

设计计算

输气管道裂纹动态扩展的数值模拟^{*}

帅 健^{**} 张 宏 许 葵

(石油大学(北京)机电学院)

帅 健 张 宏等: 输气管道裂纹动态扩展的数值模拟, 油气储运, 2004, 23(8)5~8.

摘 要 作为输气管道止裂控制的重要依据, 必须要求其裂纹驱动力小于管道材料的断裂韧性, 在这种情况下进行裂纹动态扩展的数值模拟就显得非常重要。建立了输气管道裂纹动态扩展的有限元模型, 用弹塑性、大位移四边形的壳体单元离散管道。裂纹尖端后面的气体压力简化为指数衰减模式。裂纹的开裂采用节点力释放方法来模拟, 即根据裂纹扩展速度, 依次解除裂纹尖端的节点连接。裂纹驱动力用能量释放率 G 和裂纹尖端张开角 $CTOA$ 两个断裂力学参量表示。分析了裂纹驱动力随内压的变化规律。提出的计算模型可为输气管道的止裂设计提供分析工具。

主题词 输气管道 裂纹扩展 止裂 有限元 分析 计算

一、概 述

由裂纹持续扩展导致的管道开裂是天然气输送管道区别于石油输送管道的特有破坏形式, 其破坏性十分巨大。究其原因是由于管壁缺陷、运输过程中无意形成的刻痕、腐蚀环境等可能形成的裂纹源, 在管内气压作用下发生快速扩展, 使得管道在瞬间

破坏数百米甚至上千米。北美钢制天然气管道曾发生过裂纹扩展达十几公里事故, 国内也有管道在气压试验中发生裂纹扩展的事例。

为了研究裂纹动态扩展的规律, Kanninen 等人首先提出了输气管道裂纹动态扩展的一维梁模型^[1,2], 其研究结果是得出了裂纹扩展的极限裂纹扩展速度, 并表明对应一定管道几何尺寸和操作工况, 存在一个最大的裂纹驱动力, 它可用来估计止裂

13. Zhang Xuejun; Statistical Leak Detection in Gas and Liquid Pipelines, Pipes & Pipelines International, July-August, 1993.
14. Aunicky Z; The Longitudinal Mixing of Liquids Flowing Successively in Pipelines, Chem. Engng, 1970, 48.
15. Renan Martins Baptista, Felipe Bastos de Freitas Rachid and Jose Henrique Cameiro de Araujo; Mixing Volume Evaluation Under Pumping Shut-down Conditions, PSIG, 2001.
16. Wallace J Mauer; Batch Tracking Refined Products by Computer, Pipe Line Industry, June, 1988.
17. Charles A DeFelicis; Flow Simulator Helps Solve Batch Scheduling Problems, Pipe Line Industry, June, 1976.
18. Sparrow D; Implementing Software Systems for Multi-product Pipeline Scheduling, Pipes & Pipelines International, July-August, 1985.
19. Anker R; Micro-computer System Aids in Scheduling Pipe Line Industry, November, 1986.
20. Janusz Stuchly and Chris Kedge; Computer Model Designs African Multiproducts Line Extension, Oil & Gas Journal, July 14, 1997.
21. Luke Muthews, Gurdial Singh and Rasheed Jung M; Study Verifies Safe operating Limits for Batched Line Using DRAs, Oil & Gas Journal, Feb. 26, 2001.
22. Ulli Pietsch and Brad Koberstein; Establishing Parameters Required For RealTime On-line Drag Reducing Agent Modeling, PSIG, 1999.
23. 颜汉强; 输油管道设计的计算机程序, 石油规划设计, (5) 1995.

