

文章编号: 1000-5870(2004)03-0129-07

综述

# 输气管道裂纹动态扩展及 止裂技术研究进展

帅 健<sup>1</sup>, 张 宏<sup>1</sup>, 王永岗<sup>2</sup>, 戴诗亮<sup>2</sup>

(1. 石油大学机电工程学院, 北京 102249; 2. 清华大学工程力学系, 北京 100084)

**摘要:**对输气管道裂纹动态扩展和止裂技术的研究工作进行了综合论述。讨论了输气管道裂纹动态扩展的止裂判据及输气管道止裂韧性的确定方法。将输气管道裂纹动态扩展中的流体-结构-断裂相互作用问题的力学模型归纳为一维梁模型、圆柱壳模型和有限元模型3种,介绍了有限元模型建立的原理和研究方法。研究结果表明,对于动态延性断裂的止裂,除了预测止裂韧性值,还应该预测裂纹扩展长度,以控制裂纹扩展造成的危害;对于高韧性钢管应用传统的V型缺口夏比冲击实验(CVN)和落锤撕裂实验(DWTT)方法预测会产生与断裂无关的显著能量散失,因而须改进现有的方法或发展替代性的管道止裂韧性实验方法;确定裂纹尖端张开角是一种有发展前途的方法;改进现有有限元模拟方法的途径之一是采用适应裂纹扩展情况的重新划分网格技术,而不是采用固定网格的方法。

**关键词:**输气管道; 裂纹扩展; 止裂技术; 动态断裂; 断裂力学

中图分类号: TE 88 文献标识码: A

在输气管道上发生裂纹快速扩展的原因是由于管壁缺陷、运输过程中形成的刻痕、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。在北美的钢制天然气管道上曾发生过裂纹扩展达十几公里的事例,国内也有管道的气压试验中发生裂纹扩展的事例<sup>[1]</sup>。天然气管道的裂纹快速扩展,可视为动态断裂力学的经典问题。动态断裂力学理论是工程结构止裂控制的理论基础,为工程应用提供了重要的概念和分析方法<sup>[2-4]</sup>。按照动态断裂力学的观点,结构断裂过程是一种裂纹起裂→稳态扩展→失稳→止裂的过程,因而形成了两种控制策略,即起裂控制与止裂控制。起裂控制是以控制裂纹不产生失稳扩展为目的,它允许裂纹缓慢而有限度地扩展。而止裂控制则承认裂纹发生失稳控制的可能,但要求在严重损坏结构之前,出现的裂纹快速扩展能被抑制住,因而能防止结构大范围破坏,尽量避免事故发生造成的后果,是起裂控制的重要补充,成为“结构安全的第二道防线”<sup>[5]</sup>。高压输气管道的止裂设计在我国的东西气东输工程中受到了重视<sup>[6,7]</sup>。笔者从输气管道的止裂判据、输气管道止裂韧性的确定方法、裂纹动态扩展的理论分析模型和简化的气体压力模型4个方面进行综述,为今后开展输气管道裂纹动态

扩展的理论与工程应用研究提供参考。

## 1 输气管道的止裂判据

止裂判据是控制管道裂纹扩展的理论依据,按照动态断裂力学的基本理论,裂纹动态扩展的止裂判据有能量判据和速度判据两种。

### 1.1 能量判据

Griffiths提出的能量释放率判据可以推广到动态断裂力学问题中,即在裂纹扩展过程中,由于物体内部能量的释放所产生的驱动力导致了裂纹增长,同时,物体也存在着阻止形成新的裂纹的阻力。这就是断裂问题分析中的能量平衡理论:裂纹增长时,物体中能量的变化和阻止裂纹增长的阻力是平衡的。能量平衡说明了结构物贡献给裂纹传播的驱动力与来自材料抵抗断裂的抗力之间的一对矛盾运动。当管道中最大裂纹驱动力等于管材的断裂韧性时,存在足够的能量使管道发生长程扩展;相反,当材料的断裂韧性大于裂纹驱动力时,即使出现裂纹的快速扩展,也会很快止裂。

驱动力是外力作用在物体上的功、动能、应变能3个部分对单位面积的裂纹扩展的净变化,被称为动态能量释放率。利用动态因素重新分析在静态断裂力学中建立的某些描述裂纹尖端力学特性的量,

收稿日期: 2003-08-07

基金项目: 中国石油天然气集团公司中青年科技创新基金资助项目(2001CX-35)

作者简介: 帅健(1963—),男(汉族),湖北黄梅人,教授,博士,博士生导师,从事工程力学和油气储运安全工程方面的研究。

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

例如,在大范围屈服情形下使用的J积分,在动态情形下的路径无关性不能严格成立时,其应用范围受到限制。描述裂纹动态快速扩展的力学参数有运动裂尖的渐近场、动态应力强度因子、动态围路积分以及动态能量释放率<sup>[3,4]</sup>。常用动态断裂韧性、动态J积分的临界值、裂纹尖端张开角的临界值等度量材料抵抗动态断裂的阻力,它们取决于裂纹的扩展速度,也与温度有关。工程上常直接应用从冲击试验机获得的夏比冲击功和落锤吸收能量。

