

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201507026

Q235B 钢材的微观断裂模型损伤系数识别

邢估慧¹, 郭长岚², 李彦宇³, 陈爱国¹

(1.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044;2.北京华福工程有限公司,北京 100013;
3.中国建筑设计院有限公司,北京 100044)

摘 要:为获取广泛应用的 Q235B 钢材的循环空穴增长(CVGM)和退化有效塑性应变(DSPS)微观断裂模型损伤系数,取材自热轧无缝钢管与冷弯高频焊管母材、热影响区和焊缝区,分别加工 12 个光滑和 8 个缺口试件进行低周往复加载材性试验,获取 4 种材料混合强化参数,利用 Fortran 语言编译了 CVGM 模型及 DSPS 模型程序代码,作为 UVARM 子程序嵌入 ABAQUS 中,识别了其 CVGM 和 DSPS 损伤退化系数,用于缺口圆棒试件实验过程模拟,取得较好预测效果。

关键词: CVGM; DSPS; 低周往复; 试验; 损伤系数

中图分类号: TU392.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)05-0184-05

Damage coefficient identification of micromechanical fracture prediction models for steel Q235B

XING Jihui¹, GUO Changlan², LI Yanyu³, CHEN Aiguo¹

(1.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;2.Beijing Huafu Engineering Co.,Ltd., Beijing 100013, China; 3.China Architecture Design Group, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to obtain the damage coefficient of Cyclic Void Growth Model (CVGM) and Degraded Significant Plastic Strain (DSPS) model for Steel Q235B widely used in China, taking four types of steel Q235B materials extracted from the hot-rolled seamless pipe and the matrix, heat affected zone as well as welded zone of cold-welding pipe respectively, twelve smooth specimens and eight notched specimens were machined. A series of low-frequency cyclic loading material tests were carried out to acquire the combined hardening parameters. The UVARM subroutines of CVGM model and DSPS model were developed in FORTRAN language and embedded in ABAQUS. The calibration of the damage degradation coefficients of CVGM model and DSPS model of four kinds of steel materials was performed. Based on the UVARM subroutine and identified damage coefficients, fracture initiation for the notched specimens can be predicted and simulation results match well with experimental results.

Keywords: CVGM; DSPS; low-frequency cyclic; test; damage coefficient

国内外不乏由钢材断裂引起的事故.如:1995 年阪神大地震中钢节点或构件断裂导致神户中央区域超过 1 000 栋钢结构房屋损坏,50 多栋房屋倒塌^[1];2001 年和 2011 年,钢吊杆断裂分别导致四川省宜宾市小南门大桥和新疆孔雀大桥桥面塌落^[2-3]。

钢材断裂往往是荷载效应、温度效应、加工效应等多种影响因素综合作用的结果.地震作用下钢材会产生较大变形,进入塑性、耗散能量,在经历数十次循环荷载后发生超低周疲劳破坏^[4],属韧性断裂.而微观损伤模型基于微空穴形核、扩张和聚合理论形成^[5],适用于预测钢材超低周疲劳破坏。

目前广泛应用的适用于往复加载条件的微观

模型有循环空穴增长(CVGM)和退化有效塑性应变(DSPS)模型.1968 年,McClintock^[6]指出微孔半径增长速率与塑性应变及应力三轴度有关;1969 年,Rice 等^[7]推导出弹塑性材料中单个圆柱形和球形空穴的扩张方程,得到空穴增长与应力三轴度呈指数关系;1979 年,D'Escata 等^[8]对方程进行修正,突破了模型只能应用于理想弹塑性的局限,得到了 VGM 模型和 SMCS 模型的表达式;2004 年,Kanvinde 等^[9]指出,往复加载时应力三轴度存在正负之分,提出了循环空穴增长(CVGM)模型及退化有效塑性应变(DSPS)模型;2007 年,Kanvinde 等^[10]校正了 7 种钢材在循环荷载作用下的 CVGM 模型参数,并对其进行断裂预测,验证了 CVGM 模型可行性;2012 年,Roufegarinejad 等^[11]对 5 个带有方形断口的高强钢支撑进行超低周往复荷载试验,结果证实 CVGM 模型能够准确预测初始断裂时刻及断裂位置;Siriwardane 等^[12]利用简化的 CVGM 模型准确预测

