复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 28 卷 第 3 期 6 月 2011 年
Vol. 28 No. 3 June 2011

文章编号：1000-3851(2011)03-0148-06

含孔层合板孔口缝合补强的数值模拟

韩小平*，郭章新，王 彬，朱西平
（西北工业大学 力学与土木建筑学院，西安 710072）

摘 要： 提出一种缝合线计算模型，通过数值模拟计算和实验结果比较，得到缝合线计算模型中相关的弹性参数。对复合材料开口缝合补强结构进行了有限元模拟计算，分析讨论了孔边及邻近区域应变的分布规律，并计算出应变集中因子。研究了不同缝合参数(针距、行距、边距、缝合线直径、缝合线模量)对孔边应变集中的影响，给出了合理的孔口缝合参数设计方法。

关键词： 含孔层板；缝合补强；缝合线模型；应变集中；缝合参数
中图分类号： TB330.1 **文献标志码：** A

Numerical simulations of the effect of stitching reinforcement on composite laminates with a circular hole

Han Xiaoping*, Guo Zhangxin, Wang Bin, Zhu Xiping
(School of Mechanics and Civil & Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A calculation model of stitching yarn was proposed, and the elastic properties parameter of stitching yarn were obtained based on the numerical simulation and the experiment results. The finite element simulating calculation was carried out on the stitching reinforcement for composite laminates containing a circular hole. The strain distribution near the hole edge were investigated analytically. The hole edge coefficients of strain concentration were calculated for different stitching parameters, such as stitching needle distance, row spacing, edge distance, diameter and modulus. A stitching design parameters on the edge of hole are obtained.

Keywords: composite laminates with holes; stitching reinforcement; stitching thread mode; strain concentration; stitching parameters

工程实际中，为了进行设备安装和维护等方面的需求，常常需要在复合材料层板上打孔或开口。对于复合材料开口结构来说，特别突出的一个问题是孔边区域的应力集中，以及孔口附近的分层损伤，这些内部分层难以发现，对结构是一大潜在威胁，可能会对复合材料结构的承载能力、使用寿命产生严重影响。为解决孔边分层问题，发展了不同的孔边修复或补强的方法，以增强孔边层间强度和分层阻力，提高结构的承载能力和使用寿命。

Eiblmeier J 和 Loughlan J[1]研究了含孔复合材料层合板的屈曲问题，采用环形层合板对孔口补强，对不同边界条件、不同尺寸环形板的补强效果分别进行了有限元数值模拟和实验测试，并给出最佳补强设计方案。Mahdi S 等[2-3]针对夹心层梁、加强壁板等结构的开口、连接处强度、刚度进行了实验测试和有限元模拟计算，提出开口以及连接处的修复和补强方案。Konrad J 等[4]采用纺织纤维预制件对开孔层板的孔边补强，研究结果表明，补强后强度明显提高。

在国内，寇长河等[5]对开口层合板的插层铺设非对称补强进行了孔边应力集中、应变分布、层间应力的实验研究和理论分析，与顺序铺设补强方法相比，插层铺设非对称补强方法具有更明显的补强效果。杨运民等[6]针对含孔层板的纤维绕孔工艺中绕孔纤维的取向和密度分布进行迭代设计，计算结果和强度分析表明，该含预成型孔复合材料层合板具有较高的承载能力。姜云鹏等[7]对复合材料厚蒙皮开口补强结构进行承载能力的试验研究，比较了带翻边补强、二次固化加口框两种补强方式；同时

收稿日期： 2010-07-01；**收修改稿日期：** 2010-11-11
通讯作者： 韩小平，教授，博士生导师，研究方向：复合材料及其结构的力学分析 E-mail：xphan@nwpu.edu.cn

利用有限元方法进行数值模拟，结合试验测试和数值模拟结果，提出孔口补强的优化设计方案。

利用缝合复合材料技术，对开口复合材料结构进行孔边缝合补强，是近几年发展起来的一种新方法。缝合线在复合材料总体纤维含量中往往只占很小的比例，但可以明显减缓孔边应力集中，显著提高孔口层间强度和分层阻力，改善和增强开口复合材料结构的强度，因此，这种方法受到工程技术人员和相关研究学者的关注。

