

# 特种设备安全与节能技术进展三

——2016年全国特种设备安全与节能学术大会论文集(上)

沈功田 李光海 吴 莱 主 编  
林树青 主 审



 中国质检出版社



# 特种设备安全与节能技术进展三

——2016年全国特种设备安全与节能学术会议论文集

(上)

沈功田 李光海 吴 茉 主编  
林树青 主审

中国质检出版社

北 京

## 图书在版编目(CIP)数据

特种设备安全与节能技术进展三, 2016 年全国特种设备安全与节能学术会议论文集(上) / 沈功田, 李光海, 吴茱主编. —北京: 中国质检出版社, 2017. 11

ISBN 978 - 7 - 5026 - 4490 - 1

I. ①特… II. ①沈…②李…③吴… III. ①设备安全—中国—学术会议—文集②设备—节能—中国—学术会议—文集 IV. ①X93 - 53②TB4 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 249410 号

中国质检出版社 出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100029)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

总编室: (010) 64275323 发行中心: (010) 51780235

读者服务部: (010) 68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

\*

开本 880×1230 1/16 印张 29 字数 870 千字

2017 年 11 月第一版 2017 年 11 月第一次印刷

\*

定价 145.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

# 2016年全国特种设备安全与节能学术会议

## 组织机构

### 一、组织委员会

**主 席：**徐武强 贾国栋 林树青

**副主席：**王越薇 高继轩 沈功田

**成 员：**王晓雷 杜顺学 姚泽华 沈 钢 钱夏夷 舒文华 邹定东  
丁春辉 梁广炽 丁克勤 李光海

### 二、顾问委员会

张 纲（国务院参事） 刘人怀（院士） 张钟华（院士） 庞国芳（院士）  
李天初（院士） 钟群鹏（院士） 潘际奎（院士） 李鹤林（院士）  
林宗虎（院士） 高金吉（院士） 陈学东（院士） 郭元亮

### 三、技术委员会（排名不分先后）

**主 席：**沈功田

**副主席：**高继轩 谢铁军 姚泽华 杜顺学

**成 员：**丁克勤 于国欣 王 志 王福绵 王华明 牛卫飞 尹献德  
邓阳春 业 成 冯月贵 刘 明 刘爱国 刘 磊 汤晓英  
成德芳 孙云波 李 宁 李伟忠 何仁洋 沈 勇 张志毅  
张晓斌 张路根 陈 克 陈 杰 罗伟坚 罗晓明 郑 宁  
赵鹏华 杨 力 武星军 胡 滨 胡 军 侯旭东 夏锋社  
党林贵 钱夏夷 梁广炽 曹怀祥 盛水平 董亚民 董君卯  
韩立柱 曾钦达 谢常欢 赖春阳 窦文字 缪春生 樊 琨  
薛季爱 张东平 邹 萍 汪艳娥 史红兵 于在海 徐金海  
罗志群 苏 强 王 也 伏喜斌 赖跃阳 孙书成 叶伟文  
陈家斌 祝学军 蒋 俊 黄 冀 郭伟灿 马溢坚 曾钦达

姚 钦 赵尔冰 韩建军 曹光敏 陈定岳 黄 凯 郑 凯  
刘大宝 程义河 要万富 张 勇 邢谷贤 赵 丁 张一平  
苏立鹏 张 海 胡玉龙 胡立权 徐洪涛 杨 虎 韩绍义  
王 森 邱志梅

#### 四、工作委员会（排名不分先后）

主 席：沈功田

副主席：姚泽华 杜顺学 沈 钢 丁克勤 李光海

成 员：钱夏夷 舒文华 邹定东 丁春辉 梁广炽 丁树庆 于 滨  
王伟雄 赵小兵 王晓桥 王骄凌 王从军 刘 明 李振华  
吴遵红 邢友新 朱光艺 孙仁凡 李 丁 李文广 金樟民  
杨玉山 邹少俊 宋金钢 唐卫国 王淑兰 汪 洋 张元榕  
陈志刚 钟海见 郑 炯 赵世良 赵东辉 赵秋洪 兰清生  
高 俊 高增明 郭 凯 陶 然 黄凯东 黄学斌 业 成  
蒋 青 曹 晋 王胜利 宋金泉 王海忠 韩树新

