

固体发动机试车燃气中 HCl 和 Al_2O_3 扩散研究*

李宪昌 曹丽宁 彭维勉 赵素丽 刘孟珍

(航天工业总公司 46 所, 呼和浩特, 010026)

摘 要: 对固体火箭发动机试车燃气的组成、抬升和扩散, 采用高斯模式与环境监测相结合的方式进行了系统研究, 评价了不同大气稳定度下 HCl 和 Al_2O_3 浓度的分布, 提出了有效的防治措施。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 燃烧产物, 气体扩散, 环境监测, 高斯方程

分类号: V553.21, X830.1

A SYUDY ON DIFFUSION OF HCl AND Al_2O_3 IN SOLID ROCKET MOTOR COMBUSTION-GAS

Li Xianchang Cao Linin Peng Weimian Zhao Suli Liu Mengzhen

(The 46th Research Institute, Huhehot, 010026)

Abstract: A systematic study on the composition, rise and diffusion of combustion gas exhausted during solid rocket motor firing test is made by means of combination Gaussian model prediction with environment monitoring. HCl and Al_2O_3 concentration distributions under different atmospheric stabilities are evaluated and effective anti-pollution measures are proposed.

Keywords: Solid propellant rocket engine, Combustion product, Gaseous diffusion, Environment monitoring, Gauss equation

1 前 言

大型固体发动机地面试车或发射所产生的废气扩散及对环境的影响, 国内外都有研究工作的报道^[1,2]。对试车燃气及其后燃烧产物以及试车烟气团高度的报道, 大都限于理论计算, 而试车废气扩散及对环境的影响的研究也是以理论计算为基础的。

* 本文 1992 年 10 月 26 日收到

本文研究了固体推进剂燃气的组成、烟团抬升高度、排放废气中 Al_2O_3 粒径、 HCl 及 Al_2O_3 扩散分布, 以实际测定的数据为基础辅助以高斯数学模式计算和预测, 对试车废气中 HCl 、 Al_2O_3 的扩散规律进行了系统研究, 取得了比较理想的结果。

