

Mo、Ni元素对X70钢管FCAW-G环焊接头组织性能及形变影响规律研究*

齐丽华^{1,2}, 胡颖³, 张世杰⁴, 杨耀彬^{1,2}, 陈越峰^{1,2}

(1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 西安 710077; 2. 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; 3. 国家管网集团工程建设本部, 北京 100101; 4. 国家管网集团江苏天然气管道有限责任公司, 南京 224599)

摘要: 针对不同成分合金元素对X70管线钢管和环焊缝的组织性能影响进行对比, 并运用光学显微镜、力学性能测试、硬度云图、CTOD和DIC试验等方法从组织和性能方面综合进行分析。结果显示, Mo、Ni微合金元素不仅有利于提高管体的拉伸性能, 显著细化晶粒, 且在较高的环焊热输入下, 含Mo、Ni微合金元素热影响区的冲击性能明显提高, 未发生软化现象。在拉伸形变过程中, 在无Mo、Ni微合金元素一侧的软化区域发生形变、颈缩导致失效。综合结果表明, 适当增加Mo、Ni微合金元素有利于提高管体和环焊热影响区的综合性能, 保证高钢级管道建设的安全施工和运营。

关键词: 微合金元素; CTOD; 力学性能; 硬度云图; DIC试验

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.02.001

Effect of Mo and Ni on Microstructure Properties and Deformation of X70 Pipe FCAW-G Girth Weld

QI Lihua^{1,2}, HU Ying³, ZHANG Shijie⁴, YANG Yaobin^{1,2}, CHEN Yuefeng^{1,2}

(1. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China; 2. State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, Xi'an 710077, China; 3. PetroChina Engineering Construction Department, Beijing 100101, China; 4. PetroChina Jiangsu Natural Gas Pipeline Company, Nanjing 224599, China)

Abstract: The effects of different alloying elements on the microstructure and properties of X70 pipeline steel pipe body and girth weld were compared and analyzed, and the microstructure and properties were comprehensively analyzed by optical microscope, mechanical property test, hardness nephogram, CTOD and DIC test. It was found that Mo and Ni micro alloy elements are not only conducive to improve the tensile properties of the pipe body, but also significantly refining the grain size, and under higher girth welding heat input, the impact properties of the heat-affected zone of Ni microalloy elements are significantly improved without softening. In the process of tensile deformation, deformation and necking occur in the softening zone on the side without Mo and Ni microalloy elements, leading to failure. The comprehensive results show that proper addition of Mo and Ni microalloy elements is beneficial to improve the comprehensive performance of pipe body and heat affected zone of girth welding, and ensure the safe construction and operation of high grade steel pipeline construction.

Key words: micro-alloying elements; CTOD; mechanical properties; hardness mapping; DIC test

截至2021年底, 我国大陆油气管道总里程达到了 15.0×10^4 km, 其中, 天然气管道约为 8.9×10^4 km, 原油管道约为 3.1×10^4 km, 成品油管道约为 3.0×10^4 km^[1-2]。近20年来, 随着天然气

*基金项目: 江苏滨海LNG配套输气管线滨海—盱眙项目“微合金元素对X70直缝埋弧焊钢管焊接工艺影响研究”(项目编号JSGD-JS-FW-2021-052); 国家管网科研课题“管道施工装备及焊接材料性能提升研究专题—国产焊接材料性能提升研究”(项目编号PNPCM-GCGL-GSGG-FWJF-2022-191)。

消费量的加速递增以及我国管道建设的高速发展, 油气输送管线用钢的强度等级和管径逐渐增大, 管道输送压力逐渐提高, 对管道现场焊接技术提出了新的挑战^[3-5]。近期, 管道工程建设中对钢管的微合金元素提出新的要求, 但 Nb、Ni、Mo 微合金元素对高钢级钢管的管体和环焊接头组织性能影响尚缺乏系统研究, 尤其是同种轧制工艺和制管工艺下, 其他合金成分一致时, Nb、Ni、Mo 等微合金元素的综合影响尚未见报道^[6-12]。鉴于此, 为明确 Nb、Ni、Mo 微合金元素对 X70 直缝埋弧焊钢管和环焊性能的影响, 特开

