

引文: 崔忠浩, 刘艳贺, 王海涛, 等. X80 管道环焊缝 GTN 损伤模型参数标定及应用[J]. 油气储运, 2024, 43(9): 1022-1030.

CUI Zhonghao, LIU Yanhe, WANG Haitao, et al. Parameter calibration and application of GTN damage model for girth weld in X80 pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(9): 1022-1030.

X80 管道环焊缝 GTN 损伤模型参数标定及应用

崔忠浩^{1,2} 刘艳贺¹ 王海涛¹ 罗艳龙¹ 张新军¹ 李仕力¹ 周少坤¹

1. 中国特种设备检测研究院·国家市场监督管理总局技术创新中心(油气管道与储存设备安全);

2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院

摘要:【目的】数值模拟方法在研究高钢级油气管道的损伤演化行为方面发挥了重要作用。然而,模拟结果的准确性往往受损伤模型参数精确度制约,确定准确的损伤参数既是保证模拟结果准确性的必要条件,也是分析工作的难点所在。【方法】通过材料拉伸试验、数值模拟、响应面法相结合的有限元反向标定法,建立不同孔洞体积分数与反映材料弹塑性变形以及损伤断裂行为的特征参数之间的拟合关系,实现对 X80 管道环焊缝 GTN(Gurson-Tvergaard-Needleman)损伤模型参数的有效标定;利用该参数标定结果对材料的拉伸试验过程进行数值反演,通过比较仿真与试验结果的断口特征及应力-应变曲线完成对模型参数精度的验证;同时,基于上述 GTN 损伤模型对 X80 管道环焊缝的单边缺口拉伸和单边缺口弯曲试验过程进行数值模拟及结果分析,从而完成针对该 GTN 损伤模型的适用性验证。【结果】在参数标定结果精度验证方面,完成参数标定后的仿真呈现出的断口位置以及断裂特征与试验结果相符合,其应力-应变曲线在整个损伤断裂过程中存在良好的一致性,通过对比抗拉应力、抗拉应变、断裂应力及断裂应变 4 个特征点的差值后发现,两者存在的最大误差不超过 10%;在模型适用性验证方面,单边缺口拉伸试样、单边缺口弯曲试样所对应表观韧性值分别为 0.399 3、0.324 2,两者所对应的最终转化率约为 1.23。【结论】参数验证结果证实了所提出 GTN 模型及其参数标定方法在 X80 管道环焊缝损伤演化行为预测方面的有效性,同时,基于该 GTN 模型所搭建的小尺寸断裂韧性试验模型数值模拟结果验证了不同试样之间由于裂尖拘束度影响所造成的断裂韧性的差异性问题,试验结果进一步说明了该 GTN 模型在 X80 高钢级油气管道损伤断裂领域具有较强的应用价值。(图 9,表 3,参 28)

关键词: X80 管线钢; 环焊接头; 损伤模型; 响应面法; 断裂韧性;

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)09-1022-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.09.007

Parameter calibration and application of GTN damage model for girth weld in X80 pipeline

CUI Zhonghao^{1,2}, LIU Yanhe¹, WANG Haitao¹, LUO Yanlong¹, ZHANG Xinjun¹, LI Shili¹, ZHOU Shaokun¹

1. China Special Equipment Inspection & Research Institute//Technology Innovation Center of Oil and Gas Pipeline and Storage Equipment Safety for State Market Regulation; 2. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)

Abstract: [Objective] Numerical simulations represent an important approach to studying the damage evolution behaviors of oil and gas pipelines constructed using high-grade steel. However, the accuracy of simulation results is often restricted by the precision of damage model parameters. Accurately determining damage parameters, being a challenge in the analysis process, is vital to ensure the accuracy of simulation results. [Methods] This study established a fitting relationship between different pore volume fractions and characteristic parameters reflecting material behaviors upon elastic-plastic deformations and damage fractures, through a finite element inverse calibration method integrating material tensile experiments, numerical simulations, and the response surface method, to effectively calibrate the parameters of the Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) damage model for the girth welds in X80 pipelines. The tensile experiment process was numerically inverted, using the calibrated parameters, and the precision of this model was subsequently verified by comparing the fracture characteristics and stress-strain curves between simulation and experimental results. Based on the above-mentioned GTN

damage model, numerical simulations and result analysis were conducted for the single edge notch tensile and single edge notch bending experimental processes for the girth welds in X80 pipelines, verifying the applicability of this GTN damage model. **[Results]** The accuracy verification of calibrated parameters indicated alignment between the fracture positions and fracture characteristics presented by simulations after parameter calibration and the experimental results, and high consistency of their stress-strain curves throughout the damage and fracture process. A comparison of the four characteristic values of tensile stress, tensile strain, fracture stress, and fracture strain resulted in a maximum error not exceeding 10%. In the applicability verification for the model, the apparent toughness values of single edge notch tensile and single edge notch bending specimens were recorded at 0.399 3 and 0.324 2 respectively, corresponding to both final conversion rates of about 1.23. **[Conclusion]** The parameter verification results prove the effectiveness of the GTN model and its parameter calibration method proposed in this paper in predicting the damage evolution behaviors of the girth welds in X80 pipelines. In addition, the numerical simulation results using the small-scale fracture toughness experiment model built based on the GTN model confirm the difference in fracture toughness among specimens due to the influence of crack tip constraint degrees. The experimental results further demonstrate the substantial application value of the GTN model in the damage and fracture field of X80 oil and gas pipelines. (9 Figures, 3 Tables, 28 References)

Key words: X80 pipeline steel, girth weld, damage model, response surface method (RSM), fracture toughness

油气管道作为石油天然气运输行业最为安全快捷的运输方式,已成为连接勘探、开发、处理、集输等各环节的关键纽带。随着油气开发的逐渐深入,油气管道服役环境变得复杂多样,高钢级管道的建设已经成为当下油气管道发展的重要主题,围绕高钢级管道展开安全性评估成为保障油气管道安全服役的重要环节。