## 1.2 速度判据

止裂的速度判据表明<sup>[8,9]</sup>,裂纹在管道中是止裂还是持续地快速扩展,取决于裂纹在管道中扩展的速度以及管内介质在管道破裂时的减压波速度。如果管道内介质的减压波速度大于裂纹扩展速度,裂纹尖端的应力迅速减小,从而使裂纹扩展的速度大大降低,乃至止裂。反之,如果管道内介质的减压波速度小于裂纹扩展速度,则裂纹尖端处的应力保持断裂产生时的高应力,使裂纹得以持续地高速扩展。

描述止裂的两种判据是统一的,当减压波在扩展裂纹尖端的前面时,裂纹尖端已处于经过减压的低压区,裂纹扩展失去了驱动力或驱动力大大减小,裂纹扩展不长便可得到止裂;反之,当减压波处于扩展裂纹尖端的后面时,裂纹扩展的驱动力始终大于材料对裂纹扩展的阻力时,裂纹将持续扩展。

## 2 输气管道止裂韧性的确定方法

输气管道断裂破坏的形式分为动态脆性断裂和动态延性断裂<sup>[9]</sup>。脆性断裂的断口平直,塑性区小,断口特征以解理断裂为主,断裂的驱动力来自管壁金属中的弹性应变能。动态延性断裂的特征是失效部位的宏观塑性变形较大,断口有明显的撕裂和剪切特征。典型延性断裂止裂时,裂纹通常由轴向向45°方向倾斜,然后迅速停止,断裂的驱动力一方面来自管壁金属中的弹性应变能,另一方面来自管内高压气体的膨胀作用,给已开裂、翻开管壁提供能量。为了防止脆性断裂事故发生,要求管材的韧-脆转变温度必须低于管线的环境温度。动态延性断裂则可通过改变管道的设计(如降低设计压力)和提高管材的韧性来控制,而实际上提高管材断裂韧性是控制动态延性断裂的一种合理途径。因此,正确地确定管材止裂韧性数值,是天然气管道设计中的关键步骤之一。为保证安全,输气管道的止裂设计必须建立在全尺寸止裂爆破实验的基础上。但全

尺寸止裂爆破实验的代价高昂,实验结果的针对性也很强,因此需要采取替代措施,给管材的止裂韧性定义一个明确的、可通过小试件实验测定的定量化的指标。

### 2.1 全尺寸爆破实验

预测管道动态断裂止裂韧性数值的经验或半经验公式,由全尺寸止裂爆破实验结果得到,并需要由全尺寸实验来验证。全尺寸爆破实验一般设有一根有预制裂纹的低韧性钢管在管段中部作为起裂管,两侧焊接钢管的韧性沿裂纹扩展方向递增。裂纹从起裂管向两侧扩展,停止扩展部位的钢管韧性就是设定运行条件下的管线止裂所需的韧性。同时,全尺寸爆破实验记录的管道开裂过程中的裂纹扩展速度、裂纹开裂后气体的压力变化等数据,也为理论分析提供了资料。目前已知的实验数据来源于意大利CSM(Centro Sviluppo Materiali)、加拿大-美国联盟管道和日本高强度输送管专业委员会组织的钢制管道实验<sup>[10-13]</sup>。

决定新设计的输气管道是否需要全尺寸爆破实验的基本原则是:若该管道的设计参数未超出国际上业已经过全尺寸止裂爆破实验验证的数据范围,就可以利用经过验证的预测模型和修正系数来确定管道所需的止裂韧性,反之,则须进行全尺寸爆破实验。根据这一原则,国内学者建议西气东输管道设计可采用美国 Battelle 研究所的 TCM(Two Curves Model)双曲线预测模型预测所需的止裂韧性值,并以 Leis 修正系数法进行修正,无须进行全尺寸止裂爆破实验<sup>[6,7]</sup>。

有一些数据表明<sup>[9]</sup>,延性断裂扩展速度为90~360 m/s,天然气的减压波速度为380~440 m/s,因此,根据止裂的速度判据,延性断裂总是能止裂,但止裂前可能有一定长度的裂纹扩展。高韧性钢管的全尺寸实验也表明<sup>[12,13]</sup>,在韧性远低于止裂韧性的管道中,出现了明显的裂纹减速与止裂的现象。由此可以认为只要管段足够长,可以令裂纹在低韧性段止裂。因此,除了临界止裂韧性以外,还可以用裂纹的扩展长度来描述管道的止裂能力。这样,一方面可以控制裂纹扩展,使其减小危害,另一方面可以使规定的管道的止裂韧性值有所降低,从而降低管材的制造成本。

