



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

中文核心期刊 中国科技核心期刊

基于故障树分析的航天器加强梁胶接接头可靠性提升

李莺歌 杨强 张璇 王晓宇 陈佳

Reliability improvement of a spacecraft reinforced beam adhesive joint based on fault tree analysis

LI Yingge, YANG Qiang, ZHANG Xuan, WANG Xiaoyu, CHEN Jia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023031>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一款新研制ASIC器件的单粒子效应检测与故障定位

Single event effect detection and fault location for an ASIC device

航天器环境工程. 2017, 34(2): 202–206 <https://doi.org/10.12126/see.2017.02.016>

碳/氰酸酯复合材料原子氧效应试验研究

The effects of atomic oxygen interaction with carbon/cyanate composites

航天器环境工程. 2018, 35(6): 568–574 <https://doi.org/10.12126/see.2018.06.010>

M40/648碳纤维环氧复合材料热循环效应研究

Effect of thermal cycle on M40/648 carbon/epoxy composites

航天器环境工程. 2018, 35(1): 82–86 <https://doi.org/10.12126/see.2018.01.015>

基于FTA的航天器热试验技术风险分析方法

Technical risk analysis of spacecraft thermal environmental test based on FTA

航天器环境工程. 2020, 37(4): 383–389 <https://doi.org/10.12126/see.2020.04.011>

长期贮存对卫星典型结构件的形变影响分析

Effect of long-term storage on the deformation of typical satellite structure

航天器环境工程. 2018, 35(4): 353–358 <https://doi.org/10.12126/see.2018.04.008>

基于三维有限元模型的弹翼胶接结构胶层应力分析

Stress analysis of composite repair structure of aircraft wing based on three-dimensional finite element model

航天器环境工程. 2018, 35(3): 228–232 <https://doi.org/10.12126/see.2018.03.005>

基于故障树分析的航天器加强梁 胶接接头可靠性提升

李莺歌¹, 杨强², 张璇³, 王晓宇², 陈佳¹

(1. 中国空间技术研究院 通信与导航卫星总体部; 2. 北京空间飞行器总体设计部;
3. 北京卫星制造厂有限公司: 北京 100094)

摘要: 针对某航天器舱体结构试验件在静力试验过程中发生的加强梁胶接接头脱开问题, 通过对试验件设计和工艺技术状态进行分析, 建立故障树; 继而采用求取故障树最小割集和对研制过程进行排查的定性分析方法, 确定造成故障的主要原因, 并提出相应的改进措施。经地面试验和在轨飞行验证, 证实故障定位准确, 改进措施有效, 能提高结构系统的可靠性。有关分析方法和措施可为航天器加强梁胶接接头结构设计和工艺改进提供参考。

关键词: 复合材料; 胶接接头; 故障树分析; 定性分析; 补片

中图分类号: V414.7; V416.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2023)05-0567-08

DOI: [10.12126/see.2023031](https://doi.org/10.12126/see.2023031)

Reliability improvement of a spacecraft reinforced beam adhesive joint based on fault tree analysis

LI Yingge¹, YANG Qiang², ZHANG Xuan³, WANG Xiaoyu², CHEN Jia¹

(1. Institute of Telecommunication and Navigation Satellites, China Academy of Space Technology;
2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering;
3. Beijing Spacecraft Manufactory Co., Ltd.: Beijing 100094, China)

Abstract: In view of the disconnection fault occurring at the adhesive joint of the reinforced beam in the static test of a spacecraft cabin structure, a fault tree was established by analyzing the design and process status of the test piece. The main causes of the fault were then identified by a qualitative analysis method to obtain the minimum cut set of the fault tree and troubleshoot the development process. In addition, the corresponding improvement measures were proposed. The ground test and in-orbit flight verification proved that the fault location was accurate and the improvement measures were effective, which verified the reliability of the structural system. The proposed analysis methods and measures may provide a reference for the structural design and technological improvement of beam adhesive joint for spacecraft.

