

国内天然气管道强度设计系数的评估研究

张振永 周亚薇 张金源

中国石油天然气管道工程有限公司

摘 要 采用管道单一强度设计系数方法无法科学地反映管材性能、管道施工和管道运行维护水平。为了克服上述方法的不足并评估和改进现行《输气管道工程设计规范》(GB 50251—2015)中规定的天然气管道强度设计系数,采用基于可靠性的天然气管道设计方法,针对国内近 4×10^4 km 已建天然气管道,根据管道压力、管径、管材钢级等划分了 258 种计算工况;在满足天然气管道目标可靠度的前提下,应用国内的管材、焊接情况、腐蚀情况和运行维护情况等统计数据,经过大量迭代计算得到了天然气管道的临界壁厚,并反推得到了不同工况下的天然气管道等效设计系数。研究表明:①从一级地区到四级地区,由可靠性方法反推得到的天然气管道强度设计系数均随管道管径的增大而逐渐增大;②小管径工况的天然气管道强度设计系数一般小于国家标准规定值;③大管径工况的天然气管道强度设计系数则大于国家标准规定值。进而分别对不同地区等级的小管径管道(管径不大于 508 mm)、中等管径管道(管径介于 508 ~ 711 mm)和大管径管道(管径介于 711 ~ 1 219 mm)的强度设计系数进行了细化和调整,增强了其合理性。

关键词 天然气管道 强度设计系数 可靠性设计和评价 可靠度 临界壁厚 等风险设计 GB 50251—2015

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.04.014

Evaluation on strength design coefficients of domestic natural gas pipelines

Zhang Zhenyong, Zhou Yawei & Zhang Jinyuan

(China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang, Hebei 065000, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 4, pp.116-122, 4/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: When a single pipeline strength design coefficient method is used, the performance, construction, operation and maintenance of pipelines can't be reflected actually. In this paper, a reliability-based gas pipeline design method was used to overcome the defects of this method and improve and evaluate the current gas pipeline strength design coefficient stipulated in the *Gas Pipeline Engineering Design Specifications* (GB 50251-2015). Domestic existing natural gas pipelines of 4×10^4 km long was divided into 258 calculation working conditions based on pipeline pressure, diameter and steel grade. While the target reliability of natural gas pipelines was satisfied, the critical wall thickness of natural gas pipelines was obtained by performing abundant iterative computation on the statistical data of materials, welding, corrosion, operation and maintenance of domestic pipelines. Then, the equivalent design coefficient of natural gas pipelines in different working conditions was calculated by the inverse method. It is shown that the gas pipeline strength design coefficient derived from the reliability-based method increases with the increase of pipe diameter in the areas of Class 1 to Class 4. Besides, the strength design coefficients of pipelines with small diameters are generally lower than those stipulated in the national standard, and those of large diameters are higher than those in the national standard. Finally, the strength design coefficient was refined and adjusted specifically for small diameter pipelines ($D \leq 508$ mm), medium diameter pipelines ($508 \text{ mm} < D < 711$ mm), and large diameter pipelines ($711 \text{ mm} \leq D \leq 1\,219$ mm) in different classes of areas. Consequently, its rationality is improved.

Keywords: Natural gas pipeline; Strength design coefficient; Reliability design and evaluation; Reliability; Critical wall thickness; Equal risk design; GB 50251-2015

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司“十二五”重大科技专项“第三代大输量天然气管道关键技术研究”(编号:2012E-2801-01)。

作者简介: 张振永, 1971 年生, 高级工程师; 主要从事油气长输管道工程设计和管材可靠性评估工作。地址: (065000) 河北省廊坊市广阳区和平路 146 号管道设计大厦。电话: (0316) 2075949, 13292615649。ORCID: 0000-0002-2659-3583。E-mail: cppe_zhangzy@cnpcc.com.cn

