

# Research on the Strength Enhancement Technology of Long Tube Set EPDM Rubber Joint

Fengtao Lu Chonggeng Zhang Haipeng Zhang Fan Zhang Cong Li

China Aerospace Science and Industry Corporation Sixth Research Institute 210, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

## Abstract

Currently, the insulation layer of solid rocket engines is generally made of EPDM rubber material, and the structure of the combustion chamber shell determines that the shape of the insulation layer is mostly a cylindrical structure. For the EPDM insulation layer with a long cylindrical structure, it is usually formed by Haff mold pressing. The strength of the mold joint formed by this process is lower than that of the substrate, and the mold joint of thin-walled parts is prone to tearing, occasionally resulting in mold joint demolding cracking. Therefore, it is necessary to carry out research on the strength improvement technology of the long tube set EPDM rubber joint to solve this problem and improve the quality of product molding.

## Keywords

long tube sleeve; EPDM rubber; Sealing seam strength; research

# 长筒套三元乙丙橡胶合模缝强度提升技术研究

鲁锋涛 张崇耿 张海鹏 张帆 李聪

中国航天科工集团第六研究院 210 所, 中国·陕西 西安 710065

## 摘要

目前, 固体火箭发动机绝热层普遍采用三元乙丙橡胶材料, 而燃烧室壳体的结构决定了绝热层的形状多为筒套状结构, 对于长筒套结构的三元乙丙橡胶绝热层, 通常采用哈夫模模压成型, 此工艺形成的产品合模缝强度较基体偏低, 薄壁件合模缝易撕裂, 偶发合模缝脱模开裂现象。为此, 有必要开展长筒套三元乙丙橡胶合模缝强度提升技术研究, 以解决该问题, 提高产品成型质量。

## 关键词

长筒套; 三元乙丙橡胶; 合模缝强度; 研究

## 1 引言

目前, 固体火箭发动机绝热层普遍采用三元乙丙橡胶材料, 而燃烧室壳体的结构决定了绝热层的形状多为筒套状结构, 对于长筒套结构的三元乙丙橡胶绝热层, 通常采用哈夫模模压成型, 此工艺形成的产品合模缝强度较基体偏低, 薄壁件合模缝易撕裂, 偶发合模缝脱模开裂现象。

为此, 有必要开展长筒套三元乙丙橡胶合模缝强度提升技术研究, 以解决该问题, 提高产品成型质量。

## 2 研究思路

长筒套三元乙丙橡胶合模缝强度提升技术研究思路如下:

a) 对长筒套三元乙丙橡胶的成型过程进行深入分析, 确定材料配方、模具结构对合模缝强度影响的关键点;

b) 依据分析结果, 双管齐下, 分别从材料配方及模具结构方面提出优化改进方案;

c) 开展配方优化、常规性能测试, 同步开展模具设计;

d) 进行小样(缩小型长筒套)工艺试验及性能测试;

e) 小样试验合格后, 进行产品级长筒套工艺试验, 性能测试。

研究流程见图 1。

## 3 机理分析

针对长筒套的成型过程展开分析, 模压时, 型腔内胶料沿芯模上下半圆流动, 上半圆向下流动, 下半圆向上流动, 二者在合模缝部位汇合后, 多余胶料沿合模面水平溢出, 如图 2 所示。

经成型过程分析可以发现, 合模缝强度提升需满足以下条件:

a) 材料具有良好的自粘性, 上下胶料汇合后应融合可靠;

