

国家标准

《油气输送用非金属管道完整性管理》

编制说明

(征求意见稿)

中国石油集团工程材料研究院有限公司

2024年4月

《油气输送用非金属管道完整性管理》

（征求意见稿）编制说明

一、工作简况

1、任务来源

根据国标委发〔2023〕63号文件《国家标准化管理委员会关于下达2023年第四批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》，国家标准《油气输送用非金属管道完整性管理》以项目编号20231939-T-469下达。

2、起草单位和工作组成员

本标准由中国石油集团工程材料研究院有限公司负责起草，中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司、中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司及中国海洋石油集团有限公司等参与起草。

按照标准制修订工作程序的要求，成立了本标准起草工作组，工作组由齐国权……等相关领域的专业技术人员组成。齐国权负责标准起草的全过程。

3、工作过程

工作组前期完成了调研、资料收集、标准制定方案编制、标准关键技术指标验证、标准草案起草等工作。

2024年3月，邀请国内相关企业召开启动会暨工作组会，对标准大纲、主要技术条款进行讨论，安排人员分工。标准起草工作组对标准文稿进一步修改完善，形成了本标准征求意见稿。

二、国家标准编制原则和确定国家标准主要内容的论据

管道是石油工业的血脉，在保障我国能源战略安全方面扮演着重要的角色。随着国内油气开发逐步进入中后期，油气资源劣质化较为严重。输送流体中腐蚀性介质（CO₂、H₂S、Cl⁻等高矿化度水）含量不断升高，碳钢类金属管道严重的腐蚀问题已经成为油气田开发及应用的技术瓶颈之一，油气管道腐蚀泄漏引发的安全风险和环保问题日趋严重。尤其是自2015年新“两法”实施以来，油气管道腐蚀泄漏不仅是经济问题，更是安全和环境问题。非金属管道作为后起之秀，由于其优异的耐腐蚀性、可设计性、施工便利及后期维护投资成本低等优势而被广泛应用，目前主要用于油气地面集输及市政燃气输送等领域。相较于碳钢管道，非金属管作为新型管材，且由于其结构复杂和种类多样等原因，失效问题时有发生，尤其是近年来燃气输送用聚乙烯管道失效频发，重特大安全事故引起了党中央国务院高度关注。究其原因，主要是由于非金属管道在建设期及运行期缺乏有效的完整性管理措施。对比目前较为完善的油气长输管道完整性管理体系，非金属管道完整性管理标准在国内尚属空白，迫切需要制定标准，全面提升油气非金属管道的建设质量和运行安全。本项目的制定与实施，有效补充上游地面集输及燃气输送领域完整性管理标准，协同提升油气储运领域完整性管理水平。

本标准基于全生命周期的质量控制和管理，在现行各类非金属管道产品、设计及质量控制标准的基础上，提出了油气输送用非金属管道完整性管理的内容、方法和要求，完整性管理的要素包括管理要素、技术要素和标准要素，完整性管理覆盖油气输送用非金属管道的建设期和运行期。本标准规定了油气输送用非金属管道完整性管理的完整性管理体系、建设期完整性管理、运行期完整性管理、报废处置与重复利用和管理要素。本标准适用于输送油气水介质的陆上非金属管道（玻璃纤维管、柔性复合高压输送管、热塑性塑料内衬玻璃钢复合管、钢骨架增强聚乙烯复合管及聚乙烯管等）的完整性管理，城镇燃气非金属管和海上非金属管参照使用。

三、主要试验（或验证）的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效果

（1）1000h恒压存活评价试验

对现场3种规格在役柔性复合管高压输送管（规格1：涤纶纤维增强，PE80内衬、规格2：芳纶纤维

增强 PEX 内衬柔性复合管和规格 3：芳纶纤维增强 PE-RT 内衬柔性复合管）进行取样，分别进行 1000h 存活试验，验证其是否满足在设计寿命条件下（20 年）安全服役。

试验方法：在标准 SY/T 6794-2010 中第 5.1.3 条产品单体的评定中规定，制造商应对每个产品族中一定数量的产品进行单体试验，以验证它们是否属于该产品族。制造商应设计压力相似或者尺寸规格相似的组别来选择这些单体。进行试验的单体应是在给定的压力等级的一组产品中直径最大的，或给定的尺寸规格的一组产品中压力最高的。每个被选择的产品单体都应进行恒定内压 1000h 的存活试验，以说明产品单体的性能至少与经过全部评定的产品一致。确定 LCL、MPR、MSP 的示意图见图 1。

