

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.266

高钢级山地管道设计及安全性评估的再认识

胡文君^{1,2,3,4}, 赵宇^{1,2}, 胡凯衡^{1,2}, 谌贵宇⁴, 付开伟⁴, 张晓鹏^{1,2,3}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 成都 610017)

摘要: 永久性地面变形(permanent ground deformation, PGD)是造成山地管道屈曲断裂泄露并导致重大生命、财产损失的主要原因之一。现有 PGD 区山地管道“基于应变”的设计及安全性评估方法和技术标准对在役高钢级管道安全性评估偏于危险, 亟待对其进行进一步的研究。针对山地复杂 PDG 工况下的“许用应变”及“计算应变”, 从山地管道的主要失效模式着手, 对山地管道管-土相互作用的应变计算方法(解析法、数值分析法及试验法)及安全性评估方法的技术现状及存在问题进行了分析, 并结合我国山地管道未来的发展趋势及生产需要, 提出了考虑在役管道的实际工况, 进行基于管-土相互作用规律的设计及安全性评估方法的研究路径和内容。

关键词: 高钢级; 山地管道; 永久性地面变形(PGD); 基于应变; 管-土相互作用; 设计及安全性评估
中图分类号: TH11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2023)05-083-10

Re-recognition of design and safety evaluation of high-grade steel mountain pipeline

HU Wenjun^{1,2,3,4}, ZHAO Yu^{1,2}, HU Kaiheng^{1,2}, CHEN Guiyu⁴,
FU Kaiwei⁴, ZHANG Xiaopeng^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, P. R. China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, P. R. China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China; 4. China Petroleum Engineering & Construction Southwest Company, Chengdu 610017, P. R. China)

Abstract: Permanent ground deformation (PGD) is one of the main causes of buckling, fracture and leakage of mountain pipeline, resulting in heavy loss of life and property. The existing “strain-based method” and technical standards cannot satisfy the urgent needs of design and safety evaluation of in-service high-grade steel pipelines in PGD zone and need further research. The current situation of “strain-based” failure discrimination is firstly analyzed and summarized. Technical actualities and imperfections of strain calculation methods (analytical, numerical, and experimental methods) and safety evaluation methods for pipe-soil interaction are indicated by the

收稿日期: 2021-09-01 网络出版日期: 2021-11-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41671116); “川气东送二线管道工程”资助项目(2020230C)。

Supported by National Nature Science Foundation of China(41671116) and the Second Sichuan to East Gas Transmission Pipeline (2020230C).

作者简介: 胡文君(1980—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事油气管道抗灾减灾方面的设计及研究工作, (E-mail) huwenjun@imde.ac.cn。

main patterns of pipe failure with the “allowable strain” and “calculated strain” under complex PDG working conditions. Future research topics and path of the design and safety evaluation based on actual working conditions and pipe-soil interactions are synthetically proposed, while considering the future development trend and production needs of mountain pipelines in China.

Keywords: high-grade steel; mountain pipeline; permanent ground deformation (PGD); strain design; pipe-soil interaction; design and safety evaluation

截止2020年底,国内油气管道总里程已达17万km,预计在“十四五”末将达24万km^[1]。由于环境和规划的限制,更多的管道将不得不敷设在山地灾害多发的山区(如,西南管道公司管辖的1.1万km的油气管道,山地管道有7000km,占比约64%)。滑坡、断层、地面沉降等永久性地面变形(permanent ground deformation, PGD)会造成管道变形、屈曲、断裂,导致油气泄漏、火灾、爆炸等严重事故^[2-3]。与其他影响管道营运安全的因素相比,PGD引发管道事故的危害程度更大,修复时间更长和中断服务损失更高。国内2004—2019年数据显示:PGD诱发的管道事故约占9%,每年的直接经济损失超过几十亿元(如:2015年西二线深圳段的事故,造成73人死亡,17人受伤,管道修复耗时71d,直接经济损失8.81亿元;2017及2018年中缅管道晴隆段的2次事故,共造成9人死亡,58人受伤,管道修复耗时319d,间接经济损失约10亿元)^[4]。

随着我国主导建设的中亚系列、中缅、中俄等跨国管道及国内的西气东输、川气东送系列管道的建成投产,我国油气管道尤其是山地管道的建设能力已处于世界领先水平,而规范指南的研发相对滞后,山地管道的建设标准仍处于空白。同时,随着我国能源结构的进一步调整及油气管道“一带一路”项目的持续推进,“十四五”期间我国对“清洁、绿色、环保”的天然气需求将继续增加,为提高输送效率,高钢级(X70、X80)、大口径($\phi 1016\text{ mm}$, $\phi 1219\text{ mm}$, $\phi 1422\text{ mm}$)、高压(10 MPa, 12 MPa)的油气管道也将日益增多,对新形势下管道设计及安全性评估的技术标准提出了更高要求^[5-6]。

