

夹层共底结构红外图像拼接方法

盛 涛¹, 郑金华¹, 向 苹¹, 陈 超¹, 徐红杰¹, 江海军²

(1. 上海复合材料科技有限公司, 上海 201112; 2. 南京诺威尔光电系统有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 夹层共底贮箱体积庞大, 采用脉冲红外无损检测技术单次只能检测一小片区域, 需要数百次检测才能完成对夹层共底贮箱的检测, 单个工程不利于缺陷位置的判断。本文采用固定重叠区域的红外图像拼接方法, 重叠区域采用加权融合方式可有效消除拼缝, 夹层共底结构侧边 6 个子区域采用弧形拼接方式, 可有效解决弧形区域的拼接, 可有效解决多工程拼接难题。采集工程缺陷标注后, 拼接图像直接显示缺陷的位置信息, 对于夹层共底结构缺陷信息判断带来了极大的便利。

关键词: 脉冲红外无损检测; 夹层共底贮箱; 图像拼接; 弧形拼接

中国分类号: TB302.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2023)09-0948-06

Infrared Image Stitching Method for Sandwich Bulkhead Structure

SHENG Tao¹, ZHENG Jinhua¹, XIANG Ping¹, CHEN Chao¹, XU Hongjie¹, JIANG Haijun²

(1. Shanghai Composite Material Science & Technology Co., Ltd, Shanghai 201112, China;

2. Nanjing Noveltec Co., Ltd, Nanjing 210014, China)

Abstract: A sandwich bulkhead structure has a large volume. Because infrared non-destructive testing technology can only detect a small area, hundreds of tests are required to detect the sandwich bottom structure, which is not conducive to determining the location of defects in a single project. This article proposes a fixed overlapping-area infrared image stitching method in which the overlapping area is fused using weighted fusion to effectively eliminate seams. The six sub-regions on the side of the sandwich bottom structure are stitched using an arc-shaped method. This approach not only solves the problem of stitching in multiple projects but also greatly improves the accuracy and efficiency of defect detection. After collecting and annotating the defects in the project, the stitched image directly displays the location information of the defects, which greatly facilitates the identification of defect information in the sandwich bulkhead structure.

Key words: pulsed infrared thermography, sandwich common bottom tank, image stitching, arc-shaped stitching

0 引言

夹层共底贮箱是一种新型的储存容器, 由于其具有耐腐蚀、耐高温、耐压、密封性好等特点, 被广泛应用于工业、化工、医药等领域^[1]。在工业领域, 它可以用于储存各种化学品、石油、天然气等。在化工领域, 它可以用于储存各种液体和气体。在航天领域, 夹层共底贮箱用于储存燃料和氧化剂的设备, 通常用于火箭发射器中^[2]。它的作用是提供一个安全、可靠的储存燃料和氧化剂的空间, 以确保火箭发射器在发射过程中能够持续地提供足够的燃料和氧化剂, 从而实现火箭的推进和飞行。此外, 火箭夹层共底贮箱还

可以提高火箭的稳定性和控制性, 减少火箭在飞行过程中的摇晃和偏移, 从而提高火箭的精度和安全性^[3]。

夹层共底结构是夹层共底贮箱的一部分, 夹层共底结构由上面板、夹层和下面板 3 部分组成^[4]。其中, 下面板通常采用轻质、高强度材料制成, 如玻璃钢、碳纤维、铝合金等, 上面板通常会采用高强度、耐腐蚀材料组成, 如铝合金、钛合金。夹层则可以填充保温材料, 以保持储存物体的温度稳定。夹层共底设计可以使得箱体更加坚固, 同时也可以减少箱体的重量, 提高运输效率。夹层共底结构可有效加强火箭底部强度, 从而提高火箭承受更大的载荷和振动, 夹层共底结构是火箭发射器中非常重要的组成部分, 其安

收稿日期: 2023-03-29; 修订日期: 2023-04-28.
作者简介: 盛涛 (1984-), 男, 上海市人, 高级工程师, 学士, 研究方向为复合材料无损检测技术。
通信作者: 江海军 (1988-), 男, 江苏省南京市人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为红外无损检测技术及图像处理。E-mail: hjiang@noveltec.com。

