

高铁转向架焊接接头内部裂纹应力强度因子研究*

STUDY ON THE INTERNAL CRACK STRESS STRENGTH FACTOR OF WELDED JOINTS OF HIGH-SPEED RAIL BOGIES

回丽^{**1} 仇奕霏² 周松^{***2} 杨文军² 安金岚¹

(1. 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳 110136)

(2. 沈阳航空航天大学机电工程学院, 沈阳 110136)

HUI Li¹ ZHANG YiFei² ZHOU Song² YANG WenJun² AN JinLan¹

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

(2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

摘要 通过改变高铁转向架常用的十字焊接接头和斜交焊接接头中半椭圆形表面裂纹和椭圆形埋藏裂纹的大小、形状比和深度等几何参数,利用围线积分法探究裂纹前缘 I 型应力强度因子 K_I 受几何参数的影响规律,并利用多元非线性回归的方法拟合出了求解 K_I 的数学表达式,利用围线积分法分析了 K_I 对裂纹大小和形状比变化的敏感程度。结果表明, K_I 随裂纹的增大而增大并根据接头和裂纹形式的不同逐渐发散或收敛; K_I 随裂纹形状比的增大而减小并逐渐收敛; K_I 最大值点的位置由裂纹大小、裂纹形状比和裂纹位置共同决定;拟合出的求解 K_I 的数学表达式误差在 5% 以内,精度较高;在四种裂纹形式中,十字接头表面裂纹 K_I 对裂纹形状比的敏感度明显低于其他三种裂纹形式,斜交接头埋藏裂纹对裂纹大小的敏感度明显高于其他三种裂纹形式。

关键词 焊接接头 应力强度因子 奇异单元法 裂纹大小 裂纹形状比

中图分类号 TG407

Abstract By changing the geometric parameters such as the size, shape ratio and depth of semi-elliptical surface cracks and elliptical buried cracks in cross-welded joints and oblique welded joints commonly used in high-speed rail bogies, the influence of the geometric parameters on the type I stress intensity factor K_I at the crack front was analyzed by a contour integral method. A mathematical expression for solving K_I was fitted by a multivariate nonlinear regression method, and the sensitivity of K_I to the change of crack size and shape ratio was analyzed by a countour integral method. The results show that K_I increases with the increase of crack and gradually diverges or converges according to the difference of joint and crack form. K_I decreases and converges gradually with the increase of the crack shape ratio. The location of the maximum point of K_I was determined by crack size, crack shape ratio and crack location. The error of the fitted mathematical expression for solving K_I was within 5%, and the accuracy is high. Among the four crack forms, the sensitivity of the surface crack K_I of the cross joint to the crack shape ratio is obviously lower than that of the other three crack forms, and the sensitivity of the buried crack of the oblique joint to the crack size is obviously higher than that of the other three crack forms.

Key words Welded joint; Stress intensity factor; Strange cell method; Crack size; Crack shape ratio

Corresponding author: ZHOU Song, E-mail: zhousong23@163.com

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.52105157), the Series Projects of Liaoning Provincial Department of Education (No.LJKZ0194), and the Open Fund of the National Defense Key Laboratory (No.SHSYS202003).

Manuscript received 20230116, in revised form 20230511.

0 引言

转向架作为高速列车的核心部件之一,承载着列

车和乘客的重量,其质量直接决定列车的运行和行车安全。高铁转向架因其结构复杂,不能一次性加工成形,只能采用焊接的方式对钢材进行组合。但由于其

*20230116收到初稿,20230511收到修改稿。国家自然科学基金项目(52105157),辽宁省教育厅系列项目(LJKZ0194),国防重点实验室开放基金项目(SHSYS202003)资助。

**回丽,女,1965年生,辽宁鞍山人,汉族,沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室教授,博士,主要研究方向为航空材料与结构强度。

***周松(通信作者),男,1987年生,浙江金华人,汉族,沈阳航空航天大学机电工程学院副教授,博士,主要研究方向为航空材料与结构强度。

结构复杂,在焊接过程中,焊接接头内部难免出现未焊透、气孔、夹渣等缺陷,这些缺陷会导致应力集中现象,裂纹往往会在这些区域萌生^[1]。断裂力学中最重要的物理参量——应力强度因子,可表征外力作用下裂纹尖端附近应力场强度,对评价裂纹安全性有重要意义。确定应力强度因子的方法有解析法、数值法和实验法。解析法和实验法受几何形状复杂性限制较大,并且实验法成本极高,因此,数值法被广泛应用。数值法包括有限元法和边界元法,有限元法主要有位移法、应力法、虚拟裂纹闭合法、扩展有限元法、 J 积分法和奇异单元法等^[2]。位移法和应力法通过计算出裂纹尖端附近节点的应力值和位移值,得出这些节点处的应力强度因子,再近似认为这些节点的应力强度因子值与节点到裂纹尖端的距离成线性关系,进而推导出裂纹尖端的应力强度因子,但这两种方法对节点选择要求极高,并且裂纹尖端区域网格必须画得十分细密才能得出准确结果。虚拟裂纹闭合法通过计算裂纹扩展时的应变能释放率进而得出裂纹尖端应力强度因子,准确率较高但计算过程较为复杂。扩展有限元法由传统的有限元发展而来,可以方便地模拟出完整的裂纹扩展路径,适合模拟裂纹扩展问题。 J 积分法通过计算围绕在裂纹尖端与路径无关的线积分—— J 积分后,再利用应力强度因子与 J 积分之间的关系间接求得裂纹尖端应力强度因子,守恒性好,计算结果准确^[3]。奇异单元法通过围绕裂纹尖端构造奇异单元,能很好地反映裂纹尖端的奇异性,使得不需要过细的网格也能够得到较精确的结果^[4]。Abaqus中求解裂纹相关问题的围线积分法是一种以 J 积分法为基础,以奇异单元的构造为核心的求解方法,具有计算效率高、建模简单和计算精度高等优点^[5],为本文主要研究方法。

