

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.10.022

聚乙烯复合管在油田苛刻环境的适用性

刘青山¹, 肖雯雯¹, 葛鹏莉¹, 余大亮², 兰伟²

(1. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011; 2. 重庆科技学院, 重庆 401331)

摘要: 使用高温高压釜模拟塔河油田塑料复合管苛刻的工况条件, 研究了聚乙烯和交联聚乙烯两种复合管在三种介质模拟工况条件下不同试验时间后的外观形貌、质量、拉伸强度、耐热性能和化学结构的变化规律。结果表明, 气体、煤油、NaCl 溶液三种介质对这两种复合管的性能均会产生不利的影响。在三种介质模拟工况条件下, 随着时间的增加两种复合管的质量增加、拉伸强度和维卡软化温度 (VST) 降低, 拉伸强度和 VST 的变化主要发生在前 10 h; 在煤油介质中两种复合管的质量增加最显著, 同时 VST 降低幅度最大; 模拟工况试验 1000 h 后, 两种复合管在所有介质中的拉伸强度均下降, 交联聚乙烯管的拉伸强度保持率略优于聚乙烯管, 在气体和 NaCl 溶液中交联聚乙烯管的 VST 略高于聚乙烯管, 在煤油介质中交联聚乙烯管的 VST 仅为 64℃, 聚乙烯管的 VST 为 67℃。

关键词: 塑料复合管; 聚乙烯; 油田; 高温高压; 适用性评价

中图分类号: TB304 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)10-0122-07

Applicability of Polyethylene Composite Pipe in Harsh Environment of Oil Field

Liu Qingshan¹, Xiao Wenwen¹, Ge Pengli¹, Yu Daliang², Lan Wei²

(1. Northwest Oil Field Branch Company of China Petrochemical, Urumqi 830011, China;

2. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: High temperature and high pressure autoclave was used to simulate the harsh working conditions of plastic composite pipe in Tahe oil field. The variation of outer morphology, weight, tensile strength, heat resistance and chemical structure of polyethylene composite pipes and crosslinked polyethylene composite pipes were studied under simulated working conditions of three mediums with different experimental time. The results show that the three mediums of gas, kerosene and NaCl solution have negative effects on the properties of this two kinds of pipes. Under the simulated working conditions of three mediums, with the extension of the experimental time, the weights of the two kinds of pipes increase, the tensile strength and Vicat softening temperature (VST) decrease. The variation of tensile strength and VST of the pipes mainly occur in the first 10 h. In the kerosene medium, the weights of the two pipes increase most significantly, while the decrease of VST is the most. After 1000 h of the simulation experiment, the tensile strength of the two pipes decrease, the tensile strength retention rate of crosslinked polyethylene pipe is slightly better than that of polyethylene pipe, in the gas medium and NaCl solution, the VST of the crosslinked polyethylene pipe is slightly higher than that of the polyethylene pipe, but in the kerosene medium, the VST of the crosslinked polyethylene pipe is only 64℃, and that of the polyethylene pipe is 67℃.

Keywords: plastic composite pipe; polyethylene; oil field; high temperature and high pressure; applicability

中国石油化工股份有限公司西北油田分公司所属塔河油田是我国第一个海相沉积碳酸盐油田, 塔河油田超稠油具有高含硫 (H_2S 含量 $> 1.0 \times 10^4 \text{ mg/m}^3$)、高含盐 (地层水含盐浓度 220 g/L)、高密度

(1.017 g/cm^3)、高黏度 ($2 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)、高凝固点 (45°C)、高沥青质含量 (10.5%) 的特点^[1]。为改善超稠油流动性, 管输介质采用高温输送降低稠油黏度。稠油高温集输使原本苛刻的腐蚀环境

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2019M653317)

通信作者: 兰伟, 硕士, 教授, 研究方向为材料腐蚀与防护 E-mail: lwcq666@163.com

收稿日期: 2020-07-07

引用格式: 刘青山, 肖雯雯, 葛鹏莉, 等. 聚乙烯复合管在油田苛刻环境的适用性 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(10): 122-128.

Liu Qingshan, Xiao Wenwen, Ge Pengli, et al. Applicability of polyethylene composite pipe in harsh environment of oil field[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10): 122-128.

