

API X65 管道深水铺设 GMAW 横向焊接温度场

周灿丰¹, 陈智¹, 焦向东¹, 罗雨¹, 高辉¹, 周珍珍²

(1. 北京石油化工学院 能源工程先进连接技术北京市高等学校工程研究中心、北京, 102617;

2. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨, 150028)

摘要: 为了应对管道深水铺设 GMAW 横向焊接熔池下坠、窄坡口、无衬垫等挑战, 建立了管道三维模型并进行了网格划分, 利用材料软件生成了 API X65 温度场材料数据库, 通过模拟温度场云图与实际焊缝截面的匹配校核了 Goldak 双椭球热源模型, 管道焊接温度场分布 SYSWELD 软件模拟结果与实际焊接过程相符合. 建立了焊接温度场测试系统, 通过背孔法埋设的热电偶测量了 API X65 管线钢平板焊接的热循环曲线. 测试曲线与 SYSWELD 仿真曲线具有相同的温度升降趋势, 上板节点温度也均明显低于下板节点温度. 采用焊缝截面平均热循环曲线作为热源进行了多道焊模拟, 并进行了试验. 结果表明, 多道焊接变形是由焊接工艺参数与残余应力释放共同确定的.

关键词: API X65 管道; GMAW 横向焊接; 热源模型; 焊接温度场; 热循环曲线

中图分类号: TG 402

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20200310001

0 序言

深水油气田勘探开发在 21 世纪中国能源安全保障中具有举足轻重的地位, 列入了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年)》. 中国南海已经探明的油气田储藏的水深多数位于 500 ~ 2 000 m, 对于此类深水海底管道铺设而言, J 形铺设的技术经济综合性能是最优的, 适用水深超过 3 350 m, 因而得到广泛应用和深入研究^[1-11]. 在深水海底管道 J 形铺设工程中, 自动焊接小车位于横向位置, 普遍采用机加工窄坡口达到改善焊缝质量、减少焊丝消耗、提高焊接生产效率的目的. 某些技术手段可以有效地改善横向焊接过程, 例如近些年采用激光焊控制熔池热量输入^[12-13], 以及采用旋转电弧实现窄坡口侧壁的充分熔合^[14-15]. 但是, 这些技术因为存在焊缝性能、焊接效率、设备成本、现场适应性难以满足工程需要等问题, 目前深水海底管道铺设焊接仍然采用 GMAW 自动焊, 研究重点则是开发优质高效的焊接工艺规范.

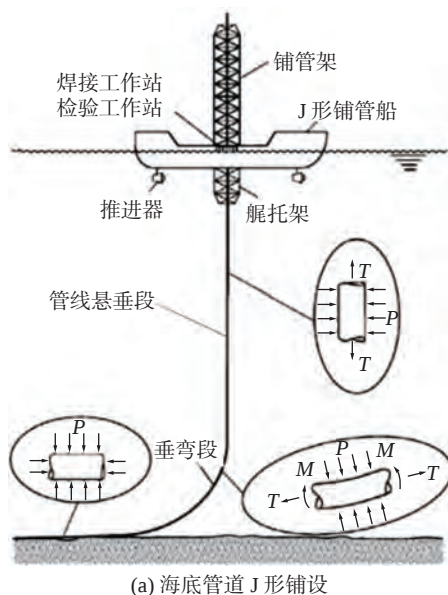
飞速发展的焊接数值计算技术在生产中得到日益广泛的应用, 已经成为开发焊接工艺规范的重

要辅助手段, 而 SYSWELD 软件是其中最为优秀的代表性产品. SYSWELD 软件采用 Goldak 开发的双椭球热源模型描述 GMAW 焊热源, 该模型成功地解决了焊接热源作用下的热分布不均匀问题^[16]. SYSWELD 软件采用 Leblond 开发的相变模型, 该模型假定不同的材料具有不同的热物性和热力学参数, 在某个温度之下将会产生相变, 而相变过程伴随着潜热^[17], 相变模型的应用使得该软件具备优越的金相组织转变仿真功能. 文中在分析海底管道 J 形铺设焊接技术特点的基础上, 采用 SYSWELD 软件进行了 API X65 管道无衬垫、窄坡口、横向焊接的温度场数值仿真, 并建立焊接温度场测试系统、测量了 API X65 管线钢平板焊接的热循环曲线, 并对数值仿真结果和试验结果进行了比对分析.

1 深水海底管道 J 形铺设焊接技术特点

海底管道铺设采用的方法主要包括卷筒铺设、S 形铺设和 J 形铺设. 卷筒铺设是将焊接好的管道缠绕在卷筒上, 铺管作业与海底电缆铺设类似, 该方法铺设效率很高, 但是只适用于浅水区域. S 形铺设通过托管架将管道送到海底, 管道在托管架上呈大写字母 S 形. 如图 1a 所示, J 形铺设通过垂直铺管架将管道送到海底, 下放过程中管道呈大写字母 J 形. 当水深超过 1 500 m 时, J 形铺设与 S 形铺

设相比具有铺管船结构紧凑、推进器功率要求低等非常突出的技术优势。



(a) 海底管道 J 形铺设



(b) 双炬焊接工作站

图 1 海底管道 J 形铺设示意与焊接工作站

Fig. 1 Sketch map of J-lay and welding workstation. (a) J-laying of subsea piping; (b) weling station with double torches

