

doi: 10.7690/bgzd.2025.08.002

高粘度发射药成型模具变形分析

季丹丹¹, 毛长勇², 马涛¹, 岳显¹, 余海勇¹

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000;

2. 中国北方化学研究院集团有限公司, 北京 100000)

摘要: 挤出模具结构决定了发射药孔径、弧厚等一系列参数。药料的粘度和模针的弹性易导致在发射药成型过程中发生模针变形, 从而影响发射药产品的尺寸质量。针对模针变形影响发射药产品尺寸、质量的问题, 基于流固耦合方法对某多孔发射药的挤出成型过程进行模拟分析。研究模具结构参数对模针变形的影响规律, 对现有模具进行正交优化设计。结果表明: 成型段长度对模针变形量的影响最大, 压缩段高度的影响次之, 收缩角的影响最小; 模针变形量随收缩角的增大呈递减趋势, 随压缩段高度和成型段长度的增加呈递增趋势; 优化模具的模针变形量较优化前减小 73.3%, 效果明显。

关键词: 发射药; 模具; 变形; 流固耦合

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Deformation Analysis of Forming Die for High Viscosity Propellant

Ji Dandan¹, Mao Changyong², Ma Tao¹, Yue Xian¹, Yu Haiyong¹

(1. Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China; 2. China North Chemical Research Academy Group Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: The structure of the extrusion die determines a series of parameters such as the diameter of the propellant bore and the arc thickness. The viscosity of the propellant and the elasticity of the mould needle can easily lead to the deformation of the mould needle in the forming process of the propellant, thus affecting the size and quality of the propellant products. Aiming at the problem that the deformation of die pin affects the size and quality of propellant products, the extrusion molding process of a porous propellant was simulated and analyzed based on the fluid-solid coupling method. The influence of die structure parameters on the deformation of the die pin was studied, and the orthogonal optimization design of the existing die was carried out. The results show that the molding section length has the greatest influence on the needle deformation, followed by the compression section height, and the shrinkage angle has the least influence; the needle deformation decreases with the increase of the shrinkage angle, and increases with the increase of the compression section height and the molding section length; the needle deformation of the optimized mold is reduced by 73.3% compared with that before optimization, and the effect is obvious.

Keywords: propellant; mold; deformation; fluid-solid coupling

0 引言

现代战争中, 发射药为绝大部分身管武器提供发射能源, 其燃烧性能和力学性能的稳定是武器正常发挥作用的保证。国内外学者对发射药的各项性能进行了数十年的研究, 取得了令人瞩目的成果。Khomenko 等^[1], Ermolaev 等^[2-4]采用多孔环切杆状发射药装药技术可大幅提高装药的装填密度, 最大装填密度达到 1.1 g/cm^3 以上, 与粒状药装药相比装填密度可提高 10% 以上。廖昕等^[5-6]通过对低易损性发射药用粘结剂、增塑剂、燃烧改良剂的选择和配方设计及理论计算, 基本确定了以 RDX 为含能填料、惰性和含能复合粘结剂、复合增塑剂及燃烧改良剂和力学性能改善剂所组成的低易损性发射药配方类型。刘志涛等^[7]对制式装药和低温感包覆火药

装药的势平衡点参数进行了比较, 分析了低温感包覆火药装药势平衡点处燃去火药相对量随装填密度变化的原因, 并拟合了低温感包覆火药装药的燃气生成函数。国内外学者对发射药性能分析、配方设计等多方面进行了大量的理论、试验及仿真工作, 而对于发射药挤出成型过程的分析报道却并不多见。

现阶段发射药的制备大多采用溶剂法进行, 其优点是应用范围广, 工艺过程安全性好, 可以压制多种形状不同的药型。然而在制备粘度较高发射药时, 药料流动对模针产生较大压力, 导致模针变形, 进一步引起发射药产品的弧厚变动, 影响发射药的燃烧、力学性能。笔者针对发射药制备过程中发生的模针变形, 采用流固耦合方法对某多孔发射药的

收稿日期: 2024-09-22; 修回日期: 2024-10-25

第一作者: 季丹丹(1986—), 女, 江苏人, 博士。

制备过程进行模拟分析,详细分析了入口线速度恒定情况下模具各结构参数对模针变形的影响规律,并采用正交优化方法分析了各结构影响模针变形的最主要关系,以最小模针变形量为优化目标对现有多孔发射药制备模具进行优化设计。研究方法和结果可为发射药的精确制备及模具的设计提供参考。

