

# 09MnNiDR 低温钢薄板 K-TIG 焊接工艺研究

刘文明, 欧阳凯, 张新明, 车昌盛, 蒋俊

(中建安装集团有限公司, 江苏 南京 210023)

**摘要:**采用“匙孔”型钨极氩弧焊(K-TIG)对10 mm厚09MnNiDR低温钢薄板进行对接焊试验研究,分析不同工艺参数条件下单道焊接头横截面,对热处理前后的接头表面特征、宏观形貌、微观组织及力学性能进行研究。结果表明,随着焊接电流的增加,焊接熔透性提高;随着装配间隙的增加,焊缝逐渐变宽。母材组织为铁素体+珠光体组织,盖面焊缝区及K-TIG焊缝区均有贝氏体析出,盖面焊缝区组织以针状铁素体为主。经焊后热处理后,K-TIG焊缝区柱状晶结构消失,盖面焊缝区部分针状铁素体转化为块状铁素体。最佳工艺参数条件下,焊后热处理前后接头抗拉强度分别为524.1、481.4 MPa。K-TIG焊缝区冲击韧性差,-70℃冲击吸收能量仅为6.7 J,焊后热处理后,冲击性能显著改善,提升至94.8 J。

**关键词:**09MnNiDR 低温钢;K-TIG 焊接;工艺参数;焊后热处理

中图分类号:TG456.9

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2025)21-0213-06

## Research on K-TIG Welding Process of 09MnNiDR Low-temperature Steel Thin Plate

LIU Wenming, OUYANG Kai, ZHANG Xinming, CHE Changsheng, JIANG Jun

(China Construction Industrial & Energy Engineering Group Co., Ltd., Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Key-hole tungsten inert gas (K-TIG) welding was used for butt welding test of 09MnNiDR low-temperature steel plate with the thickness of 10 mm, the cross section of the single pass welds at different parameters were studied. The welded joints before and after post-weld heat treatment were studied from surface characteristics, macroscopic morphology, microstructure and mechanical properties. The results show that with the increase of the welding current, the weld penetration improves; with the increase of the assembly clearance, the weld width increases. The microstructure of the base metal is ferrite and pearlite. The bainite precipitates from the microstructure of K-TIG weld zone and cap weld zone; the microstructure of the cap weld zone is mainly acicular ferrite. After post-weld heat treatment, the columnar crystal in K-TIG weld zone turns to equiaxed grains, part of the acicular ferrite in cap weld zone transforms to granular ferrite. Under the optimum process parameters, the tensile strength of the welded joint before and after post weld heat treatment are 524.1 MPa and 481.4 MPa, respectively. The impact toughness of the K-TIG weld zone is poor, which is only 6.7 J at -70℃, and it improves obviously to 94.8 J after post-weld heat treatment.

**Key words:** 09MnNiDR low-temperature steel; K-TIG welding; process parameters; post-weld heat treatment

随着化工行业的飞速发展,以及国内市场对于低温储罐需求的增加,09MnNiDR等低温储罐用钢应用日益增多。09MnNiDR钢主要应用于-70℃条件下服役的低温压力容器及储罐的制造,金相组织为铁素体+珠光体,主要合金元素Mn、Ni均为奥氏体化元素,可以提高钢材的强度和韧性。对于09MnNiDR钢的研究,目前主要集中于常用方法的

焊接工艺<sup>[1-2]</sup>、热处理<sup>[3-4]</sup>以及焊接热循环<sup>[5]</sup>等因素对焊接接头低温冲击韧性的影响,Zhang<sup>[6]</sup>、丁航<sup>[7]</sup>等则通过09MnNiDR低温钢的连续冷却转变曲线对钢材的组织 and 低温性能进行分析。

“匙孔”型钨极氩弧焊(keyhole tungsten inert gas, K-TIG)技术作为新型的高效焊接方法,以焊接过程稳定、焊接效率高、焊缝成形性能好等特点引起较大重视。K-TIG焊接技术的研究,目前主要为Invar36<sup>[8-9]</sup>、钛合金<sup>[10-11]</sup>、不锈钢<sup>[12-14]</sup>、铝合金<sup>[15]</sup>等材料的焊接工艺研究、熔池流动行为<sup>[16]</sup>等焊接过程研究,以及焊接过程中的熔池图像采集<sup>[17]</sup>、声信号采集<sup>[18]</sup>等智能化焊接技术研究。09MnNiDR钢是目前应用较为广泛的低温钢之

