

基于应变的管道设计准则 *

刘 冰^{1,2} 刘学杰^{1,2} 张 宏^{1,2}
(1. 中国石油大学·北京 2. 城市油气输配技术北京市重点实验室)

刘冰等. 基于应变的管道设计准则. 天然气工业, 2008, 28(2): 129-131.

摘 要 我国目前使用的基于许用应力的设计准则并不能完全有效地解决管道设计的所有问题, 特别是对于地面变形等位移载荷控制下的情形。通过对处于极限状态的椭圆化、拉裂和局部弯曲等管道失效形式的现行基于应变的标准进行对比, 为我国管道设计工作者提供了解决地震、断层等区域管道设计问题的重要参考; 根据国际上对管道在特定载荷作用下基于应变的设计趋势和我国西气东输及其二线工程的大规模建设, 提出了我国进行相关研究的必要性与迫切性。

主题词 管道 应变 应力 设计 标准

国内现行的各类管道设计标准大多数都是遵循传统的基于许用应力的设计准则, 即保证外载产生的管道应力或等效应力不高于管材本身的最低屈服应力。这种设计方法曾经为过去和现在的管道安全运营提供了很好的保障。但当遇到地震、滑坡、海底管道敷设等情况时, 对于管道应力超过比例极限后的继续变形, 基于应力的设计准则已不再适用, 应采取以应变为基础的设计^[1]。同时对于延性高的管材, 在载荷作用下产生应变后, 外载荷有被管道变形吸收的特点^[2], 此时应用基于应变的管道设计准则更为合理。因此, 基于应变的管道设计的研究十分必要。

一、管道设计准则

1. 基于应力的管道设计准则

鉴于传统钢材有明显的屈服点, 传统的应力设计准则中的许用应力是以管材规定的最低屈服应力为依据制定的, 即

$$\sigma \leq k\sigma_s \tag{1}$$

式中: σ 表示管材应力; σ_s 表示材料规定的最低屈服应力; k 表示设计系数。

2. 极限状态

极限状态设计方法在 DNV 和 CSA 等标准准则的制定中有较多的应用^[3,4]。这些准则对于管道极限状态的分类略有不同, DNV-OS-F101 的极限状态分类方法将其分为适用极限状态、临界极限状态、

疲劳极限状态、偶然极限状态 4 种。不同的极限状态有相应的失效模式(见表 1)。

表 1 极限状态的分类及所对应的失效模式表^[3,4]

极限状态分类	失效模式对应关系	
	DNV OS-F101	CSA Z662-03
适用极限状态	椭圆化 累计塑性应变	次要应力导致屈服 未倒塌的屈曲
临界极限状态	椭圆化 拉 裂 屈 曲 失稳断裂	拉 裂 主应力导致屈服 破裂等导致的弯曲 疲 劳
疲劳极限状态	循环载荷导致疲劳	/
偶然极限状态	偶然载荷引起临界失效	/

3. 基于应变的管道设计准则

挪威船级社(DNV)1982 年就提出将基于应变的设计准则与基于应力的设计准则结合起来^[5]。基于应变的设计准则研究从 20 世纪 90 年代初期开始较大范围地展开^[6]。挪威船级社于 1996 年出版了海底管线的极限设计准则^[7], 提出了多种载荷条件下的极限状态分析方法。同年, 加拿大标准协会(CSA)公布了 CSA Z662-96, 在海底管道设计和极限状态设计中也提出了基于应变设计的方式与方法^[8]。近十多年来许多机构和个人又提出了多种有借鉴意义的基于应变的设计准则, 同时也在继续探

* 本文受到中国石油天然气集团公司应用基础研究计划项目(编号: 04A40401)资助。
作者简介: 刘冰, 1978 生; 现为中国石油大学油气储运专业博士, 主要研究方向为油气储运系统安全。地址: (102249)北京市昌平区中国石油大学机电学院。电话: (010)89733963。E-Mail: lbcat@126.com

索和完善与应变设计准则相关的理论。现行的基于应变的管道设计准则包括:挪威船级社 2000 年出版的《海底管道系统》(DNV-OS-F101)、加拿大标准协会 2003 年出版的《油气管线系统》(CSA-Z662)、美国石油协会《碳氢化合物海底管道设计、建设、运行和维修(API RP 1111-1999)》、美国土木建筑工程师协会(ASCE)的《埋地管道设计指导》、ASME B31.8、API 1104 和 ABS 2001 等。

上述准则中, DNV-OS-F101 和 CSA-Z662 中既包括了基于应力的设计准则, 又包括了基于应变的设计准则; ASME B31.8 和 API 1104 允许基于应变的设计准则, 但没有具体条款规定; API RP 1111-1999 和 ABS 2001 中包含了部分特定管道基于应变设计的准则。

