

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.02

基于GTN模型的X80管线钢环焊缝参数标定及断裂行为研究

李元¹, 潘婷², 李安¹, 孙巧飞³, 刘攀¹, 余志峰⁴

1. 国家石油天然气管网集团有限公司 建设项目管理分公司, 河北 廊坊 065000

2. 中国石油天然气管道科学研究院有限公司, 河北 廊坊 065000

3. 国家管网集团科学技术研究总院分公司, 河北 廊坊 065000

4. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000

摘要: 经典Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) 损伤模型是建立在由高应力三轴度主导的孔隙扩张失效模型, 但GTN模型捕捉对剪切作用主导的低应力三轴度失效行为并不敏感。设计了四种不同缺口形状的拉伸试样, 以模拟不同应力三轴度下的材料行为。采用ABAQUS有限元软件进行数值模拟, 通过反向标定方法标定GTN模型参数, 并在缺口断裂区域进行网格局部加密, 以精确模拟裂纹扩展。通过多次迭代, 成功标定了X80管线钢母材及其不同匹配程度焊缝的GTN参数。研究发现, 影响韧性材料非线性响应的主要参数包括Tvergaard系数、初始孔隙率和成核孔隙体积分数。焊缝金属的孔隙度参数和形核函数参数与母材存在显著差异, 表明不能直接采用同一组参数进行管道环焊缝的韧性断裂模拟。结合有限元数值模拟仿真采用反向标定方法, 成功标定了适用于X80管线钢环焊缝接头的GTN模型参数。这为更准确地模拟管道环焊缝的断裂行为提供了依据。未来的研究方向应进一步优化GTN模型, 考虑塑性状态变量的依赖性, 以建立完全耦合的塑性本构驱动的损伤本构。

关键词: GTN损伤模型; 多孔成核损伤; 损伤力学; X80管线钢; 有限元分析

中图分类号: TG457.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0008-08

Research on the Calibration of Parameters and Fracture Behavior of X80 Pipeline Steel based on GTN Model at the Circular Weld Seam of Pipe

LI Yuan¹, PAN Ting², LI An¹, SUN Qiaofei³, LIU Pan¹, YU Zhifeng⁴

1. Construction Project Management Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Group Co., Ltd., Langfang 065000, China

2. China Petroleum and Natural Gas Pipeline Science Research Institute Co., Ltd., Langfang 065000, China

3. Science and Technology Research General Institute Branch of National Pipeline Group, Langfang 065000, China

4. China Petroleum and Natural Gas Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang 065000, China

Abstract: The classical Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) damage model is established based on the pore expansion failure model dominated by high stress triaxiality, but the GTN model is not sensitive to the failure behavior dominated by shear action under low stress triaxiality. Four different notch shapes of tensile specimens were designed to simulate the material behavior under different stress triaxialities. The ABAQUS finite element software was used for numerical simulation, and the GTN model parameters were calibrated through the inverse calibration method, and the mesh was locally refined in the notch fracture area to accurately simulate crack propagation. Through multiple iterations, the GTN parameters of X80 pipeline steel base material and its welds with different matching degrees were successfully calibrated. The study found that the main parameters affecting the nonlinear response of ductile materials include the Tvergaard coefficient, initial porosity, and nucleated pore volume fraction. The porosity parameters and nucleation function parameters of the weld metal are significantly different from those of the base material, indicating that the same set of parameters cannot be directly used for the ductile fracture simulation of pipeline ring welds. Combining the finite element numerical simulation and the inverse calibration method, the GTN model parameters suitable for X80 pipeline steel ring weld joints were successfully calibrated. This provides a basis for more accurately simulating the fracture behavior of pipeline ring welds. Future research directions should further optimize the GTN model, consider the dependence of plastic state variables, and establish a constitutive model driven by plastic constitutive coupling.

收稿日期: 2024-11-21 修回日期: 2025-01-19

作者简介: 李元(1977—),男,硕士,高级工程师,主要从事油气储运工程设计和管理工作。

tion method, the GTN model parameters applicable to X80 pipeline steel ring weld joints were successfully calibrated. This provides a basis for more accurate simulation of the fracture behavior of pipeline ring welds. Future research should further optimize the GTN model, considering the dependence of plastic state variables, to establish a fully coupled plastic constitutive-driven damage constitutive.

Keywords: GTN damage model; void nucleation damage; damage mechanics; X80 pipeline steel; finite element analysis

引用格式:李元,潘婷,李安,等. 基于GTN模型的X80管线钢环焊缝参数标定及断裂行为研究[J]. 电焊机, 2025, 55(4): 8–15.

Citation: LI Yuan, PAN Ting, LI An, et al. Research on the Calibration of Parameters and Fracture Behavior of X80 Pipeline Steel based on GTN Model at the Circular Weld Seam of Pipe[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 8–15.