收稿日期:2022-11-28 修回日期:2024-07-27

基金项目:中国建筑股份有限公司科技研发计划项目(CSCEC-2021-Q-58)

作者简介:刘文明,男,工程师,博士,主要从事先进焊接技术及热处理研究;E-mail:liuwmm\_cscec@163.com

一,对其进行 K-TIG 焊接技术研究,可以为 K-TIG 焊接技术在低温钢领域的应用提供工艺参考,提高工程效率。本文分析了 09MnNiDR 低温钢在不同 K-TIG 焊接工艺参数下的焊接成型,研究其组织和性能,优化焊接工艺参数。

## 1 试验材料及方法

对 10 mm 厚 09MnNiDR 进行 K-TIG 焊接试验。为保证焊接接头的低温冲击韧性,填充金属选择 ER55-Ni3 焊丝,焊丝直径为  $\phi 2.0$  mm,母材与焊接材料的化学成分及力学性能如表 1 所示。

表 1 母材和焊接材料的化学成分(质量分数%)及力学性能  
Tab.1 Chemical composition(wt%) and mechanical properties of base metal and filler metal

材料	C	Si	Mn	Ni	Nb	Alt	Cu	P	S	抗拉强度 / MPa	-70℃KV / J
09MnNiDR	≤0.12	0.15~0.50	1.20~1.60	0.30~0.80	≤0.040	≥0.020	-	≤0.020	≤0.008	440~570	≥60
ER55-Ni3	≤0.12	0.40~0.80	≤1.25	3.00~3.75	-	-	≤0.35	≤0.020	≤0.010	550~740	≥54

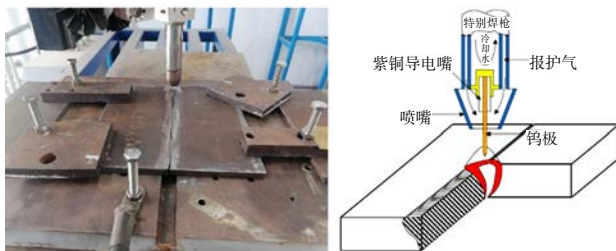


图 1 K-TIG 焊接方法及坡口形式  
Fig.1 K-TIG welding method and groove type

表 2 K-TIG 焊接工艺参数  
Tab.2 The process parameters of K-TIG welding

编号	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 / $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	装配间隙 /mm	保护气流量 / $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
1	410	22	4.5	1	20
2	450	22	4.5	1	20
3	490	22	4.5	1	20
4	530	22	4.5	1	20
5	490	22	4.5	0.5	20
6	490	22	4.5	1.5	20

采用体视显微镜及金相显微镜进行焊接接头宏观及微观金相观察。采用万能拉伸试验机进行拉伸试验,拉伸试样尺寸如图 2 所示。采用冲击试验机进

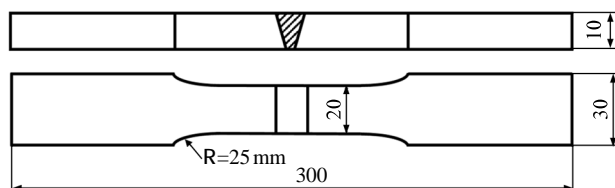


图 2 拉伸试样尺寸(mm)  
Fig.2 Sizes of the tensile sample (mm)

采用 K-TIG 焊接方法进行 09MnNiDR 低温钢不同焊接工艺条件下的焊接,保护气体为 99.99% 的氩气,分析不同焊接电流、装配间隙对 09MnNiDR 低温钢焊接接头成形性能的影响。坡口形式为 I 型坡口,K-TIG 焊接方法及坡口形式如图 1 所示。由于一道 K-TIG 焊接无法填满整条焊缝,采用 TIG 焊对最佳工艺参数下试板进行盖面焊接,盖面焊参数为焊接电流 135 A,焊接电压 16 V,焊接速度 3.9~4.1 mm/s,保护气流量为 20L/min。最后,对接头进行 620℃ 保温 1 h 的焊后热处理 (post-weld heat treatment, PWHT)。焊接工艺参数如表 2 所示。

行 -70℃ V 型缺口低温冲击试验,冲击试样尺寸为 55 mm×10 mm×7.5 mm,采用硬度试验机进行硬度试验。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 焊接电流对焊缝成形性能的影响