0 引言

对于天然气管道而言,国内外设计标准大多遵循的是基于应力的设计准则,即管道在内压下的环向应力不大于管材最小屈服强度与强度设计系数的乘积。管道强度设计系数也称安全系数,是通过工程实践经验将管材生产、管道施工和管道运行等方面的不确定性集中表现为单一系数^[1-3],采用管道单一强度设计系数方法,无法科学地反映实际管材生产、管道施工和管道运行维护水平。为了克服传统管道单一强度设计系数法的不足,近 20 年来国外正大力开展基于可靠性的管道设计和评价方法研究,国内近些年也对该方法进行了深入研究,目前已形成了较为系统的技术。

考虑到国内天然气管道采用的强度设计系数主要参考国外标准制订^[4-5],每个国家的管材生产、管道施工、管道运行维护及可接受的风险水平不同,笔者应用可靠性设计和评价方法,采用国内统计的管道材料、管道施工、管道运行维护数据和建立的管道目标可靠度,在对天然气管道强度设计系数进

行计算评估的基础上,根据天然气管道的管径大小,对管道的强度设计系数进行了细化和推荐。

1 天然气管道的强度设计系数

为保障公众安全,国内外标准一般是根据管道两侧的居民(建筑物)密度指数来划分不同的地区等级,然后再根据不同的地区等级规定不同的管道强度设计系数。

天然气管道的强度设计系数最早由美国 ASME 委员会提出并制订,从 1935 年首次纳入 ASME 标准至今,经过几次较大修改,尤其是在 1990 年把 1 级 1 类地区采用 0.8 设计系数写入 ASME B31.8,沿用至今,这些强度设计系数的确定主要依据工程经验。由于 ASME 标准的历史主导地位,国内外输送天然气管道标准大都是在 ASME B31.8 标准基础上,结合各国的具体情况,对地区等级划分和管道强度设计系数等进行了适当调整。国内外具有代表性的输送天然气管道设计标准对地区等级划分及管道强度设计系数规定如表 1 所示^[6-9]。

表 1 不同标准地区等级划分及强度设计系数对比表

标准	地区等级	设计系数	居民(建筑物)密度指数
GB 50251—2015《输气管道工程设计规范》	1 级 1 类	0.80	≤ 15 户 / (2 km × 0.4 km)
	1 级 2 类	0.72	≤ 15 户 / (2 km × 0.4 km)
	2 级	0.60	< 100 户 / (2 km × 0.4 km)
	3 级	0.50	≥ 100 户 / (2 km × 0.4 km)
	4 级	0.40	4 层及以上楼房 / (2 km × 0.4 km)
ASME B 31.8—2014《输气和配气管道系统》	1 级 1 类	0.80	≤ 10 户 / (1.6 km × 0.4 km)
	1 级 2 类	0.72	≤ 10 户 (1.6 km × 0.4 km)
	2 级	0.60	< 46 户 (1.6 km × 0.4 km)
	3 级	0.50	≥ 46 户 (1.6 km × 0.4 km)
	4 级	0.40	4 层及以上楼房 / (1.6 km × 0.4 km)
ISO 13623—2009《石油和天然气工业——管道输送系统》	1 级	0.83	很少有人活动
	2 级	0.77	< 50 人 / km ²
	3 级	0.67	≥ 50 人 / km ²
	4 级	0.55	≥ 250 人 / km ²
	5 级	0.45	4 层及以上楼房
CSA Z 662—2011《油气管道系统》	1 级	0.80	≤ 10 户 (1.6 km × 0.4 km)
	2 级	0.72	< 46 户 (1.6 km × 0.4 km)
	3 级	0.56	≥ 46 户 (1.6 km × 0.4 km)
	4 级	0.44	4 层及以上楼房 (1.6 km × 0.4 km)

上述各标准中不同地区等级的管道强度设计系数和用于划分地区等级居民（建筑物）密度指数均有所不同，GB 50251 与 ASME B31.8 标准相比，不同地区等级的管道强度设计系数完全一致，但居民（建筑物）密度指数 GB 50251 规定要大于 ASME B31.8，这与国内人口稠密国情有关；CSA Z662 标准与 ASME B31.8 标准相比，居民（建筑物）密度指数完全一致，但管道强度设计系数相比则差异较大。

