

文章编号: 1000-8241(2017)09-1071-07

基于可靠性的小口径天然气管道设计方案优选

周亚薇 张金源 张振永

中国石油管道局工程有限公司设计分公司

摘要: 基于可靠性的设计方法针对管道实际失效形式,对不同极限状态的荷载和抗力等不确定因素进行定量分析,确保管道安全可靠。全生命周期费用的比选可权衡管道耗材、施工、运行维护及失效后果,在保证安全的前提下,实现管道经济性最优。针对管径 273 mm 的某天然气管道,首次采用基于可靠性的设计方法进行钢管壁厚设计。利用调研得到的管道材料、施工及运维等不确定参数,计算目标可靠度下的临界壁厚;根据规格壁厚的规定,分别对 5.2 mm、5.6 mm、6.4 mm 及 7.1 mm 壁厚方案的全生命周期费用进行定量计算分析。结果显示:5.2 mm 方案的建设期和运营期费用最低,但失效概率大导致其潜在损失费用明显高于其他方案;6.4 mm 方案的全生命周期费用最低,30 年总费用比 5.2 mm 方案低 0.51%。基于管道安全可靠性和经济适用性的综合考虑,推荐采用壁厚 6.4 mm 方案。(图 5,表 7,参 20)

关键词: 可靠性; 临界壁厚; 全生命周期; 潜在损失费用

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.09.015

网络出版时间: 2016-12-19 16:21:14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20161219.1621.002.html>

Optimization of reliability-based design schemes on small-diameter natural gas pipelines

ZHOU Yawei, ZHANG Jinyuan, ZHANG Zhenyong

China Petroleum Pipeline Engineering Co. Ltd. (Engineering)

Abstract: The reliability-based design method can be used to analyze quantitatively the uncertainty factors at different ultimate limit states (e.g. load and resistance) in the actual failure mode of pipelines, so as to guarantee the safety and reliability of pipelines. Based on life-cycle cost comparison, the pipe material, construction, operation, maintenance and failure consequences can be balanced so as to realize the optimal pipeline economy while the pipeline is kept safe. For a certain natural gas pipeline with the diameter of 273 mm, the wall thickness was designed by using the reliability-based design method for the first time. The critical wall thickness corresponding to the target reliability was calculated by the uncertainty parameters (e.g. pipe material, construction and operational maintenance) which were acquired by means of survey and study. According to the standard wall thickness in design code, the life-cycle cost was quantitatively calculated and analyzed for the schemes with wall thickness of 5.2 mm, 5.6 mm, 6.4 mm and 7.1 mm, respectively. It is indicated that the scheme with the wall thickness of 5.2 mm is the lowest in construction and operation costs while its potential loss cost is much higher than the other schemes due to its high failure probability. The 6.4 mm scheme is the lowest in life-cycle cost and its total cost in 30 years is 0.51% lower than that of 5.2 mm scheme. When safe reliability and economic applicability are taken into consideration comprehensively, it is recommended to adopt the scheme with wall thickness of 6.4 mm. (5 Figures, 7 Tables, 20 References)

Key words: reliability, critical wall thickness, life cycle, potential loss cost

对于油气输送管道而言,国际上常用的设计方法主要有两种:一种是大部分标准规范所采用的基于应

力的设计方法,一种是国际上新兴的基于可靠性的设计方法。基于应力的设计方法要求管道设计压力下的

环向应力不大于许用应力,同时还要满足管道强度和刚度校核的要求。该方法简单易用,但是管道许用应力的计算采用单一的设计系数,无法真实反映管道的实际情况,可能导致设计不合理或过于保守^[1-6]。基于可靠性的设计方法能够针对管道实际的失效形式,对管道不同极限状态下的载荷和抗力等不确定因素进行定量分析,在满足管道安全目标可靠度的情况下,通过全生命周期费用比选,实现经济目标的最优化。

1 管道概况

以国内某拟建天然气管道为例阐述可靠性设计方法的应用。该钢制管道外径 273 mm,选用钢级 L245,设计输送压力 4.0 MPa。初步设计阶段的管道全长 48.9 km,其中二级地区和三级地区的管道长度分别为 40.9 km 和 8.0 km(表 1)。沿线设置 2 座阀室和 2 座站场。