对 09MnNiDR 低温钢进行焊接工艺研究,不同焊接电流的焊缝正面及背面成型如图 3 所示,截面宏观形貌如图 4 所示。由图 3 可以看出,焊接电流较小时(图 3(a)、图 4(a)),焊缝背面出现未焊透,焊缝仅熔透 7.95 mm,有较大一部分处于未熔透状态;焊接电流为 450 A 时(图 3(b)、图 4(b)),焊缝正面表面出现气孔缺陷,且背部部分焊透,焊缝不均匀,截

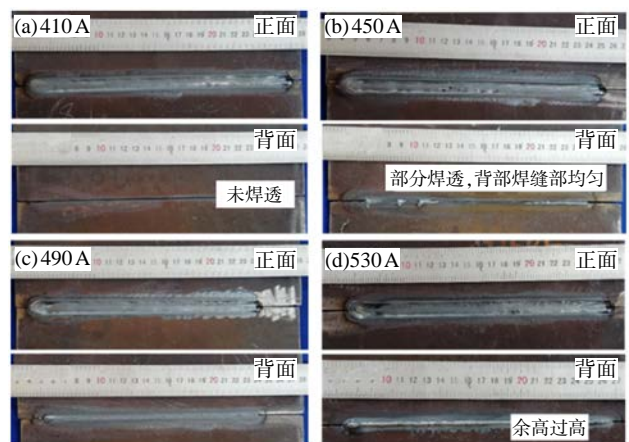


图 3 不同焊接电流下 K-TIG 焊缝表面成型  
Fig.3 Surface forming of the K-TIG welds at different welding currents

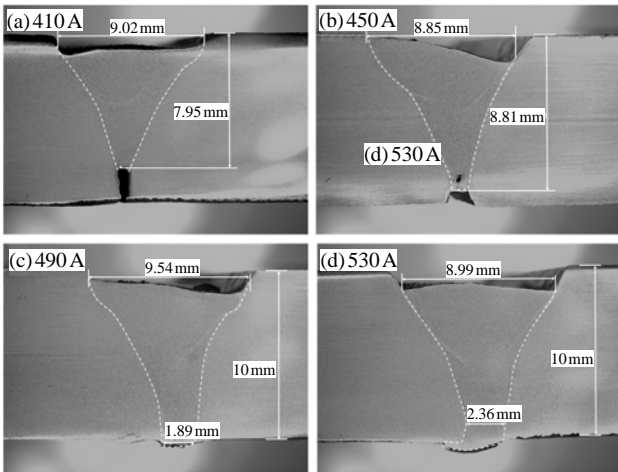


图4 不同焊接电流下 K-TIG 接头截面图  
Fig.4 Cross-section photos of the K-TIG welds at different welding currents

面底部出现小孔缺陷；焊接电流的增大至 490 A 时(图 3(c)、图 4(c)),焊接接头焊缝背面焊透且均匀分布,焊缝背部成型较好,余高不高;焊接电流达到 530 A 时,焊缝余高过高(图 3(d)、图 4(d))。由结果可以看出,随着焊接电流的增大,09MnNiDR 的 K-TIG 焊接熔池流动性变好,熔透性逐渐增强,焊缝底部增宽,焊缝背部材料流动至两侧母材并与母材底部熔合。

由于 K-TIG 方法是在大电流及钨极作用下产生较大的电弧压力,在液态熔池的重力及表面张力作用下实现三者的相对平衡,形成匙孔效应<sup>[19]</sup>。随着电流的不断增大,焊接熔池热输入不断增加,受热熔化的材料增多,在电弧压力及液态熔池的重力作用下,熔池不断向下推进,并在表面张力作用下达动态平衡,焊缝的穿透力变强。焊接电流过大时,液态金属会在锁孔附近出现回流现象,造成熔池拖尾,从而导致焊缝背部材料与母材底部熔合,严重时,焊缝金属失去动态平衡则会导致焊缝出现坍塌失稳现象。

## 2.2 装配间隙对焊缝成形性能的影响

对 09MnNiDR 低温钢进行不同装配间隙的焊接工艺研究,焊缝正面及背面成型如图 5 所示,截面宏观形貌如图 6 所示。装配间隙为 0.5 mm 时(图 5(a)、图 6(a)),焊缝背面不均匀,焊缝余高过高,装配间隙为 1.5 mm 过大时(图 5(b)、图 6(b)),焊缝正面凹陷较大,且背部余高不稳定且部分位置余高过高,焊缝根部出现孔径约 0.48 mm 左右的气孔,焊缝顶部增宽。装配间隙的增大会导致熔池表面张力减小,在重力作用下向间隙中间流动,对装配间隙进行

