

# 焊接热影响区断裂性能试验研究\*

刘永明 张晔江 陈以一 陈扬骥

(同济大学建工系, 上海, 200092)

[摘要] 为了确定断裂分析模型的参数, 本文进行了结构钢(Q235c、Q345c)焊接热影响区断裂性能试验研究, 获得了两种材料在焊接热影响区的 $J_R$ 阻力曲线, 采用 $J$ 积分撕裂模量法建立了裂纹失稳的失效评定图。采用两种材料分别制作了一组外形尺寸一致、初始裂纹尺寸不同的单边裂纹焊接板, 测出相应的极限拉伸应力, 并和理论曲线进行了对比。

[关键词] 热影响区,  $J_R$ 阻力曲线, 失效评定图, 弹塑性断裂

[中图分类号] TU311.3 [文献标识码]: A

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON FRACTURE PERFORMANCE IN WELD HEAT-AFFECT ZONE

Liu Yongming, Zhang Yejiang, Chen Yiyi, Chen Yangji

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract:** In order to calibrate the parameter of analytic fracture models, the experimental research of fracture performance in the weld heat-affect zone was done. The relationship curve between the resistance  $J$  integral and the value of crack extension was plotted by the test. The failure assessment diagram of instability of crack propagation was also obtained. The utmost tensile intensity of a group of welded single-edge-crack plate made of Q235c or Q345c, which were same shape and different initial crack length, was obtained and compared with the theoretic curve.

**Key words:** heat-affect zone;  $J_R$  resistance curve; failure assessment diagram; elasto-plastic fracture;

### 一 研究背景

二十世纪九十年代以前, 工程界普遍认为钢结构具有优良的抗震性能, 而作为钢结构抗震主体的钢框架更是具有足够的延性, 有很强的塑性耗能能力, 这种观点在以往发生的地震中得到了许多验证, 例如墨西哥地震发生后, 其震灾调查表明, 钢结构建筑破坏很少<sup>〔1〕</sup>。但1994年美国Northridge北岭地震和1995年日本Kobe神户大地震以后, 人们发现钢框架结构表现不尽如人意, 出现了大量的焊接节点断裂破坏<sup>〔2〕</sup>。

对于Northridge地震和Kobe大地震震后的研究发现, 节点区域在发生断裂时已经有很大的塑性发展, 因此抗弯钢框架节点在地震下的断裂属于弹塑性断裂的范畴。一些研究者从纯钢梁—钢柱节点出发, 对发生这些断裂破坏的现象和可能的原因作了描述和分析, 同时也作了相应的试验研究, 但由于节点区域受力的复杂性、力学分析手段的不完善以及试验条件和手段的限制, 迄今为止尚未建立起成熟的、令人满意的节点域断裂分析模型。对于节点的断裂研究大都停留在裂纹预测和安全评估方面<sup>〔3〕</sup>, 而对于裂纹由起裂, 扩展, 直至失稳断裂的全过程精确分析和模拟还未见有相应的报告。

对震后建筑物的检测发现, 在节点脆性断裂的实例中, 梁下翼缘的断裂占了相当部分, 并且发现断裂位置大都位于焊缝热影响区附近<sup>〔4〕</sup>。作者认为, 对于这类破坏现象, 可以利用已有的杆端非线性弹簧模型, 通过引入某些断裂参量, 建立适用于分析节点部分断裂的数值模型, 并做了初步尝试<sup>〔5〕</sup>。

本文通过对两种钢材的热影响区的断裂性能试验, 测得了两种材料焊缝区的 $J_R$ 阻力曲线, 得到了起裂韧度 $J_{IC}$ 和撕裂模量 $T_R$ , 采用 $J$ 积分撕裂模量法建立了失效评定图, 并和试验数据进行了对比, 为将这些参量引入前述节点域断裂的数值模型提供必要的基础。

\*高等学校博士点专项科研基金(560.3500)

