

固体火箭喷管两相流中 微粒直径的实用拟合公式*

荣先成 李宝盛

(西北工业大学航天工程学院, 西安, 710072)

摘 要: 根据国外实际发动机试车实测的喷管两相流中微粒直径等参数, 用多参数最小二乘法拟合出较方便实用的质量加权平均直径 D_{43} 计算公式, 以作为预估发动机性能的依据。

主题词: 喷管气流, 二相流, 粒度, 拟合函数

分类号: B435.11

A FITTING FORMULA FOR PARTICLE SIZE IN SOLID ROCKET NOZZLE TWO-PHASE FLOW

Rong Xiancheng Li Baosheng

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ. Xi'an, 710072)

Abstract: A fitting formula for particle size D_{43} in solid rocket nozzle two-phase flow was developed by using multivariate least square method, which will be used as a criterion for prediction of solid rocket motor performances.

Subject terms: Nozzle gas flow, Two phase flow, Granularity, Fitting function

1 引言

固体火箭发动机喷管两相流动的性能损失, 最重要的变量之一是凝相氧化铝微粒尺寸。微粒直径对比冲效率的影响很大, 微粒直径每变化 $1\mu\text{m}$, 约使比冲效率变化 1% ^[1]。因此, 固体火箭发动机性能预示的准确性在较大程度上依赖于微粒的质量加权平均直径 D_{43} 的准确性。

2 拟合公式相关参数的选取

国外根据实际测定, 已总结出许多 D_{43} 的计算公式^[1~4]。它们常包含喉径、燃烧室压强、凝相的百分含量、燃气在燃烧室中的停留时间等因素。根据微粒在燃烧室和喷管中的凝聚破碎模型, 认为微粒在燃烧室中呈液态, 易发生凝聚, 而在喷管中呈固态, 加速流动中易发生破碎。因而, 一般在燃烧室中微粒直径较大, 在喷管中微粒直径较小。计算表明, 影响微粒直径最主要的因素是喉径 D_t 和燃烧室压强 p_c 。凝相浓度 C 的影响较小, 推进剂的燃烧温度 T 影响更小, 微粒在燃烧室中的平均停留时间 $\bar{\tau}$ 则不易估计准确。考虑到燃烧室中的微粒滞后很小, 而喷管中的微粒滞后大, 对燃气流动产生较大的阻力, 对比冲效率有直接的影响, 因此, 在拟合 D_{43} 的计算公式时, 若着重计及喷管喉径、燃烧室压强和凝相浓度, 而对影响较小的燃

* 本文 1995 年月 7 日 13 收到, 修改稿 1995 年 9 月 30 日收到

烧温度和停留时间这一不易准确估计的因素暂时不予考虑,也许所得的公式更为实用。本文根据这一思路,用多参数最小二乘法,根据国外在实际发动机试车中实测的微粒直径等数据拟合出较方便实用的 D_{43} 计算公式。

要拟合 D_{43} 的计算公式,需要许多实测数据。国内有人用小型试验发动机做过一些实测,但为数很少,数据也不尽准确,可应用的实测值几乎没有。因此本文采用美国的实测数据来拟合微粒直径公式。这里基本采用标准差 $\log D$ 的正态分布数据,兼顾 SPP 采用的数据,对同类发动机选有代表性的一种,筛选时淘汰了一些明显不合理的数据,所采用的数据如表 1 所示。

Table 1 Particle size of Al_2O_3 (USA)