从风险角度来讲，管道的风险等于失效概率与失效后果的乘积，管道失效概率不但与管道的壁厚有关，也与人文活动有关，而管道壁厚和人文活动又分别与管道的设计系数和沿线地区等级相关；管道失效后果与地区等级直接相关，失效后造成的人员伤亡是人口密度的函数。因此通过不同地区等级划分和管道强度设计系数的选用，可以控制管道的风险。

2 基于可靠性的管道设计和评价方法

基于可靠性的设计和评价方法实质是对不同管道极限状态下的荷载和抗力不确定因素进行定量分析计算，该方法与单一设计系数设计方法相比，针对管道实际的失效形式进行设计，避免采用不合理或过于保守的设计，能实现管道设计、材料、施工和运行操作等方面的统一^[10-11]。

近 20 年来，国际上在管道基于可靠性的设计和评价方面开展了大量工作，并逐步提出了基于可靠性的管道设计和评估方法标准，如 ISO 16708—2006《基于可靠性的极限状态方法》和 CSA Z662—2007《油气管道系统》附录 O。为配合国内“第三代大输量天然气管道关键技术研究”，中石油在 2012 年立项开展了“天然气管道基于可靠性的设计和评价方法研究”，经过近 4 年的系统研究，消化吸收了国外已有的研究成果，结合国内天然气管道的设计、材料、施工和运行维护情况，制订了国内天然气管道的可接受社会风险和个体风险，推导完成了国内天然气管道的目标可靠度^[11]；基于现有极限状态方程适用性分析，建立了包括腐蚀、第三方机械挖掘损伤和管道无缺陷破裂等方面的 21 个管道极限状态方程；根据国内管道运行维护和挖掘机数据，建立了管道碰撞概率计算模型和挖掘机作用力计算模型^[12]；针对国内管材、管道焊接施工、管道腐蚀及内检测情况，建立了不确定参数分布函数数据库；研究构建了可靠度计算模型和优化算法，开发了可靠性设计和评估计算软件。通过课题研究和攻关，目前已形成

较为系统的天然气管道可靠性设计和评价技术体系，成果也已在一些工程中得到了应用^[12-17]。

3 管道设计系数评估技术路线

为评估目前 GB 50251 标准规定的管道设计系数，针对国内 258 种天然气管道设计工况，在满足要求目标可靠度的条件下，利用可靠性设计方法求取计算管道壁厚和反推管道设计系数，并与国家标准规定值进行对比分析，具体技术路线如下。

1) 确定目标可靠度：利用国内极端极限状态目标可靠度计算公式对选定的 258 种工况进行目标可靠度计算，即确定允许的最大失效概率。

2) 计算失效概率：在一定范围内改变管道壁厚，利用软件经过大量计算迭代得出特定设计工况的无缺陷管道破裂失效概率、外部腐蚀和第三方设备冲击条件下的大型管道泄露失效概率和破裂失效概率。

3) 确定临界壁厚值：将计算得到的失效概率与目标可靠度进行比较，选取使失效概率与目标值最为接近的壁厚值为目标可靠度下的临界壁厚值，并与输气管道工程设计规范中相应的计算壁厚对比分析。

4) 管道设计系数评估：计算与临界管道壁厚相对应的管道强度设计系数，并与输气管道设计规范所规定的管道设计系数对比分析。

4 设计工况的建立和临界壁厚计算

研究前期开展了行业调查，向管道运营商收集了 35 000 km 国内已建陆地天然气管道的 148 种组合工况，并建立数据库。同时考虑到未来一段时间天然气输送管道项目的发展趋势，补充数据库至 258 种不同的设计工况，共涉及 4 种地区等级（一、二、三、四）、5 种设计压力（4.0 MPa、6.4 MPa、8.0 MPa、10.0 MPa 和 12.0 MPa）、5 种管材钢级（X52、X60、X65、X70 和 X80）和 9 种管道外径（323 mm、426 mm、508 mm、610 mm、660 mm、711 mm、813 mm、1 016 mm 和 1 219 mm）的不同组合，具体情况如表 2 所示。

