

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.009

# FRP板修复开裂钢板的应力强度因子影响因素分析

王海涛<sup>1</sup>, 吴刚<sup>2</sup>, 张磊<sup>3</sup>

- (1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;
2. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;
3. 江苏省建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:**为系统地了解纤维增强复合材料(FRP)板修复损伤钢构件疲劳裂纹的影响因素,以FRP板修复含中心裂纹的钢板作为研究对象,以裂纹尖端的应力强度因子 $K$ 作为分析指标,采用有限元方法对FRP板修复开裂钢板的 $K$ 进行参数分析。结果表明:FRP板截面刚度、宽度和长度的提高能够使 $K$ 降低,但当FRP板增加到某一长度后,进一步增加长度将基本不影响 $K$ ;增加胶层剪切模量、降低胶层厚度可以降低 $K$ ,局部剥离的出现导致 $K$ 变大;FRP单面修复的 $K$ 明显大于双面修复,增加FRP板厚度对降低单面修复的 $K$ 作用不大。

**关键词:**纤维增强复合材料(FRP);损伤钢构件修复;裂纹;钢板;应力强度因子;有限元方法

中图分类号:TU399      文献标志码:A      文章编号:1000-1980(2020)05-0440-06

## Influencing factor analysis of stress intensity factor for FRP-strengthened cracked steel plates

WANG Haitao<sup>1</sup>, WU Gang<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>3</sup>

- (1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Concrete and Pre-Stressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;
3. Jiangsu Provincial Architectural D & R Institute Ltd., Nanjing 210019, China)

**Abstract:** To investigate main influencing factors of repair efficacy for the fatigue crack of FRP-repaired damaged steel members, the finite element method was employed to conduct the parametric analyses of the stress intensity factor ( $K$ ) for FRP-repaired central-cracked steel plate. The results show that the increase of the FRP cross-sectional stiffness, FRP width and FRP length can decrease the factor  $K$ . The values of factor  $K$  will not change any more when the FRP length exceeds a certain value. The  $K$  can be reduced by decreasing the adhesive thickness and increasing the adhesive shear modulus. The local debond leads to an increase of  $K$  value.  $K$  values of the single-sided repair are much higher than those of the double-sided repair. Moreover, the increase of the FRP thickness in the single-sided repair cannot effectively reduce  $K$  values.

**Key words:** fiber reinforced polymer; damaged steel member repair; crack; steel plate; stress intensity factor; finite element method

钢结构在疲劳荷载下,由于损伤累积,很容易出现疲劳裂纹甚至发生疲劳失效<sup>[1-2]</sup>,而且疲劳失效发生突然,危害大。为了延长受损钢构件的剩余疲劳寿命,保证结构在服役期的安全,需要对损伤构件进行加固修

基金项目: 中国博士后科学基金(2019M651675);中央高校基本科研业务费专项(B200202074);东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室基金(CPCSME2017-01)

作者简介: 王海涛(1987—),男,副教授,博士,主要从事结构加固技术研究。E-mail:wangyibo\_212@163.com

引用本文: 王海涛,吴刚,张磊. FRP板修复开裂钢板的应力强度因子影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):440-445.  
WANG Haitao, WU Gang, ZHANG Lei. Influencing factor analysis of stress intensity factor for FRP-strengthened cracked steel plates [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5): 440-445.

