

Kevlar 布层间及钢板单搭接黏结性能的试验研究^{*}

朱德举^{1†}, 张晓彤², 王润建³, 徐新华⁴

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 国网郑州供电公司, 河南 郑州 450000;
3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 4. 南通东泰新能源设备有限公司, 江苏 启东 226200)

摘要:为了研究 Kevlar 纤维布层间以及纤维布与钢板单搭接的黏结性能, 利用 MTS 微机控制电子万能试验机, 分别对双层 Kevlar 49 纤维布和 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接剪切接头的力学性能进行测试。结果表明, 双层 Kevlar 49 纤维布、Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接剪切接头试样的有效黏结长度分别为 25 mm 和 50 mm。在有效黏结长度范围内, 两种单搭接接头的黏结力均随着黏结长度的增加而增加, 但增加幅度逐渐减小, 当达到有效黏结长度时, 黏结力达到最大值; 黏结应力随着黏结长度的增加逐渐降低。本研究结果为土木工程结构补强所用 Kevlar 纤维布的合理黏结长度提供参考数据。

关键词: Kevlar; 单搭接; 破坏形态; 有效黏结长度

中图分类号: TU501

文献标志码: A

Experimental Study on Bonding Performance of Kevlar Interlayer and Kevlar-steel Single-lap Shear Joints

ZHU Deju^{1†}, ZHANG Xiaotong², WANG Runjian³, XU Xinhua⁴

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. State Grid Zhengzhou Electric Power Supply Company, Zhengzhou 450000, China;
3. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
4. Nantong Dawntine New Energy Equipment Co, Ltd, Qidong 226200, China)

Abstract: In order to investigate the bonding performance of Kevlar fabric layers and that between Kevlar fabric and steel plate, an MTS universal testing machine was used to test the mechanical properties of double-layer Kevlar 49 fabric and Kevlar 49 fabric/steel single-lap shear joints. The results show that the effective bond length of double-layer Kevlar 49 fabric single-lap shear joint specimens is 25 mm, and that of Kevlar 49 fabric/steel single-lap shear joint specimens is 50 mm. Within the effective bond length, bond forces of two types of single-lap shear joints increase with the increasing bond length, while the increasing amplitude decreases. The bond force reaches the maximum when the specimens have the effective bond length. However, the bond stresses reduce with increasing bond lengths. The experimental results obtained in this study will provide valid data for determining reasonable bond length of Kevlar fabric used

^{*} 收稿日期: 2016-06-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0703006), National Key R & D Program of China(2017YFC0703006); 湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(2016GK4016), Major Sci-Tech Research and Technological Achievements Transformation of Strategic Emerging Industry in Hunan Province (2016GK4016); 湖南省重点研发计划项目(2017GK2130), Key R & D Program of Hunan Province (2017GK2130)

作者简介: 朱德举(1978-), 男, 山东济宁人, 湖南大学教授, 博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: dzhu@hnu.edu.cn

for structural reinforcement in civil engineering.

Key words: Kevlar; single-lap joints; failure patterns; effective bond length

由于具有较好的抗冲击、抗剪、抗疲劳和电绝缘性等特点,Kevlar 纤维从少量应用于军工、航天的特殊材料逐渐发展成为在工业和民用领域广泛使用的标准材料^[1-4]. 在 Kevlar 纤维广泛的应用领域中,不可避免地存在纤维与纤维、纤维与其他材料之间的搭接,如用于土木工程领域的结构补强时^[5],需要将 Kevlar 纤维与原房屋结构进行搭接.

所谓“搭接”,是指通过胶黏剂把两种或者同种材料连接在一起,使其能够共同工作,搭接段承担着传递荷载的作用. 与其他传统的连接方式相比,胶接能够以更低的费用、更轻的质量得到相当于或者优于其他连接方式的性能^[6-7]. 由于搭接接头内部存在新的结合界面,损伤形式更加复杂,分层以及界面脱黏等损伤形式会引起结构的失效^[8]. 孔凡荣等^[9]研究发现,黏结长度对搭接接头的剪切强度和应力分布具有重要影响. 因此,通过试验确定双层 Kevlar 49 纤维布、Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接接头的力学性能,以保证结构的荷载能够有效传递以及纤维的性能能够有效发挥具有重要意义.

1 试样的制备与测试

1.1 单搭接接头的定义与适用范围

高性能纤维布在钢结构加固中得到了广泛应用,本文主要研究了 Kevlar 纤维布与钢板之间的黏结性能,为确定 Kevlar 纤维布与钢材的有效黏结长度提供参考数据. 结构加固中通常采用多层纤维布进行加固,其效果主要取决于 Kevlar 纤维布与钢板,纤维布层间的黏结性能. 因此测试纤维布之间的黏结性能同样至关重要. 本试验把纤维布与纤维布或钢板之间相互重叠的部分定义为单搭接接头.

