

文章编号: 1000-4750(2017)05-0042-10

基于 SINTAP-FAD 方法的 含裂纹缺陷钢结构构件安全性评定研究

王元清¹, 廖小伟¹, 周 晖², 石永久¹, 陈健陵³, 叶国平⁴

(1. 清华大学土木工程系土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

3. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川, 自贡 643001; 4. 成都益国工程设计顾问有限公司, 四川, 成都 610036)

摘 要: 在施工和运营过程中, 钢结构构件上出现的裂纹缺陷可能会扩展而导致其发生断裂破坏, 因此对含裂纹缺陷钢结构构件的安全性进行评估具有重要意义。首先, 引入断裂力学 K_{IC} 断裂判据和失效评定图(FAD)概念, 并介绍了结构整体性评估程序(SINTAP)的原理; 给出了裂纹缺陷评定所需材料参数的确定方法, 以及含裂纹缺陷构件的断裂力学参数和塑性屈服荷载的计算方法; 然后, 提出了基于 SINTAP-FAD 的含裂纹缺陷钢结构构件的安全性评估流程。最后, 以华南和华东两个电厂锅炉钢结构大板梁的焊接缺陷为例, 进行了基于 K_{IC} 断裂判据和 SINTAP-FAD 的裂纹缺陷安全性评定研究。结果表明, 基于 SINTAP-FAD 的方法为含裂纹缺陷工作的钢结构构件的安全性评估提供了一种行之有效的方法, 考虑多裂纹耦合作用的安全性评定方法有待进一步研究。

关键词: 钢结构; 构件; 裂纹缺陷; 断裂力学; 结构整体性评估程序; 安全性评定

中图分类号: TU391 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.06.0429

SAFETY ASSESSMENT OF STEEL STRUCTURE COMPONENT WITH CRACK DEFECTS USING SINTAP-FAD METHOD

WANG Yuan-qing¹, LIAO Xiao-wei¹, ZHOU Hui², SHI Yong-jiu¹, CHEN Jian-ling³, YE Guo-ping⁴

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry,

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Dongfang Boiler Group Co, Ltd, (Dongfang Electric Corporation), Zigong, Sichuan 643001, China;

4. Chengdu Yiguo Engineering Design Consultant Co, Ltd, Chengdu, Sichuan 610036, China)

Abstract: During the construction and operation period, the induced crack defects in the structural components of steel structures may propagate and eventually result in the fracture failure of the structural components. Therefore, it is of great significance to assess the safety of structural components containing crack defects. Firstly, the principle of failure assessment diagram (FAD) and K_{IC} fracture criterion were introduced, which are based on fracture mechanics, and on the assessment method of SINTAP. Then, the experimental methods for obtaining material parameters required by SINTAP-FAD assessment procedure, and the calculation methods of fracture mechanics parameters and plastic collapse loads of the flawed components, were presented. Finally, the safety

收稿日期: 2016-06-03; 修改日期: 2016-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378289, 51678339); 高等学校博士学科点专项科研项目(20130002110085)

通讯作者: 王元清(1963—), 男, 安徽霍山人, 教授, 博士, 博导, 主要从事钢结构研究(E-mail: wang-yq@mail.tsinghua.edu.cn).

作者简介: 廖小伟(1985—), 男, 湖北荆州人, 博士生, 主要从事钢结构疲劳与断裂研究(E-mail: liaoxw13@mails.tsinghua.edu.cn);

周 晖(1985—), 男, 浙江海宁人, 讲师, 博士, 主要从事钢结构研究(E-mail: zhouhui@bjut.edu.cn);

石永久(1962—), 男, 黑龙江鸡东人, 教授, 博士, 博导, 主要从事钢结构研究(E-mail: shiyj@mail.tsinghua.edu.cn);

陈健陵(1981—), 男, 云南昭通人, 高工, 硕士, 主要从事锅炉特种钢结构设计(E-mail: dbcjszx-fy@dbc.com.cn);

叶国平(1963—), 男, 安徽休宁人, 教授级高工, 本科, 主要从事钢结构工程设计(E-mail: yegp6312@vip.sina.com).

assessment of crack defects within the butt welds on large-size plate girders of boiler steel structures from two power stations were conducted, using K_{IC} fracture criterion and SINTAP-FAD method. The results show that the proposed method based on SINTAP-FAD provides an effective and practical approach for the safety assessment of structural components with cracks or crack-like defects in steel structures. Further research should be dedicated to the assessment method considering the multiple-crack coupling effect.

Key words: steel structure; structural component; crack defect; fracture mechanics; SINTAP; safety assessment

建筑、桥梁和工业钢结构构件在加工制造、施工和使用过程中不可避免地会产生宏观裂纹或类裂纹缺陷^[1]。如焊接钢结构构件和节点在焊接施工时会产生裂纹、未焊透、夹渣和气孔等焊接缺陷；钢板在轧制过程中，特别是钢厚板，会出现由非金属夹杂和中心偏析带来的微观裂纹缺陷；在高周疲劳荷载和低周地震往复荷载的作用下，钢结构构件的高应力集中部位也会产生疲劳裂纹^[2]和地震损伤^[3-4]；在外荷载等因素作用下，这些裂纹或类裂纹缺陷可能会扩展而导致钢结构构件的断裂破坏^[5-8]，甚至直接危及结构安全。在低温环境^[9-10]和复杂应力状态^[11-12]下，钢材的塑性和韧性降低，带裂纹工作的构件更易发生低应力脆断，从而造成严重的工程事故。

因此，为了保证带裂纹工作钢结构构件的使用安全，减少工程事故或不必要的构件更换带来的巨额经济损失，有必要对含裂纹工作状态下的钢结构构件进行安全性评估。但是，仅仅依靠传统的材料力学强度理论和钢结构理论，已无法对含缺陷钢结构构件的安全性做出可靠评定，而以断裂力学为基础的失效评定图(Failure Assessment Diagram, FAD)方法^[7,13-18]为此类含裂纹缺陷结构构件的安全性评定提供了新的途径。

首先，引入基于断裂力学的 K_{IC} 判据、失效评定图 FAD 的概念和结构整体安全性评估方法 (Structural INTeegrity Assessment Procedure, SINTAP)原理；给出材料基本力学性能参数和断裂韧性参数的确定方法，以及含裂纹缺陷构件的塑性极限荷载的计算方法；针对最危险的 I 型裂纹缺陷，提出了基于 SINTAP-FAD 方法的含裂纹缺陷钢结构构件的安全性评定流程。然后，以华南和华东两个电厂的含裂纹缺陷锅炉钢结构大板梁的安全性评定为工程算例，说明了本方法的有效性和实用性，从而为基于 SINTAP-FAD 结构安全性评估在建筑、桥梁和工业钢结构领域的应用奠定基础。