# 2016 年全国特种设备安全与节能学术会议 支持单位

(共 66 家单位)

|                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| 中国特种设备检测研究院           | 河北省特种设备监督检验院      |
| 中国特种设备安全与节能促进会        | 河南省锅炉压力容器安全检测研究院  |
| 中国特种设备检验协会            | 河南省特种设备安全检测研究院    |
| 中国锅炉水处理协会             | 福建省特种设备检验研究院      |
| 江苏省特种设备安全监督检验研究院      | 浙江省特种设备检验研究院      |
| 上海市特种设备监督检验技术研究院      | 四川省特种设备检验研究院      |
| 重庆市特种设备检测研究院          | 安徽省特种设备检测院        |
| 沈阳市特种设备检测研究院          | 江西省锅炉压力容器检验检测研究院  |
| 深圳市特种设备安全检验研究院        | 广西壮族自治区特种设备监督检验院  |
| 全国锅炉压力容器标准化技术委员会      | 湖南省特种设备检验检测研究院    |
| 全国索道与游乐设施标准化技术委员会     | 陕西省锅炉压力容器检验所      |
| 《中国特种设备安全》杂志社         | 云南省特种设备安全检测研究院    |
| 中国机械工程学会压力容器分会        | 新疆维吾尔自治区特种设备检验研究院 |
| 中国机械工程学会无损检测分会        | 海南省锅炉压力容器与特种设备检验所 |
| 中国仪器仪表学会设备结构健康监测与预警分会 | 内蒙古自治区特种设备检验院     |
| 中国腐蚀与防护学会承压设备专业委员会    | 内蒙古自治区锅炉压力容器检验研究院 |
| 广东省质量技术监督局            | 广州特种机电设备检测研究院     |
| 北京市特种设备检测中心           | 广州特种承压设备检测研究院     |
| 天津市特种设备监督检验技术研究院      | 杭州市特种设备检测院        |
| 山东省特种设备检验研究院          | 南京市锅炉压力容器检验研究院    |
| 广东省特种设备检测研究院          | 南京市特种设备安全监督检验研究院  |
| 辽宁省安全科学研究院            | 武汉市特种设备监督检验所      |
| 河北省锅炉压力容器监督检验院        | 武汉市锅炉压力容器检验研究所    |
|                       | 西安市特种设备检验检测院      |

济南市特种设备检验研究院  
长春特种设备检测研究院  
大连市锅炉压力容器检验研究院  
大连市特种设备监督检验院  
宁波市特种设备检验研究院  
厦门市特种设备检验检测院  
温州市特种设备检测中心  
北京市朝阳区特种设备检测所  
安庆市特种设备监督检验中心  
成都市特种设备检验院  
浙江省联合特种设备研究院

绍兴市特种设备检测院  
贵州省特种设备检验检测院  
江西省特种设备检验检测研究院  
乌海市特种设备检验所  
青岛市特种设备检验检测研究院  
大连利恒节能环保安全技术研究中心  
赤峰市特种设备检验所  
衢州市特种设备检验中心  
嘉兴市特种设备检验检测院  
湖州市特种设备检测研究院  
绵阳市特种设备监督检验所

# 序

由特种设备科技协作平台和国家质检总局科技委特种设备安全与节能专业技术委员会共同举办的 2016 年全国特种设备安全与节能学术会议于 11 月 22 日至 25 日在福建省厦门市召开。这是第三届全国性特种设备安全与节能科技盛会。

本届会议的主题是“科技领跑,创新发展”。召开会议的目的是为了不断营造特种设备学术氛围,培育科技创新环境,从而逐步提升特检科技水平,进一步促进特种设备安全与节能事业发展。学术会议得到了平台 57 家理事单位、中国特种设备安全与节能促进会、中国特种设备检验协会、中国锅炉水处理协会、全国锅炉压力容器标准化技术委员会、全国索道与游乐设施标准化技术委员会、中国特种设备安全杂志社、中国机械工程学会压力容器分会、中国机械工程学会无损检测分会、中国仪器仪表学会设备结构健康监测与预警分会和中国腐蚀与防护学会承压设备专业委员会等 66 家单位支持。

本次学术会议共 200 篇科技论文进行了交流,大会还设立了优秀论文奖,旨在表彰在科研上取得优秀成果的科技人员,从而鼓励更多的科技人员积极投身于特种设备科技事业中。本次会议共有 121 篇论文参加优秀论文评选,最终有 39 篇论文脱颖而出。其中一等奖论文 5 篇,二等奖论文 15 篇和三等奖论文 20 篇(获奖论文均收录在每一篇章的开头)。

