

引文: 罗志立, 隋永莉. 油气管道环焊缝自动焊未熔合影响因素[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1166-1174.

LUO Zhili, SUI Yongli. Factors influencing incomplete fusion in automatic girth welding of oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1166-1174.

油气管道环焊缝自动焊未熔合影响因素

罗志立¹ 隋永莉²

1. 国家管网集团建设管理分公司;

2. 中国石油天然气管道科学研究院有限公司·油气管道输送安全国家工程研究中心

摘要: 针对油气管道环焊缝全自动焊过程中出现的未熔合问题,采用焊接工艺试验和数值仿真相结合的方法,对未熔合的影响因素进行了研究。结果表明:在焊接位置由 3:00 移动至 6:00 的过程中,焊炬的摆动宽度逐渐增大,如保持焊接热输入量不变,则焊接工艺由大电流、高焊速转变为小电流、慢焊速。适当增加摆动宽度有助于加大坡口侧壁的熔池深度,保证熔滴过渡的稳定性,降低侧壁未熔合的出现概率;焊接位置在 4:30 至 6:00 时,焊缝成型通常较差,当前焊道出现的“驼峰”焊道将使下一焊道出现未熔合的概率增大;摆动焊接时的焊接温度场呈现出“锯齿形”,当摆动频率达到 5 次/s 及以上时,可有效消除该“锯齿形”形貌。研究成果可为提升管道自动焊的质量与效率提供参考。(图 17,参 20)

关键词: 油气管道; 自动焊; 环接头; 未熔合

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)10-1166-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.010

Factors influencing incomplete fusion in automatic girth welding of oil and gas pipelines

LUO Zhili¹, SUI Yongli²

1. Construction Project Management Sub-Company, China Oil & Gas Pipeline Network Corporation;

2. China Petroleum Pipeline Research Institute Co. Ltd./National Engineering Research Center for Pipeline Safety

Abstract: In view of the incomplete fusion occurred in the automatic girth welding of oil and gas pipelines, the factors influencing the incomplete fusion were studied with the welding procedure test and numerical simulation in combination. The results show that the swing width of the welding torch gradually increases for welding within the range from 3:00 to 6:00 o'clock. During this process, the welding process has the welding current decreased and the welding speed slowed down if the heat input remains unchanged. In this case, a larger swing width is helpful to increase the welding pool depth on the groove wall, thus guaranteeing the stability of weld droplet transition and reducing the risk of incomplete fusion on the wall. Besides, the weld morphology at the position of 4:30-6:00 was very poor, and the “hump weld” in the current pass will increase the probability of incomplete fusion in the next pass. In addition, the welding temperature field is in a serrated shape during the swing welding, which can be effectively eliminated at the swing frequency of 5 times/s or above. The research results can provide reference for improving the quality and efficiency of pipeline automatic welding. (17 Figures, 20 References)

Key words: oil and gas pipeline, automatic welding, girth weld, incomplete fusion

近年来,随着国家对清洁能源需求的不断增长,油气管道建设的管径、钢级、壁厚、输送压力逐步提高,对焊接施工技术和管道环焊缝质量提出了更高的要求。环焊缝全位置自动焊具有焊接质量好、焊接效率高、焊缝性能稳定性好、劳动强度低等优点,具有良好的应用前景^[1-3]。自 20 世纪 90 年代以来,中国的环焊缝自动

焊技术得到了长足发展,在中俄东线天然气管道工程建设中,管道自动焊技术的应用取得了卓越成效^[4-5],管道自动焊的大范围应用正逐步得到业内认可。

然而,环焊缝全位置自动焊的未熔合问题已成为影响管道自动焊应用的突出问题^[6-11]。祈哲等^[12]统计分析了西气东输二线东段管道自动焊的 1 700 道焊口,

发现焊接缺陷大多分布在仰焊位置,主要是细长的未熔合。张建护等^[13]以西气东输管道山西临汾段的自动焊焊口为例,分析了未熔合、气孔等缺陷的形成原因与控制措施。Rihar 等^[14]指出未熔合作为一种平面型缺陷,通常出现在立焊至仰焊段的坡口侧壁、焊层间以及根部,难以通过射线检测方法发现。根据其在焊缝剖面上的分布位置,未熔合可分为侧壁未熔合、层间未熔合、根部未熔合、盖面未熔合 4 类,其中侧壁未熔合最为常见,应对其进行重点关注。

未熔合将减少焊接接头的承载面积,并增加焊接接头局部应力集中,对承受内压、土壤扰动、应力腐蚀或低温工作环境中环焊接头的服役安全非常不利。基于油气管道焊接施工经验及焊接缺陷统计分析,未熔合主要分布于环焊缝下半圈 4:00 至 6:00 位置,其成因主要包括以下 3 点^[15]:①焊偏。目前管道自动焊设备一般具有焊枪自动对中功能,但在焊接过程中受管端不圆度、管口噉嘴、焊口错边等因素影响,仍会出现局部焊偏,此时通常采取人工干预手动对中,如果人工干预不当就会产生未熔合。②摆动幅度不合适。当焊枪摆幅较小时,坡口壁不能被充分加热和熔化,易产生侧壁未熔合;当焊枪摆幅过大时,坡口壁过度熔化和烧损,产生咬边而导致下一焊层出现侧壁未熔合。③打磨质量。当焊缝打磨和清理的形状不规则时,该部位易产生未熔合。计算流体力学仿真^[15-16]可有效分析流体的流动行为,Zhu 等^[17]通过计算流体动力学模拟研究摆焊对熔池形状及其流动行为的影响,分析了不同情况下熔池流动形态及熔滴下落冲击位置对侧壁未熔合的影响规律。Xu 等^[18]研究了“窄间隙+微摆动”工艺下的熔池流动行为,发现采用摆动焊接有助于增加侧壁熔深,侧壁熔深随摆动频率增加而增大。Panwisawas 等^[19]基于计算流体力学研究了焊接气孔等缺陷与熔池流动行为的关系。Yang 等^[20]研究了熔滴过渡行为、熔池稳定性等与未熔合的关系,发现较大的熔滴对电弧能量有一定阻挡作用,同时可造成剧烈的熔池扰动,增加未熔合的发生风险。