0 引言

包含缺陷的金属,在外载荷作用下会在应力集中处发生空隙体积的变化或材料密度的变化,特别是在金属的延性损伤过程中,空洞可能在缺陷附近成核,随着塑性变形逐渐增长,最后通过聚集最终实现裂纹的扩展。为了描述延性断裂过程, Gurson^[1]建立了纳入损伤和塑性应变共同作用的细观损伤力学模型,主要讨论在高应力三轴度下的损伤演化模型,随后 Tvergaard–Needleman^[2]在此基础上,考虑缺陷扩展引起的空隙体积的变化,最终完成了 Gurson–Tvergaard–Needleman(GTN)损伤模型的理论框架。GTN模型可以准确地预测材料从孔洞成核、生长到聚集扩展的完整破坏过程^[3]。这种基于微观力学的材料模型与有限元方法结合,构成了一种强大的计算材料损伤失效的方法,实现了材料从微观损伤演化,到宏观有限元断裂失效完整过程的描述,损伤演变过程如图1所示。因此GTN模型可广泛应用于局部剪切失效、裂纹萌生和裂纹扩展等问题,给高应力三轴度的失效破坏提供了高效的研究工具^[4]。

但是由于模型参数标定过程比较复杂,大多数文献都是采用母材的GTN参数进行韧性断裂的模拟。崔忠浩^[5]采用GTN模型来表征X80的韧性断裂过程,通过模型分析不同应力状态下的孔洞演化规律,并通过区域积分的方法获得了表征X80韧性断裂的特征值。方剑^[6]使用GTN模型对三点弯曲试样进行研究,得到含不同深度裂纹试样的 J - R 阻力曲线。Kumar等人^[7]利用GTN模型模拟研究管线环向裂纹延性扩展阻力曲线,Chang等人^[8]运用GTN模型对内压和弯曲作用下含裂纹管道的延性

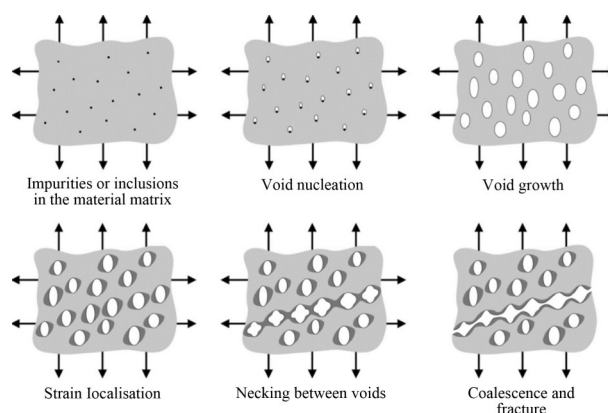


图1 孔洞成核、增长、扩展过程示意

Fig. 1 Schematic of nucleation, growth and coalescence of voids

裂纹扩展进行了模拟。现有先进的损伤模型多为非耦合模型或半耦合模型,即不考虑损伤的微观机理,通过多参数标定实现对特定载荷条件下的损伤行为的表述,但通过该方法获得的断裂应变分布规律并不唯一。因此,本研究采用基于微孔隙生长理论的GTN耦合模型来预测API X80管线钢的断裂损伤行为,首先通过理论分析明确GTN模型中的孔隙率增长过程可以简化为孔隙成核、生长直至失效的过程,后采用有限元模拟仿真反向标定方法,标定宽应力三轴度拉伸的载荷位移曲线,最后提出适用于API X80管线钢的GTN损伤模型参数。

1 GTN损伤模型

1.1 Gurson屈服条件及流动规律

Gurson模型基于以下观察:通过将经典塑性理论扩展到含有稀孔隙浓度(初始孔隙率 f_0)的合金,可从宏观上描述塑性金属中的孔洞的形核与长大过程。假设在米塞斯屈服条件下,考虑一个包含单个球形孔洞的单元模型, Gurson提出屈服条件^[1-2]:

$$\Phi = \left(\frac{q}{\sigma_y} \right)^2 + 2f \cosh \left(-\frac{3}{2} \frac{p}{\sigma_y} \right) - (1+f^2) = 0 \quad (1)$$

式中 q 为有效 Von Mises 应力; p 为静水压力; σ_y 为基体材料的屈服应力。作为等效塑性应变的函数, 空隙体积分数 f 由式(2)确定:

$$f = \frac{V_{\text{void}}}{V_{\text{matrix}}} \quad (2)$$

式中 V_{void} 为孔洞体积 V_{void} ; V_{matrix} 为总矩阵体积。当 $f=0$ 时, 表示该材料是完全致密的, Gurson 屈服条件可以简化为冯·米塞斯准则; 在另一个极端情况, $f=1$ 意味着材料已经失去了所有的应力承载能力, Tvergaard 为改进圆柱孔和球面孔周期阵列的模型预测, 引入三个损伤参数 q_1, q_2, q_3 , 并将式(1)扩展到式(3):

$$\Phi = \left(\frac{q}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f \cosh \left(-\frac{3}{2} q_2 \frac{p}{\sigma_y} \right) - (1+q_3 f^2) = 0 \quad (3)$$

