

不同 Nb 含量 X80 钢管环焊热影响区的微观组织与韧性

何小东^{1,2}, 杨耀彬^{1,2}, 陈越峰^{1,2}, 张永青^{2,3}

(1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 西安, 710077;
2. 国际焊接研究中心, 西安, 710077; 3. 中信金属股份有限公司, 北京, 100004)

摘要: 为研究 Nb 含量对焊接热影响区微观组织和性能的影响, 采用熔化极气体保护焊 (gas metal arc welding, GMAW) 和手工焊条电弧焊 (shielded metal arc welding, SMAW) 对 0.055%Nb 和 0.075%Nb 含量的 X80 钢管进行环焊。采用夏比冲击试验和金相分析方法, 研究热影响区的微观组织差异和夏比冲击韧性。并借助扫描电镜和超高温激光共聚焦显微镜分析不同 Nb 含量 X80 管体的微观组织对热影响区性能的影响。结果表明, 在 0 °C 和 -20 °C 时, 0.075%Nb 和 0.055%Nb 的 X80 钢管 GMAW 环焊接头热影响区均具有较高的冲击韧性, 其平均冲击吸收能量均高于 150 J。其中 0.055%Nb 略高于 0.075%Nb 的 GMAW 环焊接头热影响区夏比冲击吸收能量; 焊接热输入较低时, 0.055%Nb 低于 0.075%Nb 的 X80 环焊接头粗晶区的韧脆转变温度, 具有更好的低温韧性。焊接热输入较高时, 0.075%Nb 的 X80 环焊接头粗晶区具有更高的上平台冲击吸收能量, 且上平台温度和韧脆转变温度也更低, 其低温韧性也更优异; 还发现了 X80 环焊接头热影响区的冲击韧性不仅与热输入量和热影响区马氏体-奥氏体组织 (M-A) 的形状、大小、分布有关, 而且还受管体中 Nb 含量、原始的强度与韧性、微观组织状态的遗传影响。

创新点: (1) 探究了不同 Nb 含量 X80 钢管 GMAW 环焊接头热影响区的韧性分布。

(2) 在不同热输入下, 对比分析了不同 Nb 含量 X80 钢管环焊接头热影响区的韧脆转变行为。

(3) 分析了两种不同 Nb 含量 X80 管体的强度、韧性和微观组织状态对热影响区韧性的遗传影响。

关键词: 含铌 X80 钢管; 环焊接头; 热影响区; 冲击韧性; M-A 组织

中图分类号: TG 457.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230405001

0 序言

铌微合金化高强度钢应用历史已达 70 多年^[1]。特别是在 20 世纪 80 年代早期, 人们加入铌来设计新一代高强度低合金钢^[2], 充分利用铌的固溶和析出行为, 结合热机械轧制工艺, 达到细化晶粒、控制相变和析出强化的效果, 从而获得高强度、高韧性的钢材, 如 X80 管线钢。在随后的焊接过程中, 根据焊接工艺的不同, 含铌管线钢热影响区 (heat-affected zone, HAZ) 经历了一系列的奥氏体形成和分解循环, 尤其是在临界再热影响区 (inter-critically reheated HAZ, ICHAZ) 奥氏体的部分形成和分解导致了微观组织的复杂性。因此, X80 管线钢热影响区的微观组织演化受基体中 Nb 含量的强烈影响^[3]。

焊接热影响区的微观组织和韧性是影响高钢

级的油气管道完整性的重要因素。虽然 X80 高强度管线钢具有良好的抗延性断裂能力, 但焊接过程中形成的热影响区, 尤其是粗晶区 (coarse-grained heat-affected zone, CGHAZ), 其微观组织分布不均匀, 且具有高的局部化特征, 使得该区域力学性能变差, 容易形成诱发裂纹的局部脆性区, 是整个焊接结构的薄弱地带。参考文献 [4] 研究认为, 对于含 Nb 量为 0.1% 的 X80 管线钢, 虽然热影响区原始奥氏体晶粒的平均尺寸不会随热输入增加而过于粗大, 但当热输入高于 40 kJ/cm 时, 会使得原始奥氏体晶粒内粒状贝氏体的晶体取向选择过于单一, 大角晶界 (大于 15°) 密度会明显降低, 有效晶粒尺寸较大, 马氏体-奥氏体组元 (M-A) 也由于热输入量过大而明显粗化, 从而导致热影响区粗晶区韧性明显降低。Teixeira 等人^[5] 研究了高强钢热影响区的组织梯度对焊接接头不稳定断裂行为的影响, 认为粗晶区微观组织基本由粗贝氏体组成, 并在大的原始奥氏体晶粒的晶界处有少量马氏体和

