

工业CT检测技术在5 kN发动机研制中的应用

吕延达 陈亦维 郭洪勤 陈明亮

(上海空间推进研究所, 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

文 摘 针对5 kN发动机结构焊缝和复合材料喷管不可检不可测的难题,开展了工业CT检测技术研究。分析了复杂结构焊缝和复合材料喷管的常规方法检测难点,利用工业CT检测技术穿透能力强、不受工件复杂结构影响的优势,对5 kN发动机产品中的电子束焊缝、氩弧焊缝、复合材料喷管等结构进行了检测试验,得到了良好的检测效果。结果表明,工业CT检测技术可以识别5 kN发动机产品中的气孔、未焊透、分层、裂纹等缺陷,并实现对缺陷的定位与测量,可为焊缝质量评估提供依据。

关键词 5 kN发动机, 焊缝, 工业CT, 检测

中图分类号: V435

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.04.017

Application of Industrial CT Detection Technology in Defect Inspection of 5 kN Engine

LYU Yanda CHEN Yiwei GUO Hongqin CHEN Mingliang

(Shanghai Institute of Space Propulsion Shanghai, Shanghai Space Engine Engineering Research Center, Shanghai 201112)

Abstract In order to solve the problem that the structure welding and composite nozzle of 5 kN engine could not be detected, the industrial CT detection technology was studied. Based on the analysis of the difficulties in the conventional methods in detecting complex structure weldings and composite nozzles, and taken the advantages of industrial CT detection technology, such as strong penetration ability and not affected by the complex structure of the workpiece, the structures of electron beam weldings, argon arc weldings and composite nozzles in 5 kN engine products were tested, and good detection results were obtained. The test results show that the industrial CT detection technology can solve the inspection problems of structural welding and composite nozzle in 5 kN engine products, realize the identification, location and measurement of defects such as porosity, incomplete penetration, delamination and crack, and provide the basis for welding quality evaluation.

Key words 5 kN engine, Welding, Industrial CT, Testing

0 引言

5 kN发动机作为上面级动力系统的关键产品,在型号飞行过程中为上面级提供变轨动力,使其具有长时间在轨飞行、多次启动等能力,起着决定成败的作用^[1]。5 kN发动机主要由推力室头部、再生冷却身部和复合材料喷管延伸段组成。推力室头部的喷注器盘与燃料盖板之间采用电子束焊焊接,喷注器盘与顶盖通过电子束焊焊接。推力室头部与身部先进行电子束焊接,再通过连接环分别与头部、身部进行电子束焊接^[2]。此处的对接焊缝均要求 I 级焊缝标准,角接焊缝要求 II 级焊缝标准。这些焊缝若失效,会直接导致发动机工作异常,而发动机作为上面级任务的关键单点环节,其工作的正常与否将会影

响整个任务的成败。5 kN发动机喷管延伸段材料采用轻质、高模量的 C/SiC 复合材料铺层缝合再经聚碳硅烷真空高温裂解、浸渍而成,这是近年来发展较快的一种陶瓷基复合材料,可以减轻发动机结构质量,提升发动机的性能^[3]。随着 C/SiC 复合材料喷管在火箭发动机上的研究和使用的日益增多,其产品本身的生产质量及使用过程中的检测问题也逐渐受到设计人员的重视。

由于结构和材料本体等种种原因,在常规无损检测领域,5 kN发动机不可检不可测,目前通过焊缝工艺件剖切检测熔深、产品后期整体进行强度和气密等手段客观证明产品的质量。计算机断层扫描成像无损检测技术(简称工业CT)是近年来发展较快的

收稿日期:2020-06-22

第一作者简介:吕延达,1989年出生,本科,工程师,主要从事推进系统无损检测技术工作。E-mail:522256847@qq.com

一种先进无损检测方法,射线穿透过试件强度发生变化,在探测器上就会呈现为不同的灰度^[4],因此通过图像灰度的变化情况便能分析出截面密度的变化,进而分析出缺陷的位置、大小。本文介绍了5 kN发动机在研制过程中遇到的一些检测难题,采用工业CT方法全面对5 kN发动机内部焊缝和喷管延伸段的复合材料进行检测。

