

实用技术

呼图壁储气库双金属复合管应用研究

杨肇琰¹, 申莹², 杨中², 邓静², 徐明全¹, 李永康¹

(1. 新疆油田公司, 新疆 克拉玛依 834000;

2. 中油(新疆)石油工程有限公司, 新疆 克拉玛依 834000)

[摘要] 为研究天然气中 CO₂ 的腐蚀问题,根据腐蚀机理,对不同工况下介质腐蚀性分析,工程选材前针对性的开展腐蚀试验,优选双金属复合管基层、衬层材质,从设计、施工等方面进行探究,并结合现场实际应用情况,研究一套完整的双金属复合管应用架构。

[关键词] 双金属复合管; 注采管道; 基层; 衬层; CO₂ 腐蚀; 储气库

[中图分类号] TG172 [文献标识码] A doi: 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0099

[文章编号] 1001-1560(2023)04-0178-05

Application of Bimetal Composite Pipe in Hutubi Gas Storage

YANG Zhao-yan¹, SHEN Ying², YANG Zhong², DENG Jing², XU Ming-quan¹, LI Yong-kang¹

(1. Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China;

2. PetroChina (Xinjiang) Petroleum Engineering Co., Ltd., Karamay 834000, China)

Abstract: In order to study the corrosion problem of the CO₂ in natural gas, the corrosivity of medium under different working conditions was analyzed based on the corrosion mechanism. Targeted corrosion test was carried out before material selection. The base and lining materials of bimetallic composite pipe were optimized and explored from the aspects of design and construction. Based on the actual application situation on site, a complete application framework of bimetallic composite pipe was developed.

Key words: bimetallic composite pipe; injection production pipeline; base course; lining; CO₂ corrosion; gas storage

0 前言

呼图壁储气库是西气东输二线首座大型储气库,也是目前国内规模最大的储气库,总库容为 1.07×10^{10} m³,生产库容为 4.51×10^9 m³,其设计定位满足正常调峰与战略储备双功能。鉴于重大民生工程的特殊意义,为确保线路工程安全平稳运行,结合气质组分的腐蚀特性,开展集输管道内腐蚀防治研究。

1 腐蚀防治

目前集输管道常见内腐蚀防治方法有^[1]: 优选耐蚀材质、注入缓蚀剂、材料表面处理(电镀或涂层)等。

CO₂ 腐蚀环境下天然气输送常用铬合金钢材料,其 Cr 元素可与 H₂CO₃ 形成比 FeCO₃ 更稳定的腐蚀产物保护膜,而使其腐蚀速度大大降低。一般铬合金钢在

CO₂ 腐蚀环境中有很好的耐蚀性,但由于造价昂贵,因此仅在关键部位和极恶劣的环境才考虑使用。

国内油气田已有采用双金属复合管进行含 CO₂ 腐蚀介质的油气密闭集输工艺(如牙哈、克深 2、大北),以降低管材腐蚀速率,且效果显著。

2 腐蚀性分析

呼图壁储气库气源取自西气东输二线,注采管道主要腐蚀介质为 CO₂(摩尔分数 1.89%),采气期携带地层水造成管道内腐蚀。

CO₂ 腐蚀受到众多因素的影响,概括分为两大类。一是环境因素:主要是 CO₂ 的分压(P_{CO_2}),介质温度,水质矿化度,pH 值,水溶液中 Cl⁻、HCO₃⁻、Mg²⁺、Ca²⁺、细菌等的含量,油气混合物中的含蜡量,流动状态,材料表面垢的结垢与性质等。二是材料因素:包括材料种

