

文章编号:1006-9941(2019)06-0509-07

# 基于响应面中心复合设计的固体推进剂摩擦敏感度理论

邵明旺<sup>1</sup>,王 建<sup>2</sup>,乔晓林<sup>3</sup>,李兴刚<sup>3</sup>,赵 慧<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学化学与化工学院, 北京 102488; 2. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029; 3. 西安航天化学动力厂, 陕西 西安 710025)

**摘 要:** 为了确定固体推进剂生产过程中的各因素对摩擦感度的影响,采用响应面法(RSM)与中心复合试验设计(CCD)相结合,以摆锤角度、滑柱压力、试样温度为影响因素,以固体推进剂摩擦感度值为响应值设计试验,采用摩擦感度测试仪进行试验,并分析试验结果拟合了响应面模型。结果表明,在三个响应面评价精度指标中,相对均方根误差为0.14、决定系数 $R^2$ 为0.9309、校正拟合度 $R_{adj}^2$ 为0.8686,说明方程拟合精度高且误差小;由模型方差分析得方差比值 $F$ 为14.96,表明模型对响应面的影响程度较高;概率值 $p$ 为0.0001,表明模型有0.01%的概率对响应面无影响;响应曲面图表明了各因素之间的相互作用;优化模型得到最小摩擦感度值所对应的三因素范围为角度小于 $45^\circ$ ,压力小于2 MPa,温度小于 $45^\circ\text{C}$ 。

**关键词:** 固体推进剂;摩擦感度;响应面法(RSM);中心复合试验设计(CCD)

中图分类号:TJ55;V512+.4

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018237

## 1 引言

固体推进剂是指含有燃烧剂和氧化剂,在燃烧过程中能够放出大量炽热气体的固体致密材料<sup>[1]</sup>,作为一种高能化学动力提供者,广泛用于现代先进武器系统,同时亦是一种高危险的化学爆炸物<sup>[2]</sup>。热分解作用和碰撞摩擦都会导致推进剂点火或爆炸<sup>[3]</sup>,因此,引入摩擦感度的概念来评价固体推进剂的危险性能对安全生产具有十分重要的意义<sup>[4]</sup>。目前,国内外测定固体推进剂摩擦感度的仪器主要有柯兹洛夫摩擦摆、BAM摩擦仪、ABL摩擦仪、大型摩擦摆、ROTO摩擦仪等<sup>[5]</sup>。其中,国内应用较多的是柯兹洛夫摩擦摆。利用此摩擦摆进行的炸药摩擦感度实验研究较多<sup>[6]</sup>,但是相关的理论研究较少,并且对不同配方的固体推进剂在不同条件下的摩擦感度都需要进行相关实验研

究,工作量较大,需要耗费较大的人力物力。此外,实验研究周期较长,一定程度上可能导致实际生产的延后。因此,通过数理模型得到某一固定条件下固体推进剂的摩擦感度是当前面临的主要问题。此外,数值模拟技术已广泛应用于工程应用领域,在节省设计制造成本和研发时间方面发挥了重大作用。目前,火炸药生产过程的数值模拟技术也得到了相关部门的重视<sup>[7-10]</sup>。但是现有的数值仿真模型都是基于包括速度、压力、温度等参数的流场分析,对采用模型预测不同条件下的感度数值相关理论研究较少,不能满足多条件多类型的固体推进剂生产过程中的安全监控。

现今广泛应用的正交实验设计法存在实验次数多、周期长等缺点<sup>[11]</sup>,并且最终不能回归出一个函数关系式,不能从根本上解决摩擦感度试验次数多的问题,因此选择可以通过设计试验方案回归拟合函数关系的响应面法对摩擦感度试验结果进行分析拟合。响应面法(Response Surface Methodology, RSM)也称响应曲面法,是通过设计合理的试验方案以及相应的试验数据,并分析响应曲面和等高线来寻求最优的工艺参数,采用二次多项式回归拟合相应的函数关系的一种统计方法<sup>[12-13]</sup>。最初由BOX等<sup>[14]</sup>提出用来进行物理试验的设计,现已广泛应用于化工、制药、机械等领域<sup>[15-17]</sup>。但

收稿日期:2018-08-29;修回日期:2018-10-23

网络出版日期:2019-02-28

基金项目:国防基础科研课题(JCKY2016203A008)

作者简介:邵明旺(1994-),男,硕士研究生,主要从事化学工程与技术研究。e-mail:shaomingwang1@126.com

通信联系人:王建(1984-),男,教授,主要从事含能材料与高分子材料加工及装备研究。e-mail:wjj\_0107@163.com

引用本文:邵明旺,王建,乔晓林,等.基于响应面中心复合设计的固体推进剂摩擦敏感度理论[J].含能材料,2019,27(6):509-515.