先共析铁素体. 随着预制疲劳裂纹前缘侵入 CGHAZ, 其韧性明显下降. 文献 [6] 通过试验和 3D 有限元模拟, 研究了焊接热模拟 X80 管线钢在不同温度下的断裂韧度, 认为随着温度降低断裂韧性减小, 并使钢材由韧性断裂向脆性断裂转变, 不同温度下测得的裂纹尖端张开位移值均具有一定的分散性, 且分散程度随温度升高而增大. 袁军军等人^[7] 认为冲击试样的取样位置、缺口尖端组织状态和缺陷等因素对 X70 管线钢药芯焊丝多层多道焊接头冲击性能的稳定性有一定影响, 且试样缺口处柱状晶所占比例和粗大晶粒是导致冲击韧性出现波动和低值的主要原因. 管线钢热影响区微观组织及其性能还受焊接热输入量、其它合金元素和碳当量的影响. Mohammadjoo 等人^[8] 研究发现, X70 管线钢热影响区软化程度随着 Mo, Mn, Ti, N 和碳当量的增加逐渐减小, 但合金的添加对 HAZ 韧性产生了不利影响, 尤其是对填充焊和盖面焊热影响区的影响. 文献 [9] 采用热模拟试样研究了铌微合金钢焊接热影响粗晶区的微观组织组成, 主要相为含有大量 M-A 的粒状贝氏体, 并利用原子探针断层扫描技术, 研究了铌在原始奥氏体晶界 (prior austenite grain boundary, PAGB)、铁素体/M-A 界面和铁素体晶界的分布, 结果表明, Nb 在铁素体/M-A 界面处富集最明显, Nb 偏析降低了 PAGB 的吉布斯能. 原始奥氏体晶界处 Nb 的强偏析可以有效地防止高温时奥氏体晶粒的生长, 而铁素体/

M-A 界面处 Nb 偏析可以抑制冷却时贝氏体、铁素体的生长, 进一步解释了焊接后含 Nb 微合金钢中贝氏体组织较细的原因, Nb 原子与空位的结合能预测结果也表明焊接热循环对 Nb 的偏析是非平衡机制所致.

采用熔化极气体保护焊与手工焊条电弧焊的实焊方法, 进行夏比冲击试验, 且利用高温激光共聚焦显微镜观察微观组织结构, 研究不同 Nb 含量 X80 钢管在低热输入和较高热输入下环焊缝 HAZ 的微观组织与性能, 为高强度管线钢的成分优化设计与焊接工艺选择提供了试验依据.

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料选用了含铌量为 0.055% 和 0.075% 的 X80 直缝埋弧焊钢管, 钢管直径为 1 219 mm, 壁厚为 22 mm. 两种铌含量钢管分别标记为 N055 和 N075, 具体化学成分和焊接冷裂纹敏感系数 (CE_{Pcm}) 见表 1. N055 和 N075 管体纵向的拉伸屈服强度分别为 567 MPa 和 565 MPa, 抗拉强度分别为 645 MPa 和 689 MPa, 断后伸长率分别为 21% 和 25%, N055 和 N075 管体纵向平均冲击吸收能量在 0 °C 时分别为 401 J 和 375 J, 在 -20 °C 时分别为 391 J 和 340 J.

表 1 试验钢管的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of steel pipes

编号	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	V	Ti	Cu	B	Al	N	Fe	CE_{Pcm}
N055	0.049	1.74	0.15	0.010	0.0025	0.25	0.093	0.16	0.058	0.0043	0.011	0.022	0.0003	0.027	0.0031	余量	0.165
N075	0.051	1.72	0.16	0.013	0.0026	0.26	0.088	0.16	0.082	0.0045	0.012	0.026	0.0003	0.025	0.0033	余量	0.167

1.2 环焊缝焊接与试验方法

由于实际的环焊接头熔合区的形状极不规则, 对熔合线处的夏比冲击离散性影响较大. 因此, 为了更准确的研究在熔化极气体保护自动焊 (Auto-GMAW) 和 SMAW 两种典型热输入下, 不同 Nb 含量 X80 环焊接头热影响区的韧性, 参照 API RECOMMENDED PRACTICE 2Z 《海上结构用钢板预生产评定推荐作法》标准, 采用如图 1 所示的单侧 V 形坡口. GMAW 环焊采用直径为 1.0 mm 的 ER80S-G(BOHLER SG 8-P) 的实心焊丝; SMAW 采

用直径为 3.2 mm 的 E9018-G 焊条进行根焊, 填充和盖面焊采用直径为 4.0 mm 的 E11018-G 焊条. GMAW 和 SMAW 的焊接工艺参数分别如表 2 和表 3 所示.

焊接完成后, 从环焊接头 3 点钟位置截取试块制备成金相试样, 经 2% 硝酸酒精溶液浸蚀后, 在 OLS 4100 激光共聚焦显微镜下观察直边侧坡口热影响区的微观组织. 并从立焊位置 (环焊缝 2 点钟至 5 点钟) 截取试块, 在壁厚中心制备 V 形缺口夏比冲击试样, 以保证试样位于填充焊道热影响区.

