

文章编号: 1000-8241(2022)08-0953-09

运行工况对 X80 天然气管道在役焊接温度场的影响

朱汪友

国家管网集团北方管道公司

摘要: 为研究天然气输送工况参数对 X80 天然气输送管道在役焊接热影响区温度场的影响规律, 以直径 1 422 mm、壁厚 25.7 mm 的 X80 天然气管道为研究对象, 采用有限元方法对其在役焊接过程温度场进行数值模拟。结果表明: 在役焊接时, 热影响区温度由 800 °C 降至 500 °C 的过程(所需时间为 $t_{8/5}$) 出现在焊接阶段的前 20 s, 深度范围为 10 mm 以内; 天然气输送温度对管道温度场的影响最大, 当输送温度低于 10 °C 时, $t_{8/5}$ 随着输送温度下降而急剧减小, 输送温度为 -50 °C 时, $t_{8/5}$ 低至 2.5 s; 输送压力和流速对 $t_{8/5}$ 影响较小, 随着输送压力和流速的增加, $t_{8/5}$ 缓慢减小。当输送温度低于 10 °C、流速高于 10 m/s、输送压力大于 10 MPa 时, 热影响区和焊缝处产生冷裂纹的风险较大。研究成果可为现场施工单位调控 X80 管道在役焊接的输送工况和焊接工艺等参数提供理论依据, 有助于保障 X80 管道在役焊接的安全。(图 13, 表 6, 参 18)

关键词: 在役焊接; X80 钢; 运行工况; 温度场特征; 有限元

中图分类号: TG402

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.08.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of operation condition on in-service welding temperature field of X80 natural gas pipeline

ZHU Wangyou

PipeChina North Pipeline Company

Abstract: In order to study the influence law of natural gas transportation parameters on temperature field in the heat affected zone of in-service welding in X80 natural gas pipeline, the X80 natural gas pipeline with a diameter of 1 422 mm and a wall thickness of 25.7 mm was studied and the temperature field during its in-service welding was numerically simulated with the finite element method. The results show that the process of temperature drop from 800 °C to 500 °C in the heat affected area (with the time required expressed as $t_{8/5}$) appears within the depth of 10 mm in the first 20 s of in-service welding. Besides, the natural gas transportation temperature has the greatest impact on the temperature field of pipeline. When the transportation temperature is less than 10 °C, $t_{8/5}$ decreases sharply as the temperature drops, and it is as low as 2.5 s when the transportation temperature is -50 °C. Further, the transportation pressure and flow rate of natural gas have little effect on $t_{8/5}$, and $t_{8/5}$ decreases slowly with the increasing of transportation pressure and flow rate of natural gas. When the transportation temperature is less than 10 °C, the flow rate is greater than 10 m/s, and the pressure is higher than 10 MPa, the heat affected zone and the welds are at a high risk of cold cracks. The research results could provide a theoretical basis for the on-site construction organizations to control the parameters such as the transportation conditions and welding technology for in-service welding of X80 pipeline, which is helpful to ensure the safe operation of in-service welding of X80 pipeline. (13 Figures, 6 Tables, 18 References)

Key words: in-service welding, X80 steel, operation condition, temperature field characteristics, finite element

中国进口天然气的 80% 来源于中亚地区^[1], 管道输送距离远且多处于高寒地带, 恶劣的环境条件为管

道运行维护带来了严峻挑战。为提高管道强度、节约建设成本、保证输送安全, 此类输气管道多采用 X80

高强度钢^[2]。在役焊接修补技术是在不停输的情况下带压修复管道的技术^[3]。在役焊接过程中,管道内流动的天然气与管道内壁面发生强烈的热交换,导致热影响区冷却速度急剧加快,而热影响区冷却速度是冷裂纹形成的主要致因。热影响区冷裂纹的敏感性随冷却速度增加而增大,冷裂纹的产生可导致管道发生泄漏甚至爆炸^[4]。

天然气输送压力、流速、温度等运行参数直接影响管道在役焊接热影响区的冷却速度,通过调控运行参数,可以降低焊接裂纹产生的几率。Cisilino等^[5]采用有限元方法对 X52 天然气管道在役焊接温度场分布进行模拟,指出管道内介质流速增大将导致管道内壁与天然气传热系数增大,在保持焊接热输入不变的条件下,管道内壁峰值温度将降低。Bang等^[6]采用二维有限元模型分析了管径 762 mm 的 X65 输气管道在役焊接温度场分布情况。Huda等^[7]研究了不同冷却环境对 X80 管线钢临界粗晶区组织性能的影响,指出在水冷和空冷条件下,冷却速率的增加抑制了碳的扩散,促进了临界粗晶区 M/A 组元形成。赵红波等^[8]采用试验模拟方法探索不同热输入量对 X80 管线钢粗晶热影响区的影响,指出当热输入量小于 25 kJ/mm 时,粗晶区组织以板条状贝氏体为主,冲击韧性最佳,但硬度较高。

现有研究多涉及管道壁厚、焊接工艺参数、单一输送工况参数等对各种材料管道在役焊接温度场的影响^[9-11],对于复数项输送工况参数对大管径、大壁厚 X80 管道在役焊接温度场和 $t_{8/5}$ (热影响区温度由 800 °C 降至 500 °C 所需时间) 的影响尚缺乏深入细致的分析。为掌握 X80 天然气管道在役焊接热影响区温度场变化规律,基于有限元数值模拟方法,讨论在役焊接温度场特征,并重点分析天然气流速、压力、温度对 X80 管道在役焊接管道热影响区 $t_{8/5}$ 的影响规律,以期降低冷裂纹发生几率、保障 X80 管道在役焊接作业安全提供指导。

1 模型建立

1.1 在役焊接模型

以外径 1 422 mm、壁厚 25.7 mm 的 X80 管道作为研究对象,在 ANSYS 中建立有限元模型(图 1)。根据 GB/T 28055—2011《钢制管道带压封堵技术规范》,从管道周向 12 点钟位置开始,沿顺时针方向进行焊接

