

文章编号:1673-2049(2014)03-0105-07

滑坡作用下输气管道受力分析

吴锐¹,梅永贵²,邓清禄¹,庞成立¹,照冬野³

(1. 中国地质大学 工程学院,湖北 武汉 430074; 2. 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司
山西煤层气分公司,山西 晋城 048000; 3. 中国石油天然气股份有限公司
西气东输管道分公司,上海 200122)

摘要:以川气东送管道铺设中的管道横穿罗针田滑坡工程为背景,建立管道横穿滑坡情况下的力学模型,并采用静力学解析计算的方法对管道变形、受力状态进行分析研究,获得了滑坡位移、推力与管体的响应特征,如应变或应力的关系,从而为地质灾害安全风险评价及预警提供定量的评价指标。结果表明:该管道横穿滑坡段暂时处于安全状态;管道变形分布曲线呈现正态分布规律,滑坡体正中管道部位变形最大,向两端变形逐渐减小;管道弯矩分布符合两端固定简支梁承受均布荷载弯矩形态,两端应力最大,呈现中部正弯两端负弯态势,管道两端最易发生破坏;研究成果可为类似输气管道穿越滑坡地质灾害的破坏预警提供理论参考。

关键词:滑坡;输气管道;受力分析;静力学模型;强度校核理论

中图分类号:TU42 **文献标志码:**A

Stress Analysis of Buried Gas Pipeline Under Landslide Load

WU Rui¹, MEI Yong-gui², DENG Qing-lu¹, PANG Cheng-li¹, ZHAO Dong-ye³

(1. School of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Shanxi Coal-bed Gas Branch, PetroChina Huabei Oil Field Company, Jincheng 048000, Shanxi, China;
3. PetroChina West-east Gas Pipeline Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: On the background of the pipeline laying project through the Luozhentian landslide in the gas transportation from Sichuan to eastern area, the response features of landslide displacement and thrust to the stress and strain of the pipeline were acquired, via the mechanical modeling of the pipeline laying landslide and analytic statics calculating method of the deformation and force state of the pipeline, therefore, providing the quantitative assessment criteria to the security risk evaluation and early warning of geologic hazard. The results indicate that this pipeline laying landslide is safe currently. The distribution curve of pipeline deformation obeys the normal distribution law. The pipeline deformation reaches the peak in the middle of the landslide, while reducing gradually to the edges of two sides. The pipeline bending moment is in the bending state of the simply supported beam with two fixed edges under distributed loads. The maximal pipeline stress is on the two sides, showing the positive bending in the middle and negative bending on the sides, which making the edges of two sides damaged most easily. The study results can serve as theoretical references to the geologic hazard early warning in the similar oil-gas pipeline laying landslide.

收稿日期:2014-04-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2011CB710601);中石化天然气分公司项目(2011056467)

作者简介:吴锐(1990-),男,湖北孝感人,工学硕士研究生,E-mail:728411259@qq.com。

Key words: landslide; gas pipeline; stress analysis; static analysis model; strength check theory

0 引言

管道地质灾害在中国是 2000 年以来伴随西气东输、忠武输气管道、兰成渝成品油管道及川气东送管道等长距离穿越山区管道的建设而新涌现出来的一类地质灾害形式。

川气东送管道主要地质灾害类型有滑坡、崩塌、水毁,各类地质灾害规模大小不一,以滑坡灾害最多,因而川气东送工程建设面临最多的就是滑坡地质灾害。滑坡灾害主要包括老滑坡或具有明显变形的滑坡及没有变形但具有潜在变形特征的不稳定斜坡,该类管道地质灾害发生于管道穿越的斜坡,斜坡在不同诱发因素下发生变形滑动破坏,往往容易造成对管道的牵引、推挤等破坏。滑坡灾害对长输油气管道的正常运行构成严重的危害,一旦滑坡灾害发生,轻者可以使管道悬空、扭曲变形,严重的可以使管道断裂。输油气管道的泄漏或破裂甚至可能导致火灾和爆炸,严重地威胁着周围地段群众的生命财产安全。