本论文集主要收录了 2016 年全国特种设备安全与节能学术会议论文,同时还收录了特种设备科技协作平台 2016 年举办的特种设备质量控制与监督检验学术研讨会以及 2015 车用 CNG 气瓶安全技术论坛论文。三次会议共收到论文短摘要 268 篇,会议现场实际收到论文全文 209 篇。经同行专家评审、编审人员审核、出版社校核和作者修改,共收录论文 169 篇。其中 2016 年全国特种设备安全与节能学术会议 112 篇,特种设备质量控制与监督检验学术研讨会 33 篇,2015 车用 CNG 气瓶安全技术论坛 24 篇。收录的论文内容涵盖锅炉、压力容器、压力管道、电梯、起重机械、客运索道、大型游乐设施、场(厂)内专用机动车辆、大型常压储罐等设备的设计、检验检测、使用和安全监察等环节的安全和节能技术研究及应用等领域。论文集分上、下两册,共六篇,上册包括锅炉篇、管道篇和容器篇,下册包括电梯篇、起重机篇和综合篇。

本届学术会议的成功召开和这次论文集的及时顺利出版得到了国家质检总局科技司、特种设备安全监察局和特种设备科技协作平台领导的大力支持,会议组委会和 66 家支持单位做了大量宣传和精心组织工作,论文评审专家也付出了很多辛勤工作,在此,一并表示衷心的感谢。同时,感谢参与论文编辑工作的苑一琳以及研究生王尊祥和吴明涛。最后,对中国质检出版社的领导和编辑表示感谢,他们严谨的工作态度保证了本论文集的顺利出版。

为鼓励更多特种设备相关科技人员积极参与学术交流,本书收录的论文水平可能高低不等。由于论文征集、评审和编辑出版过程较仓促,恐有疏漏或不妥之处,敬请专家和广大读者批评指正。

编 者

2017 年 10 月于北京



# 目 录

## 管道篇

|                                  |                            |
|----------------------------------|----------------------------|
| 中美油气输送管道完整性管理规范对标分析 .....        | 王俊强( 3 )                   |
| 波纹管道阻火器内火焰传播的实验与<br>数值模拟研究 ..... | 孙少辰 丁春辉 胡熙玉 刘刚 毕明树( 13 )   |
| 城市燃气钢质管道外防腐层破损检测<br>技术探讨 .....   | 宋盼 任彬 王少军 左延田 黄奕昶 杨博( 30 ) |
| 城镇天然气压力管道安装监督检验竣工资料若干问题探讨 .....  | 吕圣 赖圣( 37 )                |
| 管—管角焊缝超声检测辅助定位软件的开发 .....        | 王少军 宋盼 任彬 左延田 黄奕昶 杨博( 42 ) |
| 含撞击凹陷在用城市燃气管道的安全评估 .....         | 宋盼 王少军 任彬 左延田( 48 )        |
| 炼化设备管线基于风险的腐蚀状态监测及评估 .....       | 陆新元( 54 )                  |
| 内波外螺纹管管内冷凝与流阻特性研究 .....          | 任彬 宋盼 王少军 左延田 杨博 黄奕昶( 62 ) |
| 缺陷形状差异对注水管应力场分布影响研究 .....        | 徐涛 王川 何媛媛 姚翼( 68 )         |
| 燃气用聚乙烯管的监督检验 .....               | 符明海 朱勤( 74 )               |
| 水平管内含空气混合蒸汽冷凝特性研究 .....          | 任彬 王少军 宋盼 左延田 杨博 黄奕昶( 79 ) |
| 挖掘载荷作用下燃气 PE 管道的动力响应分析 .....     | 周立国 姚安林 徐涛龙( 85 )          |
| 压力管道 90°弯管内部流场三维数值模拟 .....       | 朱平 庞旭 李璐 潘海林 罗惠龙 赵鹏( 97 )  |
| 长输管道强制整流阴极保护常见问题及整改措施 .....      | 李长春 何仁洋 阳佳旺( 102 )         |

## 容器篇

|                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 基于风险的超龄压力容器检验及<br>监管研究 .....    | 司俊 许金沙 杨宇清 盛冰斌 杨蓉遵 罗晓明(111) |
| 水晶釜材料显微组织形态与晶粒度的变化 .....        | 杨虎 陈文杰 颜春松 周昌明(118)         |
| 基于 VOF 法的球罐晃荡数值模拟及载荷计算 .....    | 刘岑凡 于哲敏 王国军 杨智荣 孙亮(127)     |
| 常压储罐群漏磁检测对风险评估结果的验证研究 .....     | 方舟 陈彦泽 刘德宇 胡炜炜(133)         |
| 储气井现场制造监督检验项目研究 .....           | 信世超(139)                    |
| 涉氨压力容器检验难点分析 .....              | 谭伟(151)                     |
| CNG-2 型气瓶用玻璃纤维增强材料耐腐蚀性能分析 ..... | 李斌 於秋霞 熊姝涛 方羽虎(157)         |
| CNG-4 型气瓶型式试验方法的对比研究 .....      | 熊姝涛 张学林 刘诗然(166)            |
| CNG 储气井连续多缺陷的数值<br>模拟及评价 .....  | 司永宏 韦晨 权基琢 李卫星 牛卫飞 张晋军(171) |
| CNG 气瓶常用材料性能分析 .....            | 熊姝涛 庞媛渊 周于(178)             |