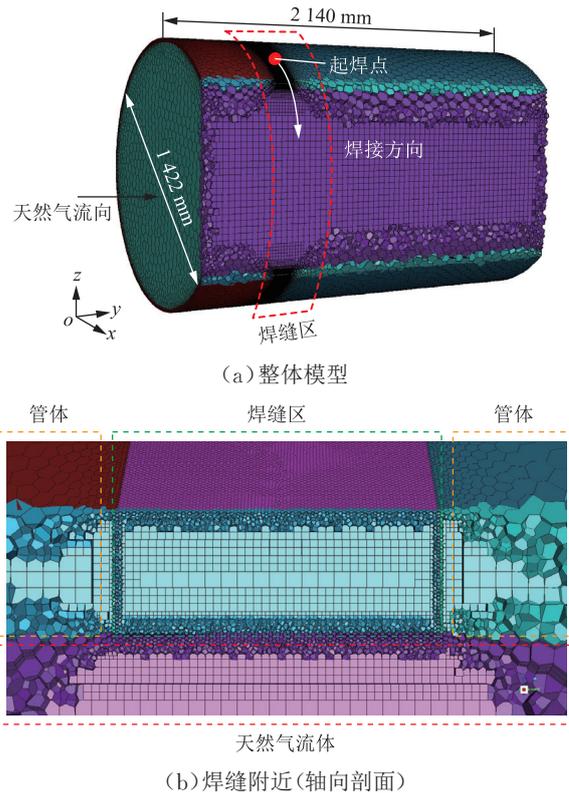


图 1 X80 管道在役焊接有限元模型图

(表 1)。模型采用 Mosaic 网格划分技术,以六面体网格为核心划分多面体网格,此方法可得到数量更少、质量更好的单元格,计算所需内存减少 1/3,并可提高模拟精确度。焊缝和管道热影响区是重点研究对象,因此对该区域网格进行加密。

表 1 X80 管道在役焊接工艺参数表

焊道类型	焊丝直径/ mm	焊接电流/ A	焊接电压/ V	焊接速度/ (cm·min ⁻¹)
打底	3.2	120~135	24~26	10~12

建立热源模型(图 2),计算时,采用 ANSYS 软件的 UDF 函数编写功能实现热源动态加载。每个载荷步内,以热源中心点(a, b)为中心,根据其变化规律将热源加载至焊缝上表面。在焊接过程中, b 由焊缝位置决定,对于每道焊缝均有一个相应的恒定值^[12]。a 则

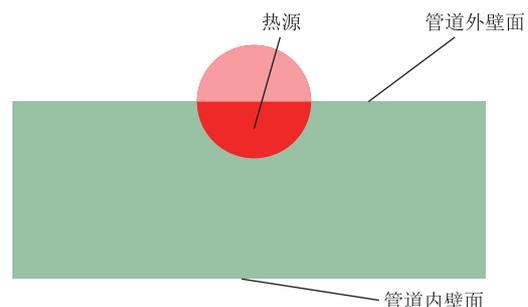


图 2 X80 管道在役焊接热源模型图

由时间和焊道位置共同决定,以便在实现热源运动的同时获得精确的温度场分布情况。根据模型特点, a 值的计算公式为:

$$a = r \cos(\pi - v_w t / r) \quad (1)$$

式中: r 为焊缝上表面半径, cm; v_w 为焊接速度, cm/min; t 为时间, s。

体生热率公式^[13]为:

$$Q_{GEN} = UI\eta / V_0 \quad (2)$$

式中: Q_{GEN} 为体生热率, J/m^3 ; U 为电弧电压, V; I 为焊接电流, A; η 为热效率, 通常取 0.80~0.90; V_0 为生热单元的体积, m^3 。

1.2 材料参数

管道材料为国产 X80 高强度管线钢(表 2), 焊接过程中的热传导是复杂的非线性关系, 为保证计算结果的准确性, 在计算过程中考虑材料物理性能参数随温度的变化(图 3), 部分高温数据通过外推法和插值法获得。

表 2 X80 钢化学成分表(质量分数)

C	Mn	Cr	Si	S	P
0.061%	1.69%	0.309%	0.199%	0.004%	0.008%

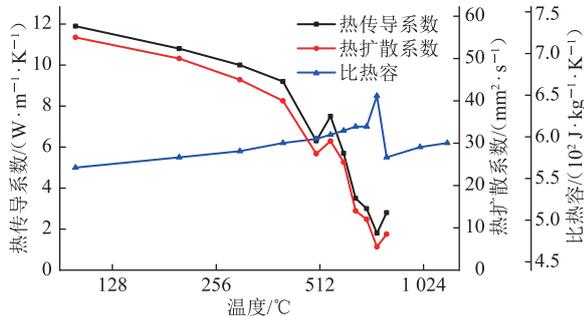


图 3 X80 钢的热物性参数曲线

1.3 边界条件

在仿真计算之前, 需要设定管道进出口边界条件和壁面边界条件。根据 X80 管道在役焊接的工作条件, 选择标准 $k-\epsilon$ 湍流模型进行仿真计算。首先计算管道内天然气流体的湍流强度:

$$i_T = 0.16 Re^{-1/8} \quad (3)$$

式中: i_T 为湍流强度; Re 为雷诺数。

雷诺数的计算公式为:

$$Re = \rho v L / \mu \quad (4)$$

式中: ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; μ 为动力黏度, $Pa \cdot s$; v 为流场特征速度, m/s ; L 为流场特征长度, m 。

计算通过圆形和非圆形管道的流量, 以判定流动状态(即雷诺数)。在圆形管道的情况下, 特征长度是管道直径; 在非圆管的情况下, 其水力直径 D_h 为:

