

长输天然气管线环焊缝失效分析

罗志鹏, 杨洋

(陕西省天然气股份有限公司, 西安 710000)

摘要: 针对某现役天然气长输管线的环焊缝泄漏问题, 通过宏观形貌分析、无损探伤、理化性能检测、金相组织分析等方法对断口进行失效分析。结果显示, 管体内部存在原始裂纹、错边量超标、焊缝根部组织缺陷等一系列问题, 在内压力、残余应力及外加载荷的共同作用下发生裂纹扩展, 直至断裂失效。通过对断口进行失效分析提出相对应的施工管理建议, 为预防同类型的工程项目问题提供参考。

关键词: 天然气管线; 环焊缝; 泄漏; 失效分析

中图分类号: TG115.5

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2021.11.006

Analysis and Discussion on Girth Weld Leakage Failure of Long Distance Natural Gas Pipeline

LUO Zhipeng, YANG Yang

(Shaanxi Provincial Natural Gas Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: In view of the girth weld leakage problem of an active natural gas long-distance transmission pipeline, the fracture failure was analyzed by means of macroscopic inspection, nondestructive inspection, physical and chemical performance test and metallographic analysis. The results show that there are a series of problems in the pipe body, such as original cracks, excessive misalignment, weld root microstructure defects and so on. Under the combination of internal pressure, residual stress and external load, crack propagation occurs until fracture failure. The corresponding construction management suggestions are put forward to provide reference for preventing the problems of the same type of engineering projects.

Key words: natural gas pipeline; girth weld; leakage; failure analysis

0 前言

天然气作为清洁能源在飞速发展的现代工业及民生领域需求与日俱增, 管道输送技术也随之快速发展, 目前普遍认可管道输送为最经济和安全的方式。管道焊接接头由母材、焊缝及热影响区组成, 各部分力学性能存在差异, 焊接结构的稳定性也会受到材料不均匀性的影响^[1-2], 所以相比管道整体而言, 对接环焊缝成为整条管线结构的薄弱环节^[3]。

在陕某现役天然气管道设计管径 DN900 mm,

材质 X70, 设计压力 8 MPa。巡检人员巡线时发现两处地表植被异常死亡, 通过开挖验证, 确认两处均发生泄漏并进行换管抢修。一处泄漏点位于弯管与直管段连接环焊缝 6 点钟位置附近, 钢管规格为 $\Phi 914$ mm \times 12.7 mm, 弯管规格为 $\Phi 914$ mm \times 16 mm, 角度为 18°; 另一处泄漏点位于直管与直管连接环焊缝 6 点钟位置, 可见裂纹长度约 80 mm, 钢管规格均为 $\Phi 914$ mm \times 12.7 mm。本研究对管道环焊缝泄漏位置进行失效分析, 并提出相应施工管理建议, 为天然气管线建设提供参考。

1 宏观形貌分析及壁厚检测

1.1 宏观形貌分析

现场取失效管段进行宏观形貌分析，分别如图1和图2所示。1#环焊缝泄漏处内表面裂纹长于外表面；漏点处外表面裂纹中心应为两半周焊的对接处，存在明显成形不良现象，裂

纹中心一侧沿焊趾处开裂，另一侧沿焊缝扩展；表面根焊宽度不均匀，且高度低于母材，存在补焊痕迹，裂纹长度与补焊痕迹长度基本相同，未见明显错边现象。对2#环焊缝泄漏裂纹进行宏观观察，可以看出，泄漏处内表面裂纹长于外表面，裂纹开裂位于焊缝直管段焊趾处，存在明显错边现象。