收稿日期:2015-07-26
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51278036,51578045);
教育部高等学校学科创新引智计划项目(B13002)
作者简介:邢估慧(1975—),女,博士,副教授
通信作者:邢估慧,jhxing@bjtu.edu.cn

了构件试验结果;廖芳芳^[13]对焊缝、热影响区和母材 3 种 Q345 钢材制作的 36 个缺圆棒试件进行往复加载试验,结合有限元分析校准了 DSPS 和 CVGM 的模型参数 λ_{CVGM} 和 λ_{DSPS} ,预测了 Q345 钢焊接节点在低周往复荷载下的断裂;2013 年,Adasooriya 等^[14]指出在循环加载过程中,若应力三轴度变化不大,可将 CVGM 模型进行简化;周晖等^[15]在廖芳芳研究基础上,对熊俊^[16]进行的 9 个梁柱节点模型进行退化性能研究,利用 USDFLD 子程序将 CVGM 模型嵌入到 ABAQUS 有限元模型中,准确预测了断裂的发生;黄学伟等^[17]亦基于廖芳芳研究成果,标定了母材、热影响区和焊缝的材料参数,预测了梁柱焊接节点的断裂;Vasdravellis 等^[18]等利用 27 个圆周槽口试件识别出了 HSS、SS304 和 SSD 三种钢材的微观模型韧性参数,分别应用 VGM 及 CVGM 微观模型进行沙漏形钢构件的断裂预测。

综上所述,中外学者已对适用于往复加载条件下的 CVGM 和 DSPS 微观损伤模型进行了大量研究,涉及材料参数识别和足尺焊接节点或构件断裂预测,证明了两类模型的适用性和有效性.但对于国内常用 Q235B 钢材却缺乏模型损伤系数.因此,本文利用 Fortran 语言编写 CVGM 和 DSPS 模型程序代码,作为 UVARM 子程序嵌入 ABAQUS 中.通过对热轧无缝钢管与冷弯高频焊母材、热影响区和焊缝区 4 种材料共 8 个缺口圆棒试件进行往复加载试验及数值模拟,结合文献[19]中识别的单调加载下模型韧性参数 α 和 η ,识别了 CVGM 及 DSPS 模型的模型损伤系数,填补相关研究空白。

1 理论背景

1.1 CVGM 模型

CVGM 模型的表达式^[9]为

$$\exp(-\lambda_{\text{CVGM}}\varepsilon_p) \cdot \eta = \sum_{\text{tensile-cycles}} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \exp(|1.5T|) \cdot d\varepsilon_t - \sum_{\text{compressive-cycles}} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \exp(|1.5T|) \cdot d\varepsilon_c, \quad (1)$$

式中: λ_{CVGM} 为 CVGM 模型损伤系数, η 为单调加载条件下韧性参数, ε_t 和 ε_c 分别为受拉和受压等效塑性应变, T 表示应力三轴度。

式(1)左侧表示受往复荷载作用下,材料损伤时韧性参数的降低,即能力曲线,右侧表示在受拉和受压状态下,对材料应力约束以及变形情况进行实时跟踪,即需求曲线.由于 CVGM 模型对应力三轴度进行积分,所以采用该模型时,不必进行单调加载条

件分析, η 作为材料韧性参数,对整个构件各部位均适用。

1.2 DSPS 模型

假定应力三轴度 T 在加载过程中变化不大的前提下,定义受拉等效塑性应变和受压等效塑性应变二者之差为有效塑性应变 ε^* ,则

$$\varepsilon^* - \varepsilon_{\text{critical}}^* > 0, \quad (2)$$

即为 DSPS 模型的表达式^[9].式中 $\varepsilon_{\text{critical}}^*$ 为临界有效塑性应变,可以认为是在单调加载下临界等效塑性应变的降低,其表达式为

$$\varepsilon_{\text{critical}}^* = \exp(-\lambda_{\text{DSPS}} \cdot \varepsilon_c) \cdot \varepsilon_p^{\text{critical}}. \quad (3)$$

