

文章编号:1673-2049(2018)01-0093-09

# 不同断裂模型在钢结构断裂破坏预测中的比较

黄学伟,赵 军

(郑州大学 力学与工程科学学院,河南 郑州 450001)

**摘要:**为对比分析不同断裂模型在钢结构断裂破坏预测中的适用性,选取 3 类典型的断裂模型(微孔扩展模型、GTN 模型、连续损伤模型)对钢结构的断裂破坏进行预测分析。首先基于试验数据标定了 Q345 钢材以及焊缝金属的断裂模型参数,然后将这 3 类断裂模型通过 ABAQUS 的用户子程序嵌入到有限元分析程序中,最后将这 3 类模型应用到开孔板以及梁柱焊接节点的断裂破坏分析中。结果表明:3 类模型均能很好地预测开孔板和节点裂纹的起始和发展过程;3 类模型对于开孔板断裂位移的预测精度相当,但对于相对复杂的梁柱焊接节点,GTN 模型对裂纹起始位移的预测精度明显高于其他 2 类模型。

**关键词:**钢结构;断裂预测;微孔扩展模型;GTN 模型;连续损伤模型;适用性

**中图分类号:**TU391 **文献标志码:**A

## Comparison of Different Fracture Models for Fracture Failure Prediction of Steel Structures

HUANG Xue-wei, ZHAO Jun

(School of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

**Abstract:** In order to compare and analyze the applicability of different fracture models in fracture failure prediction of steel structures, three typical fracture models (void growth model, GTN damage model and continuum damage model) were selected to predict the fracture behavior of steel structure. Firstly, the fracture model parameters of Q345 steel and welded metal were calibrated based on the test results. Then, the three fracture models were embedded into the finite element analysis program through the user subroutine of ABAQUS. Finally, the three models were applied to the analysis of the fracture of perforated plate and welded joints of beam column. The results show that the three models can well predict the crack initiation and development process of perforated plates and welded joints. The three models have the same prediction accuracy for the fracture displacement of perforated plate. For relatively complex beam column welded joints, the prediction accuracy of GTN model for crack initiation displacement is significantly higher than the other two models.

**Key words:** steel structure; fracture prediction; void growth model; GTN model; continuum damage model; applicability

## 0 引言

断裂破坏是建筑钢结构的一种主要失效模式,

由节点或构件断裂失效导致结构整体发生倒塌的事故近年来时有发生<sup>[1]</sup>。由于节点或构件断裂破坏具有危害性和复杂性,因此已成为国际上予以关注和

收稿日期:2017-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51608487);中国博士后科学基金项目(2016M602258);河南省高等学校重点科研项目(17A130002)

作者简介:黄学伟(1985-),男,安徽亳州人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:huangxw@zzu.edu.cn。

研究的重点和难点课题。传统的断裂力学研究方法均假定裂纹已存在,且裂纹尖端存在高应变约束,因此其适用范围有限<sup>[2]</sup>。

基于微观机制的断裂模型从微观层面探索裂纹的萌生和扩展机理,该方法不受结构几何形状的影响,具有良好的适用性,这种方法是在对材料微观结构分析的基础上,研究引起断裂的关键力学参数以及这些参数对微观结构特性的影响。对于微观机制的延性断裂破坏模型,在 Rice 等<sup>[3]</sup>具有开创性研究的基础上,各国学者提出了许多描述微孔增长和损伤演化的模型以及发生延性破坏的准则,主要包含突然失效模型和细观损伤力学模型。突然失效模型对材料的延性断裂机理进行了描述,假设当微观力学变量(例如材料微孔洞增长率)达到临界值时,材料发生延性断裂;细观损伤模型反映了损伤对材料延性性能的影响。此外,连续损伤力学模型<sup>[4]</sup>作为损伤力学一个重要分支也经常用于材料的断裂预测中,该模型通过定义一个区别于塑性应变的损伤内变量来描述材料屈服面和刚度的退化。

目前围绕突然失效模型,国内外针对钢结构的断裂破坏开展了较多研究工作<sup>[5]</sup>,如十字形焊接节点的断裂破坏<sup>[6]</sup>和梁柱焊接节点的断裂破坏<sup>[7]</sup>等,但基于细观损伤力学和连续损伤力学模型预测钢结构断裂破坏的研究还不多。本文尝试将这 3 类断裂模型应用在建筑钢结构的断裂破坏中,分析裂纹的起始和扩展过程,通过试验来验证这 3 类模型的断裂预测结果,并对比分析这 3 类模型的断裂预测精度。

## 1 断裂预测模型

本文选择 3 类具有代表性的断裂模型来进行预测分析,对于突然失效模型,选择在钢结构领域内已经开始应用的微孔扩展模型(VGM 模型)<sup>[8]</sup>,细观损伤力学模型中选择应用非常广泛的 GTN 模型<sup>[9-10]</sup>,连续损伤力学模型选择 Bonora<sup>[11]</sup>提出的连续损伤模型(CDM 模型)。

### 1.1 微孔扩展模型

Rice 等<sup>[3]</sup>推导出理想弹塑性材料中微孔洞的扩展方程,指出材料中微孔洞的增长与其应力三轴度呈现指数关系。Kanvinde 等<sup>[8]</sup>进一步发展了这一理论,建立了微孔扩展模型,该模型指出当材料某点的微孔扩展指数  $I$  达到其临界值  $\eta$  时,该点处的材料失效,该模型可表述为

$$I = \int_0^{\epsilon_p} \exp(1.5T) d\epsilon_p > \eta \quad (1)$$

式中: $T$  为应力三轴度,  $T = \sigma_m / \sigma_e$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_e$  分别为宏观的静水应力和等效应力;  $\epsilon_p$  为等效塑性应变。