国家自然科学基金项目(59678037)

作者简介: 刘永明(1977)、男, 江苏人, 同济大学建筑工程系硕士研究生

## 二 试验原理及目的

大多数韧性材料起裂后，裂纹尖端的奇异性比起裂前的奇异性弱得多，裂纹经过一个稳定的扩展过程，才能达到失稳而发生断裂。利用裂纹扩展阻力曲线即能描述这种现象。阻力曲线法是采用有疲劳裂纹的多个小试样，测出相应于不同稳定扩展量 $\Delta a$ 的J积分值 ( $J_R$ )，绘出 $J_R \sim \Delta a$ 曲线（简称 $J_R$ 阻力曲线）由此可以确定材料的断裂韧性 $J_{IC}$ 。【6】

同时得到了材料的 $J_R$ 阻力曲线，也就得到了裂纹稳定扩展的方程。如果满足J控制裂纹的某些条件时（例如一般要求裂纹的扩展量非常小，而由裂纹扩展引起的塑性区卸载可控制在J主导区内），当外加荷载和初始裂纹长度已知，即J为已知时，由 $J_R$ 阻力曲线可求出裂纹扩展量。【7】

关于裂纹的失稳扩展，许多研究试图通过不同的准则建立失效断裂判据。但这些大都建立在起裂准则的基础上，不适用于有稳定裂纹扩展的韧性材料。这其中包括K准则，J准则和英国中央电力管理局(CEGB)提出了失效评定图的概念。后由Harrison、Loosemore及Milne【8】建立了R6图概念。

实际上，通过对裂纹断口的研究发现，对于一般的韧性材料，裂纹起裂以后有一个稳定扩展的过程，然后达到失稳状态。使用的K准则，J准则都是起裂准则，即认为裂纹一旦开展就会失稳，严格说来，这只适用于裂纹的起裂前分析。在R6图中 $K_r = K_I / K_{IC}$ ，对于韧性很好的材料在裂纹扩展很小的情况下，裂纹扩展阻力会增加为 $K_{IC}$ 的几倍，此时原始坐标的定义失去意义。关于裂纹的稳定扩展和失稳断裂的判据，本文采用J积分断裂模量法建立断裂评定准则。根据美国电力研究院EPRI的稳定性评定图进行失稳评定的方法，失稳条件为：【9】

$$J(a, P) = J_R(\Delta a) \quad (1)$$

$$T(a, P) = T_R(\Delta a) \quad (2)$$

$$\text{其中: } T(a, P) = \frac{E}{\sigma_y^2} \left( \frac{\partial J}{\partial a} \right) \quad (3)$$

$$T_R(\Delta a) = \frac{E}{\sigma_y^2} \left( \frac{dJ_R}{da} \right) \quad (4)$$

$a, \Delta a, P$  ——分别为裂纹即时长度，裂纹扩展量和外加荷载

$E, \sigma_y, T_R(\Delta a)$  ——分别为材料的弹性模量，屈服应力和撕裂模量。

量，屈服应力和撕裂模量。

式(1)，(2)中所有J积分值均可由有限元计算得到，但计算量很大。对于某些特殊构件可以参照文献[10]方法，采用弹性解和全塑性解的插值方法来计算J积分。对于单位厚度的单边裂纹板，J积分的估算公式推导如下。计算采用的材料模型，采用两段折线本构关系。

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} = \frac{\sigma}{\sigma_y} \quad (\sigma < \sigma_y) \quad (5)$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} = \alpha \frac{\sigma}{\sigma_y} + (1-\alpha) \quad (\sigma_y \leq \sigma < \sigma_u) \quad (6)$$