目前,各国学者对滑坡的变形特征和形成机制已经有了比较成熟的研究,而滑坡作用下输气管道受力是一个复杂的非线性的问题,对此研究较少。随着中国输油气管道的大力铺设,帅健等^[1]系统地研究了滑坡地质灾害作用下管道破坏特征与防治对策;邓道明等^[2]在此基础上建立非线性模型,进一步研究了滑坡作用下管道的应力状态和变形特征;郝建斌等^[3]运用极限平衡理论推导了管道横穿滑坡时管道推力的计算方法;林冬等^[4]建立了管道全埋设情况下的土质滑坡模型,并进行了滑坡作用下管道应力状态试验研究;王磊等^[5]建立了管道横穿滑坡的受力模型,并采用静力学方法进行了求解分析。此外,随着计算机技术的高速发展,各国已有不少学者^[6-16]采用数值模拟的方法研究了管-土非线性接触的问题。

本文中笔者以滑坡滑动变形对管道的影响为研究主题,采用静力学解析计算的方法对管道变形、受力状态进行了分析研究,获得了滑坡位移、推力与管体的响应特征,如应变或应力的关系,从而为地质灾害安全风险评价及预警提供定量的评价指标。

1 管道与滑坡位置关系

管道地质灾害的发育状态与管道的关系,决定

了管道受到地质灾害破坏风险的大小。对于管道而言,管道走向与滑坡的滑动方向不同,其危害大小也不同。根据管道的走向与滑坡的滑动方向之间的关系,把管道与滑坡位置关系分为 3 种情况:①管道走向与滑坡滑动方向垂直,即管道横穿滑坡;②管道走向与滑坡滑动方向平行,即管道纵穿滑坡;③管道走向与滑坡滑动方向斜交,即管道斜穿滑坡。上述 3 种位置关系中以管道横穿滑坡位置关系危害最大,故本文中主要研究在川气东送管道地质灾害中,管道横穿滑坡体这一情况。

2 滑坡体中管道受力分析

2.1 受力模型

当滑坡滑动方向垂直于管道轴线时,管道受力可以简化为滑坡作用中输气管道受当量轴力 S_0 作用的梁模型。考虑到简化管梁的挠度可能较大,引入纵横弯曲问题,并计入管梁几何方程的非线性以此来研究管梁的应力和变形特征。本文中认为下滑土体作用在管道上的压力 q 沿滑坡宽度 L 均布。详细推导过程可参见文献^[4],^[17],建立相应系统的力学模型如图 1 所示,其中, f 为挠度, M_0 为管道在 $x=0$ 处截面的弯矩, Q_0 为内力, $Q_0 = \frac{1}{2}qL$, θ_0 为转角, N_0 为管道在 $x=0$ 处截面的轴力, v_0 为管道在 $x=0$ 处的挠度。

2.2 管道静力学分析

2.2.1 考虑管道内压和温差作用

管道是在温差、内压以及下滑土体压力 q 的联合作用下发生变形,当量轴力 S_0 的拉、压性不定,而其变形位移和内力的计算从弯曲微分方程入手,所以需要区分 S_0 的拉、压性进行求解。

(1) S_0 为拉力时的解

如图 1 所示,对滑坡宽度 L ,管道弯曲的微分方程为

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_0 + S_0 (y - v_0) + \frac{qx^2}{2} - \frac{qLx}{2} \quad (1)$$