变得更加复杂,在塔河油田的高温、强酸性腐蚀环境下普通 20# 钢金属管道腐蚀穿孔速度快(最短 3 个月),平均穿孔速率为 2.5 mm/a,最大穿孔速率 14.96 mm/a,腐蚀速率是 NACE 标准轻度腐蚀的 21 倍^[1-2]。塔河油田油气集输管线沿线自然生态脆弱,社会环境复杂,金属管道穿孔会带来巨大的自然环境风险和社会环境风险,严重影响安全环保生产。如何改善塔河油田高温酸性集输条件下管道腐蚀穿孔问题,一直困扰着中石化西北油田分公司^[2-3]。

在强腐蚀介质环境中,相对于金属管道,塑料复合管具有密度小、耐腐蚀性好、稠油输送阻力小、导热系数低和便于施工等一系列优点,塑料复合管在国外一些油田稠油集输领域得到了一定的应用,并且起到了降低运输成本的效果^[4-7]。但是由于不同油田地层条件和集输工况差异很大,直接借用国外应用成熟的复合管可能为集输管线的应用留下安全隐患^[8]。

各种介质如水、酸、碱、盐、腐蚀性气体和有机溶剂等都能对塑料材质产生物理和化学的作用,使其性能大幅度降低^[9]。另外,温度、压力、流速等外界工况条件的变化对塑料材质耐腐蚀性介质的稳定性以及在介质中的耐久性提出了严峻考验^[10-11]。因此,如何尽可能地模拟塑料复合管应用工况,考察材料在静态或动态条件下的耐介质适用性能,以此为不同应用环境中的塑料复合管选材提供指导,成为油气集输管材领域当前研究的热点之一^[12]。

对于油气集输管材而言,耐介质适用性评价试验方法通常采用静态浸泡方法,其基本原理是将小件试样浸泡在化学介质中,测定试样性能随浸泡时间的延长而发生的变化,以此判断管材的耐介质适用性能^[13-14]。该方法虽然操作步骤简单易行,试验装置简便可取,但大量的事例表明,单纯采用静态浸泡试验结果作为管材材质选择的依据,往往会酿成灾难性破坏事故^[15]。因为管材材质的选取同输送介质类型、运行温度压力等密切相关,而该试验过程仅能实现温度可控,且在静态浸泡状态下,也不能全面模拟输送介质在管材内部流动腐蚀的情况^[16-18]。

聚乙烯复合管是目前国内油田应用相对广泛的塑料管,自 2003 年起,塔河油田将聚乙烯管应用于淡水集输工程,并且取得一定的效果。鉴于聚乙烯复合管的优点以及中石化西北油田分公司在聚乙烯管施工方面已经积累了丰富的经验,探究聚乙烯管在西北油田分公司所属油气田油气集输领域应

用的可行性具有巨大的工程应用价值。交联改性处理是提高聚乙烯使用性能的重要方法,经交联改性处理后的聚乙烯称为交联聚乙烯。笔者利用高温高压釜,在模拟工况条件下(高温高压以及高含量 H_2S , CO_2 , Cl^- , 原油等)进行试验,测试现有聚乙烯管和相同厂家提供的交联聚乙烯管两种未服役管材在不同介质中试验前后的外观形貌、质量、拉伸强度、耐热性能和化学结构等变化规律,为综合评价聚乙烯管和交联聚乙烯管在油气集输领域特定工况的应用提供参考和借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原料

聚乙烯复合管: T-123×13.5/PN20, 内径为 98 mm, 内衬层外径为 110 mm, 管材外径为 123 mm, 河北宇通特种胶管有限公司;

交联聚乙烯复合管: T-79×13.5/PN20, 内径为 52 mm, 内衬层外径为 60 mm, 管材外径为 79 mm, 河北宇通特种胶管有限公司;

H_2S , CO_2 : 工业品, 重庆圣马气体有限公司。

1.2 主要设备及仪器

高温高压复试测试釜系统: CORTEST 型, 美国 Cortest 公司;

电子万能试验机: CMT-5105 型, 深圳三思纵横科技股份有限公司;

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: Nicolet iS50 型, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

热变形维卡软化点试验机: WK-3 型, 深圳三思纵横科技股份有限公司。

1.3 高温高压釜试验

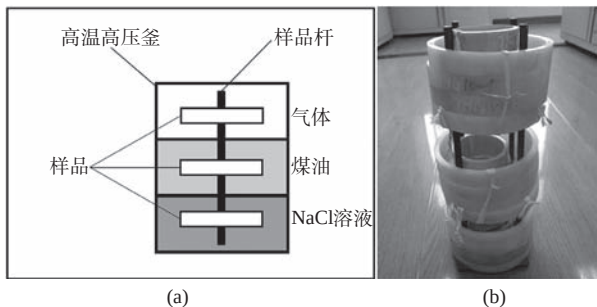
试验前从复合管上截取宽约 15 mm 的管作为试验用样品, 将复合管钢带增强缠绕结构剥除, 结合服役条件, 使用高温高压釜模拟介质环境, 具体试验参数如表 1 所示。

