

挖补修理复合材料夹芯结构侧向压缩性能研究



张铁纯¹,张世秋¹,王轩¹,周春萃²

1.中国民航大学,天津 300300

2.航空工业济南特种结构研究所 高性能电磁窗航空科技重点实验室,山东 济南 250023

摘要:本文总结了挖补修理复合材料夹芯结构侧向压缩性能的研究现状,分析了材料、工艺、构型及环境等影响因素,指出最新的修补建模方法和力学试验结果分析思路,具有重要的工程价值,为国产飞机复合材料夹芯结构修理方案设计提供参考。

关键词:复合材料;夹芯结构;挖补;侧向压缩;修补参数

中图分类号:TB332

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.08.001

复合材料夹芯结构由于面板较薄,在受到低速冲击时,面板和芯材都可能会发生不同程度的损伤,面板存在纤维断裂、基体碎裂和层间分层现象,芯材会出现蜂窝的压溃或泡沫碎裂、与面板脱黏等现象^[1-5]。除了意外冲击载荷造成的损伤外,飞机复合材料结构在服役期间还要承受复杂、长期的疲劳载荷作用,要经受温度、湿度等苛刻的外部环境考验,这种湿热环境对树脂基体的影响尤为严重^[6-8]。不论是服役期间外部湿热环境的作用,还是外力冲击的作用,一旦复合材料夹芯结构损伤严重,都应及时采取修理措施。临时性修理的意义在于不影响航空公司的运营活动,而永久性修理才能恢复复合材料夹芯结构的性能,复合材料夹芯结构的永久性修理主要采用挖补修理方式,因此挖补修理复合材料夹芯结构力学性能研究具有重要意义。

挖补修理尽可能减少修补带来的附加力矩,增加的重量(质量)也较轻^[9-13],但进行挖补修理要求有较高的熟练度和较长的材料准备时间。挖补修理复合材料夹芯结构力学性能研究主要集中在挖补后拉伸、弯曲、剪切、平压和侧压性能等方面,许多研究人员已经做出很多成果^[14-21]。复合材料夹芯结构的挖补修理工艺对挖补后力学性能也有很大

的影响,很多研究人员在挖补修理工艺方面进行了不少研究^[22-29]。而挖补修理参数和挖补形式的优化,要依靠试验才能得到最优结果,而且试验成本昂贵,所以利用有限元技术对挖补修理参数和挖补形式进行仿真分析非常重要,在这方面的研究成果也很多^[30-36]。

1 修补模型

复合材料夹芯结构主要由面板和芯材两部分组成,芯材通常是泡沫、轻木、蜂窝等轻质材料。挖补修理复合材料夹芯结构主要考虑母板、填充芯材、面板补片和胶层等部分。挖补修理又可以根据打磨形式不同分为斜接式和阶梯式。根据复合材料夹芯结构的挖补修理深度,可以分为单侧面板挖补、单侧面板加芯材修补和双侧面板加芯材修补。其中,双侧面板加芯材阶梯式挖补具体形式如图1所示,单侧面板加芯材阶梯式挖补具体形式如图2所示,单侧面板斜接式挖补具体形式如图3所示。

阶梯式挖补打磨工艺复杂,要求的精度高,实际修补几何外形和有限元建模的几何外形高度吻合,如图4所示^[32]。斜接式挖补在实际维修中更为常见,打磨出一定的锥度显

收稿日期: 2021-05-26; 退修日期: 2021-06-11; 录用日期: 2021-07-05

基金项目: 航空科学基金(20181867007)

引用格式: Zhang Tiechun, Zhang Shiqiu, Wang Xuan, et al. Research on lateral compression performance of scarf repaired composite sandwich structure[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(08): 1-11. 张铁纯, 张世秋, 王轩, 等. 挖补修理复合材料夹芯结构侧向压缩性能研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(08): 1-11.

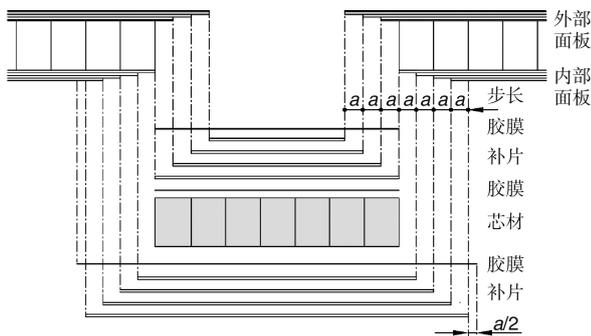


图1 双侧面板加芯材阶梯式挖补具体形式

Fig.1 Concrete stepped repair form of double side panel and core material

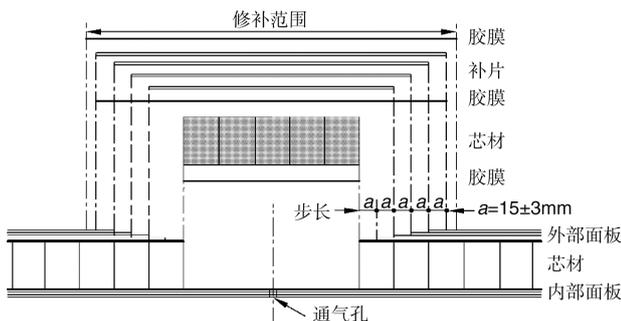


图2 单侧面板加芯材阶梯式挖补具体形式

Fig.2 Concrete stepped repair form of single side panel and core material

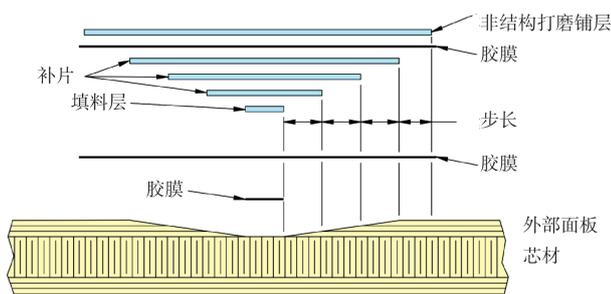


图3 单侧面板斜接式挖补具体形式

Fig.3 Concrete scarf repair form of single side panel

然比精确地打磨出台阶要容易,但修补时一般采用预浸料补片或纤维布制作的湿铺层补片,这样的补片没有锥度,各层补片组合后依然是阶梯式,但多数研究者^[35]为了胶层建模方便,将各层补片组合也视为斜接式,如图5所示,这使得实际修补与有限元建模之间有所差别。也有研究者^[23]将这种区别通过建模细致地展示出来,如图6所示。然而这种截面三维建模的复杂度却大大增加。