1.2 双层 Kevlar 49 纤维布单搭接剪切接头试样的制备

为了测定双层 Kevlar 49 纤维布层间的剪切力学性能,采用专门用于结构加固补强的 JN-C3P 改性环氧树脂胶黏剂(湖南固特邦土木技术发展有限公司)将两层尺寸相同的 Kevlar 49 纤维布进行黏结,制备出单搭接剪切接头试样. 纤维布与胶黏剂的具体力学性能参数如表 1 所示. 根据文献^[10-11]的研究结果,胶黏层厚度直接影响搭接接头的承载能力. 因此,在制作试样的过程中,如何保证所有试样胶黏层的厚度相同,成为影响试验结果的关键. 为了保证胶黏层的厚度基本相同,涂胶并擦去溢胶后,在压板上加载

150 N 的重物,放置于整个试样上静置 24 h. 用相同的环氧树脂胶在试样两端分别粘贴 25 mm×25 mm×0.3 mm 的铝片,以防止加载过程中夹具对试样造成破坏. 最终试样的示意图如图 1 所示.

表 1 Kevlar 49 纤维布、胶黏剂以及钢板的力学性能
Tab. 1 Mechanical properties of Kevlar fabric, epoxy resin and steel plate

材料	弹性模量 /GPa	伸长率 /%	屈服强度 /MPa	拉伸强度 /GPa
Kevlar 49 纤维布	117	4	—	1 748
环氧树脂胶	6.1	1.8	—	36
钢板	199	35.6	285	441

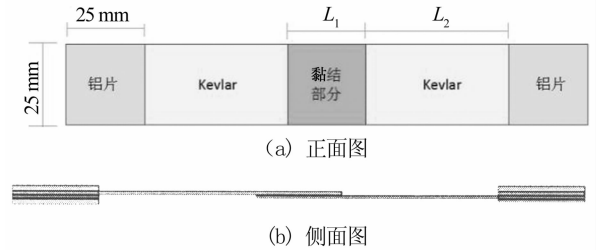


图 1 双层 Kevlar 49 纤维布单搭接剪切试样正面及侧面示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of double-layer Kevlar fabric single-lap shear joint specimens in front and side views

在双层 Kevlar 49 纤维布单搭接剪切接头的力学性能测试试验中,单侧非黏结部分的长度 $L_2 = 45$ mm,黏结部分的长度 L_1 分别取 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 和 30 mm,以研究不同黏结长度对试验结果的影响. 为了测试当试样黏结部分长度 L_1 值相同时,非黏结部分长度 L_2 值对试验结果是否会产生影响,分别测试 $L_1 = 10$ mm, $L_2 = 30$ mm 和 $L_1 = 20$ mm, $L_2 = 60$ mm 时试样的黏结强度. 每组制作 6 个试样进行测试,从而防止偶然误差对试验结果产生影响.

1.3 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接剪切接头试样的制备

在制作 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接剪切接头的试样时,将 25 mm 宽的 Kevlar 49 纤维布用 JN-C3P 改性环氧树脂胶黏剂与尺寸为 80 mm×25 mm×4 mm 的 Q235 钢板进行部分黏结(图 2 中 L_1 区域),钢板的具体参数如表 1 所示. 在 Kevlar 49 试样另一端较长范围内(图 2 中 L_2 区域)黏结相同的钢板,以减小试件拉伸时所产生的偏心,同时保证剪切破坏发生在 L_1 区域.

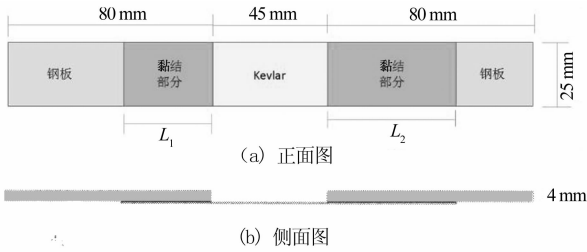


图2 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接剪切试样正面及侧面示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of Kevlar/steel single-lap shear joints specimens in front and side views

由于钢板表面容易沾染灰尘、油脂等杂质,这些杂质在黏结过程中会形成隔离层,影响环氧树脂胶体与钢板材料之间形成有效的化学键,从而降低搭接接头的黏结强度^[12].因此,黏结前有必要对钢板的表面进行处理. Fernando 等^[13]总结了溶剂清洗、手工磨削、喷砂处理等不同表面处理对搭接接头黏结强度的影响.为了达到理想的粘贴效果,在制备 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接试样前,对钢板表面进行精细打磨,去除表面的铁锈和其他杂质;然后用丙酮清洗钢板表面,除去油脂和灰尘.制备试样时,Kevlar 49 纤维布非黏结部分 L_2 长度均为 45 mm.将环氧树脂胶均匀地涂抹在钢板黏结区域表面,然后压在 Kevlar 49 纤维布对应的区域,并用棉棒擦除试样侧面的溢胶.粘贴过程中要反复用钢板来回挤压纤维布,从而使环氧树脂胶体在黏结部分内均匀分布,同时将黏结过程中产生的气泡挤出,以免影响黏结性能^[14].涂胶完毕后,同样用加载 150 N 重物的压板放置于整个试样上,静置 24 h,以保证所有试样胶黏层的厚度相同.

