

径向加压铜喷嘴真空扩散焊接工艺及实用案例

魏瑞刚 张丽娜 金盈池 黑增民 王彦超

(首都航天机械公司, 北京 100076)



摘要: 为实现发动机用喷嘴内芯肋条与外套的全连接, 保证铜喷嘴的冷却性能, 采用真空扩散焊工艺技术及膨胀加压的理念, 实现了铜喷嘴的柱面径向加压及真空扩散焊接。金相及 CT 无损检测结果表明: 铜喷嘴扩散焊接头焊接质量良好, 焊合率可达到 95% 以上。

关键词: 铜喷嘴; 真空扩散焊; 膨胀加压; 焊合率

Process and Practical Case of Radical Pressure Vacuum Diffusion Bonding of Copper Nozzle

Wei Ruigang Zhang Lina Jin Yingchi Hei Zengmin Wang Yanchao

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract: To join the ribs and the outer case and insure the cooling ability of lunch vehicle engine nozzle, the vacuum diffusion bonding and thermal expansion pressure idea are adopted to achieve the radial pressure and vacuum diffusion joints of copper nozzle. The metallographic inspection and CT testing results show that the quality of welded joints is good and the bonding rate is up to 95%.

Key words: copper nozzle; vacuum diffusion bonding; thermal expansion pressure; bonding rate

1 引言

喷嘴稳定装置是抑制高频不稳定燃烧的最有效措施之一。目前, 国外某些航天型号的大推力氢氧发动机均采用了相关的稳定装置, 例如 SSME、LE-7 和 RS-68 均采用了隔板喷嘴和声腔稳定装置^[1]。为了增大发动机推力, 国内航天发动机也采用了铜喷嘴的方式抑制燃烧振荡, 铜喷嘴采用铜材料内芯, 其上分布有数十条尺寸约为 1mm 左右的肋条, 沟槽与外壁形成冷却通道, 外壁为薄壁铜外套, 与内芯组合连接, 铜喷嘴在工作过程中冷却通道内为 100K 的低温气体, 外部为高达 3600K 高温燃气, 工作环境非常恶劣。目前采用氢排放冷却来避免因冷热温差应力过大而翘曲变形和过热烧蚀。但受加工制造水平的限制, 目前的铜喷嘴由内芯和外套分别机加后装配在一起, 仅通过两条电子束环焊缝将内外套连接起来, 其中外套与肋条未连接, 导致传热效率不足, 热试车过程中发生外套烧

蚀。因此, 为了进一步提高铜喷嘴的稳定性, 将铜喷嘴内芯肋条和外套采用全连接的方式, 可以极大改善铜喷嘴的传热, 提高使用寿命。

实践及分析表明, 采用熔焊如电子束、激光焊等点焊连接内芯肋条和外套, 由于肋条宽度小且数量多, 焊接时发生束流偏离肋条堵塞通道的现象, 造成流量反差过大使产品无法正常使用。若采用电铸等方式, 效率较低, 且结构强度低, 不适应批产要求。由此, 需要采用一种稳定、高效的焊接工艺保证产品质量, 提高生产效率。

真空扩散焊作为一种精密固相焊接技术, 具有焊接变形小, 可进行内部多点、大面积构件连接等特点^[2], 但常规的真空扩散焊接设备多为轴向加压, 铜喷嘴内外壁的连接属于径向面连接, 很难将径向压力转化为轴向压力, 本文将采用膨胀压差的方式进行铜喷嘴的真空扩散焊接, 实现铜喷嘴内芯与外套的全连接。该技术在国内外尚无公开资料文献报道。

作者简介: 魏瑞刚 (1987-), 工程师, 材料加工工程专业; 研究方向: 运载火箭贮箱制造。

收稿日期: 2017-01-19

2 试验方法

铜喷嘴用材料为CuZr0.15锆无氧铜，其主要化学成分为 $w(\text{Zr})(0.11\sim 0.21)\%+w(\text{Cu})$ 余量^[3]，首先进行扩散焊铜喷嘴内芯与外套的焊前加工，焊前外套需留有一部分加工余量，便于焊后精加工，内芯加工到图纸尺寸；加工后的铜喷嘴外套与内芯待焊面进行表面处理，并将铜喷嘴内芯与外套过盈装配；在Workhorse II型3520真空扩散焊设备及真空度为 5×10^{-5} torr下焊接；扩散焊后的铜喷嘴试件进行剖检，金相检测焊缝内部质量及焊合率，铜喷嘴样件精加工后进行CT无损检测，用于检测铜喷嘴的焊合率。