SHAO Ming-wang, WANG Jian, QIAO Xiao-lin, et al. Theory of Friction Sensitivity of Solid Propellants Based on Center Composite Design of Response Surface [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(6):509-515.

是,在感度理论研究方向,大部分集中于换热器等设备上摩擦情况的模拟<sup>[18-20]</sup>,而直接采用响应面法回归固体推进剂摩擦感度模型的研究未见报道。响应面法的优点在于可以连续分析各因素的水平值并给出直观的图形分析以及相应的函数模型。与传统优化方法不同,RSM也考虑到试验的随机误差,并且采用一次或二次多项式来拟合复杂的函数关系,减小了计算量。在摩擦感度测试过程中影响因素较多,随机误差较为明显,采用RSM能够有效的避免随机误差对最终结果的影响。

RSM 试验设计方法有很多种,包括中心复合试验设计(Central Composite Design, CCD)、Box-Behnken 试验设计(BBD)、Koshal 试验设计、Hybrid 试验设计、A 优化准则等<sup>[21]</sup>。其中较为常用的为 CCD 设计和 BBD 设计,且在试验设计中应用最为广泛的是 CCD 试验设计,这是因为在 CCD 试验设计中合适的轴点坐标能够保证试验的可旋转性以及序贯性,能够在等距点上预测恒定方差,改善预测精度;此外,CCD 试验设计中合适的中心试验次数可以使整体试验设计趋于正交设计,更有利于确定最优点的位置<sup>[22]</sup>。

基于此,本研究采用 RSM 与 CCD 相结合设计了摩擦感度测试试验,通过设定的响应面方程拟合试验测试结果,得到了固体推进剂摩擦感度的方程,同时分析影响因素及方程的可行性,可为安全测试和生产提供一定程度的指导,为后续数值仿真预测生产过程中的摩擦感度分布提供理论模型基础。

## 2 响应面法试验设计

### 2.1 试验样品及设备

丁羟三组元推进剂,西安航天化学动力厂。

摩擦感度测试仪:参照国家军用标准 GJB5891.24-2006<sup>[23]</sup> 和国家航天工业部标准 QJ2913-1997<sup>[24]</sup> 自制,试验装置简图如图 1 所示。

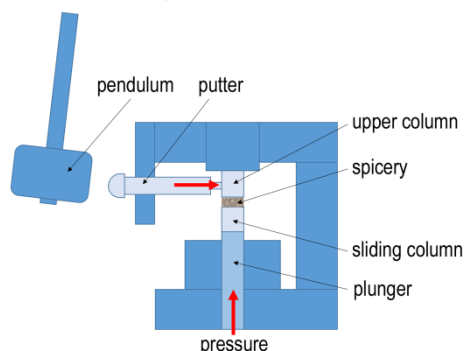


图1 摩擦感度测试装置简图

Fig.1 Sketch of friction sensitivity testing device

### 2.2 试验方法

摩擦感度测试试验按照国家军用标准 GJB5891.24-2006<sup>[23]</sup> 进行。预先在烘箱中将药浆加热保温到测试温度,恒温一定时间;将药浆迅速置于导向套内的下滑柱上,放置上滑柱,移动下柱塞使药料移出导向套;根据表压显示给下滑柱施加一定的推力;在一定角度释放摆锤,击打击杆,击杆撞击上滑柱以一定速率运动并与药浆摩擦进而发生点火;观察并记录有无分解、燃烧、爆炸等现象发生;每组测试标定为 25 发,以发生爆发的次数除以 25 即得到摩擦感度。

根据试验过程选取摆锤角度(A)、滑柱压力(B)、试样温度(C)作为 CCD 试验设计的影响因素。为保证试验设计的旋转性以及序贯性,在  $k$  个因素的情况下,对于轴向点极值( $\alpha$ )的选取应遵循  $\alpha=2^{k/4}$ ,在每个因素范围内选取 5 个不同的值进行试验,具体实际参数及水平编码值(Level)如表 1 所示。

表1 CCD 试验因素、水平及实际值

Table 1 CCD testing factors, levels and actual values

level	factor		
	A / (°)	B / MPa	C / °C
-1.682	30.00	1.00	30.00
-1	42.16	1.81	34.05
0	60.00	3.00	45.00
1	77.84	4.19	45.95
1.682	90.00	5.00	60.00

Note: A is the pendulum angel; B is the sliding column pressure; C is the spicery temperature.