1 控制方程

1.1 流体域方程

流体流动要遵循质量守恒定律和动量守恒定律。对于本文中的发射药药料,守恒定律可通过如下控制方程进行描述。

质量守恒方程:

$$\partial \rho_f / \partial t + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\partial \rho_f \mathbf{v} / \partial t + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v} \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_f) = \mathbf{f}_f. \quad (2)$$

式中: t 为时间; $\mathbf{f}_f$ 为体积力矢量; ρ_f 为药料密度; $\mathbf{v}$ 为药料速度矢量; $\boldsymbol{\tau}_f$ 为剪切力张量,表达式为:

$$\boldsymbol{\tau}_f = (-p + \mu \nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{e}. \quad (3)$$

式中: p 为药料压力; μ 为动力粘度; $\mathbf{e}$ 为速度应力张量, $\mathbf{e} = (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) / 2$ 。

1.2 固体域方程

固体(即模针)部分的守恒方程由牛顿第二定律导出:

$$\rho_s \ddot{\mathbf{d}}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s. \quad (4)$$

式中: ρ_s 为模针密度; $\boldsymbol{\sigma}_s$ 为柯西应力张量; $\mathbf{f}_s$ 为体积力矢量; $\ddot{\mathbf{d}}_s$ 为固体域当地加速度矢量。

1.3 流固耦合方程

流固耦合遵循最基本的守恒原则,故在流固耦合交界面(FSI Interface)处,应满足药料与模针应力、位移等变量的守恒,即满足如下 2 个方程:

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_f \cdot \mathbf{n}_f &= \boldsymbol{\tau}_s \cdot \mathbf{n}_s \\ d_f &= d_s \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

式中: f 为流体(药料); s 为固体(模针)。

1.4 流固耦合方法

笔者采用 ANSYS WORKBENCH 平台对模针变形过程进行模拟分析,具体流程:以 CFX 模块对药料流动过程进行仿真分析,获得模针表面受压分布;将此压力数据传递至静态动力学模块(static structure),用以分析模针在此压力作用下的变形情

况。由于模针变形量较小,对药料流动的影响不大,故笔者采用单向流固耦合方法进行分析。

2 模具结构及药料物性参数

2.1 模具结构

模具的结构决定了多孔发射药的成型尺寸,如图 1 所示,模具由压缩段、成型段、针架和模针组成。图 2 所示为流道有限元模型, z 向为药料流动方向。

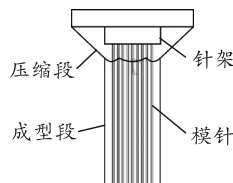


图 1 流道结构



图 2 流道有限元模型

2.2 药料物性参数

25 °C 时药料流动曲线如图 3 所示,符合假塑性流体的流动规律。对测试结果进行拟合,得到药料的流动参数:零剪切粘度为 $2.62 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,无穷剪切粘度为 $295.68 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,松弛时间为 1.86 s ,非牛顿指数为 0.12 ,药料的密度为 1550 kg/m^3 ,以此值作为仿真计算的药料参数。仿真取药料入口速度为 0.2 mm/s 。

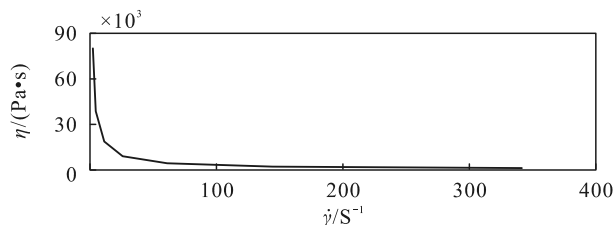


图 3 25 °C 药料的流动曲线

模针材料为碳素钢,密度 7850 kg/m^3 ,弹性模量 206 GPa ,泊松比 0.25 。

2.3 基本假设

考虑药料的特性和稳定挤出时的工艺条件,可做如下假设^[8]:

- 1) 药料是不可压缩的稳态层流;
- 2) 流场稳定、等温;
- 3) 药料在流道壁上无滑移,即其各个速度分量为零;
- 4) 不计药料重力和惯性力的影响。

3 仿真方法验证

对现有多孔发射药制备模具进行流固耦合分析,获得模针变形量(如图 4 所示) 1.98 mm ,计算

得到发射药弧厚仿真值，3 维视频显微镜测得弧厚值为 1.92 mm，误差仅为 3.3%，如图 5 所示。表明所用仿真方法是正确的。

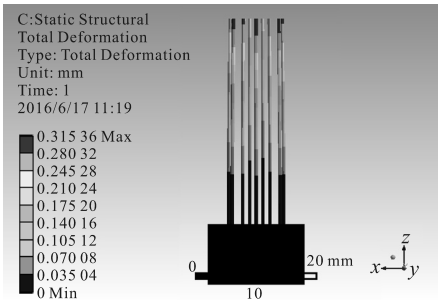


图 4 模针变形

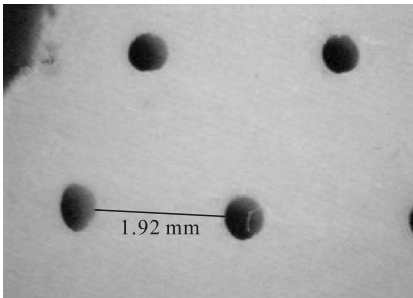


图 5 弧厚实测值

4 结果分析

本文中的优化因素取模具收缩角 α 、压缩段高度 L_c 和成型段长度 L_m 3 项，3 因素各取 4 个水平进行模针的变形分析，各因素及水平如表 1 所示。设计正交优化表 $L_{16}(4^3)^{[9]}$ ，对各参数组合进行仿真计算，所得结果如表 2 所示。

表 1 各因素水平

水平	因素		
	$\alpha/(^\circ)$	L_c/mm	L_m/mm
1	60	8	25
2	80	10	30
3	100	12	35
4	120	14	40

表 2 正交试验结果

试验号	$\alpha/(^\circ)$	L_c/mm	L_m/mm	模针变形量/mm
1	60	8	25	0.084
2	60	10	30	0.408
3	60	12	35	1.057
4	60	14	40	2.175
5	80	8	30	0.288
6	80	10	25	0.150
7	80	12	40	1.798
8	80	14	35	1.321
9	100	8	35	0.638
10	100	10	40	1.469
11	100	12	25	0.236
12	100	14	30	0.730
13	120	8	40	1.184
14	120	10	35	0.830
15	120	12	30	0.554
16	120	14	25	0.345

由表 3 极差行可见：影响多孔发射药制备模具

模针变形最重要的因素是成型段长度 L_m ，其次为压缩段高度 L_c ，收缩角 α 的影响最小。

表 3 正交结果分析

因素	$\alpha/(^\circ)$	L_c/mm	L_m/mm
δ_1	0.931	0.548	0.204
δ_2	0.889	0.714	0.495
δ_3	0.768	0.911	0.961
δ_4	0.728	1.143	1.656
极差	0.203	0.594	1.453

结合图 1 模具示意图与计算结果进行分析，可知：

1) 模针长度略大于成型段长度，随 L_m 的增大，模针长度随之增加。在入口线速度保持恒定的前提下，一端固定一端自由的模针等效于悬臂梁，在模针表面受压相差不大的情况下，其长度的增加将导致模针在自由端的变形增大，这使得 L_m 成为影响模针变形最关键的因素。

2) 压缩段在发射药挤出模具中是连接药料入口与成型段的一段圆台结构，其余因素不变的情况下，此段长度的增加将增大模具的压缩比，导致进入成型段的药料体积流量加快，增大了模针的表面压力，引起模针变形量的增大。

3) 收缩角 α 对模针变形的影响在于， α 的增大导致单位时间进入成型段的药料增加。由于药料的大粘度，其流动时靠近流道内壁及模针的部分流速很慢，药料的流量增加，一定程度上会优化成型段内的流动状态，使药料尽可能填满成型段的所有空间，模针内侧受压增大，抵消一部分其外侧压力，最终导致模针变形量减小。表 3 极差行显示， α 的影响程度仅为 L_c 的 1/3 左右。

由以上分析可见：随 L_c 和 L_m 的增大，模针的变形量成递增趋势；随 α 的增大，模针的变形量成递减趋势。要减小发射药产品的偏孔量，保证发射药产品的尺寸规格，应在一定条件下增大收缩角、减小压缩段高度及成型段的长度。对于本文中的模具结构尺寸研究范围，应取 α 水平为 4，即为 120° ， L_c 和 L_m 的水平均为 1，分别为 8、25 mm。对此结构组合进行模拟计算，并对比原有模具的模针变形量，结果如表 4 所示。可见，优化后模具的模针变形量比原有模具减小了 73.3%，优化效果明显。

表 4 优化结果

模具	$\alpha/(^\circ)$	L_c/mm	L_m/mm	模针变形量/mm
原有模具	90	10	30	0.315
优化模具	120	8	25	0.082