

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.07

管道6点钟位置坡口形状对根焊缝背面成形的影响

许威¹, 李维锋¹, 杨兰昕², 陈欣¹, 王伟¹, 林永章¹,
林之晨², 武少杰², 王志江^{2*}

1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452

2. 天津大学 材料科学与工程学院 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350

摘要: 在管道焊接工程中, 其坡口加工精度和装配精度难以保证, 同时在管道6点钟位置的根焊中, 重力与焊接电弧力作用方向相反, 容易出现焊接缺陷, 影响施工质量。不同的坡口形状会影响熔池形状进而影响焊缝背面成形。采用STT根焊方法针对U形和V形坡口进行管道6点钟位置的根焊试验, 探究不同坡口形状对焊缝背面成形的影响。试验结果表明: 提高电流水平会提升电弧力水平, 从而促进熔透。V形坡口相较于U形坡口焊接熔池体积较大, 电弧力不足以支撑熔池重力, 容易造成焊缝背面成形的凹陷。V形坡口相较于U形坡口底部较窄, 电弧容易侧偏, 热输入容易集中在侧壁导致难以熔透。

关键词: 熔池重力; 电弧力; 坡口形状; 背面成形; 管道根焊

中图分类号: TG457.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)12-0045-05

The Influence of Groove Type on the Backside Weld Geometry at 6 o'clock Position of Pipe

XU Wei¹, LI Weifeng¹, YANG Lanxin², CHEN Xin¹, WANG Wei¹, LIN Yongzhang¹, LIN Zhichen²,
WU Shaojie², WANG Zhijiang^{2*}

1. Offshore Oil Engineering, Co., Ltd., Tianjin 300452, China

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China

Abstract: In the pipeline welding, the processing accuracy of groove and the fitting-up accuracy are difficult to kept consistent in practice; meanwhile, the gravity is in the opposite direction of the arc force when welding at 6 o'clock position, making it easy to have defect and to decrease the weld quality. The shape of groove will influence the shape of molten pool and further the backside weld geometry. In the present work, surface tension transfer (STT) welding was employed to weld the root pass of pipes with "U" groove and "V" groove at 6 o'clock position in order to explore the influences of groove type on the backside weld geometry. Experimental results showed that the increase in welding current can increase the arc force to promote the penetration degree. The molten pool volume of weld with "V" groove is larger than that with "U" groove, making arc force not large enough to support the molten pool and thus making the weld have a concave surface. Furthermore, "V" groove has a narrow space at the bottom. It can make the arc easily deflect to the side, making the arc have more heat on the sidewall and further having a partial penetration.

Keywords: gravity of molten pool; arc force; groove type; backside weld geometry; root pass welding of pipe

引用格式: 许威, 李维锋, 杨兰昕, 等. 管道6点钟位置坡口形状对根焊缝背面成形的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(12): 45-49.

Citation: XU Wei, LI Weifeng, YANG Lanxin, et al. The Influence of Groove Type on the Backside Weld Geometry at 6 o'clock Position of Pipe[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 45-49.

收稿日期: 2025-02-20 修回日期: 2025-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(52375374)

通讯作者: 王志江(1981—), 博士, 副教授, 主要从事焊接新方法及工艺、焊接过程控制和焊接自动化方面的研究。E-mail: wangzj@tju.edu.cn.