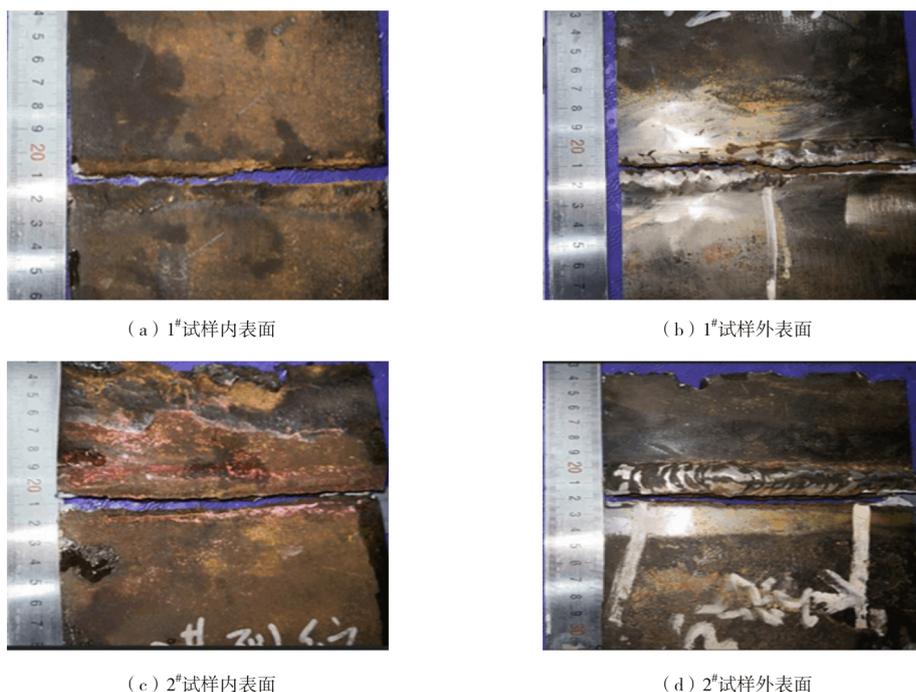


图1 失效管段内、外表面焊缝宏观形貌



图2 样品外观及编号

1.2 壁厚检测

依据 GB/T 11344—2008《无损检测 接触式超声脉冲回波法测厚方法》对1#和2#试样进行壁厚检测，壁厚检测结果见表1，1#钢管壁厚平均值为13.00 mm，2#钢管壁厚平均值为13.02 mm，2#环焊缝弯管侧壁厚平均值为16.58 mm，均未发现壁厚减薄现象。

表1 试样壁厚测量结果

测量位置	1#-1 钢管/mm	1#-2 钢管/mm	2# 钢管/mm	2# 弯管侧/mm
12 点	13.09	13.07	13.01	16.70
3 点	12.95	12.90	12.93	16.10
6 点	12.93	12.93	13.01	16.75
9 点	13.02	13.00	13.03	16.78
平均值	13.00	13.00	13.02	16.58

2 试验分析及性能测试

2.1 无损检测

2.1.1 磁粉检测

依据 SY/T 4109—2013《石油天然气钢质管道无损检测》对1#试样和2#试样环焊缝外表面进行全周长100%磁粉检测，对表面缺陷进行判定，结果如图3所示。由图3可以看出，1#试样内表面