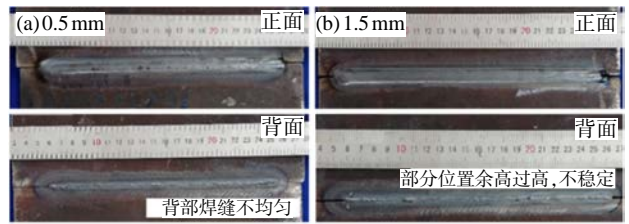


图5 不同装配间隙条件下 K-TIG 焊缝表面成型  
Fig.5 Surface forming of the K-TIG welds at different assembly clearances

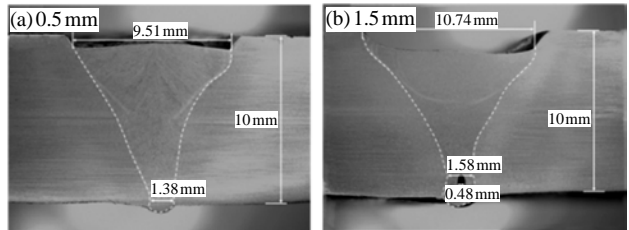


图6 不同装配间隙条件下 K-TIG 焊接接头截面图  
Fig.6 Cross-section pictures of the K-TIG welds at different assembly clearances

填充<sup>[14]</sup>,同时焊缝内部有更多的气体需要从底部匙孔排出,而 K-TIG 焊接过程时间短,焊缝冷却快,部分气体难以排出,在液体回流作用下在焊缝底部形成气孔。综合实验结果,最佳工艺参数为焊接电流 490 A,装配间隙 1 mm。

## 2.3 最佳工艺参数条件下的焊缝成型

对最佳工艺参数条件下的焊接接头进行 TIG 盖面焊接,焊缝表面形貌及截面图如图 7 所示。从图 7 中可以看出,经手工盖面焊后,焊缝成型良好,未发现缺陷。焊接接头被分为 5 个区域,即 K-TIG 焊缝区、盖面焊热影响区、盖面焊缝区、焊接热影响区以及母材区。K-TIG 焊缝区和盖面焊缝区呈现出沿过冷方向垂直生长的等轴树枝晶结构,盖面焊热影响区铸态组织特征消失,由于第二道焊接对上一道焊缝的回火作用,可以显著改善焊接接头的综合性能。经焊后热处理后,K-TIG 焊缝部分柱状晶结构特征消失。

## 2.4 焊接接头微观组织分析

采用光学显微镜对盖面焊后焊缝的微观组织进行观察,如图 8 所示。图 8(a)为母材组织,母材组织沿轧延变形方向交替呈带状分布,主要为晶粒尺寸不一的铁素体(ferrite, F)及珠光体(pearlite, P)组织;图 8(b)为焊缝熔合线位置,左侧为焊缝区,右侧为焊接热影响区(heat affected zone, HAZ),相较于焊缝区组织,焊接热影响区组织明显粗大;图 8(c)为焊接热影响区的微观组织,以 F+P 为主,部分 F 组织

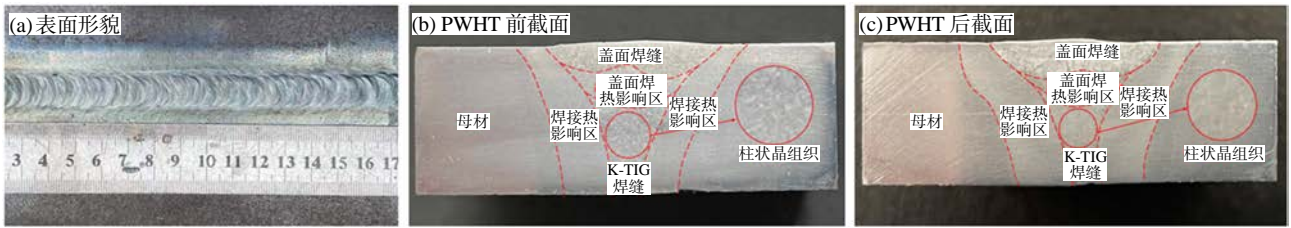


图7 盖面焊后的焊接接头表面和截面形貌

Fig.7 Surface and cross-section morphologies of the welded joint after cap welding

