

# 固体火箭发动机喷管一体化粘接工艺研究

王纪霞<sup>1</sup> 包乐<sup>1</sup> 胡大宁<sup>2</sup> 张崇耿<sup>1</sup> 张新航<sup>1</sup>

(1. 西安长峰机电研究所, 西安 710065; 2. 陆军驻天水地区军事代表室, 天水 740000)



**摘要:** 为了满足固体火箭发动机喷管一体化的粘接要求, 提高产品的粘接质量, 分析了胶粘剂性能、粘接工艺、温度及内衬与壳体的配合间隙对喷管粘接质量的影响, 结果表明, 通过控制影响一体化喷管粘接的各种因素, 得出了最佳的工艺生产条件, 保证了发动机工作的可靠性。

**关键词:** 喷管; 一体化; 粘接工艺

## Research on Integrative Bonding Process of Solid Rocket Motor Nozzle

Wang Jixia<sup>1</sup> Bao Le<sup>1</sup> Hu Daning<sup>2</sup> Zhang Chonggeng<sup>1</sup> Zhang Xinhang<sup>1</sup>

(1. Xi'an Changfeng Research Institute of Mechanism and Electricity, Xi'an 710065;  
2. Army Tianshui Area Delegation Bureau, Tianshui 740000)

**Abstract:** Influence factors on nozzle bonding property including temperature, adhesive, bonding process and gap between metal shell and insert were analyzed to satisfy integrative bonding process of some solid rocket nozzle. The result of the test indicated that the best bonding process was found through controlling the factors, and the reliability of solid rocket was protected.

**Key words:** nozzle; integration; bonding process

### 1 引言

固体火箭发动机喷管由金属壳体、喉衬组件和复合内衬组成, 工作时要承受高温、高速燃气的冲刷<sup>[1]</sup>, 因而不但要求每个部件具有一定的耐热、耐冲刷性能, 而且要求这些部件一体化粘接后具有结构完整性, 从而保证发动机工作时喷管防热的可靠性。本文针对固体火箭发动机喷管的结构设计要求, 需要金属壳体、喉衬组件和复合内衬进行一体化粘接。该喷管与以往粘接的喷管具有以下不同点: 喷管直径大; 喉衬、内衬和壳体一次粘接成型; 粘接面均为弧面配合; 内衬易变形。通过常用的方法对喷管粘接后进行探伤, 发现喷管出现严重的脱粘现象, 为了解决喷管粘接的脱粘现象, 研究分析了胶粘剂的性能、粘接工艺、粘接温度和粘接间隙对喷管粘接质量的影响。

### 2 影响因素的分析与研究

对喷管在粘接过程中出现的现象进行总结, 在一体化粘接过程中遇到的问题主要包括: 喷管小口内部直段台阶胶料聚集; 喷管大口直段过渡处胶料聚集; 喉衬组件、复合内衬和壳体粘接时, 粘接压力很难准确控制导致粘接不到位。鉴于以上现象, 本文针对性地分析了胶粘剂性能、粘接工艺、温度和粘接间隙对喷管粘接质量的影响。

#### 2.1 胶粘剂性能对粘接质量的影响

在进行喷管一体化的粘接过程中, 复合内衬与金属壳体粘接后进行超声探伤时发现较大的脱粘区, 把复合内衬从壳体中取出, 发现在金属壳体的直段和大口处有大量的胶粘剂聚集, 造成加压不到位, 严重影响

作者简介: 王纪霞 (1983-), 工程师, 化学专业; 研究方向: 固体火箭发动机材料和工艺的研究。

收稿日期: 2014-01-09

响喷管的粘接质量。通过对现用的胶粘剂进行分析研究,胶粘剂配方组成有环氧胶粘剂、固化剂和填料,其中填料是胶粘剂堆积的主要因素。由于胶粘剂固化后有较大的固化收缩率,填料的加入不仅能降低固化收缩率和胶层的热胀系数,减少固化过程中产生的内应力,而且还可以调节胶粘剂的施工粘度及流变性等,所以填料在胶粘剂中是不可缺少的。现有胶粘剂中所用的填料为云母粉和三氧化二铝粉,填料的目数均为120目,分别选用了如表1的配方组分,把三种规格的胶粘剂分别涂在喷管壳体的粘接面,然后对粘接件进行加压,把粘接件从喷管壳体退出后,规格4的大、小口直段无填料堆积,说明云母粉在140目、三氧化二铝粉在200目时与胶粘剂的流动性好而且无分层现象,满足该喷管粘接要求。按照设计指标要求,对该配方下的胶粘剂进行了剪切性能测试(见表2),从表2可以看出,该配方下胶粘剂的性能满足设计指标要求。研究表明,通过控制填料的粒度解决了粘接过程中填料堆积的问题。