4.1 目标可靠度的确定

目标可靠度作为管道安全性衡量准则，主要考虑的是管道极端极限状态失效后（管道大泄漏及破裂等）对周围人员的安全影响^[6]，其作为管道基于可靠性设计的评判标准和前提，是进行临界壁厚值反推的基础和关键。在对国内天然气管道进行大量计

表 2 基于可靠性设计方法反推得到的临界壁厚值统计表

管径 /mm	压力 /MPa	X52 钢地区等级				X60 钢地区等级				X65 钢地区等级				X70 钢地区等级				X80 钢地区等级				
		一	二	三	四	一	二	三	四	一	二	三	四	一	二	三	四	一	二	三	四	
323	4.0	3.5	4.4	4.4	4.7	3.3	4.1	4.1	4.3													
	6.4	4.9	5.4	5.5	6.0	4.6	5.2	5.2	5.9					4.9	5.0							
	8.0	5.5	6.0	6.1	6.8	5.4	6.0	6.0	6.8													
426	4.0	4.0	4.9	4.9	5.8	3.8	4.6	4.9	5.5													
	6.4	5.5	6.0	5.9	7.0	5.4	5.9	5.9	6.9													
	10.0	7.4	8.0	8.4	9.3	7.4	7.9	8.3	9.1			7.6	8.1		7.3							
508	4.0	4.4	5.4	5.4	6.5	4.2	5.1	5.2	6.1	4.0	4.8	4.9	5.5									
	6.4	6.0	6.5	6.6	7.7	5.9	6.5	6.6	7.6	5.8	6.1	6.4	7.0								7.0	
	8.0					7.0	7.5	7.9	8.7	6.8	7.1	7.3	7.8	6.6	6.8	7.2	7.7					
	10.0					8.2	8.7	9.2	10.1	7.9	8.1	8.4	8.9									
610	4.0	4.8	6.0	6.0	7.3																	
	6.4	6.6	7.2	7.4	8.6	6.6	7.1	7.6	8.5	6.4	6.7	7.1	7.7	6.2	6.5	6.9	7.6					
	8.0					7.8	8.5	8.8	9.7	7.5	7.9	8.1	8.8	7.2	7.7	7.9	8.6					
	10.0					9.2	10.0	10.4	11.2	8.8	9.1	9.3	10.0	8.5	9.0	9.2	9.8					
660	4.0	5.0	6.1	6.3	7.6																	
	6.4					6.9	7.7	8.0	8.8	6.7	7.2	7.4	8.1									
	8.0					8.2	9.0	9.3	10.1	7.8	8.3	8.5	9.1									
711	4.0	5.0	6.1	6.3	7.6																	
	6.4					7.2	8.2	8.4	9.2	7.0	7.5	7.8	8.4	6.7	7.3	7.5	8.2					
	8.0					8.5	9.4	9.8	10.6	8.2	8.7	8.9	9.6	7.9	8.4	8.7	9.2					
	10.0					10.1	11.1	11.4	12.2	9.7	10.2	10.4	11.1	9.2	9.8	10.1	10.6					
813	6.4					7.9	8.9	9.1	10.0	7.6	8.2	8.4	9.2	7.3	8.0	8.2	8.9					
	8.0					9.4	10.4	10.6	11.5	8.9	9.5	9.8	10.5	8.5	9.2	9.4	10.6					
1 016	8.0									10.7	11.4	11.6	12.5	9.8	10.6	11.0	11.7	9.2	9.8	10.2	11.2	
	10.0									13.3	14.1	14.3	14.9	11.9	12.6	12.8	13.6	11.4	11.9	12.2	12.9	
1 219	10.0																	13.8	14.4	14.6	15.1	
	12.0																	16.6	17.3	17.6	18.0	

