的增加会显著增加焊接热量的散失,导致电弧温度降低,引起电弧收缩,使电流密度增大,焊缝熔深增大。

目前国内外关于Plasma-MIG复合焊接的水下适应性研究仍存在显著空白:国际学界对水体离子浓度梯度影响电弧特性的机理尚未形成统一理论模型;温度梯度场中熔池凝固行为的动态表征缺乏系统性实验数据支撑。为深入探究水环境参数影响机制,本研究构建多因子耦合实验系统,重点解析不同盐度(0~3.5%)、温度(0~40℃)条件下传质行为与微观组织演变规律,通过建立水环境参数-焊接质量映射关系,不仅可完善极端环境下焊接理论体系,更有望为南海深水区、极地航道等特殊海域的工程实践提供工艺数据库支持,具有显著的理论创新价值与工程应用前景。

## 2 实验

该试验所使用的Plasma-FCAW水下复合焊接平台如图1所示,其主要由以下几个系统:Plasma-FCAW复合焊枪、Plasma电源、FCAW电源、焊接过程行走机构、磁控电源组成。

所用水槽外壁尺寸为300 mm×150 mm×280 mm,水槽内水深200 mm并且在距离水面50 mm处放置待焊工件。采用应用广泛的EH36船用钢板作为焊接母材,其成分如表1所示,试验过程中其母材的规格为200 mm×50 mm×8 mm,选用牌号为CHT81Ni1药芯焊丝,焊丝直径为1.2 mm,其成分如表2所示。本实验采用平板堆焊的方式,焊接过程中使用99.99%的Ar作为离子气体。由于采用自保护药芯焊丝,焊接过程中不施加其它保护气体。在试验开始前,实验人员将工件固定于水槽底部,并使用机器人将复合焊炬调节至待焊工件上方后保持在固定位置,其中将复合焊炬保持在工件上方5 mm处。伺服电机通过丝杆传动的方式带动运动平台的移动,通过放置有水槽的运动平台的直线运动使工件与焊枪产生相对位移,而工件的移动速度则由伺服电机的转动速度决定,其中,本课题选用300 mm/min的焊接速度对工件实行等速焊接。焊后,采用线切割设备沿垂直于焊缝方向截取20 mm×10 mm×8 mm的金相试样,进行研磨和抛

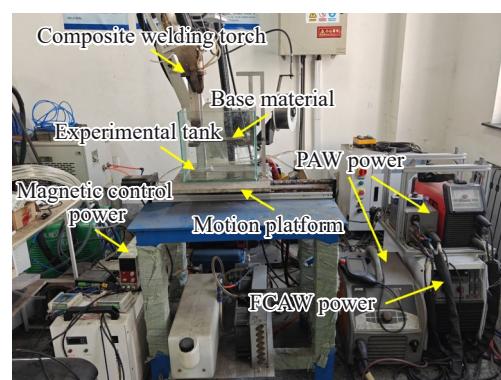


图1 Plasma-FCAW水下复合焊接平台

Fig.1 Plasma-FCAW underwater composite welding platform

表1 EH36钢化学成分

Table 1 Chemical composition of EH36 steel (wt%)

C	Mn	Si	S	P	Cu	Al	Cr	Ni
0.15	1.45	0.606	0.006	0.01	0.193	0.125	0.221	0.223

表2 CHT81Ni1药芯焊丝化学成分

Table 2 Chemical composition of CHT81Ni1 flux cored wire (wt%)

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	V
0.055	1.35	0.35	0.005	0.015	0.95	0.024	0.10	0.015

光处理后,然后使用 4vol% 的  $\text{HNO}_3$  乙醇溶液腐蚀焊缝截面 3~5 s,采用体式显微镜观察焊缝形貌。

在前期试验的基础上,保持 Plasma 电流、FCAW 电流和等离子气流量不变,改变试验水槽中水的盐度即  $\text{NaCl}$  所占质量分数以探究盐度变化对焊缝组织和硬度的影响。经前期调研,海洋中海水的平均盐度为 3.5%,而近岸区域海水盐度相对较低,因此,本课题选取有代表性的数据,即 0%、1%、3.5% 盐度进行试验,其试验参数如下表 3 所示。

基于焊接工况设计的水下 Plasma-FCAW 复合焊炬结构设计及实物图见图 2,水下复合焊接工艺原理如图 3

表 3 不同盐度下的实验参数

Table 3 Experimental parameters at different salinities

Number	Plasma current/A	FCAW voltage/V	Field current/A	Plasma gas flow/L·min <sup>-1</sup>	Salinity/%
1	165	29	1.8	4.5	0
2	165	29	1.8	4.5	1
3	165	29	1.8	4.5	3.5

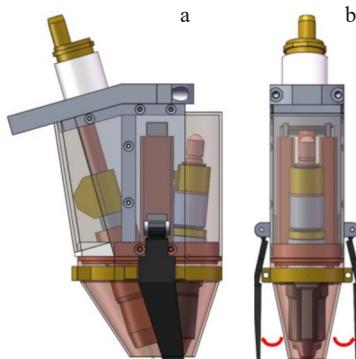


图 2 Plasma-FCAW 复合焊炬

Fig.2 Plasma-FCAW underwater hybrid welding torch: (a) front view and (b) side view

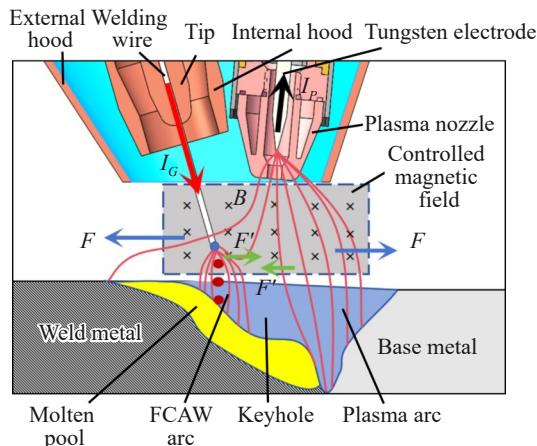


图 3 Plasma-FCAW 水下复合焊工艺示意图

Fig.3 Schematic diagram of Plasma-FCAW underwater hybrid welding

所示,其中等离子弧焊工艺采用直流正接,而 FCAW 工艺采用直流反接。由于焊接过程中两个电弧的电流方向相反(等离子弧电流为  $I_p$ , FCAW 电流为  $I_G$ ),当双弧相距较近时受到电磁斥力  $F$  作用,导致电弧之间相互排斥,这不利于电弧之间的耦合效果。因此,本团队提出在两电弧连线平面的两侧施加外部横向磁场,施加外部横向调控磁场后使其对两电弧产生相互作用力  $F'$ ,双弧在磁场调控作用下相互靠拢,从而实现了等离子弧和 FCAW 弧的柔性复合。在此基础上,课题组研究了磁场强度  $B$  对 Plasma-FCAW 复合焊过程的影响,据前期研究成果<sup>[20]</sup>得知,当励磁电流为 1.8 A,磁场强度 3.3 mT 时,横向磁场的施加抑制了复合电弧间的排斥现象,促进两个电弧间实现柔性耦合,电弧间排斥现象得到显著改善,焊接过程稳定。

