

小型固体火箭发动机燃烧室绝热层成型工艺研究

罗震

(陕西剑峰机械研究所 西安 710065)

摘 要 通过绝热层胶料及共浇注体的性能测试和对燃烧室绝热层的各种试验,探讨了配芯压注整体成型工艺条件,分析了该工艺的关键技术和控制绝热层表面质量的方法,考核了绝热层的设计和使用性能。实验结果表明:该工艺生产的燃烧室绝热层性能良好、外观光亮、质量稳定,合格率达到 100%。

关键词 绝热层,配芯压注整体成型工艺,发动机燃烧室

Study on Forming Process of Heat-insulating Layer for Combustion Chambers of the Small Solid Rocket Motors (SRM)

Luo Zhen

(Shanxi Jianfeng Research Institute of Mechanism Xi'an 710065)

Abstract The integral forming technique of mold core adjusting and binder injecting for making the heat-insulating layer of the combustion chamber of the small SRM was explored by testing properties of the binder, the cast matrices and properties of the heat-insulating layer of the combustion chamber. The key technique and the methods of surface quality control of the heat-insulating layer were analyzed. The design and operational performance of the heat-insulating layer were examined. The experimental results show that the heat-insulating layer made by the technique features excellent performances, bright appearance and stable quality. The qualification rate had reached 100%.

Key words Heat-insulating layer, Integral forming technique of mold core adjusting and binder injecting, SRM combustion chamber

1 引言

小型固体火箭发动机燃烧室内壁绝热层涂覆工艺有喷涂、刮涂、离心涂覆、贴片和压溢涂覆。由于某小型固体火箭发动机燃烧室结构特殊,上述工艺方法难于实现,故探索配芯压注整体成型工艺制作绝热层。该工艺是将芯模与燃烧室壳体先安装并调整好同轴度和两者之间的间隙,然后用压力把胶料注入壳体与芯模之间的间隙内固化后脱出芯模的成型工艺。它直接在燃烧室壳体内壁成型绝热层,同时也完成了与壳体的粘接。

试验选用环氧树脂体系进行成型工艺研究,优

选最佳工艺参数,在胶料配方、胶料粘度和温度、注射压力、工件温度、绝热层固化温度及其表面质量控制方面作了一些探索性研究。

2 试验

2.1 绝热层的配方设计

绝热层配方设计时,侧重考虑下列三方面因素:一是配方中不允许有在该工艺条件下易挥发的物质;二是配制的胶料在工艺条件下粘度低、使用期长;三是绝热层隔热性能和低温性能优良。试验采用环氧树脂体系作为燃烧室绝热材料。选用了 50 号使用期长、粘度低、综合性能优良的胺作环氧

