

文章编号:1673-5005(2024)06-0226-08 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2024.06.025

陡坡 X70 管线钢热丝 TIG 焊接头组织和性能

李立英¹, 盛学臻¹, 高彦伟², 刘乐¹, 韩彬¹

(1. 中国石油大学(华东)材料科学与工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中油(新疆)石油工程有限公司, 新疆克拉玛依 834000)

摘要: 采用两种不同的热输入对陡坡 25°X70 管线钢进行热丝 TIG 焊, 采用光学显微镜和电子显微镜对接头组织进行观察, 并测试接头的拉伸、弯曲、硬度以及冲击韧性, 分析两种焊接参数的适应性以及坡度对接头组织和力学性能的影响。结果表明, 热输入对接头组织类型影响不大, 但影响晶粒大小, 坡度影响盖面焊粗晶区宽度以及晶粒大小, 下坡口粗晶区宽度以及晶粒大小均大于上坡口; 大热输入接头各项力学性能均合格, 小热输入盖面焊趾硬度较高, 导致弯曲开裂, 上下坡口热影响区冲击功差别不大; 建议实际工程中使用焊接效率高且接头质量好的大热输入参数。

关键词: 热丝 TIG 焊; 陡坡; X70 管线钢; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 442 **文献标志码:** A

引用格式: 李立英, 盛学臻, 高彦伟, 等. 陡坡 X70 管线钢热丝 TIG 焊接头组织和性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(6): 226-233.

LI Liying, SHENG Xuezheng, GAO Yanwei, et al. Microstructure and properties of X70 pipeline steel welded joints with hot-wire TIG welding process at steep slope[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(6): 226-233.

Microstructure and properties of X70 pipeline steel welded joints with hot-wire TIG welding process at steep slope

LI Liying¹, SHENG Xuezheng¹, GAO Yanwei², LIU Le¹, HAN Bin¹

(1. School of Materials Science and Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. PetroChina (Xinjiang) Petroleum Engineering Company Limited, Karamay 834000, China)

Abstract: The hot-wire TIG welding process was used to weld the 25° X70 pipeline steel with two different heat inputs. In order to analyze the adaptability of the two welding parameters and the influence of slope on the microstructures and mechanical properties of welded joints, the microstructures of welded joints were observed with an optical microscope (OM) and a scanning electron microscope (SEM). Meanwhile, the mechanical properties of welded joints such as tension, bending, hardness and impact toughness were measured. The results show that the heat input has little effect on the microstructure type of welded joints, but affects the grain size. The slope affects the width and the grain size in the coarse-grained heat-affected zone (CGHAZ) of the cover weld. The width and the grain size in CGHAZ of the lower groove are both bigger than those of the upper groove. The mechanical properties of welded joint with a high heat input are qualified. However, the hardness of the cover weld toe with a low heat input is high, leading to cracking of bending specimens. The HAZ impact energy at both of the upper and the lower slopes does not differ much. It is suggested that welding parameters with a high heat input, which has a high welding efficiency and a good joint quality, should be used in practical projects.

Keywords: hot-wire TIG welding process; steep slope; X70 pipeline steel; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2023-12-13

基金项目: 国家重点研发项目(2021YFA1000103); 山东省重点研发项目(2020CXGC010207, 2022CXGC010202); 中国石油工程建设有限公司科研项目(CPECC2020KJ09)

第一作者及通信作者: 李立英(1976-), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为金属失效及表面改性与新材料焊接技术。E-mail: lly-ing3456@163.com。

天然气未来将成为中国能源转型后的主要清洁化石能源,因此对其需求量不断增加。但中国油气资源相对较少且分布不均匀,资源与市场不对称,且天然气对外依存度逐年增加,需对油气进行长距离运输。管道输送油气具有输送能力大且稳定连续、建设成本低、周期短等独特优点^[1],目前已经成为油气资源最主要的运输方式。焊接是管道与管道连接的最经济最有效的方法。但是,由于熔化焊属于金属熔化后重新凝固的过程,若焊接方法、焊接参数选用不当,不可避免地会在焊接区域产生各种焊接缺陷^[2]。鉴于中国的国情现状,山区管道建设不可避免;但山区条件下,由于坡度导致重力对焊接质量影响较大,如何保证大陡坡条件下焊接接头的性能成为焊接的难点。热丝 TIG 焊的送丝速度独立于焊接电流,可以改善焊缝成型,提高焊接效率和焊接质量,已经在中厚板、管焊接领域应用的越来越广泛^[3-5]。但热丝 TIG 焊在管线钢全自动焊接方面的

应用却较少。笔者采用震动送丝热丝 TIG 焊对陡坡 X70 钢管道进行焊接,分析不同焊接参数的适应性以及接头的组织和力学性能。

1 试验材料与方法

试验所采用的是国内某公司生产的 X70 钢管,规格为 $\Phi 820 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,其化学成分(质量分数)分别为 C 0.11%、Si 0.20%、Mn 1.61%、S 0.0004%、P 0.0007%、V 0.036%、Nb 0.045%和 Ti 0.0051%。