|  |                            |
|--|----------------------------|
| CNG 气瓶疲劳试验安全保护装置的设计与制作 .....                 | 方羽虎(182)                   |
| CNG 气瓶用缠绕玻璃纤维发展现状与趋势 .....                   | 於秋霞 袁国龙 顾明华(185)           |
| 对 CNG-2 型气瓶弧形部表面折叠缺陷安全性的研究 .....             | 李斌 熊姝涛 毛鯤(190)             |
| 贵州省压缩天然气车用气瓶充装安全管理规范的编制 .....                | 尤刚 王明英 许可 马祥(195)          |
| 车用压缩天然气全复合材料气瓶的有限元分析 .....                   | 彭浩(201)                    |
| 关于车用 CNG-2 型气瓶的危险性阐述和事故预防 .....              | 张益铭 吴彦峰 黄小宇 王恒(212)        |
| 蒸汽在车用 CNG 气瓶定期检验中的应用研究 .....                 | 刘洋(215)                    |
| 基于物联网的 CNG 气瓶电子标签安全管理体系建设和评估 .....           | 邱勇军 陈路(219)                |
| LNG 低温气瓶用截止阀关键制造及检测技术研究 .....                | 李前 徐维普(225)                |
| 车用 LNG 焊接绝热气瓶不拆卸检验研究 .....                   | 杨林 王友红 李斌 赵忠国(229)         |
| 储气井固井质量的影响因素分析 .....                         | 陈文杰 余跃(235)                |
| 含凹陷长管拖车大容积钢质无缝气瓶                             |                            |
| 安全评价 .....                                   | 徐永生 程亮 邓贵德 孙亮 金明哲 刘岑凡(239) |
| 大容积钢内胆纤维缠绕气瓶疲劳失效原因分析 .....                   | 程亮 翟建明 古纯霖 崔栋梁(246)        |
| 对车用缠绕气瓶定期检验情况的总结 .....                       | 李保绪 依马木艾山·买买提 李嘉楠(252)     |
| 浅析车用 CNG 钢瓶和钢内胆环向缠绕 CNG 气瓶的设计、工艺安全控制要求 ..... | 毛三品(254)                   |
| 环缠绕复合材料气瓶材料匹配性对气瓶性能影响的研究 .....               | 由宏新 招聪 张爽(267)             |
| 充满率对低温绝热气瓶蒸发率修正的研究 .....                     | 李阳 毛小虎 岳云飞(275)            |
| HJP200-13-2.2 型液化丙烷钢制焊接气瓶爆破试验变形异常分析探讨 .....  | 谢峦峰(281)                   |
| 基于 Simulink 的气瓶瓶体信息图像识别系统 .....              | 张贇 李培中 赵西城 郭峰男(285)        |
| 进口气瓶安全性能监督检验风险防控 .....                       | 李昱 袁奕雯 黄达(292)             |
| 空气储罐的轻量化优化设计 .....                           | 汤荣跃 谭婧(297)                |
| 气瓶定期检验数据自动采集处理方法的实现 .....                    | 李保绪 李莎 周飞(301)             |
| 标准瓶校验气瓶外测法水压试验装置相关问题的研讨 .....                | 王友红 方羽虎 毛鯤(304)            |
| 新能源储氢气瓶检测标准技术研究 .....                        | 李前 徐维普 罗晓明(308)            |
| 新型超高强钢研究现状及其在高压气瓶制造中的                        |                            |
| 应用前景与挑战 .....                                | 邓永强 李斌 熊姝涛 方羽虎 杨林 刘诗然(314) |
| 液化石油气瓶阀国家标准修订分析 .....                        | 袁骥千 李前 徐维普 罗晓明(321)        |
| 正拱型车用气瓶爆破片提前泄压案例分析 .....                     | 袁奕雯 李昱 符明海(324)            |
| 阀门密封面镍基合金堆焊层晶间腐蚀                             |                            |
| 敏感度的研究 .....                                 | 周路云 符明海 徐维普 李前 袁骥千(329)    |
| 一种新型蒸压釜快开门安全联锁装置 .....                       | 黄志镛 孙仁凡 陈明 胡滨 姚勇 郑连学(333)  |
| 压力容器整体就位安装监检质量控制及发展趋势 .....                  | 黄东鏊 张权良(338)               |
| 囊式蓄能器制造监督检验的几点建议 .....                       | 牛亚平 毛维伟 沈建民(341)           |
| 一起杀菌锅容器的安装质量监督检验问题探讨 .....                   | 吕锋杰 张权良(346)               |
| 低温容器日蒸发率测量方法研究 .....                         | 李正清 何丹 蔡宇宏 刘筱文 王田刚(350)    |
| 燃气汽车关键零部件技术发展现状与趋势 .....                     | 刘俊刚 邹博文 李开国 李静波(354)       |
| 一种带保温层特种设备壁温分布的简化计算方法 .....                  | 吉方 邓贵德 孙亮 刘岑凡 赵潇男(360)     |
| 基于压力梯度法的车载 LNG 气瓶绝热性能检测装置的研发 .....           | 王恒 黄小宇 崔仕博 姜斌(367)         |