现有的文献资料都是针对缝合层合板的面内力学性能的研究[8-10]，有关缝合含孔板孔边性能的理论分析和相关计算十分缺乏。本文中提出一种缝合线计算模型，通过数值模拟计算和实验结果比较，得到缝合线计算模型中相关的弹性参数。对复合材料开口缝合补强结构进行了有限元模拟计算，分析讨论了孔边及邻近区域应变的分布规律。研究了不同缝合参数(针距、行距、边距、缝合线直径、缝合线模量)对孔边应变集中的影响，给出合理的孔口缝合参数设计方法。

1 有限元计算模型及数值模拟方法

1.1 计算模型的基本数据

分析计算所用的复合材料层板以及孔口缝合的工艺参数由 625 研究所提供。层板材料为 T300/QY8911，层板铺层为 $[45/-45/0/90/0/0/90/-45/45]_{2S}$。层板尺寸为 300 mm × 200 mm × 3 mm，中心圆孔的直径为 60 mm。

孔边采用Kevlar-49(1600denier)缝线缝纫，缝合方法为改进的锁式缝纫。采用单缝合、双缝合两种形式，缝合区域示意图见图 1，具体的针距、行距、孔边距尺寸如表 1 所示。

在计算模型中，将层板和缝合线分别考虑，层板部分含有开孔以及缝线孔。将缝线孔简化为圆孔，按实际测量得到的 Kevlar 缝合线截面面积转换为圆孔直径，得到缝线孔直径为 0.54 mm。把缝合线看作为另一种复合材料，其材料性能参数由下文方法确定。

1.2 缝合线计算模型

孔口缝合时，缝合线用相当大的拉力穿过铺层，在缝合线受拉与各铺层受压过程中，缝合线与面内纤维压紧在一起，通过缝合线产生的拉伸变形增强孔边的层间性能。

对于孔口缝合补强的层合板，其厚度方向缝合线作用的影响范围与层合板平面尺寸相比非常小，因此，可以对实际问题简化。

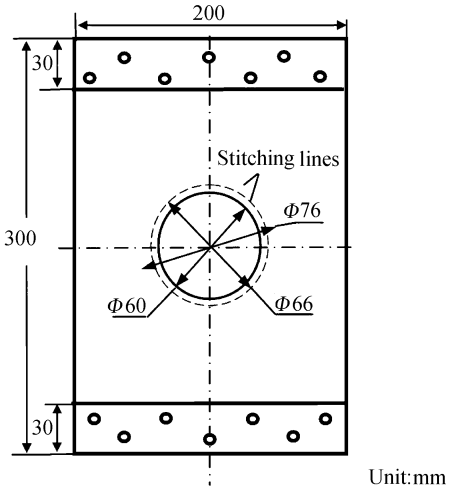

图 1 缝合区域示意图

Fig. 1 Sketch of the stitching region

表 1 孔口缝合补强的缝合设计参数

Table 1 Specifications of the stitched specimens

Stitching parameters	Single stitching			Double Stitching	
	1	2	3	1	2
Edge distance/mm	3	5	3	3	3
Needle span/mm	3	3	5	3	3
Row spacing/mm	0	0	0	5	3

首先简化纤维与缝合线相交的几何形态关系，将缝合线等效为层合板厚度方向的杆状复合材料(空间杆单元)，采用杆状复合材料模拟缝合线在层板厚度方向的增强作用。另一方面，缝合线在针孔处与层板基体界面的结合性质也直接影响缝合效果。可能有两种极端情况：(1)缝合线与基体界面结合不好，承受载荷后，针孔中的缝合线与基体脱开，针孔就相当于一个通孔；(2)缝合线与基体界面紧密结合。实际情况应该介于这两种极端情况之间。

基于上述分析，提出一种缝合线计算模型，将针孔内 Kevlar 纤维束看成空间杆单元，按照混合律法则[11]定义这种杆单元的弹性常数，将有限元模拟计算值和实验结果比较，确定针孔内杆单元的纵向模量、横向模量以及泊松比。