复。传统的疲劳裂纹修复主要通过裂纹尖端钻孔、焊接、螺接钢板以及将裂纹焊合等方法实现<sup>[3]</sup>,这些方法可以延缓疲劳裂纹的重新萌生或降低裂纹扩展速率,但通常也会带来新问题,如损伤母材、产生疲劳敏感源、修复效果不理想、钢材自重大且易腐蚀等<sup>[4]</sup>。

随着纤维增强复合材料(FRP)修复技术在混凝土结构和航空器件修复中的广泛应用,近年来,应用外贴 FRP 技术修复损伤钢结构正在引起国内外学者的关注。一些学者对 FRP 修复损伤钢构件的疲劳性能进行了试验研究<sup>[5-11]</sup>,试件形式涉及含裂纹钢板、含裂纹钢梁以及焊接节点等,其中含裂纹钢板由于试件简单、加载方便,被更多地应用在试验研究中。试验结果<sup>[5-11]</sup>表明,外贴 FRP 修复可以明显减缓裂纹增长速率,延长剩余裂纹扩展寿命。通过与传统焊接修复技术对比<sup>[8,10]</sup>,发现外贴 FRP 是一种高效的疲劳裂纹修复技术。然而,疲劳测试耗时长、成本高、离散大,进行大量的疲劳测试是不实际的,而且试验研究涵盖的参数范围非常有限,因此,通过试验很难全面地了解修复效果的主要影响因素。为系统地探究外贴 FRP 板修复钢构件疲劳裂纹的主要影响因素,采用数值分析方法进行参数分析就很有必要。

本文以 FRP 板修复的含中心裂纹钢板作为研究对象,以裂纹尖端的应力强度因子  $K$  作为分析指标,通过数值方法对影响疲劳裂纹修复效果的因素进行系统的参数分析,重点讨论 FRP 板力学和几何性能、结构胶力学和几何性能、局部剥离、单面和双面修复方法等对  $K$  的影响,为合理利用外贴 FRP 板技术提升开裂钢构件的剩余疲劳寿命提供参考。

1 试件介绍

选择在试验研究中最常用的 FRP 板双面修复的含中心裂纹钢板作为分析对象,试件几何形状如图 1 所示。钢板的长度、宽度和厚度分别为 700 mm、120 mm 和 10 mm,在钢板中心位置切割一条中心裂纹。FRP 和胶层的基本参数如下:FRP 板宽度为 120 mm,厚度和长度分别为 1.4 mm 和 300 mm,胶层厚度为 1.0 mm。在参数分析时,当变化其中一个参数时,其他参数采用上述基本参数数值。

2 有限元模型

根据线弹性断裂力学理论,应力强度因子幅度 ( $\Delta K$ ) 决定着裂纹的扩展速率和扩展寿命,因此可以用  $K$  评估 FRP 板对疲劳裂纹的修复效果, $K$  越小代表修复效果越好。由于 FRP 板修复含裂纹钢构件的几何和受力条件复杂,建立 FRP 板修复后钢构件裂纹尖端  $K$  的计算公式比较困难,因此,需要借助有限元模拟计算 FRP 修复裂纹的  $K$ 。

采用 ANSYS 软件建立有限元模型。根据对称性,仅建立 1/8 模型即可,模型两端作用有 150 MPa 的均布拉应力,典型的有限元网格划分情况如图 2 所示。在有限元模型中,FRP 和钢板采用 SOLID45 单元模拟。为了得到  $K$  随钢板厚度的变化,钢板在厚度方向被划分为 5 层单元,裂纹尖端周围的单元长度设置为裂纹长度的 1/40<sup>[12]</sup>。胶层采用 COMBIN14 单元模拟,为了模拟胶层的轴向和剪切变形,在 FRP 和钢板的对应节点之间分别建立 1 个轴向弹簧单元和 2 个切向弹簧单元。弹簧的剪切刚度和轴向刚度为<sup>[13]</sup>

$$K_t = \frac{G_a A_a}{t_a} \tag{1}$$

$$K_n = \frac{2(1 - \nu_a) G_a A_a}{(1 - 2\nu_a) t_a} \tag{2}$$

式中: $K_t$ ——弹簧的剪切刚度; $G_a$ ——结构胶的剪切模量; $A_a$ ——一个弹簧单元所代表的胶层面积; $t_a$ ——胶

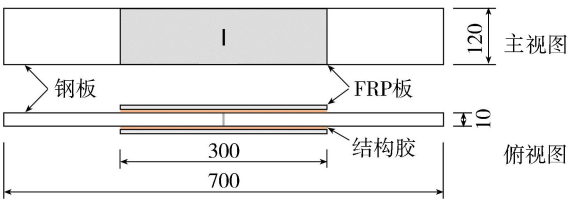


图 1 试件示意图(单位:mm)  
Fig.1 Geometry schematic of specimen (units: mm)