CVGM 模型采用积分的形式对应力约束及变形情况进行实时更新,模型更为精细化,计算量大,DSPS 模型在加载历程中忽略了应力三轴度的变化,从理论上减小了计算代价,但降低了结果的准确性。

2 低周往复加载试验

分别取材自 Q235B 热轧无缝钢管和冷弯高频焊接钢管的母材、热影响区、焊缝 4 种材料,加工光滑和缺口圆棒试件,进行低周往复加载性能试验.通过光滑试件试验结果获取钢材混合强化参数,通过缺口试件试验结果进行微细观模型损伤系数识别。

2.1 试验方案

试件尺寸和编号分别见图 1 和表 1.光滑试件每种材料 3 个试件,缺口试件每种材料 2 个试件,4 种材料共 20 个试件。

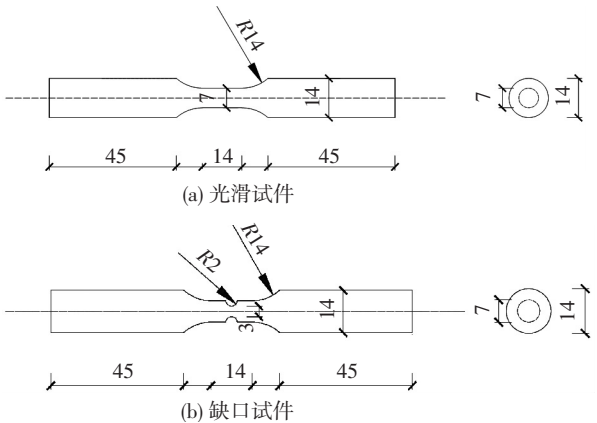


图 1 低周往复试验尺寸(mm)

Fig.1 Dimensions of specimens for the low-frequency cyclic test (mm)

试验中通过引伸计控制应变加载.引伸计标距 12.5 mm,采用变幅值对称加载的方式,每级加载循环 3 次,应变增量为 0.2%,加载频率为 0.1 Hz.先拉后压,直至光滑试件屈曲或缺口试件断裂。

表 1 低周往复加载试验试件命名表

Tab.1 Name of specimens for the low-frequency cyclic loading test

材料种类	光滑试件	缺口试件
无缝管材	CWS-1	CWR2-1
	CWS-2	CWR2-2
	CWS-3	
焊管母材	CMS-1	CMR2-1
	CMS-2	CMR2-2
	CMS-3	
热影响区	CRS-1	CRR2-1
	CRS-2	CRR2-2
	CRS-3	
焊缝	CHS-1	CHR2-1
	CHS-2	CHR2-2
	CHS-3	

2.2 试验结果

光滑圆棒试件与缺口圆棒试件试验结果分别如图 2、3 所示。各种规格试件的试验结果均离散性很小，可为后续微观损伤模型损伤系数的计算提供依据。

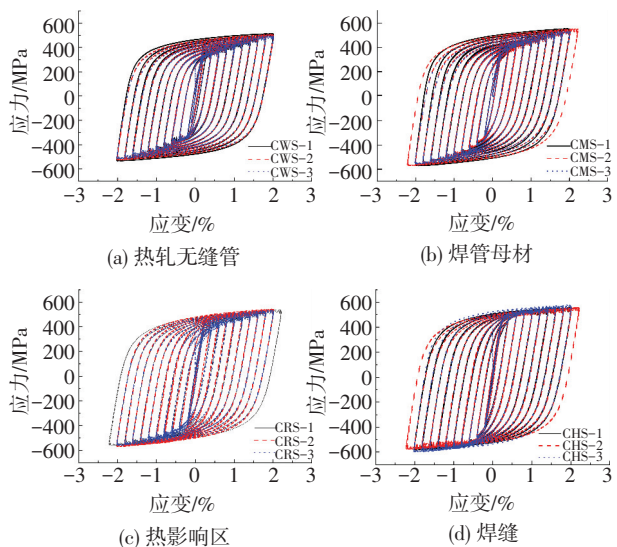


图 2 光滑试件应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of smooth circular specimen