### 3 结果与分析

#### 3.1 盐度对焊接接头的影响

##### 3.1.1 盐度对熔滴过渡和焊缝成形的影响

盐度在 0~3.5% 的变化区间内,均可以实现稳定的焊接过程。水环境盐度的改变,对 FCAW 熔滴过渡行为有一定影响,进而影响焊缝成形,如图 4 所示,  $t_0$  表示起始时刻,对应的起弧与燃弧过程中的电信号如图 5 所示。熔滴过渡形式仍以大滴排斥过渡为主,随着盐度的提高,熔滴尺寸增大,熔滴过渡周期减小。这是由于盐度增加后焊接过程的稳定性下降,熔滴的摆动频率增加,从图 4c 可以看出 3.5% 盐度下,  $t_0+39$  ms 时刻熔滴与焊丝的分离角明显增大,当  $t_0+39$  ms 时刻熔滴达到最大尺寸,在重力作用下进入熔池。

图 6 为不同盐度下的焊缝宏观形貌,结果表明,焊接过程中随着盐度的变化,焊缝的宏观形貌也发生明显变化,当盐度由 0% 变为 1% 后再升高为 3.5%,焊缝的宏观成形质量降低,焊缝表面成形变差,焊接飞溅增加,这是由于焊接过程稳定性下降,且熔滴过渡频率增加,导致更容易产生飞溅。由焊缝截面形貌可知,相比于 0% 盐度,1% 盐度下的焊缝的熔深增加 0.5 mm,熔宽减小了 0.5 mm,而相比于 1% 盐度,3.5% 盐度下焊缝熔深、余高等均相差无几,但熔宽有所降低。

##### 3.1.2 盐度对焊接接头组织的影响

水环境盐度的改变将使熔池内熔融物的冷却速度发生变化,并由此导致焊接接头的显微组织成分的改变进而影响焊缝的机械性能。本节研究了在不同盐度下,由于冷却速度的改变,焊缝微观结构的改变,并对造成焊接接头机械性能改变的主要原因提供了论据。

焊接接头包括焊缝、熔合区、热影响区三部分,分别观测在 0%、1%、3.5% 盐度下的微观组织,如图 7~图 9 所示。

从图 7 可以看出,在水环境作用下,由于冷却速度相较于陆上有了大幅度的提升,随着盐度的增加,焊缝区的

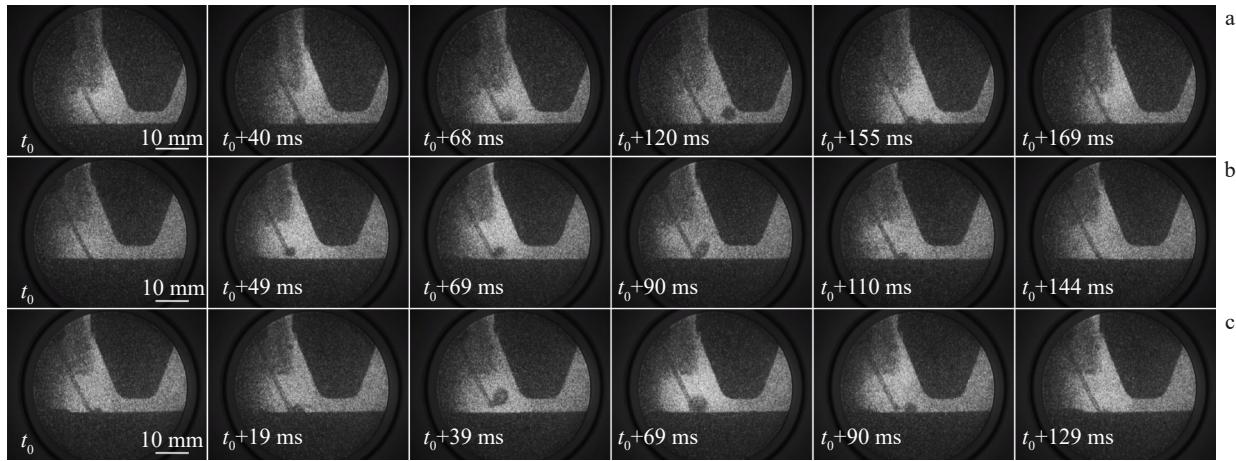


图4 不同盐度下的熔滴过渡周期

Fig.4 Transition period of molten droplets at different salinities: (a) 0%, (b) 1%, and (c) 3.5%