转向架常用焊接结构为十字和斜交焊接结构。对于十字焊接接头焊跟和焊趾处产生的裂纹,国内外学者进行了很多相关研究。ACKIEL M等^[6]研究了焊缝几何形状参数对十字焊接接头焊跟和焊趾处穿透裂纹应力强度因子的影响规律,并研究了焊跟和焊趾处穿透裂纹在疲劳载荷条件下的疲劳寿命。ZHAO H S等^[7]研究了裂纹长度、裂纹形状和裂纹位置等参数对十字焊接接头焊跟穿透裂纹和焊趾表面裂纹尖端应力强度因子的影响,并采用多元回归的方法建立了应力强度因子的求解方程。KRZYSZTOF L M等^[8-9]研究了十字焊接接头在拉伸载荷和弯曲载荷作用下,焊缝几何参数对焊跟穿透裂纹尖端 I 型和 II 型应力强度因子的影响,并拟合出数学表达式。AI MUKHTAR A M等^[10]采用了一种新的十字焊缝焊趾裂纹的分析方法,利用 Franc 2D

软件计算了裂纹扩展阶段的应力强度因子,并预测了裂纹扩展方向。魏国前等^[11-14]利用试验和有限元仿真相结合的方法研究了十字焊接接头焊趾处多裂纹和不同形状初始裂纹的裂纹扩展过程。对于十字焊接接头内部的埋藏裂纹,以及斜交焊接接头焊趾处表面裂纹和内部的埋藏裂纹,相关研究较少,并且高铁转向架中含有大量十字和斜交焊接接头,因此有必要对十字焊接接头和斜交焊接接头中表面裂纹和埋藏裂纹的裂纹前缘应力强度因子进行深入研究。

焊缝中的缺陷依据缺陷的大小、形状和位置等几何参数,按照国家标准 GB/T 19624—2019^[15]62-79 可规范化为椭圆形的表面裂纹和埋藏裂纹。本文采用围线积分法对高铁转向架十字和斜交焊接接头中表面裂纹和埋藏裂纹的裂纹前缘应力强度因子进行仿真研究,探究裂纹形状、裂纹大小与裂纹位置等几何参数对裂纹前缘应力强度因子的影响规律,并利用多元非线性回归方法拟合仿真结果,建立求解应力强度因子的数学表达式,并分析了应力强度因子对裂纹形状和大小变化的敏感程度,为评定含缺陷高铁转向架十字和斜交焊接接头安全性提供依据。

1 裂纹基本理论

1.1 裂纹尖端位移场

在裂纹尖端建立二维极坐标,设 x 轴正方向为裂纹正前方, y 轴正方向为裂纹面的法线方向,根据线弹性断裂力学相关理论可知,距离裂纹尖端很近,位置坐标为 (r, θ) 的单元的位移场与 I 型应力强度因子的关系^[16-17]如下:

$$u_x = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} (\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}) + O(r) \quad (1)$$

$$u_y = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} (\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2}) + O(r) \quad (2)$$

式中, μ 为剪切模量,与弹性模量 E 的关系为 $\mu = E(1 + \nu)/2$; ν 为泊松比; κ 为材料常数,取决于裂纹尖端应力状态,平面应力状态下 $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$,平面应变状态下 $\kappa = 3 - 4\nu$ 。若已知裂纹尖端某节点垂直于裂纹面的位移分量 u_y ,裂纹尖端 I 型应力强度因子可表示为

$$K_I = \frac{2\mu}{\kappa + 1} \lim_{r \rightarrow 0} (\mu_y \sqrt{\frac{2\pi}{r}}) \quad (3)$$

1.2 奇异单元法求裂纹尖端应力强度因子

根据断裂力学理论,裂纹尖端区域的应力具有奇异性,为了准确模拟应力的奇异性,HENSHALL R D等^[18]提出了奇异单元的概念。奇异单元是围绕裂纹尖端构造的一种特殊单元,典型裂纹尖端处布置的1/4节点奇异单元如图1所示,它可以准确模拟裂纹尖端

的应力奇异性。利用奇异单元中 1/4 节点和第 1 层边界上节点的张开位移进行线性外推, 可以计算得到平面应变和平面应力状态下的裂纹尖端应力强度因子的计算式, 即

$$K_I = \frac{E \sqrt{2\pi}}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{4u_{y(1/4)}}{\sqrt{r_{1/4}}} - \frac{u_{y(1/1)}}{\sqrt{r_{1/1}}} \right) \quad (4)$$

$$K_I = \frac{E \sqrt{2\pi}}{12} \left(\frac{4u_{y(1/4)}}{\sqrt{r_{1/4}}} - \frac{u_{y(1/1)}}{\sqrt{r_{1/1}}} \right) \quad (5)$$

式中, $r_{1/4}$ 、 $r_{1/1}$ 分别为奇异单元中 1/4 节点和单元边界上节点到裂纹尖端的距离; $u_{y(1/4)}$ 、 $u_{y(1/1)}$ 分别为 1/4 节点处和单元边界上节点处裂纹的张开位移。许多研究表明, 裂纹尖端绝大部分范围处于平面应变状态, 平面应力状态只在靠近自由表面的一个很小的区域内存在^[19]。对于平面应变状态, SHIH C F 等^[20]证明了在平面应变状态下, K_I 求解式为

$$K_I = \frac{Eu_{y(1/4)}}{4(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r_{1/4}}} \quad (6)$$

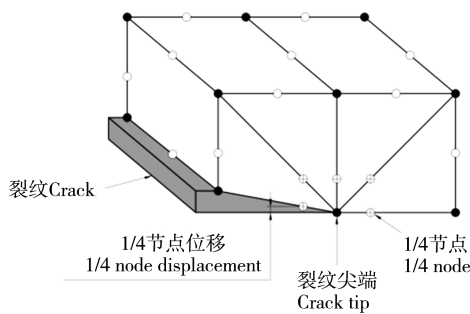


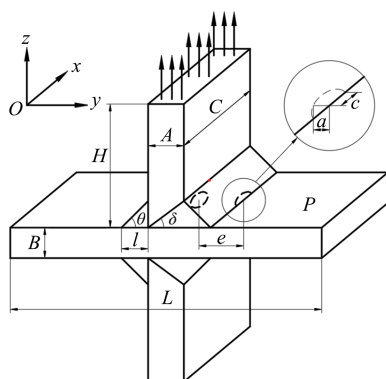
图 1 裂纹尖端节点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the crack tip nodes

