

气相和粒子冲刷速度对丁羟推进剂燃速影响分析*

刘佩进, 王 勇, 吕 翔, 李迎春, 陈 剑

(西北工业大学 航天学院 固体火箭发动机燃烧、
热结构与内流场国防科技重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 基于试验获得的气相和粒子冲刷条件下的固体推进剂燃速数据, 采用误差反向传播算法 (BP算法) 的人工神经网络技术开展了推进剂的燃速特性分析。网络训练和预示结果表明, 利用 BP算法开展冲刷条件下的燃速影响因素分析的精度在 4% 以内。分析结果表明, 气相和粒子冲刷速度都会影响固体推进剂的燃速。在低气相速度条件下, 推进剂燃速对粒子冲刷速度的变化更为敏感。粒子冲刷对固体推进剂燃速的影响存在界限效应, 当粒子冲刷速度大于某一界限值时, 推进剂燃速增加幅度增大, 并由粒子冲刷主导。

关键词: 冲刷⁺; 固体推进剂; 燃速特性⁺; BP算法⁺

中图分类号: V512 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2008) 03-0278-04

Gas and particle velocity impact on the burning rate of HTPB solid propellant

LIU Pei-jin, WANG Yong, LÜ Xiang, LI Ying-chun, CHEN Jian

(Coll. of Astronautics/National Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo-Structure,
Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract Based on the experimental burning data under gas and particle erosion, Artificial Neural Network technique using BP arithmetic was used to study analysis the burning rate property of HTPB solid propellant. Training and prediction results show that the error of BP arithmetic is less than 4%. The results indicate that the burning rate of HTPB propellant can be affected by both gas phase and particle velocity. Burning rate is sensitive to particle velocity at lower gas phase velocity. There exists a threshold of particle velocity. If particle velocity exceeds this value, burning rate of solid propellant is dominant by particle velocity and it increases dramatically.

Key words Erode⁺; Solid propellant; Burning rate⁺; BP arithmetic

1 引 言

现代战术武器的攻防对导弹的机动能力提出了更高的要求, 强机动引起的高过载对固体火箭发动机的工作安全性产生很大的影响, 已经影响到了固体发动机的研制进程。过载条件会使发动机内部的两相流动发生改变, 从而影响推进剂表面的流动状况, 对推进剂燃速特性和绝热层烧蚀产生影响。国内开展了旋转条件下固体推进剂的燃速特性研究^[1, 2], 但旋

转条件与过载引起的粒子冲刷对推进剂燃速影响有较大的差别。已经开展了比较深入的过载条件对绝热层烧蚀的影响研究工作^[3, 4]。由于固体推进剂的燃速相对于绝热层烧蚀速度较大, 表面气流的上升效应强烈, 对凝相粒子和气相的冲刷具有一定的抑制作用, 目前对此尚缺乏机理性的深入研究, 在定量上对冲刷效应与燃速之间的关系认识不够深入。本文基于不同冲刷条件下丁羟推进剂的燃速试验数据, 利用人工神经网络方法定量分析了一定工作条件下气相

* 收稿日期: 2007-06-14 修订日期: 2007-08-17。

基金项目: 国家自然科学基金 (50776073)。

作者简介: 刘佩进 (1971—), 男, 博士, 教授, 研究领域为航空宇航推进理论与工程及吸气式火箭冲压发动机理论与试验。Email: liupj@nwpu.edu.cn

和凝相粒子冲刷速度对固体推进剂燃速特性的影响,为过载条件固体发动机的设计和工作安全性评估提供依据。

2 分析方法

在大量试验数据的基础上,建立两相冲刷条件下的固体推进剂燃速模型,对指导工程应用具有重要意义。目前的燃烧模型用于分析推进剂燃速与影响因素之间的定量关系还有一定的困难,难以从燃烧机理的角度建立燃速模型。寻找一种燃速与影响因素之间的映射关系,同样具有重要工程应用价值。

人工神经网络将大量的简单神经元广泛互连成一种复杂的计算结构,具有学习、记忆、计算和各种智能处理功能,在解决非线性映射问题中发挥了很大的作用。在火箭发动机领域,应用人工神经网络解决用传统理论和方法难以解决的问题方面发挥很大的作用^[5],取得比较显著的成果。