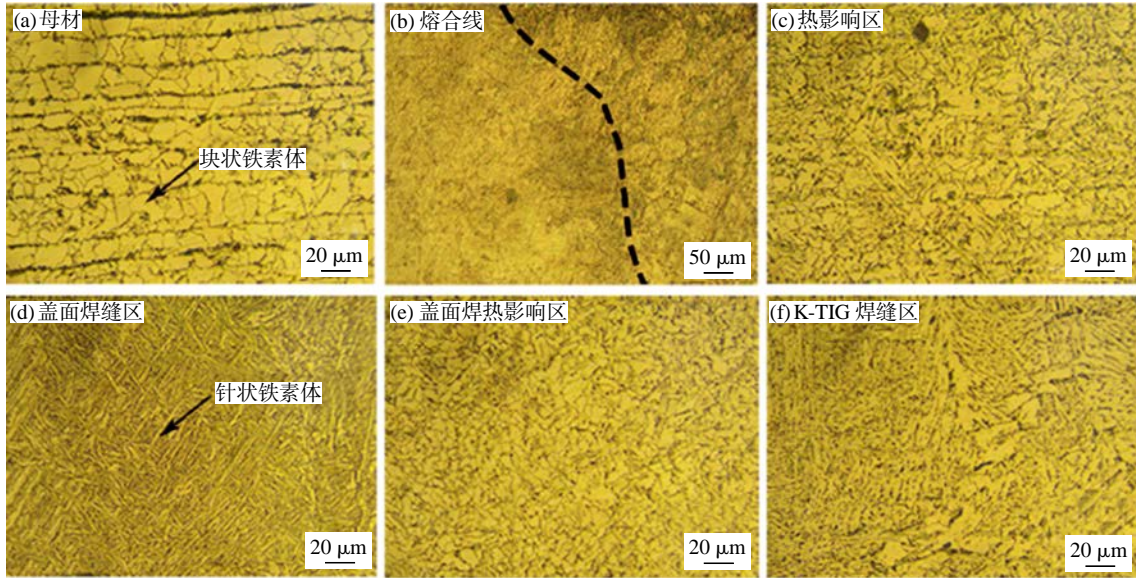


图8 焊接接头各区的微观组织

Fig.8 Microstructures of each region of the welded joint

较为粗大;图 8(d)~(f)分别为盖面焊缝区、盖面焊热影响区、K-TIG 焊缝区的微观组织。盖面焊缝区组织主要为针状 F、P 及粒状贝氏体(Bainite, B);盖面焊热影响区组织与焊接热影响区组织相近,但晶粒尺寸相对较小,以 F+P 为主,有少量 B;K-TIG 焊缝区组织为 F+块状 B 及块状 B 中夹杂的大量粒状 B。

经 PWHT 的焊接接头金相组织如图 9 所示。相较于 PWHT 前,母材(图 9(a))与焊接热影响区(图 9(b))变化不大,组织趋近于均匀化,盖面焊缝区(图 9(c))的针状 F 部分转化为块状 F;盖面焊热影响区(图 9(d))组织为 F+P+粒状 B,粒状 B 聚集在 F 晶界处;K-TIG 焊缝区(图 9(e))组织长大明显,块状 B+针状 F 大量减少,组织以块状 F 为主,粒状 B 聚集在铁素体晶界处。

## 2.5 焊接接头力学性能

最优工艺参数条件下焊接接头的抗拉强度如表 3 所示,拉伸试样形貌如图 10 所示。由表 3 中可以看出,焊接接头平均抗拉强度为 524.1 MPa,经

PWHT 后,焊接接头抗拉强度下降,平均抗拉强度为 481.4 MPa。由图 10 可以看出,PWHT 前后接头拉伸断裂位置均为热影响区,断裂形式为韧性断裂。焊接热影响区为块状 F+P 组织,F 组织较为粗大且热影响区宽度较宽,粗大的 F 使得焊接热影响区为焊接接头的焊缝薄弱位置,成为拉伸断裂位置。