2 仿真模型的建立

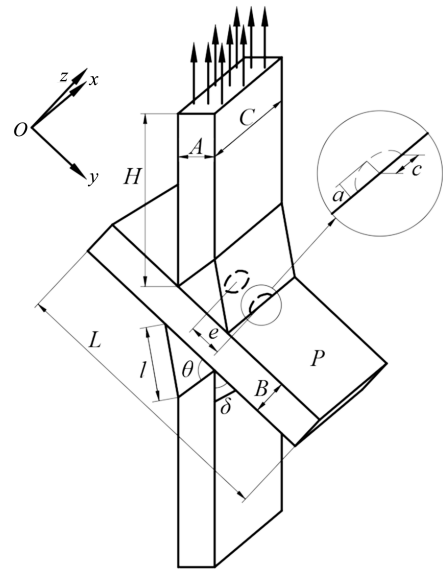
2.1 数值建模方法

高铁转向架常用焊接接头形式为十字接头和斜交接头, 建立含椭圆表面裂纹和埋藏裂纹的接头模型 (图 2), 模型尺寸数据如表 1 所示。



(a) 十字焊接接头模型示意图

(a) Schematic diagram of the cross-welded joint model



(b) 斜交焊接接头模型示意图

(b) Schematic diagram of the oblique-welded joint model

图 2 两种焊接接头模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two types of welded joint models

表 1 模型尺寸数据

Tab. 1 Model dimensions data

	A/mm	B/mm	C/mm	H/mm	L/mm	l/mm	$\theta/(^\circ)$	$\delta/(^\circ)$
十字接头 Cross joint	12	12	350	194	80	15	45	50
斜交接头 Oblique joint	12	12	350	185.5	80	29	95	45

图 2 中, 以裂纹中心为坐标系原点 O , 焊趾延伸方向为 x 轴正方向, P 面为 $x-y$ 平面, 垂直于 P 面向上为 z 轴正方向, 建立坐标系。设裂纹前缘角度在 x 轴负方向上为 0° , 并向 y 轴负方向增大; e 为埋藏裂纹深度, 用此参数来表征裂纹位置; a 为垂直于焊缝延伸方向上的半轴长, 用此参数来表征裂纹大小; c 为焊缝延伸方向上的半轴长, 用 a/c 来表征裂纹形状。为了便于分析, 3 种接头的有限元模型采用均质材料设置, 不考虑制造过程中的残余应力。长板一端固结, 另一端施加 $\sigma=100$ MPa 的轴向拉伸均布荷载, 钢材的弹性模量 $E=2.1 \times 10^5$ MPa, 泊松比为 $\nu=0.3$ 。具体建模方法如下:

1) 在裂纹前缘设置截面为正方形的六层围线积分区域, 采用 C3D8 实体单元建立裂纹区域模型如图 3 所示, 最里层采用退化单元来模拟裂纹前缘的奇异性, 其他单元采用普通单元模拟。

2) 通过 interaction 中的 crack 命令设置裂纹的分析方法为 seam, 并指定裂纹前缘和扩展方向, 指派接缝区域。

3)在分析步的历程输出中设置输出应力强度因子。

4)焊接接头模型除裂纹区域外的其他区域采用C3D10实体单元建立。

输出结果采用除围线区域最外层外的其他区域的应力强度因子的平均值,这样的建模方法可以有效地模拟出裂纹前缘的奇异性。

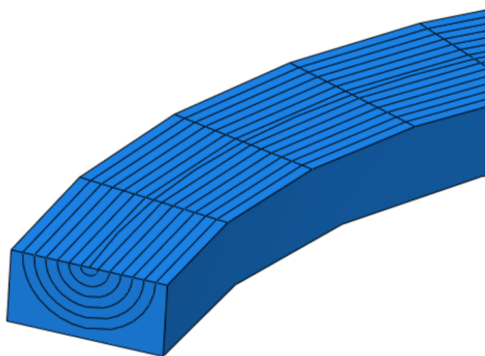


图3 裂纹前缘围线区域

Fig. 3 Countour area of the crack leading edge

2.2 仿真模型的准确性验证

国家标准 GB/T 19624—2019^[15]62-79 中给出了焊趾处存在椭圆表面裂纹的十字焊接接头模型范例,并给出了求解裂纹最深处应力强度因子的经验计算式:

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m^A M_{km} + \sigma_b f_b^A M_{kb}) / \Phi \quad (7)$$

式中, σ_m 为薄膜应力; σ_b 为线性化后的弯曲应力; f_m^A 、 f_b^A 均为A方向裂纹构型因子; M_{km} 、 M_{kb} 均为修正系数; Φ 为第二类椭圆积分。

根据该标准给出的范例,利用上文介绍的建模方法建立相应仿真模型,如图4所示,并将仿真结果与经验公式的计算结果进行对比,如表2所示。

由表2可以看出,误差率为6.33%。因此,该建模方法精度较高。

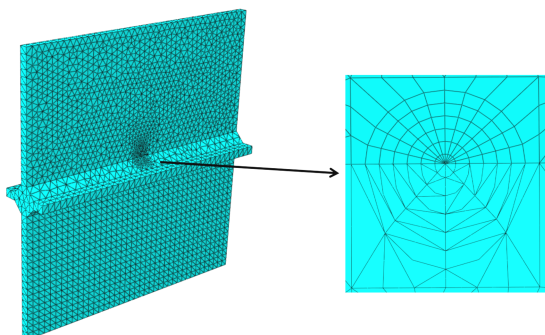


图4 十字接头整体模型

Fig. 4 Overall model of the cross joint

表2 最深点 K_I 数值模拟和计算式结果对比

Tab. 2 Comparison of numerical simulation and calculation formula results for the deepest point K_I