VGM 模型中定义了一个特征长度  $l^*$ , 它表示在一个特征长度范围内,材料的微孔扩展指数达到临界值时,延性裂纹在这个特征长度范围内起始。

### 1.2 GTN 模型

GTN 模型通过引入微孔洞体积比来表征材料的损伤,其塑性势函数  $\Phi(\cdot)$  为

$$\Phi(\sigma_e, \sigma_m, \bar{\sigma}, f) = \frac{\sigma_e^2}{\bar{\sigma}^2} + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2\bar{\sigma}}\right) - [1 - q_1^2 (f^*)^2] \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}$  为基体材料的等效应力; $f$  为微孔洞体积比,它表征一个材料单元中微孔洞的体积与单元体积之比; $q_1$ ,  $q_2$  为考虑微孔洞周围非均匀应力场和相邻孔洞之间作用的修正系数,对于金属材料, Tvergaard 等<sup>[10]</sup>提出  $q_1 = 1.5$ ,  $q_2 = 1.0$ ;  $f^*$  为有效微孔洞体积比。

$f^*$  与  $f$  之间的关系为

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \kappa(f - f_c) & f > f_c \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f_c$  为临界微孔洞体积比,当  $f = f_c$  时,微孔洞开始聚合,进而引起材料承载能力的迅速降低; $\kappa = (f_u^* - f_c) / (f_F - f_c)$ ,  $f_F$  为最大微孔洞体积比,  $f_u^*$  为最大有效微孔洞体积比,当  $f = f_F$  时,材料丧失全部承载能力,此时  $f^* = f_u^* = 1/q_1$ 。

由式(3)可以看出,  $f^*$  可用来表征微孔洞聚合引起的承载能力损失。

GTN 模型将微孔洞体积比与材料的屈服面联系起来,  $f$  的增大会引起屈服面的退化。微孔洞的增量  $df$  由原有微孔洞的增量  $df_g$  和微孔洞的形核增量  $df_n$  两部分构成,即

$$df = df_g + df_n = (1 - f) d\epsilon_{kk}^e + \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_p - \epsilon_N}{s_N}\right)^2\right] \quad (4)$$

式中: $d\epsilon_{kk}^e$  为塑性体应变增量;  $f_N$  为微孔洞体积比形核部分的极限值;  $\epsilon_N$ ,  $s_N$  分别为微孔洞形核的平均应变和标准差应变。

### 1.3 连续损伤模型

对于单调加载下延性金属的断裂破坏, Bonora<sup>[11]</sup>提出用刚度退化来描述材料的损伤程度  $D$ , 即

$$D = 1 - E/E_0 \quad (5)$$

式中: $E_0$ ,  $E$  分别为材料无损伤和有损伤时的弹性

模量。

Bonora 提出的材料损伤演化方程如下

$$dD=c\frac{(D_{cr}-D_0)^{1/c}}{\ln(\epsilon_f/\epsilon_{th})}f(T)(D_{cr}-D)^{1-1/c}\frac{d\epsilon_p}{\epsilon_p}\quad (6)$$

$$f(T)=\frac{2(1+v)}{3}+3(1-2v)T^2\quad (7)$$

式中: $c$  为材料参数; $D_0$ 、 $D_{cr}$  分别为初始损伤和临界损伤; $\epsilon_{th}$ 、 $\epsilon_f$  分别为单调加载下的损伤应变门槛值和断裂应变; $d\epsilon_p$  为累积塑性应变增量; $v$  为泊松比;函数  $f(T)$  体现了应力三轴度对损伤的影响,应力三轴度越大,损伤累积速率越快。

连续损伤模型中已有损伤的演化方程,为方便对比这几类模型中损伤的变化规律,对于 VGM 模型和 GTN 模型,本文采用线性损伤累积规律,分别定义了这 2 类模型的损伤演化方程,即

$$dD_V=\frac{dI}{\eta}=\frac{\exp(1.5T)d\epsilon_p}{\eta}\quad (8)$$

$$dD_G=\frac{df}{f_F}\quad (9)$$

式中: $dD_V$ 、 $dD_G$  分别为 VGM 模型和 GTN 模型中的损伤增量。

VGM 模型采用微孔扩展指数来描述材料微孔洞的演化过程,因此该模型描述的损伤与材料的本构模型不耦合,该模型可以认为是一种非耦合断裂模型。GTN 模型通过对细观结构变化的物理过程研究,探索材料破坏的本质,并采用平均化方法,将细观结构单元微孔洞体积比的变化与材料的宏观行为联系起来,该模型能够反映微孔洞的变形对材料屈服面的影响,因此它是一种耦合断裂模型。CDM 模型着重考察损伤对材料宏观力学性质的影响以及结构的损伤演化过程,而不追究损伤的物理背景和材料内部的细观结构变化,该模型将细观结构变化映射到宏观力学变化上加以分析,即采用带有损伤变量的本构关系描述受损材料的宏观力学行为,因此 CDM 模型也是一种耦合断裂模型。

对于结构的断裂破坏分析,结构中某点处材料的损伤达到临界损伤后,该点处的材料失效,但结构不一定会丧失承载能力。因此,在进行有限元分析过程中,当某单元的累积损伤达到临界损伤时,判定该单元失效,将单元的应力释放,并将单元删除,然

后根据新的损伤状态继续进行有限元计算,直至结构完全破坏。同时,根据单元达到临界损伤的先后顺序,可预测结构中裂纹扩展的方向。上述过程可通过 ABAQUS 软件中的 VUMAT 材料用户子程序功能来实现。在进行结构有限元分析时,由于材料的破坏等问题使得隐式计算很难满足收敛,因此本文采用显式准静态的有限元计算方法,并且计算中尽可能减少惯性效应的影响。