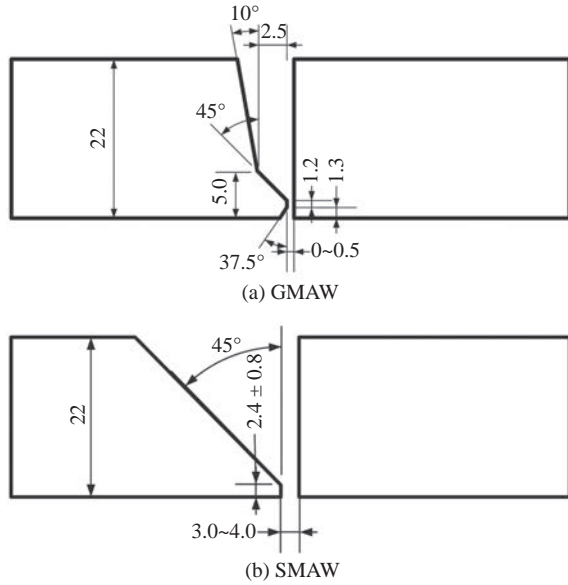


图 1 单侧 V 形坡口示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of single side V-groove. (a) GMAW; (b) SMAW

冲击试样尺寸为 55 mm × 10 mm × 10 mm, V 形缺口轴向位于直边侧 HAZ 不同位置处. FL_{0.5}, FL_{1.0} 和 FL_{2.0} (FL 为缺口位置位于 50%WM + 50%HAZ,) 分别代表缺口轴线距 FL 处 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm. 图 2 为缺口位于 FL_{0.5} 的示意图. 并利用 PSW750 型冲击试验机, 依据 GB/T 229-2020 《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行夏比冲击试验. 由于 Boltzmann 函数具有 S 形曲线形状, 与金属材料冲击吸收能量-温度关系曲线的形状非常吻合, 满足下平台区、转变温度区和上平台区 3 阶段分布特征, 物理意义明确、相关性高, 是较为认可的数学模型^[10-12]. 因此, 采用 Boltzmann 函数模型对系列冲击试验测试数据进行拟合, 获得热影响区的韧脆转变温度 (ductile-brittle transition temperature, DBTT).

表 2 单侧双 V 形坡口 GMAW 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters of single side double V-groove GMAW girth welding

焊接层	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	送丝速度 $v_f(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接速度 $v_w(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	保护气体		平均热输入 $\bar{Q}/(\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1})$
					混合比例(Ar : CO ₂)	流量Q/(L·min ⁻¹)	
根焊	150 ~ 200	22 ~ 26	8.13 ~ 9.65	460 ~ 660	4:1	20 ~ 25	0.48
热焊	180 ~ 240	24 ~ 27	11.43 ~ 12.92	560 ~ 760	4:1	30 ~ 35	0.52
填充焊	160 ~ 220	24 ~ 26	8.13 ~ 10.92	330 ~ 460	4:1	25 ~ 35	0.75
盖面焊	150 ~ 200	22 ~ 26	7.62 ~ 9.14	330 ~ 460	4:1	20 ~ 30	0.65

表 3 单侧 V 形坡口 SMAW 焊接工艺参数

Table 3 Welding process parameters of single side V-groove SMAW girth welding

焊接层数	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v_w(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	平均热输入 $\bar{Q}/(\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1})$
根焊	130 ~ 150	24 ~ 27	90 ~ 100	2.10
热焊	130 ~ 150	24 ~ 27	100 ~ 120	1.91
填充焊	170 ~ 210	24 ~ 27	90 ~ 120	2.84
盖面焊	170 ~ 200	24 ~ 27	90 ~ 120	2.70

为了进一步研究管体母材的性能和原始微观组织状态对环焊接头热影响区微观组织和韧性的影响, 采用显微硬度试验测试了 GMAW 环焊接头的硬度云图分布, 并借助扫描电镜观察了 N055 和 N075 管体的微观组织. 同时, 采用高温激光共聚焦显微镜观察在相同的条件下 N055 和 N075 分别加热至 1 350 °C 保温 1 s, 冷却至 150 °C 后, 二次加热

至 780 °C 保温 1 s, 再冷却至 200 °C, 以此模拟 X80 管道环焊接头粗晶区进行二次热循环的微观组织转变过程, 进一步对比不同 Nb 含量对 X80 环

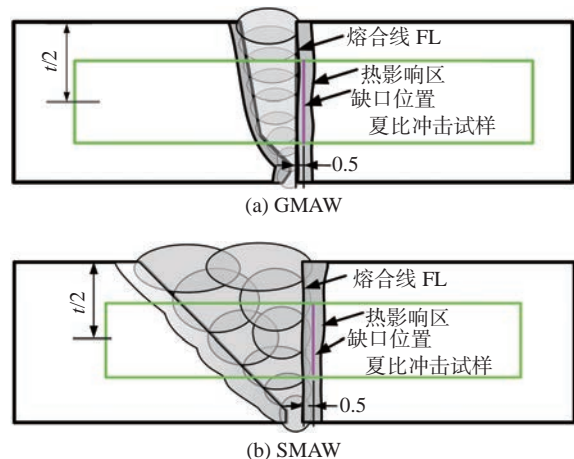


图 2 冲击试样缺口位于 FL_{0.5} 处的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of notched position at FL_{0.5} of impact sample. (a) GMAW; (b) SMAW

焊热影响区组织转变的影响。

2 试验结果与分析

2.1 不同热输入量的热影响区冲击韧性

图 3 为 N055 和 N075 钢管 GMAW 环焊接头热影响区不同位置的夏比冲击吸收能量与管体纵向夏比冲击吸收能量的对比。从图 3 中可以看出, N075 和 N055 热影响区均具有较高的冲击韧性, 其平均值高于 150 J。N055 与 N075 环焊接头热影响区相比, 采用较低热输入的环焊工艺时, N055 焊接接头热影响区 FL, FL_{0.5}, FL_{1.0} 和 FL_{2.0} 在 0 °C 和 -20 °C 时夏比冲击吸收能量均略高于 N075。

