

HTPB推进剂装药工艺研究及力学性能预测*

秦鹏举¹, 侯晓², 张翔宇³, 程吉明¹, 宋学宇¹, 程书³, 杨琨³

(1. 西北工业大学 燃烧、热结构与内流场重点实验室, 陕西 西安 710072;

2. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048;

3. 西安航天动力技术研究所 固体推进全国重点实验室, 陕西 西安 710025)

摘要: 固体发动机药柱成型过程中, 制造工艺对推进剂力学性能有很大影响, 通过对130组推进剂装药工艺参数及其力学性能研究, 确定了装药过程的工艺参数波动情况; 基于多元线性回归分析方法, 获得了影响推进剂力学性能的关键工艺参数; 以关键工艺参数为输入, 建立了BP神经网络并对推进剂的力学性能进行预测。研究表明, 16个工艺参数对推进剂力学性能有不同程度的影响, 其中固化参数、混合时间、混合温度、硫化时间、混合物相对湿度、混合压强等6个关键工艺参数对推进剂常温的力学性能有显著影响; 以关键工艺参数及对应推进剂力学性能为依据, 建立BP神经网络能够准确地对推进剂的力学性能进行预测, 最大抗拉强度的平均误差为4.08%, 最大伸长率的平均误差为3.54%。

关键词: HTPB推进剂; 力学性能; 关键工艺; 神经网络; 性能预测

中图分类号: V512.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2024) 05-2211042-11

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2211042

1 引言

固体火箭发动机是一种用固体推进剂的化学火箭动力装置, 主要应用于导弹武器、运载火箭和航天飞机-太空站技术中^[1]。固体火箭发动机药型结构一般是通过将混合充分的、未固化的固体推进剂药浆浇注于发动机燃烧室之内, 再通过化学交联反应将药柱成型^[2]。由于在制造、贮存以及使用过程中, 固体发动机结构会承受各类外界载荷作用, 良好的推进剂力学性能是保障发动机结构完整性的关键^[3-4]。

复合固体推进剂是由约占质量分数70%的氧化剂颗粒、约占质量分数20%的金属燃料颗粒、以及约占质量分数10%黏合剂组成的极高夹杂比颗粒增强含能复合材料。除组分外, 固体推进剂的力学性能还受预混、混合、浇注、固化等工艺过程影响, 建立装药工艺过程相关的推进剂力学性能分析模型, 对发动机结构完整性的准确分析、评价具有重要价值^[4]。

针对推进剂黏合剂基体中各组分对推进剂力学性能的影响, 国内外的研究者们做了大量的研究工作。Sun, Pande、倪冰等^[5-8]选用不同类型的黏合剂,

研究了推进剂抗拉强度、伸长率和弹性模量等力学性能受黏合剂的影响规律; Deng等^[9-10]筛选出改进GAP(缩水甘油基叠氮化物聚合物)固体推进剂力学性能的键合剂, 并对其作用效果进行比较分析; 刘晶如等^[11]借鉴Mark^[12]的做法, 研究了HTPB(端羟基聚丁二烯)、PET(聚对苯二甲酸乙二醇酯)以及GAP组成的双网络黏合剂的力学性能。

上述研究中均表明推进剂黏合剂组分对其力学性能有着极其重要的影响。通常发动机定型后, 其推进剂配方中黏合剂比例业已确定, 其力学性能波动主要受装药工艺波动的影响。在发动机实际生产过程中, 装药过程易受温度、湿度等外界环境影响, 导致工艺参数发生波动, 这些因素综合造成了推进剂初始力学性能的波动。

国外, Perez等^[13]通过对PBAN(聚丁二烯丙烯腈)/AP(高氯酸铵)/Al推进剂不同批次试样力学性能变化的研究, 发现料浆存放时间对推进剂力学性能影响较小; Ramohalli^[14]研究了混合时间对HTPB/AP推进剂性能的影响, 发现随混合时间(15~90 min)延长, 推进剂燃速和初始模量均升高; 类似地, Klgaer

* 收稿日期: 2022-11-15; 修订日期: 2023-03-23。

通讯作者: 秦鹏举, 博士生, 高级工程师, 研究领域为固体发动机贮存可靠性。E-mail: qpj_ftd@126.com

引用格式: 秦鹏举, 侯晓, 张翔宇, 等. HTPB推进剂装药工艺研究及力学性能预测[J]. 推进技术, 2024, 45(5): 2211042. (QIN P J, HOU X, ZHANG X Y, et al. HTPB propellant charging process and prediction of its mechanical properties[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(5):2211042.)

等^[15]研究表明混合温度和硫化温度对PBAN/AP/Al推进剂性能影响较小。

目前,国内对装药工艺与推进剂力学性能相关性研究仍较少。侯林法^[1]除了研究推进剂主要组分对力学性能的影响外,还强调了工艺因素中环境湿度、混合工艺时间等均对推进剂力学性能有较大影响。王长起^[16]调研了原材料、固化剂料浆贮放时间、混合时间、混合温度、硫化温度等对推进剂力学性能的影响,并提出了固体推进剂工艺质量控制方法。鲁国林^[17]研究了混合温度、硫化温度两个参数对推进剂力学性能影响,发现随着混合温度的升高,推进剂常温抗拉强度得到提高,但推进剂在25℃,70℃,-40℃的断裂延伸率发生降低,特别是低温(-40℃)断裂延伸率的下降尤为明显。

现有推进剂力学性能预示模型研究,一般是通过建立推进剂的本构模型,对不同测试条件下推进剂的力学性能进行预测^[18-21],大都未考虑推进剂工艺因素的影响。目前,随着对装药结构精细化分析需求的不断提升,需要依据发动机燃烧室装药环境温度、湿度等工艺条件,对推进剂初始力学性能进行准确预测^[2]。针对这一需求,张高章等^[22]通过BP神经网络模型和GA-BP网络模型,以工艺助剂和不同测试温度为输入,对复合固体推进剂力学性能进行预测。