2 模型的参数标定

从 2 块 Q345 钢板对接焊接而成的焊接件中分别抽取并制作母材、焊缝金属圆棒试件<sup>[12]</sup>,图 1 为缺口圆棒试件的几何尺寸,为分析不同应力三轴度下材料的断裂破坏,试件的缺口半径  $R$  分别设计为 1.5、3.125、6.25 mm,在材料试验机上开展缺口试件的单调拉伸试验。

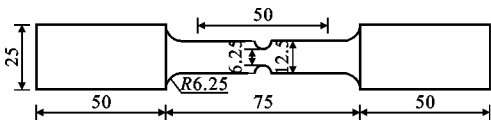


图 1 缺口圆棒拉伸试件 (单位:mm)

Fig. 1 Notched Round Bar Tensile Specimen (Unit:mm)

基于 Q345 母材和焊缝金属材料缺口圆棒试件的单调拉伸试验数据,本文采用文献<sup>[13]</sup>中的标定方法,分别标定得到 Q345 母材、焊缝金属的 VGM 模型参数和 GTN 模型参数,如表 1 所示。利用表 1 中 Q345 钢材的模型参数对缺口圆棒试件的拉伸试验进行有限元数值模拟,有限元计算得到的荷载-位移曲线与试验结果的对比如图 2 所示,可以看出表 1 中的参数能够准确地描述 Q345 钢材断裂过程中的宏观力学行为,焊缝金属材料也有类似的计算结果。另外,将文献<sup>[12]</sup>标定得到的 Q345 母材、焊缝金属的 CDM 模型参数也列入表 1 中。母材和焊缝金属材料 VGM 模型中的特征长度  $l^*$  参照文献<sup>[14]</sup>的结果,其大小均为 0.3 mm。

3 开孔板试件拉伸试验断裂预测分析

为验证 3 类损伤模型对材料断裂破坏的预测精度,开展同批次 Q345 钢材开孔板试件的拉伸试验。

表 1 3 类断裂模型参数

Tab. 1 Parameters of Three Fracture Models

材料	VGM 模型	GTN 模型						CDM 模型 <sup>[12]</sup>		
	$\eta$	$f_0$	$f_c$	$f_F$	$f_N$	$\epsilon_N$	$s_N$	$c$	$\epsilon_{th}$	$\epsilon_f$
母材	2.55	0.005	0.20	0.25	0.025	0.3	0.1	0.198	0.22	1.30
焊缝金属	2.53	0.007	0.20	0.25	0.025	0.3	0.1	0.198	0.19	1.29

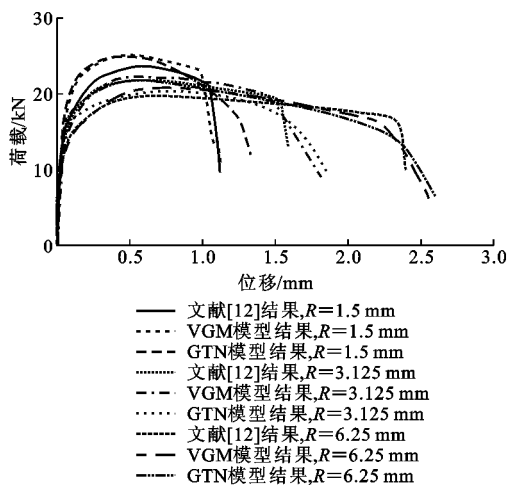


图 2 Q345 钢材缺口圆棒试件的荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement Curves of Notched Round Bar Specimens for Q345 Steel

试验设计了 2 类板状试件, BLH 试件中心处设置一个长圆孔, BH 试件中心处设置了一个圆孔, 2 个试件用来模拟工程中螺栓连接时钢板不同的开孔形状, 试件 BLH 和 BH 的厚度分别为 16 mm 和 12 mm, 其几何尺寸如图 3 所示。根据圣维南原理和实际试验的要求, 试件的长宽比取为 8。试验中将试件固定在万能试验机两夹头之间, 将引伸计对称布置在孔形两侧, 引伸计的标距为 100 mm, 如图 4 所示。试验得到 2 个试件的荷载-位移曲线, 如图 5 所示。相对于 BLH 试件, BH 试件裂纹起始时断面的等效塑性应变较均匀, 因此 BH 试件裂纹起始后快速扩展, 进而使得荷载下降迅速。

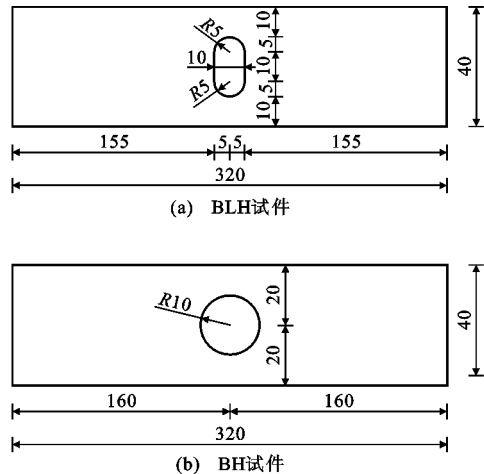


图 3 开孔板试件几何尺寸(单位:mm)

Fig. 3 Geometry Sizes of Perforated Panel Specimens (Unit:mm)