在 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接剪切接头的力学性能试验中,所测试黏结部分的长度 L_1 值分别取为 15 mm、25 mm、35 mm、45 mm、50 mm 和 55 mm,从而研究黏结长度的影响,最终制备试样的具体参数如表 2 所示.黏结长度 L_1 与试样宽度的乘积为试样的黏结面积,黏结力与黏结面积的比值即为黏结应力.相同尺寸下制作并测试 6 个试样.

表 2 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接剪切试样的几何参数
Tab. 2 Geometric parameters of Kevlar/steel single-lap shear joint specimens

序号	L_1 /mm	L_2 /mm	黏结面积 /mm ²
1~6	15	50	375
7~12	25	50	625
13~18	35	50	875
19~24	45	60	1 125
25~30	50	70	1 250
31~36	55	70	1 375

1.4 测试仪器与测试方法

采用 MTS 微机控制电子万能试验机(型号 C43.304,如图 3 所示)对试样进行拉伸测试.



图3 MTS 万能试验机

Fig. 3 MTS universal testing machine

将试样通过带有齿轮状表面的夹具夹持在仪器上,可有效防止测试过程中发生滑移.试验时加载速度设定为 2.5 mm/min,采用 30 kN 荷载传感器,数据采集频率为 20 Hz.试样的变形直接由试验机横梁位移传感器获得,测量结果包括搭接接头的滑移以及纤维布的拉伸变形.由于环氧树脂胶的弹性模量为 6.1 GPa,泊松比约为 0.38,胶体的剪切模量约为 2.2 GPa,因此 Kevlar 49 纤维布的模量(117 GPa)为胶体剪切模量的 53 倍.在荷载作用下,纤维布的变形仅为界面剪切变形(滑移)的 1/53,约占总变形的 1.85%,因此纤维布的变形可以忽略.

2 试验结果与分析

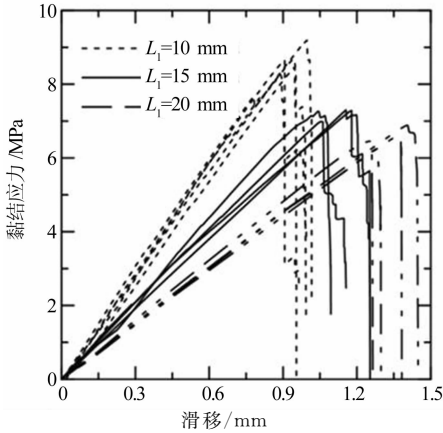
2.1 双层 Kevlar 49 纤维布的单搭接剪切接头

图 4 给出了当 $L_2 = 45$ mm 时,不同 L_1 值下的黏结应力-滑移曲线.曲线的初始阶段为线性,界面黏结状态良好;在达到峰值附近的一段范围内,出现一定的波动,这主要是由于黏结面内产生滑移和剥离;当荷载增加到一定程度后,两层纤维布之间的黏结剥离迅速发展;最后,曲线迅速下降至零,接头失去承载能力,两层纤维布在搭接处发生剥离破坏,或试样发生断裂.图 5 展示了 $L_2 = 45$ mm 时,黏结力和黏结应力随 L_1 值变化的趋势.可以看出,随着 L_1 值的增加,虽然黏结力增加,但增加幅度逐渐减小^[15],对应的黏结应力也逐渐减小.当 L_1 增大到 25 mm 时,黏结力随着黏结长度的增加不再明显增大,25 mm 黏结长度与 30 mm 黏结长度产生的黏结力基本相同,单搭接接头的黏结性能相近.因此,可以

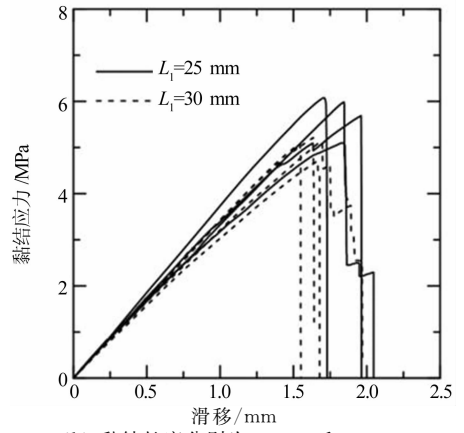
认为,对于 25 mm 宽的试样,双层 Kevlar 49 单搭接接头的有效黏结长度为 25 mm. 将试验结果与文献 [16]中测得的胶体自身的剪切强度相对比,可以看出,双层 Kevlar 49 单搭接接头胶层的剪切强度明显低于胶本身的剪切强度,由后文的破坏形态分析可以看出,

这主要是由于胶体与 Kevlar 49 织布表面的黏结性能弱于胶体的内聚力,在胶体自身发生剪切破坏前,Kevlar 49 纤维布与胶体即发生脱黏破坏.