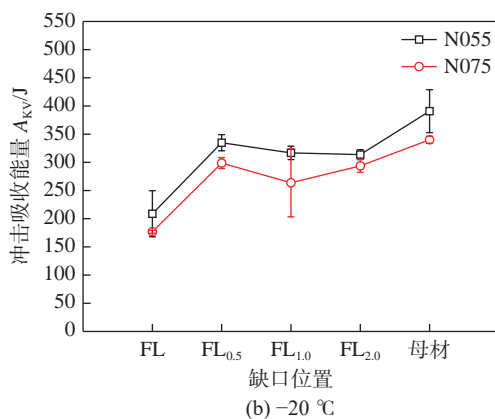
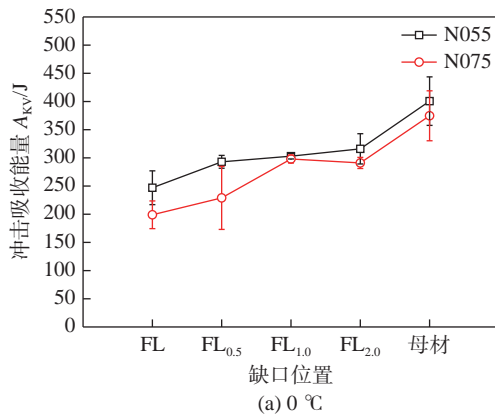


图 3 GMAW 环焊热影响区不同位置的夏比冲击吸收能量
Fig. 3 Charpy impact absorbed energy at different positions in the heat-affected zone of GMAW girth welding. (a) 0 °C; (b) -20 °C

图 4 为不同 Nb 含量 X80 单边 V 形坡口 GMAW 和 SMAW 环焊接头粗晶区的韧脆转变曲线。图 4(a) 表明, 低热输入焊接时, N055 和 N075 在粗晶区 FL_{0.5} 处韧脆转变的上平台温度分别达到 -80 °C 和 -60 °C, 且二者的上平台吸收能量相当, 均约为 300 J。经 Boltzmann 函数拟合计算, N055 的韧

脆转变温度约为 -104 °C, N075 的韧脆转变温度为 -85 °C。因此, 采用低热输入的 GMAW 环焊时, N055 和 N075 均具有优良的低温韧性。

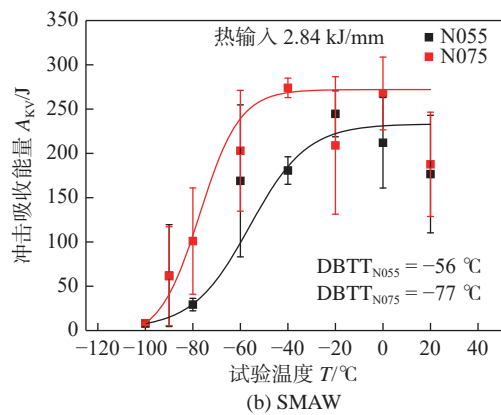
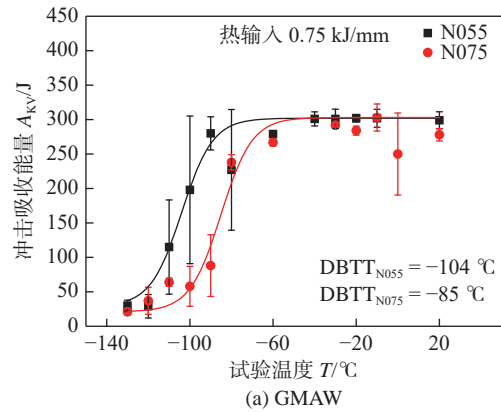


图 4 环焊接头粗晶区的韧脆转变曲线

Fig. 4 Ductile-brittle transition curve of CGHAZ of girth welded joint. (a) GMAW; (b) SMAW

图 4(b) 为 N055 和 N075 采用较高热输入的 SMAW 环焊接头 FL_{0.5} 处的韧脆转变曲线。由图 4 可知, 在较高热输入下, N055 和 N075 在粗晶区 FL_{0.5} 处韧脆转变的上平台温度分别达到 -30 °C 和 -50 °C, 且 N075 的上平台能约为 275 J, 而 N055 的上平台能约为 230 J。同时, 从图 4 可以看出, N055 和 N075 较高热输入的 SMAW 环焊接头粗晶区的韧脆转变温度分别为 -56 °C 和 -77 °C。因此, 较大热输入环焊时, 与 N055 相比, N075 具有更高上平台冲击吸收能量和更低的上平台温度, 其低温韧性更优异。

2.2 微观组织

焊接接头粗晶区的微观组织分布不均匀, 且在临界二次加热粗晶区 (intercritically reheated coarse grained HAZ, ICCGHAZ) 存在链状分布的 M-A 组元, 因其具有高的局部化特征被认为是韧性变差的主要原因^[13-14]。图 5 和图 6 分别为不同铌含量

X80在较低热输入的GMAW和较高热输入的SMAW焊接下粗晶区的微观组织. 结果表明,在较低热输入和较高热输入下,N055和N075粗晶区的组织均以粒状贝氏体(B_L)为主. 在较低热输入GMAW环焊时,N055和N075临界二次加热粗晶区的原始奥氏体晶界上分布有M-A链状组织,但是N075的IC CGHAZ内晶粒相对较小且更为均匀,M-A组织占比更高. 当采用热输入较高的SMAW环焊时,粗晶区晶界分布的M-A链状组织逐渐细化或消失,但N075粗晶区比N055粗晶态的晶粒尺寸更均匀细小,促进了M-A弥散分布,因此,N075SMAN粗晶区的韧性好于N055.

