

高空滑行期间氧化剂泵壳体冷却方案研究

张忠利

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 详细分析了高空多次启动泵压式液体火箭发动机氧化剂泵壳体在滑行期间的热环境, 应用数值分析方法对氧化剂泵壳体与涡轮壳体温度进行耦合计算, 提出了采用吹气冷却和排放冷却的氧化剂泵冷却方案。经过地面模拟试验及分析后认为, 采用排放冷却可满足发动机二次启动可靠工作且在结构上较易实现。

关键词: 液体火箭发动机; 涡轮泵; 仿真计算; 模拟试验

中图分类号: V434.21

文献标识码: A

文章编号: (2005)01-0024-05

Investigation on cooling of oxidizer pump case during coast period

Zhang Zhongli

(Shaanxi Power Machine Design & Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Thermal environment of the oxidizer pump case of a high attitude restartable pump fed liquid rocket engine during coast period is studied in detail. Numerical analysis is used for temperature coupling calculation of turbine case. Blow and dump cooling of the oxidizer pump are proposed in this paper. Simulation tests and analysis indicate that dump cooling can meet restart working condition of the engine and easily realized in structure.

Key words: liquid rocket engine; turbopump; simulation calculation; simulation test

1 引言

高空多次启动泵压式液体火箭发动机对部件的研制提出了苛刻的要求, 特别是氧化剂泵, 其温度在多次启动时必须限制在一定的工作范围内。在常规 N_2O_4 /UDMH 多次启动发动机研制过程中, 遇到了氧化剂泵在滑行期间受到来自涡轮壳体及喷管的能量转移, 致使其温度增高很多, 甚至超过了氧化剂工作时的沸点和临界点, 这么高的温度使第二次启动时氧化剂气化, 从而引发相关故障。

2 故障描述与分析

在发动机试车过程中, 一次启动工作正常,

收稿日期: 2004-02-19; 修回日期: 2004-04-19。

作者简介: 张忠利 (1970—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机传热分析。Email: zpywxl@sohu.com

按预定程序工作后正常关机, 经过滑行一段时间后第二次启动。二次启动后涡轮转速出现超过额定转速值的现象, 0.5 秒前氧化剂无流量, 0.8 秒前氧化剂泵后未建压, 上述现象说明二次启动前氧化剂泵腔的 N_2O_4 已部分气化, 因而在启动之初出现了泵建压缓慢的现象, 从而造成启动程序混乱引起试车失败。

仿真计算后认为, 在二次启动时氧化剂泵入口处 N_2O_4 将出现部分沸腾, 可能引起泵入口压力及流量产生脉动, 甚至产生泵建压缓慢现象, 从而引起二次启动失败。

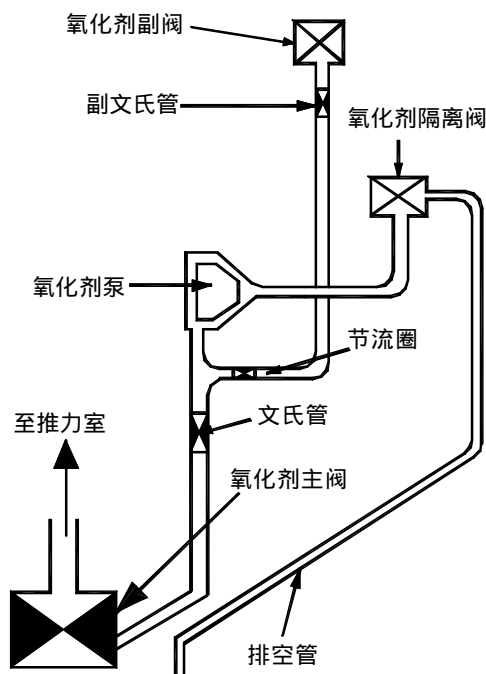


图 1 氧化剂泵排放冷却系统原理简图

Fig.1 Schematic of oxidizer pump dump cooling system

美国阿金纳发动机为保证再启动可靠工作, 对涡轮泵进行了大量的再启动模拟试验, 提供了涡轮泵壁温的工作范围, 充分保证了涡轮泵的再启动能力。

从本文所研究发动机历次试车时与氧化剂泵壳体有关的试车测量数据可以看出, 当泵进口壁温大于相应沸点时试车失败, 当泵进口壁温小于相应沸点时试车成功。对此现象的分析是: 先进入的 N_2O_4 得到较多的热量而引起部分 N_2O_4 气化,