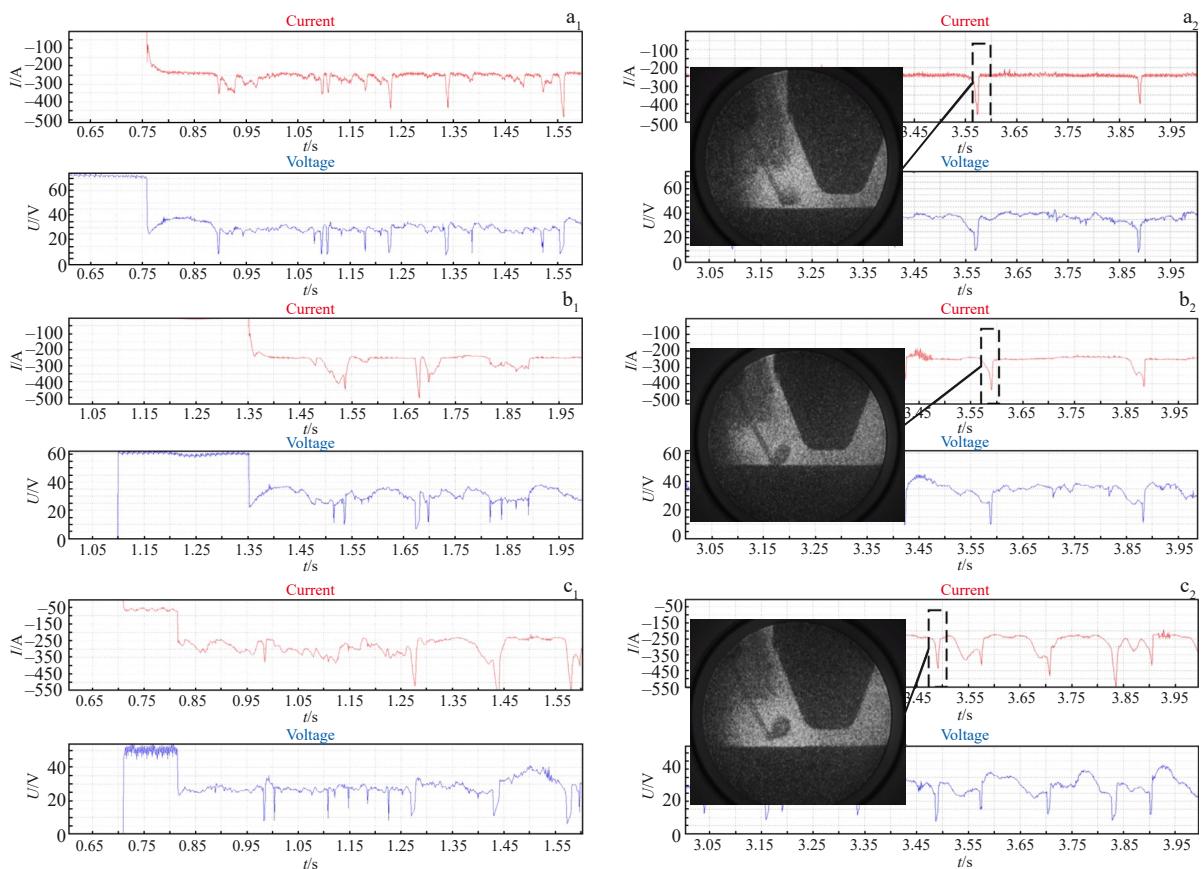


图5 不同盐度下起弧与燃弧过程中电信号

Fig.5 Electrical signals during arc initiation (a<sub>1</sub>–c<sub>1</sub>) and ignition (a<sub>2</sub>–c<sub>2</sub>) processes at different salinities: (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) 0%, (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) 1%, and (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>) 3.5%

柱状晶越来越明显且越发细小。焊缝区组织主要由珠光体和铁素体组成,其铁素体包括晶界铁素体(GBF)、块状铁素体(PF)、侧板条铁素体(SPF)以及针状铁素体(AF)。在复合电弧高温作用下,先共析铁素体在原奥氏体晶界发生形核,并逐渐长大,随着冷却速度的增加,铁素体相变量逐渐减少,侧板条铁素体先在晶界处形核,再由晶界向内部生长,进一步降温,针状铁素体也开始形核和长大。

由图7可以发现,随着盐度的增加,同一放大倍数下焊缝晶粒越来越细。同时,水环境的冷却速度增加,较高温度区间生成的GBF和PF的含量减小,AF和SPF的含量增加。这主要是由于水蒸气薄膜表面会有盐类颗粒沉积,导致液膜的稳定性降低,水的沸腾期提前到来,进而使得水中气泡更易破碎,增加了水与板材的接触,从而使海水具有较好的降温性能,焊缝区组织在高温区间停留时间变短,元素扩散不充分,抑制了GBF和PF形成,

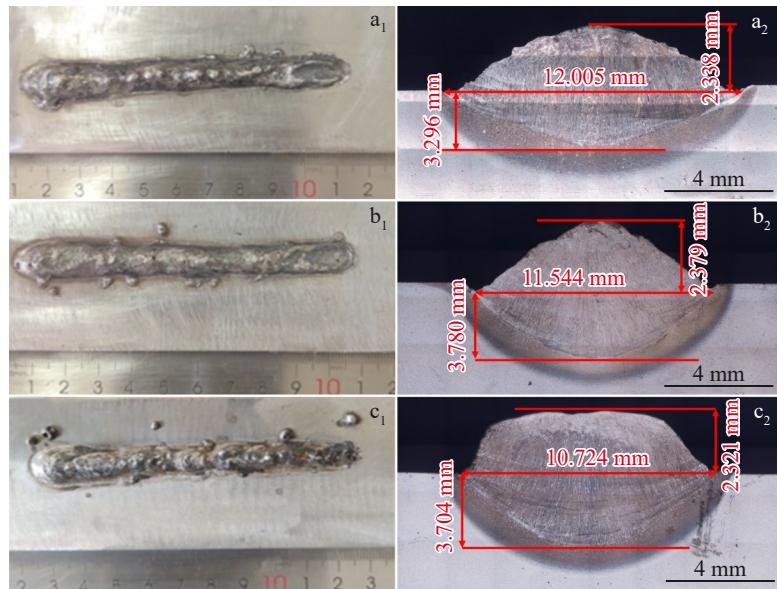


图 6 不同盐度下的焊缝宏观形貌和截面形貌

Fig.6 Macroscopic morphologies (a<sub>1</sub>–c<sub>1</sub>) and cross-sectional morphologies (a<sub>2</sub>–c<sub>2</sub>) of welds at different salinities: (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) 0%, (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) 1%, and (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>) 3.5%

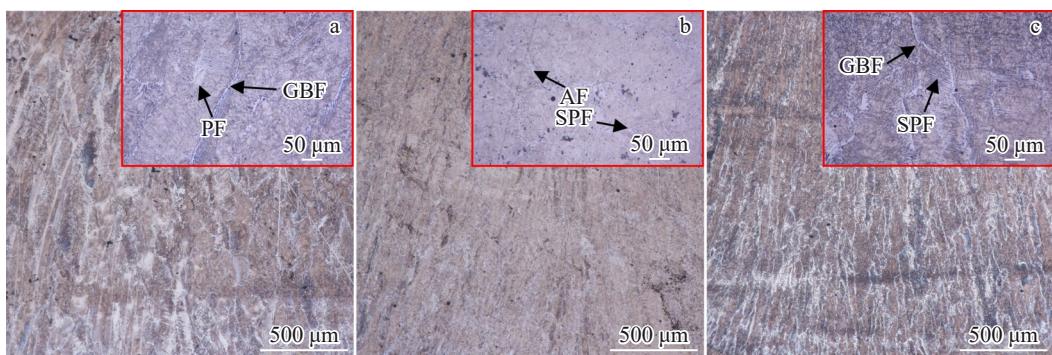


图 7 不同盐度下焊缝区的微观形貌

Fig.7 Microscopic morphologies of weld zone at different salinities: (a) 0%, (b) 1%, and (c) 3.5%

