

# 基于 GTN 模型对金属材料韧性断裂的模拟

邓 锐 陈志远

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210000)

**摘要:** 基于 GTN 损伤模型采用 Abaqus/explicit 数值模拟软件模拟了 API X65 管线钢和 Al 5052 铝合金单轴拉伸实验,分析了材料损伤的演化过程,讨论了不同硬化指数材料以及 GTN 模型参数对模拟结果的影响和模型中参数标定的依据。结果显示:损伤模型可以准确地模拟材料的韧性断裂以及材料的损伤演变;硬化指数小的材料的承载能力受内部损伤的程度影响较大;形核参数  $f_N$  对模拟结果影响最大, $f_N$  形核参数较大,材料形核率更高,试样的临界断裂应变减小。

**关键词:** 韧性断裂; GTN 模型; 有限元; 损伤模型参数

**中图分类号:** TN104.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 130.15

## Numerical investigation for ductile fracture of metal based on GTN model

Deng Rui Chen Zhiyuan

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** In this paper, FE damage simulations using the GTN model have been performed for smooth tensile tests of API X65 steel and Al-alloy 5052. Compared of experimental data and FEM, the parameters in the GTN model have been calibrated and the influence of parameters has been discussed. The damage evolution process was also described in the paper. Results show that GTN model successfully simulated the uni-axial tensile test and the bearing capacity of small material hardening index are greatly influenced by the internal damage degree.

**Keywords:** toughness fracture; GTN model; finite element; damage model parameters

### 1 引言

工程材料中损伤断裂是常见的一种失效形式,如风机叶片、车桥桥壳、传动轴承等<sup>[1-4]</sup>。金属材料在经过较大的塑性变形后一般发生韧性断裂。金属材料断裂前,其内部微孔洞会聚合长大形成微裂纹以及其他形式的微缺陷,使金属材料性能劣化,损伤积累会导致金属材料失效断裂。材料的断裂研究就方法而言,分为 2 大类:一种是经典的场论方法,从连续介质力学的角度出发,通过描述裂纹尖端的应力场强度,分析材料的断裂。Wang 等人<sup>[5]</sup>基于三维有限元分析了单边裂纹应力场的分布,总结了各种裂尖约束效应对断裂的影响。苏维国等人<sup>[6]</sup>基于超奇异积分方程建立了的 Line-Spring 模型,得到了裂纹尖端应力强度因子的数值解,为胶接修补结构的承载能力分析以及

改进设计提供理论依据。另一种是基于材料断裂的物理机理提出的局部细、微观损伤方法,从微观机理出发揭示材料的损伤断裂过程。Linse 等人<sup>[7]</sup>基于损伤理论,模拟了压力容器钢在温度与辐射的影响下的脆硬转变,分析了温度及辐射对材料的影响。Achouri 等人<sup>[8]</sup>模拟了高强度低合金钢板材冲压成型过程中的损伤的演变过程,总结了凸凹模间隙对成型极限的影响。Katani 等人<sup>[9]</sup>分析了微观结构形貌对 Ti-6Al-4V 力学性能以及断裂扩展的影响,模拟的相边界裂纹扩展结果与实验结果一致。

基于数值模拟软件模拟了单轴拉伸变形过程,分析了材料损伤(孔洞)形核长大以及聚合的演化过程,讨论了不同硬化指数材料以及 GTN 模型参数对模拟结果的影响,探索了模型中参数标定的依据。

收稿日期:2014-11

## 2 GTN 模型

Gurson 在均匀的材料中引入圆柱形微孔洞和球形微孔洞,形成多孔质体,并对这种多孔质体的塑性变形情况进行了分析,得到了多孔塑性材料的屈服函数。其屈服函数:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0}\right)^2 + 2q_1 f \cosh\left(\frac{3}{2} \frac{q_2 \sigma_m}{\sigma_0}\right) - (1 + q_3 f^2) = 0 \quad (1)$$

式中: $\sigma_{eq}$ 、 $\sigma_0$ 、 $\sigma_m$  分别为宏观的等效 Mises 应力,材料的屈服应力,平均应力。 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  为材料常数。 $f$  为孔隙体积分数。同时,该模型还加入了孔隙形核参数( $f_N$ 、 $S_N$ 、 $\epsilon_N$ )、孔隙初始聚合失效参数( $f_0$ 、 $f_c$ 、 $f_F$ )用以表征材料内部孔洞的形核长大过程。