### 2.3 试验方案设计

在满足旋转性的前提下,为保证整个试验区域内的预测值具有一定精度,需要对三因素选择 6 个中心点。此外,试验方案包括 20 组试验,其中 6 个中心点对应 6 组中心试验,剩余 14 组为析因试验,试验方案设计如表 2 所示。根据本试验方案和 2.2 节所述试验方法,进行摩擦感度测试,得到不同试验条件下的摩擦感度数值。同时,分别分析了以小数表示的结果和以百分数表示的结果,如表 3 所示,对比两种结果中三个响应面精度评价指标(相对均方根误差 RMSE、决定系数  $R^2$ 、校正拟合度  $R_{adj}^2$ ) 发现,当摩擦感度以小数表示时,拟合得到的模型可靠性更高。因此,拟合过程摩擦感度数值均以小数表示。

## 3 响应面法结果分析

### 3.1 摩擦感度模型

选择合适的响应面模型不仅能够提高最终拟合模

表2 CCD试验设计方案

Table 2 Design scheme of CCD testing

No.	factor			Y
	A / (°)	B / MPa	C / °C	
1	60.00	3.00	45.00	0.04
2	60.00	3.00	45.00	0.04
3	42.16	1.81	36.08	0.00
4	60.00	5.00	45.00	1.00
5	90.00	3.00	45.00	0.76
6	77.84	1.81	36.08	0.64
7	60.00	3.00	45.00	0.04
8	60.00	1.00	45.00	0.00
9	42.16	1.81	53.92	0.00
10	60.00	3.00	45.00	0.04
11	77.84	4.19	53.92	1.00
12	60.00	3.00	30.00	0.12
13	60.00	3.00	45.00	0.04
14	42.16	4.19	36.08	0.64
15	77.84	1.81	53.92	0.28
16	60.00	3.00	60.00	0.48
17	77.84	4.19	36.08	1.00
18	60.00	3.00	45.00	0.04
19	30.00	3.00	45.00	0.00
20	42.16	4.19	53.92	0.36

Note: Y is the friction sensitivity.

表3 评价指标对比

Table 3 Comparison of evaluation indexes

evaluation index	decimal form	percentage form
RSME	0.14	13.75
R <sup>2</sup>	0.9309	0.9309
R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	0.8686	0.8686

型的预测精度,还能较为准确地预测非试验点处的响应面数值<sup>[25]</sup>。常用的响应面法函数形式包括多项式基函数和高斯基函数等,根据摩擦敏感度的影响因素以及三种因素之间的相互作用,选用二次多项式基函数。这种基函数形式包括不含交叉项的二次多项式和含有交叉项的二次多项式,考虑到摩擦敏感度影响因素之间的共同作用,选用含有交叉项的二次多项式。二次多项式模型<sup>[22]</sup>如公式(1)和(2)所示:

不含交叉项:

$$y(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

含交叉项:

$$y(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{ij(i < j)} a_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

式中,  $a_0$  为常数项待定系数;  $a_i$  为一次项待定系数;  $a_{ij}$  为交叉项待定系数;  $a_{ii}$  为平方项待定系数。

根据20组试验数据以及所选择的含交叉项的二次多项式,采用试验设计和分析软件对试验结果进行分析,拟合得到仅在三种因素影响下的某固体推进剂摩擦敏感度与角度、压力、温度之间响应模型,如公式(3)所示:

$$Y = 4.01473 - 0.036764A - 0.59378B - 0.12074C + 4.57155 \times 10^{-4}AB - 6.36232 \times 10^{-5}AC + 9.47186 \times 10^{-4}BC + 4.27569 \times 10^{-4}A^2 + 0.12590B^2 + 1.34927 \times 10^{-3}C^2 \quad (3)$$

