

# 钛合金天然气输送管道裂纹动态扩展流固耦合模拟

装备2102班：南同庆 指导教师：齐文娇 论文类型：毕业论文

**摘要：**钛合金具有优良耐腐蚀性和力学特性，且价格逐年降低，故其可作为高腐蚀性气田输送管道的替代材料，但传统天然气输送管道止裂判据不适用于钛合金管道。基于此，本文梳理钛合金输送管道的止裂判据，提出了以临界应力强度因子 $K_{IC}$ 作为钛合金管道的止裂韧性指标；基于单轴拉伸试验结果，借助有限元技术反向标定了TA2与TA10两种钛合金材料的GTN损伤模型参数；基于ABAQUS/Explicit软件平台，构建管道结构变形和流体减压的双向流固耦合数值模型，以GTN损伤模型描述管道裂纹扩展行为，借助插值查表法编制基于GERG-2008状态方程的用户自定义子程序用于描述气体减压行为；数值分析关键参数对裂纹扩展行为的影响，初始压力升高和管道壁厚减小均会加剧裂纹的扩展；最后基于数值结果，建立了基于 $K_{IC}$ 的止裂判据，止裂韧性修正系数取1.90-2.15。本研究结果为钛合金在高腐蚀性气田输送领域的安全工程设计提供理论依据。

**关键词：**GTN损伤模型；双向流固耦合；止裂判据

## 1 研究背景

管线钢为油气田集输管道的常见选项，然而酸性气田在油气混输的工况条件下， $CO_2$ 、 $H_2S$ 和 $Cl^-$ 等介质会引起较为严重的腐蚀行为。钛及其合金具有高强度

和优良耐腐蚀能等特性，可作为我国酸性气田管输天然气的材料，适应高腐蚀环境下的管输需求。

采用钛合金进行天然气管道输送时，也必须满足止裂控制的要求。全尺寸爆破试验可以准确表征管道裂纹动态扩展规律，判断输气管道在发生断裂时能否自行止裂。但其存在试验成本高、准备周期长、危险性大及不确定因素多等问题，借助数值模拟方法，可以准确复现全尺寸爆破试验，建立管道结构变形和流体减压的流固耦合模型，将为钛合金天然气管道裂纹动态扩展提供更为全面的分析。

## 2 基于 $K_{IC}$ 的钛合金天然气输送管道止裂判据

止裂的核心在于输送管道的裂纹阻力超过裂纹持续扩展的驱动力，止裂韧性是衡量其抵御裂纹扩展能力的重要力学指标。平面应力强度因子 $K_I$ 、 $J$ 积分和CVN值均能表征钛合金材料的韧性指标。大量研究结果表明，钛合金的冲击韧性行为与延展性或断裂韧性没有很好的相关性；钛合金材料具有明显的应变速率敏感性；因此，直接使用夏比能量CVN值表征管材的止裂韧性对钛合金并不适用。

本文选取临界应力强度因子 $K_{IC}$ 作为止裂韧性指标，可建立基于 $K_{IC}$ 的钛合金天然

气输送管道止裂判据。选取  $\frac{\pi K_c^2}{8c\sigma}$  为横坐标， $M_T \frac{\sigma_c}{\sigma}$  为纵坐标，绘制二者的关系图，如图2.1所示。

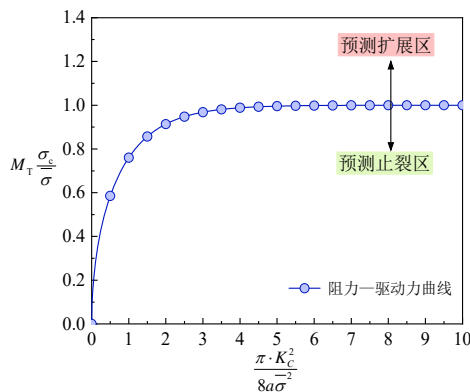


图2.1 钛合金输气管道阻力—驱动力关系图

3 管道材料本构损伤模型

3.1 材料拉伸试验

本文选取的材料是工程应用中常见的TA2和TA10，参照GB/T 228.1—2021有关要求进行单轴拉伸试验，并完成数据处理，得到全过程真实应力应变曲线及真实应力-塑性应变曲线。

3.2 GTN损伤模型参数的探讨与标定

由GTN损伤模型公式可知，未知量一共有9个： $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 、 $f_0$ 、 $f_c$ 、 $f_F$ 、 $f_N$ 、 $\varepsilon_N$  和  $S_N$ 。根据Tvergaard和Chu等人研究， $q_1 = 1.5$ ， $q_2 = 1$ ， $q_3 = q_1^2 = 2.25$ 时效果比较好， $\varepsilon_N = 0.3$  和  $S_N = 0.1$ 对大多数材料是适用的；因此主要研究其余四个参数对模拟结果的影响。

针对钛合金TA2和TA10（其力学性能参数如表3.1所示）使用ABAQUS软件进行单轴拉伸试验的有限元仿真模拟，经反复试验标定得到TA2和TA10两种材料的GTN损伤模型参数。如下表3.2。标定得到试验与仿真的载荷位移曲线结果对比图，如图3.1。

表3.1 试件材料基本性能参数

材料	密度 $\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\mu$	规定塑性延伸 强度R <sub>P0.2</sub> /MPa	抗拉强度 /MPa
TA2	4510	105	0.3	275	487
TA10	4500	107	0.3	348	492

表3.2 TA2和TA10材料的GTN损伤模型参数

材料/参数	$f_0$	$f_N$	$f_c$	$f_F$
TA2	0.001	0.03	0.15	0.25
TA10	0.001	0.045	0.15	0.25