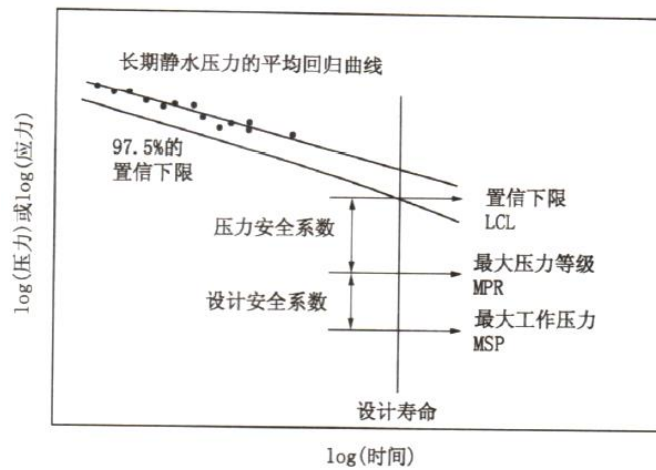


图 1 确定 LCL、MPR、MSP 的示意图

试验参数的确定：

1) 首先确定试验压力 δ_{1000} 。

针对规格 1（涤纶纤维增强，PE80 内衬）柔性复合管，95℃ 水压爆破强度值 10.7MPa；因此，1h 对应的压力值取 95℃ 水压爆破强度值即 10.7MPa。

依据标准 SY/T 6794-2010 中 5.1.2.3 评定程序中确定 LCL。试验选用试样公称压力 2.5MPa，以此确定管材最大工作压力 $MSP=2.5MPa$ 。

置信下限(LCL)表示 97.5%的预测值都位于此值之上。产品族代表置信下限 (LCL_{PFR}) 是通过外推这个回归曲线的置信区间至设计寿命来获得的。产品的设计寿命设定为 20 年。

有以下公式：

$$MSP = MPR \times f_{cyclic} \times f_{Fluid} \quad (1)$$

$$MPR = LCL \times PSF \quad (2)$$

其中，相关系数取值如下：

压力安全系数缺省 $PSF=0.67$ ；

循环工作折减系数 $f_{cyclic}=1$ ；

流体折减系数 $f_{Fluid}=1$ ；

由式 1 和式 2 可以计算 20 年设计寿命的 LCL：

$$LCL_{规格1} = \frac{MSP}{PSF \times f_{Fluid} \times f_{cyclic}} = \frac{2.5}{0.67 \times 1 \times 1} = 3.73MPa$$

同理，针对规格 2（芳纶纤维增强 PEX 内衬柔性复合管）：

$$LCL_{规格2} = \frac{MSP}{PSF \times f_{Fluid} \times f_{cyclic}} = \frac{4}{0.67 \times 1 \times 1} = 5.97MPa$$

针对规格 3（芳纶纤维增强 PE-RT 内衬柔性复合管），为了进一步研究该类柔性复合管在高温下长期服役性能，验证更苛刻工况下该类产品的适用性及安全性，引入 f_{Fluid} （流体折减系数）为 0.67，提高工作

内压。

$$LCL_{\text{规格3}} = \frac{MSP}{PSF \times f_{\text{Fluid}} \times f_{\text{cyclic}}} = \frac{4}{0.67 \times 1 \times 0.67} = 8.9\text{MPa}$$

2) 依据 1h 和 20 年寿命时间下对应的压力值 LCL，据此两点进行线性拟合，可以确定直线方程为 $Y = -0.09X + 1.029$ （见图 2），由方程可得 $\delta_{1000} = 5.7\text{MPa}$ 。

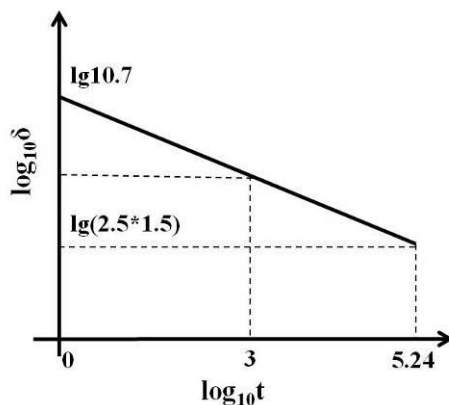


图 2 1000h 存活试验压力值确定

3) 试验结果：依据以上试验方法，评价了 3 种规格的柔性复合管 1000h 恒压存活性能，试验结果见表 1。

规格 1：涤纶纤维增强 PE80 内衬柔性复合管（DN100 PN2.5MPa）1000h 恒压存活试验条件： $\delta_{1000} = 5.7\text{MPa}$ ，温度 95°C 。选取的 2 根样品分别于 10h、95h 失效。结果表明该涤纶纤维增强柔性复合管未能通过 1000h 存活试验。