未熔合是当前影响油气管道自动焊质量的主要问题之一,其受焊接工艺、焊道形貌等多种因素共同影响,成因较为复杂。在此,通过开展环焊缝自动焊试验,并对其焊接行为进行数值仿真,探究未熔合现象的防控措施,相关结果有助于优化焊接工艺,提升管道自动焊的焊接质量及效率。

1 试验材料与方法

选取 1 219 mm×22 mm(直径×壁厚)的 X80M 钢管作为试验对象。管道自动焊设备型号为 CPP900-W2N,焊接材料为 GB/T 8110—2020《熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》中的 G55 A6 M21 SN2 实心焊丝,规格 1.0 mm。焊接过程中以 80%Ar+20%CO₂ 的混合气体作为保护气体。焊接坡口形式为复合 V 形,焊道数量为 8 层 9 道(图 1,编号①~⑨),焊接方向为立向下焊。焊接工艺参数是当前相关油气管道工程中广泛使用的环焊缝自动焊工艺参数。采用 weldQAS(weld Quality Arc System)红外测温探头对焊枪后方 20 mm 位置的温度场进行采集,并通过 weldQAS 数据采集系统实时记录焊接过程的工艺参数(图 2)。考虑到未熔合主要分布于下半圈 4:00 至 6:00 位置,测试点位选取为 3:00 至 6:00 的管段位置。基于带加热台的原位激光共聚焦系统(图 3),将制取的 X80M 试样加热至熔化,测得 X80M 的熔化温度,明确试验材料的真实熔点。

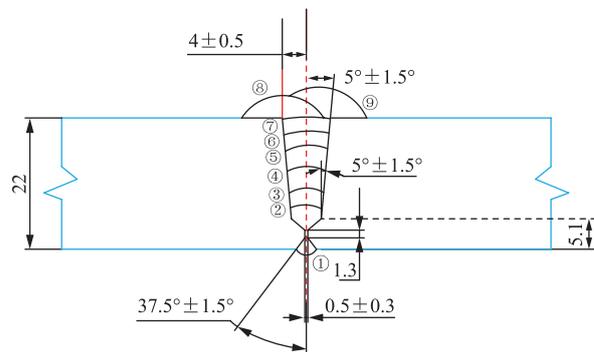


图 1 X80M 管道自动焊坡口形式及焊道顺序图(mm)
Fig. 1 Automatic welding groove form and weld pass sequence for X80M pipeline (mm)

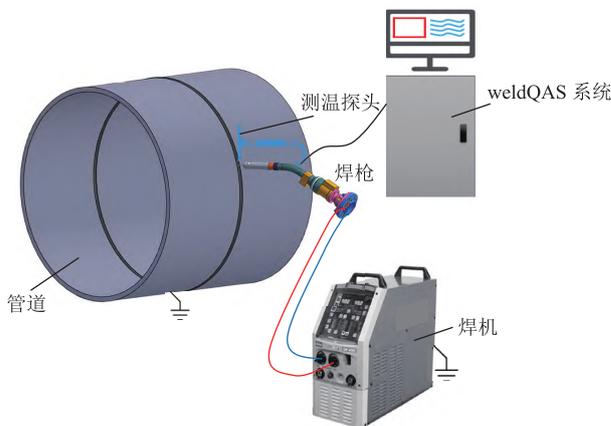


图 2 X80M 管道自动焊过程及数据采集系统示意图
Fig. 2 Automatic welding process and data acquisition system of X80M pipeline

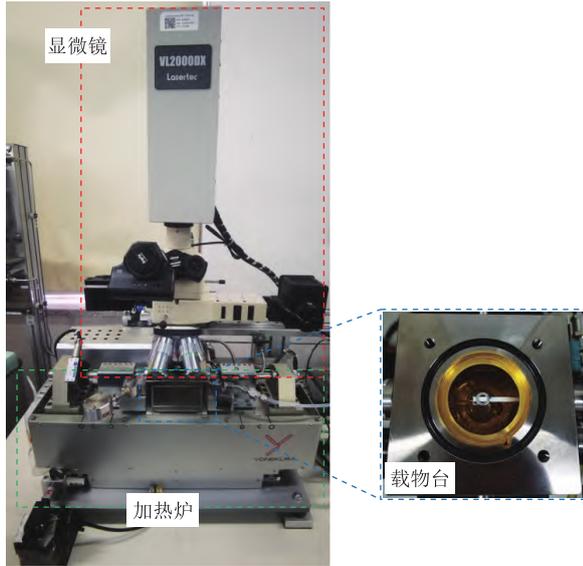


图3 测试 X80M 钢真实熔点的原位激光共聚焦系统实物图
Fig. 3 In-situ laser confocal system for true melting point testing of X80M steel

2 摆焊热源模型与数值仿真

2.1 摆焊热源模型

基于双椭球热源,利用 FORTRAN 语言进行了焊接热源二次开发,建立了摆动电弧动态热源模型。该模型不改变双椭球热源的热流密度分布函数,通过焊接局部坐标移动的方式实现热源的摆动。双椭球热源的热流密度分布函数为:

$$q_f(x,y,z) = \frac{12\sqrt{3}\eta UI}{(a_f+a_r)b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right), \quad x \geq 0 \quad (1)$$

$$q_r(x,y,z) = \frac{12\sqrt{3}\eta UI}{(a_f+a_r)b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right), \quad x < 0 \quad (2)$$

式中: η 为热效率; I 为焊接电流, A; U 为电弧电压, V; q_f 、 q_r 分别为热源前部、后部的热流密度分布函数; a_f 、 a_r 、 b_h 、 c_h 为双椭球体热源的分函数; x 、 y 、 z 为热源移动时的局部坐标,分别对应摆动焊接中的沿摆动方向、焊接方向、试板的壁厚方向。