$$S_0 = N_0 - \frac{\pi}{4} pd^2 \quad (2)$$

式中: E 为管材的弹性模量; I 为管道的截面惯性矩; y 为管道的挠度; p 为管道受到的内压; d 为管道的内径。

求解微分方程,得到管道在 $x=0.5L$ 处的挠度 f 为

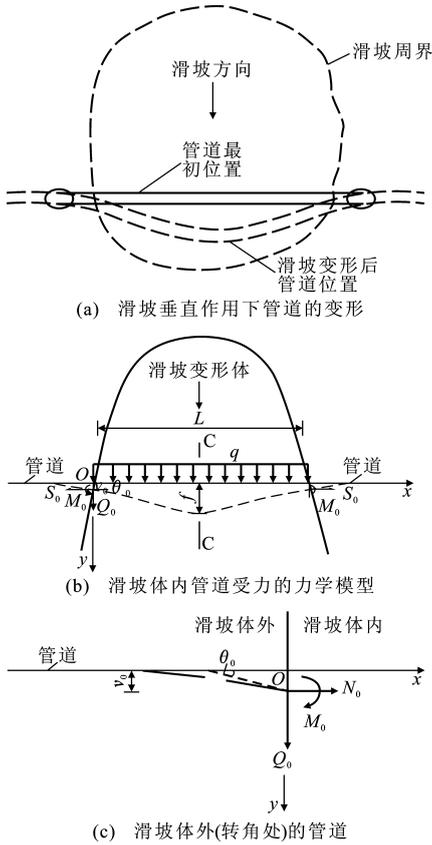


图 1 管道横穿滑坡受力示意

Fig. 1 Force Diagram of Pipeline Crossing Landslide

$$f = \frac{qL^2}{8S_0} - \frac{1}{S_0} \left(M_0 + \frac{q}{k^2} \right) \frac{\cosh(kL/2) - 1}{\cosh(kL/2)} + \nu_0 \quad (3)$$

$$k = \sqrt{\frac{S_0}{EI}}$$

由滑坡体内、外管道截面转角在 $x=0$ 处相等, 得端部弯矩 M_0 为

$$M_0 = \left[\frac{qL}{2} - \frac{qL\beta^2 S_0}{c_{y0}D} - \frac{q}{k} \tanh\left(\frac{kL}{2}\right) \right] \cdot \left[\frac{4\beta^3 S_0}{c_{y0}D} + k \tanh\left(\frac{kL}{2}\right) \right]^{-1} \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{c_{y0}D}{4EI}}$$

式中: c_{y0} 为管道在 Oxy 面发生位移时滑坡体外土体的横向阻力综合系数; D 为管道的外径。

管道在滑坡体中点 $x=0.5L$ 处的弯矩 M_c 为

$$M_c = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=\frac{L}{2}} = \left(M_0 + \frac{q}{k^2} \right) \frac{1}{\cosh(kL/2)} - \frac{q}{k^2} \quad (5)$$

(2) S_0 为压力时的解

当 S_0 为压力时, 滑坡段管道的弯曲微分方程为

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_0 - S_0(y - \nu_0) + \frac{qx^2}{2} - \frac{qLx}{2} \quad (6)$$

式中: $S_0 = \frac{\pi}{4} pd^2 - N_0$ 。

同理求得

$$f = -\frac{qL^2}{8S_0} + \frac{1}{S_0} \left(-M_0 + \frac{q}{k^2} \right) \frac{1 - \cos(kL/2)}{\cos(kL/2)} + \nu_0 \quad (7)$$

$$M_0 = \left[-\frac{qL}{2} - \frac{qL\beta^2 S_0}{c_{y0}D} + \frac{q}{k} \tan\left(\frac{kL}{2}\right) \right] \cdot \left[\frac{4\beta^3 S_0}{c_{y0}D} + k \tan\left(\frac{kL}{2}\right) \right]^{-1} \quad (8)$$

$$M_c = \left(M_0 - \frac{q}{k^2} \right) \frac{1}{\cos(kL/2)} + \frac{q}{k^2} \quad (9)$$

无论 S_0 为拉力还是压力, 上述方程只能导出 f 与 S_0 之间的一个关系式, 此外, 还需要利用滑坡体内、外管道纵向位移的连续性导出另一个 f 与 S_0 的关系式, 才可以得到解, 即

$$N_0 = \left(-\alpha \Delta T L E F \gamma + \mu \sigma_h L F \gamma + \frac{\pi^2 f^2}{4L} E F \gamma + 2N_r \right) / (L\gamma + 2) \quad (10)$$

$$\frac{|N_0 - N_r|}{t_f} \gamma \leq 1$$

$$\pm N_0^2 + (L t_f \mp 2 N_r) N_0 - \left[(-\alpha \Delta T L + \frac{\mu \sigma_h L}{E} + \frac{\pi^2 f^2}{4L}) E F t_f \mp \frac{t_f^2}{\gamma^2} \mp N_r^2 \right] = 0 \quad (11)$$