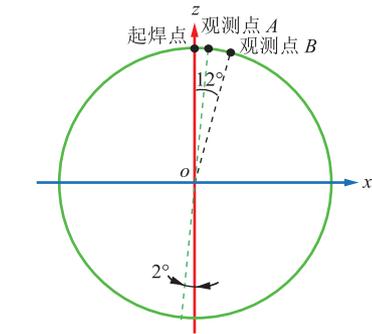
$$D_h = 4A / C \quad (5)$$

式中: A 为管道的截面积, m^2 ; C 为管道的润湿周长, m 。

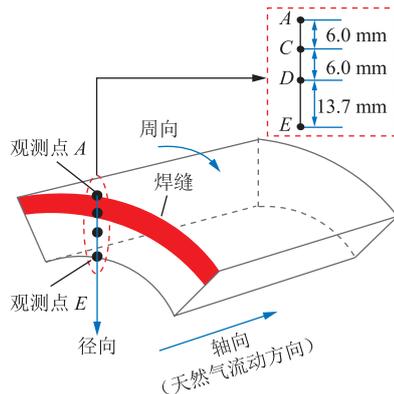
由式(3)得到 X80 管道内天然气流体的湍流强度为 5%, X80 管道的进口边界采用速度入口边界, 假设入口速度为均匀分布; 出口边界采用压力出口边界, 以管道出口的平均压力为工作压力。入口、出口边界的湍流强度为 5%, 水力直径为 1.422 m。管道壁面边界采用无滑移的静壁面, 设置外壁面的环境温度为 300 K, 内壁面直接与流动界面接触, 内壁面的温度即为流体介质温度。

2 温度场分布

在管道外壁面焊接热影响区沿焊缝顺时针方向和壁厚方向选取观测点(图 4), 用于分析焊接热量沿管体横截面周向路径和径向路径的温度变化特征。



(a) 沿焊缝顺时针方向选取



(b) 沿壁厚方向选取

图 4 管道在役焊接管体横截面温度场观测点分布图

2.1 管道外壁面周向温度场

采用 ANSYS Fluent 软件模拟直径 1 422 mm X80 管道在役焊接加热和冷却过程, 参考文献[14], 设置预热焊接仿真工况为天然气温度 25 °C、流速 12 m/s、压力 10 MPa, 得到不同时刻管道外壁面周向温度场分布(图 5)。起焊时, 由于热源的施加, 出现

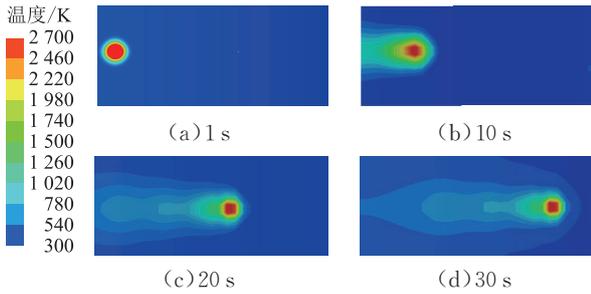


图5 在役焊接过程中不同时刻管道外壁面周向温度场分布云图
 一个稳定的温度核心区,中心温度高达 2 644 K,温度梯度随与热源中心距离的增加而递减。随着焊接进行,管道外壁面温度场达到准稳态阶段(管道外壁面最高温度及热源运动产生的温度余热尾迹长度不变),之后热源核心区持续运动,以相似的形态随焊接位置持续移动,直至焊接结束。由观测点 A、B 处温度随时间变化曲线(图 6)可见,焊接过程中管体冷却速度小于加热速度;沿焊接移动方向,后方位置对前方位置有缓冷作用,移动速度越慢,缓冷效果越好;移动的热源对其运动轨迹前方即将焊接的位置存在预热作用。

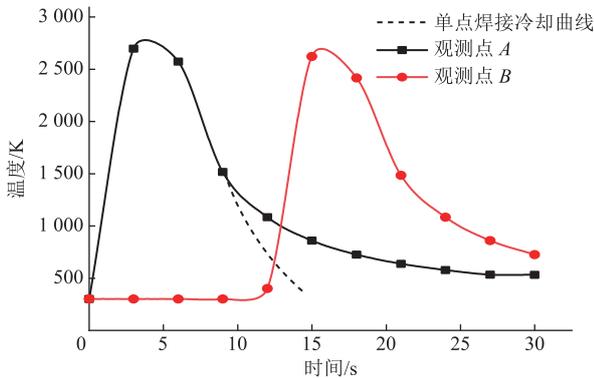


图6 管道在役焊接观测点 A、B 处温度随时间变化曲线

2.2 管道壁间径向温度场

使用与 2.1 节相同的仿真方法和参数设置,获取管道壁间径向温度场(图 7)。起焊时,温度达 2 644 K,为整个观测时段的最大值,此时热量沿壁面向下传递了约 6 mm (2/7 管道壁厚); $t=10$ s 时,核心区温度下降

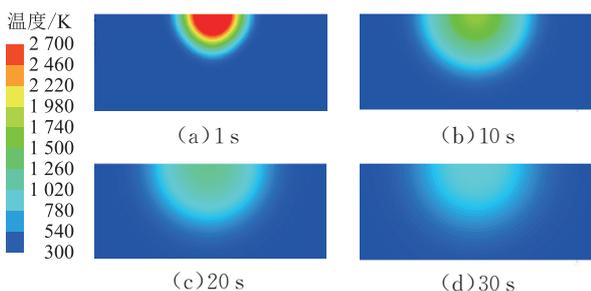


图7 在役焊接过程中管道壁间温度场云图

了约 1 000 K,此时已有少量热量传递到内壁面;随着时间的推移,管道外壁面的温度持续下降,越来越多的热量通过辐射换热沿管体传递到管道内壁面, $t=30$ s 时,外壁面最高温度已经下降到 512 K,相比于起焊时刻的最高温度降低了 2 132 K,并对内壁面造成了大于 20 K 的温度影响。