以 BLH 试件为例, 应用 3 类断裂模型预测试件的断裂破坏过程。为提高计算效率, 建立 BLH



图 4 开孔钢板试件拉伸试验

Fig. 4 Tensile Test of Perforated Steel Panel Specimen

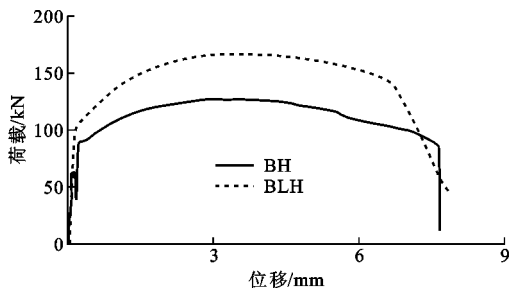


图 5 BH,BLH 试件的单调拉伸曲线

Fig. 5 Monotonic Tensile Curves of Specimens BH and BLH 试件引伸计标距内的有限元模型, 如图 6 所示, 一端固定, 另一端施加位移荷载。长圆孔处的最小网格尺寸与 Q345 钢材 VGM 模型中的特征长度相当, 约为 0.3 mm。材料采用等向强化模型, 其应力-应变关系曲线采用文献[12]的结果, 如图 7 所示。

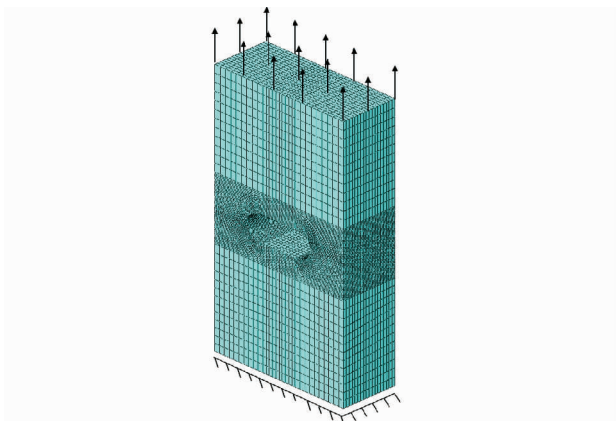


图 6 BLH 试件的有限元模型

Fig. 6 Finite Element Model of Specimen BLH

应用 VGM,CDM,GTN 断裂模型预测, 对单调加载下的 BLH 试件进行有限元分析。有限元结果表明长圆孔圆弧中心处为试件的薄弱环节, 为准确预测 BLH 试件的裂纹起始位置, 进行了如图 8 所

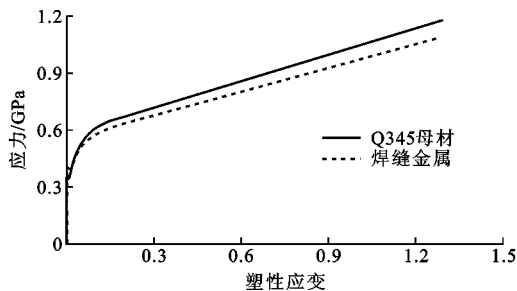


图 7 Q345 母材和焊缝金属的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-plastic Strain Curves of Q345 Base Metal and Welded Metal

示的 2 条路径损伤计算,OA 为厚度方向,OB 为宽度方向。由图 8 可以看出:3 类断裂模型厚度路径方向的损伤均明显大于宽度方向的损伤,因此裂纹易于在圆弧中心处起始;圆弧厚度中心处的损伤明显大于厚度边缘处,所以裂纹起始位置位于圆弧的厚度中心处,即在 OA 路径的中点。这与图 9 所示的试验结果吻合良好。

GTN 断裂模型预测的 BLH 试件断裂破坏过程如图 10 所示。由图 10 可见,裂纹起始后,先沿着 BLH 试件的厚度方向从中心向边缘扩展,然后沿着 BLH 试件的宽度方向从内侧向外侧扩展,最终引起试件的完全断裂,并且两侧裂纹的起始和扩展速度基本相同。通过对比图 9 所示的试验结果与图 10 所示的数值模拟结果可以看出,GTN 断裂模型能够

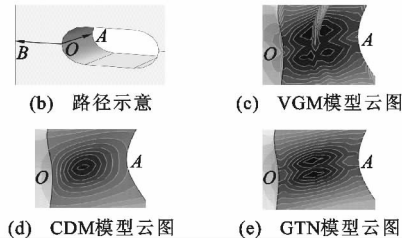
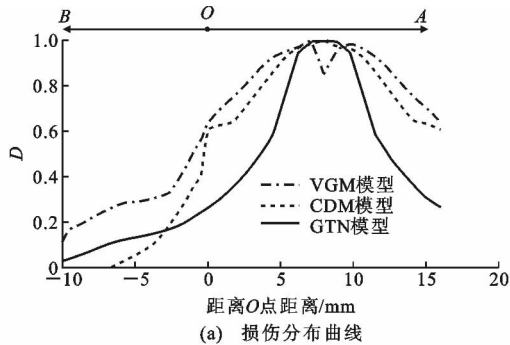


图 8 BLH 试件圆弧根部处的损伤分布

Fig. 8 Damage Distribution at Arc Root of Specimen BLH

准确预测 BLH 试件的断裂破坏过程。基于 VGM 模型和 CDM 模型计算得到的 BLH 试件断裂破坏结果如图 11 所示,可见数值模拟结果与试验结果也基本一致,但试件单元的删除顺序没有 GTN 模型的计算结果整齐。