式中, Y 为摩擦敏感度; A 为摆锤角度, (°); B 为压力, MPa; C 为试样温度, °C。

### 3.2 模型评价与分析

为保证最终拟合模型预测值的准确性,需要对拟合模型进行分析评价,主要通过方差分析证明方程可靠性,误差分析证明方程预测的准确程度,残差分布证明方程在预测过程中的适应性<sup>[26]</sup>。通过方差分析可以对二次方程中各参数项进行显著性检验,检验结果见表4。F为模型的均方与残差的均方的比值,用来比较模型方差与剩余方差,代表了该模型对响应面即摩擦敏感度的影响程度;p为与该模型F值相关的概率值,表示该模型对响应面没有影响时获得该F值的概率。一般此概率小于0.05时即可将该模型视为对响应面即摩擦敏感度有重要影响,本模型此概率远小于0.05,因此认为该模型可靠程度很高。F值越大,p值越小代表方程的显著性越高。从表4可以看出,所建立的摩擦敏感度模型F值为14.96,p值为0.0001,说明该模型对响应面有影响且影响程度不变的概率为99.99%,即该模型对响应面有稳定显著的影响。从表4中各二次项参数的p值可以直观地观察到对拟合模型有显著影响的参数项。此外,自由度(DF)表示回归模型过程中取值不受限制的变量个数,其值为9,表明模型中考虑的影响因素共9个。

误差分析主要是对方程响应面精度评价指标的分析,包括相对均方根误差RMSE、决定系数R<sup>2</sup>、校正拟合度R<sup>2</sup><sub>adj</sub>。其计算过程如公式(4)(5)(6)<sup>[25]</sup>所示:

$$RMSE = \frac{1}{k} \sqrt{\sum_{i=1}^k (y_i - \tilde{y}_i)^2} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \tilde{y}_i)^2 (k-1)}{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2 (k-p)} \quad (6)$$

式中,  $\tilde{y}_i$  为响应面回归方程的计算值;  $y_i$  为采样点计算值;  $\bar{y}$  为所有实验的平均值;  $k$  为试验次数。

RMSE 用来表示计算值与测量值之间的差异, 其值越趋近于 0, 表示响应面的误差越小, 拟合的精度越高。当  $R^2$  的值越接近 1, 则表示响应面的拟合精度越高。通常, 当  $R^2 > 0.9$  时, 响应面的拟合精度则被认为可以满足要求<sup>[27]</sup>。此外, 当引入多个设计参数时, 除

决定系数  $R^2$  之外, 还需要考虑校正之后的  $R^2$ , 即校正拟合度  $R_{\text{adj}}^2$ ,  $R_{\text{adj}}^2$  越大, 响应面拟合精度越好。表 5 为模型误差分析结果, 从表 5 中可以看出 RMSE 为 0.14,  $R^2$  为 0.9309,  $R_{\text{adj}}^2$  为 0.8686, 因此认为摩擦感度准确度较高。此外,  $R_{\text{adj}}^2$  和  $R_{\text{pred}}^2$  表示工艺过程的影响因素, 其值较高且  $R_{\text{adj}}^2$  与  $R_{\text{pred}}^2$  差值小于 0.2 时可认为除给定因素外没有其他影响因素, 但是本试验中差值大于 0.2, 说明摩擦感度测试过程除摆锤角度、滑柱压力、试样温度三个因素影响之外, 还包括其他因素的影响, 这与摩擦感度的实际测试过程一致。精密度是信号与噪声之比, 由表 5 可知, 其值大于 4, 表明模型合理。

表 4 摩擦感度模型方差分析

Table 4 Variance analysis of friction sensitivity model

source	sum of square	DF	mean square	F	p	influence degree
model	2.54	9	0.28	14.96	0.0001	significant
A	0.75	1	0.75	39.54	< 0.0001	significant
B	1.04	1	1.04	54.84	< 0.0001	significant
C	8.556E-005	1	8.556E-005	4.527E-003	0.9477	
AB	7.644E-004	1	7.644E-004	0.040	0.8446	
AC	8.328E-004	1	8.328E-004	0.044	0.8380	
BC	8.074E-004	1	8.074E-004	0.043	0.8404	
A <sup>2</sup>	0.27	1	0.27	14.21	0.0037	significant
B <sup>2</sup>	0.46	1	0.46	24.19	0.0006	significant
C <sup>2</sup>	0.17	1	0.17	8.79	0.0142	significant
residual	0.19	10	0.019			
lack of fit	0.19	5	0.038			
pure error	0.000	5	0.000			

Note: Sum of square is the sum of the squared deviations from the mean due to the effect of this term; DF is the number of variables whose value is not limited; Mean square is the ratio of sum of square to DF, and it is the variance associated with that term; F is the mean square for the term divided by the mean square for the residual; p is the probability of getting an F value of this size if the term did not have an effect on the response.