表 1 高温高压釜试验参数

试验条件	试验参数
总压力 / MPa	10
H_2S 分压 / MPa	0.6
CO_2 分压 / MPa	0.28
温度 / $^{\circ}C$	75
Cl^- 浓度 / ($g \cdot L^{-1}$)	140
时间 / h	10, 100, 1000

高温高压釜试验拟同时进行 3 种介质的适用性探索, 分别为气体、煤油和 NaCl 溶液, 将两种复合管样品同时放入高温高压釜, 同时完成两种复合管在稠油环境(煤油介质)、输气环境(气体介质)和集输环

境 (NaCl 溶液介质) 3 个模拟油气田环境下的适用性评价,试验装备示意图及样品实物图如图 1 所示。



a—高温高压釜样品装配示意图; b—样品实物图

图1 高温高压釜样品装配示意图及样品实物图

1.4 测试与表征

复合管样品经过高温高压釜模拟工况试验后,分别对比样品试验前后的外观形貌变化、质量变化、拉伸强度和耐热性能变化及成分结构变化。

增重率 (WGR) 测试: 截取一段初始状态的管材样品,经超声清洗后在 60℃烘箱中干燥 24 h 测得质量 m_1 ,随后将该样品在高温高压釜中试验一定时间后取出,超声清洗后再次放置于 60℃烘箱中干燥 24 h 测得质量 m_2 ,按照式 (1) 计算得到 WGR。

$$WGR = [(m_2 - m_1) / m_1] \times 100\% \quad (1)$$

拉伸强度参照 GB/T 1040.1-2006 测试,拉伸样品为哑铃型,受力方向沿管材轴向,样品宽度为 5 mm,拉伸速率 3 mm/min。

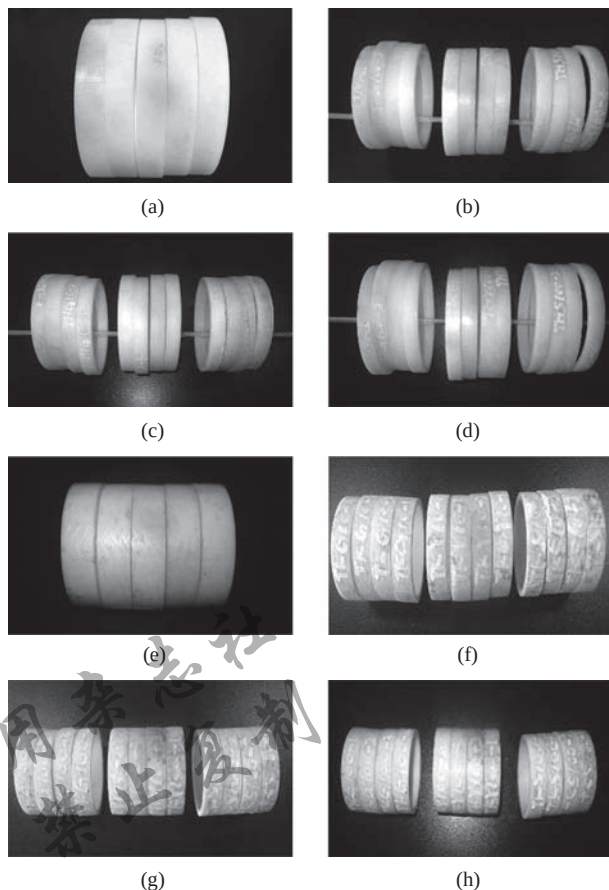
耐热性能参照 GB/T 1633-2000 测试,采用 B50 法 (50 N, 50℃/h) 对不同介质条件下试验前后的聚乙烯复合管样品的维卡软化温度 (VST) 进行测试。

复合管试验前后的化学结构通过 FTIR 仪表征。

2 结果与讨论

2.1 外观形貌变化

分别将聚乙烯管和交联聚乙烯管在气体、煤油和 NaCl 溶液中试验 10, 100 h 和 1000 h, 用于对比不同试验时间后的外观形貌变化。为在有限篇幅中尽可能展示试验介质和试验时间对外观形貌的影响, 分别选取聚乙烯管和交联聚乙烯管在气体 10 h、煤油 100 h 和 NaCl 溶液 1000 h 试验后的外观形貌进行对比, 如图 2 所示。从图 2a~图 2d 可以看出煤油和 NaCl 溶液介质中, 聚乙烯管经不同时间试验后颜色逐渐变深, 且煤油介质中颜色更深。引起样品颜色变化的主要原因是煤油和 NaCl 溶液渗入聚乙烯材料而发生了溶胀现象。随时间的延长, 管材吸