1.3 有限元计算模型及网格划分

整个模型由层板、缝合线两部分组合而成，通过共用节点连接。层板共 20 层，层板区域采用三维 8 节点六面体单元，缝合线区域(见图 1)采用空

间杆单元。在靠近孔边单元处逐渐加密，考虑结构和外载的对称性，取模型的 1/4 进行分析。计算模型和有限元网格图如图 2 所示。

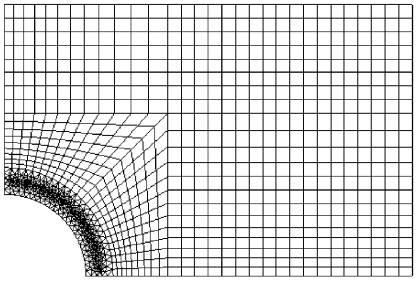

图 2　孔口缝合补强的层合板有限元模型

Fig. 2　Model for the stitching laminate with holes

不同缝合参数对层合板力学性能的影响可归结为针孔内缝合线杆单元数目、位置的改变，具体情况如表 2 所示。

表 2　不同缝合参数对应的空间杆单元数

Table 2　Numbers of bar elements for different stitching parameters

Stitching parameters	Single stitching			Double Stitching	
	1	2	3	1	2
Numbers of bar elements	17	18	10	37	36

2　计算结果与实验值比较

根据缝合线计算模型，按照混合律法则，并和实验曲线[12]拟合，缝合线针孔内空间杆单元的纵向模量、横向模量、剪切模量、泊松比分别为 $E_1=87.92$ GPa，$E_2=E_3=30.57$ GPa；$G_{12}=G_{13}=2.19$ GPa，$G_{23}=13.65$ GPa；$\upsilon_{12}=\upsilon_{13}=0.122$，$\upsilon_{23}=0.12$。

图 3 为孔边左、右边缘处(0°位置)应变随载荷变化的计算值与实验值。可以看出，数值计算和实验值吻合较好，最大误差约为 14.5%，证明缝合线计算模型是有效的。

含孔板受拉伸载荷时，最大应变发生在孔边与载荷作用线成正交的直径的两端(孔边 0°位置)，采用应变集中因子来描述孔边应变集中的严重程度。可以将孔边应变集中处的应变峰值与远场应变的比值定义为应变集中因子，即

$$K_\varepsilon=\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon^{\infty}}$$

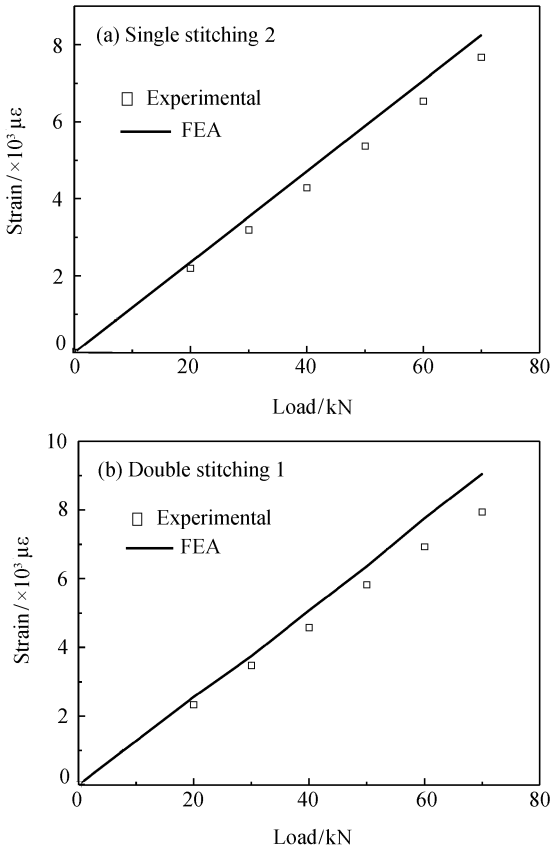

图 3　含孔层合板孔边应变-载荷曲线

Fig. 3　Strain-load curves of the stitching laminate with holes

图 4 为应变集中因子沿孔边最小截面变化的计算值与实验值，可以看到，在孔边附近小范围内，应变集中相当严重；逐渐远离孔边，应变逐渐衰减，当离开约一个半径的距离后，应变集中基本消除。

3　不同缝合参数对含孔层合板孔边应变及应变集中因子的影响

3.1　缝合边距的影响

图 5 为单缝 1、单缝 2 两种情况下孔边 0°位置和 90°位置的应变-载荷曲线。含孔板受拉伸载荷时，在孔边上、下边缘(90°位置)的局部区域承受挤压变形最为严重。单缝合 1 与单缝合 2 相比，单缝 1 边距较小，其缝合线离孔边较近，对孔边应变的影响要大一些。因此，适当减小缝合线边距，可使孔边的应变集中程度有所下降。

