

超临界二氧化碳输送用HFW焊管开发*

毕宗岳^{1,2}, 黄晓辉^{1,2}, 李银山^{2,3}, 韦 奉^{1,2}, 卿俊杰^{2,3},
王 磊^{1,2}, 范才强^{2,3}, 芦 琳^{1,2}

(1. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 西安 710018; 2. 中国石油宝鸡石油钢管
有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008; 3. 宝鸡宝管石油专用管有限公司, 陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 采用低碳中锰微合金设计、洁净化炼钢和TMCP控轧控冷技术, 设计出了低温性能优异的X60M钢级热轧卷板, 卷板微观组织为细长扁平的多边形铁素体(PF)+少量珠光体(P); 经过优化HFW钢管成型焊接工艺, 开发出X60M钢级超临界二氧化碳输送用 $\Phi 323.9$ mm \times 10 mm HFW钢管, 并对其进行了低温冲击韧性、抗拉强度、硬度检测及压扁试验和静水压爆破试验。结果表明, 该管材具有较高的强塑性和强韧性, 其焊缝强度不低于管体; 在-45℃条件下, 该钢管焊缝冲击功为293~351 J, 热影响区冲击功为219~315 J, 管体冲击功为248~342 J, 所有试样剪切面积100%。当试验温度降到-75℃, 该钢管焊缝、热影响区及母材冲击功平均值均在204~350 J范围内, 剪切面积为85%~100%, 表现出优异的低温韧性。开发管材的以上性能完全满足超临界二氧化碳输送管道设计要求和安全输送服役要求。

关键词: 超临界二氧化碳输送; X60M; HFW钢管; 低温韧性

中图分类号: TG335

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.10.007

Development of HFW Steel Pipe for Supercritical Carbon Dioxide Transportation

BI Zongyue^{1,2}, HUANG Xiaohui^{1,2}, LI Yinshan^{2,3}, WEI Feng^{1,2}, QING Junjie^{2,3},
WANG Lei^{1,2}, FAN Caiqiang^{2,3}, LU Lin^{1,2}

(1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd.,
Xi'an 710018, China; 2. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China;
3. Baoji BSG OCTG Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: Adopting low-carbon medium-manganese microalloy design, clean purification steel making, and TMCP controlled rolling and cooling technology, X60M steel grade hot rolled coil plates with excellent low-temperature performance have been developed. The microstructure of the coil plates is elongated that have flat polygonal ferrite (PF) and a small amount of pearlite (P). After optimizing HFW steel pipe forming and welding process, X60M grade $\Phi 323.9$ mm \times 10 mm HFW steel pipe for supercritical carbon dioxide conveying has been developed. The low temperature impact toughness, tensile strength, hardness, flattening and hydrostatic blasting tests are carried out. The test results show the pipe has high strong plasticity and toughness, and the weld strength is not lower than the pipe body. At -45℃, the impact energy of the steel pipe weld seam is 293~351 J, the impact energy of the heat affected zone is 219~315 J, and the impact energy of the pipe body is 248~342 J. All specimens have a shear area of 100%. When the test temperature drops to -75℃, the average impact energy of the weld seam, heat affected zone, and base metal of the steel pipe is within the range of 204~350 J, and the shear area is 85%~100%, showing excellent low temperature toughness. The performance above can fully meets the design requirements of supercritical carbon dioxide pipeline and the requirements for safe transportation and service.

