

先进钎焊技术在航天器上的应用

邱惠中

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

文 摘 简略地介绍了先进钎焊技术在航天器部件,例如运载火箭发动机的推力室和涡轮转子、人造卫星的钛导管、姿控发动机喷注器和波导器件、载人飞船的反射器、导管和蜂窝壁板、航天飞机的主发动机喷管和预燃室以及空间站的管路系统等的广泛应用情况。

关键词 钎焊技术,应用,航天器

The Application of Advanced Brazing Techniques to Space Vehicles

Qiu Huizhong

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology Beijing 100076)

Abstract This paper briefly presents the application of advanced brazing techniques for a large number of assemblies of space vehicles, such as thrust chamber and turbine rotor of launch rocket engine, titanium tube of satellite, attitude control engine injector and waveguide component of satellite, reflector, tube and honeycomb panel of manned spacecraft, main engine nozzle and preburner of space shuttle as well as the pipeline systems of space station.

Key words Brazing technique, Application, Space vehicle

前言

钎焊技术是一种近无余量的连接技术,用其代替螺纹连接、铆接等可以明显地减轻构件质量,它可以连接不同种类的材料,接头具有较佳的综合性能,可在高温(或超低温)、高压、腐蚀介质(如硝酸)或太空环境等十分复杂而苛刻的条件下工作。它可以连接用其它方法较难连接的材料(如金属与陶瓷、碳/碳与钛合金等)和制造用其它方法无法制造的结构(如液体火箭发动机波纹板夹层结构推力室)。它生产率效高,一次就能连接数以百计、总长可达几千米的钎焊缝。由于先进的钎焊技术能有效地减轻航天器构件的质量,降低制造成本,增加航天器在商业上的竞争能力,因此国外十分重视先进钎焊技术的发展及其在航天器上的应用。目前,它已成为航天器许多重要部件较关键的制造工艺技术。本文简略地

介绍先进钎焊技术在航天器上的部分应用。

1 在运载火箭上的应用

先进钎焊技术在运载火箭上的应用主要集中在液体火箭发动机系统,例如发动机的推力室、涡轮盘和导管等构件。

1.1 液体火箭发动机推力室

液体火箭发动机是运载火箭的心脏,其推力室主要由燃烧室头部喷注器组合件、燃烧室身部和喷管三部分组成。推力室(以下均指燃烧室身部+喷管)在高温、高压和高速燃气冲刷的恶劣条件下工作,采用再生冷却结构。目前世界上所有大推力液体火箭发动机按其燃烧室压力高低一般可分为中压和高压两种。中压(3 MPa~7 MPa)燃烧室其推力室通常都为钎焊的波纹板夹层结构或管束式结构,高压(7 MPa~21 MPa)燃烧室都采用铣槽式结构;欧美

收稿日期:1999-08-27

邱惠中,1937年出生,高级工程师,主要从事航天材料科技情报工作

宇航材料工艺 2000年 第3期

— 11 —

等国的燃烧室外壁都采用电铸镍内衬套加外壳及加强箍结构,喷管大都为钎焊的管束式结构。前苏联的铣槽式推力室结构简单,由内外壁组成,一般都采用扩散钎焊连接,仅对钛合金喷管采用了扩散连接。

1.1.1 燃烧室头部喷注器组合件钎焊

组合件主要由近百个精密装配的喷嘴和上、下隔板等组成,结构十分复杂,所用材料有耐热高强度或耐热不锈钢,喷嘴也有采用铬青铜的。钎焊一般在热壁式电阻加热炉内,在通有还原性气体保护的钎焊箱中进行。先将隔板喷嘴和主喷嘴焊好,再将焊好的喷嘴与上、下隔板钎焊在一起。前苏联所用钎料为银基和锰基合金。

1.1.2 波纹板夹层结构推力室钎焊

该类推力室结构简单,主要由内、外壁和波纹板三部分组成。外壁材料一般为双相不锈钢、内壁和波纹板材料为奥氏体不锈钢。国外波纹板夹层结构推力室大都采用锰基钎料真空钎焊而成。前苏联的 RD-103、RD-108、RD-214、RD-216 和 RD-219 等发动机推力室都采用这种钎焊结构,已用于 SS-3、SS-5、SS-6、SS-9 等运载火箭。