### 2.2 小尺寸试件实验

#### 2.2.1 V型缺口夏比冲击实验

V型缺口夏比冲击实验(CVN)是一种传统的评价材料断裂韧性的实验方法,它通过摆锤式冲击

实验机测量含 V 形缺口的小型试件在冲击破坏过程中的耗散功,即用夏比冲击功来评价材料的断裂韧性。该项实验简单易行,经常被用来测量金属材料的断裂韧性。

早期基于 CVN 的止裂韧性预测模式是 Battelle 研究所的 Maxey 等提出的 TCM 双曲线预测模型<sup>[14]</sup>,在这个方法中,将气体的减压和断裂的传播看成两个无关的过程,由此可确定两组曲线:一组曲线表征不同韧性水平下的断裂速度,是内压或环向应力的函数;一组曲线与气体减压波速有关,它也是环向应力或管道的内压函数。根据管道裂纹动态扩展与止裂的速度判据,如果断裂速度曲线和压力波波速曲线不相交,则在任何条件下减压波速都大于断裂速度,裂纹将发生止裂。如果两曲线相交或相切,则最少有一点所对应的压力波速和断裂速度是相等的,这时管道将发生持续的裂纹扩展。采用全尺寸实验结果进行校正,TCM 双曲线预测模型发展成便于实际应用的经验公式<sup>[15]</sup>,同时,国内外在双曲线模型的基础上给出了各自的经验公式<sup>[16]</sup>,这些公式都是指数型关系式,不同的关系式表明钢管的承压情况和规格尺寸对止裂 CVN 的影响程度不同。尽管 TCM 模型的应用非常广泛,但对于高强度、高韧性管材,其误差较大。为此提出了 Leis 修正系数<sup>[17]</sup>。但这种修正仅是一定范围内根据真实实验结果的拟合,未从根本上解决 TCM 方法在描述高韧性钢时出现的偏差。这是因为预测得到的 CVN 能量是试样在断裂过程中的总能量,其中除裂纹扩展能量外,还包括了使裂纹萌生的能量、使试样受冲击部位塑性变形的能量以及使试样运动的能量。对于高韧性材料,后三者所占的比例加大,出现了与断裂无关的显著能量散失,使得 CVN 测量值与裂纹扩展能量不再呈线性关系。

夏比冲击实验的缺点是摆锤的冲击速度远远低于实际裂纹的扩展速度,同时试件偏薄,使得测到的 CVN 能量不能严格反映裂纹扩展过程中受到的材料韧性的影响。

### 2.2.2 落锤撕裂实验

落锤撕裂实验(DWTT)早期主要用于根据断口形貌确定铁素体钢的韧-脆转变温度,后来也用于评价材料的断裂韧性<sup>[18]</sup>,通过建立 DWTT 冲击能量与延性断裂止裂的关系来研究新的止裂判据<sup>[19,20]</sup>。加拿大-美国联盟管道天然气输送管线的技术条件已列入了这一指标<sup>[21,22]</sup>。

DWTT 实验的锤击速度也小于全尺寸实验裂

纹的扩展速度,但与 CVN 相比,DWTT 实验的锤击速度更高,更接近于真实状态,而且 DWTT 采用全厚度试样,因而完全剪切撕裂破坏可以像全尺寸断裂行为那样得到充分发展,因此 DWTT 实验成为测量裂纹扩展时有效能量的更好方法。同时 DWTT 试样比 CVN 试样宽,因此,可采用预开裂试件和双 V 形槽试件及其他方法消除起裂功<sup>[23]</sup>。然而,DWTT 方法相对于 CVN 方法并没有从本质上改变 CVN 的预测结果<sup>[24]</sup>。

### 2.2.3 裂纹尖端张开角的测定

裂纹尖端张开角(CTOA)是一个断裂力学参量,在裂纹稳态扩展阶段,CTOA 达到临界值而保持恒定不变。对于钢制管道,用 CTOA 表征其断裂韧性可能得到最为近似的材料断裂特征<sup>[25,26]</sup>,因而被认为可以替代夏比冲击韧性,是一具有发展前途的止裂研究方向,其部分研究成果已应用于工程实际<sup>[27,28]</sup>。

测定 CTOA 的常用方法是双试样法,取具有不同缺口长度(断裂韧带)的试样,用 CVN 或 DWTT 冲击实验,由裂纹扩展时测量到的能量推断裂纹张开角。广泛的双参数测试证明裂纹扩展能量与试件的缺口长度呈线性关系<sup>[29,30]</sup>,说明裂纹尖端张开角可以作为材料止裂性能指标。

在小尺寸试样冲击实验中测得的 CTOA 临界值,可直接应用到全尺寸管道的断裂研究中,基于 CTOA 的止裂判据表示为

$$\begin{cases} C_{Tmax} \geq C_{Tc}, & \text{裂纹扩展;} \\ C_{Tmax} < C_{Tc}, & \text{裂纹止裂.} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $C_{Tmax}$ 为由管道的几何构形和载荷条件确定的裂纹尖端张开角最大稳态值; $C_{Tc}$ 为材料的临界断裂韧性。