本文通过对实测的装药工艺参数以及推进剂力学性能进行分析,确定了波动的装药工艺参数,以多元线性回归法确定了影响推进剂力学性能的关键工艺参数,最终以关键工艺参数为依据,建立BP神经网络对推进剂的力学性能进行预测。

2 方法

2.1 装药工艺过程及推进剂力学性能测试

本文所研究的HTPB推进剂主要成分包括铝粉、高氯酸铵、HTPB和其他添加剂,固体发动机装药的典型工艺过程及各工序中的波动工艺参数见图1,主要的工序如下:

(a)原材料处理与准备:当原材料入厂后,须对推进剂的原材料进行处理和准备,包括对黏合剂、固化剂等进行过筛、预烘,对氧化剂等进行粉碎,直至各原材料符合相应的要求。

(b)原材料称量:原材料准备就绪后,根据原材料批次、环境温度、湿度等,微调燃速催化剂,用小容积混合机测试本组原材料下推进剂的固化参数,直至满足要求后,按确定的各组分情况对原材料进行称重。该过程中的波动工艺参数为固化参数^[2]。

(c)预混:按推进剂配方的预混顺序,将胶、铝粉、燃速催化剂、增塑剂、添加剂等小组分加入预混机中,使各组分均有分散在聚合物黏合剂内。该过程中的波动工艺参数为预混的环境温度和绝对湿含量。

(d)混合:将高氯酸铵等含能组分加入经预混的黏合剂浆料中,通过机械力捏合、搅拌时黏合剂浆料涂敷在固体粒子表面。该过程中的波动工艺参数为混合的温度、相对湿度、绝对湿含量、下料速度、混合时间、混合锅扭矩、混合压强等。

(e)浇注:当推进剂混合好后,将药浆在一定的温度、真空度和下料速度条件下浇注到发动机燃烧室内。该过程中的波动工艺参数为浇注的环境温度、绝对湿含量、下料速度、下料时间、取料质量等。

(f)硫化:将浇注完毕的装药燃烧室运到保温间,保温间保持高温,燃烧室中的推进剂升温固化是高聚物交联反应过程。该过程中的波动工艺参数为硫化时间。

(g)推进剂性能测试:推进剂硫化完成后,参照GJB770B-2005火药试验方法,制备推进剂试件,并进行力学性能测试,测试温度为20℃,拉伸速率为100 mm/min。

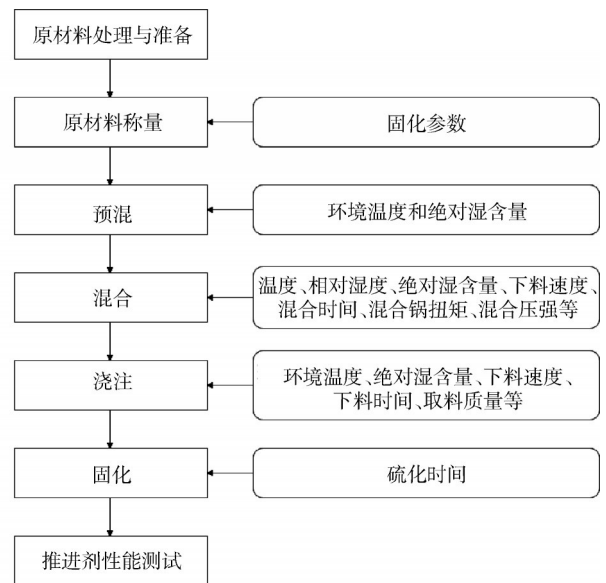


Fig. 1 Propellant loading process flow and main fluctuation parameters

2.2 多元线性回归方法

多元线性回归分析法是研究一个随机变量 y 与两个或两个上的一般变量 x_1, x_2, \dots, x_m 之间相依关系的统计分析方法。多元线性回归模型是描述因变量 y 如何依赖于自变量 x_1, x_2, \dots, x_m 和误差项的方程,它的一般形式为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m + \varepsilon \quad (1)$$

式中 y 为因变量; x_1, x_2, \cdots, x_m 为自变量, 有 $m+1$ 个未知参数, ε 是随机误差项, 误差项反映的是除 x_1, x_2, \cdots, x_m 与 y 的线性关系以外的随机因素对的影响。

本文采用 SPSS19 数据分析软件对推进剂常温下的最大抗拉强度、最大伸长率进行多元线性回归和分析, 确定对推进剂最大抗拉强度、最大伸长率存在显著影响的工艺参数, 并将其确定为影响推进剂力学性能的关键工艺参数。根据相关的工程经验, 判定系数 R^2 大于 0.3 时, 认为多元线性回归的拟合程度较好; 显著性水平小于 0.05 时, 认为参数相关性较强; 共线性值 (VIF) 小于 10 时, 认为参数之间不存在多重共线性。本文中选定的显著性水平为 0.05, 判定系数 R^2 为 0.3。

2.3 基于 BP 神经网络的推进剂力学性能预测方法

BP 神经网络及其变化形式是在人工神经网络的实际应用当中最多的网络结构, 它是前反馈型网络的核心部分, 反映出了人工神经网络的精华。在 BP 神经网络中需要通过激活函数来完成神经元的传递, 可以完成从输入到输出的任意非线性映射。BP 神经网络采用反向传播学习算法对网络权值、阈值进行调整。

为了建立复合固体推进剂关键工艺参数与其力学性能参数之间的 BP 网络模型, 本文使用 Keras 建立预测模型, 实现回归问题的预测。Keras 的开发环境为 Python, 并在此环境下导入 Tensor Flow 工具箱。本文在 Tensor Flow 中搭建的神经网络主要包括以下内容:

在对推进剂力学性能预测的研究中, 为了实现最优的预测结果, 采用了 6 个隐含层, 隐含层的神经元数分别为 128, 128, 128, 128, 64 和 10。