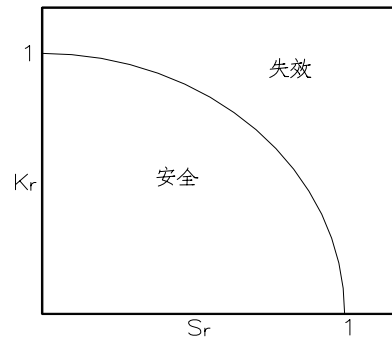


图 1 R6 评定曲线图

Fig 1 R6 Assessment Curve

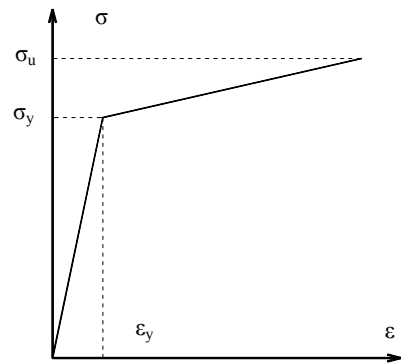


图 2 材料本构关系图

Fig 2 Material Constitutive Relationship

经过与幂硬材料相似的推导可以得到 J 的表达式:

$$J(a, P) = J_e(a, P) \quad (P < P_y) \quad (7)$$

$$J(a, P) = J_e(a, P) + J_p(a, P) \quad (P \geq P_y) \quad (8)$$

其中:  $J_e(a, P) = J_e\left(\frac{a}{W}, \frac{P}{P_y}\right) = \frac{W\sigma_y^2}{E} F_E\left(\frac{a}{W}\right) \left(\frac{P}{P_y}\right)^2$  (9)

$$J_p(a, P) = J_p\left(\frac{a}{W}, \frac{P}{P_y}\right) = \alpha \frac{W\sigma_y^2}{E} F_p\left(\frac{a}{W}\right) \left\{ \left(\frac{P}{P_y}\right)^2 - \left(\frac{P}{P_y}\right) \right\} \quad (10)$$

W、 $\alpha$ 、 $P_y$  分别为试件宽度、材料的硬化系数、以  $\sigma_y$  为基础的参考荷载  $P_y = \sigma_y(W - a)$

$F_E\left(\frac{a}{W}\right)$ ,  $F_p\left(\frac{a}{W}\right)$  为考虑了试件形状的函数。根据计算用表, 可以得到不同  $\frac{a}{W}$  的参考点 J 积分值, 对这些数据点进行拟合并注意边界条件, 可得:

$$F_E\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2.33 \frac{a}{W} + 1.63 \left(\frac{a}{W}\right)^2}{1 - \frac{a}{W}} \quad (11)$$

$$F_p\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2.71 \frac{a}{W} + 1.78 \left(\frac{a}{W}\right)^2}{1 - \frac{a}{W}} \quad (12)$$

将 J 函数式代入(2)式, 就可以得到关于  $\frac{a}{W}, \frac{P}{P_y}$  的一个方程。

$$T\left(\frac{a}{W}, \frac{P}{P_y}\right) = T_R \quad (13)$$

该方程就是以撕裂模量为控制裂纹失稳断裂参量的失效评定曲线方程。

### 三 试验内容

为了验证上节的推导, 进行了与单边裂纹板有关的两种试验。考虑到在钢框架结构中, 钢板大都采用中厚板 ( $20\text{mm} < t < 40\text{mm}$ ), 本试验中试件厚度为 30mm。本试验共有三项内容。加工试件的胚材为两块工程应用的焊接钢板, 母材分别是 Q235c 和 Q345c, 对应的焊条分别是 E43-16 和 E50-15, 手工焊。采用单边坡口对接焊缝, 坡口角度为  $40^\circ$ 。

(1) 两种钢材 (Q235c、Q345c) 常规力学性能测试, 测得弹性模量 E、材料的屈服拉应力  $\sigma_y$ 、极限拉应力  $\sigma_u$ 、伸长率  $\delta_s$  及硬化系数  $\alpha$ ; 每种材料试验结果列于表 1。

