

# 用于直升机蒙皮修复的 EA9396 和 HT6119 胶粘剂的环境适应性研究

杨宗谕<sup>1</sup>, 李月伟<sup>2</sup>, 邓庆祝<sup>2</sup>, 申坤<sup>2</sup>, 孟宪立<sup>2</sup>, 陈昕悦<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016; 2. 成都国营锦江机器厂, 成都 610500)

**摘要:** **目的** 通过测试不同胶粘剂在不同温度及不同环境介质中的粘结强度, 研究胶粘剂的环境适应性, 为直升机复合材料胶接维修提供工艺参考和数据支撑。**方法** 选取 HYSOL EA9396 (美国汉高) 和 HUITIAN HT6119 (中国回天) 2 种胶粘剂, 测试其黏度、适用期、挥发性、玻璃化转变温度、拉伸强度、弯曲强度和压缩强度等基本性能, 并使用金属-金属胶接方式, 在不同温度下和不同环境介质 (普通大气、水、航空液压油、RP-3 煤油、盐雾和湿热) 中, 测试其拉伸剪切性能。**结果** 随温度升高, 2 种胶粘剂的拉伸剪切性能均发生下降。在 121 °C 前, HT6119 胶粘剂的拉伸剪切性能优于 EA9396 胶粘剂; 121 °C (含) 至 149 °C 间 EA9396 胶粘剂拉伸剪切性能优于 HT6119 胶粘剂; 当温度上升至 177 °C 时, 两者的性能相当。2 种胶粘剂在不同环境介质均有较好的胶接性能, HT6119 胶粘剂除了在航空液压油和盐雾条件下的拉伸剪切性能略低于 EA9396 胶粘剂外, 其他环境条件下都优于 EA9396 胶粘剂。**结论** EA9396 和 HT6119 胶粘剂的拉伸剪切性能均随温度升高而下降, EA9396 在中低温下的胶粘性能较好, HT6119 在高温条件下胶粘性能较好。2 种胶粘剂在典型环境介质中的胶粘性能均无大幅下降 (相较普通大气环境), 但 2 种胶粘剂在不同介质中的拉伸剪切性能有区别。在进行胶粘剂选择时, 可根据具体的使用环境进行合理选择。

**关键词:** 胶粘剂; 环境适应性; 拉伸剪切性能; EA9396; HT6119; 胶粘理论

中图分类号: V250

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)05-0064-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.05.010

## Environmental Adaptability of Adhesive EA9396 and HT6119 Used in Helicopter Skin Repair

YANG Zong-yu<sup>1</sup>, LI Yue-wei<sup>2</sup>, DENG Qing-zhu<sup>2</sup>, SHEN Kun<sup>2</sup>, MENG Xian-li<sup>2</sup>, CHEN Xin-yue<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Chengdu State-owned Jinjiang Machinery Factory, Chengdu 610500, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the environmental adaptability of adhesives by testing the bond strength of different adhesives at different temperature and in different media, to provide process reference and data support for the adhesive maintenance of helicopter composite materials. Two kinds of adhesives were selected: HYSOL EA9396 (Henkel, USA) and HUITIAN HT6119 (Huitian, China). The basic properties of both adhesives such as viscosity, service life, volatility, glass transition tem-

收稿日期: 2023-03-24; 修订日期: 2023-05-04

Received: 2023-03-24; Revised: 2023-05-04

作者简介: 杨宗谕 (1986—), 男。

**Biography:** YANG Zong-yu (1986-), Male.

引文格式: 杨宗谕, 李月伟, 邓庆祝, 等. 用于直升机蒙皮修复的 EA9396 和 HT6119 胶粘剂的环境适应性研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 064-069.

