

多自由度空间结构在高温钎焊环境下的热变形控制技术研究

苏云玲, 曲洪亮, 罗远锋, 杨继平, 王晓伟, 王君平

(北京动力机械研究所, 北京 100074)

[摘要] 以某航天动力系统用高压涡轮导向器的制造为例, 针对其制造过程中存在的瓶颈短线问题, 从零件材料特性、结构特点以及技术要求等多个方面, 对问题产生的原因进行深入分析。从热态间隙控制方面出发, 对多自由度空间结构在高温钎焊环境下的热变形控制技术进行了深入研究, 并结合动力系统的生产制造对研究成果进行了实际应用和验证。并得出以下结论: 通过工装压紧方式来控制热变形, 压力部位越靠近焊接部位, 效果越好; 在钎焊过程中, 在升温阶段完成后, 两个零件因为钎料的渗透变成一体, 在降温阶段, 以同一个中心回缩, 此时的钎焊缝间隙大部分已经被钎料填满, 故间隙无法再发生变化; 冷态间隙满足工艺指标要求的前提下, 高温环境下的热膨胀变形会导致间隙变大; 钎料在 997℃ 左右开始熔化; 且不能通过热处理制度控制流动速度及间隙变化, 小范围的温度变化影响很小。总结出了一套适用于多自由度空间结构的热变形控制方法。

关键词: 航天动力系统; 高压涡轮导向器; 高温钎焊; 多自由度; 热变形控制

Research on Thermal Deformation Control Technology of Multi - Degree of Freedom Space Structure Under High Temperature Brazing Environment

SU Yunling, QU Hongliang, LUO Yuanfeng, YANG Jiping, WANG Xiaowei, WANG Junping

(Beijing Energy Machine Institute, Beijing 100074, China)

[ABSTRACT] Taking the manufacturing of high-pressure turbine guide for a spaceflight power system as an example, in view of the short - term problems in the manufacturing process, from the aspects of material characteristics, structural characteristics and technical requirements, the causes of the problems were analyzed. From the aspect of thermal gap control, the thermal deformation control technology of multi-degrees of freedom space structure under high temperature brazing was studied, and the actual application and verification of the research results were carried out based on the production and manufacturing of power system. And the following conclusions: through the clamping device to control the hot deformation, the pressure part closer to the welding position, the better effect; During the brazing process, after the completion of the heating phase, because of the penetration of filler metal, the two parts become one, and in the cooling stage, with the same center retracting, at this time the most gap has been filled by filler metal, so the clearance can not change; Under the condition that the cold space meets the technical requirements, the thermal expansion deformation under high temperature will lead to a large gap. The solder began to melt at about 997℃. The flow velocity and clearance can not be controlled by heat treatment system, and the temperature change in small range is very small. A set of thermal deformation control methods suitable for the spatial structure of multi-degree of freedom is summarized.

Keywords: Space power system; High pressure turbine guide; High temperature brazing; Multi-degree of freedom; Thermal deformation control

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.12.092

钎焊方法的原理是利用母材熔点低的金属材料作为钎料, 加热母材到一定温度, 熔化的钎料填充于固态的母材中间, 从而形成牢固连接。因为此种焊接方法可

采用工件整体加热, 且焊接部位光滑平整, 组织和机械性能变化小, 所以稳定性好。同时钎焊过程对母材的物理化学性能影响小, 焊接应力和变形相对较小, 同时可

以焊接性能差别较大的异种金属,能同时完成多条焊缝。因为其优良的焊接质量和较高的生产效率,同时经济性好,所以在航空航天动力系统的研制生产中具有非常广泛的应用^[1-5]。对于结构简单的产品,其钎焊过程中的装夹、定位及热变形控制方法都比较简易,可实施性强,钎焊焊接方式的优势也体现得更加明显。而对于结构复杂的产品,尤其是不同材料之间的钎焊连接,因为材料热膨胀系数、结构特点以及热变形的多向性,给钎焊过程中的装夹定位以及热变形控制技术提出了很高的要求^[6-11]。本文以某航天动力系统用高压涡轮导向器的制造为例,针对零件材料特性、结构特点以及技术要求,重点从冷态间隙控制、热态间隙控制两个方面,对多自由度空间结构在高温钎焊环境下的热变形控制技术进行了深入研究,并结合动力系统的生产制造对研究成果进行了实际应用和验证。总结出了一套适用于多自由度空间结构的热变形控制方法。