在挖补复合材料夹芯结构力学性能研究中,我们通常关注的是有限的几种力学性能,如雷达罩型复合材料夹芯

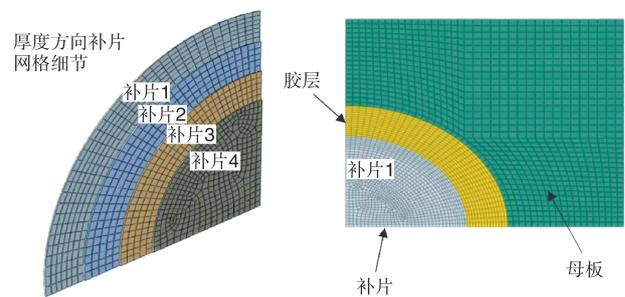


图4 阶梯式修补有限元建模局部视图

Fig.4 Local view of stepped repair finite element modeling

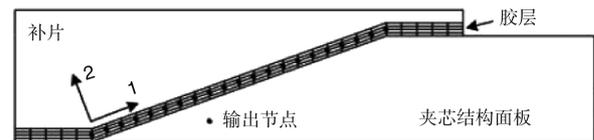


图5 斜接式修补有限元建模局部视图

Fig.5 Local view of scarf repair finite element modeling

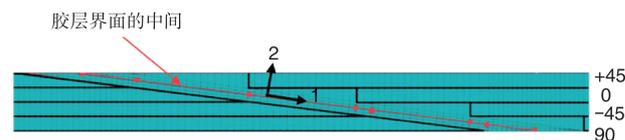


图6 精细化斜接式修补有限元建模局部视图

Fig.6 Local view of refined scarf repair finite element modeling

结构的侧向压缩性能、客舱地板的三点弯曲强度等,因此可以对所建立的挖补复合材料夹芯结构模型进行简化,进而减轻建模工作量。研究挖补复合材料夹芯结构的拉伸力学性能时,面板修补的胶层单元就一定要有,因为有研究者^[19-30]发现拉伸破坏的位置多数与胶层有关。而研究挖补复合材料夹芯结构的平压和侧压强度时,胶层的设置就变得不那么重要,因为平压强度主要与较弱的芯材强度有关^[37-38],侧压强度主要与复合材料夹芯结构形式和面板性能^[39]有关,胶层在其中很少承力,也很少发生破坏,因此省去胶层单元的建模是一个简化模型的思路。另外,设置胶层单元时,常有模拟胶层的 Cohesive 单元加入后模型不收敛的问题,有研究者^[32]指出 Cohesive 单元参数测量困难,且要经过反复试验和比对才可能会准确,利用实体单元,赋予其合适的材料模型,也能取得较好的仿真效果,模型的收敛性较好,这对于需要设置胶层的模型建立是一个新的思路。

2 侧向压缩力学性能

对采用挖补复合材料夹芯结构的侧向压缩强度恢复率

可达90%以上^[23],挖补夹芯结构侧向压缩的损伤形式包括芯材破碎、面板基体碎裂、面板纤维断裂、面板和芯材的屈曲变形等^[21,23-24]。复合材料夹芯结构的夹芯为韧性较差的材料,如PMI泡沫。在侧向压缩载荷下的失效破坏,往往不是面板先达到其压缩强度而导致的结构失效,多数情况下是先发生芯材的过大变形或者失效,而后面板才发生局部屈曲,最终达到结构的侧向压缩强度^[40-41]。

复合材料夹芯结构挖补后侧向压缩强度受到很多因素影响,主要可分为胶层参数、工艺参数、构型参数和环境参数4大类^[42],构型参数包括附加层、挖补角、补片铺层、补片形状、芯材种类和密度。

2.1 胶层参数

胶层连接补片与面板,修补主要靠胶层来进行载荷的传递,保持各修补部分间的连续,胶层的参数不同对修补后的强度影响很大。通常,胶层的材料力学性能低于复合材料层合板,拉伸载荷下挖补面板的破坏往往从胶层开始,但在复合材料夹芯结构的挖补后压缩性能表现中胶层的影响范围十分有限,往往胶层在挖补复合材料夹芯结构达到侧向压缩强度后也并未失效^[40]。程小全等^[43]认为脆性胶黏剂对修补结构的作用主要在增加刚度,这一点和Her等^[44]认为增加胶层的切变模量会使修补结构应力集中严重的看法一致,韧性胶黏剂的使用不仅可以在修补结构的刚度上起作用,在强度恢复方面的效果也很好,因此复合材料夹芯结构挖补时应采用韧性好的胶黏剂。

挖补时胶层的厚度也是一个重要因素,有限元理论分析表明胶层越厚,越能够缓解胶层中应力集中的情况^[44],但在实际的修补中,胶层厚度的增加,会导致更多缺陷。在实际修补中,研究者^[45-46]推荐采用的胶层厚度为0.1~0.15mm,这个范围内的胶层一般能够满足强度要求,也能避免引入更多的缺陷,造成修补后强度降低。

2.2 工艺参数

复合材料的修补质量只能通过对每个修补工艺环节的严格控制来保证,大量实践证明修补工艺对修补质量有巨大的影响^[47]。下文就温度均匀性、胶结界面处理工艺,以及固化工艺等方面展开分析。

对于复合材料夹芯结构的挖补修理,温度均匀性问题常被关注,因为实际的修补可能会涉及变厚度芯材的复合材料夹芯结构,甚至出现修补区某处芯材厚度为零的情况。芯材中含有空隙,其导热系数和面板有很大的不同,芯材厚度不同更加剧了这种不同修补区域温差过大的情况,采用热压罐或者烘箱固化能够进行有效缓解。但多数