在摆动焊接过程中,焊枪的移动速度可以分解为沿焊接方向的移动速度 v_y 和沿摆动方向的移动速度 v_x ,通过调整 v_y 、 v_x 可实现不同摆频、不同焊速的摆动焊接(图4)。将摆焊的运动轨迹简单拆分为4个阶段:①左端停留阶段(AB段),该阶段 v_y 不变、

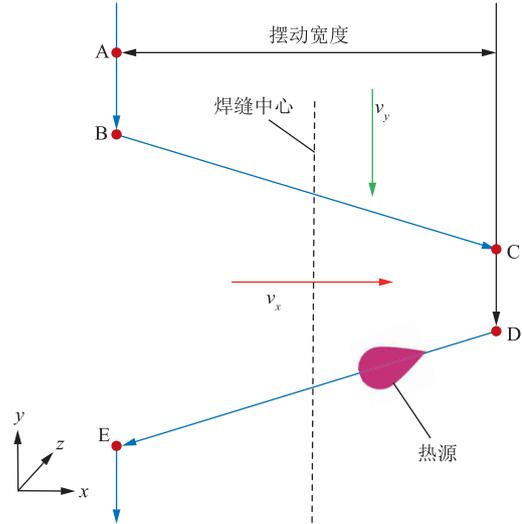


图4 管道自动焊摆动焊接时焊枪移动示意图
Fig. 4 Movement of welding gun during automatic swing welding of pipeline

$v_x=0$;②由左向右摆动阶段(BC段), v_y 不变、 v_x 方向由左向右;③为右端停留阶段(CD段), v_y 不变、 $v_x=0$;④为由右向左摆动阶段(DE段), v_y 不变、 v_x 方向与BC段相反。

2.2 环焊接头的有限元模型

基于 SYSWELD 有限元软件,建立管道环焊接头的有限元网格模型。考虑到本工作是针对摆焊温度场进行数值仿真,因此截取管道自动焊模型的局部信息进行温度场仿真(图5)。局部仿真模型中的焊道形貌基于环焊接头金相试样形貌建模,可将焊接工艺、焊道成型、外界因素等影响因素考虑在内。为了提高计算效率与精度,焊缝及热影响区附近的网格尺寸约为 $0.4\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,远离焊缝区域的网格尺寸约为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。



图5 管道自动焊摆焊温度场有限元网格划分图
Fig. 5 Finite element mesh model of temperature field in automatic swing welding of pipeline

2.3 边界条件及控制方程

考虑焊接有限元模型与周围空气的辐射、对流散热,其控制方程为:

$$H=eC_0(T+T_0)(T^2+T_0^2)+H_0 \quad (3)$$

式中: e 为辐射系数,取 -0.8 ; C_0 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $-5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T 、 T_0 分别为焊接温度、环境温度, K ; H_0 为对流系数,取 $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; H 为考虑辐射和对流的换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

对摆焊温度场进行仿真时,将局部仿真模型两端在 x 、 y 、 z 方向均进行刚性位移约束(图6)。

X80M 钢在加热、冷却过程中涉及的相有面心立方(Face Centered Cubic, FCC)结构的奥氏体相及体心

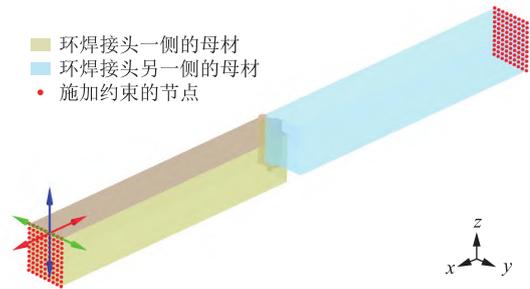
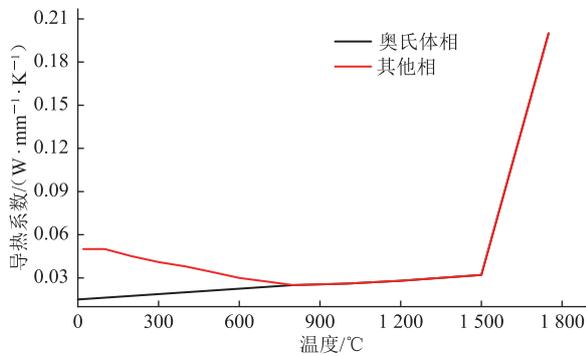
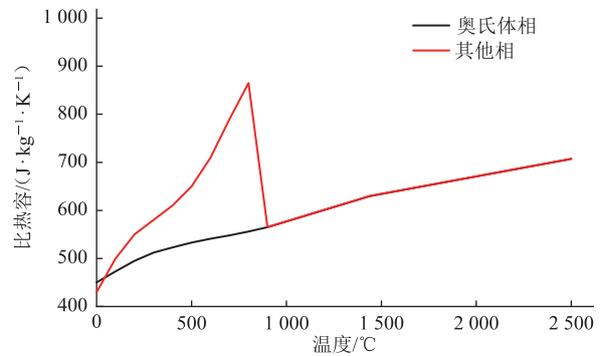


图6 管道自动焊摆焊温度场仿真约束边界条件示意图
Fig. 6 Constraint boundary conditions for simulation of temperature field in automatic swing welding of pipeline

立方(Body Centered Cubic, BCC)结构的铁素体相、贝氏体相、马氏体相等,各相在不同温度下具有不同的导热系数及比热容(图7)。



(a) 导热系数



(b) 比热容

图7 X80M 钢中各相热物理参数随温度变化曲线

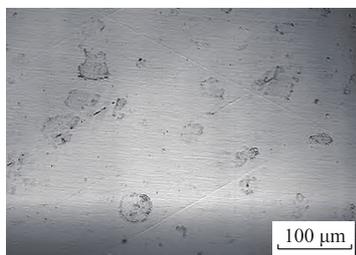
Fig. 7 Thermophysical parameters of various phases in X80M steel varying with temperature

