

文章编号: 1000-4750(2008)07-0201-05

# X70 管道钢裂纹尖端张开角的试验研究

\*帅 健<sup>1,2</sup>, 陈福来<sup>2</sup>, 刘梅玲<sup>2</sup>, 冯耀荣<sup>3</sup>, 庄传晶<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)机电工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249;  
3. 中国石油天然气集团公司管材研究所, 陕西, 西安 710065)

**摘 要:** 高压富气输送管道要求发展管道钢的裂纹尖端张开角(CTOA)的测试方法。采用准静态的撕裂过程和长裂纹扩展长度试件, 进行了 X70 管道钢的裂纹扩展试验, 用摄像机跟踪拍摄裂纹扩展全过程, 从获得的照片上直接测量出裂纹扩展全过程的 CTOA 值, 分析了裂纹扩展中的断裂力学行为。试验结果表明: 试件的韧带厚度越小, 越容易获得稳定的扩展过程, 且稳态裂纹扩展的 CTOA 值随试件韧带厚度的增加而增大, 太厚的试件不易得到稳态扩展过程。韧带厚度为 4mm、8mm 试件的稳态的裂纹扩展阶段分别为 7.6°、11.3°, 裂纹扩展长度与韧带厚度比在 4—25、4—10 之间。

**关键词:** 裂纹尖端张开角; 输气管道; 裂纹扩展; 试验; X70 管道钢

**中图分类号:** U173; TU318 **文献标识码:** A

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON CRACK TIP OPENING ANGLE OF X70 PIPELINE STEEL

\*SHUAI Jian<sup>1,2</sup>, CHEN Fu-lai<sup>2</sup>, LIU Mei-ling<sup>2</sup>, FENG Yao-rong<sup>3</sup>, ZHUANG Chuan-jing<sup>3</sup>

(1. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
2. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
3. Tubular Goods Research Center, China National Petroleum Corporation, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** High pressure, rich gas transmission pipeline requires the development of measuring method of Crack Tip Opening Angle (CTOA). Using quasi-static tear propagation and specimen of long crack propagation length, the crack propagation experiment of X70 pipeline steel was conducted. The whole progress of propagating crack was recorded by camera, the CTOA were directly tracked from the photographs, the behavior of fracture mechanics of crack propagation was analysed. The test results show that the thinner the ligament thickness is, the more easily the steady-state crack propagation process of thin ligament is obtained, and the CTOA of steady-state crack propagation process increases as the ligament thickness increases. CTOA of steady-state crack propagation process of 4mm and 8mm ligament thicknesses are 7.6° and 11.3°, respectively, and the ratio of crack propagation length and the ligament thickness are 4—25 and 4—10, respectively.

**Key words:** CTOA; gas pipeline; crack propagation; test; X70 pipeline steel

收稿日期: 2006-12-16; 修改日期: 2007-05-22

基金项目: 中国石油天然气集团公司石油管力学和环境行为重点实验室预研及探索性项目“高压富气输送管道断裂控制技术研究”

作者简介: \*帅 健(1963—), 男, 湖北黄梅人, 教授, 博士, 博导, 从事油气储运安全及工程力学等领域的教学与科研

(E-mail: shuaijian@vip.sina.com);

陈福来(1979—), 男, 山东单县人, 博士生, 从事输气管道断裂控制技术研究(E-mail: chenfulai\_26@163.com);

刘梅玲(1979—), 女, 河北秦皇岛人, 硕士生, 从事管道钢 CTOA 测试方法研究(E-mail: liumeiling1999@hotmail.com);

冯耀荣(1960—), 男, 陕西凤翔人, 教授级高工, 博士, 总工, 从事石油管力学行为、失效分析预测预防等研究

(E-mail: fengyr@tgrc.org);

庄传晶(1971—), 男, 湖北潜江人, 工程师, 硕士, 从事油气输送管及管线方面的研究(E-mail: zhuangcj@tgrc.org).