情况下,修补活动是在外场进行的,而且相应的零件拆卸不容易,在原位利用热补仪修理是仅有的可用选择,这就要求有更好的方法控制各修补区域的温度差异。通过在芯材较薄区域增加透气毡的厚度,能缓解热量散失,维持温度,但效果较差^[27]。杨龙英等^[25]利用铝板导热、透气毡保温方法对楔形蜂窝夹芯结构进行修补,发现其虽能在一定程度上减小不同区域的温差,但操作重复性不是很好。但发现在修补区域背面用真空袋或胶带固定PMI泡沫块方法,可产生较好的温度均匀性,原因在于PMI泡沫对板板区域起到保温作用,对板芯区域起到导热作用,温差可控制在5℃范围内。

合适的胶结界面处理能够提高黏结修复强度,胶结界面通常用砂纸打磨和丙酮清洗处理,打磨砂纸不应选用碳化硅砂纸,因为其打磨时易掉落残渣易形成胶结缺陷,选用氧化铝砂纸则不会出现类似情况。打磨界面的粗糙度也会影响胶结质量,过于光滑使得胶结面积减小,机械嵌合作用减弱;过于粗糙,则树脂无法渗入所有胶结表面区域,使胶层各处的连续性和均匀性较差,罗辑等^[27]通过试验探究发现打磨砂纸目数在180~320目之间能使胶层质量较好。熊玉成等^[48]通过对胶结表面激光处理和砂纸打磨后加等离子处理方法,得到的试件剪切强度比纯手工砂纸打磨分别提升17.9%和10.9%。

复合材料修补固化工艺主要有热压罐固化、烘箱固化和热补仪固化。热压罐固化得到的修补质量较好,通常优于烘箱固化和热补仪固化。刘遂等^[24]通过挖补区域有效高度这一概念,解释并用试验验证了单侧面板修补和双侧面板加芯材修补挖补区域有效高度低,热压罐固化工艺相比于热补仪固化工艺能明显够提升复合材料夹芯试件侧向压缩强度,但在单侧面板加芯材修补中挖补区域有效高度大,两者的固化后得到的侧向压缩强度基本一致。孙凯等^[26]利用热补仪进行蜂窝夹芯结构的湿铺层修补工艺研究,发现对不同的损伤深度的蜂窝夹芯件挖补后,试验件的侧向压缩强度恢复率均在87%以上,验证了热补仪工艺修复的有效性。烘箱固化工艺与热压罐工艺不同之处在于固化压力较低,但其温度均匀性较热补仪固化工艺好。

2.3 构型参数

2.3.1 附加层

附加层与母板重叠宽度、铺层角度和附加层的厚度等因素都会影响挖补复合材料夹芯件侧向压缩强度。刘国春等^[49]在平纹编织复合材料层合板挖补修理后拉伸强度分析中,发现附加层重叠宽度存在对于修补后试件强度最优的

临界值,认为合适的附加层重叠宽度是20~25mm。空客公司^[50]对飞机雷达罩维修时附加层重叠宽度建议为12~18mm,波音公司维修手册^[51]中对附加层重叠宽度的要求是最外侧附加层重叠宽度为25mm,如果附加层不止一层时,内侧附加层重叠宽度为13mm。李艳等^[52]也在层合板挖补中对附加层重叠宽度影响承载强度进行了有限元分析,发现附加层重叠宽度分别为0、12mm、24mm、28mm时,层合板修补后承载能力随重叠宽度的增大而增大。

增加附加层重叠宽度在复合材料修补中确实能够提升挖补后试件的强度,但不能单纯依靠增加附加层重叠宽度来提升修补强度,原因在于实际修补活动中随附加层重叠宽度额外增加时,胶结面积增加,引入胶层缺陷的数目也会增加,不能再提升试件的强度,这从实际修补试验中也能看到^[40]。另一方面,即使仅通过有限元分析,也能发现附加层重叠宽度的增加对试件强度的提升十分有限^[52],而且额外增加附加层面积会导致修补重量的提升,这是得不偿失的。综上所述,复合材料夹芯件修补时附加层重叠宽度应在15~25mm范围内做选择,可根据对修补强度和修补增重的需求做适当调整。

附加层铺层角度对于面板较薄的挖补复合材料夹芯结构来说不难选择,有研究者^[53]通过试验和有限元分析两种方法论证了0°铺层对复合材料夹芯结构侧向压缩承载能力的提升是最大的,但也有研究者^[54]指出,在附加层与补片间使用胶模或存在一定厚度的胶层时,±54°的附加层铺层方向最有利于传递载荷和减小应力集中。由于雷达罩复合材料夹芯结构的面板多由无经纬区分的平纹编织材料制作,此时附加层铺层的方向应选择0°或者90°,因为±45°铺层方向上平纹编织材料的强度最低^[55],使用±54°附加层铺层方向修补后复合材料夹芯结构侧向压缩强度会降低。

附加层的厚度在复合材料夹芯结构一般为一层,增加附加层的厚度,通常情况下会降低修补复合材料夹芯件的强度。赵志彬等^[55]在蜂窝夹芯复合材料挖补有限元强度分析中,发现修补件强度随额外附加层厚度增加而减小,张春等^[56]在复合材料泡沫夹芯结构强度有限元分析中也发现了类似的规律,这是由于额外增加附加层会导致面板局部刚度过大,导致应力集中,并最终使得修补后结构强度降低。

2.3.2 挖补角

从传统的二维修补理论模型出发,往往会得出:在较小的挖补角时,由于此时胶层的应力集中现象得到最大缓解,此时挖补得到试验件的强度最大^[42]。当然,如果将此理论

仅用于二维胶结接头的强度分析,也是基本正确的。但对于三维修补结构,除了胶结接头中胶层的承担载荷,还有挖补区域外的母板承担载荷。众所周知,胶层的承载能力弱于复合材料层合板。如果挖补角过小,就会导致母板去除部分过多,换成由修补区的胶层承载,这显然会降低挖补后试验件的强度。在复合材料夹芯结构的修补基本为三维修补,有研究者认为最佳挖补倾角为5°~6°,或者挖补倾角打磨比例为1:10时^[30,45-46,53,56],修补后试验件有最大侧向压缩强度。