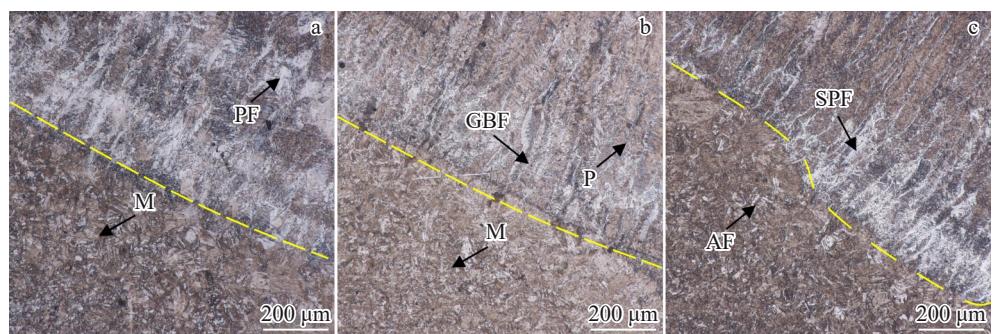


图 8 不同盐度下熔合区的微观形貌

Fig.8 Microscopic morphologies of fusion zone at different salinities: (a) 0%, (b) 1%, and (c) 3.5%

随着温度降低, AF 和 SPF 更易形核长大, 而随着盐度增加, 可以观察到随着冷速增大产生板条马氏体(LM)。同时, 随着盐度的增加, 柱状晶更加明显, 非金属夹杂的分布密度逐渐增加。这些夹杂的存在将对奥氏体晶界产生钉扎作用, 从而抑制晶粒长大, 使焊缝区组织也得到细化。

熔合区是焊缝区和熔化区中间较小的过渡区域, 由部分熔化和未熔化的母材组成。如图 8, 可以看出水环境盐度变化后熔合区组织种类并没有太大差异, 在熔合线的一侧, 是由针状铁素体、珠光体(P)组成, 而在另一侧, 则是由粗大的铁素体与珠光体组成。熔合线两端晶粒尺寸差异明显, 会导致晶格匹配度较差, 因此可以预见

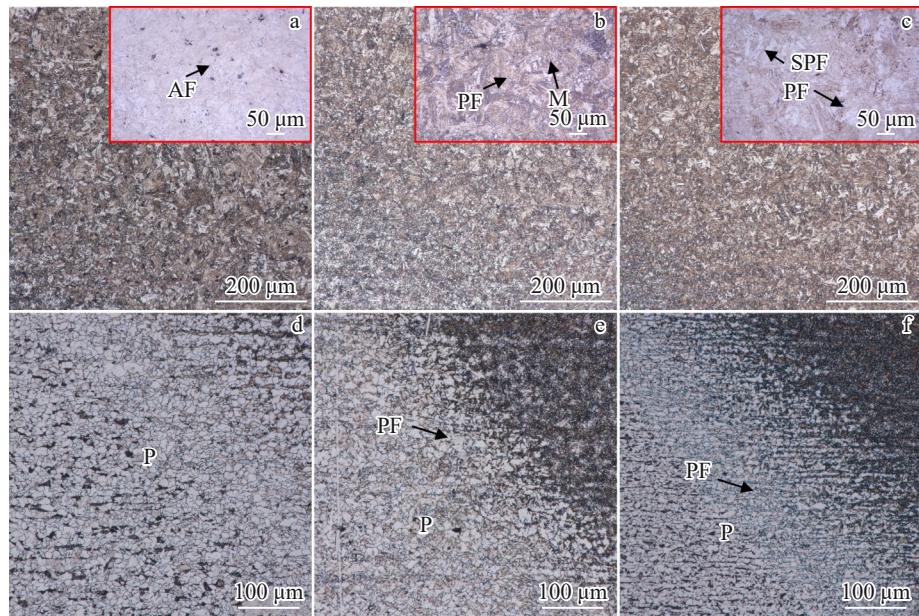


图9 不同盐度下热影响区的微观形貌

Fig.9 Microscopic morphologies of heat affected zone at different salinities: (a) 0%-CGHAZ, (b) 1%-CGHAZ, (c) 3.5%-CGHAZ, (d) 0%-FGHAZ, (e) 1%-FGHAZ, and (f) 3.5%-FGHAZ

熔合区的力学性能略低于焊缝区和热影响区,在3.5%盐度得到的焊后组织与0%盐度相比,其柱状晶粒明显变得细小,由于细晶强化作用,可以预见3.5%盐度下焊缝的整体力学性能优于0%盐度下的焊缝。

如图9所示,焊接热影响区主要由马氏体(M)和少量贝氏体(B)组成,其中,马氏体主要为板条马氏体,并且在同一放大倍数下,随着盐度的增加,板条马氏体含量也随之增加,即随着冷却速度的提高,焊缝金属由低硬度的铁素体向高硬度的板条马氏体相转变。

同时,图9a~9c为不同盐度下粗晶热影响区(CGHAZ)的显微组织图像,结果表明,在盐水的作用下,热影响区的降温速率明显加快,因该区域晶粒粗大、分布不均匀,加之其高硬度,热影响区硬度增加,韧性下降,造成粗晶影响区开裂概率远高于其他部位,是焊缝的薄弱部位。图9d~9f为不同盐度下细晶热影响区(FGHAZ)的显微组织图像,由于该区域距焊缝区较远,温度较低,晶粒长大不明显,得到的晶粒细小,其力学性能优于粗晶区。

### 3.1.3 盐度对焊接接头硬度的影响

对不同盐度水环境下磁控 Plasma-FCAW 复合焊接得到的焊接接头进行硬度测量,结果如图10所示。

可以看到,在盐度为0%、1%、3.5%时整个焊接接头的硬度在150~470 HV<sub>0.2</sub>之间。并且通过分析观察可以看到,3.5%盐度下的焊接接头硬度峰值明显高于0%盐度。由上述3.1.2节分析可知,盐水对焊缝的冷却速度较大,在较高盐度下焊缝晶粒较小,且热影响区板条马氏体含量较高,因而硬度增加。熔合线附近的硬度最低,但仍