1 5 kN发动机产品检测难点

1.1 喷注器盘与燃料盖板的焊接

在发动机实际工作中,喷注器盘与燃料盖板的焊缝需要氧化剂与燃料的两面反复承压,一旦出现该焊缝泄露,将会直接导致5 kN发动机头部意外点火、爆炸,最终导致型号任务失败。

焊缝为电子束焊,如图1、2所示。喷注器盘与燃料盖板共5条电子束焊焊缝,内侧4圈焊缝为对接焊缝,焊缝要求I级;最外圈焊缝为角焊缝,焊缝要求I级。从产品尺寸上看,焊缝熔深仅0.8~1.3 mm,焊缝顶部至喷注器盘底部为12 mm,大厚度板上的浅焊缝不易分辨;从产品结构上看,射线照相检测无法布片,超声、涡流检测没有位置放置探头。

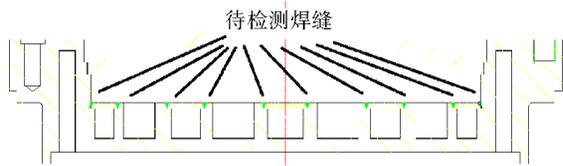


图1 喷注器盘与燃料盖板焊接

Fig. 1 Welding of injector disk and fuel cover

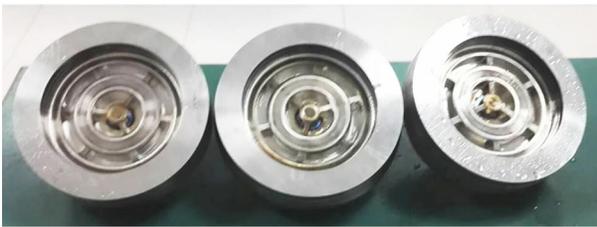


图2 喷注器盘与燃料盖板焊接实物照片

Fig. 2 Photographs of weld between injector disk and fuel cover

1.2 顶盖组件

图3给出了喷注器组件与顶盖组件焊接结构,该

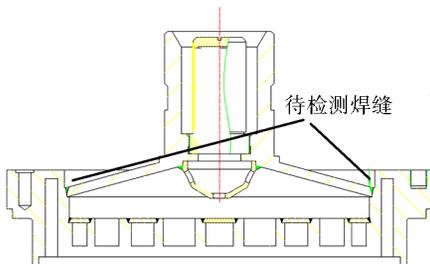


图3 喷注器组件与顶盖焊接

Fig. 3 Welding of injector component and top cover

焊缝采用电子束焊接,焊缝要求I级。从图上看,产品结构复杂,焊缝周围结构的遮挡,使常规射线、超声等检测手段受到了限制。

1.3 头身对接焊缝

推力室头部与再生冷却身部先通过电子束焊接,隔离高温燃气与冷却剂;再通过连接环分别与推力室头部和身部进行焊接,固定头身位置,使冷却剂流入喷注器燃料集液腔;最后在连接环与身部连接位置进行氩弧焊角焊,如图4所示。

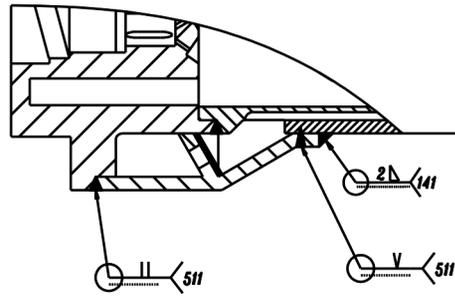


图4 头身连接结构图

Fig. 4 Head-body connection structure diagram

头部与身部的内焊缝焊接为电子束焊,焊缝要求I级。射线照相检测双壁单影斜入射的工艺方法可以实现,但几条焊缝依次成型,无法进行单独检测。

图4所示左边外焊缝为连接环与头部的焊接,采用电子束焊,焊缝要求I级。因头部内部存在复杂的喷注盘、孔等结构,故射线照相检测方法基本排除。

图4所示右边外焊缝为连接环与身部的焊接,先在拐角位置处采用电子束焊,对连接环与身部进行固定,焊缝要求I级,然后在身部与连接环的连接部位进行角焊缝的氩弧焊焊接。因身部的内壁与外壁之间存在流道,且相互之间通过扩散焊连接,流道的结构和扩散焊缝内部缺陷可能会影响这两条焊缝的判断。