Keywords: composite materials; adhesive joint; fault tree analysis; qualitative analysis; patch

收稿日期: 2023-03-13; 修回日期: 2023-09-25

引用格式: 李莺歌, 杨强, 张璇, 等. 基于故障树分析的航天器加强梁胶接接头可靠性提升[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(5): 567-574

LI Y G, YANG Q, ZHANG X, et al. Reliability improvement of a spacecraft reinforced beam adhesive joint based on fault tree analysis[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(5): 567-574

0 引言

复合材料加强梁具有重量轻以及结构强度、刚度高等显著优点^[1-2],在航天器结构中主要通过胶接轻型金属接头^[3]来承受或传递结构在航天器发射和太空着陆等任务阶段的集中冲击载荷。因此,加强梁与接头的胶接可靠性是影响航天器任务成败的关键因素之一。在工程实践中,应采取有效的技术分析和质量控制方法来避免加强梁胶接接头失效。

故障树分析法(FTA)是评价复杂产品/系统可靠性和安全性的有效方法^[4],是通过自上而下对可能造成产品故障的硬件、软件、环境及人为因素等进行分析,画出故障树,从而确定故障原因的各种可能组合方式和(或)其发生概率的一种分析技术^[5-6]。基于故障树建模的主要优势在于可以直观地描述出造成系统失效的各种事件组合,进而找出制约系统可靠性和安全性的瓶颈所在,既可以在系统设计阶段识别潜在的可能导致系统故障的问题,从而改进优化设计,也可以在系统运行之后确定造成系统故障的事件,以便明确后续的改进措施^[7]。故障树分析法的一般过程是根据所选择的系统故障顶事件,确定边界条件,通过系统分析判别所有可能的故障来源并构建故障树,再定性评估发生故障的原因以及定量计算发生故障的概率^[8]。

本文针对某航天器舱体结构试验件在静力试验过程中发生碳纤维增强树脂基复合材料加强梁与硬质铝合金胶接接头脱开的故障形式,通过全面梳理影响产品研制质量的设计和工艺因素,构建故障树;采用故障树分析法,全面排查试验件的结构设计缺陷和制造工艺故障等因素,通过定性分析方法找出故障树的所有最小割集;继而通过对试验件的研制过程进行排查,分析出导致故障发生的相关底事件,准确判断出影响产品研制质量的重要因素和采取改进措施的优先次序,并据此确定产品的设计和工艺改进措施及建议;最后利用舱体结构试验件和初样真实结构件的力学试验,考核验证了工艺改进措施的有效性。

1 加强梁胶接接头故障树建模

1.1 故障事件描述

某航天器舱体结构试验件由试验用结构舱板、

加强梁固支接头、复合材料加强梁和金属传力接头组成。如图1所示,加强梁为截面尺寸120 mm×120 mm,壁厚2 mm的碳纤维增强树脂基复合材料空心方管梁,金属接头为横截面呈“U”字型的硬质铝合金壳体结构,接头内腔尺寸与加强梁外形匹配,二者采取胶接方式连接为一体,单边设计有0.1~0.2 mm的理论胶接间隙。在试验件组装后进行静力试验时,某工况下依次完成加载载荷量级为60%的预试验、100%的验收级和140%的准鉴定级静力试验后,在载荷量级增加到145%时发生接头与加强梁脱开的故障,即试验件强度无法满足载荷量级为200%的鉴定级超载试验承载需求。

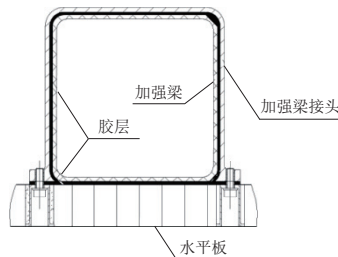


图1 加强梁与接头胶接的设计形态
Fig. 1 Design configuration of the bonding between reinforced beam and joint

1.2 故障件技术状态分析

为分析故障原因,结合试验件加强梁与接头脱开的故障形式,对试验件的设计状态和制造工艺状态进行风险因素分析,形成如下结论:

1)试验件中的加强梁和金属接头之间采取单纯的胶接方式连接为一体,而两个刚性体之间进行管-管胶接难以有效施加胶接固化压力,因此胶层的致密性和厚度均匀性得不到保证,胶接可靠性不高。

2)加强梁采取金属芯模定型、真空袋传压的方式固化成型。由于成型过程中加强梁外侧没有刚性体工装进行定型,所以产品表面平整度较差,不利于有效控制胶层厚度的均匀性以及胶接面胶接压力的均匀性和同步性。