表1 喷管粘接用胶配方组分调整前、后情况统计表

组 份	规格1 (调整前)	规格2 (调整后)	规格3 (调整后)	规格4 (调整后)
云母粉	120目	120目	140目	140目
三氧化二铝粉	120目	140目	140目	200目

表2 更换填料后喷管粘接用胶粘剂性能

性 能	原胶粘剂	调整后胶粘	设计指标
剪切强度/MPa	25	30	15

## 2.2 粘接工艺对粘接质量的影响

对直径较小、配合型面简单的喷管通常采用手动直接加压,不要求对施加压力进行量化,只要求粘接后的尺寸满足要求即可。针对该喷管直径较大、有多个弧面配合且易变形的特点,按照原有方法直接进行加压,多个弧面配合如果所施加压力太小,间隙内的空气不容易排出,造成喷管壳体与复合内衬脱粘;施加压力太大,压缩变形过大,形成内应力降低粘接强度<sup>[2, 3]</sup>,甚至会压坏组合喉衬和复合内衬,为了解决上述可能出现的问题,采用不同的粘接工艺方法。

### 2.2.1 喷管试装配

首先将复合内衬与喉衬组件试装配,如图1所示,用塞尺测量保证两件间的内型面间隙 $c$ 小于 $0.07\text{mm}$ ,当由于型面误差造成不满足此要求时,允许用200目

细砂纸轻轻适量修磨喉衬组件配合型面 $c$ 。然后把喷管壳体与复合内衬的试装配,测量复合内衬大端面高出喷管壳体大端面的高度 $a$ ,理论值 $a$ 为 $15.5\text{mm}$ ,间隔 $90^\circ$ 取测点并作标记,四点测量值偏差应小于 $0.3\text{mm}$ ,试装配不到位,配车喷管内衬外型面。其次将喉衬组件与喷管壳体试装配,测量喉衬组件下端面距离收敛段壳体下端面的高度 $b$ ,理论值 $b$ 为 $15\text{mm}$ ,间隔 $120^\circ$ 取测量点并作标记,三点测量值偏差应不超过 $0.10\text{mm}$ 。最后,喷管壳体、复合内衬与喉衬组件三件试装配,用塞尺测量复合内衬与喉衬组件内型面间隙 $c$ 要求小于 $0.07\text{mm}$ ,此时复合内衬大端面高出金属壳体大端面高度 $a$ 和喉衬组件小端的突出高度 $b$ 应与喷管壳体和喷管内衬两件单独试装配时相吻合,作为最终判断是否进行下一步粘接的依据。