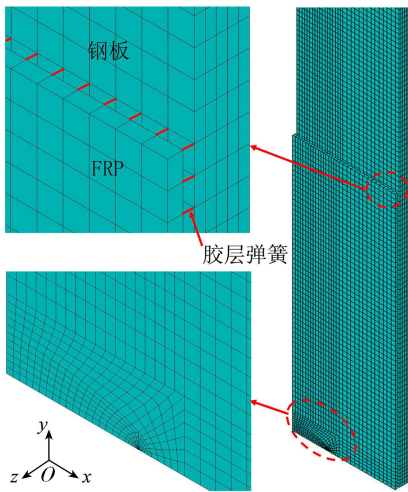


图 2 FRP 板修复后钢构件的典型有限元模型  
Fig.2 Typical finite element model of FRP-repaired cracked steel plates

层厚度; $K_n$ ——弹簧的轴向刚度; $\nu_a$ ——结构胶的泊松比。

由式(1)(2)可知,COMBIN14 单元的刚度与每个弹簧单元所代表的胶层面积有关,这会造成弹簧单元刚度随着单元不同而变化。本文模型通过 ANSYS 参数化设计语言实现弹簧单元对应胶层面积和弹簧刚度的自动计算及弹簧单元的自动添加。

假设 FRP 板为正交各项异性材料,钢板和结构胶为各向同性材料,主要力学指标如下:钢材的弹性模量  $E_s=206\text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu_s=0.3$ ;结构胶的剪切模量  $G_a=900\text{ MPa}$ , $\nu_a=0.35$ ;FRP 在顺纤维方向的弹性模量  $E_y=165\text{ GPa}$ ,在其他 2 个方向的弹性模量  $E_x=E_z=10\text{ GPa}$ ,3 个剪切模量分别为  $G_{xy}=G_{yz}=5\text{ GPa}$ 、 $G_{xz}=2.5\text{ GPa}$ ,3 个泊松比分别为  $\nu_{xz}=0.35$ 、 $\nu_{xy}=\nu_{yz}=0.28$ 。在参数分析时,当变化其中一个力学指标时,其他力学指标采用上述基本力学指标数值。对模型进行线弹性计算,采用虚拟裂纹闭合法计算应变能释放率。虚拟裂纹闭合法是一种基于能量原理的方法,结果对网格不敏感,不需要使用奇异单元,用常规网格也具有很高的计算精度,计算过程简便<sup>[14]</sup>。在平面应力条件下,I 型(张开型)裂纹的  $K$  为

$$K=\sqrt{G_1E_s}$$

(3)

其中

$$G_1=\frac{1}{2b\Delta a}F_y(v_i-v_j)$$

式中: $G_1$ ——I 型裂纹的应变能释放率; $b$ ——有限元模型的单元宽度; $\Delta a$ ——虚拟裂纹扩展长度,即裂纹尖端后面的单元长度; $F_y$ ——裂纹尖端节点在  $y$  方向的节点力; $v_i$ ——位于上裂纹面上紧邻裂纹尖端的节点在  $y$  方向的位移; $v_j$ ——位于下裂纹面上紧邻裂纹尖端的节点在  $y$  方向的位移。

式(3)中节点位移和节点力很容易从有限元分析结果中提取,参数  $\Delta a$  和  $b$  可根据有限元模型得到。本文采用的有限元模型的计算精度已经得到了验证,具体可见文献[4,6,12],此处不再赘述。