表 5 摩擦感度模型误差分析

Table 5 Error analysis of friction sensitivity model

evaluation index	numerical value
RMSE	0.14
$R^2$	0.9309
$R_{\text{adj}}^2$	0.8686
$R_{\text{pred}}^2$	0.4434
adeq precision	10.760

Note: adeq precision is a signal to noise ratio;  $R_{\text{pred}}^2$  is a measure of how well the model predicts a response value.

以图 2~图 4 进一步表征模型方程的适应性。图中数据点代表每一个试验方案, 不同的颜色点表示不同的感度数值。图 2 为残差正态概率分布, 由图 2 可知, 不同试验方案的残差概率分布总体呈线性分布, 表

明摩擦感度模型的适应性良好。图 3 为残差与预测值分布, 上下两条线代表残差的分布范围, 从图 3 中可以看出预测值的残差分布均在此范围之内并且无明显规律, 同样可以证明模型的适应性良好。图 4 为真实值与预测值的分布, 从图 4 中可以观察到大部分数据点分布在  $y=x$  这条直线上, 表明真实值与预测值基本一致, 少数点分布在直线左右, 进一步从具体数值表征方程的适应性。

以响应曲面表示各因素对摩擦感度的影响, 如图 5~7 所示。从图 5 可以看出, 当温度一定, 角度和压力均为最小值时摩擦感度值最小, 说明角度和压力之间的相互作用不明显。图 6 显示, 在角度最小时, 温度在一定范围之内摩擦感度值较小, 说明角度和温度之间的交互作用明显, 并且角度对最终摩擦感度的数值

