氢氧火箭发动机推力室头部非对称结构焊接工艺研究

高凤林　李雪飞　孔兆财　赵凤英　孙敏力　李　滕　吕　威　李　杰

（首都航天机械公司，北京 100076）

摘要：介绍了发动机推力室头部焊接工艺方案的分析优化过程，分析了推力室头部非对称结构及应力变形特点，明确了反变形及焊接顺序等控制方案，攻克了焊接可达性难题。并最终制定了成熟工艺方案，将头部面板平面度和喷嘴间隙的变形量控制在微米的范围，有效地解决了推力室头部装配、焊接生产的工艺技术难题。

关键词：非对称结构；焊接顺序；焊接应力；可达性

Research on Welding Technique of Asymmetric Structures for Thrust Chamber of LOX/LH_2 Rocket Engine

Gao Fenglin　Li Xuefei　Kong Zhaocai　Sun Minli　Li Teng　Lv Wei　Li Jie

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 10076)

Abstract：The optimal process of welding technique of the thrust chamber head of LOX/LH_2 rocket engine was introduced. Asymmetric structures for thrust chamber and the peculiarity of stress distortion were analysed. The control program on reversible deformation and welding order was brought forward. The difficult problem of welding accessibility was solved. A well-rounded program that flatness of porous plate and nozzle clearance are controlled in micron rank was established. The difficult problem of setting up and welding about the thrust chamber head was solved in effect.

Key words：asymmetric structures；welding order；welding stress；accessibility

1　引言

某型号推力室头部是运载火箭氢氧发动机的关键组件，它是发动机工作的动力源，工作时氢氧混合推进剂燃烧的起始端，其质量的优劣直接影响到火箭发射、飞行的成败。尤其是头部第一底面板的平面度及其面板上氢、氧喷嘴之间的环形间隙，产品设计要求必须控制在一定的精度范围内，波动范围不能过大，否则将影响燃料混合的均匀性和火焰燃烧的稳定性，进而直接影响整个发动机推力性能和工作过程的可靠性和安全性，甚至导致运载火箭发射的灾难性后果。因此，采用合理的焊接工艺方法，确保产品的关键形位尺寸均达到设计要求，具有重要的研究和应用意义。

本研究主要以推力室头部非对称结构生产过程中的焊接工艺控制方案的不断优化研究过程，分析和阐释产品结构在焊接顺序、焊接方向、应力和可达性等综合作用达到稳定平衡，从而使产品结构的形位公差变化保证在设计要求的范围内，并制定出成熟工艺控制方案。

2　产品介绍

某型号推力室头部由中底组合件、三底组合件、承力座、二孔座、氧进口法兰、支板及管嘴等零件装配焊接形成复杂空间结构。其中，中底组合件是由带

作者简介：高凤林（1962-），特级技师，焊接专业；研究方向；焊接技术工艺应用与实践。

收稿日期：2014-04-28

环一底、二底与氢喷嘴及氧喷嘴各 126 个，采用熔焊和钎焊方式完成焊接。而头部组件均采用氩弧焊接工艺完成焊接，其头部组合件设计的主要焊缝见图 1。由于推力室头部上下是非对称焊接结构，给焊接过程控制带来极大困难。因此，焊缝的焊接顺序、焊接方向、焊接变形控制将直接影响头部结构形位公差及技术装配尺寸精度等，从而影响产品质量和设计使用需求。