Key words: supercritical carbon dioxide transportation; X60M; HFW steel pipe; low temperature toughness

*基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技项目“超临界二氧化碳长距离管道关键技术研究”(项目编号 2021ZZ01-02)。

0 前 言

目前,全球已建二氧化碳输送管道数万千米,其中美国约有近8 000 km二氧化碳输送管道,其余二氧化碳输送管道主要分布在加拿大、挪威和土耳其等国家,二氧化碳多为超临界态输送^[1-2]。在压力超过7.38 MPa、温度大于31.1℃时,二氧化碳可以变为超临界状态,由于超临界二氧化碳兼具液体的高密度和气体的低粘度,对于大规模输送来说,超临界态二氧化碳管道输送最为经济,是最优选择^[3-4]。国外已建成的二氧化碳输送管道设计压力普遍为8~20 MPa,中小管径普遍采用性价比高的高频焊(HFW)钢管^[5-6]。而当前国内已建成的极少数二氧化碳管道采用气相输送,尚未采用超临界二氧化碳输送。二氧化碳和天然气主要成分甲烷的物理特性差异较大,因为二氧化碳的减压曲线存在平台,驱动力更强,韧性断裂扩展的敏感性更高,因此使用高韧性的钢管才能达到止裂条件。而且二氧化碳由于相变会发生焦耳汤姆逊冷却效应,在管道失效泄漏或放空时,密度会发生剧烈突变,在强节流效应下形成-78~-30℃低温,并可能有干冰生成,导致输送二氧化碳的钢管母材和焊接接头的设计温度要低于天然气管道,比如美国建造的“Cortez”二氧化碳管道韧性设计温度下降到-30~-25℃^[1,3]。所以,开发的

二氧化碳管道要求具备优异的低温抗脆性启裂能力和抗裂纹延性扩展能力,也就是钢管要求具有较高的低温韧性^[7]。

针对国内CCUS示范工程超临界二氧化碳管道输送,宝鸡石油钢管有限责任公司联合钢厂设计开发出低温性能优异的低碳中锰微合金X60M钢级卷板,采用HFW高频焊工艺成功开发出X60M钢级超临界二氧化碳输送用HFW钢管,各项性能指标均达到较好结果,特别是低温韧性达到目前行业超临界二氧化碳输送管道较高水平,为高质量CCUS超临界二氧化碳输送管道工程建设提供了坚实的管材基础。

1 卷板成分及组织设计

超临界二氧化碳输送用HFW钢管用卷板成分设计主体思路是低碳中锰微合金化,严格控制硫和磷含量,减少卷板成分偏聚和组织偏析,为使HFW焊接过程中焊缝中氧化物易于排出,严格控制 $w(\text{Mn})/w(\text{Si})$ 在5~7范围内,以减少HFW焊缝中高熔点锰-硅-氧夹杂物的形成,添加适量的铌、钒、钛等微合金元素,可细化组织,提高板材的低温韧性和强度,抑制HFW焊接热影响区晶粒粗化^[8-9],此外添加铬、镍等合金元素可提高板材的强度,X60M钢级超临界二氧化碳输送用HFW钢管热轧卷板化学成份见表1,且 $w(\text{Mn})/w(\text{Si})=6.4$ 。

表1 X60M钢级热轧卷板化学成分

%

$w(\text{C})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Al})$	$w(\text{B})$	$w(\text{Ni+Cr})$	$w(\text{Nb+V+Ti})$	CE_{Pcm}
0.05	0.007	0.001	0.10	0.04	0.000 4	0.30	0.1	0.20

在组织设计上,采用全流程洁净化冶炼技术,特别是LF、RH同炉精炼、电磁搅拌和大吨位压下技术,减少夹杂物含量和铸坯偏析,组织为扁平细小的多边形铁素体(PF)+珠光体(P),无明显带状偏析,而均匀细小的微观结构可增加裂纹扩展行程,减小裂纹进一步传播^[10]。X60M板材微观组织如图1所示,晶粒度为10.5级左右,非金属夹杂物评级未超过0.5,组织中超低的S、P含量和较少的夹杂物控制能大幅提高低温韧性,可抑制管道在冲击载荷下的裂纹萌生和裂纹快速扩展,确保管道安全运行。

