

连续油管材料临界 CTOD 值计算方法研究

冀亚锋¹, 张 宏¹, 毕宗岳^{2,3}, 王晓光¹, 鲜林云^{2,3}

(1.中国石油大学(北京),北京 102249;

2.国家石油天然气管材工程技术研究中心,陕西 宝鸡 721008;

3.宝鸡石油钢管有限责任公司,陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 连续油管在油田作业时微小的裂纹会很快引起管子的断裂,当用无损检测技术确定出微裂纹后,再根据材料的断裂韧性确定裂纹临界尺寸,进而确定含裂纹型缺陷连续油管的寿命。临界裂纹尺寸要通过平面应变状态下的临界 CTOD 试验才能确定,而制造连续油管的材料 CT80 只有薄试样,通过薄试样试验方法和有限元仿真计算方法,结合临界孔洞扩张比断裂准则,得到了一个借助有限元分析计算 CT80 材料临界 CTOD 值的方法。

关键词: 连续油管; 裂纹; 临界 CTOD; 有限元; 临界孔洞扩张比

中图分类号: TG113.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3938(2012)11-0005-04

Research on a New Method for Calculating Critical CTOD Value of Coiled Tubing Material

Ji Yafeng¹, ZHANG Hong¹, BI Zongyue^{2,3}, WANG Xiaoguang¹, XIAN Linyun^{2,3}

(1.China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2.National Petroleum and Gas Tubular Goods Engineering Technology Research Center, Baoji 721008, Shaanxi, China;

3. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., LTD., Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: The micro crack in coiled tubing will lead to fracture soon during normal operations in oilfield. When the micro crack in coiled tubing was determined by the non-destructive testing techniques, coiled tubing life will be calculated by the formula where the Crack Tip Opening Displacement(CTOD)Value is used. Critical crack size can be calculated by the critical CTOD experiment. The experiment requires the specimen must be in a plane strain condition. But the thickness of CT80 is so thin that cannot be in plane strain condition. This paper discusses a method that can be used to calculate the critical CTOD value through the thin specimen testing and finite element simulation for the CT80 grade. The critical macro-parameter of void divergence ratio fracture criterion is used in this paper.

Key words: coiled tubing; crack; critical CTOD; finite element simulation; Critical macro-parameter of void divergence ratio

1 概 述

连续油管作业作为油气工业的新兴技术,目前已开始广泛应用于钻井、酸化、压裂等油气田作业中^[1]。由于连续油管工作条件恶劣,受力复杂,使得连续油管在作业时会引起严重的塑性变形和损伤。连续油管作业实践经验表明,通常在1次或2次起下后就会出现疲劳扩展裂纹,进而很快

引起连续油管的断裂。连续油管作业时应力状态处于塑性区,临界应力强度因子已不再适用,必须使用弹塑性断裂判据。临界 CTOD (crack tip opening displacement)是弹塑性断裂力学中重要的参数,其大小直接反映了裂纹尖端材料抵抗开裂的能力,临界 CTOD 值越大表示材料抗开裂性能越好,反之抗开裂性能越差^[2]。临界 CTOD 值(δ_c)已成为广泛应用的断裂判据,用来计算工程结构已

知尺寸的裂纹失稳扩展并进行安全性分析。因此,必须进行临界 CTOD 试验确定该材料的断裂韧性。

目前国内生产连续油管所用的材料主要为 CT80 钢,进行临界 CTOD 试验时要求试样处于平面应变状态,但由于制造连续油管的钢板所限,CT80 的加工厚度为 5.8 mm,而力学性能与之相近的管线钢 X80 则有 12.5 mm 和 7 mm 的试样。CT80 钢和 X80 钢的力学性能见表 1。现有试样中只有 12.5 mm 的试样能处于国标推荐的平面应变状态,因此需对试验后的试样进行数值模拟,确定一个合适的断裂准则,根据 CT80 薄试样结果计算出 CT80 材质 12.5 mm 厚度下的临界 CTOD 值,从而计算含缺陷连续油管的寿命。

表 1 CT80 钢和 X80 钢力学性能

钢级	弹性模量 E/GPa	屈服极限 $/\text{MPa}$	拉伸极限 $/\text{MPa}$
CT80	220	610	740
X80	230	630	730