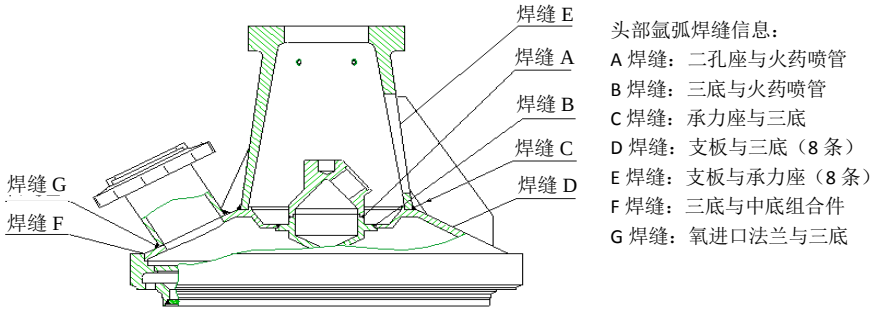


图 1　头部主要焊缝示意图

3　焊接工艺方案分析

针对推力室头部形位尺寸公差控制，后期装配尺寸要求，按照焊接工艺技术特性的实践认知，提出三种工艺方案并进行逐层次试验分析。最终找出成熟工艺控制方案，满足后期产品装配形位公差精度要求等应用技术特性。

3.1　初期工艺方案

初期工艺方案按照一般焊接可达性顺序，采用从里至外、由下至上的典型常规焊接方式，在头部面板夹持工装和承力座定心夹具的联合作用下，保持产品形位公差尺寸。具体焊接工艺流程如下：先焊二孔座与火药喷管焊缝 A；焊接三底与火药喷管焊缝 B；顺序焊接三底与中底组合件焊缝 F；焊接承力座与三底焊缝 C；焊接支板与三底的 8 条焊缝 D；焊接支板与承力座的 8 条焊缝 E；焊接氧进口法兰与三底焊缝 G。

经分析，推力室头部焊接过程中影响产品变形的主要有 3 类焊缝：C 类焊缝三底与承力座、D 类焊缝支板与三底以及 F 类焊缝中底组合件与三底，焊接时采用工装进行约束。通过数值模拟对该工艺方案进行应力仿真分析，应力分布情况如图 2 所示，浅色代表该区域焊接应力最大。可以看出，焊接对第一底、第二底中间区域造成的焊接应力较大。焊接完成后，将工装拆掉，由于焊接应力使产品结构产生弹性变形，最终拉应力主要集中到三底上，以三底与中底组合件的焊缝为支点，对第一底造成拉伸变形。针对焊缝对喷嘴间隙和面板平面度进行采样点测量，测量数据如表 1 所示。可以看出，面板变形较大（平面度实测值为 1.2～1.5mm），喷嘴间隙均匀性较差（范围处于 0～1mm）。该焊接工艺流程不能满足设计要求，必须对初期工艺方案进行改进，提出焊接后可控制产品结构弹性变形的工艺方案。

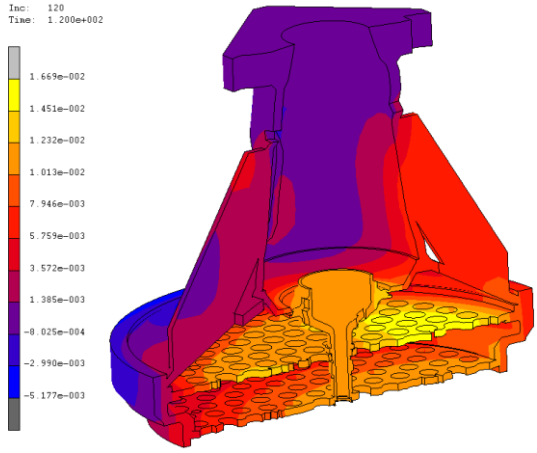


图 2　初期工艺方案头部焊接应力分布图

表 1　初期方案喷嘴间隙及面板平面度实测数据 mm

1 到 6 圈采样点		1	2	3	4	5	6	设计要求值
面板平面度		1.3	1.2	1.4	1.5	1.3	1.5	≤0.4
头部喷嘴间隙	最大值	1	0.8	0.9	1	0.7	0.9	≥0.35
	最小值	0	0.2	0.1	0	0.3	0.1	