目前,我国新建管道钢级越来越高,管径越来越大,壁厚越来越薄,径厚比 D/t 越来越大(如:中俄东线采用X80钢管,管径为 $\phi 1422\text{ mm}$ 和 $\phi 1219\text{ mm}$, D/t 为44.0, 46.0, 55.0, 66.4),致使管道的刚度降低柔性增加,这类薄壁钢管在PDG作用下更易发生屈曲断裂失效。为此,传统“基于应力”的设计及安全性评估方法不再可靠,业界提出了“基于应变”的方法。该方法经过近20年的发展,取得的研究成果也不少,但上述研究主要针对低钢级小口径管道,且较少考虑管-土相互作用的实际工况,由此制定的技术标准难以满足我国山地管道的生产实际和迅猛发展趋势,亟待进一步的提高认识,提出符合工程实际的设计及安全性评估方法。

1 山地管道设计及安全性评估现状

我国油气管道主要采用《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》GB/T 9711标准制造的钢管,通常X70/L485及以上钢材为高钢级,X65/L450及以下的为低钢级。国内外主流标准规范DNV^[7]、CSA Z662^[8]、GB/T 50470—2017^[9]及SY/T 7403—2018^[10]均推荐PGD区山地管道的设计及安全性评估采用“基于应变”的方法,该方法的失效判别公式主要涉及到管道本体的“许用应变”及PGD作用下管道的“计算应变”。由于低钢级与高钢级钢材的化学成分不同使其力学性能不同,因此,低钢级与高钢级管道的“许用应变”及“计算应变”的确定也存在差异。

1.1 “基于应变”的方法

非PGD区的常规工况下,现行规范(如:API 5L^[12]、ASME B31.8^[13]、EN 1594^[14])推荐管道采用“基于应力”的设计及安全性评估方法,将应力限制在弹性范围内,对应的应变限值为0.5%。而PGD区的管道主要受变形荷载控制,当管道塑性应变高达2%~4%且发生一定的塑性变形时,仍能满足运行要求,管道在“基于应变区”区工作,可以充分利用管材的性能(图1)。在这种特殊工况下,上述“基于应力”的方法不再适用。为因此,业界提出了“基于应变”的设计及安全性评估方法,该方法允许管道的应力超过屈服应力,此时的管道虽发生一定的塑性变形,但仍能满足运行要求,能充分发挥管材的性能(图1),将应变作为失效判据,其判别公

式如下。

当管道受压时:

$$\varepsilon_C \leq k_C \varepsilon_{Cu}; \quad (1)$$

当管道受拉时:

$$\varepsilon_T \leq k_T \varepsilon_{Tu0} \quad (2)$$

式中: ε_C 和 ε_T 为 PGD 作用下的计算应变, ε_{Cu} 为极限压应变, ε_{Tu} 为极限拉应变, k_C 和 k_T 为安全系数。

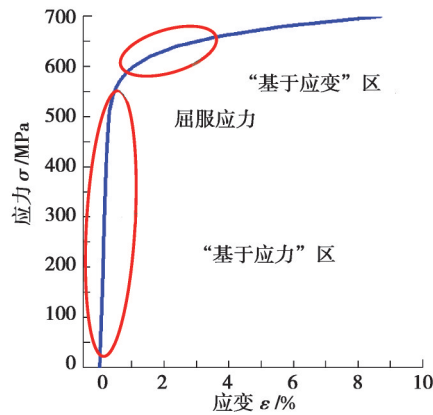


图 1 X80 管道两种方法的设计区域

Fig. 1 Design area of two methods for X80

李璞等^[11]对国际上“基于应变”的规范指南进行了比较,虽然欧美规范 CSA、BS、DNV、API 及 SUZUKI 等均提供了各类失效模式下应变极限值的计算公式及安全系数,但差异较大。而且我国的 GB/T 50470—2017^[9]及 SY/T 7403—2018^[10]选取的 k_C 和 k_T 值比国外更保守,但我国山地管道的钢级更高,口径更大,刚度更小,在山地 PDG 地段,管道屈曲断裂事故时有发生。

1.2 失效模式及许用应变

通常 PGD 区管道的失效模式按严重程度依次有拉伸断裂、局部屈曲、梁式屈曲和横截面椭圆化 4 种,管道的设计及安全性评估针对不同失效模式采用不同的许用应变。通常我国山地管道直径较大,埋深较深,发生梁式屈曲失效的概率小,横截面椭圆化对输送油和气的管道影响不大,因此,这里以工程中常见的拉伸断裂和局部屈曲为例进行分析,说明上述两种失效模式下管道的设计和安全性评估方法。

1.2.1 拉伸断裂及许用拉应变

当管道轴向受拉,弯曲或者拉弯组合荷载产生的拉应变超过某一临界值时,可能发生断裂(图 2)。油气管道主要采用焊接工艺,因此,管道的抗拉承载力主要由焊缝的强度控制。



图 2 PGD 作用下管道发生拉伸断裂失效(中缅管道,2017^[11])

Fig. 2 Tensile fracture failure of pipelines under PGD (China-Myanmar pipeline, 2017^[11])