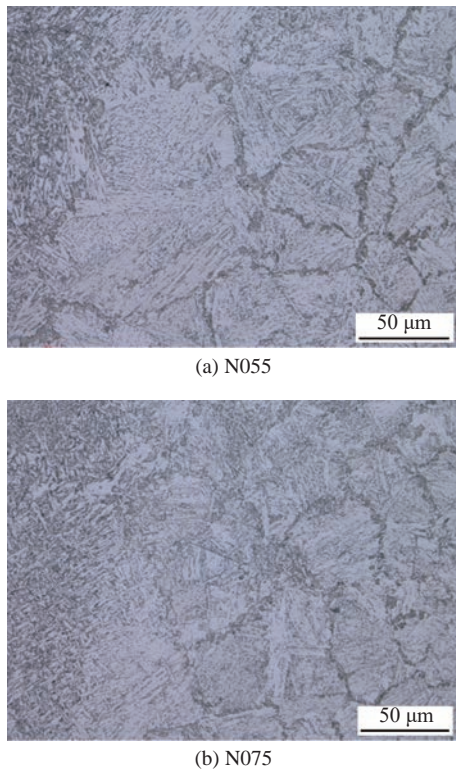


图5 较低热输入的GMAW环焊接头粗晶区微观组织
Fig. 5 Microstructure of CGHAZ of GMAW girth welded joint with lower heat input. (a) N055; (b) N075

2.3 讨论与分析

焊接热影响区粗晶区的韧性恶化或波动影响因素极其复杂. 通常认为,主要受热影响区中粗大的M-A组元、取样位置、缺口尖端组织状态、缺陷、试验温度、合金元素含量和碳当量的影响^[4-8]. 同时,管体母材的强度、韧性和原始组织状态对热影响区韧性也有明显的遗传性影响.

图7为GMAW环焊接头的硬度云图. 从图7中可以看出,N075接头两侧管体硬度高于N055,壁厚中心附近N075热影响区的平均硬度约为205

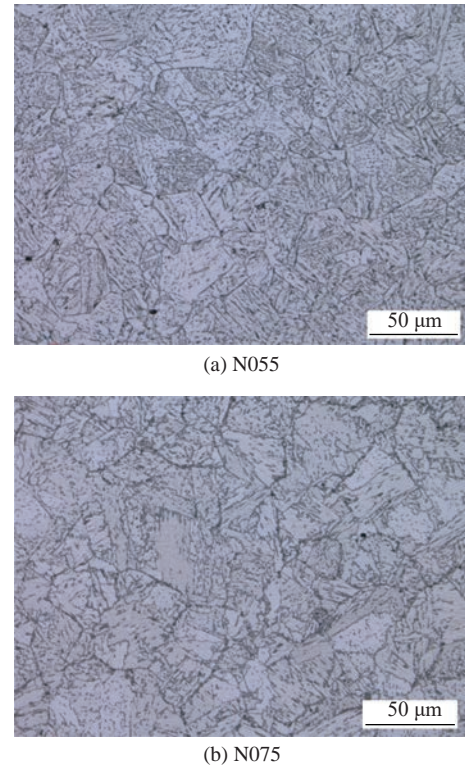


图6 较高热输入的SMAW环焊接头粗晶区微观组织
Fig. 6 Microstructure of CGHAZ of SMAW girth welded joint with higher heat input. (a) N055; (b) N075

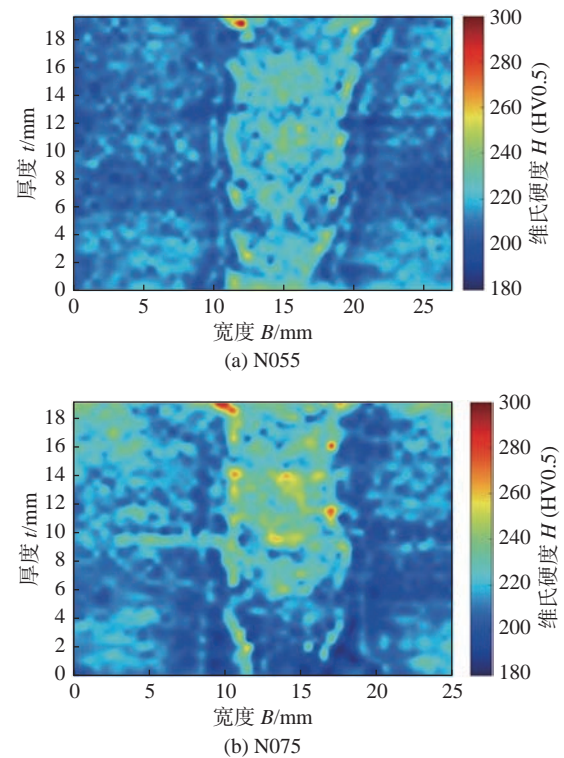
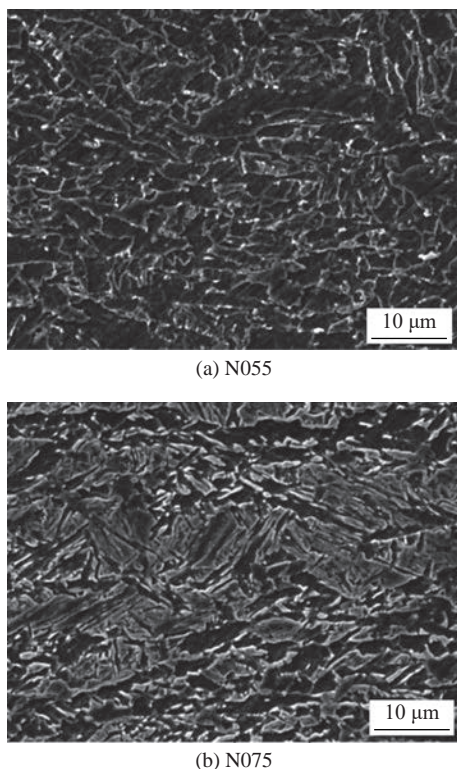