1.2 孔洞成核与增长

金属中塑性裂纹的扩展受随后空洞的形核、生长和聚合控制。Gurson 提出了孔洞体积分数的总变化公式:

$$\dot{f} = \dot{f}_{\text{gr}} + \dot{f}_{\text{nuc}} \quad (4)$$

式中 $\dot{f}_{\text{gr}}$ 反映现有孔洞的增长; $\dot{f}_{\text{nuc}}$ 捕捉新孔洞的成核。基于质量守恒将孔洞的增长用孔洞体积分数表示为:

$$\dot{f}_{\text{gr}} = (1-f) \dot{\epsilon}^{\text{pl}}: I \quad (5)$$

孔洞形核是一个复杂的过程, 与材料的微观结构密切相关。Chu 和 Needleman 提出了塑性应变控制关系:

$$\dot{f}_{\text{nuc}} = A(f_N, S_N, \epsilon_N) \dot{\epsilon}_{\text{eq}}^{\text{pl}} \quad (6)$$

当应变形核服从正态分布时:

$$A(f_N, S_N, \epsilon_N) = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_{\text{eq}}^{\text{pl}} - \epsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中 ϵ_N 为形核平均值, S_N 为标准差, f_N 为形核孔洞的体积分数。从式(4)可以看出, Gurson-Tvergaard 模型预测了现有孔洞的增长和新孔洞的成核^[2,4-5], 但没有考虑孔洞聚合。为此, Tvergaard 和 Needleman 引入了一个函数 f^* 来模拟伴随孔洞聚合的应力承载能力的快速下降。有效孔洞体积分数 f^* 是实际孔洞体积分数 f 的函数:

$$f^* = \begin{cases} f & ; f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_u - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c) & ; f_c < f < f_F \\ f_u & ; f \geq f_F \end{cases} \quad (8)$$

式中 $f_u^* = 1/q_1$; f_c 为孔洞开始聚合时的临界孔洞体积分数; f_F 为材料完全失效时的孔洞体积分数。当材料的实际孔洞体积分数 f 增长到 f_c 时, 孔洞开始聚合, 此时材料的承载能力迅速降低。

图2解释了函数(8), 说明了原始条件(4)适用于 $f < f_c$, 其中失效受孔洞形核和生长控制。对于 $f_c < f < f_F$, 由于孔洞聚合而加速的损伤演化表示为 f_u^* 。当 $f > f_F$ 时, 材料失效。一旦单元的所有材料点都失效, 就可以将其从有限元网格中移除。

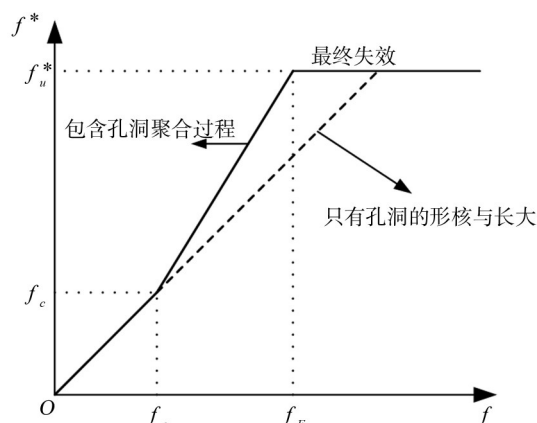


图2 孔洞的形核长大与失效过程

Fig. 2 Nucleation growth and failure process of voids

GTN 模型广泛用于数值预测不同几何试样、材料界面及焊接接头的延性裂纹扩展及断裂韧性。损伤模型的应用和开发目前主要集中于采用试验或数值模拟相结合的方法, 不仅可以直接采用损伤模型预测管道的破坏, 而且可以用于模拟分析不同裂纹深度及试样尺寸对标准试样阻力曲线的影响。

2 缺口拉伸试验及数值模型

GTN 损伤理论模型通过商业有限元计算平台 ABAQUS 实现数值模拟仿真, 为了准确测定损伤断裂模型 GTN 的模型参数, 本研究设计了 4 种不同缺口形状的试样进行拉伸试验^[9-10], 所有试样均沿钢管的轴向取样。缺口试样几何尺寸如图3所示, 图 3a~3c 为薄板缺口拉伸试样 (Notch tension radius

6.67, NT6.67; Notch tension radius 10, NT10; Notch tension radius 20, NT20), 图3d为半径4 mm的中心孔拉伸试样(Central hole radius 4, CH4)。对4种不同形状缺口试样分别进行了3组试验, 试样两端被完全夹紧, 并通过引伸计测量试样的变形量。拉伸试验在100 kN MTS 电子万能试验机上进行, 加载速率0.375 mm/min, 直至试样被拉断。

