# 海洋工程高效制管四丝埋弧焊工艺研究

海洋石油工程股份有限公司 （天津 300452） 杨尚玉 栾陈杰 许 威 曹 军 韦宝成 刘继颖

**【摘要】**针对海洋工程制管中焊接效率较低问题，设计开发出满足海洋工程高效制管要求的四丝埋弧焊工艺。阐述了新研制四丝埋弧焊接设备的焊接工艺特点，分析了接头性能的影响因素，完成了38mm板厚D36材质的四丝埋弧焊接试验，进行了焊接接头的力学性能测试、CTOD试验、断口分析及金相分析。试验结果表明，多丝埋弧焊工艺应用于海洋工程制管焊接是可行的。

## 一、概述

埋弧焊工艺具有高效、优质的特点，在海洋工程制管过程中被广泛应用。然而，由于海洋工程钢结构服役条件比较恶劣，与普通钢结构相比较，对海洋工程结构用钢材及其焊缝的综合力学性能要求比较高，因此国内外埋弧焊工艺在海洋工程领域的应用以单丝或双丝为主。随着海洋石油事业的迅猛发展，海洋石油平台的建造越来越多。众所周知，海洋石油平台和导管架都是大型的钢结构，它的建造是一个长期而繁重的工作。钢管预制和接长约占导管架工作量的40%，约占组块建造的15%，且是整个结构建造的第一步，其效率影响整个工程进度；并且随着海洋石油工业走向深水，海洋工程钢管中大厚板的焊接越来越多，进一步提高焊接效率是缓解繁重工作压力的有效措施。

四丝埋弧焊与单丝埋弧焊相比，熔池存在时间长，冶金反应充分，有充裕的时间供气体和杂质浮出。同时四丝埋弧焊减少了母材的热循环次数，延长了母材热循环的时间，减少焊缝热裂纹及气孔敏感性，焊缝熔深大，易于焊透且焊接速度显著提高，从而显著提高大厚板的焊接效率。

## 二、制管焊接新工艺的开发与评价

### 1. 传统制管焊接工艺存在的问题

传统的制管焊接单丝埋弧焊工艺采用STT进行打底焊，用埋弧焊进行填充、盖面，焊接接头形式为X形坡口，组对间隙为3～5mm，钝边宽为1～2mm，焊接时在钢板正反两面施焊；近几年开发的双丝埋弧焊工艺在海洋工程制管中也偶有使用，但是对于大厚板极多的海洋工程制管行业，其效率提高有限。现有制管行业中应用的四丝埋弧焊由于性能落后，其双面焊接最大厚度只有22mm，不能满足海洋工程制管的壁厚要求，并且一般只能满足－15℃以上低温冲击，不能达到海洋工程常用的－20℃、－40℃低温冲击及CTOD试验要求。

### 2. 四丝埋弧焊接设备

针对传统制管焊接工艺存在的问题，将目前制管行业已有部分应用的四丝埋弧焊引入海洋工程制管业。由于海洋工程应用环境恶劣，现有的四丝埋弧焊机及焊接工艺不能满足海洋工程制管的要求，因此需重新设计制造四丝埋弧焊机并开发新焊接工艺。新研制的焊机采用升降式大臂，并配有可直线

本文获得“中国安装协会焊接专业委员会2012年年会暨焊接标准及先进焊接技术研讨会”论文大赛一等奖。

移动的重载地平车，整体布局如图1所示；四丝埋弧焊机头如图2所示，4根焊丝采用纵向排列。

新研制的四丝埋弧焊机焊接速度高达2m/min，其单位时间的熔敷金属量可达40kg/h，而目前单丝埋弧焊机的焊速为0.3～0.6m/min，单位时间熔敷金属量为8～12kg/h，效率提高3～5倍。

新研制的四丝埋弧焊采用四台先进的逆变电源，能够产生可变的交流输出，其拥有可调的频率、波形平衡、相位、直流偏置，使四丝埋弧焊机在原来各个电源参数基础上，增加可调节参数11个，达到20个。每个参数对焊缝熔池的深度、宽度和焊缝的余高，以及焊根的形状都有一定的影响，而且焊缝成形还会因焊枪倾角、焊丝干伸长、焊丝距离的不同而改变。