3 结果分析与讨论

3.1 FRP 板厚度对  $K$  的影响

图 3 横坐标代表钢板一面粘贴的 FRP 板厚度, $a$  为中心裂纹长度的一半。由图 3 可知, $K$  随 FRP 板厚度的增加而降低, $a$  越大则  $K$  降低越多。如,对于  $a=25\text{ mm}$  的裂纹,未修复裂纹的  $K$  为  $1500.1\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ ,当 FRP 板厚度从  $0.3\text{ mm}$  增加到  $2.8\text{ mm}$  时, $K$  从  $1171.2\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$  降低到  $710.1\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ ,修复后与修复前  $K$  的比值从  $0.78$  降低至  $0.47$ 。对于  $45\text{ mm}$  长的裂纹,修复后与修复前  $K$  的比值从  $0.60$  降低至  $0.30$ 。这是由于 FRP 板厚度越大,其分担钢板的荷载越多,而且对裂纹张开的限制也越大<sup>[4]</sup>。

3.2 FRP 板弹性模量对  $K$  的影响

由图 4 可知,FRP 板弹性模量越大, $K$  越低,且裂纹越长则  $K$  降低越多。比如,对于  $a=15\text{ mm}$  的裂纹,未修复时  $K$  为  $1061.7\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ ,采用 FRP 修复后,随着弹模从  $80\text{ GPa}$  提高至  $460\text{ GPa}$ , $K$  从  $839.7\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$  降低至  $529.2\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ ,降低幅度从  $31\%$  增加到  $60\%$ 。 $a=45\text{ mm}$  的裂纹,修复后的  $K$  比修复前的降低了  $50\%\sim75\%$ 。3.1 节和 3.2 节说明,提高 FRP 的截面刚度(厚度和弹性模量),可以明显降低  $K$ 。

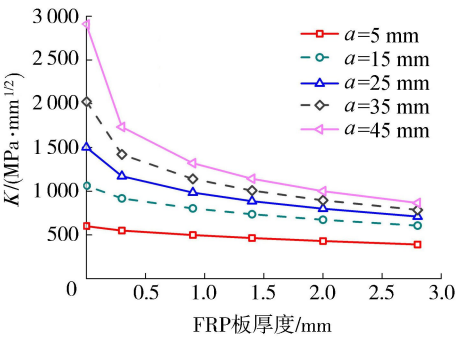


图 3 FRP 板厚度对  $K$  的影响

Fig.3 Effect of FRP thickness on  $K$

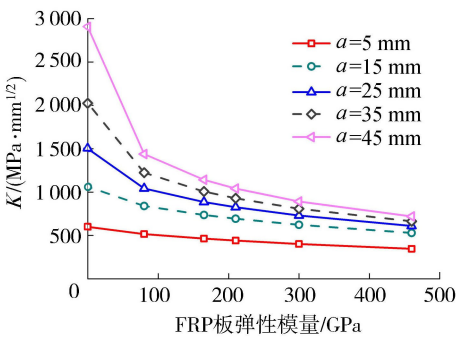


图 4 FRP 板弹性模量对  $K$  的影响

Fig.4 Effect of FRP elastic modulus on  $K$

3.3 FRP 板长度对  $K$  的影响

FRP-钢及 FRP-混凝土界面的黏结性能研究均显示<sup>[15-17]</sup>,界面存在有效黏结长度,超过该长度后,黏结强

度将不再随黏结长度的变化而改变。由图 5 可知,当 FRP 较短时, $K$  随 FRP 板的加长而降低,但当超过某一值后, $K$  基本上不再变化,在本文参数下,这个长度值大约为 60 mm。比如,对于  $a=25\text{ mm}$  的裂纹,当 FRP 长度从 0 mm 增加至 60 mm 时, $K$  从  $1\,500.1\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$  降低至  $889.4\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ ,但 FRR 长度是从 60 mm 增加至 250 mm 时, $K$  仅从  $889.4\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$  变化到  $886.4\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ ,变化很小。这说明,当 FRP 超过有效黏结长度后,再增加 FRP 长度不能进一步提高修复效果,但是考虑黏结界面可能发生剥离,在实际工程中应尽量粘贴足够长的 FRP 板。