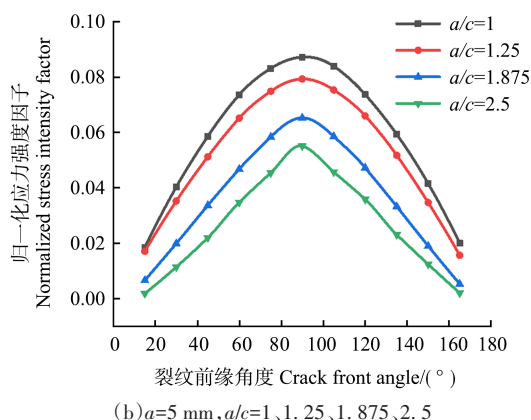
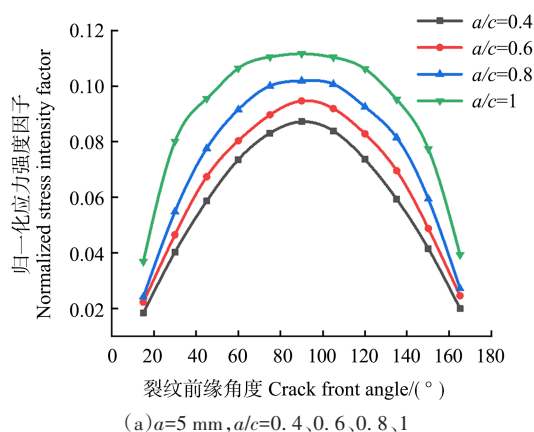
数值模拟 Numerical simulation/(MPa·mm ^{1/2})	经验公式 Empirical formula/(MPa·mm ^{1/2})
212.4	199.75

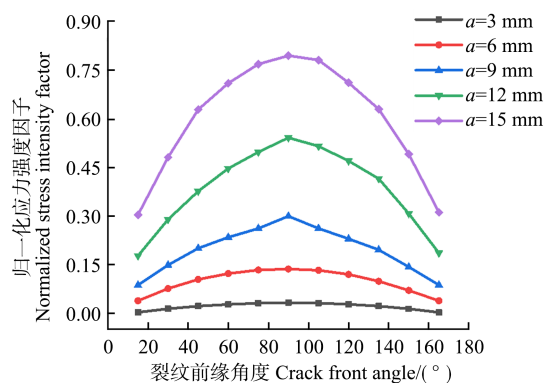
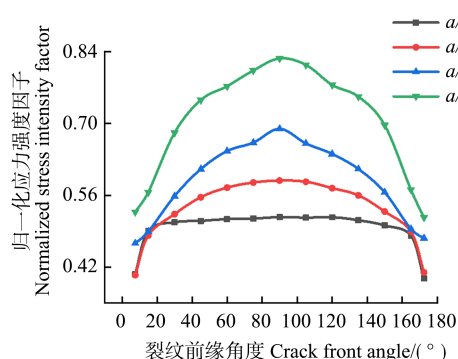
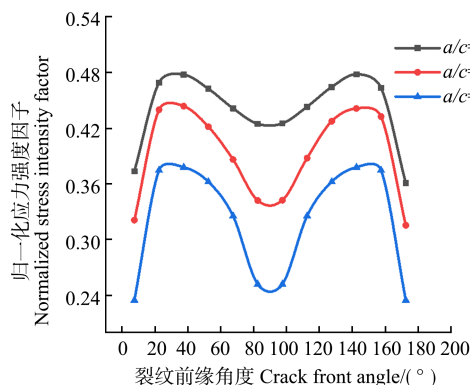
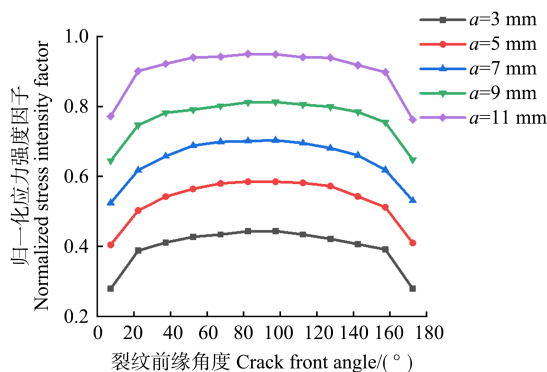
3 K_I 仿真结果及规律分析

为研究裂纹形状比 a/c , 裂纹长度 a 和裂纹深度 e 等参数对裂纹前缘I型应力强度因子 K_I (下文简称 K_I) 的影响,利用上文提出的建模方法,在Abaqus中建立不同组仿真模型,每组模型只改变 a/c 、 a 、 e 中的一个参数,可得出裂纹前缘各角度处的 K_I 值以及各参数对 K_I 的影响规律,并将 K_I 值进行归一化处理,规定 $0 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 为0, $220 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 为1。

3.1 表面裂纹 K_I 仿真结果及规律

表面裂纹 K_I 受两个参数影响,分别为 a/c 和 a 。在Abaqus中建立4组含椭圆表面裂纹的焊接接头仿真模型,两组模型为十字接头,两组模型为斜交接头,同种接头的两组模型中一组改变裂纹长度 a ,另一组改变形状比 a/c ,裂纹的几何参数和裂纹前缘各点 K_I 的变化规律如图5和图6所示。