[收稿日期] 2022-10-19

[通信作者] 杨肇琰(1985-),工程师,主要从事石油天然气地面工程设计工作,电话:13689977343,E-mail:544588284@qq.com

类,材料中的合金元素 Cr、C、Ni、Si、Mo、Cu、Co 等含量,材料表面膜等。

根据储气库的生产状况,造成 CO₂ 腐蚀主要原因是井流体中水含量、介质温度、CO₂ 的分压(P_{CO_2})等。

(1)水含量 随着井流体含水量的增加,CO₂ 的腐蚀速率也随之增加,有试验表明,当含水率为 45%(质量分数)左右时,CO₂ 的腐蚀速度出现一个阶跃,这可能是介质从油包水转向成水包油的缘故。

(2)介质温度 大量研究结果表明,温度是 CO₂ 腐蚀的重要参数。铁的 CO₂ 腐蚀可分为以下 4 种情况: $T<60\text{ }^{\circ}\text{C}$,腐蚀产物膜为 FeCO₃,无附着力且松软,金属表面光滑,主要发生均匀腐蚀; $60\text{ }^{\circ}\text{C}<T<150\text{ }^{\circ}\text{C}$,腐蚀产物膜具有一定保护作用,此时局部(点)腐蚀效果比较突出;在 110 °C 左右时,匀速腐蚀的速度明显升高,局部腐蚀加剧(甚至穿孔),腐蚀产物主要是 FeCO₃ 粗结晶; $T>150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时^[2-4],生成致密、粘结力强的 FeCO₃、Fe₃O₄ 产物膜,此时腐蚀速率反而降低。

(3)CO₂ 分压 API 6A 标准规定^[5,6],在油气工业中可根据 CO₂ 的分压判断其腐蚀性,规律如下: $P_{\text{CO}_2}<0.05\text{ MPa}$,没有腐蚀; P_{CO_2} 为 0.05~0.21 MPa,产生腐蚀; $P_{\text{CO}_2}>0.21\text{ MPa}$,发生中、高度腐蚀。

3 腐蚀机理

3.1 典型腐蚀环境

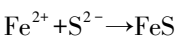
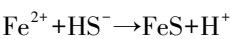
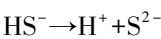
在天然气生产中,大多数腐蚀介质中含有大量的 H₂S^[7],CO₂,Cl⁻。NACEMR0175 依据腐蚀介质的不同,将其分为 2 类典型的腐蚀环境:

(1)H₂S-CO₂-Cl⁻ 酸性环境 介质组分中含 H₂S、Cl⁻、CO₂,当 H₂S 分压($P_{\text{H}_2\text{S}}$)大于 0.3 kPa 或系统总压大于 0.4 MPa 时,称为酸性环境^[8]。

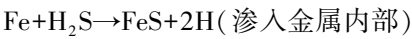
(2)CO₂-Cl⁻“甜气”环境 介质中含 CO₂、Cl⁻, P_{CO_2} 分压较高(有时高至 6 MPa),但不含 H₂S(或 $P_{\text{H}_2\text{S}}$ 分压低于 0.3 kPa)称为“甜气”环境。

3.2 2 种典型腐蚀环境的腐蚀机理

酸性气田开发过程中,介质组分含大量 H₂S,此时会造成严重腐蚀,其腐蚀机理为:

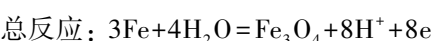
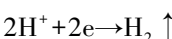
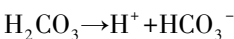
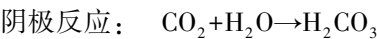


总反应:



在 H₂S、Cl⁻、CO₂ 形成的酸性环境中^[2],除管道表面的匀速腐蚀及局部(点)腐蚀外,还会引起与金属渗氢相关的腐蚀开裂,Cl⁻ 的存在加速了腐蚀作用。

在“甜气”气田开发过程中,伴生气体中含有大量的 CO₂,其腐蚀机理为:



在 CO₂ 和 Cl⁻ 组成的“甜气”环境中^[3,9-11],腐蚀产物膜形成后,金属腐蚀速度将受其稳定性、结构和渗透性能等影响,最终致使材料表面匀速腐蚀或局部(点)腐蚀,即:管道壁厚逐步减薄和孔蚀。组分中 Cl⁻ 除自身腐蚀性,还会破坏腐蚀产物膜而再次加速腐蚀。

