

氢气输送用L360MH钢级HFW焊管性能研究

文/刘 斌 毕宗岳 韦 奉 张锦刚 王 磊

中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司、宝鸡石油钢管有限责任公司

摘要：根据管道输氢的技术要求，开发了L360MH $\Phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管。通过对焊管进行检验，结果表明，焊管管体屈服强度在442~495 MPa之间，抗拉强度在535~560 MPa之间，屈强比在0.83~0.89之间，-10℃时焊缝冲击功在268~274 J之间，热影响区冲击功在299~312 J之间，各项性能指标均满足CDP-S-NGP-PL-006-2019-4《天然气管道工程钢管技术规格书》要求。慢应变速率拉伸试验结果表明，开发的HFW焊管在6.3 MPa纯氢环境中仍具有较好的抗氢脆能力。

关键词：氢气输送；L360MH；HFW；焊管

氢能是公认的清洁能源，被誉为21世纪最具发展前景的二次能源，有助于解决能源危机、全球变暖以及环境污染问题，其开发利用得到了世界范围内的高度关注。对于氢气的长距离输送，管道输氢是最安全高效的运输方式，目前已成为全球氢气远距离输送的首选。欧洲和美洲是世界上最早发展氢气管网的地区，已有70年的历史，在管道输氢方面已经有了很大规模，截至目前，美国已有约2 600 km的输氢管道，欧洲已有1 598 km的输氢管道，而我国氢气管道仅有约100 km。

近年来，国内对中长距离输氢管道开始有迫切的实际工程需求，但国内目前已建输氢管道普遍采用的管型为无缝管，钢级在L245以下，最高设计压力4 MPa。无缝管用于管道输氢虽然较为广泛，但因自身的工艺特点，目前还存在一些问题：一是无缝管采用钢坯加热后穿孔成型，壁厚波动大；二是管坯的碳当量相对较高，穿孔过程管坯表面易产生轧制裂纹等缺陷，且在管道现场环焊施工时，易出现

焊缝裂纹。因此，国内对适用于氢气输送的其他管型钢管提出了需求，本文介绍了宝鸡石油钢管有限责任公司（以下简称“宝鸡钢管”）开发的L360MH $\Phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管，并对焊管的组织、管体及焊缝的各项理化性能和氢相容性进行了分析研究，以期为之后的氢气输送用焊管产品开发提供参考。

产品性能

对批量生产的L360MH $\Phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管进行了金相组织、拉伸性能、低温夏比冲击韧性、压扁试验、硬度、HIC和SSCC等性能检测，并进行了慢应变速率拉伸试验。

1. 金相组织

L360MH $\Phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管焊接接头组织如图1所示。由图1可见，焊缝组织为细小的铁素体+少量的珠光体，管体组织为多边形铁素体+少量的珠光体，均存在较为明显的晶粒

基金项目：中国石油天然气集团有限公司前瞻性基础性及战略性技术攻关课题。课题名称：中长距离管道纯氢/掺氢输送关键技术研究，课题编号：2021DJ5002(JT)

边界，铁素体组织为输氢焊管提供了足够的塑性，而少量的珠光体提供了必要的硬度。焊缝各位置组织均匀细小，与管体组织基本接近，能够保证焊缝与管体性能的一致性。

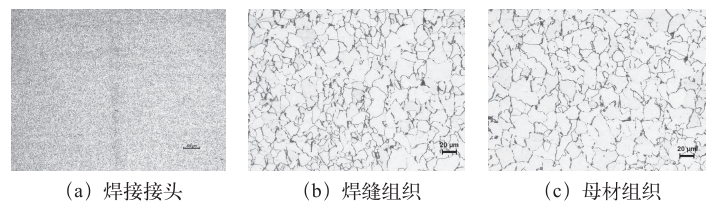


图1 焊接接头组织

2. 拉伸性能
 在管体距焊缝180°位置处取横向矩形试样进行管体拉伸试验，试验机型号为CMT5305型300 kN万能试验机；在焊缝处取横向矩形试样进行焊接接头拉伸试验，试验机型号为SHT5106型1 000 kN拉力试验机，标距长为50 mm，标距内宽为38.1 mm，厚度与钢管壁厚等厚，试验结果见表1。