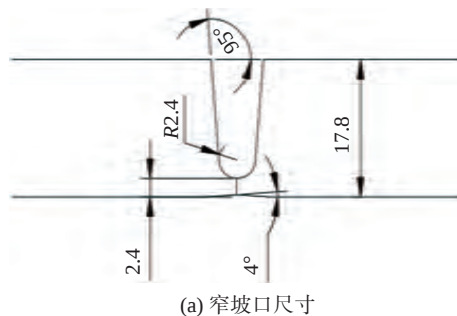
S 形铺设通过若干个焊接工作站顺序完成管道的全位置打底焊、填充焊、盖面焊等工序,焊接效率高^[18]. J 形铺设只能布置一个焊接工作站进行管道的横向位置焊接,铺设效率是通过将 4~6 根 12 m 长度管道预先焊接后安装在垂直铺管架上来保证的. S 形铺设采用带铜靴的管道内对口器进行打底焊,焊接效率高、背面成形好. J 形铺设因为铺管架上的管道长度达到 48~72 m 而且处于垂直位置,背面不加衬垫,属于单面焊接双面成形^[19]. 海底管道 J 形铺管船单日运营成本高达 35 万美元^[20],目前国际知名海洋工程公司都配备了优质高效的 GMAW 自动焊系统. 其中,荷兰 HMC 公司的 DCV Balder 号深水建造船所配备的“Veraweld”双炬焊接工作站如图 1b 所示,一次行走焊接两层焊道,焊接效率

大幅度提高.

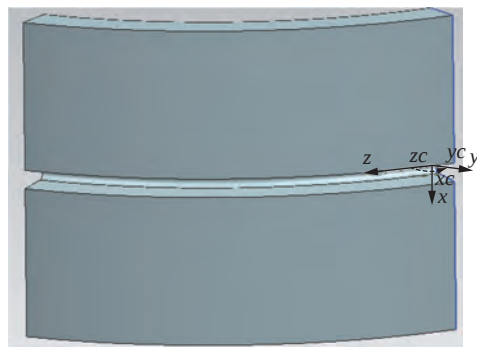
焊接工艺的优化对于管道 J 形铺设非常重要,因为在保证焊接效率的同时,既需要防止产生未焊透、未熔合等严重缺陷,又需要进行熔池控制、防止产生下塌. 通过 SYSWELD 软件进行管道横向焊接温度场仿真,结合温度场测试,是焊接工艺优化的有效途径.

2 管道焊接三维有限元模型的建立及其网格划分

以铺管工程中广泛应用的某款海底管道及其坡口为对象,建立焊接三维有限元模型,并进行网格划分. 管道壁厚为 17.8 mm, 外径为 324 mm, 取整圆的六分之一进行建模,管道坡口是可以大幅度减少填充量的机加工窄坡口,坡口参数如图 2a 所示,使用三维 CAD 软件建立的管道模型如图 2b 所示.



(a) 窄坡口尺寸



(b) 管道三维模型

图 2 管道 CAD 图 (mm)

Fig. 2 Pipe CAD diagram. (a) sizes of the narrow groove; (b) 3D of pipe

将图 2b 所示的管道三维模型以 STP 格式导出到前处理专用网格划分软件 Visual environment 中进行网格划分,划分结果如图 3 所示,共有三维网格 64900 个、二维网格 16898 个、一维网格 200 个,图 3a~图 3f 分别是母材与焊缝三维单元、热交换面二维单元、约束位置节点、焊接线与参考线、焊接起止节点、焊接起始单元.

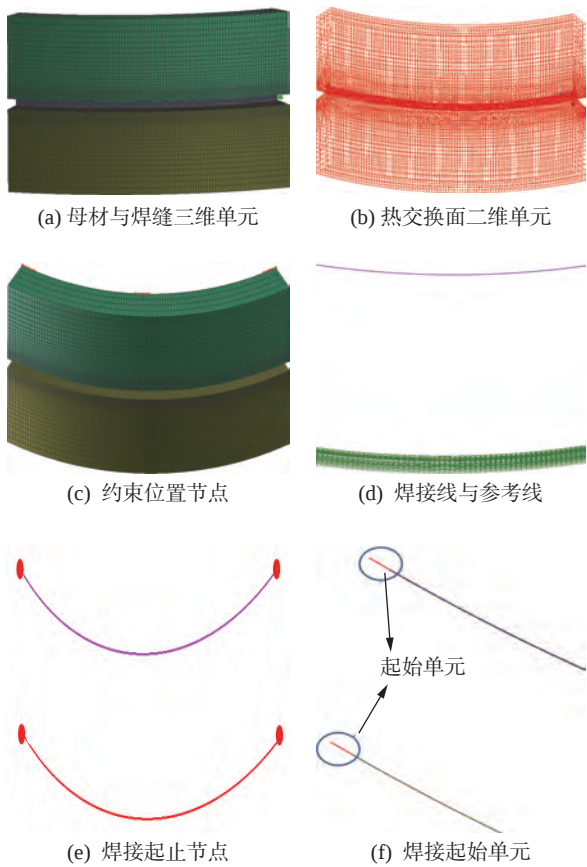


图 3 有限元模型网格分组

Fig. 3 Set collectors of finite elements. (a) 3D unit of metal and weld; (b) 2D unit of heat exchange surface; (c) constraint location node; (d) welding line and reference line; (e) welding start node; (f) welding start unit