式(1)可以作为与能量判据等价的公式来评价压力管道裂纹的扩展和止裂。

## 3 输气管道裂纹动态扩展的理论分析

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。说明与管道裂纹动态扩展事件有关的力学行为应包括<sup>[31]</sup>:①气体减压导致裂纹尖端及尖端后面的压力分布载荷发生变化——流体动力学问题;②开裂管壁的变形——结构动力学问题;③管道裂纹的快速扩展——断裂动力学问题。这3个方面的作用是一个复杂的耦合过程,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与这一现

象都有直接的关系。

天然气管道裂纹快速扩展问题的模型有 3 种:

①一维梁模型; ②圆柱壳模型; ③有限元数值模型。这 3 种模型在 20 世纪 70 年代至 20 世纪 90 年代天然气管道快速扩展和止裂的研究过程中起到了指导性作用。

### 3.1 输气管道裂纹稳态扩展的一维梁模型

Kanninen 等首次将壳体(管道)变形、气体动力学和断裂力学相互依赖的复杂分析过程简化成一个仅由轴向坐标即能确定的一维问题<sup>[32,33]</sup>, 这个方法与双悬臂梁试件的不稳定裂纹扩展的动态分析类似<sup>[34]</sup>。Kanninen 做了 4 个基本假设: ①径向变形为主; ②忽略压力沿圆周的变化; ③裂纹张开位移等于在裂纹区任何截面处径向位移沿圆周的积分; ④距裂纹尖端后面  $l$  处形成塑性屈服铰。从 Flügge 圆柱壳方程入手<sup>[35]</sup>, 可将对称载荷作用下的圆柱壳的变形模拟为弹性基础梁。从其研究结果可以看出:

①极限裂纹扩展速度为  $v_t = \frac{3}{4} c_0 \left( \frac{h}{R} \right)^{1/2}$  (其中,  $v_t$  为裂纹扩展速度,  $c_0$  为声波在材料中的传播速度,  $h$  和  $R$  分别为管道的壁厚和半径)。②对应一定几何尺寸和操作工况下的管道, 存在一个最大的裂纹驱动力, 它可用来估计止裂韧性的最小值。

### 3.2 输气管道裂纹快速扩展的圆柱壳模型

Emery 在圆柱壳模型<sup>[36]</sup> 中采用 Piola-Kirchhoff 应力和 Lagrange 应变, 并考虑横向剪切, 得到小应变、大变形下的壳体运动方程; 采用 Mises 屈服准则以及应变增量理论计算塑性变形中的应力场; 而流体压力模型是仅沿轴向位置随时间变化的一维流场模型, 并假设所有流场性质在截面上是定常的, 通过考虑外溢流体从管道中移去轴向力矩和质量, 但不引起压力沿截面的变化来处理裂纹处的泄漏, 因此忽略射流引起的反作用力, 由动量守恒以及能量方程来描述流体的运动。

Emery 将圆柱壳模型(翻边模型)与一维梁模型得到的空间压力分布作对比后指出, 翻边的效果在于延缓压力的空间衰减, 并且使翻边裂纹易于受到增大的压力加载。两种压力分布吻合, 对于空气和蒸汽, 可以使用 Kanninen 和 Poynton<sup>[37]</sup> 的压力衰减简化模型来避免复杂的流体动力学计算; 对于水-蒸汽混合管道, Kanninen 的模型能否给出满意的结果尚待进一步的研究, 这依赖于两相流的分析。

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, 如轴向裂纹和周向裂

纹<sup>[38]</sup>、大变形和小变形、弹性分析和塑性分析等。

### 3.3 输气管道裂纹扩展的有限元数值模型

对输气管道裂纹动态扩展进行模拟的有限元法, 是建立在一般固体力学有限元法的基础上的, 但必须考虑以下问题。

(1) 裂纹扩展的方法。此方法普遍采用网格不变的结点释放技术<sup>[39]</sup>, 裂尖运动由不连续的突进而进行模拟。具体做法是: 在时间增量内, 裂尖沿裂纹方向从单元的一个结点改变到下一个结点。由于裂纹长度的突然增加和位移约束的突然解除, 会引起有限元求解中严重的高频振荡现象。为了解决这一问题, 提出了改进方法<sup>[40]</sup>。

(2) 气体与管道的相互作用。完善的分析是考虑气体与管道的完全耦合作用, 对裂纹开裂后的气体流场采用全数值模拟, 其中的一个重要问题就是解决管壁对气体影响的能力, 由于标准的欧拉网格不能适当地模拟曲线边界和奇异形状的管壁的限制, 在利用一些流体力学软件分析本问题时遇到了困难, 需做近似处理。由于全数值模拟的难度, 很多情况下采用的是简化的气体压力衰减模式。

(3) 裂纹驱动力。裂纹驱动力是指在裂尖区单位面积上裂纹扩展引起的能量变化。将通过计算获得的裂纹驱动力与管材的断裂韧性对比是确定管道是否止裂的关键, 而在有限元模拟中, 裂纹驱动力可以近似地以结点力做功的形式来计算<sup>[31]</sup>, 也可以用经典的能量平衡理论结合数值计算得到<sup>[41]</sup>。

