

引用格式: 孙立刚,王涛,冷绪林,等.国内外长输管道安全管理对标及差异性分析[J].标准科学,2025(12):56-65.
SUN Ligang,WANG Tao,LENG Xulin,et al. Comparison and Differential Analysis of Domestic and Foreign Pipeline Safety Management Standards [J].Standard Science,2025(12):56-65.

国内外长输管道安全管理对标及差异性分析

孙立刚¹ 王涛^{2,3} 冷绪林¹ 王俊强^{2,3}

[1. 国家管网集团工程技术创新有限公司; 2. 中国特种设备检测研究院;
3. 国家市场监管技术创新中心(油气管道与储存设备安全)]

摘要:【目的】鉴于油气长输管道在国家能源供应安全中的重要性,以及我国长输管道相关法规标准对安全管理和体系建设的要求与欧美国家仍存在一定差距,标准比对旨在明确国内长输管道安全防控技术存在的不足及未来发展方向。【方法】采用文献调研与对标分析的方法,重点分析美国、欧盟、俄罗斯与中国在长输油气管道安全管理中设计系数、地区等级划分、管道选材、施工要求、服役安全管理等关键指标的差异。【结果】研究发现,各个国家或地区的标准设计理念各有特色。欧美强调技术先导和系统协调性,监管机构集中独立;俄罗斯相对保守,极寒气候条件下管道的质量安全要求高;我国标准注重与国际接轨和本土特色化发展,仍存在监管职权分散、标准协调不一的情况。【结论】今后我国应重点解决长输管道安全管理中发现的新问题,优化安全监管体系,从技术上协调升级相关技术标准,推动长输管道安全管理水平的全面提升。

关键词: 长输管道; 安全管理; 法规标准; 对标分析

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2025.12.008

Comparison and Differential Analysis of Domestic and Foreign Pipeline Safety Management Standards

SUN Ligang¹ WANG Tao^{2,3} LENG Xulin¹ WANG Junqiang^{2,3}

(1. Pipe China Engineering Technology Innovation Co., Ltd.;
2. China Special Equipment Inspection and Research Institute; 3. Technology Innovation Center of
Oil and Gas Pipeline and Storage Equipment Safety, State Administration for Market Regulation)

Abstract: [Objective] Given the significance of transmission oil and gas pipeline in national energy supply security and the fact that there is still a certain gap between the requirements for safety management and system construction in China's transmission pipeline regulatory standards and those in Europe and the United States, the comparison of standards aims to clarify the deficiencies in domestic transmission pipeline safety prevention and control technologies and their future development directions. [Methods] Using the methods of literature research and comparison analysis, this paper focuses on the differences of key indicators such as design coefficient, regional classification, pipeline material selection, construction

基金项目: 本文受国家市场监督管理总局特种设备安全与节能技术委员会软科学研究课题“国内外特种设备监察和检验模式对比研究”(项目编号: AJW-2024-06); 国家石油天然气管网集团有限公司科学研究与技术开发项目“压力管道(长输管道)法规体系对标和在役管道安全管理技术研究”(项目编号: J-24-D08)资助。

作者简介: 孙立刚, 本科, 高级工程师, 研究方向为长输管道设计和设计管理咨询。

requirements and service safety management in the safety management of transmission oil and gas pipeline between the United States, the European Union, Russia and China. [Results] The research has found that the design concepts of national standards in various countries have their own characteristics. In Europe and the U.S., emphasis is placed on technological leadership and system coordination, and regulatory authorities are centralized and independent. Russia is relatively conservative, and the quality and safety requirements for pipelines under extremely cold climate conditions are high. China's standards focus on aligning with international standards and have local characteristics. However, there are still problems such as scattered regulatory authorities and inconsistent coordination of standards. [Conclusion] In the future, China should focus on addressing the new problems discovered in the safety management of transmission pipeline, optimize the safety supervision system, coordinate and upgrade relevant technical standards from a technical perspective, and improve the overall safety management level of transmission pipeline.

Keyword: transmission pipeline; safety management; regulatory standards; standard comparison analysis

0 引言

长输管道是贯通油气生产和消费的“大动脉”，具有口径大、压力高、距离长、埋地敷设、沿途环境复杂等特点。如何保障其安全运行，一直是各个国家关注焦点^[1-5]。长输油气管道的本质安全与其设计、施工、运维等环节的标准规范要求息息相关。我国管道技术标准最早大多源自欧美等发达国家相关规范，并在此基础上结合我国国情发展而来。随着管道建设规模和技术发展，我国长输管道标准体系逐步完善，但与全球其他国家最新管道标准相比，在管道设计系数、地区等级划分、管道选材、施工要求、服役安全管理等方面仍存在差异。相较于国外的监管体系和法规体系，国内长输管道的监管涉及多个部门，存在管理职权交叉问题。不同专业标准化委员会制定的标准，其相关指标要求存在重复和不一致问题^[6-8]。通过对比各个国家相关管道标准安全管理要点的最新进展和差异，可以有助于科学制修订我国长输管道安全管理相关技术标准，推动长输管道安全管理水平提升意义重大。