目前,针对管道损伤断裂实现安全性预测的有限元方法主要包括静裂纹模拟、扩展有限元法(Extended Finite Element Methods, XFEM)损伤准则、GTN(Gurson-Tvergaard-Needleman)损伤模型等。其中,静裂纹模拟主要是将含裂纹缺陷模型建立在静态准则基础之上,所以该模型无法实现对受载过程中材料损伤演化及裂纹扩展行为的有效模拟;XFEM与GTN模型将管道损伤断裂模拟引入到了动态领域,其中XFEM在传统有限元法位移模式的基础上增加了能够反映裂纹扩展的修正函数,并利用水平集法实现了对界面动态变化的进一步追踪,使有限元模型摆脱了传统有限元方法所遵从的网格重划分原则,并使裂纹扩展过程具有离散性。陈峥嵘等^[1]将XFEM引入水平井压裂过程中,用于分析裂纹的延伸扩展问题,证明了该方法在模拟结构损伤断裂过程中的适用性。GTN模型则是从微观角度出发,将材料在应力作用下的塑性变形及损伤破坏与微观下微孔洞的形核、生长、聚合等行为相联系,通过控制微孔洞演化行为模拟宏观状态下材料的变形损伤过程。杨越等^[2]、杨祯^[3]在基于小尺寸试验的仿真过程中引入了GTN模型,两者的实验结果均证明了GTN模型在模拟含缺陷结构受外部载荷作用

延性破坏的有效性。基于上述观点,马剑林等^[4]利用小尺寸断裂韧性仿真实验对XFEM与GTN模型在表征管道断裂行为方面的能力进行了评估,结果表明,GTN模型的裂纹扩展以及损伤变形行为与实验结果表现出更高的一致性。

GTN损伤模型所描述的是微观状态下由材料内部孔隙演化行为所引发的宏观层面上的结构损伤断裂过程,采用适当方法对模型损伤参数进行标定则是研究管道断裂韧性的重要前提,目前主流的GTN模型参数标定方法主要包括胞元法、金相法、有限元反向标定法。其中,Steglich等^[5]利用单细胞模型模拟孔洞演化行为,从而实现了对球墨铸铁材料GTN参数的计算校准。Rakin等^[6]利用扫描电子显微镜对22NiMoCr3-7进行了金相分析,获取了该材料的初始孔洞体积分数。吴义^[7]采用金相法,利用孔洞面积测量结果确定了7075-T铝合金的孔洞体积分数。梁耀壮^[8]、曹秒艳等^[9]结合材料拉伸实验与有限元反向标定法分别对铜镍锡合金、ZAZ31B镁合金进行了GTN模型损伤参数标定。虽然胞元法与金相法是基于实际材料微观特性进行参数计算的,但有研究发现,微观下金属夹杂物体积分数与孔洞体积分数的转化关系并非绝对的^[10-11],利用材料不同应变水平下的金属夹杂物的含量去标定孔洞体积分数的方法存在一定误差,且上述方法需要对材料的微观特性进行多次实验分析,成本过高。而有限元反向标定法采用材料拉伸试验、数值模拟与响应面法相结合的方式,可以在低成本下对损伤模型参数进行精准标定。

环焊缝是管道上的薄弱环节,对管道环焊缝的损伤演化过程进行分析尤为重要。在此,采用有限元反向标定法,通过对 X80 管道环焊缝进行拉伸试验,获得对应的应力-应变曲线,以 GTN 损伤参数作为自变量,以抗拉应变、抗拉应力、断裂应变、断裂应力作为响应变量,基于响应面法设计搭建 30 组数值模拟模型,建立自变量与响应变量之间的拟合关系,实现了 X80 管道环焊缝 GTN 损伤模型参数的有效标定与精度验证。在此基础上,分别建立 X80 管道环焊缝材料的单边缺口拉伸 (Single Edge Notch Tension, SENT)、单边缺口弯曲 (Single Edge Notch Bend, SENB) 试样的数值分析模型,通过对比两者裂纹扩展阻力曲线的差异性,分析了受裂纹尖端拘束度影响而产生的断裂韧性差异性问题。

1 GTN 损伤模型

1.1 模型简介

GTN 损伤模型能够考虑相邻孔洞之间的相互作用对材料损伤过程的影响,并解释了在孔洞相互聚合的最后阶段中材料强度出现迅速下降的现象^[12-15],其屈服函数 Φ 为:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_2 f^* \cos \left(-q_2 \frac{3p}{2\sigma_y} \right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

$$f^* = \begin{cases} f, & f \leq f_c \\ f_c + \frac{\bar{f}_F - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c), & f_c < f < f_F \\ \bar{f}_F, & f \geq f_F \end{cases} \quad (2)$$

$$\bar{f}_F = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3} \quad (3)$$

式中: σ_M 、 σ_y 、 p 分别为 Von Mises 应力、材料屈服应力、静水压力, MPa; q_1 、 q_2 、 q_3 为修正系数; f^* 为孔洞体积分数,该变量能够模拟伴随着孔洞聚合所导致材料应变能力下降的整个过程; f 为材料孔洞体积分数; f_c 为临界孔洞体积分数; f_F 为材料应力承载能力完全丧失时的断裂孔洞体积分数; $\bar{f}_F$ 为与修正系数相关的参数。