3 APIX65 管线钢温度场材料数据库建立

SYSWELD 的材料数据库根据材料的金相组

表 1 API X65 钢的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of API X65

C	Si	Mn	Cr	Al	N	P	S	Fe
0.18	0.23	1.4	0.2	0.026	0.028	0.021	0.006	余量

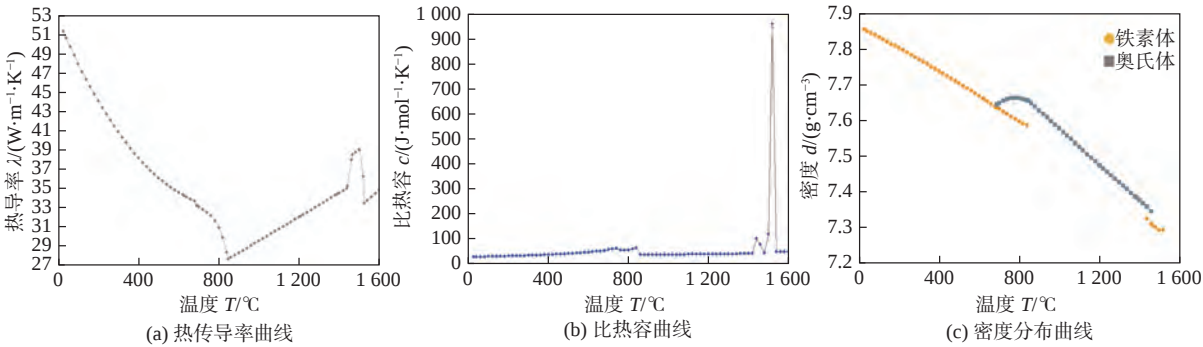


图 5 X65 材料热物性曲线

Fig. 5 Thermal parameter curves of API X65. (a) thermal conductivity curve; (b) specific heat capacity curve; (c) density distribution curve

织定义其性能. 影响温度场的材料热参数有热传导率、比热容、密度和连续冷却转变曲线 (continuous cooling curve, CCT 曲线). SYSWELD 软件是根据式 (1) 所示的 Leblond 相变模型来实现对材料 CCT 曲线的编写, 通过不同的冷却速度得到不同的生成组织比例的含量, 再对不同的金相赋予不同的材料特性进行温度场计算.

$$dP/dt = \frac{P_{eq}(T) - P}{T_{au}(T)} F(\dot{T}) \quad (1)$$

式中: P 为不同温度下的相比比例; t 为时间; P_{eq} 为相平衡比例; T_{au} 为相变延迟时间; T 为温度; $\dot{T}$ 为加热或冷却速度. 在金属材料相图计算及材料性能模拟软件 JMatPro 中, 输入 API X65 管线钢材料成分, 得到 CCT 曲线如图 4 所示, X65 钢化学成分见表 1. 同时还得到热物性曲线如图 5 所示, 图 5a-图 5c 分别是热传导率曲线、比热容曲线、密度分布曲线.

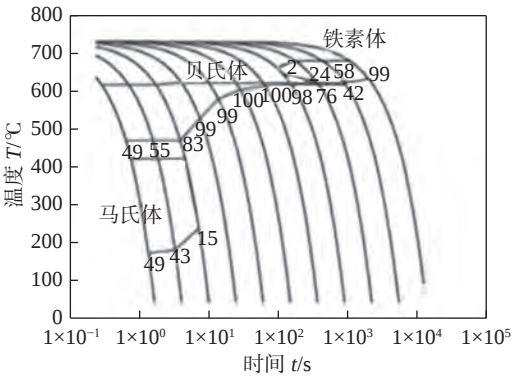


图 4 X65 材料 CCT 曲线

Fig. 4 CCT curve of API X65

SYSWELD 软件通过 Material DB 按键查询并修改材料的参数. 与其它软件采用“生死单元法”不同, SYSWELD 软件材料数据库设置了一个特殊的“热空气相”, 用于表征材料达到熔融温度时的状态, 其特点是材料的热物性参数不变, 而热力性参数大大降低.

4 API X65 管道横向焊接温度场仿真

4.1 热源模型

(1) 几何热源模型. GMAW 的熔宽熔深比大, 在 SYSWELD 软件中采用 Goldak 双椭球热源模型, 其外形如图 6 所示, Q_f 为椭圆前半球能流密度, Q_r 为椭球后半球能流密度, a_f 为椭圆前半轴长度, a_r 为椭圆后半轴长度, b 为熔宽, c 为熔深.

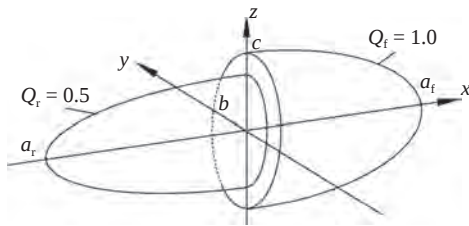


图 6 双椭球热源模型

Fig. 6 Double ellipsoid heat source model

Goldak 双椭球热源模型前半球、后半球热源函数表达式

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q)}{\pi\sqrt{\pi}a_f b c} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (2)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q)}{\pi\sqrt{\pi}a_r b c} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \quad (3)$$

式中: Q 为焊接有效输入功率, 其值为电源外特性电流和电压之积再乘以热输入效率; f_f 为前半球热流密度分布系数; f_r 为后半球热流密度分布系数; Q_f 为前半球能量; Q_r 为后半球能量. Goldak 双椭球热源模型认为: 将熔滴从焊接方向的中性面处一分为二, 两个部分的能量相等, 而热流分布系数的比值等于半球体积的反比.

管道横向焊接时, 焊枪围绕管道旋转, 热源作旋转运动. 在 SYSWELD 软件中, 连接同一时刻焊接线和参考线上对应的两个节点, 以焊接线节点为起始点形成一个矢量, 该矢量是相对坐标系 x 轴的正方向, 以左手原则建立相对坐标系, 然后将相对坐标系转化成绝对坐标系进行计算.