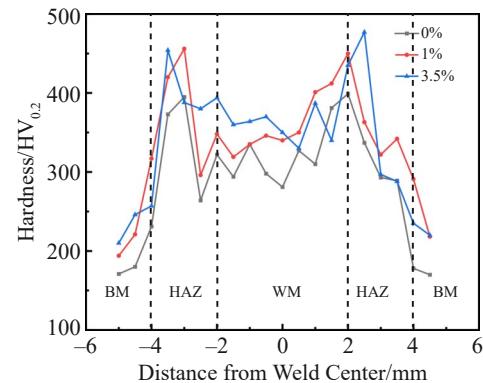


图10 不同盐度下的焊缝硬度

Fig.10 Hardness of weld at different salinities

然高于母材硬度,而焊缝区各个试样的硬度则略有起伏,差别较小,焊缝的平均硬度也呈现出升高的趋势,这是因为较高的冷却速度促进了焊缝金属区从硬度值较低的先共析铁素体向硬度值较高的针状铁素体及侧板条铁素体的转变。

从整体趋势上看,3组盐度下进行磁控 Plasma-FCAW 复合焊接得到的接头硬度均呈明显的“M”型,且随着测试点到焊缝中心距离的减小,组织硬度表现出先增大,达到峰值后急剧减小并最终在焊缝中心区域趋于平缓的趋势。根据上文对焊缝截面形貌的分析与测量,可以发现,焊缝熔合线附近的热影响区硬度最高,而由于熔合线附近组织不均匀,其硬度急剧下降,且熔合线附近硬度低于焊缝中心。由上文各个焊缝的微观组织分析可知,这是由于水环境下热影响区形成了板条马氏体,这

大大增加了其硬度,且由于熔合线附近区域较小,因而硬度急剧上升之后又急剧下降。焊缝中心硬度则相对保持在同一水平,但由于焊缝区有较多的侧板条铁素体和针状铁素体,可以看到即使盐度为0%,焊缝区的硬度也远高于母材。

### 3.2 温度对焊接接头的影响

#### 3.2.1 温度对熔滴过渡和焊缝成形的影响

世界海域广阔,不同地区和洋流,水温存在较大差异,而水温的差异对熔滴过渡和焊缝成形也产生一定的影响,在0~40℃水温下焊接的焊缝宏观形貌如图11所示。图12为不同水温环境条件下,熔滴过渡过程的X射线图像。图13为不同水温下焊接过程中对应的起弧与燃弧过程中电信号。图14为不同水温下熔滴过渡周期。

图12a所示为在0℃的冰水混合物中进行焊接时的熔滴过渡图像。结合电信号图可以观察到较低的环境温度加剧了电弧收缩,焊丝尖端距离熔池的距离很短。同时,熔池的长度较短,熔池内部气体的析出及演变行为的剧烈程度也有所降低。而随着环境水温逐渐升高到20℃,除了电弧长度有所增加外,熔池的长度也发生了明显的增加。从电信号图可以看出,5组实验在电弧开始燃烧后,前几个熔滴过渡周期相差不大,30℃实验下,初期电流电压最稳定,但大滴排斥过渡不明显,0与40℃实验下,初期电流电压变化最剧烈,以大滴排斥过渡为主。在电弧稳定燃烧后,0℃电流电压变化最剧烈,变化



图11 不同水温下焊缝宏观形貌

Fig.11 Macroscopic morphologies of welds at different water temperatures: (a) 0 °C, (b) 10 °C, (c) 20 °C, (d) 30 °C, and (e) 40 °C

周期短,熔滴过渡频率高,10℃电流电压变化剧烈程度、过渡频率介于0与20℃之间,20、30℃电流电压变化稳定,周期均匀,40℃电流电压变化幅度略有提高,但过渡周期极不规则,可以认为低温对电弧稳定性影响更大,高温对过渡形式和成形影响更大。

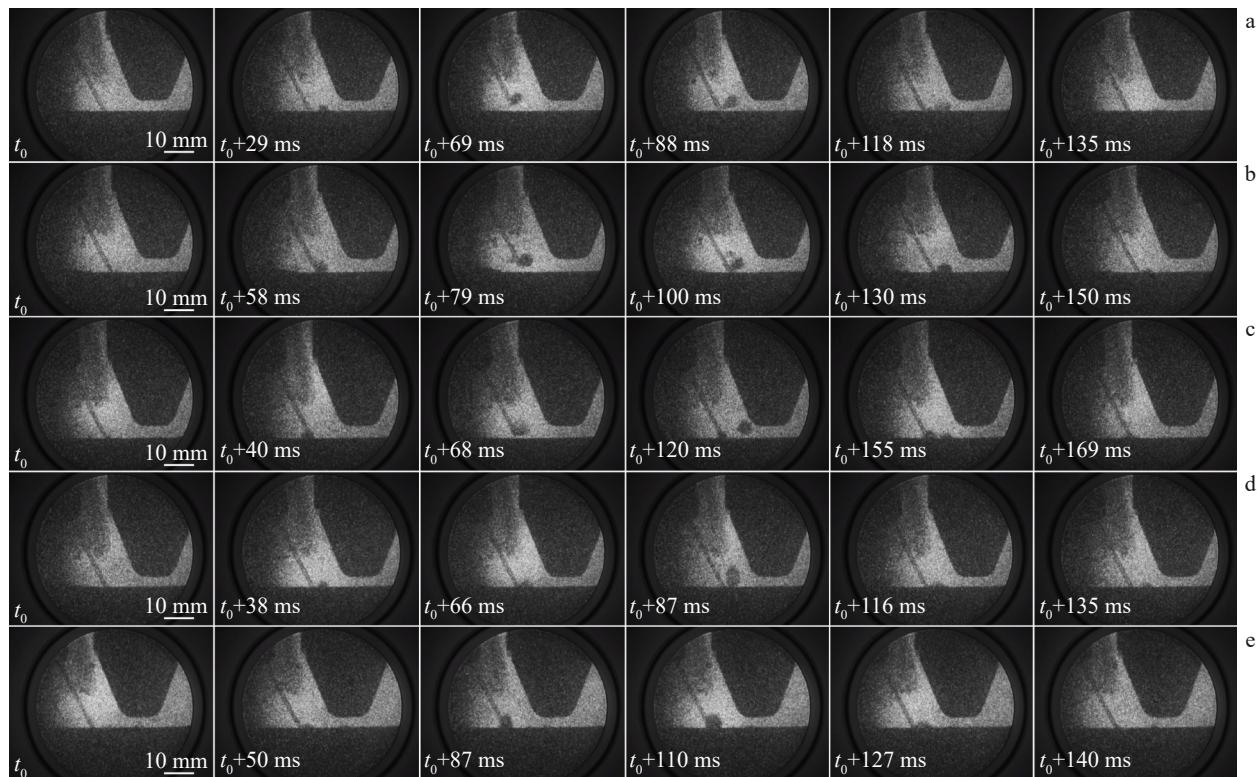


图12 不同水温下熔滴过渡周期

Fig.12 Transition period of molten droplets at different water temperatures: (a) 0 °C, (b) 10 °C, (c) 20 °C, (d) 30 °C, and (e) 40 °C