神经网络所采用的非线性激活函数为 ReLU (Rectified Linear Unit) 函数, 具体形式为

$$f(x) = \max(0, x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ x & x \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

使用均方误差 (MSE) 作为该模型的损失函数, 具体形式为

$$MSE(y, y') = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n} \quad (3)$$

式中 y_i 为每一次处理中第 i 个数据的真实值, y'_i 为对应的预测值。

采用的训练方法为 Adam (Adaptive Momentum Estimation) 自适应矩估计优化算法。采用的学习速率为 0.001, 迭代的步数为 1000 次。

采用平均相对误差 (\overline{E}_R) 作为评估指标, 具体形

式为

$$\overline{E}_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|q_i - q'_i|}{q_i} \quad (4)$$

式中 q_i 为第 i 个数据的真实值, q'_i 为对应的预测值。

3 结果与讨论

3.1 装药工艺参数及推进剂力学性能测试结果

本文所研究 HTPB 复合固体推进剂的配方 (质量分数) 为 68% 的 I 类和 III 类高氯酸铵, 17.5% 的铝粉, 10.51% 的 HTPB/TDI (甲苯二异氰酸酯)/MAPO (三 (2-甲基) 氮丙啶氧化磷) 固化体系, 3.99% 的其他助剂。通过梳理 130 组 HTPB 推进剂装药工艺参数发现, 发动机药柱从原材料到成型的过程中, 共有不少于 100 个工艺参数, 其中波动的工艺参数有 16 个, 其它工艺参数在药柱成型过程中保持不变。

根据国军标 GJB770B-2005《火药试验方法》中方法, 对每组推进剂常温 (20 °C, 100 mm/min) 的最大抗拉强度、最大伸长率进行测试, 测试结果图 2。通过 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验方法对推进剂常温最大抗拉强度、最大伸长率进行正态性检验, 推进剂最大抗拉强度的 K-S 检验统计量 D 值为 0.39、最大伸长率的 K-S 检验统计量 D 值为 0.065, 均大于显著性水平 0.05, 因此推进最大抗拉强度、最大伸长率均服

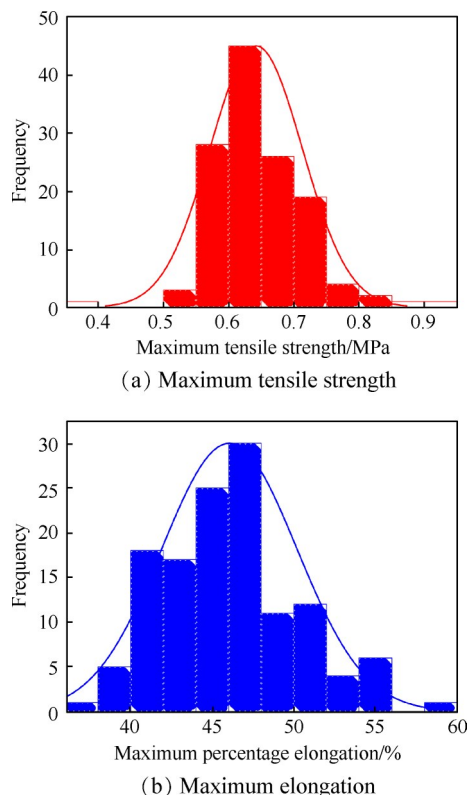
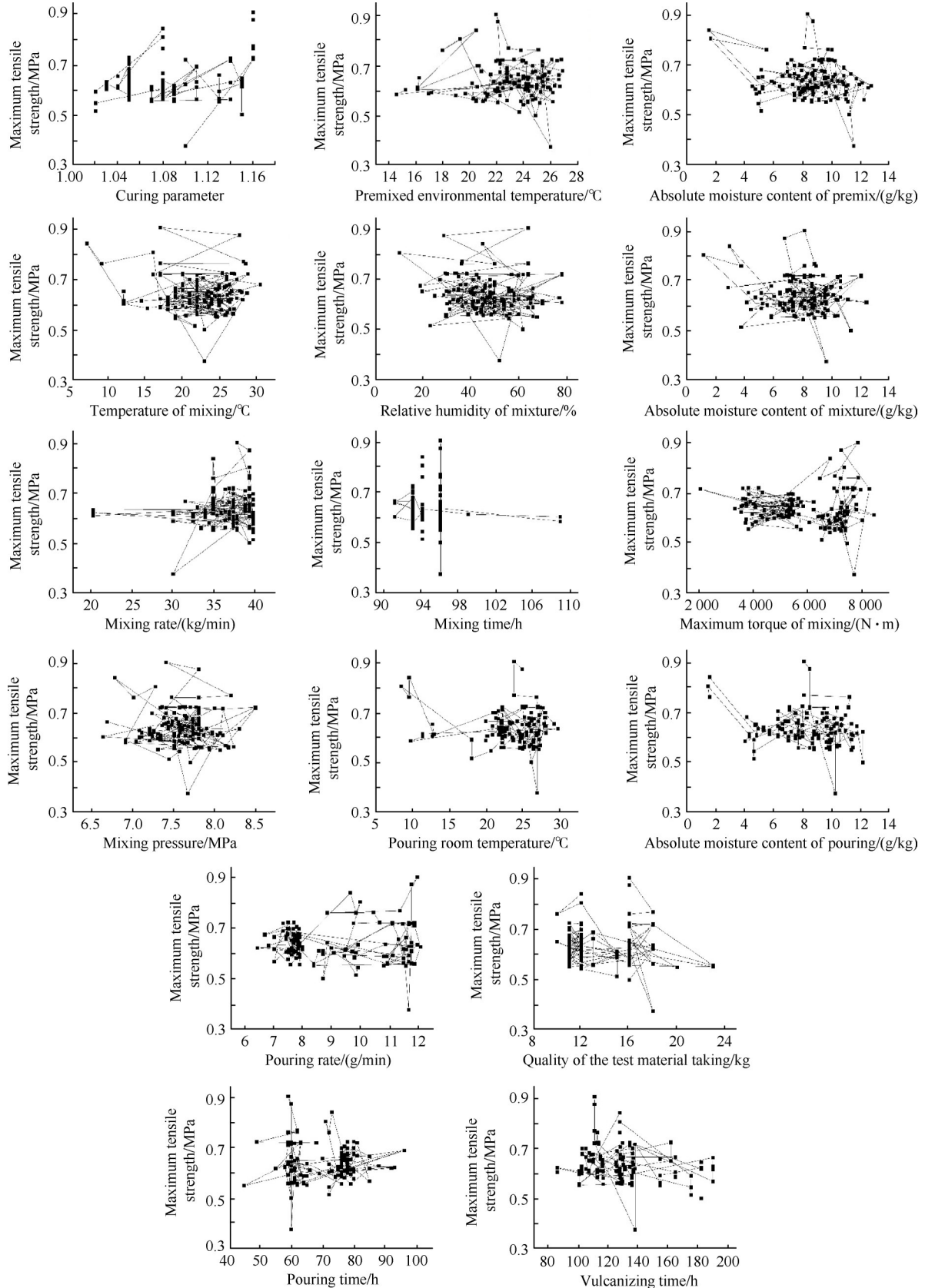