1.2 参数标定

材料的损伤演化过程由其弹塑性本构模型与 GTN 损伤模型共同作用,主要包含 14 个参数。参数可分为两个部分:第 1 部分是控制材料弹塑性行为的弹性模量 E 、泊松比 ν 、强度系数 k 及应变硬化指数

n ,以上参数可以通过材料拉伸实验获得;第 2 部分是 GTN 损伤模型需要确定的 9 个参数,分别是考虑材料内部相邻孔洞之间相互作用的模型修正系数 $q_1 \sim q_3$ 、平均等效应变 ε_N 、平均等效应变的标准差 S_N 、初始孔洞体积分数 f_0 、形核孔洞体积分数 f_N 、临界孔洞体积分数 f_c 、断裂孔洞体积分数 f_F 。为避免 GTN 损伤模型多参数间的相互依赖性所引起的误差增大现象,参考 Tvergaard 等^[13-16]的研究结果,确定了其中 5 个参数的取值为 $q_1=1.5$ 、 $q_2=1$ 、 $q_3=2.25$ 、 $\varepsilon_N=0.1$ 、 $S_N=0.3$,剩余 4 个参数将采用有限元反向标定法进行标定。

1.2.1 弹塑性本构

为确定 X80 管道环焊缝材料的弹塑性本构参数并配合响应面法完成 GTN 损伤模型损伤参数的标定工作,参照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第一部分:室温拉伸试验方法》进行拉伸试验(图 1)并利用式(4)、式(5)将试验获取的材料名义应力-应变曲线转化为真实应力-应变曲线(图 2)。考虑到受常规焊接形式的影响,管道环焊缝 6 点钟位置通常存在材料力学性能降低现象,为保证 GTN 损伤模型在模拟管道环焊缝断裂行为时的可靠性,在环焊缝 6 点钟位置沿环向方向依次取 3 个试样,并选取其中强度最小的试样用于对标试验。

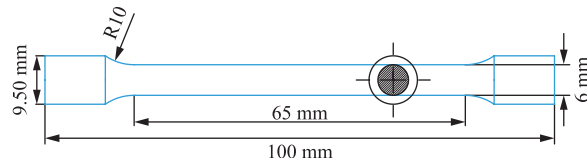


图 1 X80 管道环焊缝材料棒状拉伸试样尺寸图
Fig. 1 Dimensions of rod-shaped tensile specimen for girth weld metal in X80 pipeline

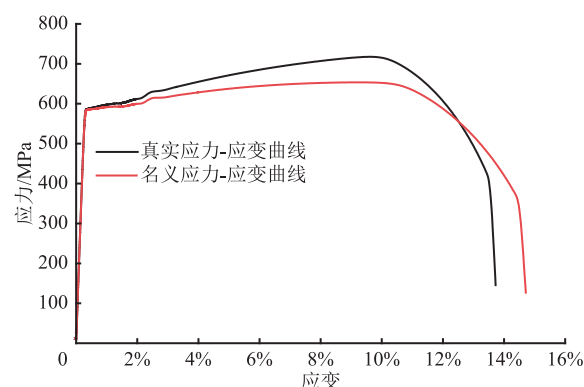


图 2 X80 管道环焊缝应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of girth weld in X80 pipeline

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (4)$$

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (5)$$

式中: σ_t 、 σ_e 分别为真实应力、工程应力, MPa; ε_t 、 ε_e 分别为真实应变、工程应变。

由于颈缩现象的存在,需要对抗拉强度之后的真实应力-应变曲线进行修正,采用式(6)Swift 定律描述材料的各向同性硬化行为,并根据拟合的公式推算抗拉强度之后的应力及应变:

$$\sigma_s(\bar{\epsilon}_p)=K(\bar{\epsilon}_p+\epsilon_0)^n \tag{6}$$

式中: σ_s 为等效塑性应力,MPa; $\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变; K 为强化系数,MPa; ϵ_0 为初始塑性应变; n 为硬化系数。

利用 Swift 方程对 X80 管道环焊缝的真实应力-应变曲线进行拟合(图 3),提取该焊缝金属材料所对应的材料硬化参数值(表 1)。

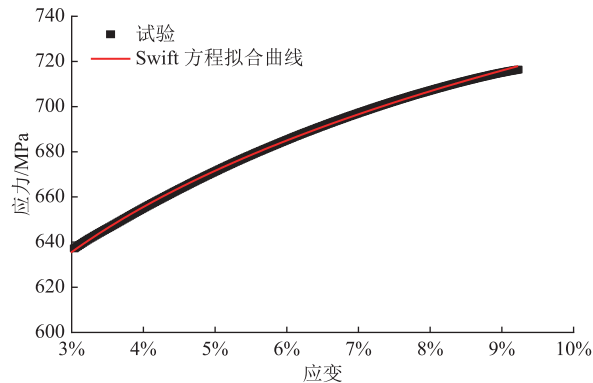


图 3 X80 管道环焊缝真实应力-应变曲线与 Swift 方程拟合曲线
Fig. 3 Fitting curve of real stress-strain curve and Swift equation for girth weld in X80 pipeline

表 1 X80 管道环焊缝弹塑性材料参数表
Table 1 Parameters of elastic-plastic materials for girth weld in X80 pipeline

E/GPa	ν	K/MPa	ϵ_0	n
210	0.3	560.891 29	3.018	0.110 55

1.2.2 损伤模型参数标定

在对 X80 管道焊缝金属材料剩余的 4 个 GTN 损伤参数进行标定时引入响应面法(Response Surface Methodology, RSM)。该方法是一种基于统计学原理的实验设计方法,可用于描述自变量与响应变量之间的关系。其通过设计一组实验方案,收集相关数据,并利用回归分析技术建立输入变量与输出变量之间的数学模型,确定两者之间的拟合关系式。本次参数标定过程中主要以 4 个孔隙体积分数(f_0 、 f_N 、 f_c 、 f_F)作为自变量,通过调研文献[14-26]总结了 GTN 损伤参数取值情况(表 2),以应力-应变曲线上的抗拉应变、抗拉应力、断裂应变、断裂应力 4 个特征点作为 RSM 试验的响应变量,利用中心复合设计的方法建立了单因素 4 水平下的 30 组响应面实验。同时,在材料性能参数的基础上搭建同规格尺寸下的棒状拉伸试验有限元分析模型,以此完成 30 组仿真实验,以获取不同自变量所对应下的抗拉应变 ϵ_b 、抗拉应力 σ_b 、断裂应变 ϵ_f 、断裂应力 σ_f (表 3)。