随着高强度管材和高压富气输送的出现,输气管道对止裂韧性的要求已经超出了现有的延性止裂预测模型标准,因此需要建立一个新的基于断裂力学原理的延性断裂止裂韧性测定标准,以满足高强度、高韧性天然气管线止裂韧性预测的需要,裂纹尖端张开角 CTOA 被认为是一种具有发展前途的研究方向<sup>[1-7]</sup>。

在裂纹稳态扩展阶段,CTOA 达到临界值而保持恒定不变,称作材料断裂韧性 $(CTOA)_c$ 。 $(CTOA)_c$ 可通过小试样试验测得<sup>[8]</sup>,并直接应用到全尺寸管道的断裂上。在描述断裂性能方面, $(CTOA)_c$ 被认为是衡量延性断裂扩展抗力的度量标准之一,它可以有效的代替夏比冲击能,以解决在高韧性管线上依赖夏比冲击能而出现的重大偏差。

$(CTOA)_c$ 的试验测试方法有动态测量和准静态测量两种。 $(CTOA)_c$ 的动态测量方法大多采用双试样法。该方法利用 CVN 或 DWTT 的冲击能量来推断裂纹尖端张开角。在对低韧性钢的测试中采用这种双试样方法测量临界裂纹尖端张开角 $(CTOA)_c$ 是较为合理的,但对于高韧性管材采用这种测试方法存在一些问题。准静态的测试方法是为了适应高韧

性管材而发展起来的,这种方法常采用 CT 试件或改进的双悬臂梁试件。采用这种改进的双悬臂梁试件进行的准静态测试,对 X80 和 X100 管道钢的试验,得到了裂纹的稳态和非稳态扩展过程,并可获得较准确的 $(CTOA)_c$ 值<sup>[9-11]</sup>。类似的试验也用于航空用铝合金材料中。

为了进一步研究高强度、高韧性管道钢的动态裂纹尖端张开角的测试方法,本文进行了准静态条件下的 X70 管道钢的撕裂试验,获得了裂纹尖端张开角的试验数据,并分析了管道钢在撕裂过程中的力学行为。

## 1 X70 钢的 CTOA 测量试验方案

试件材料为我国西气东输管道的 X70 钢,其规定的屈服极限为 590MPa,强度极限为 660MPa。管道钢的化学成分如表 1 所示。试件从管道上直接切割,试件尺寸如图 1,韧带厚度为 4mm、8mm 和 10mm 的试件的初始裂纹长度分别为 36mm、80mm 和 96mm。试件尺寸保证了裂纹在准动态扩展条件下有足够的扩展长度。

表 1 X70 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of X70 steel

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Nb	Ti	V	Ni	Fe
分数	0.052	0.21	1.56	0.01	0.001	0.01	0.01	0.23	0.057	0.02	0.055	0.25	其余

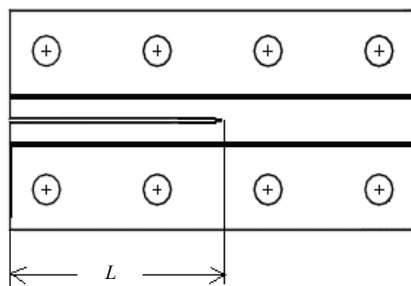


图 1 试件的几何尺寸示意图

Fig.1 Physical dimension of the specimen

试验在 MTS 810-25 型液压伺服试验机上进行。为了模拟准动态过程,位移控制速度为 0.1mm/s。从控制设备的电脑中可以直接输出试验过程中的轴向载荷和位移数据。使用数码摄像机跟踪拍摄试件撕裂的全过程。为了避免试验试件表面的反光影响数码摄像机的拍摄效果,将试件测试表面涂成不反光的深蓝色。且在试件韧带平面上划分出 5mm×1mm 的网格线,根据摄像机拍摄到的裂纹扩展过程中所走过的网格情况,来准确确定裂纹的扩展长度