裂纹长度为 135 mm，外表面裂纹长度为 65 mm，且内、外表面裂纹的一端偏移约 20 mm；2# 试样

内表面裂纹长度为 150 mm，外表面裂纹长度为 85 mm。

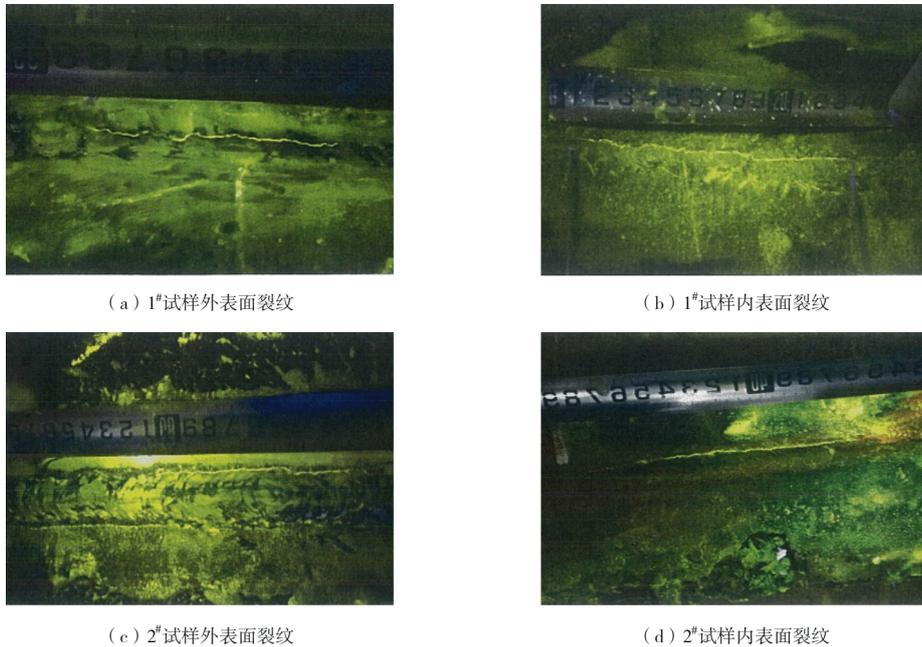


图 3 两组试样内、外表面磁粉检测结果

2.1.2 射线检测

采用 XXG-3005P 型射线检测仪，对 1# 试样环焊缝和 2# 试样环焊缝进行 100% 射线检测。检测结果表明：两试样环焊缝均存在裂纹、条渣、圆缺等缺陷，其中 1# 试样环焊缝裂纹 155 mm，2# 试样环焊缝裂纹 132 mm；1# 试样环焊缝柱孔 1 mm 的评级结果为 IV 级，其他缺陷评级结果均为 II 级。无损检测结果与

建设期存档数据进行对比分析，两道环焊缝存档片均与环焊缝特征相符。

2.2 理化性能测试

2.2.1 化学分析

依据标准 GB/T 4336—2016《碳素钢和中低合金钢多元素测量的测定 火花放电原子发射光谱法》对母材和环焊缝位置进行化学成分分析，化学分析结果见表 2。通过表 2 可知，

表 2 母材和环焊缝化学成分分析结果

%

试样	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)
2# 母材	0.066	0.20	1.50	0.015	0.002 7	0.15	0.190
环焊缝 2#-3 点	0.049	0.20	1.23	0.057	0.002 4	0.11	0.030
环焊缝 2#-5 点	0.056	0.20	1.24	0.006 8	0.002 5	0.11	0.045
环焊缝 2#-7 点	0.054	0.21	1.26	0.007	0.002 1	0.11	0.049
环焊缝 2#-12 点	0.053	0.20	1.24	0.006 4	0.002 4	0.11	0.043
标准要求	≤0.16	≤0.45	≤1.70	≤0.025	≤0.020		
试样编号	w(Nb)	w(V)	w(Ti)	w(Cu)	w(B)	w(Al)	CEV
2# 母材	0.066	0.049	0.015	0.013	0.000 8	0.022	0.396
环焊缝 2#-3 点	0.011	0.006 8	0.004 3	0.020	0.000 3	0.710	
环焊缝 2#-5 点	0.016	0.009 8	0.008 2	0.019	0.000 3	0.690	
环焊缝 2#-7 点	0.017	0.010	0.005 8	0.021	0.000 4	0.680	
环焊缝 2#-12 点	0.016	0.008 8	0.005 8	0.020	0.000 3	0.640	
标准要求	≤0.06	≤0.10	≤0.06				≤0.43