2.3 材料强化参数识别

鉴于图2和图3中钢材在往复荷载作用下表现

出了等向和随动强化两方面特征,采用 Lemaître 和 Chaboche 提出的混合强化材料模型描述钢材本构关系。等向强化部分定义了屈服面 σ^0 的大小, σ^0 是等效塑性应变 ε_p 的函数

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_{\infty}(1 - e^{-b\varepsilon_p}), \tag{4}$$

式中 $\sigma|_0$ 为塑性应变为零时的应力, Q_{∞} 为屈服面最大变化值, b 为屈服面随塑性应变增加而变化的比率。

非线性随动强化方程定义了背应力 α_k , 表示为:

$$\alpha_k = \frac{C_k}{\gamma_k}(1 - e^{-\gamma_k\varepsilon_p}) + \alpha_{k,1}e^{-\gamma_k\varepsilon_p}, \tag{5}$$

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^N \alpha_k. \tag{6}$$

式中:常数 C_k 和 γ_k 是根据试验数据将要拟合出的材料参数, 比率 C_k/γ_k 是背应力的最大变化值, γ_k 是随着塑性应变的增加而变化的背应力变化率。由于曲线的形状对应于不同的应变范围有较大的变化, 所以采用多个背应力叠加的方式来得到更加准确的曲线, 本文选取 $k=3$ 。

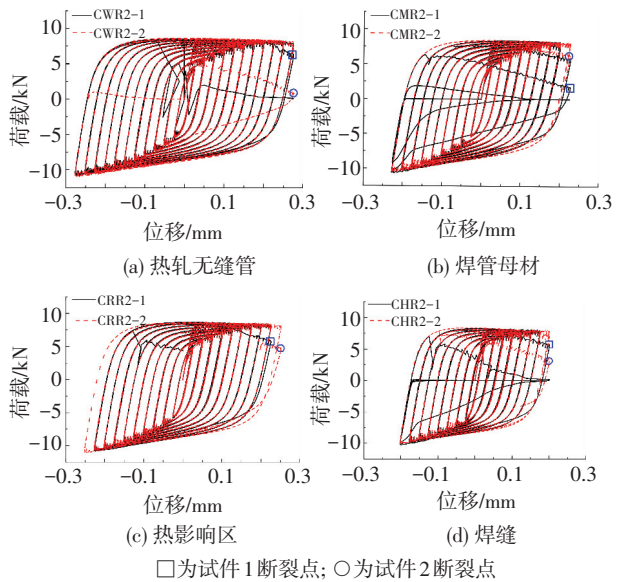


图 3 缺口试件荷载-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curve of notched specimen

参照 ABAQUS 帮助文件, 利用光滑试件试验数据对 4 种钢材循环强化参数进行标定, 并辅以缺口试件实测数据对其进行验证(见图 5)。所标定强化参数结果见表 2。

表 2 材料混合强化参数汇总

Tab.2 Summary of material mixed enhancement parameters

试件种类	弹性模量 $E/10^5$ MPa	屈服强度 σ_0/MPa	Q	b	C_1	γ_1	C_2	γ_2	C_3	γ_3
焊管母材	2.08	320	100	2.5	9 131	89.0	601	5.0	3.7	0.7
焊管母材	2.04	325	110	2.8	12 000	103.0	1 253	6.5	363.4	1.8
热影响区	1.92	345	130	1.3	3 000	52.0	2 673	42.0	1 587.0	33.0
焊缝	1.94	409	75	2.0	5 200	43.4	1 038	8.2	276.0	2.3

3 有限元模拟

3.1 建模与参数设置

采用 ABAQUS 对缺口试件引伸计段建立 C3D8R 三维实体单元有限元模型,材性参数设置见表 2,采用一端固定、另一端施加轴向位移方式加载,有限元模型见图 4.