力学性能:屈服强度小于等于 485 MPa,抗拉强度小于等于 570 MPa,延伸率大于等于 20%。焊材所采用的是奥钢联伯乐生产的 TIG 焊专用焊丝。根焊是焊接接头最易出现裂纹的区域,为避免产生裂纹,根焊、热焊采用等强匹配;而为了保证整个焊接接头强度,填充和盖面位置采用高强匹配。根焊采用 ER70S-6 焊丝,直径为 1.0 mm;填充采用 ER80S-6 焊丝,直径为 1.0 mm,焊材化学成分如表 1 所示。

表 1 焊材化学成分

Table 1 Chemical components of welding materials

%

焊丝类型	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
ER70S-6	0.10	1.05	1.63	0.035	0.025	0.15	0.15	0.05	0.15
ER80S-6	0.10	0.50	0.52	0.025	0.025	5.00	0.60	0.35	0.48

焊接坡口为 U 型,如图 1(a)所示。采用热丝 TIG 焊,保护气体为 100% Ar,气体流量均为 15~20 L/min。焊接层数、道次如图 1(b)所示。模拟陡坡

定义为下坡口,如图 2 所示。热丝电流为 80 A,焊接参数如表 2 所示。

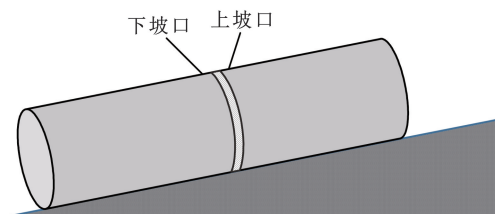


图 2 模拟陡坡环境焊接

Fig. 2 Simulated welding in steep slope environment

表 2 焊接参数

Table 2 Welding parameters

焊接方式	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度/ (cm · min ⁻¹)	焊接热输入/ (kJ · cm ⁻¹)
根焊	140~150	10	15~17	4.62
热焊	200	11	14	8.01
小热输入填充	200	11	11	8.01
大热输入填充	280	12.5	18	9.92
盖面	200	11	11	10.20

焊接完成后,以 GB/T 31032-2014 标准为指导,对接头进行组织分析和力学性能试验。采用金相显微镜和扫描电镜观察焊接接头组织。按照 GB/T 228.1-2010 和 GB/T 232-2010 采用微机控制电子式万能试验机对接头进行拉伸试验和弯曲试验。

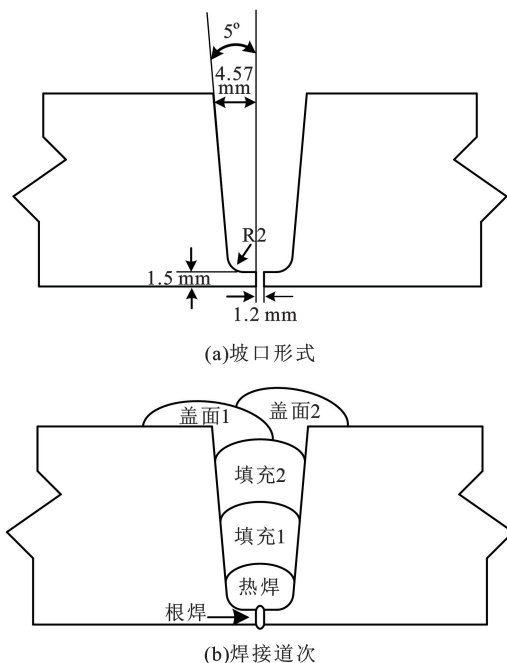


图 1 焊接坡口和焊接道次

Fig. 1 Schematic of welding groove and welding pass

25°条件下焊接,焊缝高侧定义为下坡口,焊缝低侧

按照 GB/T 4340.1-2009 采用 Hvs-50 型维氏硬度计测定焊接接头的硬度分布,载荷为 9.8 N。按照 GB/T 229-2007 采用 JB-500B 摆锤冲击试验机测定接头-20 ℃ 冲击韧性。

2 试验结果

2.1 焊接接头组织

2.1.1 接头宏观形貌

图 3 为焊接接头的宏观形貌。焊接过程先后经历一道根焊、一道热焊、两道填充焊和两道盖面焊。接头宏观金相表面无裂纹、气孔、未熔合、夹渣等缺陷,符合宏观金相检验相关标准要求。