(收稿日期: 2003-10-20)

编辑: 刘春阳

* 中国石油天然气集团公司中青年科技创新基金(项目编号 2001CX-35)。

** 102249, 北京市昌平区府学路 18 号; 电话: 13910027590。

韧性的最小值。为了考虑管道的壳体大变形，Emery 等人又提出了圆柱壳模型^[3]，该模型也称为翻边模型，与 Kanninen 的一维梁模型相比，Emery 的圆柱壳模型可以分析更多的情形，如大变形和小变形、弹性分析和塑性分析等。针对在管道裂纹动态扩展过程中复杂的气体/管道/断裂的耦合作用，O'Donoghue 和 Kanninen 提出了有限元数值模型^[4]，与前述简化解析模型相比，有限元等数值方法的好处是不需要做出许多强制性假设，更能符合裂纹扩展的物理过程，从其提出以来一直是作为裂纹驱动力计算的主要方法。

为了对输气管道，特别是高压输气管道的裂纹动态扩展问题进行更深入的分析，建立了输气管道裂纹动态扩展的有限元模型，旨在为输气管道的止裂设计提供有效的分析工具。

二、裂纹动态扩展的力学行为分析

输气管道的裂纹动态扩展现象是气体、管道和断裂相互作用又相互影响的过程。当管道上裂纹起裂和扩展时，气体压力直接作用在被破坏的管壁上，为管壁破坏提供了运动的能量，管壁呈非线性失稳破坏和裂纹扩展，既影响气体压力分布，又形成了管道上的边界条件。图 1 是裂纹动态扩展的示意图，当管道上的裂纹发生纵向扩展时，裂纹尖端后面的气体从张开处溢出，管壁横向变形越来越大。与管道裂纹动态扩展事件有关的力学行为应包括^[4]气体减压导致裂纹尖端及尖端后面的分布压力载荷—流体动力学问题，开裂管壁的变形—结构动力学问题，管道裂纹的快速扩展—断裂动力学问题。这三个方面的作用是一个复杂的耦合过程，如管道材质、工作应力、气体减压特性、温度、几何尺寸以及管外覆盖土层等对这一现象都有直接的关系。

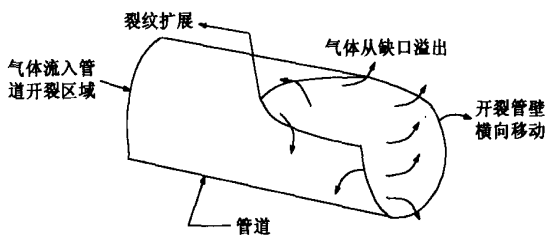


图 1 裂纹动态扩展示意图

由于裂纹尺寸这时是一个随时间变化的未知函数，扩展裂纹形成了结构的位移边界条件，使得控制方程和运动边界条件均为非线性。

三、气体压力模式

由于管壁变形的不规则曲面，管道裂纹动态扩展中的流固耦合使得模拟计算的工作量十分艰巨。为了节省计算时间和满足工程应用，对开裂管道气体压力分布的研究普遍采用简化分析结果。简化分析的目的主要是确定裂纹开裂时，其尖端处的气体压力和尖端后面的压力。

1、裂纹尖端处的气体压力

Maxey 等人采用压缩空气、氮气以及甲烷含量高的天然气观察气体的减压行为，发现可以采用理想气体定律建立这些气体的状态等式。假设气体的膨胀过程是等熵过程，充满气体的管道突然开裂，整个状态中气体成分混合均匀，则裂尖附近气体局部压力与裂纹扩展速度有如下关系^[5]：

$$p_1 = \begin{cases} p_0 & V \geq C_0 \\ p_0 \left[\frac{2}{\gamma+1} + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \frac{V}{C_0} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} & V < C_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 p_1 ——减压后的压力水平；
 p_0 ——开裂前的管内压力；
 γ ——气体的单位比热；
 V ——裂纹扩展速度；
 C_0 ——声音在气体中直线传播的速度。

