

管道凹陷研究现状*

杨 琼** 帅 健

左尚志

(中国石油大学(北京)机电工程学院)

(中国特种设备检测研究院)

杨 琼 帅 健等:管道凹陷研究现状,油气储运,2009,28(6) 10~15。

摘 要 在对管道凹陷进行分类的基础上,综述了不同类型凹陷静压爆破强度和疲劳强度的研究现状。介绍了凹陷的回弹机理、回弹量的计算方法以及外载与凹陷深度的关系等方面的研究成果。对开展管道凹陷的力学行为、形成机理、评估方法等方面的研究提出了建议。

主题词 管道 凹陷 回弹 爆破强度 疲劳强度 研究

一、前 言

凹陷是由于管壁永久塑性变形而使管道横截面发生的总的变形^[1],是管道几何缺陷的常见形式之一。凹陷可以发生在管道施工建设期间,由于搬运、回填过程中的碰撞或岩石障碍等原因导致的管道凹陷;也可以发生在管道服役期间,由于挖掘设备、岩石等外物的压砸(陆地管道),拖船、拖网的破坏(海底管道)等原因导致的管道凹陷。

管道凹陷严重威胁着管道的安全运行,有些凹陷会立即导致管道失效,而有些凹陷的存在会对管道的承压能力产生影响,随时间变化的载荷作用可能会使管道发生疲劳破坏,给管道的安全运行带来潜在危害;另外,有些凹陷会阻止清管器的顺利通过,妨碍清管和管壁检测,给管道的监测和管理带来困难。

国外许多研究机构和学者通过试验、理论分析及有限元模拟等对管道凹陷的成型机理和力学特性进行了分析计算。研究主要集中在两个方面,一方面是对凹陷管道的剩余强度和剩余寿命的研究,其目的是发展检测、维护标准;另一方面是研究凹陷管道抵抗破坏的极限能力,其目的是发展抗破坏准则,用于设计新管道或指定管道附近施工机械设备的极限参数。

二、凹陷的分类

根据几何性质,凹陷可分为平滑凹陷和曲折凹

陷。导致管壁曲率发生平滑或急剧改变的凹陷分别称为平滑凹陷和曲折凹陷。平滑凹陷包括单纯凹陷、焊缝凹陷、含划伤(或其他缺陷)的凹陷。没有发生壁厚减薄(沟槽和裂纹)和焊缝等缺陷的平滑凹陷称为单纯凹陷。在所有形式的凹陷中,研究最多的是单纯凹陷。焊缝凹陷是位于焊缝及其周围的平滑凹陷。含划伤(或其他缺陷)的凹陷是由于外部物体接触导致管道表面金属损失的缺陷,划伤(或其他缺陷)包含于凹陷中。根据凹陷位置,可将凹陷分为管顶凹陷和管底凹陷。位于管道环向圆周上 2/3 位置(顺时针 8 点到 4 点方向)的缺陷称为管顶凹陷;位于管道环向圆周下 1/3 位置(顺时针 4 点到 8 点方向)的缺陷称为管底凹陷。根据回弹与否,可将凹陷分为约束凹陷和非约束凹陷。约束凹陷是受土壤、岩石等压砸作用导致的不能回弹的凹陷,通常位于管道底部;非约束凹陷是在内压改变时能回弹的凹陷,通常位于管道顶部^[1,2]。

三、单纯凹陷的评估

1、 爆破强度评估

凹陷会引起管道局部应力应变集中,疲劳测试证明了不同类型的凹陷呈现不同的应力应变分布。除了凹陷深度,凹陷的应力应变分布还依赖于凹陷的长度和宽度。长凹陷的最大应力应变发生在凹陷的中心;短凹陷的最大应力应变发生在凹陷的周围;深度相同时,长凹陷的最大应力大于短凹陷。