和裂纹尖端张开角度。

## 2 试验现象及结果分析

对试件韧带厚度分别为 4mm、8mm 和 10mm 的 3 组共 9 个试件进行了测试。

### 2.1 不同韧带厚度试件的载荷-位移曲线

图 2 为韧带厚 4mm 试件的载荷-位移曲线,三次试验的三条载荷-位移曲线并不完全重合,可能是试验过程中误差所造成。

图 3 为韧带厚 8mm 试件的载荷-位移曲线,第一次试验的曲线与其它两次的曲线不同,该次试验的裂纹扩展长度较短,未出现裂纹稳态扩展。

韧带厚 10mm 试件的三次试验的载荷-位移曲线如图 4 所示。第一次、第二次试验在一开始经历了疲劳载荷,试图预制疲劳裂纹,但未在试件的表面观察到裂纹起裂,从图 4 中可以看出,第一次、第二次试验的载荷曲线较明显低于第三次试验,说明经过疲劳预制裂纹后裂纹起裂所需的载荷较小。

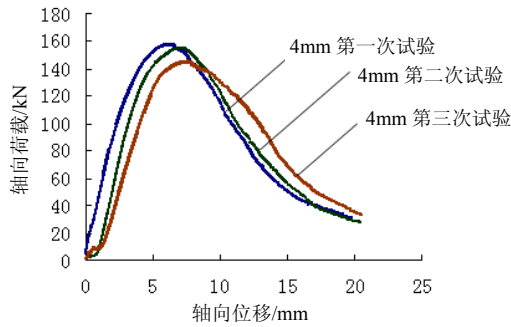


图 2 4mm 试件的载荷-位移曲线

Fig.2 Load-displacement curve of the 4mm specimen

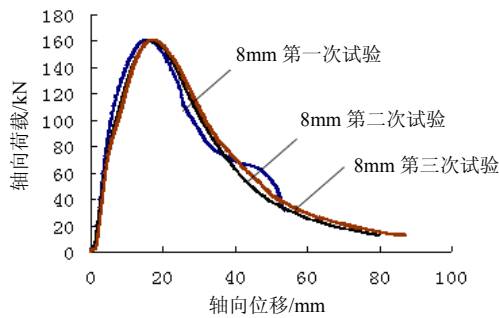


图 3 8mm 试件的载荷-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curve of the 8mm specimen

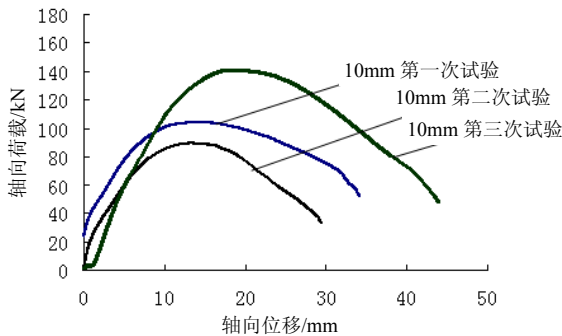


图 4 10mm 试件的载荷-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curve of the 10mm specimen

## 2.2 试验现象分析

韧带厚度 4mm 试件的三次试验都获得了较为稳定的裂纹扩展过程，这是由于试件厚度越薄，对试件的撕裂越近似于平面应力状态。图 5 是 4mm 厚度试件裂纹尖端在扩展中的现象。试件在纯拉伸载荷下开始起裂，随着裂纹的扩展，出现了倾斜断口，如图 5(a)，试样处于拉伸和剪切力共同作用下稳态扩展。图 5(b)和图 5(c)显示了裂纹扩展过程中裂纹扩展方向的转变，图 5(c)表明扩展过程中的裂纹轮廓并非是一条光滑的直线，而是出现了锯齿状轮廓。由于试件韧带较薄，试验过程中出现了扭转现象。图 5(d)为裂纹扩展到试件末端的照片，由于试件厚度偏薄，出现明显的扭转即失稳。