3)金属接头的制造工艺流程为零件加工到尺寸后直接进行表面处理,而金属接头与加强梁胶接前还需进行试装修配。这样的试验件工艺流程很难保证在接头表面处理层活性期内完成胶接操作,且对表面处理层的洁净度控制不利。

4)加强梁与接头采用牌号为 Redux420 的双组

分室温固化胶粘剂进行胶接时,如涂胶量不够,或胶接压力未控制在 $0.1\sim 0.2\text{ MPa}$,或胶层厚度未控制在 $0.1\sim 0.2\text{ mm}$,则胶层将不够致密,难以有效保证胶接强度。

1.3 建立故障树模型

为系统梳理试验件的故障原因,根据试验件的设计状态和制造工艺特点进行全面分析,结合1.2节的结论,构建如图2所示的故障树。

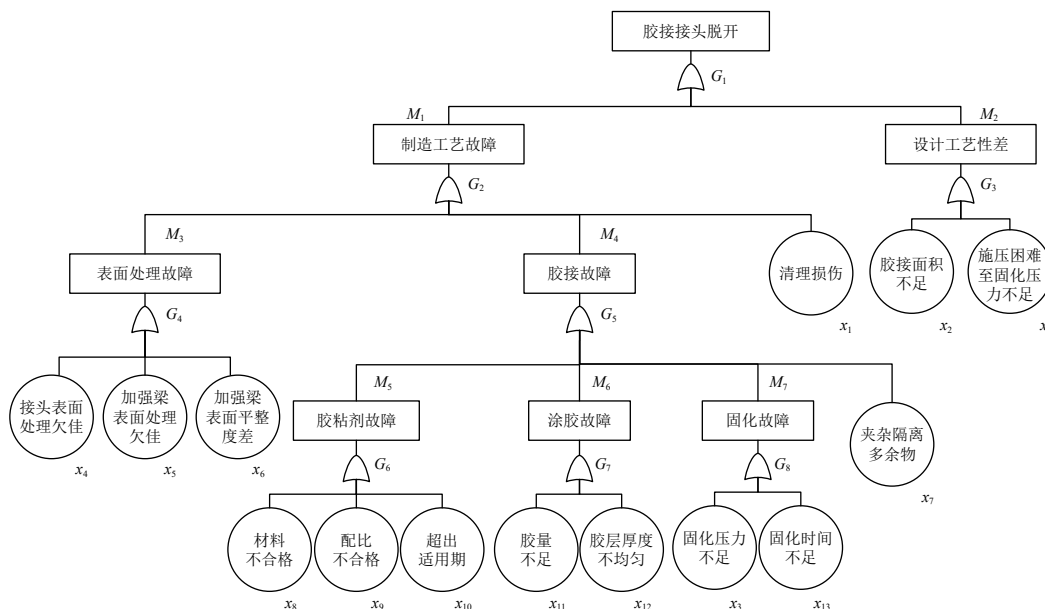


图2 加强梁胶接接头脱开故障的故障树

Fig. 2 Fault tree of the disconnection fault of the adhesive joint from the reinforced beam

2 故障树的定性分析

为识别故障原因,一般需对故障树进行定性或定量分析。当具有充足基础数据时,可定量分析出顶事件发生的概率以及底事件重要度等其他定量指标;当基础数据不足时,可通过过程排查、仿真分析或试验验证进行定性分析和比对。故障树定性分析的目的是找出导致顶事件发生的所有底事件及底事件的组合,以便帮助技术人员发现潜在故障和薄弱环节,明确改进措施;或指导诊断故障,改进产品使用和维修方案。

工程实践中,多采取最小割集^[6]和研制过程排查进行定性分析。

2.1 基于最小割集的定性分析

最小割集一般通过布尔代数化简法求取,分为下行法和上行法两种,详见 GJB/Z 768A—1998《故障树分析方法》^[6]第5.3.4节。

本文运用下行法求出故障事件的最小割集,从顶事件开始逐层向下查找割集,遇到“或”门便增加割集个数,即将“或”门的输入事件在下一列纵向依次展开,求得图2所示故障树的最小割集,如表1

