

应变设计方法在城市燃气管网中的应用

舒安庆^{1,3} 吴开斌^{2,3}

(1. 武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430074;

2. 武汉市锅炉压力容器检验研究所,湖北 武汉 430015;

3. 武汉市压力容器压力管道安全工程研究中心,湖北 武汉 430074)

摘要:根据城市燃气管网铺设中的复杂地理条件及外部环境,讨论了应变极限状态设计方法中关于极限应变、局部屈服与强度匹配、累积应变的设计要求,说明其对我国城市燃气管网建设的指导意义。

关键词:极限应变状态;局部屈服;强度匹配;累积应变

中图分类号:TH49;TE88

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.11.023

0 引言

特种设备管理核心是安全,而针对其失效模式的研究和设计则更好预防事故,保障安全。新的经济形势和科技发展水平要求特种设备的设计需要兼顾安全性和经济性,针对其失效模式的设计和管理成为特种设备研究的热点^[1]。传统的燃气管道设计主要基于弹性极限设计准则,防止管道材料发生弹性失效。但城市燃气管道具有如下特征:1)城市管网敷设在地下,违章占压燃气管道占了很大比重,并且整治的难度较大;2)有的城市处在地震带上,地震引起的地质灾害如塌陷、断层、滑坡也将造成城市地面永久变形,导致城市埋地管道的破坏;3)有些城市地下水开采过度形成采空区,引起地表塌陷;4)车辆疲劳载荷等造成管线上方盖板被压塌或压弯,焊接点、阀门等处损坏。这些喻为城市生命线的燃气管道的失效形式主要包括腐蚀、过度变形、泄露、疲劳、韧性断裂等,其失效最终表现产生大的塑性变形,变形量的大小受管道外部环境的约束和内外压力的影响,用弹性极限设计准则已不能满足实际要求,应根据实际需要承受的最大变形来设计燃气压力管道。我国成功研制抗大变形管线钢^[2],压力管道自动化焊接使得焊接质量大幅提高^[3],燃气管道焊接和缺陷的试验与有限元模拟为更加精确的设计方法提供了依据^[4,6]。本文从应变极限、局部屈服与强度匹配、疲劳载荷的累积应变等设计要求阐述其对城市燃气管网建设的重要意义。

1 理论依据

传统的设计方法通常以承受工作条件下的内压所需的管道承载能力为基础,管道正常运行条件下的环向应力必须小于其最小屈服应力与安全系数的比值。针对城市管道的大变形失效模式,基于应变的设计可以满足管道设计要求。

基于应变设计的假设管道的变形程度跟周围环境位移相一致,周围环境的位移等于管道变形,其次管道的变形是受外部环境的位移控制,当外部环境的位移一定时,不同的管材,管道的塑性变形不能以相同的应力作为设计准则,因为不同管材在相同应力下的应变是不相同的,最大应变预测设计更满足实际管道变形要求。

按产生应变的不同方式把设计控制准则分载荷控制、位移控制及两者的综合,应变的极限状态设计主要考虑的载荷作用包括:内外压力载荷、土壤运动载荷、受约束条件下的热应力、局部弯曲载荷、预载荷等,并且不涉及腐蚀应力影响。基于应变的设计方法就是讨论在上述载荷条件下管道的拉、压极限应变、局部强度的匹配性、疲劳累积应变大小。

2 应力状态下的极限应变设计

在恶劣的地质条件和违章占压环境中,要保证管道安全服役和结构完整性,必须在设计时控制管道的极限拉伸和压缩应变,尤其是抗纵向应变的能力。应变设计准则要求管道最大极限拉伸应变和压缩应变 $\varepsilon \leq 10\%$,但管道的常见失效形式为局部屈服失效,尤其是局部的纵向拉伸应变,内

压作用下最大纵向临界应变 参考计算公式^[7]:

$$\varepsilon_c = 0.85 \left(\frac{l}{D} - 0.01 \right) \left(1 + \frac{\sigma_h}{\sigma_s \cdot S} \right) \alpha_h^{-1.5} \alpha_{gw} \quad (1)$$

式(1)中: $\frac{l}{D}$ 为厚径比; σ_h 为内压下周向设计应力; σ_s 为材料屈服强度; s 为安全系数; α_h 为塑变系数(最大屈强比). α_{gw} 为焊缝系数, $\frac{D}{t} \leq 20$, $\alpha_{gw} = 1$; $\frac{D}{t} \geq 20$, $\alpha_{gw} = 1.2 - 0.01 \left(\frac{D}{t} \right)$.