1.4 喷管延伸段

喷管延伸段材料采用三向编织的C/SiC复合材料变壁厚结构,从小段处壁厚3 mm减至喷管出口处1.5 mm。在无相应验收标准参考的情况下,设计根据产品性能指标定义检测要求为“产品内部无穿层贯通的裂纹,气孔均匀,对于法兰端以下150 mm内的气孔径向尺寸应小于1.5 mm,面积小于10 mm×10 mm”。

近年出现很多对复合材料的检测技术方法,例如数字射线检测^[5],可以检测出产品中的夹杂、气孔等缺陷;超声水浸C扫描检测,需要产品与水接触一定的时间(2 h左右),可以检出中产品的分层、裂纹

等缺陷。但复合材料由于组成结构及制造工艺的复杂性,缺陷形式与通常均匀材料有很大差别,通常表现为疏松、孔隙较多、分层、密度不均匀和明显的各向异性等特点。

2 工业CT在5 kN发动机研制中的应用

2.1 检测设备

CT检测设备的技术参数如下:微焦点射线源,焦点尺寸 $0.6\ \mu\text{m}$,功率不大于90 W;双焦点射线源,焦点尺寸 $0.4\ \text{mm}/1.0\ \text{mm}$,功率不大于700 W;线阵列探测器,像素尺寸 $0.256\ \text{mm}$,长度600 mm,面阵列探测器,像素尺寸 $0.2\ \text{mm}$,外观尺寸 $400\ \text{mm}\times 400\ \text{mm}$;二代扫描,线阵列切层检测,空间分辨率6 lp/mm;三代扫描,面阵列锥束整体检测,空间分辨率23 lp/mm;最大穿透能力60 mm Fe。

2.2 产品检测与缺陷判定

2.2.1 喷注器盘与燃料盖板的焊接

018次试车5 kN产品燃料盖板的焊接为激光焊,因无工业CT检测方法对焊缝质量的判别标准,只能参考射线照相的标准,焊缝允许的气孔最大尺寸符合激光焊I级要求,但缺陷间距和数量不满足要求,如图5(a)所示。因焊缝的熔深仅 $0.4\sim 0.6\ \text{mm}$,又面临产品的液压气密试验无法实施的问题,无法真正考核到焊缝的耐压能力,经设计综合考虑后,改激光焊为电子束焊,熔深增加为 $0.8\sim 1.3\ \text{mm}$,使用工业CT检测焊缝缺陷,如图5(b)所示,焊缝锁底上方无气孔。



(a) 激光焊 (b) 电子束焊

图5 喷注器盘与燃料盖板的焊接工业CT检测结果

Fig. 5 Welding industrial CT test results of injector disk and fuel cover plate

2.2.2 顶盖组件

采用工业CT检测同样对该焊缝使用二代扫描方式,采用线阵列切层对焊缝进行检测,切层距离须大于焊缝的熔深尺寸。具体检测工艺为电压400 kV,电流1.6 mA,积分时间100 ms,投影1 800张,每层0.5 mm,层间距0.5 mm,每件产品扫描6层。缺陷判别同样参考射线照相的标准,检测未见缺陷,如图6所示。