将 3 类模型计算得到的 BH 试件、BLH 试件荷载-位移曲线与试验曲线进行对比分析,结果如图 12 所示,可以看出 3 类模型的计算结果与试验结果

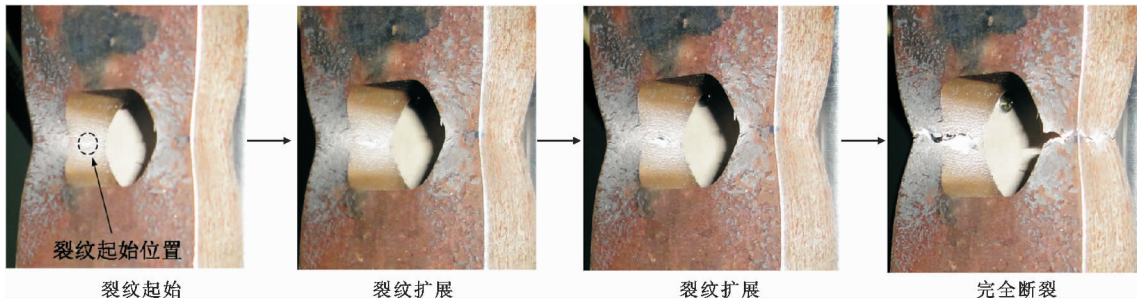


图 9 试验中 BLH 试件的断裂破坏过程

Fig. 9 Fracture Failure Process of Specimen BLH in Test

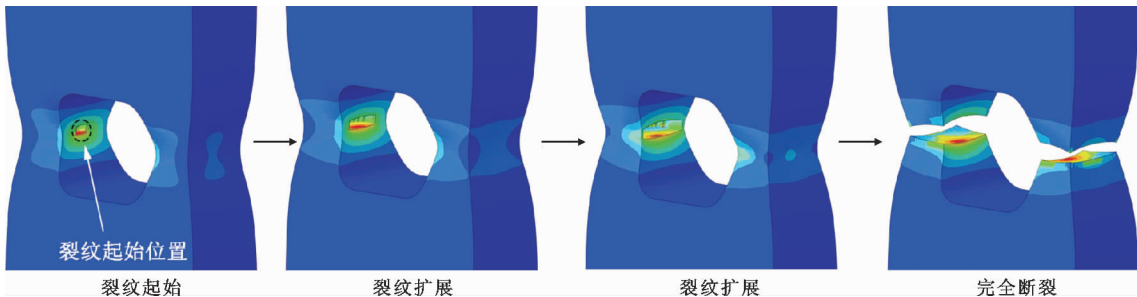


图 10 应用 GTN 模型预测的 BLH 试件断裂破坏过程

Fig. 10 Fracture Failure Process of Specimen BLH Forecasted by GTN Model



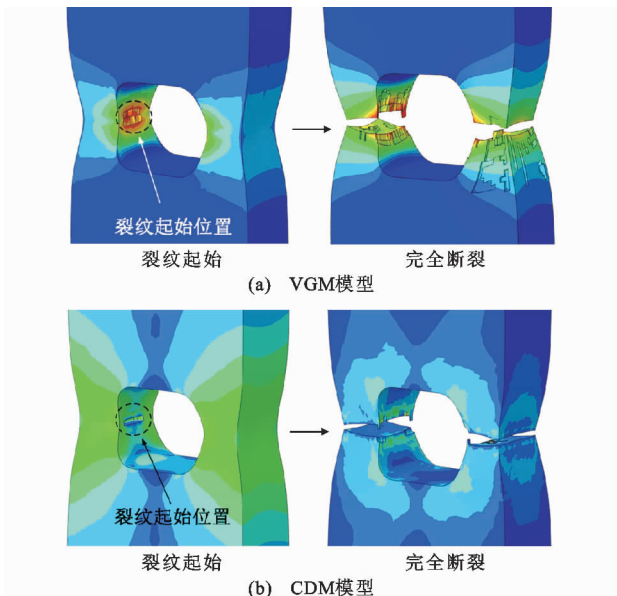


图 11 BLH 试件断裂破坏过程的数值模拟结果

Fig. 11 Numerical Simulation Results of Fracture Failure Process of Specimen BLH

都吻合良好。试验过程中发现裂纹起始后迅速扩展,很快引起荷载快速下降,因此可以将荷载-位移曲线中斜率的突变时刻作为试件的断裂时刻,此时的位移作为断裂位移 $\delta_f$ ,并在荷载-位移曲线中用符号标示出试件断裂的时刻,如图 12 所示。为定量对

表 2 3 类断裂模型的试件断裂位移预测结果

试件	$\delta_f^{\text{Test}}/\text{mm}$	GTN 模型		CDM 模型		VGM 模型	
		$\delta_f^{\text{GTN}}/\text{mm}$	$\delta_f^{\text{GTN}}/\delta_f^{\text{Test}}$	$\delta_f^{\text{CDM}}/\text{mm}$	$\delta_f^{\text{CDM}}/\delta_f^{\text{Test}}$	$\delta_f^{\text{VGM}}/\text{mm}$	$\delta_f^{\text{VGM}}/\delta_f^{\text{Test}}$
BH	7.65	7.07	0.92	6.85	0.90	8.25	1.08
BLH	6.57	6.46	0.98	6.13	0.93	7.18	1.09

注: $\delta_f^{\text{Test}}$  为断裂位移试验结果; $\delta_f^{\text{GTN}}$ , $\delta_f^{\text{CDM}}$ , $\delta_f^{\text{VGM}}$  分别为 GTN 模型、CDM 模型、VGM 模型的断裂位移预测结果。

预测精度相当,其精度均在 10% 范围内。

4 梁柱焊接节点试验的断裂预测分析

为了进一步对比分析 3 类模型在结构断裂预测中的可靠性,本文引用文献[12]中节点 GJ-M 试件的试验结果。试件的几何尺寸如图 13 所示,梁截面尺寸为 H350×150×8×12,柱截面尺寸为 H450×250×12×16,梁柱母材均选用 Q345 钢材,梁的翼缘腹板与柱翼缘的连接均采用全熔透破口对接焊缝,焊缝等级为一级。为方便梁柱翼缘的焊接,参照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[15]</sup> 的推荐形式,设计了 2 种焊接孔形。节点单调加载试验示意如图 14 所示,梁柱焊接节点试件水平放置,柱一端支撑于反力架,另一端预加柱轴力 450 kN,柱轴