所示。其中 $M_i(i=1, 2, \dots, 7)$ 代表中间事件, $x_i(i=1, 2, \dots, 13)$ 代表底事件。

表1 用下行法求得故障树的最小割集

Table 1 The minimum cut set of the fault tree obtained by the descending method

步骤	1	2	3	4	5(最小割集)
	M_1	M_3	x_4	x_8	x_1
	M_2	M_4	x_5	x_9	x_2
		x_1	x_6	x_{10}	x_3
		x_2	M_5	x_{11}	x_4
		x_3	M_6	x_{12}	x_5
			M_7	x_3	x_6
过程			x_7	x_{13}	x_7
					x_8
					x_9
					x_{10}
					x_{11}
					x_{12}
					x_{13}

图2所示故障树中只有“或”门没有“与”门,因此表1中的13个底事件均为最小割集,即只要有1个底事件出现,就会发生故障风险。为准确定位造成故障的主要原因,并据此确定相应的改进措施,最大程度提高改进措施的有效性和经济性,还需结合试验件的研制过程排查,进一步分析故障树中各个底事件对导致故障发生的具体影响。

2.2 通过研制过程排查进行定性分析

故障树的 13 个底事件逐一进行排查和分析, 确认根据试验件研制过程的实际情况, 对图 2 所示底事件导致故障发生的具体情况如表 2 所示。

表 2 基于研制过程排查的故障树分析确认表

Table 2 Analysis and confirmation table of fault tree based on the development process troubleshooting

底事件序号	底事件描述	验证方法	确认实录	结论 (是否导致故障)
x_1	清理损伤	外观检查	加强梁和接头的胶接面未见明显损伤	否
x_2	胶接面积不足	查涂胶照片 查过程记录	加强梁和接头均已按设计和工艺文件要求在规定的胶接区域足量涂胶	否
x_3	固化压力不足	查过程记录 讨论分析	1)空心方管加强梁与“U”形金属接头壳体之间为管-管胶接,难以有效施加胶接压力,易导致固化压力不足 2)加强梁表面不平整、局部存在高点,胶接固化过程高点位置较其他部位的固化压力必然会先行到位,易导致除高点外的其他区域因时间推移、胶粘剂逐渐凝胶等因素使施压失效,固化压力不足	是
x_4	接头表面处理欠佳	查过程记录 外观检查	1)接头经磷酸阳极氧化表面处理于胶接前进行了修配,但修配后未再次进行表面处理,无法确保胶接前各胶接面洁净且表面处理层处于有效鲜活期 2)脱开的接头胶接面有较大区域没有残胶,无法排除接头表面处理欠佳的情况	是
x_5	加强梁表面处理欠佳	查过程记录 外观检查	1)复合材料加强梁胶接区涂胶前按工艺文件要求进行了砂纸打磨和有机溶剂清洁,效果符合要求 2)脱开的加强梁胶接面残胶比较均匀,可排除加强梁表面处理欠佳情况	否
x_6	加强梁表面平整度差	外观检查	加强梁表面存在不规则皱褶,局部有高点,表面平整度较差	是
x_7	夹杂隔离多余物	查过程记录	胶接前已清理并由专检人员确认无多余物	否
x_8	胶粘剂材料不合格	查复验记录	所用胶粘剂入厂复验各项指标均合格,并在有效期内使用	否
x_9	胶粘剂配比不合格	查过程记录	胶粘剂的配制总量和配比均符合工艺文件要求	否
x_{10}	胶粘剂超出适用期	查过程记录	胶粘剂搅拌均匀后于规定的适用期内完成胶接操作,符合工艺文件要求	否
x_{11}	胶量不足	查涂胶照片 查过程记录	加强梁和接头均已按设计和工艺文件要求在规定的胶接区域足量涂胶	否
x_{12}	胶层厚度不均匀	查过程记录 讨论分析	1)试验件未见胶接过程采取专项措施控制加强梁与接头胶接间隙的记录,因此无法确保胶接间隙均匀一致,不能有效控制胶层厚度均匀性 2)加强梁表面局部存在高点,且不同胶接面的高点位置不一,导致加强梁与接头的胶接间隙尺寸不一致,影响胶层厚度均匀性	是
x_{13}	固化时间不足	查过程记录 查参比胶样固化状态	1)试验件胶接、施压后固化时间符合工艺文件要求 2)操作时同步预留的参比胶样固化状态正常	否