0 引言

近年来,随着我国经济的快速增长,对资源的需求不断攀升。海上油气资源十分丰富,尤其是深海油气资源储量丰富,可以有效缓解我国资源紧张的局面^[1]。油气资源主要通过海洋石油管道运输,管道根焊是填充焊与盖面焊的基础,是管道焊接中最重要的一道工序。熔池体积形态是影响根焊熔透的重要因素,其形态及其凝固后的焊缝成形主要是焊接过程中力和热的耦合得到的结果^[2]。在全位置的焊接条件下,12点钟和3点钟位置所需的电流较小,6点钟位置熔池重力阻碍熔透,相同的电流在6点钟位置容易生成中间低两侧高的凹型背面焊缝,这种缺陷会减小焊缝有效截面,造成焊缝强度下降。同时正面焊缝凸起严重,在后续填充焊中容易造成层间未熔合缺陷^[3-5]。另外,由于管道组对误差的原因,焊丝偏移容易造成电弧热量集中作用于坡口侧壁,仅有部分热量用于穿透钝边,从而造成未熔透缺陷。目前,在管道根焊中常用的坡口形状有V形和U形,V形坡口适用于厚板焊接,在焊接过程中的熔池较大,避免焊接过程中出现未熔合等。“U”型坡口底部形状比较平缓,其熔池和热影响区都较小,使得应力集中较小^[6-7]。丁晓明等^[8]采用熔化极气体保护焊(GMAW)在仰焊位置进行了试验研究,发现仰焊时,由于重力因素会加剧熔化金属下坠,使熔化金属脱离焊趾而流向熔池中心,导致仰焊更容易产生咬边等缺陷。郑明涛等^[9]针对管-板结构焊缝的焊接进行工艺研究,为了得到无缺陷的焊接接头,需要合理配比钨极氩弧焊的焊接参数、控制焊枪角度。冯靖等^[10]对管道根焊的熔池受力进行了分析,采用熔池径向力对管道全位置焊接进行分段,以解决全位置焊接时管道内、外壁成形不良的问题。

以上关于仰焊或管道6点钟位置的研究对焊接参数研究较多。只增大热输入虽然可以增加焊接电弧力,促进熔池向背面“穿凿”;但同时也会导致熔池体积过大,使熔化的母材变多,过多的热量向母材侧壁传递,焊缝容易在坡口内部堆积而背面并未熔透。而改变坡口形状可以改变熔池的受力和受力情况,有望通过调整电弧力和热输入的作用使

其容易实现熔透。本文针对6点钟位置两种坡口形状的焊缝成形问题,采用壁厚为13.5 mm的X65管线钢进行试验。通过对焊接熔池的受力和热输入进行分析,得出更适合管道6点钟位置的管道根焊坡口形式及焊接参数。

1 试验设备与材料

试验材料选用API 5L X65钢管,壁厚13.5 mm,直径355 mm,设计了角度为 3.5° 、钝边厚度1.5 mm的U形坡口,以及角度为 30° 的V形坡口,如图1所示。焊丝为ER70S-6,直径1.2 mm,保护气体为氩气和二氧化碳的混合气(体积分数占比97.5%和2.5%),保护气流速为25 L/min。X65管道及焊材的化学成分如表1所示。

试验设备如图2所示,试验采用林肯公司的STT 逆变焊接电源和STT-10送丝机进行。焊枪需要保证高度固定并沿管道行走,采用熊谷A-305行走机构搭载焊枪。

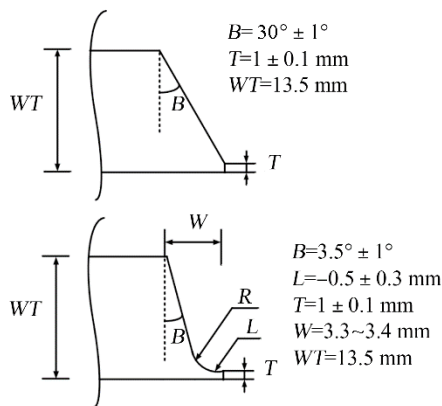


图1 V形坡口和U形坡口

Fig. 1 Schematic of grooves of “V” and “U” type

2 焊接试验及讨论

2.1 试验方案设计

所有的焊接试验均在管道6点钟位置。该位置类似仰焊位置,重力方向朝下,阻碍熔池向背面的“穿凿”。对U形坡口和V形坡口的设定相同的焊接参数,以对比在不同坡口形状、不同电流强度下熔池背面成形的情况,如表2所示。