气化后的 N_2O_4 体积将比液体 N_2O_4 大很多, 这样引起氧化剂腔道的堵塞, 部分气态 N_2O_4 可能上升到贮箱或在管路中液化, 部分气体仍停留在腔道中, 同时气态 N_2O_4 还在不断形成, 这样在二次启动前氧化剂泵腔中气体超过一定比例时, 将会引起二次启动失败, 而当泵进口管壁温小于相应沸点时, N_2O_4 不气化, 试车成功。

要保证二次启动安全可靠, 必须将氧化剂泵壳体在飞行条件下冷却到当地压力的沸点以下。最有效的方法是通过冷却涡轮壳体来冷却氧化剂泵壳体, 如果结构上难以实现也可以采用对氧化剂泵腔吹气 (N_2 、He) 或排液气化的方式进行冷却。

基于以上原因, 提出了采取排放氧化剂的方法解决此问题, 其原理如图 1 所示。经过地面模拟试验验证了此方法是可行的。

3 仿真计算

在该发动机的研制过程中, 为了确定氧化剂泵壳体在滑行期间的温度变化, 首先应用数值计算的方法对氧化剂泵壳体进行仿真计算。

在计算的过程中应用能量法对喷管、涡轮壳体、氧化剂泵壳体进行耦合仿真, 仿真计算结果如图 2 所示。图 3、4 为试车测量值与仿真计算值对比变化曲线。

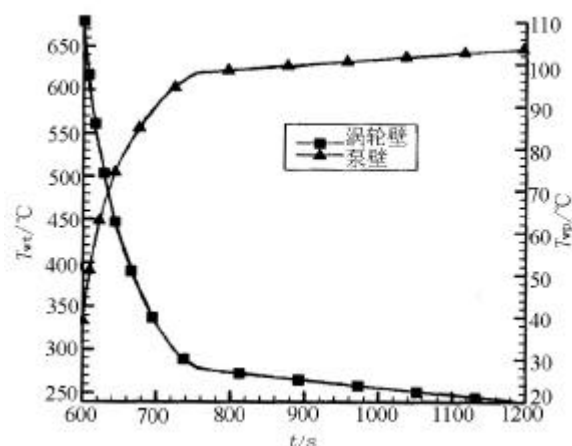


图 2 滑行期间涡轮与氧化剂泵壳体温度仿真计算结果

Fig.2 Predicted temperature of turbine and oxidizer pump case during coasting

从图 3 及图 4 可以看出, 仿真计算结果与试车测量结果比较接近, 应用数值计算的方法, 可以作为制定氧化剂泵壳体冷却方案的依据。在仿真计算时氧化剂泵壳体和涡轮壳体的初温为地面试车时发动机第一次关机时的温度。