此四丝埋弧焊机采用先进的数字集成控制器，所有参数控制采用编程的方式进行，在焊接之前先编制好程序，焊接时不需要调节，降低了焊工操作水平对焊缝质量的影响。

图1 四丝埋弧焊接系统

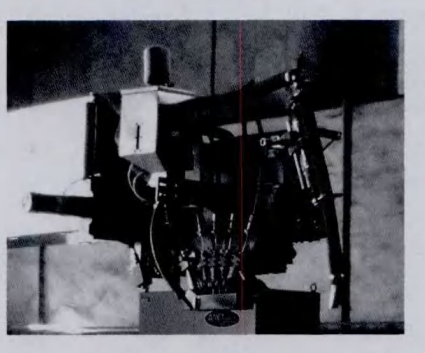


图2 四丝埋弧焊机头

### 3. 焊接新工艺开发

（1）试验材料 试验采用了海洋工程领域普遍应用的船用D36钢板（GB712—2000），其化学成分及力学性能如表1和表2所示。焊丝型号为生产中常用的JW—1，$\phi$4.0mm，焊剂为SJ101。为测试四丝埋弧焊机，仅使用部分焊丝焊接的能力和焊接控制系统的稳定性。

表1 D36钢板的化学成分（质量分数） （%）

| 元素 | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ti | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 含量 | 0.13 | 0.33 | 1.44 | 0.011 | 0.003 | 0.04 | 0.006 | 0.002 | 0.039 |

表2 D36钢板的力学性能

| 屈服强度 $R_e$/MPa | 抗拉强度 $R_m$/MPa | 伸长率$A$ (%) | 平均冲击吸收能量 $A_{kv}$/J（-20℃） |
|---|---|---|---|
| 450 | 560 | 24 | 165，195，171 |

（2）坡口形式 鉴于常规的60°坡口填充量较大，经过多次试验，分别采用55°和50°X形坡口能够满足试验要求，试件加工规格为300mm×3000mm，坡口形式如图3所示。

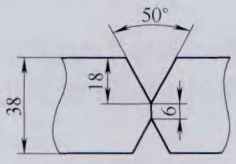



图3 38mm板坡口形式

（3）焊接参数 焊接采用高度集成的数字化控制系统，在焊接之前编制焊接程序，在焊接时不需要调节参数，极大地减轻操作难度，也减少了焊工对焊接过程的干扰。经过大量的试验，逐步摸索出影响焊缝成形和力学性能的因素如下。

焊接热输入：是影响焊接热循环的主要因素，当焊接材料及焊接方法一定时，焊接接头的组织和性能主要取决于焊接热输入的大小，若焊接工艺不合适，将导致接头性能恶化。四丝埋弧焊属于四丝大电流、共熔池焊接，热输入必然高于单丝、双丝埋弧焊，其组织和性能只能由力学性能试验判断。海洋工程中很多需要-20°或-40°低温冲击，在国内外还没有低于-15°低温冲击的四丝埋弧焊技术，这就必须严格控制焊接热输入，找到热输入与力学性能的平衡点。

焊丝排列直线度、焊丝倾角、焊丝间距、干伸长：焊丝中心一定要排列在焊缝中心线上，否则会因焊丝排列不在一条线上形成摆动电弧，造成正反面焊缝中心错位缺陷。焊丝倾角、间距和干伸长对焊缝的余高和电弧的稳定影响较大。

相位控制：在编制焊接程序时必须确定各交流焊丝的相位角差距，以确保焊接时的电弧相互干扰

最小，达到较好的焊接质量。

波形控制：焊机提供的电源模式较多，波形种类也比较多，在采用交流方波焊接时，电弧的相互干扰最小；为保证干扰较小，在电流、电压等其他参数均不变的情况下，波形平衡（即波形占空比）越小熔敷率越高，这也是提高效率的主要方法。

电弧电压：焊接时的电压对焊缝熔宽的影响很大，在单道焊接（如38mm板）时，需要严格控制好电弧电压，防止焊缝盖面超宽。

焊丝间距：四根焊丝的间距分别固定为：1～2丝20mm，2～3丝19mm，3～4丝22mm。

焊丝倾角：经多次试验，焊丝倾角1～4丝分别固定为－12°、0°、12°、25°。

焊丝干伸长：经多次试验，当焊丝干伸长为35～40mm时较好。

表3给出的38mm板相关焊接参数为试验中较好的参数，并对使用以下参数焊接的试验板进行力学性能试验。

表3 焊接参数

| | 丝序 | 电极 | 焊接电流/A | 电弧电压/V | 波平衡（%） | 相位（°） | 焊接速度/m·min$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 内侧 | 1 | 交流 | 900 | 32 | 50 | 0 | 1.4 |
| | 2 | 交流 | 850 | 35 | 25 | 90 | |
| | 3 | 交流 | 800 | 38 | 25 | 180 | |
| | 4 | 交流 | 750 | 42 | 25 | 270 | |
| 外侧 | 1 | 直反 | 980 | 32 | — | — | 1.45 |
| | 2 | 交流 | 950 | 35 | 50 | 0 | |
| | 3 | 交流 | 900 | 38 | 25 | 90 | |
| | 4 | 交流 | 850 | 42 | 25 | 180 | |