图 6 为双层 Kevlar 49 单搭接接头的界面断裂能和剪切刚度随黏结长度的变化趋势图.



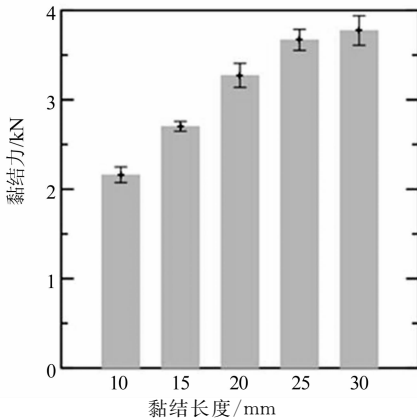
(a) 黏结长度分别为 10 mm、15 mm 和 20 mm



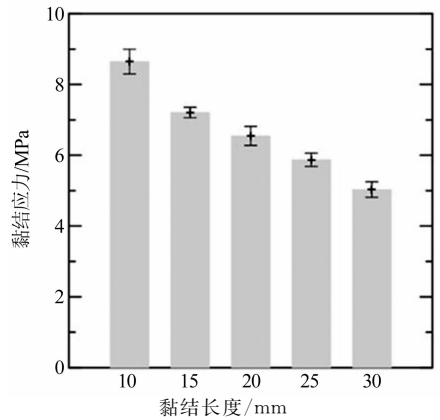
(b) 黏结长度分别为 25 mm 和 30 mm

图 4 不同黏结长度双层 Kevlar 49 单搭接剪切接头试样的黏结应力-滑移曲线

Fig. 4 Bond stress versus slip curves of double-layer Kevlar single-lap shear joint specimens with different overlap lengths



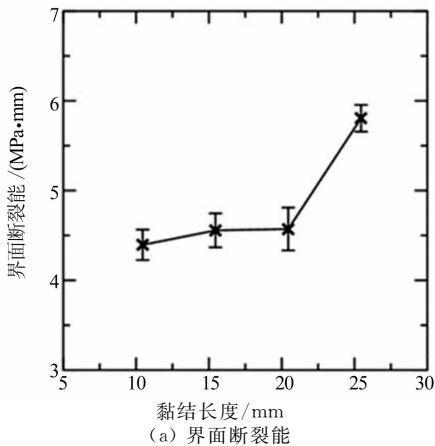
(a) 黏结力-黏结长度关系曲线



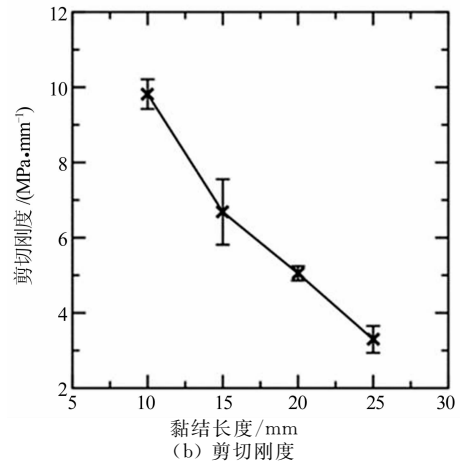
(b) 黏结应力-黏结长度关系曲线

图 5 不同黏结长度双层 Kevlar 49 单搭接剪切接头试样的黏结力和黏结应力变化图

Fig. 5 Bond force and bond stress of double-layer Kevlar single-lap shear joint samples with different overlap lengths



(a) 界面断裂能



(b) 剪切刚度

图 6 双层 Kevlar 49 单搭接接头黏结长度对其力学性能的影响

Fig. 6 The effect of overlap length on the mechanical properties of double-layer Kevlar single-lap shear joint specimens

图6中,界面断裂能为黏结应力-位移曲线下的面积,剪切刚度为曲线弹性阶段的斜率.对于 $L_1 = 30$ mm的试样,破坏形式为Kevlar 49纤维布的断裂破坏,搭接接头相对保持完整,无法得到其界面断裂能和剪切刚度,因此仅对25 mm黏结长度范围内的变化情况进行对比讨论.可以看出,当黏结长度 L_1 由10 mm增加到25 mm时,界面断裂能随着黏结长度的增加而提高,而剪切刚度则随着黏结长度的增加呈下降趋势.具体而言,当 L_1 值由10 mm增加到20 mm时,界面断裂能变化不大;而对于 $L_1 = 25$ mm的试样,界面断裂能较 $L_1 = 10$ mm的试样提高32%,意味着材料具有更高耗能能力.当黏结长度 L_1 分别为10 mm、15 mm、20 mm和25 mm时,剪切刚度分别为9.82 MPa/mm、6.68 MPa/mm、5.05 MPa/mm和3.30 MPa/mm.