YANG Zong-yu, LI Yue-wei, DENG Qing-zhu, et al. Environmental Adaptability of Adhesive EA9396 and HT6119 Used in Helicopter Skin Repair[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 064-069.

perature, tensile strength, bending strength and compression strength were tested. Then, the tensile shear properties were tested at different temperature and in different media (ordinary atmosphere, water, aviation hydraulic oil, RP-3 kerosene, salt spray and humid heat) by metal-metal bonding. The tensile shear properties of both adhesives decreased with the temperature increasing. When the temperature was lower than 121 °C, the tensile shear properties of HT6119 adhesives were better than those of EA9396 adhesives. When the temperature was between 121 °C (inclusive) and 149 °C, the tensile shear properties of EA9396 adhesives were better than those of HT6119 adhesives. When the temperature rose to 177 °C, the properties of both adhesives were similar. Both adhesives had good bonding properties in different media. The tensile shear properties of HT6119 adhesives were slightly lower than those of EA9396 adhesives under the conditions of aviation hydraulic oil and salt spray, but better than those of EA9396 adhesives under other environmental conditions. The tensile shear properties of EA9396 and HT6119 adhesives decrease with the increasing temperature. The adhesive properties of EA9396 are better at medium and low temperature, and the adhesive properties of HT6119 are better at high temperature. The adhesive properties of the two kinds of adhesives do not decrease significantly in typical environmental media (compared with ordinary atmospheric environment), but the tensile shear properties of the two kinds of adhesives in different media are different. Therefore, the adhesives can be selected reasonably according to the specific service environment.

**KEY WORDS:** adhesives; environmental adaptability; tensile shear properties; EA9396; HT6119; adsorption theory

直升机的尾传动轴通过轴承支座安装固定在尾梁上(如图 1a 所示), 直升机工作时, 尾传动轴产生周期性运动, 周期性的力通过轴承支座作用在尾梁上, 从而导致该处尾梁蒙皮与蜂窝出现分层脱粘故障, 通常使用胶接方法进行修理(见图 1b 和 c)。相比较焊接和铆钉连接等结合方式, 胶接工艺具有应用材料广、化学稳定性好、绝缘和轻量化等优点, 因此广泛应用于汽车<sup>[1]</sup>、金属结构损伤修复<sup>[2-4]</sup>、铝合金裂纹修复<sup>[5]</sup>等方面。不同种类的胶粘剂性能存在较大差异, 判断胶粘剂性能优劣的关键参数为拉伸剪切性能<sup>[6-9]</sup>, 而胶粘剂的拉伸剪切性能会在使用中发生衰退。

张学敏等<sup>[10]</sup>总结了温度、湿度和湿热效应对胶粘剂的粘接性能影响, 环境因素对胶粘剂性能有明显影

响。秦国锋等<sup>[11]</sup>研究了胶粘剂在-40 °C 下的老化机理, 发现低温老化对胶粘剂力学性能的影响不大。胡恩来等<sup>[12]</sup>通过老化实验分析了 100、80、60 °C 下胶粘剂的退化现象, 结果表明, 温度越高, 性能退化越明显, 并且通过性能退化曲线评估了胶粘剂常温下的贮存寿命。刘泊天等<sup>[13]</sup>研究了高低温循环对 MD-140 导电胶粘剂性能的影响, 结果表明, 经过循环试验后, 胶粘剂的力学性能变强, 导电性能下降。王观军等<sup>[14]</sup>制备了一种水下可固化的胶粘剂, 并研究了其在不同温度浸泡下的性能演化规律及机理, 并预测了其拉伸性能和使用寿命。赵洋等<sup>[15]</sup>对比分析了在热空气、煤油和滑油这 3 种不同介质中, CH205 和 CH220 单涂和双涂对试样拉伸剪切强度的影响, 结果表明, 单涂 CH205 优于双涂。由于直升机会在不同的温度下运输、贮存、飞行, 并且还会接触到各种的环境介质, 对胶粘剂性能在不同环境下的性能提出较高的要求, 但目前的研究中获得的拉伸剪切性能大多是在常规大气环境及室温条件下获得的, 因此无法作为参考。

本文对比分析了美国汉高 EA9396 和中国回天 HT6119 环氧树脂胶粘剂在不同温度和不同环境介质中的拉伸剪切性能, 并对包括黏度、适用期、挥发性和玻璃化转变温度( $t_g$ )等物理性能及拉伸强度、拉伸模量、弯曲强度、弯曲模量、压缩强度和压缩模量等力学性能进行了测试。本研究可以为直升机蒙皮修复提供重要参考。