提取沿观测点 A 径向的温度分布特征,绘制不同时刻管道壁间温度沿管道壁厚分布曲线(图 8)。在焊接过程中,管道外壁面温度远高于内壁面温度;内壁面最高温度为 48 °C,天然气的输送温度为 27 °C,低于 100 °C 的管体厚度约为 20.7 mm,为管道内壁与距管外壁 5 mm 处之间的部分,说明管道内壁与天然气之间存在一定的热量交换,但最高温度远小于 982 °C,没有烧穿危险;焊接热影响区温度由 800 °C 降至 500 °C 的过程发生在焊接过程前 20 s,涉及深度范围约 10 mm。

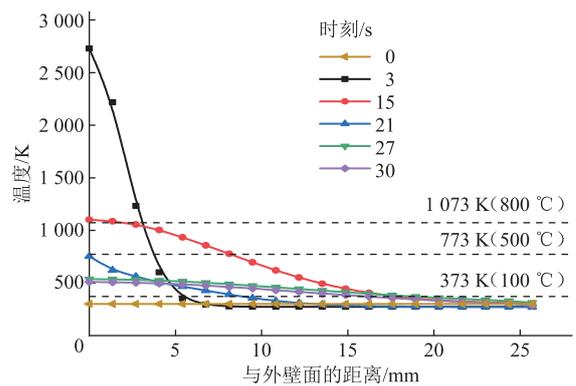


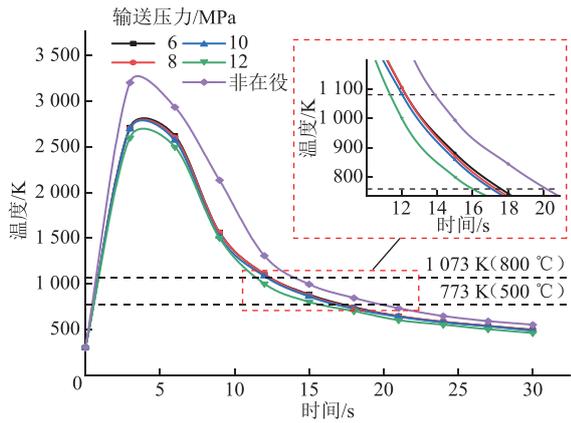
图8 在役焊接不同时刻管道壁间温度沿管道壁厚分布曲线

3 运行参数对焊接温度场的影响

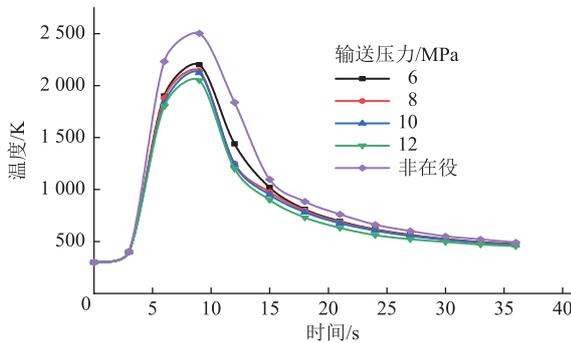
受环境温度及管输天然气压力、流速等因素的影响,X80 天然气管道在役焊接时的温度场和冷却速度将发生变化。采用前述管道模型,沿管道周向及径向路径进行温度观测,对比分析管道运行参数对焊接温度场的影响。

3.1 天然气输送压力

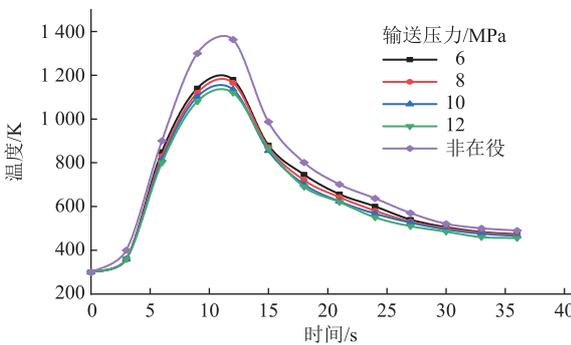
在焊接参数相同的情况下,固定天然气输送温度 25 °C、流速 8 m/s,沿 A 点径向方向测量不同输送压力作用下,直径 1 422 mm X80 管道在役与非在役焊接温度场的分布(图 9)。天然气输送压力对径向路径上 4 个观测点温度的影响规律相似:随着压力升高,观测点的最高温度缓慢降低,最大降幅为 90 K。同一观



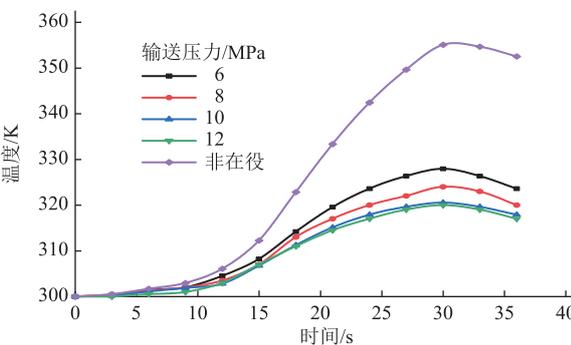
(a) A 点



(b) C 点



(c) D 点



(d) E 点

图 9 相同流速及输送温度、不同输送压力条件下径向路径各观测点温度随时间变化曲线

测点非在役焊接时的温度均高于在役焊接, A 点温差最大, 为 550 K。天然气输送压力越低, 其与管道内壁的热交换越少, 对温度场的影响越小。总体上, 天然气

输送压力对管道内壁的温度影响较小, 对焊接整体温度场的影响较弱。

分别提取不同天然气输送压力下的 $t_{8/5}$ 值(表 3), 可见非在役焊接时, $t_{8/5}$ 最大, 为 6.5 s; 在役焊接时, 随着天然气输送压力的增大, 各观测点的冷却速度变快, $t_{8/5}$ 不断减小。当 $t_{8/5}$ 为 6~15 s 时, 钢的组织以贝氏体为主, M/A 组元岛状物含量较少, 且呈块状弥散分布在基体上, 使粗晶区具有良好的韧性; 当 $t_{8/5} < 6$ s 时, 粗晶区组织中出现了针状马氏体; 当 $t_{8/5} = 4$ s 时, M/A 组元呈长条状, 更易诱发裂纹形成, 导致粗晶区韧性降低(图 10)^[15-18]。为避免和减少焊接应力, 降低焊后不良组织产生的可能性, 较合适的在役焊接天然气输送压力宜小于等于 8 MPa。