表 1 拟建天然气管道沿线地区等级划分

起始里程/km	终止里程/km	地区等级	设计系数
0	10.5	二级地区	0.6
10.5	12.5	三级地区	0.5
12.5	26.0	二级地区	0.6
26.0	28.0	三级地区	0.5
28.0	44.9	二级地区	0.6
44.9	48.9	三级地区	0.5

对于小管径、低压力管道,采用基于应力设计方法得出的计算壁厚一般较小,设计选用壁厚需在计算壁厚基础上,综合考虑多方面因素(最小壁厚规定、现场焊接及抗第三方挖掘破坏能力等)对其壁厚进行向上圆整,使其满足工程需求,但最终选取的壁厚主要取决于设计人员的工程经验,缺少理论支撑。而基于可靠性的设计方法更加合理,能够对管道的安全可靠性和经济适用性进行定量计算分析,最终确定优化的壁厚设计方案。

2 基于应力设计方法的壁厚计算

GB 50251—2015《输气管道工程设计规范》规定的钢管壁厚与设计压力、钢管外径、钢管强度等级、强度设计系数及温度折减系数有关,直管段用钢管壁厚计算式为:

$$\delta = \frac{pD}{2\sigma_s\phi Ft} \quad (1)$$

式中: δ 为钢管计算壁厚,mm; p 为设计压力,MPa; D 为钢管外径,mm; σ_s 为钢管标准规定的最小屈服强度,MPa; ϕ 为焊缝系数; F 为强度设计系数; t 为温度折减系数,当温度小于 120 °C 时,取 1.0。

经计算,二级地区和三级地区的计算壁厚分别为 3.71 mm 和 4.45 mm。值得注意的是,上述计算壁厚仅考虑了管道内压引起的应力。实际上,在确定最终选用壁厚时,应考虑的因素还包括:施工期间管道运输或搬运过程受到的载荷,试压时水的重量、土壤载荷,运行期间管道可能承受的其他二次载荷,以及现场焊接和机械连接的要求等。在此基础上,根据 ASME B36.10M-2004《焊接和无缝轧制钢管》对规格壁厚的要求,选取符合实际要求的管道壁厚。针对该工程,一般可选用的管道壁厚为 5.2 mm、5.6 mm、6.4 mm、7.1 mm 中的一种,但具体选用哪种规格主要依据设计人员的专业经验,缺少安全性及经济性的量化指导,难以反映管道施工、运行及维护过程的实际情况,可能导致不合理或过于保守的设计。

3 基于可靠性设计方法的壁厚计算

基于可靠性设计方法(图 1)的实质是对不同管道极限状态下的载荷和抗力不确定因素进行定量分析计算,根据荷载和抗力计算失效概率,以衡量特定设计是否满足分配的目标可靠度,并指导设计参数的调整和优化。在保证管道安全的基础上,对既定设计方案进行全生命周期费用比选,以实现管道经济目标的最优化。其优点主要体现在:①针对管道实际失效形式进行设计,避免采用不合理或过于保守的设计标准;②可以保证一致的安全度,避免了采用同一安全系数导致不同管道风险水平的不一致或不明确;③节省投资,能有针对性地采取措施,避免功能冗余或不足,即以最小的成本达到既定的安全目标;④适用于解决新的问题,如高钢级管道的应用、提高设计系数、新的服役条件等;⑤实现设计与运行操作的整合。

在确定管道壁厚方面,该方法首先利用调研得到的管道材料、施工及运行维护等不确定性参数,采用蒙特卡洛仿真模拟方法,进行目标可靠度下的临界壁厚计算,以得到能够保证管道安全的最小管道壁厚;之后