各国现行规范指南许用拉应变推荐值略有差别(表1),这是由于各国管道的建设用管、用途、焊接工艺的不尽相同,同时需考虑焊接缺陷、应力/应变集中、塑性降低和管道外涂层等因素。

表1 现行欧美规范指南许用拉应变推荐值

Table 1 Recommended values of allowable tensile strain in current European and American guidelines

| ASCE ^[15] | ALA-ASCE ^[16] | PRCI ^[17] | BS EN 1998-4 ^[18] |
|----------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------|
| 3%~5% | 4% | 2%~4% | 3% |

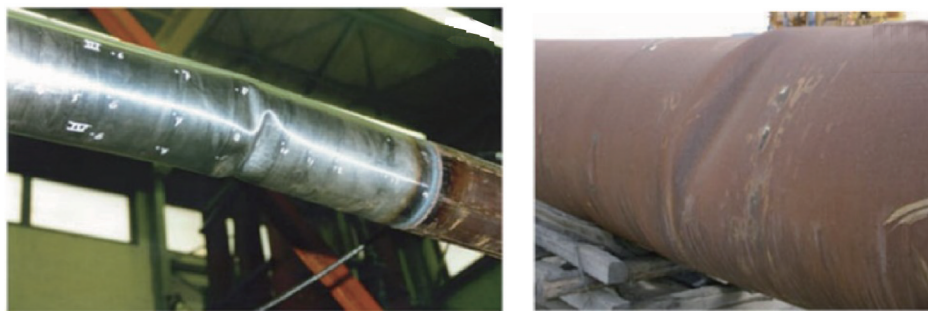
许用拉应变与考虑安全系数的极限拉应变有关,而管材的极限拉应变通过带状试件和宽板拉伸试验确定,在没有实验数据的情况下,我国的GB/T 50470—2017^[9]及SY/T 7403—2018^[10]均采纳了加拿大规范CSA Z662^[8]推荐的简化计算公式,

$$\varepsilon_{Tu} = \delta^{(2.36 - 1.583\lambda - 0.101\zeta\eta)} (1 + 16.1\lambda^{-4.45}) (-0.157 + 0.239\zeta^{-0.241} \eta^{-0.315}), \quad (3)$$

式中: ε_{Tu} 是极限拉应变, δ 是焊缝韧性($0.1 \leq \delta \leq 1$), λ 是屈强比($0.7 \leq \lambda \leq 0.95$), ζ 是缺欠长度与管壁厚度之比($2c/t$), $1 \leq \zeta \leq 10$, η 是缺欠高度与管壁厚度的比率(a/t), $\eta \leq 0.5$ 。如考虑一个轻微缺欠的管道, $\zeta=0.1$, $\eta=0.1$, $\delta=0.7$, $\lambda=0.775$,得到 $\varepsilon_{Tu}=4.5\%$ 。

1.2.2 局部屈曲及许用压应变

当管道轴向受压、弯曲或者压弯组合下产生的压应变超过某一临界值时,管道就会发生局部屈曲或起皱(图3)。Karamanos等^[19]研究表明管道许用压应变的相关度依次为径厚比(D/t)、内压及材料的屈服强度。工程经验表明局部屈曲或起皱一般首先在初始缺欠或结构不连续(如弯管和环焊缝)附近开始。



(a) 径厚比 $D/t = 103$

(b) 径厚比 $D/t = 70$

图3 管道的局部屈曲(起皱)示意图^[20]

Fig. 3 Schematic diagram of local buckling (wrinkling) of the pipe^[20]

ASCE^[15]规定理论压应变等于 $0.3t/D$ 时管道开始起皱,局部屈曲的开始并不意味着管道失效,在管壁破裂前屈曲区域可承受大约4至6倍的理论压应变。此外,局部屈曲的压应变极限值随内压的增加而增大,Gresnigt^[21]首先考虑了该效应,经其修正后的极限压应变计算公式如式(4)(5)所示。

如果 $\frac{2r'}{t} \leq 120$, 则

$$\varepsilon_{Cu} = 0.25 \frac{t}{r'} - 0.0025 + 3000 \left(\frac{r'}{Et} \right)^2 \cdot p \cdot |p|; \quad (4)$$

如果 $\frac{2r'}{t} > 120$, 则

$$\varepsilon_{Cu} = 0.10 \frac{t}{r'} + 3000 \left(\frac{r'}{Et} \right)^2 \cdot p \cdot |p|. \quad (5)$$

式中: ε_{Cu} 是极限压应变, p 是内压, E 是钢管的杨氏模量, t 是管道壁厚, r' 是发生屈曲时受压区的管道半径。

加拿大规范CSA Z662^[8]及我国的GB/T 50470—2017^[9]及SY/T 7403—2018^[10]均采用Gresnigt等^[21]提出的

极限压应变计算公式。各国现行规范指南许用压应变推荐值如表2所示。

表2 现行欧美规范指南对容许压应变推荐值

Table 2 Recommended values of allowable compressive strain in current European and American guidelines

| ASCE ^[15] | ALA-ASCE ^[16] | PRCI ^[17] | BS EN 1998-4 ^[18] |
|----------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------|
| $0.3t/D \sim 0.6t/D$ | $1.76t/D$ | $1.76t/D$ | $\min\{1\%; 20t/r\%\}$ |