3.2　改进工艺方案

通过中底组合件与三底（F 焊缝）始终保持开环状态来释放三底以上各零件焊接的累加应力，最终演变成两个刚性体与防变形约束工装的互相作用。

初期工艺方案造成拉伸应力集中在三底上，造成

第一底严重变形，所以改进方案主要集中在控制面板变形上。通过结构分析，焊接变形主要通过工装预紧力并改变焊接顺序、焊接时增加反作用力得到有效控制，实现焊接应力的有效释放。基于上述分析，通过参数选择，建立矛盾冲突矩阵，选择合适的参数，并实施产品焊接。

在焊接工装的刚性约束下，中底组合件与三底始终保持开环状态，最后焊接该焊缝。因为在焊接过程中通过三底的自由变形，三底与承力座、支板与三底的焊接应力可以得到有效释放。所以只有最后焊接三底与中底组合件时才产生焊接应力，该应力表现在两个刚性体（承力座＋三底＋支板与中底组合件）与工装的约束力相互作用。通过数值模拟对改进工艺方案进行应力仿真分析，应力分布情况如图 3 所示。可以看出，浅色区域相对第一种方案减小很多，这表明通过焊接工艺改进第一底、第二底中间区域产生的焊接应力有所缓解。因此，按此方案进行焊接时，焊接应力相对初期工艺方案得到大幅度降低。

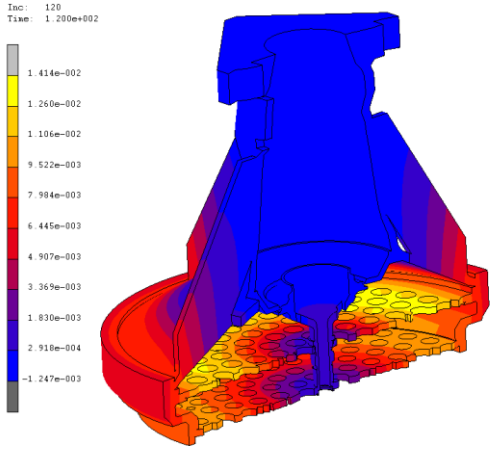


图 3　改进工艺方案头部焊接应力分布图

采用改进工艺方案完成头部焊接后，对头部喷嘴间隙及面板平面度进行采样点测量，测量数据如表 2 所示。由表 2 可知，头部喷嘴间隙的范围处于 0.1～0.9mm，虽然与初期工艺方案相比，间隙波动范围有所减小，但是间隙仍不能满足设计要求。

表 2　改进方案喷嘴间隙及面板平面度实测数据 mm

1 到 6 圈采样点		1	2	3	4	5	6	设计要求值
面板平面度		0.2	0.15	0.15	0.2	0.25	0.15	≤0.4
头部喷嘴间隙	最大值	0.65	0.8	0.9	0.6	0.7	0.5	≥0.35
	最小值	0.2	0.2	0.1	0.25	0.2	0.4	

通过上述数据可知，采用改进工艺方案焊接的头部产品部分尺寸能够满足设计要求。但是发动机试车过程中仍存在燃料不稳定燃烧现象，则产品尺寸超差仍不能满足设计使用要求。鉴于此，头部空间结构焊接工艺方案仍需进行改进。

3.3　成熟工艺方案

在改进方案的基础上进行工艺创新，通过在三底侧增加支点预留出三底与中底组合件之间的间隙，在焊接过程中进一步优化工装的预紧力，采取优化焊接参数、焊接次序和焊接方向等工艺措施进行头部焊接工艺研究。工艺方案完善后，工艺流程相应变化，具体的工艺流程如下：先焊接对产品结构变形影响较小的二孔座与火药喷管焊缝 A，分 4 段对称焊接；将三底下边沿对称堆焊加高 8 点，高度约为 1.5mm，意在预留三底与中底组合件之间的收缩间隙；将中底组合件与三底、承力座一并装在工装上，找正产品位置，先在中底组合件与三底之间对称定位 4 点，然后在三底与承力座之间对称定位 4 点，进行相关位置度限制；焊接承力座与三底之间的焊缝 C，分两层对称焊接，第二层与第一层焊接顺序相反，尽量减小焊接应力对结构位置度的影响；对称焊接 4 件支板与三底的 8 条焊缝 D，方向从里向外焊接，在三底的两条焊缝都处于开环状态（B 焊缝、F 焊缝）下，充分释放支板焊接应力，并为后续焊接收缩预留间隙；分八段对称焊接三底与中底组合件焊缝 F，分两层焊接。第一层焊完待充分冷却后，经测量承力座四角高度数值后，找高点对称焊接第二层；焊接 4 件支板与承力座的 8 条焊缝 E，方向向下，意在对三底和中底组合件进行反向施压，进一步抵消焊接应力影响；焊接三底与火药喷管关键焊缝 B，分两层对称焊接；最后焊接对焊接变形影响较小的氧进口法兰与三底焊缝 G。