1 长输管道技术标准发展

长输油气管道作为国家能源战略设施，全球各个国家均非常重视其安全管理。相关标准体系以“设计—建造—运营—应急”为链条，发展全

生命周期管理。各国安全管理侧重不同，设计、施工、运维等环节主要安全技术标准清单见表1。美国49CFR限定油气管道安全最低合规要求和完整性管理^[9]；加拿大利用CSA Z662筑牢油气管道全生命周期风险管控；欧盟通过UNECE准则推动成员国统一监管框架，建立跨境管道应急协调与公众信息共享，采用EN ISO 20074强化地质灾害防控；俄罗斯油气管道标准在周期性试压、严寒地区运维和冻土灾害等极端环境适应性方面注重主动防控^[10]；中国强调适合本国国情的油气管道标准体系建设，通过强制性法规标准，如GB 32167，加强管道本体缺陷检测与外部隐患的风险管控。随着中俄管线的投用，俄罗斯GOST体系与中国GB 32167俄文版技术上已建立协同互认。目前，长输油气管道风险与完整性管理已逐步融合，正在逐步向本体安全综合体检、风险精准预警、事故深度溯因、政府渗透监管等方向发展。

2 关键指标差异对比分析

2.1 设计系数

长输油气管道设计普遍采用第三强度（最大剪应力）理论，应力校核与安全评价一般采用第四强度理论，针对地质灾害或海底管道等特殊情况常采用基于应力或可靠性设计，如ISO 13623。相关设计规范通过规定安全系数、材料许用应力、组合应力等要求，来保证结构具有必要的安全裕

表1 各国长输管道主要技术标准清单

| 类别 | 中国 | 美国 | 欧盟 | 加拿大 | 俄罗斯 | ISO |
|------|------------|------------------|----------------|----------------|------------------------|--------------|
| 综合标准 | GB 32167 | 49CFR 192/195 | | | | |
| | GB/T 34275 | ASME B31.8S | DIN EN 14161 | CSA Z662 | CHиП III-42 | ISO 13623 |
| | GB/T 24259 | API 1160 | EN 1594 | CSA Z260 | | ISO 19345 |
| 设计 | GB 50251 | ASME B31.4 | BS EN1594 | CSA Z662 | GOST R 55989 | |
| | GB 50253 | ASME B31.8 | BS 9295 | CSA B51 | СП 36.13330 | ISO 13623 |
| | | API 5L | BS PD 8010-1 | | | |
| 施工验收 | GB 50369 | | | | | |
| | GB 50424 | | | | | |
| | GB 50460 | API RP 1169 | DIN EN 14161 | CSA B149.1 | РД 93.010.00-KTH-114 | ISO 13623 |
| | TSG D7006 | API Std 1104 | DIN EN 14163 | CSA W48 | OP-16.01-60.30.00-KTH- | ISO 13847 |
| | GB/T 31032 | API RP 582 | EN 12732 | | СП 108-34 | |
| | NB/T 47014 | | | | | |
| 运行维护 | GB/T 35068 | ASME PTB-2 | | | СТО Газпром 2-2.3-351 | |
| | GB/T 42834 | ASME PCC-2 | | CSA Z246.1 | СТО TH 001 | ISO 13623 |
| | GB/T 36701 | API 1173 | DIN EN 14161 | CSA Z1006 | OP 07.00-45.21.30-KTH- | ISO/TS 12747 |
| | GB/T 28055 | API 570 | | CSA-ISO 31000 | 004-2 | ISO 20074 |
| | SY/T 7033 | API RP 2200 | | | РД 153-112-014 | |
| | | API Std 1164 | | | | |
| 腐蚀控制 | GB/T 37190 | NACE SP 0106 | | CSA C22.3 NO.6 | | |
| | GB/T 23258 | NACE SP 0169 | DIN 30675-1 | CSA Z245.20 | GOST R 51164 | ISO 15589-1 |
| | GB/T 21447 | NACE SP 0286 | EN 15280 | SERIES | GOST R 59411 | ISO 21809 |
| | GB/T 21448 | NACE SP 0607 | | | | |
| | GB/T 19285 | | | | | |
| 检验检测 | TSG D7003 | API STD 1163 | | | | |
| | GB/T 37368 | API 570 | | | | |
| | GB/T 30582 | NACE RP 0102 | DIN EN 13480-5 | | GOST R 10124 | |
| | GB/T 27699 | NACE SP 0502 | BS 9690.1-2 | CSA Z662 | GOST 18442 | ISO 5579 |
| | GB/T 37369 | NACE SP 0206 | | | GOST 21105 | ISO 19232-1 |
| | NB/T 47013 | NACE SP 0208 | | | GOST R 55045 | |
| | | NACE SP 0204 | | | | |
| 安全评价 | | ASME B31G | | | | |
| | GB/T 27512 | API 579-1 | | | | |
| | GB/T 42033 | NACE SP0204 | BS 7910 | CSA Z662 | ГОСТ 34233 | |
| | GB/T 29167 | NACE SP0206 | BS PD 8010-3 | | ГОСТ 34283 | ISO 16708 |
| | SY/T 6477 | NACE SP0208 | | | | |
| 人员资格 | | NACE SP0502 | | | | |
| | | ASME B31Q | | | | |
| | TSG Z6001 | API 1161 | | | | ISO 24817 |
| | TSG Z6002 | API RP 1120 | DIN EN ISO | CSA W178.2 | STO Gazprom 2-2.3-563 | ISO 14731 |
| | TSG Z8002 | ANSI/ASNT CP-189 | 9606 | | | ISO 9606 |
| | | ASNT ILI-PQ | | | | |

