

基于 GTN 模型的 20 钢孔洞扩张比数值模拟*

SIMULATION OF VOID GROWTH RATIO OF
20 STEEL BASED ON GTN MODEL

张颖** 刘爱玲 李彬 戴光

(东北石油大学 机械科学与工程学院, 大庆 163318)

ZHANG Ying LIU AiLing LI Bin DAI Guang

(Department of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

摘要 孔洞扩张比 V_c 可以作为描述钢材损伤时微孔洞演化情况的细观损伤变量, GTN 模型可用于金属塑性材料的细观损伤有限元模拟。应用 GTN 模型模拟 20 钢圆棒型缺口试件拉伸过程的不同阶段, 得到细观损伤参量应力三轴度 R_σ 、等效塑性应变 ε_p 、孔洞体积百分数 f 及孔洞扩张比 V_c 在试件中心截面的变化规律。结果表明: 在整个拉伸过程中, 上述参数的数值随着载荷的增加而增大, 且 ε_p 对 V_c 的影响较大。当试件断裂时, 试件缺口截面中心位置的细观损伤参量值大于缺口根部的值, 此时 20 钢的临界孔洞扩张比 V_{cc} 为 3.134。

关键词 GTN 模型 孔洞扩张比 20 钢 细观损伤

中图分类号 TH142.1

Abstract Void growth ratio V_{cc} can be used as a parameter of meso-damage to describe the evolution of voids, GTN model can be used to simulate meso-damage of plastic material. The paper simulates the evolution of meso-damage parameters of 20 steel in different tensile stage using GTN model. The results show that with the loads increasing, stress triaxiality R_σ , equivalent plastic strain ε_p , void volume fraction f and void growth ratio V_c tend to increase, and ε_p plays a significant impact on V_c . When the specimen fracture, the meso-mechanical damage parameters at the center of the section with notch of specimen are bigger than what at notch root and the corresponding value of V_{cc} of 20 steel is 3.134.

Key words GTN model; Void growth ratio; 20 steel; Meso-damage

Corresponding author: ZHANG Ying, E-mail: aezy163@163.com, Tel: +86-459-6504690, Fax: +86-459-6507673

The project supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No. 201239).

Manuscript received 20131203, in revised form 20131231

引言

金属塑性材料的断裂破坏可以认为是由材料内部孔洞形核、长大、聚合导致的。为了描述这种基于孔洞失效的断裂过程, Gurson 根据细观损伤力学的相关理论, 提出了适用于塑性材料的 GTN 模型^[1]。孔洞扩张比 V_c 是表征金属塑性材料内部微孔洞演化过程的重要参量, 而临界孔洞扩张比 V_{cc} 是金属塑性材料临界断裂的判别准数。 V_c 无法通过实验方法获取, 用有限元软件结合 GTN 模型可以模拟材料的 V_c 。如果模型材料参数设定准确, 就可以通过细观损伤参量的变化反映材料内部的损伤行为^[2,4]。

本文以金属塑性材料 20 钢为例, 对圆棒型缺口试件进行拉伸实验, 获取其主要的材料参数。选择最优

的 GTN 模型参数组合, 利用 Abaqus/Explicit 软件对 20 钢圆棒型缺口试件进行有限元模拟。获取 20 钢拉伸断裂过程中细观损伤参数数值的变化和 V_c 的变化规律及断裂时的 V_{cc} 。

1 GTN 细观损伤模型与 V_{cc} 的计算公式

在材料的损伤研究中, Tvergaard 和 Needleman 对 Gurson^[5] 模型进行了修正, 因此该模型称为 Gurson-Tvergaard-Needleman (简称 GTN) 模型^[6]。该模型的屈服面方程 ϕ 为

$$\phi = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_s^2} + 2q_1 f^* \cosh \frac{3q_2 \sigma_m}{2\sigma_s} - [1 + (q_3 f^*)^2] = 0 \quad (1)$$