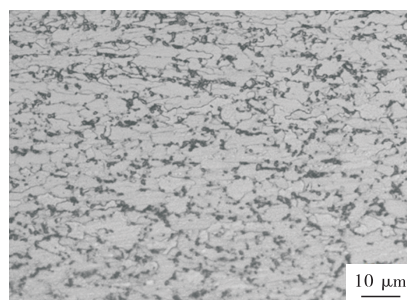


图1 X60M钢级热轧卷板金相组织

2 HFW钢管制造工艺研究

HFW制管工艺主要是将热轧卷板经过辊压

成型后，利用高频电流的邻近效应和集肤效应，将管材待焊接边部快速加热到1 300 ℃左右，在挤压辊挤压力作用下实现焊缝高温连接^[9]。板材边部形状、管材成型工艺、焊接工艺等都会对管材质量和性能造成影响。由于超临界二氧化碳输送管道承压高，为了提高低温管材的性能，需要进一步研究优化管材成型挤压工艺、焊接工艺和热处理工艺，开发出超临界二氧化碳输送用X60M钢级的高性能 $\Phi 323.9\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 直缝HFW钢管。

2.1 成型工艺研究

针对开发的超临界二氧化碳输送用X60M钢级 $\Phi 323.9\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 钢管，钢带边部采用高精度铣削工艺，确保边部整洁，形状一致。钢管成型采用排辊下山成型法，依据管径曲率和实际强度适当增大挤压辊挤压力。焊缝外毛刺形状是成型挤压力量和HFW焊缝质量最直观的反映^[11]。图2

为超临界二氧化碳输送用X60M钢级 $\Phi 323.9\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ HFW钢管不同挤压力下焊缝截面和外毛刺形貌。图2 (a) 中，挤压力为4.5 mm时，挤出金属毛刺整体呈现扁平的圆弧状，压在焊缝金属表面，且毛刺中有较大的空洞和回流夹杂；焊缝及热影响区均较宽，属于典型的挤压力不足，未能彻底挤出焊缝中的氧化物和夹杂。图2 (b) 中挤压力为5.5 mm时，挤出金属毛刺呈蘑菇状覆盖在焊缝金属上部，并和焊缝金属局部熔合，毛刺相对饱满；焊缝及热影响区宽度适宜，此种情况挤压力合适，焊缝质量较好。图2 (c) 中，挤压力为5.75 mm时，焊缝金属毛刺相对较宽，焊缝中心热影响区宽度变小，内外表面热影响区宽度变大，易造成氧化物和夹杂挤出不彻底。所以，在此钢级和规格下，挤压力为5.5 mm时，确保了HFW焊缝金属的洁净度较高。

