

表面处理对聚酰亚胺柔性复合材料粘结性能的影响

田桂芝 武海生 刘佳 陈维强 赵海伟

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

文 摘 使用聚酰亚胺(PI)膜和PI纤维编织布制备深空探测用柔性织物复合材料,研究表面处理对PI膜和PI纤维编织布之间粘结性能的影响。采用自制表面处理剂分别对PI膜和PI纤维编织布的表面进行处理,再经硅橡胶胶黏剂粘制备柔性复合材料。使用T剥离强度试验方法测试柔性织物复合材料的层间胶接性能,并分析复合材料剥离面的形貌状态。结果显示,PI膜和PI织物的表面处理可以显著提高柔性织物复合材料的T剥离强度。其中,PI膜和PI织物未经表面处理时,柔性织物复合材料的T剥离强度为8.9 N/cm。对PI膜进行表面处理,或者对PI膜和PI织物均进行表面处理的情况下,柔性织物复合材料的T剥离强度增加至11.7 N/cm和12.8 N/cm,分别提高了31.5%和43.8%。这表明对PI膜及PI织物进行合理的表面处理,可以显著提高柔性织物复合材料的胶接性能。

关键词 深空探测,柔性织物复合材料,表面处理,T剥离强度

中图分类号:TB3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.05.017

Effect of Surface Modification on the Bonding Performance of Flexible PI Composites

TIAN Guizhi WU Haisheng LIU Jia CHEN Weiqiang ZHAO Haiwei

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract In this paper, flexible composite for deep space exploration was prepared using PI film and PI woven cloth, the effect of surface modification of PI film and PI woven on the bonding properties of the flexible composites was evaluated. Before and after surface modification, PI film and PI woven cloth were adhered by silicone rubber adhesive to prepare flexible composites. The bonding properties of flexible composites with different surface treatments were studied and the morphology of the peeling surface were analyzed. The results showed that the T-peel strength of the flexible PI film/woven composites was significantly increased after the surface modification. The T-peel strength of the composite, which consisted of unmodified PI film/woven, was 8.9 N/cm. In case of that the PI film was independently modified, the PI film and PI woven were simultaneously modified, the T-peel strength increased to 11.7 N/cm and 12.8 N/cm, which was enhanced by 31.5% and 43.8%, respectively. This research has indicated that the surface treatment of PI film and PI woven cloth could significantly improve the adhesive properties of the flexible composite.

Key words Deep space exploration, Flexible composite, Surface treatment, T-peel strength

0 引言

面向我国小行星、火星、木星等深空探测需求,采用柔性结构代替传统的刚性结构,可以大幅降低结构质量及体积,成为未来深空探测器太阳翼、天线等结构的重要发展趋势^[1-4]。聚酰亚胺(PI)由于其优异的耐高低温、耐紫外、耐辐照、低介电、高绝缘等性能,越来越多地在航天产品上得到应用。PI膜广泛应用于太阳能电池基板、太阳帆、热控材料、印刷电路板、电机绝缘线等,PI纤维广泛应用于空间缆绳、

安全绳索、气瓶等^[5-10]。硅橡胶类胶黏剂由于其优异的耐空间环境性能及良好的低温柔性^[11],成为柔性复合材料胶黏剂的首选。但由于硅橡胶类胶黏剂胶接强度通常较低,用于复合PI膜、PI纤维织物等材料时,其胶接强度成为影响其性能的关键问题。采用偶联剂等方法对PI膜与PI编织布胶接面进行表面处理^[12],是有效提升其胶接强度的重要途径之一。