度^[11], 各国长输管道相关规范的设计系数对比见表2。目前, 长输管道一般按地区等级(沿线人口密度)确定设计系数, 高后果区采用加大壁厚、增设阀门等措施提升安全冗余; 欧洲及挪威采用基于可靠性的极限状态与韧性优先应力设计, 如DNV-OS-F101、ISO 13623标准引入“基于应力的设计”, 允许管道在地震、滑坡等变形下塑性延展, 避免脆性断裂; 俄罗斯标准壁厚计算依据抗拉强度, 且考虑材料可靠性系数和钢管用途可靠性系数, 具有更高的安全储备; 中国规定一级一类地区的管道强度设计系数可采用0.80或0.72, 同时通过X80高钢级管材和抗震设计提升地质灾害应对能力, GB/T 34275—2024首次引入最大允许偶然压力(MAIP), 要求强度设计系数大于0.72的输气管道MAIP不应超过1.04倍MAOP。

2.2 地区等级划分

地区等级划分由美国和加拿大主导提出, 主要用于输气管道, 与强度设计系数匹配, 是CFR、ASME、CSA标准规范的核心内容, 采用住户密度划分地区等级; 国际ISO 13623采用人口密度(人/km²), 分级侧重人类活动频率, 适用于人口统计完善的国家, 比北美标准更严格; 澳大利亚AS 2885标准在人口密度基础上, 增加水源地、生态保护区等环境敏感区的独立评级; 我国20世纪70年代参考ASME B31.8在长输管道设计规范中引入地区等

| 表2 长输管道强度设计系数 | | | |
|---------------|----------------------|-------------|-----------------------------|
| 地域划分 | 代表性标准 | 强度设计系数 | 典型应用场景附加要求 |
| 中国 | GB/T 34275 | 0.4 ~ 0.72 | 一、二级地区的学校、医院等人群聚集区, 按三级地区选取 |
| 北美 | ASME B31.8/ B31.4 | 0.4 ~ 0.8 | 人口密度分级管理, 高后果区降至0.5 |
| 欧盟 | ISO 13623 | 0.45 ~ 0.83 | 结合地质风险动态调整 |
| 俄罗斯 | С П 36.13330 | 0.6 ~ 0.9 | 高寒冻土区设计系数下调一级 |

级划分, 同时结合国情, 增加学校、医院等公共场所和新建城区作为三级地区等级, 国内外地区等级划分对比见表3。与国家标准和美国标准不同的是, 俄罗斯未考虑管道沿线人口分布情况, 而是根据管段类型及重要程度进行地区等级划分^[12-13]。

随着城市快速发展, 管道周边人口增长可能导致地区等级升级, 各国处理方式差异较大。ISO 13623中设定人口密度弹性区间, 未超限且可不升级; 美国允许地区等级变化后, 18个月内调整管道最大允许操作压力(MAOP), 若强度试压或适用性评价通过, 可维持原压力, 否则降压或改线; 我国目前标准未做具体要求, 虽可通过改线避让、降

表3 国内外地区等级划分对比

| 中国GB 50251/GB 50253 | | 国际ISO 13623 | | 美国ASME B31.8 | | 俄罗斯С П 36.13330 | |
|---------------------|------------------------------|-------------|--------------------------------------|--------------|---------------------|-----------------|---------------------------|
| 等级 | 等级说明 | 等级 | 等级说明 | 等级 | 等级说明 | 等级 | 等级说明 |
| 一级 | ≤15户 | 1-2级 | 无永久居住点, <50人/km ² | 一级 | ≤10户 | B级 | 配气站等附近河流穿越管段 |
| 二级 | 16 ~ 100户 | 3级 | 50~249人/km ² | 二级 | 11 ~ 46户 | I 级 | 输油泵站的原油管道和成品油管道等 |
| 三级 | ≥100户, 含市郊、商业、工业、规划发展区等人口稠密区 | 4级 | ≥250人/km ² 且未达到5级的住宅区、工业区 | 三级 | >46户 | II 级 | 天然气、原油和成品油管道在III类沼泽地的穿越管段 |
| 四级 | 四层及以上楼房普遍集中、交通频繁、地下设施多区段 | 5级 | 多层建筑集中、交通频繁、地下设施多区域 | 四级 | 多层建筑密集、交通密集、地下设施多区域 | III-IV 级 | 上述级别地区所述情况以外管段 |

压等手段解决,但这些方法实施难度大^[14]。

2.3 管道选材

不同国家对长输油气管道选材要求不同,主要体现在材料类型、化学成分、性能指标、焊接匹配性、服役环境特殊要求等方面,指标对比如表4所示。ASME体系的API 5L在欧美认可度高,管材韧性计算要求最严,管道工程国际协作项目可优选ISO 13623与ISO 3183组合,更为灵活;俄罗斯长输管道寒区环境低温性能要求全球最严^[15],要求-60℃冲击试验,寒区管材需添加镍、钼等合金元素;中国管道建设项目要求优先满足强制性国标GB 50251和GB 50253要求,GB/T 34275作为长输管道安全管理基础标准增加了新的技术要求,尤其对X70/X80高钢级管道S、P杂质控制、最高碳当量、DWTT试验、CVN韧性指标等更为严格,

如X80钢管焊缝及热影响区CVN冲击吸收能量单个值不应小于60 J,平均值不应小于80 J,管体横向DWTT剪切面积单个值不应小于70%,平均值不应小于85%。各国标准在管材杂质控制(中>俄>美>欧)、韧性门槛(美>中>俄>欧)、特殊环境覆盖(中俄>欧美)及高钢级灵活性(美>欧>中>俄)上差异显著,选材需综合安全、成本与使用环境灵活选用。