**4. 无损检测**

按照AWS D1.1—2008标准，焊后进行外观、射线、超声和磁粉检测，试验结果全部合格。焊缝外观形貌如图4所示，经对焊缝外观质量检查，焊缝外形均匀美观，无表面气孔、夹渣、咬边、裂纹等缺陷。

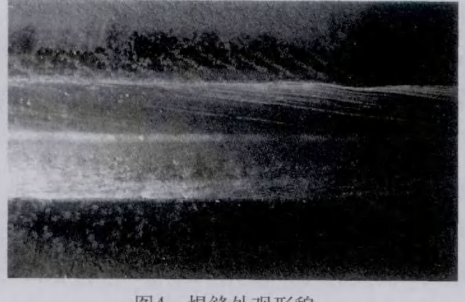


图4 焊缝外观形貌

**5. 力学性能试验及结果**

本力学性能试验据海洋工程领域结构常用标准AWS D1.1—2008实施，其结果也根据标准评价。

（1）拉伸试验 拉伸试验共进行了全焊缝拉伸试验（见表4）和横向拉伸试验（见表5）两项，全焊缝拉伸屈服强度和抗拉强度高于母材，并且满足标准要求；横向拉伸试验抗拉强度满足要求，并且断裂位置均为母材，表明焊缝强度高于母材，试验结果满足标准要求。

表4 全焊缝拉伸试验

| 编号 | A8（25mm） | A7（38mm） |
|---|---|---|
| 屈服强度$R_e$/MPa | 585 | 590 |
| 抗拉强度$R_m$/MPa | 670 | 650 |
| 伸长率A（%） | 24 | 21.5 |

表5 横向拉伸试验

| 编号 | 抗拉强度/MPa | 断裂位置 |
|---|---|---|
| A7（38mm）－1 | 583 | 母材 |
| A7（38mm）－2 | 582 | 母材 |

（2）弯曲试验 据AWS标准的要求，将弯曲试样沿厚度方向取4个试样，进行侧弯试验，弯曲试验条件为压头直径50.8mm，弯曲角180°。试验结果均满足标准要求，如图5所示。

图5 38mm板弯曲试样

（3）冲击试验 将根据AWS D1.1标准制备好的试样放入冷却槽冷却至－20°，试样缺口位置分别位于焊缝中心、熔合线、熔合线+2mm、熔合线+5mm、根部焊缝、根部熔合线，试验结果如表6所示。

表6 38mm板冲击试验结果

| 缺口位置 | 单个冲击吸收能量$A_{kv}$/J（－20℃） | 平均吸收能量$A_{kv}$/J（－20℃） |
|---|---|---|
| 焊缝中心 | 59，63，58 | 60 |
| 熔合线 | 135，109，122 | 122 |
| 熔合线+2mm | 130，112，135 | 126 |
| 熔合线+5mm | 175，192，191 | 186 |
| 根部焊缝 | 102，104，81 | 96 |
| 根部熔合线 | 137，85，59 | 94 |

表6的试验结果满足标准－20℃冲击要求：

单个冲击吸收能量$A_{kv}$≥27J，平均吸收能量$A_{kv}$≥34J，三丝、四丝均能够满足－20℃冲击要求，为后续－40℃低温冲击多丝埋弧焊接工艺开发奠定了基础。