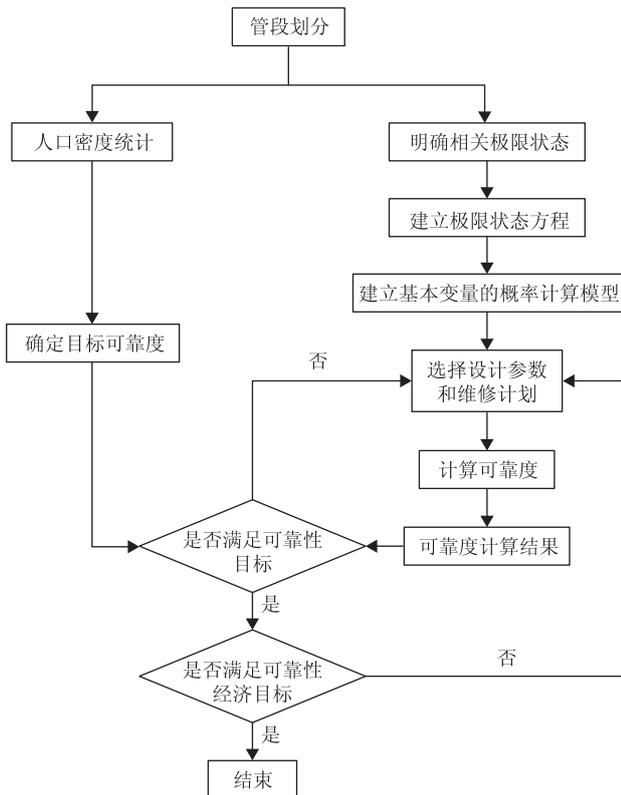


图1 基于可靠性设计方法的工作流程图

根据设计标准选取不同的规格壁厚,结合管道全生命周期费用的计算模型,定量计算分析各种壁厚设计方

案的全生命周期费用。通过经济性比选,最终确定既能保障管道安全性,又能满足全生命周期经济性最优的设计方案^[7-16]。

3.1 管道安全性

为了确保管道安全,要求其结构能够耐受生命周期内所有预先考虑的载荷与变形,且具备一定的安全裕度以防止失效。基于可靠性的设计方法将管道可靠度作为天然气管道安全性的衡量标准,通过合理的基于风险的方法建立管道可靠度目标,实现基于可靠性方法对新建天然气管道的设计、施工方案的优化,保持管道全生命周期内的风险水平一致。

在其他条件固定的前提下,通过对天然气管道极端极限状态(大孔泄漏或破裂)的失效概率进行模拟仿真计算,基于可靠性的设计方法可以反推管道的临界壁厚,即保证管道可靠度不低于目标可靠度的最小壁厚(图2)。当失效概率满足式(2)要求时,管道被认为是安全可靠的。

$$P_f = 1 - R_T \geq P_{ULS} \quad (2)$$

式中: P_f 为目标可靠度下的最大允许失效概率, $(\text{km}\cdot\text{a})^{-1}$; R_T 为天然气管道目标可靠度, $(\text{km}\cdot\text{a})^{-1}$; P_{ULS} 为极端极限状态的总失效概率, $(\text{km}\cdot\text{a})^{-1}$ 。