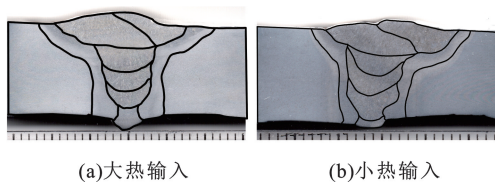


图 3 焊接接头宏观形貌

Fig. 3 Macro morphology of welded joints

2.1.2 焊缝显微组织

大热输入焊缝显微组织如图 4 所示,左侧为光镜(OM)形貌,右侧为扫描电镜(SEM)形貌。由图 4 可见,焊缝主要是由多边形铁素体(PF)和准多边形铁素体(QF)以及少量的针状铁素体(AF)和粒状贝氏体(GB)组成,且在根焊、热焊、填充层的多边形铁素体晶界处都存在黑色的蚀刻区。这是由于多边形铁素体在生长过程中,置换原子的迁移和碳原子重新分配使得新生成的 PF 和原奥氏体成分不同。其 C 含量超过 PF 的固溶度,在 PF 附近形成富碳区。富碳奥氏体稳定,不会形成 PF,在连续冷却过程中发生转变,形成蚀刻区^[6]。李焰等^[7-10]研究表明,多边形铁素体晶界旁的蚀刻区为 M-A 组元的退化组态,是珠光体(P)、退化珠光体(P')和典型贝氏体(UB, LB)的混合物。

根焊、热焊、填充和盖面焊焊缝均有细小弥散的第二相粒子,其主要成分为 C、Mn 等元素,来源于 ER70S-6 和 ER80S-6 焊丝。细小弥散的第二相粒子对位错的运动起到钉扎作用,提高焊缝强度。相比较而言,根焊和热焊组织差别不大,但热焊的黑色蚀刻区明显增多,晶粒细小,多边形铁素体和粒状贝氏体含量明显增多。盖面焊由于缺少了后续焊道的热处理作用,晶粒粗大,原奥氏体晶界清晰可见,在大晶粒内部存在纵横交错的 AF,可以有效防止位错滑移、抵抗断裂。在晶界处还发现少量链状和孤岛

状 M-A 组元,可能对韧性不利,导致脆断。

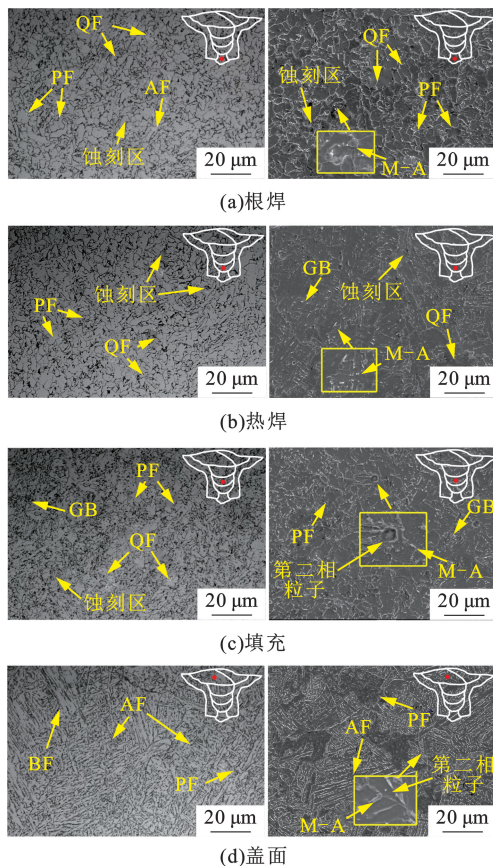


图 4 热输入焊缝组织形貌(左侧为 OM,右侧为 SEM)

Fig. 4 Microstructure of weld with high heat input (left being OM, right being SEM)

小热输入焊缝组织形貌如图 5 所示。由图 5 可知,组织与大热输入焊缝相似,主要以多边形铁素体(PF)和准多边形铁素体(QF)为主,以及少量的针状铁素体(AF)和粒状贝氏体(GB),在多边形铁素体晶界有黑色蚀刻区。但是,小热输入焊缝晶粒不均匀,根焊明显有许多细小的 PF,热焊中大块的粒状贝氏体(GB)含量增加,QF 的面积明显大于大热输入焊缝;大小不一的 AF 纵横交错,可以减少裂纹的蔓延;在填充焊缝的 PF 周围存在许多密集的小尺寸 PF,晶粒之间的尺寸差别较大。

根焊、热焊和填充焊由于受到后续焊道的二次加热,在晶界上存在少量的孤岛状 M-A 组元,且在晶粒内析出细小弥散的第二相颗粒。盖面焊组织大多是纵横交错的 AF、极少量的 PF 以及 GB,原奥氏体晶界明显可见。

2.1.3 热影响区显微组织

大热输入粗晶区(coarse-grained heat-affected zone, CGHAZ)组织如图 6 所示。粗晶区又称过热区,温度范围一般是在 1 100~1 500 ℃,在此温度区间,晶

粒发生急剧长大,冷却后形成粗大组织。受到焊接热源的影响,粗晶区晶粒长大,但是热丝 TIG 焊本身热输入较小,且根焊、热焊、填充焊受后续焊道的热作用,所以根焊、热焊、填充焊粗晶区晶粒粒径较小、宽度较窄。粗晶区主要由多边形铁素体、准多边形铁素体和粒状贝氏体组成,晶界清晰,细小的粒状贝氏体晶界上存在孤岛状的 M-A 组元,呈细小弥散分布。细小弥散的 M-A 组元对材料的韧性影响不大^[11-13]。