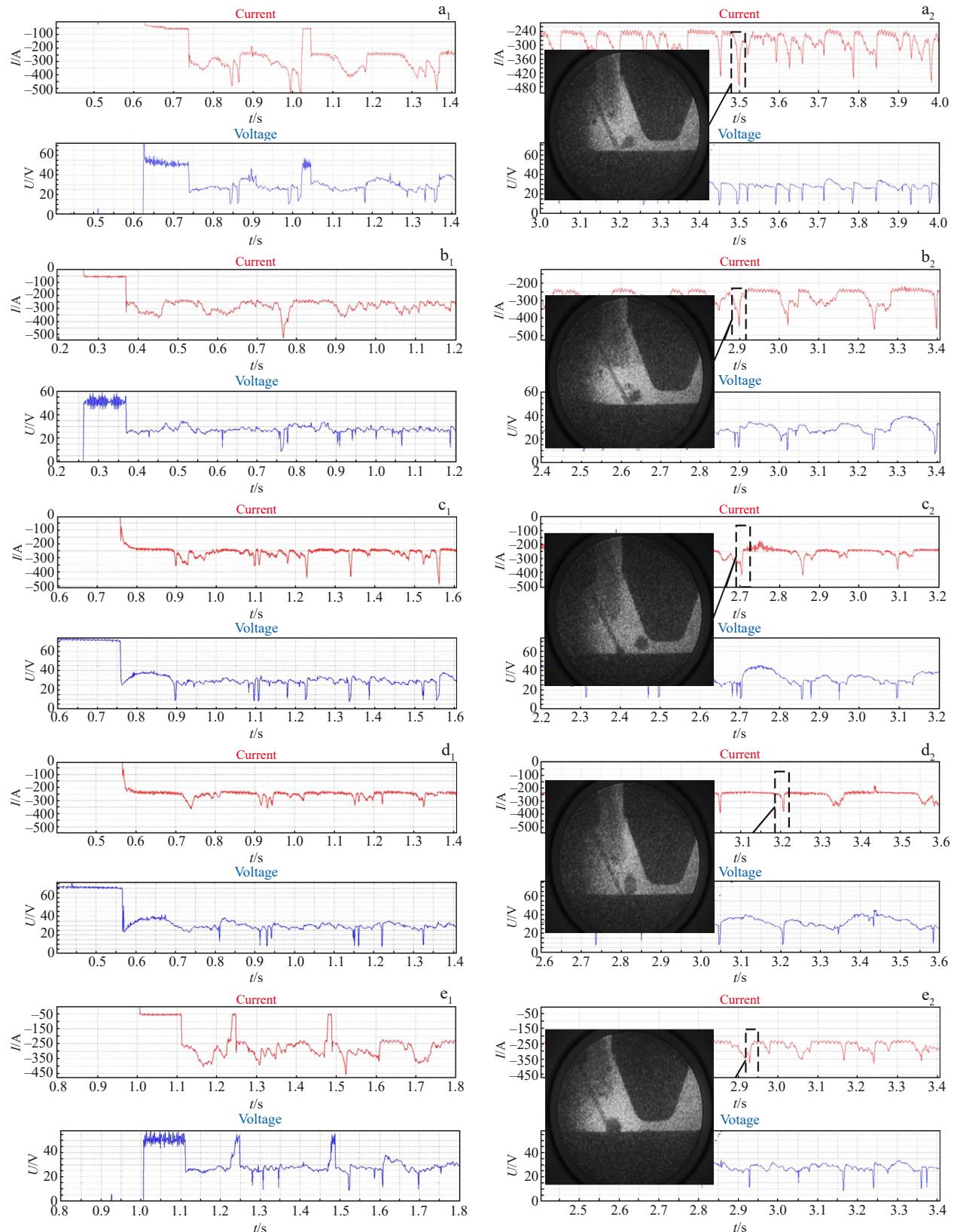


图13 不同水温下起弧与燃弧过程中电信号

Fig.13 Electrical signals during arc initiation ( $a_1$ – $e_1$ ) and ignition ( $a_2$ – $e_2$ ) at different water temperatures: ( $a_1$ ,  $a_2$ ) 0 °C, ( $b_1$ ,  $b_2$ ) 10 °C, ( $c_1$ ,  $c_2$ ) 20 °C, ( $d_1$ ,  $d_2$ ) 30 °C, and ( $e_1$ ,  $e_2$ ) 40 °C

### 3.2.2 温度对焊接接头组织和焊缝硬度的影响

水环境温度影响了电弧稳定性和熔池冷却速度, 由

此导致焊接接头的显微组织成分发生变化, 进而影响焊缝的力学性能。分别观测在0、10、20、30、40 °C水温下得

到的焊接接头焊缝区的微观组织,如图 14 所示。

水温的降低使焊缝的冷却速度大幅度提升,对焊缝区组织造成显著影响,随水温的降低,焊缝区的柱状晶生长长度增加,沿生长方向平行程度提高,且垂直于生长方向的枝晶减少,柱状晶中以珠光体为主的晶粒尺寸变得更加细小,这是由于冷却速度提高导致垂直于焊缝方向的温度梯度大幅增加,使得焊缝区柱状晶形核和长大的动力提高,晶粒长大过程中沿着垂直于焊缝方向的生长速度远大于其他方向,进而长成了方向一致且更为明显的柱状晶。焊缝区组织主要由珠光体和铁素体组成,包

括晶界铁素体、块状铁素体、侧板条铁素体以及针状铁素体,随水环境温度的降低,冷却速度提高,侧板条铁素体和针状铁素体含量提高,晶界铁素体和块状铁素体的含量减少。

如图 15 所示为不同温度水环境下热影响区的微观组织,热影响区主要由珠光体和马氏体组成,可以看出 20 °C 下热影响区的珠光体和马氏体尺寸相差不大且更为均匀,而 0 和 40 °C 下的晶粒尺寸更为细小,且 0 °C 下马氏体更多,这是由于水环境温度下降,熔池冷却速度提高,增加了马氏体相变动力和形核率,使得晶粒尺寸下