1.3 基于“管-土相互作用”的计算应变

对山地管道进行设计及安全性评估重点是基于PGD作用下管道的应变状态分析,管道受管周围土的作用发生位移和变形并对土体产生挤压,土体产生的反向抗力会约束管道进一步的位移和变形,这种约束效应对高钢级薄壁柔性管道的影响尤其显著。此时,管道和围土作为复合结构共同抵抗外部荷载,管周围土既是作用在管道上的荷载,也是增强管道强度和刚度的一种介质。因此,在进行埋地管道的设计及安全性评估时,必须考虑管周一定范围内的围土对管道力学性能的影响,即考虑“管-土相互作用”。目前“管-土相互作用”的评估方法主要有解析法、数值分析法及实验法3种。

1.3.1 解析法

解析法作为一种严格的公式解法运用在1971年San Fernando地震中一些管道受损分析,开启了国内外学者对PDG作用下管-土相互作用解析解的研究。在断层方面:1975年,Newmark等^[22]基于“索”模型首次提出了断层对管道作用的解析解;随后Kennedy等^[23]建立了忽略管道弯曲刚度的解析解,Wang等^[24]改进了考虑管道弯曲刚度的方法;自2000年以来,Takada等^[25],Karamitros等^[26]和Trifonov等^[27]将断层作用下的管道分成三段梁,通过边界条件建立平衡方程,采取迭代法得到了开放式的解析解;程旭东等^[28]和Liu等^[29]通过对断层作用下X80管道数值解的拟合,得到了管道应变的半经验解析解;最近,Talebi等^[30]针对走滑断层,考虑了轴向力,建立了改进的平衡方程,提高了解析解的精度。在滑坡方面:基于梁的大挠度理论,张东臣等^[31]推导了滑坡作用下管道响应的解析解;基于Winkler弹性地基梁理论,尚玉杰等^[32]建立了横向滑坡作用下的管道力学模型,得到了管道响应的解析解。Zahid等^[33]考虑了管-土相互作用、内压、自重和温度,首次推导了管道在纵向滑坡作用下的轴向应变解析解。

因公式简单,计算效率高,易于被工程技术人员掌握,尽管解析法存在一定的局限性,但对PGD作用下管道的初步设计及快速的定性分析具有较强的适用性,因此,在工程实践中得到一定应用。

解析法存在的不足主要体现在:1)研究主要集中在对称类PGD对管道响应的解析分析(如:走滑断层和滑坡),非对称类PGD对管道响应的解析分析研究不够(如:正断层、逆断层等)。2)研究对象主要是塑管或低钢级的小口径管道,对高钢级的大口径管道研究不足。3)忽略了轴向力的影响,使管道计算应变偏小。4)具有较大的应用限制(如:管道穿越逆断层或小角度穿越走滑断层时,管道受压弯作用,仍无法求解)。

1.3.2 数值分析法

管-土相互作用的数值模型主要有两大类:基于Winkler弹性地基梁的非线性土弹簧模型(BNWF模型)及三维连续实体有限元模型(3D FEM模型)。Lim等^[34]采用BNWF模型,将土体离散成纵、横及竖3个方向的土弹簧(“spring”)单元来模拟管-土相互作用,管道采用梁(“beam”)单元,研究了 D/t 对管道响应的影响(图4(a))。由于“beam”单元无法考虑内压,计算精度较差,无法分析管道的屈曲后行为,土弹簧刚度的计算源自经验公式,通常计算应变小于真实值,高估管道抵抗变形的能力,不安全。为了克服这一缺点,Karamitros等^[35]改进了BNWF模型,PGD影响核心区管道采用壳(“shell”)单元,远离PGD区管道采用“beam”单元,提高了计算精度(图4(b))。由于BNWF模型只适用围土均匀的情况,且不能精确地解释围土的非线性行为,不能模拟管-土之间的接触、滑移及分离,在数值参数(如内压、材料和几何参数等)分析时存在诸多限制。为此,开发了建模更严格,精度更高,适合在详细设计阶段使用的3D FEM模型。Cheng等^[36]建立了3D FEM模型,管-土相互作用通过在管-土之间设置接触面来模拟,土体采用实体(“brick”)单元,管道采用“shell”单元,分析了埋地管道在斜逆断层作用下的不同失效模式,并基于失效判定准则,获取了不同失效模式下的临界断层位移值(图5(a))。该模型建模范围大,计算成本最高,耗时最长。为了克服这一缺点,Banushi等^[37]建立了在管

道两端引入等效边界的改进3D FEM模型,即分别采用接触面和等效边界对模型内外的管-土相互作用进行模拟,通过与标定模型计算结果比较,证明了该模型具有计算精度高和计算速度快的优点(图5(b))。BNWF模型和3D FEM模型的优(缺)点及适用范围如表3所示。