3.3 2 种典型腐蚀环境的对比

2 类腐蚀环境破坏方式对比见表 1。

表 1 2 类腐蚀环境破坏方式对比

Table 1 Comparison of damage modes of two types of corrosive environment

腐蚀环境	腐蚀介质	腐蚀破坏方式	最重要的破坏方式
酸性环境	H ₂ S-CO ₂ -Cl ⁻	点蚀(PT)	应力腐蚀破裂(SCC)
		氢致开裂	
		缝隙腐蚀(CC)	
		均匀腐蚀	
“甜气”环境	CO ₂ -Cl ⁻	应力腐蚀破裂(SCC)	点蚀
		点蚀	
		缝隙腐蚀	
		均匀腐蚀	

4 腐蚀试验

储气库工程是重大民生工程,因其特殊性和重要性,工程先期开展选材腐蚀试验。结合气质条件,注采管道初选采用双金属复合管^[12]。

试验单位为中国石油天然气集团公司石油管力学和环境行为重点实验室,试验采用高温高压釜装置见图 1。试验环境参数如下:CO₂(摩尔分数)1.890 9%,总压 28 MPa,试验温度 62 °C,试验时间 120 h。试验溶

液组成 (mg/L): Cl^- 15 812, CO_3^{2-} 329.5, Ca^{2+} 3 866.1, Mg^{2+} 13.1, SO_4^{2-} 4 801.1, $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 10 144.2, 矿化物 15 720.6。腐蚀结果见表 2。

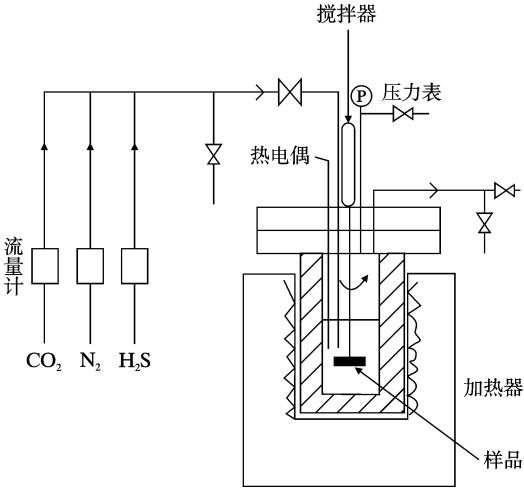


图 1 高温高压釜装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of high-temperature autoclave device

表 2 高温高压腐蚀结果

Table 2 High temperature and high pressure corrosion results

试样	状态	均匀腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)
S31603 母材	液相	0.001 8
	气相	0.000 6
S31603 焊缝	液相	0.000 9
	气相	0.001 2
20 钢	液相	1.032 4
	气相	0.034 3
L415QB	液相	3.515 8
	气相	0.043 5

根据实验室模拟极端工况下介质腐蚀结果, S31603 材料 20 a 均匀腐蚀速率为 0.000 6~0.001 8 mm/a。在确保注采管道设计寿命不小于 20 a 且经济论证后,最终优选基层材质 L415QB,衬层材质 S31603。

5 管道设计与焊接工程

5.1 管道设计

双金属复合管复合工艺^[13]主要有机械复合和冶金复合。其中机械复合成型方法有爆燃、旋压、液压、拉拔。冶金复合成型方法有热挤压、热轧、离心铸造、爆炸焊接、粉末冶金、堆焊等。对比生产成本及各油田集输系统使用情况,通过实地走访调研后,确定采用机械爆燃复合管。

5.1.1 壁厚

衬层根据腐蚀性、可焊性、腐蚀试验等综合因素确定,不计腐蚀裕量,壁厚不小于 2.5 mm ($DN>300$, 衬层厚度 ≥ 3 mm);基层壁厚根据其强度、稳定性、抗震校核等统筹计算确定。