基于有限元方法开发的专门管道裂纹动态扩展的模拟软件有美国西南研究院开发的 PFRAC<sup>[31,42,43]</sup> 和意大利 CSM 开发的 PICPRO<sup>[44]</sup>。PFRAC 程序包含了两大模块的交互作用: 用于流体力学分析的 FLOW3D 和用于壳体断裂分析的 WHAMSE。FLOW3D 用于管道快速裂纹扩展分析的一个重大改进是通过固定欧拉有限差分网格使得边界可随时间移动, 或者说, 允许随裂纹的扩展而移动。WHAMSE 可进行三维、弹塑性、大变形壳体结构的动力学计算, 它利用结点力释放的方法来计算裂纹驱动力, 并应用外力做功和内部能量的平衡来校验计算结果的数值稳定性。PFRAC 程序一直处于不断改进之中<sup>[45-49]</sup>。PICPRO 的模拟程序<sup>[44]</sup> 包括一个弹塑性、大位移壳单元和一个中心差分格式的显式积分求解程序, 钢材的塑性流动服从分段硬化的经典 Mises-Reuss 方程。为了考虑裂纹尖端的塑性变形, 在 PICPRO 节点释放时, 引入了一个由材料塑性决定的粘性区域<sup>[50]</sup>, 粘性区域的长度可由

DWTT 实验确定,实验揭示典型粘性区域的长度约为 10~20 mm。此外,该程序在管道周围设置了一些可以相互滑动的楔形块,以模拟覆盖土层对管道开裂的作用。该程序经过全尺寸管道实验验证,表明能够正确估计裂纹驱动力。

此外,考虑到对于高韧性钢管,塑性功耗散引起的动能衰减不能忽略,提出了基于韧性减速机理的迭代减速模式<sup>[51]</sup>,即根据瞬态裂纹扩展条件下的整体能量平衡方程,在有限元方法中构造了求解瞬时速度的迭代算法。

与前两种简化分析模型相比,采用有限元数值方法时,不必做出许多强制性假设,即可建立能更好地描述管道裂纹动态扩展过程中流体-结构-断裂的相互作用模型,这代表了输气管道裂纹扩展与止裂研究的一个发展方向。但现有的有限元方法普遍采用固定网格,在裂尖处未布置特殊的裂尖单元,不能反映裂尖的奇异性,且裂纹扩展量受节点间距的影响,限制了数值模拟的准确性。如果在裂纹尖端布置反映裂尖奇异性的裂尖单元,则必须根据裂尖的快速移动重新划分网格,这方面的研究将依赖于断裂力学数值模拟方法的进一步发展<sup>[52]</sup>。

## 4 气体压力模型

管道裂纹动态扩展中的流固耦合由于管壁变形的不规则曲面,使模拟计算的工作量巨大。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,目的是确定裂纹开裂时,尖端处的气体压力和尖端以后的压力。在许多情况下,壳体动态断裂的模拟可以用等效的移动边界条件来代替气体动力学计算<sup>[53]</sup>。

### 4.1 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方程。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<sup>[54]</sup>:

$$p_1 = \begin{cases} p_0, & v \geq c_0; \\ p_0 \left[ \frac{2}{\gamma+1} + \frac{(\gamma-1)v}{(\gamma+1)c_0} \right]^{2\gamma/(\gamma-1)}, & v < c_0. \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $p_1$  为减压后的压力;  $p_0$  为开裂前的管内压力;  $\gamma$  为气体的单位比热;  $v$  为裂纹扩展速度;  $c_0$  为声音在气体中直线传播的速度。

### 4.2 裂纹尖端后面气体压力的衰减模式

当天然气管道开裂后,气体从未开裂管道处流

向开裂区,由于周围环境变化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。液体压力立即降为零,而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,从而导致管壁的开裂。简化的依据是全尺寸管道爆破实验得到的实际管道开裂压力分布曲线。根据 CSM 全尺寸钢制管道爆破实验结果,拟合出气体作用于裂纹尖端后面的管壁上轴向和环向压力的近似解析分布,它们是裂纹位置和气体初始线压力的函数,如抛物线衰减函数,指数衰减的 Fourier 级数等。Kanninen 通过一维梁模型,拟合出压力分布的指数衰减函数简化表达式<sup>[32-33]</sup>,此外,最简单易行的衰减模式是线性衰减函数。在有限元模拟方法中,利用线性和指数衰减函数两种模式得到的结果吻合良好<sup>[48]</sup>。