(2) 热源模型的校核. SYSWELD 的热输入面

板用于热源模型校核, 其数学模型是非线性瞬态传热三维温度场控制方程, 即

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (4)$$

式中: ρ , c , λ 分别为焊材的密度、比热容和热导率. Q 为内部热源. Q 为 T 和 x , y , z 的函数. 假设材料是均匀的、在某一瞬时、某一温度下, ρ , c , λ 均为常数, 式 (4) 简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho c} \quad (5)$$

在 Heat Input Fitting 面板中生成热源校核模型所用的网格之后, 根据焊接工艺设置初始相、初始温度和焊接速度进行数值模拟, 生成焊缝截面二维温度场云图, 并将该云图与实际焊接的焊缝截面进行大小、形状匹配, 如图 7 所示, 如果匹配效果达到预期, 则将该热源函数保存, 供焊接向导过程参数设置时调用.

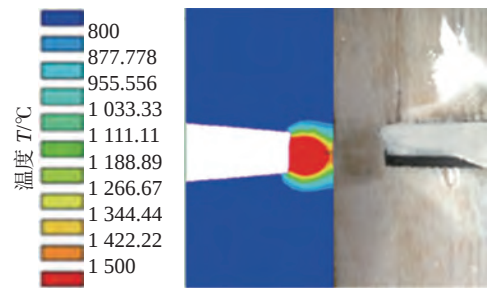


图 7 模拟温度场云图与实际焊缝截面比对

Fig. 7 Comparison between simulated temperature field cloud chart and actual weld cross section

(3) 换热边界条件的设定. 传热的计算分为热传递、热对流和热辐射, 热传递的计算由软件自身完成. 换热主要指的是热辐射和热对流, 热对流需要设置对流散热系数, 热辐射需要设置辐射散热系数. SYSWELD 软件里面的 Function DB 菜单下包含了一个名为 Convective and radiative losses 的函数, 该函数描述的是辐射散热和对流散热的热量损失总和, 系统默认的是在常温空气条件下的对流和辐射散热.

4.2 焊接温度场仿真

在 SYSWELD 软件里采用焊接向导 Welding Wizard 完成对焊接过程的参数定义、边界条件设置、变量求解, 焊接仿真计算结束后, 生成 fdb 类型的计算结果文件 Post1000.fdb, 该文件包含了温度场的各种求解结果, 例如温度、温度变化、热量、热

流、晶粒度和相变比例等。

焊接母材是 API X65 海底管道, 焊接方式是 GMAW 焊, 电源电压为 30 V、焊接电流为 180 A、焊接速度为 750 mm/min。热源模型采用校核后保存的双椭球热源, 熔宽为 2.5 mm、熔深为 2 mm、前

半球熔长为 3 mm、后半球熔长为 4 mm。采用 SYS-WELD 计算后, 读取温度场后处理文件, 图 8a~图 8h 分别为第 1, 2, 4, 8, 10, 14, 50, 2 000 s 时的温度场分布图, 整个焊接时间是 14 s, 图 8a~图 8f 代表加热过程, 图 8g~图 8h 代表冷却过程。

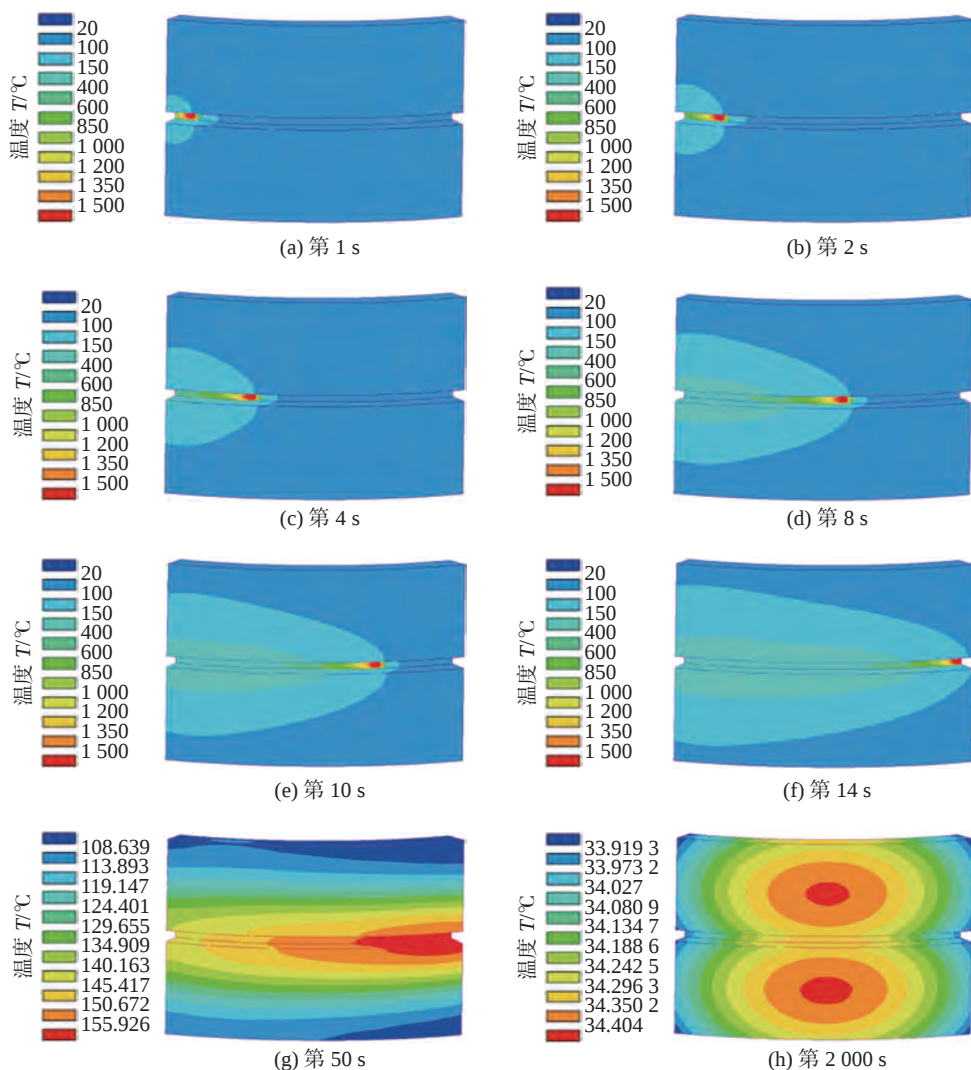


图 8 管道焊接温度场分布模拟结果

Fig. 8 Simulated results of temperature field distribution in pipe welding. (a) at 1 s; (b) at 2 s; (c) at 4 s; (d) at 8 s; (e) at 10 s; (f) at 14 s; (g) at 50 s; (h) at 2 000 s