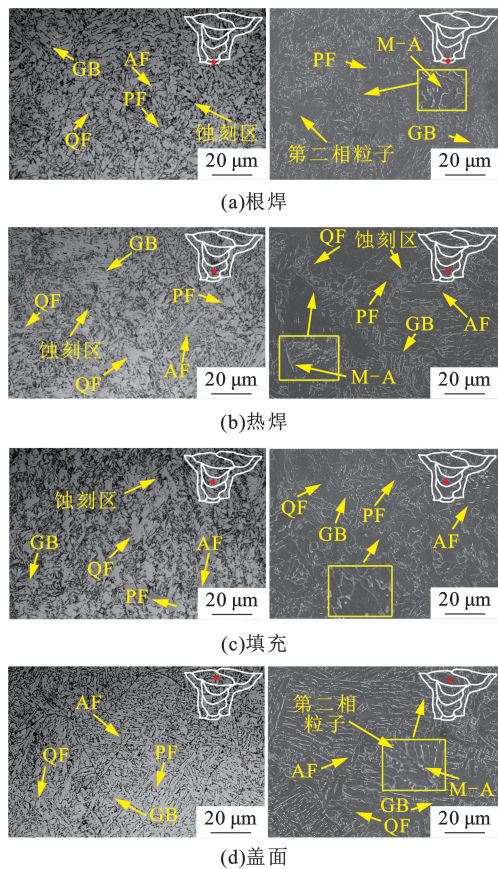


图 5 小热输入焊缝组织形貌

Fig. 5 Microstructure of weld with low heat input

根焊、热焊、填充焊上下坡口粗晶区的晶粒相差不大,且均小于盖面焊。盖面焊粗晶区主要为贝氏铁素体组织,板条倾向明显,且在贝氏铁素体晶界存在少量的链状 M-A 组元,对韧性不利。坡口影响盖面焊粗晶区的宽度和晶粒粒径。下坡口粗晶区的宽度达到 455 μm,晶粒粒径可约达 50 μm;而上坡口粗晶区的宽度只有 343 μm,晶粒粒径小于 30 μm。总之,下坡口盖面焊粗晶区宽度及晶粒粒径大于上坡口。

小热输入粗晶区组织形貌如图 7 所示。由图 7 可知,两种热输入粗晶区组织相似,均主要由粒状贝氏体、多边形铁素体、准多边形铁素体组成,在晶界处有细小弥散的孤岛状 M-A 组元。由于使用热丝 TIG 焊接过程中,震动送丝,促进熔滴进入熔池,减

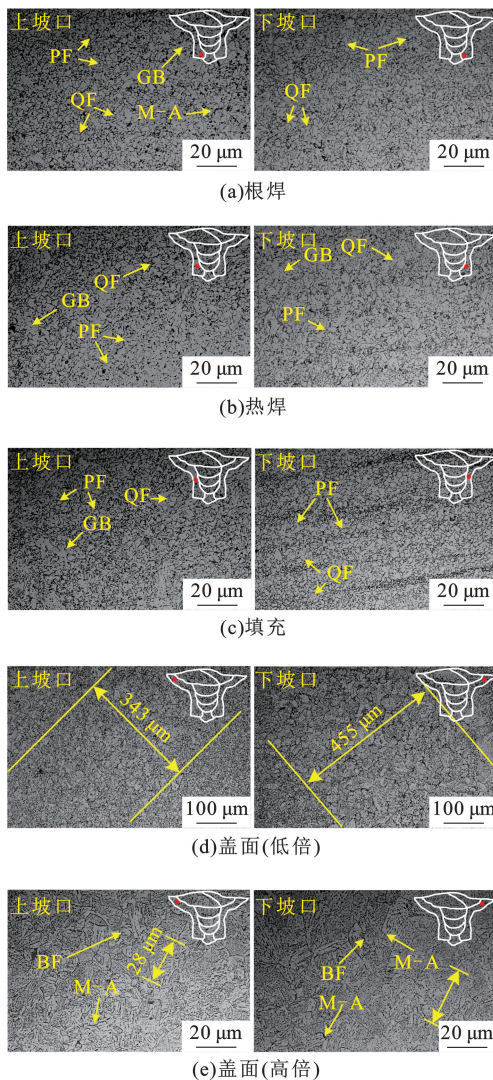


图 6 大热输入粗晶区组织形貌

Fig. 6 Microstructure of CGHAZ with high heat input

少熔池表面张力,细化晶粒,再加上热输入很小,根焊的热输入为 4.62 kJ/cm,填充的热输入为 8.01 kJ/cm,远远小于目前管道焊接常用的焊接方法,所以根焊、热焊和填充的粗晶区晶粒较为细小。

上坡口与下坡口组织晶粒类型没有明显差别。这可能是由于在坡度焊接时,热丝 TIG 焊熔池冷却较快,熔池在受到重力流向下坡口的过程中就已经凝固,且经过后续焊道的回火作用,晶粒不断细化,从而导致上、下坡口的组织类型没有明显差别。但是,盖面焊是最后工序,没有后续焊道的回火作用,下坡口的晶粒粒径大于上坡口。