采用成熟工艺方案完成头部焊接后，对头部喷嘴间隙及面板平面度进行采样点测量，测量数据如表 3 所示。由表 3 中数据可知，采用成熟工艺方案焊接推力室头部后，头部喷嘴间隙处于 0.35～0.5mm，相比初期工艺方案和改进工艺方案，其间隙得到很好的控制，波动范围仅为 0.15mm，而且面板平面度也得到了相应的提高，完全满足设计要求。

表 3　成熟方案喷嘴间隙及面板平面度实测数据 mm

1 到 6 圈采样点		1	2	3	4	5	6	设计要求值
面板平面度		0.15	0.08	0.1	0.15	0.1	0.13	≤0.4
头部喷嘴间隙	最大值	0.5	0.4	0.45	0.5	0.4	0.4	≥0.35
	最小值	0.4	0.35	0.4	0.4	0.35	0.35	

在改进方案的基础上，改进焊接顺序并预留收缩间隙，使上述三个主要焊接应力经焊接后得到完全释放，此时仅剩三底与火药喷管焊缝未焊接。当焊接该焊缝后，对推力室头部体现的应力主要表现在火药喷管与三底之间的很小的作用力。通过数值模拟对成熟工艺方案进行应力仿真分析，应力分布情况如图4所示。可以看出，浅色区域进一步缩小，说明通过焊接工艺改进第一底、第二底中间区域产生的焊接应力得到有效控制，完全满足设计提出的更高要求，产品焊接成型后完全满足后续产品的装配使用要求。