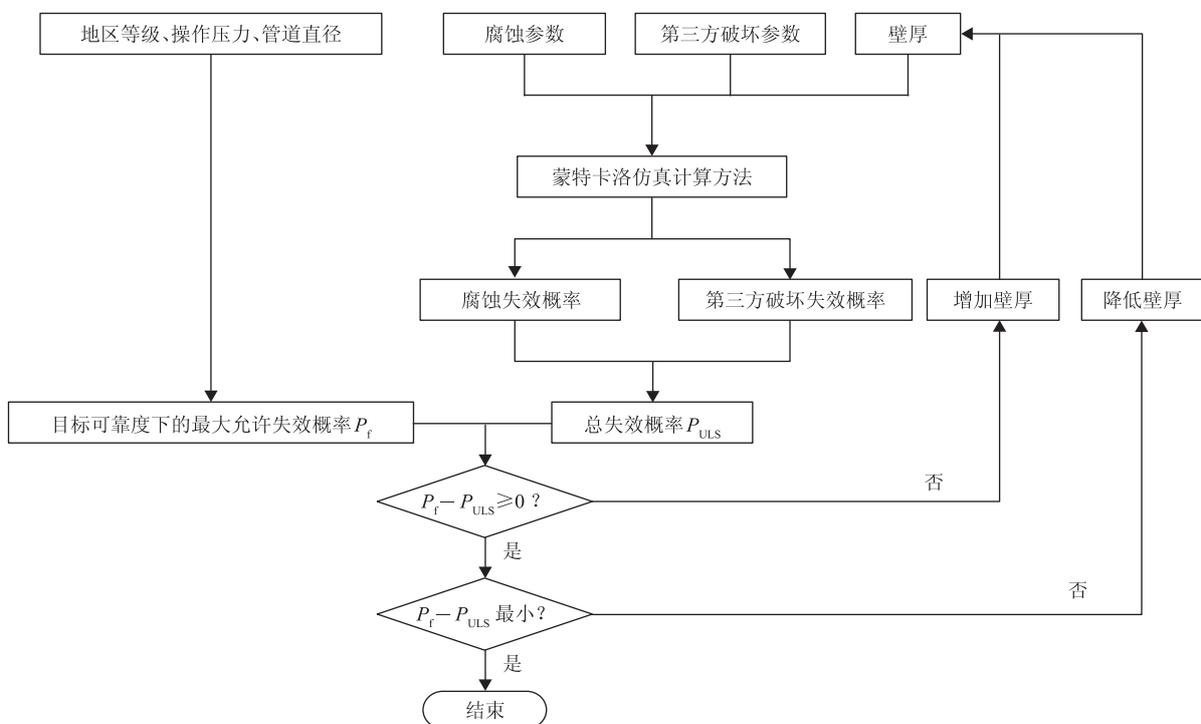


图2 基于可靠性设计方法的壁厚计算流程图

3.1.1 目标可靠度

根据适用于中国的天然气管道目标可靠度研究成

果,结合已建天然气管道的整体风险水平,天然气管道极端极限状态下的目标可靠度计算式为^[17]:

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

式中： ρ 为管道沿线的平均人口密度，人/hm²。

结合国内关于管道沿线平均人口密度的统计，计算拟建管道的可靠度目标值(表2)。

表2 不同地区等级的沿线人口密度分布情况

地区等级	平均人口密度/(人·hm ⁻²)	目标可靠度/(km·a) ⁻¹
二级地区	3.1	0.999 890
三级地区	6.2	0.999 927

3.1.2 管道可靠度

为了计算目标可靠度下的管道临界壁厚，利用国内材料、施工及运行维护数据，根据建立的极限状态方

程，利用蒙特卡洛方法，对管道极端极限状态的失效概率进行仿真计算。为了简化分析，仅针对腐蚀和第三方设备撞击进行失效概率计算，根据国内外数据统计，腐蚀和第三方设备撞击造成的大泄漏和破裂约占所有失效的60%~76%。为了统筹考虑导致管道失效的其他因素，将腐蚀与设备冲击的失效概率分别在计算结果的基础上放大1.5倍^[18-20]。管道极端极限状态下的总失效概率计算如下^[6]：

$$P_{ULS} = \frac{7.5 \times 10^5}{D^3} P_{LL} + P_{RU} \quad (4)$$

式中： P_{LL} 为大泄漏失效概率，(km·a)⁻¹； P_{RU} 为破裂失效概率，(km·a)⁻¹。

计算管道第三方破坏失效概率和管道外部腐蚀(表3、表4)时，采用CSA Z662-2015《油气管道系统》附录O中规定的极限状态方程，分别使用加拿大C-FER公司PRISMTM软件中的时间相关模型和时间无关模型进行年失效概率计算。

表3 计算腐蚀失效概率基本参数

钢级	腐蚀程度	最大允许操作压力/kPa	管径/mm	设计操作压力/kPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
L245	中等	4 000	273	4 000	415	245

表4 外部腐蚀参数选用值

平均缺陷深度/mm	缺陷密度/(个·km ⁻¹)	缺陷长度/mm	缺陷深度增长率/(mm·a ⁻¹)
威布尔(1.4, 0.5, 0, 0)	2.42	对数正态(40, 13, 0, 0)	威布尔(0.16, 0.04, 0, 0)
缺陷长度增长率/(mm·a ⁻¹)	平均缺陷深度和最大值的比率	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
对数正态(1.0, 0.5, 0, 0)	移动对数正态(1.75, 0.35, 1, 0)	正态(485, 24, 0, 0)	正态(305, 9.3, 0, 0)