式中, σ_e 为宏观 von Mises 等效应力, σ_m 为宏观静水应

* 20131203 收到初稿, 20131231 收到修改稿。黑龙江省自然科学基金 (E201239), 东北石油大学培育基金 (XN201403) 资助。

**张颖, 男, 1972 年 12 生, 黑龙江省大庆人, 汉族, 东北石油大学机械科学与工程学院, 教授, 过程装备与控制工程系主任, 博士, 主要从事石油石化行业大型承载结构无损检测与结构完整性评价的科研工作。

力, σ_s 为等效屈服应力, $q_1 \sim q_3$ 为引入的材料参数; f^* 为孔洞体积百分数 f 的函数。

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_U - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c) & f > f_c \end{cases} \quad (2)$$

式中, f_c 为孔洞开始汇合时的孔洞体积百分数; f_F 为材料断裂时的临界孔洞体积百分数, 此时 $f^* = f_U^* = 1/q_1$; f 的演化分为两部分

$$f = (f)_{\text{growth}} + (f)_{\text{nucleation}} \quad (3)$$

式中, $(f)_{\text{growth}}$ 是由于孔洞长大引起的孔洞体积百分比变化率, $(f)_{\text{nucleation}}$ 是由于孔洞形核引起的孔洞体积百分比的变化率。对于 $(f)_{\text{nucleation}}$ 有

$$(f)_{\text{nucleation}} = A \dot{\sigma}_e + B \sum_m \quad (4)$$

式中, 第一项表示塑性应变控制的形核机理, $\dot{\sigma}_e$ 为等效屈服应力率, 第二项表示应力控制的形核机理。

本文的模拟采用应变控制加载, 可只考虑上式中的第一项形核机理, 设想孔洞的形核过程服从正态分布, Chu 和 Needleman 给出了系数^{[7]99-100}

$$A = \frac{f_N}{h S_N \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_e^p - \varepsilon_N}{S_N}\right)^2\right], B = 0 \quad (5)$$

式中, f_N 为可以发生微孔洞形核的所有二相粒子的体积百分比, h 为硬化模量, ε_N 为孔洞形核的平均应变, S_N 为相应的标准方差, ε_e^p 为基体材料的等效塑性应变。

孔洞扩张比 V_G 的变化能直接反映材料宏细观损伤状态的实时变化, 可把 V_G 作为材料劣化状态的新损伤变量。在余寿文专著^{[7]111-113}和郑长卿专著^{[8]35-50}中, 对于缺口试件有

$$V_G = \varepsilon_p f(R_\sigma) = \varepsilon_p \exp(1.5 R_\sigma) \quad (6)$$

式中, ε_p 表示材料断裂时的等效塑性应变, R_σ 为材料断裂时的应力三轴度。材料断裂瞬时的 V_G , 被称为临界孔洞扩张比 V_{GC} 。故对材料细观力学的断裂判据为 $V_G \geq V_{GC}$ 。

V_{GC} 即有明确的细观物理背景, 又易于用宏观手段测量。轴对称缺口拉伸试件最小截面中心部位的孔洞扩张比 V_{GC} 的表达式为

$$V_{GC} = 2e^{0.5} \left(1 + \frac{D_F}{4r_F}\right)^{1.5} \ln\left(\frac{D_0}{D_F}\right) \quad (7)$$

式中, D_0 为试件缺口处初始截面直径; D_F 表示试样断裂时的最小截面处直径; r_F 为断裂时缺口处的曲率半径, 见文献^{[8]35-50}。

由上式可知, 通过实验可以用螺旋测微器多次测量试件断裂时的 D_F 、 r_F 和 D_0 , 取其平均值, 就可以计算得到试件断裂时的 V_{GC} 。

2 20 钢拉伸过程的细观损伤数值模拟

2.1 建立细观损伤模型

在拉伸实验过程中使用 20 钢圆棒型缺口试件, 其几何尺寸如图 1 所示。利用 Abaqus 软件进行有限元分析时, 建立试件的轴对称模型, 由于试件的对称性, 因此选取试件 1/4 截面进行建模。网格划分采用越靠近缺口根部网格越密的原则, 网格单元类型为 CAX4R。试件的模型图及网格划分图见图 2。