1 项目简介

某型号航天动力系统核心机用高压涡轮导向器是型号发动机中的关重件产品,由导向器零件和喷管零件通过钎焊组合而成。其中导向器结构为回转件,材料为高温合金 K24;喷管结构为三维空间结构的枝形结构件,材料为 ZG1Cr18Ni9Ti;两者均为精铸件。高压涡轮导向器设计结构示意图如图 1 所示。

产品完成钎焊工序后,起动喷管与导向器的钎焊对接部位常存在未钎透质量缺陷,从而导致钎焊部位产生较大宽度的间隙,而补焊处理周期较长,从而直接影响了批生产的任务交付,成为批生产中的重大瓶颈短线,制约着型号研制进展。其具体缺陷部位如图 2 所示。

型号研制任务的紧迫需求要求立刻分析定位问题产生的根本原因,并有针对性地制定工艺措施,解决批生产过程中钎焊缝间隙过大,返厂补焊返修率高的问题,消除制约型号批生产的重大瓶颈短线,同时大幅降低生产成本,显著缩短生产周期,提高生产效率,保障型

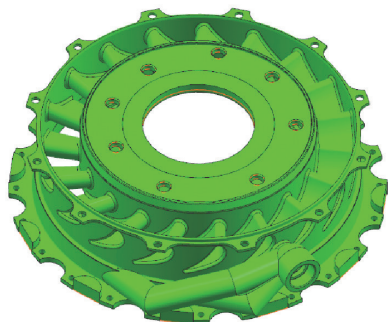


图1 高压涡轮导向器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of high pressure turbine guide structure

号批生产的进度需求。

2 技术方案和技术途径

2.1 技术方案

高压涡轮导向器加工工艺流程如图 3 所示。

传统钎焊产品多结构相对简单,在钎焊过程中可以通过简单装夹,通过产品自身结构约束或用重物自身的重量压紧待焊零件,如某型燃烧室机匣,其钎焊工装装夹示意图如图 4 (a) 所示,钎焊过程中,仅需通过重物压紧扩压器内壳内腔端面即可完成钎焊。如某型分体结构高压涡轮导向器,其结构及其钎焊工装装夹示意图分别如图 4 (b)、图 4 (c) 所示,在钎焊过程中,通过叶片轮廓的锥形结构并通过简单工装沿径向压紧叶片大端面,从而来限制叶片沿半径方向的自由度,通过叶环上的叶型孔与叶片的配合间隙并用简单工装固定内环从而限制其角向自由度,同时压紧内环端面,即可完成钎焊。其共同的特点是热态环境下的间隙变化方向与产品重力方向一致。

与传统钎焊产品结构相比,此系列型号的高压涡轮导向器起动喷管为多自由度的三维空间结构,起动喷管装配位置位于导向器外圆表面上,其在高温环境下的间隙变化方向与产品重力方向垂直,且导向器为回转件结构,起动喷管为空间三维枝形结构,所以不仅无法通过传统的重物压紧方式进行装夹,而且热变形情况复杂,其结构如图 5 所示(其中 1~7 为不同位置编号)。其间隙变化方向为配合表面的法线方向,且热膨胀方向为发散的空间结构。

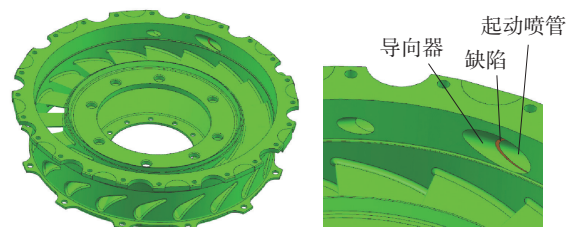


图2 电火花扩孔后的缺陷部位示意图

Fig.2 Schematic diagram of the defect site after the spark reaming

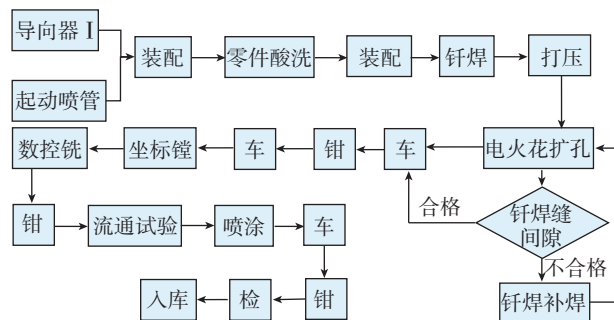
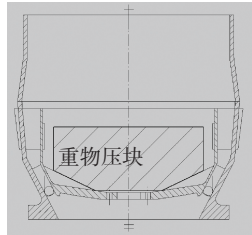


