

FRP 加固金属裂纹板的断裂力学分析¹⁾

彭福明 岳清瑞 杨勇新 张晓欣

(中冶集团建筑研究总院, 北京 100088)

摘要 传统的金属结构加固方法会形成新的疲劳源, 而粘贴 FRP 加固则具有明显的优势. 提出了“三维实体 - 弹簧 - 壳元”有限元模型, 金属板采用三维实体单元, FRP 采用壳单元, 用弹簧单元来模拟 FRP 与金属板之间的胶层, 对金属裂纹板粘贴 FRP 加固后的性能进行了线弹性断裂力学分析, 并对影响金属板裂纹前缘应力强度因子的参数进行了讨论. 分析结果表明, 采用高弹性模量的 FRP 和增加 FRP 的厚度对改善加固效果非常明显.

关键词 纤维增强复合材料, 金属裂纹板, 线弹性断裂力学, 应力强度因子, 约束方程

FRACTURE MECHANICS ANALYSIS OF CRACKED METALLIC PLATES REPAIRED WITH FRP

PENG Fuming YUE Qingrui YANG Yongxin ZHANG Xiaoxin

(Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group, Beijing 100088, China)

Abstract There are several advantages of adhesively bonded fiber reinforced polymer (FRP) laminates used for the deteriorated metallic members over the traditional retrofit methods susceptible to fatigue crack initiation. The three dimensional “solid-spring-shell element” finite element model is presented in the paper. In the FEM model, the metallic plate is modeled as a solid element, FRP is modelled as a shell element and the spring element is used to model the adhesion between the metallic plate and FRP. Linear fracture mechanics analysis of cracked metallic plates repaired with FRP is carried out. Influencing factors on the stress intensity factors at crack tips are discussed. It is shown that the increases in the elastic modulus or the thickness of FRP improve the effectiveness of strengthening significantly.

Key words fiber reinforced polymers, cracked metallic plates, linear fracture mechanics, stress intensity factors, constraint equations

金属结构在使用过程中受到交变荷载的作用, 内部的初始缺陷不断发展形成宏观裂纹, 裂纹失稳扩展导致结构失效. 疲劳断裂是金属结构破坏的主要形式之一, 一旦发生就会造成灾难性的后果. 当金属结构存在裂纹时, 其承载能力和刚度变弱. 传统的加固方法是将金属盖板和型材通过焊接、栓接或铆接的方式连于原损伤结构. 实践表明这些传统的加固方法是有效的, 但存在以下缺点: 焊接缺陷对疲劳敏感; 焊缝附近可能发生电偶腐蚀; 栓接需要在损伤部位钻孔, 恶化了损伤区域的受力情况; 需要

补强板, 增加了结构的重量; 加固工期长, 影响结构的正常使用; 金属容易锈蚀, 维护费用高等. 与传统的金属结构加固方法相比, 由于纤维增强复合材料 (FRP) 具有优异的耐疲劳性能, 而且粘结传力更加均匀可靠, 不会带来疲劳敏感缺陷, 因此粘贴 FRP 加固裂纹金属构件具有特别的优势. 双面粘贴 FRP 加固金属裂纹板的典型构造如图 1 所示.

断裂力学从材料中具有初始缺陷这一事实出发, 研究裂纹尖端附近的应力应变情况. 目前线弹性断裂力学已经比较成熟, 在生产中已经得到广泛

2005-05-09 收到第 1 稿, 2005-12-09 收到修改稿.

1) 国家 863 计划项目 (2001AA336010), 国家自然科学基金项目 (50238030) 和 2004 年科研院所技术开发研究专项资金项目 (2004EG213024) 资助.