2.3.3 补片铺层

补片的每层铺层顺序和角度应尽可能和母板一致,波音公司^[51]的飞机复合材料部件修补方法中也都是如此,然而空中客车公司^[50]却采用首铺最大层补片做法,如图7所示。理由在于:首铺最大层补片有助于修补后表面处理,该方法也通过了试验验证^[55],而采用首铺最小层补片也确实有可能在最后表面处理时打磨掉最外层,这一点少有研究者关注。在铺层角度方面,喻梅等^[45]通过有限元分析后认为,补片与母板存在一定的偏差角,并不会显著影响挖补修补的效果,因为即使补片偏差角达到45°,试验件压缩强度也仅降低0.1%。

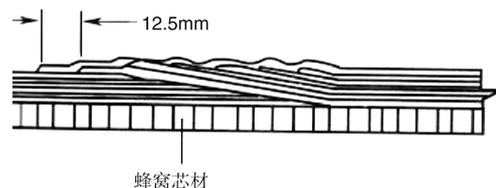


图7 斜接式首铺最大层补片修补图

Fig.7 Schematic diagram of scarf repair for the first maximum layer

传统的补片铺层采用预浸料铺层或者湿铺层方式进行固化修补,可能会出现补片的皱曲和变形,使用提前固化好的硬补片修补能够避免这种情况,而且硬补片可采用与原母板相同的热压罐固化工艺制作,修补时固化温度仅取决于所用胶黏剂的固化温度,可有效降低修补时固化温度,成型后的硬补片也可以采用数控加工技术进行修整,使其能与挖补空腔更好地贴合^[57]。

2.3.4 补片形状

在实际的复合材料修补活动中,补片形状多为圆形,圆形补片能够较好地缓解应力集中现象。传统的挖补倾角下,母板的去除较多,这降低了挖补后复合材料的结构强度。针对这种情况,Niedernhuber等^[58]提出了一种新的基于纤维方向主导修补模型阶梯步长的新思路,即排除垂直于

特定层纤维方向的重叠长度,并比较连续步长阶梯修补和减小步长阶梯修补的抗拉强度。结果显示,其拉伸强度无明显区别,其胶结接头长度减小近40%,极大地缩小了挖补面积,传统铺层方式与纤维导向铺层方式修补面积对比意图如图8所示。Pierce等^[31]基于该修补模型进行了修正,除了将垂直于纤维方向铺层的阶梯步长排除,还将与纤维方向呈45°的铺层部分阶梯步长减为原步长的一半,单个胶结接头的修补模型如图9所示,三维修补模型的铺层形式如图10所示。采用该铺层方式,补片的应力集中现象得到缓解,同时进一步减小了挖补面积,保持同等修补强度,修补尺寸可以减小33%~40%。

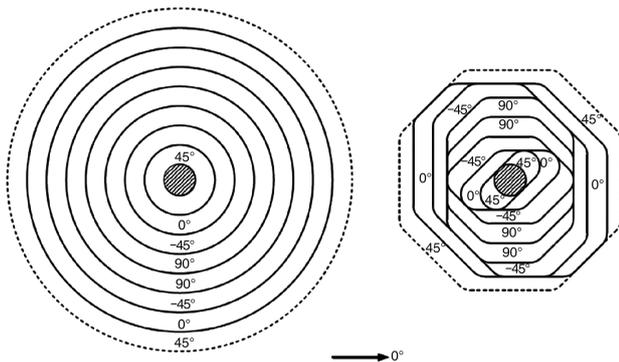


图8 传统铺层方式与纤维导向铺层方式修补面积对比
Fig.8 Comparison of repaired area between traditional layup method and fiber-guided layup method

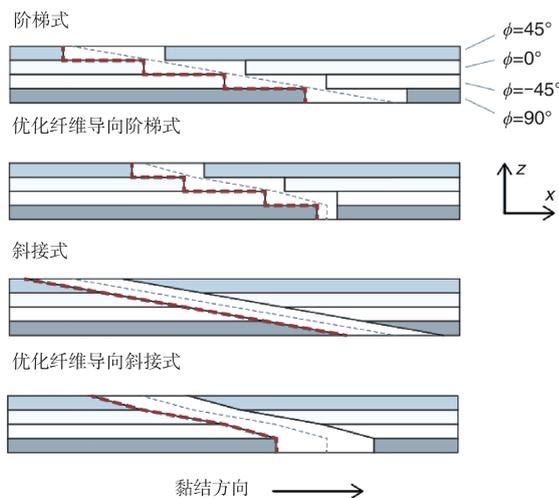


图9 优化纤维导向方法下单个胶结接头的修补模型
Fig.9 Repair model of single adhesive joint with optimized fiber-oriented method

2.3.5 芯材的种类和密度

芯材更换时,应该使用与母板芯材类型和密度相同的

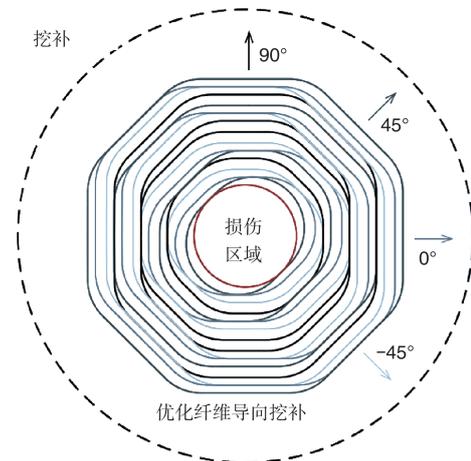


图10 优化纤维导向方法与挖补方法的修补面积对比
Fig.10 Comparison of repair area between optimized fiber-oriented method and scarf repair method

芯材。通常情况下,也可以使用同类型、密度稍高的芯材。有研究者也发现,修补时用密度更大的蜂窝芯材填充时,修补后试件比同密度芯材修补件的拉伸或压缩强度更大,且这种差异会随着修补面积的增大而增大^[59]。

2.4 环境参数

环境参数主要指湿度与温度,复合材料在湿热环境影响下,力学性能会有所降低,复合材料夹芯结构因为芯材吸湿性高于复合材料面板,其面临的湿热问题更加严峻。修补胶层吸湿性也比面板高,受热膨胀情况也比面板严重。