## 1 试验

### 1.1 试验原料

试验中使用 HYSOL EA9396 (美国汉高) 和 HUITIAN HT6119 (中国回天) 2 种胶粘剂作为研究



图 1 尾梁结构及修理前后脱粘部位内蒙皮和蜂窝  
Fig.1 Tail beam structure (a) and inner skin and honeycomb of the deboned area (b) before and after repair (c)

对象。EA9396 胶粘剂是一种室温固化、双组分改性环氧树脂胶粘剂，基胶为深蓝色的黏稠液体，固化剂为黄褐色的液体。该胶粘剂中基胶与固化剂的质量比为 100 : 30，室温下活化期为 60 min。HT6119 胶粘剂是一种双组分室温固化环氧树脂胶粘剂，其颜色为浅黄色，该胶粘剂中基胶与固化剂的质量比为 100 : 40，室温下活化期为 80 min。

## 1.2 试样制备

根据 GB/T 7124—2008《胶粘剂拉伸剪切强度的测定（刚性材料对刚性材料）》制作金属试片。本文主要为了对比 EA9396 和 HT6119 胶粘剂在不同温度和环境下的拉伸剪切强度，并对比其他性能，试片将选取常用的材料进行制作，根据以往经验，决定选取 2024-T3 铝板作为金属试片的制作材料。

本次将制作 20 个试片，2 个为 1 组，10 组试片用于胶粘剂拉伸剪切强度试验，其中 5 组用于不同温度下金属与金属胶接，另外 5 组用于不同环境条件下金属与金属胶接。

根据 GB/T 7124—2008《胶粘剂拉伸剪切强度的测定（刚性材料对刚性材料）》要求，采用剪板机制作 20 件 100 mm×25 mm、 $\delta=1.6$  mm 的金属试片，在 12.5 mm 处做好胶接面标记，并在非胶接处做好试片标记，如图 2 所示。

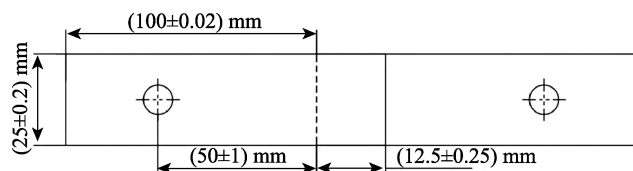


图 2 胶粘剂拉伸剪切强度测试试样尺寸  
Fig.2 Dimension of the specimen for the tensile shear strength of adhesive

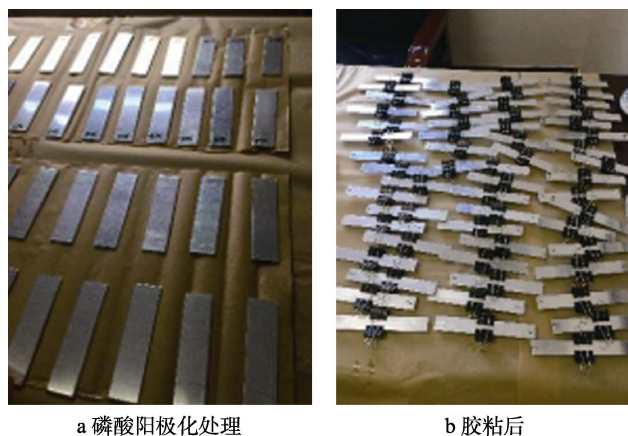
试片在胶接前进行磷酸阳极化处理（如图 3a 所示）。然后按工艺要求配制胶粘剂，将配制好的胶液均匀涂抹在胶接面上，在 25 °C 下静置固化 5 d（如图 3b 所示）。

## 1.3 环境适应性试验

为了研究胶粘剂的环境适应性，分别在不同温度 and 不同环境介质中测试了胶粘剂的拉伸剪切性能。在 25、82、121、149、177 °C 温度下分别测试其拉伸剪切性能。使试片在湿热条件下（温度为 70 °C，相对湿度为 85%）放置 1 000 h，中性盐雾条件下（室温）放置 1 000 h，在流速为 5 mm/min 的 RP-3 煤油、航空液压油、水中浸泡 30 d 后进行拉伸剪切测试，并在空气中放置 30 d 样品作为空白对照。