2 临界 CTOD 试验

按照 GB/T 21143—2007《金属材料静准态断裂韧性统一试验方法》进行临界 CTOD 值测试。标准要求宽厚比介于 1 和 4 之间,推荐为 2,采用最大载荷特征值方法测定材料的临界 CTOD 值。

根据标准中的最大载荷特征值方法,当试验结束后给出试验的 $P-V$ 曲线,从中找出曲线的最高点,即载荷最大值,计算出对应的塑性位移分量,如图 1 所示,进而求出临界 CTOD 值。

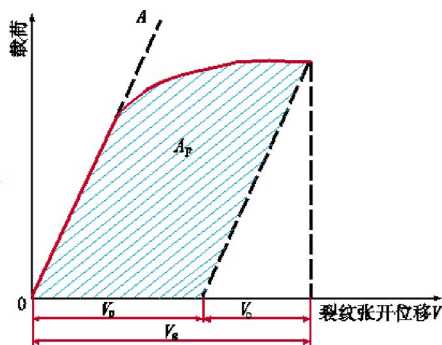


图 1 塑性应变 $P-V$ 曲线

CTOD 值按式(1)计算,三点弯曲试件的几何关系如图 2 所示。

$$\delta = \left[\left(\frac{S}{W} \right) \frac{P}{(BB_N W)^{0.5}} \times f \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\mu^2)}{2\sigma_s E} \right] + \frac{0.4(W-a_0)V_p}{0.6a_0+0.4W+z} \quad (1)$$

式中: δ —裂纹尖端张开位移 (CTOD 值);

P —施加的载荷;

S —三点弯曲试样的跨度;

B —试样厚度;

B_N —试样净厚度;

W —试样宽度;

μ —泊松比;

E —弹性模量;

σ_s —材料屈服强度;

a_0 —原始裂纹长度;

f —三点弯试样的函数;

V_p —裂纹嘴张开位移的塑性分量;

z —刀口厚度。

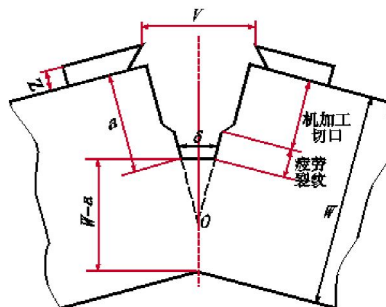


图 2 三点弯曲试件的几何关系

按要求制备长 120 mm、宽 25 mm 的试样,其中 X80 钢试样厚度分别为 12.5 mm 和 7 mm,CT80 钢分别取厚度 5.8 mm 的横向和纵向各一组。每组 3 个试样共计 12 个试样,取样方向和厚度见表 2。两种材质的材料性能参数均由取自同一板材制成的圆棒试样通过拉伸试验获得。

表 2 试样参数

试样编号	材质	取样方向	试件厚度 B/mm
H1	CT80	横向	5.8
Z1	CT80	纵向	5.8
C1	X80		12.5
D21	X80		7

当试样厚度较小时,试样裂尖处于平面应力状态,随着厚度的增加,平面应力状态向平面应变状态过渡,当试样超过一定数值以后,材料将完全处于平面应变状态。CTOD 值随着厚度变化

的关系如图 3 所示。研究发现, 试样完全处于平面应变状态条件下, 当试样达到一定厚度时, 材料的 CTOD 值不再随着试样厚度的变化而变化, 而是表现为一个恒定的常数^[3]。

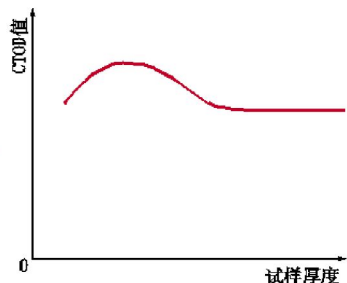


图 3 CTOD 值与试样厚度关系的定性描述

按标准制备带预制裂纹的三点弯曲标准试样, 其中预制裂纹长度为 5 mm。试验前对系统进行标定, 首先使用高频疲劳试验机预制疲劳裂纹, 然后对试件进行加载和卸载, 记录载荷-位移曲线 ($P-V$ 曲线), 二次疲劳后对试样进行发蓝处理, 液氮冷却下打断, 以方便观察预制疲劳裂纹和裂纹扩展长度, 最后断口读数测量 a_0 并进行数据有效性检验。试验过程及试样断后实物照片如图 4 所示。