1 理论与方法

1.1 基于线弹性断裂力学的 K_{IC} 断裂判据

控制结构构件断裂的 3 个主要因素包括：裂纹的几何尺寸和形状、作用应力和材料断裂韧性^[1]。其中，前两者是驱动断裂发生的作用，后者是抵抗断裂发生的抗力。

在线弹性断裂力学中，裂纹尖端的应力强度因子 K_I 描述了驱动断裂发生的作用，是低应力脆性断裂发生与否的控制参量；材料的断裂韧性 K_{IC} 或 K_{mat} 是表征含裂纹材料抵抗断裂破坏能力的度量。因此，基于应力强度因子 K_I 的断裂判据可以如下式所示：

$$K_I \leq K_{IC} \quad (1)$$

1.2 基于 SINTAP-FAD 的结构安全性评估方法

1.2.1 失效评定图(FAD)

失效评定图的概念是由英国中央电力局于 1976 年提出，它可以有效地分析含缺陷结构的线弹性断裂、弹塑性断裂和塑性破坏，在工程实践中有着广泛的应用价值，如图 1 所示。失效评定图通过归一化纵坐标 $K_I = K_I / K_{mat}$ 和横坐标 $L_I = F / F_Y$ 来评价含缺陷结构的断裂破坏和塑性破坏，其中， K_I 是裂纹尖端的应力强度因子， K_{mat} 是材料的断裂韧性指标， F 是结构承受的载荷， F_Y 是含裂纹结构的塑性极限荷载。

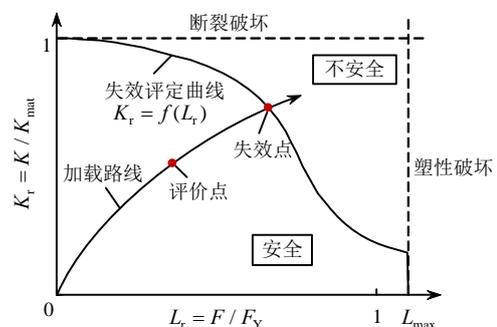


图 1 失效评定图示意图

Fig.1 Schematic illustration of the failure assessment diagram

K_r 表征了结构构件抵抗断裂破坏的状态, 横坐标 L_r 表征了结构构件抵抗塑性极限破坏的状态。随着荷载增大或者裂纹的扩展, 评价点(K_r, L_r)会向失效点逼近。当根据实际情况计算的含裂纹结构的坐标评价点(K_r, L_r)位于失效评定曲线 $K_r=f(L_r)$ 与坐标轴之间时, 则认为含缺陷结构是安全的; 否则, 不能保证结构的安全。

在实际的工程应用中, 结构安全性评估方法给出了失效评定曲线 $K_r=f(L_r)$ 的表达式。SINTAP 方法第 2 级评定针对均具有屈服平台材料的焊接强度不匹配构件的失效评定曲线表达式如下^[19]。

$$f(L_r) = (1 + L_r^2 / 2)^{-1/2}, \quad 0 \leq L_r < 1 \quad (2)$$

$$f(L_r) = (\lambda_M + 1 / (2\lambda_M))^{-1/2}, \quad L_r = 1 \quad (3)$$

其中:

$$M = f_{YW} / f_{YB} \quad (4)$$

$$\lambda_M = \frac{(F_{YM} / F_{YB} - 1)\lambda_W + (M - F_{YM} / F_{YB})\lambda_B}{M - 1} \quad (5)$$

$$\lambda_B = 1 + 0.0375 \left(\frac{E_B}{f_{YB}} \right) \left(1 - \frac{f_{YB}}{1000} \right) \quad (6)$$

$$\lambda_W = 1 + 0.0375 \left(\frac{E_W}{f_{YW}} \right) \left(1 - \frac{f_{YW}}{1000} \right) \quad (7)$$

式中: M 为焊接强度不匹配因子; F_{YM} 为不匹配焊接接头的净截面塑性极限荷载; F_{YB} 为完全是母材时的净截面塑性极限荷载; f_{YW} 和 f_{YB} 分别为焊缝和母材的屈服强度; E_W 和 E_B 分别为焊缝与母材的弹性模量。

$$f(L_r) = f(1)(L_r)^{(N_M - 1) / 2N_M}, \quad 1 < L_r \leq L_r^{\max} \quad (8)$$

其中:

$$L_r^{\max} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{0.3}{0.3 - N_M} \right) \quad (9)$$

$$N_M = \frac{M - 1}{(F_{YM} / F_{YB} - 1) / N_W + (M - F_{YM} / F_{YB}) / N_B} \quad (10)$$

$$N_W = 0.3(1 - f_{YW} / f_{uW}) \quad (11)$$

$$N_B = 0.3(1 - f_{YB} / f_{uB}) \quad (12)$$

式中, f_{uW} 和 f_{uB} 分别为焊缝和母材的抗拉强度。

1.2.2 结构整体性评估方法(SINTAP)

结构整体性评估程序 SINTAP 已经被应用于预测金属结构的最大承载力和最大裂纹尺寸的研究^[13-17], 并被证实为评定带裂纹缺陷结构构件安全性的一种有效方法, 但是建筑和工业钢结构领域的应用并不多。SINTAP 方法根据目标结构材料参数

输入的详细程度划分为 7 个等级, 随着材料输入参数的增多和评定级别的提高, 评定结果会更加精确和偏于不保守^[20]。本文主要应用第 0 级缺省评定、第 2 级焊接强度不匹配评定和第 3 级采用材料真实应力-应变曲线评定。