雷达罩夹芯结构面板主要为玻璃纤维,管清宇等^[60]对7781玻璃纤维环氧树脂面板复合材料湿热性能进行研究,发现其高温湿态环境条件下压缩强度可降低10%~40%。尹亮等^[61]对聚甲基丙烯酸酰胺(PMI)泡沫夹芯玻璃纤维面板复合材料进行湿热研究,湿热处理后结构侧向压缩强度降低16.73%。郑国栋等^[62]对玻璃纤维环氧树脂面板泡沫夹芯复合材料进行吸湿性能研究,在离子水和海水处理后,试验件侧向压缩强度分别降低16.72%和21.2%。在压缩刚度方面,湿热条件下压缩刚度降低多在10%以内,比强度降低的比例要小,原因在于夹芯结构的压缩刚度主要由面板纤维压缩刚度决定,纤维在湿热环境下吸湿较少,性能降低较少。

在复合材料修补后湿热性能研究方面,刘淑峰等^[63]进行了树脂基复合材料斜面胶结湿热性能研究,发现试件拉伸破坏位置主要在胶结界面上。苏日新等^[64]建立了湿热环境下复材修理压缩解析模型,试验结果与解析结果吻合。苏景新等^[65]对层合板修理后湿热环境的弯曲性能进行研究,发现湿热处理后试验件弯曲强度降低34%~39%。复合

材料关于复合材料夹芯结构修补后湿热性能的研究目前仍少见。

3 未来发展方向

在侧向压缩载荷作用下,挖补复合材料夹芯结构的强度、刚度、破坏形式和损伤机理受到胶层参数、工艺参数、构型参数和环境参数的影响。为了提高挖补复合材料夹芯结构的侧向压缩强度,可以在以下几个方面努力。

(1) 在胶黏剂方面:选择韧性好的胶黏剂,胶层厚度控制在0.1~0.15mm。

(2) 在工艺方面:应该严格把控,将修补固化时温度场均匀性做到最佳,有条件的情况下应优先使用热压罐或烘箱,胶结界面的处理可根据已有条件,尽可能通过较好的打磨工艺或表面处理技术提高界面性能。

(3) 在构型参数方面:附加层厚度为一层,方向为 0° ,与母板重叠15~25mm为宜;面板挖补倾角 $5^\circ\sim 6^\circ$ 时修补复合材料夹芯结构有最大侧向压缩强度;补片可选用固化后的硬补片进行修补;补片形状可采用纤维方向主导的修补模型中的优化方案,能够极大地减小母板挖去部分,减小母板强度损失;适当地采用同材料密度稍大的芯材也能提高修补夹芯结构的侧向压缩强度。

(4) 在环境参数方面:要注意在湿热环境下修补复合材料夹芯结构存在强度降低的风险。

4 结束语

复合材料夹芯结构挖补对结构气动外形的恢复,是其他修补方式所不具备的。在轻量化设计普遍存在的绿色节能时代,复合材料夹芯结构的应用逐渐广泛。本文总结了复合材料夹芯结构挖补的分类及有限元建模难点,围绕修补后侧向压缩强度性能恢复,给出许多的修补推荐参数和参数控制方法。

现有的复合材料夹芯结构挖补后侧向压缩性能研究的成果很多,但关于环境因素影响的研究还很缺乏。复合材料夹芯结构服役期间往往伴随着温度和湿度的变化,芯材的吸湿性能又远高于面板,湿热环境的影响给复合材料夹芯结构修补后力学性能的恢复制造了很大的不确定性,但相关的研究较少。因此,应更多地开展对复合材料夹芯结构挖补结构的环境性能研究。

AST

参考文献

[1] 王士杰,孙泽玉,陶雷,等. PMI泡沫对碳纤维复合材料抗低

速冲击性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料,2019(8):53-58.

Wang Shijie, Sun Zeyu, Tao Lei, et al. Effect of PMI foam on low-velocity impact resistance of carbon fiber composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019 (8) : 53-58. (in Chinese)

[2] 赵金华,曹海琳,晏义伍,等. 泡沫铝夹层结构复合材料低速冲击性能[J]. 材料工程,2018,46(1):92-98.

Zhao Jinhua, Cao Hailin, Yan Yiwu, et al. Low velocity impact properties of aluminum foam sandwich structural composite[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46 (1) : 92-98. (in Chinese)

[3] 孔德拴. 复材泡沫夹芯飞机结构的制造缺陷收集和修理[J]. 科学技术创新,2020(6):27-28.

Kong Deshuan. Collect and repair manufacturing defects of composite foam sandwich aircraft structures[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(6):27-28. (in Chinese)

[4] 石晓朋,李曙林,常飞,等. Nomex蜂窝复合材料冲击损伤及剩余压缩强度试验[J]. 航空材料学报,2013,33(6):70-75.

Shi Xiaopeng, Li Shulin, Chang Fei, et al. Impact damage and post-impact compressive strength experiment of nomex honeycomb sandwich panel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(6):70-75. (in Chinese)

[5] 夏龙,徐维,李巧,等. 复合材料泡沫夹芯结构低速冲击损伤研究[J]. 航空工程进展,2011,2(4):425-431.

Xia Long, Xu Fei, Li Qiao, et al. Low-velocity impact damage analysis on composites foam core sandwich structure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2 (4):425-431. (in Chinese)

[6] 刘淑峰,程小全,包建文. 湿热环境对树脂基复合材料性能影响的分析[J]. 高分子材料科学与工程,2014,30(9):183-190.

Liu Shufeng, Cheng Xiaoquan, Bao Jianwen. Hygrothermal effects on properties of composite materials[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2014,30(9):183-190. (in Chinese)

[7] 曹景斌,王松,章强. 树脂基复合材料湿热压缩性能研究[J]. 航空科学技术,2020,31(3):47-52.