Fig. 2 Frequency spectrum of mechanical properties of propellant

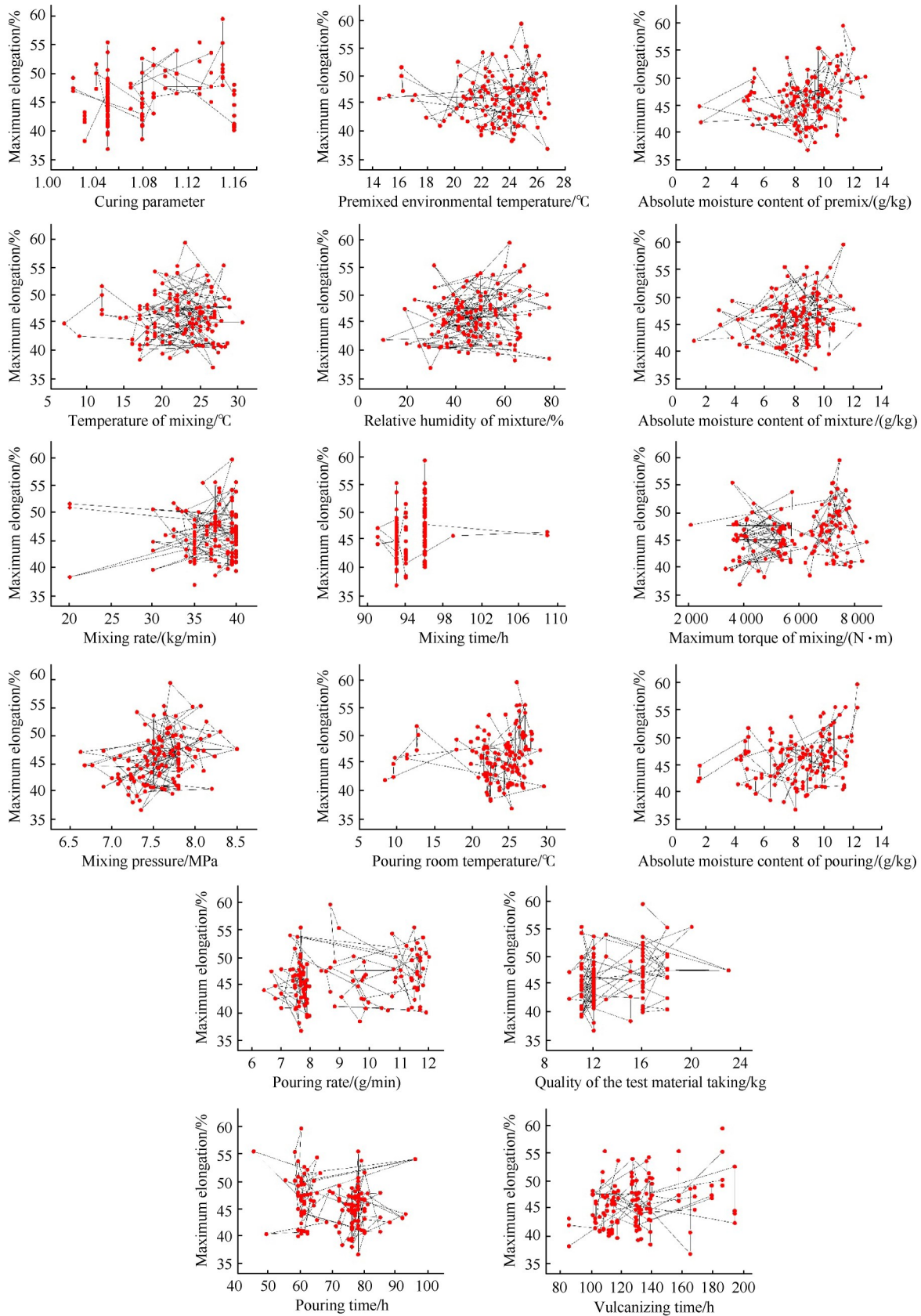
从正态分布。

16个波动的工艺参数与对应推进剂常温力学性能结果见图3,其中图3(a)中所有纵坐标均为推进剂

常温最大抗拉强度、横坐标分别为16个工艺参数,图3(b)中所有纵坐标均为推进剂常温最大伸长率、横坐标分别为16个工艺参数。从图3可以看出,固化



(a) Maximum tensile strength



(b) Maximum elongation

Fig. 3 Relationship between mechanical properties of propellant and process parameters