$$\frac{|N_0 - N_r|}{t_f} \gamma > 1$$

式中: c_{x0} 为滑坡体外土体的切(纵)向阻力综合系数; F 为管道的截面积; N_r 为内压和温度变化引起的等效轴力, $N_r = (-\alpha E \Delta T + \mu \sigma_h) F$; γ 为系数, $\gamma = \sqrt{\frac{\pi D c_{x0}}{E F}}$; u 为管道的轴(纵)向位移; α 为管材的线膨胀系数; ΔT 为管道的操作温度与敷设温度之差; σ_h 为由内压 p 引起的管道的环向应力, $\sigma_h = \frac{pD}{2t}$, t 为管道的壁厚; t_f 为滑坡体外土体的极限抗剪强度; μ 为泊松比。

求出 N_0 后, 便可求出 S_0 , 进而求解出 M_0, M_c 等内力及管道相应的纵向位移。

2.2.2 不考虑管道内压和温差作用

该方法主要特点是忽略管道轴向变形和轴力。在滑坡体内管道受力采用结构力学方法求解, 变形体外管道受力采用弹性地基梁理论计算, 最后由管道两端点处的位移与内力协调条件进行联立求解。为简便起见, 认为土体性质、管道的变形和受力关于 C-C 截面对称。

滑坡体内内梁的内力为

$$Q_0 = \frac{1}{2} qL \quad (12)$$

由管道弯曲的微分方程

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_0 + \frac{qx^2}{2} - \frac{qLx}{2} \quad (13)$$

求解微分方程得

$$y = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} M_0 x^2 + \frac{1}{24} qx^4 - \frac{1}{12} qLx^3 \right) + Cx + D \quad (14)$$

$$\text{式中: } \lambda = \sqrt{\frac{kD}{4EI}}$$

通过变形协调条件,即滑坡体内、外交界处的转角 θ_0 相等得

$$M_0 = \frac{DkqL^3 - 24EIqL\lambda^3}{96EI\lambda^3 + 12DkL} \quad (15)$$

由此求得,管梁的内力为

$$\left. \begin{aligned} M &= M_0 + \frac{qx^2}{2} - \frac{qLx}{2} \\ Q &= qx - \frac{1}{2}qL \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

管梁的挠度为

$$y = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} M_0 x^2 + \frac{1}{24} qx^4 - \frac{1}{12} qLx^3 \right) + \theta_0 x + \nu_0 \quad (17)$$

3 管道横穿滑坡工程实例

3.1 滑坡概况

罗针田滑坡位于湖北恩施市屯堡镇罗针田村,滑坡处于一大型古崩滑堆积体上,斜坡表层为块石碎石土堆积,块石为灰岩,大小混杂,其产状没有规律,且与基岩不一致。崩滑体主滑方向北西(300° 左右),后缘高程 850 m,前缘高程 600 m,垂直高度 250 m。该古滑坡体规模大,滑坡区域内地层结构复杂,其所在的基岩地层主要为二叠系、石炭系、泥盆系及志留系,总体为顺向坡。

古崩滑堆积体暂时无整体变形的迹象,管道从罗针大型古崩滑堆积体中部穿行约为 1 500 m。在桩号 EES21-2+150 处管沟开挖,内侧形成高边坡,切坡最高近 30 m,边坡局部出现变形,边坡顶部路面出现开裂,裂缝长度近 30 m,裂缝宽度达到 2 cm,且公路外侧整体向坡外凹陷,此段变形体即为罗针田滑坡,体积约为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于中型管道滑坡。滑坡属于覆盖层滑坡,管沟切坡坡度 $60^\circ \sim 70^\circ$,切坡高度 5~20 m,坡体为碎块石土,未揭露基岩。滑坡属于推移式,下滑方式据初步观测有 2 种:一是滑动从管道内侧川气东送管沟切坡脚坡剪出;二是滑动从管道外侧斜坡中剪出。川气东送管道从滑坡区前缘通过,滑坡一旦滑动,将直接推动管道,致使管道变形或断裂。