2.4 施工要求

长输管道施工方面,不同国家要求不同,主要体现在材料检验、管沟开挖、坡口加工、管口组对、焊接要求、无损检测、回填处理、压力试验、腐蚀防护和阴极保护等方面,各国具有地域特色,指标对比见表5。美国ASME体系成熟,更注重工程效率;欧盟EN 14161/EN 12732体现绿色低碳理

表4 国内外长输管道选材指标对比分析

| 对比内容 | 中国 | 欧盟/ISO | 美国 | 俄罗斯 |
|------|--|---|---|--|
| 标准依据 | GB 50251/GB 50253 GB/T 34275 | ISO 13623 | ASME B31.8 ASME B31.4 | GOST R 55989 ГОСТ 550 GOST R 52079 |
| 钢级范围 | GB/T 9711 PSL2钢管, L245–L555 | ISO 3183, 覆盖 L245–L690 | API 5L, 钢级Gr.B、 X42–X120 | ГОСТ 20295、GOST R 52079, 钢级K34~K65 |
| 韧性指标 | 环境温度、材料等级不同要求 有差异,输气高于输油,高钢 级厚壁管和DN500以上输气管道 要求DWTT试验 | 要求材料足够韧性防脆 断 | 需基于管径、压力、温度 计算CVN,输气管道需满 足动态断裂止裂 | 寒区管材要求-60℃冲击 试验,ГОСТ标准中低温 韧性指标全球最严 |
| 化学成分 | 严格控制S、P含量(≤0.015%), X70/X80要求S(≤0.005%)、 P(≤0.015%),碳当量有上 限要求(CEIIW≤0.43%, CEpcm≤0.25%),严于API 5L | 执行ISO 3183规定成分 范围,可优化但需满足 力学性能。 | 限定碳当量,控制焊接 性,高钢级要求更严 | 特殊环境硫含量 ≤0.002%,并通过 ГОСТ腐蚀测试,碳当 量有上限,要求碳当量 (CEIIW≤0.44%) |
| 尺寸公差 | 规定外径、壁厚、椭圆度公 差,壁厚负偏差≤12.5%,椭圆 度≤1.0% | 规定详细公差,如壁厚 负偏差≤12.5%,椭圆 度≤1.0% | 与ISO 3183一致,壁厚负 偏差控制严,壁厚负偏差 ≤10% | 壁厚偏差按ГОСТ 19903 选取,椭圆度≤1.0% |
| 特殊要求 | 酸性环境要求HIC、SSC试验; GB/T 34275增加低温附加冲击功 要求,冻土/地震区管材韧性及 变形能力要求更严 | 服役条件分级,C级为 酸性/低温环境,抗SSC 按ISO 15156、HIC按 ISO 3183执行 | 酸性环境按NACE MR0175/ISO 15156执行; 低温附加冲击功要求 | 寒区环境低温性能要 求严苛,管材需添加 镍、钼等合金元素,如 09Г2С对应16Mn |
| 焊接匹配 | 要求焊材与母材强度匹配,严 格评定焊接工艺NB/T 47014 | 焊接程序ISO 15614, 保证接头性能 | 要求焊接工艺匹配性,需 通过焊接工艺评定WPS/ PQR | 要求材料低屈强比、精 细化热输入控制、严苛 的低温韧性保障 |

