复合材料学报 第18卷 第4期 11月 2001年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 18 No. 4 November 2001

文章编号: 1000-3851(2001)04-0123-05

层压板修理设计中的参数选择问题

孟凡颢[1], 陈绍杰[1], 童小燕[2]
(1. 沈阳飞机设计研究所2部, 沈阳 110035; 2. 西北工业大学 飞机结构完整性研究所, 西安 710072)

摘 要: 复合材料层压板的修理问题是复合材料结构修理中的基础性研究课题。其中, 贴补法和挖补法是两种基本的修理方法。通过有限元方法对贴补法和挖补法进行了研究, 给出了贴补修理和挖补修理的最佳设计参数选择方案。对于大多数贴补修理设计, 补片的厚度应该是母板厚度的一半, 搭接长度大约在25 mm; 对于挖补修理, 通常可采用6°的挖补角度。试验结果表明, 通过计算分析得出的最佳修理设计参数对工程实际具有很好的指导意义。

关键词: 复合材料修理; 贴补; 挖补; 设计参数
中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

SELECTION OF THE DESIGN PARAMETERS IN LAMINATE REPAIR

MENG Fan-hao[1], CHEN Shao-jie[1], TONG Xiao-yan[2]
(1. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China;
2. Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Laminate repair is a basic research topic of composite repair. Thereinto, patch-bonded repair and flush repair are the two most important methods. In this work, FEM analysis was researched on the above two methods, and the scheme of parameter selection was provided. The research shows that, for most patch-bonded cases, patch thickness should be half of the original laminate, and the overlap length should be about 25 mm. And for most flush repairs, the scarf angle can be 6°. Typical specimens were tested to verify the optimized design parameters. To eliminate the influence of the additional bending and to simulate the actual structure more exactly, the patch-bonded specimens should be designed as two-sided repair. The results of the tests fitted in well with the parameters derived from the theoretical analysis. And the scheme of parameter selection has great significance in directing the engineering practice of composite repair.

Key words: composite repair; patch-bonded repair; flush repair; design parameter

层压板的修理问题是复合材料结构修理问题中的基础性研究课题, 而层压板修理设计的研究则是首当其冲的。在国内外的复合材料修理研究方面, 层压板的修理设计一直是一项重要的研究内容。国外对复合材料层压板的修理设计的研究已经有了20多年的历史, 在最近的国际复合材料11届会上, 仍然有许多关于层压板修理设计的文章。从国内外的有关论文和研究资料来看, 层压板的修理设计的研究主要集中在贴补修理和挖补修理的诸多参数的选择方面。

结合"95"预研, 我们对复合材料结构修理问题进行了大量的研究。其中, 关于层压板的修理设计, 在试验和理论方面都有很好的结果。本文的计算分析采用了NASTRAN有限元分析软件, 力学验证试验在北京航空航天大学固体力学所进行。文中主要给出了理论分析和试验的结果, 详细的理论分析过程将另外撰文发表。

在研究过程中, 试验件是基于典型铺层选取的, 而计算分析则考虑了多个参数的情况。

1 层压板的主要修理方法

复合材料层压板的修理方法从广义上可以分为装饰性修理(不影响刚度和强度)和恢复强度和刚度的结构性修理。以下将主要讨论层压板的两种主要

收稿日期: 2000-09-17; 收修改稿日期: 2000-12-17
作者介绍: 孟凡颢(1966), 男, 硕士, 工程师, 主要从事复合材料结构修理和纺织复合材料应用研究。

的结构性修理方法,即贴补法(图 1)和挖补法(图 2)。贴补修理通常作为一种临时修理方法,但这种修理必须使结构能维持正常工作。由于这种临时修理的寿命一般低于部件设计寿命,通常在返厂修理时要转为永久修理。挖补修理是常用的永久修理方法,这种修理方法的寿命一般不低于部件的设计寿命。另外,贴补修理通常适用于薄板,挖补通常适用于厚板。

挖补修理和贴补修理从设计观点可以作为连接接头考虑。图 3 给出了相当于用补强板修理的某些胶接形式和胶层上的剪应力分布。可以看出,对于不同的胶接形式(修理方式),其剪应力的分布情况是不同的。当然,剪应力的均匀分布是比较好的理想情况。