注：①变量参数分布来源于中国已建管道的实际统计值；②变量参数的统计考虑了管道防腐层类型、途经土壤类型及管道钢级。

腐蚀失效概率与时间相关，计算模型和失效概率计算还需考虑到运行期间的内检测和缺陷修补及维护的影响。假设管道设计寿命为30年，管道每隔10年采用高精度内检测器进行检测。当检测到的剩余壁厚与标称壁厚比值小于等于50%，二级地区的计算失效压力与最大允许操作压力(MAOP)比值小于等于1.61，三级地区的计算失效压力与MAOP比值小于等于2时，应当对检出缺陷进行开挖与修复。

第三方设备撞击造成的失效概率与时间无关，管道每公里每年的失效概率等于每公里每年的冲击次数和每次冲击造成的失效概率之积。根据国内已建管道的运行维护和统计数据，构建了第三方设备冲击故障树模型，根据管道实际的设计参数和运维方式，可计算设备冲击概率和失效概率。冲击失效的概率需根据极限状态函数计算，得出基于国内挖掘机设备实际统计值的输入参数的概率分布(表5)。

表5 中国挖掘机设备质量及作用力概率分布

地区等级	挖掘机质量/t	凿深度/mm	凿长度/mm	齿长度/mm
二级地区	对数正态(33.5, 15.4, 0, 0)	威布尔(0.5, 0.5, 0, 0)	威布尔(153, 191.25, 0, 0)	矩形(119, 40, 0, 0)
三级地区	威布尔(18.8, 10.6, 0, 0)	威布尔(0.5, 0.5, 0, 0)	威布尔(153, 191.25, 0, 0)	矩形(119, 40, 0, 0)
地区等级	齿宽度/mm	夏比冲击功/J	屈服强度/MPa	
二级地区	矩形(3.5, 0.89, 0, 0)	对数正态(34, 3.82, 0, 0)	正态(305, 9.3, 0, 0)	
三级地区	矩形(3.5, 0.89, 0, 0)	对数正态(34, 3.82, 0, 0)	正态(305, 9.3, 0, 0)	

3.1.3 临界壁厚

在一定范围内改变设计壁厚,分别计算 30 年设计寿命内外部腐蚀和第三方设备冲击下大泄漏和破裂的失效概率,最终得到一个使总失效概率不大于目标可靠度下的允许失效概率的最小壁厚值,该壁厚即为目标可靠度下的临界壁厚。

在二级、三级地区,当壁厚输入值为 4.8 mm 时,经模拟仿真计算得到的总失效概率均超过了相应工况目标可靠度下允许的失效概率,因此,拟建管道在二级、三级地区的临界壁厚均为 4.9 mm(表 6)。即当壁厚不小于 4.9 mm 时,便可以保证管道的可靠度不低于目标可靠度,能够保障管道的安全性。

表 6 临界壁厚反推统计表

地区等级	壁厚/mm	外部腐蚀失效概率		第三方破坏失效概率		总失效概率	目标可靠度下的可允许失效概率	是否超出允许的失效概率
		大泄漏	破裂	大泄漏	破裂			
二级地区	4.9	7.31×10^{-5}	2.02×10^{-8}	9.18×10^{-5}	3.10×10^{-5}	$1.070 8 \times 10^{-4}$	$1.099 3 \times 10^{-4}$	否
	4.8	1.63×10^{-4}	1.34×10^{-7}	9.81×10^{-5}	3.43×10^{-5}	$1.230 4 \times 10^{-4}$	$1.099 3 \times 10^{-4}$	是
三级地区	4.9	7.31×10^{-5}	2.02×10^{-8}	5.14×10^{-5}	1.88×10^{-5}	$6.622 4 \times 10^{-5}$	$7.303 4 \times 10^{-5}$	否
	4.8	1.09×10^{-4}	7.39×10^{-8}	5.66×10^{-5}	2.15×10^{-5}	$7.684 2 \times 10^{-5}$	$7.303 4 \times 10^{-5}$	是

根据 ASME B36.10-2004 对规格壁厚的规定,向上圆整依次选取 5.2 mm、5.6 mm、6.4 mm 及 7.1 mm 作为比选壁厚方案,在确保管道安全可靠的前提下,进行管道经济性分析。