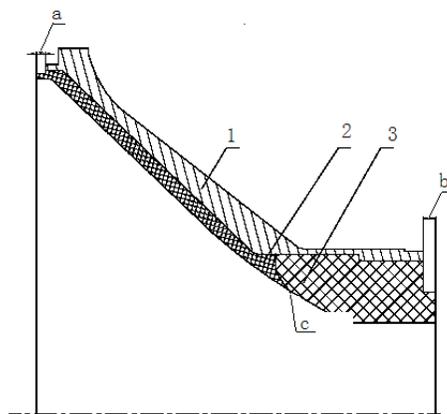


图1 喷管粘接示意图

1—喷管壳体 2—喷管内衬 3—喉衬

### 2.2.2 喷管粘接加压工艺方法

为了减少因压力难以控制对产品质量造成的影响,对压力进行量化,对喷管粘接采取量化加压技术改造,加压量化原理见图2。

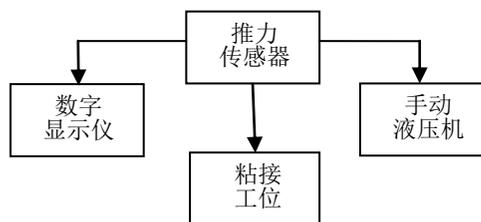


图2 喷管粘结加压量化原理示意图

喷管粘接控制过程如下:壳体大端放上压板,从壳体下端放入螺杆,螺杆上端上好螺母,在压板上放置粘接工装的承压块,压机顶杆顶住承压块加压,为

保证内衬不偏斜，加力时粘接工装的中心要与内衬的中心一致。加力要均匀缓慢，喷管内衬大端面四周均有溢胶，视为正常。每次加力后分别测量记录喷管内衬大端伸出壳体的特征点高度  $a'$  及小端喉衬伸出喷管壳体的特征点高度  $b''$ ，当满足  $\Delta a = (a' - a)$  小于 0.20mm 和  $\Delta b' = (b - b'')$  小于 0.10mm 时，停止加力，认为加压到位，同时通过高度  $a$  的变化量  $\Delta a$ ，高度  $b$  的变化量  $\Delta b'$ ，计算间隙  $c$  粘接面的值  $c'$ ，当  $c'$  的值满足小于 0.10mm 时，粘接到位。由于使用的数字显示仪不能直接读出压力值，为了方便使用，数字显示仪进程对应的压力值见表 3。通过控制粘接压力的大小不但提高了粘接质量，还提高了生产效率。

表 3 数字显示仪进程对应的压力值 (桥压 5v)

量程/kN	进程/mv
0	0
0.5	0.0698
1	0.1396
1.5	0.2094
2	0.2792
2.5	0.3490
3	0.4188
3.5	0.4886
4	0.5584
4.5	0.6282
5	0.6980
5.5	0.7681
6	0.8382
6.5	0.9083
7	0.9784
7.5	1.0485
8	1.1186
8.5	1.1887
9	1.2588
9.5	1.3289
10	1.3990

2.3 温度对粘接质量的影响

温度对胶粘剂的流动性影响也很大，温度高胶粘剂的流动性好，反之则流动性变差。粘接温度过低，胶粘剂粘稠，不利于胶液的流动、浸润，产生胶层不均匀、夹裹气泡等缺陷。为了避免上述问题的出现，做了工艺试验 (见表 4)，对复合内衬和喷管壳体的预热温度进行研究，最终确定了生产的温度范围：操作间温度在 15~28℃ 的范围，复合内衬和金属壳体在 (50±2)℃ 下预热 120min。最高预热温度选择 (50

±2)℃，主要是因为胶粘剂在 60℃ 下的流动性较好，但选用胶粘剂的固化温度为 80℃，所以选择了以上粘接工艺的温度条件。在此条件下进行喷管的粘接，胶料的流动性得到保证，粘接后进行超声探伤，结果良好。

表 4 不同温度下的喷管粘接探伤结果

序号	操作间温度	预热时间	喷管内衬和壳体预热温度	超声探伤结果
1	15~28℃	120min	(30±2)℃	脱粘
2			(40±2)℃	脱粘
3			(50±2)℃	合格

2.4 配合间隙对粘接质量的影响

喷管内衬与金属壳体配合间隙设计要求尺寸范围为 0.062~0.342mm。间隙的大小严重影响胶液的流量，间隙的大小与流量关系的理论计算：

粘性融体，在环缝中流动有下列公式<sup>[4]</sup>：

$$Q = \frac{\pi k' Dh^{n+2} \Delta P^n}{2^{n+1} (n+2) L^n}$$

其中， $Q$ ——容积流量； $\Delta P$ ——压力降； $D$ ——导管的直径； $h$ ——缝隙宽度； $L$ ——缝隙的长度； $k'$

——流体的流动度  $k' = \frac{1}{\zeta'}$ ； $\zeta'$ ——非牛顿流体的粘

度系数； $n$ ——流动常数。

根据喷管壳体与内衬的公差进行计算，最大的间隙宽度 0.34mm、最小的间隙宽度 0.06mm。在同一条条件下加压，公式中除  $Q$ 、 $h$  外其余各参数相等。两种