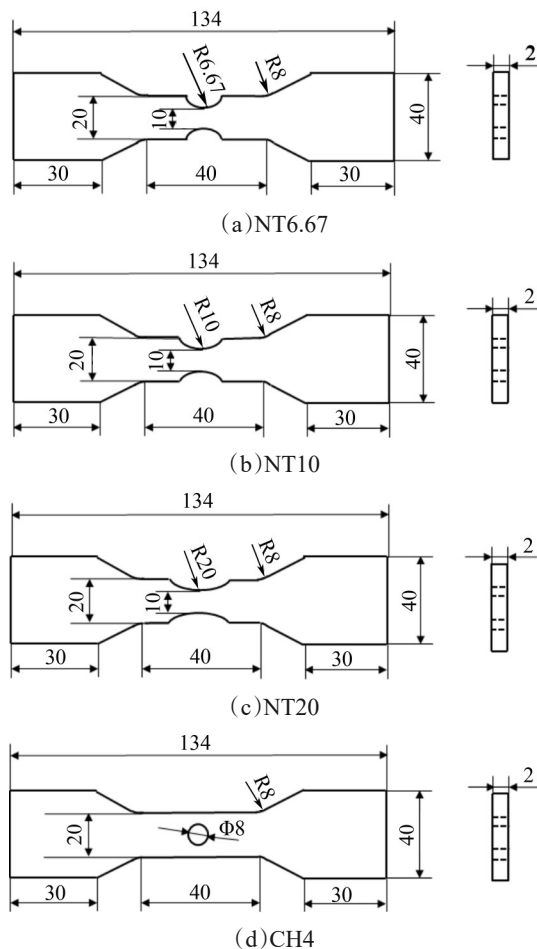


图3 缺口试样几何尺寸

Fig. 3 Geometry of the notch specimens

采用有限元软件ABAQUS按照缺口拉伸试样进行1:1建模^[11]。有限元模型单元采用8节点实体减缩积分单元C3D8R。4种试样的模型如图4所示, 为了精确模拟裂纹的扩展, 模型在缺口断裂区域进行了网格局部加密。

3 GTN损伤模型的标定

由于GTN模型的预测精度在很大程度上依赖

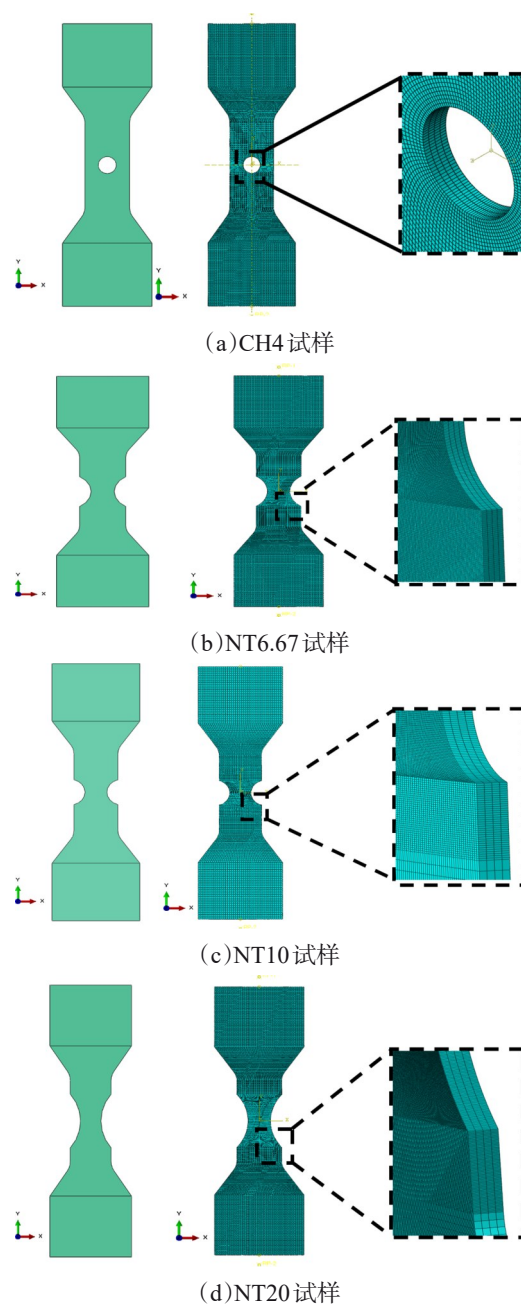


图4 GTN参数标定缺口拉伸试样模型及网格

Fig. 4 Schematic diagram of numerical simulation model

于9个模型参数的准确性, 因此材料模型的校准成为研究的焦点。一般情况下, GTN损伤模型需要确定的9个参数, 即: $\{q_1, q_2, q_3, f_0, f_c, f_F, f_N, \epsilon_N, S_N\}$, 虽然这些参数与材料中孔洞演化相关, 但它们与物理量不是直接相关的, 也不容易测量。前三个参数由Tvergaard提出, 确定屈服函数的演化。

