

# 液体火箭发动机钎焊、扩散焊质量检测技术研究

单黎波, 金作花, 贺云龙, 康琳琦, 洪 岩, 秦建刚  
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 现代液体火箭发动机的推力室钎焊身部、发生器钎焊身部及游机推力室钎焊身部均是在高温、高压环境下工作, 采用波纹板和铣槽式结构, 而这种结构的钎焊和扩散焊的焊接质量直接关系到产品的承压强度及冷却效果。因此, 对钎焊和扩散焊的质量检测尤为重要。着重讨论了对波纹板结构和铣槽结构的钎焊、扩散焊质量采用不同无损检测方法进行检测时, 方法的可行性和存在的问题, 并给出不同方法对产品的可检测性结论。

**关键词:** 钎焊; 扩散焊; 波纹板; 铣槽; 检测

**中图分类号:** V463

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2009) 06-0047-05

## Testing techniques of brazing and diffusion welding quality of liquid rocket engine

Shan Libo, Jin Zuohua, He Yunlong, Kang Linqi, Hong Yan, Qin Jiangang  
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In view of high temperature and high pressure operating environment, brazed bodies of thrust chamber, generator and vernier engine of modern liquid rocket engines adopt corrugated plate and milled groove structures. The brazing and diffusion welding quality directly affects the compressive strength and cooling effect of the product. Therefore, the testing of brazing and diffusion welding quality is of great importance. The paper discussed the feasibility and existing problems of testing brazing and diffusion welding quality of corrugated plate and milled groove structures by various NDT techniques. Testability of different methods was also defined.

**Key words:** brazing; diffusion welding; corrugated plate; milled groove; testing

收稿日期: 2009-08-07; 修回日期: 2009-09-03。

作者简介: 单黎波 (1962—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机系统质量控制及检验技术。

## 0 引言

推力室钎焊身部、发生器钎焊身部及游机推力室钎焊身部是液体火箭发动机的重要组成部分。由于它们均是在高温、高压环境下工作,为保证发动机的正常工作,多采用波纹板和铣槽式结构组件,通常采用钎焊或扩散焊工艺技术制造,而这些组件钎焊或扩散焊的质量检测一直是设计、工艺人员最关心的问题之一。同时,因检测方法限制带来组件强度试验时的破坏,还存在潜在风险,必须寻求有效的质量检测方法。

目前,对波纹板和铣槽式结构钎焊、扩散焊焊接质量的检测主要是采用X射线探伤方法。但由于X射线检测的前提是产品内部缺陷部位必须与基体材料有一定的厚度差或密度差,以能在底片上产生肉眼可识别的光学密度差(即最小黑度差),对波纹板结构用X射线进行检测目前的实践证明是可以满足检测要求的;而对于铣槽结构的钎焊焊缝,由于其内壁筋小平面在钎焊后与外壁组合的间隙极小,在大多数情况下,无法在X射线底片上产生肉眼观察所需的黑度差,因此X射线检查基本上无法达到检查效果。对于扩散焊焊缝来讲,根本没有传统意义上的焊缝,其两个平面的贴合较钎焊更加紧密,用X射线对其焊接质量无法进行检测。因此X射线检测通常只能对铣槽结构钎焊、扩散焊中的通道堵塞和多余物进行检查。

因此,钎焊、扩散焊等重要焊缝的质量检测,仅用X射线检测的方法是无法满足要求的。目前,一些宇航技术较发达的国家,已将激光全息照相技术、超声波C扫描技术及计算机层析技术(工业CT)等方法应用于液体火箭发动机的主要零、部、组件的检测。

## 1 液体火箭发动机钎焊、扩散焊的结构特点

液体火箭发动机上钎焊、扩散焊组件典型结构:一是板式内、外壁中间夹波纹板结构;二是铣槽式内壁,外壁为板式,材料通常采用钢-钢

或铜-钢等组合。

### 1.1 波纹板式钎焊结构和几何尺寸

波纹板式钎焊如图1所示,它表示这种结构的横截面。结构材料为不锈钢,钎料为镍锰基合金。高温钎焊后,钎焊缝成型截面如图2所示。



图1 波纹板钎焊结构

Fig.1 Corrugated plate brazed structure

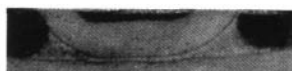


图2 波纹板钎焊缝成型截面( $\times 80$ )

Fig.2 Cross section of corrugated plate brazing weld ( $\times 80$ )