2 研究工作程序和实验研究方法

2.1 研究工作程序

研究工作程序见图 1。

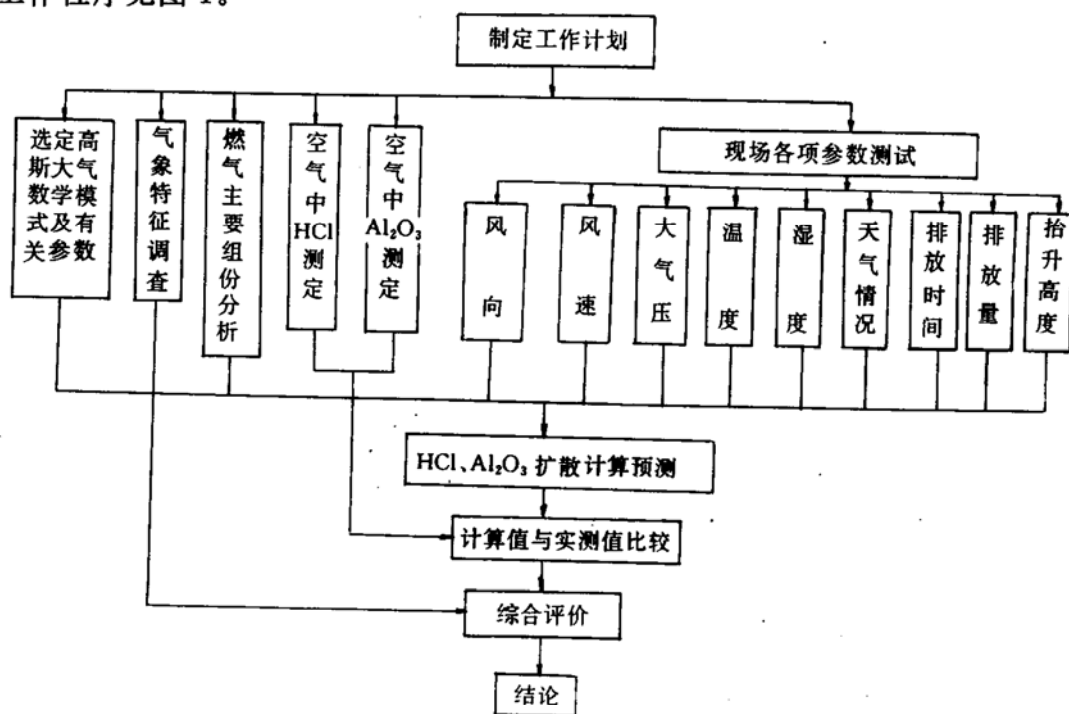


图 1 研究工作程序框图

2.2 实验研究方法

2.2.1 选定高斯大气扩散数学模式

对大型火箭发动机试车废气, 一般应视为大负荷瞬时点源。但是, 试车废气先水平喷放, 后因高温而具有上浮力, 可以抬升到数十到数百米的高度。从开始排放到抬升至一定高度形成初始稳定云团, 需要一百多秒至二百秒以上, 恰能满足高斯模式的时间下限; 实际测定表明, Al_2O_3 粒径在 $20\mu\text{m}$ 以下, 具有与 HCl 气体分子相同的运动行为; 在一定的距离内非雨天气 Al_2O_3 的沉降和 HCl 的被吸收可忽略不计; 另外, 本研究所选定的试验场地、地形地貌基本满足高斯模式的条件。

本文以初始稳定烟团中心为原点, 烟团沿 x 轴迁移, 同时向 y 轴和 z 轴方向扩散。

由于试车烟团直径为数十米, 而高斯模式通常应用于初始直径 1m 左右的羽烟, 因此, 需把烟团起点虚拟后移到直径接近于 0 的位置, 设为 $-x_0$, 即计算中得到的浓度分布位置一律加 $-x_0$ 这段距离。高斯扩散模式的主要公式为:

$$C(x, y, z, H) = \frac{\theta}{2\pi u \delta_y \delta_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\delta_y}\right)^2\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\delta_z}\right)^2\right] \right\}$$

$$+ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\delta_z}\right)^2\right]\}$$

式中： θ 污染源排放强度，mg/s； y 水平扩散距离，m；
 $\bar{v}$ 初始烟团稳定高度处平均风速，m/s； z 垂直扩散距离，m；
 H 初始烟团稳定高度，m； δ_y 、 δ_z 水平和垂直扩散参数，m。

由上式分别令 $z=0$ 和 $y=0, z=0$ 可得高架源近地面和烟羽轴线近地面污染物浓度公式。还可以导出 y 轴、 z 轴的浓度正态分布公式、浓度最大值及浓度最大值距离 $x_{\max}$ 等有意义的结果。

2.2.2 大气稳定性和扩散参数

大气稳定度分类方法和扩散参数分别采用帕斯奎尔和布里吉斯方法确定和估算^[3]。

2.2.3 主要项目的测试和分析方法

- (1) 推进剂燃气中 Al₂O₃、HCl 和 CO、CO₂、O₂ 分别采用 E. D. T. A 二钠络合滴定法、酸碱滴定法和溶液吸收法^[4]。
- (2) 空气中 Al₂O₃ 采用滤膜采样称重，然后分别采用显微镜涂片法测定粒度，原子吸收分光光度法测定 Al₂O₃ 的含量。
- (3) 空气中 HCl，用 NaOH 溶液吸收采样，硫氰酸汞比色法测定 HCl 的含量。
- (4) 烟团抬升高度，用角度测量仪测定。

3 实验研究结果和讨论

3.1 推进剂燃气中主要组份的分析结果及其与计算比较

由表 1 可见，在各种情况下，Al₂O₃ 和 HCl 的实测值与计算值均基本一致；CO、CO₂ 在 N₂ 中燃烧试样的分析与发动机出口平流计算值接近，即 CO 远远高于 CO₂ 的含量；而在空气中燃烧试样，CO 远远低于 CO₂，CO 和 CO₂ 总量则相等。这表明空气中的 O₂ 参加了燃烧，从而证明燃气从发动机喷出后存在后燃烧过程，这与文献 [5] 报道后燃烧计算结果相一致。