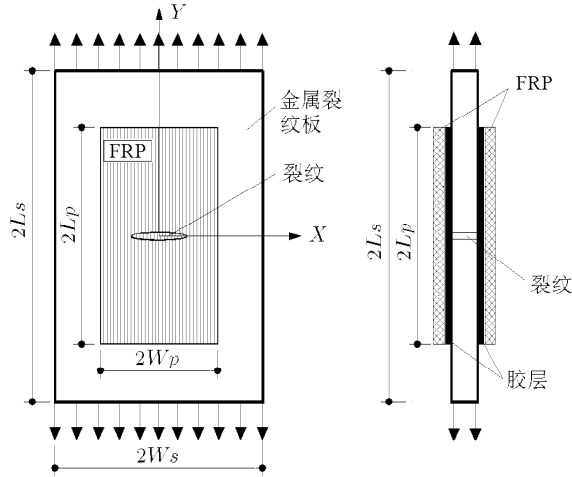


图 1 FRP 加固金属裂纹板

的应用。本文采用通用有限元程序 ANSYS, 利用其二次开发功能, 主要是参数化设计语言 (APDL) 和宏命令, 建立了“三维实体 - 弹簧 - 壳元”有限元模型, 对金属裂纹板粘贴 FRP 加固后的性能进行了线弹性断裂力学分析, 并对影响参数进行了讨论。

1 断裂力学分析的关键技术

1.1 裂纹前缘的模拟

金属裂纹板断裂力学模型中最重要的区域是裂纹前缘, 在线弹性断裂力学中, 裂纹前缘的应力和应变具有奇异性, 即随 $1/\sqrt{r}$ 变化。Hensbell 和 Shaw^[1], Barsoum^[2~4] 提出用中节点位于距裂尖 $1/4$ 单元长度处的二次等参元来处理裂纹问题, 这样可以得到裂尖附近的应力场具有 $1/\sqrt{r}$ 的渐近性, 这种单元称为奇异单元。奇异单元在 ANSYS 中采用 Solid95 单元, 即将 20 节点等参单元的中间节点移至单元相应边长的 $1/4$ 处, 如图 2 所示。ANSYS 不能自动生成奇异单元, 所以编写宏命令手工生成节点和单元。金属裂纹板其它区域均采用 Solid45 实体单元。

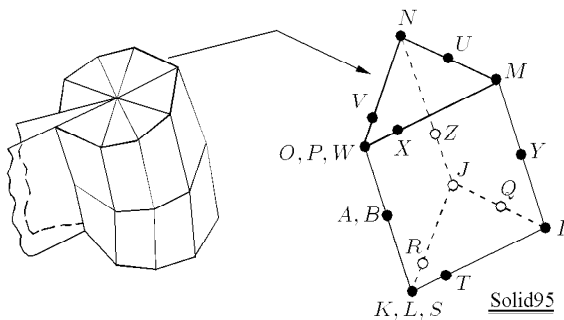


图 2 裂纹前缘奇异单元

1.2 粘结胶层的模拟

由于粘结胶层的厚度很小, 因此在有限元分析中采用实体单元是不合适的。本文采用 ANSYS 中的弹簧单元 Combin14 来模拟 FRP 与金属板之间的胶层, 在 FRP- 胶层界面与金属板表面之间相应的一对节点之间设置 3 个弹簧单元分别表示界面的法向 (即金属板的厚度方向)、纵向切向和横向切向, 如图 3 所示。

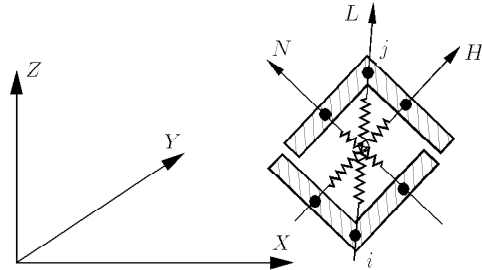


图 3 粘结胶层弹簧单元

弹簧单元的长度为胶层的厚度, 法向弹簧单元的性能由粘结剂拉伸试验得到的应力 - 应变曲线确定, 切向弹簧单元的性能由粘结剂剪切试验的剪切应力 - 剪切应变曲线得到, 分析中认为纵向切向弹簧和横向切向弹簧的性能相同。在确定 Combin14 单元的实常数时, 需要用到每个弹簧单元所对应的粘结胶层的面积, 如图 4 所示。从图中可以看出, 根据弹簧所对应节点的位置可以分为中间弹簧 (即内部弹簧)、边界弹簧和角部弹簧 3 类弹簧, 各类弹簧对应的面积计算公式分别为:

中间弹簧

$$A_i = \frac{1}{4}(a + b)(c + d) \tag{1}$$

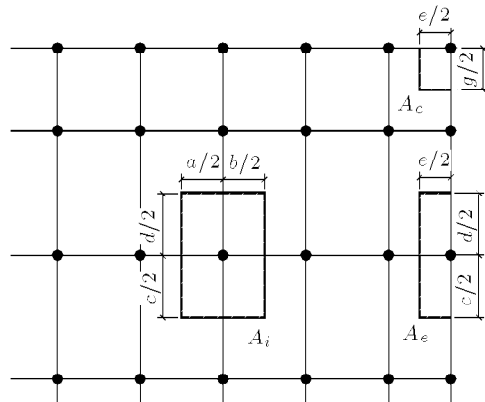


图 4 弹簧单元面积的计算

边界弹簧

$$A_e = \frac{1}{4}(a + b)e \quad (2)$$

角部弹簧

$$A_c = \frac{1}{4}eg \quad (3)$$

1.3 FRP 的模拟

加固金属结构采用的 FRP 厚度一般较小, 所以本文采用 Shell63 单元来模拟. 为了保证各部分的变形协调, 需要在 FRP- 胶层界面节点与 FRP 中面节点之间建立约束方程 [5], 如图 5 所示, 图中 t_a 为胶层的厚度, t_p 为 FRP 的厚度, FRP 的中面节点 i 和 FRP- 胶层界面节点 j 之间的约束方程为

$$u_i = u_j + \frac{t_p}{2}\theta_{yi} \quad (4)$$

$$v_i = v_j - \frac{t_p}{2}\theta_{xi} \quad (5)$$

式中, $u_i, v_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}$ 分别为 FRP 中面节点沿其节点坐标系 X 方向, Y 方向的位移和绕 X 轴, Y 轴的转角; u_j, v_j 为 FRP- 胶层界面节点 (即弹簧单元的上节点) 沿 X 轴, Y 轴的位移.

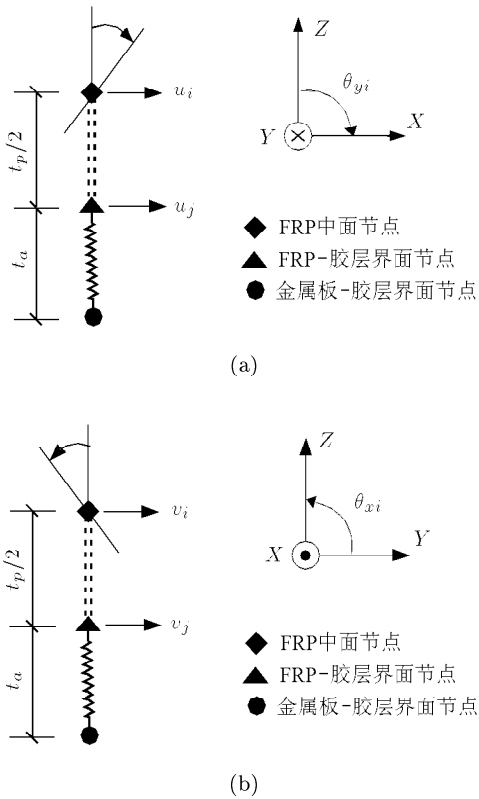


图 5 约束方程

1.4 裂纹前缘的界面脱胶

在金属板裂纹前缘区域, 由于几何形状的不连

续和材料的突变, 会产生严重的应力集中, 因此该区域会出现局部脱胶, 即局部胶层破坏或粘结界面失效, FRP 与金属裂纹板分离. 采用本文的有限元模型可以方便地描述这种现象. 将脱胶区域相应节点之间的剪切弹簧单元删除, 但仍保留法向弹簧单元, 这是为了防止 FRP 与金属表面之间发生贯穿, 即 FRP- 胶层界面节点处于金属板表面节点之下, 脱胶区域的模拟见图 6.