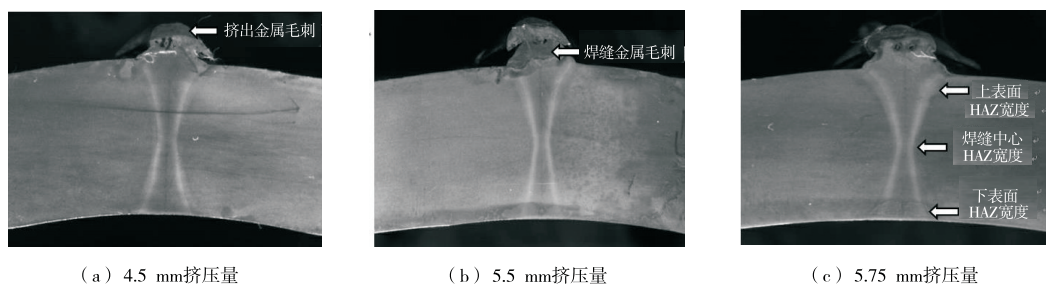


图2 不同挤压力下焊缝及外毛刺形貌

2.2 焊接工艺研究

针对开发的超临界二氧化碳输送用X60M钢级 $\Phi 323.9\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ HFW钢管，为了尽可能减少或消除焊缝处的氧化物夹杂，提高焊缝韧性，通过工艺试验和优化，焊接开口角适当减小，控制在 $3^\circ\sim 5^\circ$ 以便增加挤压力；在相同挤压力下，尽可能提高焊接速度；根据壁厚，焊接频率调整为415~435 kHz。选择三种焊接工艺（见表2），研究焊缝低温韧性变化情况。图3为不同焊接工艺下焊缝冲击功随温度变化情况。可见工艺1对应的焊缝韧性最高，在 -75°C 时，焊缝夏比冲击功仍然达到了200 J。为了进一步提高焊缝韧性，对焊缝进行 930°C 奥氏体化高温热处理，消除焊缝中存在的硬相组织，提高焊缝与母材组织的一致性。图4为工艺1焊缝热处理后焊接接头的组织照片，可见热影响区和焊缝组织均为F+PF+P组织，晶粒度均为10.5级，晶粒细小，组织均

匀，与母材基本一致，焊缝未见明显夹杂物，确保了焊接接头具有优异低温韧性^[6,12]。

表2 超临界二氧化碳HFW焊管焊接工艺研究

焊接工艺	功率/kW	频率/kHz	焊接速度/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)
工艺1	403	425	17
工艺2	408	428	16
工艺3	454	424	18

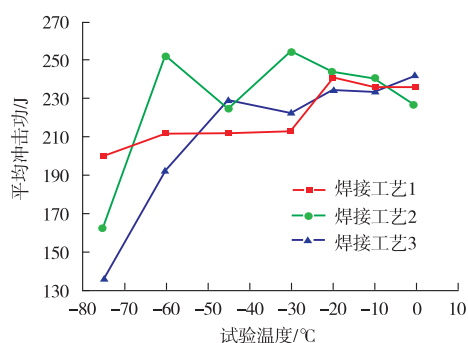
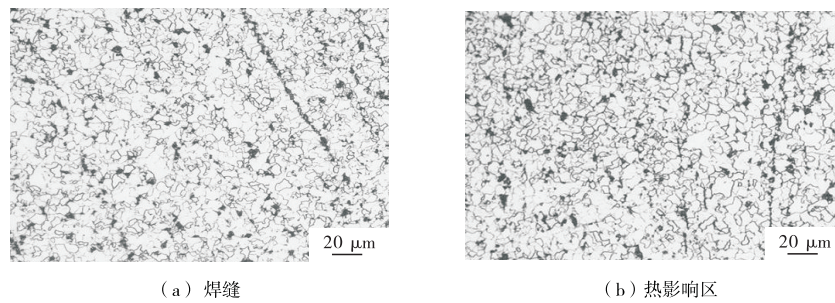


图3 不同焊接工艺焊缝冲击功随温度变化曲线



(a) 焊缝 (b) 热影响区

图4 HFW焊接接头金相组织

3 钢管力学性能

采用德国 16 in 直缝高频电阻焊管 (HFW) 生产线,在上述焊接工艺下,批量试制了超临界二氧化碳输送用 X60M 钢级 $\Phi 323.9$ mm \times 10 mm HFW 钢管。

3.1 低温冲击韧性

采用 ZWICK PSW750J 型示波冲击试验机,对 X60M 钢级 $\Phi 323.9$ mm \times 10 mm 钢管母材、焊缝

和热影响区分别进行系列温度下的夏比冲击试验,结果如图 5 所示。在 $-75\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 系列温度下,母材、焊缝和热影响区都具备较高的冲击韧性,冲击功都大于 204 J;母材、焊缝和热影响区的剪切面积均大于 85%。表 3 为 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下超临界二氧化碳 HFW 钢管不同位置处的夏比冲击韧性及剪切面积,可见, $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,焊缝、热影响区及母材的平均冲击功,均不小于 237 J,具有良好的低温韧性。