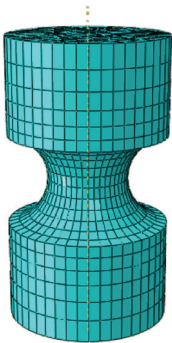


图 4 低周往复缺口试件有限元模型

Fig.4 Finite element model of notched specimen under low-frequency cyclic loading

将有限元模拟结果与试验结果对比,二者荷载位移曲线吻合较好(见图 5).

3.2 往复加载下的微观损伤模型参数校正

获得试件在加载过程中的有效应力、等效塑性应变以及应变分量等相关参数,以图 3 中荷载-位移曲线中的急剧下降点为钢材断裂点,基于单调拉伸试验已经校正的韧性参数结果^[19],得到 CVGM 模型和 DSPS 模型损伤系数,见表 3、4.表 3 中损伤变量 D 为受压等效塑性应变的累积.

表 3 CVGM 模型损伤系数计算结果

Tab.3 Calculation results of damage coefficient of CVGM model

试件种类	η_{cyclic}	η	D	$\bar{\lambda}_{CVGM}$	λ_{CVGM}
CWR2-1	2.27	2.77	3.68	0.05	0.04
CWR2-2	2.47	2.77	3.94	0.03	
CMR2-1	1.01	1.99	1.92	0.35	0.31
CMR2-2	1.06	1.99	2.31	0.27	
CRR2-1	1.28	1.85	2.11	0.19	0.14
CRR2-2	1.56	1.85	2.48	0.08	
CHR2-1	0.89	1.86	1.61	0.44	0.36
CHR2-2	1.05	1.86	1.97	0.28	

表 4 DSPS 模型损伤系数计算结果

Tab.4 Calculation results of damage coefficient of DSPS model

试件种类	ε^*	ε_c	$\varepsilon_{critical\ p}$	$\bar{\lambda}_{DSPS}$	λ_{DSPS}
CWR2-1	0.306	3.677	0.630	0.196	0.184
CWR2-2	0.321	3.940	0.630	0.171	
CMR2-1	0.196	1.927	0.400	0.370	0.330
CMR2-2	0.211	2.308	0.400	0.280	
CRR2-1	0.258	2.115	0.365	0.160	0.120
CRR2-2	0.304	2.490	0.365	0.070	
CHR2-1	0.191	1.616	0.355	0.380	0.320
CHR2-2	0.212	1.970	0.355	0.260	

4 CVGM 和 DSPS 模型断裂预测结果

利用循环空穴增长模型(CVGM 模型)及退化有效塑性应变模型(DSPS 模型)对缺口圆棒试件进行断裂预测.图 5 是试验值分别与 CVGM 模型及 DSPS 模型预测的荷载-位移曲线的对比图,图中已标注出断裂的预测点.