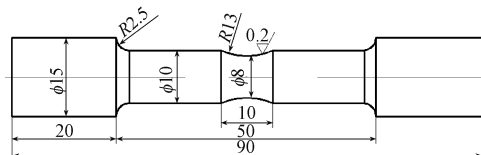


图 1 圆棒型缺口试件的尺寸

Fig. 1 Shape and size of the notched specimen

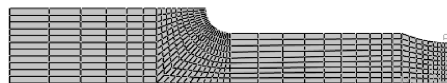


图 2 试件的 1/4 有限元模型及网格划分图

Fig. 2 1/4 of the finite element mesh model of notched specimen

2.2 材料参数的选择

采用位移控制的方式进行加载。模拟时, 20 钢初始材料参数如下: 弹性模量 E 为 200 000 N/mm², 材料密度 ρ 为 7 800 kg/m³, 泊松比 μ 为 0.3。

当塑性应变较小时, 由单向拉伸试验所得到的名义应力应变曲线与真实应力应变曲线是基本一致的。而当塑性应变很大时, 单向拉伸试验中的试件会出现颈缩, 因此试验结果在塑性应变很大时结果不精确。为保证模拟的准确性, 需输入真实应力和塑性应变。真实应力 σ_{true} 和真实应变 $\varepsilon_{\text{true}}$ 与单向拉伸实验中得到的名义应力 σ_{nom} 和名义应变 ε_{nom} 换算公式^{[9]166-167}

$$\sigma_{\text{true}} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0 \frac{l}{l_0}} = \sigma_{\text{nom}} (1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{true}} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (9)$$

式中, l_0 是试件的初始长度; l 是试件的当前长度; A_0 是试件的初始面积; A 是试件当前的截面面积。

在 Abaqus 中定义塑性材料参数时, 还需要使用塑性应变 ε_{pl} , 其表达式为^{[9]166-167}

$$\varepsilon_{\text{pl}} = |\varepsilon_{\text{true}}| - |\varepsilon_{\text{el}}| = |\varepsilon_{\text{true}}| - \frac{|\sigma_{\text{true}}|}{E} \quad (10)$$

根据式(8)~式(10)计算得到修正后的真实应力-塑性应变曲线, 如图 3 所示。

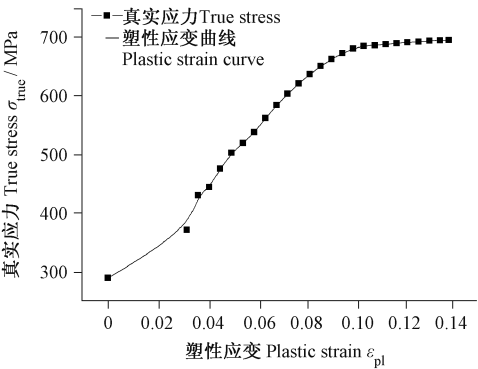


图 3 真实应力和塑性应变的关系曲线
Fig. 3 The relationship of true stress and plastic strain

2.3 GTN 模型参数的选取

在 Abaqus/Explicit 中需要定义的 GTN 模型参数有 $q_1 \sim q_3, f_c, f_F, f_N, \varepsilon_N, S_N$ 。对于前五个参数,可以使用推荐值^[10]: $q_1 = 1.5, q_2 = 1.0, q_3 = 2.25, f_c = 0.15, f_F = 0.25$ 。对于后三个参数,通过查阅相关文献^[11-13],对于塑性金属材料, $f_N = 0.01 \sim 0.04, \varepsilon_N = 0.1 \sim 0.3, S_N = 0.05 \sim 0.1$ 。由于目前还没有针对 GTN 模型在 20 钢拉伸过程模拟中的 f_N, ε_N 和 S_N 的确切值,因此本文对这三种损伤参数在给定范围内分别选择三个数值,进行数值模拟。根据式(6)可计算不同 GTN 模型参数组合下的 V_{GC} 值,表 1 为不同 GTN 参数组合模拟得到的 V_{GC} 。