## 1.4 测试标准及试验仪器

按照 GB/T 2794—2013，使用单圆筒旋转黏度计



a 磷酸阳极化处理

b 胶粘后

图 3 铝合金试样

Fig.3 Aluminum alloy specimens: a) phosphoric acid anodized; b) adhesive specimens

法进行胶粘剂黏度的测定；按照 ASTM D1002—2010，进行单搭接胶着结合的金属试样剪切试验；按照 GJB 444—1988，进行金属对金属的胶粘剂高温拉伸剪切强度试验；按照 ASTM D3167，进行胶粘剂浮辊剥离试验；按照 GB/T 1040-2018，进行塑料拉伸试验；按照 GB/T 9341—2008，进行塑料弯曲试验；按照 ASTM D695—2015，进行硬质塑料压缩试验；按照 GB/T 2793—1995，进行胶粘剂不挥发物含量测定试验；按照 GB/T 22567—2008，测定电气绝缘材料玻璃化转变温度。使用的主要试验仪器：DHG-9145A 电热鼓风干燥箱（上海一恒科学仪器有限公司）、3367 高低温拉力试验机（美国英斯特朗）、3369 拉力试验机（美国英斯特朗）、SETH-Z-048UF 高温高湿试验机[爱斯佩克环境仪器（上海）有限公司]、DVNest 旋转黏度计（美国博力飞）、TMA Q400 热机械分析仪（美国 TA 仪器）、ZYMC-350VS 非介入式匀质机（深圳中毅科技）。

## 2 结果及分析

### 2.1 物理性能

EA9396 和 HT6119 胶粘剂的主要物理性能数据见表 1。黏度对胶粘剂性能有影响，黏度越大，其附着力越强，EA9396 的黏度高于 HT6119。EA9396 的适用期短于 HT6119，说明后者拥有更长的施工时间。EA9396 和 HT6119 均无明显的挥发性，前者挥发性略大。EA9396 的玻璃化转变温度 ( $t_g$ ) 低于 HT6119，由于  $t_g$  决定了胶粘剂使用温度的上限，因为超过该温

表 1 EA9396 和 HT6119 胶粘剂物理性能

Tab.1 Physical properties of EA9396 and HT6119 adhesives

材料	黏度/(Pa·s)	适用期/min	挥发性/%	$t_g$ /°C
EA9396	7.382	65	0.112	77.6
HT6119	5.140	70	0.093	94.3



度, 胶粘剂状态会发生明显变化, 导致强度降低, 因此可以预测 HT6119 耐高温性能应该更优。

## 2.2 基本力学性能

EA9396 和 HT6119 胶粘剂的基本力学性能见表

表 2 EA9396 和 HT6119 胶粘剂其他力学性能  
Tab.2 Other mechanical properties of EA9396 and HT6119 adhesives

材料	拉伸强度 (拉伸模量) /MPa	弯曲强度 (弯曲模量) /MPa	压缩强度/ (压缩模量) /MPa	浮辊剥 离/(kN·m <sup>-1</sup> )	断裂伸长率/%
EA9396	52.0(2 640)	104.7(2 504)	68.0(1 553)	2.9	2.6
HT6119	56.6(2 320)	113.7(2 767)	59.8(1 442)	3.7	4.9