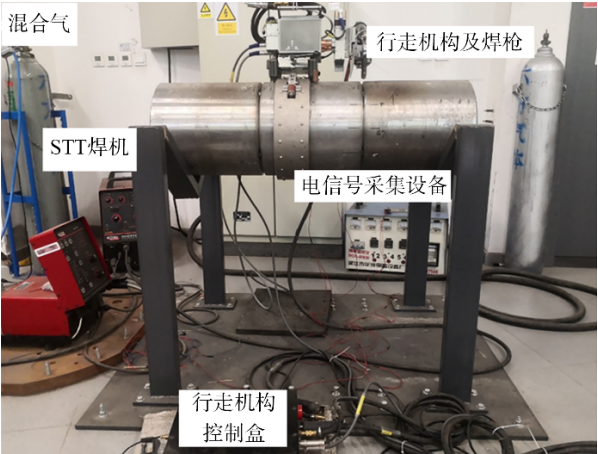


图2 焊接试验装置

Fig. 2 Experimental setup.

表1 X65管道及焊材的化学成分(质量分数, %)

材料	C	Mn	Si	S	P	Fe
API 5L X65	0.050	1.400	0.220	0.050	0.040	Balance
ER70S-6	0.073	1.490	0.880	0.011	0.010	Balance

表2 焊接试验参数

Table 2 Welding parameters

焊缝编号	坡口形状	平均电流/A	焊接速度/(m·min ⁻¹)
L ₁	U	130	0.36
L ₂	U	150	0.36
L ₃	U	170	0.36
L ₄	V	130	0.36
L ₅	V	150	0.36
L ₆	V	170	0.36

2.2 试验结果及分析

取焊接后的切样进行观察,并对焊缝背面的形状参数进行定义^[6],如图3所示。焊缝背面两个焊趾之间的距离定义为背面宽度 W_b ,从焊缝底部到焊趾连线的垂线距离定义为背面余高 h_b ,焊缝最高点

到焊缝最低点的距离为熔深 d_p 。试验结果如表3所示。

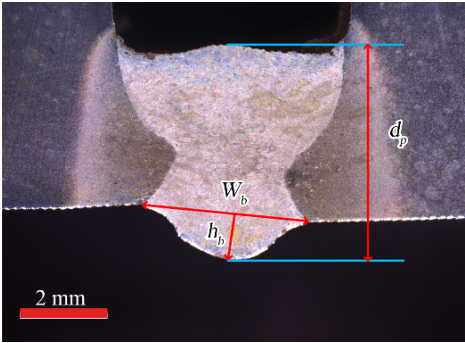


图3 焊缝背面成形的定义^[6]

Fig. 3 Definitions of backside weld geometry^[6]

表3 焊缝背面成形测量

Table 3 Measurements of backside weld geometry.

试验编号	h_b /mm	W_b /mm	d_p /mm
L ₁	-0.13	3.2	4.7
L ₂	0.07	3.9	5.2
L ₃	0.24	4.2	5.6
L ₄	-0.22	6.2	4.1
L ₅	-0.19	6.3	4.6
L ₆	-0.17	4.6	4.2

焊缝 L_1 – L_3 采用U形坡口, L_4 – L_6 采用V形坡口,焊接过程中固定焊接速度不变,改变焊接平均电流。首先针对U形坡口,分别从小电流到大电流进行试验,其焊缝成形分别如图4a~4c所示。可以看出在小电流时容易形成背面下凹的缺陷,导致焊缝强度下降。这是因为在6点钟位置中,重力会阻碍熔池向上“穿凿”,如图5所示,当焊接电弧提供的力不足以维持熔池时,就会出现下凹缺陷,此时焊缝余高 $h_b<0$ 。下凹缺陷会导致有效截面积下降,降低焊缝强度。