临界再热粗晶区 (intercritically reheated CGHAZ, IR CGHAZ) 是粗晶区经过二次热循环形成的,其典型组织是贝氏体+沿晶界分布的链状 M-A 组元,如图 8 所示。由图 8 可见,贝氏体边界上存在大量的链状 M-A 组元,其数量以及粒径都远超过粗

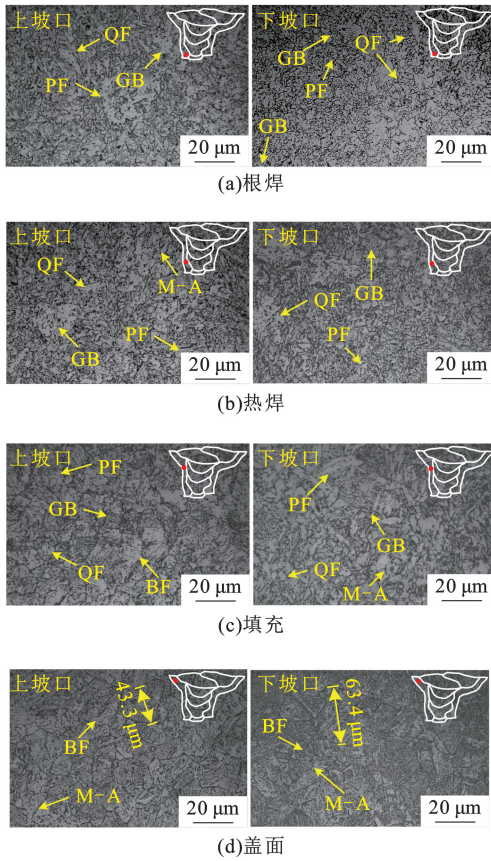


图7 小热输入粗晶区组织形貌

Fig. 7 Microstructure of CGHAZ with low heat input

晶区。粗晶区的原奥氏体晶界和板条界为临界粗晶区形成粗大的M-A组元提供了条件^[14]。这是因为粗晶区的非平衡组织具有一定的位向,在经历 $\alpha+\gamma$ 两相区热循环时,碳原子易定向扩散,促使碳浓度的非均匀性。同时,在 $\alpha+\gamma$ 两相区内, α 的形成过程是一个向外排碳的过程,这时形成的 γ 比高温单相 γ 区形成的 γ 具有更高的含碳量。此时,新生 γ 趋于稳定,冷却到 M_s 点以下发生马氏体相变,但相变不完全,含有少量残余奥氏体,最终在晶界上形成链状M-A组元。

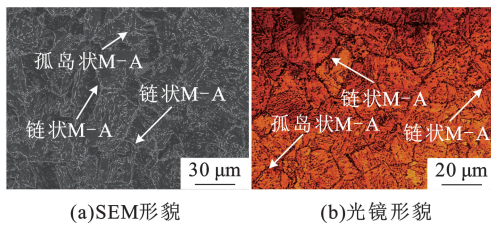


图8 临界再热粗晶区组织形貌

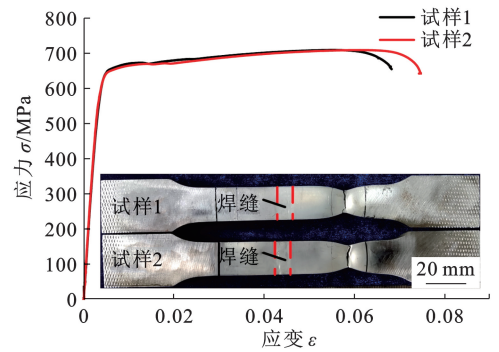
Fig. 8 Microstructure of IR CGHAZ

2.2 焊接接头性能

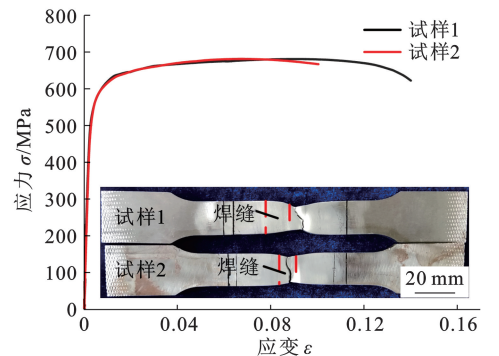
2.2.1 拉伸性能

X70钢焊接接头拉伸合格指标为:若试样断在焊缝或熔合区,其抗拉强度应不小于570 MPa,且每

个试样的断裂面应完全焊透和熔合;若试样断在母材,抗拉强度应不小于542 MPa。拉伸曲线见图9,拉伸试样结果如图10所示。大热输入试样均断在母材,且抗拉强度高于标准要求的542 MPa。小热输入1号试样在热影响区起裂,但最终在母材断裂,2号试样直接断在焊缝,但抗拉强度高于标准要求的570 MPa。这是由于小热输入接头,热焊层焊缝中大块粒状贝氏体和多边形铁素体增加,导致接头强度较低。由图9可知,拉伸过程可分为3个阶段:弹性变形阶段、塑性变形阶段和过渡阶段。每条曲线的后期都表现为应变增大、应力减小,说明在拉伸过程中均存在颈缩现象。