根据式(7)测量 5 个试件中的 D_0, D_F 和 r_F ,可计算得到 20 钢的实际 V_{GC} 值,相关数据见表 2。对这 5 个试件的实际 V_{GC} 取平均值,得到 20 钢圆棒型缺口试件的实际 V_{GC} 为 2.96。

表 1 不同 GTN 参数组合模拟得到的 V_{GC}

孔洞形核体积分数 Nucleation void volume fraction f_N	孔洞形核平均应变 Nucleation void mean strain ε_N	标准方差 Standard deviation S_N	临界孔洞扩张比 Critical void growth ratio V_{GC}
0.01	0.3	0.07	3.134
0.02			2.666
0.04			1.873
0.01	0.1	0.07	2.105
	0.2		2.723
	0.3		3.134
0.01	0.3	0.05	2.774
		0.07	3.134
		0.1	3.233

由表 1 可知,最接近实际 V_{GC} 平均值的模拟结果为 3.134,此时模拟 V_{GC} 与实际结果的误差最小。故应采用此时的 GTN 参数组合进行有限元模拟,即 $q_1 = 1.5, q_2 = 1.0, q_3 = 2.25, f_c = 0.15, f_f = 0.25, f_N = 0.01,$

$\varepsilon_N = 0.3, S_N = 0.07$ 。对表 1 的数据分析可得,随着参数 f_N 的增大, V_{GC} 的值降低,而随着 ε_N 和 S_N 的增大, V_{GC} 的值随之提高。当 f_N 和 ε_N 数值增加时, V_{GC} 数值变化较大,故 f_N 和 ε_N 对 V_{GC} 的影响较大,而 S_N 对 V_{GC} 的影响最小。此规律可在模拟其他塑性材料 V_{GC} 时,用来调整 GTN 模型参数的取值。

表 2 测量计算得到的 V_{GC}
Tab. 2 The measurement calculated V_{GC}

试件号 No.	初始直径 Initial diameter D_0/mm	断裂直径 Fracture diameter D_F/mm	曲率半径 Curvature radius r_F/mm	临界孔洞扩张比 Critical void growth ratio V_{GC}
1	8.01	5.20	2.52	2.66
2	8.12	5.30	2.13	2.91
3	8.05	5.12	2.01	3.12
4	8.00	5.01	2.32	2.95
5	7.98	4.97	2.09	3.14

3 细观损伤参量的数值分析

采用有限元模拟的方法不仅可以获得 V_{GC} 还可以得到整个拉伸过程细观损伤参量和孔洞扩张比 V_G 的变化。本文选择计算 V_G 时用的应力三轴度 R_σ 、等效塑性应变 ε_p 和 GTN 模型中孔洞体积百分数 f 三个变量进行分析。根据拉伸应力-应变曲线,见图 4,选取屈服点 B、屈服阶段结束点 C、强度极限点 D 和断裂点 E 及加载过程中间点,这些点代表拉伸过程的不同阶段。本文主要分析试件中心截面的细观损伤变量在这些阶段的变化, x 表示试件 o-o 面中心 ($x = 0 \text{ mm}$) 到缺口根部 ($x = 4 \text{ mm}$) 的距离。图 5 ~ 图 8 分别为这些参数在试件中心截面的分布图。