表5 国内外长输管道施工验收要求对比

| 对比内容 | GB 50369 GB/T 34275 | ASME B31.8 ASME B31.4 | EN 14161 EN 12732 | С П 36.13330 |
|------|---|--|--|--|
| 材料检验 | 质疑时实物复验, 小缺陷允许修磨补焊, 凹坑深度>2%管径切除, 低温矫圆加热至50~100℃ | 复验批次抽样10%, 小缺陷允许修磨补焊, 凹坑深度>2%管径切除, 低温矫圆无要求 | 强制要求第三方实验室复验, 尤其低温冲击韧性, 凹坑深度>1.5%管径切除, 禁止冷矫圆 | 检验更严, 要求复验制管各环节的监控记录, 凹坑深度>1%管径切除, 低温矫圆加热至50~100℃ |
| 管沟开挖 | 管沟底宽不小于钢管外径加0.5 m, 碎石或冻土地段管沟应超挖300 mm, 并铺垫 ≥ 300 mm厚细土垫层 | 管沟底宽为管径加1.0 m, 且在沼泽地区需额外增加0.5 m; 岩石段需超挖300 mm, 回填级配砂石缓冲 | 强调斜坡稳定性, 规定在砂质土壤中沟壁坡度不大于30°, 黏性土壤中不大于45° | 根据地质风险等级(工作条件系数0.6~0.9)动态调整管沟深度; 冻土区施工用热棒保温防冻 |
| 坡口加工 | 氧炔焰切割坡口要求打磨去除氧化皮, 坡口角度控制在 $30^\circ \pm 2^\circ$ | 机械加工坡口, 角度公差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内 | 坡口表面粗糙度 $Ra \leq 12.5 \mu m$, 避免微观缺陷导致应力集中 | ГОСТ 20295要求-20℃以下加工坡口时, 须预热至50℃以上, 防开裂 |
| 管口组对 | 坡口角度公差 $\pm 2^\circ$, 错边量 ≤ 3.0 mm或壁厚的1/8(取小值), 组对间隙(2.0 ± 0.5) mm | 坡口角度公差 $\pm 1^\circ$, 错边量 ≤ 3.0 mm, 组对间隙(1.8 ± 0.3) mm | 坡口角度公差 $\pm 1^\circ$, 错边量 ≤ 3.0 mm或1%管径较小值, 组对间隙(2.0 ± 0.3) mm | 坡口角度公差 $\pm 3^\circ$, 错边量 ≤ 2.0 mm, 组对间隙允许1.5~3.0 mm范围 |
| 焊接要求 | -5℃以上施工, 按SY/T 4109进行评定, 覆盖所有母材类型和焊接位置, 允许咬边深度 ≤ 0.8 mm, 允许输油管道补焊修复, 输气管道则要求直接切除 | -10℃以上施工, 增加冲击韧性试验, 要求-20℃下夏比冲击功 ≥ 27 J, 允许的咬边深度 ≤ 0.8 mm, 允许补焊修复不超过2次 | 无湿度限制, 模拟管道服役温度进行评定, 允许内咬边深度 ≤ 1 mm或10%壁厚较小值 | -20℃需预热, ГОСТ P 55943规定焊材须与管材同源, 即同一钢厂生产的配套焊丝焊剂, 严禁<5℃寒冷地区进行焊缝修复 |
| 无损检测 | 输气管道射线+超声100%检测, 输油管道为30%射线检测, 四级地区100%检测+20%射线复验 | 检测比例与地区等级相关, 一级地区抽检5%, 四级地区达20% | 100%超声或射线检测与100%磁粉或渗透表面检测 | 前100道焊口100%射线+超声检测, 后续每100道焊口, 射线检测 $\geq 20\%$ |
| 回填处理 | 进出站段每300 mm分层夯实, 沼泽地段应采取稳管措施 | 管顶300 mm内须人工回填细土, 每层 ≤ 150 mm逐层夯实, 机械回填仅允许管顶0.6 m以上使用 | 洪水易发区管沟回填后压载沙袋 | 自然沉降40 d |
| 压力试验 | 水压或气压, 与地区等级相关, 试验压力1.1~1.5倍设计压力, 分段试压, 稳压时间水压4 h/气压24 h, 管段长度 ≤ 30 km(水)或 ≤ 18 km(气) | 水压或气压, 与地区等级相关, 试验压力1.25~1.5倍设计压力, 稳压时间水压4 h/气压8~24 h, 按地区等级分段试验 | 推荐水压, 气压试验需定量风险评估, 试验压力1.25~1.5倍设计压力, 稳压时间水压4 h/气压12 h, 分段无要求 | 强制要求水压, 禁止气压, 试验压力 ≥ 1.43 倍设计压力, 稳压时间水压12~24 h, 管段长度10~20 km(严控高寒区, 应变监测) |
| 腐蚀防护 | 三层聚乙烯(3PE)结构, 厚度 ≥ 2.5 mm | 沙漠地区推广熔结环氧粉末(FBE)涂层厚度350~500 μm | 关注环保性, 要求涂层材料通过ROHS检测(重金属含量 ≤ 100 ppm), 有内腐蚀裕量要求 | 聚合物复合涂层, 在-60℃条件下仍保持柔韧性 |
| 阴极保护 | 牺牲阳极法(镁合金)和强制电流法并行, 保护电位维持在-0.85~-1.25 V(CSE) | NACE RP0169按土壤电阻率分级: $>50 \Omega \cdot m$ 地区用强制电流, $<50 \Omega \cdot m$ 用牺牲阳极 | EN 12954创新性地引入电流密度闭环控制, 通过智能电位采集器实时调节输出 | 要求保护电流密度达5 mA/m ² (较国际通用值高67%), 并在绝缘接头处安装极化电池防止杂散电流 |

念,在环保涂层、数字射线、电流密度控制方面领先,局部稳定性要求高,如冷安装时壁厚要求高出2~3 mm,增加了内腐蚀裕量考虑,对输送含CO₂或H₂S酸性介质的管道尤为关键;俄罗斯CΠ标准体系安全裕度最大,壁厚按抗拉强度计算^[16],试压时间12 h,禁止气体试压,管沟开挖深度根据工作条件系数动态调整,值得借鉴;中国以GB 50369标准为核心,融合美俄技术元素,在焊接检测比例、地区等级划分上较严格,同时细化了沉管下沟、直接铺管穿越等复杂工程^[17-18]。

2.4.1 焊接与无损检测

不同国家长输油气管道焊接技术上差异体现在焊接方法选择、自动化程度、工艺标准及地形适应性等方面。欧美发达国家以机器人自动焊为主导,发展中国家以半自动焊为主,技术难点集中于窄坡口自动焊机器人、高纯度高等级钢焊材等,以提高焊接质量和效率^[19]。主要焊接标准指标对比见表6,API 1104认可度高,全球广泛采用,技术要求主要在焊接工艺评定和无损检测验收,对环焊缝缺陷分类定量化验收准则较为全面,如连续12