凹陷深度一般定义为在直径方向上相对于原管径的最大减小量,是影响平面凹陷爆破强度和疲劳

* 国家科技支撑技术课题(2006BAK02B01-12)。

** 102249,北京市昌平区府学路 18 号;电话:13810514362。

寿命最重要的因素。British Gas 提出,当凹陷深度小于 8%管径时,凹陷对管道爆破强度的影响很小。Europe Pipeline Research Group (EPRG) 认为,当凹陷深度达到 7%管径时,需要修理或移除。但是,随着输送管道钢级的不断提高,钢的韧性越来越大,再用基于凹陷深度的方法进行强度评估是不恰当的。目前,对于在工程中,是否按照管道凹陷的最大深度进行管道的强度评价,存在一些争论。ASME B31.8 提出了基于应变的评估标准,认为当凹陷区的最大应变达到 6%时(6%是在 3%和 12%之间选取的数值,3%是 ASME B31.4 和 ASME B31.8 中允许的弯曲应变极限,12%是材料变形处开裂的可能性会增加的应变极限^[4]),需修理或移除。推荐方法中假设各个最大应变都正好发生在凹陷最深处,计算公式为^[3]:

$$\epsilon_{xb} = t \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} \right) \quad (1)$$

$$\epsilon_{yb} = \frac{-t}{R_2} \quad (2)$$

$$\epsilon_{ym} = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{L} \right)^2 \quad (3)$$

$$k = \frac{\frac{d^2 y}{d^2 x}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$R = \frac{1}{k}$$

- 式中 ϵ_{xb} —— 环向弯曲应变;
 ϵ_{yb} —— 轴向弯曲应变;
 ϵ_{ym} —— 轴向薄膜应变;
 t —— 管道壁厚;
 R_0 —— 管道内径;
 R_1, R_2 —— 管道的横截面和轴向面曲率半径;
 L —— 凹陷长度;
 d —— 凹陷深度。

根据凹陷环向曲线的轮廓,凹陷可分为无凹角和有凹角两种情况(见图 1)。如果凹陷只是导致管道扁平,为无凹角凹陷, R_1 为正值;如果凹陷导致管道管壁曲线进一步凹进去,则为有凹角凹陷, R_1 为负值。

管道内外表面的应变可表示为:

$$\epsilon_i = [\epsilon_{xb}^2 - \epsilon_{xb}(\epsilon_{yb} + \epsilon_{ym}) + (\epsilon_{yb} + \epsilon_{ym})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\epsilon_o = [\epsilon_{xb}^2 + \epsilon_{xb}(\epsilon_{ym} - \epsilon_{yb}) + (\epsilon_{ym} - \epsilon_{yb})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中 ϵ_i —— 管道内表面的应变;

ϵ_o —— 管道外表面的应变。

评价凹陷时,取内外表面应变值中较大者进行评价。

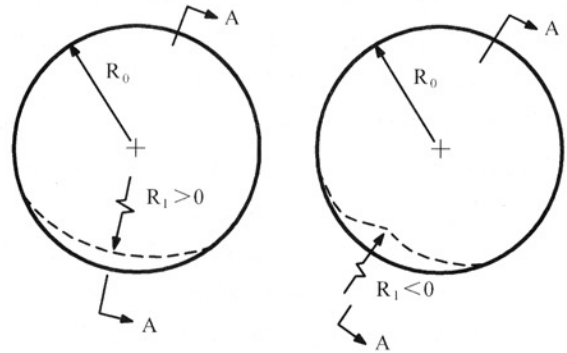


图 1 无凹角和有凹角凹陷的管道截面图

2、疲劳强度评估

基于应变的方法评估管道凹陷的严重性是在静态行为下进行的评估,由于凹陷(特别是非约束凹陷)在交变的操作压力下会产生疲劳,因此需要进行疲劳评估。当存在多凹陷时,通过对凹陷的疲劳强度进行评估,能够有效判断操作压力对疲劳寿命的影响,合理安排修理顺序,制订维修计划。