管道科技工作者针对基于应变的设计准则开展了大量的研究。其中以大型有限元软件为分析工具的数值模拟方法为主, 同时也做了一些全尺寸实验。

Ellinas 等人对包括纯弯曲、组合弯曲和内压载荷下的 36 个不同试件进行了测试, 提出了陆地和海底管道基于应变设计的方法, 可以利用大型有限元软件 ABAQUS 进行模拟计算, 进而得到屈曲应变的设计公式^[9]。Dinovitzer, Aaron S. 等人利用二维和三维非线性有限元分析确定了环向缺陷的局部扩展, 给出尖锐或平面缺陷失效准则^[10], 其失效准则考虑了缺陷长度、材料强化率和材料模型等因素。EMCC 公司的 WANG Yong-Yi 等人分析了存在表面裂纹的环焊缝的许用应变, 发现影响环焊缝应变承受能力的因素有: 缺陷尺寸、管材与焊接材料间的应变强化率、环焊缝强度匹配、断裂韧性、焊帽高度, 其中缺陷尺寸最为关键。做出了裂纹尖端张开位移的驱动力和外加应变的关系图, 并将其划分为 3 个区域, 对 252 例有限元数值模拟结果进行了曲线拟合, 得到各区域对应的许用应变^[11]。WANG Yong-Yi 等人把内部缺陷看成表面破裂缺陷的简化方法来研究大纵向应变下, 有内部缺陷的环焊缝的力学行为, 也利用 ABAQUS 软件分析研究了内部缺陷对环焊缝拉伸应变极限的影响^[12]。2003 年由美国管道安全部(OPS)及矿业管理部(MMS)联合主持, 爱迪生焊接研究所(EWI)撰写了《以应变为基础的管道设计》这一研究报告, 系统地阐述了以应变为基础的管道设计方法与建议。

目前世界范围内已经有多个工程应用了基于应变的设计准则。如 Shell 在 Malampaya 油田管道的设计建设中针对地震和海床运动应用了极限状态的

设计准则; Norman Wells 的 Enbridge 穿越冻土层的管道使用了基于应变的设计方法。

二、基于应变设计准则的比较

为了便于比较, 选取椭圆化(度)、拉裂、局部屈曲作为主要失效模式进行比较。

1. 椭圆化(度)

基于应变的椭圆化(度)设计准则的对比如表 2 所示, 椭圆度极限一般使用固定的上界或以通常的完整性和操作需要(如清管要求)来确定。CSA、DNV 中椭圆度的计算式均可表示为:

$$\Delta = 2 \left(\frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \right) \leq \Delta^{\text{crit}} \quad (2)$$

式中: Δ 为椭圆度, 无量纲; Δ^{crit} 为临界椭圆度, 无量纲; $D_{\max}$ 为管道外径最大值, mm; $D_{\min}$ 为管道外径最小值, mm。

表 2 管道椭圆化(度)设计准则对比表^[3, 4, 13-15]

规范或准则	椭圆度极限(%)
CSA-Z662-03 App.C	3.0(6.0) ¹⁾
DNV-OS-F101	3.0
API 1111-1999	5.5~6.2
Murray 等人	4.3~6.5 ²⁾

注: 1) 括号内数字表示在确认不会影响管道操作或维护, 也不会引起其他可能的失效时椭圆度极限的上界; 2) 环向应力作用下、管材屈服强度为 480 MPa、壁厚为 10 mm 管道。

CSA、DNV 对不同直径的管道规定了相对固定的临界椭圆度。CSA 仅在确认不会影响管道操作或维护, 也不会引起其他可能的失效时, 椭圆度极限值可提高为一般情况下的 2 倍。API 1111-1999 对于不同的管道外径规定了不同的椭圆度的临界值。Murray 等人提出的临界椭圆度考虑了纵向弯曲应变和环向椭圆度组合影响。在没有考虑其他因素, 特别是管道的 D/t 比值较小的情况下, 使用固定的椭圆度上界值是比较保守的。

2. 拉裂

基于应变的拉裂设计准则的对比见表 3, 拉裂极限一般使用弹性和塑性相结合的方法, 给出塑性应变极限值。DNV-OS-F101(2000)规定累计塑性应变超过 0.3% 时需要进行工程临界评价(ECA); 累计塑性应变超过 2.0% 时不仅需要进行工程临界评价(ECA), 还需要满足材料等其他附加要求。CSA、DNV 和 ASCE 中对这些应变的规定都是针对无缺陷管道的参考数值。

表 3 管道拉裂设计准则对比表^[3,4,16]