表 2 GTN 损伤模型孔隙体积分数取值范围表
Table 2 Value ranges for pore volume fractions in GTN damage model

孔隙体积分数	取值范围
f_0	0.000 25~0.004 5
f_N	0.000 015 4~0.05
f_c	0.000 08~0.03
f_F	0.03~0.6

表 3 单因素 4 水平 GTN 损伤模型响应面仿真实验结果表
Table 3 Simulation experimental results of single-factor, 4-level GTN damage model for response surface

序号	f_0	f_N	f_c	f_F	ϵ_b	σ_b/MPa	ϵ_f	σ_f/MPa
1	0.001 313	0.012 512	0.022 52	0.457 5	0.113 449	651.467 2	0.170 400	213.675 4
2	0.002 375	0.025 008	0.015 04	0.315 0	0.105 305	649.140 0	0.141 155	209.630 1
3	0.002 375	0.025 008	0.015 04	0.600 0	0.105 305	649.140 0	0.154 077	144.977 1
4	0.003 438	0.037 504	0.007 56	0.172 5	0.087 374	643.877 2	0.102 043	569.424 6
5	0.002 375	0.025 008	0.030 00	0.315 0	0.105 305	649.140 0	0.144 401	270.673 4
6	0.002 375	0.025 008	0.015 04	0.315 0	0.105 305	649.140 0	0.141 155	209.630 1
7	0.002 375	0.025 008	0.015 04	0.315 0	0.105 305	649.140 0	0.141 155	209.630 1
8	0.003 438	0.012 512	0.007 56	0.172 5	0.106 941	649.628 0	0.147 688	547.963 4
9	0.002 375	0.025 008	0.015 04	0.315 0	0.105 305	649.140 0	0.141 155	209.630 1
10	0.002 375	0.025 008	0.015 04	0.315 0	0.105 305	649.140 0	0.141 155	209.630 1
11	0.002 375	0.025 008	0.015 04	0.315 0	0.105 305	649.140 0	0.141 155	209.630 1
12	0.003 438	0.012 512	0.007 56	0.457 5	0.129 762	648.917 2	0.165 519	210.297 4
13	0.001 313	0.037 504	0.007 56	0.457 5	0.105 306	618.651 9	0.139 041	215.625 6
14	0.001 313	0.012 512	0.022 52	0.172 5	0.106 929	652.093 2	0.162 339	233.921 0
15	0.003 438	0.037 504	0.022 52	0.172 5	0.105 303	646.137 2	0.129 434	534.616 0
16	0.003 438	0.012 512	0.022 52	0.457 5	0.106 929	652.093 2	0.170 400	213.675 4

续表

序号	f_0	f_N	f_c	f_F	ε_b	σ_b/MPa	ε_f	σ_f/MPa
17	0.002 375	0.025 008 0	0.015 04	0.030 0	0.105 305	649.140 0	0.126 493	604.258 30
18	0.000 250	0.025 008 0	0.015 04	0.315 0	0.105 305	649.140 0	0.141 155	209.630 10
19	0.002 375	0.000 015 4	0.015 04	0.315 0	0.136 284	652.570 6	0.136 284	652.570 60
20	0.001 313	0.012 512 0	0.007 56	0.457 5	0.126 488	651.534 4	0.126 488	651.534 40
21	0.004 500	0.025 008 0	0.015 04	0.315 0	0.105 305	646.639 5	0.139 516	162.451 60
22	0.002 375	0.025 008 0	0.000 08	0.315 0	0.103 668	640.676 5	0.129 730	210.100 40
23	0.001 313	0.012 512 0	0.007 56	0.172 5	0.126 488	651.534 4	0.154 179	15.546 01
24	0.003 438	0.037 504 0	0.022 52	0.457 5	0.102 043	645.910 9	0.140 615	243.098 90
25	0.001 313	0.037 504 0	0.022 52	0.172 5	0.105 306	648.651 9	0.131 027	526.969 10
26	0.003 438	0.012 512 0	0.022 52	0.172 5	0.106 941	649.628 0	0.159 076	250.057 50
27	0.001 313	0.037 504 0	0.007 56	0.172 5	0.105 306	648.651 9	0.121 605	538.392 90
28	0.002 375	0.050 000 0	0.015 04	0.315 0	0.103 649	615.617 3	0.129 715	214.410 40
29	0.003 438	0.037 504 0	0.007 56	0.457 5	0.103 673	645.536 0	0.136 261	274.645 20
30	0.001 313	0.037 504 0	0.022 52	0.457 5	0.105 306	648.651 9	0.142 235	214.531 00

通过对 30 组仿真模型的结果数据进行回归分析,最终获取了输入变量与输出变量之间的二次响应模型,建立了两者之间的拟合关系式:

$$\begin{aligned}\varepsilon_b = & 0.142 - 6.211\,22 f_0 - 2.065\,83 f_N - 0.712\,012 f_c + \\ & 0.055\,658\,7 f_F + 137.309 f_0 f_c + 8.554\,89 f_0 f_F + \\ & 42.209\,7 f_N f_c - 0.873\,735 f_N f_F - 2.607\,88 f_c f_F + \\ & 23.382\,2 f_N^2\end{aligned}\tag{7}$$

$$\begin{aligned}\sigma_b = & 649.452 - 5.874\,12 f_N + 1.957\,66 f_c + 1.403\,53 f_F + \\ & 1.841\,38 f_0 f_N - 1.152\,19 f_0 f_c + 2.200\,81 f_N f_c - \\ & 1.465\,64 f_N f_F + 2.306\,91 f_c f_F - 3.226\,72 f_N^2\end{aligned}\tag{8}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_f = & 0.141\,753 - 0.008\,297\,25 f_N + 0.007\,078\,17 f_c + \\ & 0.006\,940\,33 f_F - 0.005\,166\,5 f_0 f_N - 0.002\,781\,62 f_0 f_c + \\ & 0.002\,356\,75 f_0 f_F - 0.003\,238\,25 f_N f_c + \\ & 0.002\,292\,88 f_N f_F - 0.001\,740\,75 f_c f_F - \\ & 0.001\,407\,68 f_N^2\end{aligned}\tag{9}$$