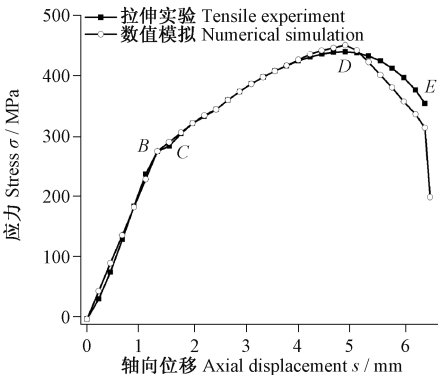


图 4 数值模拟曲线与拉伸实验应力曲线比较
Fig. 4 The comparison of numerical simulation and experimental results

1) 应力三轴度 R_σ : 在整个拉伸过程中,试件缺口中心到缺口根部的 R_σ 呈减小趋势。其中, $B \sim D$ 阶段 R_σ 减小缓慢, $D \sim E$ 阶段 R_σ 减小迅速,而在阶段 E 试件

截面中部的 R_σ 迅速减小。说明试件截面受 R_σ 的影响是从缺口根部向缺口中心发展的,且影响随着拉伸载荷的增加而加剧。

2) 等效塑性应变 ε_p : $B \sim C$ 阶段的 ε_p 增加平缓。 $C \sim D$ 阶段的 ε_p 随载荷的增加而不断上升,其最大值在缺口根部。 $D \sim E$ 阶段 ε_p 受到 R_σ 的影响, ε_p 的最大值在试件缺口中心呈减小趋势,并在试件截面中部 ε_p 开始出现上升。说明 ε_p 在强化阶段开始有明显的增加,在颈缩阶段截面中心 ε_p 的数值出现大幅增加,此时受 R_σ 影响, ε_p 从缺口根部向缺口中心发展。

3) 孔洞体积百分数 f : 在 GTN 模型中,认为材料的最后破坏是由微孔洞的汇合引起的,故把 f 作为考虑孔洞长大、汇合引起承载能力演化的损伤变量,由于其明确的物理意义,也经常作为评价微孔洞演变情况的参量。 $B \sim D$ 阶段 f 变化很小,说明此时只是孔洞的形核、长大阶段,材料的应力承载能力开始衰减。 $D \sim E$ 阶段切口截面中心的 f 迅速增加,说明此时有大量的孔洞聚集,材料的应力承载能力最终完全丧失,导致材料被破坏。从图 7 中可以看出随着载荷的增加, f 的最大值从试件缺口根部向心部发展,最终试件从心部开始断裂。

4) 孔洞扩张比 V_G : 根据式(6)计算圆棒缺口试件中心截面在拉伸不同阶段的 V_G ,其数值变化情况见图 8。从图中可以看出, V_G 的变化情况与 ε_p 和 f 的变化情况类似,在 $B \sim D$ 阶段试件截面 V_G 的数值有缓慢的增加,表明试件内部的微孔洞在缺口表面处不断形核、长大,随着载荷的增加,微孔洞不断聚合。在阶段 E 可获得圆棒缺口试件中心截面的临界孔洞扩张比 V_{GC} ,试件缺口心部的 V_{GC} 大于试件缺口根部的 V_{GC} 。当 V_{GC} 为 3.134 时,试件从截面中心处开始断裂,该值可以作为 20 钢拉伸断裂的判断准则。