## 2.3 不同温度下拉伸剪切性能

EA9396 和 HT6119 胶粘剂在不同温度下金属对金属的拉伸剪切强度如图 4 所示。可以看到, 在室温下, EA9396 的拉伸剪切强度高于 HT6119。随着温度的升高, 2 种胶粘剂拉伸剪切强度均发生下降, 在 121、149 °C 时, HT6119 的拉伸剪切强度反而高于 EA9396, 在 179 °C 时, 两者的拉伸剪切强度相当。金属与金属胶接归因于其中的胶接作用力, 主要的几个理论包括: 机械嵌锁理论<sup>[16]</sup>、吸附理论<sup>[17]</sup>、化学键理论<sup>[18]</sup>。根据理论可以分别解释为: 被粘材料表面的不规则性(凹陷、缝隙)有利于胶粘剂流动填入, 置换出凹陷、缝隙内的空气, 固化后产生啮合连接, 形成机械嵌锁作用; 胶粘剂与被粘物金属之间产生物理吸附或化学吸附, 产生附着力<sup>[19]</sup>; 胶粘剂与被粘物之间间距极近, 产生分子间作用力或者形成共价键。然而只有 2 个活性中心的电子云密度变得充分大, 距离较近, 且达到必要的量化条件才能产生化学键, 因此胶粘剂与被粘物形成化学键较难。在本研究中, 胶粘剂主要通过机械嵌锁作用和吸附作用产生胶接。影响胶粘剂拉伸剪切性能的因素有温度、湿度、基体表面粗糙度、胶粘剂黏度和表面润湿程度<sup>[20-22]</sup>等。随着温度的升高, 当温度超过  $t_g$  时, 胶粘剂就会变成高弹

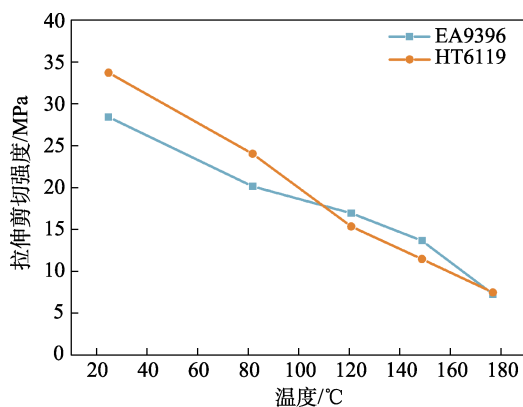


图 4 不同温度下金属对金属拉伸剪切强度  
Fig.4 Metal-to-metal tensile shear strength at different temperature

2. 通过对比 EA9396 和 HT6119 胶粘剂的拉伸强度/拉伸模量、弯曲强度/弯曲模量和压缩强度/压缩模量, 差距并不明显。EA9396 和 HT6119 的浮辊剥离分别为 2.9、3.7 kN/m, 要根据材料的使用适应性进行判断。EA9396 的断裂伸长率小于 HT6119。

态, 其强度就会降低<sup>[23]</sup>。此外, 随温度升高, 胶粘剂内会发生氧化分解, 造成化学键的断裂等, 导致其拉伸剪切性能下降<sup>[24]</sup>。然而有研究表明, 温度不超过  $t_g$  时, 随温度升高, 基团发生氧化交联可以增强胶粘剂的粘结性能<sup>[25]</sup>, 但该现象并没有在本研究中出现。

## 2.4 不同环境介质中拉伸剪切性能

EA9396 和 HT6119 胶粘剂在不同环境介质中单搭接胶着结合的金属试样的剪切强度如图 5 所示。可以看到, HT6119 在水、航空液压煤油、盐雾和湿热环境中放置后, 拉伸剪切强度有明显下降, 而 EA9396 的剪切强度仅在湿热环境下有所下降, 在其他环境中无明显下降。考虑到两者的下降幅度均不大, 说明 2 种胶粘剂均能够在不同的环境中适用, 并且耐湿热老化能力都较强。胶接结构界面破坏存在 3 种破坏模式, 分别为界面破坏、内聚破坏和混合破坏。内聚破坏<sup>[26]</sup>包括胶粘剂自身破坏和被粘物自身破坏, 内聚破坏是胶粘剂界面粘接强度良好的表现; 界面破坏<sup>[27]</sup>是胶粘剂与被粘物在粘接界面产生的破坏; 混合破坏<sup>[28]</sup>指既有内聚破坏, 又有界面破坏。本次所做拉伸剪切破坏试验结果显示均为界面破坏(如图 6 所示)。胶粘剂不溶解在水和油等溶剂中, 可能存在润湿和