展此项研究工作, 以期提高管体性能和环焊性能, 提高环焊缝的安全系数, 保障管道安全运营。

1 化学成分

试验用两种合金成分钢管均为同一钢厂和管厂生产, 分别为 X70 钢级 $\Phi 914 \text{ mm} \times 19.1 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管 (含 Nb、Ni、Mo) 和 X70 钢级 $\Phi 914 \text{ mm} \times 18.9 \text{ mm}$ 直缝埋弧焊管 (含 Nb, 无 Mo、Ni)。试验钢管的化学成分见表 1。

表 1 X70 钢管母材的化学成分

试样编号	化学成分/%													
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)	w(Ni)	w(Nb)	w(V)	w(Ti)	w(Cu)	w(B)	w(Al)
BC009 (无 Mo、Ni)	0.061	0.23	1.71	0.009 3	0.002 7	0.24	<0.000 9	0.007 9	0.041	0.005 1	0.016	0.009 4	0.000 4	0.034
BH140 (含 Mo、Ni)	0.055	0.23	1.64	0.008 4	0.002 4	0.14	0.11	0.13	0.048	0.003 9	0.012	0.016	0.000 3	0.026

2 管体性能和微观组织

图 1 所示为圆棒试样横向和纵向拉伸应力-应变曲线。由图 1 可见, 管体横向拉伸的应力-应变曲线带有屈服平台, 含 Mo、Ni 横向圆棒试样的屈服强度和抗拉强度均高于不含 Mo、Ni 横向圆棒试样, 屈服强度高出大约 30~40 MPa, 抗拉强度高出大约 20~30 MPa。管体纵向圆棒拉伸应力-应变曲线, 含 Mo、Ni 元素的为典型的 round-house 曲线, 无明显的屈服平台, 不含 Mo、Ni 元素的拉伸曲线有一定的屈服平台, 且含 Mo、Ni 管体的纵向圆棒试样的屈服强度和抗拉强度均高于不含 Mo、Ni 的

纵向圆棒试样。图 2 所示为不同合金成分的管体纵向 (BM-Z)、横向 (BM-H)、焊缝 (CM-WM) 和热影响区 (CM-FL) 的冲击性能统计结果, 由图 2 可知, 两种试样在管体横向和焊缝热影响区的冲击性能比较接近。其中含 Mo、Ni 元素管体横向、焊缝和热影响区的冲击性能略高于不含 Mo、Ni 的钢管; 管体纵向冲击性能平均值略低于横向平均值。管体的纵向韧性通常与轧制钢板温控差异性有关, 而在同种轧制工艺下, 横向冲击性能差异多与材料的合金成分有关。但是含 Mo、Ni 试样焊缝的冲击功远大于不含 Mo、Ni 的试样, 平均值高约 100 J。