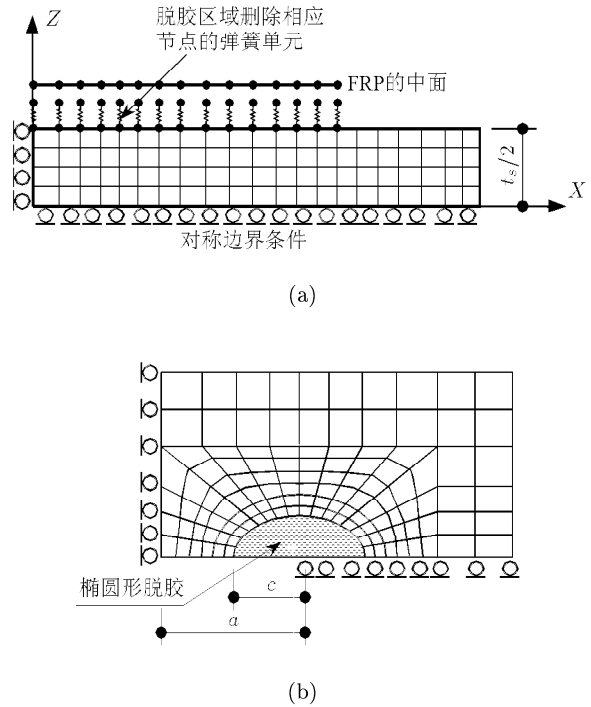
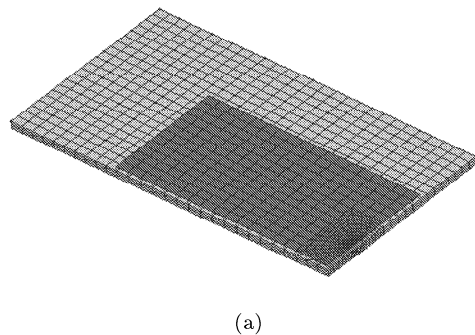


图 6 裂纹前缘椭圆形脱胶的模拟

对于图 1 所示的 FRP 加固金属裂纹板, 采用本文提出的“三维实体 - 弹簧 - 壳元”模型, 即金属裂纹板采用实体单元, 粘结胶层采用弹簧单元, FRP 采用壳单元. 由于对称性, 仅取 1/8 模型进行分析, 在对称面施加对称边界条件, 分析的有限元模型见图 7 所示.



(a)

图 7 有限元模型

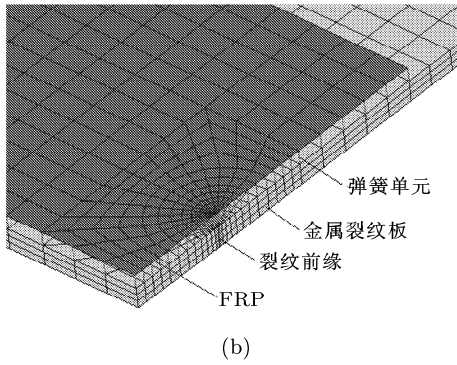


图 7 有限元模型 (续)

2 ANSYS 中应力强度因子的计算

线弹性断裂力学分析中, 采用裂尖附近节点位移拟合得到应力强度因子. 当裂纹体关于裂纹面对称时, 应力强度因子计算如下

$$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{2G}{1 + \kappa} \frac{|v|}{\sqrt{r}} \quad (6)$$

$$K_{II} = \sqrt{2\pi} \frac{2G}{1 + \kappa} \frac{|u|}{\sqrt{r}} \quad (7)$$

$$K_{III} = 2\sqrt{2\pi} G \frac{|w|}{\sqrt{r}} \quad (8)$$

式中, K_I, K_{II}, K_{III} 为 I 型, II 型, III 型裂纹的应力强度因子. u, v, w 为局部柱坐标系下的位移, 见图 8. r, θ 为局部柱坐标系下的坐标. $\kappa = 3 - 4\nu$ (平面应变或轴对称) 或 $\kappa = \frac{3 - \nu}{1 + \nu}$ (平面应力). ν 为材料的泊松比; G 为材料的剪切模量.