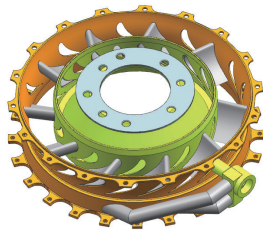
图3 高压涡轮导向器加工工艺流程图

Fig.3 Process flow chart of high pressure turbine guide

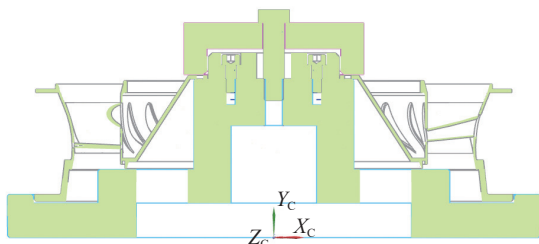
同时导向器材料为铸造高温合金, 起动喷管材料为铸造不锈钢, 两种材料的线膨胀系数不同。在钎焊温度下, 导向器与起动喷管的热膨胀变形如图 6 所示。由计算结果可估算, 当温度升高 1000℃ 时, 起动喷管长管、短管与导向器配合部位的最大间隙分别约为 1.12mm、0.28mm。为了保证热态间隙满足 $\leq 0.1\text{mm}$ 的要求, 应有效控制配合部位的热膨胀变形, 从而满足钎焊过程中



(a) 燃烧室机匣焊接工装结构示意图



(b) 分体高压涡轮导向器结构示意图



(c) 分体结构高压涡轮导向器钎焊工装结构示意图

图4 某型燃烧室机匣

Fig.4 A combustion chamber casing

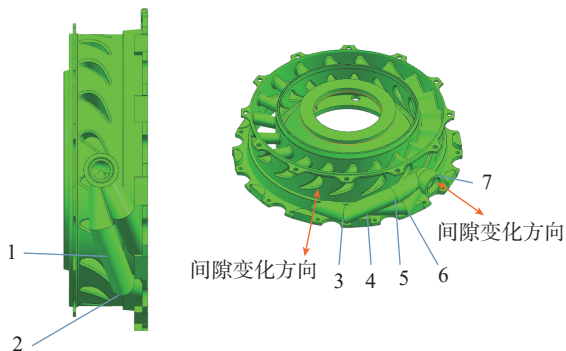


图5 高压涡轮导向器结构及压紧部位示意图

Fig.5 Schematic diagram of high pressure turbine guide structure and compression position

的热态间隙要求。

2.2 热膨胀变形的理论验证

为了对这一分析结果进行验证, 在没有涂抹钎料的情况下, 利用原有的工装装夹方案进行了一次入炉试验, 并与入炉前状态进行了对比。入炉前的产品配合状态与试验后的产品配合状态分别如图 7 所示。通过塞尺检测, 长管配合部位最大间隙约 1.2mm, 短管部位最大间隙约 0.3mm。由试验结果可得出确切结论: 高温钎焊环境下的热膨胀变形导致了钎焊缝间隙的增大, 进而导致了未钎透缺陷。

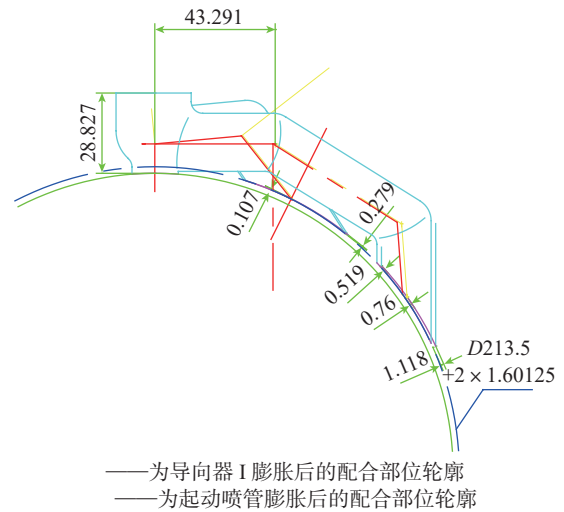


图6 导向器I与起动喷管的热膨胀变形示意图 (单位: mm)