情况的胶流量之比为：
$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{h_2^{n+2}}{h_1^{n+2}} = \frac{0.34^{n+2}}{0.06^{n+2}}$$

a. 假定为牛顿液体时  $n=1$ ，则

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{0.34^3}{0.06^3} = 181.96;$$

b. 假定为非牛顿液体时  $n=2$ ，则

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{0.34^4}{0.06^4} = 1031.12.$$

这些数据表明间隙的大小严重影响胶液的流量。在加压时胶液不会以同样的速度往上升，因此控制间隙的均匀度非常重要。实际使用时内衬出现局部轻微

变形, 为了减少复合内衬变形, 控制了复合内衬的存放时间, 做到机加后使用时间控制在 24h 以内, 使喷管壳体与复合内衬间隙控制在设计范围内。

### 3 结束语

为了满足固体火箭发动机喷管一体化的粘接要求, 研究和分析了胶粘剂性能、粘接工艺方法、温度和配合间隙对喷管一体化粘接的影响, 解决了粘接过程中粘接不到位和粘接面脱粘的问题, 最终得出了主要影响因素的最佳生产条件:

- a. 从胶粘剂的性能分析最终确定了云母粉和三氧化二铝的目数分别为 140 目和 200 目;
- b. 从粘接工艺方法分析确定了先进行各个部件的试配, 然后对加压的过程进行量化的工艺方法进行一体化粘接;

c. 从温度的影响角度分析确定了操作的温度参数为: 操作间温度在 15~28℃ 的范围, 复合内衬和金属壳体在 (50±2)℃ 下预热 120min;

d. 从壳体与复合内衬、喉衬组件的配合间隙分析, 通过缩短复合内衬存放时间, 控制复合内衬与壳体的间隙。

### 参考文献

- 1 赵慧蓉. 固体火箭发动机喷管粘接界面的超声检测[J]. 固体火箭技术, 2000(2): 74~78
- 2 魏元, 徐岱, 冯卫. 无机型磷酸盐胶粘剂粘贴工艺对于有效粘贴的影响研究[J]. 航天环境工程, 2011(2): 167~170
- 3 李辉, 邓德凤. 三元乙丙橡胶粘接工艺研究[J]. 航天制造技术, 2011(3): 36~38
- 4 吴其晔, 巫静安. 高分子材料流变学[M]. 高等教育出版社, 2002

#####

(上接第 25 页)

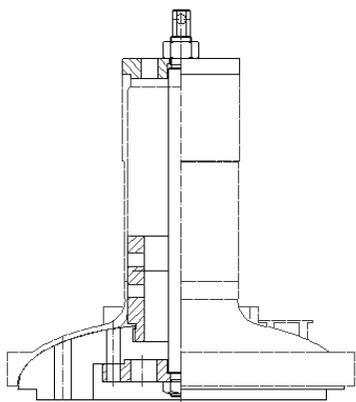


图 5 回火整形工装结构图

### 6.4 加工工艺性

通过工艺试验, 摸索喷管壳体加工方法。

- a. 当喷管壳体在车加工时, 夹小端外圆, 找正收敛段大端内孔及对焊处小端内孔在 0.2mm 以内, 保证收敛段与尾管的同轴度, 以利于装配、粘接内衬。
- b. 安装座 2 零件加工时, 其上平面留取 2mm 余量, 以备焊接收缩及热处理变形, 待最终形成喷管壳

体后加工安装座 2 上平面时, 先数控铣安装座 2 上平面, 留 0.5mm 余量, 再磨削加工到位, 可保证工件加工的经济性和可靠性。

### 7 结束语

通过实践应用证明, 改进后的 D6AC 钢喷管壳体加工工艺方法合理、有效。通过分析加工过程中存在的问题, 针对相关因素进行相应的细节控制, 并设计必要的工装, 达到对工件最终加工质量的控制, 实现了零件的高效加工。

### 参考文献

- 1 张耀寰, 等. 机械加工工艺设计使用手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993
- 2 阎承沛. 真空与可控气氛热处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- 3 邱宣怀, 等. 机械设计(第 4 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997
- 4 运强, 李保章. 实用车削操作技巧 450 例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006