收稿日期:2001-08-31

罗震,1943年出生,高级工程师,主要从事合成胶粘剂、耐高温、耐蚀防热材料的研究工作

树脂固化剂。为了提高绝热层的耐烧蚀、绝热性能,配方中加入了适量的耐高温、隔热性能优良的填料。

2.2 绝热层性能测试

2.2.1 试样制备

按优选的配方和工艺参数制备试样。

2.2.2 基本性能测试

(1) 拉伸强度、延伸率、冲击韧性、热导率、线膨胀系数、比热容按 GB770A—97 规定的相关方法测定。

(2) 密度按 GB1033—86 测定。

(3) 氧—乙炔烧蚀率按 GB323A—96 测定。

2.3 试验设备

恒温反应釜、真空泵、烘箱、空气压缩机、脱模机、水压试验机、INSTRON4540 美制静态材料试验机、氧—乙炔烧蚀试验装置、发动机地面试车台及其测试装置。

2.4 试验步骤

(1) 胶料按配方比例和配胶工艺配制,待用。

(2) 采用配芯压注整体成型工艺将胶料注入型腔内固化成型。

(3) 采用水压试验、常温及高低温试验、冲击、震动、运输等一系列例行试验和发动机地面试车考核绝热层的设计和使用性能。

3 结果与分析

3.1 脱模设计与脱模剂的厚度控制

由于芯模较长,芯模全部被绝热层包容。为了顺利脱出芯模,设计选用热熔脱模剂,该脱模剂的熔点温度略低于绝热层最终固化温度。当绝热层固化完全了,热熔脱模剂也熔化了,此时在绝热层与芯模之间充满了液态脱模剂,可在脱模机上顺利地拔出芯模。实施此脱模设计,即使在高于绝热层的玻璃化温度下脱模,也不会引起绝热层脱粘,必须随室温变化调整热熔脱模剂的上模温度。一般分三档,每档温差 10,能保证芯模上的脱模剂厚度一致。若不管春夏秋冬,一律用同一温度上脱模剂,则会造成脱模剂厚度冬季偏厚,夏天偏薄。若脱模剂太厚,则在装配芯模过程中会蹭掉超厚的脱模剂,最后导致绝热层表面粗糙或出现棱条;若脱模剂厚度过薄,会造成脱模困难或脱不出芯模的现象。

3.2 环氧胶料搅拌抽真空脱气的温度、真空度及时间的选择

宇航材料工艺 2002 年 第 1 期

我们研制的环氧胶料在 50 下的活化能较小、反应速度缓慢、经过 1.5 h 后其流动性依然良好。实践证明:当加入的填料经过 120、4 h 烘干,胶料在 50 时,真空度达 1 330 Pa ~ 3 995 Pa,搅拌除气 40 min 即可除尽胶料中的气泡。

3.3 工件预热温度及时间的选择

工件温度最佳选择应为胶料粘度最低点附近对应的温度,同时必须保证工件温度为恒温状态。实验时选高于胶料温度 10 的工件预热温度(即 60)预热工件。预先安装好的芯模与燃烧室组件工件,其间存在两层空气。一层是芯模内密封住的空气;另一层是芯模与燃烧室壳体内壁之间的空气(即绝热层填充间隙)。空气的热导率很小,芯模主要靠顶部表面受热,因此工件预热时,必须经过足够长的时间才能使芯模温度和芯模内的空气温度达到预期温度。

用 WZB 型铂热电阻对芯模温度进行测试,方法是在安装好的工件芯模上的止扣螺纹孔内放入分度号为 B_{A2} 的铂热电阻。实际测量结果见表 1。0 ~ 650 铂丝电阻与温度的关系为: $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$, 式中 R_t 为 t 时热电阻的电阻值, R_0 为 0 时热电阻的电阻值, A 、 B 为有关的分度常数。对分度号为 B_{A2} 者 $R_0 = 100$, $A = 3.96847 \times 10^{-3}/$, $B = -5.847 \times 10^{-7}/^2$ 。

由表 1 可见,工件在 60 预热 3.5 h,芯模温度才能达到 50 (其最高恒定温度为 55),而燃烧室壳体温度达 60。为了使壳体温度不至迅速下降,采取热棉垫包裹的保温措施,使整个工件温度基本上满足恒温 50 ~ 55 的工艺要求。此时,当 50 的胶料注入工件内时,型腔内的胶料温度必定在 50 ~ 55 内,胶的粘度会变小,与工件表面浸润良好。胶料越向上注入,其温度越接近芯模温度,粘度会变得越来越小,进料压力就小,注胶全过程中都不会裹入空气,固化后的绝热层表面是一个光亮的表面。

实践证明:胶料粘度控制是实施配芯压注整体成型工艺的关键之一。首先,环氧胶料必须在工艺温度及时间内粘度变化小,并为牛顿流体;其次,在注射过程中,粘度应控制在最低点附近。粘度小,注胶压力低,注胶时间和注胶速度容易控制,制品质量好而稳定。

表1 工件预热时间与芯模温度测试结果

Tab.1 Test results of workpiece preheating time and mold core temperature

| 在60 下工件 保温时间 /h | 电阻测量值 / | 芯模达到的温度 / |
|--------------------|------------|--------------|
| 0.0 | 104.9 | 12 |
| 0.5 | 108.1 | 21 |
| 1.0 | 110.8 | 27 |
| 1.5 | 113.8 | 35 |
| 2.0 | 116.0 | 41 |
| 3.0 | 118.8 | 48 |
| 3.5 | 119.5 | 50 |
| 4.0 | 120.4 | 52 |
| 4.5 | 121.1 | 54 |
| 5.0 | 121.4 | 55 |
| 5.5 | 121.6 | 55 |
| 6.0 | 121.6 | 55 |