(a)大热输入



(b)小热输入

图9 拉伸应力-应变曲线

Fig. 9 Tensile stress-strain curves

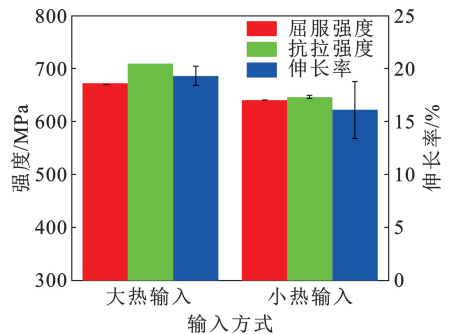


图10 拉伸试验结果

Fig. 10 Results of tensile test

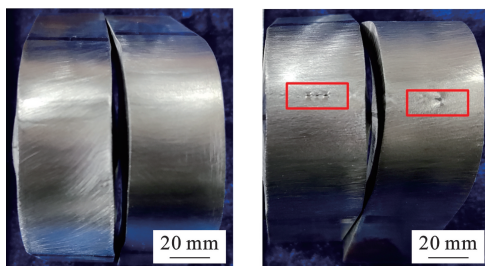
2.2.2 弯曲性能

弯曲试验结果见表 3, 弯曲试样如图 11 所示。大热输入试样弯曲 180°后, 试样表面光滑无裂纹, 该焊接接头抗弯性能良好。小热输入试样表面出现超过 3 mm 的裂纹, 裂纹平行于熔合线方向, 该裂纹位于下坡口盖面焊焊趾位置, 盖面焊焊趾位置为焊缝和粗晶区的交界处, 晶粒异常粗大, 抗弯能力差, 容易发生断裂, 不满足标准要求。

表 3 弯曲试验结果

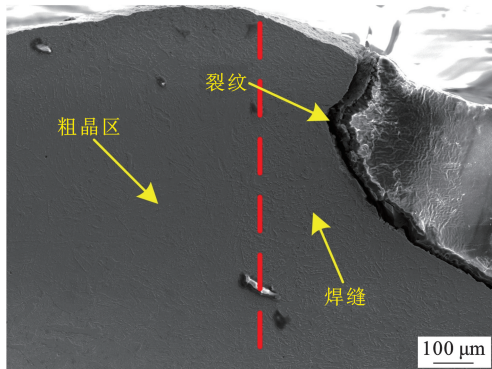
Table 3 Results of bending test

试样	试样类型	弯心直径/ mm	弯曲角/ (°)	弯曲 结果
大热输入	横面向弯	40	180	未见缺陷
	横面向弯	40	180	未见缺陷
小热输入	横面向弯	40	180	4.5 mm 裂纹
	横面向弯	40	180	3 mm 裂纹



(a)大热输入

(b)小热输入



(c)弯曲裂纹微观形貌

图 11 弯曲试样及裂纹形貌

Fig. 11 Morphology of bending specimens and cracks

2.2.3 冲击试验

-20 °C 冲击试验结果如图 12 所示。由图 12 可知, 两种不同热输入接头的平均夏比冲击功应不小于 50 J, 单个试样的夏比冲击功最小值应不小于 38 J, 均符合标准要求。焊接接头冲击功呈现 HAZ>熔合线>焊缝的趋势, 上坡口与下坡口 HAZ 的冲击功相差不大。大热输入焊缝与熔合线的冲击功都优于小热输入, 两者 HAZ 的冲击功差别不大。HAZ 冲击试样缺口位于等效 HAZ 即熔合线+1 mm 的位置。由于热丝 TIG 焊热输入小, 在两侧熔合线附近的粗晶区较窄,

冲击缺口开在两侧热影响区的细晶区, 所以冲击功相差不大。细晶区晶粒细小, 晶界数量增多, 有效减缓裂纹蔓延, 所以细晶区冲击功最好; 而在热丝 TIG 焊下, 粗晶区晶粒比较细小, 组织之间纵横交错, 阻止裂纹扩展, 焊缝处组织不均匀, 大块铁素体阻挡裂纹扩展能力较小, 所以 HAZ 韧性较高。