从图 8 可以看到, 在第 1 s 和第 14 s 时, 温度变化较大, 原因是焊接的起弧和收弧阶段热流密度比平稳焊接过程时稍大, 否则在该阶段不能保证所有焊缝节点都达到熔点温度值。在平稳焊接阶段, 熔池尺寸与焊缝尺寸大致相同, 说明热源模型和几何参数的选择是合理的。热源经过时, 温度迅速达到熔点温度以上, 随后缓慢冷却, 焊缝前半球的等温线比后半球密集, 相同温差的两条等温线随着温度的降低其距离越来越大。在焊接过程中, 焊件边缘的最高温度不超过 400 °C。冷却时, 温度逐渐降低,

降低的速度随时间而愈发减小, 冷却到第 2 000 s 时, 焊件上板、下板中间的温度稍高, 但是这个误差足够小、可以忽略不计。

5 横向焊接温度场测试

5.1 焊接温度场测试系统

焊接温度场测试系统由图 9 所示的焊接设备和图 10 所示的温度采集系统组成。焊接电源是 Fronius 公司的 TPS4000 数字化焊接电源, 自动焊

接小车通过与直线导轨的啮合而在处于垂直位置的焊接变位机上实现水平移动. 为了方便测试, 焊接试件采用板材而不是管道, 板材材料是 API X65 管线钢, 壁厚为 17.8 mm, 长度和宽度分别为 300 和 60 mm, 在宽度方向中心位置、沿长度方向机加工如图 2a 所示窄坡口, 板材通过快速夹具固定在焊接变位机上.

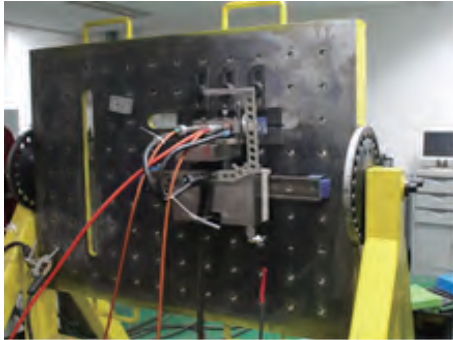


图9 焊接设备

Fig. 9 Welding equipment

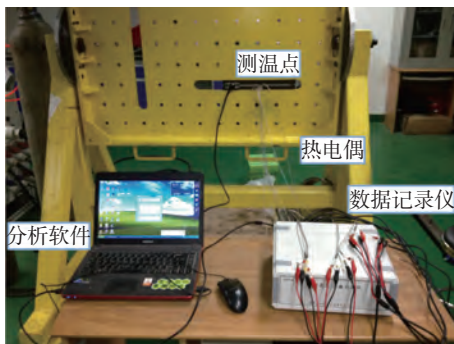


图10 温度采集系统

Fig. 10 Temperature acquisition system

温度采集系统由测温元件即热电偶、Hpxy-8 B 函数记录仪及其处理软件组成. 函数记录仪提供 8 通道采集接口, 采样频率最高达 100 kHz, 采用 USB 接口与电脑相连. 焊接过程中的焊缝温度不能直接测量, 通过美国 DCC 公司的 HOTSPOT II 型热电偶焊接机将热电偶点焊固定, 采用背孔法埋设的热电偶测量温度. 测温点的布置如图 11 所示, 与焊接中心线等距离地在上板、下板分别布置深度 2, 3, 4, 5 mm 的热电偶埋设小孔, 上板 4 个点的编号为 A, B, C, D, 下板 4 个点的编号为 E, F, G, H, 随着埋设小孔深度增加, 因为热电偶与电弧的距离增加, 测量获得的温度降低. 图 11a,b 分别为正视图 and 俯视图.

5.2 焊接温度场测试结果

焊接试验采用的实芯焊丝牌号是 ER70S-6, 直径是 1.2 mm, 送丝速度为 10.5 m/min, 焊接保护气

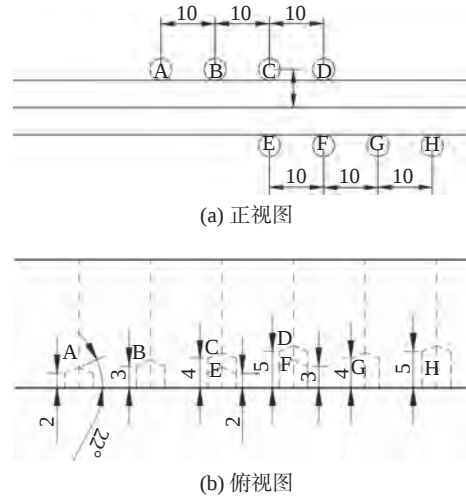


图11 测温点分布图

Fig. 11 Distribution of temperature measurement points. (a) front view; (b) top view

体为海底管道铺设工程广泛采用的 50%Ar + 50% CO₂ 混合气体, 其它参数与数值仿真所用参数相同. 8 路热电偶测量获得的板材热循环曲线如图 12 所示.