2# 试样母材的铌(Nb) 含量微超标, 且允许有+0.01%的偏差, 满足标准 GB/T 9711—2017 要求。

2.2.2 力学性能试验

依据标准 GB/T 2653—2008 《焊接接头弯曲试验方法》对 1# 试样环焊缝进行弯曲性能测试。环焊缝的弯曲试验取全壁厚的板状侧弯试样, 弯轴直径为 90 mm, 试验前去除内、外焊缝余高, 结果发现试样未出现裂纹, 满足 SY/T 4103—2006 《钢制管道焊接及验收》标准要求。

采用 PSW750 型冲击试验机, 依据标准 GB/T 229—2007 《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》对 1#、2# 试样母材以及环焊缝进行夏比冲击试验, 取样位置如图 4 所示, 冲击试验结果见表 3。表 3 结果显示, 1# 试样环焊缝 11 点钟焊缝试样

的冲击性能不能满足标准要求, 其余均满足 GB/T 9711—2017 的要求。

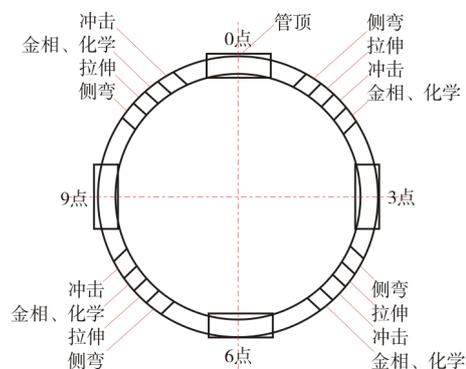


图 4 环焊缝取样位置示意图

另对试样进行落锤撕裂试验, 结果见表 4, 检测结果未见异常。

表 3 环焊缝夏比冲击性能试验结果

试样编号	取样位置	冲击功/J		剪切面积/%		
		单值	均值	单值	均值	
1#-1	母材	284、280、296	287	100、100、100	100	
1#-2	母材	237、316、276	276	100、100、100	100	
2#	母材	263、261、225	250	100、100、100	100	
1# 环焊缝	2 点	焊缝	73.7、163、110	116	100、100、100	100
		热影响区	244、251、147	214	95、98、70	88
	5 点	焊缝	144、160、187	164	60、70、80	70
		热影响区	217、222、207	215	80、80、80	80
	7 点	焊缝	156、254、132	181	65、95、60	73
		热影响区	247、264、116	209	88、90、45	74
	11 点	焊缝	24.9、68.7、157	83	10、25、65	33
		热影响区	189、271、145	202	60、100、55	72
2# 环焊缝	3 点	焊缝	121、81.7、124	109	60、50、60	57
		热影响区	148、218、222	196	70、80、80	77
	5 点	焊缝	113、182、142	146	60、75、65	67
		热影响区	253、223、253	243	100、100、100	100
7 点	焊缝	118、84.4、70.4	91	55、40、40	45	
	热影响区	203、233、230	222	60、80、70	70	
12 点	焊缝	148、101、117	122	70、45、55	57	
	热影响区	275、247、309	277	100、90、100	97	
标准要求		≥38	≥51			

表 4 落锤撕裂试验结果

试样编号	长×宽×高/(mm×mm×mm)	剪切面积百分比/%
1 [#] -1 母材横向	305×76.2×t	100、100
1 [#] -2 母材横向	305×76.2×t	100、100
2 [#] 母材横向	305×76.2×t	100、100
标准要求		两试样平均值≥85%

2.2.3 金相组织分析

依据标准 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》对 1[#]、2[#] 环焊缝试样进行金相组织分析及低倍检验。

1[#] 试样环焊缝 11 点位置根焊组织为贝氏体 (B_粒) + 多边形铁素体 (PF) + 晶核内针状

铁素体 (IAF)、填充组织为 B_粒 + PF、盖面组织为粗大 B_粒，焊缝熔合区组织均为 B_粒，均未见异常；其 5 点钟位置存在一处未熔合缺陷，7 点钟位置根焊焊趾有裂纹缺陷，且周围组织变形 (如图 5 (a) 所示)。