(1) Tvergaard参数 q_i 的标定。

Needleman和Tvergaard通过研究给出了推荐

使用以下参数: $q_1=1.5, q_2=1, q_3=2.25$ 。

(2) 孔隙度参数的标定。

初始孔洞体积分数 f_0 与金属材料的化学成分及相应的微观结构密切相关。严格地说, f_0 的值可以通过实验观察到的粒子的平均维数来确定。对于钢, f_0 可以通过冶金检验来确定,例如通过确定氧化物和 MnS 夹杂物的体积分数,Corigliano 应用卡尔曼滤波技术研究大范围的初始孔隙度值 $0.000 1 \leq f_0 \leq 0.05$ 。

分析表明,对于单轴拉伸试验,当 f_0 增加时,屈服发生的速率显著加快。初始孔隙率对材料软化行为的起始有明显的影响,但在较高的变形水平下对材料响应的影响有限。临界孔隙体积分数 f_c 不能直接确定,但往往是通过数值模拟与试验相结合的方法确定。在 q_1, q_2, q_3 固定的情况下,最优值 f_c 可以通过比较有限元模拟与试验结果(如光滑拉伸试样,缺口拉伸试样,中心裂纹板或紧凑型拉伸试样的试验)来确定。大量文献研究最终得出 f_c 的推荐范围为 $0.01 \leq f_c \leq 0.05$ 。材料最终失效时的孔洞体积分数依赖于初始孔洞体积分数,通常认为其取值范围在 $0.15 \leq f_f \leq 0.3$ 。

(3) 形核函数参数的标定。

剩余三个参数 f_N, ε_N, S_N 描述了新孔洞的形核。这种形核规律代表了次生孔洞的影响,次生孔洞是由与基体有强烈键合的粒子引发的。假设小颗粒的形核受塑性变形控制,对三轴度不太敏感。需要三个参数来描述所提出的正态分布:能形核的孔洞的总量 f_N ,它们能形核的平均变形 ε_N ,以及围绕这个平均值的标准偏差 S_N 。对于形核孔洞体积分数 f_N ,范围 $0.001 \leq f_N \leq 0.1$ 。确定 ε_N, S_N 是一个更复杂的任务,因为它们的值取决于粒子间距的复杂统计数据。对于大多数金属来说, ε_N 和 S_N 相应的经验范围为 $0.1 \leq \varepsilon_N \leq 0.3, 0.05 \leq S_N \leq 0.1$ 。

GTN 参数的敏感性分析已在文献中有所报道。影响韧性材料非线性响应的主要参数是 Tvergaard 系数 q_i 、初始孔隙率 f_0 和成核孔隙体积分数 f_N ;GTN 参数的校准并不能保证唯一的解,即不同的参数集可以拟合相同的实验数据。目前 GTN 模型的参数标定过程主要是通过不断地尝试迭代,得到有限元模拟结果与试验结果较为一致的结果,从而得到最

终的标定参数。

4 试验结果

针对四个本构模型——母材及三个不同匹配程度焊缝的应力-应变曲线的材料参数,分别应用到四种不同缺口形状模型中。对 16 种不同材料属性、不同缺口形状模型进行模拟,首先需要标定母材对应的 GTN 参数,经过参数的调试,得到参数变化后载荷-位移曲线或者应力-应变曲线的变化规律,同时使用控制变量方法,较为快速地标定出对应的参数。

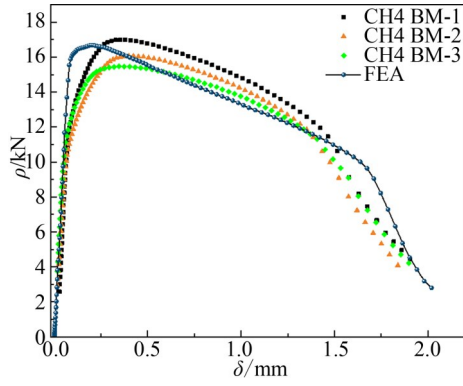
例如在数值计算过程中会发现当初初始孔隙率 f_0 、成核孔隙体积分数 f_N 、临界孔隙体积分数 f_c 变小时,标定曲线的损伤拐点会向右移动;初始孔隙率 f_0 、成核孔隙体积分数 f_N 参数变化对结果的影响相较于临界孔隙体积分数 f_c 更大。然后在母材参数标定好的基础上对焊缝参数进行了进一步标定。