1.1.3 管束式推力室钎焊

管束式推力室由几百根变截面管、外壳和加强筋等在气体保护加热炉中分二次钎焊而成^[1]。美国所有中压燃烧室的发动机推力室均为这种结构。管束材料有纯镍、T-347 型不锈钢、因康镍 X-750 和 A-286 等高温合金。钎料有银基、镍基、金基和金钼基合金。美国的 LR-79、LR-87、LR-91、LR-93、LR-107 和 J-2、F-1 等型号的发动机推力室均为这种钎焊的管束式结构,它们已用于宇宙神、雷神、大力神和土星 V 等运载火箭。

1.1.4 铣槽式结构推力室钎焊

国外所有高压补燃发动机燃烧室都采用铣槽式结构,即在燃烧室内壁铜合金的外表面铣出冷却介质的槽道。该类推力室的喷管,前苏联也采用铣槽式结构,而美国仍采用管束式钎焊结构。前苏联的铣槽式结构推力室分 4~6 段,在专用的可通氩气对每个壳段实施增压的感应加热炉中进行扩散钎焊,使用铜、锰或银、铜涂层做钎料或扩散焊(喷管材料为钛合金)。然后用真空电子束焊把壳段连接起来。前苏联的铣槽式推力室已用于 RD-253、RD-120、RD-170、RD-180 和 RD-0120 等发动机,并在“质

子号”、“天顶号”和“能源号”等运载火箭上获得应用。

1.2 液体火箭发动机涡轮转子钎焊

美国液体火箭发动机的燃气涡轮转子几乎都用钎焊方法把叶片与锻造的圆盘连接起来。采用钎焊连接的涡轮转子,不但可以保证获得精确尺寸公差,而且可将性能相差极大的材料连接起来。资料介绍了一个叶片为铸造的 Cr-Mo 不锈钢、圆盘为 A-286 铁基高温合金的转子钎焊情况,所用膏状钎料为 AMS4777 镍基合金,在氢气炉中钎焊。有一种涡轮盘,轮盘材料为锻造的 GH169 合金,叶冠为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,叶片与叶冠连接,选用了 Au-18Ni 钎料,采用在氩气保护下的连续顺序感应钎焊,钎焊室采用石英玻璃制成,钎焊过程可以直接观察^[2]。

1.3 液体火箭发动机异种材料导管钎焊

在某些发动机的管路系统中,有些铝合金和不锈钢的导管也是通过钎焊连接的。例如 J-2 氢氧发动机的 6061 铝合金控制阀门和直径为 51 mm 的 304 L 不锈钢导管的连接。美国火箭达因公司先在 304 L 不锈钢表面镀一层钛,厚度为 10 μm~15 μm,然后用 BAISI-4 钎料在铝钎剂保护下进行钎焊连接。

2 在卫星上的应用

减轻卫星的结构质量就可增加其有效载荷,这对降低卫星发射成本有着重要意义。在卫星上采用钎焊连接的构件主要有导管、姿控发动机和波导器件等。

2.1 卫星导管钎焊

在卫星姿控系统有许多输送无水肼和高压气体的钛导管,80%左右的钛导管必须在卫星总装条件下进行连接。用感应钎焊的导管接头代替螺纹接头,不仅使接头质量明显减轻,而且可减少渗漏,提高接头可靠性^[3]。西欧的“交响乐”卫星的姿控钛导管就是采用钎焊钳感应加热连接的,钎料为 Ti-48Zr-4Be 合金。

2.2 姿控发动机头部毛细管结构钎焊

卫星在导入和姿态控制时,需要一些小推力的液体火箭发动机(即姿控发动机)。不少姿控发动机的头部为一薄壁毛细管钎焊结构。例如有一种姿控发动机头部是由多根外径为 0.75 mm、内径为 0.45

宇航材料工艺 2000 年 第 3 期

mm的1Cr18Ni9Ti不锈钢毛细管将其两端分别插入法兰小孔内并经真空钎焊而成。常用的粉末钎料为QNi-3和QMn-7等,真空钎焊时必须严格控制钎焊规范,避免出现毛细管被钎料熔蚀或堵塞。