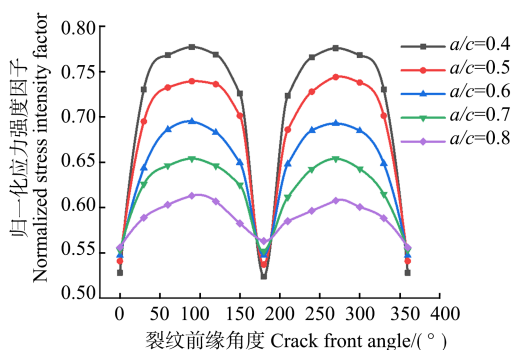
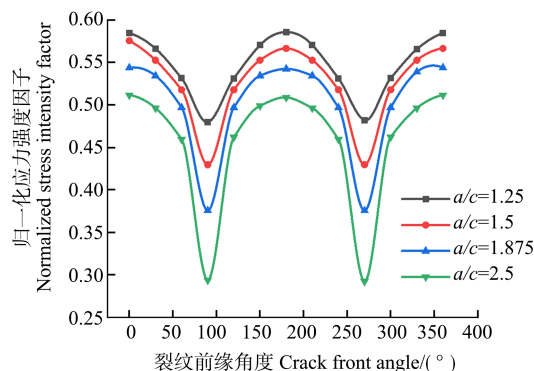
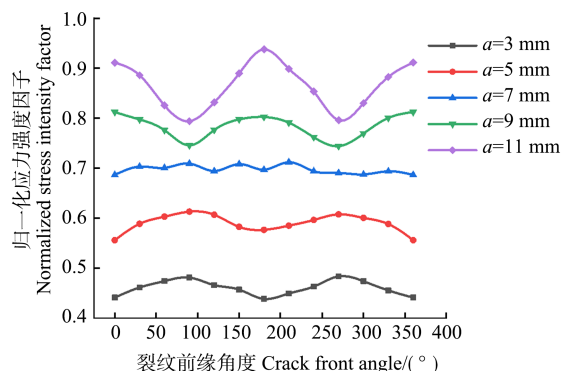
(c) $a/c=0.8, a=3, 6, 9, 12, 15$ mm图 5 十字接头表面裂纹 K_I Fig. 5 K_I of the surface crack of the cross joint(a) $a=5$ mm, $a/c=1, 0.8, 0.6, 0.4$ (b) $a=5$ mm, $a/c=1.25, 1.67, 2.5$ (c) $a/c=0.8, a=3, 5, 7, 9, 11$ mm图 6 斜接头表面裂纹 K_I Fig. 6 K_I of the surface crack of the oblique joint

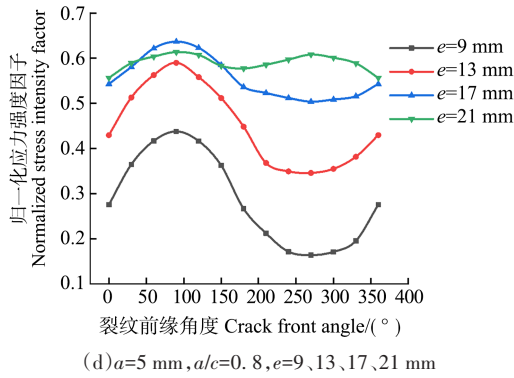
由图 5 和图 6 可以看出:

- 1) 十字和斜接头表面裂纹 K_I 随着 a/c 的增大而减小。
- 2) 十字和斜接头表面裂纹 K_I 随着 a 的增大而增大。
- 3) 当 $a/c \leq 1$ 时, 十字和斜接头表面裂纹 K_I 均在 90° 处达到最大值; 当 $a/c > 1$ 时, 十字接头表面裂纹 K_I 在 90° 处达到最大值, 斜接头表面裂纹 K_I 在 30° 和 150° 处达到最大值。

3.2 埋藏裂纹 K_I 仿真结果及规律分析

埋藏裂纹 K_I 受 3 个物理参量影响, 分别为裂纹大小 a 、形状比 a/c 和裂纹深度 e 。在 Abaqus 中建立 3 组含椭圆埋藏裂纹的十字接头仿真模型, 3 组仿真模型中椭圆埋藏裂纹的几何参数和裂纹前缘各点 K_I 的变化规律如图 7 所示。

(a) $a=5$ mm, $e=21$ mm, $a/c=0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ (b) $a=5$ mm, $e=21$ mm, $a/c=1.25, 1.5, 1.875, 2.5$ (c) $a/c=0.8, e=21$ mm, $a=3, 5, 7, 9, 11$ mm

图7 十字接头埋藏裂纹 K_I Fig. 7 K_I of the buried crack of the cross joint

由图7(a)和图7(b)可知:

1) 随着 a/c 的增大, 裂纹前缘 0° 和 180° 处 K_I 变化不大, 其他位置的 K_I 逐渐增大。

2) 当 $a/c \leq 1$ 时, K_I 在 90° 和 270° 处达到最大值; 当 $a/c > 1$ 时, K_I 在 0° 和 180° 处达到最大值。

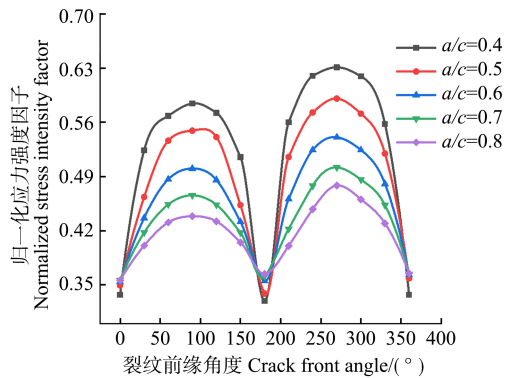
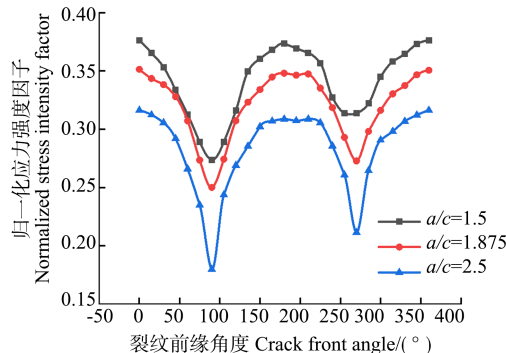
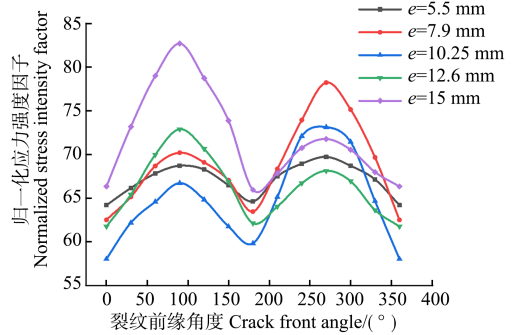
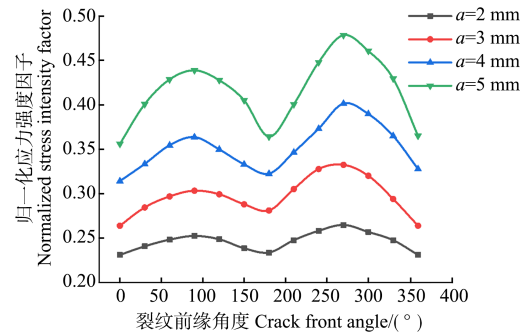
由图7(c)可知:

1) K_I 随着 a 的增大而增大。

2) 当裂纹大小 $a \leq 7$ mm 时, K_I 在裂纹前缘 90° 和 270° 处达到最大值; 当裂纹大小 $a > 7$ mm 时, K_I 在 0° 和 180° 处达到最大值。

由图7(d)可知, 裂纹前缘越靠近焊缝中心, K_I 越大。

在 Abaqus 中分别建立 3 组含椭圆埋藏裂纹的斜接头仿真模型, 3 组模型中椭圆埋藏裂纹的几何参数和裂纹前缘各点 K_I 的变化规律如图8所示。

(a) $a=5$ mm, $e=10.25$ mm, $a/c=0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ (b) $a=5$ mm, $e=10.25$ mm, $a/c=1.5, 1.875, 2.5$ 图8 斜接头埋藏裂纹 K_I Fig. 8 K_I of buried crack of the oblique joint

由图8(a)和图8(b)可知:

1) 随着 a/c 的增大, 裂纹前缘 0° 和 180° 处 K_I 变化不大, 其他位置的 K_I 逐渐增大。

2) 当 $a/c \leq 1$ 时, K_I 在 270° 处达到最大值; 当 $a/c > 1$ 时, K_I 在 0° 和 180° 处达到最大值。

由图8(c)可知, K_I 在 270° 处达到最大值, 并随着 a 的增大而增大。

由图8(d)可知:

1) 随着裂纹深度 e 的增大, 裂纹前缘 90° 和 270° 处的 K_I 经历了先增大后减小再增大的过程, 0° 和 180° 处的 K_I 经历了先减小后增大的过程。

2) 当 $e \leq 11.41$ mm 时, K_I 最大值点为裂纹前缘 270° 处; 当 $e > 11.41$ mm 时, K_I 最大值点为裂纹前缘 90° 处。

4 K_I 的多元非线性回归拟合与敏感性分析

4.1 裂纹前缘 K_I 多元非线性回归拟合

为分析十字接头和斜接头中表面裂纹和埋藏裂纹的 K_I 对 a/c 和 a 两种参数的敏感程度, 取十字接头表面裂纹、十字接头埋藏裂纹和斜接头表面裂纹前缘 90° 处的 K_I 进行多元非线性回归拟合。由图3、图4可知, 斜接头埋藏裂纹前缘 270° 处的 K_I 比 90° 处的 K_I 对 a/c 和 a 两种参数更为敏感, 因此选取 270° 处的数据进行拟合。

设拟合函数为

$$K_I = a' + b' \left(\frac{a}{c} \right)^2 + c'a^2 + d' \left(\frac{a}{c} \right)a + e' \left(\frac{a}{c} \right) + f'a \quad (8)$$

十字接头表面裂纹拟合函数为

$$K_I = 5674.477 + 1.74 \left(\frac{a}{c} \right)^2 + 0.662a^2 + 1418.485 \left(\frac{a}{c} \right)a - 7103.397 \left(\frac{a}{c} \right) - 1132.468a \quad (9)$$

十字接头埋藏裂纹拟合函数为

$$K_I = -2023.013 + 20.22 \left(\frac{a}{c} \right)^2 - 0.892a^2 - 537.295 \left(\frac{a}{c} \right)a + 2578.954 \left(\frac{a}{c} \right) + 450.869a \quad (10)$$

斜接头表面裂纹拟合函数为

$$K_I = -3641.995 + 30.652 \left(\frac{a}{c} \right)^2 - 0.3a^2 -$$

$$948.113 \left(\frac{a}{c} \right)a + 4592.859 \left(\frac{a}{c} \right) + 775.922a \quad (11)$$

斜接头埋藏裂纹拟合函数为

$$K_I = -913.608 + 19.126 \left(\frac{a}{c} \right)^2 + 1.44a^2 - 256.046 \left(\frac{a}{c} \right)a + 1182.838 \left(\frac{a}{c} \right) + 209.922a \quad (12)$$

拟合出的数学表达式的误差为

$$E_{\text{error}} = \left| \frac{K'_I - K_I}{K_I} \right| \times 100\% \quad (13)$$

式中, K'_I 为将 3 种几何参数代入拟合函数计算出的结果, K_I 为 Abaqus 的仿真结果, 单位均为 $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 。由式(13)计算出的误差和所有 K'_I 、 K_I 按照上文所述归一化方法处理后的数据如表 3、表 4 所示。

表 3 十字接头内部裂纹仿真数据、计算数据和误差

Tab. 3 Simulation data, calculation data and errors of internal cracks of the cross joint

十字接头表面裂纹 Surface crack of the cross joint					十字接头埋藏裂纹 Buried crack of the diagonal joint				
a/c	a/mm	仿真结果 Simulation result	计算结果 Calculation result	误差 Error/%	a/c	a/mm	仿真结果 Simulation result	计算结果 Calculation result	误差 Error/%
0.8	6	0.136	0.139	2.10	0.7	5	0.654	0.653	0.13
0.8	9	0.300	0.306	2.14	0.6	5	0.695	0.690	0.69
0.8	12	0.543	0.527	2.78	0.5	5	0.739	0.729	1.41
0.8	15	0.797	0.803	0.79	0.4	5	0.777	0.769	0.98
1.25	5	0.079	0.080	1.43	0.8	5	0.613	0.618	0.83
1.875	5	0.065	0.065	0.87	0.8	7	0.700	0.712	1.71
2.5	5	0.055	0.055	0.09	0.8	9	0.759	0.773	1.89
1	5	0.087	0.088	1.45	0.8	11	0.812	0.802	1.15
0.8	5	0.095	0.096	0.98	1.5	5	0.430	0.424	1.32
0.6	5	0.102	0.103	1.42	1.875	5	0.376	0.357	4.99
0.4	5	0.112	0.112	0.11	2.5	5	0.294	0.303	3.05