Cao Jingbin, Wang Song, Zhang Qiang. Research on resin composite hydrothermal compressive properties[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(3):47-52. (in Chinese)

[8] 付裕,刘牧东,吴堂珍,等. 直升机复合材料结构疲劳寿命评

- 定技术的研究进展与发展趋势[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1):83-88.
- Fu Yu, Liu Mudong, Wu Tangzhen, et al. Development and trend on fatigue life evaluation of helicopter composite structure[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(1): 83-88. (in Chinese)
- [9] 李顶河,徐建新. 飞机复合材料结构修理:理论、设计及应用[M]. 北京:科学出版社,2019.
- Li Dinghe, Xu Jianxin. Composite repair of aircraft structures: Theory, design and application[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)
- [10] 李顶河,赵鲁春,徐建新,等. 复合材料正交加筋圆柱壳结构阶梯式挖补修理的参数化研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9): 308-317.
- Li Dinghe, Zhao Luchun, Xu Jianxin, et al. Parametric investigation of orthotropic stiffened composite laminated cylindrical shells with a stepped-lap repair[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9):308-317. (in Chinese)
- [11] 徐建新,曹小梅,李顶河. 复合材料加筋板的阶梯式挖补修理稳定性分析[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(4):1-3.
- Xu Jianxin, Cao Xiaomei, Li Dinghe. Research on stability of stiffened composite laminates with stepped-lap repair[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(4): 1-3. (in Chinese)
- [12] 贾宝惠,窦晨,李顶河,等. 复合材料蜂窝夹芯板斜接式挖补修理的稳定性分析研究[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(4): 588-591.
- Jia Baohui, Dou Chen, Li Dinghe, et al. Study on buckling of composite honeycomb plate with scarf repairs[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(4): 588-591.(in Chinese)
- [13] 徐建新,杨维嫣,窦晨,等. 基于遗传算法的复合材料层合板修理方案优化[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(1):75-81.
- Xu Jianxin, Yang Weiyang, Dou Chen, et al. Based on genetic algorithm optimization for the composite laminated plate repair program[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013, 31(1):75-81. (in Chinese)
- [14] 刘国春,庞杰,杨文锋,等. 玻璃纤维泡沫夹芯结构挖补修理弯曲性能试验与有限元模拟[J]. 复合材料科学与工程, 2020(2):76-80.
- Liu Guochun, Pang Jie, Yang Wenfeng, et al. Finite element simulation and experiment verification on bending performance investigation on adhesively repaired foam core sandwich fiber glass composite[J]. Composites Science and Engineering, 2020(2): 76-80.(in Chinese)
- [15] 刘国春,魏桂明,杨文锋,等. 复合材料泡沫夹芯结构胶结修理的压缩性能[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(2):16-21.
- Liu Guochun, Wei Guiming, Yang Wenfeng, et al. Compression performance of adhesively repaired foam core sandwich composite[J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(2):16-21.(in Chinese)
- [16] 郭轩,关志东,邱诚,等. 蜂窝夹芯挖补修理结构弯曲性能研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7):1528-1536.
- Guo Xuan, Guan Zhidong, Qiu Cheng, et al. Flexural performance of scarf repaired honeycomb sandwich structures [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7):1528-1536. (in Chinese)
- [17] 刘峰,张春,喻辉,等. 纯剪切状态下泡沫夹芯壁板非穿透损伤挖补强度研究[J]. 机械设计与制造, 2017(4):229-232.
- Liu Feng, Zhang Chun, Yu Hui, et al. Scarf-patch strength analysis of foam core sandwich panel with non-penetrating damage under pure shear loading[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(4):229-232. (in Chinese)
- [18] 张春,刘峰,马佳,等. 泡沫夹芯面板非穿透损伤挖补维修有限元分析[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(5):44-48.
- Zhang Chun, Liu Feng, Ma Jia, et al. Scarf-patch repair analysis of foam core sandwich panel with non-penetrating damage[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(5): 44-48. (in Chinese)
- [19] 李剑峰,燕瑛,廖宝华,等. 复合材料蜂窝夹芯结构单面贴补弯曲性能的分析模型与试验研究[J]. 航空学报, 2013, 34(8): 1884-1891.
- Li Jianfeng, Yan Ying, Liao Baohua, et al. Analysis model and experimental study of bending behavior of composite honeycomb sandwich structures with one-side bonded repair [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(8): 1884-1891. (in Chinese)
- [20] 杨扬,邢素丽,江大志,等. 修复方式对蜂窝夹芯结构弯曲性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(4):100-105.
- Yang Yang, Xing Suli, Jiang Dazhi, et al. Effects of repaired