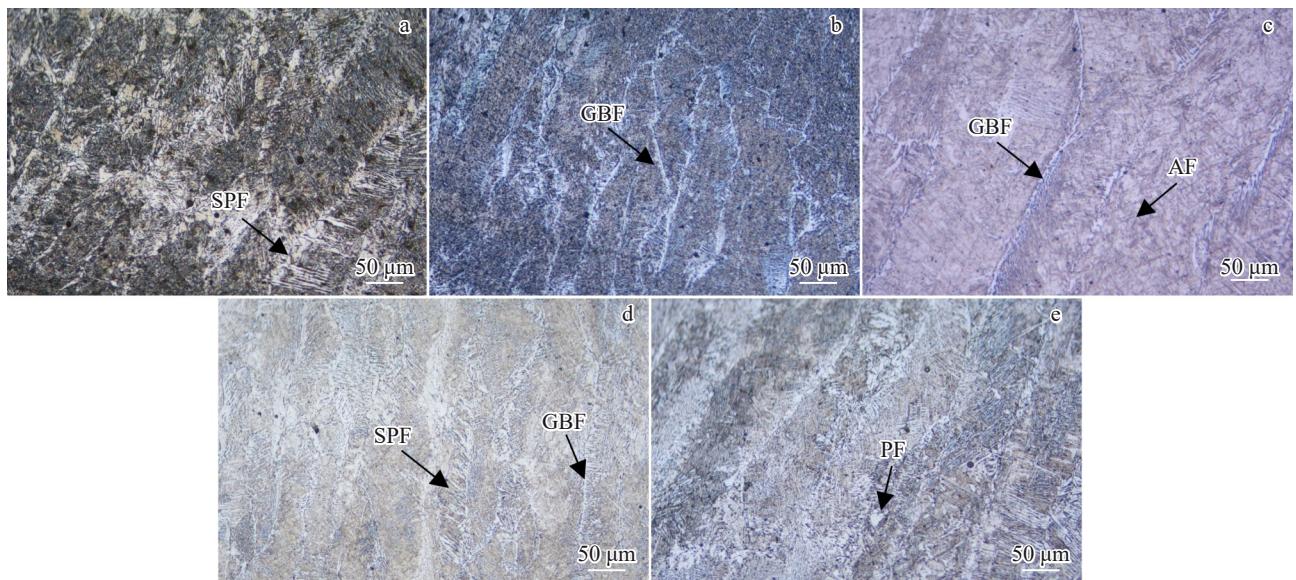


图 14 不同水温下焊缝区微观形貌

Fig.14 Microscopic morphologies of weld zone at different water temperatures: (a) 0 °C, (b) 10 °C, (c) 20 °C, (d) 30 °C, and (e) 40 °C

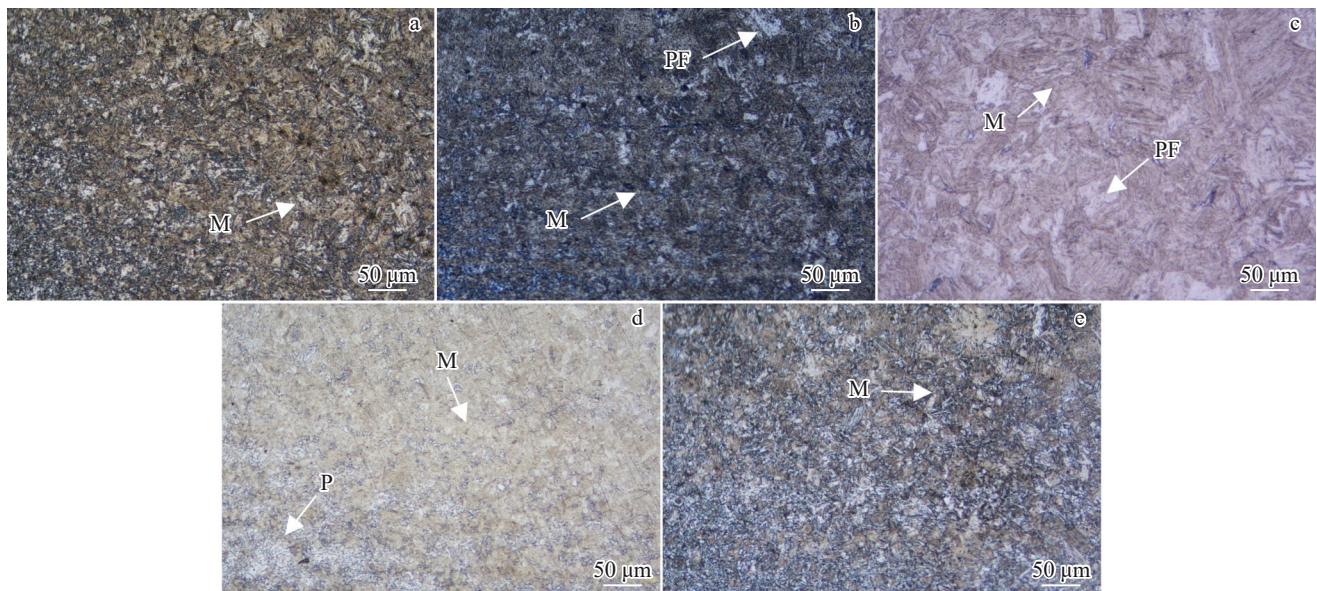


图 15 不同水温下热影响区微观形貌

Fig.15 Microscopic morphologies of heat affected zone at different water temperatures: (a) 0 °C, (b) 10 °C, (c) 20 °C, (d) 30 °C, and (e) 40 °C