全性和可靠性对火箭发射的成功至关重要。因此,对火箭夹层共底进行无损检测是非常重要的。无损检测可以帮助检测出夹层共底中可能存在的缺陷和损伤,如裂纹、腐蚀、疲劳等,以及其他可能影响夹层共底贮箱性能和安全性的问题。夹层共底直径可达3 m,高度可达1.5 m,基本无法通过X射线进行检测;超声C扫以单点扫描方式检测内部缺陷,单点扫描速度慢,同时在多层结构中容易导致检测结果不准确,容易造成漏检和误检情况。

红外无损检测技术是一种非接触式、检测速度快、以成像方式显示的检测方法,广泛应用于工业、交通、军工等领域^[5-9]。红外无损检测技术可用于夹层共底结构的无损检测,由于夹层共底结构体积过于庞大,红外无损检测技术无法单次检测完成,需要检测上百次才能实现对整个夹层共底结构的检测。因此采用多工程红外图像拼接成一张大图,以获得更广阔的视野和更全面的缺陷信息。

红外图像拼接方法可采用 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)^[10]、SURF (Speed Up Robust Features)^[11]、BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints)^[12]、ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF)^[13]等算法,通过检测两张待拼接红外图像上特征点进行配准。但在实际检测过程中,夹层共底结构红外图像细节信息不足,特征点不明显,图像边缘不明显,无法为配准提供足够且可靠的特征对。另一方面,夹层共底结构红外图像有上百张,不仅左右、上下方向需要拼接,图像还存在弧形的特点,采用自动配准,若某几张图像配准错误,将导致整个拼接图像的错误。因此本文采用基于固定重叠区域的夹层共底结构红外图像拼接方法。本文所介绍方法的关键点在于:①采集工程前确定好固定重叠区域;②弧形位置检测的平面图像转换成弧形图像;③针对左右、上下重叠区域采用加权融合算法,使得拼接区域过渡更加平滑,实现无缝拼接。

1 红外图像检测及特征分析

1.1 夹层共底结构检测方法

夹层共底结构直径为3.0 m,高度为1.5 m,上面板和下面板都是由厚度为3 mm的铝合金构成,夹层由厚度为10 mm的泡沫夹芯构成,整体形状类似半圆球面。夹层共底结构示意图如图1所示,图1(a)为夹层共底结构侧面图,图1(b)为夹层共底结构的俯视图,俯视图可以看到夹层共底结构上面板分为中间区域和侧边6个子区域,图1(b)中展示了其中一个子区域检测工程的划分,单个子区域都包含几十个检测子区域。

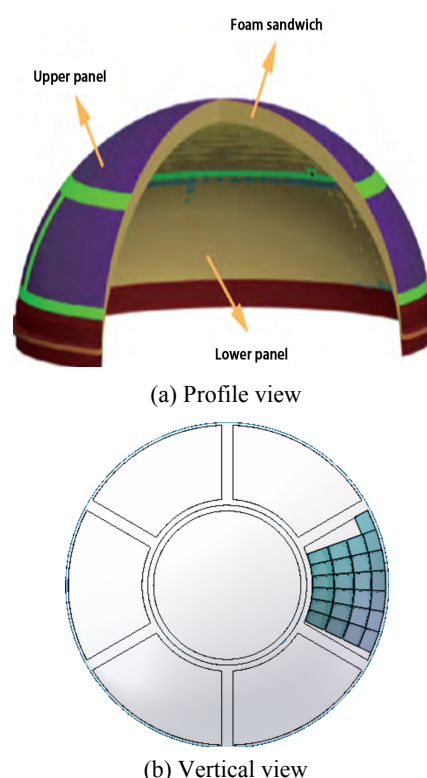


图1 夹层共底结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of sandwich common bottom structure