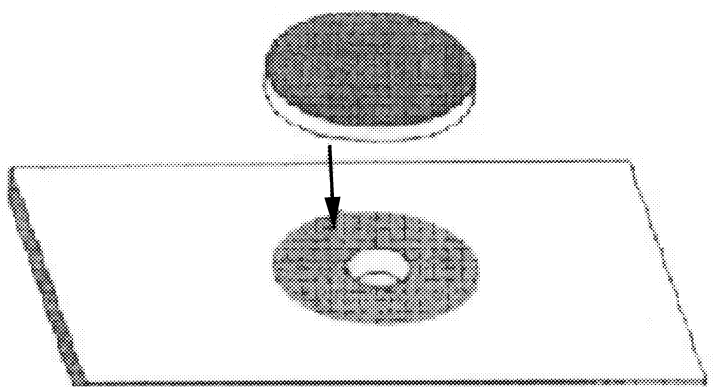

图 1　贴补修理示意图

Fig. 1　Patch-bonded repair

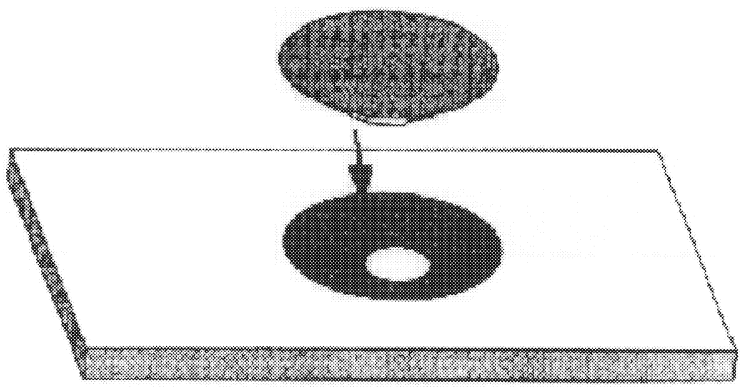

图 2　挖补修理示意图

Fig. 2　Flush repair

2　修理设计中的参数选择

2.1　贴　补

2.1.1　概述

贴补修理(图 1)是将修理材料制成补强板,可以是已经固化的板或未固化的予浸料板,胶接到原结构的损伤部位,使损伤结构遭到破坏的载荷传递路线得以重新恢复。分析和试验都表明,这种修理能使修理结构的静强度恢复到完好结构静强度的

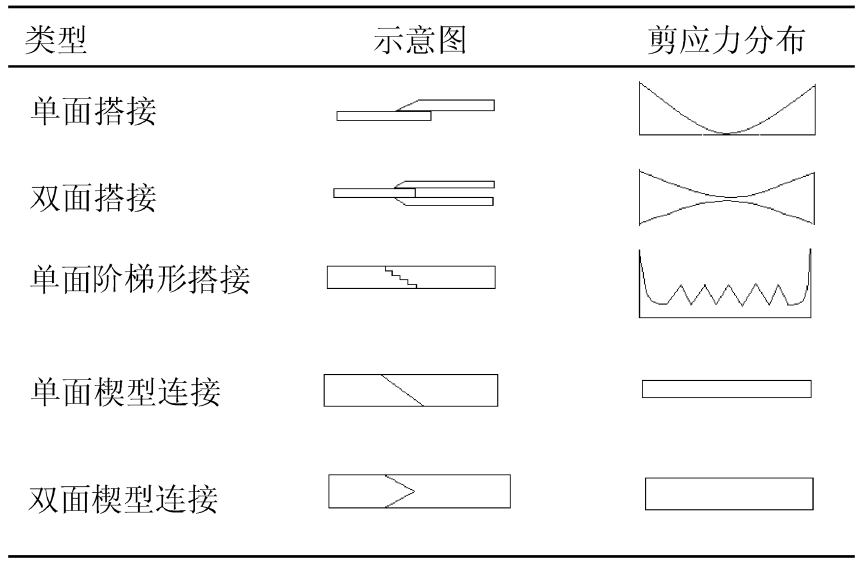

图 3　几种连接形式的剪应力分布

Fig. 3　Shearing stress distribution of some joint forms

70 %～80 %。

在搭接接头的计算分析中,一般假设通过补片传递所有的载荷。实际上,对于贴补的层合板来讲,母板在失去补片的支持后仍然能承受一些载荷。因此,传统的分析模型没有充分考虑母板的残余承载能力,低估了修理后的结构承载能力。