对具有屈服平台的材料, 第 0 级失效评定曲线 $f(L_r)$ 可以表示为^[15]:

$$f(L_r) = (1 + L_r^2 / 2)^{-1/2}, \quad 0 \leq L_r < L_r^{\max} \quad (13)$$

其中, $L_r^{\max} = 1$ 。

第 3 级失效评定曲线 $f(L_r)$ 可以表示为^[17]:

$$f(L_r) = \left[\frac{E\varepsilon_{\text{ref}} + \frac{L_r^3 f_y}{2E\varepsilon_{\text{ref}}}}{L_r f_y} \right]^{-1/2} = \left[\frac{E\varepsilon_{\text{ref}} + \frac{L_r^2 \sigma_{\text{ref}}}{2E\varepsilon_{\text{ref}}}}{\sigma_{\text{ref}}} \right]^{-1/2}, \quad 0 \leq L_r \leq L_r^{\max} \quad (14)$$

$$f(L_r) = 0, \quad L_r > L_r^{\max} \quad (15)$$

其中:

$$L_r^{\max} = \frac{f_y + f_u}{2f_y} \quad (16)$$

式中, σ_{ref} 和 ε_{ref} 为材料的真应力和真应变。

2 安全性评估程序

2.1 材料参数的确定

依据《金属材料 室温拉伸试验方法》(GB/T 228-2002), 通过单轴拉伸试验, 可以获取含裂纹结构钢材的弹性模量 E 、屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u , 以及全应力 σ_{ref} -应变 ε_{ref} 曲线等基本力学性能数据。

对于中、低强度的结构钢材, 由于受到试样尺寸的限制, 平面应变断裂韧度 K_{IC} 的测定比较困难, 而冲击韧性试验较为简单。因此, 利用经验公式 (17), 通过冲击功 A_{KV}/J 得到断裂韧性 $K_{\text{mat}}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ 是一种行之有效的方法^[20]。

$$K_{\text{mat}} = \sqrt{\frac{E(0.53A_{KV}^{1.28})0.2^{(0.133A_{KV}^{0.256})}}{1000(1-\nu^2)}} \quad (17)$$

依据《金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法》(GB/T 21143-2007), 采用直三点弯曲试样, 可以测定目标钢结构构件钢材的裂纹尖端张开位移 CTOD 特征值 $\delta_{\text{cr}}/\text{mm}$ 。在弹性和小范围屈服情况下, 下式给出了由 CTOD 得到断裂韧性 K_{mat} 的经验公式^[20]。

$$K_{\text{mat}} = \sqrt{1.5\delta_{\text{cr}}f_y E / (1-\nu^2)} \quad (18)$$

式(17)和式(18)中, ν 为泊松比。

2.2 断裂力学参量的计算

对于形状规则的含裂纹钢结构构件，应力强度因子的计算已经有了相应的解析表达式^[21]。但是，对复杂的钢结构构件裂纹来说，应力强度因子的计算需要借助有限元软件，如 ABAQUS^[22]。利用有限元软件进行断裂力学分析，关键在于对裂纹尖端奇异单元的处理。目前，计算应力强度因子 K_I 时，采用了退化等参奇异单元或虚拟裂纹闭合法。

ABAQUS 提供了用于二维和三维有限元分析的奇异单元，可以准确模拟线弹性情况下裂纹尖端应力场、应变场 $r^{-1/2}$ 的奇异性，如图 2 所示。在划分网格时，裂纹尖端第一层单元采用退化平面单元或退化的实体单元，外层单元仍然使用一般的平面单元或实体单元，裂纹尖端附近网格尺寸：奇异单元径向尺寸与裂纹尺寸之比一般为 0.05~0.15，环向每 15°~30°划分一个单元。

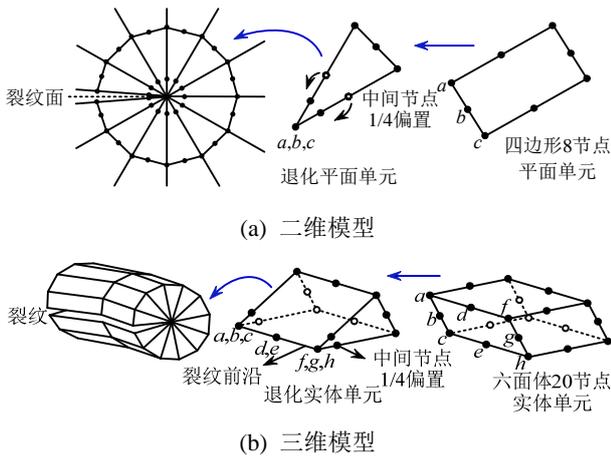


图 2 裂纹尖端奇异单元
Fig.2 Singular element at the crack tip

2.3 塑性极限荷载

塑性极限荷载 F_Y 是含裂纹缺陷结构安全性评估中的重要输入参数，但是由于缺陷裂纹引起的应力-应变场非常复杂，含缺陷结构构件塑性极限荷载的精确解很难得到。文献[21,23-24]给出了有限的对于带缺陷板件和管道构件的塑性极限荷载解析解，特别注意的是，对于焊接强度不匹配构件来说，塑性屈服荷载不仅取决于焊接强度不匹配度，还与裂纹尺寸、焊缝宽度和板件宽度等参数有关^[19]，图 3 给出了高匹配对接焊接板件的塑性破坏形式。因此，大部分构件的塑性极限荷载需要通过实验的手段或有限元数值分析的方法得到，或者通过偏于保守的简化采用近似解析解。

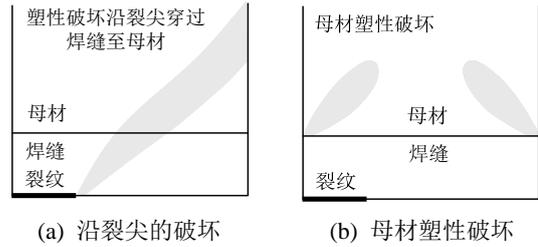


图 3 高匹配焊接板的塑性破坏形式

Fig.3 Plastic collapse modes for over-matched welded plate

2.4 钢结构构件安全性评估流程

图 4 给出了基于 SINTAP-FAD 的含裂纹缺陷钢结构构件的安全性评定流程。首先，通过拉伸、冲击和断裂韧性试验获取相应的材性数据；根据解析解或有限元数值计算得到构件裂纹尖端的应力强度因子，以及含缺陷构件的净截面塑性极限荷载，从而确立含裂纹缺陷钢结构构件的评价点，并进行基于 K_{IC} 断裂判据的安全性评定；然后，根据 SINTAP 提出的失效评定曲线和材料数据的详尽程度，选择相应的评价等级。当断裂韧性数据无法获取时，可以选择 0 级评估；当焊接强度不匹配程度超过 10% 时，选择第 2 级评估；当材料全应力-应变曲线可用时，可以选择评定第 3 级评估。值得注意的是，随着材料输入参数的增多和评定级别的提高，评定结果会更加精确和偏于不保守，因此，应根据工程实际的不同需求选择适当的评定等级。