3 结果与讨论

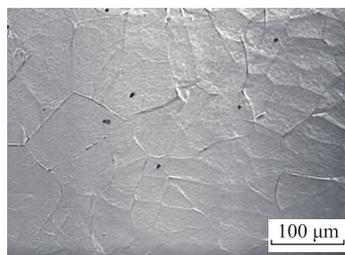
3.1 熔点

基于带加热台的原位激光共聚焦系统,将 X80M 试样以 $13 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ 的速度加热,直至试样完全熔化,精确测量材料的熔点。为更清楚地观测试样表面熔化情

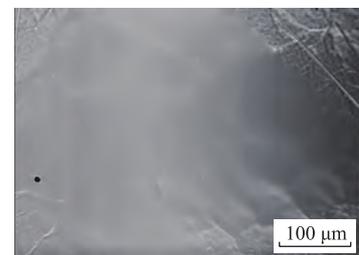
况,将 X80M 金相试样表面机械抛光,但不进行腐蚀操作,仅在加热过程中观察表面形貌(图8)。当试样加热至 $1560 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,可见粗大的奥氏体晶界已开始出现“预熔”或部分熔化的现象;当试样加热至 $1590 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,试样表面已大部熔化。因此,该试验将 X80M 钢的熔点定义为 $1590 \text{ }^\circ\text{C}$ 。



(a) $25 \text{ }^\circ\text{C}$



(b) $1560 \text{ }^\circ\text{C}$



(c) $1590 \text{ }^\circ\text{C}$

图8 X80M 钢在加热熔化过程中的表面形貌图

Fig. 8 Surface morphology of X80M steel during heating and melting process

3.2 管道摆焊自动焊工艺试验

焊接工艺试验均从 $2:30$ 位置起弧至 $6:30$ 位置收弧,试验过程中通过 weldQAS 系统采集焊接温度场及相关

焊接工艺参数,包括焊接电流、焊接电压、焊接速度、焊接热输入、摆宽、摆频、边缘停留时间等,并以摆焊自动焊的焊接工艺参数为基础,分析该工艺的典型特点。

3.2.1 焊接工艺参数

为了更加直观地体现管道自动焊的工艺特点,分别记录 3:00、4:00、5:00、6:00 等焊接位置在自动焊过程中的焊接工艺参数(图 9)。可见热焊层的焊接速度最

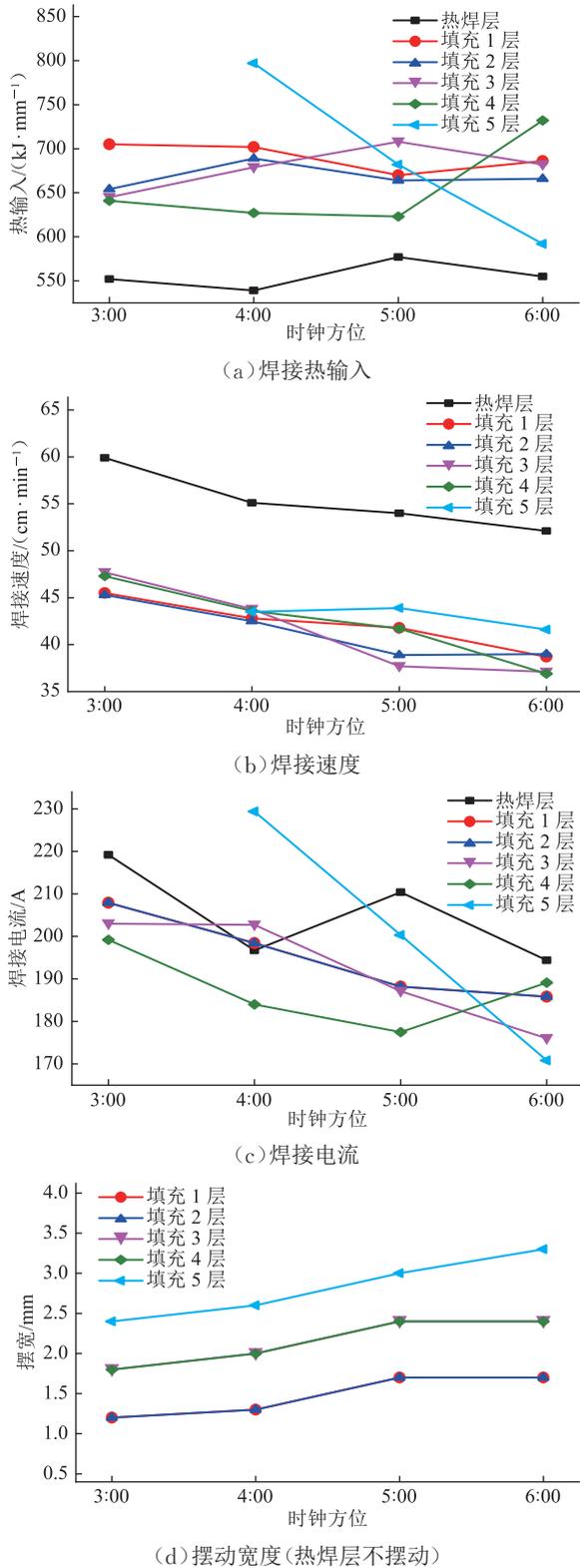


图 9 X80M 管道自动焊工艺参数随焊接位置变化曲线

Fig. 9 Variation of automatic welding process parameters of X80M pipeline with welding position

快、焊接热输入最小,焊枪由 3:00 位置移动至 6:00 位置的过程中,各焊道的焊接速度、焊接电流均逐步减小,填充 1~4 层的焊接热输入相近,填充 5 层不同焊接位置的焊接热输入差异较大。对比不同焊接位置的热输入变化,可见热焊层及填充 1~4 层的焊接热输入与焊接位置的变化无明显规律,填充 5 层由 4:00 位置移动至 6:00 位置的焊接过程中,焊接热输入急剧减小。在由 3:00 位置移动至 6:00 位置的焊接过程中,焊接熔池受重力的影响逐渐显著,目前的焊接工艺是在保持焊接热输入基本不变的情况下,通过降低焊接速度与焊接电流,保证熔滴过渡和熔池的稳定性。在此过程中,焊枪摆动宽度逐步增大。这是由于在采用小电流慢速焊而焊接热输入基本不变的情况下,需要通过增大摆动宽度、增加坡口边缘停留时间,加大坡口侧壁的熔深,降低侧壁未熔合的出现概率。