本文研究自制表面处理剂对PI膜、PI编织布与硅橡胶胶接强度的影响,采用T剥离强度试验方法对

收稿日期:2021-05-30

第一作者简介:田桂芝,1988年出生,硕士研究生,工程师,主要从事复合材料及其成型技术研究工作。E-mail:tianguizhi0628@163.com

未经表面处理及经过表面处理的试样进行胶接性能表征,并对测试结果及试件剥离面的形貌状态进行分析。

1 实验

1.1 原材料

低苯基甲基硅橡胶、柔性表面处理剂:自制。

聚酰亚胺编织布(PI平纹编织布):面密度,40 g/m²,江苏先诺新材料科技有限公司。

聚酰亚胺膜(PI膜):均苯型、厚度25 μm,株洲时代华鑫新材料技术有限公司。

1.2 剥离试样制备与测试

1.2.1 剥离试样制备

采用低苯基甲基硅橡胶,分别对未经表面处理以及经过表面处理剂处理的PI膜与PI编织布进行胶接,制备了剥离强度试样待测,试样表面处理方式见表1,制备流程见图1。

表1 材料表面处理方式

Tab. 1 The handing of the surface treatment of the materials

试件	PI膜表面处理	PI编织布表面处理
1	否	否
2	是	否
3	是	是

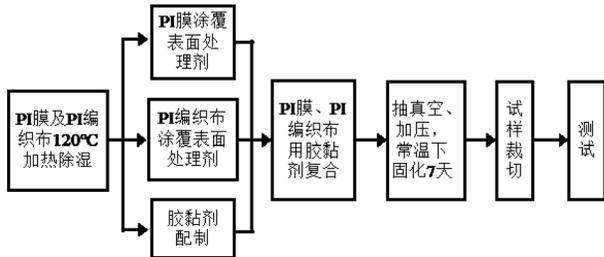


图1 试件制作流程图

Fig. 1 Process flow chart of peel test specimen

1.2.2 剥离试样测试

采用胶黏剂T剥离强度试验方法挠性材料对挠性材料(GB/T 2791—1995)研究表面处理工艺对PI膜与PI编织布的胶接强度的影响。挠性材料对挠性材料的T剥离试验是在试样的未胶接端施加剥离力,使试样沿着胶接线产生剥离,所施加的力与胶接线之间角度可不必控制。胶接好的试样在万能拉伸试验机上,以恒定速率(100±10) mm/min进行剥离,测量试样剥离所需的力值。剥离试件试样尺寸见图2,典型剥离曲线示意图见图3,试件图见图4。

测试时至少记录在100 mm剥离长度内的剥离力,计算相应的剥离强度值。

$$\sigma_t = F/B$$

式中, σ_t 为剥离强度, F 为剥离力, B 为试样宽度。

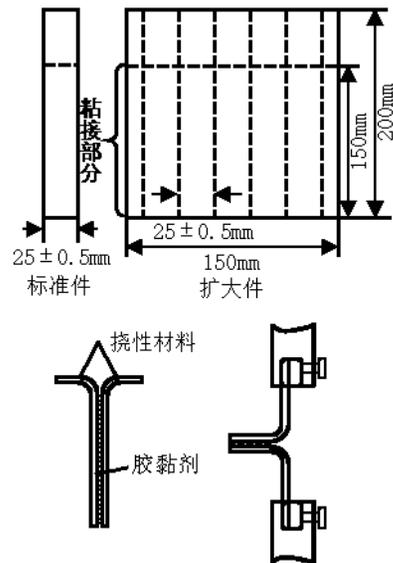


图2 剥离试件尺寸示意图

Fig. 2 Diagram of peel test specimen

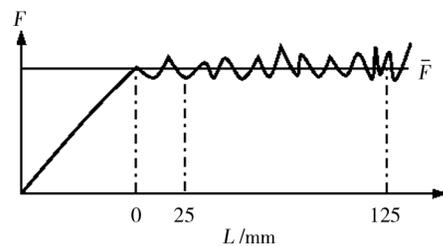


图3 典型剥离曲线示意图

Fig. 3 Diagram of typical peeling curve

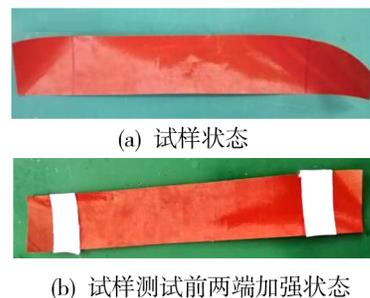


图4 剥离试件图

Fig. 4 Diagram of real part of peel test specimen

2 结果分析与讨论

2.1 未经表面处理试样测试结果及分析

对PI膜及PI编织布均未进行表面处理制得的试件进行T剥离强度测试。试件破坏时的载荷平均值为22.3 N,剥离强度平均值为8.9 N/cm,试件测试后的剥离面形貌状态见图5。从剥离面状态可以看出,有大块的胶黏剂从PI膜表面剥离脱落,说明胶黏剂与PI膜的胶接力较差,PI织物相对于PI膜表面较为粗糙,因此相对PI膜而言,胶黏剂与PI编织布的胶接力较强。