波纹板与内外壁焊前装配间隙为0.12mm(即钎料带厚度),经高温钎焊时内腔抽真空,内外壁发生高温蠕变而向波纹板贴合,此时间隙仅有0.08mm左右。因此波纹板小平面与内外壁的结合钎焊缝厚度为0.08mm左右;并在两侧形成焊缝圆角,其高度在0.4mm左右;整个焊缝共宽2.4mm左右。成型后的焊缝由钎料、基体的化学元素相互扩散后形成的连接接头与焊缝圆角两部分组成。

### 1.2 铣槽式钎焊结构和几何尺寸

铣槽式钎焊结构可分为同种材料间的钎焊和异种材料间的钎焊,但其基本结构是相同的。目前生产中主要应用的是钢-钢钎焊和铜-钢钎焊,也有铝-钢钎焊等。图3所示为发生器钎焊结构局部截面图。结构材料为不锈钢,钎料为镍锰基合金。

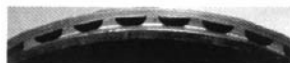


图3 发生器钢-钢铣槽钎焊结构

Fig.3 Steel-steel milled groove brazed structure of generator

内外壁焊前装配间隙为0.12mm(钎料带厚度),高温钎焊时内腔抽真空,外壁高温蠕变向

内壁筋肋小平面对贴合, 贴合紧密, 其间隙仅有 0.02mm, 肉眼观察无明显焊缝和焊角。图 4 为此钎焊焊缝和形成的焊角金相图。

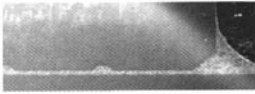


图 4 钢-钢钎焊焊缝和形成的焊角金相图 (×80)  
Fig.4 Metallographic image of steel-steel brazing weld and weld angle (×80)

其他如铜-钢钎焊、铜-铜钎焊等在发动机上也有应用, 结构类似, 内外壁材料、厚度、槽深、槽宽和筋宽, 以及钎焊料都不同; 钎焊料主要是 Cu-Ag 合金钎料,  $d0.12\text{mm}$ 。

### 1.3 铣槽式扩散焊结构

铣槽式扩散焊结构如图 5 所示。结构材料为不锈钢和铬青铜。图 6 为收扩段铜-钢扩散焊焊缝的金相图。

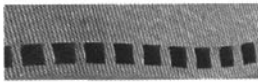


图 5 收扩段铜-钢扩散焊结构  
Fig.5 Copper-steel diffusion welded structure of convergent-divergent section

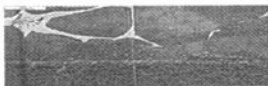


图 6 收扩段铜-钢扩散焊焊缝成形金相图 (×100)  
Fig.6 Metallographic image of copper-steel diffusion welding seam of convergent-divergent section (×100)

在合适的镀层厚度和焊接参数下, 完成扩散焊后所获得的焊接接头, 其强度可以达到基材的强度。

## 2 检测方法探讨

无损检测的方法较多, 但根据其机理和所能检测的缺陷范围, 常分为五大类 (也即通常所说的常规五项): 射线检测、超声波检测、电磁涡

流检测、磁粉检测和渗透检测。随着电子技术和计算机技术及图像处理技术的发展, 这五大常规检测方法也在不断地发展。比如 X 射线实时成像、工业 CT 和超声 C 扫描等。另外随着现代科学的发展, 一些新的检测技术也得到了广泛应用, 如激光全息检测技术、红外热成像检测技术等。

### 2.1 钎焊的 X 射线检测

X 射线检测是在焊缝质量检测中采用的最广泛和最重要的无损检测技术。它是通过 X 射线射入物体后, 光子与物质原子发生相互作用, 产生能量转换 (散射、吸收或衰减), 并引起各种物理效应, 或经某种物理效应而辐射出具有一定能量和特征的射线, 然后根据射线的强度分布来判断缺陷的大小和位置。