SPRM type	Al%	C Al_2O_3 concentration	D_c/D_t	T_c/K	$\bar{\tau}/\text{ms}$	p_c/MPa	D_t/mm	Measurement	$D_{43}/\mu\text{m}$ formula(1)	$D_{43}/\mu\text{m}$ formula(2)
CSD-3C2-X	16	0.237	2	3158	35	0.96	12.7	1.04	0.98	1.01
70-1b	16	0.26	2	3395	12	3.77	62.48	2.00	3.28	3.17
CSD-TM-3	18	0.305	2	3513	69	6.73	51.6	5.36	3.76	3.88
MX/SS ADP	18	0.297	2	3760	157	8.58	175.5	5.77	7.38	7.31
45-in	18	0.305	4	3513	145	6.52	195.2	6.23	5.25	5.37
44SS4	15	0.26	0.75	3330	23	3.40	393.7	8.89	7.93	7.38
156-7	16	0.26	3	3395	143	3.84	508	10.8	9.4	8.65
TCC-120	20	0.34	1.8	3497	162	4.80	622.3	11.1	11.1	12.31
156-9	18	0.32	1.125	3557	110	3.84	876.3	12.0	12.16	12.98
UA-1205	16	0.285	0.4	3309	175	3.77	957.6	12.0	12.6	12.41

3 拟合结果

根据表 1 实测数据用多参数最小二乘法拟合的 D_{43} 计算公式,如考虑喉径和燃烧室压强两个主要因素时,为

$$D_{43} = 0.2916 D_t^{0.4821} p_c^{0.3453} \quad (1)$$

如考虑喉径、燃烧室压强和凝相 Al_2O_3 浓度时,为

$$D_{43} = 0.7622 D_t^{0.4764} p_c^{0.3037} C^{0.7036} \quad (2)$$

公式 (1)、(2) 是在对数均方误差最小的意义下所得,其标准差分别为 $1.04 \mu\text{m}$ 和 $1.27 \mu\text{m}$ 。对比表 1 中由公式 (1)、(2) 算得的 D_{43} 数值可见,公式 (1) 比公式 (2) 的准确性还略高一些,可能是 Al_2O_3 浓度数据本身不够准确之故。因此可以认为公式 (1) 有较好的实用性和可信性。

将公式 (1) 用于国内某些发动机时,可计算出它们各自的 D_{43} (如表 2 所示)。在缺乏国内实测数据时,它们可作为发动机性能预估的依据。

Table 2 Particle size of Al_2O_3 for some solid rocket motors

SPRM type	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
p_c/MPa	3.92	6.37	4.27	5.88	4.51	5.55	5.88
D_t/mm	83	64	151	140	190	227	292
$D_{43}/\mu\text{m}$	3.93	4.10	5.41	5.82	6.15	7.20	8.30

参 考 文 献

- 1 何洪庆, 张振鹏. 固体火箭发动机的气体动力学. 西安: 西北工业大学出版社, 1988
- 2 方丁酉. 两相流动力学. 长沙: 国防科技大学出版社, 1988
- 3 Hersem R W. Aluminium oxide particle size for solid rocket motor performance prediction. AIAA 81-0035
- 4 Sabnis J S, Dejong F J, Gibeling H J. Calculation of particle trajectories in solid rocket motors with arbitrary acceleration. AIAA 91-3392

.....

(上接第 13 页)

5.2 寿命预估

贮存过程温度变化比较平缓, 累积损伤呈线性增大趋势。试件破坏概率分布函数 P 取 1, 计算发动机贮存 10 年累积损伤为 29%。据此预测, 如果认为累积损伤达到 1.0 时发动机失效, 则发动机平均贮存寿命约为 30 年。即发动机贮存 30 年, 失效概率为 50%。根据试件破坏概率分布曲线 (图 3) 分析, 取 $P=0.42$, 对应失效概率为 10%, 计算得发动机贮存寿命为 15 年; 取 $P=0.24$, 对应失效概率为 1%, 计算得发动机贮存寿命为 8 年。

同时, 计算结果表明, 应力、损伤随环境温度升高而降低, 随温度下降而增大。由此可见, 若贮存地区年平均温度较低, 则发动机贮存寿命较短。

参 考 文 献

- 1 蔡峨. 粘弹性力学基础. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989
- 2 Derbalian G, et al. Probabilistic environmental model for solid rocket motor life prediction. NTR-6030, 1982
- 3 Bills K W, et al. Solid propellant cumulative damage program-final report. AFRPL-TR-68-131
- 4 Zibdeh H S, et al. The use of the first passage method in service life prediction for rocket motors. AIAA-86-1416