3.2 管道经济性

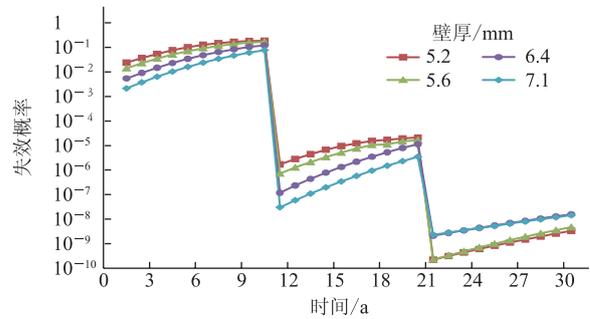
管道全生命周期费用包括建设期费用、运营期费用和潜在损失费用,可以权衡管道耗材、施工、运行、维护以及管道失效后果,在保证管道安全的前提下,以达到管道经济性的最优,最终实现设计、材料、施工和运行操作等方面的统一,其组成表达式为:

$$C_{fc} = C_{cc} + C_{oc} + C_{plc} \quad (5)$$

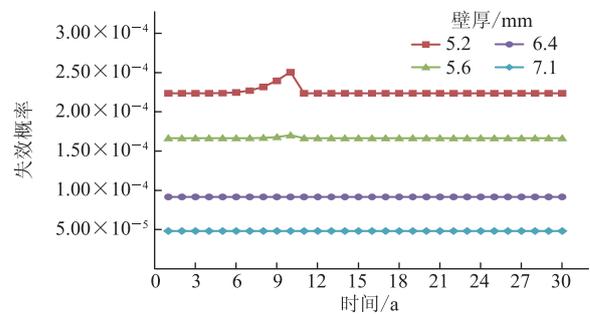
式中: C_{fc} 为管道全生命周期费用, 10^4 元; C_{cc} 为管道建设期费用, 10^4 元; C_{oc} 为管道运行费用, 10^4 元; C_{plc} 为管道失效后的潜在损失费用, 10^4 元。

管道建设期费用包括材料费(管材、焊材、防腐材料等),设备费,施工费,征地费等;运营期费用包括管道的日常巡线维护费、内检测费及站场的运行维护费等。这两项费用按常规做法通过工程概算获得。管道失效后的潜在损失费用为 30 年的总失效(小泄漏、大泄漏、破裂)损失费用,包括失效事件的直接抢修费(设备、材料和施工费),维抢修时的管段气体放空损失费,运行中断损失的输送收益,失效事故引起的人员伤亡补偿费等。

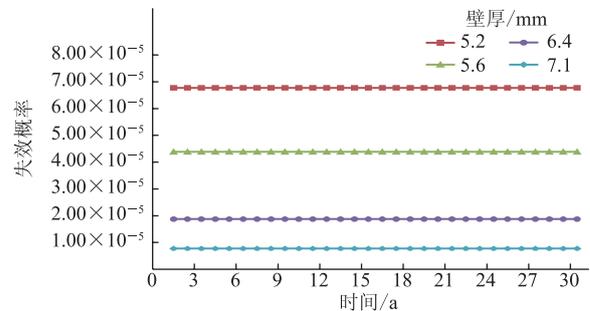
潜在损失费用与管道的失效概率直接相关,由每种方案的小泄漏、大泄漏及破裂失效概率的计算结果(图 3)可知,管道壁厚越大,相同时间所对应的失效概率越小。因此,随着壁厚的增加,管道的潜在损失费用会相应减小。



(a) 小泄漏



(b) 大泄漏



(c) 破裂

图 3 4 种壁厚设计方案失效概率计算结果分布图

按照全生命周期费用的计算方法,得到 4 种壁厚设计方案在 30 年设计寿命内的全生命周期综合费用(表 7)。

表7 4种管道壁厚设计方案全生命周期费用统计表

壁厚/mm	建设期投资总费用/(10 ⁴ 元)	运营期总费用/(10 ⁴ 元)	潜在损失费用/(10 ⁴ 元)			全生命周期综合成本费用/(10 ⁴ 元)
			小泄漏	大泄漏	破裂	
5.2	21 066	32 746.60	1 076.95	329.55	565.40	30 299.79
5.6	21 156	32 814.10	839.41	238.53	362.43	30 177.15
6.4	21 324	32 948.35	489.59	126.63	152.41	30 085.95
7.1	21 484	33 065.35	268.36	64.90	62.04	30 108.85