聚乙烯管: a—初始状态; b—气体介质 10 h;

c—煤油介质 100 h; d—NaCl 溶液 1000 h

交联聚乙烯管: e—初始状态; f—气体介质 10 h;

g—煤油介质 100 h; h—NaCl 溶液 1000 h

图2 聚乙烯管和交联聚乙烯管试验前后外观形貌变化

收液体或气体的量不断增加因此颜色也变得更深。

交联聚乙烯管的颜色为黄色, 从图 2e~图 2h 可以看出, 交联聚乙烯管试验前样品颜色较为均匀, 无起泡开裂等失效现象。经过不同介质和不同时间试验后也可见一定的溶胀现象, 由于黄色颜料存在的原因, 溶剂分子的溶胀作用对样品颜色的影响不易确认。可以发现, 聚乙烯管和交联聚乙烯管即使在气体介质中试验 10 h 也会发生肉眼可见的形貌变化, 但是随着介质改变和试验时间的进一步延长 (从 10 h 延长到 1000 h), 其溶胀现象并不会继续发生显著的变化, 因此可以推断, 聚乙烯管和交联聚乙烯管在试验介质中的溶胀主要发生在试验前期。

2.2 质量变化

聚乙烯管和交联聚乙烯管在不同介质中经过不同时间后的 WGR 如图 3 所示。从图 3a 可以看出, 随时间的增加, 聚乙烯管质量增加, 但是相同时间下不同介质中质量增加幅度不同。时间相同时,

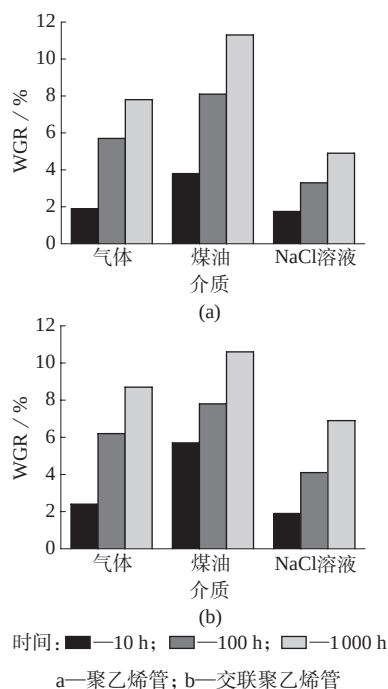


图3 聚乙烯管和交联聚乙烯管试验后的WGR

聚乙烯管在煤油中的WGR最大,在NaCl溶液中的WGR最小。试验过程中样品质量增加主要是由于管材样品吸收介质中的液体发生溶胀所致,质量增加越明显表明在该条件下溶胀现象越显著。

从图3b可以看出,时间和介质对交联聚乙烯WGR的影响与聚乙烯管相似:随时间增加交联聚乙烯管质量增加,在煤油介质中的WGR最大,NaCl溶液中的WGR最小。对比两种管材可以看出,1000 h后,聚乙烯在煤油中的WGR略高于交联聚乙烯,但在气体和NaCl溶液中的WGR明显低于交联聚乙烯管。

2.3 拉伸强度变化

试验前后聚乙烯管和交联聚乙烯管的拉伸强度变化情况如图4所示。通过图4a可以发现,与初始聚乙烯管样品相比,介质和时间对聚乙烯管拉伸强度有一定影响。拉伸强度降低主要发生在前10 h,随时间延长聚乙烯管拉伸强度整体呈下降趋势,但是增速逐渐减缓,时间相同时,介质对聚乙烯管拉伸强度的影响不大。

从图4b可以看出,与初始样品相比,交联聚乙烯管的拉伸强度也随时间增加而降低,但下降幅度较小。拉伸强度的降低也主要发生在前10 h,进一步增加时间,拉伸强度变化逐渐变缓,特别是在NaCl溶液中,10 h后再增加时间交联聚乙烯管的拉伸强度几乎没有变化。