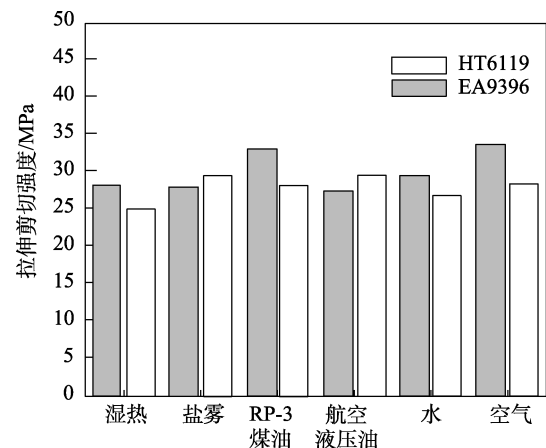


图 5 不同环境下单搭接胶着结合的金属试样剪切强度  
Fig.5 Shear strength of metal specimens with single-lap adhesive bond in different environments



图6 经过拉伸剪切测试后的样品  
Fig.6 Specimens after tensile shear tests

膨胀<sup>[29]</sup>的作用, 导致其产生界面破坏, 从而黏性失效。此外, 各种溶剂以及湿热环境中的湿度对其中粘接结构产生了影响<sup>[30]</sup>, 导致强度下降。

### 3 结论

本文着重对比研究了 EA9396 和 HT6119 胶粘剂的环境适应性, 在不同温度和不同环境介质中测试其拉伸剪切性能, 获得了如下结论:

1) EA9396 在室温和常规大气环境下拉伸剪切性能优于 HT6119, 但 2 种胶粘剂的拉伸剪切性能均随温度的升高而下降。当温度超过 121 °C (含) 时, HT6119 的拉伸剪切性能反而优于 EA9396。

2) EA9396 和 HT6119 胶粘剂在不同环境条件下的拉伸剪切强度存在差异, HT6119 在空气、水、RP-3 煤油和湿热环境的适应性优于 EA9396 胶粘剂, 而在盐雾、航空液压油中, EA9396 的环境适应性优于 HT6119。