表 1 材料拉伸试验数据

Tab 1 Material Data of Tensile Test

材料	弹性模量 E(N/mm <sup>2</sup> )	屈服应力 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	极限应力 $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	延伸率 $\delta_s$ (%)	骨架模型材料 硬化系数 $\alpha$
Q235c	198548	263.2	434.3	37.4	171
Q345c	204141	414.8	603.2	30.3	103

(2) 带焊缝的两种钢材 (Q235c、Q345c) 在焊缝热影响区的  $J_R$  阻力曲线测试, 测得焊缝热影响区相应于不同裂纹稳定扩展量  $\Delta a$  的 J 积分值 ( $J_R$ ), 给出  $J_R \sim \Delta a$  曲线; 采用三点弯曲标准试件, 根据有关标准<sup>[11]</sup> 确定的试件形状如图 1, 其中 S=116mm。

实际试件初始裂纹位置确定为焊

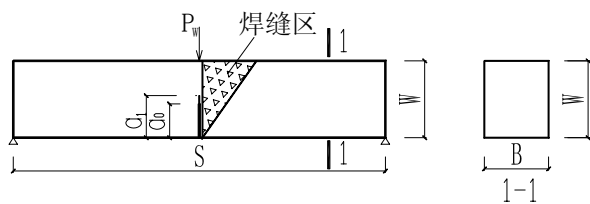


图 3 三点弯曲标准试件

Fig 3 Three-spot Bending Standard Specimen

缝垂直熔合线向母材区偏移 1mm，具体位置参见图 4，然后预制引发了 2mm 左右的疲劳裂纹。两组试件在完成试验后，根据测得的测得的弯曲加载停机点载荷  $P_S$ 、预制裂纹长度  $a_0$ 、试验终止时裂纹长度  $a_1$ ，稳定裂纹扩展量  $\Delta a = a_1 - a_0$ ，采用文献<sup>〔11〕</sup>方法，计算得到弹性  $J_e$ 、塑性  $J_p$  以及  $J_R$  值。有关试验数据见表 2。

表 2  $J_R$  阻力曲线试验主要测试数据

Tab 2 Test Data of  $J_R$  Resistance Curve

编号		1	2	3	4	5	6
Q235c 钢材	$P_w$ (KN)	12.60	16.40	16.30	13.55	15.15	12.60
	$a_0$ (mm)	13.787	13.357	13.3	14.049	13.456	14.519
	$\Delta a$ (mm)	0.077	0.388	0.258	0.294	0.203	0.134
	$J_e$ (N/mm)	15.3	22.9	22.1	19.2	20.1	19.1
	$J_p$ (N/mm)	54.7	266.8	215.0	224.6	164.2	141.6
	$J_R$ (N/mm)	70.0	289.6	237.1	243.8	184.3	160.8
Q345c 钢材	$P_w$ (KN)	16.85	18.14	17.00	16.81	16.00	
	$a_0$ (mm)	13.716	13.832	14.006	14.318	14.268	
	$\Delta a$ (mm)	0.172	0.318	0.27	0.306	0.193	
	$J_e$ (N/mm)	26.3	31.6	29.1	31.3	27.9	
	$J_p$ (N/mm)	206.4	331.0	263.8	294.8	209.0	
	$J_R$ (N/mm)	232.7	362.6	292.9	326.1	236.9	

在  $J_R \sim \Delta a$  直角坐标图上标记试验点，如图 2、图 3 所示，图中的钝化线为过原点 O 以 1.5 ( $\sigma_s + \sigma_u$ ) 为斜率的直线，它反映了裂纹尖端因钝化而出现的伸长区随载荷增加而增大的规律；图中的“最小裂纹扩展线”为过  $\Delta a = 0.03\text{mm}$  所作的钝化线的平行线；图中的“允许的最大裂纹扩展线”为过  $\Delta a = 0.5\text{mm}$  所作的平行于纵轴的直线。只有落在小裂纹扩展线与允许的最大裂纹扩展线之间的试验点才能确定为最终的有效试验点。