英寸焊缝中未焊透累计长度不得超过8%,并对烧穿、夹渣等缺陷的影像黑度与尺寸关系作出严格限制。欧盟标准与ISO 13623协同一致,建立了完整的焊接工艺评定规则体系(WPAR),对返修焊接规程提出了明确的技术要求,尤其是低温焊接环境下的工艺控制专项条款。澳大利亚标准AS/NZS 2885.2主要针对壁厚≥3.2 mm的碳钢和碳锰钢管道,不适用于耐腐蚀合金和壁厚<3.2 mm的薄壁管,对焊接过程最低预热温度、层间温度控制及焊后缓冷措施做了规定。俄罗斯标准CHиΠ III-42-80年代较早,在部分国家仍然使用,焊接质量采用固定缺陷容许百分比,如裂纹在300 mm焊缝内累计≤8%,注重工艺过程检查。GB/T 34275—2024为我国最新标准,并提出了数字化无损检测、自动化焊接等新要求,焊接质量在焊缝等级划分和合格指标方面更为严格,适用于油气长输管道新建项目或高钢级管道。

2.4.2 压力试验

压力试验方面,主要包括强度试验和密封性试验,涉及压力试验介质、压力水平、稳压时间、

表6 国内外焊接指标对比分析

| 对比内容 | GB/T 31032 SY/T 4103 | API 1104 | EN 14163 BS 4515 | С Н и Π III-42-80 |
|-------|---|--|--|---|
| 适用范围 | 线路和站场管道 | 线路和站场管道 | 线路和站场管道 | 线路管道 |
| 焊接方法 | 焊条电弧焊、熔化极/非熔化极气体保护焊、气焊、闪光对焊等 | 埋弧焊、气体保护焊、闪光堆焊等 | 双相不锈钢禁止使用焊条电弧焊 | 焊条电弧焊(低氢焊条)、埋弧焊、气体保护焊等 |
| 工艺评定 | WPS 焊接方法变更、预热温度降低>50℃需重新进行,拉伸+弯曲试验,180°弯曲裂纹≤3 mm | WPS+机械试验 母材组别、方法/设备/焊材变更等需要重新进行,酸性环境增加硬度测试,HV10≤349(酸性) | WPAR全面 热输入>1.5 kJ/mm,单道焊变为多道焊需重新进行,不锈钢可-20℃冲击豁免,弯曲无裂纹 | 工艺验证 环境温度<30℃、预热温度降低>20℃需重新进行,-40℃环境需在低温舱焊接,-60℃冲击均值≥50J |
| 破坏性试验 | 拉伸≥母材抗拉强度 | 刻槽锤断试验单个气孔≤1.6 mm且累积面积≤2% | -20℃冲击试验,拉伸≥95%母材抗拉强度 | 低温冲击(-60℃)、全截面拉伸≥95%母材抗拉强度 |
| 焊工资格 | 资格证、上岗证 | 单项、全项资格 | EN 287-1认证 | 高寒地区(-40℃)需额外极地操作认证 |

管段长度及环境特殊要求等内容,输油和输气管道要求不同。压力试验一般为水压或气压,优先推荐水压,欧美和中国标准在一、二级地区或低风险区允许气压,俄罗斯标准禁止采用气压试验,欧盟环保要求高,试压水无污染添加剂并排放前检测;中、美、欧试验压力规定一般为设计压力的1.25~1.5倍($\leq 90\%$ SMYS)^[20],地区分级不同,要求不一,俄罗斯标准试验压力要求最高,大于1.43倍设计压力,接近管材最小要求的屈服强度(SMYS),高寒冻土区额外增加10%压力裕量,确保低温韧性;稳压时间俄罗斯要求最长,水压稳压 ≥ 12 h(常规)或 ≥ 24 h(高寒区),其他国家一般为水压4 h,气压8~24 h;试验管段一般按地区等级执行,水压段长 ≤ 30 km,气压段长 ≤ 18 km,俄罗斯标准要求更短,水压段长 ≤ 10 km(高寒区)或 ≤ 20 km(常规),此外高寒/冻土地区,俄罗斯标准要求应变监测,其他国家要求采取防冻措施。

2.4.3 腐蚀控制

长输管道腐蚀控制是保障管道安全最重要的环节,涉及防腐材料、施工工艺、阴极保护等内容,各个国家标准要求各有特色。欧美注重设计优化,API RP 1102和ISO 16440反对钢套管穿越道路,认为套管会屏蔽阴极保护电流加速腐蚀,NACE SP 0169规定新建管道外防腐层绝缘电阻 $\geq 0.01 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}^2$,阴极保护电位 -850 mV CSE (通电电位)或 -950 mV CSE (断电电位)双参数控制,测试桩每1 km设1处,且牺牲阳极间距不超过300 m,输送介质含 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 时采用13Cr马氏体不锈钢或双相不锈钢内衬管内防腐,并测试抗氢致开裂性能;欧盟以ISO 15589-1(阴极保护)和PD 8010-1(管道系统操作规范)为代表,采用防腐层分级与阴极保护双参数控制,轻度腐蚀区采用厚度 $\geq 400 \mu\text{m}$ 环氧煤沥青,海洋或工业区采用厚度 $\geq 3 \text{ mm}$ 聚丙烯增强毡或厚度 $\geq 500 \mu\text{m}$ 熔结环氧粉末;中俄重视防护强度,俄罗斯标准GOST R 55910和SP 36.13330注重弯头、三通等应力集中部位管件防腐,要求增加壁厚20%或采用内衬不锈钢,极寒地区防腐层要求采用耐 -60°C 低温的聚氨酯或聚乙烯