2.3 铝波导器件钎焊

为减轻卫星结构质量,波导器件所用材料已由铜合金发展为铝合金,如3003(LF21)、6063(LD31)和6061(LD2)等铝合金。钎焊方法也由盐浴或火焰钎焊向真空钎焊或真空钎焊—气体淬火组合工艺发展。我国某人造卫星所用铝波导材料为LF21铝合金,它由六个组合件连接组成;其中最复杂的组合件由35个零件钎焊而成,钎缝共54条,每个组合件都采用一次焊成;所用钎料为Al-11.5Si-1.5Mg和Al-6Si-1.5Mg,钎焊时热态真空度不低于 9×10^{-3} Pa;零件和钎料在专用夹具上安装,用激光点焊定位。

3 在载人飞船上的应用

为减轻飞船结构质量,采用了大量的先进钎焊技术,在美国有钎焊使“阿波罗”飞船上天之说。该运载火箭的发动机(F-1和J-2)推力室就是典型的钎焊结构。“阿波罗”飞船仪器舱的环境控制系统就是用25块铝合金针柱夹层钎焊壁板制造的。其服务舱通讯装置的四个微波反射器,直径800 mm,蜂窝材料为Rene 41镍基合金,钎料为Au-18Ni,采用炉中钎焊。其登月舱的反射器也是一种蜂窝结构,面板材料为A286高温合金,蜂窝芯为T-321不锈钢,也是采用炉中钎焊的。“阿波罗”飞船宇航员座舱外壳采用了PH14-8MO沉淀硬化不锈钢蜂窝壁板作为锥裙和底部隔热层,直径3.9 m,是使用BAg-8a银钎料氩气保护钎焊的。在“阿波罗”飞船的推进和反馈系统,有1046处用感应钎焊连接的管接头,钎料为BAg-8a和BAu-4。“阿波罗”飞船登月舱、指挥舱和服务舱的水管冷却系统、盛宇航员粪便系统和姿控系统的导管都采用钎焊钎感应加热连接的。此外“阿波罗”飞船的核子辅助动力装置、惯性控制仪支架等也都是钎合金钎焊结构,所用钎料为BAg-49银钎料。

4 在航天飞机上的应用

航天飞机结构质量减轻1 kg,其发射成本可降低15000美元,因此在航天飞机上也广泛采用先进的钎焊技术。

宇航材料工艺 2000年 第3期

4.1 美国航天飞机钎焊应用

美国航天飞机主发动机(SSME)是高压补燃发动机,全长4.2 m。主发动机上的许多组合件采用了钎焊。如主发动机推力室的延伸喷管,由1086根A-286合金锥形管总长为3292 m,装配钎焊成一管束喷管,然后与Inconel-718外壳和结构环钎焊成一体,所用钎料为Au-22Ni-8Pd和Au-25Mn-6Pd-6Ni-45Cu等。在锥形管与喷管外壳组装中共使用了7 kg钎料,管端插入歧管钻孔处还有2160个钎焊接头,钎缝总长度超过4277 m,氢气保护炉中钎焊。预燃室材料为Inconel-625合金,也是采用Au-22Ni-8Pd钎料在氢气炉中钎焊的。预燃室电火花点火器插入部分,材料为Cu-3%Ag合金与Inconel-625合金,也是采用钎焊连接的。此外美国航天飞机机翼蒙皮,它由B/Al复合材料上下面板、Ti-3Al-2.5V蜂窝芯、Ti-6Al-4V框架和加强板四部分组成,利用二步法进行了钎焊试验,钎料为Al-Mn和Al-Si合金,结果表明B/Al蜂窝壁板较钛合金壁板可减轻质量33%。此外,航天飞机的B/Al帽形截面桁条也在热等静压炉中进行了真空钎焊试验。