## 锅炉篇

微波消解—电感耦合等离子体发射光谱法测定

|                                  |                             |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 工业锅炉水中的铁和铜 .....                 | 于冀芳 李耀国 王万兴 马建宇 李宁宁 李波(373) |
| 我国电站锅炉水冷壁高温腐蚀及防治技术现状 .....       | 刘光奎 钱林锋 梁奎 钱公(379)          |
| 蒸汽空气预热器泄漏失效分析 .....              | 丁二喜 黄剑灵 吴继权(386)            |
| 摩尔法测定氯化物的影响因素及其消除 .....          | 毛丽燕 王亮(393)                 |
| 某电站高压循环流化床锅炉水冷壁管爆管<br>失效分析 ..... | 蒋腾波 许波 胡健 祝新伟 戴晖 潘金平(397)   |
| 燃生物质成型燃料工业锅炉能效指标确定 .....         | 伏喜斌 张金梅 徐火力 黄学斌(405)        |
| 一种智能化工业锅炉远程监测物联网终端研制 .....       | 马舜 刘延雷 盛水平 李伟忠 赵辉(411)      |
| 1000 MW 超超临界锅炉水冷壁管横向裂纹原因分析 ..... | 车畅 刘翔 刘杰(418)               |
| 电站锅炉钢结构焊缝制造质量的无损检测优化 .....       | 王少军 任彬 宋盼 黄奕昶 杨博(426)       |
| 电站锅炉水冷壁管氢损伤原因分析及预防措施的探讨 .....    | 任建辉 杨必应 王义厢(430)            |
| 工业锅炉气体不完全燃烧热损失探讨 .....           | 李耀国 于冀芳 王万兴 宿素玲(434)        |
| 浅谈工业锅炉安装过程中对质量保证体系运行的监督检验 .....  | 孙逊 孙彬彬(437)                 |
| 深度冷凝工业锅炉节能潜力分析及技术方案研究 .....      | 李婷 李京京 董亚民 陈凯(441)          |
| 碱回收锅炉高温过热器爆管失效分析 .....           | 陈勋(448)                     |

# 容 器 篇



# 中美油气输送管道完整性管理规范对标分析

王俊强<sup>1,2</sup>

1.中国特种设备检测研究院,北京 100029

2.国家质量监督检验检疫总局油气管道工程技术研究中心,北京 100029

**摘要:**完整性管理已成为我国油气管道安全管理的主要方式之一。通过回顾总结油气管道安全管理的发展历程和最新进展,围绕完整性管理的法规、标准的制修订,重点介绍了中美油气管道基线评估、高后果区识别、完整性评价、维修维护等关键技术的进展情况,对比分析了各技术条款的特点和差异。其中,最新美国联邦法规提出中后果区的概念,已将完整性评价最低要求扩展到了中后果区,冲击水压试验和超声导波探伤已列入输气管道完整性评价技术体系,当前不同规范评价周期差异较大。结合发达国家的安全管理经验和我国管道隐患治理情况,提出了当前我国油气管道完整性管理在标准体系、立法、监管、技术应用等方面存在的问题和重点发展方向。

**关键词:**油气管道;完整性管理;完整性技术;高后果区;在线检测;压力试验;评价周期;维修维护

## The Latest Development of Oil and Gas Pipeline Integrity Management Specifications

Wang Junqiang<sup>1,2</sup>

1.China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029

2.Oil and Gas Pipeline Engineering Research Center of AQSIQ, Beijing 100029

**Abstract:** Integrity management (IM) has become one of the main ways of oil and gas pipeline safety management. This paper overviews and summarizes the development history and latest progress of oil and gas pipeline safety management, introduces emphatically the progress of key technologies in Sino-US oil and gas pipeline surrounding the revision of regulations and standards of pipeline integrity management (PIM), such as baseline assessment, high consequence area identification, integrity assessment and evaluation, repair and maintenance and so on. Then, the characteristics and differences of various terms were analyzed by contrast in technical specifications. Among them, the concept of moderate consequence areas (MCAs) was proposed in the latest US federal regulations, and integrity assessment has been extended to MCAs in the gas pipeline minimum federal safety standards, the spike hydrostatic pressure testing (SHPT) and guided wave ultrasonic testing (GWUT) were included in the pipeline integrity assessment technique system, the specified assessment interval was quite different for the different specifications at present. Combined with the experience of safety management in developed countries and the progress of hidden governance in our country, various issues and development directions are raised from the current PIM including standard system, the legislative, supervision, technology applications and so on.