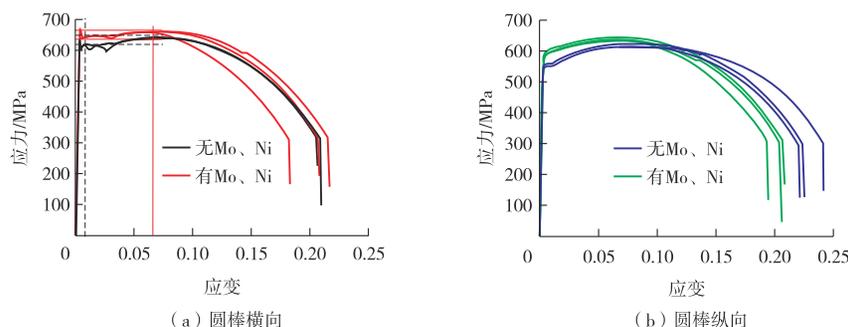


图 1 圆棒试样横向和纵向拉伸应力-应变曲线

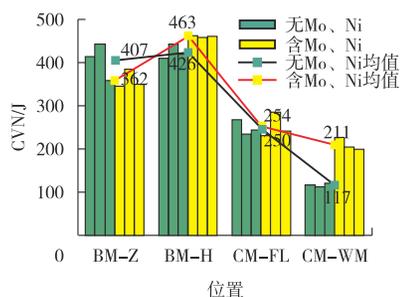


图2 不同合金成分钢管冲击性能统计结果

图3为不同合金成分管材横向和纵向金相组织照片。含Mo、Ni元素管材的横向和纵向组织均存在晶粒的不均匀性,而无Mo、Ni元素管材的横向和纵向晶粒组织均匀。这两种板材均为同一钢厂使

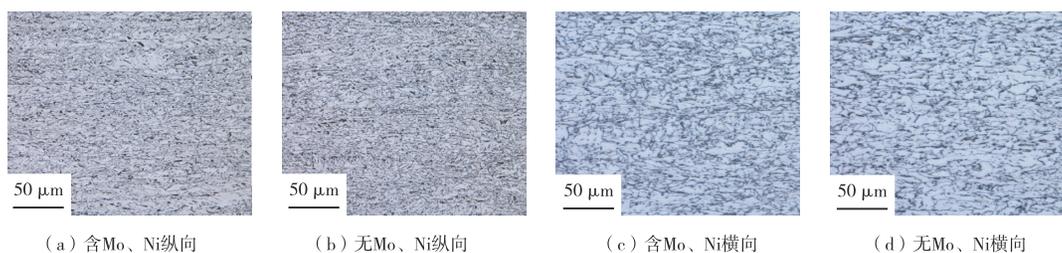


图3 不同合金成分管材横向和纵向显微组织

3 环焊接头组织分析

采用气保药芯焊丝自动焊(FCAW-G)对两种合金钢管施焊,对环焊接头进行组织性能分析。图4为不同合金成分焊接接头熔合线附近粗晶区和细晶区的显微组织。FCAW-G的热输入较高,为1.0~2.0 kJ/mm,含Mo、Ni元素管道环焊接头,熔合线粗晶区晶粒尺寸为30~50 μm,细晶区的晶粒尺寸为3~5 μm,且在整个金相视野内细小均匀。

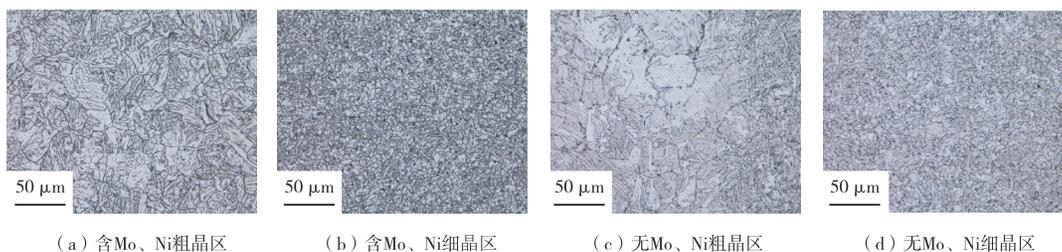


图4 不同合金成分环焊接头熔合线附近粗晶区和细晶区的显微组织

4 环焊接头的力学性能

图5(a)为两种合金成分在环焊工艺条件下

用同一轧制工艺生产,可推断其粗轧时的终轧温度偏低,这更适应于无Mo、Ni的材料。0.11%Mo和0.13%Ni的增加,使得Mo元素的作用大于Ni元素,降低了C在奥氏体中的扩散速度,使得奥氏体的形成减缓,导致 A_{C3} 略有升高,使含Mo、Ni的板材最后道次在双相区轧制,因此两种合金成分母材宏观晶粒表征存在差异。无Mo、Ni元素管材的横向晶粒尺寸约为20~30 μm,纵向晶粒细小约为5~10 μm;含Mo、Ni材料的横向晶粒尺寸约为5~30 μm,纵向也约为5~30 μm。因此,含Mo、Ni元素管材的横向冲击性能高于无Mo、Ni管材,而纵向冲击性能的均值较无Mo、Ni管材略有降低。