静力试验过程脱开的接头和加强梁胶接区形貌分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 可见,接头胶接区除通过螺孔可施加拧紧力的胶接面呈现出接头与加强梁之间胶接良好的状态(破坏形式为复合材料加强梁的碳纤维层间发生剥离)外,接头的其余胶接面均呈现为光洁的铝合金表面,且胶接面无残胶。该现象一方面说明铝合金接头存在表面处理不到位,胶粘剂无法在胶接面有效浸润的问题;另一方面说明接头与加强梁存在大面积胶接压力施加不到位的问题。由图 4 可见,加强梁胶接面的残胶比较均匀,说明加强梁的打磨和清洁效果符合要

求,可以实现胶粘剂在胶接面的有效浸润;但加强梁胶接面局部存在不规则皱褶和突出高点,不利于胶接压力的同步、均匀施加。

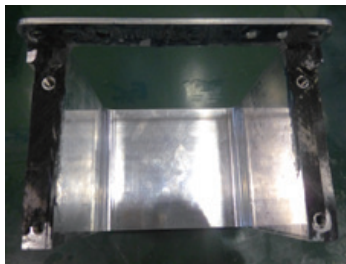


图 3 脱开的接头胶接区形貌

Fig. 3 Morphology of the bonding area of the detached joint

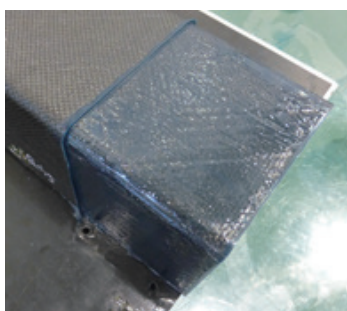


图4 脱开的加强梁胶接区形貌

Fig. 4 Morphology of the bonding area of the detached reinforced beam

综合以上分析结果,表明底事件 x_3 、 x_4 、 x_6 和 x_{12} 是导致试验件加强梁胶接头脱开的主要原因,因此在后续产品研制过程中应采取相应的措施以确保胶接固化压力充足、接头表面处理到位,并尽量提高加强梁表面的平整度和胶层厚度的均匀性;针对操作中确实存在施压困难、固化压力难以保证,进而导致胶接可靠性低的管-管胶接结构,还应在胶接部位采取额外的补片加强方案,以提高胶接可靠性。

3 改进措施及结果

3.1 设计改进建议

根据故障树分析结果,结合试验件的研制过程复查情况,为避免刚性体矩形结构管-管胶接所导致的胶接压力难以施加、胶接强度不易控制、数据离散性过大的缺陷,建议将加强梁与接头的胶接面改进为梯形截面,如图5所示。

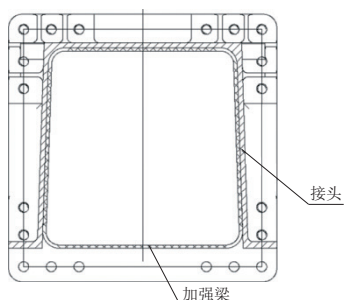


图5 改进后的加强梁与接头胶接截面

Fig. 5 Cross-section of improved reinforced beam and adhesive joint

采用此种设计状态,当接头与加强梁胶接时,接头可在自重及外部压力作用下直接沿胶接斜面对称下滑并贴紧加强梁,不仅有助于胶接压力的顺利施加,还利于有效控制胶接间隙的均匀性,可提高胶接强度和可靠性。

3.2 工艺改进措施

3.2.1 加强梁成型工艺改进

为消除真空袋传压过程中真空袋膜带动透气毡自由收缩造成各种不规则褶皱,并在产品表面形成凹凸不平的相应缺陷,严重影响加强梁与接头的胶接质量,在加强梁研制时增加外部可定向活动的金属外模,使其在加强梁固化成型环节可由外压推动,向内滑移到理论位置并固定,以提高加强梁的外形尺寸精度和表面平整度,从而降低接头与加强梁的胶接难度,提高胶接面胶层厚度和均匀性,并有利于有效控制同一胶接面的压力均匀性和施压同步性。

3.2.2 胶层厚度控制工艺改进

为有效控制接头与加强梁胶接时的胶层厚度和均匀性,工艺上采取先在加强梁表面胶接2圈直径约0.15 mm的碳纤维丝,然后再涂胶,可将接头与加强梁各个胶接面的胶层间隙均有效控制为0.15 mm。