规格 2：芳纶纤维增强 PEX 内衬层柔性复合管（DN100 PN4MPa）1000h 恒压存活试验条件： $\delta_{1000} = 7.8\text{MPa}$ ，温度 95°C 。选取的 2 根样品试验结果为：1 根通过，1 根未通过（试验时间 836h）。

规格 3：芳纶纤维增强 PE-RT 内衬柔性复合管（DN100 PN4MPa）1000h 恒压存活试验条件： $\delta_{1000} = 7.8\text{MPa}$ ，温度 95°C 。选取的 2 根样品全部通过存活试验。

结果表明，规格 1 和规格 2 柔性复合管高压输送管在后期运行过程中有较大失效的风险，应采取降级使用或逐年跟踪评价方式进行控制，而规格 3 的柔性复合高压输送管则在设计压力及温度条件下长期安全运行。

表 1 1000h 恒压存活评价试验结果

试验规格	公称压力 /MPa	试验压力 /MPa	试验结果
规格 1	2.5	5.7	分别于 10h、95h 失效
规格 2	4	7.8	1 根存活，1 根于 836h 失效
规格 3	4	7.8	通过

(2) 超声相控阵检测实验研究

对预制缺陷的试样进行了超声相控阵适用性评估，明确了最小分辨尺寸为 $\phi 2\text{mm}$ ，见图 3。对模拟现场缺陷的试样进行了缺陷识别能力分析，明确了该技术用于现场的可行性，能够通过底波的变化和位移，分辨是否分层信号产生，见图 4。

室内验证结果表明，超声相控阵检测实验研究可用于含缺陷的玻璃钢管检测，精度可达 $\phi 2\text{mm}$ 。识别类型包括管体分层、裂纹等缺陷。设备便携，且已商业化。2023 年 7 月，在塔里木油田哈得作业区完成了现场验证试验，进一步证明了超声相控阵的适用性。