表 3 列出了由试验数据得到的两种钢材热影响区的  $J_R$  阻力曲线方程，临界起裂的  $J_{IC}$ ，表征裂纹失稳扩展的撕裂模量  $T_R$ 。

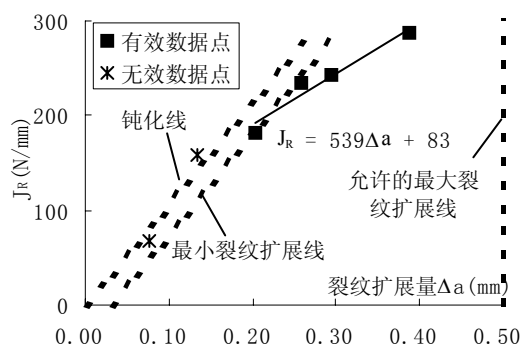


图 4 Q235c 钢材焊缝热影响区  $J_R$  阻力曲线

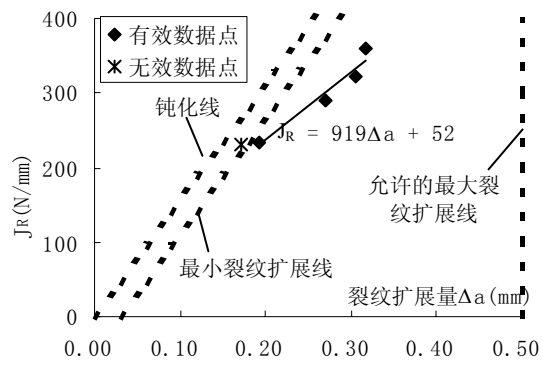


图 5 Q345c 钢材焊缝热影响区  $J_R$  阻力曲线

Fig 4 Q235c  $J_R$  Resistance Curve of HAZ Fig 5 Q345c  $J_R$  Resistance Curve of HAZ

表 3 断裂分析主要参量

Tab 3 Main Data of Fracture Analysis

钢种	$J_R$ 阻力曲线方程	临界起裂的 $J_{IC}$ (N/mm)	撕裂模量 $T_R$
Q235c	$J_R = 539\Delta a + 83$	110 N/mm	1545
Q345c	$J_R = 919\Delta a + 52$	98 N/mm	1041

(3) 带焊缝的两种钢材 (Q235c、Q345c) 单边裂纹板试件极限拉伸载荷测试，测得单边裂纹板极限拉伸载荷  $P_L$  值，并和焊缝热影响区失效评定的理论曲线对比。本项试验中的试件同样

取自 30mm厚的对接坡口焊接钢板。试件的外观尺寸按标准拉伸平板试件的要求制作，宽度为 24mm，沿钢板的S（厚度）方向；标距长度 80mm，沿钢板的L（长度）方向；标距内厚度 6mm，沿钢板的T（宽度）方向。焊缝区位于试件中部，要求焊缝的竖直熔合线居中。试件的外观图见图 4。

本试验按 Q235c 和 Q345c 钢材各做了 6 个，共计 12 个试件。每根试件均需按照要求预先切割初始裂纹，切割深度分别取为试件宽度的 10%、20%、30%、40%、50%、60%，切割起始位置定为焊缝坡口底自垂直熔合线偏向母材方向 1mm 处，切割时沿试件的宽度方向。两种材料的试件切割要求相同。考虑对裂纹尖端奇异性的要求，本项试验中的试件同样均需要预制疲劳裂纹，预制要求与方法同前一试验。

完成疲劳裂纹预制过程的试件，放置到万能试验机上进行单调拉伸试验，直至将试件完全拉断，测出其P-δ曲线。由于每根试件都有初始切割裂缝，因此最后发生断裂的断面全部沿初始切割裂纹的横断面开展。在试件拉断后，经过高温氧化发蓝处理，在工具显微镜下可以读出预制后的初始裂纹长度 $a_0$ 。