3.4 FRP 板宽度对  $K$  的影响

由图 6 可知,FRP 板越宽, $K$  越小,且对于越长的裂纹, $K$  降低越多。此外,对于某一裂纹长度,当 FRP 宽度增加到与裂纹长度一样时,继续增加宽度, $K$  的降低速度将变小,这一点从图中的曲线斜率可以看出。比如,对于  $a=45\text{ mm}$  的裂纹,当 FRP 宽度达到 45 mm 后,曲线下落的斜率出现一个转折。这主要因为当 FRP 宽度超过裂纹长度后,进一步加宽 FRP 仅能持续降低钢板应力,而不能增加对裂纹的限制。尽管如此,由于疲劳裂纹在循环荷载下会逐渐扩展,在实际工程中要尽量保证 FRP 板宽度。

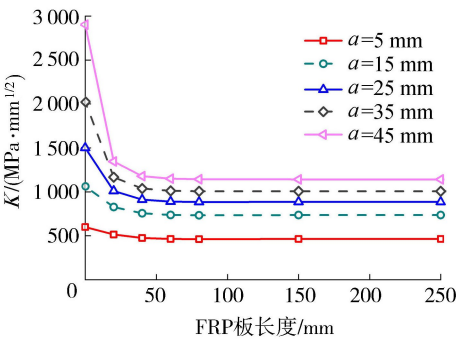


图 5 FRP 板长度对  $K$  的影响  
Fig. 5 Effect of FRP length on  $K$

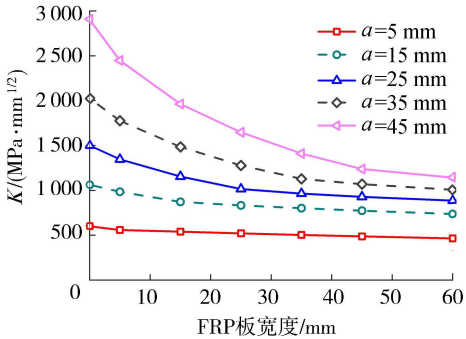


图 6 FRP 板宽度对  $K$  的影响  
Fig. 6 Effect of FRP width on  $K$

3.5 胶层厚度对  $K$  的影响

由图 7 可知,胶层越薄, $K$  越低,而且修复效果随裂纹的增长更加明显。比如,对于  $a=15\text{ mm}$  的裂纹,当胶层从 2.5 mm 降低至 0.3 mm 时, $K$  相比于未加固试件的降低幅度从 27% 提高到 40%。对于  $a=35\text{ mm}$  的裂纹, $K$  的降低幅度从 43% 提高到 57%。理论上,胶层越薄修复效果越明显,但太薄的胶层不仅会导致施工困难,而且胶层越薄,界面黏结强度越低<sup>[15-16]</sup>,可能导致界面过早失效,反而会降低甚至丧失修复效果。

3.6 结构胶剪切模量对  $K$  的影响

由图 8 可知,结构胶剪切模量越大, $K$  越小,修复效果越好。比如,当剪切模量从 400 MPa 增加到 4 000 MPa 时,对于  $a=15\text{ mm}$  的裂纹, $K$  从  $781.6\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$  降低至  $628.8\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ ,降低幅度从 31% 提高到 41%,对于  $a=35\text{ mm}$  的裂纹,降低幅度从 43% 提高到 62%。但是,剪切模量太大也容易导致黏结界面提前失效<sup>[4]</sup>。此外,通过与 FRP 板的影响对比发现,胶层不如 FRP 板对  $K$  的影响明显。因此,对疲劳裂纹修复时,可以通过改变 FRP 板来提高修复效果,结构胶性能应优先保证界面的有效黏结。