算和参考国内外相关行业可接受风险的基础上，制订了国内天然气管道的可接受社会风险和个体风险，并根据管道的失效后果模型，推导了国内极端极限状态目标可靠度计算公式^[12]。

$$R_T = \begin{cases} 1 - \frac{775}{(\rho p D^3)^{0.63}}, (\rho = 0) \\ 1 - \frac{9.96}{(\rho p D^3)^{0.59}}, (\rho p D^3 \leq 4.7 \times 10^9) \\ 1 - \frac{9.3 \times 10^{10}}{(\rho p D^3)^{1.65}}, (\rho p D^3 \geq 4.7 \times 10^9) \end{cases} \quad (1)$$

式中 R_T 表示管道极端极限状态的目标可靠度； p 表示设计压力，MPa； D 表示钢管外径，mm； ρ 表示人口密度，人/ 10^4 m^2 。

4.2 失效概率的计算

极限状态可以视作一种失效模式，其中“失效”被广义地理解为不能满足设计要求的一种状态。目标可靠度 (R_T) 被定义为管道在规定时段内能够满足其全部设计要求的概率，其与相同时段内的失效概率 (p_f) 二者之间的关系是^[18-19]：

$$R_T = 1 - p_f \quad (2)$$

临界壁厚值的反推，就是在满足目标可靠度的

前提下，对使得极端极限状态下失效概率最大壁厚值的探索过程，也就是寻找满足式(3)最小壁厚值的过程：

$$1 - (p_{LL} 7.5 \times 10^5 / D^3 + p_{RU}) > R_T \quad (3)$$

式中 p_{LL} 、 p_{RU} 分别表示管道大泄漏、爆裂的失效概率，次/(km·a)。

4.3 临界壁厚值的确定

在利用软件计算失效概率时，计算模拟次数为 1×10^8 次，模拟计算 30 a 中最大失效概率值(大泄漏、破裂)作为临界壁厚反推的实际失效概率。结合国内的管材、焊接、腐蚀和运行维护等统计数据，建立参数的计算模型，并选择合适的设计参数及维修计划等，经过大量迭代计算得到了数据库中 258 种天然气管道设计工况的临界壁厚值，反推结果见表 2。

5 管道设计系数的计算及推荐

根据输气管道工程设计规范中管道壁厚的计算公式，利用基于可靠性设计方法的临界壁厚，反推计算得到可靠性设计方法对应 258 种设计工况的管道强度设计系数，计算公式如下：

$$F = \frac{pD}{2\sigma_s \varphi \delta t} \quad (4)$$

式中 F 表示强度设计系数； σ_s 表示钢管标准规定的最小屈服强度，MPa； φ 表示焊缝系数； δ 表示钢管计算壁厚，mm； t 表示温度折减系数，当温度小于 120 °C 时，取值为 1.0。

不同工况下推导计算的管道强度设计系数与国家标准规定的管道强度设计系数对比结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出，推导计算的管道设计系数与管道直径具有较好的相关性，对于 4 个地区等级，管道设计系数均随管道直径的增大而增大。对于大部分工况来说，小直径管道(直径分别为 323 mm、426 mm 和 508 mm)设计工况中，基于可靠性方法的管道设计系数小于国家标准规定值；在中等直径管道(直径分别为 610 mm 和 660 mm)设计工况中，2 种管道设计系数在一定的范围内相互交叉；在大直径管道(直径分别为 711 mm、813 mm、1 016 mm 和 1 219 mm)设计工况中，基于可靠性设计方法得到了更高的管道设计系数。

针对 4 个地区等级的所有设计工况，按照管径的不同，分别计算可靠性设计方法得到管道设计系数平均值。基于方便应用和安全考虑，将平均设计系数值进行适当的调整，得到了表 3 推荐采用的管道强度设计系数。