贴补修理时,通常将结构损伤区中的材料去除,一般开成圆孔,有时需根据修理设计开成特殊形状。

这类修理形式类似于图 3 中的单面搭接接头。为了减少剥离应力和剪应力集中,补片端部通常设计成楔型。

正如单面搭接接头的情况一样,贴补修理的主要问题是存在偏心载荷,在补强板上形成弯曲载荷,在胶层和复合材料层间产生剥离应力。特别是在压缩载荷作用下,面外弯曲将大大减低屈曲载荷,使得压缩破坏提前产生。在实际结构的修理中,对于外补强板胶接连接(贴补),可以将其看作双面搭接连接的一半来分析。损伤后的结构,例如蜂窝结构的夹芯和壁板内部的骨架等,可以提供足够的支持来平衡弯曲影响。因此,对贴补修理的验证通常采取双面贴补的试验方案,以消除附加的弯曲影响。同时,从图 3也可以看出,双面搭接的剪应力分布比单面搭接要均匀一些。

2.1.2　补片的大小

修理设计所要回答的一个重要问题就是补片应该取多大,在这里,胶接面积是一个关键参数。对于搭接模型而言,可以主要考虑搭接长度。搭接模型的计算分析表明,若搭接长度比较短,则所有的胶粘剂都处于较高的剪应力状态;搭接长度比较长,则大部分的胶接区域只承受很小的载荷或不受载,载荷主

要通过胶接接头搭接部分端部的两个狭小区域来传递。图 4 的计算结果示出了双搭接接头在不同搭接长度时的失效应力。这里对胶粘剂采用最大剪应变准则作为失效判据(胶粘剂采用弹塑性模型)。分析结果表明,双搭接接头存在一个临界搭接长度,采用更长的胶接长度不会增加失效应力,这个失效应力是可用的最大强度,它是与胶粘剂的剪切失效模式有关的。在图 4 中,优化搭接长度大约为 12 mm。考虑到诸如不完全胶接、补片端部分层和安全系数等因素,对于大部分修理,20 mm～30 mm 的搭接长度应该是一个不错的选择。例如:对于一个具有20 mm 损伤孔的结构来说,会需要一个直径大约为60 mm～80 mm 的补片。