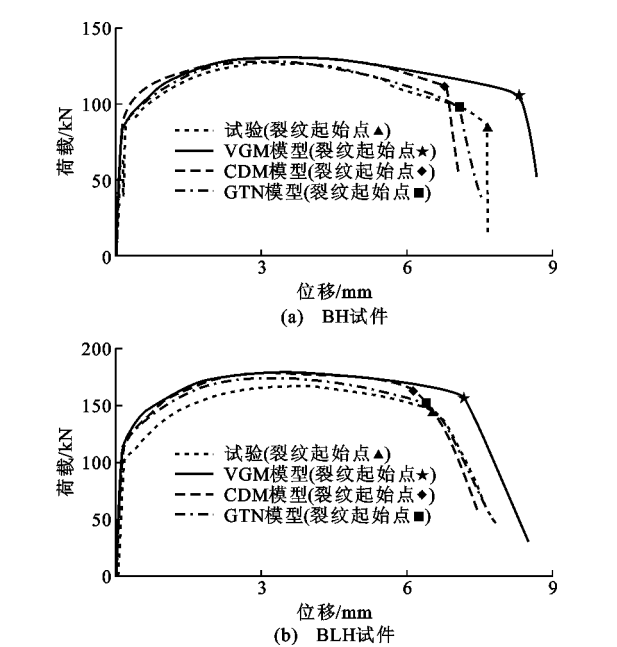


图 12 3 类断裂模型预测荷载-位移曲线与试验结果对比

Fig. 12 Comparison of Load-displacement Curves Among Test Results and Simulation Results by Three Fracture Models

比 3 类断裂模型的预测精度,将断裂位移的预测结果与试验结果进行对比分析,如表 2 所示。由表 2 可以看出,对于 BH 试件和 BLH 试件,3 类模型的

压比保持为 0.1。梁端通过作动器施加水平推力,焊接孔 B 侧梁翼缘受拉,焊接孔 A 侧梁翼缘受压,伺服作动器加载中心距柱翼缘的高度为 1 300 mm。

采用 ABAQUS 软件建立 GJ-M 节点的有限元模型,如图 15 所示,柱一端采用固接约束,另一端采用滑动约束,在柱端施加轴压,并通过在梁端施加位移荷载来模拟实际加载工况。图 15 中节点焊接孔 B 梁翼缘焊趾和柱翼缘焊趾处的最小网格尺寸约为 0.3 mm×0.3 mm,这与钢材和焊缝金属 VGM 模型的特征长度一致。钢材和焊缝金属采用如图 7 所示的应力-应变关系。

在单调荷载作用下,GJ-M 试件 B 侧梁翼缘受拉。3 类模型的有限元计算结果均表明,损伤主要集中在焊接孔 B 梁翼缘焊趾处,该危险位置的损伤

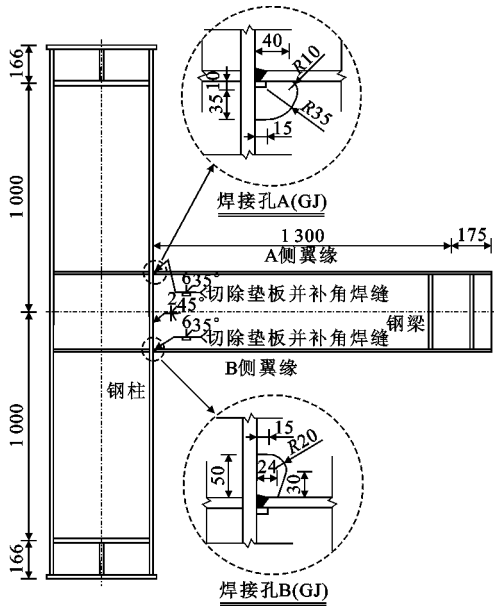


图 13 GJ-M 节点试件的几何尺寸 (单位: mm)

Fig. 13 Geometry Size of Joint GJ-M (Unit: mm)

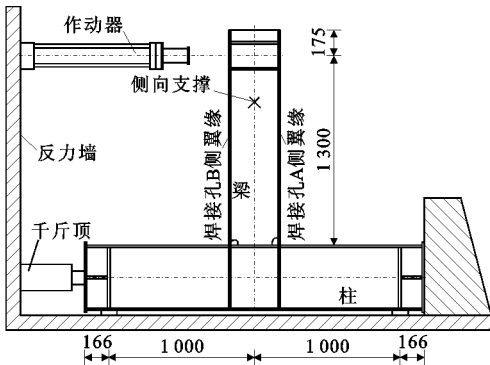


图 14 GJ-M 节点试件单调加载试验 (单位: mm)

Fig. 14 Monotonic Loading Test of Joint GJ-M (Unit: mm)

发展规律如图 16 所示,可见损伤都随着加载位移的增大而增大,当损伤达到临界损伤  $D_{cr}$  时,裂纹起始。关于裂纹起始位移的预测结果,VGM 模型的结果最小,CDM 模型其次,GTN 模型最大。

裂纹起始后,基于 GTN 模型预测得到 GJ-M 节点的断裂破坏过程,如图 17 所示。裂纹首先在焊接孔 B 侧梁翼缘焊趾处产生,裂纹起始后沿着翼缘的厚度方向从 B 侧翼缘内侧向外侧扩展,当裂纹穿透翼缘壁后,裂纹开始沿着翼缘的宽度方向从翼缘中心向两侧边缘扩展,最终贯穿整个翼缘截面,焊接节点断裂破坏。可以看出预测的断裂破坏过程与图 17 所示的试验结果吻合良好。基于 VGM 模型和 CDM 模型的断裂过程预测结果也与试验结果一致,与开孔板试件拉伸结果类似,GTN 模型的计算结果删除单元比较整齐。