综上,并非壁厚越小,费用越低。建设期和运营期费用随着壁厚的增加而缓慢增长,壁厚从5.2 mm依次增加至7.1 mm,建设期和运营期总费用依次增加了0.29%、0.56%及0.51%。但是,由于较大的壁厚降低了管道失效的风险,从而潜在损失费用随着管道壁厚的增加而显著下降,依次降低了26.96%、46.64%及48.57%(图4)。

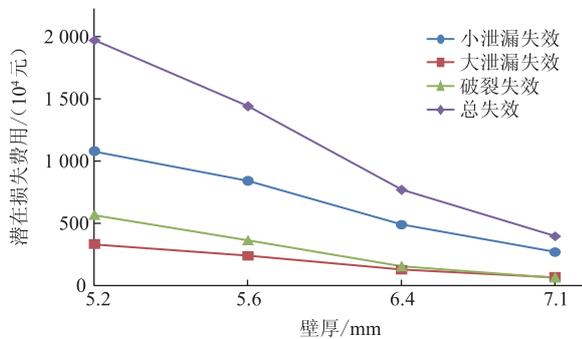


图4 4种壁厚设计方案的潜在损失费用对比图

3.3 推荐壁厚

当壁厚增加时,管道发生大泄漏和破裂失效的概率明显下降,管道的可靠性大幅提升,若基于安全考虑,壁厚越大,则管道越可靠。但壁厚的增大将不可避免地引起管材费用的增加,因此,需要通过定量的经济比选确定最终设计方案。

根据费用计算结果,最小规格壁厚5.2 mm方案的建设期和运营期费用均最低,但失效概率大导致其潜在损失费用明显高于其他方案;采用壁厚6.4 mm方案时全生命周期费用最低,30年总费用比5.2 mm、5.6 mm及7.1 mm方案分别低0.71%、0.30%及0.09%(图5)。

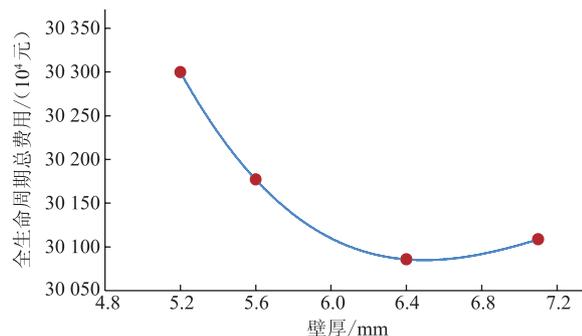


图5 全生命周期总费用对比图

基于可靠性的设计方法综合考虑了管道的安全可靠性和经济可行性2个方面,通过定量计算和比选,选用6.4 mm作为推荐壁厚。

4 结论

对于小口径、低钢级天然气管道,基于应力设计方法的计算壁厚较小,根据设计经验进行壁厚选择缺少理论支撑。基于可靠性的设计方法通过对管道耗材、施工、运行、维护以及管道失效后果进行定量分析对比,最终确定的壁厚设计方案不但满足了相关标准规范要求,也实现了管道安全目标可靠度和全生命周期费用最优的目标,为小口径天然气管道壁厚的选择提供了全新的思路和方法,具有较高的推广应用价值。

参考文献:

- [1] ZHANG W W, ZHANG Z Y, ZHANG J Y, et al. Research on reliability-based design technique of China domestic onshore gas pipeline[C]. Guangzhou: Proceedings of the 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, 2014: IEEE 32999.
- [2] ZHANG Z Y, ZHANG W W, ZHANG J Y, et al. Application of reliability-based design method of pipeline material selection[C]. Calgary: Proceedings of the 10th International Pipeline Conference, 2014: IPC 2014-33038.
- [3] ZHOU W, HUANG G. Model error assessment of burst capacity models for corroded pipes[C]. Calgary: Proceedings of the 9th International Pipeline Conference, 2012: IPC 2012-90335.
- [4] ZHU X K, LEIS B N. Assessment criteria and burst pressure prediction for pipelines with long blunt defects[C]. Calgary: Proceedings of the 9th International Pipeline Conference, 2012: IPC 2012-90625.
- [5] TRIFONOV O V, CHERNIY V P. A semi-analytical approach to a nonlinear stress-strain analysis of buried steel pipelines