表1 拉伸性能统计

检测项目	管体						焊缝	
	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		屈强比		抗拉强度/MPa	
	单值	平均值	单值	平均值	单值	平均值	单值	平均值
检测值	442~495	468	535~560	542	0.83~0.89	0.85	525~578	563
技术规格书要求	360~500		460~660		≤0.90		≥460	

由表1可以看出，焊管管体屈服强度范围为442~495 MPa，平均值为468 MPa；抗拉强度范围为535~560 MPa，平均值为542 MPa；焊接接头抗拉强度范围为525~578 MPa，平均值为563 MPa，均符合CDP-S-NGP-PL-006—2019-4《天然气管道工程钢管技术规格书》(以下简称“技术规格书”)要求。

3. 冲击韧性

在L360MH $\phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管管体、焊接接头取样进行夏比冲击试验，夏比冲击试样加工成V形缺口，试样尺寸为7.5 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm，试验设备型号为NI750F。试验结果见表2。

表2 夏比冲击功统计

检测项目	管体横向Ak _v /J(−10℃)		焊缝Ak _v /J(−10℃)		热影响区Ak _v /J(−10℃)	
	单值	平均值	单值	平均值	单值	平均值
	312~385	345	268~274	272	299~312	305
技术规格书要求	≥23	≥30	≥23	≥30	≥23	≥30

由表2可以看出，L360MH $\phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管在−10℃下管体横向冲击功单值在312~385 J之间，平均值为345 J；焊缝冲击功单值在268~274 J之间，平均值为272 J；热影响区冲击功单值在299~312 J之间，平均值为305 J，远远满足技术规格书要求，表明批量生产的L360MH $\phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管具有优异的冲击韧性。

4. 硬度
 在钢管焊接接头处取样，进行管体母材、焊缝和热影响区位置10 kg载荷维氏硬度试验，试验机型号为HVS-50 A，试验结果见表3。

表3 焊接接头硬度试验结果

检测项目	HV10		
	母材	焊缝	热影响区
	168~176	170~174	166~177
技术规格书要求	≤260		

由表3可以看出，母材区最大硬度为176 HV10，焊缝处最大硬度为174 HV10，热影响区最大硬度为177 HV10，母材、焊缝及热影响区硬度接近，焊接接头未发现明显的软化现象。

5. HIC和SSC

依据NACE TM 0284—2016和NACE TM 0177—2016标准要求，在L360MH $\phi 406.4 \times$

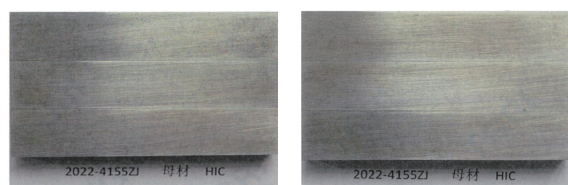
10.8 mm纯氢输送用HFW焊管管体及焊接接头处取样进行氢致开裂（HIC）试验和硫化物应力开裂（SSC）（四点弯曲）试验，试验结果见表4和表5，宏观照片如图2～图4所示。

表4 氢致开裂（HIC）试验结果

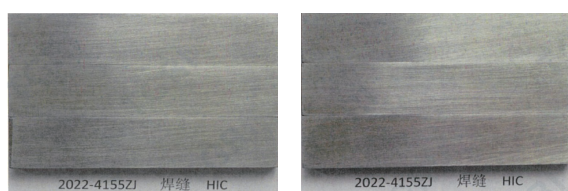
位置	裂纹率测量结果			备注
	CLR (%)	CTR (%)	CSR (%)	
	平均值	平均值	平均值	
母材	0	0	0	无氢鼓泡
焊缝	0	0	0	无氢鼓泡
技术规格书要求	≤15	≤5	≤2	