3.2　缝合针距的影响

与单缝合 1 相比，单缝 3 针距加大，相当于缝合线密度减小。图 6 为单缝 1、单缝 3 两种情况下孔边 0°位置和 90°位置的应变-载荷曲线。可以看

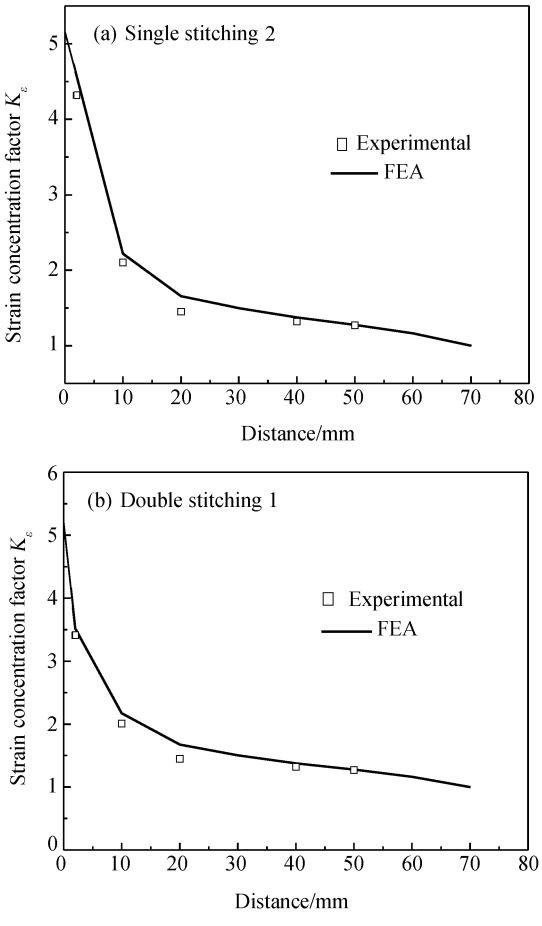

图 4　K_ε 沿含孔层合板孔边最小截面的分布

Fig. 4　Distribution of K_ε at the minimum cross-section around the hole in the stitching laminate

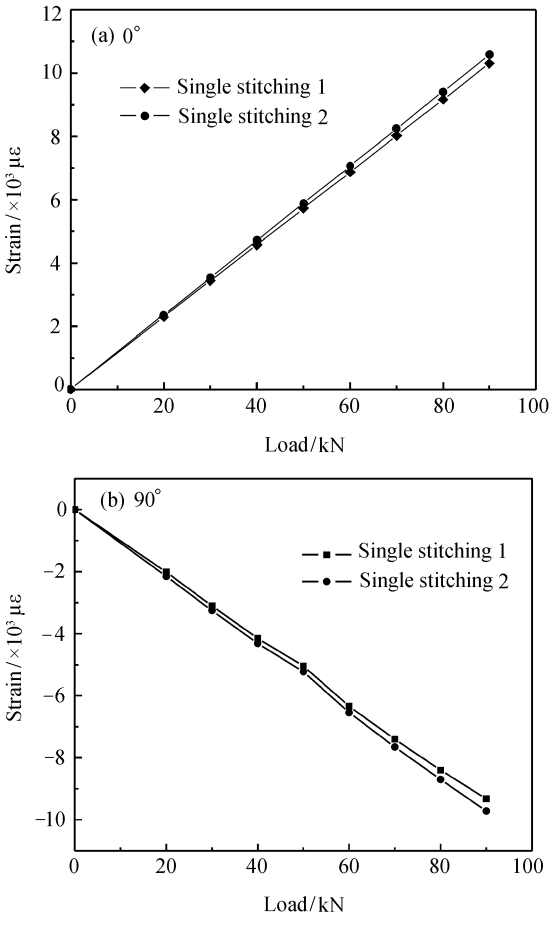

图 5　不同缝合边距含孔层合板孔边应变-载荷曲线

Fig. 5　Strain-load curves of the stitching laminate with different edge distances