当 $\frac{D}{t}$ 取值在 50 ~ 100 之间, 上式的计算结果较为精确, 当 $\frac{D}{t} \leq 45$ 时, $\varepsilon_c = 0.78 \left(\frac{l}{D} - 0.01 \right) \left(1 + 5 \frac{\sigma_h}{\sigma_s} \right) \alpha_h^{-1.5} \alpha_{gw}$ 更为合适.

外压作用下极限纵向临界应变 参考计算公式^[7]:

$$\varepsilon_c = 0.85 \left(\frac{l}{D} - 0.01 \right) \left(g_d - \frac{p_e}{p_c} \right) \alpha_{gw} \quad (2)$$

式(2)中: g_d 为压溃系数, $g_d = 1/(1 - 10D_0)$, D_0 为椭圆度参数; p_e 为外压; α_{gw} 为焊缝系数, 取值同式(1). p_c 为压溃压力, $p_c = 26 \times \sigma_{SMYS} \left(\frac{l}{D} \right)^{2.5}$. σ_{SMYS} 为材料的标准最小屈服强度.

对于一次载荷, 上面的计算结果较为精确, 当受二次载荷作用时, 许用应变值可以取得比一次载荷变形稍大, 但不能大于 1.5%.

3 焊缝周围局部屈服状态的应变设计

由于外部载荷作用复杂, 如何阻止焊缝周围的局部屈服是极限应变状态设计的重点. 在焊缝的邻域内, 由于焊材与管材的强度不匹配、焊接热应力、焊接缺陷、腐蚀缺陷等造成应力集中. 应力集中系数与材料接口的形状、壁厚的匹配、焊缝的均匀度、管道的椭圆度、强度的匹配相关. 弹性应力集中系数用 Neuber 方法确定^[8].

$$k^2 = \frac{E \sigma \varepsilon}{s^2} \quad (3)$$

式(3)中: k 为理论应力集中系数; E 为弹性模量; ε 为接口根部的等效应变; σ 为接口根部的等效应力; s 为远离接口处的等效应力.

研究表明, 焊缝强度与母材强度之间为过匹配, 即焊缝强度应当高于管道母材, 使拉伸应变得以在钢管上累积形成大变形, 过匹配的程度以 5% ~ 10% 为宜^[5]. 焊材强度 σ 取值范围在管材的 $\sigma_{SMYS} + 80 \text{ MPa} < \sigma < \sigma_{SMYS} + 250 \text{ MPa}$ 之间, 存在累

积塑性变形 $\Delta \varepsilon \geq 2\%$ 时, 焊材强度最大值不超过 $\sigma_{SMYS} + 200 \text{ MPa}$. 焊缝周围壁厚匹配应满足不超过壁厚 10% 且相邻壁厚差 $\leq 3 \text{ mm}$. 改变材料中的成分(增加铌、铝含量)或改变其径厚比(D/t)可以增强焊接热应力抗性. 采用合适的焊剂和焊接工艺(螺旋焊)可以减少焊接中的缺陷.

局部屈服下管道的椭圆度将发生变化, 而管道的椭圆度的设计应满足管内流体流量和管道检测设备的正常检测. 对于椭圆度参数 D_0 的计算如下:

$$D_0 = 2(D_{\max} - D_{\min}) / (D_{\max} + D_{\min}) \quad (4)$$

式(4)中: D_{\max} 为管道最大外径; D_{\min} 为管道最小外径.

为满足正常检测需要, 要求椭圆度的变形不超过 6%, 外压作用的椭圆度变形应不超过 3%; 内压鼓胀变形不超过 2.5%.

4 疲劳载荷累积变形下的应变设计

对于车辆周期载荷下管道的变形主要属于疲劳累积变形, 对于疲劳累积应变计算方法如下^[9]:

$$\Delta \varepsilon = 0.055 N^{-0.4} \quad (\Delta \varepsilon > 0.002) \quad (5)$$

$$\Delta \varepsilon = 0.016 N^{-0.25} \quad (\Delta \varepsilon < 0.002) \quad (6)$$

式(5)、(6)中: N 为循环次数.

式(5)、(6)主要用于计算焊缝周围的疲劳累积效应, 未考虑焊缝边缘的形状的影响. H. A. Bratfos^[10] 认为焊接处接口的形状对焊缝抗高周疲劳能力影响很大, 可用 BS7910 中的 MK 方法计算焊缝边缘形状的影响. 对于累积塑变 $\Delta \varepsilon \geq 2\%$ 的工况, 材料的 $\sigma_{SMYS} \leq 100 \text{ MPa}$, 屈强比 $\frac{Y}{T} \geq 0.85$, 延伸率 $\varepsilon_L \geq 25\%$, 周期载荷作用后时效处理(250 °C, 放置 1 h), 应满足材料的屈强比 $\frac{Y}{T} \leq 0.97$, 延伸率 $\varepsilon_L \geq 15\%$.