改性材料,阴极保护采用带状镁阳极,电位 -1.75 V CSE ,埋深低于冻土线且回填砂砾层;我国长输管道采用涂层+阴极保护联合防护,补口处施工质量要求剥离强度不得低于 50 N/cm ,且采用电火花检漏,新建管道阴极保护断电电位严格控制在 $-850 \text{ mV} \sim -1200 \text{ mV}$ 之间,高含硫管道需选用双组分环氧树脂内涂层,沼泽、盐渍土等特殊区段,标准要求“一段一策”的防腐设计。

2.5 服役安全管理

长输油气管道服役环节的安全管理,更加侧重风控控制,体现在高后果区管理、定期检验、完整性管理、维修维护、应急抢险等方面,各个国家要求不一。

在高后果区管理方面,美国标准49CFR 192/195、中国标准GB 32167更加侧重人员密集型和环境敏感型高后果区动态管理,强制要求每18个月识别更新,中国法规更加强管道保护安全间距控制,美国强制推行“811挖掘前呼叫系统”,减少施工破坏风险;欧盟和俄罗斯未采用高后果区管理思路,EN 16348标准要求基于全生命周期风险分析,如地质灾害、腐蚀速率,注重自然保护区、跨境河流等环境敏感区风险防控,欧盟风险执行ALARP原则,不可接受风险线 $\geq 1^{-3}/\text{年}$,可忽略风险线 $\leq 10^{-6}/\text{年}$,俄罗斯采用输送介质与管段位置等级双维度风险控制,主要从设计上防控,尤其是地震带和冻土区。

在定期检验和完整性管理方面,定期检验均强调基于风险的检验,依据风险调整检验周期^[21-23]。美国49CFR 192/195推行完整性管理,强制要求内检测周期,高后果区管道 ≤ 7 年,检测方法以内检测(ILI)为主,结合压力试验,监管由PHMSA联邦监管,检验由运营商或第三方执行^[24-25],并符合API 1163资质;欧盟无检验周期要求,按剩余寿命的一半或风险评估结果确定,由成员国指定机构监管,如德国DVGW,检验机构需通过EN ISO/IEC 17020认证^[26];俄罗斯ГОСТ P 55989要求投用2年内完成技术状态评估,定期检验周期 ≤ 5 年,腐蚀高风险区缩短至3年,检验内容覆盖壁厚测量、阴极保护

评估、地质灾害监测等,强制由国家授权技术监督机构实施,如Rostekhnadzor(俄罗斯联邦技术监督局),人员需持联邦级资格证;中国监管采用行政准入+周期硬约束,TSG D7003要求投产后3年内完成首次定期检验,后续按检验方法、结果综合确定,检验周期为3~9年,检测方法包括一般性年检检查和内/外专业性检验,检验机构和人员由市场监管总局核准,机构须持有特种设备检验核准证(DD1/DD3类),2015年国家能源局开始推荐长输管道按GB 32167执行完整性管理。

在维修维护与应急抢险方面,各个国家根据管道沿途环境制定专项策略。欧美注重在标准方面强化全生命周期风险管理和数字化应急平台,如美国油气管道完整性管理的全覆盖,要求定期维修维护,PHMSA对强制维修设备定期检验,人员培训认证,强调信息化与快速响应,ICS事故指挥系统统一调度,地方政府联动,响应时效无固定阈值;欧盟关注风险管控与环保,尤其是人口密集区、生态敏感区的修复要求,人员和设备要求体系认证;俄罗斯标准规定了高寒/沼泽等特殊环境的修复和防护,维抢修设备应适应极寒环境,人员须经过专项培训;中国注重定期缺陷修复、第三方损坏/地质灾害/腐蚀风险控制^[27],应急抢险实施三级预警,按泄漏量、中断时间、社会影响划分,制定高后果区专项应急预案,且推行国际互认,如中俄管线推行“72小时抢修”标准,依托模块化集装设备、属地化抢修中心实现快速响应。

3 总结与发展建议

3.1 总结

通过对比分析全球代表性国家长输油气管道主要标准规范的安全管理关键指标要求,得出如下结论:

(1) 标准设计理念各有特色。美国标准强调技术先导性,设计理念基于全生命周期成本优化,允许在风险可控条件下采用更高设计系数,全球应用广泛;欧盟标准注重全系统协调理念,如管道

与周边环境协同安全;俄罗斯标准采用保守型安全理念,如设计壁厚选用抗拉强度为计算基础,壁厚裕量大。中国标准在美国标准基础上本土化,兼顾安全与经济性。在材料选择、设计方法上保持与美国标准兼容性,如基于屈服强度计算壁厚,但试压程序、高强钢应用上吸收俄罗斯标准的严格性。

(2) 安全管理水平差异较大。欧美监管机构独立,信息共享管理完善,认可度高;俄罗斯标准宽松,但安全裕量大,技术更新滞后;中国管道安全监管存在责权分散、不清现象,标准间指标要求松严不一,数据共享机制仍需完善。

3.2 发展建议

针对未来我国长输油气管道相关标准体系建设发展,建议如下:

(1) 优化监管体系。借鉴PHMSA和NEB,设立独立监管机构,整合分散职能。构建统一的数据共享平台和事故数据库、跨国项目协助和技术认证、联防联控机制等,构建“全生命周期智能监管”体系,提升高后果区防控、隐患排查治理、第三方施工管理、灾害应急救援等相关能力。

(2) 解决安全管理新问题。针对长输管道面临的新安全管理问题,如地区等级升级后的安全管理、高后果区和安全隐患增长管理、长期新建或搁置未投产管道安全、超过40年的老龄化管道安全等。目前,国内相关标准仍无针对性的安全管理要求。