图5 PI膜及PI编织布均未经表面处理试样剥离面形貌状态图

Fig. 5 Morphology of the peel test specimen without surface treatment

2.2 PI膜经表面处理剂处理试样测试结果及分析

对PI膜进行表面处理,而PI编织布未进行表面处理制得的试件进行了T型剥离强度测试。试件破坏时的载荷平均值为29.2 N,剥离强度平均值为11.7 N/cm,试件测试后的剥离面形貌状态见图6。从剥离面状态可以看出,胶黏剂在PI膜表面分布比



图6 PI膜经表面处理PI编织布未经处理试样剥离面形貌状态图

Fig. 6 Morphology of the peel test specimen with the surface of the film treated

2.3 PI膜及PI织物均经表面处理剂处理试样测试结果及分析

对PI膜及PI编织布均进行表面处理制得的试件进行T剥离强度测试。试件破坏时的载荷平均值为32.1 N,剥离强度平均值为12.8 N/cm,试件测试后的剥离面形貌状态见图7。从剥离面状态可以看出,



图7 PI膜及PI编织布均经表面处理试样剥离面形貌状态图

Fig. 7 Morphology of PI film and PI woven cloth with surface treatment

2.4 结果对比及机理分析

根据以上测试结果,将PI膜及PI编织布未经表面处理试件(试件1)、仅将PI膜经表面处理剂处理试件(试件2)、将PI膜及PI编织布均经表面处理试件(试件3)三类试件测试结果进行对比,具体见表2。

聚酰亚胺材质表面含有大量羰基或羟基,自制表面处理剂中含有一类具有特殊结构的低分子有机硅化合物,其分子结构中含有与聚合物分子有亲和力或者反应能力的活性官能团以及可以水解的烷氧基。烷氧基可以水解成硅醇,与聚酰亚胺的羟基发生作用,形成氢键,并可以缩合成—SiO—N共价键,同时硅醇也会相互缔合,最终形成网状结构。同时活性基团可以与胶黏剂中的基团发生反应,形成共价键,从而使得表面处理剂将PI膜、PI编织布与胶黏

图5中PI膜未进行表面处理的试件更加均匀,未出现大面积脱落现象,说明胶黏剂与PI膜的胶接强度增强,由于PI编织布未进行表面处理,相比PI膜的表面,测试后的PI编织布表面胶黏剂较少,说明与经过表面处理的PI膜相比,PI编织布和胶黏剂之间的胶接强度较小。

PI膜及PI编织布均经过表面处理的试件与未经表面处理的试件相比,胶黏剂在PI膜及PI编织布表面均未出现大块脱落情况,且在膜及编织布表面分布较均匀,说明PI膜及PI编织布均经过表面处理的试件其粘接强度相比PI膜及PI织物未经表面处理剂处理的试件显著提高。

剂相互连接起来,增强了其间的胶接强度。

表2 不同表面处理状态试件测试结果对比

Tab. 2 Comparison of the test results of composites with different surface treatments

试件	载荷/N	剥离强度/N·cm ⁻¹
试件1	22.3	8.9
试件2	29.2	11.7
试件3	32.1	12.8
试件2较试件1提高/%	30.9	31.5
试件3较试件1提高/%	43.9	43.8