5 结 语

a. 城市天然气供给管网系统是城市能源生命线, 一旦泄漏、爆炸等恶性事故, 将造成巨大生命财产损失. 现行的燃气管道的设计方法是针对强度失效模式, 不太适合城市复杂的使用条件, 基于应变的设计方法更能满足安全性和经济性要求.

b. 基于应变的设计可以充分利用材料的机械性能, 提高管道抗压缩和纵向变形的能力, 降低管道在安装、服役期间产生的局部变形的影响, 延长管道的安全寿命, 防止和减少事故发生, 提高在恶劣环境中管道的安全水平, 保障服役期间管道的安全可靠.

c. 不同地质条件在外载荷下可能产生最大应变变形是设计参数选取的关键,采用新的材料、新焊接工艺可以更好的保证城市燃气管道的安全性能。

参考文献:

- [1] TSG R0004-2009. 固定式压力容器安全技术监察规程[S]. 国家质量监督检验检疫总局.
- [2] 李鹤林. 油气管道基于应变的设计及抗大变形管线钢的开发与应用[J]. 焊管, 2007, 30(5): 5-11.
- [3] 孟凡刚. X80 钢管道及现场环焊缝焊接技术发展现状[J]. 石油化工设备, 2008, 37(3): 44-49.
- [4] 舒安庆, 王■, 魏化中. 含腐蚀缺陷燃气管道极限载荷的有限元分析[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(2): 102-104.

- [5] 舒安庆, 吴开斌, 魏化中. 燃气管道裂纹扩展 G 判据及分形研究[J]. 机械强度, 2009, 31(5): 837-841.
- [6] 舒安庆, 吴开斌. 城市燃气管道的焊接残余应力分析[J]. 石油化工设备技术, 2007(2): 62-64.
- [7] DNV-OS-F101. Submarine Pipeline Systems(2000)[S].
- [8] Alan Clover. X80 Design, Construction and Operation [C]//X80 钢级管线国际技术研讨会会议文集. 北京: 北京石油工业出版社, 2004: 143-198.
- [9] TX 77060 USA. [S]. American Bureau of Shipping. Subsea Pipeline Systems and Resers.
- [10] Bratfos H A. Use of strain-based EAC for the assessment of flaws in pipeline girth welds subjected to plastic deformations [C]//Proc. Int. Pipe Dreamer's conference, Yokohama: ASME, 2002: 957-985.

Limited state design method based on strain in natural-gas system

SHU An-qing^{1,3}, WU Kai-bin^{2,3}

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Boiler Pressure Vessel Inspection Institute, Wuhan 430015, China;

3. Wuhan Pressure Vessel and Pipeline Safety Engineering Research Center, Wuhan 430074, China)

Abstract: Since the complication of the stress in gas pipeline, the detail design of this method included the limited requirements of strain, local yield-strength matching and accumulated strain were discussed. Some significant conclusions for the construction of gas pipeline were drawn in practice.

Key words: limited strain state; local yield; strength matching; accumulated strain

本文编辑: 陈小平

☆

(上接第 87 页)

- [5] 王泽宇, 冯炼, 张发勇. 竖井烟囱效应作用下的隧道火灾通风数值模拟[J]. 地下空间与工程报, 2006(6): 485-486.
- [6] 常玉锋, 陈锋, 贾沛, 等. 排烟方式对火场人员疏散影

响的数值模型[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(9): 46-49.

- [7] 黄晓曼, 胡英盛. 节能建筑与通风设计[J]. 科技信息, 2009(19): 255.

Study of hypogee vantilation system based on chimney effect

GUO Min¹, LIAO Yi-de¹, TAN Wen-xin¹, CHEN Fang¹, LIU Xiao-dan²

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Wanhun Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

2. Daqing Petrochine Company Plastics Plant, Daqing 163714, China)

Abstract: In order to avoid the high energy consumption, poor effects and noise pollution in the vantilation of hypogee such as tunnel, underground parking, this paper proposed the theory of vantilation based on chimney effect and used the solar energy. Much theoretical calculation and digital simulation was made for this theory. As the result shows, this system can reach the effect we want completely.

Key words: hypogee; vantilation; solar energy; chimney effect

本文编辑: 陈小平