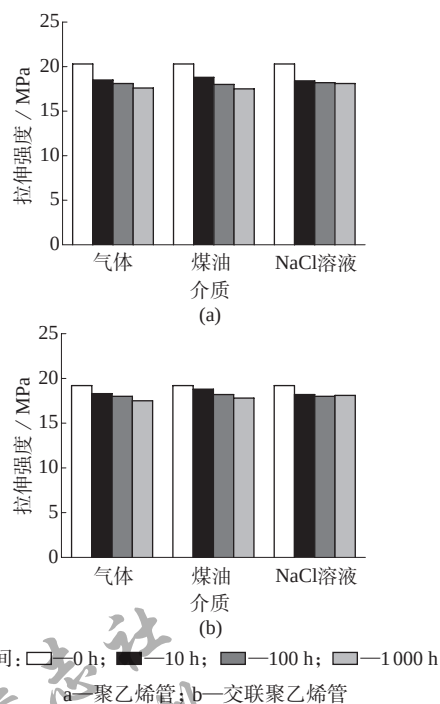


图4 聚乙烯管和交联聚乙烯管试验前后的拉伸强度

2.4 耐热性能变化

试验前后聚乙烯管和交联聚乙烯管的VST测试结果如图5所示。

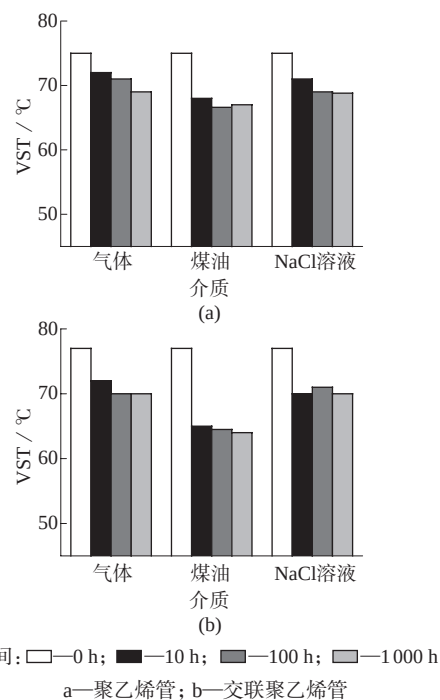


图5 聚乙烯管和交联聚乙烯管试验前后的VST

从图5a可以看出,试验前聚乙烯管的VST约为75℃,在三种介质条件下,随时间增加,VST逐渐下降,并且下降趋势大致相同:在0~10 h时VST下降较为明显,10 h后随着时间的增加,VST变化

不大。对于不同介质条件而言,在煤油介质中 VST 下降幅度稍大于气体介质和 NaCl 溶液。热塑性材料的溶胀作用为物理吸附溶解现象,虽然渗入的溶剂介质部分填充了聚合物分子的结构空间,但并未对其分子链的结构排列造成破坏,因此材料耐温性能变化不大。

从图 5b 可以看出,试验前交联聚乙烯管的 VST 约为 77℃。交联聚乙烯管的 VST 在不同介质中随时间增加也大体呈下降趋势,其中在煤油介质下降幅度最大,且明显高于聚乙烯管。从时间对 VST 的影响可以看出,0~10 h 时 VST 下降较为明显,特别是煤油介质中下降幅度最大,随着时间增加, VST 变化不明显,在气体介质中,交联聚乙烯管在 100 h 和 1000 h 后的 VST 基本一致,而在 NaCl 溶液介质中,交联聚乙烯管在 10 h 和 1000 h 后的 VST 基本一致。

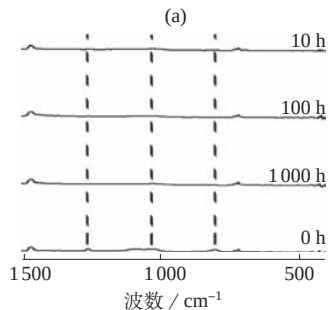
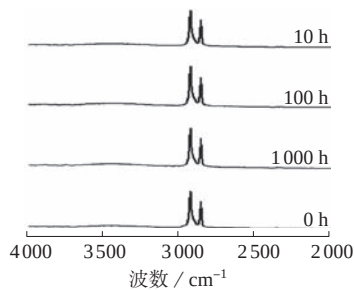
2.5 化学结构变化

利用 FTIR 仪分别测试了不同介质条件下不同试验时间的聚乙烯管和交联聚乙烯管的结构,由于不同介质(气体、煤油和 NaCl 溶液)条件下聚乙烯和交联聚乙烯结构变化不明显,因此主要展示了 NaCl 溶液条件下不同反应时间的两种管材样品的 FTIR 谱图,结果如图 6 和图 7 所示。从图 6a 和图 7a 可以看出,试验前后样品的 FTIR 谱图均为典型的聚乙烯成分结构,表明不同试验条件下样品的主要结构并未被破坏。