表 4 斜接头内部裂纹仿真数据、计算数据和误差

Tab. 4 Simulation data, calculation data and errors of internal cracks of the oblique joint

斜接头表面裂纹 Surface crack of the oblique joint					斜接头埋藏裂纹 Buried crack of the oblique joint				
a/c	a/mm	仿真结果 Simulation result	计算结果 Calculation result	误差 Error/%	a/c	a/mm	仿真结果 Simulation result	计算结果 Calculation result	误差 Error/%
1	5	0.513	0.514	0.21	0.8	3	0.332	0.332	0.01
0.8	5	0.589	0.598	1.60	0.7	5	0.502	0.515	2.58
0.6	5	0.689	0.693	0.59	0.6	5	0.541	0.548	1.27
0.4	5	0.826	0.800	3.23	0.5	5	0.591	0.582	1.42
0.8	3	0.444	0.461	3.93	0.4	5	0.631	0.619	1.96
0.8	7	0.726	0.724	0.32	0.8	5	0.478	0.483	1.05
0.8	9	0.801	0.839	4.65	0.8	4	0.401	0.401	0.01
0.8	11	0.961	0.943	1.88	0.8	5	0.478	0.483	1.05
1.25	5	0.429	0.424	1.05	1.5	5	0.314	0.313	0.10
1.67	5	0.340	0.314	7.58	1.875	5	0.273	0.257	5.61
2.5	5	0.230	0.238	3.67	2.5	5	0.211	0.218	3.37

由表3和表4可知,用多元非线性回归拟合出的数学表达式算出的裂纹前缘 K_I 值大部分误差在5%以内,具有较高的精度。

4.2 K_I 对 a/c 和 a 的敏感性分析

将十字接头表面裂纹、十字接头埋藏裂纹、斜交接头表面裂纹和斜交接头埋藏裂纹的拟合函数分别对 a/c 和 a 求偏导,并将 a/c 和 a 对应值代入偏导数,得出偏导数值的绝对值,即为 K_I 对 a/c 和 a 的敏感程度,如图9、图10所示。

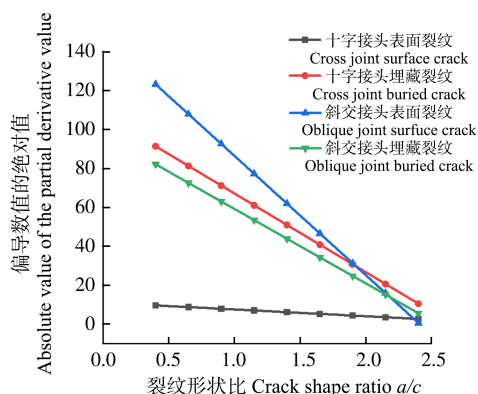


图9 K_I 对 a/c 的敏感程度

Fig. 9 Degree of K_I sensitivity to a/c

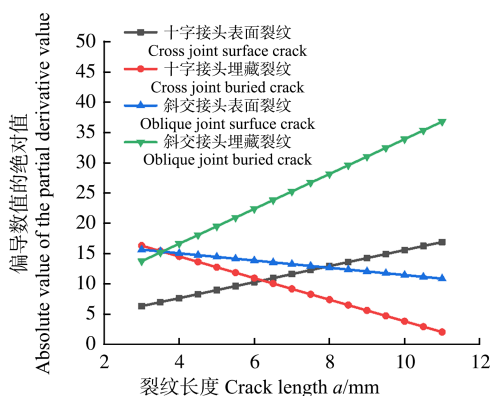


图10 K_I 对 a 的敏感程度

Fig. 10 Degree of K_I sensitivity to a

由图9可知,4种裂纹形式对 a/c 的敏感程度均随着 a/c 的增大而减小。十字接头埋藏裂纹、斜交接头表面裂纹和斜交接头埋藏裂纹的 K_I 对 a/c 的敏感度相差较小,但十字接头表面裂纹 K_I 对裂纹形状比的敏感度明显小于其他3种裂纹形式。

由图10可知,十字接头表面裂纹和斜交接头埋藏裂纹对 a 的敏感程度随着 a 的增大而增大,十字接头埋藏裂纹和斜交接头表面裂纹对 a 的敏感程度随着 a 的增大而减小。在4种裂纹形式中,斜交接头埋藏裂纹对 a 的敏感程度明显高于其他3种裂纹形式。

5 结论

本文探究了裂纹的大小、形状比和深度等几何参数对十字焊接接头和斜交焊接接头中表面裂纹和埋藏裂纹前缘 K_I 的影响规律,并利用多元非线性回归的方法拟合出了求解 K_I 的数学表达式,分析了 K_I 对裂纹大小和形状比变化的敏感程度,得出如下结论:

1)本文提出的求解裂纹前缘I型应力强度因子 K_I 的仿真建模方法精度较高,得出的仿真结果与国家标准GB/T 19624—2019中给出的经验公式计算出的结果相比,误差为6.33%。

2)十字接头表面裂纹 K_I 最大值点为裂纹最深点,而斜交接头表面裂纹 K_I 最大值点在形状比小于1时为裂纹最深点,在形状比大于1时靠近裂纹表面。十字接头埋藏裂纹 K_I 最大值点为距离焊缝中心最近的短半轴对应的裂纹前缘点,但随着裂纹的增大,短半轴对应的裂纹前缘点距离焊缝中心过远时, K_I 最大值点变为长半轴对应的裂纹前缘点。当应力比小于1时,随着裂纹深度的增大,斜交接头埋藏裂纹 K_I 最大值点从裂纹前缘270°处变为90°处;当应力比大于1时, K_I 最大值点为0°和180°处。