5.1.2 管件

站内管件以及仪表、测针接口等,根据设计压力和工艺条件,推荐采用纯材 (S316L) 管件,也可进行独立分段设计。

5.1.3 其他

(1)储气库注采管道注气设计压力 32 MPa,采气设计压力 16 MPa,注采周期变压工况运行对其基层母材抗疲劳性要求较高,应选用 GB/T 9711“石油天然气工业 管线输送系统用钢管”PSL2 等级钢管,进行-40℃夏比低温冲击试验。

(2)双金属复合管基层与衬层粘结力剪切强度应不小于 138 MPa,交货前推荐单管进行有限元分析,以有效避免管道应用时分层、鼓包、屈曲。

(3)大口径 ($DN>300$) 双金属复合管及管件,管端椭圆度不大于 1%,能大幅提高焊合格率。

(4)衬层管延伸至基管管端外 50 mm。

(5)管道进、出站低点 (易积液处) 设置腐蚀检测仪,用于气相、液相介质腐蚀监测。

5.2 焊接工程

5.2.1 坡口形式

坡口的形状和尺寸与焊接方法、焊接位置、焊件厚度等因素有关。考虑焊接的特点和管道壁厚,采用单面 V 型坡口,坡口角度 30°~35°。

5.2.2 焊接方法

施工焊接方法^[14]有手工电弧焊 (SMAW)、熔化极气体保护焊 (GMAW 或 MIG)、钨极氩弧焊 (GTAW 或 TIG)、药芯焊丝电弧焊 (FCAW)。影响选用焊接方法的因素包括质量、效率、设备状况和焊接材料。

结合管材自身特点,为确保一次合格率,推荐采用钨极氩弧焊进行封底焊接和根部打底焊接,并进行一道填充焊道的焊接,其余填充和盖面焊道采用效率较高的手工电弧焊方法。

5.2.3 焊接材料

衬层厚度较小 (≥ 2.5 mm),焊接时衬层和基层均对焊缝金属有稀释作用,且由于封底处导热性差,2 种母材的熔化量大,为了避免焊缝产生马氏体组织,焊接材料的 Cr、Ni 含量应该足够高。因此封底焊、根部焊需采用合金元素含量较高的奥氏体不锈钢。为防止焊缝

及热影响区晶粒粗大,减少焊接应力和防止产生热裂纹,尽量选用较小的规范参数和较低的层间温度。

5.2.4 焊接保护

焊接衬管时,为防止母材被严重氧化,使焊道难以成形且产生气孔,甚至影响焊缝区的抗腐蚀性和结构稳定性,需进行背面气体保护。保护气一般用纯氩(纯度99.99%),设置气体保护装置,保护气底进顶出,通气量大于封堵容积的8倍以上,流量一般取5~50 L/min,以保证焊缝背面的氧含量降低到0.005%以下。焊接过程中要一直通气保护,直至焊缝的有效厚度超过4 mm。

5.2.5 验收要求

注采管道无损探伤采用双百检测(100%射线检测+100%超声波检测)。

6 检测分析

2013年7月集输管道投产至今,已安全平稳运行8 a多。为了验证双金属复合管衬层是否存在介质腐蚀引起基管壁厚减薄情况,特对运行管道开展了壁厚检测。由于集输管道不具备切割检验条件,现场采用超声测厚仪对9处双金属管基层进行壁厚检测(见表3),并抽检管段前后环焊缝质量(见表4),检测结论均未见异常。