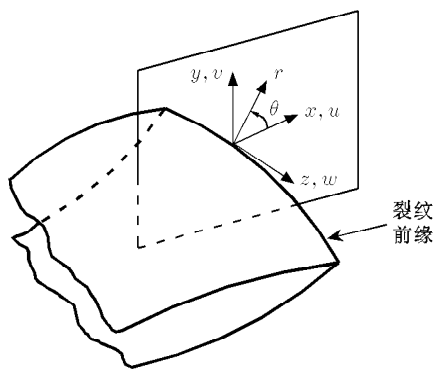


图 8 裂纹前缘的局部坐标系

假定在裂尖局部坐标系下, 对于 y 方向的位移可表达为^[6]

$$\frac{|v|}{\sqrt{r}} = A + Br \quad (9)$$

式中, A, B 为未知常数, 可由图 9 中节点 J 和 K 的位移得到.

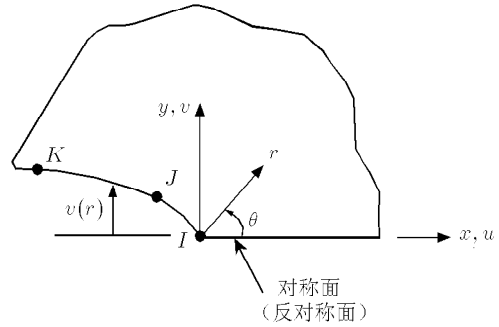


图 9 表征裂尖位移的节点

根据节点 J, K 沿 y 方向的位移 v_j, v_k , 并注意到 $r_k = 4r_j$, 可得

$$A = \frac{8|v_j| - |v_k|}{3\sqrt{r_k}}, \quad B = \frac{4|v_k| - 8|v_j|}{3r_k^{3/2}} \quad (10)$$

由式 (9) 得

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{|v|}{\sqrt{r}} = A \quad (11)$$

则由式 (6) 和式 (11) 得到 I 型裂纹的应力强度因子

$$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{2GA}{1 + \kappa} \quad (12)$$

类似地, 可以得到其它二类裂纹的应力强度因子.

3 断裂力学参数分析

本文对粘贴 FRP 加固后的金属裂纹板裂纹前缘的断裂参量 - 应力强度因子 K 进行了有限元分析, 并对各种影响因素进行了比较和分析. 由于是单向拉伸金属板, 因此, 仅对金属板裂纹前缘的 I 型应力强度因子 K_I 进行分析, 分析采用的参数见表 1.

表 1 有限元分析采用的参数

材料	材料性能	几何参数 (mm)	备注
金属	$E = 200 \text{ GPa}, \nu = 0.3$	$L_s = 200;$	各向同性材料
		$W_s = 100;$	
		$t_s = 6$	
胶层	$E_a = 3 \text{ GPa}, \nu_a = 0.5$	$t_a = 0.5$	各向同性材料
		$E_X = 300 \text{ GPa}$ (主方向)	
FRP	$E_Y = E_Z = 10 \text{ GPa}$ $G_{XY} = G_{XZ} = 5 \text{ GPa}$ $G_{YZ} = 2.5 \text{ GPa}$ $\mu_{XY} = \mu_{XZ} = 0.28$ $\mu_{YZ} = 0.35$	$L_p = 100$	正交各向异性材料
		$W_p = 60$	
		$t_p = 0.5$	

3.1 裂纹长度的影响

未加固金属裂纹板和双面加固金属裂纹板的应

力强度因子见图 10. 图中 UM 表示未加固金属板的中面, US 表示未加固板的表面, RM 表示加固板的中面, RS 表示加固板的表面.