误差反传训练算法 (Back Propagation, 简称 BP 算法) 是人工神经网络常用的一种算法, BP 算法的主要思想是把学习过程分为两个阶段: 第一阶段 (正向传播过程), 给出输入信息通过输入层经隐含层逐层处理并计算每个单元的实际输出。第二阶段 (反向过程), 若未在输出层得到期望的输出值, 则逐层递归地计算实际输出与期望输出之差, 以便根据此误差调节权系数。Hecht-Nielsen 分析了多层神经网络实现非线性映射的能力, 并指出对任一给定的函数 f , 总存在一个三层 BP 网络可以无限逼近它。基于这种考虑, 本文采用三层 BP 网络方法建立气相和粒子冲刷条件下固体推进剂的燃速模型。

在利用 BP 网络进行两相冲刷条件下固体推进剂的燃速模型研究时, 首先要确定网络的输入, 即影响冲刷条件下固体推进剂燃烧特性的主要因素。本文采用的试验数据主要考虑了固定工作压强条件下粒子速度 V_p , 气相速度 V_g 和粒子浓度的影响, 试验发现冲刷条件下粒子速度和气相速度是影响推进剂燃速的主要因素, 而粒子浓度对燃速的影响不明显^[6]。为了研究冲刷条件对推进剂燃速的影响, 这里选用粒子速度和气相速度作为输入, 工作压强做为预留的分析参数, 选取燃速比作为模型的输出, 采用的 BP 网络结构如图 1 所示。燃速比定义为冲刷条件下的燃速与相同压强下无冲刷条件的燃速 (参考燃速) 之比。

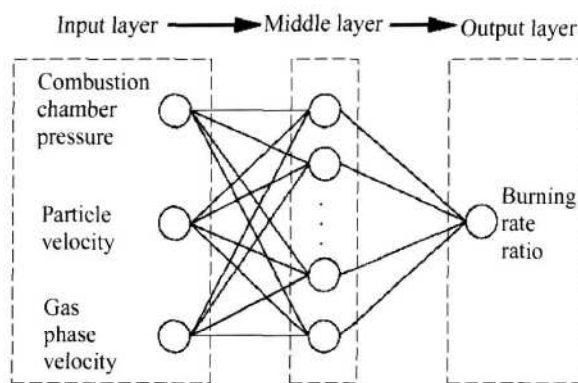


Fig. 1 Neural network structure in burning rate analysis

3 试验数据与分析结果

3.1 试验方法和试验数据

文献 [6] 基于一种高浓度粒子聚集技术, 设计了专门的试验装置和推进剂试件, 利用 X 射线实时荧光屏分析技术开展了两相冲刷条件下固体推进剂燃速特性研究, 获得了不同气相和粒子冲刷条件下丁羟推进剂燃面退移过程的动态图像。试验中发动机的驱动药和被冲刷的推进剂试件采用同一种丁羟推进剂。利用数字图像处理技术, 获得了不同部位的燃速数据。利用计算流体力学方法, 获得了推进剂表面的气相和粒子速度, 数值计算模型和方法见参考文献 [7]。

本文对两个较为典型的试验工况开展进一步处理与分析。图 2 和图 3 分别为两次试验典型时刻的原始图像和数字图像处理后的燃面界面线。可以看出, 由于气相和粒子冲刷速度的不同, 固体推进剂的燃面退移行为有较大的区别。初步分析认为, 导致试

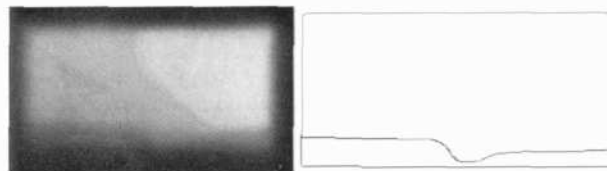


Fig. 2 X-ray original image and processed image at $t = 1.0$ s of test No. 1

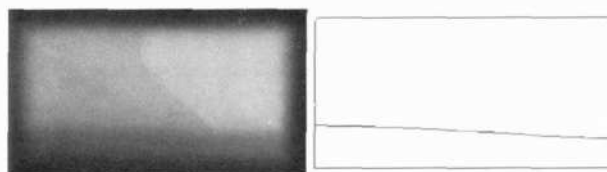


Fig. 3 X-ray original image and processed image at $t = 0.8$ s of test No. 2

验一中部燃面凹坑形成的原因是粒子冲刷速度超过一定的界限,粒子冲刷对推进剂的燃速产生强烈的增益作用。由于代表了两种不同的燃速增加模式,因此选择这两次试验数据作为进一步的分析对象。