夹层共底结构采用型号为 ThermPulse C6000 便携红外无损检测设备进行检测,如图2所示,热激励源为闪光灯,脉冲宽度为1~10 ms,闪光灯最大能量为6000 J,红外热像仪分辨率为400 pixel×300 pixel,帧频为100 Hz,单次检测最大面积为300 mm×225 mm,检测过程中需要考虑周围重叠区域,通过在4个角点贴圆点,把子区域划分为280 mm×210 mm,因此单个区域有效检测面积为280 mm×210 mm。多工程检测过程中所有参数设置如下,闪光灯能量为6000 J,脉冲宽度为3 ms,采集时间为10 s,帧频为100 Hz,共采集1000帧图像。



图2 便携红外无损检测设备

Fig.2 Portable infrared nondestructive testing equipment

1.2 夹层共底结构红外图像特征分析

红外图像本身存在图像分辨率低、对比度低、信噪比低、边缘特征不明显的特点。另一方面,夹层共底结构检测采用主动式热激励源对试件表面进行热激励,通过红外热像仪采集夹层共底试件表面降温过程的红外序列图像。在降温过程中,热波(变化的温度场)由于三维热扩散会逐渐与周围区域达到热平衡,从图像上看图像会越来越模糊。如图3所示,展示了不同时刻红外图像,该检测区域为正常区域,未发现缺陷,红外图像中除了能看到4个圆点的信息,其余区域基本是均匀的,灰度变化差异值比较小。除了4个角点外很难找出特征点进行匹配,4个角点进行匹配容易导致匹配错乱的情况,因此采用传统特征点匹配拼接的方式难以拼接好夹层共底结构。

2 红外图像拼接方法

2.1 弧形图像处理

夹层共底结构分为中间区域和侧边6个子区域,中间区域近似为平面结构,侧边6个子区域为弧面结构。弧面结构就不能采用平面进行拼接,应该把平面变成弧面,再由弧面拼接成子区域。

弧形图像处理过程中,变化的参数为角度,平面图变成弧形图角度不同,则最后图像形状会有所不同,由于实际检测图像边缘为黑色,不利于实际效果的展示,弧形图像效果展示采用伪彩色图像,这样可以更加明显地看到平面图像变成弧形图像的过程,弧形图像缺失区域可由白色或者黑色填充,如图4所示,图4(b)和图4(c)对应的是角度分别为 7.5° 和 15° 的弧形图。弧形图的角度取决于检测过程中相邻两个工程实际的角度。侧边6个子区域,每个子区域总角度都为 60° ,每个子区域单层检测8次,则角度为 7.5° 。