#### 参考文献:

- [1] 李伟红, 韩胜利, 彭仁贵. 低密度环保汽车减振胶的研制[J]. 粘接, 2016, 37(6): 46-49.  
LI Wei-hong, HAN Sheng-li, PENG Ren-gui. Development of Environment Friendly Damping Adhesive with Lower Density for Automobiles[J]. Adhesion, 2016, 37(6): 46-49.
- [2] 何磊, 赵满. 美国海军复合材料修复技术[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(7): 149-153.  
HE Lei, ZHAO Man. Repair Technology of Composite Materials in U.S. Navy[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(7): 149-153.
- [3] 孙运刚, 贺旺, 许光群. 复合材料加筋结构损伤修复用胶粘剂的选型及验证[J]. 化工新型材料, 2020, 48(9): 159-163.  
SUN Yun-gang, HE Wang, XU Guang-qun. Test and Selection of Adhesive for Reinforced Structural Repair of Composite Stiffened Panel[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(9): 159-163.
- [4] 唐婷, 何栋. 金属损伤结构的复合材料修补技术研究[J]. 中国胶粘剂, 2021, 30(2): 70-74.  
TANG Ting, HE Dong. Research on Composite Material Repair Technology for Damaged Metal Structure[J]. China Adhesives, 2021, 30(2): 70-74.
- [5] 钱海峰, 马世宁, 孙晓峰, 等. 复合材料快速修复含裂纹铝合金板的力学性能研究[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(11): 28-31.  
QIAN Hai-feng, MA Shi-ning, SUN Xiao-feng, et al. Study on Mechanical Properties of Aluminum Alloy Plate with Cracks Repaired Quickly by Composite Materials[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2009, 30(11): 28-31.
- [6] 付建农, 陈海玲, 杨雪艳, 等. 胶粘剂拉伸剪切强度测量结果的不确定度评定[J]. 化学分析计量, 2010, 19(4): 17-18.  
FU Jian-nong, CHEN Hai-ling, YANG Xue-yan, et al. Evaluation of Uncertainty in Measurement of Tensile lap-Shear Strength of Adhesives[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2010, 19(4): 17-18.
- [7] 肖瑞钦, 庞志亮. 如何克服搭接翘曲对胶粘剂拉伸剪切强度测定结果的影响[J]. 广东建材, 2011, 27(7): 40-42.  
XIAO Rui-qin, PANG Zhi-liang. How to Overcome the Influence of Lap Warping on the Determination of Tensile Shear Strength of Adhesive[J]. Guangdong Building Materials, 2011, 27(7): 40-42.
- [8] 毛庆凯, 姚山, 杨通, 等. 从摩擦学角度分析表面粗糙度对金属/胶粘剂界面拉伸剪切强度的影响[J]. 机械工程材料, 2014, 38(6): 79-84.  
MAO Qing-kai, YAO Shan, YANG Tong, et al. Analysis of Surface Roughness Impact on Tensile Shear Strength of Metal /Adhesive Interface from the Viewpoint of Tribology[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(6): 79-84.
- [9] 杨帆, 杨雪, 晁峰涛. 浅谈影响胶粘剂/防腐涂料拉伸剪切强度测定结果的因素[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(11): 78-80.  
YANG Fan, YANG Xue, CHAO Feng-tao. A Superficial Analysis on the Influence Factors of Test Result of Tensile-Shear Strength of Adhesion and Coating[J]. Total Corrosion Control, 2017, 31(11): 78-80.
- [10] 张学敏, 邓勇, 杨树梅, 等. 环境因素对胶粘剂粘接性能的影响[J]. 山东化工, 2019, 48(3): 12-13.  
ZHANG Xue-min, DENG Yong, YANG Shu-mei, et al. Influence of Environmental Factors on Properties of Adhesives[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(3): 12-13.
- [11] 秦国锋, 那景新, 慕文龙, 等. CFRP/铝合金粘接接头在低温环境中的老化机理研究[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28(8): 27-33.  
QIN Guo-feng, NA Jing-xin, MU Wen-long, et al. Research on Aging Mechanism of CFRP/Aluminum Alloy Bonded Joints in Low Temperature Environment[J]. China Adhesives, 2019, 28(8): 27-33.