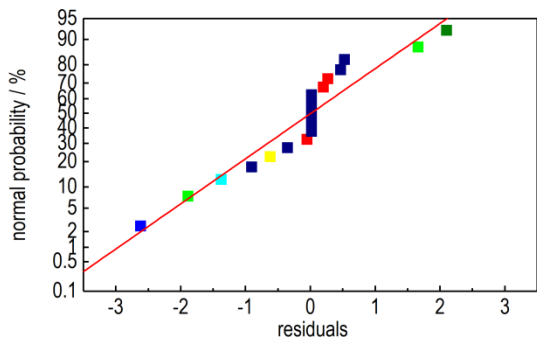


图2 残差正态概率分布图

Fig.2 Distribution diagram of residual normal probability

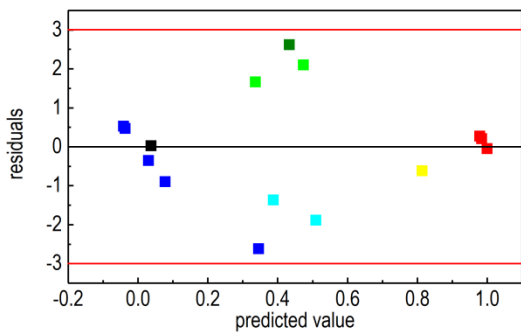


图3 残差与预测值分布图

Fig.3 Distribution diagram of residual and predicted value

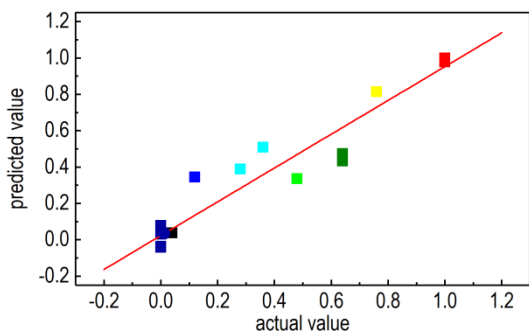


图4 真实值与预测值分布图

Fig.4 Distribution diagram of actual value and predicted value

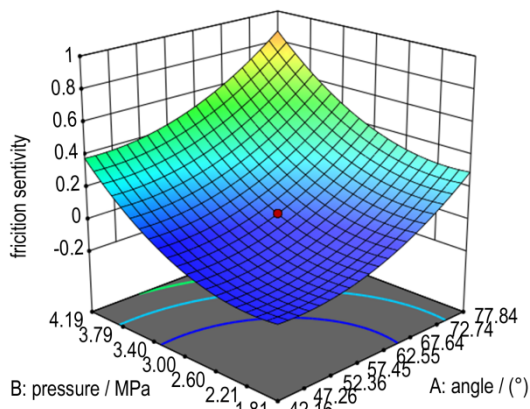


图5 角度和压力对摩擦感度的影响

Fig.5 Influence of angle and pressure on friction sensitivity

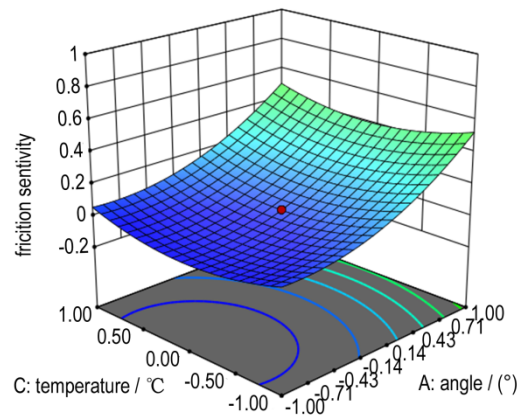


图6 角度和温度对摩擦感度的影响

Fig.6 Influence of angle and temperature on friction sensitivity

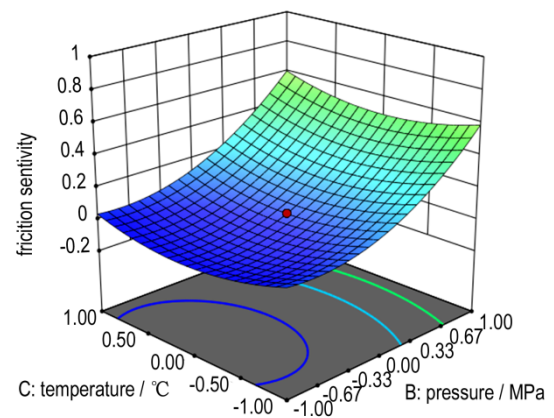


图7 压力和温度对摩擦感度的影响

Fig.7 Influence of pressure and temperature on friction sensitivity

影响更加明显。由图7可知,压力和温度对摩擦感度的影响与图6相似,表明这三种因素中角度和压力对摩擦感度的影响较为显著,因此在生产过程中应作为首要考虑因素。

### 3.3 模型优化

对最终拟合模型进行参数优化,拟合摩擦感度最小值所对应的三因素的数值,保证在此三因素作用范围内摩擦感度为0。选定这三因素的作用范围,以及摩擦感度优化值选定最小值,并设定一个本试验中所达不到的最小数值,保证优化结果的准确性。通过优化得出,当角度小于45°,压力小于2 MPa,温度小于45 °C时,摩擦感度数值为0,即为最优安全操作条件,为通过响应面法优化摩擦感度试验因素提供了可能。

## 4 结论

(1)采用响应面法与摩擦感度试验相结合获得固体推进剂摩擦感度模型,对模型方差、误差以及残差分

布进行分析,证明响应面模型的准确性和可靠性。

(2)模型方差中较大的 $F$ 值和极小的 $p$ 值表明了该模型的可靠性;响应面精度评价指标RMSE越小, $R^2$ 、 $R^2_{adj}$ 越大,模型拟合精度越高;残差分布图、真实值与预测值分布满足线性关系,残差与预测值分布无规律表明模型的适应性良好;响应面曲线图表明了各因素之间的相互作用。

(3)通过优化模型响应面的最小值得到三种影响因素的安全操作范围:角度小于 $45^\circ$ ;压力小于2 MPa;温度小于 $45^\circ\text{C}$ 。