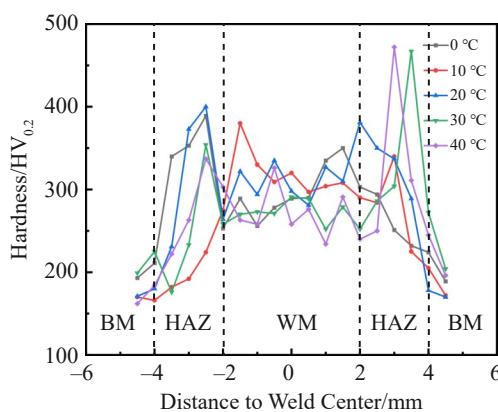


图 16 不同水温下的焊缝硬度

Fig.16 Hardness of weld at different water temperatures

降,而40 °C由于水温升高,在珠光体相变温度停留时间更长,导致马氏体含量减少,相变过程中奥氏体转变为珠光体的含量增加,晶粒变细。

图 16 为不同水温水环境下整个焊缝的硬度变化图,整个焊缝硬度呈典型的“M”形。焊缝区硬度在230~330 HV<sub>0.2</sub>之间,其中20 °C水环境下焊缝区的平均硬度最大,而低温和高温都会导致焊缝区的硬度下降。热影响区的硬度在340~460 HV<sub>0.2</sub>,20 °C水环境下焊缝热影响区硬度高于0 °C水环境的热影响区硬度,但30和40 °C参数下部分热影响区硬度高于20 °C,可以看出水环境温度升高,使得热影响区硬度提高。结合图15的热影响区组织可以发现这是由于温度升高,珠光体含量增加且晶粒细化导致的,而温度降低使得马氏体含量增加,但同时产生了更多的先共析铁素体,使得硬度略有下降。

## 4 结 论

1)当盐度提高时,熔滴过渡周期缩短,稳定性下降,由于盐度影响了焊接过程中焊缝周围水的沸腾换热系数,冷却速度提高,焊缝的熔宽随盐度上升而下降。随盐度提高,整个焊缝组织晶粒细化,焊缝区的针状铁素体和侧板条铁素体含量增加,热影响区的板条马氏体含量增加,焊缝整体硬度提高。

2)温度对电弧稳定性和熔滴过渡行为产生显著影响,低温熔滴过渡周期缩短,高温熔滴过渡周期不规则。随着水温降低,焊缝区的柱状晶长度增加,晶粒细化,侧板条铁素体和针状铁素体含量提高。对于热影响区的组织,0 °C下板条马氏体含量增加,40 °C下马氏体含量减少,但由于冷却速度增加,高温停留时间长,珠光体含量增加,且伴随着晶粒细化现象发生。随水环境温度升高,

热影响区硬度升高,但0和40 °C水环境下得到的焊缝区硬度均低于20 °C的焊缝区硬度。

## 参 考 文 献

- Chen H Y, Jin W L, Song S Y et al. International Conference on Optics, Electronics, and Communication Engineering[C]. Wuhan: Wuhan University, 2024: 353
- Zhang Yong, Jia Chuanbao, Zhao Bo et al. Journal of Materials Processing Technology[J], 2016, 238: 373
- Wang Zhenmin, Pei Kai, Han Leigang et al. Journal of Manufacturing Processes[J], 2021, 68: 1726
- Lader S K, Baruah M, Ballav R et al. Metals and Materials International[J], 2025, 31: 831
- Yang Yong(杨勇), Ren Qun(任群), Yang Xirong(杨西荣) et al. Materials China(中国材料进展)[J], 2025, 44(2): 177
- Putri E D W S, Surojo E, Budiana E P et al. Procedia Structural Integrity[J], 2020, 27: 54
- Xu C S, Guo N, Zhang X et al. Journal of Manufacturing Processes[J], 2020, 55: 381
- Zhang Pengfei(张鹏飞), Xie Longfei(谢龙飞), Zhang Lingfeng(张凌峰) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(12): 3457
- Zhang H T, Dai X Y, Feng J C et al. Welding Journal[J], 2015, 94(1): 8
- Wang Bo(王波), Yang Fan(杨帆), Li Lianbo(李连波) et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)[J], 2022, 43(4): 74
- Zhang Zhongke(张忠科), Xiong Jianqiang(熊健强), Chu Shusheng(初树晟) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(2): 559
- Han Jiao(韩蛟), Han Yongquan(韩永全), Hong Haitao(洪海涛) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(6): 2027
- Yang T, Gao H M, Zhang S H et al. Acta Metallurgica Sinica (English Letters)[J], 2013, 26(3): 328
- Yurtisik Koray, Tirkes Suha, Dykhno Igor et al. Soldagem & Inspeção[J], 2013, 18(3): 207
- Mamat S, Afandi A A M, Bakar M B A et al. Materials Science Forum[J], 2021, 1010: 15
- Tomków J, Fydrych D, Łabanowski J. Weld World[J], 2023, 67: 2381
- Świerczyńska A, Fydrych D, Rogalski G. International Journal of Hydrogen Energy[J], 2017, 42(38): 24532
- Duanmu Lin(端木琳), Xu Fei(徐飞). Journal of Refrigeration (制冷学报)[J], 2016, 37(3): 6
- Chen H, Guo N, Shi X H et al. Journal of Manufacturing Processes[J], 2018, 31: 103
- Yu J, Wang B, Zhang H et al. Welding Journal[J], 2020, 99(1): 25

## Influence of Water Environment on Microstructure and Droplet Transfer Behavior of Magnetically Controlled Plasma-FCAW Underwater Hybrid Welding

Zhang Hongtao<sup>1,2</sup>, Yang Fan<sup>1,2</sup>, Yu Jia<sup>1</sup>, Li Lianbo<sup>3</sup>, Sun Yu<sup>1</sup>

(1. Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

(2. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin 150000, China)

(3. CNOOC Marine Engineering Co., Ltd, Tianjin 300451, China)

**Abstract:** Magnetically controlled plasma-flux cored arc welding (Plasma-FCAW), as an efficient hybrid arc welding method, is characterized by excellent deep penetration and low spatter. However, the welding process is susceptible to disturbances due to the complex underwater environment. To address this issue, a self-developed electromagnetic excitation device was used in this study to apply a transverse magnetic field to the underwater hybrid Plasma-FCAW process. This magnetic control facilitated flexible coupling between the two arcs, thereby effectively improving the stability of the hybrid welding process and the weld bead formation. On this basis, welding process experiments were carried out in water environment with different salinities and temperatures. The influence of the water condition on droplet transfer behavior, weld formation, as well as microstructure and properties was studied. The results show that increased salinity shortens the droplet transfer cycle, raises the cooling rate, and reduces the weld width. Water temperature significantly affects arc stability and droplet transfer behavior: the droplet transfer cycle shortens at low temperature, while it becomes irregular at high temperature. Both increased salinity and decreased water temperature increase the content of side-plate ferrite and acicular ferrite in the weld zone. In contrast, higher water temperature increases the pearlite content in the heat-affected zone, thereby affecting the hardness of weld.

**Key words:** underwater welding; Plasma-FCAW; droplet transition; salinity; water temperature

---

Corresponding author: Sun Yu, Ph. D., Assistant Researcher, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, P. R. China, Tel: 0086-631-5677156, E-mail: sunyu\_hitwh@hit.edu.cn