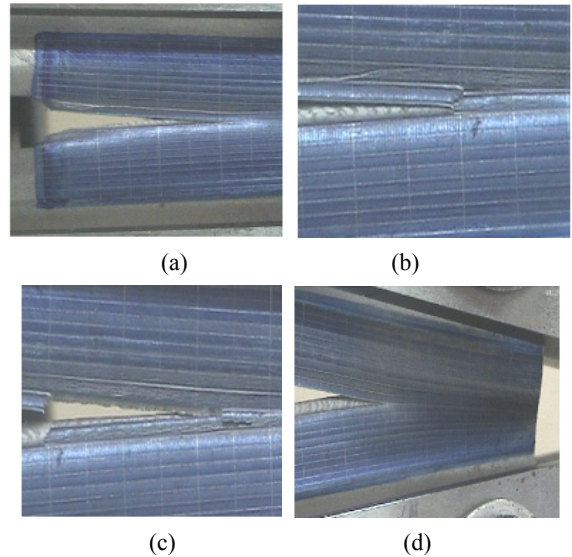


图 5 韧带厚度为 4mm 试件的扩展特点

Fig.5 Propagating characteristics of the 4mm specimen

图 6 是 8mm 试件的裂纹尖端的扩展情形。图 6(a)显示裂纹扩展方向由 $+45^\circ$ — $-45^\circ$  的转变，然后稳态扩展直至止裂如图 6(b)所示。不同于韧带为 4mm 试件，裂纹扩展到试件末端也未出现失稳现象。

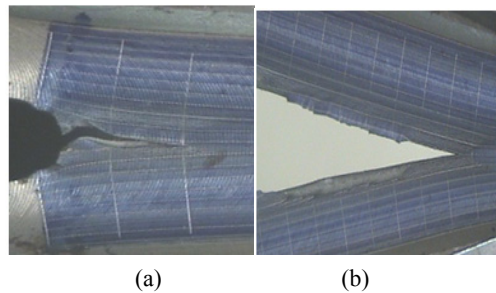


图 6 韧带厚度为 8mm 试件的扩展特点

Fig.6 Propagating characteristic of the 8mm specimen

韧带厚度 10mm 试件的第一次、第二次试验均未出现稳态扩展，如图 7 所示，其原因是未能成功预制裂纹。如图 8(a)所示，两个试件都因为在悬臂端产生塑性变形裂纹停止扩展。

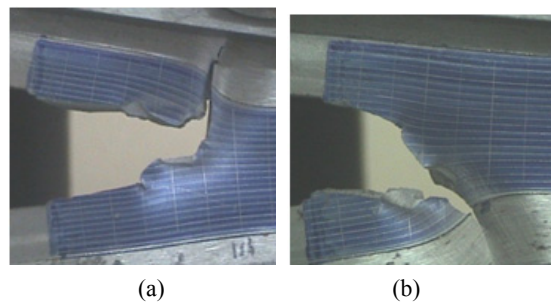


图 7 韧带厚 10mm 试件前两次试验的断裂形貌

Fig.7 Crack shape of the 1st and 2nd test of the 10mm specimen

韧带厚度为 10mm 的试件第三次试验未经历疲劳载荷循环而直接起裂,如图 8(a),平稳扩展一小段距离后,也由于悬臂端出现塑性铰而使裂纹扩展方向严重偏离而终止,如图 8(b)所示。而其余两个试件均未获得成功。