表3 基管壁厚检测汇总表

Table 3 Summary of wall thickness measurement of base pipe

序 号	外径/ mm	基管公 称壁厚 t/mm	检测位置	检测值/ mm	API Spec 5L 标准壁厚偏差	标准偏差 对应壁厚
1	114	10	变形前端	最大值:10.3 最小值:9.7	[-12.5%, +15%] [-1.25 mm, +1.5 mm]	[8.75 mm, 11.5 mm]
			变形处			
			变形后端			
2	168	14	变形前端	最大值:14.4 最小值:13.5	[-12.5%, +15%] [-1.75 mm, +2.1 mm]	[12.25 mm, 16.1 mm]
			变形处			
			变形后端			

表4 基管焊缝检测结果汇总

Table 4 Summary of inspection results of base pipe welds

序号	检测方法	检测结果	参照标准	评定等级
1	磁粉检测	未见表面裂纹	NB/T 47013.4-2015	I级
2	射线检测	未见超标缺陷	NB/T 47013.2-2015	II级
3	超声波探伤检测	未见超标缺陷	NB/T 47013.3-2015	I级
4	相控阵检测	未见超标缺陷	GB/T 32563-2016	合格

检测结论进一步佐证了所选衬层材质具有良好的

耐腐蚀性,也充分证明注采管道采用双金属复合管其整体质量满足工程要求。

7 结 论

呼图壁储气库经过8个注采周期的安全运行,双金属复合管在双流向、变压工况下实际耐蚀效果满足工程要求。管道腐蚀试验、工程设计、施工焊接、物资采购等各环节要点控制,能够为后续同类重大工程提供经验和支持。

[参 考 文 献]

[1] 张哲.新疆呼图壁储气库埋地管道防腐对策研究[J].石油管材与仪器,2019,5(2):59-61.
ZHANG Z. Application Analysis of Anticorrosion of Buried Pipelines in Xinjiang Hutubi Gas Storage [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2019, 5 (2): 59-61.

[2] 宋坤鹏.某区块气井腐蚀现状及对策分析[J].中国石油和化工标准与质量,2013,33(15):129.
SONG K P. Analysis of corrosion status and countermeasures of gas wells in a block [J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2013, 33 (15): 129.

[3] 宋跃海.牙哈凝析气田地面集气管线腐蚀分析及管材选用[J].黑龙江科技信息,2009,32(1):9.
SONG Y H. Corrosion analysis and pipe material selection of surface gas gathering pipeline in Yaha condensate gas field [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2009, 32 (1): 9.

[4] 张新朝.中温变换装置不锈钢管道应力腐蚀开裂分析[J].氮肥技术,2020,41(1):50-51.
ZHANG X C. Analysis of stress corrosion cracking of stainless steel pipe in medium temperature shift device [J]. Nitrogen Fertilizer Technology, 2020, 41 (1): 50-51.

[5] 柯伟.中国工业与自然环境腐蚀调查的进展[J].腐蚀与防护,2004,25(1):1-8.
KE W. Progress in Public concerning corrosion in Chinese industrial and natural environment [J]. Corrosion and Protection, 2004, 25 (1): 1-8.

[6] 羊东明.雅克拉气田集气管线内腐蚀分析及材质选用[J].天然气工业,2012,32(10):74-77.
YANG D M. Internal Corrosion analysis and material selection of gas gathering lines in the Yakla Gas Field [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32 (10): 74-77.

[7] 盖伟涛.交变应力和腐蚀交互作用下钻柱失效机理研究[D].大庆:东北石油大学,2006.
GAI W T. A Research on failure mechanism of drill string in