表 3 不同天然气输送压力下管道 $t_{8/5}$ 模拟结果表

天然气输送压力/MPa	$t_{8/5}$ /s
6	6.0
8	5.8
10	5.5
12	4.9
非在役焊接	6.5

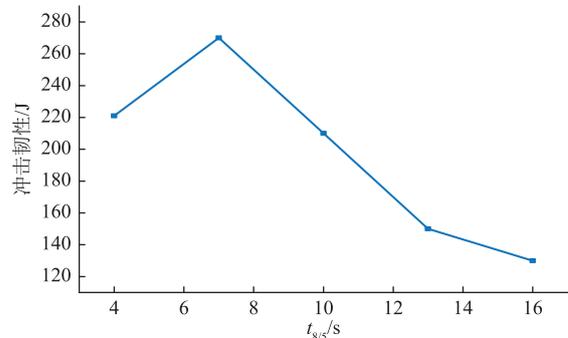


图 10 钢材冲击韧性随 $t_{8/5}$ 变化曲线

3.2 天然气流速

采用相同焊接参数, 固定天然气输送压力为 3.1 节得出的在役焊接合理输送压力的上限 8 MPa, 沿 A 点径向方向测量不同天然气流速对 1 422 mm X80 管道在役/非在役焊接温度场的影响(图 11)。天然气流速对径向路径上 4 个观测点的温度影响规律相似: 随流速加快, 观测点的最高温度缓慢降低。在各流速条件下, 同一观测点非在役焊接温度均高于在役焊接, A 点温差最大, 最高温差为 650 °C, 说明天然气流速越慢, 与管道内壁的热交换越少, 对温度场的影响越小。总体上, 天然气流速对管道内壁的温度影响较小, 对焊接温度场的影响整体较弱。

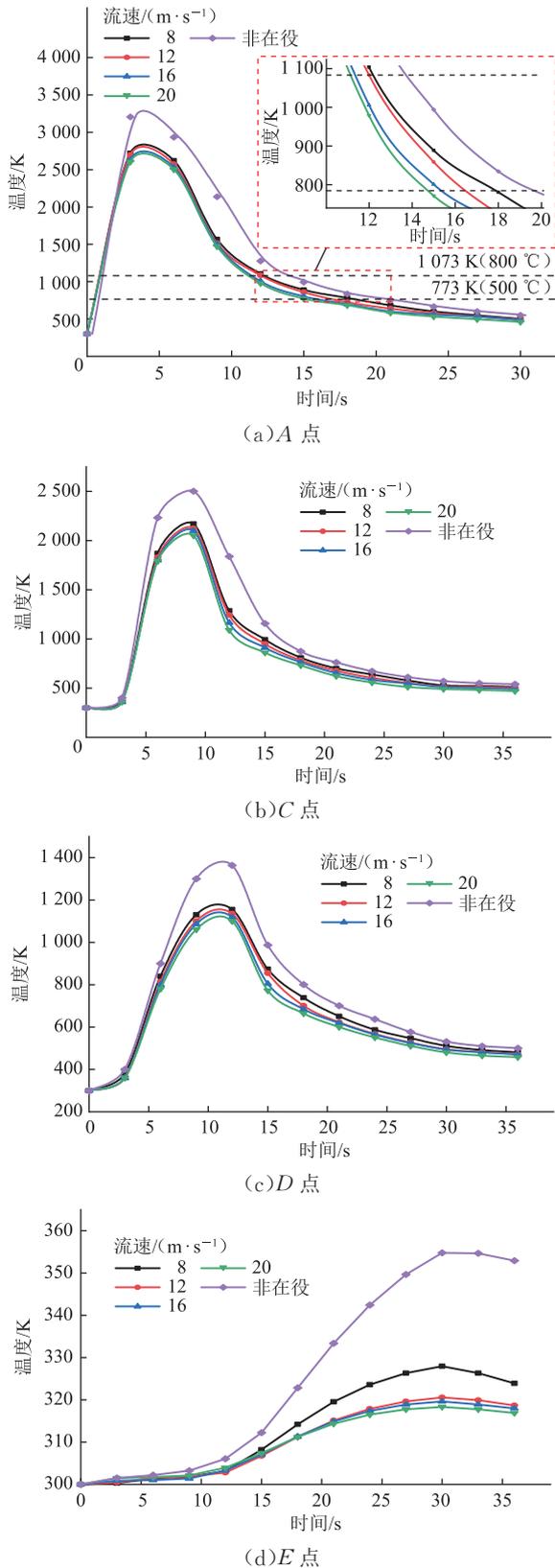


图 11 相同输送压力及输送温度、不同流速条件下径向路径各观测点温度随时间变化曲线

分别提取不同天然气流速下的 $t_{8/5}$ (表 4), 可见非在役焊接时的 $t_{8/5}$ 最大, 为 6.5 s; 在役焊接时, 随着天然气流速增大, 各观测点的冷却速度加快, $t_{8/5}$ 不断减

表 4 不同天然气流速下管道 $t_{8/5}$ 模拟结果表

天然气流速/(m·s ⁻¹)	$t_{8/5}$ /s
8	6.0
12	5.0
16	4.5
20	4.3
非在役焊接	6.5

小; 由 3.1 节可知, 当 $t_{8/5}$ 为 6~15 s 时, 焊后组织性能较好, 冲击吸收能量较高。因此, 为避免和减少焊接应力, 减小焊后不良组织产生的可能性, 在役焊接时的天然气流速宜小于等于 8 m/s。