表 1和表 2分别是两次试验的数据。为了获得更为全面的燃速特性,从图像中计算出了单个推进剂试件不同部位的平均燃速,表中的位置表示距试件左端的距离。气相和粒子冲刷速度从两相流数值模拟结果中读取。根据发动机的工作时间和推进剂肉厚,计算出试验 1参考燃速为 7.23 mm /s,试验 2参考燃速为 7.13 mm /s。

除任意取出的一组数据外(表 1中标注*),其余数据作为样本,做为 BP算法的网络学习样本。表 3给出了网络训练(预示)结果与学习样本(原始数据)之间的对比,最大相对误差为 3.83%,表明网络训练结果较好的实现了对学习样本的逼近。采用网络学习结果对任意取出的试验数据(没有作为学习样本,表 3中标注*)进行了燃速比(ϵ_p)预示,并与真实试验的燃速比(ϵ_e)进行了对比,其相对误差为 2.14%。表明本文基于 BP网络建立的两相冲刷条件下固体推进剂的燃速模型具有较高的预示精度,数据本身具有很好的规律性,可以用于冲刷条件下固体推进剂的燃烧特性进一步分析。

3.2 分析结果

利用基于 BP算法的燃速分析模型,研究了冲刷条件下粒子速度和气相速度对燃速比的影响。图 4显示的是固定粒子冲刷速度,改变气相冲刷速度时冲刷条件对推进剂燃速比的影响。从图 4中可以看出,在研究的速度范围内,随着气相冲刷速度的增加,推进剂燃速都有不同程度的增加。不同的粒子冲刷条件下,改变气相冲刷速度导致的燃速的增加幅度有较大区别。随着粒子冲刷速度的增加,气相速度增加导致推进剂燃速的增加幅度呈下降趋势。对于基本燃速为 7 mm /s左右的丁羟推进剂,在粒子冲刷速度大于 25 m /s时,此时的推进剂燃速基本由粒子冲刷主导,改变气相冲刷速度对推进剂燃速的影响不大。

图 5显示的是固定气相冲刷速度,改变粒子冲刷速度对推进剂燃速比的影响。可以看出,在不同的气相速度条件下,粒子冲刷导致推进剂燃速增加的趋势也有较大的区别。基本气相速度越小,粒子速度增加导致推进剂燃速增加的幅度越大。实际上,燃速增加是气相和粒子冲刷的综合作用,基本气相速度较大时,由于气相作用导致推进剂燃速增加,更为强烈的上升气流的作用对粒子冲刷有所抑制,这可能是高的基本气相速度条件下,推进剂燃速对粒子冲刷速度敏感程度下降的原因。

Table 1 Burning rate and flow parameters at different locations of species test No. 1					
Location/mm	24	40*	46	54	65
Gas phase velocity/(m/s)	43.0	58.5	56.0	61.0	67.0
Particle velocity/(m/s)	14.5	27	32	32	29
Average burning rate/(mm/s)	9.56	12.48	14.08	14.25	12.29

Table 2 Burning rate and flow parameters at different locations of species test No. 2				
Location/mm	14	38	50	62
Gas phase velocity/(m/s)	4.1	10.3	18.7	21.8
Particle velocity/(m/s)	6	17	16.5	15.8
Average burning rate/(mm/s)	7.39	8.36	8.68	9.0

Table 3 Experimental data and predicted results							
Test No	Location/mm	Chamber pressure/MPa	Particle velocity/(m/s)	Gas phase velocity/(m/s)	Experimental burning rate ratio/ ϵ_e	Predicted burning rate ratio/ ϵ_p	Relative error/%
1	24	3.53	14.5	43.0	1.32	1.313	0.57
	40*		27	58.5	1.726	1.689	2.14
	46		32	56.0	1.95	1.928	1.12
	54		32	61.0	1.97	1.897	3.72
	65		29	67.0	1.70	1.735	2.04
2	14	3.62	6	4.10	1.04	1.052	1.19
	38		17	10.3	1.17	1.215	3.83
	50		16.5	18.7	1.22	1.222	0.15
	62		15.8	21.8	1.26	1.218	3.32