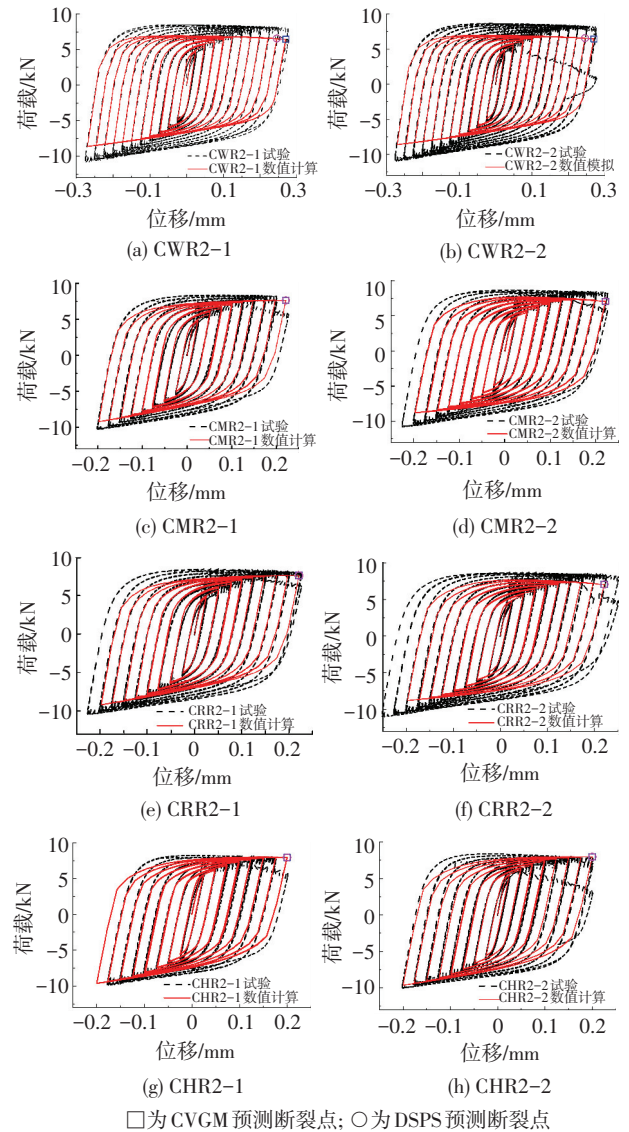


图 5 荷载-位移曲线试验值与 CVGM、DSPS 模型预测值对比
Fig.5 Comparison of the test values for load-displacement curve with the prediction of CVGM and DSPS model

为更清楚对比 CVGM 和 DSPS 模型的断裂预测效果,将两模型的预测误差列入表 5.除试件 CWR2-2 采用 DSPS 模型预测误差达 15.15%外,其他试件的两种模型预测结果误差均在 15%以内,满足精度上的要求.理论上,由于 CVGM 模型考虑了实时的积分,在预测结果上应有更高的准确性,但对比模型的预测结果,两种模型的预测准度并无明显差别.从自定义变量的变化过程中,可以看出 CVGM 模型更具有规律性,体现了实时积分对模型预测结果的影响.

然而,在 DSPS 模型预测中,限制了应力三轴度的变化,应用性较小,所以仍可认为 CVGM 模型预测结果具有更高的可靠性和适用性。

表 5 各试件模型预测结果分析

Tab.5 Analysis of model prediction results for each specimen					
试件 编号	实测断 裂圈数	CVGM 预测值	CVGM 预 测误差/%	DSPS 预测值	DSPS 预 测误差/%
CWR2-1	32	32	0	28	-12.50
CWR2-2	33	32	-3.03	28	-15.15
CMR2-1	25	25	0	25	0
CMR2-2	27	25	-7.41	25	-7.40
CRR2-1	27	25	-7.41	27	0
CRR2-2	29	25	-13.79	27	-6.90
CHR2-1	22	24	9.09	24	9.09
CHR2-2	24	24	0	24	0

5 结 论

通过对 Q235B 钢材进行了一系列的低周往复加载试验,利用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟,计算并校正了适用于低周往复加载的微观模型 CVGM 和 DSPS 模型的损伤系数(λ_{CVGM} 和 λ_{DSPS})并对缺口圆棒试件进行了两种微观模型下的断裂预测,得到以下结论:

1) 损伤系数 λ_{CVGM} 和 λ_{DSPS} 具有较强的一致性,对特定的一种材料 λ_{CVGM} 的值较大,那么该材料对应的 λ_{DSPS} 亦较大,反之成立.对不同种材料而言,CVGM 模型中,热轧无缝管损伤系数最小,热影响区次之,焊管母材及焊缝较大;DSPS 模型中,热影响区损伤系数最小,热轧无缝管次之,焊管母材及焊缝较大.

2) 通过缺口圆棒的断裂预测结果,可以观察到两微观模型预测结果均较为理想,除试件 CWR2-2 的 DSPS 模型预测误差达到 15.15% 以外,其他试件两种模型预测结果均在 15% 以内,满足精度上的要求.理论上,CVGM 模型具有更好的应用性,但在本文研究范围内从预测结果看,CVGM 与 DSPS 模型预测精度差异并不大.