#### 参考文献:

- [1] 张端庆. 固体火箭推进剂[M]. 北京:兵器工业出版社, 1991: 1-10.  
ZHANG Duan-qing. Solid rocket propellant [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1991: 1-10.
- [2] 王照波, 野延年, 李丽珍. 固体推进剂摩擦感度测试方法研究探讨[C]//四川:中国宇航学会固体火箭推进年会. 2005.  
WANG Zhao-bo, YE Yan-nian, LI Li-zhen. Research on test method of friction sensitivity of solid propellant[C]//Sichuan: China Aerospace Society Solid Rocket Propulsion Annual Meeting, 2005.
- [3] 秦能, 裴江峰, 王明星. 一种RDX-CMDB推进剂危险性能研究[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 725-729.  
QIN Neng, PEI Jiang-feng, WANG Ming-xing. Study on Hazard Performance of RDXvCMDB Propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(6): 725-729.
- [4] 陈协坤, 张喜芳. 固体火箭复合推进剂摩擦感度测试技术研究[J]. 推进技术, 1984, 5(2):1-5.  
CHEN Xie-kun, ZHANG Xi-fang. Research on friction sensitivity testing technology of solid rocket composite propellant[J]. *Chinese Journal of Propulsion technology* 1984, 5(2): 1-5.
- [5] 郑孟菊. 炸药的性能及测试技术[M]. 北京:兵器工业出版社, 1990.  
ZHENG Meng-ju. Explosive properties and testing techniques [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1990.
- [6] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京:科学出版社, 1989: 104-109.  
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. High-energy explosives and related properties[M]. Beijing: Science Press, 1989: 104-109.
- [7] 林文洲, 洪滔. 高能炸药摩擦感度的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(6):745-751.  
LIN Wen-zhou, HONG Tao. Numerical simulation of friction sensitivity of high energy explosives[J]. *Chinese Journal of Explosion and Shock*, 2016, 36(6):745-751.
- [8] 张家希, 李世鹏, 隋欣, 等. 某固体推进剂摩擦试验过程数值模拟[C]//西安:中国航天动力联合会议. 2016: 422-430.  
ZHANG Jia-xi, LI Shi-peng, SUI Xin, et al. Numerical simulation of friction test process of a solid propellant [C]//Xi'an: China Airlines Sky Sky Power Joint Conference. 2016: 422-430.
- [9] 林文洲, 洪滔. 高能炸药摩擦感度理论初步研究[J]. 含能材料, 2007, 15(1): 12-15.  
LIN Wen-zhou, HONG Tao. Preliminary study on the theory of friction sensitivity of high energy explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(1): 12-15.
- [10] Jiang X B, Guo S, Yao M, et al. Novel method for determining the dynamic friction coefficient of explosives[J]. *Combustion Explosion & Shock Waves*, 2014, 50(1): 118-123.
- [11] 张泽志, 韩春亮, 李成未. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 河南教育学院学报(自然科学版), 2011, 20(4): 34-37.  
ZHANG Ze-zhi, HAN Chun-liang, LI Cheng-wei. Application of response surface method in experimental design and optimization [J]. *Chinese Journal of Henan Institute of Education (Natural Science Edition)*, 2011, 20(4): 34-37.
- [12] Heller B. Statistics for experimenters, an introduction to design, data analysis, and model building [J]. *Mathematical Modelling*, 1986, 7(9): 1657-1658.
- [13] Montgomery D C. 实验设计与分析:第三版[M]. 北京:中国统计出版社, 1998: 612-623.  
Montgomery D C, Experimental design and analysis: the third edition[M]. Beijing: China Statistics Press, 1998: 612-623.
- [14] Box G E P, Wilson K B. On the experimental attainment of optimum conditions [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1951, 13(1):1-45.
- [15] Gullón B, Gullón P, Lú-Chau T A, et al. Optimization of solvent extraction of antioxidants from eucalyptus globulus leaves by response surface methodology: characterization and assessment of their bioactive properties [J]. *Industrial Crops & Products*, 2017, 108: 649-659.
- [16] 陆森林, 任栾翔. 基于响应面法的车内噪声分析与优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(5): 65-70.  
LU Sen-lin, REN Zhi-xiang. Analysis and optimization of interior noise based on response surface method [J]. *Chinese Journal of Zhengzhou University*, 2017, 38(5): 65-70.
- [17] Alexandre E M C, Araújo P, Duarte M F, et al. Experimental design, modeling, and optimization of high-pressure-assisted extraction of bioactive compounds from pomegranate peel [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2017, 10(5): 886-900.
- [18] Ghasemi N, Aghayari R, Maddah H. Optimizing the parameters of heat transmission in a small heat exchanger with spiral tapes cut as triangles and aluminum oxide nanofluid using central composite design method [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2018, 54(7): 2113-2130.
- [19] Zheng N, Liu P, Shan F, et al. Sensitivity analysis and multi-objective optimization of a heat exchanger tube with conical strip vortex generators [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 122: 642-652.
- [20] Zheng N, Liu P, Liu Z, et al. Numerical simulation and sensitivity analysis of heat transfer enhancement in a flat heat exchanger tube with discrete inclined ribs [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 112: 509-520.
- [21] 王永菲, 王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2005, 14(3): 236-240.  
WANG Yong-fei, WANG Cheng-guo. Theory and application of response surface method [J]. *Chinese Journal of the Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2005, 14(3): 236-240.
- [22] Jeffwu C F, Michael H. 试验设计与分析及参数优化[M]. 北京:中国统计出版社, 2003: 362-365.  
Jeffwu C F, Michael H. Experimental design and analysis and