2、裂纹尖端后面的气体压力

当天然气管道开裂后，气体从未开裂管道处流向开裂区，由于气体从裂纹张开处流向周围环境以及气体流向开裂区后发生膨胀等原因，使得管道裂纹尖端后面气体的溢出呈现压力逐渐衰减的趋势。区别于液体压力的立即降为零，气体压力是沿一特征长度稳定地衰减至大气压力，并有一段明显的衰减区。在这一衰减区，气体继续对管壁施压，因此导致管壁的开裂。简化的依据是全尺寸管道爆破试验得到的实际管道开裂压力分布曲线。根据从全尺寸钢制管道爆破试验结果，拟合出气体作用于裂纹尖端后面的管壁压力的近似解析分布为指数衰减函数：

$$p(\zeta) = \begin{cases} p_1 & \zeta \geq 0 \\ p_1 e^{b\zeta/L} & -L \leq \zeta < 0 \\ 0 & \zeta < -L \end{cases} \quad (2)$$

式中 ζ ——所计算的横截面位置相对于裂尖的位置;
 L ——气体压力衰减区的长度;
 b ——表示压力衰减程度的系数。

四、壳体的有限元网格和边界条件

管道上的裂纹一般从起裂点同时向两侧扩展, 由于管道几何形状和所承载荷的对称性, 取一侧管道的一半, 即四分之一建立模型, 见图 2。采用四节点弹塑性板壳单元, 沿管道的轴向和周向分别划分网格, 在管道内壁作用气体压力。

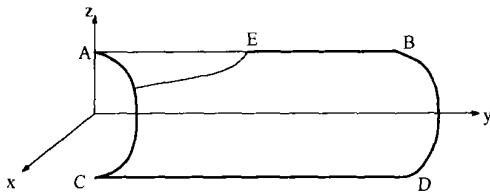


图 2 计算模型的边界条件

考虑到裂纹张开形成的运动边界以及模型的对称性, 图 2 指定的计算模型边界条件为, E 点是裂尖位置, 随时间变化; AE 边界是自由边; EB 边界约束 x 方向的位移和绕 $y、z$ 轴的转动; AC 边界和 BD 边界约束 y 方向的位移并绕 $x、z$ 轴的转动; CD 边界约束 $x、z$ 方向的位移并绕 $y、z$ 轴的转动; C 点是固定点。

五、节点力释放技术

对于用有限元离散后的结构, 连接是在节点上, 裂纹动态扩展中的节点释放是指当裂纹尖端通过有限元网格中的某个节点时, 便解除该节点的连接作用, 将其分为两个节点, 并释放节点力。节点力释放技术是动态断裂问题数值模拟的典型方法, 适合各种管道材料。在所模拟的输气管道裂纹动态扩展问题中, 裂纹的扩展是沿轴线方向, 裂纹的扩展速度可看作是已知的, 这样, 裂纹尖端位置作为时间的函数也是已知的, 因此, 裂纹沿着轴线方向的扩展被模拟为裂纹尖端的不连续突进, 见图 3。在动态计算的时间增量 Δt 内, 裂尖沿裂纹传播方向从一个节点改变到下一个节点。

为了得到较为精确的解答, 必须采用较小的时间步长。通常, 裂尖只能运动到两个相邻节点之间的某一个位置。在节点释放过程中, 位移约束的突然解除, 将引起有限元求解中比较严重的高频振荡现象。为了克服这个困难, 提出了缓步释放的方法, 即节点力的大小随着裂纹在单元边界长度上的位置变化而逐渐衰减到零, 可表示为:

$$F(t) = F_0 \left[1 - \frac{a(t)}{L} \right]^c \quad (3)$$

式中 F ——被释放的约束力;
 F_0 ——被释放的节点力;
 $a(t)$ ——裂纹沿单元的扩展长度。

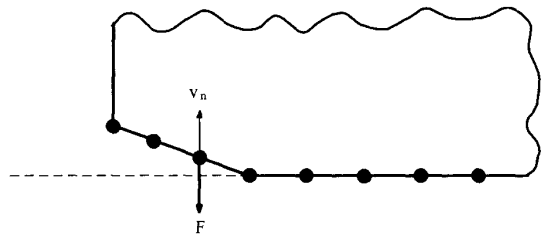


图 3 节点力释放

若式 (3) 中的 $c=1$, 则呈线性变化。

六、裂纹驱动力计算

在输气管道裂纹动态扩展与止裂设计中, 常用来表征裂纹驱动力的参数有能量释放率 G 和裂纹尖端张开角 ($CTOA$)。

能量释放率 G 定义为在裂纹区每扩展单位面积所引起的能量变化, 可以近似地以节点力做功的形式来计算^[4]:

$$G = \frac{2}{hL} \int_t^{t+\Delta t} F(t) v_n dt \quad (4)$$

式中 h ——管壁厚度;
 L ——单元沿裂纹扩展方向的长度;
 Δt ——裂纹扩展一个单元所用的时间;
 v_n ——垂直裂纹扩展方向的节点速度;