图7 GMAW环焊接头的硬度云图
Fig. 7 Hardness map of GMAW girth welded joint. (a) N055; (b) N075

HV0.5, N055热影响区的平均硬度约为198 HV0.5. 因此,N075热影响区的硬度略高于N055,即表明

N075 热影响的强度也高于 N055. 同时, 上文中图 3 的对比结果表明, N055 管体的纵向冲击韧性高于 N075. 图 8 为扫描电镜下 N055 和 N075 管体壁厚中心的微观组织. 从图 8 可以看出来, 与 N055 相比, N075 管体具有更多的粒状贝氏体组织, 且在晶粒内分布有较多的板条亚结构. 因此, N075 管体纵向强度高于 N055, 而平均冲击韧性低于 N055. 管体原始的微观组织和性能导致 0.055%Nb 含量高于 0.075%Nb 含量的 X80 钢管 GMAW 环焊接头热影响区不同位置的冲击韧性.



(a) N055

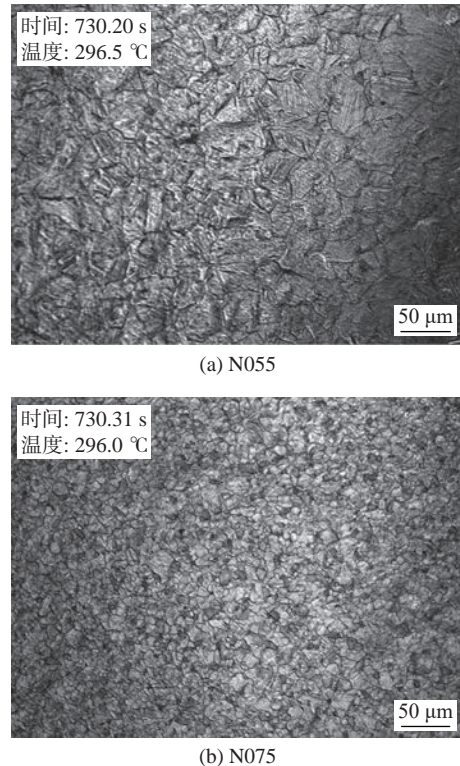
(b) N075

图 8 X80 管体 SEM 微观组织

Fig. 8 SEM microstructure of X80 pipe. (a) N055; (b) N075

CGHAZ 的韧性受贝氏体相变后其晶体学结构影响, 而 ICCGHAZ 则主要受沿原奥氏体晶界形成的链状 M-A 影响. 在试样受冲击过程中, 裂纹在二次热循环产物 M-A 处形成核. 当遇到岛型 M-A 组分时, 裂纹发生偏转, 而当遇到 M-A 型纤细组分时, 则呈直线传播. 裂纹偏转越小, 传播路径消耗的能量越小, 从而降低韧性^[15]. 通过优化母材合金成分 (比如加入 Nb), 细化 CGHAZ 的奥氏体晶粒尺寸, 获得最佳晶体学结构匹配的组织, 有利于改善焊接热影响区的韧性^[16].

图 9 为激光共聚焦观察到 N055 和 N075 二次热循环后的微观组织. 从图 9 可以看出, N075 在二



(a) N055

(b) N075

图 9 X80 二次热循环冷却至约 296 °C 的微观组织

Fig. 9 X80 secondary thermal cycle cooling to about 296 °C microstructure. (a) N055; (b) N075

次热循环后热影响区的晶粒尺寸明显小于 N055. GMAW 环焊时, 由于热输入较低, 热影响区很窄, 而 N075 在 ICCGHAZ 形成的 M-A 较粗, 但其晶粒相对较细. 因此, M-A 所占比例较高, 在管体原始冲击韧性遗传影响下, N075 热影响区的韧性低于 N055. 当较高热输入的 SMAW 环焊时, N075 热影响区的奥氏体晶粒尺寸细化, M-A 也随之细化, M-A 分布趋于不连续或消失, ICCGHAZ 表现出更好的韧性. 因此, 较高热输入的 SMAW 环焊时, 与 N055 相比, N075 粗晶区具有更高的韧脆转变上平台能和更低的韧脆转变温度.