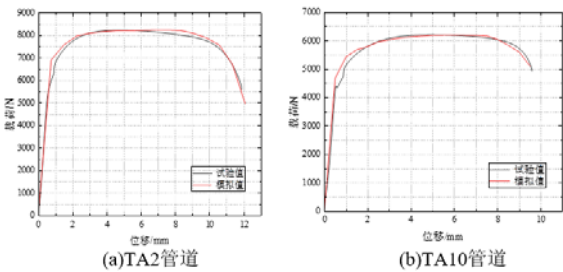


图3.1 两种试件的载荷位移曲线对比图

4 管道裂纹动态扩展数值模拟的实现

4.1 钛合金天然气输送管道有限元模型

在ABAQUS软件中，建立了如下流固耦合模型，用于实现钛合金天然气管道的裂纹动态扩展流固耦合模拟研究。

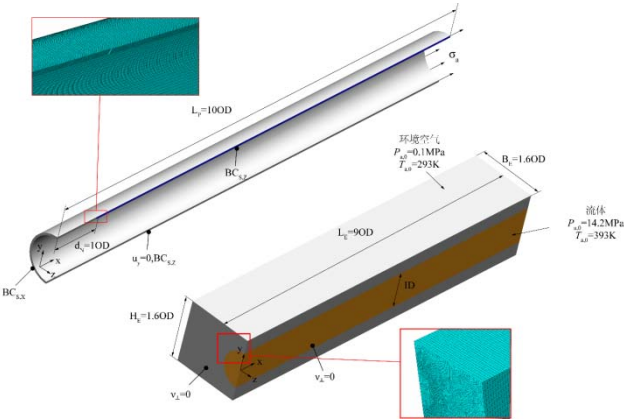


图4.1 CEL框架下用于模拟管道裂纹动态扩展的FSI（流固耦合）模型

管内介质的减压模型方面，基于插值查表法，使用Fortran语言编写用户自定义子程序VUEOS描述管内流体天然气的减压行为。其中，采用GERG-2008状态方程，使用MATLAB软件调用REFPROP输出子程序调用所需天然气的热力学数据。

在管道材料方面，预制了1个OD长度的裂纹。裂纹在此路径上扩展，进行网格加密，定义GTN损伤模型材料属性，采用单元删除法模拟裂纹扩展。并通过CEL方法实现管道大规模变形的流固耦合模拟。

为探究不同影响因素对管道裂纹扩展的影响，着重分析了不同初始压力和不同管道壁厚条件下的裂纹扩展速度曲线。计算结果如下。

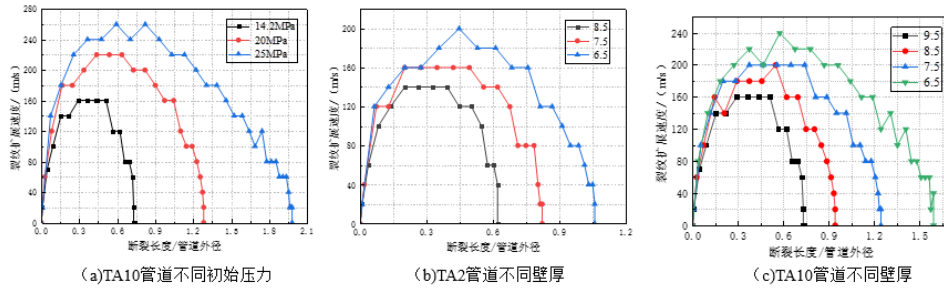


图4.2 模拟得到管道的裂纹扩展速度曲线图

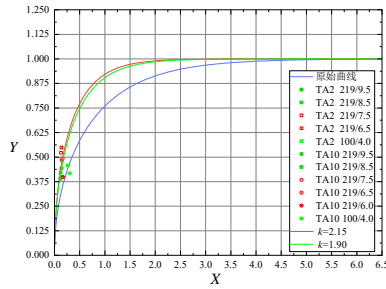
初始压力的升高和管道壁厚的减小都会加剧管道裂纹扩展，不仅管道裂纹扩展初始阶段的速率不断变大，而且裂纹稳定扩展阶段的速度也随之增大。

#### 4.2 止裂判据的建立

根据相关公式可建立基于 $K_c$ 的钛合金天然气输送管道止裂判据式如下：

$$1000 \frac{K_c \cdot E}{A_c \cdot \sigma_f^2 \cdot \sqrt{Rt}} = \frac{24}{\pi} \ln \sec \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{3.33 \sigma_c}{\sigma} \right) \quad (4.1)$$

由本文建立的钛合金天然气输送管道有限元模型，可得到钛合金管道裂纹扩展的止裂判据数据点，绘制止裂判据如图4.3。


 图4.3 基于临界应力强度因子 $K_c$ 修正的钛合金天然气输送管道止裂判据

分析得到，修正系数可以取1.90~2.15，有效区分裂纹扩展数据点和止裂数据点。

### 5 结论

- (1) 选取GTN损伤模型来描述管道的变形和断裂，得到标定参数。
- (2) 根据建立的钛合金天然气输送管道的流固耦合模型，完成了对特定工况下的裂纹动态扩展数值模拟分析，着重考虑了不同初始压力和不同壁厚对管道裂纹动态扩展的影响。
- (3) 建立了钛合金天然气输送管道的止裂判据，重点分析裂纹扩展驱动力与裂纹扩展阻力的作用机制，选取平面应力强度因子 $K_c$ 作为止裂韧性指标，建立钛合金管道的阻力-驱动力止裂判据，并基于数值仿真结果，通过引入止裂韧性修正系数对其进行修正，修正系数范围为1.90~2.15。