从图 6b 和图 7b 可以看出,经过模拟工况试验后两种管材的初始样品(0 h)的 1261 cm^{-1} (C—峰), 1094 cm^{-1} (—OH), 800 cm^{-1} (C—CH₃) 峰在试验后均已消失。这表明 C—O 键发生氧化断裂,其对应的变角峰 C—CH₃ 也部分断裂。C—O 键氧化断裂的原因主要是 H₂S 的还原作用,但无论是聚乙烯还是交联聚乙烯,其结构中 C—O 键含量极少,且并未处于主链之上,因此它的断裂并不能对聚乙烯和交联聚乙烯的结构完整性造成影响。相反,断裂的功能团活性键还倾向于与其它活性基团连接,对保持其分子结构的完整性起到积极作用。对比图 6、图 7 可以看出,聚乙烯管和交联聚乙烯管在模拟工况条件下的结构变化基本一致,且经过 10 h 的试验后两种管材样品的 FTIR 谱图与 1000 h 试验后的谱图没有明显区别,表明结构变化主要发生在前 10 h。

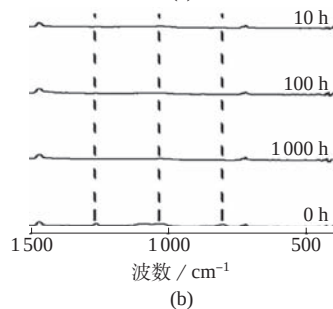
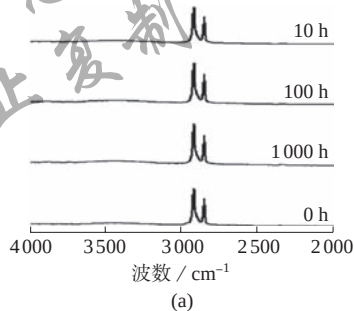
2.6 聚乙烯管和交联聚乙烯管性能对比

总结以上试验结果,将聚乙烯管和交联聚乙烯



a—波数 $2000\sim4000\text{ cm}^{-1}$; b—波数 $500\sim1500\text{ cm}^{-1}$

图 6 NaCl 溶液中不同试验时间的聚乙烯管 FTIR 谱图



a—波数 $2000\sim4000\text{ cm}^{-1}$; b—波数 $500\sim1500\text{ cm}^{-1}$

图 7 NaCl 溶液中不同试验时间的交联聚乙烯管 FTIR 谱图

管在高温高压釜不同介质条件下试验 1000 h 后各项性能指标的变化进行对比分析,具体如表 2 所示。结合表 2 可以看出不同的介质环境对聚乙烯管和交联聚乙烯管的性能有一定的影响。在三种介质中,因没有颜料的影响,聚乙烯管外观形貌的变化比较明显,其中在煤油中颜色变深最显著;聚乙烯管和交联聚乙烯管经过模拟工况试验后,均发生了一定程度的氧化,在试验时间相同时,介质条件改变对管材化学结构变化的影响不明显,并且两种复合管的氧化都主要发生在前 10 h。在 1000 h 时,两种管

表 2 两种复合管在不同介质中试验 1000 h 后的性能变化

性能指标	聚乙烯管			交联聚乙烯管		
	气体	煤油	NaCl 溶液	气体	煤油	NaCl 溶液
外观形貌变化	颜色变深,其中煤油中颜色最深			因有黄色颜料影响,不宜确认颜色变化		
WGR/%	7.8	11.3	4.9	8.7	10.6	6.9
拉伸强度保持率/%	86.7	86.2	89.2	91.1	92.7	94.3
VST/℃	69	67	69	70	64	70
化学结构变化	三种介质条件下均在前 10 h 发生氧化,1000 h 后的化学结构与 10 h 时的没有明显区别					

材的 WGR 均在煤油中最显著(聚乙烯管为 11.3%,交联聚乙烯管为 10.6%),在 NaCl 溶液中最小,聚乙烯管的 WGR 为 4.9%,交联聚乙烯管的 WGR 为 6.9%。通过对两种管材在三种介质条件下试验 1000 h 后的拉伸强度保持率对比可以看出,在三种介质条件下交联聚乙烯管拉伸强度保持率均略优于聚乙烯管,在三种介质中交联聚乙烯管拉伸强度保持率比聚乙烯管均高 5% 左右。在耐热性能方面,煤油对两种管材耐温性能影响最大,交联聚乙烯管在煤油中试验 1000 h 后的耐温性能较差,VST 下降至 64℃,而聚乙烯管的 VST 为 67℃,在其它两种介质中交联聚乙烯管的 VST 略高于聚乙烯管。