3.2.2 焊道成型及侧壁未熔合影响因素

焊后通过三维形貌扫描仪对焊道形貌进行扫描,由填充 5 层与填充 4 层的焊缝三维形貌图(图 10)可

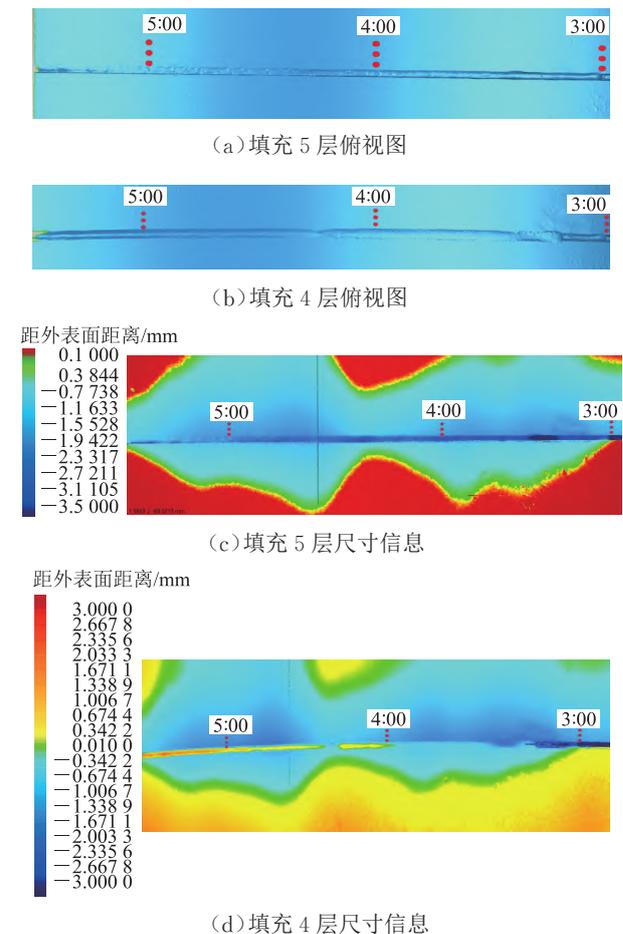


图 10 X80M 管道自动焊部分环焊缝俯视图及尺寸信息云图

Fig. 10 Top view and sizes of some girth welds in automatic welding of X80M pipeline

见,沿 3:00 至 6:00 方向,焊缝表面距钢管外表面的距离逐渐减小。这说明对于同焊层,相比于 3:00~3:30 位置,4:30~6:00 位置的填充量较大,焊缝成型较差,焊缝表面凹凸不平,常伴随有“驼峰形”的焊道形貌。

为探究焊缝成型与未熔合的关系,分别在 3:00、6:00 位置预留阶梯型焊道,观察每层焊道形貌。焊后截取阶梯形焊道的剖面制成金相试样,采用 4%(体积分数)硝酸酒精溶液腐蚀显示焊缝成型轮廓(图 11、图 12)。

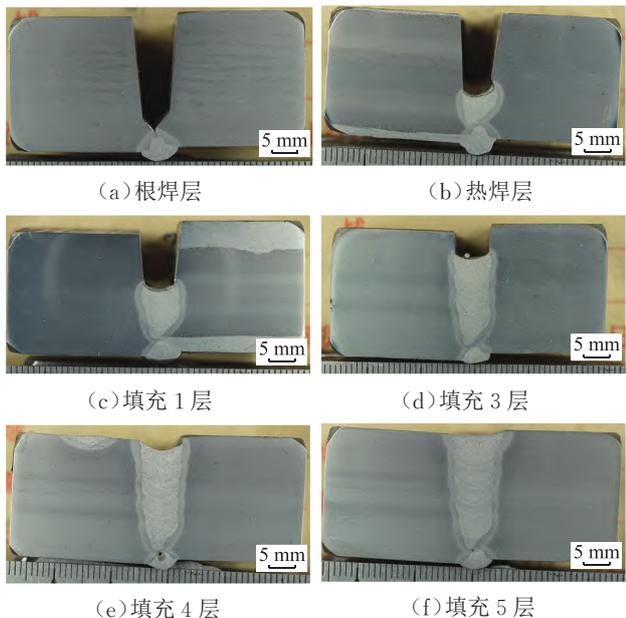


图 11 X80M 管道自动焊环焊缝 3:00 位置阶梯焊道剖面图
Fig. 11 Profile of ladder weld pass at 3:00 position of X80M pipeline automatic girth weld

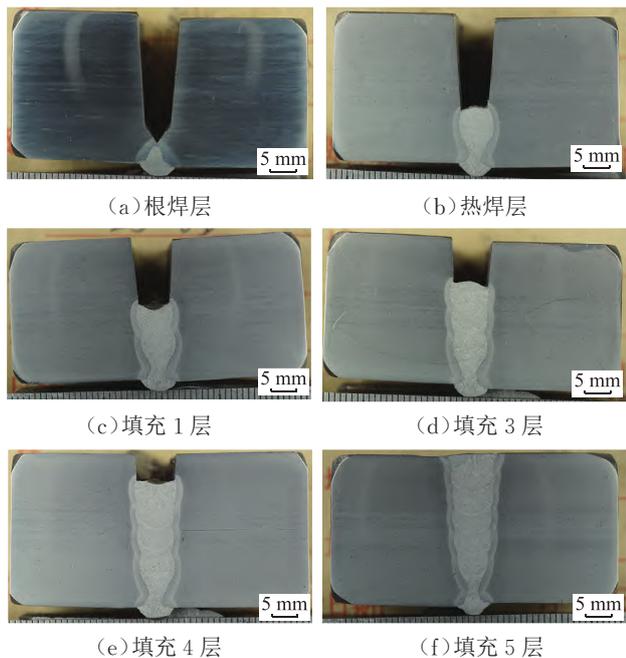


图 12 X80M 管道自动焊环焊缝 6:00 位置阶梯焊道剖面图
Fig. 12 Profile of ladder weld pass at 6:00 position of X80M pipeline automatic girth weld