- methods on bending mechanical properties of honeycomb sandwich structures[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2012(4):100-105. (in Chinese)
- [21] 汪海,陈秀华,郭杏林,等. 复合材料蜂窝夹芯结构修理后强度研究[J]. *航空学报*, 2001, 22(3):270-273.
Wang Hai, Chen Xiuhua, Guo Xinglin, et al. Strength investigation of composite honeycomb structures after repair [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 22(3):270-273. (in Chinese)
- [22] 李彩燕,邢素丽,朱宝军,等. T700/双马复合材料蜂窝夹芯结构损伤修复试验研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2014(11):48-53.
Li Caiyan, Xing Suli, Zhu Baojun, et al. Experimental research on the repair of the damage in honeycomb-core t700/bmi composite sandwich structures[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2014(11):48-53. (in Chinese)
- [23] 刘遂,关志东,郭霞,等. 胶结修理后边缘闭合蜂窝夹芯结构的侧压性能[J]. *材料科学与工艺*, 2014, 22(1):24-29.
Liu Sui, Guan Zhidong, Guo Xia, et al. Edgewise compressive behavior of edge closed honeycomb sandwich structures after bonded repair[J]. *Materials Science & Technology*, 2014, 22(1):24-29. (in Chinese)
- [24] 刘遂,关志东,郭霞,等. 工艺因素对修理后蜂窝夹芯结构侧压性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(3):177-183.
Liu Sui, Guan Zhidong, Guo Xia, et al. Process parameters effect on the edgewise compressive behavior of repaired honeycomb sandwich structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(3):177-183. (in Chinese)
- [25] 杨龙英,程勇. 复合材料蜂窝夹芯楔形结构件修补工艺研究[J]. *纤维复合材料*, 2014, 31(3):6-8.
Yang Longying, Cheng Yong. Honeycom cuniform structure of composite material's remedy study[J]. *Fiber Composites*, 2014, 31(3):6-8. (in Chinese)
- [26] 孙凯,晏冬秀,孔娇月,等. 碳纤维增强复合材料蜂窝夹层结构的热补仪湿铺层修补试验研究[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(S1):255-260.
Sun Kai, Yan Dongxiu, Kong Jiaoyue, et al. The experimental investigation for wet layup repair of CFRP honeycomb structure by hot bonder[J]. *Acta Materiae Materialia Sinica*, 2013, 30(S1):255-260. (in Chinese)
- [27] 罗辑,杨永忠,陈新萍,等. 复合材料蜂窝夹芯结构挖补工艺[J]. *航空制造技术*, 2010(6):100-101.
Luo Ji, Yang Yongzhong, Chen Xinping, et al. Scarf patch process for composites honeycomb sandwich structure[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010(6):100-101. (in Chinese)
- [28] 孔娇月,晏冬秀,孙凯. 复合材料胶结修理工艺过程及其影响因素[J]. *航空制造技术*, 2013(Z2):114-117.
Kong Jiaoyue, Yan Dongxiu, Sun Kai. Bond repair process for composites structure and influencing factor[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013(Z2):114-117. (in Chinese)
- [29] 邹国发,龙国荣,万建平,等. 树脂基复合材料蜂窝夹层结构修补技术研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2005(6):43-45.
Zou Guofa, Long Guorong, Wan Jianping, et al. Study of repairing technology for resin based composite structure with honeycomb sandwich[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2005(6):43-45. (in Chinese)
- [30] Ghazali E, Dano M, Gakwaya A, et al. Mechanical performance of repaired sandwich panels: experimental characterization and finite-element modelling[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2017, 21(4):1357-1378.
- [31] Pierce R S, Falzon B G. Modelling the size and strength benefits of optimised step/scarf joints and repairs in composite structures[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 173:107020.
- [32] Ghazali E, Dano M, Gakwaya A, et al. Experimental and numerical studies of stepped-scarf circular repairs in composite sandwich panels[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, 82:41-49.
- [33] Ghazali E. Mechanical performance of adhesively bonded repairs in honeycomb composite sandwich structures[D]. Quebec: Université Laval, 2017.
- [34] Zhang T, Yan Y, Jin C. Experimental and numerical investigations of honeycomb sandwich composite panels with open hole damage and scarf repair subjected to compressive loads[J]. *The Journal of Adhesion*, 2016, 92(5):380-401.
- [35] Liu S, Guan Z, Guo X, et al. Edgewise compressive performance of repaired composite sandwich panels experiment and finite element analysis[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2013, 32(18):1331-1347.
- [36] Ramantani D A, Campilho R D S G, De Moura M F S F, et

- al. Stress and failure analysis of repaired sandwich composite beams using a cohesive damage model[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2010, 12(3): 369-390.
- [37] 董安琪, 段跃新, 肇研, 等. 湿热环境对PMI泡沫夹芯复合材料性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(2): 46-52.
Dong Anqi, Duan Yuexin, Zhao Yan, et al. Effects of hydrothermal condition on properties of polymethacrylimide (PMI) foam cored sandwich structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(2): 46-52. (in Chinese)
- [38] 肇研, 董昊, 胡建平, 等. 湿热循环对Nomex蜂窝/环氧树脂夹层复合材料性能的影响[J]. *材料工程*, 2012(6): 1-6.
Zhao Yan, Dong Hao, Hu Jianping, et al. Effects of cyclic hydrothermal on properties of nomex honeycomb/epoxy sandwich[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012(6): 1-6. (in Chinese)
- [39] 吴晖, 罗白璐. 舰用玻纤增强夹芯结构的压缩力学行为及破坏机制[J]. *中国水运(下半月)*, 2021, 21(4): 49-51.
Wu Hui, Luo Bailu. Compression mechanical behavior and failure mechanism of glass fiber reinforced sandwich structures for ship[J]. *China Water Transport (Second Half Month)*, 2021, 21(4): 49-51. (in Chinese)
- [40] 张铁纯, 张世秋, 王轩, 等. 平纹编织面板泡沫夹芯结构修补后侧向压缩性能[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(3): 51-59.
Zhang Tiechun, Zhang Shiqiu, Wang Xuan, et al. Research on edgewise compression properties of plain weave panel foam sandwich composite material after repair[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(3): 51-59. (in Chinese)
- [41] 原崇新, 董青海, 何斌. PMI泡沫夹芯碳纤维复合材料的制备及力学表征[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(4): 89-95.
Yuan Chongxin, Dong Qinghai, He Bin. Manufacturing and virtual test model of PMI foam sandwich composite structures [J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(4): 89-95. (in Chinese)
- [42] 张婕, 程小全, 胡仁伟, 等. 挖补复合材料层合板的拉伸和压缩性能研究现状[J]. *高分子材料科学与工程*, 2018, 34(1): 178-183.
Zhang Jie, Cheng Xiaoquan, Hu Renwei, et al. Tensile and compressive properties of scarf repaired composite laminates [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2018, 34(1): 178-183. (in Chinese)
- [43] 程小全, 赵文漪, 高宇剑, 等. 胶黏剂性能对挖补修理层合板拉伸性能的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(9): 1144-1149.
Cheng Xiaoquan, Zhao Wenyi, Gao Yujian, et al. Influence of adhesive properties on tensile behavior of scarf repaired laminates[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(9): 1144-1149. (in Chinese)
- [44] Her S C, Chao M. Adhesively bonded patch repair of composite laminates[J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2011, 25(18): 2569-2585.
- [45] 喻梅, 许希武. 复合材料挖补修理结构的压缩强度分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2008(5): 709-714.
Yu Mei, Xu Xiwu. Study of the compression strength of scarf patch repaired composite structures[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008(5): 709-714. (in Chinese)
- [46] 孟凡颖, 陈绍杰, 董善艳, 等. 复合材料损伤结构胶结补强修补分析及设计[J]. *飞机设计*, 2002(1): 18-21.
Meng Fanhao, Chen Shaojie, Dong Shanyan, et al. The analysis and design of the adhesive bonding repair of the damaged composite components[J]. *Aircraft Design*, 2002(1): 18-21. (in Chinese)
- [47] Katnam K B, Da Silva L F M, Young T M. Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2013, 61: 26-42.
- [48] 熊玉成, 巴德玛, 李长青, 等. 表面处理对复合材料母板与维修补片黏结强度的影响[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(9): 100-104.
Xiong Yucheng, Ba Dema, Li Changqing, et al. Effect of surface treatment on bond strength of the base laminate and repair patches[J]. *Fiber Reinforcement Plastics/Composites*, 2019(9): 100-104. (in Chinese)
- [49] 刘国春, 秦文峰, 杨文锋, 等. 平纹编织复合材料挖补修理附加层优化研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2015, 38(8): 1045-1048.
Liu Guochun, Qin Wenfeng, Yang Wenfeng, et al. Parameters optimization of covering layer of plain-woven composite laminates with flush repair[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 38(8): 1045-1048.