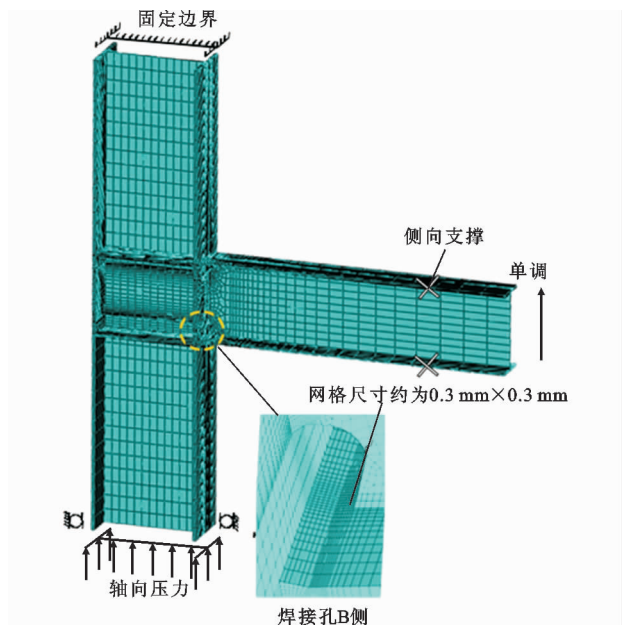


图 15 GJ-M 焊接节点的有限元模型

Fig. 15 Finite Element Model of Joint GJ-M

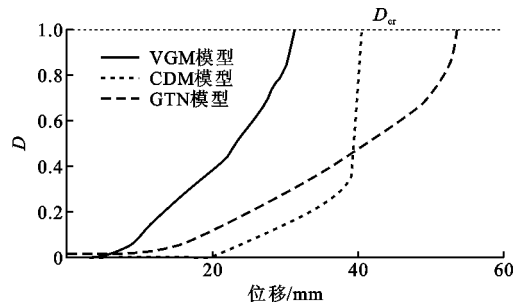


图 16 焊接孔 B 侧梁翼缘焊趾处的损伤发展规律

Fig. 16 Damage Development Law at Weld

Access Hole B of Beam Flange Toe

将有限元计算得到的 GJ-M 节点荷载-位移曲线与试验结果进行对比,如图 18 所示,其中不同曲线上的符号代表了裂纹起始的时刻。在荷载-位移曲线的前期,3 类模型的预测结果与试验结果基本一致,但随着加载进行,裂纹起始后预测得到的荷载-位移曲线与试验曲线有所差别。试验结果显示裂纹起始后,荷载并未立即迅速降低,而是当裂纹穿透翼缘壁以后,荷载才开始快速下降,3 类断裂模型的计算结果也很好地模拟了这一现象,如图 18 所示。基于 3 类断裂模型的 GJ-M 试件裂纹起始位移预测结果如表 3 所示,由图 18 和表 3 可以看出,VGM 模型和 CDM 模型的预测结果都明显低于试验结果,应用 GTN 模型取得了良好的预测结果,其预测精度高于 CDM 模型和 VGM 模型。

表 3 3 类断裂模型的 GJ-M 试件裂纹起始位移预测结果

Tab. 3 Predicted Crack Initiation Displacements of Joint GJ-M by Three Fracture Models

$\delta_i^{\text{Test}}/\text{mm}$	GTN 模型		CDM 模型		VGM 模型	
	$\delta_i^{\text{GTN}}/\text{mm}$	$\delta_i^{\text{GTN}}/\delta_i^{\text{Test}}$	$\delta_i^{\text{CDM}}/\text{mm}$	$\delta_i^{\text{CDM}}/\delta_i^{\text{Test}}$	$\delta_i^{\text{VGM}}/\text{mm}$	$\delta_i^{\text{VGM}}/\delta_i^{\text{Test}}$
49.6	53.6	1.08	40.2	0.81	31.3	0.63

注： $\delta_i^{\text{Test}}$  为裂纹起始位移试验结果； $\delta_i^{\text{GTN}}$ 、 $\delta_i^{\text{CDM}}$ 、 $\delta_i^{\text{VGM}}$  分别为 GTN 模型、CDM 模型、VGM 模型的裂纹起始位移预测结果。