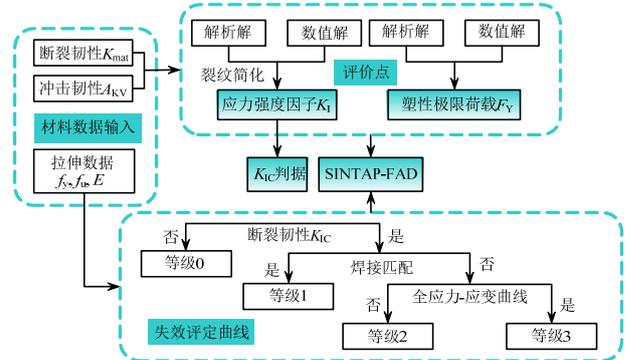


图 4 含裂纹缺陷构件的结构安全性评估流程图
Fig.4 Flow chart of structural safety assessment procedure for the flawed components

3 工程算例

华东和华南某电厂锅炉钢结构大板梁的拼接焊缝，在探伤检测中发现存在不同程度的超标缺陷，而基于传统强度理论认定构件净截面强度满足设计要求，为了保证大板梁的安全运营，需要对其焊接缺陷进行整体安全性评估。因此，以这两个电

厂锅炉钢结构大板梁含裂纹缺陷的下翼缘板对接焊接接头为对象,采用断裂力学方法,进行基于 K_{IC} 断裂判据和 SINTAP-FAD 的整体安全性评估研究。由于大板梁承受的是静力荷载,因此不考虑疲劳荷载导致的裂纹扩展问题。

3.1 算例 1

3.1.1 工程背景

2011 年,华南某电厂在锅炉停机大修期间,发现 K3 大板梁跨中下翼缘拼接焊缝中存在超标未熔合缺陷,而基于传统强度理论分析,认为构件强度满足设计要求。为确保大板梁的整体安全性,本文采用基于 SINTAP-FAD 的方法,对该含类裂纹缺陷的大板梁构件进行安全性评估。

该大板梁跨度为 37 m,工字型截面(6000 mm×1400 mm×40 mm×100 mm);上、下翼缘板为 ASTM A572 Gr.50 材质,跨中拼接焊缝采用双 V 型坡口对接焊缝, H10Mn2 焊丝。在正常工作状态下,大板梁跨中下翼缘承受弯曲拉应力为 150 MPa。

3.1.2 材料参数

为了使获得的材性数据尽可能反映该大板梁下翼缘对接焊缝板的性能,由原大板梁制造商采用同样的钢板材料及焊接工艺模拟制作了下翼缘对接焊接接头。通过单轴拉伸试验、夏比 V 型缺口冲击试验和三点弯曲试验测得了母材和焊缝材料的力学性能参数、冲击功 A_{KV} 和 CTOD 条件启裂特征值 $\delta_{0.2}$ 。

在室温下,拉伸试验测得母材和焊缝的弹性模量 E 、屈服强度 f_y 和抗拉强度 f_u ,如表 1,可以看出焊缝材料的弹性模量、屈服强度、抗拉强度和断后伸长率指标均表现出了一定的离散性;焊接强度不匹配因子 $M = 1.12$,属于高匹配焊接接头;图 5 给出了焊缝材料的真实应力-应变曲线。由冲击试验和经验公式(17),以及由三点弯曲试验和经验公式(18)得到的 K_{mat} 如表 2 所示。可以看出,由冲击功得到的断裂韧性指标 K_{mat} 要比通过 CTOD 转化的断裂韧性指标偏于保守。

3.1.3 裂纹简化及有限元模型

该类裂纹缺陷处于 K3 大板梁跨中下翼缘板拼接焊缝内,如图 6(a)所示。在疲劳和断裂分析中,主要考虑垂直于裂纹面正应力的影响。因此,为了简化,选取该工字梁的下翼缘板对接焊接接头局部为研究对象,假定其应力边界条件为拉应力沿板厚均匀分布。根据实际裂纹探伤情况,该拼接焊缝内

缺陷简化为椭圆埋藏裂纹,如图 6(b)所示。

表 1 拉伸试验结果

Table 1 Results of the uniaxial tensile tests

材料		E /GPa	f_y /MPa	f_u /MPa	A (%)
母材	均值	195.0	353.9	532.4	31.5
	离散系数/(%)	3.8	0.7	0.9	13.8
焊缝	均值	203.5	394.6	489.1	27.6
	离散系数/(%)	11.9	14.3	10.4	12.8

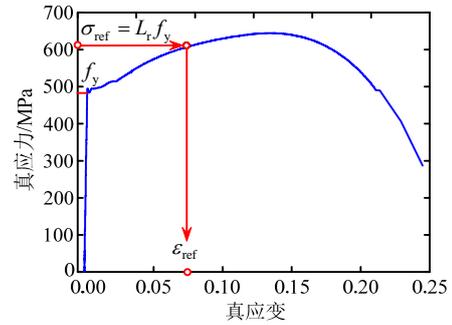


图 5 焊缝材料的真应力-真应变曲线

Fig.5 The true stress-strain curve for weld metal

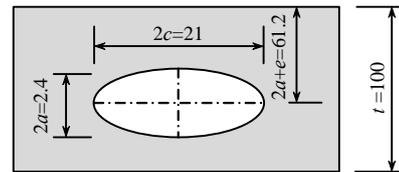
表 2 冲击试验和三点弯曲试验得到的 K_{mat} / (MPa · m^{1/2})

Table 2 K_{mat} values transformed from test results of Charpy impact and three-point bending

材料	A_{KV} /J	$\delta_{0.2}$ /mm
母材	222.8	304.3
焊缝	231.5	263.1



(a) 焊接接头内部缺陷



(b) 裂纹简化模型

图 6 算例 1 裂纹缺陷示意图 /mm

Fig.6 Schematic diagram of the crack in the butt-welded lower flange plate for case 1

为了更精细化地对大板梁下翼缘板对接焊接接头的裂纹缺陷进行安全性评估,建立了含椭圆埋藏裂纹的下翼缘板对接焊接接头的 ABAQUS 三维有限元模型,如图 7 所示。采用 8 节点六面体单元 C3D8,裂纹尺寸如图 6(b)所示,计算了其短轴裂纹尖端应力强度因子 K_I 随工作应力的变化规律。图 8

给出了 K_I 的数值解与解析解^[1,21]的对比分析,可以看出,椭圆埋藏裂纹短轴尖端 K_I 的数值解略大于解析解,两者吻合很好。因此,3.1.4 节和 3.1.5 节的安全性评估将偏安全的基于 K_I 的数值解进行。