- [12] 胡恩来, 陈津虎, 胡绍华, 等. 某型胶粘剂加速贮存试验及寿命评估[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 147-150.  
HU En-lai, CHEN Jin-hu, HU Shao-hua, et al. Storage Accelerated Aging Test and Life Assessment of an Adhesive[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 147-150.
- [13] 刘泊天, 张静静, 高鸿, 等. MD-140 导电胶粘剂性能测试及分析[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(4): 404-407.  
LIU Bo-tian, ZHANG Jing-jing, GAO Hong, et al. The Test and Analysis of Properties of MD-140 Conductive Adhesive[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(4): 404-407.
- [14] 王观军, 韩庆, 谭晓林, 等. 水下可固化环氧胶粘剂湿热耐久性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2023, 32(3): 28-36.  
WANG Guan-jun, HAN Qing, TAN Xiao-lin, et al. Study on Hygrothermal Durability of Underwater Curable Epoxy Adhesive[J]. China Adhesives, 2023, 32(3): 28-36.
- [15] 赵洋, 王巧玲, 田利华, 等. 不同介质对 CH205 和 CH205/CH220 胶粘剂粘接效果的影响[J]. 特种橡胶制品, 2022, 43(5): 23-25.  
ZHAO Yang, WANG Qiao-ling, TIAN Li-hua, et al. Effect of Different Media on Bonding Effect of CH205 and CH205/CH220 Adhesives[J]. Special Purpose Rubber Products, 2022, 43(5): 23-25.
- [16] 张雪琴, 江帆, 张琼. 马拉松场地器械用纤维复合材料胶接接头的性能研究[J]. 化学与粘合, 2023, 45(1): 62-65.  
ZHANG Xue-qin, JIANG Fan, ZHANG Qiong. Study on the Properties of Fiber Composite Bonded Joints for Marathon Field Equipment[J]. Chemistry and Adhesion, 2023, 45(1): 62-65.
- [17] 顾继友. 胶接理论与胶接基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
GU Ji-you. Bonding Theory and Bonding Foundation[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [18] 张吉武. 基于 SCARF 胶接维修的基础理论和验证研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2015.  
ZHANG Ji-wu. Research on Basic Theories and Verifications Based on the SCARF Bonding Repair[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2015.
- [19] 汤朋, 刘兰轩, 曹东萍, 等. 有机涂层附着机理及附着力提高方法综述[J]. 材料保护, 2020, 53(2): 126-135.  
TANG Peng, LIU Lan-xuan, CAO Dong-ping, et al. Review on Adhesion Mechanism and Adhesion Enhancement of Organic Coatings[J]. Materials Protection, 2020, 53(2): 126-135.
- [20] 张璞, 许立宁, 路民旭. 金属表面预处理对环氧树脂粘结剂粘结强度的影响[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(8): 1662-1665.  
ZHANG Pu, XU Li-ning, LU Min-xu. Effects of Metal Pretreatment on the Bonding Strength of Epoxy Resin Adhesive[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(8): 1662-1665.
- [21] 韩树强, 刘泽年, 刘军, 等. 不同表面处理方法对环氧胶粘涂层剪切强度影响[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2009, 29(3): 55-57.  
HAN Shu-qiang, LIU Ze-nian, LIU Jun, et al. Influence of Different Surface Treatment Methods on the Shear Bond Strength of Epoxy Adhesive Coating[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2009, 29(3): 55-57.
- [22] 余帆, 饶南荃, 吕长海, 等. 储存温度与使用温度对粘接剂及复合树脂性能影响的研究进展[J]. 口腔疾病防治, 2022, 30(8): 604-608.  
YU Fan, RAO Nan-quan, LV Chang-hai, et al. The Effect of Storage Temperature and Application Temperature on the Properties of Adhesives and Resin Composites[J]. Journal of Prevention and Treatment for Stomatological Diseases, 2022, 30(8): 604-608.
- [23] 余晓明. 环境湿度及温度对金刚石串珠胶粘剂开姆洛克 213 粘接力的影响[J]. 超硬材料工程, 2022, 34(4): 47-50.  
YU Xiao-ming. Influence of Ambient Humidity and Temperature on the Adhesion of Diamond Bead Adhesive Chemlok 213[J]. Superhard Material Engineering, 2022, 34(4): 47-50.
- [24] 秦国锋, 那景新. 复合材料胶接接头温度-湿度-载荷老化机理研究概述[J]. 中国胶粘剂, 2020, 29(3): 57-65.  
QIN Guo-feng, NA Jing-xin. Research on Temperature-Humidity-Load Aging Mechanism of Composite Bonded Joint[J]. China Adhesives, 2020, 29(3): 57-65.
- [25] KE Xiang, TANG Shu-xian, DONG Zhi-yun, et al. An Instant, Repeatable and Universal Supramolecular Adhesive Based on Natural Small Molecules for Dry/Wet Environments[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 442: 136206.
- [26] 关世伟. 胶接接头破坏分析[J]. 中国胶粘剂, 2015, 24(2): 57-58.  
GUAN Shi-wei. Failure Analysis of Cemented Joint[J]. China Adhesives, 2015, 24(2): 57-58.
- [27] 张昊博, 武德珍, 程珏, 等. 聚酰亚胺表面光接枝对粘接性能的影响研究[J]. 中国胶粘剂, 2021, 30(11): 1-5.  
ZHANG Hao-bo, WU De-zhen, CHENG Jue, et al. Study on Effects of UV Grafting on Bonding Properties of Polyimide Surface[J]. China Adhesives, 2021, 30(11): 1-5.
- [28] REN Jun-yu, DU Guan-ben, LIU Si-chen, et al. High-Strength, Self-Initiated, Wide pH Range of Underwater Adhesive Suitable for Different Severe Environments[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 455: 140640.
- [29] LEGER R, ROY A, GRANDIDIER J C. A Study of the Impact of Humid Aging on the Strength of Industrial Adhesive Joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 44: 66-77.

责任编辑: 刘世忠