对焊接接头焊缝及热影响区进行 -70℃ 夏比冲击试验,冲击试验结果如表 4 所示,冲击试样断口形貌如图 11 所示。从表 4 可以看出,焊缝平均冲击吸收能量为 6.7J,冲击韧性差;焊接热影响区的平均冲击吸收能量为 202.5J,冲击性能良好。焊后热处理后,焊缝区冲击韧性有所改善,平均冲击吸收能量为 94.8J,焊接热影响区冲击吸收能量与热处理前相差不大,平均冲击吸收能量为 204.8J。焊缝冲击断面(图 11(a))显示,焊缝的低温冲击韧性一半为韧性断裂,一半为脆性断裂,韧窝较浅。这主要是由于盖面焊热影响区组织为 F+P 组织,且晶粒细小,受细晶强化作用影响,此区域呈现韧脆混合断裂,而 K-TIG 焊缝区晶粒组织大小不一且不均匀分布,包

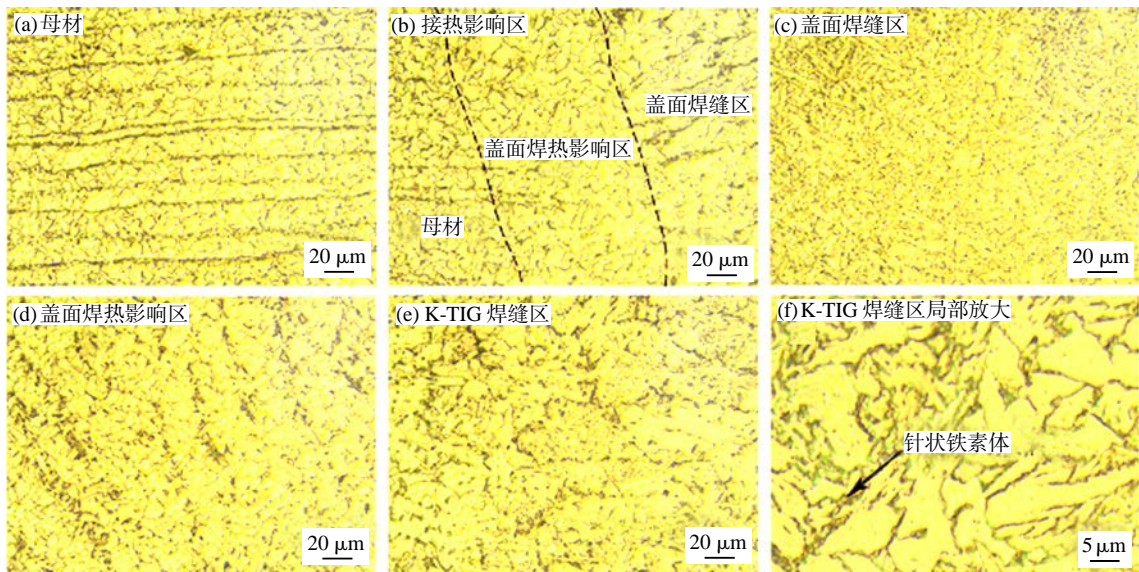


图9 焊接接头热处理后的微观组织

Fig.9 Microstructure of the welded joint after PWHT

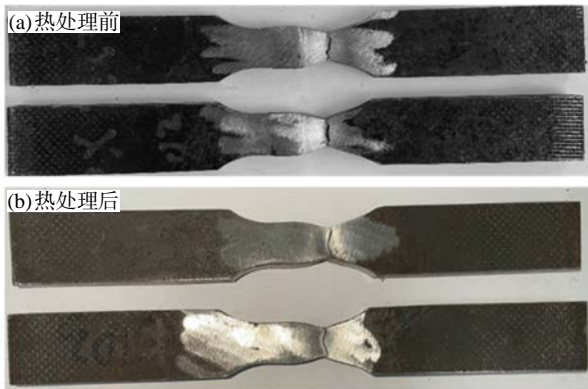


图10 K-TIG 焊接接头拉伸试样形貌

Fig.10 Tensile sample morphologies of the K-TIG welded joints

表3 焊接接头的抗拉强度  
Tab.3 Tensile strength of the welded joints

热处理状态	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断裂位置
热处理前	523.3, 524.8(524.1)	热影响区
热处理后	478.6, 484.2(481.4)	热影响区