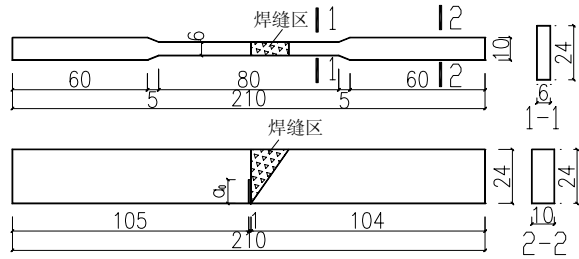


图 6 单边裂纹板拉伸试件

Fig 6 Tensile Specimen of Single-Edge-Crack Slab

根据单边裂纹板 J 积分的估算公式，可以根据式(13)求出失稳断裂时  $\frac{a}{W}, \frac{P}{P_y}$  的不同组合，适当选取小的增量计算步，

可以得到一条失效评定曲线。为了模型的应用方便，纵坐标采用  $\frac{a}{W}$ ，横坐标  $\frac{P}{P_y}$ ，其中  $P_y^\infty = W\sigma_y$  为远场屈服荷载。为了比较方程的适用性将试验数据同样在图中画出。见图 5，

图 6。为了与无缺陷试件相符，采用材料拉伸试验的极限荷载，设置截断线  $\frac{P}{P_y} = \frac{P_u}{P_y}$ 。

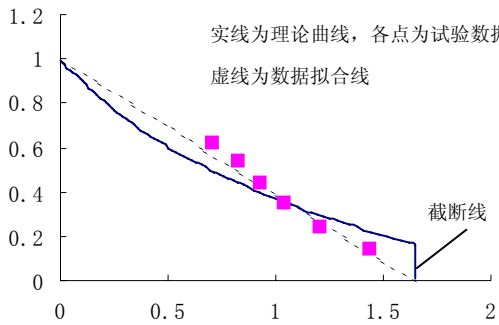


图 7 Q235c 钢焊缝热影响区单边裂纹板  
拉伸失效评定曲线和试验对比

Fig 7 Comparison Between Theory Failure Assessment and Test Data of Single-Edge-Crack Slab (Q235c)

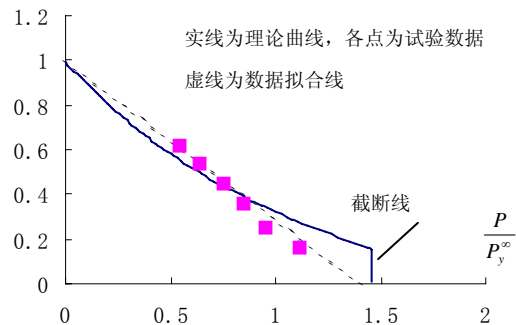


图 8 Q345c 钢焊缝热影响区单边裂纹板  
拉伸失效评定曲线和试验对比

Fig 8 Comparison Between Theory Failure Assessment and Test Data of Single-Edge-Crack Slab (Q345c)

对于试验数据可以线性回归得到失效曲线方程：

$$\text{Q235c: } \frac{P}{P_y^\infty} = -1.65 \frac{a}{W} + 1.65$$

$$\text{Q345c: } \frac{P}{P_y^\infty} = -1.41 \frac{a}{W} + 1.41$$

对于韧性很好的钢材，在平面应力的情况下，由于塑性容易发展，最后的断裂大都属于塑性拉断破坏。本文中试验所用的单边裂纹板试件，有缺陷截面的破坏应力都达到了材料的

名义极限应力。对比试验数据和理论曲线,在中等裂纹区( $0.2 \leq \frac{a}{W} \leq 0.6$ )理论曲线和试验数据符合较好,但在裂纹较小的情况下( $\frac{a}{W} \geq 0.2$ ),理论曲线偏离实际情况较大,在裂纹趋于零时,试件的失稳荷载不等于无缺陷试件的极限荷载,理论计算可能偏于不安全。对于裂纹较大的情况下( $\frac{a}{W} \geq 0.6$ ),由于试验数据的不足(本文中单边裂纹板 $\frac{a}{W} \leq 0.6$ ),无法和理论曲线进行对比。有可能因为裂纹影响的增大,理论曲线比现有数据的拟合线更为趋于实际情况。这还有待于进一步试验的验证。