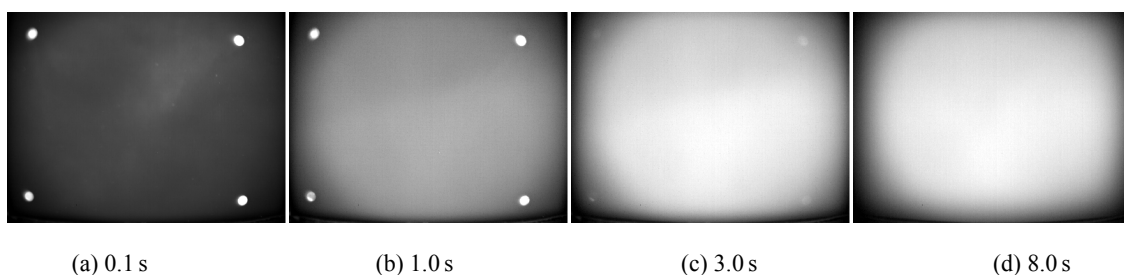


图3 脉冲激励后红外序列图像

Fig.3 Infrared sequence images after pulsed excitation

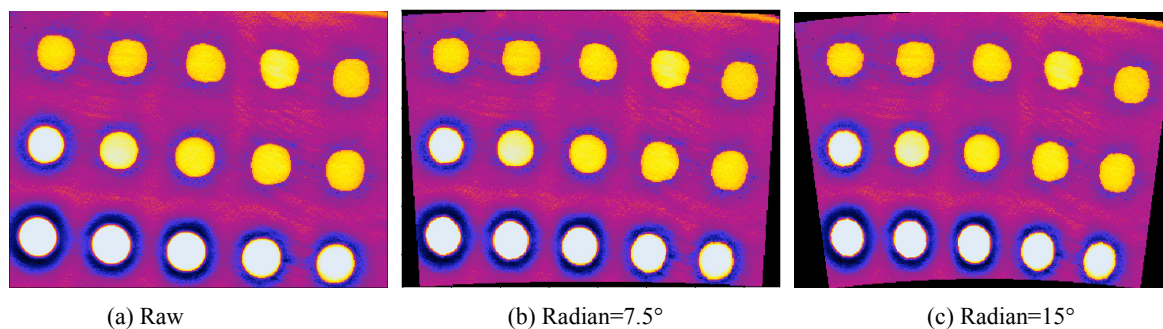


图4 弧形图像处理

Fig.4 Arc image processing

2.2 加权融合算法

图像拼接的目标是把两幅或者多幅图像拼接成一幅无缝的图像。为了实现这个目标,需要在图像拼接过程中不留下拼接缝隙。由于拼接的两幅图像不是在一个工程中采集的,不可避免地受到各种不确定因素的影响,例如闪光灯能量不均匀、图像对齐程度、图像噪声等。如果将这些图像简单叠加起来,必然导致图像重叠区域产生明显的接缝,达不到图像无缝拼接的目标。

为使得重叠区域平滑,提高拼接图像质量,采用加权融合算法,使得重叠区域过渡平滑,以免图像出现明显的拼接痕迹。在重叠区域由前一幅图像逐渐过渡到第二幅图像,图像重叠区域像素按照一定的权值相加,从而合成拼接图像,本次拼接中采用的是灰度图像拼接,不用考虑RGB颜色通道。令对应的前后两幅图像重叠部分对应的灰度值分别是 g_1 和 g_2 ,则对应重叠的灰度值可以通过下式计算得到:

$$Y_1 = d \cdot g_1 + (1 - d) \cdot g_2 \quad (1)$$

式(1)中: Y_1 是融合后像素大小; 参数 d 是加权系数, 用来调和相邻图像的过渡色, 产生加权平均的效果, 取值范围在 $[0,1]$ 之间, 对于图像 1 而言, 重叠区域最左边加权系数为 1, 重叠区域最右边加权系数为 0, 图像 2 正好相反; 在两幅图像重叠区域中, 随着像素位置的变化, 加权系数 d 随着像素位置的变化而发生变化, 如图 5 所示。

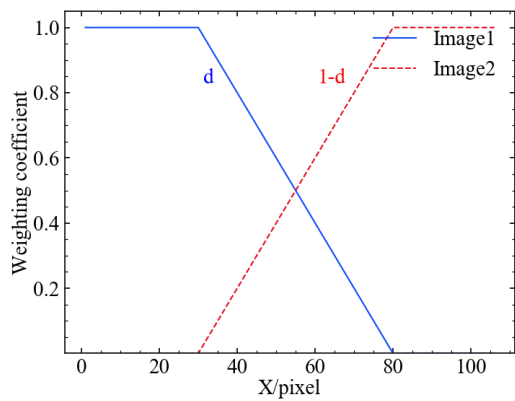


图 5 加权系数图像
Fig.5 Image of weighting coefficient

3 图像拼接结果与分析

为了验证本文采用的基于固定重叠区域的夹层共底结构红外图像拼接方法有效性, 采用了侧边 6 个

小区域进行验证和中间区域进行对比分析, 将直接拼接结果和加权融合拼接结果进行对比。本文采用的计算机配置为 Intel (R) Core(TM) i7-9700K CPU 以及 16 G 内存, 采用 Python3.6 进行算法的计算。