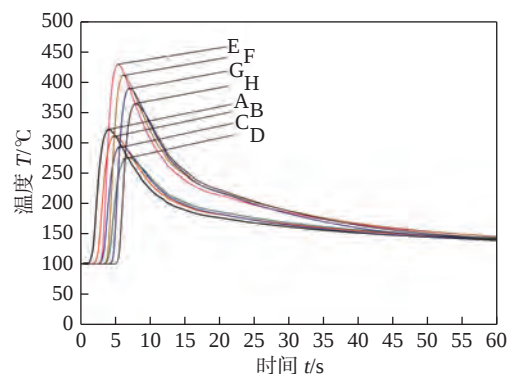


图12 板材试验节点热循环曲线

Fig. 12 Thermal cycle curves of plate test nodes

5.3 横向焊接热循环曲线仿真结果与测试结果的讨论

在 SYSWELD 中, 与焊接温度场测试 8 路热电偶分别对应的、管道三维有限元模型中间的 8 个节点的热循环曲线如图 13 所示.

对图 12 和图 13 的观察、比较和分析如下.

(1) A 至 D 点属于上板、E 至 H 点属于下板, 无论是模拟结果还是实测结果, 上板热电偶的温度曲线都明显低于下板热电偶的温度曲线, 这是因为横向焊接的熔滴在重力的作用下沿着坡口向下滴落并凝固, 造成下板热量集中的缘故.

(2) 实测温度曲线在时间上稍微落后于模拟曲线, 这是因为测试系统有个短暂的温度响应过程.

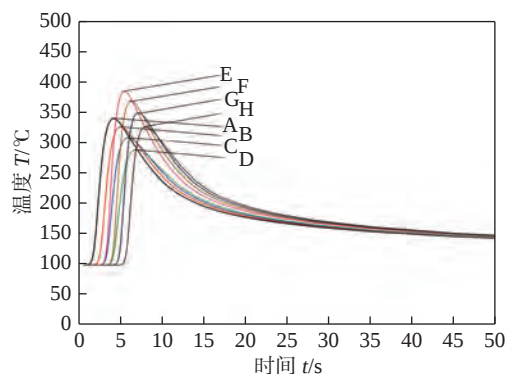


图 13 管道模拟节点热循环曲线

Fig. 13 Thermal cycle curves of pipe simulated nodes

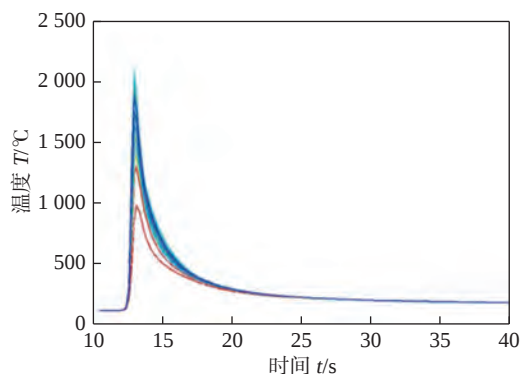
(3) 模拟曲线和实测曲线的升温、降温趋势大致相同, 可以认为模拟结果基本准确, 实测结果在个别时间点上的温度出现了失真, 但是偏离范围可以接受.

(4) 通过仔细观察可以发现, 上板 4 个节点模拟温度比实测温度高, 而下板 4 个节点模拟温度比实测温度低, 这可能是热流密度分布不均匀造成的. SYSWELD 的 Goldak 双椭球热源模型假设前后两个半球的热流密度相同, 但是在熔滴发生流动的横焊情况下, 热流密度变化是很大的, 从而这个假设对数值计算结果产生了较大的影响.

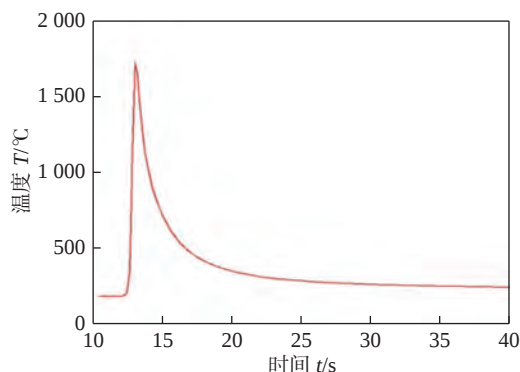
6 基于焊缝截面平均热循环曲线的多道焊焊接变形

6.1 焊缝截面平均热循环曲线的提取

焊接热循环曲线既是三维单元模型单道焊仿真的结果, 也可以作为二维单元截面模型多道焊仿真的热源型式. 在 SYSWELD 软件中, 完成如图 8 所示的三维单元模型焊接仿真模拟后, 选取一个截面的节点, 以温度为纵坐标、时间为横坐标建立坐标系, 显示包含所有焊缝节点的一系列曲线, 如图 14a 所示, 利用 Display 面板的 Averaging 命令求出如图 14b 所示的该组曲线的平均曲线, 然后将该曲线



(a) 焊缝截面节点热循环曲线



(b) 焊缝截面平均热循环曲线

图 14 热循环曲线

Fig. 14 Thermal cycle curves. (a) nodes thermal cycle curves of weld cross section; (b) average thermal cycle curve of weld cross section

作为二维单元截面模型多道焊仿真的加载热源.

6.2 多道焊焊接变形焊数值仿真

API X65 板材外观尺寸为 300 mm × 60 mm × 17.8 mm, 窄坡口尺寸如图 2a 所示, 对板材横截面进行二维网格划分, 并在板材左端施加压板约束、右端自由, 采用如表 2 所示的不同焊接电流、焊接速度进行共计 8 层的多道焊焊接变形数值模拟, 最后一层即第八层焊后截面变形如图 15 所示.