#### 四 结论及研究展望

本文通过对于焊接结构热影响区断裂性能的试验研究,测定了为了进行断裂分析的相关材料参数,得到了两种钢材(Q235c, Q345c)描述裂纹扩展的 $J_R$ 阻力曲线,建立了基于J积分撕裂模量法控制失稳断裂的裂纹失效评定曲线。这项工作在以下几个方面有着重要的应用。

可以用于对于有缺陷的焊接构件或节点进行安全性的评价,来判断构件或节点在特定的荷载状况下是否会发生失稳断裂,进而可以对于结构整体的安全性进行评估。

考虑到结构在承受周期性反复荷载作用下,会产生低周疲劳的裂纹开展,如果结合裂纹的扩展方程,本文所建立的分析弹塑性断裂的方法可以对结构裂纹的起裂,稳态扩展直至失稳断裂的过程进行计算模拟,对于计算结果的分析可作为防断裂设计的依据。地震下钢框架的弹塑性反应分析可以采用杆端离散轴向弹簧模型,对于梁的下翼缘板轴向弹簧可以视为单边裂纹板,从而可以方便的将断裂参量引入模型。对于前述应用方法<sup>[5]</sup>,本文试验为考虑断裂的杆端非线性弹簧模型提供了必要的模型参数。计算表明,该模型可以较好的反映裂纹的力学特性及其对于结构的影响。

本文试验得到的基于J积分撕裂模量法的裂纹失效评定曲线,严格说来只适用与单一性张开型裂纹(例如梁柱连接的梁翼缘);而在实际结构中存在复杂的应力状态,裂纹的开展属于复合性裂纹开展(例如梁柱节点中的梁腹板),需要考虑剪力对于裂纹开展的影响。如何建立复合性裂纹的断裂判据,将是今后的一个研究方向。

#### 参 考 文 献

- [1] Charles W. Roeder. **Column Cracking in Moment Frames**. ASCE. Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 12, p3537-3550, December 1994
- [2] 李国强 孙飞飞 沈祖炎 **强震下钢框架梁柱焊接连接的断裂行为** 建筑结构学报 Vol.19 No.4 1998.8
- [3] B.Wang, N.Hu, Y.Kurobane, Y.Makino, S.T.Lie. **Damage criterion and safety assessment approach to tubular joints** Engineering Structures 22 424-434 (2000)
- [4] Jerome F. Hajjar, Roberto T. Leon. **Effect of Floor Slabs on the Performance of SMR Connections**. Proc. Elev World Conf. on Earth Eng., Paper No. 656, Elsevier. 1996
- [5] 张晔江 **钢框架梁柱节点弹塑性断裂的数值模拟和参数研究** 同济大学硕士学位论文 2000.3
- [6] 丁遂栋, 孙利民. **《断裂力学》**. 机械工业出版社. 1997
- [7] 黄克智, 余寿文 **《弹塑性断裂力学》** 清华大学出版社 1985.8
- [8] R. P. Harrison, K. Loosemore, and I. Milne. **Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects**. CEGB Report No. R/H/R6. Central Electricity Generating Board. United Kingdom. 1976.
- [9] 董亚民, 冯峰, 黄克智 **国内外“延性断裂评定”的各种实施方法及可靠性研究** 工程力学 Vol.17 No.3 2000.3
- [10] Mel Vin F.Kanninen 等著, 洪其麟等译 **《高等断裂力学》**北京航空学院出版社 1987.11
- [11] GB2038—91. **《金属材料延性断裂韧度 $J_{IC}$ 试验方法》**. 1980