出，随着针距减小，缝合线密度增大，孔边的应变也随之减小。

从受力和变形机制上分析，缝合线对含孔层合板面内力学性能有两方面影响：(1)缝合线对孔边分层的阻止作用。在孔边通过贯穿厚度方向的缝合线作用，层合板层间强度得到加强，孔边的应变集中程度也会有所下降；(2)缝合线对层板面内纤维的损伤导致材料性能下降。这两方面相互影响，当缝合线密度较低(缝合线针距较大)时，缝合线对孔边分层的阻止作用占主导地位，此时，随着缝合线密度加大，层合板层间分层的补强效果增强，孔边的应变集中程度会随之下降。当缝合线密度超过临界值时，缝合线对层板的损伤占主导地位，此时加大缝合线密度，会导致层板力学性能下降。显然，对含孔层合板孔边缝合补强，存在一个最佳缝合线密度(针距)。

3.3　单缝合和双缝合情况下孔边应变比较

图 7 比较了单缝合、双缝合两种情况下孔边应变，可以看出，双缝合试件在孔边的应变及应变集中与单缝合试件明显不同。在孔边 0°位置，单缝合试件的应变集中要小于双缝合试件，而在孔边上、下边缘(90°位置)，结果正好相反。造成这种情况的原因，是由于孔口缝合补强使得层板内部应力重新分布，尤其是在孔边到缝合线区域，又产生了新的应力集中和应变集中，这在一定程度上改变了局部区域的刚度，即产生了“局部强化”现象。与单缝合试件相比，双缝合试件的缝合线数目增加了一倍多，“局部强化”的程度更大，导致双缝合试件在孔边(0°位置)应变集中程度反倒增大。但在孔边上、下边缘(90°位置)，双缝合试件在孔边的应变及应变集中都要小于单缝合试件，这可能与孔边上、下边缘的局部区域承受挤压变形有关。因此，即使缝合参数与缝合线密度保持不变，但在不同的载荷环境下，材料的变形机制可能不同，这时孔边缝合线的补强效果也不同。

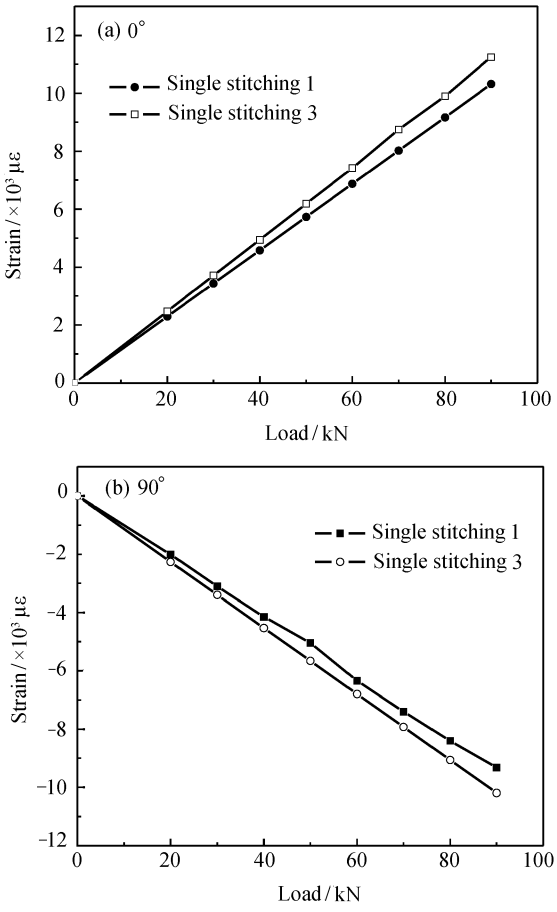

图 6　不同缝合针距含孔层合板孔边应变-载荷曲线

Fig. 6　Strain-load curves at the hole edge of the stitching laminate with different needle distances