目前,工程上进行疲劳评估的准则是一旦管道含有尖锐缺陷,则不能继续使用。一般情况下,短凹陷没有尖锐缺陷,长凹陷通常含有尖锐缺陷。而且,长凹陷的应力集中明显高于短凹陷,即使没有尖锐凹陷也可能存在疲劳破坏的严重威胁。

要理解凹陷的疲劳行为,就必须理解凹陷的应力行为。研究应力的方法有解析法、有限元法、等效载荷法^[5]。非约束凹陷的疲劳寿命随压力交变范围、初始凹陷深度、初始局部应变、凹陷体积、管直径与壁厚比率(D/t)的增加而减少^[2]。

在凹陷疲劳行为的研究中,全尺寸凹陷疲劳试验的研究值得关注。许多研究说明,基于深度准则进行疲劳评估是存在问题的。Fowler 等人^[5]通过大量的试验,证实了含凹陷管道在疲劳载荷下会失效,认为凹陷破坏产生的应力集中是其疲劳失效的主要原因,应力集中随着管道管径与壁厚比率的变化而改变。Kenting 等人在证实凹陷深度重要性的基础上,研究了凹陷长度对疲劳的重要作用。试验结果证明,在同一深度下,长凹陷有更短的疲劳寿命。Kenting 等人还通过对比长短凹陷的残余应力、应力集中和回弹过程,说明基于深度的准则评估疲劳强度是不准确的^[5]。另外,Rinehart 等人^[6]根据试验数据得出了两个重要结论,基于深度准则的

疲劳评估与试验结果不是很吻合;深度准则适合于低寿命长凹陷的疲劳评估。

许多学者用不同方法对疲劳寿命进行预测。Fowler 等人将应力集中因子(Stress Concentration Factor)信息制成表格,用于从历史压力范围确定局部应力范围,再用 S-N 曲线得出疲劳寿命,最后用修正因子进行调整。Hagiwara 等人使用线性回归分析方法,提出了深度、管径、钢级和疲劳寿命的经验表达式^[5]。

基于几何特征进行疲劳评估需解决两个问题,确定区别凹陷类型的几何值;对给定类型的凹陷,确定区别安全凹陷和不安全凹陷的几何值。Rinehart^[5]提出了用 C-P 曲线来进行疲劳评价。他将凹陷分为模型 C 和模型 P,模型 C 指的是裂纹位于凹陷中心、寿命短、存在明显回弹特征的凹陷;模型 P 指的是裂纹位于凹陷周围、寿命长、具有小范围回弹特征的凹陷。

基于断裂力学预测疲劳寿命的方法是用裂纹尖端应力强度因子 ΔK 来表示。Diowitz 等人用幂次律疲劳裂纹扩展模型来预测疲劳寿命。Dawson 提出用管道缺陷评价手册(PDAM)中的模型来决定是否有凹陷疲劳失效的危险,用有限元分析确定应力的范围,再用 S-N 曲线得出疲劳循环。Rinehart 和 Keating 则考虑了裂纹终止对残余应力的影响,通过计算断裂初始行为(当凹陷不存在明显的尖锐缺陷时必须考虑)预测疲劳寿命。Rinehart 和 Keating 还用测定的体积参数预测疲劳寿命,认为非约束凹陷的疲劳寿命反比于一个无量纲参数 $Ld_f W/D^2 t$ 。

将应力集中因子和管道凹陷的几何特征看作函数关系,可以得出应力集中因子的解析公式^[7]:

$$K_t = 1 + 1.423 \left(\frac{D}{t} \right)^{0.67} \left(\frac{d}{D} \right)^{0.62} \frac{L}{W} \quad (6)$$

$$K_f = q(K_t - 1) + 1 \quad (7)$$

式中 K_t ——静压下应力集中因子;

K_f ——疲劳载荷下的疲劳因子;

D ——管道直径;

t ——管道壁厚;

d ——凹陷的最大深度;

W ——凹陷的宽度;