每种应力-应变曲线参数对应的模型,其中有三个试样(CH4, NT6.67, NT10)是拉伸过程加引伸计测量得出的力-位移曲线,还有一种试样(NT20)通过 DIC 方法标定出应力-应变曲线,最终四种试样的数值计算结果与试验结果基本吻合,可以得出较为一致的 GTN 模型参数。图 5 为管材 GTN 参数标定结果,图 6 为 WM-1(低匹配 10%)GTN 参数标定结果,图 7 为 WM-2(高匹配 10%)GTN 参数标定结果,图 8 为 WM-3(低匹配 5%)GTN 参数标定结果。对于 NT 试样,标定结果较为准确,而对于 CH 试样,四种本构模型标定结果有一定偏差。在图 5~图 8 中,(a)、(b)、(c)图纵坐标表示横梁支反力,横坐标表示缺口断裂位置的轴向位移,(d)图纵坐标表示应力值大小,即支反力除以试样最小截面积,横坐标表示缺口断裂处的轴向应变。同时在表 1 中列出了对应的 GTN 参数标定结果。

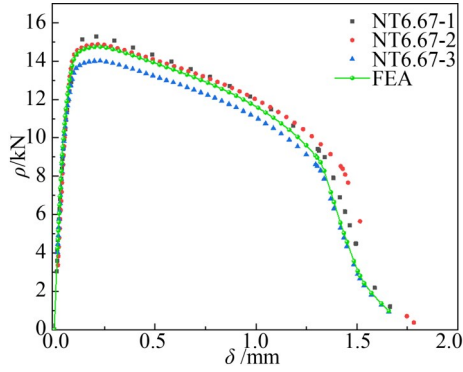
表 1 GTN 模型标定参数

Table 1 GTN model calibration parameter

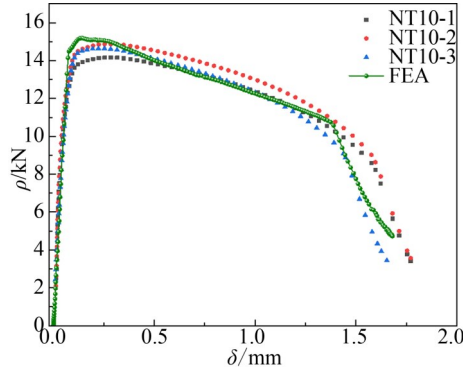
	q_1	q_2	q_3	ε_N	S_N	f_N	f_0	f_c	f_f
BM	1.5	1	2.25	0.2	0.05	0.008	0.0001	0.05	0.25
WM-1	1.5	1	2.25	0.2	0.05	0.005	0.01	0.05	0.25
WM-2	1.5	1	2.25	0.2	0.05	0.008	0.01	0.05	0.25
WM-3	1.5	1	2.25	0.2	0.05	0.008	0.005	0.05	0.25



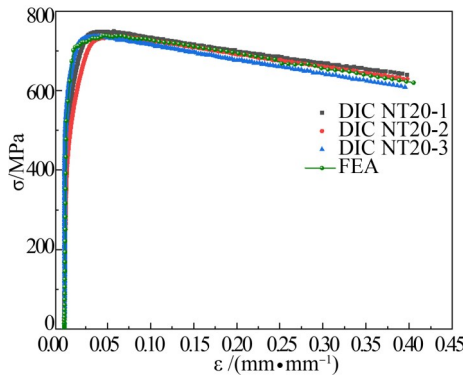
(a)CH4 试样



(b)NT6.67 试样



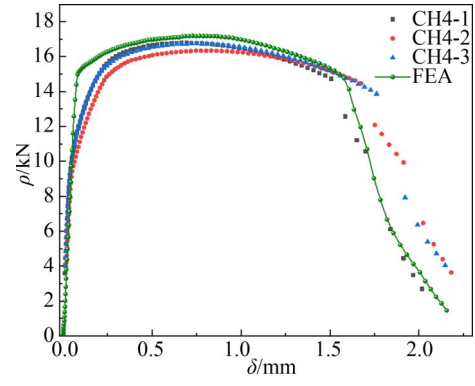
(c)NT10 试样



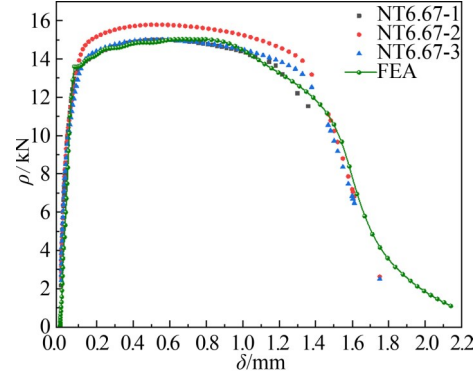
(d)NT20 试样

图5 X80-BM的GTN参数标定

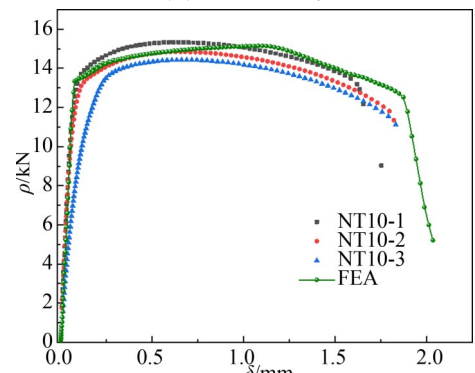
Fig. 5 GTN parameter calibration of X80-BM