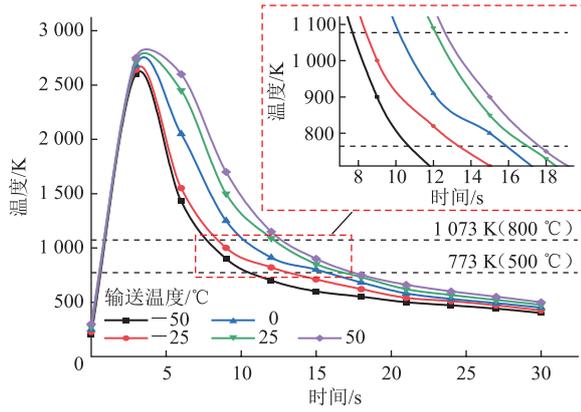
3.3 天然气输送温度

采用相同焊接参数, 固定天然气压力和流速为 3.1 节、3.2 节得到的合理上限值, 分别为 8 MPa 和 8 m/s, 沿 A 点径向方向测量, 获得不同输送温度下 1 422 mm X80 管道在役焊接温度场的分布 (图 12)。天然气输送温度对径向路径上 4 个观测点温度的影响规律相似: 输送温度越高, 管道焊缝及热影响区各观测点的温度越高, 最高温差 200 °C, 天然气输送温度越低, 天然气与管壁之间的热交换越剧烈, 被带走的焊接热量也越多, 相比输送压力和流速, 天然气输送温度对管道内壁温度的影响更大。在所设工况下, 观测点最高温度从 57 °C 下降至 -28 °C, 可见天然气输送温度对焊接温度场整体影响十分有限。

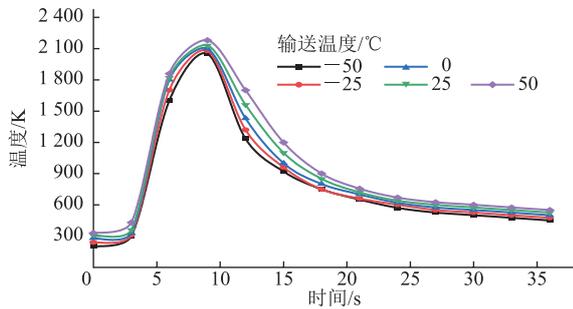
提取不同天然气输送温度下的 $t_{8/5}$ 值 (表 5), 可见随着温度的升高, 管道各观测点的冷却速度变慢, $t_{8/5}$ 不断增大; 当天然气输送温度为 50 °C 时 $t_{8/5}$ 最大, 为 6.3 s; 当天然气输送温度为 -50 °C 时 $t_{8/5}$ 最小, 为 2.5 s, 减小了约 60%, 此时 M/A 组元呈长条状, 更易诱发裂纹形成, 导致粗晶区韧性降低。为避免和减少焊接应力的产生, 减小焊后不良组织产生的可能性, 在役焊接时, 天然气输送温度宜大于等于 25 °C。

3.4 复合工况

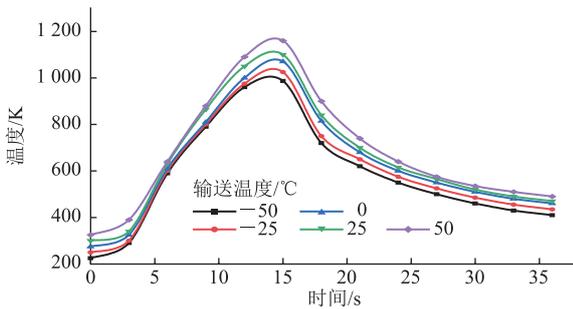
为研究各运行参数对在役焊接温度场的综合影响, 通过查阅相关文献和技术手册^[15], 设置天然气输送压力为 6~12 MPa, 间隔 2 MPa 取值; 天然气流速为 6~14 m/s, 间隔 2 m/s 取值; 天然气输送温度为 -10~25 °C, 间隔 5 °C 取值。将上述工况参数排列组合, 获得复合工况, 分析天然气输送工况对在役焊接温度场的影响 (图 13)。在役焊接管道热影响区的冷却速度主要受传热系数影响: 当天然气输送压力与流