图7为双层Kevlar 49单搭接接头试样的破坏形态图.对试样的破坏形态进行分析,可以发现当 L_1 不超过20 mm时,试样的破坏形式为搭接接头的混合破坏^[11],即同时包含胶体与Kevlar 49纤维布表面之间脱黏的界面破坏,以及胶体内部发生断裂的内聚破坏,如图7(a)所示.

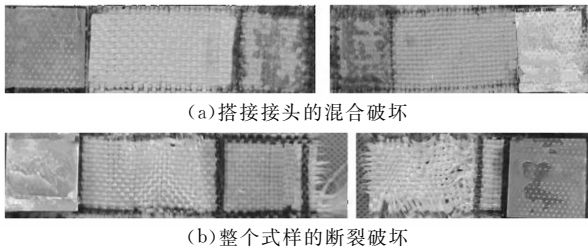
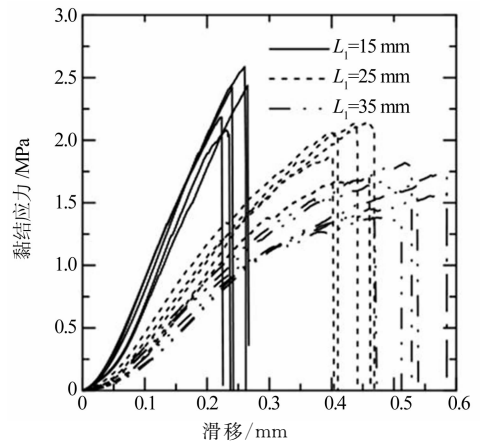


图7 双层Kevlar 49单搭接接头试样的破坏形态
Fig. 7 Failure pattern of double-layer Kevlar single-lap shear joint specimens

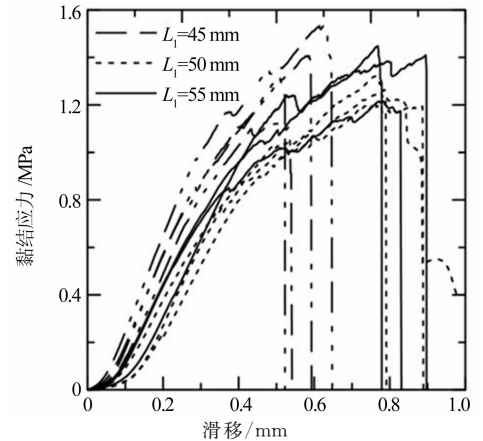
当 $L_1 = 25$ mm时,试样的破坏形式依然是搭接接头的混合破坏,同时部分纤维束发生明显的大变形;纤维束断裂过程消耗了大量能量,从而造成 $L_1 = 25$ mm试样较 $L_1 = 20$ mm试样的界面断裂能出现大幅度提升.当 $L_1 = 30$ mm时,试样由于纤维束被拉断而发生断裂破坏,搭接接头并没有发生明显的剥离现象,如图7(b)所示.由此可以推定,当 L_1 超过30 mm时,试样的承载力取决于纤维布的拉伸强度,黏结区域长度的增加并不会引起试样承载力的增加.

2.2 Kevlar 49纤维布/钢板单搭接剪切接头

图8为不同 L_1 值的Kevlar 49纤维布/钢板单搭接剪切接头的黏结应力-位移曲线.曲线的初始上升阶段为线弹性,但是随着 L_1 的增大,在峰值应力前出现非线性段,并且应力在该阶段随之波动,纤维布/钢板的界面发生局部破坏.在到达峰值后,纤维布与钢板之间的黏结区域发生剥离破坏,应力迅速下降至零.



(a) 黏结长度分别为15 mm、25 mm和35 mm



(b) 黏结长度分别为45 mm、50 mm和55 mm

图8 不同黏结长度Kevlar 49纤维布/钢板单搭接剪切接头试样的黏结应力-位移曲线

Fig. 8 Bond stress versus slip curves of Kevlar/steel single-lap shear joint specimens with different overlap lengths

图9对比了Kevlar 49纤维布/钢板单搭接剪切接头黏结力和黏结应力随 L_1 值的变化情况.可以看出,随着 L_1 值的增加,黏结力呈上升趋势,但对应的黏结应力却逐渐减小.值得一提的是,当 L_1 值由45 mm增加到50 mm时,黏结力上升,而当 L_1 值由50 mm增加到55 mm时,黏结力增加不明显,由此可以推断, $L_1 = 50$ mm为Kevlar 49纤维布/钢板单搭接剪切接头试样的有效黏结长度.