温度对胶料粘度影响极大,胶料粘度与温度 T 的关系可用下式表示^[1]:

$$= Ae^{E/RT} \quad (1)$$

式中: E 为胶料粘流活化能, A 为相当于温度 T 趋近于 时的粘度常数, R 为气体常数, T 为胶料温度。

由(1)式可知温度 T 低,则粘度 增大。

若工件在 60 下仅预热 1.5 h,其芯模温度为 35 (见表 1),而燃烧室壳体温度已达 60。在这种芯模与壳体温差大的条件下注入胶料,会导致两金属壁上的胶料粘度差别大(靠壳体壁上的胶料粘度比原来小得多,而靠芯模壁上的胶料粘度却比原先大得多),胶料加压上升时就产生一个较大的速度梯度(该速度梯度会随时间延长而变小),胶料上升的形态是向芯模壁翻卷迭加升高的,这样上升的胶料最容易夹卷空气。胶料越往上注入,其温度就逐渐接近 35,粘度则越变越大,导致靠下部粘度相对较小的胶不能再越上层粘度大的胶,必须用较大的压力才能使胶料向上推进。高粘度胶夹裹的空气,难以从胶液中逸出,待绝热层固化后,产品表面便出现许多气孔。

树脂粘度与它渗入微孔深度 z 的关系式为^[2]:

$$z^2 = K L \cos t / \quad (2)$$

式中 t 为液体到达深度 z 的时间; K 是常数,它在此为 $1/(1.40 \times 6)$; $L \cos$ 是粘接张力; 是孔径。

从式(2)可知,液体到达深度 z 与其粘度 成反比。粘度大的胶料难于渗入微孔中,即难于浸润工件表面。50 的胶料遇到 35 的芯模,胶料粘度必然增大,使许多微孔被胶料覆盖。当升温固化时,胶的粘度随温度上升而在一定时间内变小,此时,一方面微孔内的空气受热膨胀,向压力较小的方向迁移和彼此相遇变大,它们绝大多数还未来得及逸出就被固结在绝热层内形成针孔或气泡;另一方面,胶料中的树脂受热使分子运动速度加快,胶料粘度迅速变小,使它有条件渗入原先被空气占据的微孔内,固化脱模后便在绝热层表面看到极薄的一层渗胶花纹。反之,若工件温度过高(如等于胶料的起始反应温度 80),在胶料注入过程中受热的胶料反应速度加快,胶的粘度也会以较快的速度增大,同样也得不到优质产品。

3.4 注胶压力的选择

用研制的胶料,在选取的工艺参数条件下试验并计算出该胶料非牛顿性的指数 $n = 1$,从而判定该胶料在选取的工艺条件下为牛顿性液体。

当 $n = 1$ 时,胶料在环形窄缝流道的体积流量 Q 与环缝宽度 H 的三次方成正比^[3]。推导的公式如下:

$$Q = KDH^3 P / 12L \quad (3)$$

式中 K 为流动度, D 为环隙内径, P 为压力降, L 为管长。对同一发产品 K 、 D 、 P 、 L 均为定值。

由于燃烧室为薄壁金属壳体,加工过程中不可避免会产生变形,故它与芯模之间的缝隙宽度 H 不可能均匀一致。若注胶压力过高,会导致较宽缝隙处的胶快速升高,并返流到较窄缝处,容易包裹空气,使产品表面形成大气孔,故在胶料使用期内,应尽可能采用较低压力、较慢速度注胶。通过反复试验后,选取注胶压力为 0.13 MPa ~ 0.15 MPa,即可得到优质产品。

3.5 绝热层固化温度的选择

用差动热分析(DSC)方法测出绝热层配方胶起始反应温度为 80,反应峰顶温度分别是 98 和 145 (双峰),反应终止温度为 163,故选绝热层固化温度为 80 和 110 两个阶段。