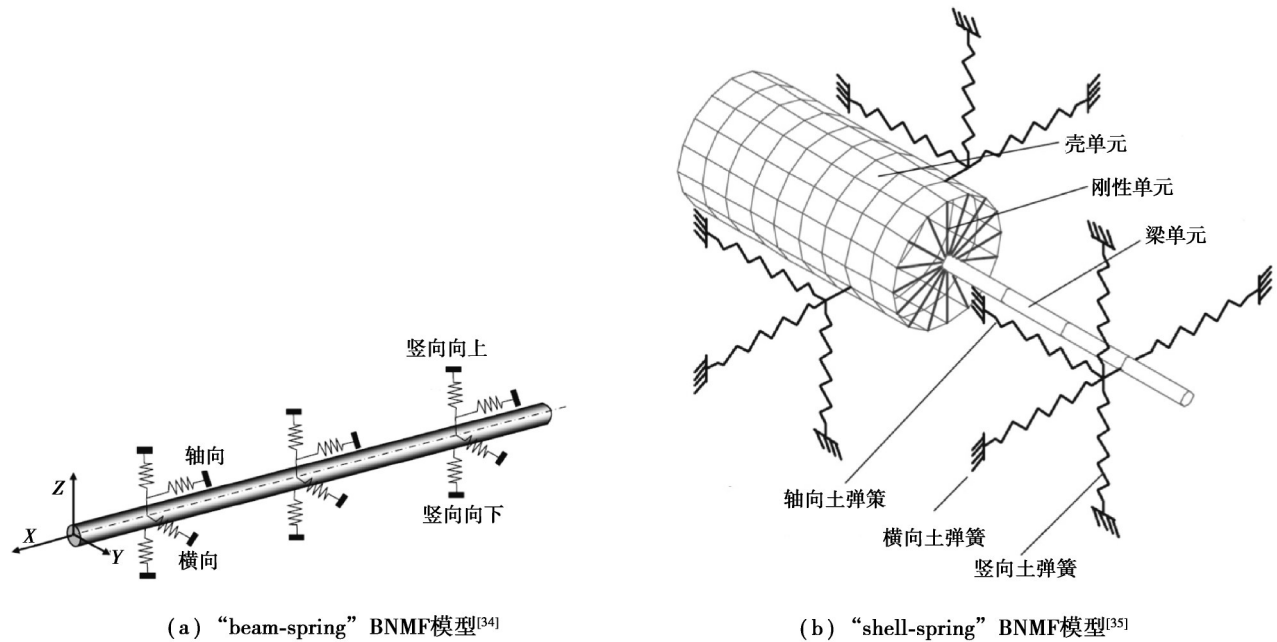


图4 BNWF模型

Fig. 4 BNWF model

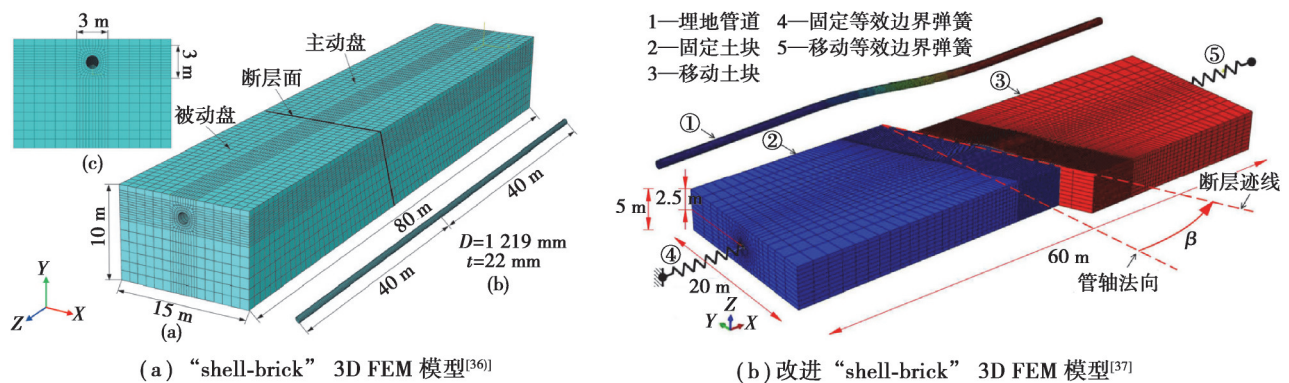


图5 3D FEM模型

Fig. 5 3D FEM model

1.3.3 试验法

通过具体事故验证解析法和数值分析法是评估管-土相互作用最直接的方法。但事故数量有限,且事故分析报告难以获得,几乎没有具体事故的确切资料和数据,难以还原真实工况。因此,一般采用试验法对管-土相互作用进行模拟。试验法主要有全尺、缩尺及离心机试验法3种。