L ——凹陷的长度;

q ——缺口敏感度,通过疲劳试验得出。

管道缺陷管理手册(PDAM)^[8]中总结了平面凹陷的疲劳评价模型。EPRG 和 Alexander CR 等机

构分别提出了预测非约束平面凹陷疲劳寿命的半经验或经验方法。EPRG 推荐的经验模型是基于 DIN 2413 给出的埋弧焊直缝管的 S-N 疲劳曲线和应力集中因子得出的模型,凹陷的应力集中因子是凹陷深度和管道几何参数的函数,模型中的凹陷深度是在回弹后无压力时测量的深度。Alexander CR 提出的模型也是基于 S-N 曲线和应力集中因子得出的模型,应力集中因子由凹陷管道的有限元分析得出,并按照屈服强度、管径壁厚比、凹陷深度相对名义管径回弹比和平均压力制成表格形式。根据平面凹陷疲劳试验数据比较 EPRG 和 Alexander CR 提出的模型,结果表明,尽管模型预测结果和试验结果存在一定误差,但相对于 Alexander CR 模型, EPRG 模型的预测结果更准确。PDAM 推荐使用 EPRG 模型预测单纯凹陷管道的疲劳寿命。

对于凹陷的疲劳研究仍有很多工作有待开展,例如残余应力、凹陷宽度对疲劳寿命的影响。疲劳行为不仅与应力集中是函数关系,与残余应力也密切相关,但目前很少有研究涉及残余应力。只有对凹陷的影响因素有了更多的了解后,凹陷的疲劳行为才能得到彻底的理解和准确的预测。

四、焊缝凹陷的评估

焊缝凹陷对管道的安全影响很大,环焊缝由于有更多的焊缝缺陷,在发生凹陷时比直焊缝更易产生破坏。目前,还没有可靠的方法预测位于焊缝的平滑凹陷管道的爆破压力和疲劳寿命,当发现管道存在位于焊缝的平滑凹陷时,通常是进行修理或移除。

文献[2]统计了已发表文献中含有焊缝凹陷压力容器的全尺寸爆破试验结果,试验证实含有焊缝凹陷管道的爆破压力非常低,最小爆破压力为 SMYS(指定的最小屈服强度)的 7%,分析原因可能是由于凹陷和回弹过程中的焊缝破裂导致。

文献[1]统计了已发表文献中含有焊缝凹陷压力容器的全尺寸疲劳试验结果,试验证实了含焊缝凹陷管道的疲劳寿命远低于同等条件下的平面凹陷和含焊缝的无凹陷管道的疲劳寿命,并且环焊缝凹陷的疲劳寿命低于直焊缝凹陷的疲劳寿命。

五、含划伤(或其他缺陷)凹陷的评估

含划伤(或其他缺陷)的平滑凹陷是机械破坏中非常严重的破坏形式,其爆破强度低于同等条件下

的单纯凹陷,也低于含有同样划伤的非凹陷管道。目前,含划伤的平滑凹陷的爆破试验使用了很多种凹陷制造方法,包括有内压的凹陷、无内压的凹陷、先有凹陷再出现划伤、先有划伤再出现凹陷、划伤和凹陷同时发生等多种不同的情况。然而,大多数试验都是机械制造的刻痕或缝隙,与实际的划伤有一定的差别^[1]。

Leis 等人分析了含划伤的平滑凹陷缺陷的失效机理。含划伤的平滑凹陷失效包括高塑性应变、壁厚减薄、裂纹形成、延性撕裂和塑性流动。受内压作用下含划伤凹陷的行为非常复杂,划伤和凹陷是几何不稳定结构,在划伤的基础上可能包含裂纹;划伤和凹陷处材料的特性可能改变;凹陷的运动可能会促进在划伤基础上裂纹的形成和扩展。