3 结论

(1) 在 0 °C 和 -20 °C 时, 0.075%Nb 和 0.055%Nb 的 X80 钢管 GMAW 环焊接头热影响区均具有较高的冲击韧性, 其平均冲击吸收能量高于 150 J. 但是, 0.055%Nb 略高于 0.075%Nb 的 X80 钢管 GMAW 环焊接头热影响区的夏比冲击吸收能量.

(2) 当采用低热输入焊接时, 0.055%Nb 低于 0.075%Nb 的 X80 环焊接头粗晶区的韧脆转变温度, 具有更好的低温韧性; 当采用较高热输入焊接

时,0.075%Nb的X80环焊热影响区的上平台冲击吸收能量更高,且具有更低的上平台温度和韧脆转变温度,其的低温韧性更优异。

(3) X80环焊接头热影响区的冲击韧性不仅与焊接热输入量和热影响中M-A形状、大小、分布有关,而且还受管体的化学成分、原始的强韧性和微观组织状态的遗传影响。

参考文献

- [1] Morrison W B. Microalloy steels - the beginning[J]. *Materials Science and Technology*, 2009, 25(9): 1066 - 1073.
- [2] Deardo A, Hua M, Cho K, *et al.* On strength of microalloyed steels: an interpretive Review[J]. *Materials Science and Technology*, 2009, 25(9): 1074 - 1082.
- [3] Fateh F, Matthias M. Effect of Nb on austenite formation and decomposition in an X80 linepipe steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2011, 18: 658 - 663.
- [4] 缪成亮,尚成嘉,王学敏,等.高Nb X80管线钢焊接热影响区显微组织与韧性[J].*金属学报*, 2010, 46(5): 541 - 546.
Miao Chengliang, Shang Chengjia, Wang Xuemin, *et al.* Microstructure and toughness of HAZ in X80 pipeline steel with high Nb content[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(5): 541 - 546.
- [5] Teixeira P, Loureiro A, Rodrigues D, *et al.* Effect of the HAZ microstructural gradient on the unstable fracture behaviour of welds in a high strength steel[J]. *Materials Science Forum*, 2006, 514-516(5): 539 - 543.
- [6] 徐杰,卓小敏,李朋朋.温度对X80管线钢韧/脆转变区断裂韧性的影响[J].*工程力学*, 2016, 33(S): 56 - 61.
Xu Jie, Zhuo Xiaomin, Li Pengpeng. Effect of temperature on the fracture toughness of X80 pipeline steel in ductile-to-brittle transition region[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(S): 56 - 61.
- [7] 袁军军,禅志善,曹睿,等.多层多道平焊接头冲击性能不稳定的原因分析[J].*焊接学报*, 2017, 38(5): 100 - 103.
Yuan Junjun, Chan Zhishan, Cao Rui, *et al.* Analysis of impact toughness variation for flat position multi-pass weld joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(5): 100 - 103.
- [8] Mohammadjoo M, Collins L, Rashid M F, *et al.* Influence of steel chemistry and field girth welding procedure on performance of API X70 line pipe steels[C]//International Pipeline Conference. ASME, Virtual, Online, 2020.
- [9] Wang H, Wang J, Tong Z, *et al.* Characterization of Nb interface segregation during welding thermal cycle in microalloyed steel by atom probe tomography[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018(12): 6224 - 6230.
- [10] 赵建平,张秀敏,沈士明.材料韧脆转变温度数据处理方法探讨[J].*石油化工设备*, 2004, 33(4): 29 - 32.
Zhao Jianping, Zhang Xiumin, Shen Shiming. On the method of data processing for ductile-brittle transition temperature[J]. *Petrochemical Equipment*, 2004, 33(4): 29 - 32.
- [11] 周昌玉,夏翔鸣. CrMo 钢材料韧脆转变温度曲线的回归分析[J].*压力容器*, 2003, 20(6): 13 - 18.
Zhou Changyu, Xia Xiangming. Regression analysis of ductile-brittle transition temperature curve for CrMo steel[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2003, 20(6): 13 - 18.
- [12] 周腾飞,关凯书.不同缺口形式小冲杆试样测试3Cr1MoV钢韧脆转变温度的对比[J].*机械工程材料*, 2018, 42(12): 21 - 26.
Zhou Tengfei, Guan Kaishu. Comparison of ductile-brittle transition temperature testing of 3Cr1MoV steel with small punch specimens of different notch forms[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2018, 42(12): 21 - 26.
- [13] 李学达,尚诚嘉,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.* Influence of necklace-type M-A constituent on impact toughness and fracture mechanism in the heat affected zone of X100 pipeline steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(9): 1025 - 1035.
- [14] 李学达,李春雨,曹宁,等.高强管线钢焊接临界再热粗晶区中逆转奥氏体的逆相变晶体学[J].*金属学报*, 2021, 57(8): 967 - 976.
Li Xueda, Li Chunyu, Cao Ning, *et al.* Crystallography of reverted austenite in the intercritically reheated coarse-grained heat-affected zone of high strength pipeline steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(8): 967 - 976.
- [15] Qi Xiaonan, Huan Pengcheng, Wang Xiaonan, *et al.* Effect of root welding heat input on microstructure evolution and fracture mechanism in intercritically reheat-coarse grained heat-affected zone of X80 pipeline steel[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31: 1 - 9.
- [16] 王学林,李学达,尚成嘉.高强度管线钢焊接热影响区显微组织精细表征[J].*焊管*, 2019, 42(7): 27 - 37.
Wang Xuelin, Li Xueda, Shang Chengjia. Fine characterization of high strength pipeline steel welding HAZ microstructure[J]. *Weld Pipe and Tube*, 2019, 42(7): 27 - 37.