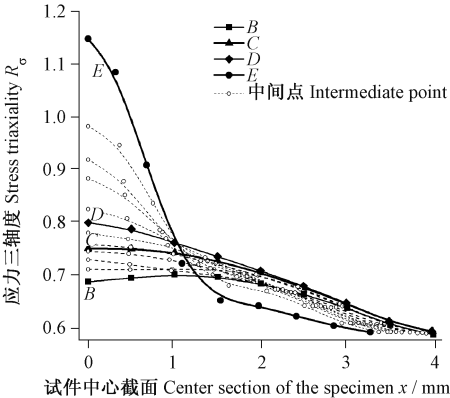


图 5 试件中心截面应力三轴度 R_σ 分布

Fig. 5 Distribution of stress triaxiality R_σ in center section of the specimen

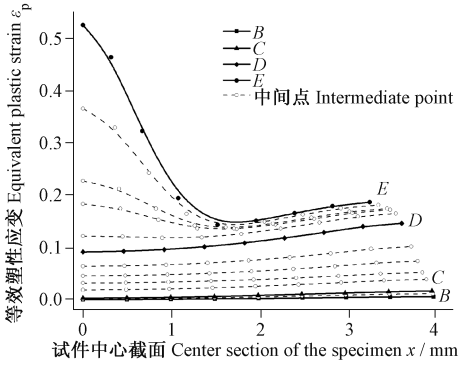


图 6 试件中心截面等效塑性应变 ε_p 分布

Fig. 6 Distribution of equivalent plastic strain ε_p in center section of the specimen

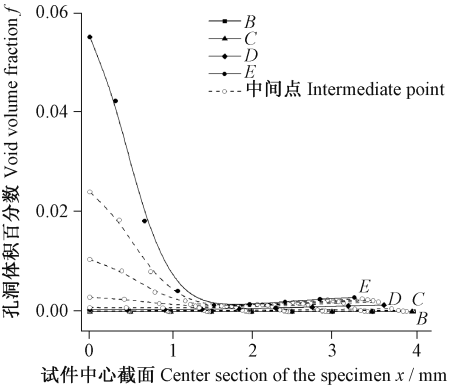


图 7 试件中心截面孔洞体积百分数 f 分布

Fig. 7 Distribution of void volume fraction f in center section of the specimen

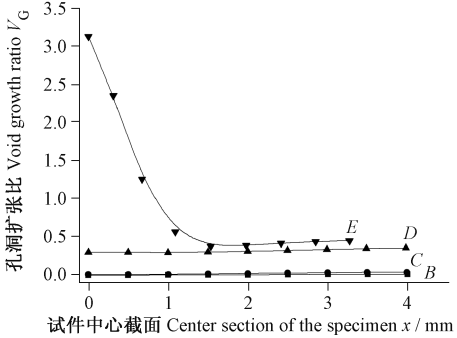


图 8 试件中心截面孔洞扩张比 V_G 分布

Fig. 8 Distribution of void growth ratio V_G in center section of the specimen

4 结论

应用 GTN 模型模拟 20 钢圆棒型缺口试件拉伸过程的不同阶段,研究细观损伤参量应力三轴度 R_σ 、等效塑性应变 ε_p 、孔洞体积百分数 f 及孔洞扩张比 V_G 在试件中心截面的变化规律,结果如下:

1) 通过改变 GTN 模型的参数可模拟得到不同的 V_{GC} 。其中, 孔洞形核粒子平均等效塑性应变 ε_N 和形核粒子的孔洞体积分数 f_N 对 V_{GC} 的影响最大, 而形核应变标准差 S_N 对 V_{GC} 影响最小。当这三个细观损伤参数值增加时, f_N 与 V_{GC} 成反比, ε_N 和 S_N 与 V_{GC} 成正比。该规律可在模拟其他塑性材料 V_{GC} 时, 对 GTN 参数进行调整。

2) 用 GTN 模型模拟 20 钢的 V_{GC} 细观损伤参数最优取值是 $q_1 = 1.5$, $q_2 = 1.0$, $q_3 = 2.25$, $f_c = 0.15$, $f_f = 0.25$, $f_N = 0.01$, $\varepsilon_N = 0.3$, $S_N = 0.07$ 。用该组参数得到的模拟 V_{GC} 是 3.134, 这与实验测量的 V_{GC} 结果误差不大。

3) 通过对应力三轴度 R_σ 、等效塑性应变 ε_p 、孔洞体积百分数 f 及孔洞扩张比 V_G 的模拟结果进行分析, 发现随着拉伸载荷的增加, 这四个细观损伤参数的数值呈增长趋势, 但在断裂瞬时均表现为试件缺口心部的值大于试件缺口根部的值, 故试件从心部开始断裂。