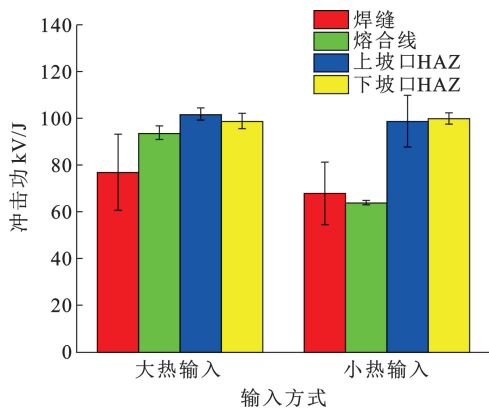


图 12 冲击试验结果

Fig. 12 Results of impact test

2.2.4 硬度试验

两种不同热输入接头的硬度分布如图 13(图中, BM、HAZ 和 WM 分别表示母材、热影响区和焊缝)所示。由图 13(a)、(b)可见, 大热输入焊缝的硬度由高到低的顺序为盖面、填充、热焊、根焊; 沿水平方向根焊、热焊和填充焊硬度分布为 HAZ>母材>焊缝。HAZ 硬度高的位置位于细晶区。这是因为细晶区的组织是细小的多边形铁素体, 晶粒细小, 晶界面积增加, 硬度增加。在热焊、填充焊两侧 HAZ 有明显的软化现象, 硬度低至 203 HV1 左右。这是由于后面的焊接过程对前面的焊道组织进行了回火, 受后续工艺二次热输入的影响, 粗晶区的粒状贝氏体经过二次加热, 发生回复与再结晶, 粒状贝氏体发生粗化, 由碳原子富集导致的固溶强化, 位错富集导致的相变强化作用减弱, 硬度降低。而盖面层的硬度为 HAZ>焊缝>母材, 在靠近焊缝的位置, 粗晶区组织为贝氏体铁素体, 板条存在缠结的位错, 导致硬度明显升高。另外, 由于在多层多道焊中过热区的形成导致热焊和填充焊及填充焊之间的交界处存在明显的硬度升高。

由图 13(c)、(d)可见, 小热输入整体硬度分布不均匀。焊缝硬度分布为盖面>根焊>热焊>填充。盖面焊缺少后续焊道的热处理作用, 是直接冷却得到的铸态组织, 焊缝及其 HAZ 晶粒异常粗大, 造成硬度升高。沿水平方向根焊、热焊和填充焊的硬度分布为 HAZ>母材>焊缝。在两层焊道交界位置硬

度较高,在 HAZ 两侧也存在软化现象。软化是因为受后续焊道二次热输入的影响,粗晶区的粒状贝氏体经过二次加热发生回复与再结晶,粒状贝氏体发生粗化,由碳原子富集导致的固溶强化及位错富集导致的相变强化作用减弱,硬度降低^[15-17]。另外,下坡口盖面焊趾位置存在一块硬度较大的区域,易成为起裂源,导致弯曲试样开裂。

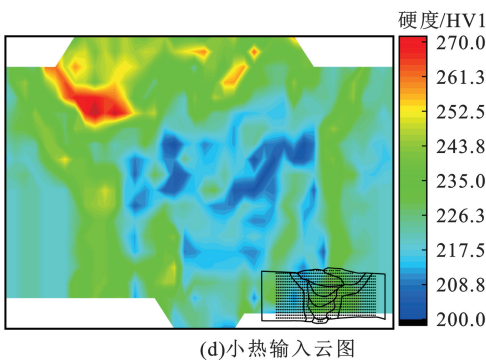
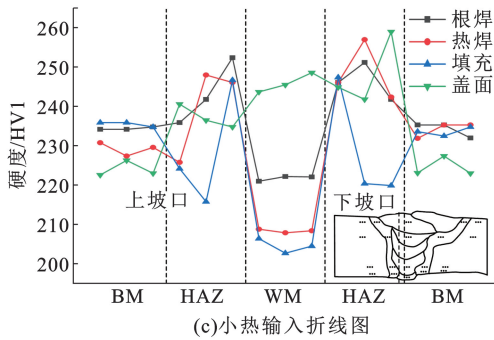
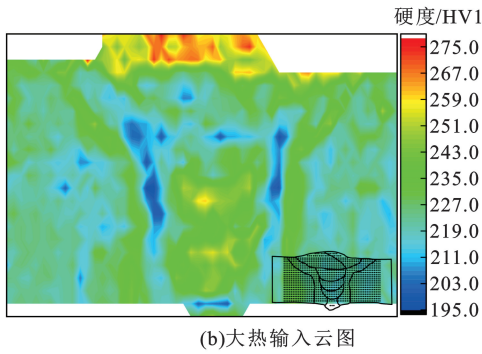
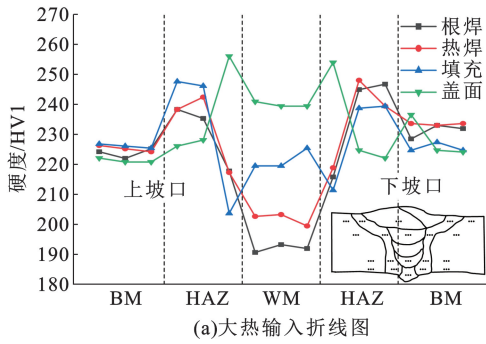


图 13 焊接接头硬度

Fig. 13 Hardness distribution of welded joints

3 结 论

(1) 陡坡 25°X70 钢热丝 TIG 焊接头,热输入对组织类型影响不大,但影响晶粒尺寸;焊缝主要为多边形铁素体与粒状贝氏体;大热输入热焊和填充层焊缝晶粒大小均匀,而小热输入不均匀;坡度影响盖面焊粗晶区宽度及晶粒粒径;下坡口粗晶区宽度及晶粒粒径均大于上坡口。