第一作者:何小东, 硕士, 正高级工程师/国际焊接工程师; 主要从事管线钢焊接工艺、材料性能测试及表征研究; Email: xiaodonghe@126.com.

(编辑: 王盈盈)

mented carbide near the welding seam, with a maximum axial residual stress of about 1 304 MPa. Adding Cu and Mo interlayers can effectively alleviate residual stress in the joint. When the thickness of the interlayers is less than 0.6 mm, Cu has a better relieving effect on residual stress in the joint. When the thickness of the interlayers is greater than 0.6 mm, Mo has a better relieving effect. When Cu and Mo are used as interlayers, the optimal thickness for relieving residual stress in the joint is around 1.0 mm. The experimental results of residual stress in dissimilar materials brazed joints are basically consistent with the numerical simulation results.

Highlights: (1) The distribution of residual stresses in the joints was analyzed by establishing a residual stress model for cemented carbide/superalloy brazed joints.
(2) The influence of various interlayer materials and thickness on the residual stresses of brazed joints was investigated.

Key words: numerical simulation; residual stress; cemented carbide; superalloy; brazing

Microstructure and toughness of heat-affected zone in girth welding of X80 steel pipe with different Nb content

HE Xiaodong^{1,2}, YANG Yaobin^{1,2}, CHEN Yuefeng^{1,2}, David Han², ZHANG Yongqing^{2,3}(1. State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an, 710077, China; 2. International Welding Technology Center, Xi'an, 710077, China; 3. CITIC Metal Co., Ltd., Beijing, 100004, China). pp 75-81

Abstract: In order to study the effect of Nb content on the microstructure and properties of heat affected zone (HAZ), the 0.055%Nb and 0.075%Nb content X80 steel pipes were girth welded by Gas metal arc welding (GMAW) and shielded metal arc welding (SMAW). Charpy impact test and metallographic analysis were used to study the impact toughness and microstructure differences in the HAZ. The effects of the microstructure of X80 pipe body with different Nb content on the properties of the heat-affected zone were analyzed by scanning electron microscope and confocal laser microscope with high temperature. The results show that at 0 °C and -20 °C, 0.075%Nb and 0.055%Nb X80 steel pipes have high impact toughness in the HAZ of GMAW girth welded joints, and their average impact absorbed energy are higher than 150J. However, the Charpy impact absorbed energy in the HAZ of GMAW girth welded joint of X80 steel pipe with 0.055% Nb is higher than that of X80 steel pipe with 0.075%Nb. When

GMAW is used, the ductile-brittle transition temperature (DBTT) of X80 girth welded joint with 0.055%Nb is lower than that of X80 with 0.075%Nb because of the low welding heat input. When SMAW is used, due to higher heat input, the coarse grain heat affected zone (CGHAZ) of X80 girth welding joint with 0.075%Nb has higher impact absorbed energy on the upper-shelf and lower temperature of upper-shelf zone and DBTT, and its low temperature toughness is better. It is also discussed that the impact toughness of the HAZ of X80 girth welded joint is not only related to the heat input and the shape, size and distribution of M-A, but also genetically influenced by the content of Nb in the pipe body and the original strength, toughness and microstructure state.

Highlights: (1) The toughness distribution of HAZ in GMAW girth welded joint of X80 steel pipe with different Nb content was investigated.
(2) The ductile to brittle transition behavior of HAZ in the girth welded joint under different heat inputs for X80 steel pipes with different Nb content was compared and analyzed.
(3) The genetic effects of strength, toughness and microstructure of X80 steel pipe with different Nb content on toughness of HAZ were analyzed.

Key words: X80 steel pipe containing niobium; girth welded joint; HAZ; impact toughness; M-A

Image processing technology for ship plate melt pool based on MS-FCM algorithm

XU Yuanzhao^{1,2}, LUO Jiutian^{1,2}, FANG Naiwen³, FENG Zhiqiang^{1,2}, WU Pengbo³, LI Quan^{1,2}(1. Guangxi Ship Digital Design and Advanced Manufacturing Engineering Technology Research Center, Beibu Gulf University, Qinzhou, 535011, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Marine Engineering Equipment and Technology, Qinzhou, 535011, China; 3. China National Machinery Engineering Corporation Harbin Welding Research Institute Co., Ltd., Harbin, 150028, China). pp 82-90

Abstract: The image processing and feature extraction technology of molten pool is an important part of intelligent welding quality monitoring for gas metal arc welding (GMAW) on ships. To address the unstable characteristics of large smoke and spatter during GMAW welding of ship hull plates, such as blurred image acquisition and difficult edge extraction, a fuzzy c-means clustering (FCM) based on mean shift (MS) optimization is proposed. The image processing algorithm for In the optimization design of the welding dynamic visual sensing sys-