

制发烟机是可行的。

2 WQJ-01型发动机的改进方案

在不改变 WQJ-01型发动机基本结构的情况下，进行了系统配置和部件改动^[3]，其中包括：重新设计排气系统，根据计算结果，设计不同喷口直径的喷管，改变排气温度和速度，以满足发烟要求；增加滑油与燃油系统；增配起动控制系统；为了研究和计算，增加了简单的测试系统。

发动机改进后进行了热力计算。WQJ-01型发动机最大工作转速为31000r/min~33000r/min，临界转速约为26000r/min，连续工作时间不大于80s。为使空气流量，排气温度等参数符合发烟要求，又使发动机的连续工作状态远离临界转速，确保发动机安全可靠运行，把发动机的连续工作转速下调10%，约为28500r/min。转速调低后，基本不影响发动机正常工作，连续工作时间也延长了，满足发烟实验和测试的要求。

当发动机连续工作转速下调后，发动机的共同工作点随之改变，在非设计点工作时，各截面参数也发生了变化。为使计算和实验有较可靠的数据，在假定压气机效率和涡轮效率基本不变的情况下，计算出降转后，压气机增压比和空气流量的近似值， $\pi_c \approx 2.6$ ； $W_a = 1.4\text{kg/s}$ 。其它参数是已知的。在计算时，采用选取 T_{t4} 的方法，初值838.15K，步长60K，终值为设计点温度1123.15K，计算出涡轮降压比 π_T 、喷管总压 p_{t9} 、排气速度 C_9 、燃气流量 W_g 、喷口直径 D_9 ，计算程序及计算公式（略），结果如表1所示。

Table 1 Exhaust parameter of small engine

T_{t4}/K	p_{t9}/MPa	$C_9/(\text{m/s})$	$W_g/(\text{kg/s})$	π_T	D_9/mm
823.15	0.102680	74.25	1.40343	2.32501	220.33
883.15	0.109411	181.85	1.40396	2.18177	145.52
943.15	0.115562	245.75	1.40450	2.06564	129.14
1003.15	0.121190	295.86	1.40505	1.96972	121.21
1063.15	0.126353	338.41	1.40560	1.88923	116.53
1123.15	0.131103	376.02	1.40616	1.82076	113.50

3 实验及数据处理

参照上述计算结果，设计了4个引射段相同的收敛喷管，收敛角度为15°，喷口直径分别为224，140，130，110mm，按照喷口直径的大小依次安装4个喷管，分别测量排气总温、总压，每个喷管测量5~7次。雾油发烟系统由引射段、收敛段、喷嘴及供油系统组成。设计了射流喷嘴和离心喷嘴，在场做了雾油发烟实验，在安装不同喷嘴的发烟系统中，测量雾油发烟量、烟雾温度、发动机排气总温、总压和雾油重量浓度。实验采用46#机械油。

计算总压时，取北京地区的大气压近似等于标准大气压。对上述数据的处理，采用算术平均法求均值。每一次测量都是在相同的条件下重复测量，结果具有相同的精度和可信度，是等精度测量。用最小二乘法的原理可以证明：在一组等精度测量中，算术平均值是最佳值或最可信赖值^[4]。最后

整理出发动机喷口直径与总温、总压及压差的关系曲线。对于测得的温度值，采用相似准则换算成标准状态下温度，画出转速-温度曲线。

对于有冷端补偿的测温仪表数值，要换算成标准状态下的温度，再对标准状态下的 T ， p 取算术平均值。

例如，转速28800r/min， $\phi=140\text{mm}$ 时，测得数据如表2。

Table 2 Experimental results

Ambient temperature $T_h/^{\circ}\text{C}$	25	25	25	25	25
Measured temperature $T_c/^{\circ}\text{C}$	550	565	560	535	545
Measured total pressure p/kPa	10.32	10.06	10.06	10.60	10.79

把测得的温度转换成标准状态下温度，再取算术平均值得 $\bar{T}=796.51\text{K}$ ，总压差取算术平均值 $\bar{p}=10.348\text{kPa}$

4 实验结果与结论

(1) 发动机结构不变，只降低转速的实验结果见表3：

Table 3 Engine rotational speed-exhaust temperature

$n/(\text{r}/\text{min})$	32000	31500	29500	29000	28800	28600	28500	28000
$\bar{T}/\text{K}$	659.29	718.21	720.16	731.97	735.46	739.68	739.96	742.39

由表3可以看出：发动机在几何结构不变情况下，转速下降，排气温度上升。而排气温度升高正好符合发烟的要求，在等流量的条件能蒸发更多的雾油。

(2) 在标准状态下，转速28500r/min，变化喷口直径的实验结果如图1、2所示。由图1可知：喷口直径减小，发动机排气温度上升。这是因为喷口面积减小，涡轮后压力 p_{t5} 上升，涡轮降压比下降，在转速不变，即涡轮功不变的情况下，涡轮前温度 T_{t4} 上升，排气温度就要上升。在已知发烟的最佳温度时，由曲线上可以确定发动机的喷口直径。