3)采用多元非线性回归的方法拟合出的求解 K_I 的数学表达式,大部分计算结果误差在5%以内,具有较高的精度。

4)4种裂纹的 K_I 随着裂纹形状比的增大而减小并逐渐收敛,十字接头表面裂纹和斜交接头埋藏裂纹的 K_I 随着裂纹的增大而增大并逐渐发散,十字接头埋藏裂纹和斜交接头表面裂纹的 K_I 随着裂纹的增大而增大并逐渐收敛。十字接头表面裂纹 K_I 对裂纹形状比的敏感度明显低于其他3种裂纹形式,斜交接头埋藏裂纹对裂纹大小的敏感度明显高于其他3种裂纹形式。

参考文献(References)

- [1] 王磊,曾泓润,刘小鹏,等. 打磨方式对SMA490BW耐候钢十字接头疲劳性能的影响[J]. 焊接, 2021(12): 12-16.
WANG Lei, ZENG HongRun, LIU XiaoPeng, et al. Effect of grinding methods on fatigue properties of SMA490BW weathering steel cross welded joints[J]. Welding & Joining, 2021(12): 12-16 (In Chinese).
- [2] 揭志羽,李亚东,卫星,等. 焊接节点表面裂纹复合型应力强度因子的数值计算研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 127-133.
JIE ZhiYu, LI YaDong, WEI Xing, et al. Numerical study of mixed-mode stress intensity factor of surface crack of welded joint[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 127-133 (In Chinese).

- Chinese).
- [3] 张涓榕. 基于扩展有限元的铝合金板裂纹扩展分析及疲劳寿命预测[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016: 14.
- ZHANG HuanRong. Crack propagation analysis and fatigue life prediction of aluminum alloy plate based on extended finite element method [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016: 14 (In Chinese).
- [4] 赵 莉. 钻杆本体及接头表面裂纹的断裂性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016: 15-16.
- ZHAO Li. Study on the fracture performance of cracks on the surface of the drill pipe body and joint [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016: 15-16 (In Chinese).
- [5] 董玉凡. 含复合缺陷 X80 天然气管道环焊缝完整性安全评价 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021: 23.
- DONG YuFan. Safety evaluation of circumferential weld integrity of X80 natural gas pipeline with composite defects [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021: 23 (In Chinese).
- [6] ACKIEL M, MANURUNG Y H P, GHAZALI F, et al. Finite element-based fatigue life prediction of a load-carrying cruciform joint [J]. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 2015, 8: 1414-1425.
- [7] ZHAO H S, LIE S T, ZHANG Y. Prediction of stress intensity magnification factors of a weld toe crack in load-carrying cruciform fillet welded joints under axial loading [J]. International Journal of Steel Structures, 2019, 19(3): 978-990.
- [8] KRZYSZTOF L M. Stress concentration at load-carrying fillet welded cruciform joints subjected to tensile and bending loads [J]. Acta Mechanica et Automatica, 2019, 13(4): 245-250.
- [9] DJOKOVIC J M, NIKOLIC R R. Influence of the joint geometry on the stress intensity factor of the fillet welded cruciform joint subjected to tension and bending [J]. Materials Today: Proceedings, 2016, 3 (4): 959-964.
- [10] AI MUKHTAR A M, HENKEL S, BIERMANN H, et al. A finite element calculation of stress intensity factors of cruciform and butt welded joints for some geometrical parameters [J]. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 2009, 3(4): 236-245.
- [11] 魏国前, 陈斯雯, 余 茜, 等. 焊趾多裂纹的试验与仿真分析 [J]. 焊接学报, 2019, 40(11): 75-81.
- WEI GuoQian, CHEN SiWen, YU Xi, et al. Experimental and simulation study on multiple cracks of weld toe [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(11): 75-81 (In Chinese).
- [12] 余 茜, 魏国前, 李山山, 等. 考虑形状比的焊趾裂纹扩展行为的数值仿真分析 [J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 107-112.
- YU Xi, WEI GuoQian, LI ShanShan, et al. Numerical simulation analysis of crack propagation behavior of weld toe considering shape ratio [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40 (5): 107-112 (In Chinese).
- [13] 余 茜, 魏国前, 李山山, 等. 考虑多裂纹的焊趾裂纹扩展行为的数值仿真分析 [J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 88-93.
- YU Xi, WEI GuoQian, LI ShanShan, et al. Numerical simulation analysis of crack propagation in weld toe considering multiple cracks [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40 (7): 88-93 (In Chinese).
- [14] 余 茜, 魏国前, 胡政豪, 等. 焊趾裂纹前沿扩展的动态数值仿真分析 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37(7): 1107-1114.
- YU Xi, WEI GuoQian, HU ZhengHao, et al. Dynamic numerical simulation analysis for crack front propagation in welding toe [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37 (7): 1107-1114 (In Chinese).
- [15] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 在用含缺陷压力容器安全评定: GB/T 19624—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 62-79.
- National Technical Committee of Boilers and Pressure Vessels Standardization. Safety assessment of in-service pressure vessels containing defects: GB/T 19624—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019: 62-79 (In Chinese).
- [16] IRWIN G R. Plastic zone near a crack and fracture toughness [C]// Proceedings of the 7th Sagamore Research Conference on Mechanics & Metals Behavior of Sheet Material. New York, 1960, 4: 463-478.
- [17] 任晖邦. 钻井隔水管接头焊缝裂纹干涉问题的研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2017: 8-9.
- REN HuiBang. Research of interaction cracks at riser pipe coupling weld [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017: 8-9 (In Chinese).
- [18] HENSHELL R D, SHAW K G. Crack tip finite elements are unnecessary [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1975, 9(3): 495-507.
- [19] 宋占勋, 方少轩, 谢基龙. T形焊接接头根部裂纹应力强度因子研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 87-94.
- SONG ZhanXun, FANG ShaoXuan, XIE JiLong. Research on stress intensity factors for weld root crack of T-butt joints [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (2): 87-94 (In Chinese).
- [20] SHIH C F, DE LORENZI H G, GERMAN M D. Crack extension modeling with singular quadratic isoparametric elements [J]. International Journal of Fracture, 1976, 12(4): 647-651.