3.2 管道受力计算分析

第 2 节中,对管道横穿滑坡模型进行了详细的受力分析推导,结合对该模型的模拟分析,可明确地反映出滑坡变形滑动中管道的受力分布及破坏模式。在川气东送管道地质灾害中,管道横穿罗针田滑坡体,穿越长度为 100 m,为了解该滑坡变形中管道的受力情况,现以罗针田滑坡为代表对其管道进行受力定量分析。

考虑滑坡变形对管道的不利影响,在滑坡变形的情况下对管道纵向变形及受力进行分析,采用第 2 节中相应推导公式对管道受力分别进行考虑内压和温差影响及不考虑内压和温差影响的计算。

计算中各参数取值如下:

(1) 管材采用 X70 型钢,弹性模量 $E = 207 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$,密度 $\rho = 7.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,管材的线膨胀系数 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,钢管的最小屈服强度 $\sigma_s = 540 \text{ MPa}$ 。

(2) 管道的规格为 $\Phi 1\ 016 \times 21$,即管道的外径 $D = 1\ 016 \text{ mm}$,壁厚 $t = 21 \text{ mm}$ 。

(3) 管道输气压力 $p = 5.0 \text{ MPa}$,温差 $\Delta T = -10 \text{ }^\circ\text{C}$,滑坡对管道的地滑力 $q = 1.64 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,可根据《给水排水管道结构设计规范》(GB 50332—2002)中管道侧向土压力公式计算,其中将主动土压力设为滑坡作用下的滑力^[9]。

(4) 土体的纵向阻力综合系数 $c_{x0} = 5.88 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$,土体的横向阻力综合系数 $c_{y0} = 2.45 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$,滑坡体外土体的极限抗剪强度 $t_t = 24.6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

经计算可知,其管道的变形及受力情况如下:

(1) 考虑内压和温差

考虑内压和温差时管道的内力和位移计算结果见表 1,管道挠度和管道纵向长度关系曲线见图 2,管道弯矩和管道纵向长度关系曲线见图 3。

表 1 考虑内压和温差时管道的内力和位移计算结果

Tab. 1 Calculation Results of Internal Force and Displacement of Pipeline Considering Internal Pressure and Temperature Difference

S_0/kN	N_0/kN	$M_0/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_c/(\text{kN} \cdot \text{m})$	f/m	ν_0/cm
1 244.45	1 245.77	883.92	-598	0.477	2.740

(2) 不考虑内压和温差

不考虑内压和温差时管道的内力和位移计算结果见表 2,管道挠度和管道纵向长度关系曲线见图 4,管道弯矩和管道纵向长度关系曲线见图 5。从图 2~5 可以看出,在 2 种计算工况中,管道变形(挠

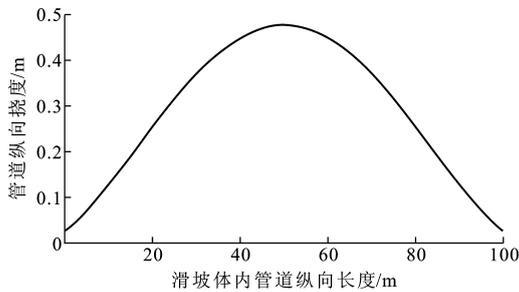


图2 考虑内压和温差时管道纵向挠度和管道纵向长度关系曲线

Fig. 2 Relation of Longitudinal Deflection and Longitudinal Length of Pipeline Considering Internal Pressure and Temperature Difference

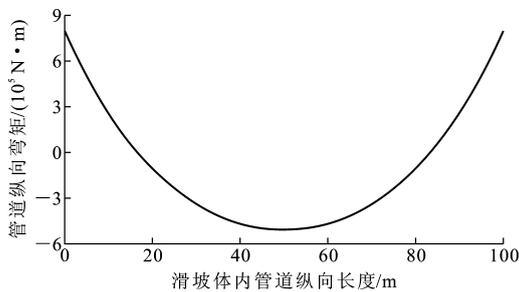


图3 考虑内压和温差时管道纵向弯矩和管道纵向长度关系曲线

Fig. 3 Relation of Longitudinal Bending Moment and Longitudinal Length of Pipeline Considering Internal Pressure and Temperature Difference

表2 不考虑内压和温差时管道的内力和位移计算结果
Tab. 2 Calculation Results of Internal Force and Displacement of Pipeline Without Considering Internal Pressure and Temperature Difference