3.2.3 工艺流程改进

研究发现铝合金采取磷酸阳极氧化表面处理工艺可在基材表面形成一层多孔的氧化铝膜层,从而改变胶接面的表面粗糙度和微观纹理,改善其润湿性,提高胶接可靠性^[9];但这种多孔结构在空气中很容易吸潮、吸尘,继而导致胶接面在存放过程中被污染。因此,须调整工艺流程——应尽快在经磷酸阳极氧化处理后的胶接面涂胶,使胶液能够在表面处理层活性期内渗入多孔的膜层中,以确保胶接性能^[10]。

工程实践中,为加强金属接头表面处理质量的控制,将表面处理工序调整到胶接件试装修配合格后再实施,可有效避免胶接前对表面处理层的污染,而且有利于在表面处理层处于活性期内完成胶接操作。

3.2.4 利用胶接补片进一步提高胶接可靠性

蔡建丽等^[11]对蜂窝夹层结构复合材料蒙皮缺陷的修补研究发现,胶接复合材料补片可使缺陷区蒙皮强度恢复率达到120.07%。王清远等^[12]利用复合材料补片修补含V形裂纹损伤的金属结构件,结果发现1层复合材料补片可使含V形裂纹试件的疲劳寿命提高5倍,2层和4层补片可分别延长试件寿命10倍和14倍以上。

借鉴上述研究成果,为进一步提高加强梁胶接接头的可靠性,提升接头承载能力,在接头与加强梁胶接到位后,再参照航天标准 Q/W 1310—2011《碳纤维/环氧树脂复合材料结构修补工艺技术要求》中的补片式修补方法,以接头外缘为基准,覆盖接头整个水平面及其外侧加强梁 40~50 mm 宽度,利用 Redux420 胶粘剂胶接 6 层 0.25 mm 厚的 T300 碳纤维编织布,在胶接区外侧形成约 1.5 mm 厚的复合材料补片对加强梁胶接接头进行局部加强处理。接头胶接形式和补片加强形式分别如图 6 和图 7 所示。

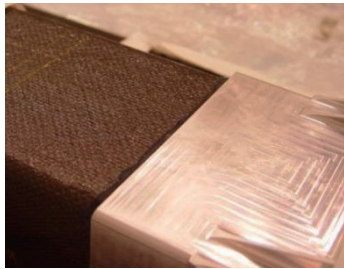


图 6 接头与加强梁胶接形式
Fig. 6 Bonding configuration of joint and reinforced beam



图 7 接头区胶接复合材料补片加强形式
Fig. 7 Configuration of composite patch in the joint area

3.3 改进结果

为全面考核改进措施的有效性和可靠性,采用改进后的工艺措施制备试验件并对接头部位进行补片加强,按照表 3 所列的试验载荷条件进行 5 种不同工况(5 种不同的承载方式)下的静力试验,以测量试验件的结构强度。

静力试验结果表明:工况 1 加载量级达到 230% 时,最大应变点测量值为 401 $\mu\epsilon$,最大位移点测量值为 0.096 mm。该工况整个试验过程未见异常,表明试验件结构设计强度和可靠性满足要求。工况 2~5 关键部位的位移测量值详见表 4,主要测点的载荷量级-应变曲线如图 8 所示,图中纵坐标为试验测点的应变值(单位为 $\mu\epsilon$),横坐标为试验过程的加载量级。由表 4 可见,在不同工况下,试验件在设计预期的 200% 超载量级下,各测点的位移变化量均很小,试验件的结构强度完全满足设计要求;由图 8 可见,各试验工况下,试验件在加载量级不大于 200% 的情况下,结构应变与载荷量级基本呈线性关系,证明结构可承受设计预期的超载载荷,且试验中未发生明显失稳现象。

另外,利用改进后的工艺措施制成的该型号初样结构件已顺利通过整星验收级和鉴定级噪声和正弦振动试验的考核,正样飞行件已在轨稳定运行多年,结构接头的胶接性能均没有发生改变,强度和可靠性满足要求。