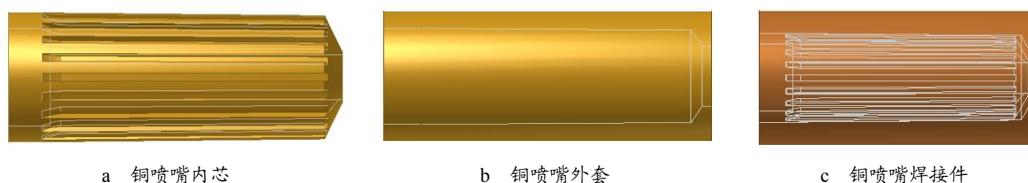


图1 喷嘴结构件示意图

尽管扩散焊接变形很小，但由于铜喷嘴为多孔、多槽结构，热变形不可避免带来孔的变形，焊后，铜喷嘴孔径尺寸均发生微小变形，但不同产品焊接变形一致，焊件之间偏差尺寸极小。为了保证图纸尺寸，部分尺寸需要焊后二次加工。焊后加工时需防止多余物进入通道。

3.2 铜喷嘴的真空扩散焊接

3.2.1 简化铜喷嘴的扩散焊接试验

基于铜试板优化扩散焊接工艺，铜喷嘴的焊接采用 $850\sim 900^{\circ}\text{C}$ ， $100\sim 150\text{min}$ ，待焊面表面处理的方式。为了降低成本，初始采用简化结构形式的铜喷嘴进行试验，如图2所示。铜喷嘴内芯与外套仅配合面加工，其余简化加工。

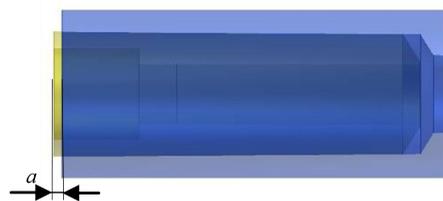


图2 结构简化后的铜喷嘴

通过简化铜喷嘴扩散焊接，测试：a. 径向加压对扩散焊接头质量的影响；b. 焊接工装的合于使用性；c. 过盈量 a 对焊接接头质量的影响等。

3.2.1.1 径向加压对扩散焊接头质量的影响及焊接

3 径向加压铜喷嘴真空扩散焊接工艺研究

3.1 铜喷嘴的结构设计及焊后加工技术研究

为了施加铜喷嘴的径向压力，铜喷嘴内芯与外套均进行了结构性设计，采取焊前配合加工、焊后精工加工的方式保证产品最终尺寸，加工要求如下：

a. 设计铜喷嘴内芯与外套小角度锥面过盈配合，目的是保证两者的待焊面紧密接触，直面过盈配合的效果等同锥面配合，但装配较困难；

b. 为了避免焊接变形对铜喷嘴内芯上肋条、孔等尺寸的影响，焊前留有一定加工余量。

图1所示为铜喷嘴内芯、外套的结构设计示意图。

工装的合于使用性

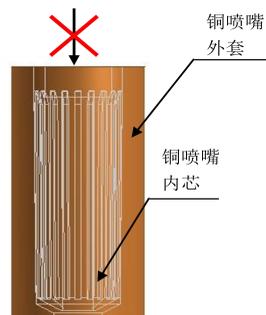


图3 铜喷嘴结构示意图

铜喷嘴的真空扩散焊工艺参数基于锆铜试板优化工艺参数的基础，其中仅加压方式不同于试板的平面轴向加压。铜喷嘴内芯和外套为圆柱面贴合方式，如图3所示。常规的平面轴向加压方式无法实现铜喷嘴内芯和外套径向正向压力的施加，需借助间接方式将柱面径向压力转化为平面压力。提出了膨胀压差的加压理念，即利用热膨胀系数差异产生的径向正压力对铜喷嘴加压，如图4所示。具体实施方式为：工装材料采用与铜热膨胀系数差异较大的钼、陶瓷、石墨等，按图4所示将铜喷嘴放入工装中，升温及焊接过程中，铜的热膨胀远大于石墨、陶瓷等材料工装的热膨胀，两者膨胀压差产生正向压力施加于铜喷嘴上，在温度、时间的控制下完成铜喷嘴的内芯与外套的焊接。