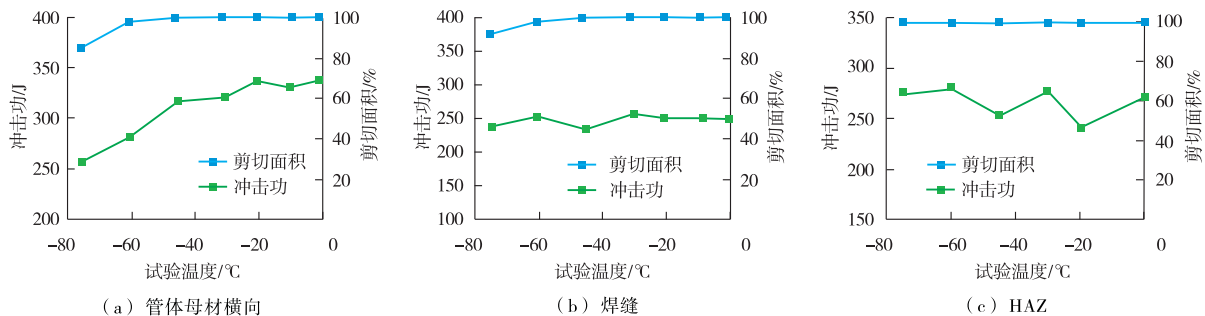


图5 超临界二氧化碳输送用 HFW 钢管系列温度韧脆转变曲线

表3 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下超临界二氧化碳输送用 HFW 钢管冲击试验结果

取样位置	冲击功/J		剪切面积/%	
	单值	均值	单值	均值
焊缝中心	293 ~ 351	319	100 ~ 100	100
热影响区	219 ~ 315	307	100 ~ 100	100
管体横向	248 ~ 342	292	100 ~ 100	100

3.2 拉伸强度

采用 ZWICK Z1200KN 型万能材料试验机进行拉伸试验,结果见表 4。母材抗拉强度为 580~620 MPa,焊缝抗拉强度为 570~620 MPa,焊缝与母材抗拉强度基本一致,均高于 X60 钢级要求的最低值 (520 MPa)。同时,屈强比 ≤ 0.89 ,完全符合标准要求,且强度具有一定余量,能确保钢管服役更加安全^[13]。

表4 超临界二氧化碳输送用 HFW 钢管母材纵向、焊缝拉伸试验结果

试样	母材 $R_{0.5}$ /MPa	母材 R_m /MPa	屈强比/%	母材 A /%	焊缝 R_m /MPa
X60M	460~545	580~620	0.75~0.89	31~38	570~620
API 要求	415~565	520~760	≤ 0.93	≥ 23	≥ 520

3.3 硬度检测

图 6 为超临界二氧化碳输送用 X60M 钢级

$\Phi 323.9$ mm \times 10 mm HFW 钢管焊接接头硬度分布图,焊缝、母材、热影响区硬度分布较均匀,

均低于 220HV_{10} ，管体母材最高硬度 213HV_{10} ，焊缝最高硬度 207HV_{10} ，焊接接头平均硬度仅 193HV_{10} 。较低的硬度值利于避免管道应力腐蚀的发生^[14-15]。

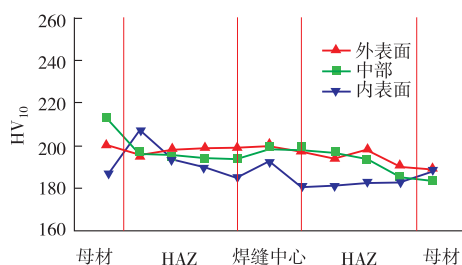
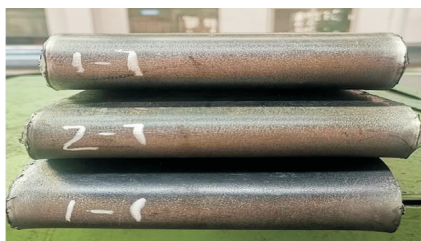