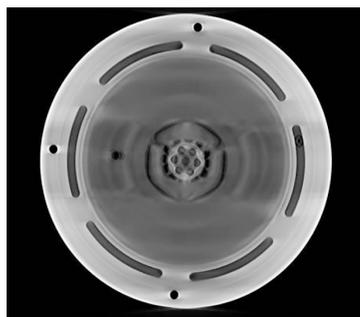
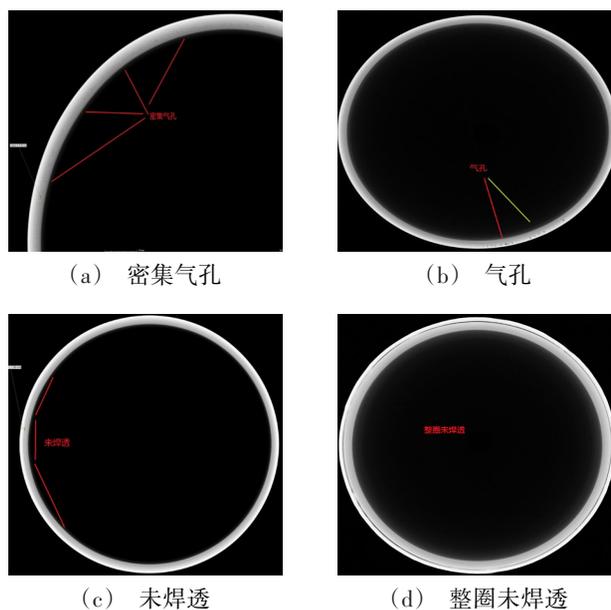


图6 喷注器组件与顶盖组件焊缝CT检测结果

Fig. 6 CT inspection of weld seam between injector assembly and top cover assembly

2.2.3 头身对接内焊缝

由于该处位置焊缝壁厚不大,采用工业CT检测方法对该焊缝使用二代扫描方式,采用线阵列切层对焊缝进行检测,切层距离须大于焊缝的熔宽尺寸。具体检测工艺为电压300 kV,电流2 mA,积分时间80 ms,投影1 440张,每层0.5 mm,层间距0.5 mm,每件产品扫描5层。图7所示为CT切层图片,四件产品为试验件,图中明显可见气孔、未焊透缺陷,实际产品锁底上方未见气孔。



(a) 密集气孔 (b) 气孔
(c) 未焊透 (d) 整圈未焊透

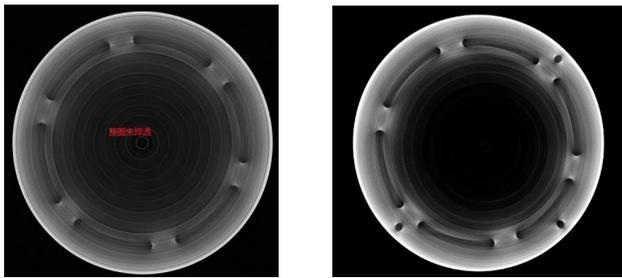
图7 头身对接内焊缝CT检测图片

Fig. 7 CT inspection picture of body butt internal weld

2.2.4 连接环与头部的对接外焊缝

采用工业CT检测方法对该焊缝使用二代扫描方式,采用线阵列切层对焊缝进行检测,切层距离须大于焊缝的熔宽尺寸。具体检测工艺为电压430 kV,电流1.55 mA,积分时间120 ms,投影1 800张,每层0.5 mm,层间距0.5 mm,每件产品扫描5层。图8给出了焊缝的检测结果,图8(a)可见试验件中的未焊透,图8(b)为实际产品的焊缝检测,未见明显

缺陷。



(a) 未焊透 (b) 未见缺陷

图8 头身对接内焊缝CT检测图片

Fig. 8 CT image of head-to-body butt weld

2.2.5 连接环与身部的对接外焊缝

采用线阵列切层对焊缝进行检测,切层距离须大于焊缝的熔宽尺寸。具体检测工艺为电压350 kV,电流1.8 mA,积分时间80 ms,投影1440张,每层0.5 mm,层间距0.5 mm,每件产品扫描8层。图9给出了焊缝的检测结果,图9(a)明显可见试验件中的未焊透,图9(b)为实际产品的焊缝检测,未见明显缺陷。



(a) 未焊透 (b) 未见缺陷

图9 连接环与身部的对接外焊缝CT检测图片

Fig. 9 CT inspection picture of butt weld between connecting ring and body

2.2.6 喷管延伸段

采用微焦点射线源与面阵探测器结合的组合方式,进行第三代锥束扫描。由于使用微焦点射线源,放大倍数应尽可能的大,分辨率尽可能的高。具体检测工艺为电压140 kV,电流0.5 mA,积分时间500 ms,投影1800张。图10给出了喷管延伸段的检测结果。不仅检测出产品的裂纹、分层、气孔等缺陷,还可以对气孔缺陷进行孔隙率分析,如图11所示,可以得到复合材料内部的气孔大小分布、气孔位置分布、气孔体积占比等数据,供设计人员统计参考使用。