表5 硫化物应力开裂（SSC）试验结果

位置	加载应力 /MPa	试验结果
母材	360×0.72	720 h试验后，放大10倍对工作段进行观察，未发现裂纹
焊缝	360×0.72	720 h试验后，放大10倍对工作段进行观察，未发现裂纹
技术规格书要求	72%AIS	放大10倍对工作段进行观察，试样表面无开裂或断裂现象



(a) 正面 (b) 背面
图2 母材试样96 h HIC试验后表面宏观照片



(a) 正面 (b) 背面
图3 焊缝试样96 h HIC试验后表面宏观照片



(a) 母材试样 (b) 焊缝试样
图4 母材及焊缝试样720 h SSC试验后表面宏观照片

由表4和表5结果可以看出，批量生产的L360MH $\phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管具

有优异的抗氢致开裂和抗硫化物应力开裂能力。

6. 慢应变速率拉伸

(1) 试验方法

从管体和焊接接头取缺口试样进行慢应变速率拉伸试验，试验标准依照GB/T 34542.2—2018《金属材料与氢环境相容性试验方法》执行，采用WDML-3-50 kN型微机控制高压氢环境慢拉伸试验机分别进行6.3 MPa氮气和氢气慢拉伸试验，慢拉伸应变速率为 $1.0 \times 10^{-6}/s$ ，氢气中的试验需在试验开始之前将试样静置于6.3 MPa纯氢环境箱中48 h以上，并保证整个慢拉伸试验过程均在6.3 MPa纯氢环境箱中进行。使用日立S-3700N型扫描电镜测量缺口试样断口直径并进行断口形貌观察，断口直径每隔45°测量一次，最终测得断口面积平均值。钢的氢脆敏感性使用抗拉强度 R_m 、断口面收缩率 Z 和拉伸位移 D 的损失率来综合表征，具体损失率计算公式为：损失率 $= [1 - (S_{\text{氢气}}/S_{\text{氮气}})] \times 100\%$ （其中 S 分别表示 R_m 、 Z 、 D ）。

(2) 试验结果

图5和图6为L360MH $\phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管母材和焊缝慢拉伸缺口试样在两种气体介质下慢应变速率拉伸应力-拉伸位移曲线。由图5和图6可知，与6.3 MPa氮气环境相比，纯氢输送用HFW焊管母材和焊缝慢拉伸缺口试样在6.3 MPa氢气中的抗拉强度和位移有一定程度的下降，焊缝试样下降幅度大于母材试样。对纯氢HFW焊管的抗拉强度、断面收缩率及拉伸位移的平均值损失率进行了进一步的统计分析，其中母材和焊缝试样的抗拉强度、断面收缩率及拉伸位移的平均值损失率分别为0.4%、3.2%、0.9%和4.2%、1.2%、8.5%，表明L360MH $\phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管具有较好的抗强度和抗塑性损失。