采用与数值仿真相同的 API X65 管线钢板, 相同的、如表 2 所示的多道焊焊接工艺参数, 进行横向多道焊试验. 焊接完成之后选择焊件自由端最下方节点为参照点, 该点对应于 SYSWELD 软件仿

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

焊层	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	送丝速度 $v_s/(m \cdot min^{-1})$	焊缝熔深 H/mm
打底	170	30	12.5	10.5	2.7
2~3	180	30	12	10.5	1.8
4~6	180	30	12	11	2
7~8	200	30	14	11.5	3

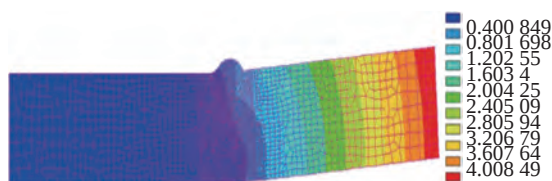


图 15 多道焊焊接变形模拟结果 (mm)

Fig. 15 Simulated results of welding deformation(mm)

真中的编号为 34154 的节点,实测其变形量为 5 mm,如图 16 所示。



图 16 横向多道焊焊接变形试验结果 (mm)

Fig. 16 Tested results of welding deformation(mm)

6.3 多道焊焊接变形结果分析

将多道焊焊接变形数值仿真第一层打底焊到第八层盖面焊的焊接变形量绘制成曲线,如图 17 所示。

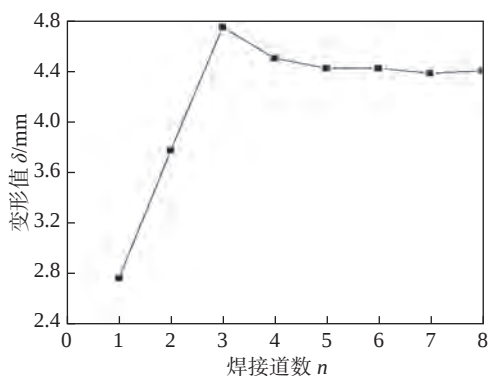


图 17 焊接变形曲线

Fig. 17 Welding deformation curves

最终焊接变形模拟结果为 4.41 mm,试验结果为 5 mm,二者基本吻合,误差为 14%。误差的产生,一是模拟中热流均匀分布的假设与横焊实际情况不符合,二是采用焊缝截面平均热循环曲线作为热源,省去了三维移动热源带来的大量非线性计算,但是同时也带来计算精度的降低。

图 17 表明,对于多道焊而言,前面几层基本决定了整个变形的大致轮廓与数值,后面几层的影响相当小,有时甚至出现随着焊缝道数的增加,变形反而减小的情况。这是因为虽然焊接变形随焊接电流增加、焊接速度降低而增加,但是除了焊接热输入产生的基础变形,焊件中残余应力释放将产生变形补偿,而后者在后面几层焊接中发挥重要作用。

7 结论

(1) SYSWELD 软件焊接温度场仿真与温度场测试的结合应用,是深水海底管道铺设横向焊接工艺规范优化的有效途径。

(2) API X65 海底管道横向焊接温度场仿真结果,其温度变化趋势与焊接实际过程相符,熔池尺寸与焊缝尺寸基本一致,这表明热源模型和几何参数的选择是合理的。

(3) SYSWELD 软件温度场仿真的热循环曲线与温度场测试的热循环曲线,温度升降趋势相同,上板温度均明显低于下板温度,与横向焊接的特点符合。

(4) SYSWELD 软件上板节点模拟温度高于实测温度,而下板与之相反,这可能主要是因为 Goldak 双椭球热源模型前后两个半球的热流密度相同的假设在横向焊接中不再适用。

(5) 焊缝截面平均热循环曲线作为热源可以进行多道焊的高效率模拟,但是对于横向焊接而言,其热流均匀分布的假设会带来模拟结果与试验结果之间存在一定的偏差。

(6) 对于多道焊而言,基础变形主要表现在前面几层,而变形补偿在后面几层发挥重要作用。

参考文献

- [1] Gong Shunfeng, Zhang Tao, Wang Xipeng, *et al.* Numerical simulation on dynamic behaviour of deepwater J-lay systems[J]. Ocean Engineering, 2020, 196: 106771.
- [2] Kwon Y J, Nam B W, Kim N W, *et al.* A model test on a rigid pipe installation using J-Lay method[C]//The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference. Sapporo, Japan, 2018, 255–261.
- [3] Mark J Kaiser. Offshore pipeline construction cost in the U. S. Gulf of Mexico[J]. Marine Policy, 2017, 82: 147–166.
- [4] Zhong Wenjun, He Ning, Ni Wench. Structural analysis of J-lay tower on deepwater semi-submersible lifting and pipe laying vessel[C]//ISOPE International Journal of Offshore and Polar Engineering Conference. Rhode Island, Greece, 2016, 676–683.
- [5] Lirola F, Pionetti F R, Agoumi J, *et al.* Development and qualification of an innovative and cost efficient heat traced flowline optimized for J-Laying[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2016, 255–261.
- [6] Senthila B, Selvam Panner R. Dynamic analysis of a J-lay pipeline[J]. Procedia Engineering, 2015, 116: 730–737.