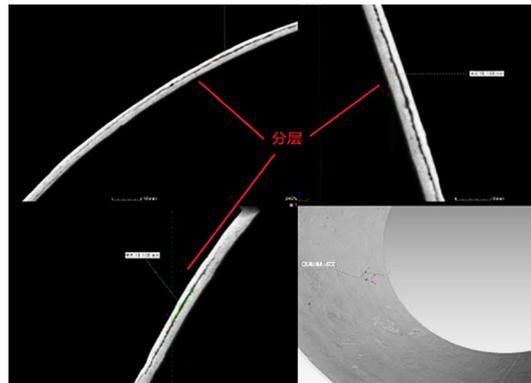
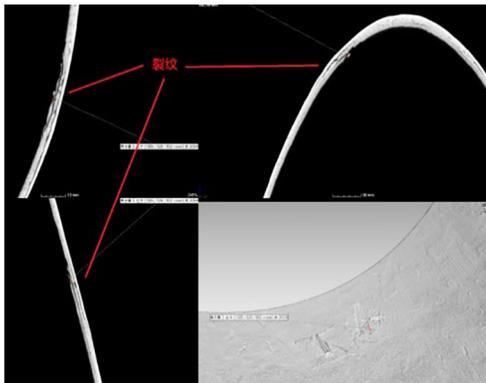


图10 C/SiC复合材料喷管延伸段检测结果

Fig. 10 Detection results of nozzle elongation of C/SiC Composites

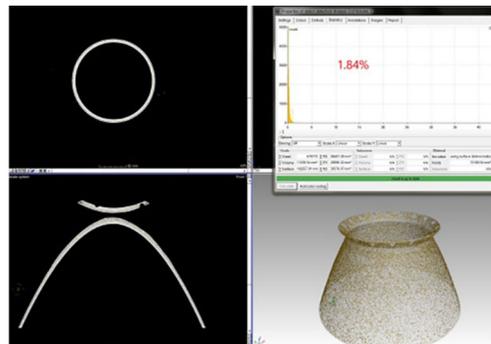
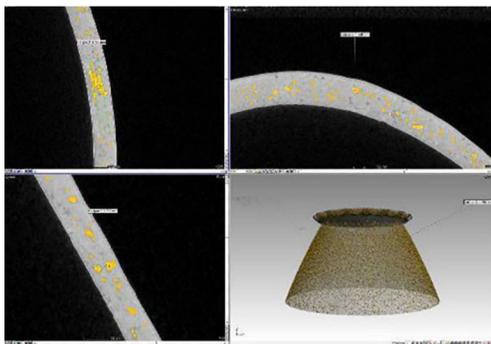


图11 C/SiC复合材料喷管延伸段孔隙率分析结果

Fig. 11 Porosity analysis results of nozzle elongation section of C/SiC Composites

2.3 检测情况与试车考核结果

5 kN 发动机研制过程中,始终采用工业 CT 检测技术对各处焊缝和喷管延伸段内部材质进行质量控制,表 1 汇总给出了自 5 kN 研制以来,各不同位置处焊缝、喷管的检测子样数和实际检测结果,检测结果表明工业 CT 检测可以识别出各位置处的缺陷,通过游标卡尺测量出气孔的具体尺寸,计算出喷管延伸段中气孔在整个复合材料中的体积占比,给设计人员提供判断依

据。5 台发动机经历了 7 次地面热试车,发动机累计点火 17 074 s,累计点火 680 次,发动机均点火正常,工作可靠;2018 年 12 月 29 日,5 kN 发动机在酒泉卫星发射中心随远征三号上面级首飞飞行应用,发动机累计启动 21 次,累计点火时间 1 034 s,圆满完成了多部部署飞行任务。上述 5 kN 发动机地面热试车结果和首次飞行结果表明,工业 CT 检测技术可以有效检测多种质量缺陷,保证发动机产品工作的可靠性。