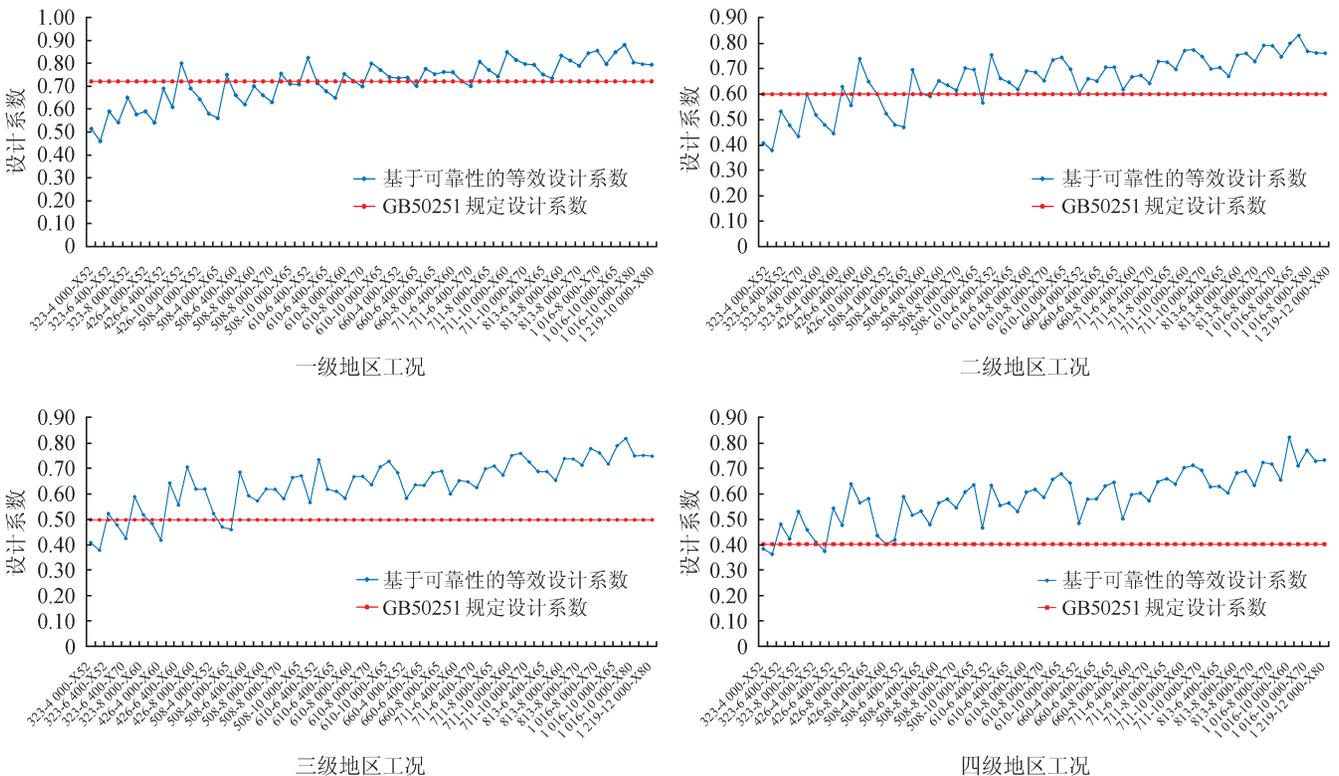


图 1 计算所得管道强度设计系数与国家标准规定推荐系数的对比图

表 3 基于可靠性设计方法推荐采用的管道强度设计系数表

地区等级	管道强度设计系数		
	小直径管道	中等直径管道	大直径管道
一级地区	0.62	0.72	0.80
二级地区	0.55	0.65	0.72
三级地区	0.50	0.60	0.65
四级地区	0.45	0.55	0.60

6 结论和建议

1) GB 50251 规定的管道强度设计系数主要参考 ASME B31.8 制订, 这些系数的确定来源于长期的工程实践, 无法量化反映管材性能、施工和运行维护水平以及管道技术的进步。