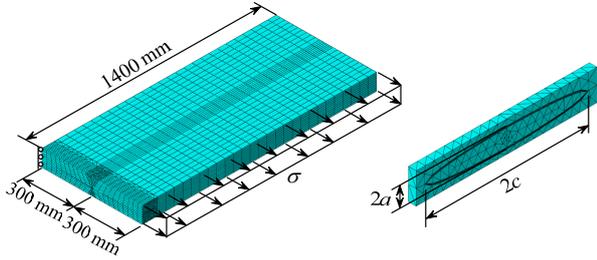


图 7 含椭圆埋藏裂纹缺陷对接平板的三维有限元模型
Fig.7 3D FE model of the butt-welded plate with the embedded elliptical crack defect

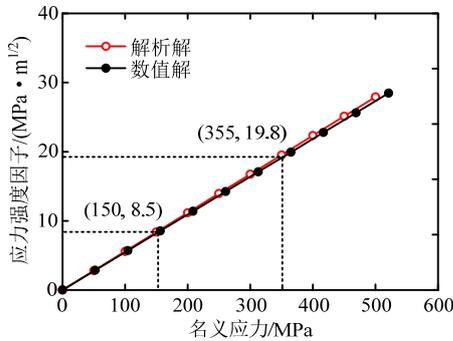


图 8 椭圆埋藏裂纹应力强度因子随作用应力的变化规律
Fig.8 Variation law of the stress intensity factor of embedded elliptical crack versus the applied stress

3.1.4 基于 K_{IC} 判据的评定结果

在设计工作应力 $\sigma=150\text{ MPa}$ 和接近屈服应力 $\sigma=355\text{ MPa}$ 作用下,给出了基于 K_{IC} 断裂判据的大板梁下翼缘板对接焊接接头含椭圆埋藏裂纹缺陷安全性评定的安全系数 $S_f = K_{mat} / K_I$, 如表 3 所示。可以看出,采用更加贴近实际缺陷状态的椭圆埋藏裂纹时,该含裂纹缺陷下翼缘板对接焊接接头具有很高的安全富裕度。

表 3 算例 1 大板梁安全性评定安全系数

Table 3 Safety factors of the steel plate girder for case 1

裂纹类型	K_{mat} (工作应力 150 MPa)		K_{mat} (屈服应力 355 MPa)	
	A_{KV}	$\delta_{0.2}$	A_{KV}	$\delta_{0.2}$
椭圆埋藏裂纹	27.2	30.9	11.7	13.3

3.1.5 基于 SINTAP-FAD 的评定结果

由于含椭圆埋藏裂纹的焊接强度不匹配平板的塑性极限荷载很难得到,因此,不考虑焊接高强度匹配带来平板极限荷载的增强,偏保守的采用纯母材中含椭圆埋藏裂纹的极限荷载解析解^[25]。计算得到,含椭圆埋藏裂纹下翼缘焊接接头平板的等效

远场塑性屈服荷载拉应力为 $\sigma_{YM}=\sigma_{YB}=353.8\text{ MPa}$, $F_{YM}/F_{YB}=1.0$ 。

如图 9 所示,给出了含椭圆埋藏裂纹的 K3 大板梁下翼缘板对接焊接接头的整体性安全评估结果。可以看出,在目前工作应力 $\sigma=150\text{ MPa}$ 的情况下,对 K3 大板梁下翼缘板对接焊接接头的缺陷评定结果是安全的;且采用椭圆埋藏裂纹模型进行评估时,含裂纹缺陷的下翼缘对接焊接接头具有较高的安全富裕度。从目前该电厂的工程实践反馈来看,该大板梁运行安全,未出现裂纹扩展的情况,也验证了本文采用椭圆埋藏裂纹简化模型的安全性评定结果。

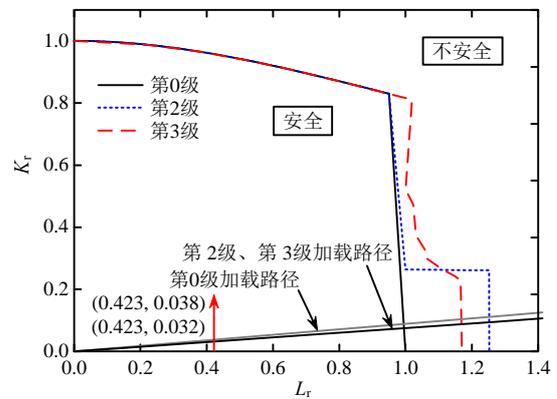


图 9 含椭圆埋藏裂纹的评定结果

Fig.9 Assessment results with the embedded elliptical crack

另外,从图 9 还可以看出,第 0 级评估给出了更加保守的评估结果,其加载路径(K_r, L_r)要高于第 2 级、第 3 级评估加载路径,且失效评定曲线被包络于第 2 级、第 3 级评定曲线之内;第 2 级、第 3 级评估给出了更加精确,但偏于不保守的评估结果。

3.2 算例 2

3.2.1 工程背景

2013 年,在对华东某电厂 1 号炉设备的现场检查中,磁粉探伤检测发现, K1~K5 大板梁拼接焊缝端部表面存在长度不一的线状裂纹,并初步对表面裂纹采取了打磨消缺处理;超声波探伤检测发现, K1~K5 大板梁翼板拼接焊缝内部存在着不同程度的点状和片状且被判定为超标缺陷,尚未采取处理。为保证施工及运营阶段锅炉大板梁的安全,需要对其带裂纹工作状态进行安全性评估。

根据大板梁应力水平和裂纹缺陷程度,选择以 K4 大板梁(H8600 mm×1500 mm×36 mm×120 mm)下翼缘 2H 位置处的拼接焊接接头为研究对象,对其拼接焊缝的表面裂纹缺陷和内部埋藏型缺陷进行基于 SINTAP-FAD 的安全性评定分析。翼缘板和

腹板钢材均采用 Q345B，下翼板由 3 段拼接而成，拼接焊缝采用 H10Mn2 焊丝，X 型坡口埋弧焊，其设计工作应力为 202 MPa。

3.2.2 材料参数

通过模拟构造大板梁下翼缘板对接焊接接头，尽可能真实获得大板梁的母材和焊缝真实材性数据。表 4、表 5 和图 10 给出了该模拟对接接头的母材和焊缝材料在室温条件下的拉伸、冲击与断裂韧性数据，焊接强度不匹配因子 $M=1.34$ ，属于高匹配焊接接头。同样可以看出焊缝材料力学性能表现出了更大的离散性；相比基于断裂韧性试验结果得到的 K_{mat} ，基于冲击韧性试验结果的 K_{mat} 给出了更加偏于保守的结果。