$CTOA$ 是一个断裂力学参量, 在裂纹稳态扩展阶段, $CTOA$ 达到临界值, 保持恒定不变。对于钢制管道, 用 $CTOA$ 表征其断裂韧性可以得到最为近似的材料断裂特征, 因而被认为可以替代夏比冲击韧性, 是一种具有发展前途的止裂研究方向, 其部分研究成果目前已应用于工程实际。在有限元方法中, $CTOA$ 根据裂纹尖端后面节点的位置计算。

七、算例分析

按照上述方法，采用 ANSYS 有限元分析软件，对所给算例进行计算。假定管道直径为 1.016 m，管壁厚度为 0.014 7 m，计算模型长度为 90 m，内压为 10 MPa，裂纹稳定扩展速度为 300 m/s。裂纹尖端后面气体压力衰减的长度取 1.5 倍的直径长度。

图 4 和图 5 是计算得到的裂纹稳态扩展的能量释放率和裂纹尖端张开角 (CTOA) 与裂纹尖端扩展距离的关系，两者的大小因有限元算法的原因而略有抖动，能量释放率的稳态值约为 17.1 MN/m，CTOA 裂纹尖端张开角的值约为 14°。图 6 和图 7 是 CTOA 和能量释放率 G 随管道内压的变化情况。可以看出，裂纹尖端张开角和内压基本成线性关系。内压越大，CTOA 和能量释放率越大，说明管道的内压越高，所需管材的韧性就越高。