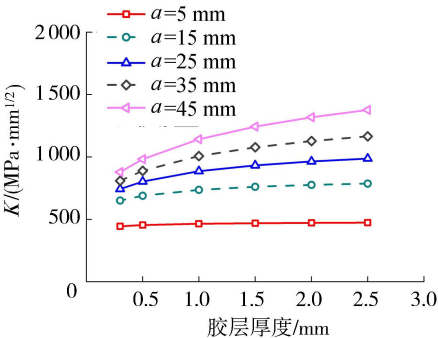


图 7 胶层厚度对  $K$  的影响  
Fig. 7 Effect of adhesive thickness on  $K$

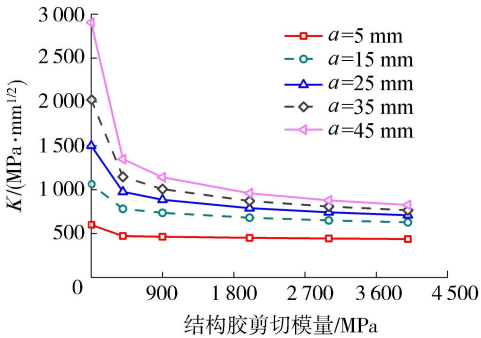


图 8 结构胶剪切模量对  $K$  的影响  
Fig. 8 Effect of adhesive shear modulus on  $K$

3.7 局部剥离对  $K$  的影响

试验研究<sup>[18-20]</sup>发现,疲劳裂纹可能会引起界面出现局部剥离,中心裂纹引起的局部剥离形状近似为椭圆形,如图9所示。定义一个表征局部剥离大小的指标  $c/d$ ,  $c$  与  $d$  分别为椭圆的短轴和长轴的长度,  $c/d$  越大说明局部剥离面积越大。既有研究显示<sup>[19]</sup>,局部剥离长度  $d$  略大于裂纹长度。为了建模方便,本文假定局部剥离的长度  $d$  等于

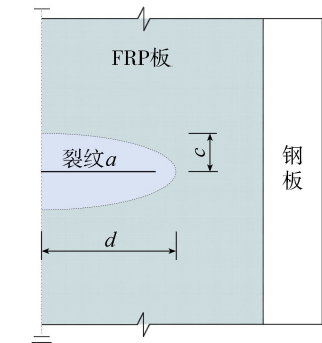


图9 局部剥离示意图  
Fig.9 Schematic of local debond

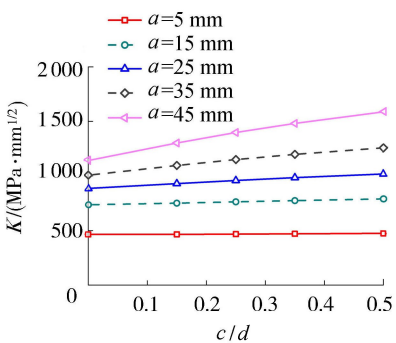


图10 局部剥离对  $K$  的影响  
Fig.10 Effect of local debond on  $K$

1.1 倍的裂纹长度,局部剥离的模拟可通过删除剥离区域的切向弹簧单元实现<sup>[4,12]</sup>。图10所示为局部剥离面积对  $K$  的影响。可以发现,  $K$  随  $c/d$  的增大而逐渐变大,这说明局部剥离的出现导致了裂纹修复效果的降低。此外,当裂纹较短时,局部剥离对  $K$  的影响很小,但随着裂纹变长,局部剥离的不利影响也更加明显。比如,将  $c/d$  从0增加到0.5,对于5 mm长的裂纹,  $K$  的降低幅度从22%减小到21%,影响很小,但对于45 mm长的裂纹,  $K$  的降低幅度从61%减小到45%。