3.1 拼接图像局部区域

为了说明加权融合在图像拼接过程中的处理效果, 采用平面拼接和弧形拼接图像来说明, 图 6 为平面拼接效果, 采用直接叠加方式拼接图像, 很明显看出有很重的拼缝; 而采用加权融合的方式, 基本看不到拼缝痕迹。由于拼接图像来源于不同的采集工程, 采集过程中由于热激励的非均匀性, 热激励源左边和右边存在不均匀性, 导致图像左边和图像右边会出现灰度不一致的情况, 同时边缘区域比中间区域要偏暗一些, 拼接过程是图像右边拼接图像左边, 所以会存在两张图像灰度值有差别的情况。

图 7 为弧形拼接结果图像, 弧形图像存在于夹层共底结构侧边 6 个子区域, 弧形图像拼接, 首先采用弧形图像处理算法把平面图像转为弧形图像, 转换完成后完成拼接, 拼接过程与平面图像拼接基本一致。如图 7 所示, 采用直接叠加方式可以看到很明显的拼缝, 如图 7(a)所示; 图 7(b)为采用加权融合方式得到的结果, 基本上看不到拼缝信息。

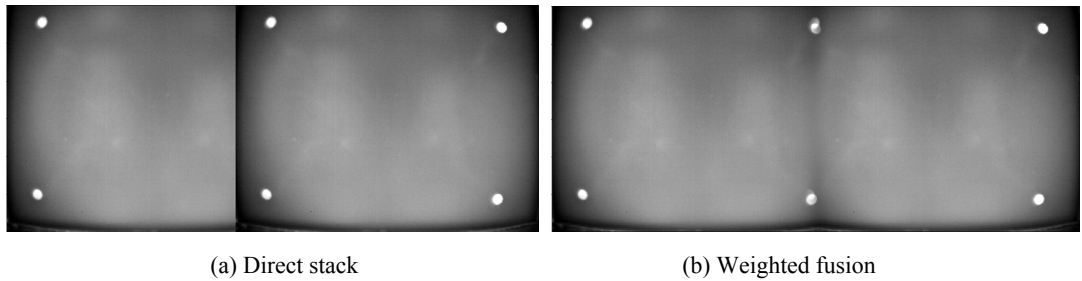


图 6 使用两种方法的平面拼接结果
Fig.6 The results of planar stitching using two methods

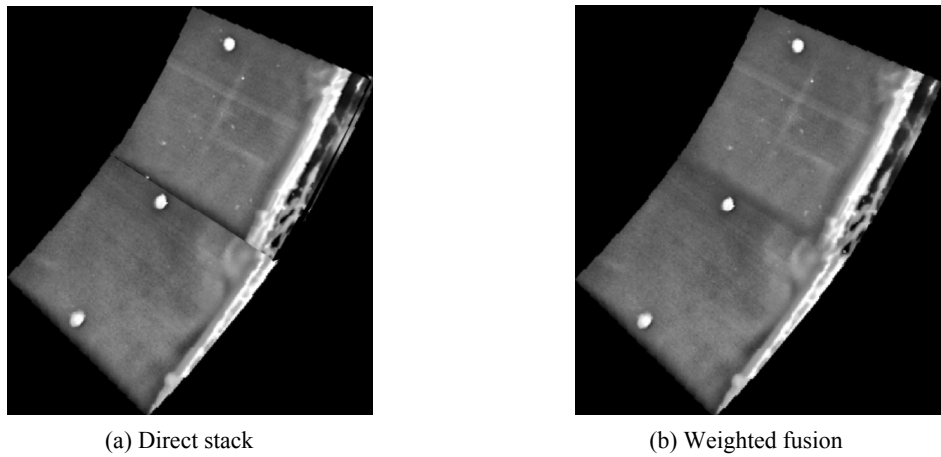


图 7 弧形拼接结果
Fig.7 Results of arc-shaped splicing

3.2 拼接图像全域

以夹层共底结构下面板为例,共划分为236个小区域,需要采集236个工程,采集过程中确保采集条件不变,对236个工程图像进行拼接,夹层共底结构中间区域采用平面拼接方式,侧边6子区域采用弧形拼接方式,侧边6子区域边缘采用黄色线隔开,拼接效果如图8所示。夹层共底拼接图像可以全局看检测图像,选择拼接图像可以采用原始图像,也可以选择一阶导图像、二阶导图像,本图选用的是原始图像拼接。