2) 可靠性设计和评价方法是一种科学、合理的方法, 可针对管道失效形式进行设计, 避免采用不合理或过于保守的管道设计, 能实现管道设计、材料、施工和运行操作等的统一, 可统筹考虑管道失效概率和后果因素, 最大化地实现管道等风险设计。

3) 对目前研究工况的推导计算结果表明, 基于可靠性方法的管道设计系数与管道直径具有较好的相关性。对于一、二级地区的小口径管道, 反推得到的管道强度设计系数要低于国家标准规定值; 对于大口径管道, 不同地区等级的反推管道强度设计系数均大于国家标准规定值。说明现行国家标准规定的管道强度设计系数不能实现管道的等风险设计, 基于可靠性设计方法确定的管道强度设计系数比国家标准规定值更有利于实现管道的等风险设计。

4) 为了保障管道安全、提高管道经济性, 避免采用不合理或过于保守的管道设计, 建议对现行国家标准规定的管道强度设计系数进一步细化研究, 宜细分工况, 确定对应的管道强度设计系数, 以期实现天然气管道的等风险设计。

参 考 文 献

- [1] 张宏, 顾晓婷, 赵丽恒. 基于可靠性的油气管道设计系数研究[J]. 焊管, 2011, 34(4): 58-62.
Zhang Hong, Gu Xiaoting & Zhao Liheng. Research on design coefficient of oil and gas pipeline based on reliability[J]. Welded Pipe and Tube, 2011, 34(4): 58-62.
- [2] Michalopoulos E & Babka S. Evaluation of pipeline design factors[R]. Hartford: The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company, 2000.
- [3] 赵新伟, 张华, 罗金恒. 油气管道可接受风险准则研究[J]. 油气储运, 2016, 35(1): 1-6.
Zhao Xinwei, Zhang Hua & Luo Jinheng. Risk acceptance criteria for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(1): 1-6.
- [4] 孟虎林, 刘士超, 于方涌, 朱威. 澳大利亚管道试压技术标准的先进性[J]. 油气储运, 2016, 35(5): 508-512.
Meng Hulin, Liu Shichao, Yu Fangyong & Zhu Wei. Advancement of Australian technological standards for pressure testing of pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(5): 508-512.
- [5] 刘迎春, 石玉辉, 王朝璋, 胡维润, 王永辉, 王国维. 澳大利亚长输管道管理标准的先进性[J]. 油气储运, 2016, 35(7): 759-762.
Liu Yingchun, Shi Yuhui, Wang Chaozhang, Hu Weirun, Wang Yonghui & Wang Guowei. Advancements in long-distance pipeline management standards of Australia[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(7): 759-762.
- [6] 中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司. 输气管道工程设计规范: GB 50251—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Southwest Company of China Petroleum Engineering Co., LTD. Code for design of gas transmission pipeline engineering: GB 50251-2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [7] The American Society of Mechanical Engineers. Gas transmission and distribution piping systems: ASME B31.8 [S]. New York: ASME, 1991.
- [8] International Organization for Standardization. Petroleum and natural gas industries: BS EN ISO 15156-1:2002 [S]. London: British Standards Institution, 2009.
- [9] Canadian Standards Association. Oil and gas pipeline systems: CSA Z662-2011[S]. Ontario: CSA, 2011.
- [10] Zhang Wenwei, Zhang Zhenyong, Zhang Jinyuan, Yu Zhifeng, Yang Peng & Liu Yuqing. Research on reliability-based design technique of China domestic onshore gas pipeline[C]//10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, 2014.
- [11] Nessim M, Zhou Weixing, Zhou J, Rothwell B & McLamb M. Target reliability levels for design and assessment of onshore natural gas pipelines[C]//2004 International Pipeline Conference, 4-8 October 2004, Calgary, Alberta, Canada. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/IPC2004-0321>.
- [12] Zhang Jinyuan, Zhang Zhenyong, Yuzhifeng, Wu Wen & Chen Yingshuai. Building a target reliability adaptive to China onshore natural gas pipeline[C]//10th International Pipeline Conference, 29 September-3 October 2014, Calgary, Alberta, Canada. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/IPC2014-33129>.
- [13] Lu Jiang, Wu Wen, Zhang Zhenyong & Zhang Jinyuan. Probability calculation of equipment impact based on reliability method[C]//10th International Pipeline Conference, 29 September-3 October 2014, Calgary, Alberta, Canada. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/IPC2014-33147>.