表 4 拉伸试验结果

Table 4 Results of the uniaxial tensile tests

材料		E/GPa	f_y/MPa	f_u/MPa	$A/(%)$
母材	均值	187.3	332.9	534.1	29.8
	离散系数	3.1	7.7	3.2	6.9
焊缝	均值	195.4	444.3	538.6	28.3
	离散系数	4.6	16.3	12.0	14.6

表 5 冲击试验和三点弯曲试验得到的 K_{mat} $/(MPa \cdot m^{1/2})$

Table 5 K_{mat} values transformed from test results of Charpy impact and three-point bending

材料	A_{KV}/J	$\delta_{0.2}/mm$
母材	201.6	248.1
焊缝	209.9	283.8

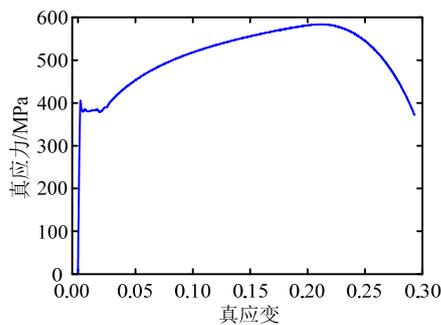


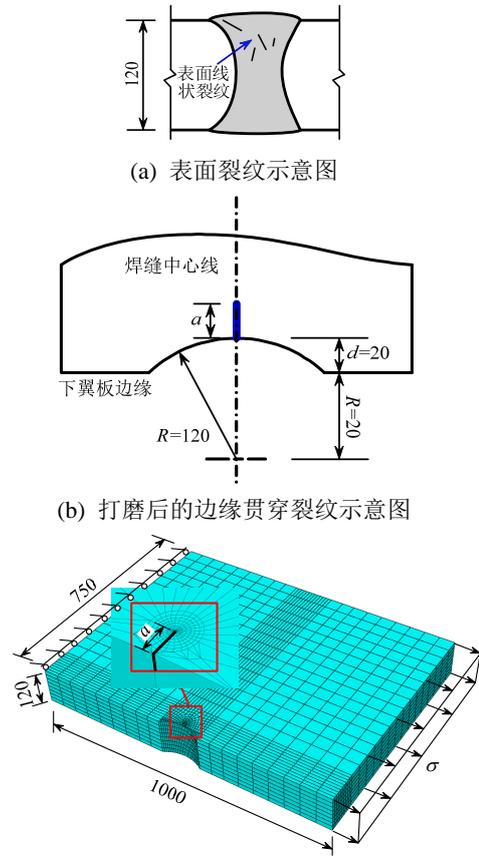
图 10 焊缝材料的真应力-真应变曲线

Fig.10 The true stress-strain curve of weld metal

3.2.3 裂纹简化及有限元模型

选取 K4 大板梁下翼缘板的对接焊接接头为研究对象，假定其应力边界条件为拉应力沿板厚方向均匀分布，不考虑剪应力的影响。K4 大板梁对接焊缝的表面线状裂纹如图 11(a)所示，虽然进行了初步打磨，但由于裂纹缺陷较深，仍然偏于保守的认为打磨后存在肉眼不可见的裂纹，将该表面裂纹简化为边缘贯穿裂纹， $a=2\text{ mm}$ ，如图 11(b)所示。如

图 11(c)，建立含裂纹缺陷焊接接头的精细化三维有限元模型，采用 8 节点六面体单元 C3D8。

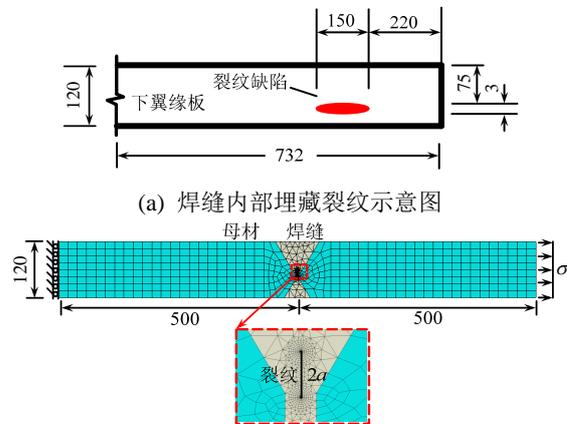


(c) 含边缘贯穿裂纹三维有限元模型

图 11 表面裂纹的模型简化 /mm

Fig.11 Simplified model of the surface crack

下翼缘板对接焊缝最不利的内部埋藏裂纹缺陷如图 12(a)所示，根据现场探伤结果，将内部埋藏裂纹偏于保守的简化为内部贯穿裂纹， $2a=3\text{ mm}$ ，如图 12(b)建立了含内部贯穿裂纹的二维精细化有限元模型，采用平面应变单元 CPE8。



(b) 含中心贯穿裂纹的二维有限元模型

图 12 内部埋藏裂纹的模型简化 /mm

Fig.12 Simplified model of the embedded crack

图 13 给出了含裂纹缺陷下翼缘板对接焊接接头表面裂纹和内部埋藏裂纹应力强度因子 K_I 的解析解^[1,21]与数值解的对比分析。可以看出, 将表面裂纹简化为边缘贯穿裂纹模型时, 由于焊缝表面进行了初步打磨, 引起的应力集中, 使得裂纹尖端 K_I 的数值解大于解析解; 将埋藏裂纹简化为中心贯穿裂纹模型时, 裂纹尖端 K_I 的数值解与解析解吻合的较好。因此, 3.2.4 节和 3.2.5 节的焊接缺陷整体安全性评估将仍然基于 K_I 数值解进行。

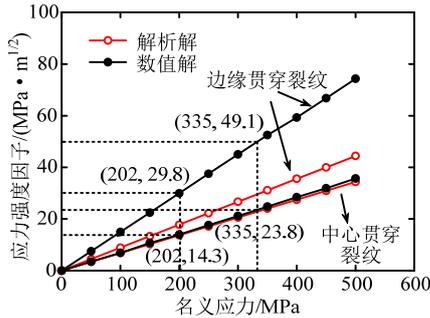


图 13 表面裂纹和内部埋藏裂纹的应力强度因子计算
Fig.13 Stress intensity factor of the surface crack and the embedded crack