如图10所示,当黏结长度 L_1 由15 mm增加到55 mm时,界面断裂能均呈现上升的趋势;剪切刚度则随着黏结长度 L_1 的增加而降低,且降低幅度逐渐减小.具体而言,当 L_1 值由15 mm增加到55 mm时,界面断裂能则由0.27 MPa·mm上升到0.64 MPa·mm.随着 L_1 由15 mm增加到25 mm,剪切刚度由12.01 MPa/mm骤降54.77%至5.43 MPa/mm;而当 L_1 由35 mm增加到55 mm时,剪切刚度由4.69 MPa/mm降为2.83 MPa/mm,降低幅度明显减小.

试样的破坏形态如图11所示.可以发现,所有Kevlar 49纤维布/钢板单搭接剪切接头的破坏形式

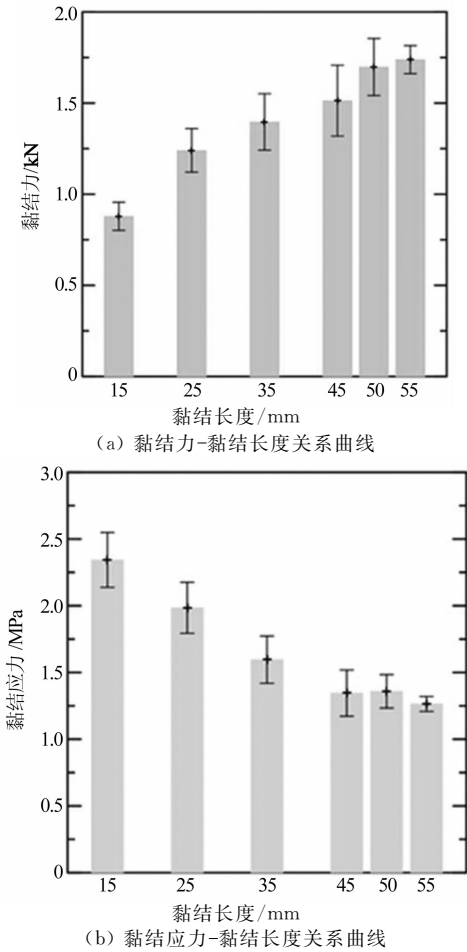


图 9 不同黏结长度 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接剪切接头试样的黏结力和黏结应力变化图

Fig. 9 Bond force and bond stress of Kevlar/steel single-lap shear joint samples with different overlap lengths

均为胶层钢板界面破坏,即胶体基本上全部残留在 Kevlar 49 纤维布上.其原因是,胶黏剂与钢板表面的结合力小于胶黏剂的内聚力.当黏结区域长度 L_1 值不超过 55 mm 时,试样均在黏结长度较短的区域 (L_1) 发生破坏;而当 $L_1=55$ mm 时,部分试样在 L_1 区域发生破坏,还有部分试样在 L_2 区域发生破坏,说明 55 mm 黏结长度已经超过了 Kevlar 49 纤维布与钢板单搭接的有效黏结长度^[17].在有效黏结长度范围内,试样完成了钢板与纤维布之间的应力传递,而

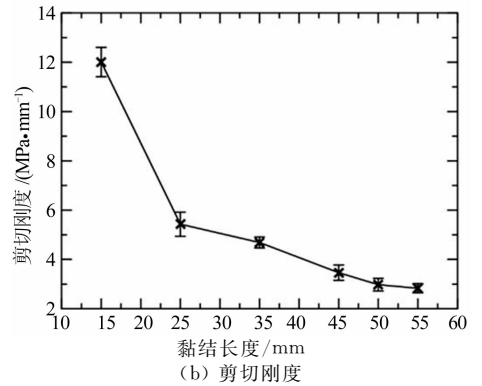
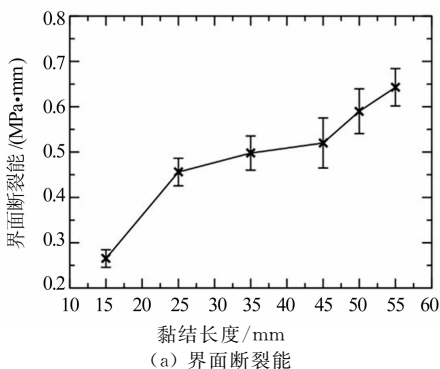
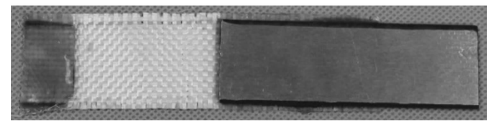