参考文献 (References)

- [1] 王国珍, 张贺全, 蒲吉斌, 等. GTN 损伤模型对 C-Mn 钢缺口拉伸试样延性断裂的预测[J]. 机械强度, 2008, 30(4): 647-652.
WANG GuoZhen, ZHANG HeQuan, PU JiBin, et al. Prediction of ductile fracture in tensile specimens with notches for a C-Mn steel by using GTN damage model[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(4): 647-652 (In Chinese).
- [2] 庄力健, 高增梁, 王效贵, 等. 16MnR 钢在不同应力比下的疲劳裂纹扩展的试验研究及模拟[J]. 压力容器, 2007, 24(3): 1-7.
ZHUANG LiJian, GAO ZengLiang, WANG XiaoGui, et al. An experimental study and simulation of fatigue crack propagation of 16MnR steel[J]. Pressure Vessel Technology, 2007, 24(3): 1-7 (In Chinese).
- [3] M. Abbasi, B. Bagheri, M. Ketabchi et al. Application of response surface methodology to drive GTN model parameters and determine the FLD of tailor welded blank [J]. Computational Materials Science, 2012(53): 368-376.
- [4] 陈志英, 董湘怀. GTN 细观损伤模型参数对板料损伤行为的影响[J]. 锻压技术, 2012, 37(3): 23-27.
CHEN ZhiYing, DONG XiangHuai. Influence of GTN meso-damage model parameters on sheet forming damage behavior[J]. Forging and Stamping Technology, 2012(53): 368-376 (In Chinese).

- [5] 黄西成, 陈裕泽, 陈勇梅, 等. 2169 钢细观损伤参数识别[J]. 材料工程, 2007(4): 50-52.
HUANG XiCheng, CHEN YuZe, CHEN YongMei, et al. Identification of mesodamage parameters of 2169 steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2007(4): 50-52 (In Chinese).
- [6] 石柏军, 彭松, 刘松林, 等. 基于 GTN 损伤模型的压力连接过程仿真[J]. 材料科学与工程, 2012, 20(2): 86-89.
SHI BaiJun, PENG Song, LIU SongLin, et al. Simulation analysis of the mechanical clinch joining process based on the GTN model[J]. Materials Science and Technology, 2012, 20(2): 86-89 (In Chinese).
- [7] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 96-113.
YU ShouWen, FENG XiQiao. Damage mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 96-113 (In Chinese).
- [8] 郑长卿, 周利, 张克实. 金属韧性破坏的细观力学及其研究应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 35-50.
ZHENG ChangQing, ZHOU Li, ZHANG KeShi. Micromechanical research and application for the ductile fracture of metal [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 35-50 (In Chinese).
- [9] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 166-167.
SHI YiPing, ZHOU YuRong. Examples of ABAQUS finite element analysis [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 166-167 (In Chinese).
- [10] 陈吉. 小冲杆试验中 GTN 模型及有限元应力应变分析[D]. 上海: 华东理工大学, 2013: 36-40.
CHEN Ji. Research of equivalent fracture strain and equivalent fracture stress in small punch test [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013: 36-40 (In Chinese).
- [11] Viggo Tvergaard. Material Failure by Void Growth to Coalescence [J]. Advances in Applied Mechanics, 1989(27): 83-151.
- [12] A. B. Richelsen, V. Tvergaard. Dilatant plasticity or upper bound estimates for porous ductile solids [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(8): 2561-2577.
- [13] 闫玉曦, 孙权, 陈建钧, 等. 基于 GTN 模型的冷轧硅钢边部裂纹扩展研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 33-39.
YAN YuXi, SUN Quan, CHEN JianJun, et al. Analysis for the Propagation of edge crack of silicon steel during cold rolling process based on GTN damage model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 33-39 (In Chinese).