根据仪器记录的数据绘出各试样的 $P-V$ 曲线, 如图 5 所示。找出各试样的最大载荷及其对应的裂纹张开位移, 利用式(1)计算各试样的 CTOD 值。

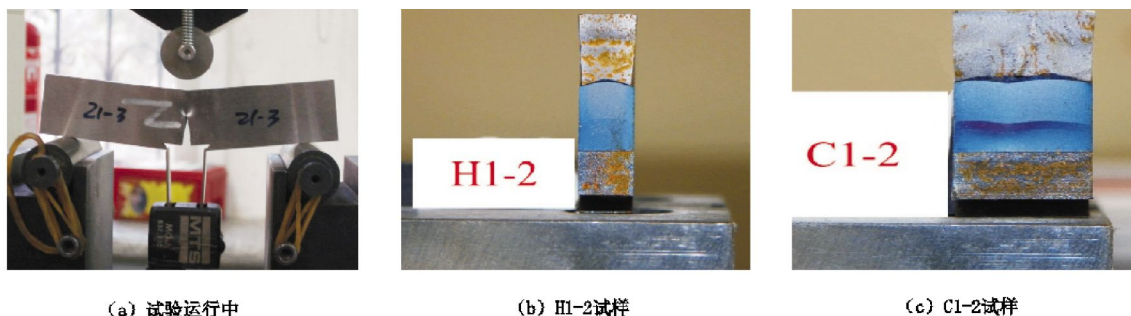


图 4 试验过程及试样断后实物照片

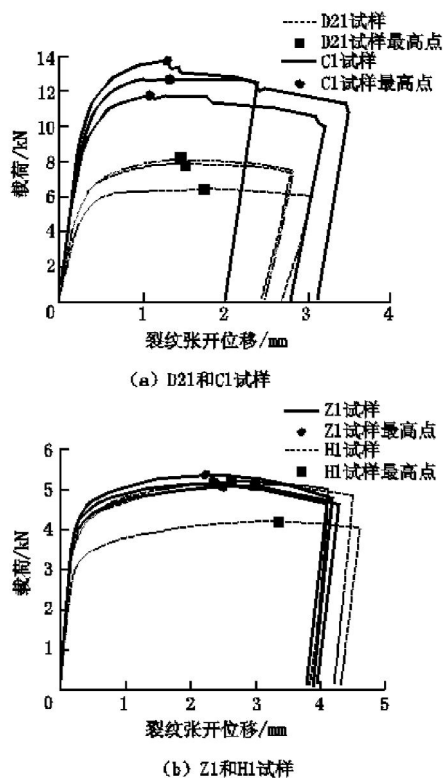


图 5 各试样的 $P-V$ 曲线

由试样的 $P-V$ 曲线计算各试样的临界 CTOD 值, 结果见表 3。

表 3 各试样的临界 CTOD 值

试样编号	材质	试件厚度 B/mm	临界 CTOD 值/ mm	平均值/ mm
H1-1	CT80	5.881	0.5374	0.5884
H1-2		5.893	0.6089	
H1-3		5.883	0.6085	
Z1-1	CT80	5.887	0.4951	0.4547
Z1-2		5.738	0.4084	
Z1-3		5.738	0.4605	
C1-1	X80	12.530	0.1880	0.1809
C1-2		12.548	0.1968	
C1-3		12.525	0.1479	
D21-1	X80	7.027	0.2785	0.2750
D21-2		7.023	0.2586	
D21-3		7.019	0.2877	

从表 3 中可以看出, X80 不同厚度的试样 CTOD 值并不相同, 薄试样的 CTOD 值要更大一些, 这是因为薄试样并不是处于平面应变状态下。虽然 H1 和 Z1 取自同一板材, 但由于取的方向不同, 其 CTOD 值也不相同。

3 计算机仿真计算

在预测含裂纹缺陷连续油管的寿命时, 需要

用到材料的临界 CTOD 值, 但受制造连续油管所用板材的限制而不能测出该材料的临界 CTOD 值。为测算 CT80 的临界 CTOD 值, 需要用计算机仿真的方法, 这就要选择一个合适的断裂准则, 且该准则要适用于当前试件的计算。用该准则首先对已有试样进行仿真, 证明其正确性后方可进行其它试件的仿真计算。

计算所用断裂准则为临界孔洞扩张比断裂准则^[4], 根据塑性力学中的一些常用假设, 该准则将韧性金属材料的宏观断裂准则表示为:

$$V_{CC} = \varepsilon_p \exp\left(\frac{3}{2} \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_m}\right) = \text{const}, \quad (2)$$