- (in Chinese)
- [50] Airbus. Component maintenance manual-nose radome[Z]. France: Airbus, 2008.
- [51] Boeing. Structural repair manual section 51-71-composite repairs-common date[Z]. The United States of America: Boeing, 2014.
- [52] 李艳,张献逢,李召华. 复合材料阶梯挖补修理中附加铺层的优化设计[J]. 粘接, 2018, 39(9):45-47.
Li Yan, Zhang Xianfeng, Li Zhaohua. Optimization design of covering layer for step-lap repairing of composites[J]. Bonding, 2018, 39(9):45-47.(in Chinese)
- [53] Armstrong K B, Bevan L. G, Cole W F. 先进复合材料的保养和维修[M]. 2版. 北京:航空工业出版社, 2017.
Armstrong K B, Bevan L. G, Cole W F. Maintenance and repair of advanced composites[M]. 2nd Edition. Beijing: Aviation Industry Press, 2017.(in Chinese)
- [54] Breitzman T D, Iarve E V, Cook B M, et al. Optimization of a composite scarf repair patch under tensile loading[J]. Composites Part A, 2009, 40: 1921-1930.
- [55] 赵志彬,谢逸夫,刘志琪,等. 复合材料蜂窝结构渐进损伤评估及挖补修理研究[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(5): 1047-1053.
Zhao Zhibin, Xie Yifu, Liu Zhiqi, et al. Study on progressive damage assessment and scarf repair of composite honeycomb structure[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(5):1047-1053.(in Chinese)
- [56] Xiaoquan C, Baig Y, Renwei H, et al. Study of tensile failure mechanisms in scarf repaired CFRP laminates[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013, 41:177-185.
- [57] Baker A. Development of a hard-patch approach for scarf repair of composite structure[R]. Defense Science and Technology Organization Report TR-1892, Victoria: Air Vehicles Division Defence Science and Technology Organization, 2006.
- [58] Niedernhuber M, Holtmannspoetter J, Ehrlich I. Fiber-oriented repair geometries for composite materials[J]. Composites Part B Engineering, 2016, 94:327-337.
- [59] John S T, Lamia S, John M W, et al. Bonded Repair of Aircraft Composite Sandwich Structures[R]. Office of Aviation Research DOT/FAA/AR-03/74, Virginia: National Technical Information Service (NTIS), 2004.
- [60] 管清宇,李卫平. 湿热环境对 7781/CYCOM 7701 玻璃纤维/环氧复合材料典型力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12):3288-3297.
Guan Qingyu, Li Weiping. Effect of hygro-thermal condition on typical mechanical property of 7781/CYCOM 7701 fiberglass/epoxy composite[J]. Acta Materiae Materialia Sinica, 2018, 35(12):3288-3297.(in Chinese)
- [61] 尹亮,郑国栋,丁常方,等. PMI 泡沫夹芯复合材料湿热老化性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(8):5-9.
Yin Liang, Zheng Guodong, Ding Changfang, et al. Study on hygrothermal ageing of PMI foam cored sandwich composite [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015 (8) : 5-9. (in Chinese)
- [62] 郑国栋,徐晓明,雷娟娟,等. 海水对 PMI 泡沫夹芯复合材料吸湿性能以及力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(9):105-109.
Zheng Guodong, Xu Xiaoming, Lei Juanjuan, et al. Effect of seawater on hygroscopicity and mechanical properties of PMI foam sandwich composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(9):105-109. (in Chinese)
- [63] 刘淑峰,张骞,程小全,等. 湿热环境下碳纤维复合材料斜面胶结件拉伸试验研究[J]. 高科技纤维与应用, 2016, 41(1): 34-39.
Liu Shufeng, Zhang Qian, Cheng Xiaoquan, et al. Tensile performance of adhesively bonded carbon/epoxy composite scarf joints subject to hygrothermal environment[J]. High-tech Fiber & Application, 2016,41(1):34-39. (in Chinese)
- [64] 苏日新,余音. 湿热环境下复材修理压缩解析模型及极限载荷的二分法分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019, 309(10):59-65.
Su Rixin, Yu Yin. Composite material repair compression analysis model and dichotomy analysis of ultimate load in hygrothermal environment[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019, 309(10):59-65.(in Chinese)
- [65] 苏景新,赵文昊,陈栋,等. 复合材料层合板修理结构湿热环境的弯曲性能[J]. 中国民航大学学报, 2020, 38(2):60-64.
Su Jingxin, Zhao Wenhao, Chen Dong, et al. Flexural properties of repaired composite laminate structure under hygrothermal conditions[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2020, 38(2):60-64. (in Chinese)

Research on Lateral Compression Performance of Scarf Repaired Composite Sandwich Structure

Zhang Tiechun¹, Zhang Shiqiu¹, Wang Xuan¹, Zhou Chunping²

1. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

2. Aviation Key Lab of Science and Technology on High Performance Electromagnetic Windows, Research Institute for Special Structure of Aeronautical Composite, Jinan 250023, China

Abstract: This paper summarizes the current research status of the lateral compression performance of the composite sandwich structure for scarf repair, analyzes the influence factors of materials, technology, configuration and environment, and points out the latest repair modeling methods and analysis ideas of mechanical test results, which has important engineering value and provides references for the repair plan design of domestic aircraft composite sandwich structure.

Key Words: composite materials; sandwich structure; scarf repair; lateral compression; repair parameters

Received: 2021-05-26; **Revised:** 2021-06-11; **Accepted:** 2021-07-05

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20181867007)