b) 模具在合模面部位具备良好的密封功能, 以及防止

【作者简介】鲁锋涛(1983-), 男, 中国陕西西安人, 高级工程师, 从事复合材料成型、工艺装备设计研究。

过度溢胶功能，确保合模缝部位不泄压。

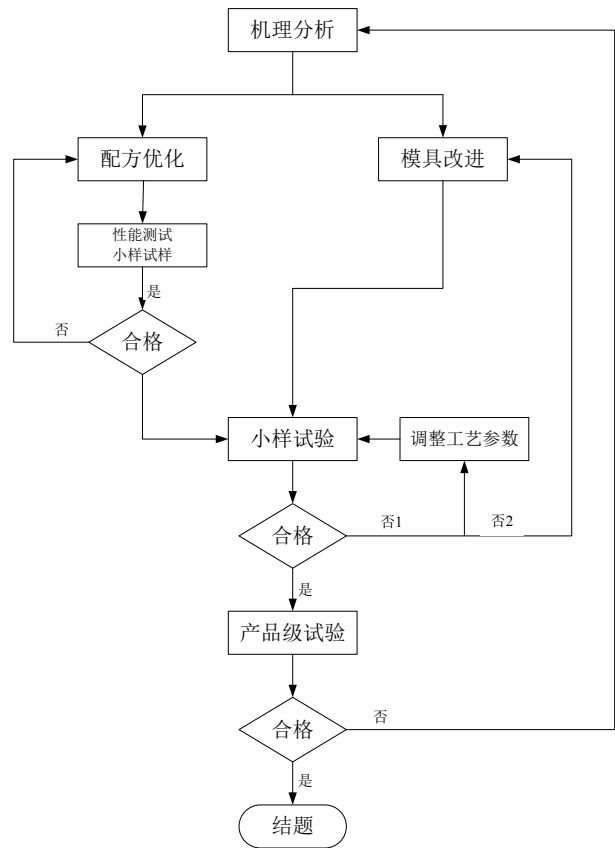


图 1 研究流程

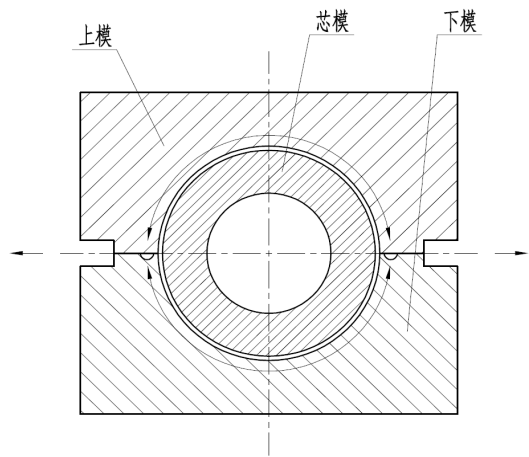


图 2 胶料流向示意图

## 4 改进措施

### 4.1 材料配方改进

当前，绝热层材料为三元乙丙橡胶体系，其基体材料为非极性的三元乙丙橡胶，自粘性和互粘性较差，另外，材料中芳纶纤维含量较高，进一步降低自粘性。经分析，材料配方特性与成型需求相矛盾，为此，从以下方面优化：

a) 基体橡胶并用极性较大的橡胶材料，提高极性，增

加材料自粘性、互粘性；

b) 配方中增加相匹配的增粘体系，进一步提高粘接性；

c) 适当减少芳纶纤维，增加塑性阻燃剂，以提高绝热层成碳性、流动性和弥合性。

### 4.2 成型模具结构改进

现阶段，用以压制长筒套三元乙丙橡胶的哈夫模合模面为平面（与工作台平行）结构，通过机理分析，水平合模面对溢出胶料无法限制，合模到位瞬间，胶料可能出现过度溢出现象，存在合模缝部位压力偏低，胶料发虚风险，为此，模具改进方案如下：

a) 合模面改为斜面（斜上），增加溢胶阻力，合模时，对溢出胶料产生逆向分力，防止过度溢胶；

b) 合模面增加小型储胶槽，合模后，形成胶条密封措施，确保密封保压；

c) 结构适应性改进，增加导向结构，确保合模顺畅。

成型模具结构改进示意图见图 3。

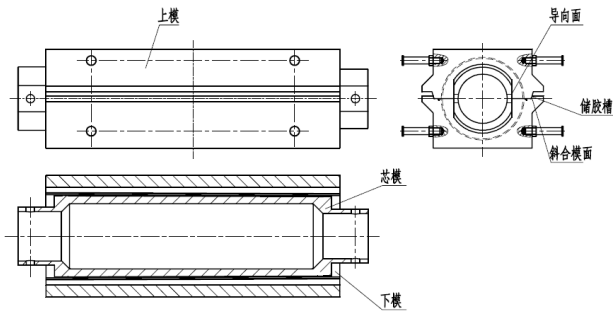


图 3 成型模具结构改进示意图

### 4.3 成型工艺参数摸索

合模压力、合模速度、装料方式以及装料量等均影响合模缝的成型外观质量、强度，经过多轮工艺试验，摸索出成型工艺参数如下：

a) 合模压力：按模具投影面积计算，6MPa 压力即可保证模具合模到位；

b) 合模速度：合模速度尽可能慢，确保胶料充分流动，在模具装料行程内（装料高度），点动控制平板硫化机升降，分 3 次走完行程，中间间歇 2min；

c) 装料方式：本文介绍的是沿芯模上下分瓣装料方式，要求装料左右对称，前后均匀，两侧装料离合模缝预留 10mm 胶料流动空间。至于沿芯模包裹式装料工艺，因存在搭接区，本文未做试验研究；

d) 装料量：按净重的 110% ~ 115% 进行装料。

材料配方优化试验与结果分析

为验证配方改进效果，设计三组对比试验：对照组采用原配方试验组 1 在基体中并用 10% 极性橡胶（如氯丁橡胶），试验组 2 在试验组 1 基础上添加 5% 增粘树脂（如萜烯树脂）并减少 10% 芳纶纤维、增加 8% 塑性阻燃剂（磷酸酯类）。通过测试胶料自粘性（采用 90° 剥离试验，测

试未硫化胶料的初始粘合力)和硫化后合模缝强度(拉伸强度测试),结果显示:对照组自粘性为 0.8N/cm,合模缝拉伸强度为 4.8MPa;试验组 1 自粘性提升至 1.5N/cm,合模缝强度达 7.5MPa;试验组 2 自粘性进一步提升至 2.1N/cm,合模缝强度突破 5.6MPa,且成碳性(800℃残炭率)从原配方的 25% 提高至 32%,满足绝热层耐高温要求。