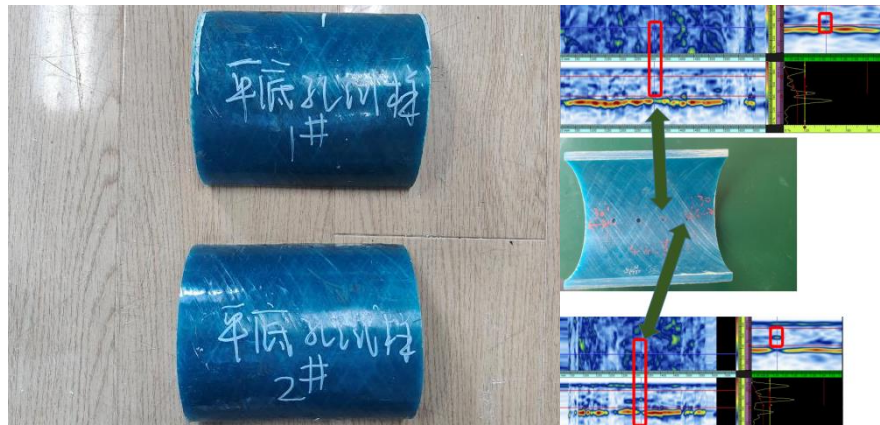


图 3 预制孔状缺陷

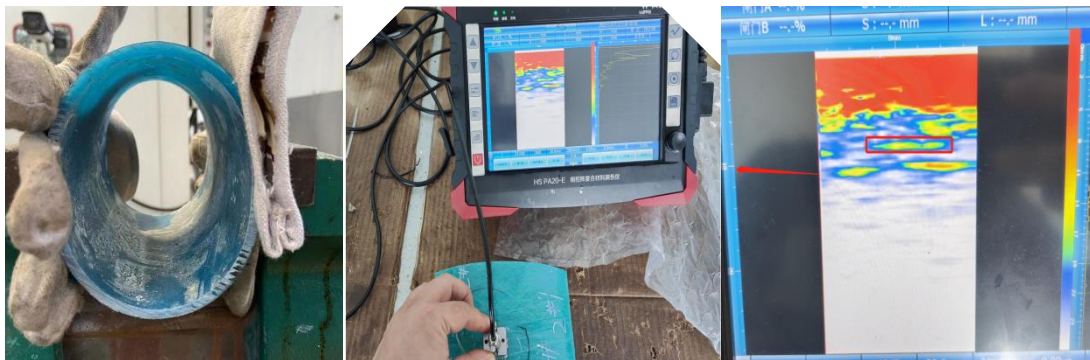


图 4 模拟现场挤压变形失效

(3) 数字射线检测实验研究

项目组完成了基于数字射线（DR）检测设备能力验证及参数调整，经过室内筛选，优选射线机（YXLON-300DS 便携式高频射线机），焦点尺寸 1mm，成像板像素 $139\ \mu\text{m}$ 。进一步探索了缺陷识别能力，完成了预制缺陷检测实验，见图 5。完成了玻璃钢管 O 型圈损伤检测实验，结果表明可明显分辨密封圈滑移变形等情况，见图 6。数字射线试验结果表明，该技术成像较为直观，便于识别。识别类型包括平底孔、刻槽、模拟裂纹等缺陷，以及接头螺纹损伤、内部密封胶圈状况；可以通过数字射线检测中的灰度差异发现玻璃钢管上的变形、损伤、开裂等问题；检测设备便携，适合现场操作，但是存在辐射问题，应做好必要防护。2023 年 7 月，在塔里木油田哈得作业区完成了现场验证试验，进一步证明了数字射线的适用性。

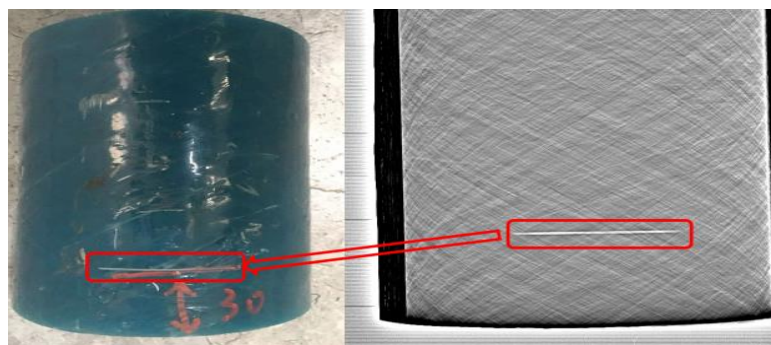


图 5 预制浅表裂纹缺陷

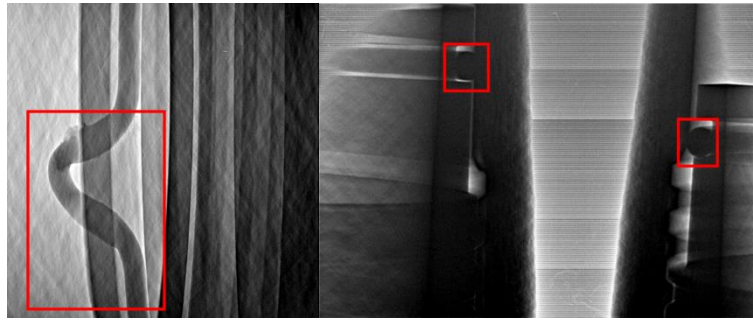


图 6 预制密封圈缺陷

(4) 寿命预测技术研究

方法概述：寿命压力值定义为管材在长期服役后静水压达到公称压力的 1.5 倍时爆裂或泄露至失效时对应的压力值，记为 δ_{end} ，其值大小为 $\delta_{end}=1.5 \times \text{公称压力}$ 。最后通过方程中已知寿命压力值得到对应的时间值，此值即为该批次复合管的寿命时间，如图 7 所示。