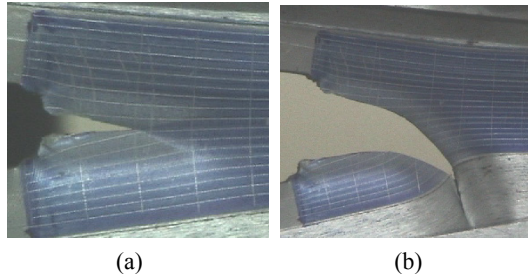


图 8 韧带厚 10mm 试件的第三次试验图像

Fig.8 Images of the 3rd test of the 10mm specimen

由于韧带厚度 10mm 试件未成功是由试件悬臂端出现塑性变形,改变了 10mm 试件的初始裂纹长度尺寸,控制其在悬臂端不产生塑性变形,可以改进试验结果。

### 2.3 CTOA 测量值的分析

4mm 和 8mm 试件都获得了较为稳定的裂纹扩展过程,可以得到裂纹尖端张开角的测量值。而 10mm 试件的裂纹扩展的距离较短,没有获得有价值的裂纹尖端张开角测量值。

#### 2.3.1 韧带厚 4mm 试件的 CTOA 值

图 9 为韧带厚度 4mm 的试件的 CTOA 测量值,可以看出第二次试验和第三次试验的结果比较相近,而第一次试验的结果与其他两次相差较大。主要是第一次试验准备不足:① 摄像机的拍摄位置距试件较远,拍摄到的角度不清晰;② 辅助夹具与试验机的加载中轴线可能未完全对齐,从而影响了裂纹的稳态扩展;③ 试件韧带表面未标记精细网格。从图 9 中可以看出,裂纹起裂阶段 CTOA 值较大,裂纹扩展长度与韧带厚度比值在 4—25 之间,CTOA 值基本恒定为 7.6°,裂纹扩展即将止裂前 CTOA 值又逐渐增大。

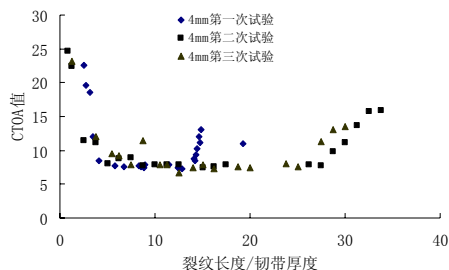


图 9 4mm 试件的 CTOA 测量值

Fig.9 Measured CTOA of the 4mm specimen

#### 2.3.2 韧带厚 8mm 试件的 CTOA 值

图 10 中可以看到裂纹起始时,CTOA 值比较分散,裂纹扩展长度与韧带厚度比值在 4—10 之间,CTOA 值基本恒定为 11.3°,裂纹扩展即将止裂前 CTOA 值又逐渐增大。

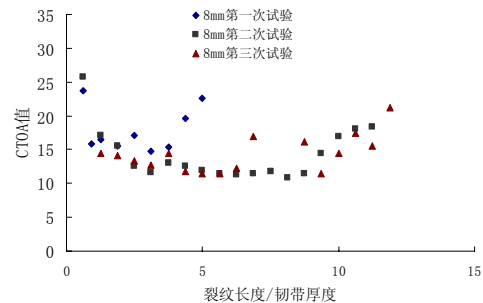


图 10 8mm 试件的 CTOA 测量值

Fig.10 Measured CTOA of the 8mm specimen

韧带厚度为 4mm 和 8mm 试件的 CTOA 值分布规律:裂纹起裂阶段 CTOA 值较大,随后裂纹进入较为平稳的扩展阶段,CTOA 值趋于恒定,止裂前阶段,CTOA 的值又逐渐增大。裂纹起裂阶段 CTOA 值较大,可能是由平面撕裂及裂尖锐化引起的;止裂前阶段 CTOA 值较大,则可能因为裂尖已接近试件边缘。

## 3 结论

(1) 本试验采用了准静态的撕裂过程以及试件有足够的裂纹扩展长度,更接近输气管道上的裂纹动态扩展过程,有利于获得稳定的裂纹扩展。

(2) 韧带厚度为 4mm、8mm 试件的稳态的裂纹扩展阶段分别为:裂纹扩展长度与韧带厚度比值在 4—25、4—10 之间;其稳态扩展 CTOA 值分别为 7.6°、11.3°。