[14] Cunhas SB. Comparison and analysis of pipeline failure statistics[C]// 9th International Pipeline Conference, 24-28 September 2012, Calgary, Alberta, Canada. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/IPC2012-90186>.

[15] Zhang Zhenyong, Zhang Wenwei, Zhang Jinyuan & Liu Yuqing. Application of reliability-based design method of pipeline material selection[C]//10th International Pipeline Conference, 29 September-3 October 2014, Calgary, Alberta, Canada. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/IPC2014-33038>.

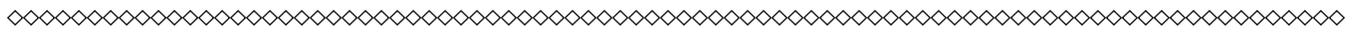
[16] Zhou J, Nessim M, Rothwell B & Zhou Wenxing. Development of reliability-based design and assessment standards for onshore natural gas transmission pipelines[C]//International Pipeline Conference, 25-29 September 2006, Calgary, Alberta, Canada. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/IPC2006-10045>.

[17] Zhu Xiankui & Leis BN. Assessment criteria and burst pressure prediction for pipelines with long blunt defects[C]//9th International Pipeline Conference, 24-28 September 2012, Calgary, Alberta, Canada. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/IPC2012-90625>.

[18] 帅健. 油气管道可靠性的极限状态设计方法[J]. 石油规划设计, 2002, 13(1): 18-21.
Shuai Jian. The reliability-used limit-state design method[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2002, 13(1): 18-21.

[19] 温凯, 张文伟, 宫敬, 李恒东, 张振永, 赵博渊. 天然气管道可靠性的计算方法[J]. 油气储运, 2014, 33(7): 729-733.
Wen Kai, Zhang Wenwei, Gong Jing, Li Hengdong, Zhang Zhenyong & Zhao Boyuan. Computation of gas pipeline reliability[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(7): 729-733.

(修改回稿日期 2017-01-22 编辑 何明)



中石油力降成本初步实现页岩气效益开发

根据最新公布的财务数据, 2016 年, 中石油国内天然气产量占其国内油气产量总当量的比例达到 39.6%, 占全国天然气总产量的比例达到 73.2%。这其中, 页岩气的突破性进展可圈可点。截至 2016 年底, 中石油长宁—威远、昭通两个国家级页岩气示范区已建成页岩气配套产能 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2016 年产量超过 $28 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

通过不断的技术突破和工艺优化, 在长宁—威远示范区, 长宁区块的钻井周期已从 150 天降至 70 天, 威远区块的钻井周期从 196 天降至 90 天, 平台压裂周期从 100 天降至 60 天, 单井钻井成本从初期最高的 1.3 亿元降至 5 000 万元。随着开采技术的日趋成熟和开采成本的不断降低, 中石油对于 3 500 m 以浅页岩气资源已基本实现了效益开发。中石油与四川能源投资集团等成立的国内首家企地合资的页岩气勘探开发公司——四川长宁天然气开发有限责任公司 2016 年实现税后净利润近 3.5 亿元, 全部投产井的内部收益率达到 13.86%。

我国页岩气资源丰富, 其中四川盆地及周边地区是目前较为理想的勘探开发区域。不过, 我国页岩气资源地质环境相对复杂, 一度被认为开发成本过高, 距离实现商业化开采十分遥远。然而, 通过我国油气企业 10 年的持续攻关, 目前我国已成为继美国、加拿大之后第三个实现页岩气商业化开发的国家。

(天工 摘编自中国石油新闻中心)