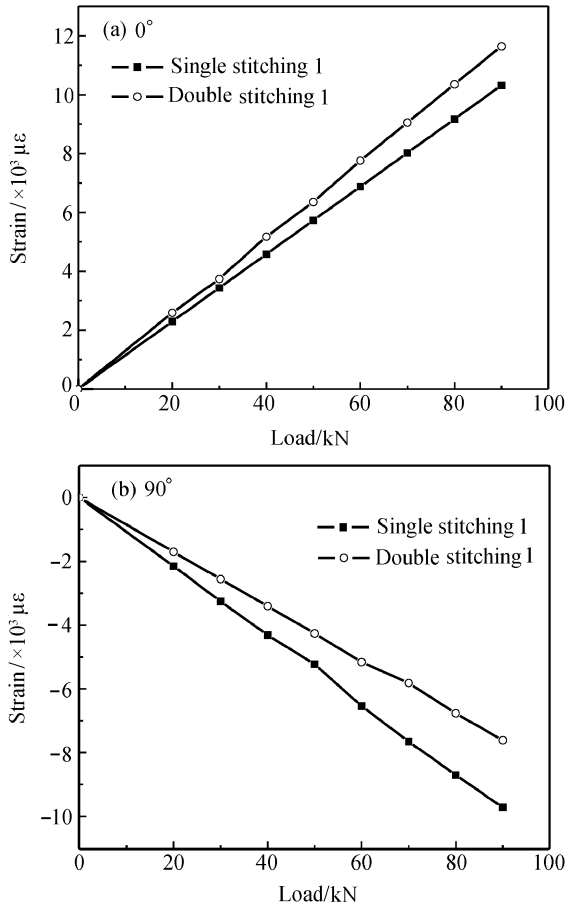

图 7　单缝合和双缝合含孔层合板孔边应变-载荷曲线

Fig. 7　Strain-load curves at the holeedge of the stitching laminate with single and double stitching

3.4　缝合线模量的影响

图 8 为缝合线模量对应变集中因子 K_ε 的影响规律，图中横坐标是缝合线模量 E' 相对于层板模量 E 的比值。随着缝合线模量增大，应变集中因子 K_ε 略有降低，这说明采用较高模量的缝合线对降低应变集中因子 K_ε 较为有利。

3.5　缝合线半径的影响

图 9 为缝合线半径对应变集中因子 K_ε 的影响规律。可以看出，单缝合三种情况的 K_ε 变化趋势基本一致，随着缝合线半径增大，K_ε 降低，当缝合线半径增大到 0.3 mm 时，这时增大缝合线半径，K_ε 不降低反而增大，其中单缝 1 变化的尤为明显。双缝 2 情况的 K_ε 变化趋势与单缝合情况相类似。双缝 1 情况有所不同，随着缝合线半径增大，K_ε 先降低，缝合线半径增大到 0.2 mm 时，K_ε 又开始增大，当缝合线半径增大到 0.3 mm 以后，K_ε 又开始降低。

综上述所，缝合线半径对应变集中因子 K_ε 影响较大，其机制分析如下：当缝合线半径增大，缝合线参与整体受力配额有所增加，同时加大了孔边的约束，阻止分层的进一步扩展，也使得孔边应变集中因子 K_ε 降低。当缝合线半径增大到 0.3 mm

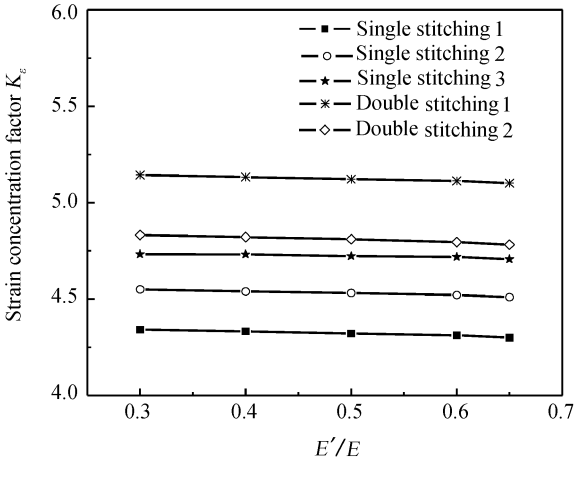

图 8　缝合线模量对应变集中因子的影响

Fig. 8　Effect of modulus of stitching yarn on the strain concentration factor

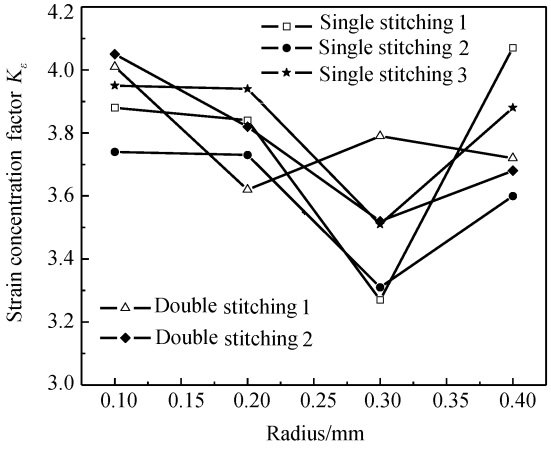

图 9 缝合线半径对应变集中因子的影响

Fig. 9 Effect of radius of stitching yarn on the strain concentration factor

以后，再增大缝合线半径，K_ε 不降低反而增大，说明此时缝合线对层板的损伤作用占主导地位。因此，针对不同的缝合参数，存在一个缝合线临界半径尺寸。在实际缝合工艺中，只要小于这个缝合线临界半径尺寸，就可达到孔边层间分层的补强效果，同时降低孔边的应变集中程度。