在实际应用中,某种材料的大部分模型参数都是可以事先确定的,部分模型参数需要根据材料的实验结果与有限元结果标定<sup>[10]</sup>。其中,材料本构参数  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ ,通常认为是材料无关的,一般取  $q_1 = 1.5$ ,  $q_2 = 1.0$ ,  $q_3 = (q_1)^2 = 2.25$ 。 $\epsilon_N$ 、 $S_N$  的取值对于大部分工程合金材料是独立的,通常取  $\epsilon_N = 0.3$ ,  $S_N = 0.1$ 。另外,可以给出通过 Mn、S 成分来确定  $f_0$  的方法:

$$f_0 = 0.054 \left( S\% - \frac{0.001}{Mn\%} \right) \quad (2)$$

对于  $f_N$ 、 $f_c$ 、 $f_F$ ,可以从单轴拉伸试验确定。

## 3 单轴拉伸实验模拟

将对比 FEM 单轴拉伸模拟结果与实验结果,标定材料的模型参数,以及结合单轴拉伸的变形过程讨论不同参数对模拟结果的影响。

### 3.1 材料力学性能

本节选取了 Kim 的 API X65 管线钢拉伸实验结果<sup>[11]</sup>以及 Guo 的 Al 5052 铝合金的拉伸实验结果<sup>[12]</sup>作为参照,其材料力学性能如表 1 所示。

表 1 API X65 钢以及 Al 5052 铝合金的力学性能

	杨氏模量	泊松比	屈服强度	拉伸强度
	/GPa		/MPa	/MPa
X65	210.7	0.3	464.5	563.8
Al 5052	68.9	0.33	209.6	272.2

### 3.2 几何及有限元模型

有限元模拟基于 Abaqus/explicit,几何尺寸及网格划分如图 1 所示。由于试样是轴对称的,故采用四结点双线性轴对称四边形单元(CAX4R)模拟 1/4 的试样。端部为位移边界条件。GTN 参数的选取原则遵循第 1 部分讨论的方法,其中  $q_1 = 1.5$ ,  $q_2 = 1.0$ ,  $q_3 = (q_1)^2 = 2.25$ ,  $\epsilon_N = 0.3$ ,  $S_N = 0.1$ ;根据 Franklin 的公式,计算得到  $f_0 = 0.00125$ ;  $f_N$ 、 $f_c$ 、 $f_F$  通过实验结果用有限元拟合得到,表 2 为参数选择情况。

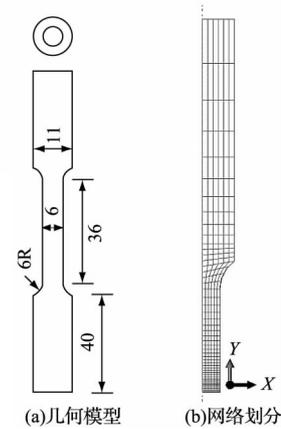


图 1 单轴拉伸试样

表 2 不同 GTN 模型参数的模型编号

材料	组号	$f_N$	$f_c$	$f_F$
API X65	F <sub>1</sub>	0.0008	0.015	0.25
	F <sub>C1</sub>	0.0008	0.100	0.25
	F <sub>N1</sub>	0.0080	0.015	0.25
Al 5052	F <sub>2</sub>	0.0012	0.005	0.12
	F <sub>C2</sub>	0.0012	0.015	0.12
	F <sub>N2</sub>	0.0025	0.005	0.12

### 3.3 结果讨论

如图 2 所示,名义应变  $\epsilon = 0.23$  材料孔隙率 VVF 的分布。

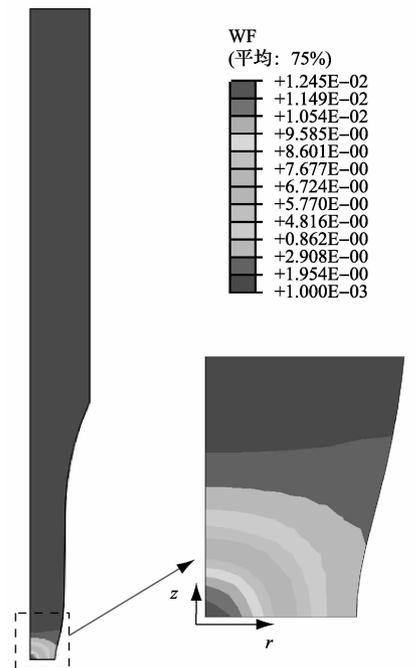


图 2 名义应变  $\epsilon = 0.23$  时材料空隙率 VVF 的分布

在拉伸过程中,材料中的孔隙率随着变形逐渐增加。如图3,从初始(变形) $f_0=0.125\%$ ,到缩颈开始时(工程应变 $\epsilon=0.2$ ) $f=0.8\%$ ,微孔洞开始在颈缩处形核。随着试样变形的继续,试样内的微孔洞迅速长大,微孔洞之间互相聚合,试样开始形成宏观裂纹,试样的承载能力急剧下降。同时需要指出的是,在颈缩 $r=0$ 处,材料的损伤最大。