(2) 两种热输入接头拉伸试验均合格,大热输入弯曲合格,小热输入弯曲试样出现大于 3 mm 的裂纹;坡度对冲击功影响不大,大热输入焊缝与熔合线冲击功高于小热输入,两者 HAZ 差别不大;大热输入焊缝硬度为盖面>填充>热焊>根焊,小热输入焊缝硬度为盖面>根焊>热焊>填充,且后者下坡口盖面焊趾硬度较高。

(3) 在实际工程中陡坡 25°X70 钢采用热丝 TIG 焊接时,建议使用焊接效率高且接头质量好的大热输入参数。

参考文献:

[1] 高惠临. 管线钢与管线钢管[M]. 北京: 中国石油出版社, 2012: 2-3.

[2] 付建华, 王毅辉, 李又绿, 等. 油气管道全生命周期安全环境风险管理[J]. 天然气工业, 2013, 34(7): 138-143.

FU Jianhua, WANG Yihui, LI Youlu, et al. Safety and environmental risk management for the whole life cycle of oil and gas pipelines [J]. Natural Gas Industry, 2013, 34(7): 138-143.

[3] 王陆钊. 热丝 TIG 焊的工艺及性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2010.

WANG Luzhao. Study on technology and properties of hot wire TIG welding [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2010.

[4] 张品兴, 刘爱国, 王宝堂, 等. 熔丝 TIG 焊与 MIG/TIG 焊工艺对比[J]. 沈阳理工大学学报, 2017, 36(4): 44-48.

ZHANG Pinxing, LIU Aiguo, WANG Baotang, et al. Comparison of welding process between fuse TIG welding and MIG/TIG welding [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 36(4): 44-48.

[5] 赵福海, 华学明, 叶欣, 等. 考虑热损失的热丝 TIG 焊热丝温度分布解析模型[J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 97-100.

ZHAO Fuhai, HUA Xueming, YE Xin, et al. Analytical model of temperature distribution of hot wire TIG welding

- considering heat loss [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012,33(10):97-100.
- [6] 毕宗岳. 管线钢管焊接技术[M]. 北京:石油工业出版社,2013:16.
- [7] 李焰,李亚东,杨瑞,等. X80 管线钢焊接接头重构及其在 NACE 溶液中的腐蚀行为[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):153-160.
- LI Yan, LI Yadong, YANG Rui, et al. Reconfiguration and corrosion behavior of X80 pipeline steel welded joint in NACE solution [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(6):153-160.
- [8] LI X D, FAN Y R, MA X P, et al. Influence of martensite-austenite constituents formed at different inter-critical temperatures on toughness [J]. Materials Design, 2015, 67:457-463.
- [9] 王勇,孙启平,韩涛,等. 基于等效缺陷尺寸在役焊接安全性评价研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):124-129.
- WANG Yong, SUN Qiping, HAN Tao, et al. Safety evaluation of in-service welding based on equivalent defect size[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(1):124-129.
- [10] DAVIS C L, KING J E. Cleavage initiation in the inter-critically reheated coarse-grained heat affected zone. part I: fractographic evidence [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1994,25:563-573.
- [11] 李学达,尚成嘉,韩昌柴,等. X100 管线钢焊接热影响区中链状 M-A 组元对冲击韧性和断裂机制的影响[J]. 金属学报,2016,52(9):1025-1035.
- LI Xueda, SHANG Chengjia, HAN Changchai, et al. Effect of chain M-A elements on impact toughness and fracture mechanism in X100 pipeline steel welding heat-affected zone [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(9):1025-1035.
- [12] YU L, WANG H H, HOU T P, et al. Characteristic of martensite-austenite constituents in coarse grained heat affected zone of HSLA steel with varying Al contents [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014,19(8):708-714.
- [13] YU L, WANG H H, WANG X L, et al. Improvement of impact toughness of simulated heat affected zone by addition of aluminium [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2014,30(15):1951-1958.
- [14] 冯涛,邢付龙,孙永兴,等. 镍基泡沫防砂筛管 TIG 焊接头组织性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(2):176-182.
- FENG Tao, XING Fulong, SUN Yongxing, et al. Microstructure and property of TIG welding joint of nickel foam sand screen tube [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(2):176-182.
- [15] 李学达. 第三代管线钢的焊接性能研究[D]. 北京:北京科技大学,2015.
- LI Xueda. Research on welding performance of third-generation pipeline steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [16] CHENG Yiyuan, CHEN Zizhen, NIU Yongjun, et al. Influence of inclusions on strength and toughness of X70 pipeline steel girth weld [J]. Applied Mechanics and Mechatronics Automation, 2012,1554:182-183.
- [17] 安雪. M-A 组元对临界再热粗晶热影响区低温冲击韧性的影响[D]. 天津:天津大学,2015.
- AN Xue. Effect of M-A elements on low temperature impact toughness in the heat affected zone of critical reheat coarse grains [D]. Tianjin :Tianjin University, 2015.

(编辑 沈玉英)