可见 3:00 位置各焊层靠近坡口壁位置的焊道高度略高于焊道中部,均呈现“中间凹”的焊道形貌,而 6:00 位置的热焊层与填充 3 层呈现出“驼峰形”焊道形貌。

分析环焊缝自动焊工艺参数,热焊层焊接时为直拉操作,焊枪不摆动,熔池内的铁水在 6:00 及其附近位置时受重力的影响最为显著,因而更容易产生“驼峰形”焊道。但填充 3 层焊接时,由于焊枪摆动宽度相对较小,且焊接电流较小,相对其他焊道较容易产生“驼峰形”焊道形貌。当出现“驼峰形”焊道时,可通过焊缝打磨去除,也可通过调整焊接工艺参数加以改善。侧壁未熔合与当前焊道及其下一焊道的焊道成型密切相关(图 13)。如果当前焊道呈现典型的“驼峰型”,则焊道的坡口两侧不易被充分熔化,将影响下一焊道的成型,使其易产生侧壁未熔合。

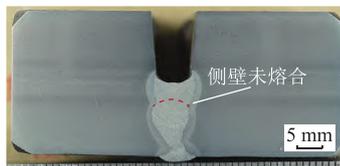


图 13 发生侧壁未熔合的 X80M 管道自动焊环焊接头剖面图
Fig. 13 Profile of automatic girth weld for X80M pipeline with incomplete fusion on sidewall

3.2.3 焊接温度场分布

当侧壁未熔合产生时,常伴随“冷熔”或“过熔”现象(图 14)。“冷熔”指与坡口接触的“熔池铁水”温度过低,且保持熔化状态的时间较短,导致坡口壁未能充分熔化,从而产生侧壁未熔合;“过熔”指与坡口接触的熔池铁水温度过高,且保持熔化状态时间较长,导致坡口壁过度熔化形成过熔沟槽,从而在下一焊道产生侧壁未熔合。

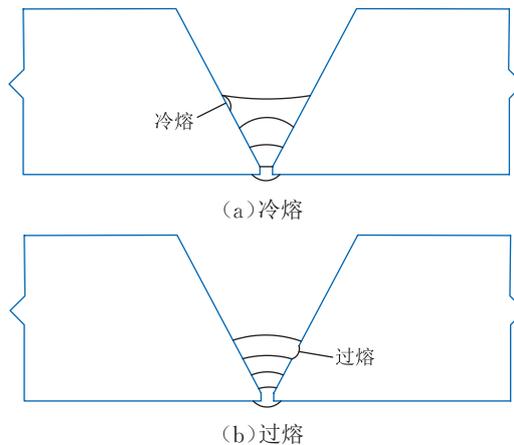


图 14 冷熔、过熔产生侧壁未熔合示意图
Fig. 14 Incomplete fusion on sidewall caused by cold fusion or superfusion

由于已确定了 X80M 钢的熔化温度为 1 590 ℃,可据此明确数值仿真过程的熔池尺寸,并评估坡口侧

壁的熔化程度,以界定“冷熔”及“过熔”的边界。为保证焊接熔池的数值模拟精度,将实际焊接接头剖面与数值模拟结果进行对比。由立焊位置的对比结果(图15)可见,数值模拟结果与实际结果相似,表明热源校核成功,数值模拟结果具有可信性。

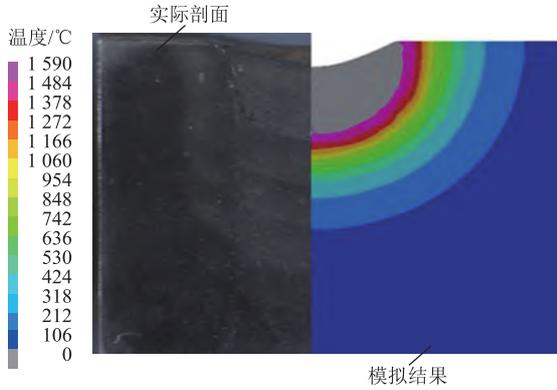
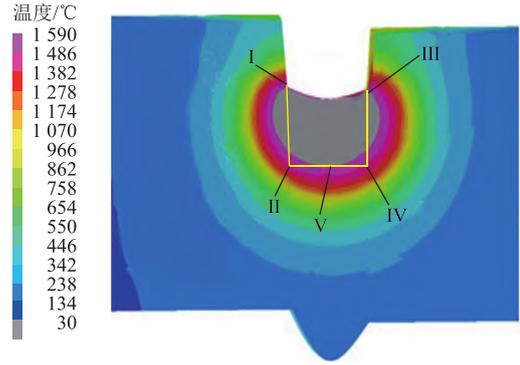


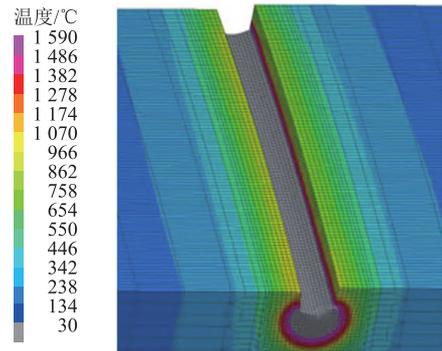
图15 X80M管道环焊接头实际剖面与焊接熔池数值模拟结果对比图

Fig. 15 Comparison between the actual profile of X80M pipeline girth weld and the numerical simulation results of welding pool