因此,PI膜(经表面处理)与PI编织布(未经表面处理)以及PI膜与PI编织布(均经表面处理)经胶黏剂胶接制得的试件的T型剥离强度均大于PI膜与PI

编织布(均未经表面处理)与胶黏剂制得的试件的T剥离强度。

3 结论

自制柔性表面处理剂,对PI膜或者PI编织布的表面进行表面处理,并使用硅橡胶粘接PI膜和PI编织布,制备柔性复合材料。其中,仅对PI膜进行表面处理以及对PI膜和PI织物均进行表面处理制备的柔性织物复合材料,其T剥离强度平均值分别为11.7 N/cm和12.8 N/cm,较未经表面处理的柔性织物复合材料的平均T剥离强度(8.9 N/cm)分别提高31.5%和43.8%,其破坏载荷也分别提高30.9%和43.9%。结果表明,PI膜及PI编织布经过自制表面处理剂处理,均能够有效提高低苯基甲基硅橡胶对PI膜/PI编织布的胶接强度。另外,对PI膜及PI编织布均进行表面处理,可以更加有效地提升柔性复合材料的层间粘接性能。

参考文献

[1] 彭福军, 谢超, 张良俊. 面向空间应用的薄膜可展开结构研究进展及技术挑战[J]. 载人航天, 2017, 23(4): 427-439.

PENG F J, XIE C, ZHANG L J. Advancement and technical challenges of deployable membrane structure in space application [J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(4): 427-439.

[2] 王从思, 韩如冰, 王伟, 等. 星载可展开有源相控阵天线结构的研究进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 107-123.

WANG C S, HAN R B, WANG W, et al. Development of spaceborne deployable active phased array antennas [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 107-123.

[3] 段宝岩. 大型空间可展开天线的研究现状与发展趋势[J]. 电子机械工程, 2017, 33(1): 4-17.

DUAN B Y. The state-of-the-art and the development of large space-borne deployable antenna [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2017, 33(1): 4-17.

[4] 李团结, 马小飞. 大型空间可展开天线技术[J]. 空间电子技术, 2012(3): 35-43.

Li T J, Ma X F. Technologies of large deployable space antennas [J]. Space Electronic Technology, 2012(3): 35-43.

[5] 汪多仁. 聚酰亚胺的合成与应用的进展[J]. 电线电缆, 2001, 12(6): 10-12.

Wang D R. Advances in the synthesis and application of polyimide [J]. Electric Wire & Cable, 2001, 12(6): 10-12.

[6] 刘伟利. 聚酰亚胺膜的发展概况[J]. 中国塑料, 1993, 7(4): 10-15.

Liu W L. The developmental survey of polyimide film [J]. China Plastics, 1993, 7(4): 10-15.

[7] 林松, 牛鸿庆, 李文斌. 聚酰亚胺纤维与碳纤维缠绕复合气瓶性能对比研究[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(6): 23-29.

LIN S, NIU H Q, LI W B. Comparative study on performance of polyimide fiber and carbon fiber composite cylinders [J]. Materials Science and Technology, 2018, 26(6): 23-29.

[8] 颜善银, 陈文求, 杨小进, 等. 聚酰亚胺膜的应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2009, 37(9): 26-29.

YAN S Y, CHEN W Q, YANG X J, et al. Research progress on the applications of polyimide membranes [J]. New Chemical Materials, 2009, 37(9): 26-29.

[9] 周琦. 聚酰亚胺纤维研究进展及应用[J]. 纺织科技进展, 2021(5): 6-8.

ZHOU Q. Research progress and application of polyimide fiber [J]. Progress in Textile Science and Technology, 2021(5): 6-8.

[10] 高鸿, 王永建, 邢焰. 空间领域用高性能聚酰亚胺薄膜现状与发展[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(3): 248-253.

GAO H, WANG Y J, XING Y. The application and the development of high performance polyimide film in aerospace field [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(3): 248-253.

[11] 黄艳华, 石扬, 薛磊, 等. 航空硅橡胶材料研究及应用进展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 79-91.

HUANG Y H, SHI Y, XUE L, et al. Research and application progress of silicone rubber materials in aviation [J]. Journal of aeronautical materials, 2016, 36(3): 79-91.

[12] 曲春艳, 李琳, 王德志. 钛合金胶接表面处理研究[J]. 材料工程, 2010(12): 82-85.

QU C Y, LI L, WANG D Z. Study on surface treatment of titanium alloy for adhesive bonding [J]. Journal of Material Engineering, 2010(12): 82-85.