由图2可知：喷口直径减小，排气压力上升。由燃气流量公式可知，在燃气流量不变的情况下，喷口面积与排气压力成反比，直径减小压力上升。在尾喷管内增加流阻，如取消尾锥，相当于减小喷口面积，为了保证有效流通面积，就要增大喷口尺寸。增加流阻的目的是增大燃气的湍流强度和动能损失，以增强燃气的掺混能力和能量交换能力，来提高发烟效果。

(3) 安装射流式喷嘴，在不同压力下测得雾油发烟实验结果数据见表4。安装离心喷嘴后的测试结果列于表5中。

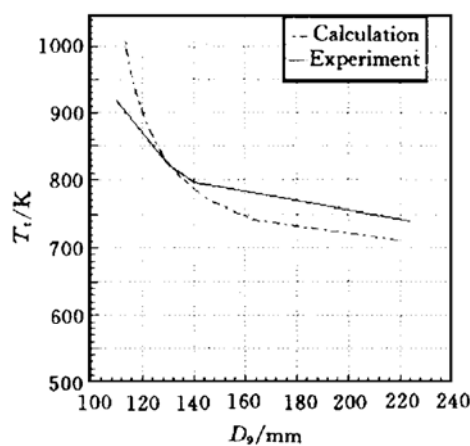


Fig. 1 Curve of diameter-exhaust temperature

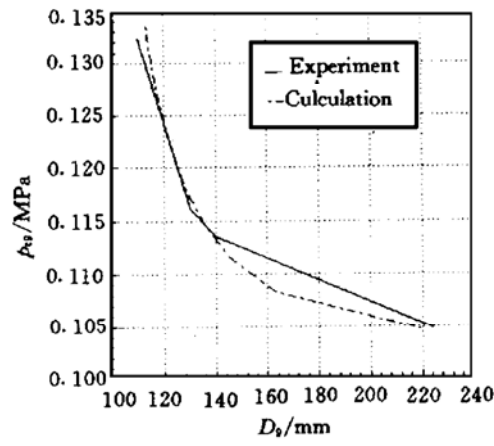


Fig. 2 Curve of diameter-exhaust pressure

Table 4 Experimental results of jet nozzle

Smoke oil pressure difference $\Delta p/\text{MPa}$	0.588	0.784	0.980	1.176	1.372
Smoke amount (kg/h)	222	420	510	570	582
Smoke temperature (K)	653	625	598	575	553
Smoke density (mg/l)	0.49	0.57	0.90	1.03	1.09
Total pressure difference (kPa)	10.878	10.976	10.976	11.025	10.976
Exhaust total temperature (K)	804	803	803	803	803

Table 5 Experimental results of centrifugal nozzle

Smoke oil pressure difference $\Delta p/\text{MPa}$	1.372	1.960	2.450	2.940
Smoke amount (kg/h)	288	340	390	420
Smoke temperature ($^{\circ}\text{C}$)	450	430	395	370
Smoke density (mg/l)	0.51	0.53	0.57	0.58
Total pressure difference $\Delta p/\text{kPa}$	10.878	10.927	10.976	10.972
Exhaust total temperature (K)	804	804	803	803

从表4、5的实验数据看，在相同压力情况下，射流喷嘴的发烟量约是离心喷嘴的两倍，这是因为46# 机油粘度大，射流喷嘴的流动阻力小于离心喷嘴造成的。在相等发烟量的情况下，所形成的烟雾浓度是相近的，即遮蔽能力是相当的，因为影响烟雾浓度的主要因素是雾油耗量。根据实验数据和军方需要：车载发烟机雾油发烟系统应选用射流喷嘴。

在发烟实验中发现，烟雾温度在575K，发烟量在570kg/h 时，烟雾效果最好。地面无残油，烟雾浓度、遮蔽效果均很好。烟雾温度在553K；发烟量在582kg/h 时，烟雾较“沉”，地面上略有残油，烟雾浓度变化不大。实验表明：雾油发烟量在570kg/h 时，是以 WQJ-1型发动机制作发烟机的最大发烟量。即最佳发烟量。此时，发烟量与燃气量之比，称为最佳混合比。在气流条件相同的情况下，最佳混合比是不变的。它对类似结构的发烟机的发烟系统设计具有指导作用。

在发烟实验中，发烟前后的发动机排气总温、总压基本不变。总温约为803K，总压差约为10.976kPa。因为发烟后燃气因放热而温度降低，燃气密度增大，相当于喷口面积增大；同时，喷