无Mo、Ni元素管道环焊接头熔合线附近的晶粒大小差异性很大,粗晶区的晶粒尺寸为30~100 μm,晶粒尺寸以50 μm以上居多,且粗晶区的晶粒边界处有链状的M-A组织,宏观表现为其熔合区附近的韧性离散度增加,相对应地细晶区的晶粒尺寸差异性较含Mo、Ni元素的管道大很多,细小尺寸与前者一致为3~5 μm,较大晶粒约20 μm,且分布在细晶粒之间,降低了材料的韧性,说明Mo、Ni元素有利于提高淬透性,细化晶粒。

焊接接头不同位置的冲击性能和标准偏差,试验温度为-10℃。焊缝中心、熔合线附近的冲击性能从焊缝中心到接近母材方向逐渐升高,且环焊

接头各部位的冲击韧性均较高。无 Mo、Ni 管材环焊接头的冲击韧性为 166~318 J，含有 Mo、Ni 元素管材环焊接头的冲击韧性为 168~288 J，均有很好的冲击性能，远远满足单值 38 J、均值 50 J 的标准要求。FL+2 mm 细晶区附近的冲击韧性与管体母材的冲击韧性相近，无 Mo、Ni 元素焊接接头细晶区的冲击性能略高于含 Mo、Ni 元素焊接接头。而 FL-2 mm、FL-1 mm 和 FL+1 mm 处的冲击性能是受焊缝中心和熔合线两侧的冲

击性能影响，其离散程度较大。

图 5 (b) 为两种合金成分 FCAW-G 工艺条件下的裂纹尖端张开位移 (CTOD) 在环焊接头不同位置的分布趋势。含 Mo、Ni 元素焊接接头 CTOD 略高于无 Mo、Ni 元素焊接接头，且在 FL+1 mm 处两者的 CTOD 值相近。由图 1 可知，无 Mo、Ni 元素管体的韧性高于含 Mo、Ni 元素，但其 CTOD 受管体韧性影响不大，进一步说明了 Mo、Ni 元素有利于提高环焊接头熔合线附近的冲击性能。

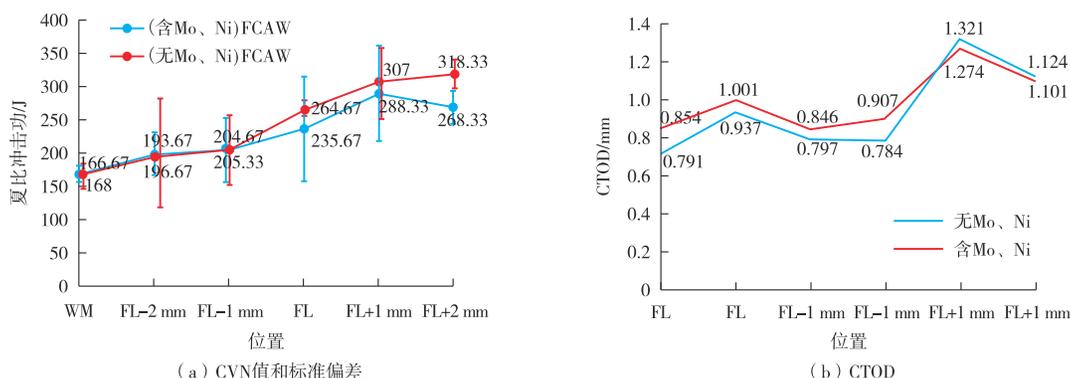


图 5 不同合金成分环焊接头不同位置的夏比冲击功和 CTOD 分布特征

图 6 为两种合金成分管材在 FCAW-G 工艺条件下环焊接头的硬度云图。从图 6 可知，环焊接头细晶区靠近 19.1 mm 一侧 (含 Mo、Ni) 硬度为 175HV_{0.5}~220HV_{0.5}，无软化现象，细晶区靠近