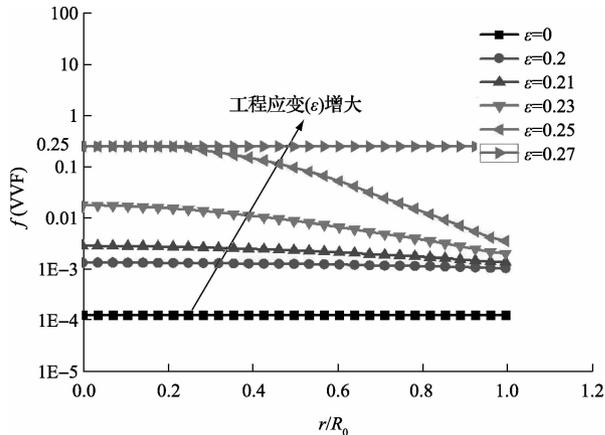


图3 X65钢Z=0轴向(r方向)材料孔隙率(f)在变形过程中的分布变化情况

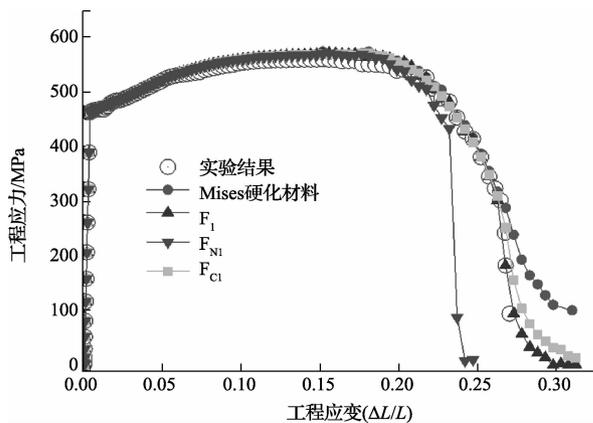


图4 API X65 管线钢拉伸实验结果与有限元结果对比

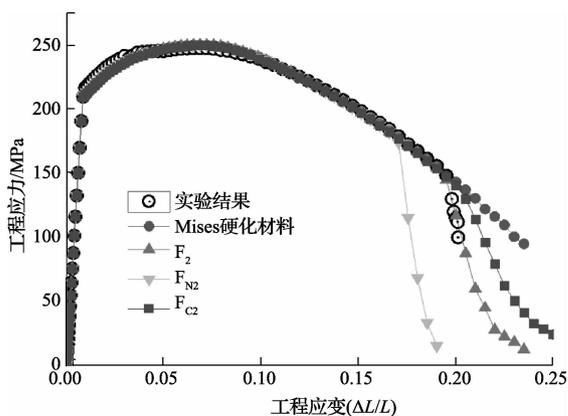


图5 Al 5052 铝合金拉伸实验结果与有限元结果对比

从图4和5可以看出,与幂硬化mises屈服条件相比,GTN模型从微观断裂机理出发准确地模拟了单轴拉伸试样的韧性断裂过程。

对于不同的形核参数的模型,在变形过程中,所产生的损伤深度不同。当形核参数 $f_N$ 较大时,如 $F_{Ni}$ 形核参数 $> F_i$ 形核参数,试样快速大量形核,试样的承载能力下降,试样的临界断裂应变减小。

模型的临界聚合参数 $f_c$ 与完全失效参数 $f_F$ 对材料的影响主要体现在材料的失效阶段;当 $f_c$ 和 $f_F$ 的值较小时,材料内的微孔洞在较小的孔隙率下聚合、快速长大,最终失效断裂。从图3中看出, $F_i$ 模型较 $F_c$ 模型,试样承载能力在达到临界值之后迅速下降,试样很快断裂失效。