表 1 燃气中主要组份分析结果及其与计算值比较

No.	主要原材料 (%)			数据 来源	主要组份 (mol/kg)					说 明
	AP	Al	HTPB		Al ₂ O ₃	HCl	CO	CO ₂	H ₂ +N ₂	
1	69.0	19.0	8.4	实测	3.44	5.41	4.30	7.00	16.4	常压空气中燃烧
				计算	3.51	5.37	9.39	0.51	14.18	发动机出口平流
2	39.1	5.0	8.2	实测	0.911	3.43	11.62	4.65	18	常压 N ₂ (含 O ₂ 0.02%) 中燃烧
				实测	0.911	3.43	3.48	9.17	21	常压下空气中燃烧
				计算	0.917	3.33	12.56	2.50	20.94	发动机出口平流

3.5 HCl 和 Al_2O_3 扩散预测

根据表 2 中风速、大气稳定度、实测抬升高度等有关参数, 预测各次试车时 HCl 和 Al_2O_3 最大落地浓度及其出现距离和分布规律, 结果见表 3。

表 3 HCl 和 Al_2O_3 最大落地浓度及其出现距离

No.		1	2	3	4	5
HCl	$\theta \times 10^6$ (mg/s)	2.85	2.84	6.73	2.50	7.50
	$C_{\max}$ (mg/m ³)	19.62	2.28	5.89	10.46	40.60
	$x_{\max}$ (m)	500	6000	3500	900	500
Al ₂ O ₃	$\theta \times 10^6$ (mg/s)	4.10	4.80	11.0	4.50	13.0
	$C_{\max}$ (mg/m ³)	26.03	3.87	9.81	19.38	70.08
	$x_{\max}$ (m)	500	6000	3500	900	500

3.6 扩散后空气中 HCl 和 Al_2O_3 实测值及其与预测值比较

HCl 和 Al_2O_3 实测值及其与预测值比较结果见表 4、5。由表中可见两者规律性一致, 具有显著的相关性。

表 4 空气中 HCl 实测值与预测值比较

NO.	数据来源	采 样 点 位 置 (m)							相关系数	
		1000	1500	2000	3000	5000	7000	10000	γ	$\gamma_{0.05}$
1	实测	14.56	6.79						1.000	0.997
	计算	12.50	7.32	4.79	2.53	1.10	0.62	0.34		
3*	实测	<0.01	2.10	2.54	4.37				0.977	0.878
	计算	0.39	2.17	3.88	5.75	5.41	4.29	3.03		
4	实测	4.58	4.30	3.78	1.72				0.886	0.878
	计算	10.08	7.18	5.10	2.87	1.30	0.75	0.42		
5	实测			4.47		1.35	0.32	<0.01	0.990	0.878
	计算	25.90	15.17	9.92	5.23	2.27	1.29	0.71		
备 注		* NO. 2 试车因下雨未能采样。								

表 5 空气 Al_2O_3 实测值与预测值比较

NO.	数据来源	采 样 点 位 置 (m)							相关系数	
		1000	1500	2000	3000	5000	7000	10000	γ	$\gamma_{0.05}$
1	实测	20.80	9.70						1.000	0.997
	计算	17.86	10.46	6.84	3.16	1.57	0.89	0.49		
3*	实测	<0.01	3.50	4.24	7.28				0.977	0.878
	计算	0.65	3.61	4.46	9.58	9.01	7.15	5.05		
4	实测	8.48	7.96	7.00	3.18				0.886	0.878
	计算	18.67	13.3	9.44	5.32	2.40	1.38	0.77		
5	实测			8.27		2.49	0.59	<0.01	0.990	0.878
	计算	44.65	26.15	17.10	9.02	3.92	2.23	1.22		
备 注		* NO. 2 试车因下雨未能采样。								

3.7 废气中 HCl 和 Al_2O_3 的比例系数

由对燃气成份的分析的计算表明, 燃气中 HCl 和 Al_2O_3 的含量之比值与实测空气中 HCl 和 Al_2O_3 的含量之比值相等, 见表 6。由此可见, 在一定距离内试车废气中 Al_2O_3 粒子具有和 HCl 气体相同的运动行为。同时可以推论, 进行试车废气对大气污染监测时, 可以只测定 HCl 的含量, 由这一系数推算同一点 Al_2O_3 的含量, 从而可以节省监测的人力和物力。

