

- Production, 2019, 215: 131-43.
- [4] AUERBACH R, BOKELMANN K, STAUBER R, et al. Critical raw materials – Advanced recycling technologies and processes: Recycling of rare earth metals out of end of life magnets by bioleaching with various bacteria as an example of an intelligent recycling strategy [J]. Minerals Engineering, 2019, 134: 104-17.
- [5] ÖNAL M A R, RIAÑO S, BINNEMANS K. Alkali baking and solvometallurgical leaching of NdFeB magnets [J]. Hydrometallurgy, 2020, 191.
- [6] LIU B, ZHU N, LI Y, et al. Efficient recovery of rare earth elements from discarded NdFeB magnets [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 124: 317-25.
- [7] ZAKOTNIK M, HARRIS I R, WILLIAMS A J. Possible methods of recycling NdFeB-type sintered magnets using the HD/degassing process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 450(1-2): 525-31.
- [8] 李现涛, 岳明, 李萌, 等. 块状烧结钕铁硼废料的氢处理回收技术研究进展 [J]. 2016, 37(03): 123-8.
- [9] HUA Z, WANG J, WANG L, et al. Selective extraction of rare earth elements from NdFeB scrap by molten chlorides [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2014, 2(11): 2536-43.
- [10] ABRAHAMI S T, XIAO Y, YANG Y. Rare-earth elements recovery from post-consumer hard-disc drives [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2014, 124(2): 106-15.
- [11] XIE B, WANG L, LI H, et al. An interface-reinforced rhombohedral Prussian blue analogue in semi-solid state electrolyte for sodium-ion battery [J]. Energy Storage Materials, 2021, 36: 99-107. 周利娜, 苏志伟, 肖成梁, 等. 阳极氧化浸出钕铁硼废料中的钕和铁 [J]. 高校化学工程学报, 2022, 36(4): 603-9.
- [12] 周利娜, 苏志伟, 肖成梁, 等. 阳极氧化浸出钕铁硼废料中的钕和铁 [J]. 高校化学工程学报, 2022, 36(4): 603-9.
- [13] KUMARI A, DIPALI, RANDHAWA N S, et al. Electrochemical treatment of spent NdFeB magnet in organic acid for recovery of rare earths and other metal values [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 309.

Exploration of Injection Molding Process for EPDM Rubber

Fengtao Lu Benli Qi Gongle Han Haipeng Zhang

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

Abstract

In solid rocket engines, the insulation layer and cladding are mostly made of ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber. Currently, the molding process of EPDM rubber is mainly based on compression molding, involving molds such as upper and lower molds and Haff molds. Some products formed by Haff molds have lower strength at the joint of the mold and are prone to cracking. In addition, some rubber products contain metal inserts, and traditional molding processes make it difficult to locate and load the inserts. Through analysis, it is found that the cracking problem of the mold joint in the product formed by Haff mold pressing is mainly caused by local pressure relief during mold closing; The difficulty in locating inserts and loading materials is mainly due to the shared space between the material cavity and the mold cavity in the molding process. In the injection molding process, when injecting glue, the mold cavity is always in a locked state, there is no risk of pressure relief, and the material cavity is separated from the mold cavity, which can effectively solve the problems of insert positioning and loading. Therefore, it is necessary to explore the injection molding process of EPDM rubber.

Keywords

Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber; Injection Molding; Process Investigation

三元乙丙橡胶注压成型工艺探究

鲁锋涛 祁本利 韩共乐 张海鹏

中国航天科工集团第六研究院 210 所, 中国·陕西 西安 710065

摘要

在固体火箭发动机中, 绝热层、包覆套所采用的材料大多为三元乙丙橡胶, 目前, 三元乙丙橡胶的成型方式主要以模压工艺为主, 涉及的模具具有上下模、哈夫模, 而采用哈夫模成型的部分产品, 合模缝部位强度偏低, 易出现开裂现象。此外, 部分橡胶产品中含有金属嵌件, 传统模压工艺对于嵌件定位难度大, 装料困难。通过分析, 哈夫模模压成型后的产品合模缝易开裂问题, 主要原因为合模时的局部泄压造成; 嵌件定位难度大, 装料困难, 主要是因为模压工艺中, 料腔与型腔空间共用造成。而注压工艺中, 注胶时, 模具型腔始终处于锁紧状态, 不存在泄压风险, 且料腔与型腔分开, 可有效解决嵌件定位问题以及装料问题。为此, 有必要开展三元乙丙橡胶注压成型工艺探究。