## 5 结束语

前人在确定输气管道的止裂韧性值(包括管材止裂韧性测试实验方法)方面做了大量工作,提出了基于经验的输气管道止裂设计方法。在输气管道裂纹动态扩展的力学行为的分析方面,也提出了一些实用性强的简化分析模型和数值模拟方法,为输气管道的止裂设计提供了理论基础,但这些方法还不能揭示输气管道裂纹动态扩展的复杂现象,输气管道裂纹动态扩展与止裂的研究还处于不完善的阶段。为了适应输气管道的大口径、高压力的发展趋势,应该进一步深化对气体-管道-断裂相互作用的理论分析,以期能揭示管道裂纹动态扩展的力学行为,为止裂设计提供更多的理论根据和分析方法。目前,对输气管道止裂设计的研究应注重 3 个问题:(1) 对高韧性钢管,传统的 CVN 和 DWTT 方法会产生与断裂无关的显著能量散失,需要改进现有的止裂韧性预测方法或发展新的管道止裂韧性实验方法,确定裂纹尖端张开角仍是一个有发展前途的方法;(2) 对于动态延性断裂的止裂,除了预测止裂韧性值,还应该预测裂纹扩展长度,控制裂纹扩展造成的危害;(3) 数值模拟方法仍然是描述管道与气体相互作用力学行为的有效方法,改进现有有限元模拟方法的途径之一是采用适应裂尖运动情况的重新划分网格技术。

### 参考文献:

[1] 潘家华.长输管道试压断裂分析[J].石油工程建设,

- 1992, 18(5): 4—7.
- [2] 范天佑. 断裂动力学的进展[J]. 力学进展, 1986, 16(1): 1—13.
- [3] 范天佑. 断裂动力学引论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [4] 刘再华, 解德, 王元汉, 李连常. 工程断裂动力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
- [5] KANNINEN M F, POPELAR C H. Advanced Fracture Mechanics[M]. New York: Oxford University Press, 1985.
- [6] 黄志潜. 西气东输管道延性断裂的止裂控制[J]. 焊管, 2001, 24(2): 1—10.
- [7] 潘家华. 输气管道的止裂研究[J]. 焊管, 2001, 24(4): 1—9.
- [8] 潘家华, 郭光臣, 高锡祺. 油罐及管道强度设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [9] 潘家华. 油气管道断裂力学分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [10] SUGIE E, *et al.* 输气管线中剪切裂纹扩展的研究[J]. 韩勇, 译. 石油专用管, 1991(4): 162—173.
- [11] SUGIE E, *et al.* 控轧钢 X70 输送管的抗剪切断裂能力的全尺寸爆破实验研究[J]. 韩新利, 译. 石油专用管, 1991(4): 174—187.
- [12] EIBER B, CARSON L, LEIS B. Fracture control for the alliance pipeline[R]. Proceedings of ASME IPC, ASME, 2000.
- [13] HIROYUKI M, TAKAHIRO K, TOYOAKIS, *et al.* Prediction for crack propagation and arrest of shear fracture in ultra-high pressure natural gas pipeline[R]. Proceedings of the Special Party of ASME, 2000.
- [14] MAXEY W A. Fracture initiation, propagation and arrest[R]. 5<sup>th</sup> Symposium on Line Pipe Research, American Gas Association, 1974.
- [15] ROTHWELL A B. The application of the Battelle “short formula” to the determination of ductile fracture arrest toughness in gas pipeline[R]. Proceedings of ASME IPC Calgary, 2000.
- [16] POKUTYLOWICZ N, LUTON M J, PETKOVIC R A, *et al.* Simulation of dynamic ductile failure in pipelines[R]. Proceedings of ASME IPC, 2000.
- [17] LEIS B, EIBER R, CARSON L, *et al.* Relationship between apparent (total) Charpy vee-notch toughness and corresponding dynamic crack-propagation resistance [R]. Proc Int Pipeline Conf Calgary, 1998.
- [18] Recommended practice for conducting drop-weight tear tests on line pipe [S]. API RP 5L3, American Petroleum Institute, 1996.
- [19] POYNTON W A, SHANNON R W E, *et al.* The design and application of shear fracture propagation studies [J]. ASME J Eng Mat Tech, 1974, 96: 323—329.
- [20] WILKOWSKI G M, MAXEY W A, EIBER R J. Use of the DWTT energy for predicting ductile fracture behavior in controlled steel line pipes[J]. Canada Materials Quarterly, 1980, 19: 59—77.
- [21] COLLINS L E, KOSTIC M, *et al.* High strength linepipe: current and future production[R]. Proceedings of ASME IPC, 2000.
- [22] AFAGANIS J A, MITHCHELL J R, *et al.* Design, development and confirmation of a high toughness gas line pipe for Alliance pipeline at Camrose pipe company [R]. Proceedings of ASME IPC, 2000.
- [23] PUSSEGODA N, MALIK L, *et al.* An interim approach to determine dynamic ductile fracture resistance of modern high toughness pipeline steels[R]. Proceedings of ASME IPC, 2000.
- [24] LEIS B N. Characterizing dynamic crack-resistance of pipelines using laboratory-scale practice[R]. Proceedings of ASME IPC, 2000.
- [25] WANG. An engineering fracture parameter for non-J controlled crack growth[J]. Fatigue Frac Engng Mater Struct, 1994, 17: 469—477.
- [26] MARTINELLI A, VENZIS. Tearing modulus J-integral CTOA and crack profile shape obtained from the load-displacement curve only[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 53(2): 263—277.
- [27] PUSSEGODA L N, VERBIT S, *et al.* Review of CTOA as a measure of ductile fracture toughness[R]. Proceedings of ASME IPC, 2000.
- [28] MANNUCCI G, BUZZICHELLI G, *et al.* Ductile fracture arrest assessment in a gas transmission pipeline using CTOA [R]. Proceedings of ASME IPC, 2000.
- [29] PRIEST A H, HOLMES B. A multi-test piece approach to the fracture characterization of linepipe steels [J]. Int J Fract, 1981, 17(3): 277—299.
- [30] HOLMES B, PRIEST A H, WALKER F E. Prediction of linepipe fracture behavior from laboratory tests [J]. Int J Pres Ves Piping, 1983, 12: 1—27.
- [31] O’DONOGHUE P E, GREEN S T, *et al.* The development of fluid/structure interaction model for flawed fluid containment boundaries with application to gas transmission and distribution piping[J]. Computers & Structures, 1991, 38(5/6): 501—513.
- [32] KANNINEN M F, SAMPATH S G, POPELAR C. Steady-state crack propagation in pressurized pipelines without backfill[J]. ASME J Pres Ves Tech, 1976, 98: 56—66.