需要指出的是,硬化指数较小的材料(Al 5052)模拟结果受模型参数的影响比硬化指数大的材料(API X65)更明显。对于硬化指数较小的材料,损伤理论与非损伤理论的模拟结果差别较大,GTN模型的有限元模拟结果更接近实验的情况。

#### 4 结论

基于Gurson细观损伤模型模拟了API X65 管线钢和Al 5052 铝合金单轴拉伸以及单边裂纹弯曲变形过程。从结果中可以看出:1)模拟的结果与实验结果一致,Gurson损伤模型中的空洞聚合长大很好地描述了宏观断裂的物理机制,模拟结果更贴合实际。2)不同的材料,材料内部缺陷对其影响程度不同。硬化指数小的材料受微孔洞的影响较大。3) $f_N$ 形核参数较大,材料形核率更大,试样的临界断裂应变减小。当 $f_c$ 和 $f_F$ 的值较小时,材料在较小的孔隙率下便可以聚合长大,材料承载能力下降迅速。

#### 参考文献

- [1] 李鑫. 小波分析在滚动轴承故障信号处理中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(6): 65-67, 71.
- [2] 黄海鸿, 姚结艳, 刘儒军, 等. 基于金属磁记忆技术的车桥桥壳损伤检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(7): 770-776.
- [3] 胥永刚, 孟志鹏, 赵国亮. 基于双树复小波变换的轴承复合故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 447-452.
- [4] 张保钦, 雷保珍, 赵林惠, 等. 风机叶片故障预测的振动方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 285-291.
- [5] WANG E Y, ZHOU W X. Three-dimensional finite element analysis of crack-tip fields of clamped single-edge tension specimens-Part I: Crack-tip stress fields[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 116(2): 122-143.
- [6] 苏维国, 穆志韬, 郝建滨, 等. 金属裂纹板复合材料修

- 补结构的超奇异积分方程方法[J]. 工程力学, 2014, 31(11):31-38.
- [7] LINSEA T, KUNA M, VIEHRIG H-W. Quantification of brittle-ductile failure behavior of ferritic reactor pressure vessel steels using the Small-Punch-Test and micro-mechanical damage models[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 614(3): 136-147.
- [8] ACHOURI M, GERMAIN G, DAL SANTO P, et al. Experimental and numerical analysis of micromechanical damage in the punching process for High-Strength Low-Alloy steels[J]. Materials and Design, 2014, 56(10):657-670.
- [9] KATANI S, MADADI F, ATAPOUR M, et al. Micromechanical modelling of damage behaviour of Ti-6Al-4V[J]. Materials & Design, 2013, 49(8): 1016-21.
- [10] BENSEDDIQ N, IMAD A. A ductile fracture analysis using a local damage model[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(4): 219-227.
- [11] OH C K, KIM Y J, BAEK J H, et al. A phenomenological model of ductile fracture for API X65 steel [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49(12):1399-1412.
- [12] GUO J, ZHAO S, MURAKAMI R I, et al. Experimental and numerical investigation for ductile fracture of Al-alloy 5052 using modified Rousselier model[J]. Computational Materials Science, 2013, 71(5): 115-123.

作者简介

邓锐, 1991年出生, 工学硕士, 主要研究方向为飞机结构三维疲劳断裂损伤容限设计技术。  
E-mail: dengrui\_nuaa@sina.com

(上接第53页)

- [4] 李彦, 李镛. 基于嵌入式 Linux 系统的双网卡大数据传输[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 1027-1032.
- [5] 李慧, 罗海勇, 徐俊俊, 等. 一种基于奇异值分解的射频指纹排序定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10):2219-2225.
- [6] WANG W, LI J W, HUANG F F, et al. Design and implementation of Log-Gabor filter in fingerprint image enhancement[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(3): 301-308.
- [7] 王伟希, 袁杰, 臧灵, 等. 基于局部特征的点模式指纹匹配算法[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(1):18-23.
- [8] 白一彤, 王宪. 一种自动确定分割阈值的指纹图像分割方法[J]. 计算机系统应用, 2009, 18(5): 25-28.
- [9] TOMIOKA, NISIYAMA S, ENOTO T. Nonlinear least square regression by adaptive domain method with multi plegenetical gorithills[J]. IEEE Transcation of Evolution Computation, 2007, 11(1):29-37.
- [10] MALTONI D, MAIO D, JAIN A K, et al. Handbook of fingerprint recognition [M]. Springer-Britain, 2009:15-23.

作者简介

毕雪芹, 工学硕士, 副教授, 主要研究方向为计算机测控系统。  
E-mail: bixueqin@126.com