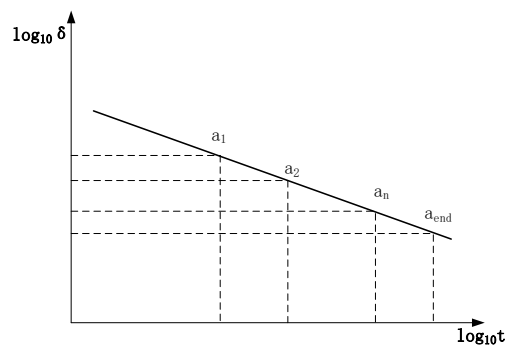


图 7 柔性复合高压输送管寿命预测线性回归图

实例 1：预测 DN100 PN4MPa 柔性复合管在 95℃ 时寿命时间

选取试验所需管材及准备工作。该批次的管子中任意挑选 12 根，2 根为 1 组，分别编号为 1#、2#、3#、4#、5#和 6#；（2）进行静水压。静水压温度、时间及压力值设置见表 2；（3）静水压剩余强度测试。水压爆破试验，所得爆破压力值见表 2；（4）线性回归法进行数值拟合。经过对以静水压时间（t）的对数 $\log_{10}t$ 为 X 轴，爆破压力（ δ ）的对数 $\log_{10} \delta$ 为 Y 轴的数据拟合，结果见图 8，拟合方程为 $y=-0.0973x+1.2816$ ；（5）管材寿命推算。代入管材寿命压力值 $1.5 \times 4\text{MPa}=6\text{MPa}$ ，推算出寿命时间为约 17 年（约 149349h）。

表 2 DN100 PN4MPa 柔性复合管在 95℃ 时试验过程数据

编号	静水压温度 (℃)	静水压时间 (h)	静水压压力值 (MPa)	爆破压力 (MPa)	
1#	95	1	8	19.1	19.2
2#	95	10	8	15.7	15.6
3#	95	100	8	11.9	11.9
4#	95	200	8	11.2	11.3
5#	95	500	8	10.7	10.6
6#	95	1000	8	9.9	10.0

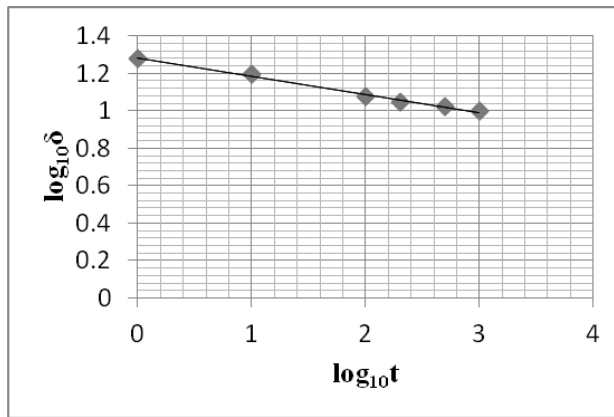


图 8 DN100 PN4MPa 柔性复合管在 95°C 时静水压时间-剩余强度回归曲线图

实例 2：预测 DN100 PN4MPa 柔性复合管在 50°C 时寿命时间

选取试验所需管材及准备工作。该批次的管子中任意挑选 12 根，2 根为 1 组，分别编号为 1#、2#、3#、4#、5#和 6#；（2）进行静水压。静水压温度、时间及压力值设置见表 2；（3）静水压剩余强度测试。水压爆破试验，所得爆破压力值见表 3；（4）线性回归法进行数值拟合。经过对以静水压时间（t）的对数 log₁₀t 为 X 轴，爆破压力（δ）的对数 log₁₀ δ 为 Y 轴的数据拟合，结果见图 9，拟合方程为 $y = -0.1172x + 1.4435$ ；（5）管材寿命推算。代入管材寿命压力值 $1.5 \times 4\text{MPa} = 6\text{MPa}$ ，推算出寿命时间为约 54 年（约 475387h）。

表 3 DN100 PN4MPa 柔性复合管在 50°C 时试验过程数据

编号	静水压温度 (°C)	静水压时间 (h)	静水压压力值 (MPa)	爆破压力 (MPa)	
1#	50	1	8	26.4	26.5
2#	50	10	8	21.8	21.8
3#	50	100	8	17.5	17.6
4#	50	200	8	15.4	15.6
5#	50	500	8	13.2	13.3
6#	50	1000	8	10.9	10.8