关键词

三元乙丙橡胶; 注压成型; 工艺探究

1 引言

在固体火箭发动机中, 绝热层、包覆套所采用的材料大多为三元乙丙橡胶, 目前, 三元乙丙橡胶的成型方式主要以模压工艺为主, 涉及的模具具有上下模、哈夫模, 而采用哈夫模成型的部分产品, 合模缝部位强度偏低, 易出现开裂现象。此外, 部分橡胶产品中含有金属嵌件, 传统模压工艺对于嵌件定位难度大, 装料困难。

针对上述问题进行深入分析, 哈夫模模压成型后的产品合模缝易开裂问题, 主要原因为合模时的局部泄压造成; 嵌件定位难度大, 装料困难, 主要是因为模压工艺中, 料腔与型腔空间共用造成。而注压工艺中, 注胶时, 模具型腔始

终处于锁紧状态, 不存在泄压风险, 且料腔与型腔分开, 可有效解决嵌件定位问题以及装料问题。为此, 有必要开展三元乙丙橡胶注压成型工艺探究。

2 研究思路与技术方案

开展三元乙丙橡胶注压成型工艺探究, 需满足两个条件。其一, 三元乙丙橡胶材料本身具有良好的流动性。其二, 需要设计出合理可靠的注压成型模具。对于三元乙丙橡胶的流动性, 已在模压工艺中进行了验证, 因而, 本文将重点研究注压成型模具设计。

按照注压成型模具的原理及功能模块, 可将模具划分为两个结构单元—料腔、型腔。注压成型工艺的整体技术方案如下:

先将模具各零部件进行组装, 形成型腔。再将三元乙丙橡胶装入料腔, 通过平板硫化机加热加压, 将三元乙丙橡

【作者简介】鲁锋涛(1983-), 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。

胶从料腔挤压流入型腔，从而实现产品成型，最后，拆卸模具，进行脱模。

2.1 试验对象选取

选取一小型且需通过嵌件成型的典型零件（结构见图1），开展研究试验工作，可以同时研究解决合模缝质量问题、嵌件固定问题、装料问题。

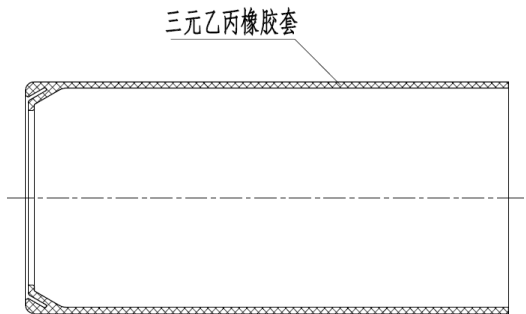


图1 试验样品结构

在该零件中，三元乙丙橡胶的厚度为3.5mm，总重0.62kg。

2.2 注压成型模具设计

根据产品结构特点，完成试验件注压成型模具设计，该模具主要由注塞、上模、芯模、下模、嵌件等组成，结构

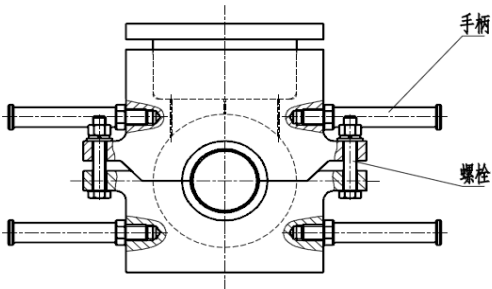
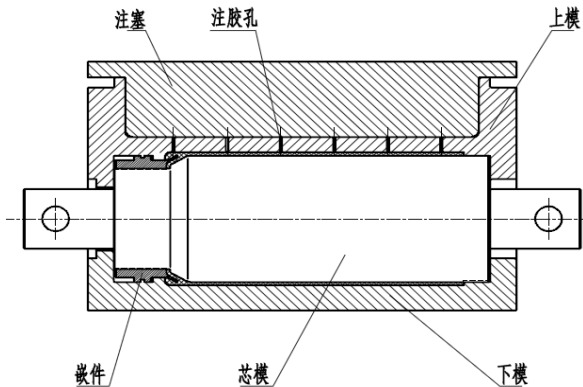


图2 注压成型模具结构

2.3 注压成型模具材料选择与性能适配

在注压成型模具设计中，材料选择直接影响模具寿命、成型精度及产品质量。针对三元乙丙橡胶注压工艺的特点（工作温度150-180℃、锁模力5-6MPa、胶料流动性中等），模具核心部件（上模、下模、芯模）选用Cr12MoV冷作模具钢。该材料经淬火+低温回火处理后，硬度可达50-55HRC，具备优异的耐磨性和抗压强度，可有效抵抗胶料在高压下的冲刷磨损；同时，其线膨胀系数较低（ $11.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ），在反复加热-冷却循环中变形量小，能保证型腔尺寸稳定性，避免因模具热变形导致产品尺寸超差。

对于注塞部件，考虑到其需频繁与胶料接触，承受设

见图2。

模具主要设计要点如下：

料腔：试验样品中，三元乙丙橡胶总重0.62kg，模具料腔设计尺寸为330mm×134mm×50mm，可装料2.6kg，满足装料要求；注胶孔：根据产品型腔位置，在料腔底部设置三排注胶孔，注胶孔排布位置与型腔匹配，孔径为 $\phi 3$ ；嵌件固定：金属嵌件在模具内需固定可靠，且精准定位，才能保证成型后的尺寸精度，根据嵌件结构特点，选择嵌件环形槽外圆作为径向定位面，利用环形槽的侧面作为轴向定位面，确保嵌件定位可靠；模具定位：上下模与芯模轴向通过前后端面定位，径向采用前后两端定位，前端通过嵌件过渡定位，芯模与嵌件内圆进行定位，嵌件环形槽外圆与上下模进行定位，后端上下模与芯模直接定位；排气、溢胶：前端嵌件外部型腔，通过上下模与嵌件的配合间隙进行排气、溢胶，在配合面前端设置空腔，存放排出气体及溢出胶料；前端嵌件内部型腔、后端型腔通过配合间隙直接排气、溢胶；启模口：模具共设置三处启模口，分别位于注塞与上模之间、上模与下模之间、上下模与芯模之间，确保产品成型后顺利脱模，以及再次注料时，注塞可以顺利脱出；模具强度：该试验件注压模具属于小型模具，模具设计壁厚为25mm，强度满足注压要求。

备压力以及与料腔的摩擦力，选用40Cr合金结构钢，经调质处理后硬度控制在28-32HRC，既保证了足够的强度（屈服强度 $\geq 785\text{MPa}$ ），又具备一定韧性，可减少长期往复运动中的疲劳损伤风险。金属嵌件与模具的配合面则采用镀铬处理，镀层厚度20-25 μm ，表面粗糙度 $Ra \leq 0.8\mu\text{m}$ ，一方面降低嵌件与模具的摩擦系数，便于装拆定位；另一方面镀铬层的化学稳定性可防止嵌件在高温硫化过程中与胶料发生化学反应，方便脱模。

2.4 注压工艺参数优化过程与关键依据

注压工艺参数的确定需结合三元乙丙橡胶的硫化特性及模具结构特点，通过多组对比试验逐步优化。在压力参数调试中，初期尝试3-4MPa压力时，发现胶料难以充满型腔