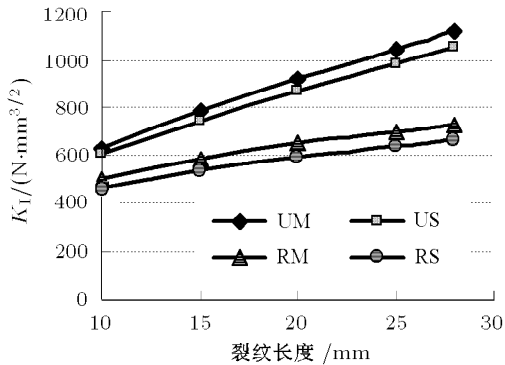


图 10 加固前后 K_I 随裂长的变化

从图中可以看出, 粘贴 FRP 加固后, 裂尖的应力强度因子大幅度降低, 金属板中面的应力强度因子降低了 21.4%~35.0%, 表面的应力强度因子降低了 24.1%~37.0%. 随着裂纹长度的增加, 降低效果更加明显, 而且金属板表面的应力强度因子降低的更多. 粘贴 FRP 加固后, 降低裂纹尖端的应力强度因子是延长金属构件疲劳裂纹扩展寿命的直接原因.

3.2 FRP 刚度的影响

FRP 的刚度与 FRP 的弹性模量和厚度有关, 增加弹性模量或厚度都会导致刚度的增加. 当裂纹长度为 20mm 时, 应力强度因子随 FRP 的弹性模量和厚度的变化见图 11 和图 12. 从图中看出, 随着 FRP 弹性模量的增加或厚度的增加, K_I 明显降低, 而且基本呈线性关系. 因此, 提高 FRP 的弹性模量或增加 FRP 的厚度是降低裂纹前缘应力强度因子的有效措施.

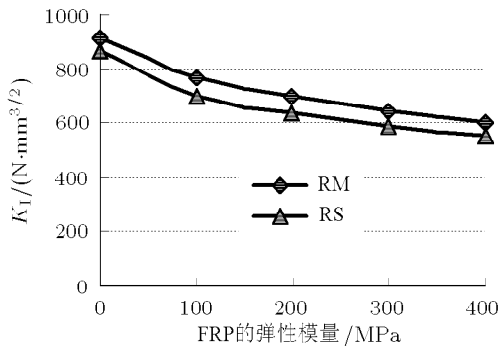


图 11 K_I 随 FRP 弹性模量的变化

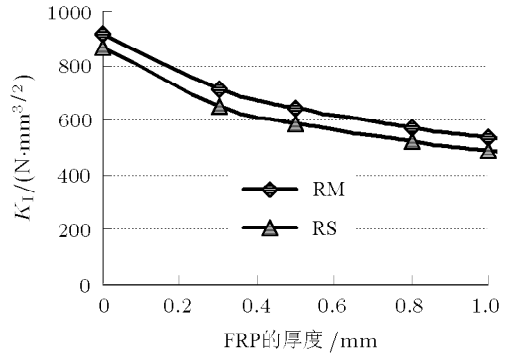


图 12 K_I 随 FRP 厚度的变化

3.3 FRP 尺寸的影响

FRP 的尺寸主要是指 FRP 粘贴区域的大小, 即 FRP 的长度和宽度. 当裂纹长度为 20mm 时, 应力强度因子随 FRP 的长度和宽度的变化见图 13 和图 14. 从图 13 看出, 随着 FRP 长度的增加, 应力强度因子明显降低; 但是当 FRP 的长度增加到一定尺寸后 (约为 60mm, 即约为裂纹长度的 3 倍), 应力强度因子不再降低, 即增加 FRP 的粘贴长度对降低裂尖应力强度因子不起作用. 从图 14 可以看出, 随着 FRP 宽度的增加, 裂尖的应力强度因子不断降低; 当 FRP 的宽度增加到一定范围后, 加固效果有所减