规范或准则	应变极限(%)
CSA-Z662-03	2.5 ¹⁾
DNV-OS-F101	累计塑性应变可超过 2.0% ²⁾
ASCE	2.0 ³⁾

注:1)海底管道安装应变极限;2)针对不同情形需满足安装和材料等的附加要求;3)地面变形中允许的拉应变极限值。

3.局部屈曲

CSA 中的局部屈曲纵向临界压应变用下式估算:

$$\epsilon_{crit} = 0.5 \frac{t}{D} - 0.0025 + 3000 \left[\frac{(p_i - p_e)D}{2tE_s} \right]^2 \left(\frac{D}{t} \leq 45, p_i \geq p_e \right) \quad (3)$$

式中:ε_{crit}为管道的临界压应变;t为管道壁厚,mm;D为管道外径,mm;p_i为管道最大设计内压力,MPa;p_e为管道外部最小静水压力,MPa;E_s=207000 MPa。

DNV-OS-F101(2000)综合载荷、外压等作用来确定不同载荷情况下局部屈曲的设计准则。如存在纵向压应变和内部过压时局部屈曲的设计准则为:

$$\epsilon_1 \leq \frac{\epsilon}{\chi} \quad (4)$$
$$\epsilon = 0.78 \left(\frac{t}{D} - 0.01 \right) \left(1 + 5 \frac{\sigma_1}{f_y} \right) \alpha_h^{-1.5} \alpha_{gw} \quad (5)$$

式中:ε₁为设计压应变;χ为应变系数;σ₁为环向应力,MPa;t=t-t_{corr},mm;t为无腐蚀管道壁厚,mm;t_{corr}为管道壁厚腐蚀裕量,mm;f_y为设计中使用的屈服应力,MPa;α_h= $\frac{\sigma}{\sigma_s}$ 管材的屈强比,其中σ为管材抗拉强度,MPa;α_{gw}为焊缝因子。

三、结论与建议

基于应变的管道设计准则从提出以来就一直备受关注,但无论是写入标准的设计准则条文,还是已有的研究成果,基于应变的设计准则和相应的评估方法都并不十分完善,仍有许多方面需要改进和发展。我国管道建设实践中同样面临诸如地震、滑坡、泥石流等各种地质灾害的威胁和越来越多的海底管道工程建设,但我国基于应变的管道设计准则还没有明确地提出和大范围地展开研究。面对管道设计与建设事业的飞速发展,借鉴国外相关领域的建设经验,结合我国的实际情况,深入研究基于应变的管道设计与评估准则,并同时改善管材生产工艺,生产

出适用的管材的任务,已迫在眉睫。

参 考 文 献

[1] 潘家华.高强度管线钢发展中的几个重要课题[J].焊管,2005,28(4):1-2.

[2] 刘学杰,孙绍平.地下管道穿越断层的应变设计方法[J].特种结构,2005,22(2):81-85.

[3] DNV. Offshore Standard OS-F101. Submarine pipeline systems[S].2000.

[4] Canadian Standards Association. Oil and gas pipeline systems[S].Canada,2003.

[5] DNV. Rules for submarine pipeline systems[S].Norway,1981.

[6] AME. Establishment of strain-Based criteria and analysis for the assessment of sub-sea pipelines[R]. Final Report AME/26563/R/04,1997.

[7] DNV. Rules for submarine pipeline systems (1996) [S]. Norway,1996.

[8] Canadian Standards Association. Oil and gas pipeline systems[S]. Rexdale, Ontario, Canada,1996.

[9] ELLINAS C P. Pipeline design based on strain criteria [J]. Chemical Business,1999,13(5):131-135.

[10] GRAVILLE, BRIAN A, DINO VITAER, AARON S, et al. Development of rational criteria for strain limits in pipeline welds[R]. Report to Nova Corporation,1993.

[11] WANG YONG-YI, RUDLAND, DAVID DENYS, et al. A preliminary strain-based design criterion for pipeline girth welds [C]. Proceedings of the 4th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, ASME,2002.

[12] WANG YONG-YI, WEN TAO, CHENG, et al. Tensile strain limits of buried defects in pipeline girth welds [C]. Proceedings of the 5th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, ASME,2004.

[13] American Petroleum Institute Publishing Services. Design, Construction, Operation, and Maintenance of Off-shore Hydrocarbon Pipelines [S]. Washington, D C, USA,1999.

[14] MURRAY N A, BILSTON. Rational acceptance limit for field bends in oil or gas pipelines [C]. International Pipeline Conference, Calgary, Canada,1992.

[15] 王明春,练章华,代娟,等.管道承压能力逆转原因探讨[J].西南石油大学学报,2007,29(3):126-129.

[16] The American Society of Civil Engineers. Guidelines for the design of buried steel Pipe (with addenda through February 2005) [S]. USA,2005.

(修改回稿日期 2008-01-07 编辑 罗冬梅)