British Gas 等机构提出了预测含划伤凹陷管道爆破强度的半经验断裂模型,EPRG 和 PDAM 均推荐该模型作为机械破坏的评估方法。目前还没有可靠的方法预测含划伤凹陷管道的疲劳寿命。全尺寸试验证明,含划伤的凹陷管道的疲劳寿命低于平面凹陷管道及含有划伤的无凹陷管道,疲劳寿命短是由于疲劳和延性撕裂引起的裂纹扩展联合作用所导致的。

六、回 弹

凹陷的形成使管道产生弹塑性变形,当移去外

$$H_o = \pi \times H_r \times \left[\frac{1}{\pi - 2 \times \alpha \times \arctan\left(\frac{L_r}{H_r}\right) \times \arctan\left(0.1 \times \frac{D}{t} \times \frac{P}{R_p}\right)} \right] \quad (9)$$

式中 α ——修正系数;

L_r ——有内压时的凹陷长度;

P ——内压;

R_p ——屈服强度。

M_o ——塑性极限弯矩;

δ_r ——凹陷回弹后的深度;

D ——管道直径。

七、外载和凹陷深度的关系

外载和凹陷深度的关系是研究凹陷力学行为的主要内容,在已发表的关于凹陷行为的文献中,主要是基于刚塑性方法进行的研究。

Ellinas 和 Walker 运用半经验方法,通过假设两侧屈服区的长度为常量(相当于 3.5 倍的管道直径),得出了凹陷载荷与凹陷深度的关系式:

$$F = 150 M_o \sqrt{\frac{\delta_r}{D}} \quad (10)$$

式中 F ——形成凹陷所施加的外载;

部加载,凹陷会产生一定程度的回弹。回弹可以是弹性的,也可以是塑性的。

了解凹陷的回弹过程和回弹量的大小对凹陷管道的评价和管理具有重要意义。预测凹陷管道的爆破强度和疲劳寿命需要了解凹陷的应力行为,定量凹陷的应力集中因素。凹陷的应力集中因子是凹陷深度的函数,回弹影响凹陷深度的大小。

凹陷的回弹依赖于管道的几何性质、材料性质、是否受内压、凹陷的形状等因素。长凹陷的回弹大于短凹陷的回弹,平滑凹陷的回弹大于曲折凹陷的回弹,受内压凹陷的回弹大于无内压凹陷的回弹,薄壁管道凹陷的回弹大于厚壁管道凹陷的回弹^[1]。

文献[9]研究了内压对凹陷深度的影响,凹陷的测量通常是在管道受压情况下进行的,而普遍的评估准则是基于缺陷在没有内压时测得的缺陷特征。由于压力差使得缺陷产生回弹,凹陷的深度发生变化,凹陷的深度随着内压的增大而减小。

通常使用经验公式来计算无内压时的凹陷深度:

$$H_o = 1.43 H_r \quad (8)$$

式中 H_o ——无内压时的凹陷深度;

H_r ——有内压时的凹陷深度。

由于式(8)没有考虑到凹陷的任何影响因素,因此这个关系式被认为是相当保守的。文献[9]提供了一个新的关系式:

Furnes 和 Wierzbicki 等人对在刀形加载物下易弯曲管道出现凹陷的情况进行了分析。Furnes 提出了在圆轴上出现楔形缺陷的模型,但仅限于用来检验局部凹陷。Wierzbicki 将管道分离为环向截面和径向截面,忽略剪切影响,且端部受完全约束时提出的模型表达式为^[10]:

$$\frac{\xi}{R} = \sqrt{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{\frac{d}{t}} f_1 f_2 \quad (11)$$

$$F = 16 M_o \sqrt{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{\frac{d}{t}} \quad (12)$$

式中 f_1, f_2 ——给定系数;

ξ ——屈服区域轴向长度;

d ——凹坑深度;