Trautmann等^[38]首先进行了横向位移作用下干燥和全饱和砂土中直径为102 mm和324 mm的HDPE塑管的全尺试验,研究了直径、埋深、管道表面粗糙度和土体密实度对荷载-位移曲线的影响。Ha等^[39]介绍了直径为33.4 mm HDPE塑管的4次离心机试验,旨在验证断层作用下管道与断层的交叉角对管道响应的影响。Hsu等^[40-41]在松散和致密砂土中,对直径为102,152.4,228.6,304.8,324 mm的HDPE塑管进行了全尺轴向拉伸试验,试验数据表明现行规范指南ASCE及ALA-ASCE提供的公式会低估最大轴向土体抗力,该结论也在Karimian等^[42]对直径为324 mm和457 mm的A524级钢管的全尺试验中得到验证。王仁超^[43]以相似原

理,在砂土中建立了直径为 25 mm 的 PVC 塑管受滑坡作用的缩尺物理试验,全面分析了滑坡作用下管道的内力和变形规律。在欧盟 GIPIPE 框架内,Karamanos 等^[44]在干燥和全饱和土中进行了 PGD(断层/滑坡)作用下直径为 219 mm 的 X65 钢管的全尺试验(图 6~7),验证了所开发的数值模型及解析解的准确性。

表 3 BNWF 模型和 3D FEM 模型主要优(缺)点及适用范围

Table 3 Main advantages (disadvantages) and application scope of BNWF model and 3D FEM model

| 方法 | 优点 | 缺点 | 适用范围 |
|------------------------------|---|--|-------------------------|
| “beam-spring” BNWF 模型 | 1)易于应用;2)计算效率最高。 | 1)只适用于土质均匀的情况;2)不能精确地解释土壤的非线性行为;3)数值参数分析存在限制;4)无法考虑管道的内压及屈曲后行为;5)计算精度不足,计算值偏小。 | 一般地区及初步设计阶段的定性分析。 |
| “shell-spring” BNWF 模型 | 1)易于应用;2)计算效率最高;3)可以分析大变形区管道的屈曲后行为。 | 1)只适用于土质均匀的情况;2)不能精确地解释土壤的非线性行为;3)数值参数分析存在限制;4)计算精度不足,计算值偏小。 | 一般地区及初步设计阶段的定性分析。 |
| “shell-brick” 3D FEM 模型 | 1)使用接触模型能更精确解释管-土界面的几何非线性;2)数值参数分析方便;3)计算精度高。 | 1)计算成本最大,耗时最长;2)对计算机性能及分析人员专业技术能力要求高。 | 严重 PGD 作用下大应变区的详细设计与评估。 |
| 改进“shell-brick” 3D FEM 模型 | 具备“shell-brick”FEM 模型的所有优点,且计算效率更高。 | 1)计算成本大、耗时长;2)对计算机性能及分析人员专业技术能力要求最高。 | 严重 PGD 作用下大应变区的详细设计与评估。 |

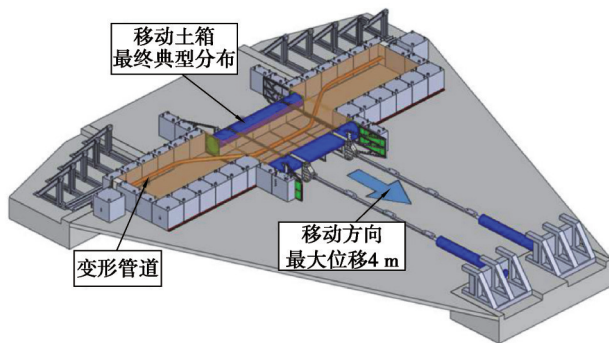


图 6 “滑坡/断层”全尺试验装置简图^[44]
Fig. 6 Schematic diagram of the landslide/fault full-scale test setup^[44]



图 7 “滑坡/断层”试验结果示意图^[44]
Fig. 7 Schematic diagram of landslide/fault test results^[44]

试验法主要集中在干燥、全饱和土中小口径(管径在 25 mm 和 324 mm 之间)、低钢级(\leq X65)或(PVC 及 HDPE 塑管)管道开展的试验,但缺乏 PGD 作用下大口径、高钢级管道的物理模型试验。尤其是真实工况(非饱和围土中)大口径、高钢级管道的全尺模型试验仍处于空白。

2 亟需开展的工作

基于上述原因,为适应我国山地管道的发展趋势及生产需要,弥补国内外针对山地管道设计及安全性评估研究较少及技术规范缺欠的现状,亟需针对实际 PGD 工况下高钢级、大口径、高压的山地管道开展以下工作:

- 1)开展全尺试验,为解析解及数值模型的开发及验证提供支撑数据。
- 2)开展管道的失效模式及机理研

究,制定合适的许用应变。3)开展考虑多轴向“管-土相互作用”的管道响应封闭解析解的研究,提高计算效率及易操作性。4)开发更贴近实际工况的围土本构模型(非饱和土、硬化及软化特性),建立更严格的3D FEM模型。5)基于以上研究,改进失效判别公式,提升“基于应变”的设计及安全性评估方法。6)研制与我国山地管道发展趋势及实际生产需求相匹配的规范指南,切实提高山地管道抵御地质灾害的能力。