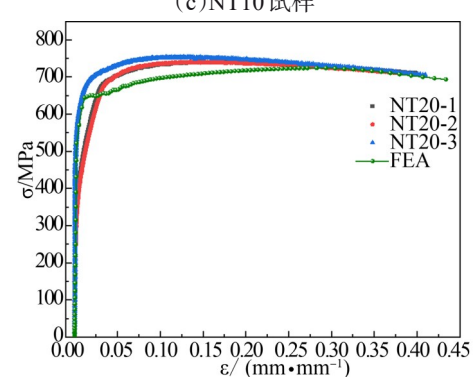
(a)CH4 试样



(b)NT6.67 试样



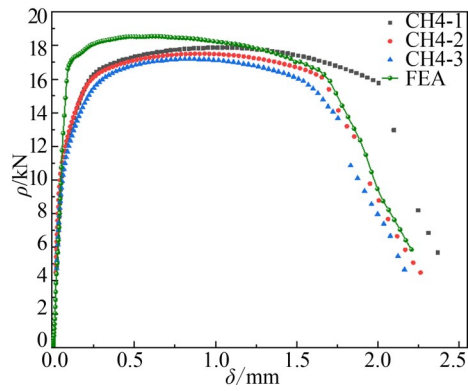
(c)NT10 试样



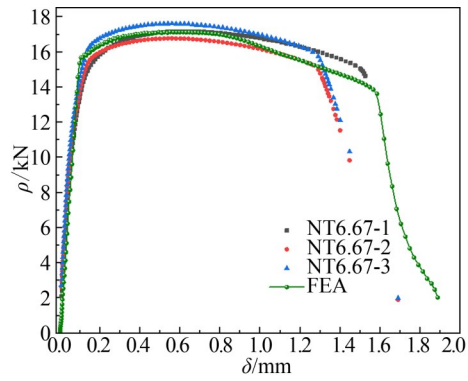
(d)NT20 试样

图6 X80-WM-1的GTN参数标定

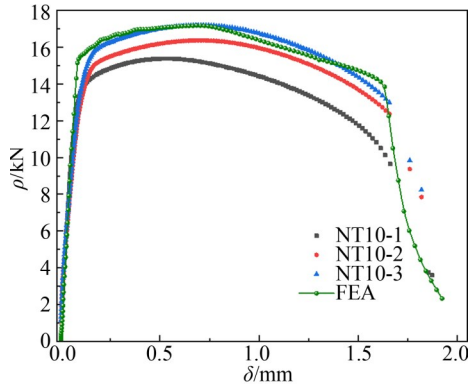
Fig. 6 GTN parameter calibration of X80-WM-1



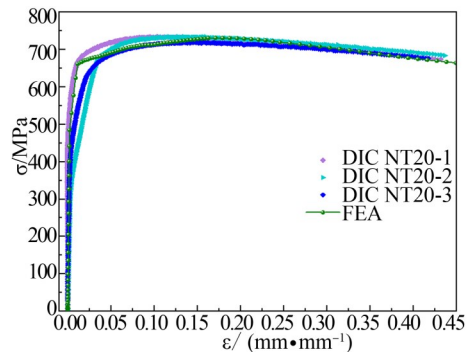
(a)CH4 试样



(b)NT6.67 试样

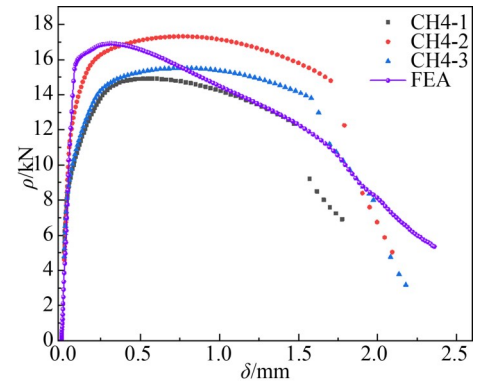


(c)NT10 试样

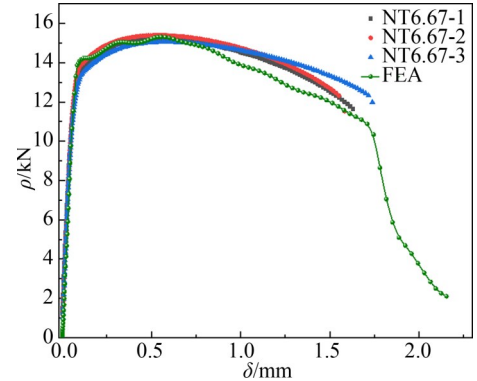


(d)NT20 试样

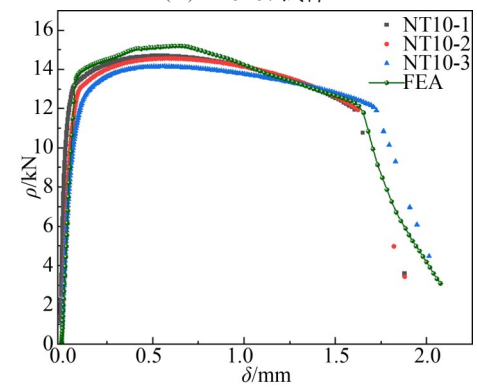
图7 X80-WM-2的GTN参数标定
Fig. 7 GTN parameter calibration of X80-WM-2