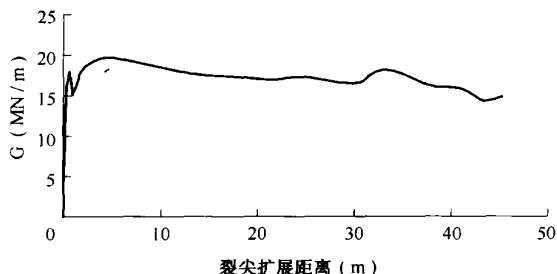


图 4 裂纹稳态扩展的能量释放率

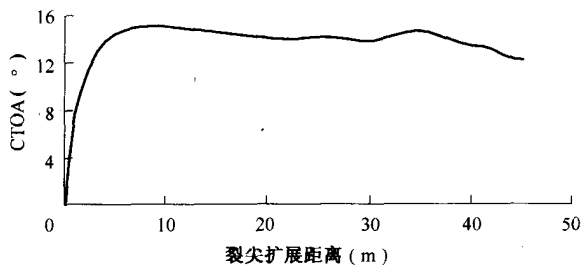


图 5 裂纹稳态扩展的裂纹尖端张开角

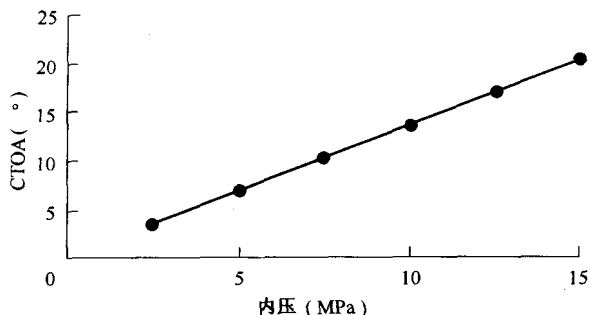


图 6 CTOA 随内压的变化

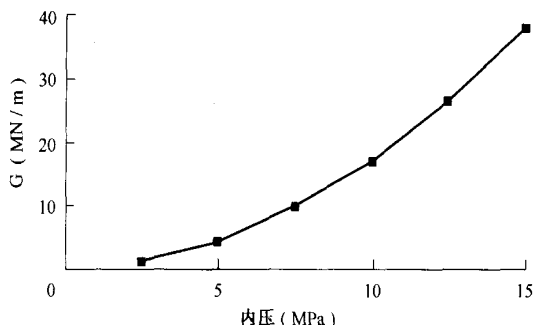


图 7 能量释放率 G 随内压的变化

八、结束语

作为一种新发展起来的输气管道止裂判据 (CTOA) 具有良好的发展前景。应用有限单元的数值模拟方法，是计算输气管道 CTOA 的有效手段。提出的裂纹扩展的有限元模型，采用节点力释放方法，能够模拟裂纹开裂运动，计算 CTOA 和能量释放率这两个重要的断裂力学参数，为高压输气管道的止裂设计提供分析工具。

参 考 文 献

1. Kanninen M F, Sampath S G, Popelar C: Steady-state crack propagation in pressurized pipelines without backfill, ASME J Pres Ves Tech, 1976, 98.
2. Popelar C, Rosenfield A R, Kanninen M F: Steady-state crack propagation in pressurized pipelines, ASME J Pres Ves Tech, 1977, 99.
3. Emery A F, Love W J, Kobayashi A S: Dynamic finite difference analysis of an axially cracked pressurized pipe undergoing large deformations, Philadelphia ASTM, 1977.
4. O'Donoghue P E, Green S T, Kanninen M F et al: The development of fluid/structure interaction model for flawed fluid containment boundaries with application to gas transmission and distribution piping, Computers & Structures, 1991, 38 (5/6).
5. Maxey W A, Podlasek R J, Eiber R J et al: Observations on shear fracture propagation behavior, British Gas/IGE ed. Crack Propagation in Pipelines, Newcastle Upon Tyne, 1974.

(收稿日期: 2003-08-05)

编辑: 刘春阳

欢迎订阅

《油 气 储 运》

作 者 介 绍

- 欧阳忠滨 在读研究生, 1980年生, 2001年毕业于石油大学(山东)油气储运专业, 获学士学位, 现在石油大学(北京)油气储运专业攻读硕士学位, 中国石油管道分公司管道科技研究中心进站研究生, 从事油气管道仿真软件方面的研究。
- 帅 健 教授, 博士生导师, 1963年生, 1982年毕业于武汉化工学院化机专业, 现在石油大学(北京)从事工程力学、油气储运系统安全工程的科研与教学工作。
- 潘红良 博士、教授, 1964年生, 1995年博士毕业于华东理工大学化工机械专业, 现在华东理工大学从事教学和科研工作, 研究方向为机械设计及理论。
- 黄 强 工程师, 1971年生, 1995年毕业于西南石油学院油气储运专业, 现在新疆时代石油股份有限公司油气工艺所从事设计工作。
- 安家荣 副教授, 1963年生, 1987年毕业于石油大学石油储运专业, 获硕士学位。现在石油大学(山东)储运工程系从事油气管输技术和油气集输方面的教学和科研工作。
- 李红克 在读博士生, 1974年生, 现为北京航空航天大学机械学院材料加工工程在读博士生。主要从事天然气管道延性断裂裂纹扩展和止裂控制研究。
- 苗 青 见本刊2004年第7期作者介绍。
- 陈国群 助理工程师, 1976年生, 2000年毕业于石油大学(山东)热能工程专业, 获学士学位, 2003年获石油大学(北京)油气储运专业工学硕士学位, 现在中国石油管道分公司管道科技研究中心工作。
- 赵富贵 工程师, 1952年出生, 1988年毕业于经济管理函授联合大学企业管理专业, 现在中国石化集团公司管道储运公司工程处从事工程管理工作。
- 汪春付 见本刊2004年第3期作者介绍。
- 曹振明 工程师, 1964年生, 1985年毕业于南京化工学院石油储运专业, 现在中石化扬子石油化工股份有限公司储运厂从事储运管理工作。
- 唐林华 工程师, 1975年生, 1999年毕业于西南石油学院油气储运专业, 现在中石化西南局川西采输处工作。
- 曾多礼 高级工程师, 1956年生, 1988年毕业于青海大学内燃机专业(自修), 1996~1997年在中国人民解放军后勤工程学院进修油料储运专业。现任中国人民解放军62217部队副总工程师, 本刊通讯员。
- 朱 梅 注册造价工程师, 1970年生, 1992年毕业于天津理工学院管理信息专业, 现在中国石油天然气管道工程有限公司技术经济室从事长输管道工程的投资估算工作。
- 黄维秋 副教授, 1965年生, 1988年毕业于石油大学(山东)石油储运专业, 1991年毕业于石油大学(北京)石油储运工程专业, 获硕士学位, 现在江苏工业学院油气储运工程教研室工作, 并在攻读南京理工大学应用化学专业博士学位。
- 孔繁荣 工程师, 1971年生, 1997年毕业于石油大学(北京)石油及天然气储运专业, 获硕士学位, 现在中国石化工程建设公司储运室从事工程设计工作。
- 霍敬愿 实验师, 1967年生, 1993年毕业于南开大学电子学与信息系统专业, 现任河北工业大学分院现代教育中心主任。
- 张毅平 助理讲师, 1978年生, 2000年毕业于中国人民解放军后勤工程学院油料储运专业, 现在北京军区油库工程质量监督站从事油库工程质量监督工作。
- 韩春宇 助理工程师, 1973年生, 2000年毕业于山东大学计算机及应用专业(函授), 现在中石化管道储运分公司潍坊输油处从事输油调度工作。