- [7] Etienne Girault, François Lirola, Erwan Briand, *et al.* Lessons learned from the qualification program and J-laying campaign of 12-inch steel Catenary risers for the P55 deepwater project[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2015, 1 – 24.
- [8] Heerema E P. Recent achievements and present trends in deepwater pipe-lay systems[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2005, 1 – 4.
- [9] Killeen J P, Dyson K C, Reeves K D, *et al.* Large diameter SCR delivery challenges[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2005, 1 – 13.
- [10] Van der Graaf J, Wolbers D, Boerkamp P. Field experience with the construction of large diameter SCR in deep water[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2005.
- [11] Dick Wolbers, Rob Hovinga. Installation of deepwater pipelines with sled assemblies using the new J-Lay system of the DCV balder[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2003, 1 – 12.
- [12] Mazar Atabaki M, Yazdian N, Ma J, *et al.* High power laser welding of thick steel plates in a horizontal butt joint configuration[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 83: 1 – 12.
- [13] Guo Wei, Liu Qiang, Francis John A, *et al.* Comparison of laser welds in thick section S700 high-strength steel manufactured in flat (1G) and horizontal (2G) positions[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2015, 64: 197 – 200.
- [14] Vishvesh J B. Effect of residual magnetism on sidewall fusion in narrow gap gas metal arc welding[J]. Welding and Cutting, 2008, 7(5): 280 – 288.
- [15] Kang Y H, Na S J. Characteristics of welding and arc signal in narrow groove gas metal arc welding using electromagnetic arc oscillation[J]. Welding Research, 2003, 5: 93 – 99.
- [16] Goldak A, Bibby M, Moore J, *et al.* Computer modeling of heat flow in welding heat source[J]. Metallurgical and materials transactions, 1986, 17(3): 587 – 600.
- [17] Leblond J B, Devaux J. A new kinetic model for aniso-thermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size[J]. Acta metallurgica, 1984, 32(1): 137 – 146.
- [18] Zhou Canfeng, Jiao Xiangdong, Chen Jiaqing, *et al.* Design of welding system applied in deepwater sub-sea pipeline laying[J]. Welding & Joining, 2010(7): 16-20.
- [19] Macdonald K A, Maddox S J. New guidance for fatigue design of pipeline girth welds[J]. Engineering Failure Analysis, 2003, 10(2): 177 – 197.
- [20] David Walters, Ricky Thethi. A step change application of threaded and coupled connections[J]. Offshore Pipeline Technology, 2002: 1 – 15.

第一作者简介:周灿丰,1970 年出生,教授。主要从事火下焊接与焊接自动化技术研究。Email:Canfeng@bipt.edu.cn。

(编辑: 郑红)

and achieve the higher measurement accuracy, the tensile and compressive force is applied to the steel sheet sample and the internal stress of the sample is measured through the blind hole method, then compare with the theoretical values and analyze the measurement accuracy. The experimental results show that the minimum resolution of the blind hole method is about 1 MPa; the residual stress values which are measured by the blind hole method have some deviation under the different internal stress levels; as the tensile stress increases, the measurement accuracy of the blind hole method are increased, which becomes stable after the tensile stress is more than 60 MPa; as the absolute value of the compressive stress increases, the measurement accuracy are increased, which becomes stable after the compressive stress is less than -35 MPa; when the stress is between -10 MPa and 25 MPa, the measurement accuracy is relatively poor. According to the experimental measurement results, the compensation correction mode for the blind hole method is established, and after correction the measurement accuracy of the blind hole method under high stress conditions (tensile stress greater than 25 MPa, compressive stress less than -10 MPa) could be significantly improved. However, under the low stress conditions (tensile stress is less than 25 MPa, compressive stress is greater than -10 MPa), after correction the improvement of the measurement accuracy is still limited. It is recommended to increase measurement number to ensure the measurement accuracy. The compensation correction mode is applied to the actual measurement of residual stress of hot rolled automobile beam steel plate, the experimental results show that the transverse residual stress is greater than the longitudinal residual stress exists in the hot rolled steel plate with sliver warping defects, which provide a support for solving the slicing warpage problem.

Key words: blind hole method; minimum resolution; compensation correction; residual stress; unevenness

Study on temperature field of GMAW horizontal welding for deep water laying of API X65 pipe ZHOU Canfeng¹, CHEN Zhi¹, JIAO Xiangdong¹, LUO Yu¹, GAO Hui¹,

ZHOU Zhenzhen² (1. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Energy Engineering Advanced Joining Technology, Beijing Key Laboratory of Pipeline Critical Technology and Equipment for Deepwater Oil & Gas Development, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing, 102617, China; 2. Harbin Welding Institute co., Ltd., Harbin, 150028, China). pp 60-68

Abstract: To meet challenges of GMAW horizontal welding in deep water pipeline laying, such as molten pool falling, narrow gap groove and without backing support, a 3D model of pipe is established and meshed, temperature field material database of API X65 is generated by material software, the Goldak double ellipsoid heat source model is checked by matching the simulated temperature field cloud chart with the actual weld cross section, and temperature field distributions in pipe welding simulated by SYSWELD software are consistent with the actual welding process. The welding temperature field test system is established, and the thermal cycle curve of API X65 pipeline steel plate welding is measured by the thermocouple embedded in the back hole method. Tested curve has the same temperature rise and fall trend as the SYSWELD simulated curve, and temperature of upper plate node is significantly lower than that of lower plate node. The average thermal cycle curve of weld cross section is used as the heat source to simulate the multi pass welding, and the test is carried out. The results show that the welding deformation of multi pass welding is determined by the welding process parameters and residual stress release.

Key words: API X65 pipe; GMAW horizontal welding; heat source model; welding temperature field; thermal cycle curve

Wettability of Ag-Cu-Ti filler metal on C/C composites under TIG arc YU Jiang^{1,2}, LIU Haoran³, ZHAO Shuaitongze⁴, YANG Xiao⁵, ZHANG Wenjie⁶

(1. Harbin Institute of Technology, State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin, 150001, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Weihai, 264209, China; 3. Hanhong College of Southwest University, Chongqing, 400700, China; 4. Shenyang Aerospace University, Shenyang, 110136, China; 5. FAW