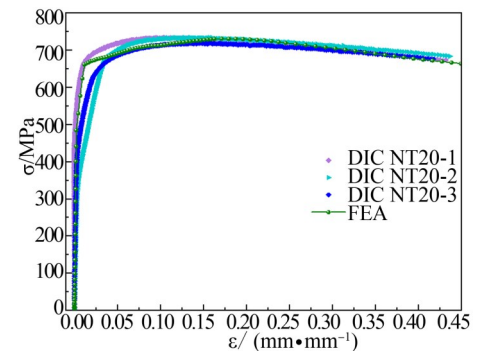
(a)CH4 试样



(b)NT6.67 试样



(c)NT10 试样



(d)NT20 试样

图8 X80-WM-3的GTN参数标定
Fig. 8 GTN parameter calibration of X80-WM-3

4 结论

采用试验-有限元结合的方法,针对X80管线钢母材及其三种不同匹配程度焊缝,通过设计不同缺口形状的拉伸试样,成功标定了各自的GTN损伤模型参数,为更加准确地模拟X80环焊缝断裂行为提供依据。

(1)通过多次迭代,获得了X80管材GTN参数,发现影响韧性材料非线性响应的主要参数是Tvergaard系数 q_i 、初始孔隙率 f_0 和成核孔隙体积分 f_N 。

(2)对比焊接接头不同部位的标定参数可以发现,GTN模型中的不同匹配强度的焊缝金属与管材的孔隙度参数、形核函数参数相差较大,不能直接采用同一组参数进行管道环焊缝的韧性断裂模拟。

(3)GTN模型在微观力学领域取得了卓越的成就,但模型对孔隙成核、孔隙聚集等行为依旧做了经验性假设,导致Gurson模型中一些相关系数丧失真实的物理意义。因此未来Gurson类损伤模型的研究方向,应在损伤机制中充分考虑罗德角、第二和第三偏应力张量不变量等塑性状态变量的依赖性,建立一个完全耦合塑性本构驱动的损伤本构。

参考文献:

- [1] 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): 297–300.
- [2] Tvergaard V, Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(1): 157–169.
- [3] Han G, He J, Lin L Z. Simple shear methodology for local structure-property relationships of sheet metals: State-of-the-art and open issues[J]. Progress in materials science, 2024, 143(6): 101266.1–101266.57.
- [4] Dunand M, Mohr D. On the Predictive Capabilities of the Shear Modified Gurson and the Modified Mohr-Coulomb Fracture Models over a Wide Range of Stress Triaxialities and Lode Angles[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2011, 59(7): 1374–1394.
- [5] 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(09): 1022–1030.
CUI Z H, LIU Y H, WANG H T, et al. Calibration and Application of GTN Damage Model Parameters for X80 Pipeline Girth Welds[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(09): 1022–1030.
- [6] 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(03): 99–103.
FANG J, QUI B W, YUAN Z X. Three-point bending crack propagation test and finite element simulation of X80 steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(03): 99–103.
- [7] Kumar A, Naveen, Arora K S, et al. Micromechanical modelling of API X80 linepipe steel[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 199: 104755.
- [8] Chang Q, Cao Y, Zhen Y, et al. Study on the effect of loading conditions on the fracture behavior of pipeline with girth weld[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 203: 104940.
- [9] 李一哲,龚宝明,刘秀国,等. 面外拘束效应对单边缺口拉伸试样断裂韧性的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(12): 1785–1791.
LI G Z, GONG B M, LIU X G, et al. The effect of out-of-plane constraint on the fracture toughness of single-edge notched tensile specimens[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(12): 1785–1791.
- [10] 李一哲,王东坡,邓彩艳,等. 单边缺口拉伸试样的断裂韧性计算方法对比[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 59–62.
LI Y Z, WANG D P, DENG C Y, et al. Comparison of Fracture Toughness Calculation Methods for Unilateral Notch Tensile Specimens[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2017, 38(4): 59–62.
- [11] 邱保文. X80管线钢韧性断裂研究与有限元模拟[D]. 湖北:武汉科技大学, 2010.
QIU B W. Research on the ductile fracture of X80 pipeline steel and finite element simulation [D]. Hubei: Wuhan University of Science and Technology, 2010.