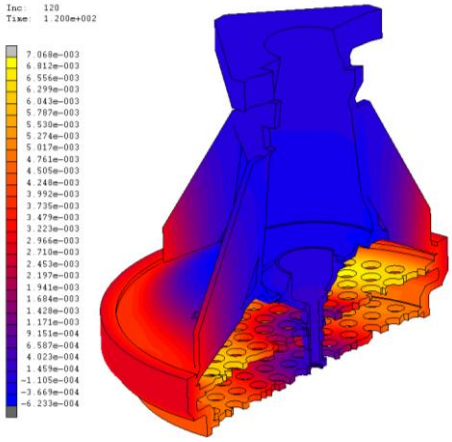


图4　成熟工艺方案头部焊接应力分布图

综上所述，在焊接工装的刚性约束下，通过预留间隙、设置开环状态并按照优化的焊接顺序，使焊接应力得到充分释放和有效控制，保证生产的产品形位尺寸能够满足设计要求。

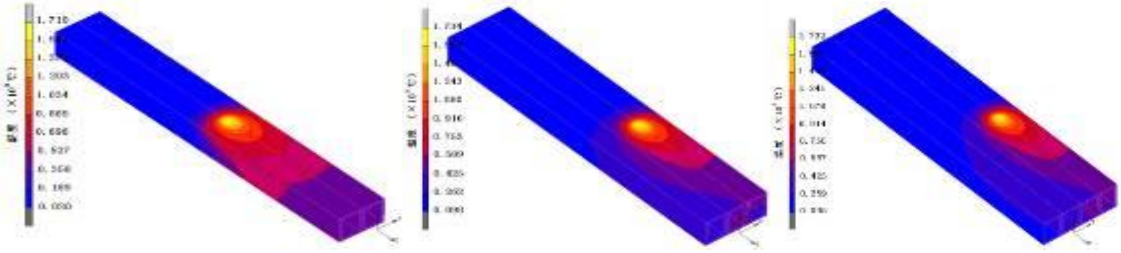
3.4　可达性控制

除了解决焊接应力控制工艺问题外，还须彻底解决焊接可达性方面的两个工艺问题：其一是焊接可达性，其二是焊接电弧热量的可达性。

头部完成其它零组件焊接后，给最后焊接的火药喷管与头部三底的待焊焊缝造成了焊接可达性难题。由于受其它零件限制，此待焊焊缝位置狭窄，现在市面上所能够采购到的普通焊枪都无法满足的该焊缝的焊接可达性要求。因此，通过对该焊缝位置结构进行分析，对普通焊枪进行优化改进，设计出一种特殊形状的专用焊枪，实现了这一狭窄空间结构焊缝的有效焊接，专用焊枪与普通焊枪对比如图5所示。

图5　专用焊枪（左）与普通焊枪（右）对比

由于焊接过程中要实现头部焊接的形变最小化，需尽可能保证头部最后一道闭环焊缝焊接的焊缝形状系数达到最小，以减少因焊接热输入引起的焊接应力过大而造成产品焊接变形，但是如果热输入太小则会造成部分焊缝熔深不足。通过多次试验研究，引进富氩焊接技术，即采用特定比例的氢氩混合气进行焊接，图6为富氩焊接技术电弧热量可达性效果仿真图。采用该方法不但有效提高了电弧热量，使之获得深而窄的焊缝形状系数，而且解决了由焊缝成型系数不良引起的焊接应力变形。



a　未加氢　　b　加氢3%　　c　加氢5%

图6　加氢量对焊缝熔深的影响

4　应用效果

采用成熟工艺方案进行焊接，较前两种方案，在头部间隙和面板平面度控制方面，有了很大的提升，完全满足了设计要求，表4为推力室头部采用成熟工艺焊接实测统计结果。

表 4　头部喷嘴间隙及面板平面度实测数据　mm

1 到 6 圈采样点		1	2	3	4	5	6	设计要求值
面板平面度		0.15	0.1	0.15	0.13	0.08	0.08	≤0.4
头部喷嘴间隙	最大值	0.4	0.4	0.5	0.45	0.4	0.4	≥0.35
	最小值	0.35	0.35	0.45	0.4	0.35	0.4	

从推力室头部焊接实测统计结果表明，焊接头部间隙完全满足设计提出的要求，也满足后续产品在装配过程中提出的更高要求，因此，该工艺方案为推力室头部复杂结构件在焊接过程中控制变形，保证面板平面度提出了一个更加可靠的工艺方案。

5　结束语

通过对某型号发动机头部焊接工艺的研究，提高了头部焊接产品的焊接质量可靠性，并得出以下结论：

a. 通过实践对比分析，确定了成熟工艺方案为理想控制方案。

b. 成熟工艺方案研究分析了焊接工艺控制过程中的各种结构因素，决定以头部结构特点、焊接应力的影响，到焊接顺序、方向的作用，焊接可达性拓展等方面，进行了很大的调整、优化和改进。采取了相应的解决措施，将焊接变形控制在微米级，满足了设计要求。

c. 解决了在非对称结构下，控制焊接应力与变形的焊接工艺难题，最大限度地减小了对产品结构的影响，提高了焊接质量，提高了实际应用的稳定性和可靠性，满足了批产发射的需求，取得了巨大的经济效益。

参考文献

1　中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册. 北京：机械工业出版社，2007

2　胡绳荪. 现代弧焊电源及其控制. 北京：机械工业出版社，2007

3　刘鸿文. 材料力学. 北京：高等教育出版社，2011

4　王宗杰，臧汝恒，李德元. 工程材料焊接技术问答. 北京：机械工业出版社，2002

5　姜焕中. 电弧焊及电渣焊. 北京：机械工业出版社，2006

⊙⊙⊙