表 3 各试验工况的载荷条件
Table 3 Loads of each test condition

工况		加载量级/N								
		60% 预试验	100% 验收级	140%	150% 鉴定级	180%	200% 超载级	220%	230%	300% 破坏试验
工况1	x向	3 488.2	5 813.6	8 139.0	8 720.2	10 464.0	11 627.0	12 790.0	13 371.0	17 441.0
	y向	384	640	896	960	1152	1280	1408	1472	1920
	z向	296.16	493.60	691.04	740.40	888.48	987.20	1085.90	1135.30	1480.80
工况2	x向	292.32	487.20	682.08	730.80	876.96	974.40	1 071.80	1 120.60	1 461.60
	y向	-3197	-5328	-7459	-7992	-9590	-10 656	-11 722	-12 254	-15 984
	z向	796.8	1328.0	1 859.2	1 992.0	2 390.4	2 656.0	2 921.6	3 054.4	3 984.0
工况3	x向	-759.6	-1266.0	-1 772.0	-1 899.0	-2 279.0	-2 532.0	-2 785.0	-2 912.0	-3 798.0
	y向	876	1460	2044	2190	2628	2920	3212	3358	4380
	z向	4 519.8	7533.0	10 546.0	11 300.0	13 559.0	15 066.0	16 573.0	17 326.0	22 599.0
工况4	x向	201.6	336.0	470.4	504.0	604.8	672.0	739.2	772.8	1 008.0
	y向	1 867.8	3 113.0	4 358.2	4 669.5	5 603.4	6 226.0	6 848.6	7 159.9	9 339.0
	z向	-264	-440	-616	-660	-792	-880	-968	-1012	-1320
工况5	x向	519.6	866.0	1 212.4	1 299.0	1 558.8	1 732.0	1 905.2	1 991.8	2 598.0
	y向	484.2	807.0	1 129.8	1 210.5	1 452.6	1 614.0	1 775.4	1 856.1	2 421.0
	z向	-3 943.8	-6 573.0	-9 202.2	-9 859.5	-11 831.4	-13 146.0	-14 460.6	-15 117.9	-19 719.0

表 4 各试验工况的位移测量值

Table 4 Displacement measurement values of each test condition

工况及加载量级		位移/mm						
		测点D1	测点D2	测点D3	测点D4	测点D5	测点D6	测点D7
工况2	100%	-0.048	0	-0.016	-0.106	-0.092	0.012	-0.006
	150%	-0.066	0.002	-0.008	-0.218	-0.172	0.018	-0.018
	200%	0.090	0.005	-0.013	-0.446	0.296	0.026	0.051
	365%	-0.490	0.118	-0.144	-0.798	-0.634	0.373	0.242
工况3	100%	0.122	0.132	-0.126	-0.014	-0.030	0.092	0.166
	150%	0.250	0.250	-0.190	-0.004	-0.058	0.206	0.265
	200%	0.390	0.396	-0.312	0.038	-0.050	0.299	0.431
	300%	1.502	1.414	0.006	0.347	0.141	0.806	1.190
工况4	100%	0.002	0.005	-0.001	0.003	0.006	0.004	0.003
	150%	0.005	0.009	0.001	0.006	0.009	0.007	0.006
	220%	0.011	0.015	0.004	0.012	0.013	0.013	0.012
工况5	100%	-0.086	-0.150	0.076	0	0.016	-0.018	-0.060
	150%	-0.132	-0.256	0.110	0.008	0.044	-0.024	-0.092
	200%	-0.204	-0.386	0.168	0.028	0.080	-0.058	-0.142