3.2.4 基于 K_{IC} 判据的评定结果

在设计工作应力 $\sigma=202\text{ MPa}$ 和接近屈服应力 $\sigma=335\text{ MPa}$ 下, 给出了基于 K_{IC} 判据的大板梁下翼缘板对接焊接接头含边缘贯穿裂纹(表面未打磨和打磨后, 表面未打磨时, 取 $a=20\text{ mm}$)和中心贯穿裂纹缺陷安全性评定的安全系数, 如表 6 所示。可以看出, 对边缘贯穿裂纹经表面打磨后, 安全系数有了明显提升; 将对接焊缝的表面缺陷(打磨后)和内部埋藏缺陷分开考虑时, 均表现出了较高的安全富裕度。但对比案例 1 来说, 安全富裕度仍然偏低。

另外, K1、K2、K3 和 K5 大板梁对接焊缝表面缺陷进行了初步打磨, 且表面裂纹深度较浅, 假设不再存在二次裂纹。由于 K1 大板梁对接焊缝未检测到内部埋藏缺陷, 因此, 表 7 只给出了 K2、K3、K5 大板梁对接焊缝在最不利内部埋藏缺陷简化为中心贯穿裂纹条件下的安全系数。

表 6 算例 2 大板梁 K4 安全性评定安全系数

Table 6 Safety factor of the steel plate girder K4 for case 2

裂纹类型	K_{mat} (工作应力 202 MPa)		K_{mat} (屈服应力 335 MPa)	
	A_{KV}	$\delta_{0.2}$	A_{KV}	$\delta_{0.2}$
边缘贯穿裂纹(表面未打磨)	3.6	4.9	2.1	2.9
边缘贯穿裂纹(表面打磨后)	6.8	9.5	4.1	5.8
中心贯穿裂纹	14.1	19.8	8.5	11.9

表 7 算例 2 的 K2、K3、K5 大板梁安全性评定安全系数
Table 7 Safety factors of the steel plate girders K2, K3, K5 for case 2

裂纹类型	K_{mat} (工作应力 202 MPa)		K_{mat} (屈服应力 335 MPa)	
	A_{KV}	$\delta_{0.2}$	A_{KV}	$\delta_{0.2}$
K2	17.1	24.0	10.1	14.1
K3	14.9	21.0	8.8	12.4
K5	35.4	49.8	6.6	9.3

3.2.5 基于 SINTAP-FAD 的评定结果

对于含边缘贯穿裂纹和含中心贯穿裂纹高匹配焊接平板的塑性极限荷载, 由于本例的边缘贯穿裂纹和中心贯穿裂纹的尺寸远小于下翼缘板焊接接头尺寸, 在相对较高的焊接不匹配因子 $M=1.34$ 条件下, 平板焊接接头更倾向于发生毛截面屈服^[24]。因此, 对打磨后含边缘贯穿裂纹和含中心贯穿裂纹下翼缘板对接焊接接头的等效远场塑性极限荷载拉应力均取为母材的屈服应力 $\sigma_{YM}=332.9\text{ MPa}$, $F_{YM}/F_{YB}=1.0$ 。

如图 14 和图 15 所示, 给出了表面打磨后含边缘贯穿裂纹和含中心贯穿裂纹的 K4 大板梁下翼缘板焊接接头的安全性评估结果。结果表明, 在设计工作应力水平 $\sigma=202\text{ MPa}$ 的情况下, 分开考虑不同裂纹缺陷的影响时, 该大板梁对接焊缝是安全的。另外, 同样可以看出, 第 2 级、第 3 级评估能给出比第 0 级评估更精确但偏于不保守的结果。

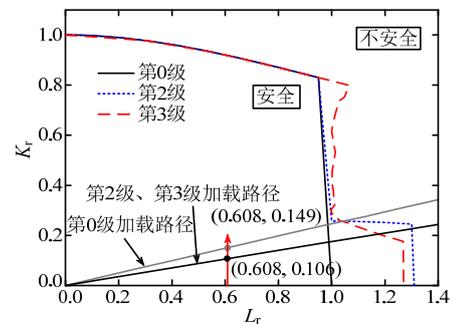


图 14 打磨后含边缘贯穿裂纹的评定结果
Fig.14 Assessment results with the edge through-all crack after surface polishing

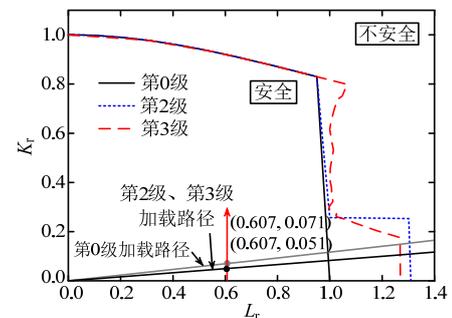


图 15 含中心贯穿裂纹的评定结果
Fig.15 Assessment results with center through-wall crack

尽管如此,从工程实践反馈来看,该大板梁下翼缘板的焊接缺陷出现了裂纹扩展的情况。2015年12月,通过专家评审决定通过体外预应力技术对大板梁进行加固处理。一方面是由于在进行内部埋藏裂纹简化时,拼接焊缝内出现了难于模拟的焊根缺陷群;另一方面本节将两种缺陷分开进行了评估,以及未考虑对裂纹的耦合作用,从而导致了评估结果低估了实际大板梁对接焊缝的实际缺陷状况。对比算例1的基于 K_{IC} 断裂判据和SINTAP-FAD的评定结果,也可以看出,本算例的安全富裕度更低,更加倾向于发生以塑性屈服为主的断裂破坏。

4 结论

基于SINTAP-FAD的原理,提出了带裂纹缺陷工作钢结构构件的安全性评定方法,通过算例分析得到如下结论:

(1) 运用ABAQUS有限元软件可以方便的进行钢结构构件裂纹的应力强度因子求解,对含多裂纹或者复杂裂纹体构件的断裂有限元分析还需要进一步的研究。

(2) 可用的含裂纹缺陷焊接强度不匹配构件塑性屈服荷载的解析解还比较有限,特别是对含椭圆埋藏裂纹的焊接强度不匹配构件塑性屈服荷载的计算还需要进一步的完善。

(3) 钢结构构件是在带裂纹的工作状态下工作的,但是,需要应用基于断裂力学的方法对其安全性进行评定。而基于SINTAP-FAD的结构安全性评估方法,正好为含裂纹缺陷工作的钢结构构件的安全性评定提供了一种有效、实用的途径。

(4) 从工程实践的反馈来看,算例1在目前的工作应力和裂纹状态下是安全的。算例2由于未能考虑多裂纹耦合的缺陷状态,安全评估给出了偏于不保守的结果。相比算例1,安全富裕度仍然偏低。

参考文献:

- [1] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 4.
Chen Chuanyao. Fatigue and fracture [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2001: 4. (in Chinese)
- [2] Fish J W. Fatigue and fracture in steel bridge: Case studies [M]. New York: John Wiley & Sons, 1984: 1.
- [3] Miller D K. Lessons learned from the Northridge earthquake [J]. Engineering Structures, 1998, 20(4/5/6): 249—260.