2[#] 试样焊缝 3、7、12 点钟位置处的根焊组织均为 PF + 珠光体 (P)、填充焊组织为 B_粒 + PF、盖面组织为粗大 B_粒，环焊缝细晶区组织均为 PF + 马氏体-奥氏体 (MA)，无明显异常；在管体 5 点钟位置处，焊缝错边约 3.43 mm；而在 7 点钟、12 点钟位置，根焊焊趾有裂纹缺陷，且周围组织变形。图 5 (b) 所示为 12 点钟根焊焊趾金相组织形貌。

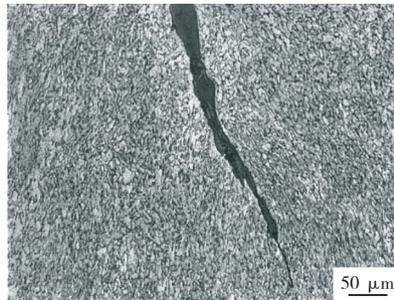
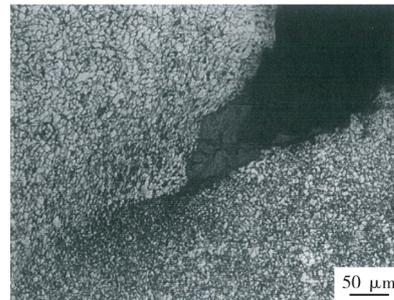
(a) 1[#] 试样 7 点钟根焊焊趾(b) 2[#] 试样 12 点钟根焊焊趾

图 5 两试样不同位置根焊焊趾金相组织形貌

3 焊缝断口分析

对 1[#] 样品泄漏裂纹断口进行形貌分析，断口均发现脱碳层，脱碳层宽度约 200 μm，脱碳层为补焊时二次加热温度过高所致，采用扫描电子显微镜进行微观分析，如图 6 (a) 所示，断面中心呈现河流花样的解理台阶，具

有脆性断裂特征，不良组织使得材料抗裂纹扩展能力下降^[4-5]。

对 2[#] 试样泄漏裂纹断口取样进行剖面分析，断口根焊焊缝组织与常规根焊组织不同，裂纹区出现魏氏体组织，说明裂纹区域补焊时焊接热输入量较大^[6-7]。采用电子显微镜进行微观分析，根焊区域组织形貌如图 6 (b) 所示，

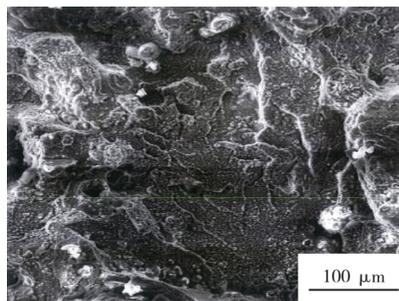
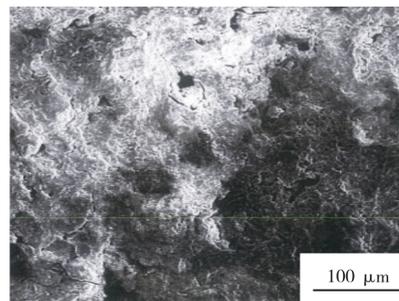
(a) 1[#] 试样断口中心处组织形貌(b) 2[#] 试样断口根焊处组织形貌

图 6 扫描电子显微镜下观察的两组试样组织形貌

根焊区域在放大 500 倍下能够观察到裂纹。对断口靠近根部区域进行能谱分析, 结果发现其主要为铁的氧化物。

对断口取样进行硬度测试, 测试位置如图 7 所示, 测试结果见表 5 和表 6, 两组试样不同位置硬度值对比如图 8 所示。由于脱碳导致 1# 根焊断口附近硬度值最低, 2# 试样根焊断口附近硬度值相对较高, 母材硬度未见异常。