4 结 论

（1）提出一种缝合线计算模型，通过数值模拟和实验结果比较，得到缝合线计算模型中相关的弹性参数。

（2）不同缝合参数（针距、边距、行距）对于孔边附近应变集中因子有明显的影响：缝合边距小、针距小，应变集中因子 K_ε 也较小；单缝合情况下的 K_ε 要小于双缝合情况；含孔层合板孔边缝合补强，存在最佳缝合密度。

（3）孔口缝合补强后出现“局部强化”现象，即在孔边局部区域，刚度增大，导致孔口缝合试件在孔边应变、应力集中程度增大，这是设计中要考虑的一个特殊问题。

（4）随着缝合线模量增大，应变集中因子 K_ε 略有降低，即采用较高模量的缝合线对降低应变集中因子 K_ε 有利。

（5）随着缝合线半径加大，孔边 K_ε 有所降低。针对不同的缝合参数，存在一个缝合线临界半径尺寸。

参考文献：

[1] Eiblmeier J, Loughlan J. The buckling response of carbon fibre composite panels with reinforced cut-outs [J]. Composite Structures, 1995, 32(1): 97-113.

[2] Mahdi S, Kinloch A J, Matthews F L, Crisfield M A. The mechanical performance of repaired stiffened panels Ⅰ: Experimental characterization [J]. Composites, 2002, 33(2): 343-354.

[3] Mahdi S, Kinloch A J, Crisfield M A, Matthews F L. The mechanical performance of repaired stiffened panels Ⅱ: Finite element modelling [J]. Composites, 2002, 33(2): 355-366.

[4] Konrad G, Tamara H, Holger O. Application of the tailored fiber placement (TFP) process for a local reinforcement on an “open-hole” tension plate from carbon/epoxy laminates [J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 81-88.

[5] 罗小东，寇长河，于卫东. 复合材料层合结构开口的非对称补强研究 [J]. 航空学报，1994，15(12)：1478-1481.
Luo Xiaodong, Kou Changhe, Yu Weidong. Asymmetric submerged reinforcement of composite laminates containing a circular hole [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15(12): 1478-1481.

[6] 杨运民，彭向和，陈元强. 含预成型孔复合材料层合板的强度分析 [J]. 复合材料学报，1999，16(4)：85-89.
Yang Yunmin, Peng Xianghe, Chen Yuanqiang. Strength analysis of composite laminates containing preformed hole [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 16(4): 85-89.

[7] 姜云鹏，张庆茂，王 毅，岳珠峰. 复合材料层合板开口翻边补强试验和数值模拟 [J]. 复合材料学报，2005，22(5)：190-196.
Jiang Yunpeng, Zhang Qingmao, Wang Yi, Yue Zhufeng. Experiment studies and FEM simulation of repaired composite laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5): 190-196.

[8] Mouritz A P, Leong K H, Herszberg I. A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fiber-reinforced polymer composites [J]. Composites Part A, 1997, 28A: 979-991.

[9] Mouritz A P, Cox B N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufaturing, 2000, 31(1): 1-27.

[10] 程小全，郦正能，寇长河. 缝合复合材料可用性——一般层合板的基本性能 [J]. 复合材料学报，2004，21(4)：71-76.
Cheng Xiaoquan, Li Zhengneng, Kou Changhe. Properties of stitched composite laminates—The principal properties of general laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(4): 71-76.

[11] 沈观林. 复合材料力学 [M]. 北京，清华大学出版社，1995.

[12] 韩小平，曹效昂，朱西平，岳珠峰. 孔口缝合补强对含孔层板应变集中影响的实验研究 [J]. 复合材料学报，2006，23(4)：169-174.
Han Xiaoping, Cao Xiaoang, Zhu Xiping, Yue Zhufeng. Experimental investigation on strain concentration in composite laminates with a circular hole [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(4): 169-174.