$$\begin{aligned}\sigma_f = & 216.475 - 20.251\,7 f_0 - 30.039\,7 f_N - 45.708\,6 f_c - \\ & 105.151 f_F + 40.263\,5 f_0 f_N + 31.024\,1 f_0 f_c + \\ & 66.275\,3 f_N f_c - 52.370\,7 f_N f_F + 66.995\,9 f_N^2 + \\ & 18.72 f_c^2 + 57.277\,7 f_F^2\end{aligned}\tag{10}$$

对式(7)~式(10)进行方差分析, ε_b 、 σ_b 、 ε_f 、 σ_f 拟合关系式决定系数 R^2 分别为 0.834 6、0.959 0、0.902 8、0.948 2,均接近于 1,可见该二次项模型对后续探究特定自变量下的响应量具有较好的预测能力。为获取实际 X80 管道焊缝金属的 GTN 模型参数,以 上述拉伸试验所提取取的 ε_b 、 σ_b 、 ε_f 、 σ_f 作为已知量,利用最小二乘法配合上述 4 个拟合参数方程,反向

推算得到表 4 范围内对应误差最小的最优解,进而确定 $f_0=0.002\,375$ 、 $f_N=1.54\times10^{-5}$ 、 $f_c=0.015\,04$ 、 $f_F=0.315$,实现 GTN 模型的有限元反向标定。

1.2.3 损伤模型参数验证

基于弹塑性本构参数与 GTN 损伤参数,建立 X80 管道环焊缝材料拉伸试样损伤演化模型,可见试验与仿真模型的断裂形貌基本一致,均呈杯锥状断口特征(图 4),即试样中心位置的材料先发生损伤,并随载荷持续增加,损伤逐渐由中心向外围扩张,最终导致材料整体断裂。由于试验采用一端加载、另一端固定的加载方式,导致断口位置更靠近加载段。对比试验及仿真获得的名义应力-应变曲线(图 5),发现在整个损伤断裂过程中的两条曲线存在良好的一致性,屈服、断裂两个特征点位置比较接近,抗拉强度特征点位置相对

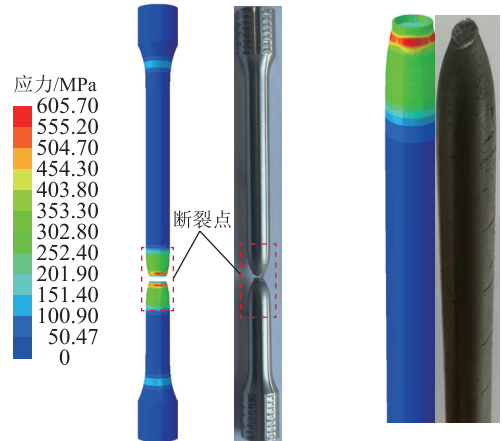


图 4 X80 管道环焊缝材料拉伸试样及仿真模型断裂形貌图
Fig. 4 Fracture morphology of tensile specimen and simulation model for girth weld metal in X80 pipeline

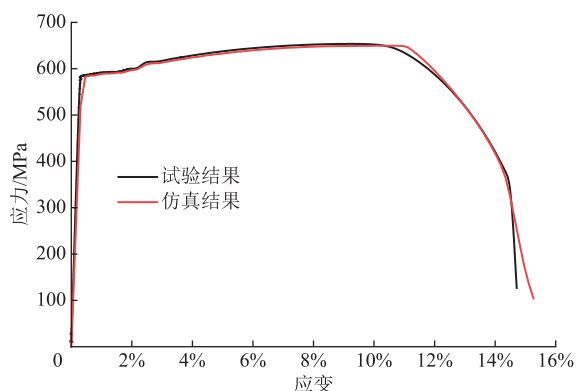


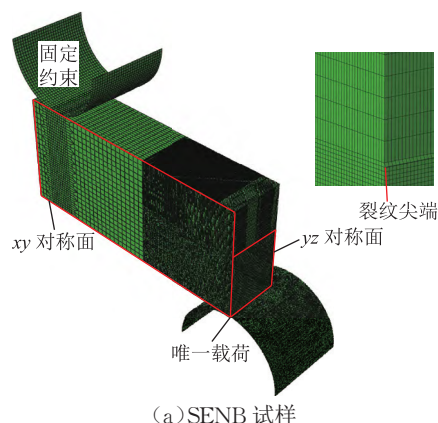
图5 X80 管道环焊缝拉伸试验与仿真结果对比图

Fig. 5 Comparison between tensile experiment and simulation results for girth weld in X80 pipeline

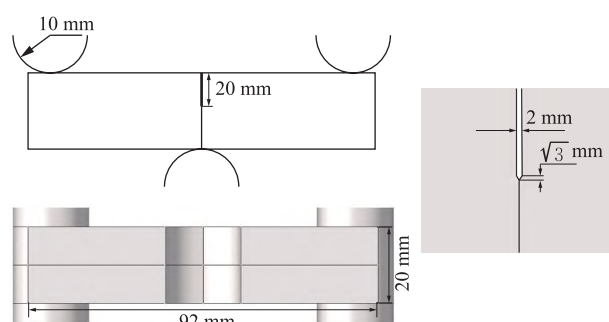
偏差最大,为 0.013 1,约占总抗拉应变的 8%,不影响试样的最终断裂点,可见 GTN 损伤参数能够对 X80 管道环焊缝的损伤演化行为实现良好预测。