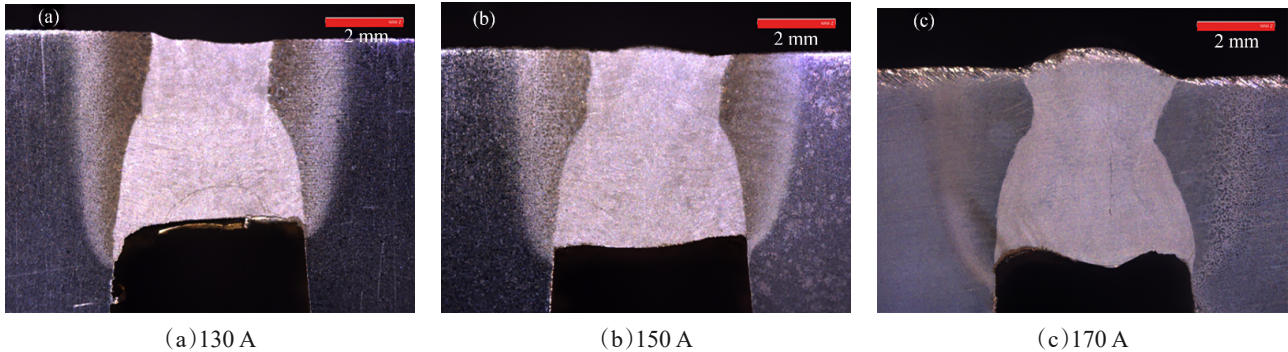


图4 U形坡口工件在不同焊接电流下形成的焊缝横截面

Fig. 4 Cross sections of welds with “U” groove under different welding currents

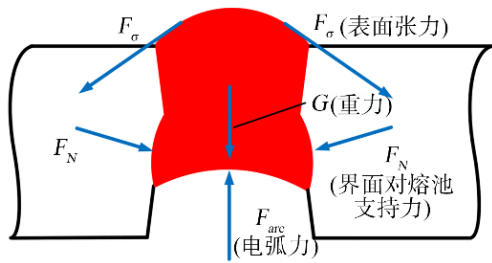


图5 U形坡口全熔透状态下的熔池受力图

Fig. 5 Force analysis of molten pool with "U" groove under full penetration condition

在焊接过程中,焊接电流是影响电弧力的重要因素,如式(1)^[11]所示:

$$F_{\text{arc}} = \alpha I^2 \quad (1)$$

式中 F_{arc} 是施加在熔池上的电弧力的总和, I 是焊接电流, α 是与焊接电弧有关的常数。由式(1)可知,焊接电弧力大小与焊接电流的平方呈线性关系。较大的焊接电弧力对焊接熔池有更好的“支撑”作用,对于促进焊接熔透的形成及维持熔池不

下凹有重要作用。在熔池全熔透的状态下,只有当电弧力大于重力、支持力和表面张力在垂直方向之和才能形成正常的熔透,见图5:

$$F_{\text{arc}} = G + F_N^v + F_\sigma^v \quad (2)$$

式中 G 是熔池所受重力, F_N^v 是母材对熔池的支持力在竖直方向的分力, F_σ^v 是表面张力在竖直方向的分力。当焊接电流不断增大,电弧力也成指数状增大,背面焊缝逐渐从下凹变为凸起。凸起的焊缝有效截面积增加。

在V形坡口条件下,焊缝背面有下凹缺陷,其焊缝成形如图6a~6c所示。在小电流的情况下,由于电弧力小,焊缝背面呈下凹状。随着焊接电流的增大,下凹程度减小,但仍然未出现正常凸起的背面成形。考虑到两种坡口情况下使用的电流幅值相同,电弧力的大小相差不大。由于熔池背面呈下凹状,此时表面张力沿竖直方向的分力应该向上,此时熔池的受力如图7所示。