表 6 不同配方推进剂产生 HCl 和 Al_2O_3 的比值

配 方 代 号	1		2			3		
AP 加入量 (%)	70		68			69		
Al 加入量 (%)	15		17			19		
装药量 (kg)	4000		9980			3700		
HCl 产生量 (kg)	789		1912			719		
Al_2O_3 产生量 (kg)	1127		3188			1321		
HCl/ Al_2O_3	0.70		0.60			0.54		
采样点位置 (m)	1000	1500	1500	2000	3000	1000	2000	3000
实测 HCl 浓度 (mg/m^3)	14.56	6.99	2.10	2.54	4.37	4.58	3.78	1.72
实测 Al_2O_3 浓度 (mg/m^3)	20.80	9.70	3.50	4.24	7.28	8.48	7.00	3.18
HCl/ Al_2O_3	0.70	0.72	0.60	0.60	0.60	0.54	0.54	0.54
平均值 (HCl/ Al_2O_3)	0.71		0.60			0.54		

4 固体发动机试车废气对环境影响评价

试车废气中主要污染物的评价标准: HCl 采用居住区大气中有害物质的最高容许浓度 (TJ36-79 工业企业设计卫生标准), 一次不超过 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$; Al_2O_3 归入一般性飘尘, 采用大气环境质量标准 (GB3095-82), 一次不超过 $0.70\text{mg}/\text{m}^3$ 。

本文研究结果表明, 在一定的气象条件下, 无论是 10t 推进剂, 还是 4t 推进剂发动机排放的废气, 在 7000m 的范围内主导下风向轴线 HCl 和 Al_2O_3 落地浓度都超过标准值。

通过多年对地区居民和动植物的生长状况观察, 未发生明显的不良反映。这不仅因为地势开阔干燥多风, 有利于废气的扩散, 还因为 HCl 虽然具有一定的刺激性, 但它是人体必需的物质; Al_2O_3 与当地高原多风天气引起的风沙及大气飘尘浓度相比是微不足道的。美国科学家对航天飞机排放废气对环境的影响的研究结果也证明, HCl 和 Al_2O_3 对环境不会造成明显的影响。当然, 如果试车台在山窝里, 试验时又逢雨天, HCl 有可能造成酸雨而对该地区植物、金属器件有刺激和腐蚀作用。

为了尽量减少试车废气对居住区环境的影响, 建议选择不稳定气象条件且晴天风速较大的西北风天气试车; 在新建试车台和发射场时, 也应考虑主导风向的作用。

5 几点结论

(1) 推进剂燃气分析结果表明, 燃气从发动机排出后存在后燃烧过程; HCl 和 Al_2O_3 含量理论计算值与实测值接近; 推进剂中的铝粉在燃烧过程中绝大部分生成 Al_2O_3 。

(2) 燃气中 Al_2O_3 粒径几乎全部小于 $20\mu\text{m}$, 因此, Al_2O_3 粒子具有和 HCl 气体相同的运动行为。

(3) 烟气团的抬升和扩散依据不同的气象特征和地理条件而不同; 在发动机型号确定的情况下, 风速及大气稳定度对烟团的抬升和扩散起主导作用; 文献 [1, 2] 推荐的烟气团抬升高度计算公式和参数具有一定的局限性, 各地对初始稳定烟团高度的确定以实测为宜, 或对公式作适当修正。

(4) 运用高斯模式计算 HCl 和 Al_2O_3 的扩散、分布, 结果与实测值接近, 规律性一致, 具有显著的相关性。说明高斯模式的运用是成功的, 为今后试车废气对环境污染状况的预测、监测和评价奠定了基础。

(5) 对试车废气的监测, 可以 HCl 为主, 当需 Al_2O_3 的数据时, 可由 HCl/ Al_2O_3 的比例系数推算, 这样可大大减少用于监测的人力、物力和工作量。

(6) 通过选择有利于试车废气扩散的气象条件进行试验, 可以减少对居住区大气的污染。

参 考 文 献

- [1] 齐健等. 固体火箭发动机试车环境影响初步探. 航天工业部污染防治技术资料汇编, 第一册
- [2] 赵克熙等. 固体发动机试车燃气的扩散及对环境的影响. 推进技术, 1991 (4)
- [3] 吴鹏鸣等. 环境空气监测质量保证手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1980
- [4] 国家环保局《空气和废气监测分析方法》编写组. 空气和废气监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1980
- [5] 赵克熙. 固体火箭发动机试车后燃烧产物. 推进技术, 1991 (5)