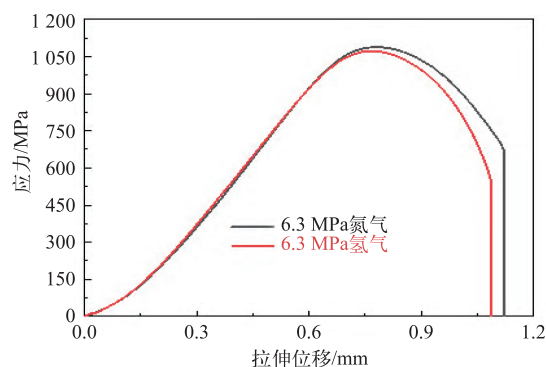


图5 母材慢拉伸缺口试样应力-位移曲线

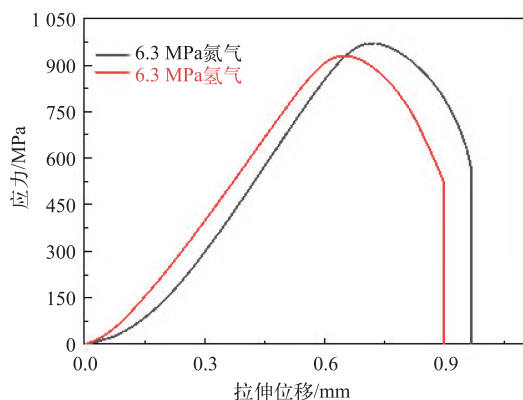


图6 焊缝慢拉伸缺口试样应力-位移曲线

图7和图8为L360MH $\phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管母材和焊缝慢拉伸缺口试样在6.3 MPa氢环境中断口形貌，母材和焊缝试样断口外侧的滑移带较窄，氢气引起了断口边部出现较多的氢致裂纹。但从图5和图6的抗拉强度、断面收缩率和拉伸位移平均值损失率来看，6.3 MPa纯氢环境并未对HFW焊管的性能造成恶劣的影响。

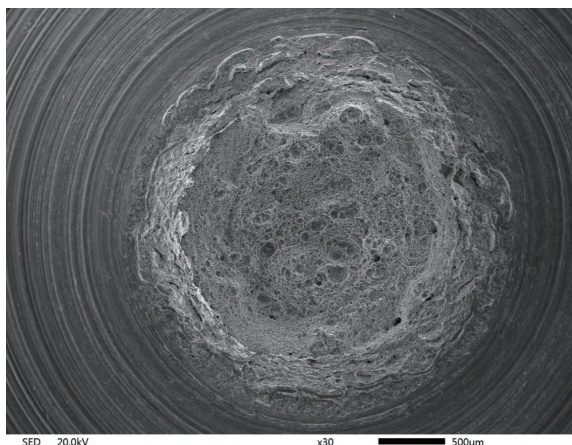
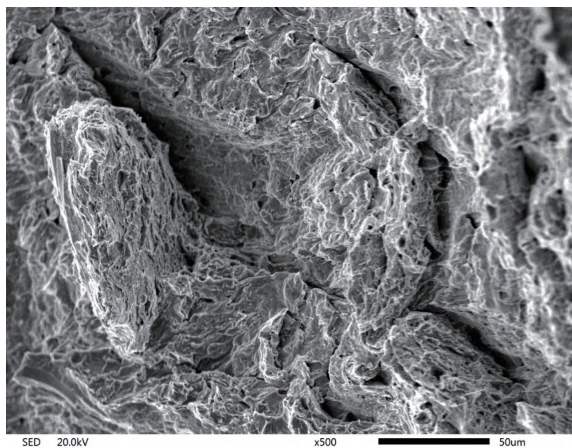


图7 母材慢拉伸缺口试样在6.3 MPa纯氢环境中断口形貌

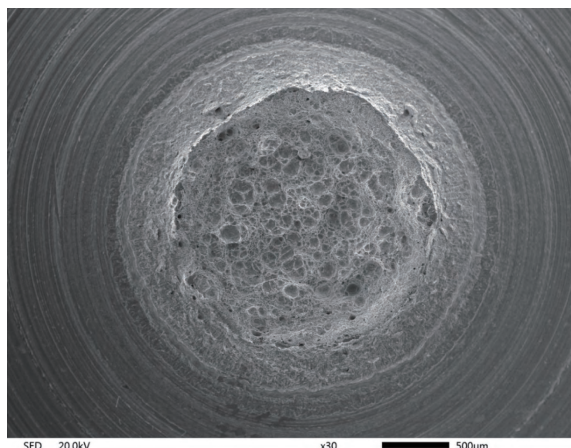
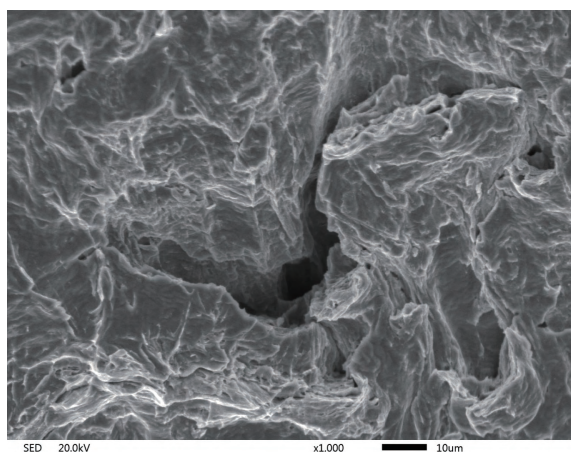