入雾油,造成排气堵塞,相当喷口减小。但排气温度下降和喷油堵塞的影响程度相当。

(4)通过对发动机排气系统的设计,能够改变燃气的温度和速度,以满足发烟的要求。把 WQJ-1 型涡轴起动机改为满足发烟要求的动力是可行的。并确定了作为发烟机用的燃气发生器主要参数(在标准状态下):增压比 $\pi_c=2.60$, 空气流量 $W_a=1.4\text{kg/s}$, 转速 $n=28500\text{r/min}$, 涡轮前温度 $T_{t4}=930\text{K}$, 喷管入口温度 $T_{t7}=803\text{K}$ 。

参 考 文 献

- 1 蒋士练. 对发烟装备发展的建议. 见: 烟火武器装备发展与使用论文集. 北京: 总参防化部, 1991.
- 2 姚煜良. 烟幕在光电对抗中的应用. 北京: 解放军出版社, 1989.
- 3 张 良. 车载发烟机发烟系统原理性设计. 见: 中国化学会第三届防化学术会议论文集. 北京: 总参防化部, 1995.
- 4 周作元, 李荣光. 温度与流体参数测量. 北京: 清华大学出版社, 1982.

简 讯

TRW 公司成功地试验了民兵 III 发动机

1997年11月21日, TRW 成功地试验了一台民兵 III 号第二级发动机, 这是 TRW 投标美国空军洲际弹道导弹 (ICBM) 主要综合合同的重要里程碑。

该公司称, 由 TRW 联合推进合作伙伴锡奥科尔公司和联合技术公司的化学系统分部 (CSD) 合作重新制造的民兵 III 号发动机的点火试验, 比原计划提前了两个月。

这次点火试验, 在靠近圣何塞的化学系统分部 (CSD) 的工厂进行, 达到了所要求的试验目的。这次试验, 也是在空军的民兵 III 推进替代计划支持下, 评估联合投资重新制造二级火箭发动机一系列试验中的第一次。

以 TRW 为首的工作团队, 包括锡奥称尔/CSD 合资企业、波音公司、洛克希德·马丁公司、BDM 和 MRJ 技术联合体, 正竞争 ICBM 主要综合合同, 该合同预计于1997年中旬由空军裁决。

(刘萝威 供稿)

液体推进剂一甲肼与水二元物系 汽液相平衡的研究^{*}

米镇涛 李德庆 邱立勤 周 集 义

(天津大学化学工程系, 天津, 300072) (黎明化工研究院, 洛阳, 471001)

摘 要: 一甲肼是一种重要的液体推进剂, 分离反应过程所生成的水是确保一甲肼质量的关键。测定了甲基肼-水 (MMH-H₂O) 物系在101.33kPa 下的汽液平衡, 以及电解质对其汽液平衡的影响。采用盐效应和溶剂化的方法, 研究了不同电解质对 MMH-H₂O 汽液平衡的盐效应。

主题词: 甲基肼, 汽液平衡⁺, 盐效应⁺

分类号: V511

STUDIES ON VAPOR-LIQUID-EQUILIBRIUM OF MONOMETHYLHYDRAZINE-WATER BINARY SYSTEM

Mi Zhengtao Li Deqing Qiu Liqin

(Dept. of Chemical Engineering, Tianjin Univ., Tianjin, 300072)

Zhou Jiyi

(Liming Chemical Research Inst., Luoyang, 471001)

Abstract: Monomethylhydrazine (MMH) is an important liquid propellant. The water produced in the process of separation and reaction is critical for the quality of MMH. The vapor-liquid-equilibrium (VLE) of MMH-H₂O binary system was measured under 101.3kPa and the influence of the MMH-H₂O-electrolyte ternary systems was considered. Electrolyte remarkably raised the volatility of MMH and changed the VLE of MMH-H₂O binary system. The VLE of MMH-H₂O-NaCl and MMH-H₂O-NaOH ternary systems were studied by experiments. Salt effects of electrolytes were correlated with salt-effect-coefficient method and solvation method. NaOH had greater effect on MMH-H₂O binary system than NaCl. Salt effects of these two electrolytes were compared.

Subject terms: Monomethylhydrazine, Vapor-liquid equilibrium⁺, Salt effect⁺

1 引 言

一甲肼 (MMH) 是空间技术领域中成功应用的液体化学推进剂, 但国外有关一甲肼化学品的报道甚少。在一甲肼的生产中 MMH-H₂O 二元共沸物系的加碱精制是关键工序^[1,2]。因此, 本文测定了该物系在101.33kPa 下的汽液平衡数据, 并且利用盐效应的有关理论, 研究了全浓度范围内 NaCl 与 NaOH 在此二元物系汽液平衡中的盐效应, 得到了 MMH-H₂O 系统含电解质时汽液平衡

^{*} 收稿日期: 1997-06-24, 修回日期: 1997-08-15, 本课题为国家化学工程联合实验室开放基金资助项目