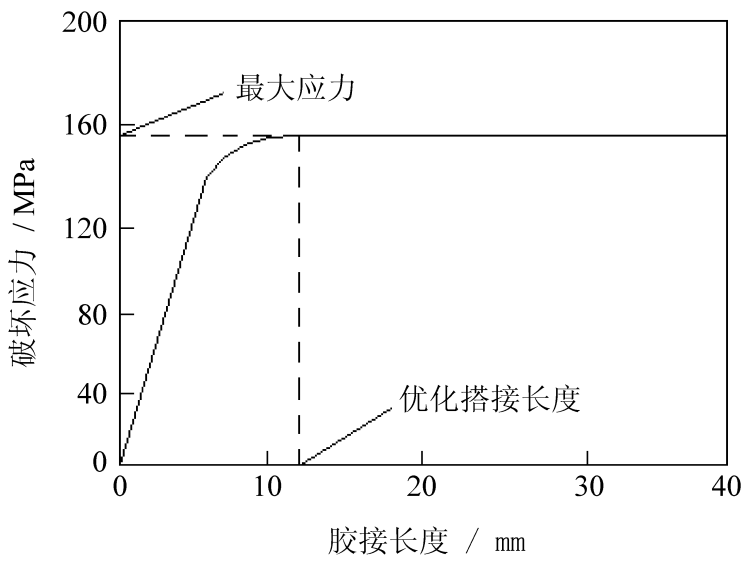

图 4 优化的搭接长度

Fig. 4 Optimized overlap length

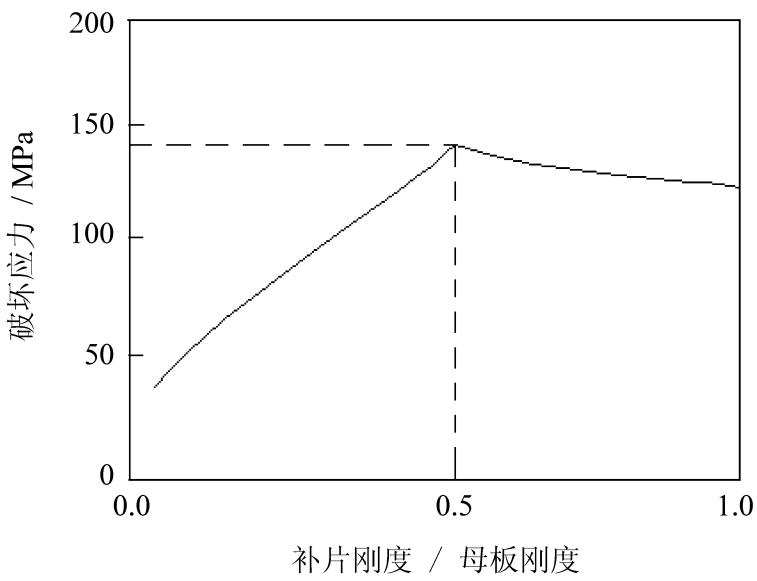

图 5 最佳的补片刚度

Fig. 5 Optimized patch stiffness

2.1.3 补片厚度

补片厚度是贴补修理要考虑的另一个重要参数。补片厚度影响的是补片的面内刚度,图 5 的分析计算结果示出了补片面内刚度(即弹性模量和厚度的乘积)对破坏强度的影响,分析结果表明,总的补片面内刚度的最优值等于母体层合板的面内刚度值。如果母板的刚度是 Et,则双搭接接头的最优补片刚度值应该是(Et)/2。与估计的一致,具有软补片(补片比较薄或它的弹性模量值比较低)的胶接接头的极限强度较低;然而,用较硬的补片(刚度比较大)也并不意味着会增大接头的强度。

对于双搭接接头,当母板和补片的弹性模量相同时,最优的补片厚度是母板的 1/2。分析表明,对于外贴补片修理,当我们使用 1/2 母板厚度作为补片厚度时,应力集中系数也是最小的。

2.1.4 贴补修理试验结果

图 6 给出了不同补片厚度(刚度)的试验结果,A 组为某种规格母板的破坏应力;B、C、D 组为 3 组修理件的破坏应力。其中,B 组补片的刚度为母板的 1/3,C 组补片的刚度为母板的 2/3,D 组补片的刚度与母板相当,各组的补片大小等其他因素相同。当增加补片的刚度到母板的 4/3 时,由于应力集中的影响,没有得到有效的试验数据。可以看出,通常在补片与母板的材料相同的情况下,最佳的补片厚度为母板的一半(这是对双面搭接而言,即相当于实际结构的修补)。

图 7 给出了不同补片大小的试验结果,A 组为某种规格的母板的破坏应力;B、C组为2组修理件

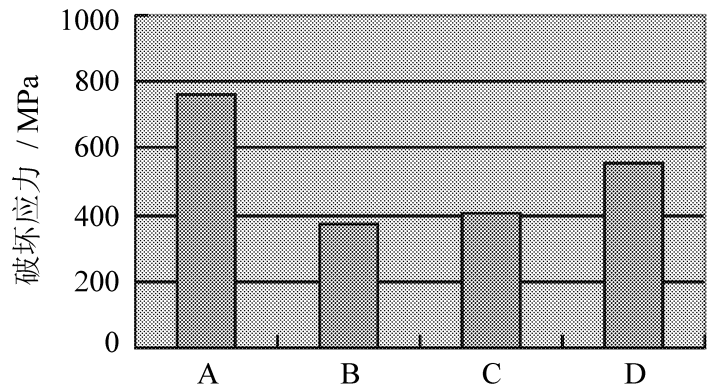

图 6 补片刚度影响的试验结果

Fig. 6 Test result of patch stiffness

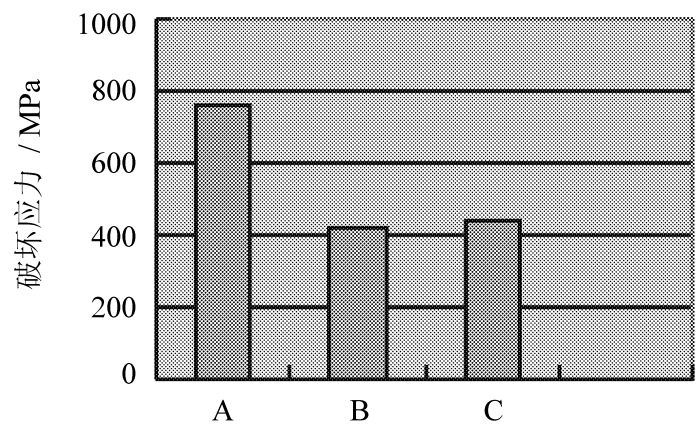

图 7 补片大小的影响

Fig. 7 Effect of patch size

的破坏应力。其中,B 组补片的直径为 80 mm,C 组补片的直径为 100 mm,两组补片的刚度等其他因素相同,母板所受损伤的直径为 30 mm。可以看出,当补片直径超过临界值以后,继续增大补片直径对于改善修理效果已经没有意义。