R ——管道半径;
 t ——管道壁厚。

式(12)也用于调查在凹陷过程中轴向加载的影响,同时推荐用于海底管道凹陷的风险评估。但由于它假设管道为刚性,且忽略了管道的内压和覆盖层,也是相当保守的。

西澳大学的 Brooker^[11]对管道在无内压情形下受到刀形加载而出现凹陷的情况进行了数值模拟,通过对管道壁厚、管长、管径及屈服应力等参数的考虑,给出了载荷与凹陷深度的表达式:

$$F = 11.364 M_0 + 15.49 N_0 \delta_r \left(\frac{t}{D}\right)^{0.15} \left(\frac{t}{L}\right)^{0.25} \quad (13)$$

式中 N_0 ——塑性薄膜载荷。

由于实际上管道凹陷还受到硬化及不完全的端部约束、内压力的影响,因此模型与管道凹陷的实际情况还是有所区别的。Brooker 对有压情况下的凹陷也进行了分析,并将载荷方式改为 V 形加载,得到了相应的模型表达式^[12]:

$$F = 2 M_0 \left(\frac{b_1 + 2 b_2 + 2 c}{c} + \frac{3 b_2 \delta^2}{c t^2} + 2 \frac{\delta^2}{t^2} + 4 \right) + P \left(b_1 b_2 + c(b_1 + b_2) + \frac{4 c^2}{3} \right) \quad (d \leq t) \quad (14)$$

$$F = 2 M_0 \left(\frac{b_1 + b_2 + 2 c}{c} + \frac{4 b_2 \delta}{c t} + 4 \frac{\delta}{t} + 2 \right) + P \left(b_1 b_2 + c(b_1 + b_2) + \frac{4 c^2}{3} \right) \quad (d > t) \quad (15)$$

式中 b_1 ——平行于管道轴向压头的尺寸;
 b_2 ——垂直于管道轴向压头的尺寸;
 c ——描述凹陷区域大小的参数。

式(15)考虑的因素多且较全面,但是只适用于径向接触荷载条件,并且在管道压力较低、管道的环向刚度很大或很小时都不够准确。

Iflefel 等人^[13]研究了内压和弯曲作用对凹陷管道的影响,首次提出了弯曲影响模型,对管道的损伤评估有一定的参考意义。文献[14]则通过理论分析,用能量平衡得到了载荷 F 与凹陷深度的关系:

$$F = \sigma_y h \sqrt{R h} \left[f_1 + f_2 \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h}{R}} \right] \quad (16)$$

八、结束语

(1)通过对管道凹陷的大量试验研究,总结了许多评估缺陷的方法,有些方法已经纳入行业规范,明确指导各种凹陷的评估^[2]。例如,加拿大工业标准

协会 CSA Z662-03(2005)、澳大利亚国家标准 AS 2885.3(2001)、美国机械工程师协会 ASME B31.8(2003)、ASME B31.4(2004)、美国石油协会 API 1160(2001)都明确了管道凹陷的评估方法。另外,由 16 家国际石油天然气公司发起的联合工业项目指出,管道缺陷评价手册(PDAM)是当前评估管道缺陷的最有效的方法。


(2)对凹陷的研究仍存在局限。例如,单纯凹陷基于应变的评估方法仍需确定其适用条件和使用范围;行业规范有待于进一步改进;凹陷几何特征的确定及其对管道疲劳强度的影响程度,回弹量的确定及其与凹陷形状的关系仍需要开展更深入的研究。

(3)到目前为止,对许多类型的凹陷尚未形成系统的评估方法,有待于开展进一步的研究。例如,对于曲折凹陷的认识,仅限于通常所认为的,曲折凹陷比相同深度的平面凹陷有更低的爆破压力和更短的疲劳寿命,尚未形成评价曲折凹陷的方法。因此,一旦检测到曲折凹陷,无法进行评估,只能对其进行修理。对于凹陷与其他典型的局部管壁缺陷(管体制造缺陷、腐蚀缺陷、环境裂纹)同时存在的情况,也尚未形成相应的评价方法。

(4)与国外相比,国内对管道凹陷的研究,无论是在凹陷的力学行为、形成机理方面,还是在评估方法方面,都存在很大差异。为了确保管道的完整性,国内的科研工作者有必要进一步加强对管道凹陷的研究。