Q_0/kN	$\theta_0/(^\circ)$	$M_0/(kN \cdot m)$	$M_c/(kN \cdot m)$	f/m	ν_0/cm
81.65	0.004 55	1 270.63	-770.62	0.529	0.861

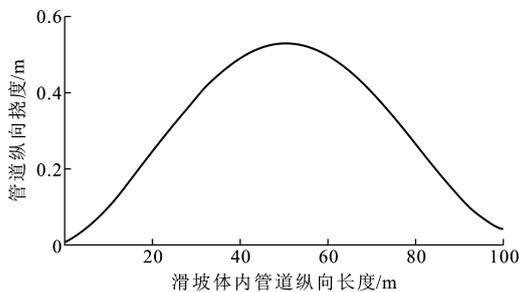


图4 不考虑内压和温差时管道纵向挠度和管道纵向长度关系曲线

Fig. 4 Relation of Longitudinal Deflection and Longitudinal Length of Pipeline Without Considering Internal Pressure and Temperature Difference

度)分布曲线呈现正态分布规律,滑坡体正中管道部位挠度最大,向两端挠度逐渐减小,管道弯矩分布符

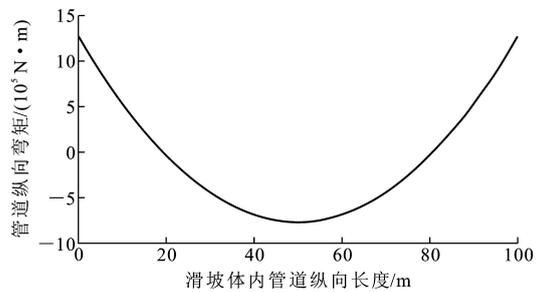


图5 不考虑内压和温差时管道纵向弯矩和管道纵向长度关系曲线

Fig. 5 Relation of Longitudinal Bending Moment and Longitudinal Length of Pipeline Without Considering Internal Pressure and Temperature Difference

合两端固定简支梁承受均布荷载弯矩形态,在受力的情况下出现中部正弯两端负弯态势,且两端弯矩大于中部弯矩。

由表1,2可知:在不考虑管道内压和温差的情况下,管道中间处的挠度为0.529 m,中间处的弯矩为-770.62 kN·m,端部弯矩为1 270.63 kN·m;而在考虑管道内压和温差的情况下,管道中间处的挠度为0.477 m,中间处的弯矩为-598 kN·m,端部弯矩为883.92 kN·m;管道的挠度及受力均大于考虑内压和温差的情况,可见,在管道受力分析模型简化的情况下,计算结果偏于保守。

4 管道强度校核

4.1 强度校核理论

在管道强度的设计计算中,通常由环向应力确定管道的壁厚,然后对内压、温度变化和管道弯曲在管道和管件上产生的组合应力,根据它们可能同时产生的条件和状态,将各向应力分别进行叠加,再利用强度理论建立的材料强度条件核算管道应力是否处于安全范围内。

由于输气管道是薄壁,可以忽略径向应力,因此,一般意义下的管道应力状态是只有环向应力和轴向应力的双轴应力状态,其应力计算公式为:

轴向应力 σ_x 为

$$\sigma_x = \frac{N}{F} \pm \frac{M}{W} \quad (18)$$

环向应力 σ_θ 为

$$\sigma_\theta = \sigma_h = \frac{pD}{2t} \quad (19)$$

式中: N 为管道轴力; W 为截面抗弯模量。

根据不同的强度理论,对上述应力进行综合,即组合应力,可以判别管道的可靠性。对于金属材料,

Tresca 屈服条件和 Mises 屈服条件都是考虑了塑性流动的强度理论,它们的计算值都能较好地反映塑性材料的实际应力状态,都为各国规范采用。

Tresca 屈服条件,也称为最大剪应力条件,当量应力表达式为

$$\sigma_{\text{eq}} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (20)$$

式中: σ_{eq} 为当量应力; σ_1, σ_3 分别为第一主应力和第三主应力。

Mises 屈服条件,也称为最大形状改变比能条件,当量应力表达式为

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (21)$$

式中: σ_2 为第二主应力。

对于管道,应力求解多属于平面问题, $\sigma_3 = 0$,则

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \quad (22)$$

考虑到最大剪应力屈服的计算比较简单,也稍偏于安全,大多数油气管道的工程设计规范中采用此强度理论作为验算环向应力和轴向应力组合的理论,中国也是如此。

上述组合应力还应该和管道材料的容许应力进行比较,以便判断管道结构强度是否符合要求,其强度条件为

$$\sigma_{\text{eq}} < [\sigma] = K \phi \sigma_s \quad (23)$$

式中: $[\sigma]$ 为容许应力; K 为强度设计系数; ϕ 为焊缝系数。

对于受约束的管道,按照最大剪应力屈服条件计算当量应力。当应力为压(负值)时,应满足下述条件

$$\sigma_{\text{eq}} = \sigma_h - \sigma_x < 0.9 \sigma_s \quad (24)$$

4.2 强度校核计算

为能具体地反映在此种变形及受力情况中管道的安全状态,下面可根据内压和温差计算结果对管道强度进行校核。

根据强度校核公式得

$$\sigma_x = \frac{N}{F} \pm \frac{M}{W} = 2.05 \text{ MPa}$$

$$\sigma_0 = \sigma_h = \frac{pD}{2t} = 120.95 \text{ MPa}$$

故有

(1)满足 Tresca 屈服条件的当量应力表达式为

$$\sigma_{\text{eq}} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = 157.724 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{eq}} < [\sigma] = K \phi \sigma_s = 243 \text{ MPa}$$

(2)满足 Mises 屈服条件的当量应力表达式为

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} = 142.60 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{eq}} < [\sigma] = K \phi \sigma_s = 243 \text{ MPa}$$

式中: $K = 0.5; \phi = 0.9$ 。

2种强度校核均满足要求,认为在当前滑坡推力及小变形影响作用下,管道处于安全状态。

5 结 语

(1)管道横穿滑坡即下滑土体压力垂直与管道走向时,管道变形分布曲线呈现正态分布规律,滑坡体正中管道部位变形最大,向两端变形逐渐减小,而管道弯矩分布符合两端固定简支梁承受均布荷载弯矩形态,两端应力最大,呈现中部正弯两端负弯态势。

(2)在不考虑管道内压和温差的情况下,管道变形及受力均大于考虑内压和温差的情况,可见,在管道受力分析模型简化的情况下,计算结果偏于保守。

(3)强度校核计算表明,在当前滑坡推力及小变形为前提的情况下,管道暂时处于安全状态。但是若滑坡进一步滑动,管道变形可能增大,或直接导致管道破坏。在实际情况中,除了在管道穿越滑坡段实施相应的治理工程外,也应特别加强滑坡地表变形的监测,以便及时判断管道受力状态的变化。

参考文献:

References:

- [1] 帅 健,王晓霖,左尚志.地质灾害作用下管道的破坏行为与防护对策[J].焊管,2008,31(5):9-15.
SHUAI Jian, WANG Xiao-lin, ZUO Shang-zhi. Breakage Action and Defend Measures to Pipeline Under Geological Disaster[J]. Welded Pipe and Tube, 2008, 31(5):9-15.
- [2] 邓道明,周新海,申玉平.横向滑坡过程中管道的内力和变形计算[J].油气储运,1998,17(7):18-22.
DENG Dao-ming, ZHOU Xin-hai, SHEN Yu-ping. Calculation of Pipeline Inner Force and Distortion During Transverse Landslide Body[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1998, 17(7):18-22.
- [3] 郝建斌,刘建平,荆宏远,等.横穿状态下滑坡对管道推力的计算[J].石油学报,2012,33(6):1093-1097.
HAO Jian-bin, LIU Jian-ping, JING Hong-yuan, et al. A Calculation of Landslide Thrust Force to Transverse Pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6):1093-1097.
- [4] 林 冬,雷 宇,许可方,等.横向滑坡对管道的影响试验[J].石油学报,2011,32(4):728-732.
LIN Dong, LEI Yu, XU Ke-fang, et al. An Experiment