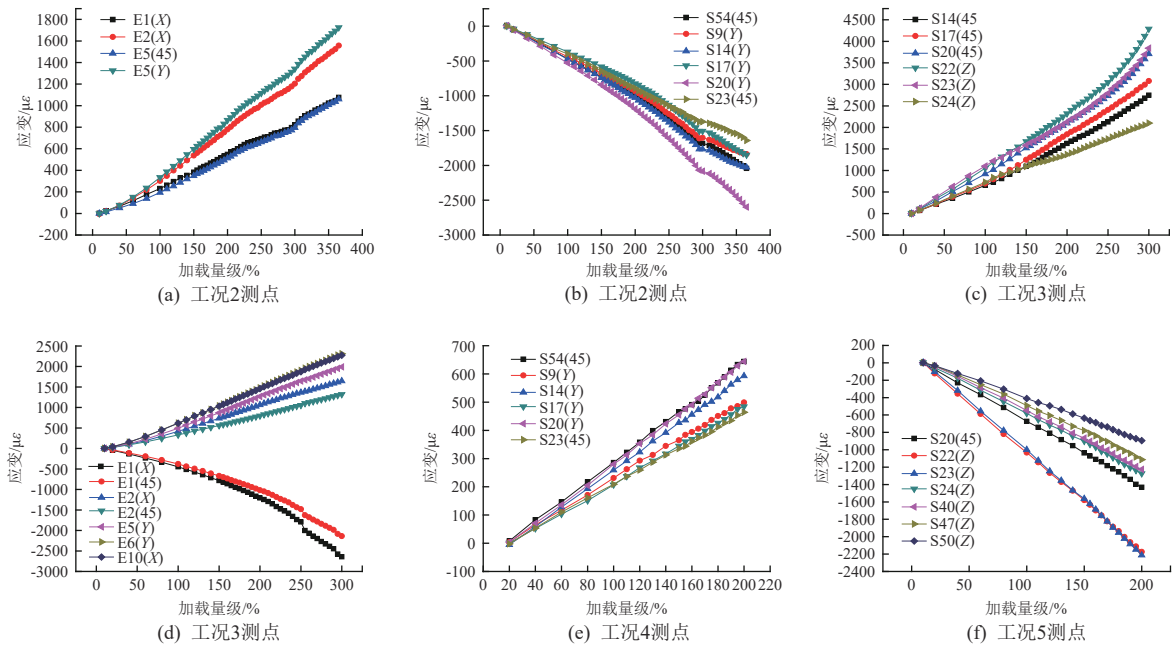


图 8 各试验工况的载荷量级-应变曲线

Fig. 8 Load magnitude-strain curve for each test condition

4 结论

通过开展基于故障树分析的航天器加强梁胶接头可靠性提升研究，提出有关改进措施建议，实施后经验证得出以下结论：

- 1)将加强梁与接头的胶接面截面由方形改为梯形，有助于胶接压力的顺利实施，进而提高胶接可靠性。
- 2)改进胶接工艺，提高压力均匀性和同步性、提高胶接面表面活性和接触面积、加强胶层厚度和均匀性控制，并在胶接区外层胶接补片加强，可有

效提高胶接可靠性。
以上研究可为航天器加强梁胶接头结构设计和工艺改进提供参考。

参考文献 (References)

[1] 田海英, 关志军, 丁亚林, 等. 碳纤维复合材料应用于航天光学传感器遮光镜筒[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 704-706
TIAN H Y, GUAN Z J, DING Y L, et al. Carbon fiber composite material used in space optical instrument[J]. Optical Technique, 2003, 29(6): 704-706
[2] 李成功, 傅恒志, 于翹, 等. 航空航天材料[M]. 北京: 国防

- 工业出版社, 2002
- [3] 张甲龙. 复合材料多面体支架设计与成型技术研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2015: 5
- [4] HAASL D F. Advanced concepts in fault tree analysis[C]// System Safety Symposium. Seattle: The Boeing Company, 1965: 9
- [5] 可靠性维修性保障性术语: GJB 451A—2005[S], 2005: 13
- [6] 故障树分析方法: GJB/Z 768A—1998[S], 1998: 6-38
- [7] SILVA I, GUEDES L A, PORTUGAL P, et al. Reliability and availability evaluation of wireless sensor networks for industrial applications[J]. Sensors, 2012, 12(1): 806-838
- [8] 金伟娅, 张康达. 可靠性工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005
- [9] 郭磊, 刘检华, 张佳朋, 等. 航天工业中胶接技术的研究现状分析[J]. 中国机械工程, 2021, 32(12): 1398
- GUO L, LIU J H, ZHANG J P, et al. Research status analysis of adhesively connection technology in aerospace industry[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(12): 1398
- [10] 高慎斌. 卫星制造技术(下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1998: 28
- [11] 蔡建丽, 余欢, 王云英, 等. 玻璃钢蜂窝夹层结构制品常见缺陷修补技术[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(1): 46
- CAI J L, YU H, WANG Y Y, et al. The repairing technology to the defects of GFRP honeycomb sandwich structure parts[J]. FRP/CM, 2011(1): 46
- [12] 王清远, 陶华. 复合材料修补件的强度和疲劳性能[J]. 材料工程, 2003(1): 22
- WANG Q Y, TAO H. Strength and fatigue behavior of composite repaired components[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(1): 22

(编辑: 闫德葵)