参数、混合时间、混合压强等工艺参数在每一个横坐标中对应的纵坐标测试结果数量相近,因此固化参

数、混合时间、混合压强等工艺参数的波动相对较小;相反,混合物相对湿度、混合物绝对湿度、浇注初

始绝对湿度等工艺参数的波动相对较大。并且,从图3还可以看出,推进剂常温最大抗拉强度和常温最大伸长率与16个工艺参数各自无明显的关系。

3.2 装药工艺参数对药柱初始力学性能的影响分析研究

分别以每组推进剂测试的最大抗拉强度、最大伸长率为因变量,16个波动的工艺参数为自变量,进行多元线性回归和分析。

3.2.1 最大抗拉强度多元线性回归结果

推进剂常温最大抗拉强度与16个波动的工艺参数的回归模型汇总见表1,从模型汇总表中可以看出模型的整体相关系数 $R=0.675$,判定系数 $R^2=0.456$,大于判定系数临界判据0.3,说明样本的回归效果较好,方程拟合程度较高。

推进剂常温最大抗拉强度与16个波动的工艺参

数的多元线性回归方差分析见表2,由表可得检验的统计量值 $F=5.9$,显著性水平值小于0.001,取显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,查 F 分布表可知 $F_{0.05}(16,113)=1.734 < F$,表明回归方程高度显著,说明16个工艺参数对常温最大抗拉强度有高度显著的线性影响。

推进剂常温最大抗拉强度与16个波动的工艺参数的多元线性回归多重共线性见表3,从表中可以看出以显著性 $\alpha=0.05$ 为临界判据,固化参数、混合温度、混合物相对湿度、混合时间、硫化时间等工艺参数对常温最大抗拉强度有显著的影响。且固化参数、混合温度、混合物相对湿度、总混合时间、硫化时间的共线性值(VIF)最大为3.395,小于判定值10,说明自变量之间不存在多重共线性。同时,由表可见固化参数、混合温度的系数为正,混合时间、混合物相对湿度、硫化时间的系数为负,因此,推进剂常温

Table 1 Summary of multiple linear regression models for maximum tensile strength

R	R^2	Standard estimation error	Durbin-Watson
0.675	0.456	0.056	1.484

Table 2 ANOVA for maximum tensile strength

Parameter	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	Significance
Regression	0.297	16	0.019	5.9	3.2×10^{-9}
Residual	0.354	113	0.003		
Total	0.652	129			

Table 3 Multiple linear regression coefficient of maximum tensile strength

Model	Unstandardized coefficient		Standard coefficient	T-test value	Significance	Collinear statistics	
	Coefficient	Std. error				Tolerance	VIF
(Constant)	0.508	0.357		1.426	0.157		
Curing parameter	1.602	0.215	0.952	7.445	2.1×10^{-11}	0.295	3.395
Premixed environmental temperature	-8.63×10^{-5}	0.002	-0.004	-0.048	0.961	0.754	1.326
Absolute moisture content of premix	0	0.001	0.023	0.299	0.765	0.823	1.216
Temperature of mixing	0.004	0.002	0.220	-1.687	0.044	0.283	3.529
Relative humidity of mixture	-0.001	0	-0.262	-2.734	0.007	0.524	1.910
Absolute moisture content of mixture	-0.001	0.002	-0.060	-0.755	0.452	0.775	1.291
Mixing rate	0.002	0.001	0.093	1.261	0.210	0.880	1.137
Mixing time	-0.015	0.003	-0.496	-5.150	1.11×10^{-6}	0.520	1.924
Maximum torque of mixing	4.87×10^{-6}	0	0.156	1.526	0.130	0.460	2.172
Mixing pressure	0.009	0.020	0.044	0.462	0.645	0.536	1.865
Pouring room temperature	-0.002	0.002	-0.090	-0.829	0.409	0.411	2.434
Absolute moisture content of pouring	-0.001	0.001	-0.082	-1.123	0.264	0.901	1.110
Pouring rate	-0.004	0.004	-0.104	-0.886	0.378	0.350	2.857
Quality of the test material taking	-0.009	0.003	-0.366	-3.524	0.101	0.447	2.236
Pouring time	0.001	0.001	0.170	1.387	0.168	0.321	3.117
Vulcanizing time	-0.001	0	-0.216	-2.752	0.007	0.783	1.277

的最大抗拉强度随着固化参数、混合温度的增加而增大,随着总混合时间、混合物相对湿度、硫化时间的增大而降低,并且固化参数、混合时间、混合温度、混合物相对湿度、硫化时间的系数绝对值依次减小,因此其对推进剂常温的最大抗拉强度的影响依次减弱。

分别根据多元线性回归方程及确定的关键工艺参数,对最大抗拉强度进行预测,130 组数据的平均相对误差见图 4,横轴为相对预测误差,纵轴为相应的频数。

通过全部工艺参数的多元线性回归方程对最大抗拉强度的预测结果中,最小相对误差为 0.41%,最大相对误差为 30.3%,平均相对误差为 11.2%;通过关键工艺参数对最大抗拉强度的预测结果中,最小相对误差为 0.39%,最大相对误差为 44.9%,平均相对误差为 14.5%。可见多元线性回归方程能够对推进剂最大抗拉强度进行预测;仅通过关键工艺参数对推进剂最大抗拉强度预测误差,略大于通过全部工艺参数的预测结果,可见识别的关键工艺参数的确对推进剂的最大抗拉强度有着显著影响。

3.2.2 最大伸长率多元线性回归结果

推进剂常温最大伸长率与 16 个波动的工艺参数的回归模型汇总见表 4,从模型汇总表中可以看出模

型的整体相关系数 $R=0.577$,判定系数 $R^2=0.333$,大于判定系数临界判据 0.3,说明样本的回归效果较好,方程拟合程度较高。

推进剂常温最大伸长率与 16 个波动的工艺参数的多元线性回归方差分析表见表 5,由表可得检验的统计量值 $F=2.54$,显著性水平值小于 0.001,取显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,查 F 分布表可知 $F_{0.05}(16, 113)=1.734 < F$,表明回归方程高度显著,说明 16 个工艺参数对常温最大伸长率有高度显著的线性影响。