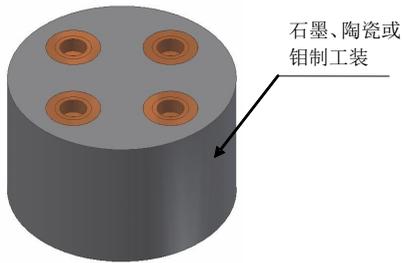


图4 实际采用的压力控制方式

试验结果表明，利用膨胀加压的理念实现了铜喷嘴的扩散焊接，其中铜喷嘴内芯与外套配合是关键，试验过程中采取的铜喷嘴外套与内芯小角度过盈加工方式，使铜喷嘴外套和内芯即使在室温状态下也能顺利实现压入装配，同时外套增厚控制变形，借助焊后加工保证图纸装配尺寸要求。图5为焊后铜喷嘴金相剖检图。焊接界面焊合良好，晶粒尺寸无明显增大，焊件变形小，焊合率达到95%以上。



图5 扩散焊铜喷嘴宏观及金相组织照片

3.2.1.2 过盈量对焊接接头质量的影响

过盈量为图2中a值，即内芯高出外套的量，通过试验发现，尺寸控制在0.5~1mm之间为宜，超过1mm会造成铜喷嘴内芯肋条的变形，影响到铜喷嘴液流流量的大小，小于0.5mm后，焊接接头的焊合率降低，过盈量为0时，发现在端头部分出现未焊合现象。图6所示。

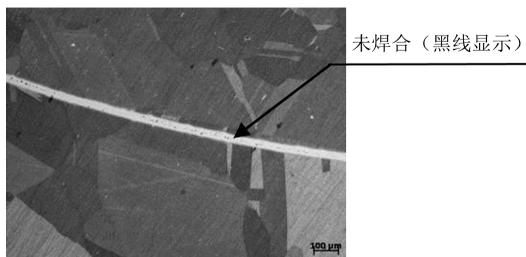


图6 过盈量小造成的未焊合

3.2.2 铜喷嘴的真空扩散焊接及接头检测结果

在简化铜喷嘴加工及焊接工艺的基础上，加工焊接了铜喷嘴产品样件，如图7所示。

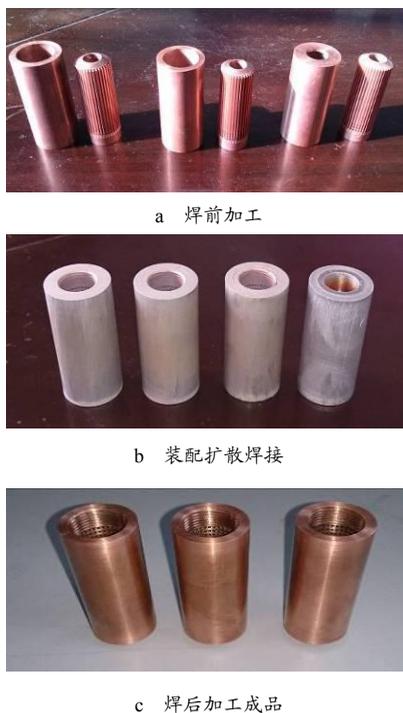


图7 铜喷嘴扩散焊接件工艺过程

图8所示为扩散焊铜喷嘴的焊后金相剖检结果，可以看出，整体焊接状况良好，无未焊合缺陷。

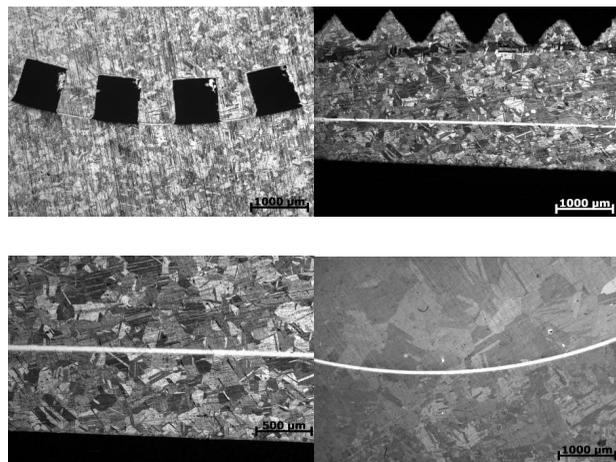


图8 铜喷嘴扩散焊接头金相组织图

图9为焊接良好铜喷嘴的CT检测结果图，通过观察图片中结合面密度变化，判定焊接情况，由于图片数量过多，仅截取部分照片。照片中显示接头焊合良好，无缺陷。

(下转第57页)