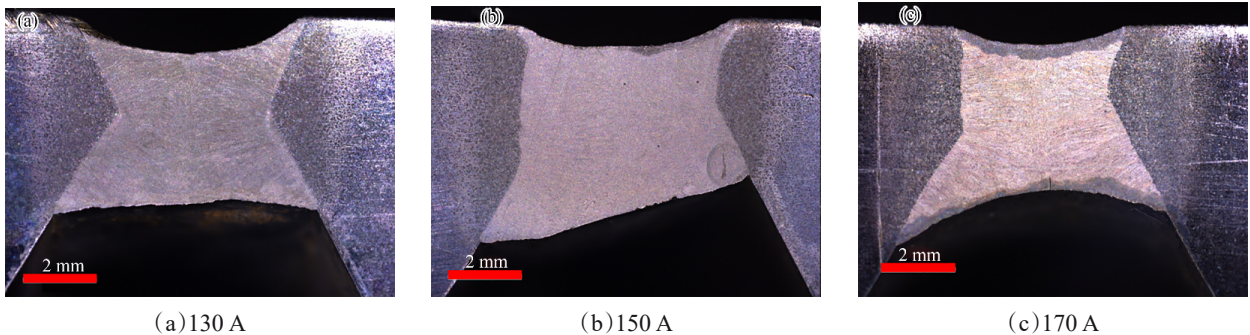


图6 V形坡口工件在不同焊接电流下形成的焊缝横截面

Fig. 6 Cross sections of welds with "V" groove under different welding currents

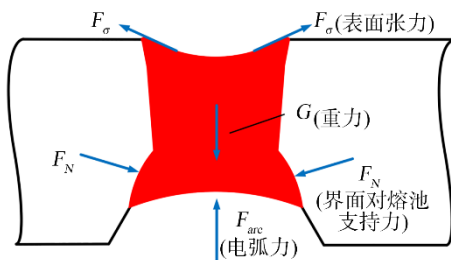


图7 V形坡口产生下凹缺陷的熔池受力图

Fig. 7 Force analysis of molten pool with "V" groove when concave-surface occurs

此时熔池所受的四个力的关系应该表达为:

$$F_{\text{arc}} + F_\sigma^v = G + F_N^v \quad (3)$$

与U形坡口不同的是,V形坡口的坡口角度(30°)相比于前者(3.5°)更大,影响了熔池体积和支

持力的角度不同。两种坡口的试样在相同的壁厚下进行加工,更大的坡口角度更利于电弧加热,且熔化金属量大(见图8b),会产生更大体积的熔池,这会导致熔池所受重力的增加。坡口角度更大会使熔池所受支持力在竖直方向的分量更大,阻碍熔池“穿凿”,导致实现熔透所需的热输入更大。表面张力的作用方向是促进与熔池凸起或下凹相反的方向。其大小主要受熔池液态金属性质和温度影响,在两种坡口条件下,为了平衡竖直方向电弧力与熔池重力,表面张力方向和熔池形状会呈现不同的状态:在U形坡口条件下,电弧力大于重力,熔池形状表现为凸起,表面张力表现为斜向下;在V形坡口条件下,重力大于电弧力,熔池形状表现为下

凹,表面张力表现为斜向上。

除了力的作用,焊接热输入对熔透过程也有很大的影响。试验中,两种坡口的钝边均为1 mm。U形坡口底部较宽,电弧热量主要集中于坡口底部,并向焊缝背面传导用于熔透钝边。V形坡口底部较窄,电弧大部分热量集中于坡口侧壁,并且沿着侧壁向管道内部传导,导致用于熔透钝边的热量较少,因此,会出现熔透效果较差的情况,见图8。从图8可以看出,要熔透两种不同形状的坡口,所需熔化的母材量不同。U形坡口对热输入要求相对较小,熔池也会较小,对电弧力大小的要求相对低。在焊接过程中可以通过调节峰值占比和峰值大小进行控制。另外,在V形坡口中,由于焊丝偏离或坡口平整度等问题,电弧会因为最小电压原理产生偏转,加热侧壁。电弧热量一旦集中于坡口侧壁,则仅有小部分热量用于穿透钝边,且致使焊缝不对称,如图6所示。