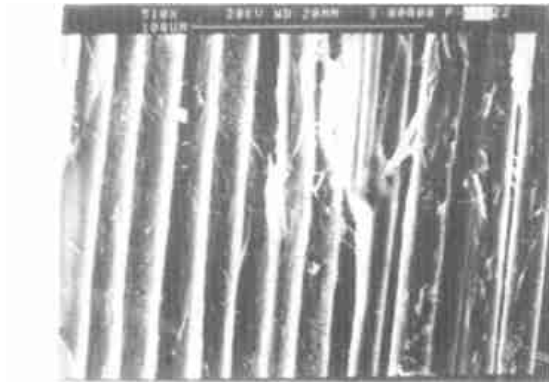
4.2 俄罗斯“暴风雪”号航天飞机上的钎焊应用

俄罗斯“暴风雪”号航天飞机使用能源号运载火箭发射上天,该航天飞机采用了大量先进焊接和钎焊工艺技术,焊缝总长度超过1500 m,还有3000个焊接和钎焊的导管接头。钎焊的壁板面积超过100 m²,大尺寸蜂窝状的三层壁板采用气保护炉中钎焊制造。在连接钛合金导管过程中使用安装条件下的高频感应钎焊工艺。连接的导管直径为6 mm~100 mm,壁厚0.5 mm~2.5 mm。耐热钢和钛合金的钎焊接头用于关键承载部位或高温部位。采用钛合金钎焊的蜂窝夹层结构使用温度可达750~800℃,可减轻构件质量20%~40%。

5 在其它航天器上的应用

在其它航天器上也越来越多地采用先进钎焊技术,例如美国天空试验室(一种空间站)的加工车间的管路冷却系统就是采用钎焊钎感应加热连接的。在美国天空试验室上对19 mm的薄壁不锈钢管进行了放热反应钎焊试验,所用钎料为BAg-8a,可填充0~0.75 mm接头间隙。这种放热反应钎焊连接

(下转第37页)



(c) 辐照后断口



(d) 辐照后断口的纤维与树脂的粘结

图2 AFRP 横向拉伸断口形貌

Fig. 2 Fracture sections of the transverse tensile specimens

4 结论

(1) APMOC 纤维经 射线辐照处理 (500 kGy) 后 ,AFRP 的复丝拉伸强度提高 8.2 % ,横向拉伸强度提高 16.1 % 。

(2) 射线处理后 ,AFRP 的拉伸断口形貌发生了明显变化。断口比较齐整 ,微纤劈裂现象减少。说明辐照使 APMOC 纤维本身发生了辐照交联反应 ,微纤之间产生了化学键 ,增加了分子间作用力。

参考文献

- 1 赵克熙.原苏联芳纶复合材料进展及固体发动机壳体上的应用.宇航材料工艺,1995;5:9~13
- 2 Hoffmann L, Penn S et al. Some effects of surface controlled reactions of kevlar on the interface in epoxy composites. Polymer Composite, 1988;9:184~191
- 3 Zhang L H et al. Mechanism of radiation crosslinking of polymers and its relationship with structural multiplicity. Radiat. Phys. Chem., 1993;42:125~128

(上接第 13 页)

方法将用于未来空间站导管的修理^[4]。美国在 90 年代中期还采用扩散钎焊制造美国国家空天飞机 (NASP) 的 SiC/ Ti 复合材料外蒙皮。日本也正在采用扩散钎焊制造“ HOPE ”号航天飞机在 550 以下区域所用钛合金多层壁防热结构。

6 结束语

钎焊技术是一种航天精密构件有效连接技术,可明显减轻航天产品质量,特别适用于液体火箭发动机许多零部件的制造。钎焊技术在国外航天领域已获得广泛应用。我国应重视先进钎焊技术的发展

及其在航天器上的应用,吸收国外先进经验,以减轻航天器构件的质量、改进性能及降低制造成本。

参考文献

- 1 Heine R W . The Brazing of F- 1 and J - 2 engine thrust chamber. Western Machinery, 1971; (4): 8~10
- 2 薛谈之. 涡轮叶冠连续顺序感应钎焊. 宇航材料工艺,1997;(4):60
- 3 Clautice W E. Induction brazing at the kennedy space center. Welding Journal, 1974; (10): 613~622
- 4 Siewert J A et al. The skylab brazing experiment. Welding Journal, 1977; (10): 291~302