**Keywords:** Oil and gas pipeline; Integrity management; Integrity technology; High consequence areas; In-line inspection; Pressure testing; Reassessment interval; Maintenance

## 0 引言

管道是油气资源输送的主要工具,是国家重大基础设施。随着油气资源的需求增长,油气输送管道

基金项目:国家标准委《实施制造业标准化提升计划——油气输送管道标准体系研究》专项资助

作者简介:王俊强,1983年出生,男,博士,主要从事压力管道检验检测、完整性评价及安全管理研究。



的重要性凸显,其总里程数快速攀升。然而,城市的快速发展、管道的老龄化,导致管道隐患越来越多,如何保障管道安全成为一大难点,也已成为企业、政府、公众的关注重点。

美国 H.R.3609《2002 年管道安全改进法》<sup>[1]</sup>的颁布,标志着完整性管理已从法律层面作为油气管道安全保障的主要手段,也促使完整性管理、安全检测和评价、预防和修复、人员资质等管道相关标准快速发展,完整性管理逐渐体系化。《2006 年管道检验、保护、强制执行与安全法案》<sup>[2]</sup>的颁布,正式将防止第三方挖掘破坏提升到了联邦一级水平,降低了管道人为意外损伤。《2011 年管道安全、监管确定性和创造就业》<sup>[3]</sup>的颁布,要求提高管道安全标准,加大监管和处罚力度,强化人员培训工作和公众宣传教育,从法律角度提升安全管理力度。2015 年和 2016 年油气输送管道联邦法规 CFR 195《危险液体管道输送安全》、CFR 192《天然气和其他气体输送管道:联邦最低安全》分别进行制修订<sup>[4,5]</sup>,对数据收集、高后果区识别、风险评估、完整性评估、压力测试、风险消减与维修维护等方面的条款做了修订。例如,提出将周期性完整性管理扩展到高后果区(high consequence areas, HCAs)以外可能发生重大事故的隐患管段,即“中后果区(moderate consequence areas, MCAs)”的概念。CFR 195 和 CFR 192 对高后果区管道的完整性管理方法由 ASME B31.8S-2014<sup>[6]</sup>和 API 1160-2013<sup>[7]</sup>提供技术支撑,但两项标准适用范围规定:可应用于所有区域管道。

我国油气管道管理方式落后于美国,基于其重要的战略地位,于 2000 年前后引入完整性管理概念,经过 10 余年的快速发展历程,在 2010 年 6 月《石油天然气管道保护条例》上升为《中华人民共和国石油天然气管道保护法》<sup>[8]</sup>,标志着我国油气管道安全级别提升到国家法律层面。该法快速颁布的主要原因是我国城市建设迅猛发展,管道安全运行环境严峻,隐患突出,支撑该法的标准多数由国外标准引进消化吸收而成,不过,该法并未提及完整性管理。2013 年,《中华人民共和国特种设备安全法》<sup>[9]</sup>颁布,油气长输管道作为压力管道中的一种,其生产、经营、使用、检验检测等安全工作要接受政府全过程监督管理,由此,油气管道的安全监管有了法律保障。2013 年,11·22 特别重大事故(青岛输油管道爆炸事件)再一次引发全民对油气管道安全的关注,此事件引起国务院高度重视,由此,2014 年 11 月,国务院安全委会发布《关于深入开展油气输送管道隐患整治攻坚战的通知》(安委[2014]7 号)<sup>[10]</sup>,要求于 2014 年 10 月至 2017 年 9 月在全国范围内对 29436 处油气管道隐患(其中占压 11972 处、间距不足 9171 处、不满足安全要求交叉穿越 8293 处。)<sup>[11]</sup>开展隐患整治工作,并成立了专门的隐患整改工作领导小组。上述事件推动了我国油气管道完整性管理的进程,2015 年 10 月,GB 32167—2015《油气输送管道完整性管理规范》<sup>[12]</sup>颁布,内容围绕数据采集与整合、高后果区识别、风险评估、完整性评价、风险消减与维修维护、效能评价等 6 个环节开展。该标准与美国 ASME B31.8S 和 API 1160 思路基本一致,是我国管道完整性管理首部强制性国家标准,完整性理念在油气输送管道中的应用进一步深化。与此同时,与管道检测、评价、修复和应急等相关的标准开始制修订,如 TSG D7003—2010《压力管道定期检验规程——长输(油气)管道》<sup>[13]</sup>开始修订。2016 年国家标准委委托中石油和中国特检院开始对油气管道标准体系进行研究,为未来相关标准的制修订和管理提供依据。