表4 K-TIG 焊接接头冲击试验结果  
Tab.4 Impact test results of the K-TIG welded joint

热处理状态	缺口位置	冲击吸收能量 $KV_2$ /J
PWHT 前	焊缝	7.7, 5.5, 6.8 (6.7)
	热影响区	200.7, 204.9, 201.9(202.5)
PWHT 后	焊缝	146.2, 79.8, 58.4(94.8)
	热影响区	205.6, 200.7, 208.1(204.8)

含大量粒状 B, 呈现脆性断裂。焊接接头焊缝区树枝晶的生长方向与冲击方向相互垂直, 导致焊接接头低温冲击性能较低。此外, K-TIG 焊缝区的大量粒状 B 组织, 使得接头强硬度提高, 塑韧性下降。同时, 焊

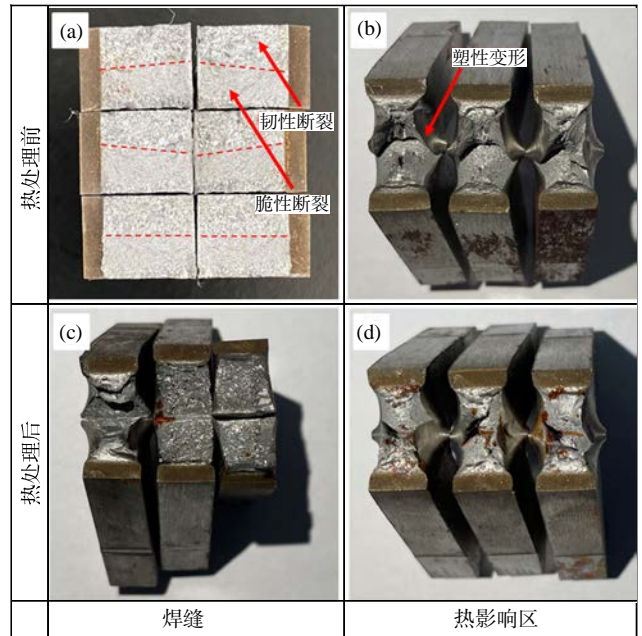


图11 K-TIG 焊接接头冲击试样断口形貌

Fig.11 Fracture morphologies of impact samples of the K-TIG welded joint

接接头组织不均匀性及原始的铸态组织使得焊缝在低温条件下冲击韧性大大降低。焊接热影响区的冲击断口主要为韧性断裂(图 11(b))。经 PWHT 后, 焊接接头组织均匀性得到改善, K-TIG 焊缝区部分柱状晶结构特征消失, F 含量增多, 接头韧性改善, 焊缝与热影响区试样均为韧性断裂, 如图 11(c)、(d)所示, 相较于热处理前, 焊缝区的韧窝深度加深, 冲击韧性提高, 焊接热影响区与热处理前相差不大。

对焊接接头各区域进行硬度检测, 结果如图 12

所示。焊接接头最高硬度位于盖面焊热影响区,受细晶强化作用的影响,焊缝的硬度提高,塑性也提高。K-TIG 焊缝位置由于大量粒状 B 的存在,焊缝硬度得到显著的提升;焊接热影响区受焊接热循环作用的影响,晶粒变得粗大,相对于母材略有下降,为硬度最低位置。盖面焊组织以针状 F+P 组织为主,与母材组织成分相差不大,硬度相差不大。经 PWHT 后,焊缝区硬度明显下降,其中 K-TIG 焊缝区和盖面焊热影响区硬度降幅较大。

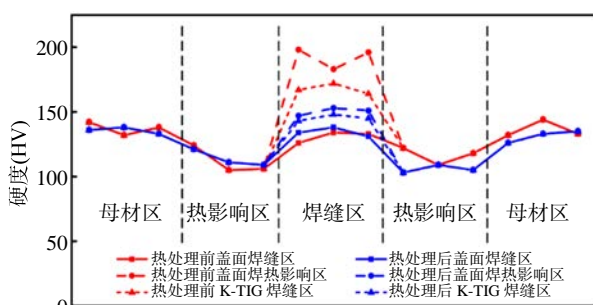


图 12 K-TIG 焊接接头硬度试验结果

Fig.12 Hardness test results of the K-TIG welded joint

### 3 结论

(1) 随着焊接电流的增加,焊缝熔透性逐渐增强,当电流最小时,焊缝出现未熔透;当电流最大时,焊缝余高过高。随着装配间隙的增大,焊缝底部宽度逐渐增大,当装配间隙最大时,焊缝底部出现气孔缺陷。