2.2 挖　补

2.2.1 概 述

外表面齐平的挖补修理(图 2)类似于图 3 中的单面楔型接头,或单面阶梯型搭接接头。相应地,挖补的形式也主要有两种,即对应于楔形接头的斜接式挖补(Scarf)和对应于阶梯形接头的阶梯形挖补(Step)。为了分析的方便,在这里对阶梯形挖补和斜接式挖补暂时不作区别。这种修理形式的胶接面上的剪应力分布比较均匀。此外,由于不存在偏心载荷,补强板的剥离应力比较小。因此,这种修理的效率高,特别适用于厚层压板的修理,可以得到光滑的外表面形状。

在外场条件下,这种修理方式比贴补修理方式困难,修理周期比较长。因此大多在大修厂或生产厂采用。此外,这种方法的更重要的缺点是,需要去除大量的未损伤的材料,以形成所需要的斜度或阶梯。所以,该方法对修理工艺的成熟性和稳定性具有较高的要求。

挖补修理可以用于部分厚度或整个厚度损伤情况。如果在厚层合板上产生内部分层,并且认为采用注射修理不合适时,可以将分层上部的材料切除,形成适当的挖补斜度或阶梯,然后采用挖补修理。

挖补修理时通常采用材料和铺层顺序均与母板一致的补片,并且为了保证胶接质量,多采用湿法成型,即修理时采用予浸料补片,然后固化。

挖补修理方式的主要设计参数是一个挖补角度的选择问题,这对于两种挖补形式都是一致的,因为改变阶梯形挖补的阶差最终改变的仍然是总体的挖补角度。

2.2.2 挖补角度的选择

通过计算分析,在图 8 中给出了楔形角、胶粘剂抗剪强度对修理板承载能力的影响曲线。可以看出:挖补修理存在着一个最佳楔形角 [。而且这个最佳楔形角随着胶粘剂抗剪强度的增大而增大。[越大,则在修理过程中去掉的母板材料就会越少,同时也会减少修理时间,而这一切都有赖于胶粘剂抗剪强度 f_s 的增大,即选用具有高抗剪强度的胶粘剂。但随着楔形角的增大,胶层中剪应力的最大值也随之