表 1 各位置处工业 CT 检测情况
Tab. 1 Industrial CT testing at various locations

产品编号	燃料盖板	顶盖组件	头身内焊缝	头身外上焊缝	头身外下焊缝	氩弧焊缝	喷管延伸段	
							最大气孔尺寸/mm	孔隙率/%
018 次试车 14-01-001	气孔超标	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	小气孔	0.86	3.48
020 次试车 15-01-001	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	小气孔	0.98	1.63
系统试车 15-01-002	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	小气孔	1.12	1.76
结构器 15-01-003	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	小气孔	1.15	1.45
Y116-01-001	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	小气孔	1.35	1.84
试样试车 17-01-001	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	无气孔	小气孔	1.34	2.08

3 5 kN 发动机工业 CT 检测标准的探讨

5 kN 发动机内部焊缝大部分为电子束焊缝,参考 GJB1718A—2005《电子束焊接》,少部分为氩弧焊焊缝,参考 QJ1842A—2011《结构钢、不锈钢熔焊技术条件》,这些焊接标准中关于未焊透、未熔合、裂纹等的描述为不允许,对于工业 CT 检测方法同样使用。但是关于气孔大小、间距与数量的描述时基于射线照相检测中投影图像的概念,而对于工业 CT 检测中断层图像中是否适用,还需要进一步研究和探讨。

对于 C/SiC 复合材料的检测,工业 CT 检测技术不仅对复合材料内部的气孔、裂纹、分层、夹杂等缺陷具有良好的检测效果,还能准确地对气孔缺陷进行分析、测量、统计,基本可以做到对缺陷的自动化分析与识别。但在复合材料的评价上,型号人员根据前几次的试车结果将喷管的径向缺陷由不小于 1 mm 修改至不小于 1.5 mm,随着试车和飞行子样的增加,针对复合材料的判别标准越来越精确。

4 结论

(1)工业 CT 检测技术对结构复杂的电子束焊焊缝、氩弧焊焊缝可以有效地检测,焊缝中的未焊透、气孔等缺陷清晰可见。

(2)工业 CT 检测技术对复合材料气孔、裂纹、分层等缺陷可以有效地检测,并可对缺陷进行尺寸测量。

(3)采用工业 CT 检测技术,可以解决 5 kN 发动

机研制过程中的焊缝检测难题,消除检测的薄弱环节,提高产品的可靠性。

参考文献

- [1] 孙鑫,杨成虎,等. 5 kN 再生冷却发动机推力室传热研究[J]. 火箭推进,2012,38(2):32-37.
- [2] SUN Xin, YANG Chenghu, et al. Heat transfer investigation for 5 kN regeneratively-cooled engine thrust chamber[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 38(2): 32-37.
- [3] 陈明亮,陈泓宇,等. 一种火箭发动机头部和再生冷却身部的新型连接结构[P]. CN 106050474 A, 2016. 10. 26.
- [4] CHEN Mingliang, CHEN Hongyu, et al. A new connecting structure of the head of the rocket engine and the regenerative cooling body[P]. CN 106050474 A, 2016. 10. 26.
- [5] 刘昌国,邱金莲,等. 液体火箭发动机复合材料喷管延伸段研究进展[J]. 火箭推进,2012,45(4):1-88.
- [6] LIU Changguo, QIU Jinlian, et al. Research progress of composites nozzle extension for liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 45(4): 1-88.
- [7] 徐向群. 工业 CT 检测[M]. 国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材,2012:30-46.
- [8] XU Xiangqun. Industrial CT testing[M]. National Defense Science, Technology and Industry Non-destructive testing Personnel Qualification and Certification Training Materials, 2012:30-46.
- [9] 郑世才,王晓勇,等. 数字射线检测技术[M]. 北京:北京机械工业出版社,2015.
- [10] ZHENG Shicai, WANG Xiaoyong, et al. Digital X-ray detection technology[M]. Beijing: Beijing China Machine Press, 2015.