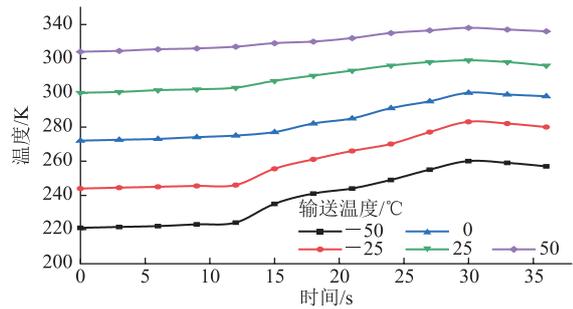
(a) A 点



(b) C 点



(c) D 点

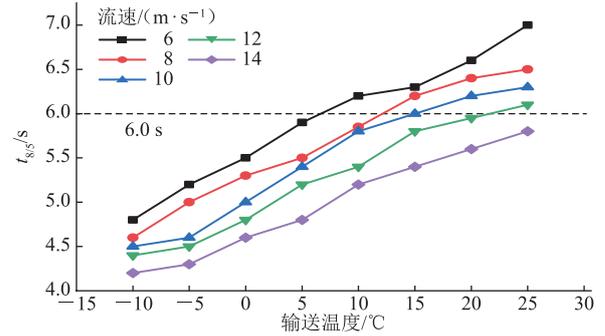


(d) E 点

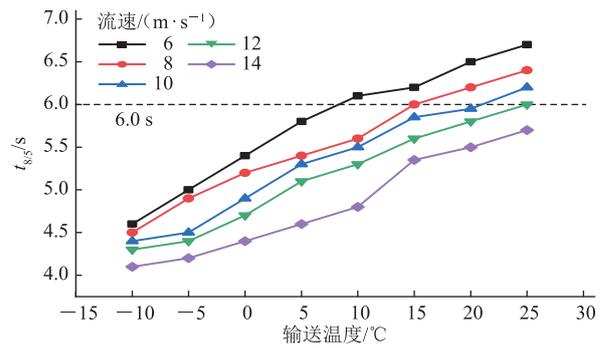
图 12 相同输送压力、流速、不同输送温度条件下各观测点温度随时间变化曲线

表 5 不同天然气输送温度下管道 $t_{8/5}$ 模拟结果表

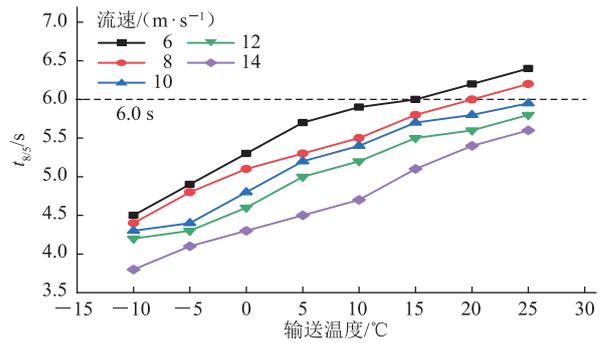
天然气输送温度/°C	$t_{8/5}/s$
-50	2.5
-25	4.3
0	5.0
25	6.1
50	6.3



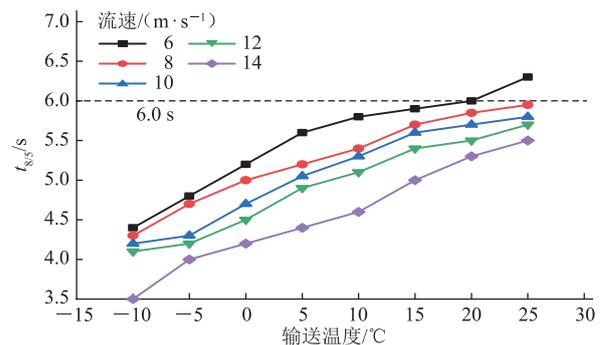
(a) 输送压力 6 MPa



(b) 输送压力 8 MPa



(c) 输送压力 10 MPa



(d) 输送压力 12 MPa

图 13 不同输送压力及流速条件下 $t_{8/5}$ 随天然气输送温度变化曲线

速较大、输送温度较低时,天然气带走热量的能力增强,传热系数增大,冷却速度加快, $t_{8/5}$ 随之减小。但由于直径 1 422 mm X80 管道的壁厚较厚,达 25.7 mm,焊接热量大部分被管道本体吸收,总体上,天然气输送压力和流速对温度场的影响较弱。在天然气输送

压力由 6 MPa 上升至 12 MPa、天然气流速由 6 m/s 上升至 14 m/s 的条件下, $t_{8/5}$ 值分别下降了 8%、17%; 相比天然气输送压力和流速, 天然气输送温度对焊接温度场的影响较大, 当天然气输送温度从 25 °C 下降至 -10 °C 时, 天然气的传热能力急剧上升, 温度场的冷却速度显著加大, $t_{8/5}$ 下降了 34%。

当 $t_{8/5}$ 小于 6 s 时, 焊接后材料产生较大焊接残余应力及不良焊后组织的可能性较大, 统计无预热、无缓冷情况下, X80 管道在役焊接 $t_{8/5}$ 值大于等于 6 s 的工况(表 6), 建议当天然气输送工况参数超出表 6 所列工况范围时, 应尽量下调天然气输送工况参数, 并采取焊前预热或焊后缓冷等措施, 以提高管道在役焊接的可靠性。

表 6 X80 管道在役焊接 $t_{8/5} \geq 6$ s 工况统计表

天然气输送压力/MPa	天然气流速/(m·s ⁻¹)	最低输送温度/°C
6	6	10
	8	13
	10	15
	12	20
8	6	10
	8	15
	10	25
10	6	25
	8	20
12	6	20

4 结论

(1) 直径 1 422 mm X80 管道在役焊接过程中, 由于管道壁厚较大, 管道内壁温升较小, 最高温度仅为 66.4 °C, 远小于 982 °C, 没有烧穿风险。

(2) 管道壁间温度随与外壁面距离的增大而降低, 焊接热影响区温度由 800 °C 降至 500 °C 的过程发生于焊接过程中的前 20 s, 涉及深度范围为 10 mm 以内。

(3) 在役焊接时, 天然气流体与管道内壁之间存在强烈的热交换, 天然气输送的压力、流速、温度均对管道热影响区温度存在影响, 最高温度均低于管道非在役焊接时的温度, 最大温差达 650 °C。

(4) 随着天然气流速和输送压力的增加、输送温度的降低, 焊接热影响区温度由 800 °C 降至 500 °C 时间 $t_{8/5}$ 逐渐减小, 其中输送温度对 $t_{8/5}$ 的影响最大, 当输送温度为 -50 °C 时, $t_{8/5}$ 低至 2.5 s, 极易诱发裂纹形成。

在役焊接过程中, 当天然气输送温度低于 10 °C、流速大于 10 m/s 时, 应适当降低天然气输送压力、流速或采取焊前预热、焊后缓冷等措施, 以降低管道焊后产生较大残余应力的可能性。

(5) 随着中国大口径、高压、高钢级油气管道陆续服役, 管道焊接量陡升, 焊接作业时间长, 质量控制难度大, 自动化修复及配套技术研发刚刚起步。今后可开展 B 型套筒角焊缝服役可靠性与无损检测技术研究, 形成 B 型套筒角焊缝无损检测工艺和标准, 建立在役管道施焊压力综合评判方法, 进一步提升油气管道在役焊接修复施工质量, 完善在役管道自动焊机修复工艺。

参考文献:

- [1] 李剑, 余源琦, 高阳, 李明鹏, 杨桂茹, 史艳军. 中国天然气产业发展形势与前景[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 133-142.
LI J, SHE Y Q, GAO Y, LI M P, YANG G R, SHI Y J. Natural gas industry in China: Development situation and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 133-142.
- [2] 冯耀荣, 庄传晶. X80 级管线钢管工程应用的几个问题[J]. 焊管, 2006, 29(1): 6-10, 77.
FENG Y R, ZHUANG C J. Application problems of grade X80 pipeline project[J]. Welded Pipe and Tube, 2006, 29(1): 6-10, 77.
- [3] FU G M, LOURENÇO M I, DUAN M L, ESTEFEN S F. Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures[J]. Marine Structures, 2016, 46: 30-55.
- [4] 黄志强, 汤海平, 丁雅萍, 唐子雷, 夏国发. 天然气管道在役焊接温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2018, 39(6): 29-34, 130.
HUANG Z Q, TANG H P, DING Y P, TANG Z L, XIA G F. Numerical simulation for in-service welding temperature field of gas pipeline[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(6): 29-34, 130.
- [5] CISILINO A P, CHAPETTI M D, OTEGUI J L. Minimum thickness for circumferential sleeve repair fillet welds in corroded gas pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 79(1): 67-76.
- [6] BANG I W, SON Y P, OH K H, KIM Y P, KIM W S. Numerical simulation of sleeve repair welding of in-service gas pipelines[J]. Welding Journal, 2002, 81(12): 273-S-282-S.
- [7] HUDA N, MIDAWI A R H, GIANETTO J, LAZOR R,

- GERLICH A P. Influence of martensite-austenite (MA) on impact toughness of X80 line pipe steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 662: 481-491.
- [8] 赵红波, 毕宗岳, 牛辉, 包志刚, 付宏强. 焊接热输入对厚壁 X80 管线钢粗晶热影响区组织及性能的影响[J]. *焊管*, 2017, 40(9): 6-10.
- ZHAO H B, BI Z Y, NIU H, BAO Z G, FU H Q. Influence of welding heat input on coarse grain heat affect zone microstructure and properties of thick wall X80 pipeline steel[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2017, 40(9): 6-10.
- [9] HEYDARI H, AKBARI M. Investigating the effect of process parameters on the temperature field and mechanical properties in pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy sheet using response surface methodology[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 106: 103267.
- [10] 余自林. 异型接头及异种金属的焊接工艺优化研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- YU Z L. Research on optimization of welding process for abnormal joints and dissimilar metals[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [11] 刘永滨, 冯立德, 张季娜, 许志武, 李政玮. 天然气管道在役修补焊接过程的数值模拟[J]. *焊接学报*, 2019, 40(10): 111-115, 120.
- LIU Y B, FENG L D, ZHANG J N, XU Z W, LI Z W. Numerical simulation on in-serve welding of natural gas pipeline[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(10): 111-115, 120.
- [12] 周春亮. P92 钢焊接温度场及应力场的数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- ZHOU C L. Numerical simulation of temperature and residual field in P92 steel welding process[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [13] 迟露鑫. 0Cr18Ni9 不锈钢焊接温度场模拟与验证[J]. *焊接技术*, 2015, 44(11): 12-16.
- CHI L X. Simulation and verification of welding temperature field of 0Cr18Ni9 stainless steel[J]. *Welding Technology*, 2015, 44(11): 12-16.
- [14] 张振永. 中俄东线 X80 钢级 $\phi 1\ 422$ mm 管道工程设计关键技术应用[J]. *焊管*, 2019, 42(7): 64-71.
- ZHANG Z Y. Application of key technologies in design of X80 $\phi 1\ 422$ mm pipeline engineering of China-Russia East Natural Gas Pipeline Project[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2019, 42(7): 64-71.
- [15] 郭林, 霍向东, 李烈军, 黎剑锋, 董锋, 田振卓. 冷却速度对 X80 管线钢焊接热影响区组织性能的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2013, 34(6): 96-100.
- GUO L, HUO X D, LI L J, LI J F, DONG F, TIAN Z Z. Effect of cooling rate on microstructures and properties of welding heat affected zones in X80 pipeline steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2013, 34(6): 96-100.
- [16] 章培军, 董有昌. X80 管线钢焊接工艺优化模型与性能研究[J]. *铸造技术*, 2016, 37(10): 2224-2226.
- ZHANG P J, DONG Y C. Research on welding process optimization model and performance of X80 pipeline steel[J]. *Foundry Technology*, 2016, 37(10): 2224-2226.
- [17] 杨叠, 杨柳青, 隋永莉, 白世武, 刘清友. X80 钢管环焊缝连续冷却转变曲线研究[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2016(3): 14-19.
- YANG D, YANG L Q, SUI Y L, BAI S W, LIU Q Y. Research on CCT curves of X80 pipeline girth weld[J]. *Welding Digest of Machinery Manufacturing*, 2016(3): 14-19.
- [18] 张德芬, 王进, 李焯铮, 景亮. 冷却时间对 X80 钢焊接热影响区粗晶区组织及性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(增刊 2): 129-133.
- ZHANG D F, WANG J, LI Y Z, JING L. Effect of cooling time on microstructure and properties of coarse grain heat-affected zone in X80 steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(S2): 129-133.
- (收稿日期: 2022-04-21; 修回日期: 2022-06-28; 编辑: 张腾)
-
- 基金项目:** 国家管网集团揭榜挂帅重点研究项目“油气管道维抢修关键技术研究”, AQWH202207。
- 作者简介:** 朱汪友, 男, 1978 年生, 高级经济师, 2015 年硕士毕业于中国人民大学工商管理专业, 现主要从事长输油气管道资产完整性、安全环保和数字化建设等管理工作。地址: 河北省廊坊市广阳区新开路 408 号, 065000。电话: 0316-2170588。Email: marinemjr@126.com