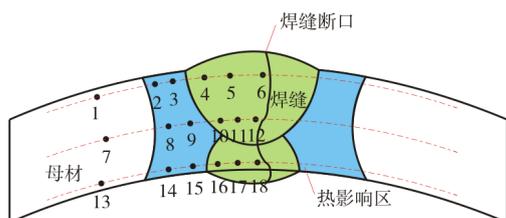


图 7 断口硬度测试位置示意图

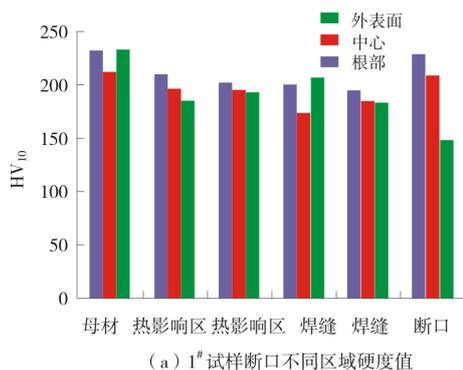


表 5 1# 试样断口环焊缝不同位置硬度测量结果

试验位置	HV ₁₀	试验位置	HV ₁₀	试验位置	HV ₁₀
1	231	7	211	13	231
2	208	8	194	14	183
3	199	9	193	15	191
4	198	10	171	16	204
5	192	11	182	17	181
6	225	12	526	18	146

表 6 2# 试样断口环焊缝不同位置硬度测量结果

试验位置	HV ₁₀	试验位置	HV ₁₀	试验位置	HV ₁₀
1	201	7	199	13	204
2	191	8	187	14	190
3	180	9	185	15	210
4	204	10	179	16	202
5	202	11	190	17	216
6	197	12	215	18	212

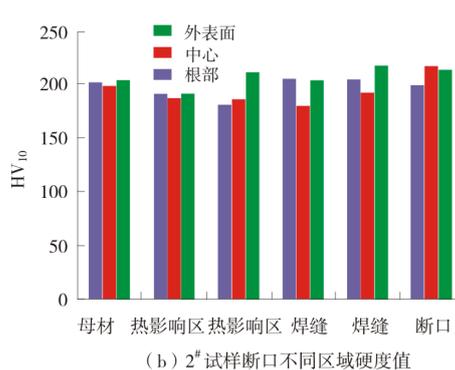


图 8 两组试样不同位置硬度值对比结果

4 分析讨论

结合无损检测、理化性能测试和断口分析试验结果, 1# 试样环焊缝存在明显返修焊痕迹, 并在返修位置开裂泄漏, 开裂长度基本与返修焊长度一致。裂纹从内表面向外扩展, 盖面焊层达 6.8 mm, 大于 50% 壁厚; 根焊和填充焊层断口两侧金相组织存在脱碳现象, 表明盖面层在焊接前已发生开裂, 且盖面层焊接热输入较大, 存在过热现象^[8-9]; 裂纹缺陷在内压力、残余应力和外加载荷的共同作用下扩展至外表面造成环焊缝泄漏失效^[10]。对于 2# 试样环焊缝, 发现焊缝的 3 点、6 点、9 点钟方向均存在明显错边现象, 经过断口分析, 发现裂纹从内表面向外表面扩展, 根部

存在内部返修现象, 盖面焊层达 5.7 mm, 大于 40% 壁厚, 其组织中存在魏氏体组织, 且硬度增大, 造成环焊缝根部脆性增加; 在焊缝 7 点钟和 12 点钟位置根焊焊趾处均存在裂纹缺陷, 缺陷在附加弯曲应力、内压力及残余应力的共同作用下扩展至外表面造成管体失效。

5 结束语

环焊缝缺陷导致泄漏往往发生在原始裂纹处, 裂纹在内压力、残余应力及外加载荷的共同作用下, 向外扩展导致失效。通过优化管道设计及转向角度, 采用降坡或削坡设计等, 减少热煨弯管使用数量, 以减少不等壁厚组对焊口; 合理