(3) 试件的韧带厚度越小,裂纹尖端越接近于平面应力状态,越容易获得稳定的扩展过程,且稳态裂纹扩展的 CTOA 值随试件韧带厚度的增加而增大。

(4) 厚的试件不易获得稳定的裂纹尖端张开角的原因是容易在试件的悬臂端产生塑性铰而使裂纹改变方向。

(5) 所有获得稳态裂纹扩展的试验,均是从线切割加工的钝形缺口直接起裂,因此,没必要预制疲劳裂纹和加工尖角缺口。

### 参考文献:

[1] 帅健,张宏,王永岗.输气管道裂纹动态扩展及止裂技



- 术研究进展[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(3): 129—135.
- Shuai Jian, Zhang Hong, Wang Yonggang. Research advances in dynamic crack propagation and arrest techniques for gas transmission pipeline [J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2004, 28(3): 129—135. (in Chinese)
- [2] 陈福来, 帅健. 输气管道延性断裂的止裂结构及韧性确定方法[J]. 压力容器, 2006, 23(7): 39—43.
- Chen Fulai, Shuai Jian. Arresting structure and ductile determining methods of ductile fracture for gas transmission pipeline [J]. Pressure Vessel Technology, 2006, 23(7): 39—43. (in Chinese)
- [3] 冯耀荣, 庄苗, 庄传晶. 裂纹嘴张开角及在输气管线止裂预测中的应用[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 99—107.
- Feng Yaorong, Zhuang Zhuo, Zhuang Chuanjing. Crack tip opening angle and its application to crack arrest in gas pipeline [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 99—107. (in Chinese)
- [4] Newman Jr J C, James M A, Zerbett U. A review of the CTOA/CTOD fracture criterion [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(3-4): 371—385.
- [5] 帅健, 张宏, 许葵. 输气管道裂纹动态扩展的数值模拟[J]. 油气储运, 2004, 23(8): 5—8.
- Shuai Jian, Zhang Hong, Xu Kui. Numerical simulation of crack propagation in gas transmission pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2004, 23(8): 5—8. (in Chinese)
- [6] Horsley D J. Background to the use of CTOA for prediction of dynamic ductile fracture arrest in pipelines [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(3-4): 547—552.
- [7] Rudland D L, Wilkowski G M, Feng Z. Experimental investigation of CTOA in pipeline steels [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(3-4): 567—577.
- [8] O'Donoghue P E, Kanninen M F, Leung C P. The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines [J]. Pressure Vessel & Piping, 1997, 70(1): 11—25.
- [9] Shterenlinkht A, Hashemi S H, Howard I C. A specimen for studying the resistance to ductile crack propagation in pipes [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(13-14): 1997—2013.
- [10] Hashemi S H, Howard I C, Yates J R. Experimental study of thickness and fatigue precracking influence on the CTOA toughness values of high grade gas pipeline steel [C]. Proceedings of the IPC 2004 International Pipeline Conference. Calgary: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 2412—2419.
- [11] Hashemi S H, Howard I C, Yates J R. A single specimen CTOA test method for evaluating the crack tip opening angle in gas pipeline steels [C]. Proceedings of the IPC 2004 International Pipeline Conference. Calgary: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 1703—1709.

(上接第 200 页)

- [10] 刘有志. 水工混凝土温控和湿控防裂方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006: 65—66.
- Liu Youzhi. Study on the method of temperature and moisture controlling for crack preventing of hydraulic concrete [D]. Nanjing: Hohai University, 2006: 65—66. (in Chinese)
- [11] Ayman Ababneh, Yunping Xi, Kaspar Willam. Multiscal modeling of the coupled moisture diffusion and drying shrinkage of concrete [C]// Ulm F J, Bazant Z P, Wittmann F H. Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi Brittle Materials, 2001, 3: 159—164.
- [12] Gérard B, Marchand J. Influence of cracking on the diffusion properties of cement based materials, Part I: Influence of continuous cracks on the steady state regime [J]. Cement and Concrete Research, 2000(30): 37—43.