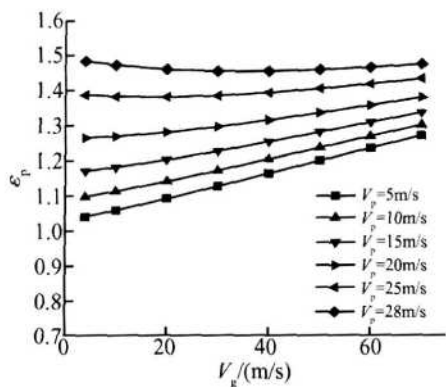


Fig. 4 Influence of gas phase velocity on burning ratio under constant particle velocity

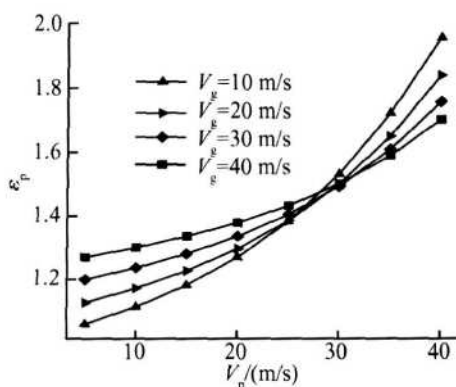


Fig. 5 Influence of particle velocity on burning ratio under constant gas phase velocity

由上述分析结果可以看出,当过载导致固体发动机内的粒子冲刷速度达到某一值时,应该特别注意粒子冲刷对推进剂燃速大幅度增加而导致绝热层过早暴露的影响。装药通道内初始流速越低,越应该重视粒子冲刷对推进剂燃面退移的影响。

4 结 论

(1) 基于 BP 网络建立的冲刷条件下固体推进剂的燃速模型具有较高的预示精度。

(2) 气相和粒子冲刷速度都会影响固体推进剂

的燃速。在低气相速度条件下,推进剂燃速对粒子冲刷速度的变化更为敏感。

(3) 粒子冲刷对固体推进剂燃速的影响存在界限效应,对于本文研究的丁羟推进剂和工作压强条件,当粒子冲刷速度超过约 25 m/s 时,推进剂燃速增加由粒子冲刷主导。

参考文献:

- [1] 曹泰岳. 含金属固体推进剂在加速度场中燃烧时瞬态燃烧特性预示 [J]. 推进技术, 1987, 8(5).
- [2] 张为华, 曹泰岳, 万章吉. 固体火箭发动机旋转对燃速的影响 [J]. 航空动力学报, 1994, 9(1).
- [3] 何国强, 王国辉, 蔡体敏, 等. 高过载条件下固体发动机内流场及绝热层冲蚀研究 [J]. 固体火箭技术, 2001, 24(4).
- [4] 李江, 刘洋, 娄永春, 等. 颗粒冲刷对绝热层烧蚀影响的实验研究 [J]. 推进技术, 2006, 27(1). (LI Jiang, LIU Yang, LOU Yong-chun, et al. Experimental investigation for the influence of particle on insulation erosion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(1).)
- [5] 刘佩进, 吕翔, 何国强. 基于人工神经网络的燃速相关性研究 [J]. 推进技术, 2004, 25(2). (LIU Pei-jin, LÜ Xiang, HE Guo-qiang. Burning rate relativity investigation using artificial neural network [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(2).)
- [6] 李迎春, 何国强, 刘佩进, 等. 粒子冲刷对丁羟推进剂燃烧性能影响试验研究 [J]. 固体火箭技术, 2008, 31(1).
- [7] 何国强, 王国辉, 蔡体敏, 等. 过载条件下固体发动机内流场数值模拟 [J]. 推进技术, 2002, 23(3). (HE Guo-qiang, WANG Guo-hui, CAI Ti-min, et al. Numerical simulation on 3-D two-phase flow field in SRM with acceleration load [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(3).)

(编辑: 郭振伶)