图6 超临界二氧化碳输送用HFW钢管焊接接头硬度分布



(a) 焊缝位于12点位置



(b) 焊缝位于3点位置

图7 HFW钢管压扁试验后形貌

表5 超临界二氧化碳输送用HFW钢管压扁试验结果

取样位置	压扁状态	
	平板间距/mm	试验结果
焊缝位于0°	107(0.33D)	焊缝和管体均未裂
	0	焊缝和管体均未裂
焊缝位于90°	161(0.50D)	焊缝和管体均未裂
	0	焊缝和管体均未裂
API SPEC 5L要求	间距 $\geq 0.50D$, 焊缝不应出现裂纹; 间距 $\geq 0.33D$, 管体不应出现裂纹	

3.5 静水压爆破试验

为了进一步验证超临界二氧化碳输送用X60M钢级 $\Phi 323.9\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ HFW钢管管体和焊缝承压能力，选用长8 m的整管试样进行水压爆破试验，试验依据SY/T 5992标准进行，参考标准计算爆破压力为32.11 MPa，实际试验测得爆破压力为39.31 MPa，高于计算爆破压力，爆口形貌如图8所示，起爆点位于钢管母材上。可见管材不但具有较高的承压能力，而且焊缝强度不低于母材。

3.4 压扁试验

压扁试验可直接反映HFW焊管焊缝质量的控制水平和焊管综合力学性能。取250 mm长试验管段，进行整管压扁试验，依据ASTM A370-22a标准要求，采用YH41-100C压扁试验机将焊缝分别置于12点位置和3点位置位置进行压扁试验，板间距离先分别压至0.33D和0.50D，观察有无裂纹，再压至贴合观察裂纹（平板间距0 mm），如图7所示。可见两种情况下均未出现任何裂纹，压扁试验结果见表5，可以看出，试验结果远高于API SPEC 5L标准要求。

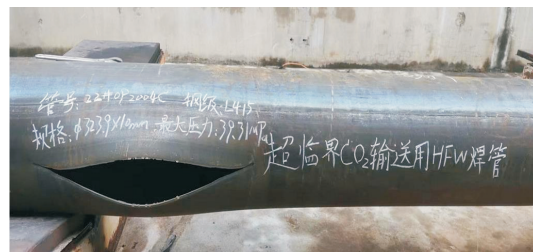


图8 超临界二氧化碳HFW输送用钢管爆破试验后形貌

4 结 论

(1) 采用低碳中锰微合金化设计、洁净化炼钢和TMCP控轧控冷技术研制的X60M钢级超临界二氧化碳输送管用热轧卷板，金相组织以细长扁平的多边形铁素体(PF)+少量珠光体(P)为主，且低温韧性优异。

(2) 通过优化HFW钢管成型焊接工艺，在挤压力5.5 mm、焊接功率400 kW左右、焊接速度17 m/min、焊接频率425 kHz、焊缝热处理温度930℃等工艺下，开发出X60M钢级超临界二氧化碳输送用 $\Phi 323.9\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ HFW钢管，力学性能完全满足GB/T 9711 PSL2要求，管体母材及焊缝强度高，低温韧性好，并具有高的强塑性。

(3) $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试验温度下, X60M钢级超临界二氧化碳输送用 $\Phi 323.9\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ HFW钢管焊缝冲击功为293~351 J、热影响区冲击功为219~315 J、管体冲击功为248~342 J, 所有试样剪切面积为100%。当试验温度下降到 $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 管体、焊缝、热影响区冲击功均在204~350 J范围内, 剪切面积为85%~100%, 管材具有优异的低温韧性, 提高了管道在低温下的抗裂纹启裂能力和裂纹扩展止裂能力, 完全满足超临界二氧化碳管道设计要求, 可保证管道的安全输送。

参考文献:

- [1] 李永强. 超临界 CO_2 长距离管道输送技术研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- [2] 房启超. 超临界 CO_2 输送管网运行工况的安全性研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- [3] 白世星. 泄放工况对超临界 CO_2 管道输送工艺参数影响研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- [4] 吕家兴, 侯磊, 王昕, 等. 超临界 CO_2 管道输送管径技术经济性评价[J]. 油气储运, 2022, 41(1): 114-120.
- [5] 王全德. 长距离超临界 CO_2 管道输送仿真应用研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [6] 李记科, 丛山, 杨红兵. 美国ERW/HFW钢管应用经验借鉴[J]. 钢管, 2019, 48(1): 8-19.
- [7] 刘长远. 管道内超临界和密相 CO_2 泄漏扩散规律研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [8] 黄晓辉, 史显波, 席敏敏, 等. 含Cu抗细菌腐蚀管线钢的研制及其性能[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(4): 33-37, 45.
- [9] 黄晓辉, 余晗, 韦奉, 等. 抗细菌腐蚀X70钢级HFW焊管性能研究[J]. 石油管材与仪器, 2022, 8(1): 19-23.
- [10] 黄晓辉, 牛爱军, 王博玉, 等. 低温环境用X80直缝埋弧焊管焊缝韧性波动分析[J]. 低温工程, 2023(2): 90-96.
- [11] 刘怡婷. HFW系列管线管的力学性能控制技术[J]. 上海化工, 2022, 47(3): 52-55.
- [12] 李超, 薛自建, 陈长青, 等. N80钢级HFW套管焊后热处理工艺试验研究[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(9): 56-60.
- [13] 徐源. 含杂质超临界 CO_2 管道裂纹延性扩展研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- [14] 刘丽双. 超临界二氧化碳管道腐蚀特性研究[J]. 化学工程师, 2023, 37(5): 85-88.
- [15] 赵帅, 张建, 李清方, 等. 含杂质二氧化碳管道输送[M]. 北京: 中国石化出版社, 2014.

作者简介: 毕宗岳 (1963—), 男, 工学博士, 教授级高工, 中国石油宝鸡石油钢管有限责任公司首席技术专家, 主要从事油气输送管材开发及焊接工艺技术研究工作。

收稿日期: 2023-07-20

编辑: 罗 刚

(上接第42页)

- [10] 孙咸. 高强度钢冷裂纹启裂位置判据与焊缝强度匹配的关系[J]. 电焊机, 2020, 50(1): 21-28.
- [11] 孙咸. 焊缝金属的强度匹配方式及其应用[J]. 现代焊接, 2012(1): 22-24, 27.
- [12] 李风波, 朱春生, 钱葆义, 等. ASTM A514 Gr.Q钢焊接工艺[J]. 焊接技术, 2010, 39(3): 35-38.
- [13] 孙咸. 焊缝金属强度匹配与扩散氢的关系[J]. 电焊机, 2019, 49(11): 7-16.
- [14] KITAGAWA Y, KAWASAKI H. Recent development of high-strength and tough welding consumables for offshore structures[J]. Kobelco Technology Review, 2013, 32(12): 1-8.
- [15] SCHAEFFER B, MELFI T. Minimizing risk in offshore submerged arc welding[J]. Welding Journal, 2013, 92(3): 40-43.
- [16] Welding Company, Kobe Steel, Ltd. Offshore structures exploring deeper seas demand higher quality filler metals[J]. Kobelco Welding Today, 2008, 11(4): 1-8.
- [17] KOBE STEEL. Meeting the requirements of offshore structures that operate in ever deeper and colder water[J]. Kobelco Welding Today, 2013, 16(2): 3-8.

作者简介: 孙 咸, 男, 教授, 主要从事焊接材料及金属焊接性方面的研究和教学工作, 对焊接材料软件开发具有丰富经验; 获国家科技进步二等奖1项(2000年), 省(部)级科技进步一等奖2项, 二等奖3项, 1992年获国务院颁发的政府特殊津贴, 已发表学术论文200余篇。

收稿日期: 2022-04-06

修改返回日期: 2023-02-16

编辑: 董 超