## 1 完整性管理关键技术

### 1.1 基线评估

基线评估是管道首次开展的完整性评价,目的是获取管道基本状态,判定管道的质量和安全性,是未来管道周期性评价的基础,也称基线检测。检测方法包括内检测、外检测和压力测试,检测对象为管道空间位置、埋深、本体缺陷及其他异常。检测时间一般要求在投用前后短期内完成。

美国联邦法规 CFR 192 在 192.919 条款中规定了基线评估计划:管道风险识别、基于风险的完整性评价方法、基线评估以及质量控制等;在 192.921 条款中规定了如何实施基线评估:内检测、直接检测和

压力试验等,对于管道特定的风险因素还应选用专门的技术进行评估,但必须在 180 天前告知管道安全办公室(Office of Pipeline Safety, OPS)。对于高后果区管段限期开展基线评估,完成日期为 2002 年 12 月 17 日;对于新识别的高后果区管段和新安装管段,需在 10 年内完成基线评估。2016 年新修订了 192.921 条款,并提出基线评估必须满足指标要求,达到管道建设时的最大许用操作压力(MAOP)。

CFR 195 在 195.452 条款中规定了高后果区的基线评估计划:检测方法包括内检测、压力测试、外腐蚀直接评价以及其他测试方法。如果选择其他测试方法,要在 90 天前告知 OPS,陈述选择该评价方法的理由、基于风险的评估计划安排,并给出基线评估完成时间表。在管线开始投用前,必须完成基线评估。对于新识别到的高后果区,必须在 1 年内列入基线评估计划中,5 年内完成该区域的基线评估。

我国法律法规虽然未提出基线检测,但对管道检测也有相关规定。《中华人民共和国石油天然气管道保护法》第 23 条规定企业应定期对管道进行检测、维修,确保其处于良好状态。《中华人民共和国特种设备安全法》将压力管道纳入特种设备范畴,第 15 条规定使用单位应进行自行检测和维护保养。《石油天然气管道安全监督与管理暂行规定》第 24 条和 TSG D7003—2010《压力管道定期检验规则——长输(油气)管道》规定:油气管道应当定期进行检测,新建管道应当在投产后 3 年内进行首次全面检验,方法包括内检测、直接检测和压力试验。对具备内检测条件的管道,采用内检测器进行检测,对不具备内检测条件的管道,采用直接检测方法进行全面检验,当内检测或者直接检测不可实施时,可采用压力试验方法进行检验。GB 32167 中的 8.2.1.3 也要求管道在投用前后 3 年内开展基线检测与评价,其结论可以作为工程验收依据。

## 1.2 高后果区识别

高后果区(HCAs)指管道泄漏后可能危及公众安全或造成较大环境污染的区域。HCAs 是管道完整性管理和事故防范的重点区域,其识别原则和管理方法也成为国内外管道行业关注的焦点。美国联邦法规 CFR 195 在 195.450 条款中提出危险液体输送管道 HCAs 的 4 条识别原则:商用通航河道,城市人口集中区(人口普查划定的包含 5 万及以上人口,且人口密度不小于 1000 人/平方英里),城镇、村庄或其他商业区以及环境敏感区。其中,195.6 规定环境敏感区指水资源保护区和生态保护区。

CFR 192 在 192.903 和 192.905 条款中给出天然气管道的两种 HCAs 识别方法。第一种方法采用地区等级:三级和四级地区、一级和二级地区潜在影响半径大于 200m 的区域,存在 20 户及以上建筑物,或潜在影响半径区域内包含一特定场所,均为 HCAs;第二种方法采用影响半径计算方法:在影响半径区域内存在 20 户及以上建筑物或一特定场所,并对特定场所做了详细说明。为了建立非 HCAs 区域管道完整性评价和修复条件,保障公众安全,2016 年 6 月发布的联邦公告中,PHMSA 提出了“中后果区(MCAs)”概念,指在三、四类以外的地区,潜在影响区域内有 5 户及以上居民楼、活动场所、高速公路、4 车道主干公路等区域管段。PHMSA 要求运营商对 MCAs 的管段开展检测评价、修复维护、验证 MAOP 和管材适用性,最长评价周期不超过 15 年。