#### 2.1.1 X 射线对波纹板结构钎焊的检测

经过长期的实践证明, 对于波纹板结构的钎焊质量采用 X 射线进行检测, 效果较好。

如图 3 示意图所示结构, 在进行 X 射线检测时, 绝对灵敏度应为钎焊缝的厚度, 即 0.08mm 左右。按相对灵敏度要求, 其相对灵敏度应不大于  $S_{wi}$ 。

$$S_{wi} = \frac{0.08}{4.567} \times 100\% = 1.751\% \quad (1)$$

图 7 和图 8 分别为检测出的未钎上和通道堵塞在底片上的影像。

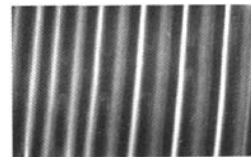


图 7 波纹板与内壁的未钎上  
Fig.7 Incomplete brazing of corrugated plate and inner wall

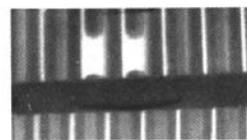


图 8 通道堵塞  
Fig.8 Blocked channel

### 2.1.2 X射线对铣槽结构钎焊和扩散焊的检测

铣槽结构的钎焊质量,目前依然采用的是X射线检测。但由于在钎焊过程中,外壁在高温和压力作用下向筋的小平面蠕变而贴合,结合面很紧密,与波纹板结构仅凭肉眼即可分辨出焊缝和焊缝圆角的情况大不相同。铣槽结构的钎焊和扩散焊焊缝没有传统意义上肉眼可辨识的焊缝及焊缝圆角。

在理论上,由于在这种结构焊接完成后,间隙极小,仅为0.02mm,则在相同的透照情况下可以得到底片的相应对比度很小,几乎无法分辨。也就是说,此时在底片上无法形成可分辨的黑度差。由此可看出,铣槽结构在钎焊后,采用X射线进行钎焊质量的检测是无法达到和实现对未钎上缺陷的检测要求的。

对于扩散焊而言,因其焊接的两平面是在高温和高压下完全紧密接触,两平面间是无间隙可言的,因此也是无法用X射线进行检测的。所以对于铣槽结构的钎焊和扩散焊,只能考虑采用其他检测方法。

同时,对于钎焊和扩散焊质量的X射线检测主要是检查产品中是否存在多余物和焊缝的未钎上以及通道堵塞等缺陷。但对于钎焊、扩散焊焊缝中可能存在的裂纹、气孔、孔洞等其他缺陷,和从而导致的钎着率低等现象,采用X射线检测的方法是无法进行精确检测的,因此通常在X射线检测之后还采用液压强度试验的方法对产品进行考核,以满足产品的实际应用要求。基于此,应考虑其他检测方法在对钎焊、扩散焊质量检测的可行性。

### 2.2 钎焊、扩散焊的其他检测方法简介

经上述讨论,由于X射线在对铣槽结构的钎焊和扩散焊连接接头的质量不具备检测能力,现就可能解决此问题的一些检测方法进行简单介绍。

#### 2.2.1 超声波C扫描检测

超声波检测也是在无损检测中重要的检测技术之一。它是利用产品中存在的缺陷对超声波的反射进行检测的,超声在通过大面积厚度小的异质薄层时,如通过钢中间隙为 $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{mm}$ 的气

隙时,几乎百分之百地反射超声波。对于钎焊和扩散焊组件可能存在的间隙,即使充满钎料,只要未钎上或未焊上的间隙大于 $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{mm}$ ,在该处就会百分之百的产生全反射。因此,从理论上讲,采用超声波检测铣槽结构的钎焊和扩散焊连接接头的质量是一种灵敏度极高的方法,适用于无需知道缺陷存在深度的薄壁组件的钎焊和扩散焊质量。尤其是采用C扫描定量缺陷尺寸的水浸聚焦超声波探伤技术,能以预定的测量精度测定缺陷的最大尺寸,重现性好、信噪比高,能实现自动探伤,减少人为因素,确保检测结果的可靠性。

超声C扫描检测也属于一种非接触式检测方法,通常采用以水作为耦合介质的水浸法,它是将工件置于水中,利用水层厚度减小检测盲区,同时采用点聚焦或线聚焦探头,对工件逐点扫描,因此检测灵敏度很高。水浸法不仅能够保证超声波发射和接收的质量,而且便于实现检测自动化,具有消耗少、不污染工件、稳定性好等特点。国外曾有试验室利用水浸超声C扫描检测系统对气轮机叶片上的焊缝进行检测。在水浸法中,水浸聚焦法倍受青睐,它利用声波经过凹透镜后使声能聚焦的原理制作探头,克服了声束在液体和工件中扩散的不足,提高了声波的指向性。

利用水浸聚焦法检测工件时,由于声波在水与工件材料的界面上产生折射,因此其焦距发生变化。水浸聚焦超声探伤的探头焦点、焦柱直径及焦柱长度是确定缺陷边界尺寸的主要参数,需要计算和实测。