(3) 协同升级技术标准。充分吸收欧美等国家或地区技术与标准优点,如动态风险评价、多源融合监测技术(预埋式传感器覆盖率 $\geq 50\%$)、GIS全域数据库、氢醇氨新能源输送安全、管道与环境协同发展(腐蚀防护与碳排放挂钩)、低温高寒地区和老龄化管道的压力试验安全等,制定并完善适用于我国国情的相关技术标准。

(4) 改革机构及人员资质。长输油气管道法定检验与完整性管理的进一步扩展,带动上游油气田和下游燃气的安全管理升级。完善管道检验、检测、焊接、防腐等相关机构及人员的能力考核机制,在市场准入基础上,建立“能力优先”的承包

商评估机制,降低机构间的恶性竞争。

4 结语

通过对比分析各个国家长输管道标准中安全管理的相关指标要求,明确了不同地域国家标准

安全管理新要求和发展动向,以及我国存在的不足和未来重点发展方向。下一步,我国应重点解决长输管道存在的安全管理新问题,优化安全监管体系,从技术上协调升级相关技术标准,改革管道安全管理相关机构及人员资质,推动长输管道安全管理水平的全面提升。

参考文献

- [1] 王震,孔盈皓.油气管网服务新型能源体系建设的创新路径[J].油气储运,2024,43(10):1081-1088.
- [2] 姚伟.油气管道安全管理的思考与探索[J].油气储运,2014,33(11):1145-1151.
- [3] WU Y Y,GAO L,CHAI J, et al. Overview of Health-Monitoring Technology for Long-Distance Transportation Pipeline and Progress in DAS Technology Application[J]. Sensors, 2024, 24(2):413.
- [4] HUO H Y, LI Y, JI L K. Development and Applications of Pipeline Steel in Long-Distance Gas Pipeline of China[M]. Energy Materials 2014, 2015.
- [5] 蔡亮.中国和加拿大长输管道安全管理体系对比分析[J].石油和化工设备,2022,25(12):136-138.
- [6] 应未,常通,李贵荣,等.国外长输管道安全管理技术现状综述[J].石油工业技术监督,2022,38(06):44-48.
- [7] 蔡婷,蔡亮,姚玢,等.美国油气管道监管法规标准体系研究[J].全面腐蚀控制,2017,31(8):4-8.
- [8] 税碧垣,杨宝玲.国内外管道企业标准体系建设现状与思考[J].油气储运,2012,31(5):326-329.
- [9] 赵光志,蔡亮,苏彦杰.美国长输管道安全法规标准体系研究[J].全面腐蚀控制,2019,33(2):1-4.
- [10] 刘悦,冯庆善,王学力,等.国内外油气管道设计标准的比较[J].油气储运,2012,31(1):45-47.
- [11] 解玉鑫.油气输送管道强度设计系数的优化[J].油气田地面工程,2018,37(3):44-46.
- [12] 刘江波,孟虎林,于方涌,等.中美俄长输管道设计标准关键问题探讨[J].石油化工自动化,2020,56(2):24-27.
- [13] 鲁玉坤,屠俊红.关于国内外长输管道建设及设计标准的研究与思考[J].中国标准化,2022(17):120-123.
- [14] 单克,帅健.地区等级升级的天然气管道风险管理研究[J].中国安全科学学报,2016,26(11):145-150.
- [15] 陆潇,茹克建,唐云飞,等.中国和俄罗斯管道壁厚计算方法差异研究[J].油气田地面工程,2020,39(2):17-21.
- [16] 王品贤,夏俏健,牛志勇,等.国内外管道设计标准中管道壁厚计算方法差异[J].石油化工设备,2020,49(2):53-57.
- [17] 张一,马亮,唐云飞,等.国外长输管道工程阀室设计推荐做法简介[J].石油和化工设备,2019,22(6):25-27.
- [18] 鲁玉坤,屠俊红.关于国内外长输管道建设及设计标准的研究与思考[J].中国标准化,2022(17):120-123.
- [19] 陈杉,周少坤,张新军,等.我国压力管道元件制造行业发展及安全监管现状[J].中国特种设备安全,2024,40(S2):46-51.
- [20] 郭昱,顾晓婷,王立航,等.GB 50251与ASME B31.8中输气管道试压规定的对比[J].油气储运,2017(5):553-557.
- [21] 王俊强,何仁洋,刘哲,等.中美油气管道完整性管理规范发展现状及差异[J].油气储运,2018,37(1):6-14.
- [22] 王振声.油气储运资产完整性管理一体化标准体系建设与思考[J].油气储运,2022,41(4):372-380.
- [23] 何旭鸢,刘庆亮.管道完整性管理标准的对比分析与启示[J].标准科学,2022(2):78-82.
- [24] 孙增芹,郑程程.加拿大油气管道安全监管法律制度考察与镜鉴[J].油气储运,2025,44(4):460-472.
- [25] 孙增芹,李梦瑶.美加油气管道安全监管法律制度考察及对中国的启示[J].中国石油大学学报(社会科学版),2024,40(2):59-66.
- [26] 周大伟.英国油气行业的安全监管[J].中国机构改革与管理,2020(4):53.
- [27] 孔丹丹.浅谈天然气长输管网安全运营中存在的问题及对策措施[J].石化技术,2023,30(12):109-111.