式中: V_{CC} —材料韧性断裂特征参数, 不敏感于应力三轴度的材料常数;

ε_p —断裂时等效塑性应变;

σ_{eq} —Mises 等效应力;

σ_m —静水应力。

由表 1 可以看出 CT80 和 X80 的力学性能相近, 可以认为若上述断裂准则成立就可以适用于这两种材料。

计算采用 ABAQUS 软件, 建立模型和划分网格后的模型如图 6 所示, 在试件上切割等于实

际裂纹长度的初始裂纹。试件采用三维 20 节点单元, 在中间含裂纹区域网格划分较密, 压头和支撑端采用刚性单元。在压头施加位移载荷, 并输出压头的反力变化曲线。材料选用各个材料的真实应力-应变曲线。

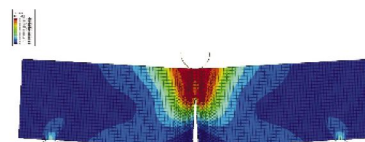
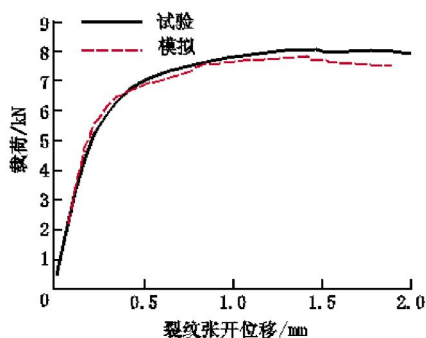


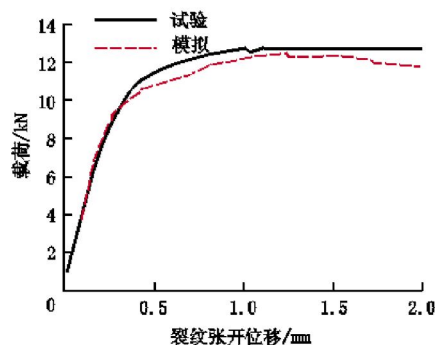
图 6 试样 Mises 应力云图

根据 D21 试样的试验结果, 对该试样进行计算机仿真计算, 使 D21 试件的 $P-V$ 曲线和试验 $P-V$ 曲线相近, 如图 7(a) 所示, 计算试件临界断裂时的临界孔洞扩张比常数 $V_{CC} = 0.593\ 21$ 。同样对 C1 试样进行仿真计算, 仍使试件的仿真 $P-V$ 曲线和试验 $P-V$ 曲线相近, 如图 7(b) 所示, 而这时厚试样临界断裂时的临界孔洞扩张比 $V_{CC} = 0.590\ 33$, 薄试件和厚试件的 V_{CC} 十分接近, 说明临界孔洞扩张比断裂准则在这里是适用的, 这个值与材料厚度无关, 是个材料常数。

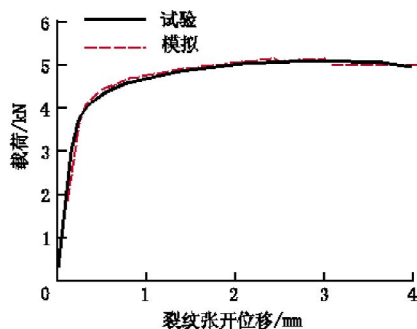
根据这个准则, 对 H1 试件的试验结果用仿真软件计算出试样断裂时的 $V_{CC} = 0.98$, 如图 7(c) 所



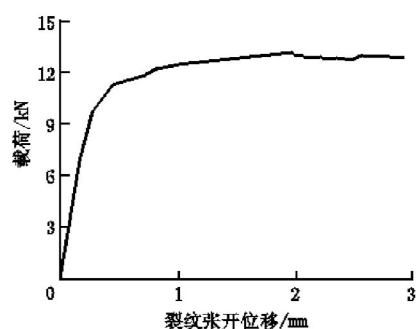
(a) D21 试样试验与仿真曲线



(b) C1 试样试验与仿真曲线



(c) H1 试样试验与仿真曲线



(d) CT80 三点弯曲试样壁厚 12.5 mm 的仿真曲线

图 7 试验与模拟 $P-V$ 曲线对比

(下转第 12 页)