3 结论

(1) 在特定工况条件下,气体、煤油、NaCl 溶液介质对聚乙烯管和交联聚乙烯管性能有不利的的影响,介质环境不同,材质性能变化也不同。在拉伸强度和化学结构方面,三种介质对两种复合管的影响程度整体差异不大,但在煤油介质下,两种复合管的 WGR 更大,VST 下降更显著。

(2) 交联聚乙烯管在高温高压工况条件下的拉伸强度保持率略优于聚乙烯,但在气体和 NaCl 溶液介质下,交联聚乙烯管的 WGR 更大,而在煤油介质下,交联聚乙烯管的耐热性能较差,在其它两种介质中交联聚乙烯管的耐热性能略好于聚乙烯管。

参考文献

- [1] 羊东明,葛鹏莉,朱原原.塔河油田苛刻环境下集输管线腐蚀防治技术应用[J].表面技术,2016,45(2):57-64.
Yang Dongming, Ge Pengli, Zhu Yuanyuan. Corrosion prevention and control technology application of gathering and transportation pipelines in Tahe oilfield[J]. Surface Technology, 2016, 45(2):57-64.
- [2] 羊东明,石鑫,李亚光.塔河 12 区高含 H₂S 和 CO₂ 伴生气管道防腐技术[J].腐蚀与防护,2013,34(6):545-548.
Yang Dongming, Shi Xin, Li Yaguang. Anticorrosion technology of associated gas pipe in H₂S and CO₂ environment in the 12th district of Tahe oilfield[J]. Corrosion & Protection, 2013, 34(6):545-548.
- [3] 葛鹏莉,羊东明,韩阳,等.内穿插修复技术在塔河油田的应用[J].腐蚀与防护,2014,35(04):384-386.
- [4] Ge Pengli, Yang Dongming, Han Yang, et al. Application of interpolation recovery technique of polyethylene pipes in Tahe oilfield[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(04):384-386.
- [5] 张兆,刘鹏,徐超,等.玻璃纤维增强热塑性复合管性能评价方法研究进展[J].中国塑料,2019,33(8):136-143.
Zhang Zhao, Liu Peng, Xu Chao, et al. Research progress in performance evaluation methods continuous glass fiber-reinforced thermoplastic composite pipes[J]. China Plastics, 2019, 33(8):136-143.
- [6] 王薇,王俊涛,魏向军,等.井下柔性复合管注水技术及应用[J].石油钻采工艺,2017,39(1):83-87.
Wang Wei, Wang Juntao, Wei Xiangjun, et al. Water injection technology based on downhole flexible composite pipe and its application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(1):83-87.
- [7] 王大鹏,刘美苓,姜焕英,等.油气产业用增强热塑性复合管研究进展[J].中国塑料,2017,31(7):16-22.
Wang Dapeng, Liu Meiling, Jiang Huanying, et al. Research progresses of reinforced thermoplastic composite pipes used for oil and gas industry[J]. China Plastics, 2017, 31(7):16-22.
- [8] 毕红军,徐国强,付晶,等.井下用纤维增强连续复合管的性能评价[J].工程塑料应用,2014,42(9):81-84.
Bi Hongjun, Xu Guoqiang, Fu Jing, et al. Performance evaluation of fiber reinforced continuous composite tube for downhole[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(9):81-84.
- [9] 唐晓,时春涛,曹光,等.海岸土壤环境对油气管道局部腐蚀的影响[J].中国腐蚀与防护学报,2016,36(3):191-196.
Tang Xiao, Shi Chuntao, Cao Guang, et al. Effect of coastal soil environment on localized corrosion for oil and gas pipelines[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2016, 36(3):191-196.
- [10] Naseri S, Moghadasi J, Jamialahmadi M. Effect of temperature and calcium ion concentration on permeability reduction due to composite barium and calcium sulfate precipitation in porous media[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22:299-312.
- [11] Zhang Xuemin, Li Houbo, Qi Dongtao, et al. Failure analysis of anticorrosion plastic alloy composite pipe used for oilfield gathering and transportation[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 32:35-43.
- [12] Li Xiaoguang. Accumulation conditions and key exploration & development technologies of heavy oil in Huanxiling oilfield in Liaohe depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Research, 2020, 5(1):18-38.
- [13] 毕文军,姜妹,张溪明,等.一种搪瓷复合管的制造方法及耐蚀性检测[J].腐蚀与防护,2015,36(6):586-589.
Bi Wenjun, Jiang Shu, Zhang Ximing, et al. Manufacturing