- [ 33 ] POPELAR C, ROSENFELD A R, KANNINEN M F. Steady-state crack propagation in pressurized pipelines[ J]. ASME J Pres Ves Tech, 1977, 99: 112—121.
- [ 34 ] KANNINEN M F, POPELAR C, GEHLEN P C. Dynamic analysis of crack propagation and arrest in the double-cantilever-beam specimen[ R]. ASTM STP 627, 1977.
- [ 35 ] FLÜGGE W. Stresses in Shells[ M]. Berlin: Springer-Verlag, 1962.
- [ 36 ] EMERY A F, LOVE W J, KOBAYASHI A S. Dynamic finite difference analysis of an axially cracked pressurized pipe undergoing large deformations[ R]. ASTM STP 627, 1977.
- [ 37 ] POYNTON W A. A theoretical analysis of shear fracture propagation in backfilled gas pipelines[ A]. GAS/IEE, ed. Crack Propagation in Pipelines[ C]. New castle Upon Tyne, British Gas/IGE, 1974, 14.
- [ 38 ] EMERY A F, KOBAYASHI A S, LOVE W J. An analysis of the dynamic propagation of elastic-plastic circumferential crack in pressurized pipes[ R]. ASTM STP 711, 1980.
- [ 39 ] KEERGSTRA P N R. A transient finite element crack propagation model for nuclear pressure vessel steels[ J]. Journal of International Nuclear Engineers, 1976, 17(4): 89—96.
- [ 40 ] YAWAGA G, SAKAI Y, AUDO Y. Analysis of a rapidly propagating crack using finite elements[ R]. ASTM STP 627, 1977.
- [ 41 ] 庄茁, O' DONOGHUE P E. 能量平衡结合有限元数值计算分析天然气管道裂纹稳定扩展问题[ J]. 工程力学, 1997, 14(2): 56—67.
- [ 42 ] O' DONOGHUE P E, GREEN S T, *et al.* A fluid/structure interaction model for dynamic crack propagation in a pressurized pipeline[ R]. ASME PVP 160, 1989.
- [ 43 ] O' DONOGHUE P E, KANNINEN M F, LEUNG C P, *et al.* The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines[ J]. Int J Pres Ves Piping, 1997, 70: 11—25.
- [ 44 ] BERARDO G, SALVINI P, *et al.* On longitudinal propagation of a ductile fracture in a buried gas pipeline; numerical and experimental analysis[ R]. Proceedings of ASME IPC, 2000.
- [ 45 ] KANNINEN M F, O' DONOGHUE P E. Research challenge arising from current and potential applications of dynamic fracture mechanics to the integrity of engineering structures[ J]. International Journal of Solids Structures, 1995, 32(17/18): 2423—2445.
- [ 46 ] ZHUANG Zhuo, O' DONOGHUE P E. Analysis model to simulate the cracked pipe buried in soil[ J]. Acta Mechanica Sinica, 1998, 14(2): 147—156.
- [ 47 ] 庄茁, O' DONOGHUE P E. 天然气管道止裂构件的分析和设计[ J]. 固体力学学报, 1998, 19(3): 213—227.
- [ 48 ] ZHUANG Zhuo, GUO Yong-jin. Analysis of dynamic mechanics in gas pipelines[ J]. Eng Fract Mech, 1999, 64: 271—289.
- [ 49 ] ZHUANG Zhuo, O' DONOGHUE P E. Recent development of analysis methodology for rapid crack propagation and arrest in gas pipelines[ J]. Int J Fract, 2000, 101(3): 269—290.
- [ 50 ] CHASTEL Y, MAGNY F, BAY F. An elastic viscoplastic finite element model for multimaterials[ J]. Engineering Computation, 1998, 15(1): 139—149.
- [ 51 ] 由小川. 超高压钢制输气管道裂纹韧性减速机理的研究[ D]. 北京: 清华大学工程力学系, 2002.
- [ 52 ] BOUCHARD P O, BAY F, *et al.* Crack propagation modeling using an advanced remeshing technique[ J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 189: 723—742.
- [ 53 ] FREUND L B, PARKS D M, RRCE J R. Running ductile fracture in a pressurized line pipe[ A]. WHEELER J B, *et al.* Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590[ C]. Philadelphia: ASTM, 1976, 243—262.
- [ 54 ] MAXEY W A, PODLASEK R J, EIBER R J, *et al.* Observations on shear fracture propagation behavior[ A]. British Gas/IGE, ed. Crack Propagation in Pipelines[ C]. New castle Upon Tyne, 1974.