Fig.6 Thermal expansion deformation diagram of guide I and starting nozzle



(a) 入炉前



(b) 入炉后

图7 钎焊前后的热变形量对比示意图

Fig.7 Comparison of thermal deformation before and after brazing

为了更好地确定热变形控制方案,使用 Ansys 软件对高压涡轮导向器的钎焊过程温度场进行了模拟仿真,更直观地了解其热变形部位及其变形规律。从其变形部位和规律中,可以得出:(1) 起动喷管长管部位的中间段距离工件中心最远,是变形最大的部位。(2) 起动喷管配合部位的热态间隙产生于两个方面,一个方面是起动喷管自身的热膨胀变形,另一方面是由于高压涡轮导向器整体热变形导致的轮廓外延。

2.3 技术方案

2.3.1 热变形控制方案I

使用不锈钢材料工装装夹,压紧部位为图 5 中 3、6、7。

此方案在工艺试验验证时,第 1 次钎焊完成后,发现配合间隙明显变大,起动喷管座部位间隙约 1.3mm,起动喷管长管部位间隙约 0.8mm。钎料流动不均匀,色泽灰暗,局部结节严重,待焊部位仅小面积局部有钎料留驻,外观有明显肉眼可见的黑色渣点。分析原因:

(1) 焊前清理: 待焊接部位清理不彻底,导致混入多余物。

(2) 工装: 工装材料为不锈钢,热膨胀量过大,高温环境下定位作用失效,导致高温下不能定位起动喷管。

(3) 配合间隙: 起动喷管间隙变大后,钎料不能留驻,导致未钎透。

(4) 热膨胀变形: 热膨胀变形导致配合间隙增大。

不锈钢材料的工装沿径向的热膨胀变形大于铸造高温合金高导整体的热膨胀变形量,无法完成在高温环境下的产品装夹定位。

2.3.2 热变形控制方案II

使用与工件同材料工装进行装夹,压紧部位为图 5 中 4、7。

此方案为优化前的批产产品工装装夹方案,抽检 20 件产品的钎焊前冷态间隙及钎焊后的钎焊缝间隙,如表 1 所示。

由表 1 中数据可以看出,抽检的 20 件产品在冷态间隙满足 $\leq 0.1\text{mm}$ 的前提下,使用当前工装方案进行装夹定位,有 18 件产品在钎焊后出现了钎焊缝间隙未钎透缺陷,其中 12 件产品钎焊缝间隙宽度 $\geq 0.3\text{mm}$ 。其间隙情况的实物图片如图 8 所示。

从而可以得出结论为:(1) 热膨胀变形导致了钎焊缝间隙的增大。(2) 当前工装定位方式不能有效控制钎焊过程中的热膨胀变形。

2.3.3 热变形控制方案III

使用同工件材料工装进行装夹,压紧部位为图 5 中 1、2、7。现有热变形控制方案从以下几个方面进行优化。

表1 冷态间隙与钎焊缝间隙实测值

序号	产品编号	冷态间隙 /mm		焊后间隙 /mm	
		长爪	短爪	长爪	短爪
1	071	0	0	0.4	0
2	072	0	0	0.3	0
3	073	0	0	0.1	0
4	074	0	0	0	0
5	076	0	0	0.2	0
6	077	0	0	0.5	0
7	078	0	0	0.5	0
8	081	0	0	0.8	0
9	082	0	0	0.7	0
10	084	0	0	0.31	0
11	085	0	0	0.45	0
12	087	0	0	0.1	0
13	088	0	0	0	0
14	090	0	0	0.39	0
15	094	0	0	0.33	0
16	095	0	0	0.27	0
17	096	0	0	0.1	0
18	098	0	0	0.22	0
19	099	0	0	0.66	0
20	100	0	0	0.45	0



图8 钎焊缝间隙实物图片

Fig.8 Physical picture of weld gap



图9 工艺试验的钎焊缝状态示意图

Fig.9 Schematic diagram of brazing seam state of process test piece



图10 正式件的钎焊缝状态示意图

Fig.10 Schematic diagram of brazing seam status of formal parts

(1)沿配合表面的法线方向施加压紧力,压紧力方向与热变形方向相反。

(2)固定起动喷管座的周向位置,限制其沿配合部位的切向位移。

(3)释放起动喷管中间部位的热变形,钎焊过程中不压紧。

(4)增大压紧部位的接触面积,改点接触为面接触,增大压紧力作用区域。

试验后的钎焊缝状态如图9所示。

3 成果验证

试验验证合格后,将此方案应用于产品批产,并100%检钎焊后的钎焊缝间隙,除1件产品出现0.1mm宽度的钎焊缝间隙外,其余产品均未出现钎焊缝间隙。产品一次交检合格率达到99.4%。优化后的产品钎焊缝间隙情况如图10所示。