ASME B31.8S-2014 和 API 1160-2013 虽然也提到潜在影响区计算,但并未划分高后果区,两项标准均认为完整性管理可应用于任何区域管道,利用基于风险的检验思路,对管道全线进行风险评估,将高后果区融入进风险评估体系,从技术上更具有科学性。

GB 32167 和 TSG D7003 中均提出高后果区识别原则(TSG D7003 中定义为事故后果严重区),其思想均源于 CFR 192 和 CFR195。TSG D7003 中输气管道 HCAs 识别采用了 CFR 192 第一种方法,输油管道 HCAs 识别采用了 CFR 195。GB 32167 中输气管道采用了 CFR 192 第二种方法,输油管道在 CFR 195 的基础上做了修改,并规定:在管道建设期就开始开展 HCAs 识别,以优化路由选择,无法避让时要采取安全防护措施。投用后按完整性管理要求周期性开展 HCAs 识别,尤其是管道周围环境发生变化时,间隔时间最长不超过 18 个月,表 1 详细对比了国内外油气管道相关法规、标准的高后果区识别原则。此外,王晓霖<sup>[14]</sup>针对 HCAs 识别原则不尽相同,管理流程、防治对策缺乏具体规定等问题,提出将输油管





道 HCAs 划分为人口密集、重要设施、环境敏感 3 类,建立了其量化评估模型和评分指标体系,采取分级管理策略。

表 1 国内外高后果区识别原则对比

| 管道类型 | 来源                            | 识别项   | 分级                               |
|------|-------------------------------|---|----------------------------------|
| 输油管道 | GB 32167                      | a)GB 50251—2015 中的四级地区;<br>b)GB 50251—2015 中的三级地区;<br>c)管道两侧各 200m 内有聚居户数在 50 户或以上的村庄、乡镇等;<br>d)管道两侧各 50m 内有省道或国道高速公路、铁路及易燃易爆场所等;<br>e)管道两侧各 200m 内有湿地、森林、河口等国家自然保护区;<br>f)管道两侧各 200m 内有水源、河流、大中型水库   | Ⅲ级<br>Ⅱ级<br>Ⅱ级<br>Ⅰ级<br>Ⅱ级<br>Ⅲ级 |
|      | CFR 195<br>TSG D7003          | a)商用通航河道;<br>b)城市人口密集区;<br>c)乡镇、居民与商业区等人口密集区;<br>d)环境敏感区,如水资源保护区、生态保护区、军事设施等区域  | —<br>—<br>—<br>—                 |
| 输气管道 | CFR 192<br>第二种方法<br>GB 32167  | a)GB 50251—2015 中的四级地区;<br>b)GB 50251—2015 中的三级地区;<br>c)如管径大于 762mm,最大允许运行压力大于 6.9MPa,其天然气管道潜在影响区域内有特定场所的区域,潜在影响半径按照公式 $r = 0.099 \sqrt{d^2 p}$ 计算;<br>d)如管径小于 273mm,最大允许运行压力小于 1.6MPa,其天然气管道潜在影响区域内有特定场所的区域,潜在影响半径按照公式 $r = 0.099 \sqrt{d^2 p}$ 计算;<br>e)其他管道两侧各 200m 内有特定场所的区域;<br>f)除三级、四级地区外,管道两侧各 200m 内有加油站、油库等易燃易爆场所 | Ⅲ级<br>Ⅱ级<br>Ⅱ级<br>Ⅰ级<br>Ⅰ级<br>Ⅱ级 |
|      | CFR 192<br>第一种方法<br>TSG D7003 | a)三级和四级地区;<br>b)一级和二级地区,潜在影响半径大于 200m 的区域,居民户数不小于 20 户,或潜在影响半径区域内含有特定场所   | —<br>—                           |

注:1.高后果区分为三级,Ⅰ级表示最小的严重程度,Ⅲ级表示最大的严重程度。

2.  $d$  为管道外径,单位为毫米(mm);  $p$  为管段最大允许操作压力,单位为兆帕(MPa);  $r$  为受影响区域半径,单位为米(m)。

3. 特定场所指医院、学校、托儿所、养老院、监狱或其他具有难以迁移或难以疏散人群的建筑设施的区域。

### 1.3 完整性评价

#### 1.3.1 评价方法

油气管道完整性评价方法包括内检测、压力测试、直接评价以及其他已验证具有可靠性的方法。方法选择需要依据辨识到的管道风险因素,有针对性地选择一种或多种方法。当选择其他方法时,美国联邦法规要求操作人员提前向 OPS 告知。最新修订的 CFR 192 和 CFR 195 扩大了定期完整性评估范围,并非仅针对高后果区,对于能影响到管道安全运行的所有区域都应进行检测和修复。CFR 195 在