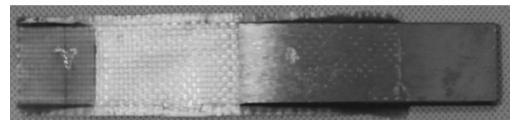
图 10 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接接头的黏结长度对其力学性能的影响

Fig. 10 The effect of overlap length on the mechanical properties of Kevlar/steel single-lap shear joint specimens

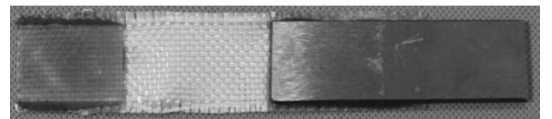
有效黏结长度外的纤维布与钢板之间不存在黏结应力,造成 55 mm 搭接段的黏结力与 70 mm 搭接段的黏结力近似相同,破坏在 L_1 和 L_2 区域随机发生.对破坏形态的分析再一次证明, $L_1=50$ mm 为 25 mm 宽度 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接剪切接头试样的有效黏结长度.



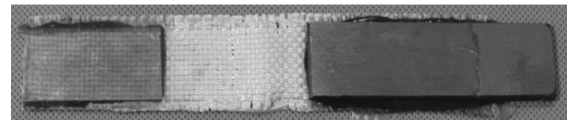
(a) 黏结长度为 15 mm



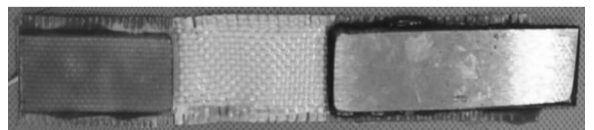
(b) 黏结长度为 25 mm



(c) 黏结长度为 35 mm



(d) 黏结长度为 45 mm



(e) 黏结长度为 50 mm



(f) 黏结长度为 55 mm

图 11 不同黏结长度下 Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接接头试样的破坏形态

Fig. 11 Failure patterns of Kevlar/steel single-lap shear joint specimens with different overlap lengths

3 结论与展望

本文研究了双层 Kevlar 49 纤维布的单搭接剪切接头和 Kevlar 49 纤维布/钢板的单搭接剪切接头的力学性能,并得到以下结论:

1)两种单搭接接头的黏结力均随着黏结长度的增加而增加,但增加幅度逐渐减小,当达到有效黏结长度时,黏结力达到最大值;黏结应力则随着黏结长度的增加逐渐降低。

2)双层 Kevlar 49 纤维布和 Kevlar 49 纤维布/钢板的单搭接剪切接头试样的有效黏结长度分别为 25 mm 和 50 mm。

3)在有效黏结长度范围内,双层 Kevlar 49 纤维布、Kevlar 49 纤维布/钢板单搭接的界面破坏形式分别为混合破坏和胶层-钢板界面破坏。纤维布与胶体的界面往往是最薄弱的部位,在树脂胶充分浸润纤维布的情况下,胶体与纤维仍然发生脱黏破坏,为了增强界面性能,可以采用纤维表面改性^[18]、选取合适的黏结剂等手段。本文只讨论了用于结构加固补强的 JN-C3P 改性环氧胶黏剂,在后续工作中将对对比分析不同黏结剂的影响。

本文采用的试样尺寸较小,无法采用应变片对黏结应力分布进行分析,因而采用不同黏结长度进行一系列测试来获得有效黏结长度。本研究的结果为目前 Kevlar 49 纤维布/钢板、双层纤维布层间界面性能的唯一试验结果,对实际工程有一定的指导意义。在后续研究中,将对碳纤维、玄武岩纤维、玻纤维布与钢板之间的黏结性能进行测试,进而对不同纤维布及编织结构与钢板的黏结破坏行为进行对比分析。此外,还将采用不同的黏结剂,研究胶体黏结性能对试验结果的影响。

参考文献

- [1] 高启源. 高性能芳纶纤维的国内外发展现状[J]. 化纤与纺织技术, 2007, 3(1): 31-36.
GAO Q Y. Current developing situation of high performance aramid fibre at home and abroad[J]. Chemical Fiber and Textile Technology, 2007, 3(1): 31-36. (In Chinese)
- [2] 张诚修, 管宝琼. Kevlar 纤维复合材料在土木工程结构加固中的应用[J]. 合成纤维, 2007, 34(4): 1-5.
ZHANG C X, GUAN B Q. Application of Kevlar composite material in reinforcement of civil engineering[J]. Synthetic Fiber in China, 2007, 34(4): 1-5. (In Chinese)
- [3] 孔海娟, 张蕊, 周建军, 等. 芳纶纤维的研究现状与进展[J]. 中国材料进展, 2013, 32(11): 676-684.
KONG H J, ZHANG R, ZHOU J J, et al. The research status and progress of aramid fibers[J]. Materials China, 2013, 32(11): 676-684. (In Chinese)
- [4] 张蓓. 我国芳纶纤维的发展概况[J]. 精细与专用化学品, 2010, 18(10): 106-109.
ZHANG B. Review of the development on aramid fiber in China[J].