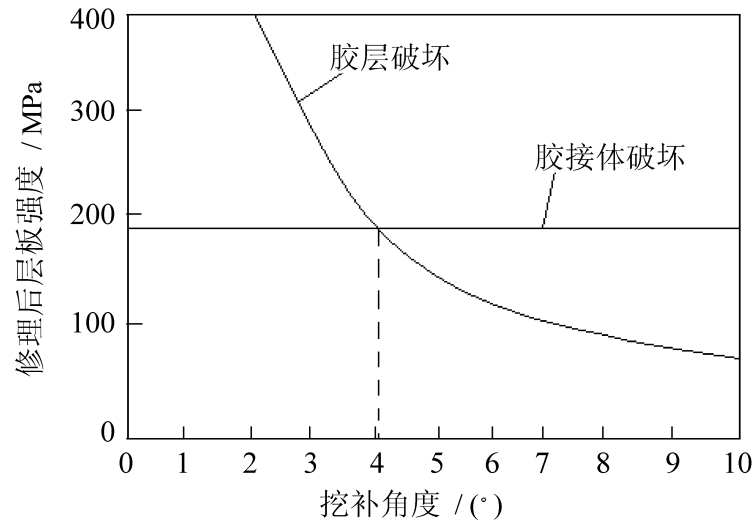

图 8　优化的挖补角度

Fig. 8　Optimized scarf angle

增大。因此由于胶粘剂抗剪强度的限制,楔形角不可能做得很大。与贴补修理相比,挖补修理方式可以使剪应力和剥离应力更低而且更为均匀,因此它的修理效率就更高一些。与贴补模型类似,在一个传统的楔型接头模型里,通常假设通过楔型连接的补片传递所有的载荷。实际上,母板在失去补片的支持后仍然能承受一些载荷。因此,传统的分析模型低估了修理后的结构强度。有限元方法的分析结论表明,采用满足要求的胶(通常要求其剪切强度不小于 20 MPa)进行挖补修理时,6 的楔形角为最优楔形角,而不是 3°。同时,前者去掉的母板材料少,更容易制造,能够产生更高的修理效率。传统的胶接模型的分析结论是,挖补斜度应该是 1∶15 到 1∶18 之间,这是一个很保守的结论,并且由于要去除大量的未损伤材料,因而风险也比较大。

从国外的研究和实践经历看,比如波音公司,阶梯形挖补的每层的阶差从最初的 1 英寸减小到 0.5 英寸,也体现了随着修理技术和材料性能的提高,挖补角度有增大的趋势。

2.2.3 挖补的试验结果

图 9 中给出了不同挖补角度的试验结果。A 组

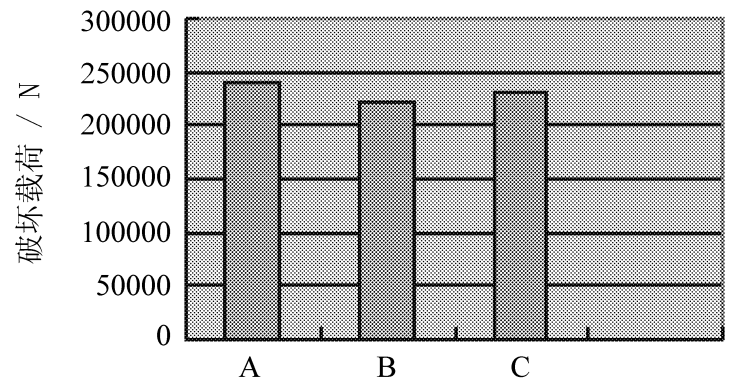

图 9　挖补角度的影响

Fig. 9　Effect of scarf angle

是完好的母板的破坏强度, B 组和 C 组是两组修理件的破坏强度。其中, B 组的挖补角度大约是 6°, C 组的挖补角度大约是 3°。可以看出, 挖补修理可以使损伤件的强度恢复到完好母板的 90 % 以上。采用更小的挖补角度对修理效果的影响不大, 但是由于要去除更多的无损材料并且增加了胶接面积, 因此要承担更大的风险。

3 结 论

(1) 对于贴补修理, 一般用双面贴补来模拟实际结构的修理情况。此时, 最佳的补片厚度为母板厚度的一半。

(2) 对于贴补修理, 在胶粘剂性能满足要求的情况下(即要满足剪切强度不低于 20 MPa 等条件), 25 mm 左右的搭接长度就可以满足一般修理的使用要求。

(3) 对于挖补修理, 在胶粘剂性能满足要求的情况下, 最佳的挖补角度为 6°。此时, 修补件的强度恢复可以满足要求, 并且由于去除了更少的母板材料而且胶接面积相对要小, 因而修理效果比较安全可靠。

参考文献:

[1] 崔元庆. 复合材料损伤结构胶接补强修理分析及设计技术[D]. 西安: 西北工业大学, 1999.

[2] 薛克兴. 复合材料结构的损伤与修理[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.

[3] 白金泽. 复合材料胶接修理参数优化分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2000.

[4] 乔 新. 波音飞机复合材料结构修理教程[M]. 北京: 中国民航出版社, 1996.

[5] Holm A, Hanno H. Shear Stresses in a Stepped Bonded Repair of a Laminate[A]. In: Murray L S, ed. Proceedings of ICCM-11[C]. Gold Coast: ACSS, 1997. 4754.

[6] Randolph A O, Clifford M F. Bonded Repairs in Composite Structures —— A Finite Element Approach[A]. In: Murray L S, ed. Proceedings of ICCM-11[C]. Gold Coast: ACSS, 1997. 4811.

[7] Soutis C, Hu F Z. Repair Design of Composites and Efficiency of Scarf Patch Repairs[A]. In: Murray L S, ed. Proceedings of ICCM-11[C]. Gold Coast: ACSS, 1997. 4832.