（4）焊缝宏观及硬度测试　按上述焊接工艺焊接D36钢板的焊缝金属宏观图像如图6所示。通过对焊缝宏观检查，发现焊缝完全焊透，无裂纹等缺陷。

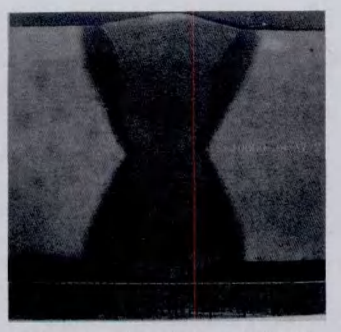


图6　38mm板焊缝金属宏观图像

宏观试验后按图7所示分别对焊接接头的上、中、下表面进行维氏硬度测量，从左至右分别为母材、热影响区、焊缝、热影响区、母材，接头硬度测试结果如图8所示。

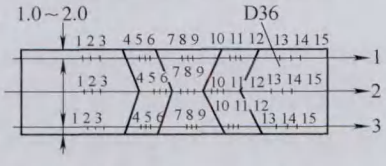



图7　焊接接头硬度测试取值位置示意

注：1～15为硬度测试点

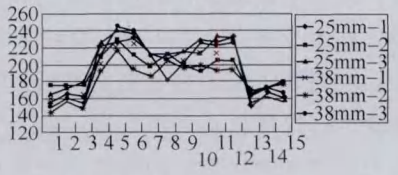



图8　焊接接头硬度测试值

从图8可看出，焊接接头从焊缝中心到母材这段距离，不同位置的维氏硬度值时高时低，呈波浪式变化。熔合线处一边是温度较低的母材，一边是温度较高的熔池金属，存在较大的温度梯度和过冷度，使得该处组织比焊缝其他位置组织细小、致密，细晶强化作用明显，表现出较高的硬度。而且熔合线偏母材一侧，母材金属处于过热状态，奥氏体晶粒发生严重的长大，冷却后容易生成硬脆组织，所以其硬度值升高，但均低于AWS D1.1—2008标准要求的325HV，符合要求。

### 6. CTOD试验及扫描电镜和金相分析

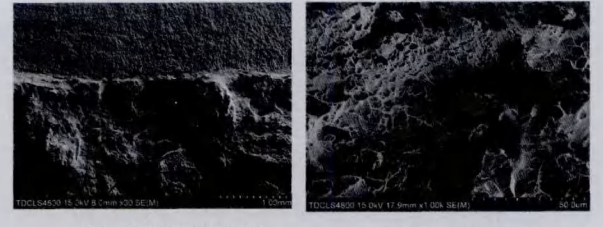
（1）CTOD试验　为更准确的测试焊缝金属的韧性，根据BS—7448—1991标准进行了38mm板焊缝金属CTOD试验，试验温度0℃，试验结果如表7所示。为确保CTOD试验结果的可靠性，在判定试验结果的有效性时，不仅要符合BS7448标准，更要符合DNV—OS—C401标准的规定，根据验收标准，全厚度试样的裂纹尖端张开位移CTOD值达到0.15mm即满足要求。由此可见，本次CTOD试验结果均符合要求。

表7　CTOD试验值　（mm）

| 编号 | W－1 | W－2 | W－3 |
|---|---|---|---|
| CTOD值 | 0.1920 | 0.1622 | 0.2918 |

（2）扫描电镜试验和起裂区金相组织分析　为分析CTOD试验值的差异，了解影响焊缝金属韧性的因素，特选择CTOD值较低和较高的W－2和W－3试样进行比较。

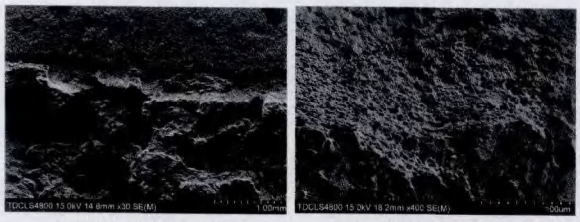
试样W－2断口宏观及微观形貌分析如图9所示。从图9a宏观形貌可知，裂纹尖端只有少量的区域，断口昏暗，大部分区域断口齐平、光亮，有明显的反光小刻面。从图9b微观形貌发现，裂纹尖端出现少量的韧窝，在韧窝区域下方变成河流解理特征。由宏微观形貌发现，裂纹尖端在起裂过程中出现少量塑性韧窝特征，然后转变为脆性的解理。



（a）宏观形貌放大30×　（b）微观形貌放大1000×

图9　W－2断口形貌

试样W－3断口宏观及微观形貌如图10所示。从图10a宏观形貌可知，裂纹尖端有部分区域断口昏暗，接着往下断口齐平、光亮，有明显的反光小刻面。从图10b微观形貌发现，在放大400倍下，裂纹尖端有较大范围出现了塑性的韧窝形貌，然后才出现脆性的河流花样。由宏微观形貌发现，裂纹尖端在起裂过程中出现大量拉长的韧窝形貌，因此材料表现出较好的断裂韧性。