规划管道摆放位置，避免焊接接头与地形条件复杂位置叠加产生的影响；弯管与直管段焊接接头存在不等壁厚焊趾位置不连续过度应力集中问题，可改进不等壁厚焊接接头坡口形式，并制定不等壁厚焊接接头专项工艺规程，控制和提高焊接质量；在施工过程中，严格执行焊接工艺要求，无损检测标准参照 NB/T 47013 增加目视检查的相关规定，对焊缝外观成形质量、咬边、错边等进行检查控制，严格评估焊缝返修质量，减少焊缝返修时组织性能的损伤。

参考文献：

- [1] 熊庆人, 张建勋, 李云龙, 等. 高钢级管线钢环焊缝强度匹配与安全评价[J]. 焊管, 2010, 33(6): 23-27.
- [2] 杨峰平, 卓海森, 罗金恒, 等. 油气输送管失效案例与原因分析[J]. 石油管材与仪器, 2015, 1(3): 63-66.
- [3] 张良, 罗金恒, 任国琪, 等. 某输气管线环焊缝泄漏失效分析[J]. 焊管, 2016, 39(12): 65-68.
- [4] 沈卓, 李玉海, 单以银, 等. 硫含量及显微组织对管线钢力学性能和抗 H₂S 行为的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(2): 215-222.
- [5] 曾燕屏, 朱鹏宇, 仝珂, 等. 显微组织对 X70 管线钢力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(3): 40-50.
- [6] 李树森, 刘敏, 左秀荣, 等. 高强度管线钢焊接裂纹产生的原因及控制[J]. 材料与冶金学报, 2013, 12(1): 67-71.
- [7] 程强. X80 管线钢焊接缺陷分析和预防措施[J]. 汉江石油科技, 2015, 25(1): 69-72.
- [8] 王海涛, 李仕力, 陈杉, 等. 高钢级天然气管道环焊缝断裂问题探讨[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(2): 49-52.
- [9] 黄磊, 李记科, 王长安, 等. X70 级 1 016 mm×17.5 mm 天然气管道环焊缝缺陷剖析[J]. 焊管, 2013, 36(6): 58-61.
- [10] 石宇熙. 天然气管道焊缝缺陷原因及防治技术[J]. 上海煤气, 2002(5): 37-39.

作者简介：罗志鹏（1982—），男，硕士，主要从事天然气储运研究工作。

收稿日期：2021-05-30

编辑：董超

欢迎订阅 2022 年《焊管》期刊

《焊管》期刊创刊于1978年，是我国焊管行业国内外公开发行的技术期刊，是陕西省优秀科技期刊；中国核心期刊（遴选）数据库、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊；《中国期刊全文数据库》、《中国期刊网》、《中国学术期刊（光盘版）》、《中国石油文摘》等多家著名数据库收录期刊。

《焊管》期刊始终以为我国焊管行业的科技进步服务为办刊方针，以传播科技知识、交流科研成果和先进技术经验为目的，主要报道与焊管生产有关的新材料的开发应用、成型工艺与设备、焊接工艺与设备、无损检测技术、自动控制技术、防腐工艺与设备、管道设计与施工等方面的技术信息与技术成果。

《焊管》期刊为月刊，大16开本，全彩印刷，每月28日出版，刊登彩色广告。国内统一连续出版物号：CN 61—1160/TE；国际标准连续出版物号：ISSN 1001—3938。邮发代号：52—89，每期定价18元，全国各地邮局均可订阅。如因故漏订，可直接与《焊管》期刊社联系补订。

欢迎访问《焊管》期刊网站，投稿网址：<http://www.hgqks.com>。

通讯地址：陕西省宝鸡市姜谭路10号

邮编：721008

传 真：(0917) 3398448

E-mail: hgqks@vip.163.com

编辑部电话：(0917) 3398448 3398447