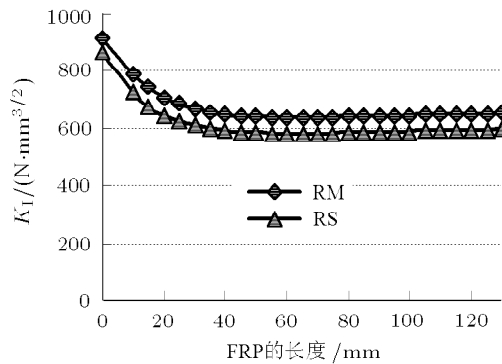


图 13 K_I 随 FRP 长度的变化

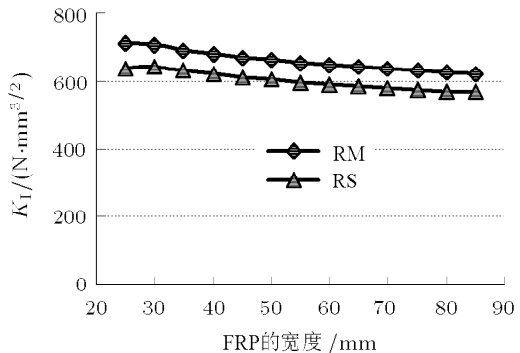


图 14 K_I 随 FRP 宽度的变化

缓. 因此, 增加 FRP 的宽度比增加 FRP 的长度对提高裂纹的疲劳扩展寿命有效.

3.4 裂纹前缘界面脱胶的影响

由于金属裂纹前缘和裂尖粘结区域存在严重的应力集中, 因此, 在裂尖区域 FRP 与金属裂纹板之间的粘结可能局部失效, 即界面脱胶. 本文的分析假定裂尖脱胶区域为椭圆形, 且长轴与短轴之比为 1.25. 应力强度因子随脱胶区域大小的变化见图 15, 图中横坐标 c/a 表示脱胶区域的长半轴与裂纹半长的比值, 见图 6. 从图中看出, 随着脱胶区域尺寸的增大, 裂尖应力强度因子有所增加, 但不是太明显, 例如当裂尖脱胶长度达到裂纹长度的 80% 时, 应力强度因子仅增加了 4.6%~8.6%.

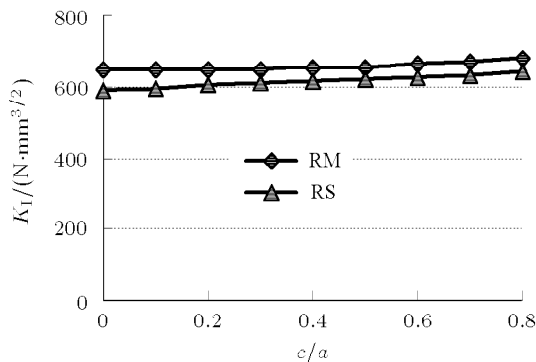


图 15 K_I 随脱胶区域大小的变化

4 结 论

本文提出了“三维实体 - 弹簧 - 壳元”有限元模型, 对建模的细节进行了详尽的论述, 然后利用该模型对裂纹金属板粘贴 FRP 加固后的性能进行了分析, 对影响因素进行了讨论. 根据本文的分析结果

可以得到如下结论:

(1) 在金属裂纹板表面粘贴 FRP 加固时, FRP 承担了部分荷载, 能有效降低裂纹尖端的应力强度因子, 从而提高金属构件的疲劳寿命.

(2) 增加 FRP 材料的弹性模量和厚度对降低裂纹尖端的应力强度因子非常明显.

(3) 增加 FRP 的粘贴长度对降低裂纹尖端的应力强度因子有一定的效果, 但粘贴长度超过裂纹长度的 3 倍后效果减弱.

(4) 增加 FRP 的粘贴宽度对降低裂纹尖端的应力强度因子比较明显.

(5) 裂纹前缘界面脱胶对金属板裂纹前缘的应力强度因子有一定影响, 但不太明显.

参 考 文 献

- 1 Henshell RD, Shaw KG. Crack tip finite elements are unnecessary. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1975, 9: 495~507
- 2 Barsoum RS. On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1976, 10: 25~37
- 3 Barsoum RS. Triangular quarter-point elements as elastic an perfectly-plastic crack tip elements. *Int J Num Meth Engng*, 1977, 11: 95~98
- 4 Foschi RO, Barrett JD. Stress intensity factors in anisotropic plates using singular isoparametric elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1976, 10: 1281~1287
- 5 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1997 (Wang Xucheng, Shao Ming. Basic Principle and Numerical Approach of Finite Element Method. Beijing: Tsinghua University Press, 1997 (in Chinese))
- 6 ANSYS Theory Reference. Electronic Release. SAS IP Inc., 1998