4 结论

项目研究成果有效解决了不同材料多自由度空间结构在高温钎焊环境下的热变形控制难题,并在航空航天发动机核心机用重件高压涡轮导向器产品的批生产中进行了深入应用,解决了钎焊缝间隙过大,返厂补焊返修率高的问题,消除了制约型号批生产的重大瓶颈短线。研究过程得出以下结论:

(1)通过工装压紧方式来控制热变形,则压力部位越靠近焊接部位,效果越好。

(2)在钎焊过程中,在升温阶段完成后,两个零件因为钎料的渗透变成一体,在降温阶段,以同一个中心回缩,此时的钎焊缝间隙大部分已经被钎料填满,故间隙无法再发生变化。

(3)冷态间隙满足工艺指标要求的前提下,高温环境下的热膨胀变形会导致间隙变大。

(4)钎料在997℃左右开始熔化;且不能通过热处理制度控制流动速度及间隙变化,小范围的温度变化影响很小。

参考文献

- [1] 李家枢,石伯平.金属工艺学[M].北京:高等教育出版社,2003.
LI Jiashu, SHI Boping. Metal technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [2] 赵越.钎焊技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2004.
ZHAO Yue. Brazing technology and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [3] 薛松柏.钎焊技术问答[M].北京:机械工业出版社,2007.
XUE Songbai. Soldering technique[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007.
- [4] 罗蒙丽.高温合金钎焊技术的现状与发展[M].硬质合金,2015,32(2):108-118.
LUO Mengli. Current situation and development of high temperature alloy brazing technology[M]. Cemented Carbide, 2015, 32(2): 108-118.
- [5] 白丽凝.高湿真空钎焊炉的加热室设计[J/OL].科技情报开发与经济,2009,19(3):[2009-09-01].http://doi:10.3969/j.issn.1005-6033.2009.31.090.
BAI Lining. The design of the heating chamber of a high-wet vacuum brazing furnace[J/OL]. Science and Technology Intelligence Development and Economy, 2009, 19(3): [2009-09-01]. http://: Doi: 10.3969/j.issn.1005-6033.2009.31.090.
- [6] 祁焱,张羊换,全白云,等.钎焊及钛基钎焊料的发展及应用[J].金属功能材料,2003,10(5):31-37.
QI Yan, ZHANG Yanghuan, QUAN Baiyun, et al. Brazing and titanium brazing materials[J]. Metal Functional Materials, 2003, 10(5): 31-37.
- [7] 朱警雷,黄继华,张华,等.硬质合金与钢异种金属焊接的研究进展[J].焊接,2008(2):15-19.
ZHU Jinglei, HUANG Jihua, ZHANG Hua, et al. Advances in the study of metal welding of hard alloy and steel[J]. Welding & Joining, 2008(2): 15-19.
- [8] 陈建中,熊计,郭智兴,等.硬质合金焊接新工艺发展现状与趋势[J].硬质合金,2009,26(2):127-133.
CHEN Jianzhong, XIONG Ji, GUO Zhixing, et al. Development status and trend of cemented carbide welding new process[J]. Cemented Carbide, 2009, 26(2): 127-133.
- [9] 冯武锋,王春青,李明雨,等.SMD真空无钎剂激光软钎焊试验研究与机理分析[J].电子工艺技术,1999,20(1):1-5.
FENG Wufeng, WANG Chunqing, LI Mingyu, et al. Research and mechanism analysis of SMD vacuum solderless laser soft soldering test [J]. Electronics Process, 1999, 20(1): 1-5.
- [10] 岳喜山,孙凤莲.硬质合金圆环与钢基体钎焊过程的数值模拟[J/OL].焊接学报,2005(9):[2005-09-01].http://doi:10.3321/j.issn:0253-360X.2005.09.009.
YUE Xishan, SUN Fenglian. The numerical simulation of hard alloy ring and steel matrix brazing process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005(9): [2005-09-01]. http://Doi: 10.3321/ j.ssn: 0253-360x.2005.09.009.
- [11] 杨元修.大面积环形硬质合金的钎焊[J].电焊机,1995(4):42-44.
YANG Yuanxiu. The brazing of a large ring of hard alloy[J]. Electric Welding Machine, 1995(4): 42-44.

通讯作者: 苏云玲,硕士,高级工程师,研究方向为三维复杂型面整体叶轮的精密电解加工, E-mail: liusue666@sina.com。

(责编 大漠)