- [4] Kuwamura H. Fracture of steel during an earthquake state-of-the-art in Japan [J]. Engineering Structures, 1998, 20(4/5/6): 310—322.
- [5] Lee S B. Fatigue failure of welded vertical members of a steel truss bridge [J]. Engineering Failure Analysis, 1996, 3(2): 103—108.
- [6] Almar-Naess A, Haagenen P J, Lian B, et al. Investigation of the Alexander L. Kielland failure - metallurgical and fracture analysis [J]. Journal of Energy Resources Technology, 1984, 106(1): 24—31.
- [7] Goren Kiral B, Erim S. Prediction of fracture behavior of steel beam-to-column connections with weld defect using the SINTAP [J]. Engineering Structures, 2005, 27(5): 760—768.
- [8] 童乐为, 顾敏, 朱俊, 等. 基于断裂力学的圆钢管混凝土 T 型焊接节点疲劳寿命预测[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 331—336, 354.
Tong Lewei, Gu Min, Zhu Jun, et al. Prediction of fatigue life for welded T-joints of concrete-filled circular hollow sections based on fracture mechanics [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 331—336, 354. (in Chinese)
- [9] Hayes B. Classic brittle failures in large welded structures [J]. Engineering Failure Analysis, 1996, 3(2): 115—127.
- [10] 王元清. 钢结构脆性破坏事故分析[J]. 工业建筑, 1998, 28(5): 55—58.
Wang Yuanqing. Accident analysis on brittle failure of steel structures [J]. Industrial Construction, 1998, 28(5): 55—58. (in Chinese)
- [11] 王元清, 武延民, 王小哲, 等. 含缺口受拉平板三维应力场及其对脆性破坏的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(6): 832—834, 842.
Wang Yuanqing, Wu Yanmin, Wang Xiaozhe, et al. 3D stresses in a flat slab with a crack in tension and the effect on brittle fracture [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2002, 42(6): 832—834, 842. (in Chinese)
- [12] Kuwamura H, Iyama J, Matsui K. Effects of material toughness and plate thickness on brittle fracture of steel members [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(11): 1475—1483.
- [13] Teran-Guillen J, Cicero S, Garcia T, et al. Structural integrity assessment of the cast steel upper anchorage elements used in a cable stayed bridge [J]. Engineering Structures, 2014, 81: 309—317.
- [14] Lie S T, Li T. Failure pressure prediction of a cracked compressed natural gas (CNG) cylinder using failure assessment diagram [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 18: 474—483.
- [15] Zerbst U, Hamann R, Wohlschlegel A. Application of the European flaw assessment procedure SINTAP to pipes [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,

- 2000, 77(11): 697—702.
- [16] Gubeljak N, Zerbst U, Predan J, et al. Application of the European SINTAP procedure to the failure analysis of a broken forklift [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2004, 11(1): 33—47.
- [17] Motarjemi A K, Kocak M. Fracture assessment of a clad steel using various SINTAP defect assessment procedure levels [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2002, 25: 929—939.
- [18] 胡方鑫, 施刚, 石永久. 基于断裂力学的高强钢材梁柱节点受力性能分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(4): 41—46.
Hu Fangxin, Shi Gang, Shi Yongjiu. Fracture behavior of beam-column connections using high strength steel based on fracture mechanics [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(4): 41—46. (in Chinese)
- [19] Kim Y J, Kocak M, Ainsworth R A, et al. SINTAP defect assessment procedure for strength mis-matched structures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 67(6): 529—546.
- [20] SINTAP. Structural integrity assessment procedure for European industry [R]. Rotherham: British steel, 1999.
- [21] Lanham S A. Stress intensity factor and limit load handbook [M]. Gloucester: British Energy Generation Ltd, 1998: AI.2—AI.14, AIV.4—AIV.27.
- [22] ABAQUS. Analysis user's manual version 6.5 [M]. Providence, RI: Hibbitt, Karlsson and Sorenson, Inc., 2005.
- [23] Kim Y J, Schwalbe K H. Mismatch effect on plastic yield loads in idealized weldments I. weld center cracks [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(2): 163—182.
- [24] Kim Y J, Schwalbe K H. Compendium of yield load solutions for strength mis-matched DE(T), SE(B) and C (T) specimens [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(9): 1137—1151.
- [25] 李荣生. 含椭圆埋藏裂纹平板在拉弯组合作用下的极限荷载和J积分研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008.
Li Rongsheng. Limit load and J-integral of embedded elliptical cracks in plates under combined tension and bending [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2008. (in Chinese)

(上接第 22 页)

- [11] Joshua Mathew, Nisha Babu. Topology optimization of braced frames for high-rise buildings [J]. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2014, 5(12): 84—92.
- [12] Liang Qingquan, Xie Yimin, Steven G P. Optimal topology design of bracing systems for multistory steel frames [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(7): 823—829.
- [13] Kutuk M, Ibrahim Gov. Novel bracing type against seismic loading: KX type [J]. *Mathematical and Computational Applications*, 2013, 18(3): 438—447.
- [14] Shahrouzi M, Sardarinasab S. A new memetic swarm optimization for spectral layout desing of braced frames [J]. *International Journal of Optimization Civil Engineering*, 2015, 5(1): 53—65.
- [15] Lauren L Stromberg, Alessandro Beghini, William F Baker, Glaucio H Paulino. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column elements [J]. *Engineering Structures*, 2012, 37(4): 106—124.
- [16] Sigmund O, Maute K. Topology optimization approaches-A comparative review [J]. *Structural Multidisciplinary Optimization*, 2013, 48(6): 1031—1055.
- [17] Deaton J D, Grandhi R V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000 [J]. *Structural Multidisciplinary Optimization*, 2014, 49(1): 1—38.
- [18] JGJ3-2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
JGJ3-2010, Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [19] 彭细荣, 隋允康. 对连续体结构拓扑优化合理模型的再探[J]. *固体力学学报*, 2016, 37(2): 181—191.
Peng Xirong, Sui Yunkang. A further discussion on rational topology optimization models for continuum structures [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*. 2016, 37(2): 181—191. (in Chinese)