3 结 语

随着油气管道“一带一路”项目的继续推进,我国山地管道建设能力及水平已处于世界领先,而规范指南的发展相对滞后,且我国山地管道事故时有发生,其原因之一为现行规范指南推荐的设计和安全性评估方法满足不了我国山地管道的发展趋势及生产实际的需求,致使PGD区现役管道安全状态不可控和拟建管道设计依据不充分。因此,亟需针对实际工况下山地管道的设计及安全性评估方法进行进一步研究,以加深和提高理论认识水平,对于持续改进山地管道“基于应变”的设计及安全性评估、研制与我国山地管道发展趋势及实际生产需求相匹配的规范指南、切实提高山地管道抵御山地灾害的能力及建设和管理水平、保障山地管道长期安全运行等都具有重要意义。

参考文献

- [1] 中商华研研究院. 中国油气管道工程建设行业“十四五”前景规划与项目投资建议报告2021~2026年[R]. 北京: 中商华研研究院, 2021.
CHINA Business Research Institute. China's oil and gas pipeline construction industry in the "14th five year plan" prospect planning and project investment proposal report 2021-2026 [R]. Beijing: CHINA Business Research Institute, 2021. (in Chinese)
- [2] 罗志强, 夏敏, 敖波. 山区天然气管道地质灾害防治工作思路[J]. 石化技术, 2020, 27(1): 132-134.
Luo Z Q, Xia M, Ao B. Considerations on prevention and control of natural gas pipeline geological disasters in mountainous areas[J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(1): 132-134. (in Chinese)
- [3] 张宏, 刘啸奔. 地质灾害作用下油气管道设计应变计算模型[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 91-97.
Zhang H, Liu X B. Design strain calculation model for oil and gas pipelines subject to geological hazards[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 91-97. (in Chinese)
- [4] 中国石油工程建设有限公司西南分公司. 提升油气长输管道本质安全研究报告[R]. 成都: 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 2018.
China Petroleum Engineering & Construction Southwest Company. Research report on improving intrinsic safety of long distance oil and gas pipeline[R]. Chengdu: China Petroleum Engineering & Construction Southwest Company, 2018. (in Chinese)
- [5] 黄维和, 郑洪龙, 李明菲. 中国油气储运行业发展历程及展望[J]. 油气储运, 2019, 38(1): 1-11.
Huang W H, Zheng H L, Li M F. Development history and prospect of oil & gas storage and transportation industry in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(1): 1-11. (in Chinese)
- [6] 辛艳萍. 中国油气管道技术现状与发展趋势分析[J]. 天然气与石油, 2020, 38(2): 26-31.
Xin Y P. Current situation and development trend of oil and gas pipeline technology in China[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(2): 26-31. (in Chinese)
- [7] Det Norske Veritas As. Submarine pipeline systems: DNV-OSF101:2013[S]. Oslo: DNV, 2013.
- [8] National Standard of Canada. Oil and gas pipeline systems: CSA Z662:19[S]. Toronto: Canadian Standards Association, 2019.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 油气输送管道线路工程抗震技术规范 GB/T 50470—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Seismic technical code for oil and gas transmission pipeline engineering GB 50470—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese)
- [10] 国家能源局. 油气输送管道应变设计规范 SY/T 7403—2018[S]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Code for strain-based design of oil & gas transmission pipelines. SY/T 7403—2018[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018. (in Chinese)