分析摆焊自动焊剖面温度场,可见摆动焊接时,温度场在坡口内部及其附近区域的分布是不均匀的,具体表现为坡口一侧的温度略高于另一侧(图16),同一焊接时刻下I、II两点的温度高于III、IV两点的温度,这取决于摆焊热源的运动轨迹(图4)。热源轨迹呈“锯齿形”,当热源运动至CD段时,该位置被充分加热,而其对面的BE段不能被焊接热源直接加热,在同一时刻的宏观温度场分布上表现为CD段的温度高于BE段,且温度场呈现非对称性的锯齿形分布规律。摆动焊接时温度场的不均匀分布会导致坡口侧壁出现“冷熔”或“过熔”现象,从而增加侧壁未熔合的发生概率。



(a) 截面温度场



(b) 三维温度场

图16 自动焊摆频较低时焊接温度场云图

Fig. 16 Cloud diagram of welding temperature field at low swing frequency in automatic welding

weldQAS系统探头测试区域位于焊丝后方约20 mm处,该区域是已经凝固的焊缝区,而数值模拟可对焊接过程任意时刻和位置进行计算分析。对比weldQAS系统测量及数值模拟获得的焊接工艺试验过程温度场云图(图17),可见测试区的峰值温度为900~1 200 °C,数值仿真预测的温度场分布趋势与试验测得的温度场分布趋势相同,摆频较低时,温度场具有“锯齿形”形貌;当摆频达5次/s及以上时,可有效消除摆焊温度场的“锯齿形”形貌。

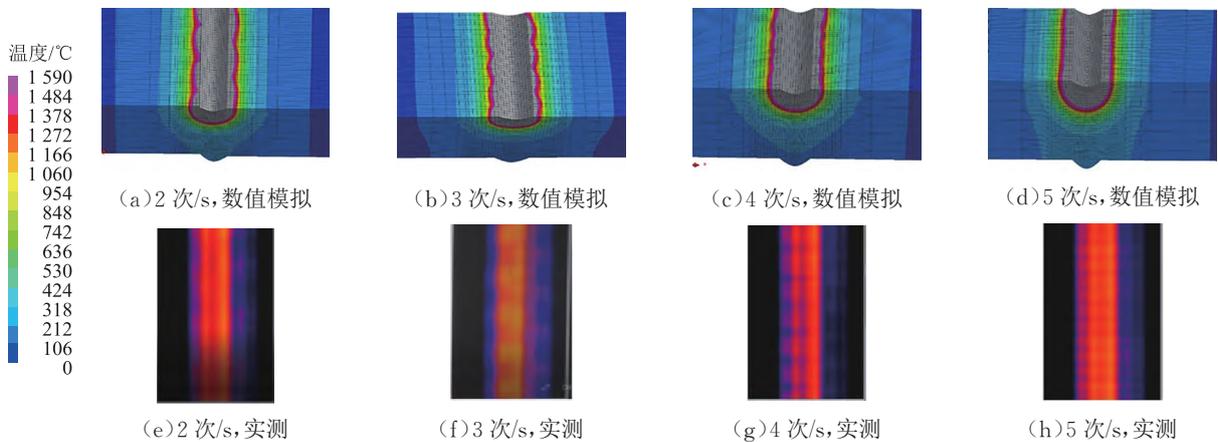


图17 weldQAS系统实际测量及数值模拟获得的不同摆焊频率焊接工艺试验过程温度场云图

Fig. 17 Cloud diagram of temperature field during welding process test at different swing frequencies measured by weldQAS system and from numerical simulation

4 结论

针对油气管道环焊缝全自动焊过程中出现的未熔合问题,采用焊接工艺试验与数值仿真相结合的方法,分析了3:00至6:00位置的焊接热输入、焊接速度、焊接电流及摆动频率、摆动宽度对焊接行为的影响,进一步研究了其对未熔合出现概率的影响,主要结论如下。

(1)焊接位置由立焊位转变成仰焊位过程中,熔池受重力的影响愈发显著,在保持热输入基本不变的情况下逐渐降低焊接速度和焊接电流,有效保证了熔滴过渡和熔池的稳定性。

(2)焊枪由3:00位置移动至6:00位置的过程中,采用小电流、慢速焊且焊接热输入基本不变时,需要通过增大摆动宽度、增加坡口边缘停留时间来加大坡口侧壁的熔深,降低侧壁未熔合的出现概率。

(3)对于同焊层而言,4:30~6:00位置的填充量相对较大,焊缝成型较差,常伴有“驼峰形”焊道形貌,将影响下一焊道的成型,易增加侧壁未熔合出现概率。

(4)摆焊温度场呈“锯齿形”不均匀分布,摆动匹配参数不合理时,易导致坡口侧壁出现“冷熔”或“过熔”现象,从而增加侧壁未熔合的出现概率。通过合理设置与坡口宽度相匹配的焊接速度、焊枪摆动频率,使焊接温度场分布更均匀,可降低侧壁未熔合出现概率。

参考文献:

- [1] 权涛. 中国长输油气管道自动焊技术应用现状及展望[J]. 化工管理, 2021(5): 69-70, 72. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2021.05.033.
- QUAN T. Application status and prospect of automatic welding technology for long distance oil and gas pipelines in China[J]. Chemical Enterprise Management, 2021(5): 69-70, 72.
- [2] 张毅, 刘晓文, 张锋, 邹鹏, 王宽龙. 管道自动焊装备发展现状及前景展望[J]. 油气储运, 2019, 38(7): 721-727. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.07.001.
- ZHANG Y, LIU X W, ZHANG F, ZOU P, WANG K L. Development status and prospect of pipe automatic welding equipment[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(7): 721-727.
- [3] 陈娟, 宋锦, 张悦, 刘学彬, 檀良涛, 赵金水, 等. 高钢级大口径油气管道在役自动焊工艺[J]. 油气储运, 2021, 40(8): 914-918.

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.08.012.

CHEN J, SONG J, ZHANG Y, LIU X B, TAN L T, ZHAO J S, et al. In-service automatic welding technology for high-grade large-diameter oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(8): 914-918.

- [4] 陆阳, 邵强, 隋永莉, 冯大勇. 大管径、高钢级天然气管道环焊缝焊接技术[J]. 天然气工业, 2020, 40(9): 114-122. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.09.014.