(责任编辑 沈玉英)

*tion and Control Engineering in the University of Petroleum, China, Dongying 257061/ Shiyou Daxue Xuebao, 2004, 28 (3): 119 ~ 121*

**Abstract:** On the basis of autoregressive moving average (ARMA) innovation model and white noise estimators, a Wiener filter with multiple observation delay based on descriptor system, namely estimator, was presented using modern time-series analysis method. The estimator can handle the problems of prediction, filtering and smoothing of a system in a unified framework. It has the recursiveness of ARMA and asymptotic stability. The algorithm can avoid solving the complicated Riccati equations and Diophantine equations. If the system can be observed, it can handle the stable or instable system, non-minimum phase system, singular or nonsingular system for state transformation matrix in a unified framework. A simulation example verified the validity of the algorithm.

**Key words:** modern time-series analysis method; multiple observation delay system; Wiener state estimator; autoregressive moving average innovation model

**Form invariance of holonomic systems with unilateral constraints in phase space/ CHEN Pei-sheng and FANG Jian-hui. College of Physics Science and Technology in the University of Petroleum, China, Dongying 257061/ Shiyou Daxue Xuebao, 2004, 28(3): 122 ~ 124**

**Abstract:** The form invariance of holonomic systems with unilateral constraints in phase space was studied. The definition and the criterion for the form invariance of holonomic systems with unilateral constraints in phase space were given. The structure equation and the conservation law for the form invariance were obtained. The example demonstrated the validity of the researched result.

**Key words:** holonomic systems with unilateral constraints; phase space; form invariance; structure equation; conservation law

**Homotopy continuation technology for solving boundary value problems using solution methods for initial value problems/ RUAN Zong-li, GAO Guang-xuan and LI Wei-guo. College of Mathematics and Computation Science in the University of Petroleum, China, Dongying 257061/ Shiyou Daxue Xuebao, 2004, 28 (3): 125 ~ 128**

**Abstract:** Some methods for solving the initial value problems can be used to solve the boundary value problems of nonlinear differential equation. The numerical continuation technologies were discussed. Especially, the emphasis was laid on predictor-corrector (PC) technology and its application to solve the boundary value problems. Several strategies including QR decomposition, generalized inverse of matrix, Broyden rank-1 correction were given. Some programs of Matlab were computed with PC technology. The numerical continuation results proved the effectiveness of the methodology.

**Key words:** nonlinear differential equations; initial value problem method; boundary value problem; numerical continuation method; homotopy mapping; predictor-corrector technology

**Research advance of dynamic crack propagation and arrest techniques for gas transmission pipeline/ SHUAI Jian, ZHANG Hong, WANG Yong-gang and DAI Shi-liang. College of Mechanical and Electronic Engineering in the University of Petroleum, China, Beijing 102249/ Shiyou Daxue Xuebao, 2004, 28(3): 129 ~ 135**

**Abstract:** Researches on dynamic fracture propagation and arrest techniques for gas pipeline were reviewed. The arrest criteria of dynamic crack propagation and the prediction methods for arrest toughness of gas pipeline were demonstrated. The advance of prediction method for arrest toughness of pipe steel was described. The mechanics models for coupled fluid-structure-fracture problem in analysis of dynamic crack propagation on gas pipeline were reduced to three kinds of one-dimensional beam model, cylindrical shell model and finite element model. The principles and the study methods for the finite element model were introduced. The current research should be focused on as follows: ① For the dynamic ductile fracture, the crack propagation length should be predicted, so as to control the damage of pipeline. ② For the high-toughness steel pipe, it is necessary to improve the traditional CVN and DWTT test methods or to develop the alternative to them, in order to avoid the irrelevant energy dissipation. The method for determining the open angle in crack tip is promising. ③ The present finite element method for predicting dynamic fracture propagation should be improved. The new-cancelled structure technology can be applied.

**Key words:** gas pipeline; crack propagation; arrest technique; dynamic fracture; fracture mechanics