参 考 文 献

1. Cosham A, Hopkins P: The effect of dents in pipelines—guidance in the pipeline defect assessment manual, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81.
2. Dawson S J: Emerging techniques for enhanced assessment and analysis of dents, Proceedings of IPC 2006 6th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2006.
3. ASME B31.8 - 2003 Gas transmission and distribution piping systems.
4. Baker: Integrity management program—dent study, Department of Transportation, Delivery Order DTRS56-02-D-70036, 2004.
5. Rinehart A J: Effects of localized geometric imperfections on the stress behavior of pressurized cylindrical shells (PhD dissertation), Texas A&M University, 2003.
6. Rinehart A J, Keating P B: Length effects on fatigue behavior of longitudinal pipeline dents, Proc. of the 2002 International Pipeline Conference, ASME, Calgary, Alberta, Canada, 2002.
7. Bianca de Carvalho Pinheiro: Stress concentration factors of dented pipelines, Proceedings of IPC 2006 6th International


 输送工艺

长输管道冷热油交替输送热力影响因素分析

周 建* 王 凯

(中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室)

邹晓琴

(西南油气田分公司天然气经济研究所)

窦 丹

(中国石油天然气勘探开发公司)

周 建 王 凯等:长输管道冷热油交替输送热力影响因素分析,油气储运,2009,28(6) 15~17, 43。

摘 要 针对冷热油交替输送管道的设计与运行,通过冷热油交替输送软件计算,考察了输送距离、年输送批次、相对输量、管道输量和出站温度等热力影响因素对原油流动安全的影响,总结了长输管道冷热油交替输送的典型热力特征,深化了对冷热油交替输送规律的认识。

主题词 管道 冷热油 交替输送 热力特征 影响因素 分析

统分析,可以更好地为生产实践提供技术服务。

一、前 言

原油顺序输送是石油管道技术的发展方向之一。考虑到原油品质不同,其安全、经济的输送温度也不同,为此发展了冷热油交替输送工艺。我国西部原油管道和庆铁老线输油管道都将采用这种输送工艺。

冷热油交替输送是一个复杂的非稳态热力—水力耦合问题,需借助数值计算求解。近年来,中国石油大学(北京)针对冷热油交替输送开展研究,取得了阶段性成果^[1,2],开发的冷热油交替输送软件已应用于西部原油管道设计和运行阶段的工况计算。对长输管道冷热油交替输送的热力影响因素进行系

二、热力影响因素分析

1、 计算条件

以某条输油管道为例,管径为 $\phi 813 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$,管道埋深为 1.6 m,土壤导热系数为 $1.28 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,土壤恒温层温度为 10°C ,空气与地表的换热系数为 $20.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。管道交替顺序输送不同品质的原油 1 和原油 2,两者的导热系数均为 $-0.000 2 T + 0.137 8 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,物性参数见表 1,其中,导热系数、比热、流变行为指数、稠度系数随温度变化的关系式均为试验数据拟合结果,仅在本计算的温度范围内成立。

Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2006.

8, Cosham A, Hopkins P: The pipeline defect assessment manual, Proceedings of IPC 2002 International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2002.

9, Avigaële LE BASTARD: Influence of internal pressure for depth measurement on dent, Proceedings of IPC 2006 6th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2006.

10, Wierzbicki T, Suh M: Indentation of tubes under combined loading, International Journal of Mechanical Sciences, 1988, 30(3/4).

11, Brooker D C : A numerical study on the lateral indentation of

continuously supported tubes, Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60.

12, Brooker D C: Denting of pressurized pipelines under localized radial loading, International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46.

13, Iflefel I B, Moffat D G et al: The interaction of pressure and bending on a dented pipe, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82.

14, Liu J H, Francis A: Theoretical analysis of local indentation on pressured pipes, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81.

(收稿日期:2008-07-02)

* 102249,北京市昌平区府学路 18 号;电话:(010)89733776。