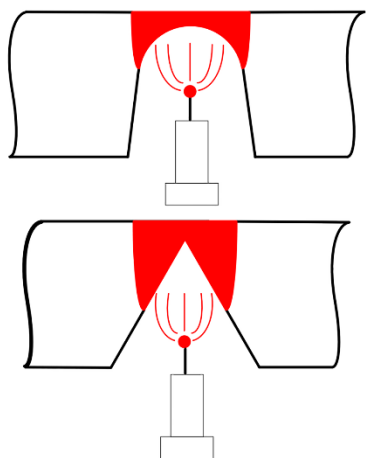


图8 U形坡口和V形坡口的母材受热部分

Fig. 8 Heat analysis for base metals with "U" and "V" grooves

3 结论

(1)在管道6点钟位置下,由于重力影响,在电弧力不足的情况下焊缝背面会出现下凹缺陷。提升峰值电流会使电弧力增大,可增大熔池对背面的“穿凿”作用。在本研究中通过提升平均电流在一定范围内提升了峰值电流,减小背面的下凹缺陷。

(2)在相同条件下,U形坡口相比于V形坡口更容易熔透。由于V形坡口角度较大,熔池体积更

大,熔池重力相较于U形坡口更大。在电弧力不变的情况下,为了平衡熔池重力,表面张力的方向为斜向上,导致焊缝背面呈下凹状。U形坡口的底部较宽,电弧热量容易集中加热钝边;V形坡口底部较窄,电弧热量会更多地用于加热侧壁,使焊缝比较难熔透。小角度的U形坡口更适合管道6点钟位置根焊使用。

(3)在6点钟位置,要抑制下凹缺陷的产生可以采用以下两种方式:使用U形坡口这类减小母材熔化量的坡口;调整焊接参数时,调节峰值电流占比和大小应是比较有效的方式。

参考文献:

- [1] 严春妍,顾正家,聂榕圻,等. X80管线钢水下湿法多道焊残余应力分析[J]. 焊接学报,2024,45(3):15-21.
YAN C Y, GU Z J, NIE R Q, et al. Residual stress analysis in multi-pass underwater wet welded X80 pipeline steel [J]. Transactions of The China Welding Institution,2024,45(3):15-21.
- [2] 郭春富,刘帛炎,董春林,等. TC4厚壁管全位置PAW工艺及接头性能分析[J]. 焊接学报,2019,40(7):121-126.
GUO C F, LIU B Y, DONG C L, et al. All-position plasma arc welding process for thick TC4 tube and mechanical properties of welded joints [J]. Transactions of The China Welding Institution,2019,40(7):121-126.
- [3] 张阳,吕小青,徐连勇,等. 工件倾角对脉冲MAG焊接熔池形态和焊缝尺寸的影响[J]. 焊接学报,2019,40(10):36-42.
ZHANG Y, LV X Q, XU L Y, et al. Effect of workpiece inclination on weld pool shape and weld forming in pulsed MAG welding [J]. Transactions of The China Welding Institution,2019,40(10):36-42.
- [4] 贾传宝,杜永鹏,武传松,等. 厚板窄间隙磁控电弧TIG焊接自动控制系统设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2017,45(9):40-46.
JIA C B, DU Y P, WU C S, et al. Design of an automatic control system for magnetic controlled narrow-gap TIG arc welding of thick plates [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2017,45(9):40-46.
- [5] 徐刚,张天雷,何林基,等. 窄间隙摆动电弧数值模拟[J]. 轻工机械,2021,39(3):54-58.
XU G, ZHANG T L, HE L J, et al. Numerical simulation of welding arc with narrow gap [J]. Light Industry