目前,美国已将超声扫描检测技术应用于火箭发动机燃烧室衬套的扩散连接接头的检测,但国内对此技术仍处于实验室开发研究阶段。

另外,用此方法进行检测需分别制作针对不同产品的检测工装,检测周期较长,前期检测设备的投资较大。同时不具备对多余物的检测能力。

#### 2.2.2 激光全息检测

美国、俄罗斯、乌克兰等航天技术比较发达的国家,都已将激光全息检验技术广泛应用于发

动机质量检验,在发动机的主要组件如推力室钎焊身部、发生器钎焊身部、游动钎焊身部。固体火箭发动机壳体、推力室焊缝检测也应用到激光全息检测,并取得了很好的效果,而且其检测手段和检测技术还在不断提高、发展。

激光全息检测是全息照相技术和全息干涉计量技术相结合的综合技术,是一种无接触的快速无损检测方法,它通过外界加载的方法,使被检测物体表面和内部的缺陷在相应的物体表面造成局部的变形,比较工件变形前后产生的两个相干波形状,并对这种微小变形所形成的干涉条纹与正常部位的均匀条纹进行记录、比较,来判断被测物体的内部质量,以达到检测目的。

激光全息检测是激光出现以后发展最快、应用最广的一项技术,该检测技术已有数十年的发展历史,已成功应用于飞机蜂窝夹芯结构的脱粘检测、固体火箭发动机燃料中固体药柱与包覆层间的脱粘检测、汽车轮胎与其它叠层内部的脱粘检测等方面,并取得令人满意的检测结果。俄罗斯液氧/煤油发动机推力室夹层结构的焊接质量检测中也应用到了激光全息检测方法。

激光全息检测具有检测灵敏度高,检测周期短,检测范围广,直观感强等优点。但激光全息的检测需要一个较大的实验室和各类检测工装,设备前期投资较大。同时还不具备对多余物的检测能力。

### 2.2.3 其他检测方法

对于钎焊和扩散焊的检测技术和方法,除 X 射线检测技术、超声波检测技术和激光全息检测技术外,还有一些检测方法可供借鉴。如红外检测技术、激光超声检测技术、微焦点实时成像技术、界面电阻测量法及衍射声时法等。工业 CT 目前已被证明不适用于生产流程中对钎焊、扩散焊进行检测,仅在对产品个别部位需进行分析时可采用。

## 3 结论

由于各种无损检验方法都有一定的适用范围和特点,对钎焊和扩散焊的各种检测方法也各有

其特点。因此对钎焊和扩散钎焊质量进行检测时,应视产品的使用要求、产品的结构,选用两种以上的检测或检验方法检查钎焊和扩散钎焊质量。

(1) X 射线检测对于波纹板钎焊缝的焊接质量、各种钎焊及扩散焊冷却通道是否存在堵塞及多余物有着较好的检测效果,且检测较为快捷;对铣槽结构的钎焊和扩散焊焊接质量无法进行检测,同时对钎焊连接接头内部存在的一些气孔等细小缺陷无法分辨出来。对以上结构在检测的基础上还应增加液压试验考核。

(2) 超声波检测对于钎焊和扩散焊质量有着比较好的检测效果,对通道是否存在堵塞亦能进行相应的判断,但对于冷却通道中是否存在多余物则无检测能力。

(3) 激光全息同样对钎焊和扩散焊有着较好的检测能力,但对检测环境及工装设备要求较高,并对冷却通道是否存在多余物无法进行控制。

综上所述,对于铣槽结构的钎焊、扩散焊质量进行检测,应采用 X 射线检测和超声波检测或激光全息检测相结合的方法进行。这样既可对连接接头的质量进行检测,又可控制冷却通道中堵塞和多余物存在。与此同时,还应增加结构强度方面的考核试验。

### 参考文献:

- [1] 邓健. 钎焊[M]. 机械工业出版社, 1979.
- [2] 张志永. 水浸聚焦超声探伤原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [3] 邱元武. 激光技术和应用[M]. 同济大学出版社, 1997.
- [4] 钢铁, 高桥康夫. 扩散连接接头质量评价现状[J]. 无损检测, 2003, 25(8): 410-414.
- [5] 郭会民, 赵仕哲, 李万万. 熔化极混合气体保护焊工艺研究与应用[J]. 火箭推进, 2007, 33(2): 53-58.

(编辑: 马 杰)