参考文献

[1] MILLER D K. Lessons learned from the Northridge earthquake [J]. Engineering Structures, 1998, 20(4/5/6): 249-260.

[2] 任伟平. 焊接钢桥结构细节疲劳行为分析及寿命评估[D].成都:西南交通大学,2008.

REN Weiping. Fatigue behavior and fatigue life evaluation of structural details in welded steel girder bridges [D]. Chendu: Southwest Jiaotong University,2008.

[3] 孙亭文,达林塔. 新疆孔雀河大桥桥面塌落 断裂长度约 15 米 [N/OL]. (2011-04-12) [2015-6-28]. <http://www.chinanews.com/sh/2011/04-12/2966293.shtml>.

[4] 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.

[5] ANDERSON T L. Fracture mechanics: fundamentals and applications [M].3rd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005.

[6] MCCINTOCK F A. A criterion for ductile fracture by the growth of holes [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1968, 35(2):363-371.

[7] RICE J R, TRACEY P M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields [J].Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1969, 17(69):201217.

[8] D’ESCATHA Y, DEVAUX J C. Numerical study of initiation, stable crack growth and maximum load with a ductile fracture criterion based on the growth of holes [J]. ASTM STP, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, 1979, 668: 229248.

[9] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Micromechanical simulation of earthquake-induced fracture in steel structures [R]. Stanford University: Blume Earthquake Engineering Center, 2004.

[10] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Cyclic void growth model to assess ductile fracture initiation in structural steels due to ultra low cycle fatigue [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(6):701-712.

[11] ROUFEGARINEJAD A, TREMBLAY R. Finite element modeling of the inelastic cyclic response and fracture life of square tubular steel bracing members subjected to seismic inelastic loading [C] // Proceedings of 7th international conference behaviour of steel structures in seismic areas. Santiago, Chile:[s.n.], 2012:97-103.

[12] SIRIWARDANE S A S C, RATNAYAKE R M C. A simple criterion to predict fracture of offshore steel structures in extremely-low cycle fatigue region [C] //ASME International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Brazil: American Society of Mechanical Engineers, 2012:211-218.

[13] 廖芳芳.钢材微观断裂判据研究及在节点延性断裂预测中的应用[D].上海:同济大学,2012.

LIAO Fangfang. Research on the criterion of microscopic fracture of steel and its application in prediction of ductile fracture of joints[D]. Shanghai: Tongji University,2012.

[14] ADASOORIYA N D, SIRIWARDANE S C, OHGA M. A simplified approach to predict the failure of steel members under interaction effect of fracture and fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 47(2):161173.

[15] ZHOU H, WANG Y, SHI Y, et al. Extremely low cycle fatigue prediction of steel beam-to-column connection by using a micro-mechanics based fracture model [J]. Steel Construction, 2013, 48(2):90100.

[16] 熊俊.强震作用下钢框架焊接节点损伤性能和计算模型研究 [D]. 北京:清华大学, 2011.

XIONG Jun. Research on the damage behavior and calculation model of welded connections in steel frames under earthquakes [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.

[17] 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 Xuewei, TONG Lewei, 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.

[18] VASDRAVELLIS G, KARAVASILIS T L. Design rules, experimental evaluation, and fracture models for high-strength and stainless-steel hourglass shape energy dissipation devices [J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 140(11):1-14.

[19] 邢慧慧,郭长岚,张沛,等. Q235B 钢材的微观损伤模型韧性参数校正[J]. 建筑材料学报,2015(2):228-236.

XING Jihui, GUO Changlan, ZHANG Pei, et al. Calibrations of toughness parameters of microscopic damage model for steel Q235B [J]. Journal of Building Materials, 2015(2):228-236.

[20] MYERS A T, KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. Calibration of the SMCS criterion for ductile fracture in steels: specimen size dependence and parameter assessment [J]. American Society of Civil Engineers, 2014(11):1401-1410. (编辑 赵丽莹)