- [11] 李璞,陶燕丽,周建. 基于应变设计管道局部屈曲应变极限值的计算[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 101-107.
Li P, Tao Y L, Zhou J. A study of the ultimate compressive strain of local buckling in strain-based design of pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 101-107.(in Chinese)
- [12] American Petroleum Institute. Line pipe: API 5L-2018[S]. Washington, DC: API Publishing Services, 2018.
- [13] ASME Code for Pressure Piping. Pipeline transportation systems for liquids and slurries: ASME B31.4-2019[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [14] Institution BS. Gas supply systems-pipelines for maximum operating pressure over 16 bar - functional requirements: BS EN 1594:2009[S]. Brussels: BSI standards limited, 2009.
- [15] Committee on Gas and liquid Fuel Lifelines of the ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering. Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems: ASCE 1984[S]. Virginia: American society of Civil Engineers, 1984.
- [16] American Lifelines Alliance-American Society of Civil Engineers. Guidelines for the design of buried steel pipe (with addenda through February 2005): ALA-ASCE: 2005[S]. USA: American Society of Civil Engineers, 2005.
- [17] Pipeline Research Council International. Guidelines for constructing natural gas and liquid hydrocarbon pipelines through areas prone to land slide and subsidence hazards: PRCI:2009[S]. Texas: PRCI Inc, 2009.
- [18] British Standard. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance: Part 4 Silos, tanks and pipelines: BS EN 1998-4: 2006[S]. Brussels: BSI standards limited, 2006.
- [19] Karamanos S A, Sarvanis G C, Keil B D, et al. Analysis and design of buried steel water pipelines in seismic areas[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2017, 8(4): 04017018.
- [20] Vasilikis D, Karamanos S A, van Es S H J, et al. Ultimate bending capacity of spiral-welded steel tubes - Part II: Predictions[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 102: 305-319.
- [21] Gresnigt N, van Es S, Karamanos S, et al. New design rules for tubes in combined walls in EN1993-5[J]. Ce/papers, 2017, 1(2/3): 948-959.
- [22] Newmark N M, Hall W. J. Pipeline design to resist large fault displacements[C]// Proceedings of the US National Conference on Earthquake Engineering 1975. Urbana, Illinois, US: Department of Civil Engineering, University of Illinois, 1975: 416-425.
- [23] Kennedy R P, Williamson R A, Chow A M. Fault movement effects on buried oil pipeline[J]. Transportation Engineering Journal of ASCE, 1977, 103(5): 617-633.
- [24] Wang L R L, Yeh Y H. A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1985, 13(1): 75-96.
- [25] Takada S, Hassani N, Fukuda K. A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30(8): 1243-1257.
- [26] Karamitros D K, Bouckovalas G D, Kourvezis G P. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(3): 200-211.
- [27] Trifonov O V, Cherniy V P. Elastoplastic stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 33(1): 54-62.
- [28] 程旭东, 庞明伟, 徐立, 等. 基于应变设计的跨斜滑断层埋地管道地震反应分析[J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 110-117.
Cheng X D, Pang M W, Xu L, et al. Seismic response analysis of buried pipelines crossing oblique slip faults based on a strain design[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10): 110-117.(in Chinese)
- [29] Liu X B, Zhang H, Han Y S, et al. A semi-empirical model for peak strain prediction of buried X80 steel pipelines under compression and bending at strike-slip fault crossings[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 32: 465-475.
- [30] Talebi F, Kiyono J. Introduction of the axial force terms to governing equation for buried pipeline subjected to strike-slip fault movements[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 133: 106125.
- [31] 张东臣, Быков Л И. 滑坡条件下埋地管道受力分析[J]. 石油规划设计, 2001, 12(6): 1-3,6.
Zhang D C, Быков Л И. The force-summing analysis of buried pipeline under landslide condition[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2001, 12(6): 1-3,6. (in Chinese)
- [32] 尚玉杰, 王殿龙, 闫生栋, 等. 横向滑坡作用下埋地管道力学响应分析[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(1): 155-161.
Shang Y J, Wang D L, Yan S D, et al. Mechanical response analysis of buried pipeline under the action of transverse landslide[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(1): 155-161.(in Chinese)
- [33] Zahid U, Godio A, Mauro S. An analytical procedure for modelling pipeline-landslide interaction in gas pipelines[J]. Journal of

- Natural Gas Science and Engineering, 2020, 81: 103474.
- [34] Lim Y M, Kim M K, Kim T W, et al. The behavior analysis of buried pipeline: considering longitudinal permanent ground deformation[C]//Pipeline Division Specialty Conference 2001. July 15-18, 2001, San Diego, California, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2001: 1-11.
- [35] Karamitros D K, Bouckovalas G D, Kouretzis G P. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(3): 200-211.
- [36] Cheng X D, Ma C, Huang R K, et al. Failure mode analysis of X80 buried steel pipeline under oblique-reverse fault[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 125: 105723.
- [37] Banushi G, Squeglia N, Thiele K. Innovative analysis of a buried operating pipeline subjected to strike-slip fault movement[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 107: 234-249.
- [38] Trautmann C H, O'Rourke T D. Lateral force-displacement response of buried pipe[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(9): 1077-1092.
- [39] Ha D, Abdoun T H, O'Rourke M J, et al. Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high-density polyethylene (HDPE) pipelines crossing fault zones[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(10): 1501-1515.
- [40] Hsu T W. Rate effect on lateral soil restraint of pipelines[J]. Soils and Foundations, 1993, 33(4): 159-169.
- [41] Hsu T W, Chen Y J, Wu C Y. Soil friction restraint of oblique pipelines in loose sand[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(1): 82-87.
- [42] Karimian H, Wijewickreme D, Honegger D. Buried pipelines subjected to transverse ground movement: comparison between full-scale testing and numerical modeling[C]//Proceedings of 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 4-9, 2006, Hamburg, Germany. 2008: 73-79.
- [43] 王仁超. 滑坡作用下管道变形破坏机理试验研究[D]. 成都: 中国科学院, 水利部成都山地灾害与环境研究所, 2019.
Wang R C. Experimental study of pipeline deformation and failure mechanism under landslide action[D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [44] Vazouras P, Karamanos S A, Sarvanis G C, et al. Safety of buried steel pipelines under ground-induced deformations[R]. Brussels: RFCS Publications, 2015.

(编辑 郑洁)