- parameter optimization [M]. Beijing: China Statistics Press, 2003: 362-365.
- [23] 国防科学技术工业委员会. GJB 5891.24-2006: 火工品药剂试验方法第 24 部分: 摩擦敏感度试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- National Defense Science and Technology Industry Committee. GJB 5891.24-2006: Pyrotechnics-Test methods-Part 24: Friction sensitivity test [S]. Beijing: China Standard Press, 1996.
- [24] 中国航天工业总公司. QJ 2913-1997: 复合固体推进剂摩擦敏感度测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- China Aerospace Industry Corporation. QJ 2913-97: Composite solid propellant friction sensitivity test method[S]. Beijing: China Standard Press, 1996.
- [25] 秦玉灵, 孔宪仁, 罗文波. 多铺层碳纤维蜂窝板模型修正[J]. 航空学报, 2011, 32(4): 636-648.
- QIN Yu-ling, KONG Xian-ren, LUO Wen-bo. Multi-layer carbon fiber honeycomb panel model correction[J]. *Chinese Journal of Aviation*, 2011, 32(4): 636-648.
- [26] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
- LI Li, ZHANG Sai, HE Qiang, et al. Application of response surface method in experimental design and optimization [J]. *Chinese Journal of Laboratory research and exploration*, 2015, 34(8): 41-45.
- [27] 马迪. 粒子群响应面建模法在 ASPEN 多因素优化中的应用[D]. 山西: 太原理工大学, 2016.
- MA Di. Application of particle swarm response surface modeling method in ASPEN multi-factor optimization [D]. Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2016.

## Theory of Friction Sensitivity of Solid Propellants Based on Center Composite Design of Response Surface

SHAO Ming-wang<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, QIAO Xiao-lin<sup>3</sup>, LI Xing-gang<sup>3</sup>, ZHAO Hui<sup>3</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. Xi'an Aerospace Chemical Propulsion Plant, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** To determine the influence of various factors in the production process of solid propellant on the friction sensitivity, the response surface methodology (RSM) combined with central composite design (CCD) was used to design the experiments based on the pendulum angle, the strut pressure and the sample temperature were taken as influencing factors, and the friction sensitivity value of solid propellant was considered as the response value. The friction sensitivity tester was used to test and analyze, the testing results were fitted to the response surface model. Results show that in three response surface evaluation accuracy indexes, the relative root mean square error RMSE is 0.14, the determination coefficient  $R^2$  is 0.9309, and the correction fitting degree  $R_{adj}^2$  is 0.8686, showing that the fitting precision of the equation is high and the error is small. The variance ratio  $F$  obtained by variance analysis of the model is 14.96, indicating that the model has a higher influence on the response surface. The probability value  $p$  is 0.0001, indicating that the probability of 0.01% of the model has no effect on the response surface. The response surface map shows the interaction between the various factors. The three-factor operating range corresponding to the minimum friction sensitivity value obtained by the model optimization is less than  $45^\circ$  in angle, less than 2 MPa in pressure, and less than  $45^\circ\text{C}$  in temperature.

**Key words:** solid propellant; friction sensitivity; response surface methodology (RSM); central composite design (CCD)

**CLC number:** TJ55; V512+.4

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018237

(责编:姜梅)