4 绝热层性能、质量与考核试验

件性能实测数值见表 2,耐老化性能见表 3。

某小型固体火箭发动机燃烧室绝热层浇注体试

表 2 绝热层浇注体试件主要性能*

Tab.2 Primary properties of the heat-insulating layer of the small SRM combustion chamber

| 拉伸强度 /MPa | 延伸率 / % | 冲击韧性 /J cm ⁻² | 密度 /g cm ⁻³ | 热导率 /W(m·K) ⁻¹ | 线膨胀系数 /10 ⁻⁴ K ⁻¹ | 比热容 /J(g·K) ⁻¹ | 氧—乙炔线烧蚀率 /mm s ⁻¹ (烧 4s~10s) |
|--------------|------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|--|------------------------------|--|
| 23~33 | 4.2~7.0 | 1.2~1.8 | 1.39 | 0.332 | 1.2092 | 1.5288 | 0.436~0.541 |

*拉伸强度、延伸率、冲击韧性的测试温度为 -40。

表 3 绝热层浇注体试件耐老化性能*

Tab.3 The ageing-resistant properties of the heat-insulating layer of the small SRM combustion chamber

| 存贮时间 | 拉伸强度/MPa | 延伸率/ % |
|---------|----------|--------|
| 初值 | 32.75 | 5.45 |
| 海南贮 2 年 | 32.1 | 5.06 |
| 海南贮 4 年 | 27.6 | 5.24 |

*测试温度为 -40。

从表 2、表 3 可见绝热层低温性能和耐老化性能十分优良。

按优选的工艺参数生产的绝热层表面光亮,无气孔,无麻点和渗胶花纹,绝热层厚度和内腔尺寸精度都完全符合设计要求,产品无损探伤不脱粘,质量稳定,合格率达到 100%。水压试验、例行试验和发动机试车考核都完全满足设计和使用要求。

此工艺已经成功地推广应用于类似的发动机绝热层的生产和长尾喷管防热内衬的粘接。

5 结论

配芯压注整体成型工艺用于制造某小型固体火

箭发动机特殊结构燃烧室绝热层是可行的。对所研制的绝热层胶料在 50℃,真空度达 1 330 Pa~3 995 Pa 下,搅拌除气 40 min 后,用 0.13 MPa~0.15 MPa 的压力注入恒温 50~55℃范围内的工件型腔内,分别在 80℃和 110℃下固化后脱出芯模,便能生产出性能良好、外观光亮、质量稳定的绝热层,产品合格率达到 100%。此工艺成本低,生产效率高,适宜于批量生产。

致谢 先后参加本工作的有张多太、薛启寿、张传文、苗凌如、赵伟建、张建刚、郑宏山、王素珍等同志,在此一并致谢。

参考文献

- 1 王贵恒.高分子材料成型加工原理.北京:化学工业出版社,1982:27
- 2 高学敏等.粘接和粘接技术手册.重庆:四川科学技术出版社,1999:39
- 3 王贵恒.高分子材料成型加工原理.北京:化学工业出版社,1982:129

(编辑 李洪泉)

缓进磨削技术与设备

本成果解决了涡轮工作叶片榫齿加工的关键,经试验研究,掌握了缓进磨削工艺特点、缓进磨床的制造及配套技术。

缓进磨削工艺是用大吃刀缓进给的方式磨削难加工材料和复杂型面,吃刀深度 5 mm~10 mm。有的采用连续修正技术,进给速度由 25 mm/min~300 mm/min,提高到 100 mm/min~1 200 mm/min,而且减少了磨削抗力和提高了磨削精度。切削过程采用强冷却,冷却压力 0.29 MPa,冲洗压力 0.784 MPa。磨削效率超过国外同类机床水平的 50%,价格仅为进口机床的三分之一,操作简单。现开发成功三种缓进磨床:榫齿缓进磨床、单立柱微机控制缓进磨床和微机控制连续修正缓进磨床。

本成果适用于航空发动机叶片、汽轮机叶片加工,汽车行业摇臂生产,大型柴油机连杆,组合夹具基础 T 型槽的加工等。加工卡尺槽型、外型等部位,精度高并提高工效。本成果设计先进,有连续修正功能,解决了砂轮磨损关键技术问题,可采用国产砂轮,磨削效率高,成本低,节省外汇,经济效益显著。

·李连清·