- Fine and Specialty Chemicals, 2010, 18(10): 106-109. (In Chinese)
- [5] 李新新, 张慧萍, 晏雄. 芳纶纤维生产及应用状况[J]. 天津纺织科技, 2009, 187(1): 4-6.
LI X X, ZHANG H P, YAN X. Production and application of aramid fiber[J]. Tianjin Textile Science & Technology, 2009, 187(1): 4-6. (In Chinese)
- [6] 李龙, 胡平, 刘立忠. 不同胶层厚度单搭接接头剪切试验与强度预测[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 17-21.
LI L, HU P, LIU L Z. Strength of adhesively bonded single lap for differential bondline thickness and tension loading prediction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 17-21. (In Chinese)
- [7] 杨娜, 林升, 苏超. 厚板焊接接头残余应力和损伤分布的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(11): 24-31.
YANG N, LIN S, SU C. Research on residual stress field and damage distribution for thick plate welded joints[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(11): 24-31. (In Chinese)
- [8] 朱程燕, 熊克, 卞侃, 等. 碳纤维复合材料 T 型接头的脱黏损伤监测实验[J]. 复合材料学报, 2012, 29(6): 237-242.
ZHU C Y, XIONG K, BIAN K, et al. Experiment on disbond detection on CFRP T-joint[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(6): 237-242. (In Chinese)
- [9] 孔凡荣, 游敏, 郑小玲, 等. 搭接长度对接接头工作应力分布影响的数值分析[J]. 机械强度, 2004, 2(1): 213-217.
KONG F R, YOU M, ZHEGN X L, et al. Numerical analysis of the effect of lap length on the stress distribution of adhesively bonded joints[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 2(1): 213-217. (In Chinese)
- [10] NAIK D, SANKARAN S, MOBASHER B, et al. Development of reliable modeling methodologies for fan blade out containment analysis-Part I: experimental studies[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 1-11.
- [11] DA S L, RODRIGUES T, FIGUEIREDO M, et al. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength[J]. The Journal of Adhesion, 2006, 82(11): 1091-1115.
- [12] 江乐彬, 谢惠民, 王怀喜, 等. 单搭接胶接接头拉伸剪切性能的数值模拟与实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(6): 643-649.
WANG L B, XIE H M, WANG H X, et al. Numerical simulation and experimental study of tensile shear performance of adhesively bonded single-lap joint[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(6): 643-649. (In Chinese)
- [13] FERNANDO D, TENG J G, YU T, et al. Preparation and characterization of steel surfaces for adhesive bonding[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(6): 04013012.
- [14] 周申光. 振动载荷下单搭接接头的疲劳特性研究[D]. 大连: 大连理工大学汽车工程学院, 2014: 13-14.
ZHOU S G. Research on fatigue behavior of single-lap joint under vibration loads[D]. Dalian: School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, 2014: 13-14. (In Chinese)
- [15] 杨银环, 周振功, 郭颖, 等. 缺陷对单搭接胶接接头力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2012, 29(5): 157-163.
YANG Y H, ZHOU Z G, GUO Y, et al. Effect of defects in the adhesive layer on strength of adhesively bonded single-lap composites joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(5): 157-163. (In Chinese)
- [16] 彭勃, 余益斌, 单远铭, 等. 加固用环氧树脂胶耐热性能研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(12): 108-111.
PENG B, XU Y B, SHAN Y M, et al. Study on the heat resistance performance of structural epoxy adhesive [J]. Building Structure, 2012, 42(12): 108-111. (In Chinese)
- [17] 梁祖典, 燕璞, 张涛涛, 等. 复合材料单搭接胶接接头试验研究与数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(12): 1786-1792.
LIANG Z D, YAN Y, ZHANG T T, et al. Experimental investigation and numerical simulation of composite laminate adhesively bonded single-lap joints[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(12): 1786-1792. (In Chinese)
- [18] 李伟, 黄虹云, 吴永庆. VARTM 制备麻纤维增强环氧树脂复合材料研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(12): 15-20.
LI W, HUANG H Y, WU Y Q. Preparation of Jute fibers reinforced epoxy resin composites by VARTM[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(12): 15-20. (In Chinese)