夹层共底图像拼接可以更直观地看到检测后的结果,并且有位置信息,与实际产品会有差别,夹层共底实际上存在三维空间,本文采用的拼接为二维平

面拼接,并未考虑到夹层共底的高度信息,但基本上不影响采用拼接图像对所有工程检测结果展示。在检测完成后可以采用软件对单个工程进行缺陷打标,打标时可以采用矩形、圆形、椭圆对缺陷区域进行标注,标注完成后,在拼接图像中可以直接展示缺陷位置,缺陷区域用红色区域表示,缺陷分布效果如图9所示,缺陷分布图像可以更加清晰地反映缺陷位置,实际缺陷判定过程中,需要明确相邻缺陷的距离。例如面积大于 200 mm^2 的两缺陷之间的距离必须大于 400 mm ,如果两缺陷之间的距离小于 400 mm ,则该缺陷不能被忽略,如果两缺陷之间的距离大于 400 mm ,则该缺陷可以被忽略,采用拼接以后的图像相邻距离相对比较判断出来。

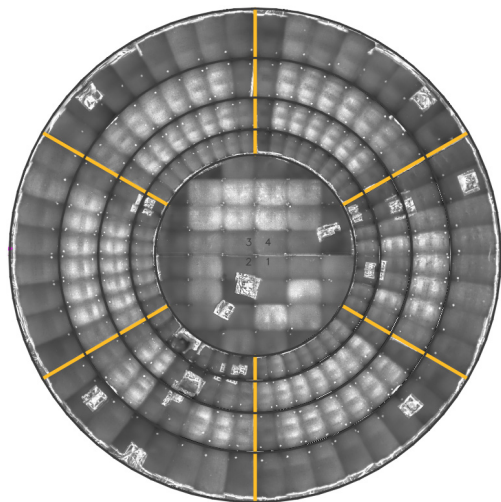


图8 夹层共底图像拼接结果

Fig.8 Mosaic results of sandwich bulkhead image

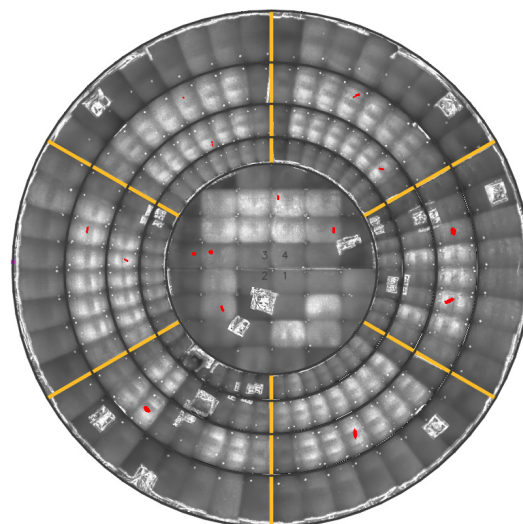


图9 夹层共底图像缺陷分布

Fig.9 Defect distribution of sandwich bulkhead image

4 结语

夹层共底结构是火箭结构中的重要组成部分,负责承受火箭的重量和压力,其安全性和可靠性至关重要。

本文采用的是红外无损检测技术对夹层共底结构进行无损检测,由于夹层共底结构体积庞大,单次无法完成检测,需要数百次才能完成检测。多工程图像非常难实现对缺陷的定位和判断,本文通过红外图像拼接方式对数百次的检测工程进行拼接,采用固定重叠区域的红外图像拼接方法,重叠区域采用加权融合方式可有效消除拼缝。采集工程缺陷标注后,拼接图像直接显示缺陷的位置信息,有利于夹层共底结构缺陷的判断和检修,具有较大的实用性和应用价值。未来,可以进一步探索更高效和更高精度的多工程图

像拼接方法,例如基于4个角点的全自动拼接,以满足红外无损检测领域更详尽的需求。

参考文献:

- [1] 王彬,杨瑞生,郑卫东,等. 运载火箭共底贮箱加注过程非稳态温度分布数值模拟[J]. 化工学报,2020,71(S01): 68-76.
WANG B, YANG R S, ZHENG W D, et al. Numerical simulations on unsteady temperature distribution of sandwich bulkhead tank in launch vehicle[J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(S01): 68-76.
- [2] 湛利华,关成龙,黄诚,等. 航天低温复合材料贮箱国内外研究现状分析[J]. 航空制造技术,2019,62(16): 1-9.
ZHAN L H, GUAN C L, HUANG C, et al. Analysis of research status of composite cryotank for space[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(16): 1-9.

- [3] 孙培杰, 李鹏, 张振涛, 等. 新一代运载火箭共底贮箱隔热性能试验及环境预示[J]. 上海航天, 2014, **31**(5): 54-59.
SUN P J, LI P, ZHANG Z T. Experimental and numerical investigation of heat insulation performances of coplanar tanks in new generation launch vehicle[J]. *Aerospace ShangHai*, 2014, **31**(5): 54-59.
- [4] 李茂, 韩涵, 唐杰, 等. 大温差隔热共底在运载贮箱中的应用研究[J]. 上海航天, 2016, **32**(B05): 43-50.
LI M, HAN H, TANG J. Application of PMI foam cored sandwich bulkhead tank in launch vehicle[J]. *Aerospace ShangHai*, 2016, **32**(B05):43-50.
- [5] 江海军, 陈力, 张淑仪. 激光扫描红外热波成像技术在无损检测中的应用[J]. 无损检测, 2014, **36**(12): 20-22.
JIANG H J, CHEN L, ZHANG S Y. Applications of the laser scanning infrared thermography for nondestructive testing[J]. *Nondestructive Testing*, 2014, **36**(12): 20-22.
- [6] 郑凯, 江海军, 陈力. 红外热波无损检测技术的研究现状与进展[J]. 红外技术, 2018, **40**(5): 401-411.
ZHENG K, JIANG H J, CHEN L. Infrared thermography NDT and its development[J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(5): 401-411.
- [7] 刘颖韬, 郭广平, 杨党纲, 等. 脉冲热像法在航空复合材料构件无损检测中的应用[J]. 航空材料学报, 2012, **2**(1): 72-77.
LIU Y T, GUO G P, YANG D G. Pulsed thermography of composite components used in aerospace applications[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, **32**(1): 72-77.
- [8] 郭伟, 董丽虹, 徐滨士, 等. 主动红外热像无损检测技术的研究现状与进展[J]. 无损检测, 2016, **38**(4): 58-66.
GUO W, DONG L H, XU B S, et al. Research status and progress of active infrared thermographic nondestructive testing[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, **38**(4): 58-66.
- [9] 刘颖韬, 郭广平, 曾智, 等. 红外热像无损检测技术的发展历程、现状和趋势[J]. 无损检测, 2017, **39**(8): 63-70.
LIU Y T, GUO G P, ZENG Z, et al. The development history, status and trends of infrared thermographic nondestructive testing[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, **39**(8): 63-70.
- [10] 孙艳丽, 周伟, 张亚周, 等. 基于 SIFT 的航空侦查图像拼接算法[J]. 电子测量技术, 2020, **43**(19): 112-116.
SUN Y L, ZHOU W, ZHANG Y ZH, et al. Image mosaic algorithm of aerial investigation based on SIFT[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, **43**(19): 112-116.
- [11] 黄康, 王明泉, 张俊生, 等. 基于 SURF 算法的射线底片拼接技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, **40**(2): 93-97.
HUANG K, WANG M Q, ZHANG J SH, et al. Research on image stitching of radiographic technology film based on SURF stitching algorithm[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, **40**(2): 93-97.
- [12] Leutenegger S, Chli M, Siegwart R Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints[C]//*Proceedings of 2011 International Conference on Computer Vision. Barcelona*, 2011: 2548-2555.
- [13] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C]//*Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision*, 2011: 2564-2571.