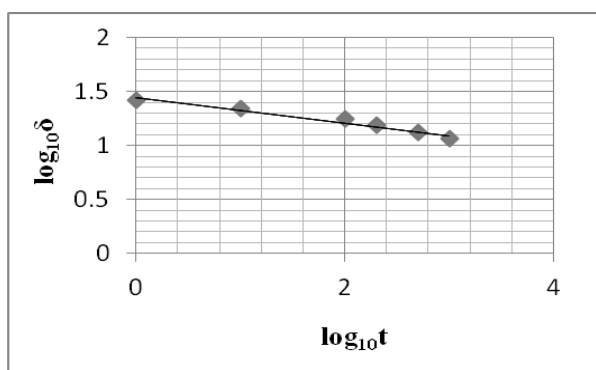


图 9 DN100 PN4MPa 柔性复合管在 50°C 时静水压时间-剩余强度回归曲线图

实例 3：预测 DN100 PN2.5MPa 柔性复合管在 60°C 时寿命时间

（1）选取试验所需管材及准备工作。该批次的管子中任意挑选 12 根，2 根为 1 组，分别编号为 1#、2#、3#、4#、5#和 6#；（2）进行静水压。静水压温度、时间及压力值设置见表 3；（3）静水压剩余强度测试。水压爆破试验，所得爆破压力值见表 4；（4）线性回归法进行数值拟合。经过对以静水压时间（t）的对数 log₁₀t 为 X 轴，爆破压力（δ）的对数 log₁₀ δ 为 Y 轴的数据拟合，结果见图 10，拟合方程为 $y = -0.0875x + 1.032$ ；（5）管材寿命推算。代入管材寿命压力值 $1.5 \times 2.5\text{MPa} = 3.75\text{MPa}$ ，推算出寿命时间为约 19.5

年（约 171369h）。

表 4 DN100 PN2.5MPa 柔性复合管在 50℃时试验过程数据

编号	静水压温度 (℃)	静水压时间 (h)	静水压压力值 (MPa)	爆破压力 (MPa)	
1#	95	1	5	10.7	10.8
2#	95	10	5	8.7	8.5
3#	95	100	5	7.9	7.9
4#	95	200	5	6.8	6.7
5#	95	500	5	6.3	6.4
6#	95	1000	5	5.6	5.7

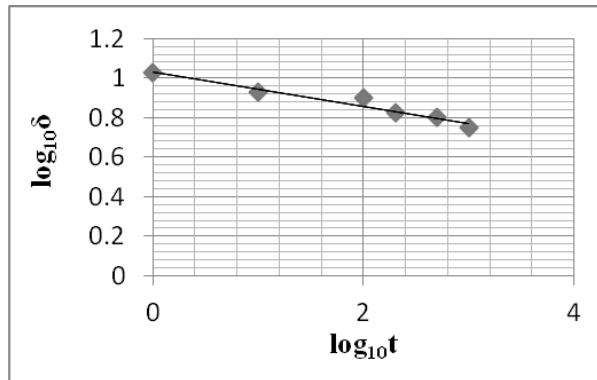


图 10 DN100 PN2.5MPa 柔性复合管在 60°C 时静水压时间-剩余强度回归曲线图

四、采用国际标准和国外先进标准的程度，以及与国际、国外同类标准水平的对比情况，或与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况

当前，国内尚无相关标准。国际上关于油气输送用非金属管道完整性管理的标准仅有 API RP 15SA 《可盘绕式增强塑料管线管完整性管理》，该标准仅涉及单一非金属管产品，且缺乏建设期相关质量控制措施。

本标准覆盖油气集输及市政燃气用各类非金属管道，基于全生命周期创新完整性管理模式，更适应我国国情。

本标准与现行国外同类标准相比，达到了国际先进水平。

五、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准基于全生命周期的质量控制和管理，在现行各类非金属管道产品、设计及质量控制标准的基础上，提出了管道系统建设期、运行期完整性管理技术要求，是对现有的油气输送用钢质管道完整性管理标准（GB 32167-2015）统一配套和有益补充。

另外，本标准通过完整性管理水平提升，有效降低失效率，符合低碳、节能及环保要求。本标准的制定是对油气输送及安全环保等现行法律、法规及政策的有效促进，有助于进一步规范和完善非金属管道选用，保障非金属管道在我国的安全推广应用。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

七、国家标准作为强制性国家标准或推荐性国家标准的建议

建议本标准作为推荐性标准。

八、贯彻国家标准的要求和措施建议（包括组织措施、技术措施、过渡办法等内容）

本标准涉及的产品包括：输送油气水介质的陆上非金属管道（玻璃纤维管线管、柔性复合高压输送管、热塑性塑料内衬玻璃钢复合管、钢骨架增强聚乙烯复合管及聚乙烯管等），城镇燃气非金属管和海上非金属管可参照使用。

本标准涉及的过程包括：油气输送用非金属管道的建设期、运行期和报废处置与重复利用期。

九、废止现行有关标准的建议

无。

十、其他应予说明的事项

无。