2 适用性验证

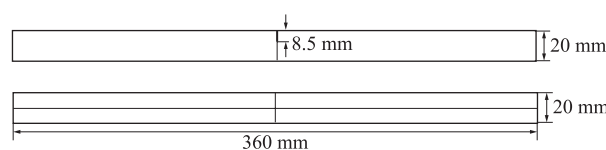
SENT 与 SENB 试验是分析材料断裂韧性水平的常用方法,因二者在结构、裂纹几何尺寸、加载方式等方面存在差异,其计算所得断裂韧性值相应存在差异^[27],给小尺寸试样表征材料断裂韧性带来不便。为解决该问题,基于上述结果对该现象进行分析研究,以期获取二者之间的相互转化关系,提升小尺寸试样在表征材料断裂韧性方面的应用性,并进一步验证 GTN 模型在探究管道损伤断裂韧性方面的适用性。



(a) SENB 试样



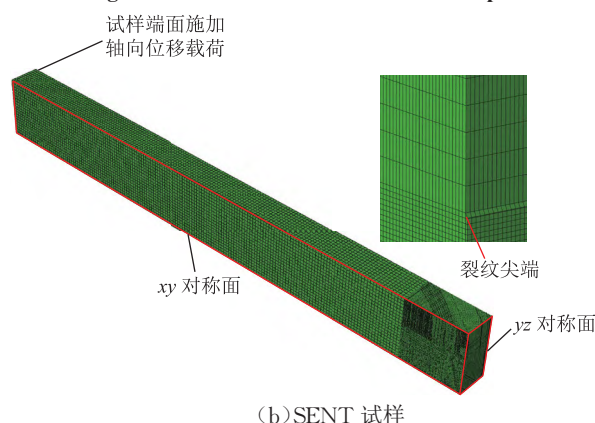
(a) SENB 试样



(b) SENT 试样

图6 SENB 试样及 SENT 试样尺寸图

Fig. 6 Dimensions of SENB and SENT specimens



(b) SENT 试样

图7 SENB 试样及 SENT 试样网格划分示意图

Fig. 7 Meshing of SENB and SENT specimens

2.2 表观断裂韧性量化分析

在裂纹扩展过程中,裂纹扩展量的提取主要分为 2 个阶段:第 1 阶段为裂纹尖端钝化阶段,该阶段裂纹尖端的 GTN 单元并未发生损伤失效,所以该阶段的裂纹扩展量为沿裂纹尖端方向上的节点位移增量;第

2 阶段为裂纹扩展阶段,该阶段裂纹尖端的 GTN 单元开始发生损伤失效,裂纹扩展量将根据裂纹尖端位置处失效单元的数量进行计算(图 8)。根据上述方法,获取 SENT 试样、SENB 试样的裂纹扩展阻力曲线(图 9)。

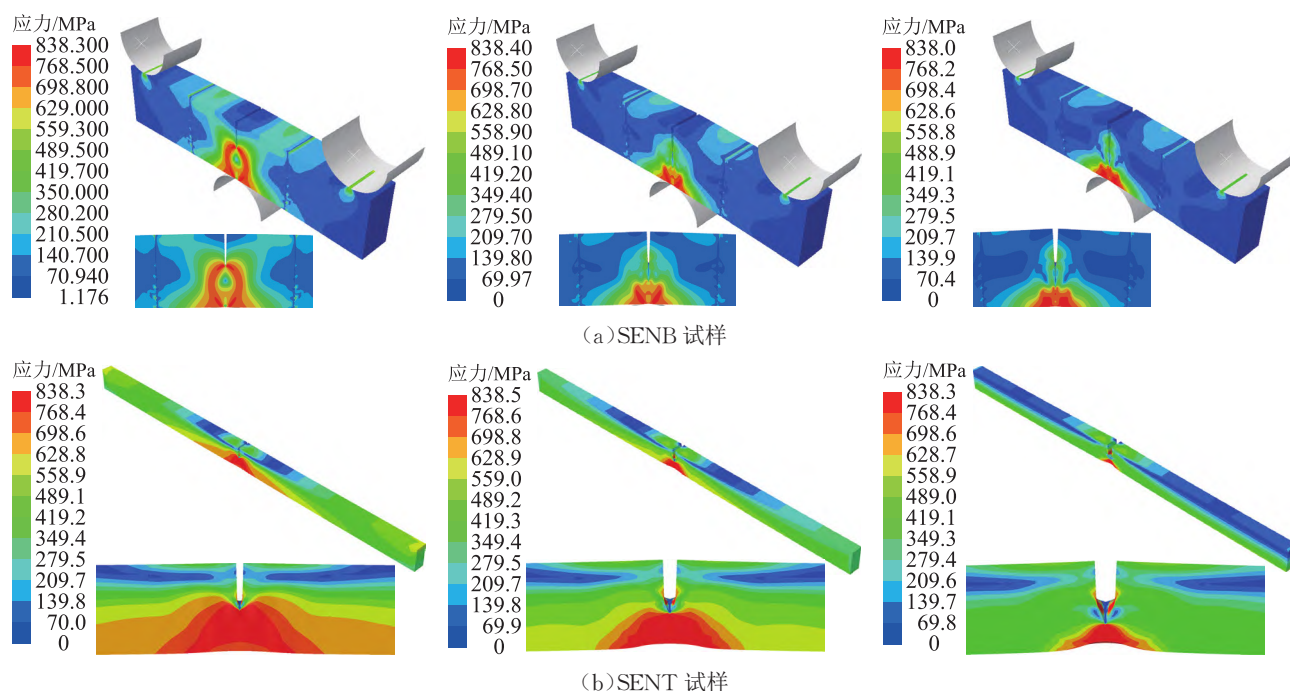


图8 SENB试样及SENT试样应力演化云图
Fig. 8 Stress evolution contours of SENB and SENT specimens