- on the Effect of a Transverse Landslide on Pipelines [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 728-732.
- [5] 王磊, 邓清禄. 滑坡作用对输气管道危害的静力学分析[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(增): 340-345.
WANG Lei, DENG Qing-lu. Mechanical Analysis on the Safety of Gas-transporting Pipeline Caused by Landslide Deformation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(S): 340-345.
- [6] 杨俊, 张峥, 常波, 等. 含缺陷管道悬空状态下的有限元建模[J]. *管道技术与设备*, 2009(2): 1-3, 26.
YANG Jun, ZHANG Zheng, CHANG Bo, et al. FEM Model of Suspended Pipeline Including Defects[J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2009(2): 1-3, 26.
- [7] 王卢毅. 输气管线在地质灾害中的力学行为研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
WANG Lu-yi. The Mechanics Behavior of Gas Transmission Pipeline in Geological Disaster Research[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [8] 由小川, 庄苗, 张效羽, 等. 高压天然气管线在地质灾害下的失效分析[J]. *天然气工业*, 1999, 19(4): 77-81.
YOU Xiao-chuan, ZHUANG Zhuo, ZHANG Xiao-yu, et al. High Pressure Gas Pipeline Under the Geological Disasters of Failure Analysis[J]. *Natural Gas Industry*, 1999, 19(4): 77-81.
- [9] 郭浩. 滑坡土体抗剪强度指标的确定方法研究[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2007, 24(4): 5-7.
GUO Hao. Determination of Shear Strength Index of Landslide Soil[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2007, 24(4): 5-7.
- [10] 张泽鹏, 谢富贵. 注浆钢管技术处治山区公路滑坡施工工艺研究[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2006, 24(4): 54-57.
ZHANG Ze-peng, XIE Fu-gui. Study on Steel Floral Tube Grouting Technic Used in Highway Landslide in Mountainous District[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2006, 24(4): 54-57.
- [11] 王琴, 陈隽, 李杰. 地下管线非一致地震激励振动台试验的三维有限元建模[J]. *建筑科学与工程学报*, 2008, 25(3): 47-53.
WANG Qin, CHEN Jun, LI Jie. 3-D Finite Element Modeling of Underground Pipeline Under Non-uniform Earthquake Excitation in Shaking Table Tests [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2008, 25(3): 47-53.
- [12] 赵玉珍, 刘悦臣, 杨川. 地铁迷流对埋地管线腐蚀及抗蚀方法[J]. *交通运输工程学报*, 2003, 3(3): 46-49.
ZHAO Yu-zhen, LIU Yue-chen, YANG Chuan. Metro Stray Current Corrosion of Pipelines Buried Underground and Resisting Corrosion Method[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(3): 46-49.
- [13] 周先雁, 王智丰, 晏班夫. 预应力管道压浆质量无损检测方法[J]. *中国公路学报*, 2011, 24(6): 64-71.
ZHOU Xian-yan, WANG Zhi-feng, YAN Ban-fu. Nondestructive Testing Method of Grouting Quality for Prestressed Pipe[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(6): 64-71.
- [14] 戚冬艳, 柳建设, 郭红军, 等. 市政管道工作井的工作机理研究[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2013, 30(12): 87-90.
QI Dong-yan, LIU Jian-she, GUO Hong-jun, et al. Analysis on Working Mechanism of Municipal Pipeline Well[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2013, 30(12): 87-90.
- [15] 薛伟辰, 刘晟, 王恒栋, 等. 大跨度预应力张弦式管道试验与有限元分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2007, 24(4): 74-81.
XUE Wei-chen, LIU Sheng, WANG Heng-dong, et al. Experiment and FEM Analysis on Long-span Prestressed Beam String Pipes[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2007, 24(4): 74-81.
- [16] 杨伟, 黄俊生, 余海生. 公路边坡稳定性评价方法及滑坡防治措施[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2007, 24(4): 1-4.
YANG Wei, HUANG Jun-sheng, YU Hai-sheng. Assessment Method of Highway Slope Stability and Measurement for Landslide Control[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2007, 24(4): 1-4.
- [17] 童华. 长输管线大变形设计理论研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
TONG Hua. Research on Long Distance Pipeline with Large Deformation Design Theory [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.