3.8 单/双面修复对  $K$  的影响

由图11可知,2种修复方法引起的  $K$  沿试件厚度的分布明显不同,双面修复的  $K$  沿厚度对称分布,2个FRP粘贴表面处的  $K$  略小于钢板中间部位的  $K$ ,但差距较小。然而,单面修复的  $K$  沿厚度分布明显不均匀,在修复一侧  $K$  最小,在未修复一侧  $K$  最大,而且不均匀程度随着裂纹变长而越明显。这是由于单面修复时仅修复试件的某一面会导致试件的刚度不对称,试件在受拉时产生平面外弯曲效应,试件向未修复一侧弯曲<sup>[21]</sup>。

由图12可知,单面修复的  $K$  虽然小于未修复的  $K$ ,但显著高于双面修复的  $K$ ,这说明单面修复的效果远低于双面修复。比如,对于  $a=25$  mm的裂纹,双面修复的  $K$  为未修复的59%,而单面修复的  $K$  为未修复的82%。即使将单面修复的FRP厚度增加一倍,使其与双面修复的FRP用量相等,也不能有效地降低  $K$ ,如图12中2条单面修复的曲线所示。这说明当采用单面修复时,增加FRP厚度不能有效地提高修复效果。

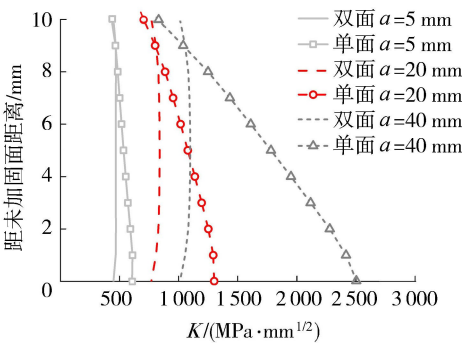


图11  $K$  沿钢板厚度方向的分布  
Fig.11 Distributions of  $K$  value along the thickness

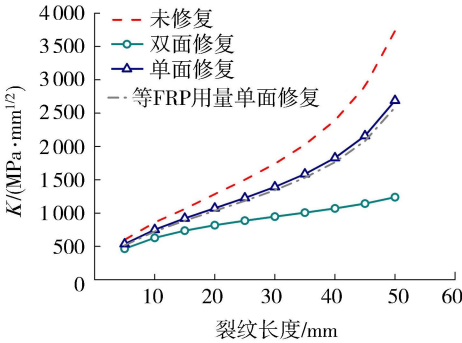


图12 单/双面修复的  $K$  比较  
Fig.12 Comparisons of  $K$  value from the single- and double-sided repairs

4 结 论

- a. 增加FRP板截面刚度、宽度以及长度能够降低  $K$ ,但当FRP板超过某一长度后,  $K$  将不再随FRP板长度增加而改变。
- b. 增加胶层剪切模量和降低胶层厚度可以降低  $K$ ,但考虑到界面剥离问题,在实际工程中胶层的设计应优先保证黏结有效。
- c. 局部剥离的出现会增大  $K$ ,降低修复效果,而且剥离面积越大,  $K$  也越大。