LU Y, SHAO Q, SUI Y L, FENG D Y. Girth welding technology for large-diameter high steel grade gas line pipes[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(9): 114-122.

- [5] 许强, 张亮, 吴迪. 中俄天然气东线管道全自动焊接工艺分析[J]. 天然气技术与经济, 2017, 11(4): 37-39. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1132.2017.04.011.

XU Q, ZHANG L, WU D. Automatic welding technology for the sino-Russian eastern route gas pipeline[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2017, 11(4): 37-39.

- [6] 王乐乐, 李莉, 张斌, 孙云峰, 冯学书, 高山卜. 中国油气储运技术现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2021, 40(9): 961-972. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.09.001.

WANG L L, LI L, ZHANG B, SUN Y F, FENG X S, GAO S B. Current status and development trend of oil and gas storage and transportation technologies[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 961-972.

- [7] 李荣光, 张巍, 赵振, 于憬, 汤斌, 孙旭, 等. 高钢级管道环焊缝缺陷修复技术探讨[J]. 油气储运, 2020, 39(3): 307-312, 360. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.03.009.

LI R G, ZHANG W, ZHAO Z, YU J, TANG B, SUN X, et al. Discussion on repair technology of girth weld defects of high-grade steel pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3): 307-312, 360.

- [8] 汪宏辉, 李熙岩, 张波, 刘兴邦, 严辉, 王志航. 长输管道全自动焊接边缘未熔合产生原因与抑制技术[J]. 电焊机, 2019, 49(3): 57-61. DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2019.03.12.

WANG H H, LI X Y, ZHANG B, LIU X B, YAN H, WANG Z H. Technology of causes and suppression of weld edge incomplete fusion for long-distance pipeline automatic welding[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(3): 57-61.

- [9] MENG Y F, LI G, GAO M, ZHANG C, ZENG X Y. Formation and suppression mechanism of lack of fusion in narrow gap laser-arc hybrid welding[J]. The International Journal of Advanced

- Manufacturing Technology, 2019, 100(9): 2299-2309. DOI: 10.1007/s00170-018-2851-7.
- [10] LI L Y, FU J Q, YAO Y G, WANG X J, LIU K, HAN T, et al. Generation mechanism of lack of fusion in X70 steel welded joint by fully automatic welding under steep slope conditions based on numerical simulation of flow field[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(9): 4055-4072. DOI: 10.1007/s00170-023-11386-1.
- [11] HE Y, TANG X H, ZHU C X, LU F G, CUI H C. Study on insufficient fusion of NG-GMAW for 5083 Al alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9): 4303-4313. DOI: 10.1007/s00170-017-0485-9.
- [12] 祈哲, 杨祥海. 管道全位置自动焊焊接缺陷特点及其预防[J]. 电焊机, 2012, 42(2): 84-86. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2303.2012.02.022.
- QI Z, YANG X H. Welding defects characteristics and prevention on metal-cored wire all-position pipe welding[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(2): 84-86.
- [13] 张建护, 唐德渝, 张田利, 侯泽峰. 管道自动焊常见缺陷产生原因及防治措施[J]. 石油工程建设, 2005, 31(3): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2206.2005.03.013.
- ZHANG J H, TANG D Y, ZHANG T L, HOU Z F. Causes of frequently appeared defects in pipeline automatic welding and preventive measures[J]. Petroleum Engineering Construction, 2005, 31(3): 44-47.
- [14] RIHAR G, URAN M. Lack of fusion characterisation of indications[J]. Welding in the World, 2006, 50(1): 35-39. DOI: 10.1007/BF03266513.
- [15] 张忠圆, 邵春雷. 离心泵气液两相流数值模拟与可视化试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 629-637. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7627.2021.05.012.
- ZHANG Z Y, SHAO C L. Numerical simulation and visualization experiment of gas-liquid two phase flow in the centrifugal pump[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 43(5): 629-637.
- [16] 王国华, 贾良鑫, 张鑫建, 张峰, 刘业飞, 仲兆祥. 基于响应曲面法脉冲喷吹效果的CFD数值模拟[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 132-140. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7627.2022.02.002.
- WANG G H, JIA L X, ZHANG X J, ZHANG F, LIU Y F, ZHONG Z X. CFD numerical simulation of pulse-jet cleaning efficiency based on response surface method[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 44(2): 132-140.
- [17] ZHU C X, CHEON J, TANG X H, NA S J, LU F G, CUI H C. Effect of swing arc on molten pool behaviors in narrow-gap GMAW of 5083 Al-alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 243-258. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.04.026.
- [18] XU G X, WANG J Y, LI P F, ZHU J, CAO Q N. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in swing arc narrow gap GMA welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 260-269. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.09.030.
- [19] PANWISAWAS C, SOVANI Y, TURNER R P, BROOKS J W, BASOALTO H C, CHOQUET I. Modelling of thermal fluid dynamics for fusion welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 176-182. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.09.019.
- [20] YANG T, LIU J F, ZHUANG Y, SUN K, CHEN W L. Studies on the formation mechanism of incomplete fusion defects in ultra-narrow gap laser wire filling welding[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106275. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106275.
- (收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-07-25; 编辑: 张腾)
-
- 基金项目:** 中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目“长输管道智能焊接与检测技术装备研究”, 2021ZG01。
- 作者简介:** 罗志立, 男, 1971年生, 高级工程师, 2014年硕士毕业于中国石油大学(北京)安全工程专业, 现主要从事油气储运工程建设相关工作。地址: 河北省廊坊市经济技术开发区四海路18号, 065000。电话: 0316-5973718。Email: luozl@pipechina.com.cn
- 通信作者:** 隋永莉, 女, 1970年生, 教授级高级工程师, 2008年博士毕业于天津大学材料加工工程专业, 现主要从事油气管道及储罐的现场焊接技术方面的研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区金光道44号, 065000。电话: 0316-2076715。Email: suiy1970@126.com



开放科学(资源服务)标识码(OSID):