18.9 mm 一侧 (无 Mo、Ni) 出现明显的软化现象，硬度为 160HV_{0.5}~190HV_{0.5}。焊缝中心层道间的硬度呈淡蓝色，有局部软化现象，该区域硬度分布均匀，为 195HV_{0.5}~210HV_{0.5}。

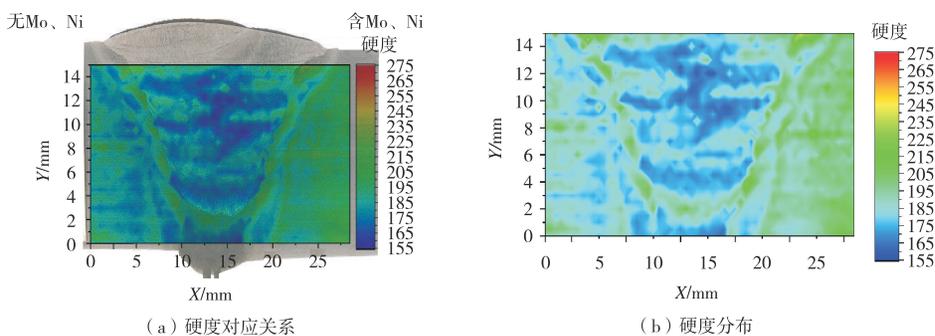


图 6 不同合金成分管材环焊接头的硬度云图

5 环焊接头的形变规律

图 7 所示为 FCAW-G 环焊工艺下同一环焊缝两侧母材 DIC 试验过程的应力-应变云图。DIC 试样标记的点位中，1 和 5 分别位于无 Mo、Ni 合金和含 Mo、Ni 合金的管体母材上，3 和 4 分别位于靠近两侧的环焊缝熔合线，2 位于环焊缝中心。

由应变图可知，随着时间的推移，含 Mo、Ni 管体母材一侧基本没有发生应变，1~4 位置在应变初始阶段随时间变化趋势一致，当应变达到 9% 左右，无 Mo、Ni 合金管材一侧的应变量迅速增加，且快速出现失稳颈缩情况。而与其邻近的焊缝熔合线 4 点位置应变量达到 18% 左右后不再继续增加，焊缝中心 2 点位置的应变量达到 12% 左右也不再增加，3 点位置应变量达到 9% 左右

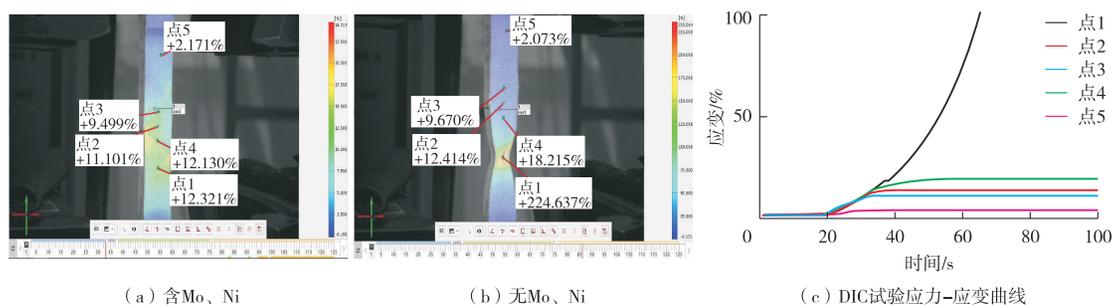


图7 FCAW焊接接头DIC云图和拉伸应变曲线

后即不再增加,另一侧母材5点位置的应变量为2%左右。由管体的拉伸应力-应变曲线可知,含Mo、Ni合金元素的管体拉伸强度略高于无Mo、Ni合金元素管体,整体环焊接头中拉伸强度较低的部位为无Mo、Ni合金元素管体一侧,因此,拉伸过程中首先在无Mo、Ni合金元素管体一侧发生形变失稳。