d. 单面修复的  $K$  沿钢板厚度分布不均匀,单面修复的  $K$  明显大于双面修复,增加单面修复 FRP 板厚度对提高修复效果并不明显。

## 参考文献:

- [1] 田圆,吉伯海,杨沐野,等. 钢桥面板顶板与竖向加劲肋连接角焊缝疲劳试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(5):433-438. (TIAN Yuan, JI Bohai, YANG Muye, et al. Fatigue experimental investigation of steel bridge deck plate and vertical stiffener connection fillet weld[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(5): 433-438. (in Chinese))
- [2] 吉伯海,程苗,傅中秋,等. 基于实测应变的钢桥面板疲劳寿命分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(5):422-426. (JI Bohai, CHENG Miao, FU Zhongqiu, et al. Fatigue life analysis of steel bridge deck based on measured strain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(5): 422-426. (in Chinese))
- [3] 中国工程建设标准化协会. 钢结构加固技术规范:CECS77—1996[S]. 北京:中国计划出版社,2005.
- [4] 王海涛. CFRP 板修复钢结构疲劳性能及其设计方法研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [5] YU Qianqian, CHEN Tao, GU Xianglin, et al. Fatigue behaviour of CFRP strengthened steel plates with different degrees of damage[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 69(3): 10-17.
- [6] WANG Haitao, WU Gang, JIANG Jianbiao. Fatigue behavior of cracked steel plates strengthened with different CFRP systems and configurations[J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(3): 04015078.
- [7] HU Lili, ZHAO Xiaoling, FENG Peng. Fatigue Behavior of cracked high-strength steel plates strengthened by CFRP sheets[J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(6): 04016043.
- [8] WU Gang, WANG Haitao, WU Zhishen, et al. Experimental study on the fatigue behavior of steel beams strengthened with different fiber-reinforced composite plates[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(2): 127-137.
- [9] YU Qianqian, WU Yufei. Fatigue retrofitting of cracked steel beams with CFRP laminates[J]. Composite Structures, 2018, 192: 232-244.
- [10] JIAO Hui, MASHIRI F, ZHAO Xiaoling. A comparative study on fatigue behaviour of steel beams retrofitted with welding, pultruded CFRP plates and wet layup CFRP sheets[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 59: 144-152.
- [11] 余倩倩,顾祥林,陈涛,等. 碳纤维增强复合材料板补强平面外纵向焊接接头疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(增刊1):406-410. (YU Qianqian, GU Xianglin, CHEN Tao, et al. Experimental study on fatigue behavior of out-of-plane gusset welded joints strengthened by CFRP[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(Sup1): 406-410. (in Chinese))
- [12] 王海涛,吴刚,吴智深. FRP 布置方式对含裂纹钢板修复后的疲劳性能影响分析[J]. 土木工程学报,2015,48(1):56-63. (WANG Haitao, WU Gang, WU Zhishen. Study on the effect of FRP configurations on the fatigue behavior of strengthened steel plate with an initial crack[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 56-63. (in Chinese))
- [13] SUN C T, KLUG J, ARENDT C. Analysis of cracked aluminum plates repaired with bonded composite patches[J]. AIAA Journal, 1996, 34(2): 369-374.
- [14] 解德,钱勤,李长安. 断裂力学中的数值计算方法及工程应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [15] YU Tao, FERNANDO D, TENG Jinguang, et al. Experimental study on CFRP-to-steel bonded interfaces[J]. Composites: Part B, 2012, 43(5): 2279-2289.
- [16] WANG Haitao, WU Gang. Bond-slip models for CFRP plates externally bonded to steel substrates[J]. Composite Structures, 2018, 184: 1204-1214.
- [17] SHEN Dejian, SHI Huafeng, JI Yong, et al. Strain rate effect on effective bond length of basalt FRP sheet bonded to concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 82: 206-218.
- [18] WU Chao, ZHAO Xiaoling, AL-MAHAIDI R, et al. Fatigue tests of cracked steel plates strengthened with UHM CFRP plates [J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(10): 1801-1815.
- [19] COLOMBI P, BASSETTI A, NUSSBAUMER A. Delamination effects on cracked steel members reinforced by pre-stressed composite patch[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007, 39(1): 61-71.
- [20] MALL S, CONLEY D S. Modeling and validation of composite patch repair to cracked thick and thin metallic panels[J]. Composites: Part A, 2009, 40(9): 1331-1339.
- [21] TSOVALIS N G, MIRISIOTIS L S, DIMOU D N. Experimental and numerical study of the fatigue behaviour of composite patch reinforced cracked steel plates[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(10): 1613-1627.