#### 模具结构改进的有限元仿真验证

利用 ABAQUS 软件对改进前后的模具合模过程进行仿真分析,重点模拟胶料在合模缝处的压力分布。原平面合模面在合模到位瞬间,合模缝区域压力骤降至 2.3MPa,存在明显泄压;改进后的斜面合模面(倾斜角度 15°)配合储胶槽(宽 5mm×深 3mm)结构,合模过程中胶料溢出阻力增大,合模缝区域压力稳定维持在 5.8MPa,且储胶槽内形成的密封胶条能有效阻止后期泄压。仿真结果与实际试验一致,验证了模具改进方案的合理性。

#### 07 工艺参数优化的正交试验设计

选取合模压力(5MPa、6MPa、7MPa)、合模次数(2次、3次、4次)、装料系数(110%、112%、115%)作为正交试验因素,以合模缝强度和外观质量为评价指标。结果表明:当合模压力 6MPa、分 3 次合模(间歇 2min)、装料系数 112% 时,综合效果最佳——合模缝强度达 6.2MPa,溢胶量控制在 0.3mm 以内,无缺胶或过压导致的变形现象,为批量生产提供了参数依据。

## 5 试验与分析

### 5.1 材料配方优化试验与结果分析

为验证配方改进效果,设计三组对比试验:对照组采用原配方,试验组 1 在基体中并用 30% 极性橡胶(如氯丁橡胶),试验组 2 在试验组 1 基础上添加 5% 增粘树脂(如萜烯树脂)并减少 3% 芳纶纤维、增加 5% 塑性阻燃剂(磷酸酯类)。通过测试胶料自粘性(采用 90° 剥离试验,测试未硫化胶料的初始粘合力)和硫化后合模缝强度(拉伸强度测试),结果显示:对照组自粘性为 0.8N/cm,合模缝拉伸强度为 4.8MPa;试验组 1 自粘性提升至 1.3N/cm,合模缝强度达 5.2MPa;试验组 2 自粘性进一步提升至 1.6N/cm,合模缝强度突破 5.6MPa,且成碳性(800℃残炭率)从原配方的 25% 提高至 32%,满足绝热层耐高温要求。

### 5.2 模具结构改进后的有限元仿真验证

利用 ABAQUS 软件对改进前后的模具合模过程进行仿

真分析,重点模拟胶料在合模缝处的压力分布。原平面合模面在合模到位瞬间,合模缝区域压力骤降至 4.3MPa,存在明显泄压;改进后的斜面合模面(倾斜角度 15°)配合储胶槽(宽 5mm×深 3mm)结构,合模过程中胶料溢出阻力增大,合模缝区域压力稳定维持在 5.8MPa,且储胶槽内形成的密封胶条能有效阻止后期泄压。仿真结果与实际试验一致,验证了模具改进方案的合理性。

### 5.3 工艺参数优化的正交试验设计

选取合模压力(5MPa、6MPa、7MPa)、合模次数(2次、3次、4次)、装料系数(110%、112%、115%)作为正交试验因素,以合模缝强度和外观质量为评价指标。结果表明:当合模压力 6MPa、分 3 次合模(间歇 2min)、装料系数 112% 时,综合效果最佳——合模缝强度达 6.2MPa,溢胶飞边控制在 0.06mm 以内,无缺胶或过压导致的变形现象,为批量生产提供了参数依据。

## 6 验证情况

从材料优化后的性能测试、小样试验,以及模具改进后的小样联合试验到产品级试验,所有试验结果达到预期,成型后的三元乙丙橡胶筒套外观光滑平整,无合模缝撕裂、开裂现象。

## 7 结语

通过开展长筒套三元乙丙橡胶合模缝强度提升技术研究,从材料配方、模具结构方面双管齐下,采取相应优化改进措施,合模缝强度取得显著改善,后续还需进一步试验,进行性能稳定性验证。

### 参考文献

- [1] 张韶姣,刘林国,孙学红.聚乙二醇脂脂肪酸酯对三元乙丙橡胶胶料脱模效果的影响[J].橡胶工业,2025,72(07):539-544.
- [2] 戴明浩,赵铜鑫,赵薇,等.高压直流电缆系统交联聚乙烯/三元乙丙橡胶界面的匹配特性研究[J].高压电器,2025,61(07):179-188+196.DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.07.021.
- [3] 侯敏,马建桥,马磊,等.动车组车顶环氧树脂绝缘子合模缝对闪络路径的影响分析[J].绝缘材料,2024,57(07):94-102.DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.07.012.
- [4] 侯兰杰,彭倩倩,刘宽,等.三元乙丙橡胶板式支座性能测试与有限元模型的二次开发[J/OL].橡胶工业,1-5[2025-08-18].https://link.cnki.net/urlid/11.1812.TQ.20250612.1441.002.