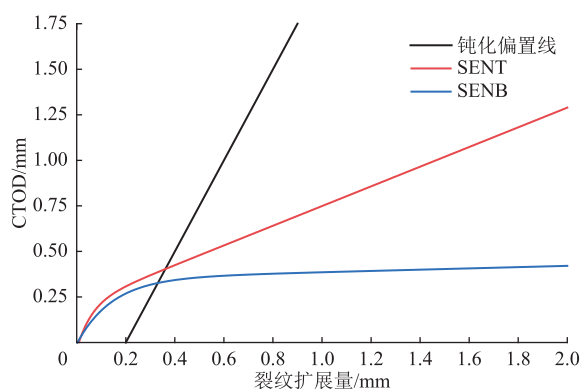


图9 SENT试样及SENB试样裂纹扩展阻力曲线
Fig. 9 Crack growth resistance curves of SENT and SENB specimens

在裂纹扩展量相同时, SENT试样计算所得裂纹阻力曲线整体高于 SENB试样, 表明 SENT试样计算所得断裂韧性水平高于 SENB试样, SENB试样具有更高的保守性。而根据钝化偏置线计算得到的 SENT 以及 SENB 试样表观韧性值分别为 0.399 3、0.324 2, 其两者的表观断裂韧性值最终转化率约为 1.23。

3 结论

1) 利用材料拉伸试验、数值模拟与响应面法相结合的有限元反向标定法, 实现了对 X80 管道环焊缝 GTN 损伤模型参数的有效标定, 利用标定的 GTN 损伤参数和弹塑性本构参数所搭建的材料拉伸试验数值

仿真模型, 取得了与试验相一致的应力-应变曲线, 两者屈服点、断裂点的最大误差不超过 5%, 抗拉点的最大误差不超过 8%, 验证了 GTN 损伤模型及所提出损伤参数标定方法在 X80 管线钢损伤演化行为预测方面的有效性。该方法可作为开展在役油气管道受载荷作用下损伤断裂行为预测的基础, 为高钢级油气管道的安全服役提供方法支撑。

2) 小尺寸断裂韧性试样是试验管道材料断裂韧性水平的常用手段, 利用 GTN 损伤演化模型对 X80 管线钢的 SENT、SENB 试验过程进行数值模拟, 分析得出 SENT 试样、SENB 试样的表观韧性值分别为 0.399 3、0.324 2, 其最终转化率约为 1.23。该结论证实了不同试样之间由于裂尖拘束度影响所造成断裂韧性具有差异的问题, 因此在评估工作中应选择与实际结构裂纹拘束度近似度较高的断裂韧性试验结果, 以确保评估工作的准确性。

3) 基于 GTN 损伤模型搭建的小尺寸断裂韧性仿真分析试验所提取的裂纹扩展阻力曲线以及表观韧性结果获得了与试验结果相一致的结论, 进一步说明了 GTN 损伤模型在探究管道损伤断裂领域有着良好的适用性, 从而为该 GTN 损伤模型在后续管道断裂韧性分析工作中的应用提供了有效依据。

参考文献:

[1] 陈峥嵘, 齐宇, 韩磊, 房茂军, 王波, 谢昕, 等. 非均质致密储层水

- 平井分段压裂裂缝扩展模拟[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(2): 53-60. DOI: 10.19597/j.issn.1000-3754.202302019.
- CHEN Z R, QI Y, HAN L, FANG M J, WANG B, XIE X, et al. Fracture propagation simulation of horizontal well staged fracturing in heterogeneous tight reservoirs[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(2): 53-60.
- [2] 杨越, 李逸涵, 杨万欢, 黎军顽, 钟巍华, 宁广胜, 等. 小尺寸 CT 试样断裂行为的 GTN 细观损伤模型研究[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(2): 411-420. DOI: 10.7538/yzk.2023.youxian.0279.
- YANG Y, LI Y H, YANG W H, LI J W, ZHONG W H, NING G S, et al. Study on fracture behavior of mini-CT specimen based on GTN mesoscopic damage model[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2024, 58(2): 411-420.
- [3] 杨祯. 基于 Gurson 模型的高强钢塑性断裂行为研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- YANG Z. Study on ductile fracture of high strength steel based on Gurson model[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [4] 马剑林, 葛华, 甄莹, 方迎潮, 蒋毅, 崔富凯, 等. 基于损伤力学的全尺寸天然气管道断裂韧性评估方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 153-160. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2021.04.019.
- MA J L, GE H, ZHEN Y, FANG Y C, JIANG Y, CUI F K, et al. A damage mechanics based evaluation method for fracture toughness of full-scaled gas pipelines[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(4): 153-160.
- [5] STEGLICH D, SIEGMUND T, BROCKS W. Micromechanical modeling of damage due to particle cracking in reinforced metals[J]. *Computational Materials Science*, 1999, 16(1/2/3/4): 404-413. DOI: 10.1016/S0927-0256(99)00083-X.
- [6] RAKIN M, CVIJOVIC Z, GRABULOV V, PUTIC S, SEDMAK A. Prediction of ductile fracture initiation using micromechanical analysis[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71(4/5/6): 813-827. DOI: 10.1016/S0013-7944(03)00013-4.
- [7] 吴义. 基于损伤的 7075-T6 铝合金 HFQ 工艺成形性实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- WU Y. Experimental study on formability of 7075-T6 aluminum alloy HFQ based on damage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [8] 梁耀壮. 基于修正 GTN 模型的铜镍锡合金斜轧穿孔数值模拟和工艺优化[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- LIANG Y Z. Numerical simulation and process optimization of cross rolling perforation of Cu-6Ni-6Sn alloy based on modified GTN model[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [9] 曹秒艳, 左苗苗, 王鹏, 郝海滨, 赵长财, 李建超. 基于 GTN 模型的镁合金异形件颗粒介质成形[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(12): 2413-2421. DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2018.12.03.
- CAO M Y, ZUO M M, WANG P, HAO H B, ZHAO C C, LI J C. Solid granules medium forming of magnesium alloy special shaped part based on GTN model[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(12): 2413-2421.
- [10] ZHANG Z L, THAULOW C, ØDEGÅRD J. A complete Gurson model approach for ductile fracture[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 67(2): 155-168. DOI: 10.1016/S0013-7944(00)00055-2.
- [11] CHHIBBER R, ARORA N, GUPTA S R, DUTTA B K. Estimation of Gurson material parameters in bimetallic weldments for the nuclear reactor heat transport piping system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2008, 222(12): 2331-2349. DOI: 10.1243/09544062JMES1001.
- [12] GURSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I: Yield criteria and flow rules for porous ductile media[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1977, 99(1): 2-15. DOI: 10.1115/1.3443401.
- [13] TVERGAARD V. Influence of void nucleation on ductile shear fracture at a free surface[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1982, 30(6): 399-425. DOI: 10.1016/0022-5096(82)90025-4.
- [14] TVERGAARD V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions[J]. *International Journal of Fracture*, 1981, 17(4): 389-407. DOI: 10.1007/BF00036191.
- [15] TVERGAARD V, NEEDLEMAN A, LO K K. Flow localization in the plane strain tensile test[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1981, 29(2): 115-142. DOI: 10.1016/0022-5096(81)90019-3.
- [16] TVERGAARD V, NEEDLEMAN A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar[J]. *Acta Metallurgica*, 1984, 32(1): 157-169. DOI: 10.1016/0001-6160(84)90213-X.
- [17] 匡锐, 巩红涛, 刘嘉欣, 张威, 李明, 邓雪涛, 等. 基于 GTN 模型的含缺陷球墨铸铁力学行为分析[J]. 热加工工艺, 2023, 52(11): 131-135. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20220307.
- KUANG R, GONG H T, LIU J X, ZHANG W, LI M, DENG