- method and corrosion resistance test of a kind of enamel composite pipe[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(6):586-589.
- [13] 韩帅豪, 岑宏宇, 陈振宇, 等. 原油与高压 CO₂ 共存条件下咪唑啉缓蚀剂的作用行为研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(3):221-226.
- Han Shuaihao, Cen Hongyu, Chen Zhenyu, et al. Inhibition behavior of imidazoline inhibitor in corrosive medium containing crude oil and high-pressure CO₂[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(3):221-226.
- [14] Marshall D. Protecting oilfield tubulars against corrosion[J]. Reinforced Plastics, 2014, 58(1):39-41.
- [15] 李发根, 杨家茂, 冯泉, 等. 在役双金属复合管道失效机制及控制措施分析 [J]. 焊管, 2019, 42(9):64-68.
- Li Fagen, Yang Jiamao, Feng Quan, et al. Failure mechanism and control measures analysis of bimetal composite pipelines[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(9):64-68.
- [16] 李厚补, 羊东明, 戚东涛, 等. 增强热塑性塑料连续管标准现状与发展建议 [J]. 塑料, 2016, 45(4):85-87.
- Li Houbu, Yang Dongming, Qi Dongtao, et al. Present status and development proposals of standards of reinforced thermoplastic pipes[J]. Plastics, 2016, 45(4):85-87.
- [17] Li Houbu, Yan Milin, Qi Dongtao, et al. Failure analysis of steel wire reinforced thermoplastics composite pipe[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 20:88-96.
- [18] Wang Zhongyi, Liu Bin, Yang Yange, et al. Experimental and numerical studies on corrosion failure of a three-limb pipe in natural gas field[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 62:21-38.
-
- (上接第 109 页)
- [2] 李思远, 杨伟, 杨鸣波. 降噪高分子材料及其应用 [J]. 工程塑料应用, 2004, 32(5):70-73.
- Li Siyuan, Yang Wei, Yang Mingbo. Polymeric noise reduction composites and their applications[J]. Engineering Plastics Application, 2004, 32(5):70-73.
- [3] 顾灿松, 邓国勇, 何森东. 汽车空调系统异响引起的车内噪声研究与解决 [J]. 汽车技术, 2008(11):21-23.
- Gu Cansong, Deng Guoyong, He Sendong. The analysis and solution to car interior noise caused by abnormal noise from air conditioner[J]. Automotive Technology, 2008(11):21-23.
- [4] 蒋永敏. 浅析汽车的吸音隔音材料 [J]. 中国包装工业, 2014(2):9-10.
- Jiang Yongmin. Analysis of the sound-absorbing and sound-proof materials in automobile[J]. China Packaging Industry, 2014(2):9-10.
- [5] 仇文波. 一款微型轿车前门玻璃升降器异响问题的改善 [J]. 汽车工艺与材料, 2015(11):10-16.
- Qiu Wenbo. An improvement for noisy issue of front regulator of mini passenger vehicle[J]. Automobile Technology & Material, 2015(11):10-16.
- [6] 蒋雄, 邱德平. 汽车内饰塑料件 NVH 异响改善 [J]. 汽车工程师, 2018(4):31-34, 37.
- Jiang Xiong, Qiu Deping. Improvement of the acoustic performance of vehicle plastic interior parts[J]. Auto Engineer, 2018(4):31-34, 37.
- [7] 江文杰, 孙成武. 某车型汽车座椅异响问题的研究与解决 [J]. 机械制造, 2016(4):44-46.
- Jiang Wenjie, Sun Chengwu. Research and solution of abnormal sound of a car seat[J]. Machinery, 2016(4):44-46.
- [8] Yoshizawa H, Israelachvili J. Fundamental mechanisms of interfacial friction II: Stick-slip friction of spherical and chain molecules[J]. J Phys Chem, 1993, 97(43):11 300-11 313.
- [9] Yoshizawa H, You L C, Israelachvili J. Fundamental mechanisms of interfacial friction. 1. Relation between adhesion and friction[J]. J Phys Chem, 1993, 97(16):4 128-4 140.
- [10] Stoll A, Cavalcante M. Stick-slip characteristics of leather / artificial leather[M]//Trapp M, Chen Fang. Automotive buzz, squeak and rattle: Mechanisms, analysis, evaluation and prevention. Amsterdam: Elsevier, 2011: 63-98.
- [11] Rojsatean J, Larpsuriyakul P, Prakymoramas N, et al. Friction characteristics of self-lubricating ABS under different surface roughnesses and temperatures[J]. Tribology International, 2017, 109:229-237.
- [12] Popp K. Vibration control to avoid stick-slip motion[J]. Journal of Vibration & Control, 2004, 10(11):1 585-1 600.