OIL & GAS STORAGE AND TRANSPORTATION (MONTHLY)

Vol. 23 No. 8 (Total No. 188) Aug. 25, 2004

CONTENTS AND ABSTRACTS

°OVERVIEW°

OUYANG Zhongbin, Wu Changchun et al: Simulation Technology and its Application for Oil Pipeline, *OGST*, 2004, 23 (8) 1~5.

With the ever growing application of pipeline simulation technology, the introduction of simulation software is made by many companies. Basic theory of pipeline simulation software, which mainly consists of mathematical model and numerical solution, is systematically explained in this paper. Modern pipeline simulation technology and its development trend are also introduced. This paper lists some of international commercial software widely used at present. The proposals are put forward for developing oil pipeline software by self-research way.

Subject Headings: oil pipeline, simulation software, mathematical model, numerical solution, application

°DESIGN & CALCULATION°

SHUAI Jian, ZHANG Hong et al: Numerical Simulation of Crack Propagation in Gas Transmission Pipeline, *OGST*, 2004, 23 (8) 5~8.

As an important criterion of arrest control of gas pipeline, drive force of a crack must be smaller than the fracture toughness of pipe material. In this case numerical simulation of dynamic propagation of a crack is vital. A finite element model about crack propagation is established. The pipe is discreted with elastic-plastic, large deformation and quadrilateral element. Gas pressure in tip of crack is simplified as an exponent decay model. Crack growth is simulated by node force release method, in which node constrain is set free in turn according crack propagation speed. Crack drive force is expressed by such fracture parameters as energy release rate and crack tip opening angle (CTOA). An illustrative example is given. Variation of crack drive force with pressure in pipe is analyzed. The model presented can be as an analytical tool for arrest design of gas pipeline.

Subject Headings: gas pipeline, crack propagation, arrest, node force release, finite element, analysis, calculation

PAN Hongliang: Finite Element Analysis on the Heat Transfer Characteristics of Heating Tracer with Heat-Transfer Cement, *OGST*, 2004, 23 (8) 9~11.

By Finite Element Method Analysis of heat transfer characteristics of heating tracer with heat transfer cement, it is concluded that heating tracer with heat transfer cement is not only in excellent heat transfer rate, but also in low energy lose rate.

Subject Headings: FEM, heating tracer, insulation, heat transfer cement, analysis

HUANG Qiang, WAN Jie et al: Calculation and Change of Heat Transfer Coefficient in Pipeline Commission-