- X T, et al. Analysis of mechanical behavior of ductile iron with defects based on GTN model[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(11): 131-135.
- [18] WANG Y B, ZHANG C S, MENG Z J, CHEN L, ZHAO G Q. A novel three-dimensional M-K model by integrating GTN model for accurately identifying limit strains of sheet metal[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(7): 1953-1962. DOI: 10.1016/S1003-6326(23)66235-1.
- [19] 姚冉. 6005A 铝合金热成形实验与数值模拟研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2022.
- YAO R. Research on hot forming experiment and numerical simulation of 6005A aluminum alloy[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2022.
- [20] 王江超, 卓子超. 基于 GTN 损伤模型的 Q690 钢及其对接接头断裂性能评估[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(2): 142-147. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02237.
- WANG J C, ZHUO Z C. Fracture performance assessment of Q690 steel and its butt welded joint based on GTN damage model[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(2): 142-147.
- [21] 赵雷, 王逊, 徐连勇, 韩永典. 基于 GTN 模型的小冲孔高温拉伸性能表征[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(3): 283-290. DOI: 10.11784/tdxbz202009062.
- ZHAO L, WANG X, XU L Y, HAN Y D. Characterization of high-temperature tensile properties of small punch test based on the GTN Model[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(3): 283-290.
- [22] 孙权, 鹿业波, 陈建钧. 基于响应面法剪切修正 GTN 模型损伤参数的确定[J]. 机械强度, 2019, 41(6): 1460-1465. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2019.06.029.
- SUN Q, LU Y B, CHEN J J. Determination of damage parameters of shear modified GTN model by response surface method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(6): 1460-1465.
- [23] 吕正芳. 双相特征 X80 管线钢塑性损伤行为研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- LYU Z F. Research on plastic damage behavior of X80 pipeline steel with dual phase characteristics[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [24] 方剑, 邱保文, 袁泽喜. X80 钢三点弯曲裂纹扩展试验及有限元模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(3): 99-103. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200115.002.
- FANG J, QIU B W, YUAN Z X. Crack propagation of three-point bending test and finite element simulation for steel X80[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(3): 99-103.
- [25] 王旭. 高钢级管道环焊接头断裂评估方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- WANG X. The study of fracture assessment methods for high-grade girth welded pipes[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [26] 陆敏捷. 基于压痕法的 X80 管线钢断裂韧性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- LU M J. Fracture toughness of X80 pipeline steel investigation by indentation method[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [27] 张宏, 吴锴, 冯庆善, 隋永莉, 王东营, 戴联双, 等. 高钢级管道环焊接头力学性能与适用性评价研究进展[J]. 油气储运, 2022, 41(5): 481-497. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.05.001.
- ZHANG H, WU K, FENG Q S, SUI Y L, WANG D Y, DAI L S, et al. State of the art on mechanical properties and fitness-for-service assessment of high-grade pipeline girth weld[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(5): 481-497.
- [28] ZHEN Y, LI X Y, CAO Y G, ZHANG S H. A novel method to determine critical CTOA directly by load-displacement curve[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 230: 107013. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107013.
- (编辑: 张腾)
-
- 基金项目:** 中国特种设备检测研究院科研基金项目“高钢级天然气管道焊接及检测评价研究”, 2020内02。
- 作者简介:** 崔忠浩, 男, 1999 年生, 在读硕士生, 2021 年毕业于河北科技大学车辆工程专业, 现主要从事油气管道环焊缝应变容量预测技术方向的研究工作。地址: 北京市朝阳区和平街西苑 2 号, 100029。电话: 17812372062。Email: czh002799@163.com
- 通信作者:** 刘艳贺, 男, 1989 年生, 工程师, 2014 年硕士毕业于武汉科技大学冶金工程专业, 现主要从事压力管道载荷计算与评价方向的研究工作。地址: 北京市朝阳区和平街西苑 2 号, 100029。电话: 15541123302。Email: liuyanhe6@163.com
- Received: 2023-10-09
 - Revised: 2023-11-15
 - Online: 2024-06-20