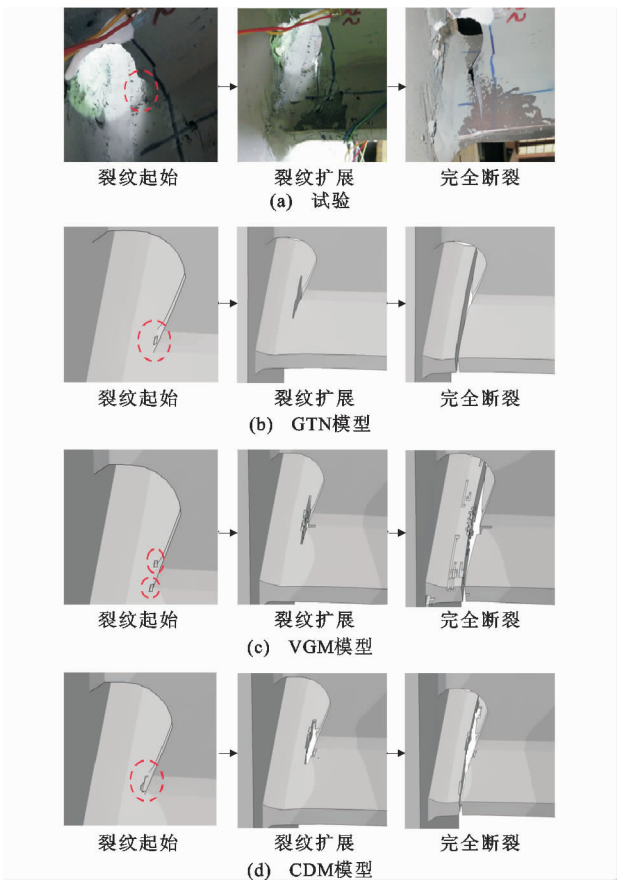


图 17 GJ-M 节点的断裂破坏过程

Fig. 17 Fracture Failure Process of Joint GJ-M

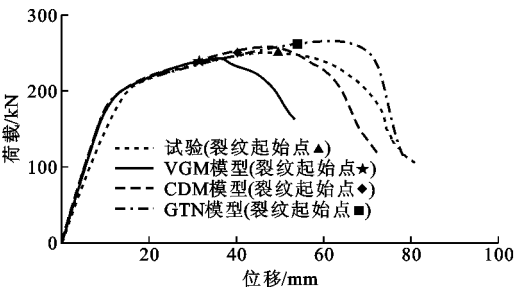


图 18 GJ-M 节点的荷载-位移曲线

Fig. 18 Load-displacement Curves of Joint GJ-M

5 结 语

(1)应用 GTN 模型、CDM 模型和 VGM 模型分别对开孔板试件的拉伸试验进行了预测分析,结果显示,对于裂纹的起始和扩展,3 类模型的预测结

果都与试验结果吻合良好,并且对于试件断裂位移的预测,3 类模型的预测精度相当。

(2)针对钢框架梁柱焊接节点,GTN 模型、CDM 模型和 VGM 模型预测节点的断裂破坏过程得到了试验结果的验证,但对于焊接节点裂纹起始位移的预测,GTN 模型的预测精度最高,CMD 模型次之,VGM 模型的预测精度最差。

(3)虽然 VGM 模型需要标定的参数很少,但由于其不能反映损伤对材料性能退化的影响,使得该模型对于复杂节点断裂破坏的预测精度较低;GTN 模型能够反映材料内部微孔洞的损伤发展对材料性能退化的影响,尽管模型参数较多,但有些参数可参考以前的研究结果,需要标定的参数仅为  $f_0$ 、 $f_c$  和  $f_r$ ,并且 GTN 模型的预测精度较高,因此推荐在钢结构焊接节点拉伸断裂为主的破坏中应用。

(4)从机理上来说,GTN 模型、CDM 模型和 VGM 模型都只反映了应力三轴度对于材料损伤演化规律的影响;在高应力三轴度下,钢材的断裂呈现出拉伸断裂模式,因此应力三轴度对于钢材的断裂破坏有决定性的影响;在低应力三轴度情况下,材料的断裂呈现出剪切断裂模式,这时 Lode 参数对钢材的断裂起到了决定性作用,因此下一步工作重点是研究低应力三轴度情况下 Lode 参数对钢材断裂破坏的影响。

参考文献:

References:

[ 1 ] NAKASHIMA M, ROEDER C W, MARUOKA Y. Steel Moment Frames for Earthquakes in United States and Japan[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8): 861-868.

[ 2 ] TATEISHI K, HANJI T, MINAMI K. A Prediction Model for Extremely Low Cycle Fatigue Strength of Structural Steel[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(5): 887-896.

[ 3 ] RICE J R, TRACEY D M. On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1969, 17(3): 201-217.

[ 4 ] PIRONDI A, BONORA N, STEGLICH D, et al. Sim-



- ulation of Failure Under Cyclic Plastic Loading by Damage Models[J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22(11): 2146-2170.
- [5] 廖芳芳,王 伟,李文超,等. 钢结构节点断裂的研究现状[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(1): 67-75.  
LIAO Fang-fang, WANG Wei, LI Wen-chao, et al. Review on Research Status of Connection Fracture of Steel Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 67-75.
- [6] KANVINDE A M, FELL B V, GOMEZ I R, et al. Predicting Fracture in Structural Fillet Welds Using Traditional and Micromechanical Fracture Models [J]. Engineering Structures, 2008, 30 (11): 3325-3335.
- [7] 周 晖,王元清,石永久,等. 基于微观机理的梁柱节点焊接细节断裂分析[J]. 工程力学, 2015, 32(5): 37-50.  
ZHOU Hui, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu, et al. Fracture Analyses of Welded Details in Beam-to-column Connections Using Micromechanics-based Models[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(5): 37-50.
- [8] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Void Growth Model and Stress Modified Critical Strain Model to Predict Ductile Fracture in Structural Steels[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132 (12): 1907-1918.
- [9] GURSON A L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth; Part 1 — Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977, 99(1): 2-15.
- [10] TVERGAARD V, NEEDLEMAN A. Analysis of the Cup-cone Fracture in a Round Tensile Bar[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(1): 157-169.
- [11] BONORA N. A Nonlinear CDM Model for Ductile Failure[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1997, 58 (1): 11-28.
- [12] 黄学伟. 地震作用下梁柱焊接节点超低周疲劳断裂试验研究与损伤预测分析[D]. 上海: 同济大学, 2015.  
HUANG Xue-wei. Experimental Study and Damage Prediction of Ultra Low Cycle Fatigue Failure of Beam-to-column Welded Joints Under Earthquake Loading[D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [13] 黄学伟,童乐为,周 锋,等. 基于细观损伤力学的梁柱焊接节点断裂破坏预测分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11): 82-90.  
HUANG Xue-wei, TONG Le-wei, ZHOU Feng, et al. Fracture Prediction of Welded Beam-to-column Joints Based on Micromechanics Damage Model[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 82-90.
- [14] LIAO F F, WANG W, CHEN Y Y. Parameter Calibrations and Application of Micromechanical Fracture Models of Structural Steels[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2012, 42(2): 153-174.
- [15] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].  
GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].