(2) K-TIG 焊缝区组织主要为 F+块状 B+大量的粒状 B;盖面焊热影响区组织为块状 F+P;盖面焊缝区的组织为大量针状 F+P+粒状 B;经 PWHT 后, K-TIG 焊缝柱状晶特征消失,盖面焊缝区针状 F 部分转化为块状 F。

(3) 最佳焊接工艺参数下的接头力学性能结果显示,焊后热处理前后接头抗拉强度分别为 524.1 和 481.4 MPa,断裂位置均为焊接热影响区位置;受 K-TIG 焊缝组织的影响,焊缝的低温冲击性能差,经焊后热处理后,焊接接头抗拉强度下降,接头冲击韧性提高,-70℃焊缝区冲击值达到 94.8J,焊接热影响区冲击性能受热处理影响不大。

### 参考文献:

[1] 李金梅,杨兆庆,梁小武,等. 热输入对 09MnNiDR 钢焊接热

影响区粗晶区组织和韧性的影响[J]. 机械工程材料,2021,45(12):72-77.

[2] 李卫红,文成. 09MnNiDR 钢的埋弧焊工艺评定[J]. 热加工工艺,2014,43(13):193-194.

[3] 汪晶洁,吴君明,王红鸿. 09MnNiDR 低温钢焊后热处理工艺研究[J]. 电焊机,2019,49(3):28-30.

[4] 张丙军,谢章龙,席连云,等. 亚温淬火对 09MnNiDR 容器钢板组织及断裂性能的影响[J]. 金属热处理,2021,46(4):122-125.

[5] 张丽红,陈芙蓉,常建刚. 焊接热循环对 09MnNiDR 钢热影响区低温韧性的影响[J]. 焊接学报,2020,41(3):91-96.

[6] Zhang L, Chen F, Chang J. Determination of SHCCT curve of low temperature steel 09MnNiDR and analysis of low temperature toughness of welded joints[J]. Acta Microscopica, 2020,29(6):3147-3155.

[7] 丁航,王丽君,杨勇,等. 09MnNiDR 低温压力容器钢的连续冷却转变[J]. 江西冶金,2022,42(3):1-6.

[8] Xuan Y, Yang J, Liu H B, et al. Microstructure and mechanical properties of Invar36 alloy joints using keyhole TIG welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2020,25(8):712-718.

[9] 徐磊,刘红兵,杨瑾,等. 真空退火对 Invar36 合金 K-TIG 焊接接头组织和性能的影响[J]. 热处理,2021,36(6):6-10.

[10] 任冠鹏,杨青云,徐家磊,等. Gr.12 钛合金 K-TIG 焊接接头的组织和力学性能研究 [J]. 热加工工艺,2022,51(21):131-134.

[11] Cui S W, Shi Y H, Zhu T, et al. Microstructure, texture, and mechanical properties of Ti-6Al-4V joints by K-TIG welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019,37:418-424.

[12] 李京洋,李伟,焦向东,等. 304 不锈钢激光 K-TIG 复合焊接电弧特性的研究[J]. 电焊机,2020,50(4):30-35.

[13] Cui S W, Shi Y H, Cui Y X, et al. The impact toughness of novel keyhole TIG welded duplex stainless steel joints [J]. Engineering Failure Analysis, 2018,94:226-231.

[14] 占爱文,石永华,陈金荣. 对接间隙对 K-TIG 焊接 304 不锈钢熔池和锁孔的影响[J]. 热加工工艺,2021,50(23):139-145.

[15] 杨健. 6N01 铝合金对接接头的 K-TIG 焊接工艺、组织及性能 [D]. 兰州:兰州理工大学,2021.

[16] 冯涛,吕祚翔,刘俊,等. 15-5PH 钢 K-TIG 焊熔池流动行为分析[J]. 焊接学报,2021,42(8):91-96.

[17] 黄辉,蔡庆荣,陆立明,等. 基于 U 型网络的 K-TIG 焊熔池图像分割方法研究 [J]. 计算技术与自动化,2022,41(2):100-107.

[18] 梁斌,崔延鑫,石永华,等. 深熔 K-TIG 焊接过程的声信号采集及特征分析[J]. 电焊机,2018,48(10):94-97.

[19] 徐良,欧阳凯,杨海峰. K-TIG 焊接动态过程及组织和性能分析[J]. 焊接学报,2020,41(8):68-72. 