- crossing active faults[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(11): 1298-1308.
- [6] ZHANG S, ZHOU W. An efficient methodology for the reliability analysis of corroding pipelines[C]. Calgary: Proceedings of the 9th International Pipeline Conference, 2012: IPC 2012-90482.
- [7] STEPHENS M J, LEEWIS K, MOORE D K. A model for sizing high consequence areas associated with natural gas pipelines[C]. Calgary: Proceedings of the 4th International Pipeline Conference, 2002: IPC 2002-27073.
- [8] 罗更生, 周煜. 含裂纹油气管道可靠性评定方法及敏感性分析[J]. *石油学报*, 2011, 32(6): 1083-1087.
- LUO G S, ZHOU Y. A reliability assessment method of crack-containing oil-gas pipelines and its sensitivity analysis[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(6): 1083-1087.
- [9] 刘雯. 天然气管道的运行可靠性评价技术[J]. *天然气工业*, 2001, 21(4): 94-97.
- LIU W. Technique of evaluating the reliability of natural gas pipeline operation[J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(4): 94-97.
- [10] 胡镁林, 黄坤, 吴晓南. 基于 D-S 证据理论的天然气管道可靠性评价[J]. *油气储运*, 2011, 30(7): 490-493.
- HU M L, HUANG K, WU X N. The gas pipeline reliability analysis based on D-S evidence theory[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2011, 30(7): 490-493.
- [11] 张宗杰, 谢青青, 文江波, 等. 干线天然气管道运行可靠性评价方法[J]. *油气储运*, 2014, 33(8): 807-812.
- ZHANG Z J, XIE Q Q, WEN J B, et al. Reliability evaluation method for gas trunk line[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2014, 33(8): 807-812.
- [12] 温凯, 张文伟, 宫敬, 等. 天然气管道可靠性的计算方法[J]. *油气储运*, 2014, 33(7): 729-733.
- WEN K, ZHANG W W, GONG J, et al. Computation of gas pipeline reliability[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2014, 33(7): 729-733.
- [13] 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 H, GU X T, ZHAO L H. Research on design coefficient of oil and gas pipeline based on reliability[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2011, 34(4): 58-62.
- [14] 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 J. The reliability-used limit state design method[J]. *Petroleum Planning & Engineering*, 2002, 13(1): 18-21.
- [15] 罗金恒, 赵新伟, 韩晓毅, 等. 西气东输管道可靠度预评估[J]. *焊管*, 2005, 28(3): 62-65.
- LUO J H, ZHAO X W, HAN X Y, et al. Pre-evaluation on reliability of West-East Gas Transmission Pipeline[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2005, 28(3): 62-65.
- [16] 黄维和. 油气管道风险管理技术的研究及应用[J]. *油气储运*, 2001, 20(10): 1-10.
- HUANG W H. Research and application of oil and gas pipeline risk management techniques[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2001, 20(10): 1-10.
- [17] ZHANG J Y, ZHANG Z Y, YU Z F, et al. Building a target reliability adaptive to China onshore natural gas pipeline[C]. Calgary: Proceedings of the 10th International Pipeline Conference, 2014: IPC 2014-33129.
- [18] ZIMMERMAN T, NESSIM M, MCLAMB M, et al. Target reliability levels for onshore gas pipelines[C]. Calgary: Proceedings of the 9th International Pipeline Conference, 2002: IPC 2002-27213.
- [19] NESSIM M, ZIMMERMAN T, GLOVER A, et al. Reliability-based limit states design for onshore pipelines[C]. Calgary: Proceedings of the 9th International Pipeline Conference, 2012: IPC 2012-27125.
- [20] LU J, WU W, ZHANG Z Y, et al. Probability calculation of equipment impact based on reliability method[C]. Calgary: Proceedings of the 10th International Pipeline Conference, 2014: IPC 2014-33147.

(收稿日期: 2016-06-06; 修回日期: 2017-07-02; 编辑: 杜娟)

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“第三代大输量天然气管道工程关键技术研究”, 2012E-2801-01.

作者简介: 周亚薇, 女, 1986年生, 工程师, 2012年硕士毕业于中国地质大学(北京)矿产普查与勘探专业, 现主要从事基于可靠性的油气管道线路设计及其评价方法的研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区和平路146号管道设计大厦, 065000。电话: 18732610681, Email: zhouyawei@cnpc.com.cn