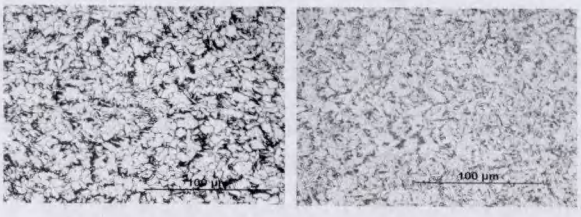
(a) 宏观形貌放大30×　　(b) 微观形貌放大400×

图10　W－3断口形貌

根据扫描电镜的试验结果，W－3试件裂纹尖端出现的韧窝数量明显多于W－2试件，在起裂过程中出现大量拉长的韧窝形貌，因而能够表现出更好的断裂韧性。

出现上述差异主要的原因可能有：预制裂纹差异、CTOD曲线计算误差、试验件内部存在较小的被判定为合格的微小缺陷、温度场对焊缝接头的韧性影响等，为准确判定原因，进行起裂区金相组织分析。

（3）起裂区金相组织分析　按照金相组织分析试验的标准，将断口起裂区经粗磨、精磨、抛光、腐蚀后在光学显微镜下观察组织并照相。试验腐蚀剂为4%的硝酸酒精溶液；腐蚀时间根据腐蚀后组织情况而定。试样组织分别如图11a、11b所示。




(a) W－2试样 金相组织500×　(b) W－3试样 金相组织500×
主要为块状F+针状F+少量P　主要为块状F+针状F+少量P

图11　金相组织

图11a（W－2试件）中主要是铁素体和少量珠光体，但存在出现先共析铁素体的风险，粗大的先共析铁素体会降低焊接接头的力学性能和断裂韧性，可能由于试验板材的预热不均匀，导致焊缝各部分的冷却速度差别。虽然W－2试样中针状铁素体少于W－3试样，但是韧性要求符合标准要求。

图11b（W－3试件）中组织较细腻，针状铁素体较多，针状铁素体对裂纹的传播会有更大的阻碍作用，此外，由于针状铁素体中具有较小的等轴晶粒和许多细小的弥散析出相及高密度位错，故具有良好的力学性能，使材料表现出较好的断裂韧性，其断口微观形貌出现一定范围塑性的韧窝花样。

## 三、结语

（1）焊接参数选择合理，焊接热输入找到恰当的平衡点，因此能够得到力学性能良好的焊接接头；新工艺采用集成的控制系统，先编程后施工，降低了操作难度，保证了焊接质量。

（2）新工艺采用大钝边埋弧焊工艺，取消碳弧气刨作业，极大地提高了焊接效率，减少噪声，降低烟尘污染，显著改善车间作业环境。

（3）新工艺通过改变电弧特性，在热输入相同的情况下，通过调节波形平衡，有效增加了熔敷率，使双面单道焊的板厚有效增加，减少焊接工序，缩短焊接时间，减少了碳弧气刨和焊接中断时间，极大地提高了焊接效率。

（4）新工艺试验结果表明，四丝埋弧焊接新工艺能够满足海洋工程领域的苛刻要求，此新工艺应用于海洋工程程领域是可行的。**MW**

（20120718）

## 压力容器制造委员会2012年年会暨技术交流会胜利召开

2012年9月17~20日，中国机械工程学会压力容器制造委员会2012年年会在冰城哈尔滨召开。中国机械工程学会压力容器分会常务秘书卞庆生以及来自50多家压力容器制造企业的总工、技术人员近80人参加了本次大会。戈兆文高工做了精彩报告，会员单位部分代表也分别就各自研究领域进行了技术交流。9月18日，会议代表在哈焊所江北新址召开了压力容器制造委员会哈焊所技术交流会，哈焊所杜兵副所长做了题为《焊接技术在重大装备中的应用》的报告，对焊接装备、材料及焊接工艺的发展提出了建设性的思考。全国焊接标准化技术委员会朴东光秘书长做了题为《焊接标准化现状及发展动态》的报告，详细介绍了焊接行业标准的制定、实施、国内外发展现状及各个压力容器企业关注的标准技术问题。威尔公司徐锴副总经理做了题为《压力容器中高端焊接材料国产化现状及应用》的报告，重点介绍了压力容器主焊缝及内壁堆焊用焊接材料的应用及发展现状。　（本刊报道）