6 结论

(1) 两种合金成分X70钢管材的力学性能均满足要求,且含Mo、Ni元素有利于提高管体的拉伸强度。

(2) FCAW-G环焊工艺条件下,两种合金成分的环焊接头均获得很好的拉伸强度、冲击韧性,其环焊力学性能均满足DEC文件的相关标准要求,且获得良好的CVN和CTOD值,均能满足0.254的要求。含Mo、Ni元素环焊缝的CTOD值均大于无Mo、Ni元素环焊缝,说明Mo、Ni元素有利于提高环焊熔合线附近的冲击性能。

(3) 含Mo、Ni元素管材环焊缝CGHAZ晶粒尺寸为30~50 μm ,对应的冲击性能离散度增加;无Mo、Ni元素管材环焊缝CGHAZ晶粒尺寸差异性很大,为30~100 μm 。Mo、Ni元素有利于提高淬透性,细化晶粒。

(4) 含Mo、Ni元素管材环焊缝薄壁侧均无软化现象,无Mo、Ni元素管材环焊缝发生显著的软化情况,比母材平均硬度降低约7.4%。

(5) 等强匹配的环焊接头在DIC试验过程中,在无Mo、Ni合金元素管材一侧发生形变和失稳,进一步证明了Mo、Ni合金元素能够提高管材环焊接头热影响区的强度和安全性。

参考文献:

- [1] 高鹏,高振宇,刘广仁.2019年中国油气管道建设新进展[J].国际石油经济,2020,28(3):52-58.
- [2] 华经产业研究院.2021年中国油气管道累计、新增里程情况及行业前景展望[EB/OL].(2022-05-20)[2022-08-31].https://caifuhao.eastmoney.com/news/20220520112449062287420.
- [3] 李为卫,胡美娟,齐丽华,等.高压高强度天然气管道国内外标准对比分析[M].西安:陕西科学技术出版社,2020.
- [4] 武刚,王楠,冯管,等.X70管线钢焊接接头在拉伸过程中的力学响应及性能关系[J].焊管,2020,43(8):7-12.
- [5] 张侠洲,陈延请,王凤会,等.X70管线钢焊接接头调质处理后的低温冲击韧性[J].材料热处理学报,2018,39(6):156-162.
- [6] 孙磊磊,郑磊.X70管线钢焊接粗晶区组织及韧性的热模拟研究[J].上海金属,2017,39(4):10-13.
- [7] 张忠发,朱亮,蔡淑娟.热输入对X70管线钢焊接热影响区组织和韧性的影响[J].电焊机,2015,45(9):29-33.
- [8] 吕向阳,李建军.高强管线钢低温焊接工艺研究[J].焊接技术,2007(S2):16-17.
- [9] 张正延,孙新军,雍岐龙,等.Nb-Mo微合金高强度钢强化机理及其纳米级碳化物析出行为[J].金属学报,2016(4):410-418.
- [10] 张先龙,刘庆忠.X70M管线钢低强匹配焊材工艺研究[J].金属加工(热加工),2016(6):657-662.
- [11] 杨昕.X80管线钢STT+药芯自保护焊接工艺研究[J].电焊机,2008(11):6-8.
- [12] 祝少华,杨军,张万鹏,等.X70管线钢焊接接头断裂韧性分析[J].焊管,2013,36(11):59-62.

作者简介:齐丽华(1973—),女,博士,教授级高工,主要从事高钢级油气管道用钢管和环焊组织性能研究,以及高钢级管道环焊起裂和损伤机理研究。

收稿日期:2022-08-31

修改返回日期:2022-11-23

编辑:罗刚