- interaction of stresses and corrosion [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2006.
- [8] 孙文杰.塔河油田伴生气集输管道内壁防腐研究[J].河南科技,2013(3):53-54.
- SUN W J. Research on corrosion prevention of the inner wall of associated gas gathering and transmission pipeline in Tahe Oilfield [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013(3): 53-54.
- [9] 代维.塔河油田金属管线的腐蚀规律研究及新型管材的应用[D].成都:西南石油大学,2017.
- DAI W. Research on corrosion law of metal pipelines in Tahe Oilfield and application of new pipes [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [10] 王丰.L245NB/316L双金属复合管焊缝耐腐蚀性能研究[D].成都:西南石油大学,2018.
- WANG F. Study on corrosion resistance of L245NB/316L bimetallic composite pipe weld [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [11] 兰海标.闵桥油田输油管线腐蚀原因分析与防护[J].科技资讯,2012(3):59-61.
- LAN H B. Cause analysis and protection of oil pipeline corrosion in Minqiao Oilfield [J]. Science and Technology Information, 2012(3): 59-61.
- [12] 凌星中.内复合双金属管制造技术[J].焊管,2001,24(2):43-46.
- LING X Z. Manufacturing technology of inner compound metal pipe [J]. Welded Pipe, 2001, 24(2): 43-46.
- [13] 曹晓燕.双金属复合管复合工艺研究进展[J].钢管,2014,43(2):11-15.
- CAO X Y. Progress Made in Research on Cladding process of bimetal Clad pipe [J]. Steel Pipe, 2014, 43(2): 11-15.
- [14] 赵虎.310S耐热不锈钢的焊接性及焊接技术[J].干燥技术与设备,2011(2):94-96.
- ZHAO H. Weldability and welding technique of 310S heat-resistant stainless steel [J]. Drying Technology and Equipment, 2011(2): 94-96.

[编校:郑霞]

(上接第168页)

- [43] 张从艳,张清贵,杨武奎.某型涡喷发动机Ⅱ级导向器叶片搪瓷涂层工艺方法改进技术研究[J].航空维修与工程,2015(10):99-103.
- ZHANG C Y, ZHANG Q G, YANG W K. Research on Process Improvement of the Enamel Coating for the 2nd Stage Guide Vane of Certain Turbojet Engine [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015(10): 99-103.
- [44] CHEN K, CHEN M H, WANG Q C, et al. Micro-alloys precipitation in NiO- and CoO-bearing enamel coatings and their effect on adherence of enamel/steel [J]. International Journal of Applied Glass Science, 2018, 9(1): 70-84.
- [45] ANDO K, FURUSAWA K, CHU M C, et al. Crack-healing behavior under stress of mullite/silicon carbide ceramics and the resultant fatigue strength [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2001, 84(9): 2 073-2 078.
- [46] ANDO K, CHU M C, TSUJI K, et al. Crack healing behaviour and high-temperature strength of mullite/SiC composite ceramics [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2002, 22(8): 1 313-1 319.
- [47] ZHEN Q, LI Z, HU P F, et al. A glass-ceramic coating with self-healing capability and high infrared emissivity for carbon/carbon composites [J]. Corrosion Science, 2018, 141: 81-87.

[编校:郑霞]

(上接第177页)

- [65] CHARALAMBOUS C A. Dynamic Stray Current Evaluations on Cut-and-Cover Sections of DC Metro Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(8): 3 530-3 538.
- [66] SOLGAARD A, GEIKER M R, KUETER A, et al. Experimental observations of stray current effects on steel fibres embedded in mortar [J]. Corrosion Science: The Journal on Environmental Degradation of Materials and its Control, 2013, 74: 1-12.
- [67] BERTOLINI L, CARSANA M, PEDEFERRI P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current [J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1 056-1 068.
- [68] 万红霞,李婷婷,宋东东,等.杂散电流对埋地管道的腐蚀及排流方式的研究进展[J].表面技术,2021,50(4):125-134.
- WAN H X, LI T T, SONG D D, et al. Research progress of stray current on corrosion and drainage method of buried pipeline [J]. Surface Technology, 2021, 50(4): 125-134.
- [69] 赵永刚.阴极保护系统中管道受杂散电流干扰分析与排流保护研究[D].西安:西安石油大学,2016.
- ZHAO Y G. Analysis of stray current interference to pipelines in cathodic protection and study on drainage protection on system [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.

[编校:郑霞]