推进剂常温最大伸长率与 16 个波动的工艺参数的多元线性回归多重共线性表见表 6,从表中可以看出以 $\alpha=0.05$ 为临界判据,混合压强、混合时间、硫化时间等工艺参数对常温最大伸长率有显著的影响。且混合保压值、混合时间、硫化时间的共线性值 (VIF) 最大为 1.924,小于判定值 10,说明自变量之间不存在多重共线性。同时,由表可见混合压强、混合时间、硫化时间的系数为正,因此,推进剂常温的最大伸长率随着混合压强、混合时间、硫化时间的增加而增大,并且混合压强、混合时间、硫化时间的系数绝对值依次减小,因此其对推进剂常温最大伸长率的影响依次减弱。

分别根据多元线性回归方程及确定的关键工艺参

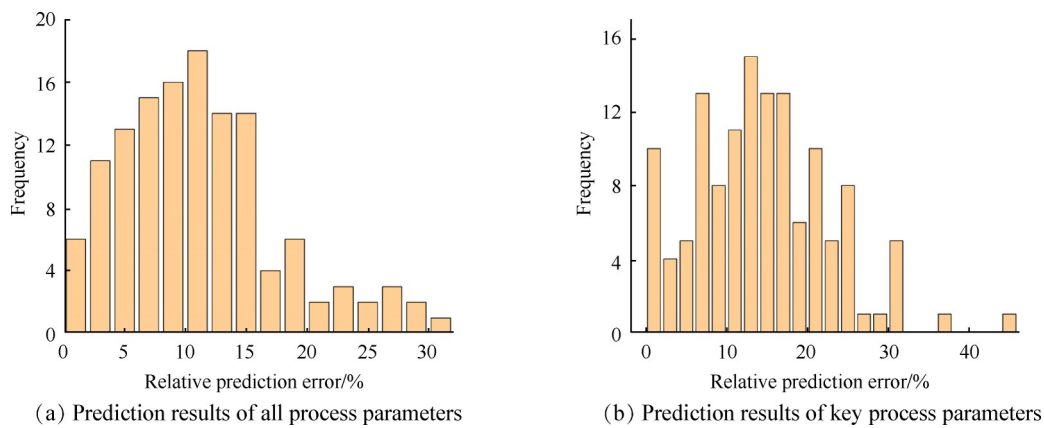


Fig. 4 Mean relative error of multivariate polynomial regression of tensile strength

Table 4 Summary of multiple linear regression models for maximum elongation

R	R^2	Standard estimation error	Durbin-Watson
0.577	0.333	3.697	1.406

Table 5 ANOVA for maximum elongation

Parameter	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	Significance
Regression	586.5	16	36.6	2.54	0.002
Residual	1632	113	14.5		
Total	2219	129			

Table 6 Multiple linear regression coefficient of maximum elongation

Model	Unstandardized coefficient		Standard coefficient	T-test value	Significance	Collinear statistics	
	Coefficient	Std. error				Tolerance	VIF
(Constant)	-40.611	24.206		-1.678	0.096		
Curing parameter	6.193	14.602	0.063	0.424	0.672	0.295	3.395
Premixed environmental temperature	-0.022	0.121	-0.017	-0.179	0.859	0.754	1.326
Absolute moisture content of premix	0.025	0.043	0.053	0.592	0.555	0.823	1.216
Temperature of mixing	-0.122	0.145	-0.128	-0.842	0.402	0.283	3.529
Relative humidity of mixture	0.034	0.034	0.112	1.007	0.316	0.524	1.910
Absolute moisture content of mixture	0.086	0.125	0.063	0.690	0.491	0.775	1.291
Mixing rate	0.086	0.097	0.076	0.881	0.380	0.880	1.137
Mixing time	0.385	0.197	0.200	1.785	0.027	0.520	1.924
Maximum torque of mixing	0	0	-0.148	-1.248	0.214	0.460	2.172
Mixing pressure	4.457	1.338	0.367	3.332	0.001	0.536	1.865
Pouring room temperature	-0.012	0.126	-0.012	-0.096	0.924	0.411	2.434
Absolute moisture content of pouring	-0.039	0.058	-0.057	-0.673	0.502	0.901	1.110
Pouring rate	-0.232	0.296	-0.107	-0.784	0.435	0.350	2.857
Quality of the test material taking	0.263	0.171	0.186	1.539	0.127	0.447	2.236
Pouring time	0.063	0.061	0.148	1.038	0.302	0.321	3.117
Vulcanizing time	0.052	0.016	0.305	3.347	0.001	0.783	1.277

数,对最大伸长率进行预测,130组数据的平均相对误差见图5,横轴为相对预测误差,纵轴为相应的频数。

通过全部工艺参数的多元线性回归方程对最大伸长率的预测结果中,最小相对误差为0.13%,最大

相对误差为35.6%,平均相对误差为11.7%;通过关键工艺参数对最大伸长率的预测结果中,最小相对误差为0.73%,最大相对误差为37.0%,平均相对误差为20.5%。可见多元线性回归方程能够对推进剂最大伸长率进行预测;通过关键工艺参数对推进剂最大伸长率预测的误差,略大于通过全部工艺参数的预测结果,可见通过多元线性回归识别的关键工艺参数的确对推进剂的最大伸长率有着显著影响。

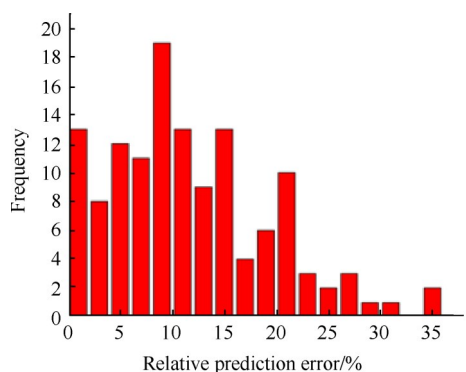
3.2.3 小结

通过对推进剂常温下的最大抗拉强度、最大伸长率进行多元线性回归和分析,发现:

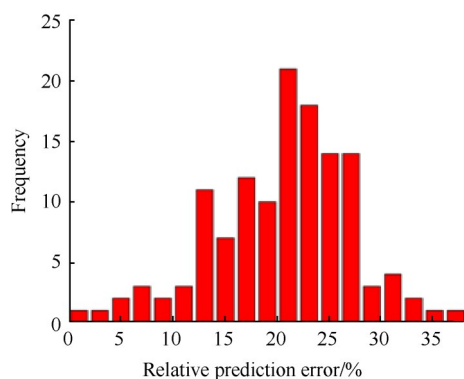
(1)推进剂的力学性能与16个工艺参数之间的多元线性回归拟合程度较好。

(2)固化参数、混合时间、混合温度、硫化时间、混合物相对湿度对最大抗拉强度有显著的影响;混合压强、混合时间、硫化时间对最大伸长率有显著的影响。综上,固化参数、混合时间、混合温度、硫化时间、混合物相对湿度、混合压强等6个工艺参数对推进剂的力学性能有显著影响,与Ramohalli、侯林法、鲁国林等研究成果相吻合。

(3)对比最大抗拉强度和最大伸长率的多元线性回归预测结果,最大抗拉强度的预测结果的平均相对误差更小,由此可见最大抗拉强度的多元线性回归模型更优;并且,根据多元线性回归识别的关键工艺参数对推进剂力学性能进行预测,其预测的平



(a) Prediction results of all process parameters



(b) Prediction results of key process parameters

Fig. 5 Mean relative error of multivariate polynomial regression of maximum elongation

均相对误差,均略大于基于全部工艺参数预测的平均相对误差,由此可见确定的关键工艺参数的确对推进剂的最大伸长率有着显著影响。

3.3 基于BP神经网络的推进剂力学性能预测结果

根据装药工艺参数对推进剂力学性能的影响分析研究,发现固化参数、混合时间、混合温度、硫化时间、混合物相对湿度、混合压强对常温最大抗拉强度、最大伸长率有显著的影响。因此,本文分别选取6个关键工艺参数对常温最大抗拉强度、最大伸长率进行神经网络的训练和预测,其中参与训练的子样(训练集)为120个,进行验证的子样(验证集)为10个,神经网络训练过程见图6。

根据建立的模型分别对常温最大抗拉强度、最大伸长率进行神经网络的预测,模型的训练预测结果见下表7和表8。其中最大抗拉强度预测的最小误差为1.50%,最大误差为6.19%,平均误差为4.08%;最大伸长率预测的最小误差为0.19%,最大误差为7.28%,平均误差为3.54%。从模型的训练结果和预测结果可以看出,模型能够很好地反映出关键工艺

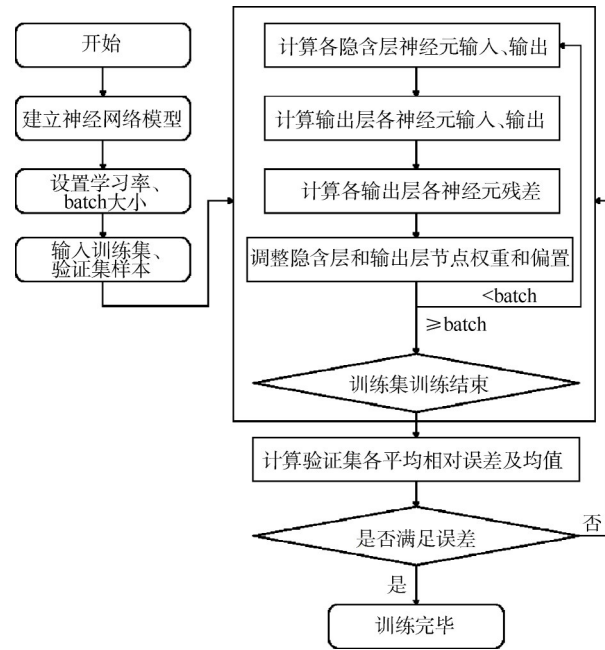


Fig. 6 Neural network training process

参数对常温最大抗拉强度、最大伸长率力学性能的影响。

Table 7 Comparison of maximum tensile strength of propellant measured and predicted

Number	Measured maximum tensile strength/MPa	Predicted maximum tensile strength/MPa	Maximum tensile strength error value	Relative error of maximum tensile strength/%
1	0.594	0.614	0.020	3.37
2	0.589	0.613	0.024	4.07
3	0.665	0.655	-0.010	1.50
4	0.616	0.593	-0.023	3.73
5	0.630	0.669	0.039	6.19
6	0.570	0.597	0.027	4.74
7	0.598	0.581	-0.017	2.84
8	0.653	0.615	-0.038	5.82
9	0.771	0.737	-0.034	4.41
10	0.612	0.587	-0.025	4.08

Table 8 Comparison of maximum elongation of propellant measured and predicted

Number	Measured maximum elongation/%	Predicted maximum elongation/%	Maximum elongation error value	Relative error of maximum elongation/%
1	46.6	45.86	-0.740	1.59
2	45.6	46.13	0.530	1.16
3	44.8	47.82	3.020	6.74
4	44.6	46.92	2.320	5.20
5	44.1	47.31	3.210	7.28
6	49.6	47.47	-2.130	4.29
7	55.4	54.30	-1.100	1.99
8	45.8	46.68	0.880	1.92
9	47.4	49.80	2.400	5.06
10	47.7	47.61	-0.090	0.19

4 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)在发动机药柱成型过程中,大部分工艺参数保持不变,仅固化参数、预混环境温度、混合相对湿度、浇注下料速度、硫化时间等16个工艺参数存在波动,受到这些波动工艺参数的影响,推进剂常温的最大抗拉强度、最大伸长率均服从正态分布。