图8 焊缝慢拉伸缺口试样在6.3 MPa纯氢环境中断口形貌

结束语

1) 开发出的L360MH $\phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管各项性能均满足CDP-S-NGP-PL-006—2019-4《天然气管道工程钢管技术规格书》要求，焊管具有高的强韧性及优良的综合性能、抗氢致开裂和抗硫化物应力开裂能力。

2) 批量生产的L360MH $\phi 406.4 \times 10.8$ mm纯氢输送用HFW焊管在6.3 MPa纯氢环境中仍具有较好的抗氢脆能力。EA

参考文献

- [1] HORMAZA MEJIA A, BROUWER J, MAC KINNON M. Hydrogen leaks at the same rate as natural gas in typical low-pressure gas infrastructure[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(15): 8810-8826.
- [2] 马林聪. 中国氢能产业基础设施发展蓝皮书

- [M]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [3] DAVIS S J, LEWIS N S, SHANER M, et al. Net-zero emissions energy systems[J]. Science, 2018, 360(6396): 9793.
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 能源技术革命创新行动计划(2016-2030年)[EB/OL]. (2016-04-07)[2022-03-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/01/content_5078628.htm.
- [5] RIVAROLO M, MARMI S, RIVEROS-GODOY G, et al. Development and assessment of a distribution network of hydro-methane, methanol, oxygen and carbon dioxide in Paraguay[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77: 680-689.
- [6] 李玉星, 张睿, 刘翠伟, 等. 掺氢天然气管道典型管线钢氢脆行为[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 732-739.
- [7] 于蓬, 王健, 郑金凤, 等. 氢能利用与发展综述[J]. 汽车实用技术, 2019(24): 22-25.
- [8] SEZGIN J G, BOSCH C, MONTOUCHET A, et al. Modelling of hydrogen induced pressurization of internal cavities[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(22): 15403-15414.
- [9] 郑津洋, 刘自亮, 花争立, 等. 氢安全研究现状及面临的挑战[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 106-115.
- [10] 蒋庆梅, 王琴, 谢萍, 等. 国内外氢气长输管道发展现状及分析[J]. 油气田地面工程, 2019, 12(38): 6-8.

(上接第36页)

参考文献

- [1] NIAZ S, MANZOOR T, PANDITH A H. Hydrogen storage: materials, methods and perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 457-469.
- [2] KRENN, GRAY A. AIP conference proceedings [AIP advances in cryogenic engineering: transactions of the cryogenic engineering conference - CEC, volume 57 - spokane, washington, USA (13-17 June 2011)] - diagnosis of a poorly performing liquid hydrogen bulk storage sphere[J]. American Institute of Physics, 2012: 376-383.
- [3] DOMASHENKO A, GOLOVCHENKO A, GORBATSKY Y. Production, storage and transportation of liquid hydrogen. Experience of infrastructure development and operation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002, 27(7/8): 753-755.
- [4] 王芳. 大型液氢贮罐的结构设计[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [5] 陈崇昆. 300 m³液氢运输槽车液氢贮罐的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [6] 王平. 空心玻璃微球真空绝热性能研究及应用初探[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [7] Ping W, Liao B, An Z, et al. Measurement and calculation of cryogenic thermal conductivity of HGMs[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 129: 591-598.
- [8] CHAN C K, TIEN C L. Conductance of Packed Spheres in Vacuum[J]. Journal of Heat Transfer, 1973, 95(3): 64-64.
- [9] LIAO Y, WU X, LIU H, et al. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres[J]. Thermochemica Acta, 2011, 526(1-2): 178-184.
- [10] 徐烈. 低温绝热与贮运技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [11] 陈国邦, 张鹏. 低温绝热与传热技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.