(2)16个波动的工艺参数对推进剂力学性能的影响符合多元线性关系;其中常温最大抗拉强度受固化参数、混合时间、混合温度、硫化时间、混合物相对湿度等关键工艺参数影响显著;常温最大伸长率受混合压强、混合时间、硫化时间等关键工艺参数影响显著。

(3)以推进剂常温最大抗拉强度和最大伸长率确定的关键工艺参数为输入,基于BP神经网络模型能够精确地对药柱常温的力学性能进行预测,最大抗拉强度的平均误差为4.08%,最大误差为6.19%,最大伸长率的平均误差为3.54%,最大误差为7.28%。

参考文献

- [1] 侯林法. 复合固体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [2] 张永侠, 贾小锋, 苏昌银. 固体火箭发动机装药与总装工艺学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2017.
- [3] ZIMMERMAN G, KISPERSKY J, NAHLOVSKY B, et al. Embrittlement of propellants containing nitrate ester plasticizers[C]. California: 18th Joint Propulsion Conference, 1982.
- [4] TIXIER L, NEVIERE R. Fracture of case bonded grains in cold pressurization motor tests [C]. Colorado: 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2009.
- [5] SUN MIN B. Characterization of the plasticized GAP/PEG and GAP/PCL block copolyurethane binder matrices and its propellants [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics: An International Journal Dealing with Scientific and Technological Aspects of Energetic Materials, 2008, 33(2): 131-138.
- [6] PANDE S M, SADAVARTE V S, BHOWMIK D, et al. NG plasticized PE-PCP binder-based advanced solid rocket propellants: studies on machanical properties [J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2012, 11(2).
- [7] LEE D H, KIM K T, JUNG H, et al. Characterization of 1, 2, 3-triazole crosslinked polymers based on azide chain-ends prepolymers and a dipolarophile curing agent as propellant binders: the effect of a plasticizer [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2014, 45(6): 3110-3116.
- [8] 倪冰, 覃光明, 冉秀伦. GAP/HTPB共混粘合剂体系的力学性能研究[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 167-173.
- [9] DENG J K, LI G P, XIA M, et al. Improvement of mechanical characteristics of glycidyl azide polymer binder system by addition of flexible polyether [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(35).
- [10] DENG J K, WANG X Q, LI G P, et al. Effect of bonding agent on the mechanical properties of GAP high-energy propellant [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(4): 394-400.
- [11] 刘晶如, 罗运军, 杨寅. 双模聚氨酯交联体系的力学性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(10): 90-93.
- [12] MARK J E. Some unusual elastomers and experiments on rubberlike elasticity [J]. Progress in Polymer Science, 2003, 28(8): 1205-1221.
- [13] PEREZ D, RAMOHALLI K. A scientific approach to composite propellant processing [C]. Arizona: 26th Joint Propulsion Conference, 1991.
- [14] RAMOHALLI K N R. Influence of mixing time upon burning rate and tensile modulus of AP/HTPB composite propellants [C]. Karlsruhe: 15th ITC Conference, 1984.
- [15] KLAGER K, ROGERS C J, KLAAS P J. Solid propellant reproducibility by materials characterization and process control [C]. Karlsruhe: Internationale Jahrestagung ICT, 1977.
- [16] 王长起. 复合固体推进剂工艺质量控制 [J]. 推进技术, 1993, 14(5): 66-71. (WANG C Q. Quality control in process of solid composite propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 1993, 14(5): 66-71.)
- [17] 鲁国林. 工艺温度对丁羟推进剂力学性能的影响 [J]. 固体火箭技术, 1999, 22(3): 34-36.
- [18] 彭威. 复合固体推进剂粘弹损伤本构模型的细观力学研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2001.
- [19] 徐强, 胡勤伟, 沙宝林, 等. NEPE固体推进剂含损伤的黏弹性本构研究 [J]. 应用力学学报, 2019, 36(3).
- [20] TUNÇ B, ÖZÜPEK Ş. Implementation and validation of a three dimensional damaging finite strain viscoelastic model [J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 102: 275-285.
- [21] YUN K S, PARK J B, JUNG G D, et al. Viscoelastic constitutive modeling of solid propellant with damage [J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 80: 118-127.
- [22] 张高章, 司马凯. 复合固体推进剂力学性能的建模预测研究 [J]. 化工新型材料, 2019, 46(12): 160-164.

(编辑:白鹭)

HTPB propellant charging process and prediction of its mechanical properties

QIN Pengju¹, HOU Xiao², ZHANG Xiangyu³, CHENG Jiming¹, SONG Xueyu¹, CHENG Shu³, YANG Kun³

(1. Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermo-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;

3. National Key Laboratory of Solid Rocket Propulsion, Institute of Xi'an Aerospace Solid Propulsion Technology, Xi'an 710025, China)

Abstract: The manufacturing technology has a great influence on the mechanical properties of solid propellant of solid rocket motor during the molding process. Through the study of the charging process parameters and mechanical properties of 130 pots propellant, the fluctuation of the charging process parameters was determined. Based on the multiple linear regression analysis method, the key process parameters affecting the mechanical properties of the propellant were obtained. Taking the key process parameters as input, a BP neural network is set up and the mechanical properties of the propellant are predicted. The research results show that 16 parameters have different degrees of influence on mechanical properties of propellant, six key process parameters such as the curing parameters, mixing time, mixing temperature, vulcanizing time, relative humidity, mixing pressure and so on have significant effect on the mechanical properties of the propellant temperature. Based on the key process parameters and the corresponding mechanical properties of the propellant, the BP neural network was established to accurately predict the mechanical properties of the propellant. The average error of the maximum tensile strength was 4.08%, and the average error of the maximum elongation was 3.54%.

Key words: HTPB propellant; Mechanical properties; Key process; Neural network; Performance prediction

Received: 2022-11-15; Revised: 2023-03-23.

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2211042

Corresponding author: QIN Pengju, E-mail: qpj_ftd@126.com