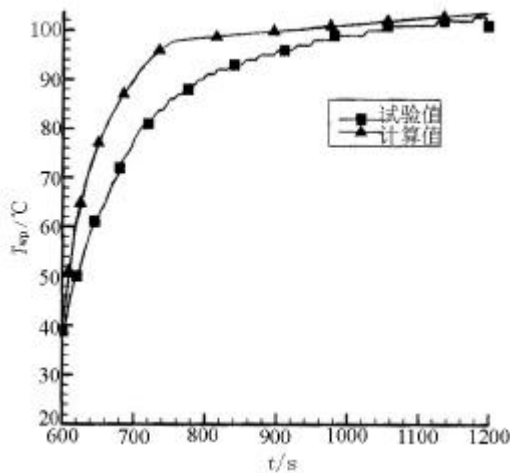


图 3 滑行期间氧化剂泵壳体温度比较

Fig.3 Temperature comparison of oxidizer pump case during coasting

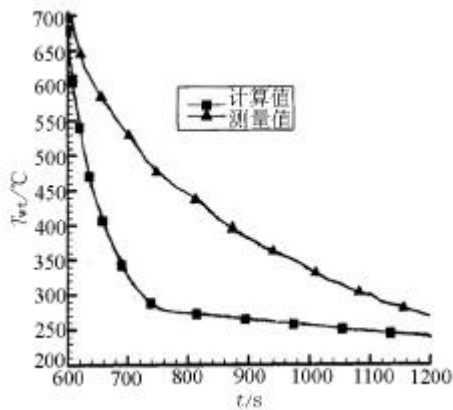


图 4 滑行期间涡轮壳体温度比较

Fig.4 Temperature comparison of turbine case during coasting

从图 2、3 可以看出, 氧化剂泵壳体在滑行结束后其温度为 101°C, 大大超过 N_2O_4 在其使用压力下的沸点, 二次启动时氧化剂泵腔内 N_2O_4 将会气化, 当气体的比例超过一定值后将发生气蚀。

为了解决泵壳体温度过高的问题, 对其进行了吹气冷却和排放冷却的计算分析。

3.1 吹气冷却计算分析

氧化剂泵壳体的能量分析原理图见图 5。

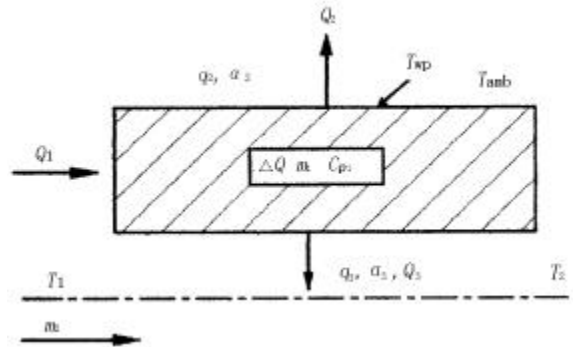


图 5 氧化剂泵的能量分析图

Fig.5 Energy analysis of oxidizer pump

能量平衡方程为

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + \Delta Q \quad (1)$$

$$\Delta Q = m_1 c_{p1} \Delta T_1 \quad (2)$$

$$Q_2 = q_2 A \quad (3)$$

$$Q_3 = q_3 A \quad (4)$$

$$q_2 = a_2 (T_{wp} - T_{amb}) \quad (5)$$

$$q_3 = a_3 (T_{wp} - T_{gc}) \quad (6)$$

式中, c_{p1} 为泵壳体材料的比热容, J/(kg K); A 为泵壳体的表面积, m^2 ; m_1 为泵壳体质量, kg; Q_1 为涡轮导入氧化剂泵壳体热量, W; Q_2 为泵壳体向外界散热热量, W; Q_3 为泵壳体向管内传热量, W; ΔQ 为泵壳体热容增加量, W; q_2 为泵壳体与外界的对流换热热流密度, W/m^2 ; q_3 为泵壳体与冷却介质的对流换热热流密度, W/m^2 ; T_{wp} 为泵壳体壁温, °C; T_{amb} 为外界环境温度, °C; T_{gc} 为泵腔内冷却介质温度, °C; ΔT_1 为氧化剂泵壳体的温升率, °C/s, 该值为试验值; a_2 为泵壳体与外界

的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; a_3 为泵壳体与冷却介质的换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

计算后得到: $Q_2 \ll \Delta Q$, $Q_3 \ll \Delta Q$, 所以 Q_2 、 Q_3 也可以忽略。因此有

$$Q_1 = \Delta Q \quad (7)$$

由氧化剂泵壳体的温升率计算 ΔQ , 以此作为涡轮导入氧化剂泵壳体的热量。如果对氧化剂泵壳体进行吹气 (N_2 、He) 冷却, 只要保证气体带走的热量等于涡轮导入的热量即可, 那么氧化剂泵壳体的温度就不会升高。

依据传热理论推得 N_2 和 He 的流量与泵壳体温升之间的关系为:

对于 N_2

$$\Delta Q = 9.2902 \dot{m}_{N_2}^{0.8} \quad (8)$$

对于 He

$$\Delta Q = 36.367 \dot{m}_{He}^{0.8} \quad (9)$$

式中, \dot{m}_{N_2} 、 \dot{m}_{He} 为采用吹气冷却时 N_2 、He 的流量。吹气流量计算结果见表 1 所示。

表 1 吹气及排放冷却流量计算结果

Tab.1 Predicted flow rate for blow and dump cooling

$\Delta t / s$		120	60	100	30	20	40	100	90	40
$\Delta T_1 / (^{\circ}C/s)$		0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.05	0.033	0.025
$\Delta Q / W$		0	155.0	309.96	464.9	309.96	154.98	77.49	51.14	38.75
N_2	$\dot{m}_{N_2} / (g/s)$	0	33.71	80.186	133.1	80.186	33.71	14.175	8.43	5.96
	m_{Σ} / kg	0	2.023	8.0186	3.993	1.6037	1.3486	1.418	0.759	0.238
He	$\dot{m}_{He} / (g/s)$	0	6.12	14.56	24.17	14.56	6.12	2.57	1.531	1.066
	m_{Σ} / kg	0	0.367	1.456	0.725	0.291	0.245	0.257	0.138	0.043
N_2O_4	$\dot{m}_{N_2O_4} / (g/s)$	0	0.374	0.748	1.12	0.748	0.374	0.187	0.123	0.093
	m_{Σ} / g	0	22.0	74.8	34.0	15.0	15.0	18.7	11.0	3.7

注: Δt 为冷却时间

3.2 N_2O_4 排放冷却计算分析

N_2O_4 沸点低、容易气化, 因此氧化剂泵壳体壁温容易高于使用压力下 N_2O_4 的沸点而引起二次启动失败, 这是其缺点。由于 N_2O_4 容易气化, 它的气化潜热又大, 因此利用 N_2O_4 气化吸热来冷却氧化剂泵壳体, 这又是它的优点, 即可以将不利条件变为有利条件。

氧化剂泵壳体从涡轮盘带来的热量为

$$Q_1 = \Delta Q = m_1 c_{p1} \Delta T_1$$

N_2O_4 的气化潜热为 $r = 414.5 J/g$

N_2O_4 流量为 $\dot{m}_{N_2O_4} = Q_1 / r$

N_2O_4 的排放冷却流量见表 1。

3.3 冷却方案比较分析

从上述分析计算中得出吹气冷却时用气量太大, 如果壁温在实际情况下更高, 实际用气量比计算值还要大些, 同时由于不能变气量供气, 再加上气瓶部件结构重量, 将使重量增加很多。采用排放 N_2O_4 蒸发冷却是一个有效而简单的方法, 冷却效果较好, 而且高空比地面更容易蒸发, 地面试验数据

能够应用到高空。从第一次关机后开始排放蒸发冷却,每秒仅蒸发不超过 3 克 N_2O_4 即可达到冷却要求,而且所需的 N_2O_4 总量为 194.2g。从量上来看很小,不足 1kg,在结构上采用安装定压单向阀,使高空飞行时管路内保持一定压力,这样模拟了地面试验条件,同时又能调节排放流量。

4 地面模拟试验

4.1 吹气冷却试验

在吹气试验中采用汽油喷灯加热试验件的涡轮端,涡轮壳体和转子的热量逐渐向泵端传递,当进口管壁温超过 75°C 后,停止加热,打开电动气阀,开始吹气冷却。一定流量的气体经泵后测压嘴进入泵腔,与泵壳体进行对流换热后,经排空管排出。记录吹气时间及进口管温度变化。达到一定时间后,关闭电动气阀,停止吹气,观察并记录进口管壁温升高过程。对吹气冷却的要求是,使进口管内壁温降至 40°C 以下,停止吹气后 10 秒以内,进口管内壁不超过 45°C 。试验结果表明吹气冷却的耗气量很大。

4.2 排放冷却试验

在试验中采用气焊枪加热试验件涡轮端,涡轮壳体和转子的热量逐渐由涡轮端向泵端传递;当泵壳体温度达到 140°C 时停止加热;打开相关阀门, N_2O_4 在贮箱压力的挤压下进入试验件,充填泵腔、主导管和副导管,并与试验件结构进行热交换,冷却泵腔及主、副导管; N_2O_4 在试验件腔道内停留预定时间后,关闭隔离阀,打开排空阀, N_2O_4 经排空阀和排空单向阀排入收集箱; N_2O_4 在排放过程中,继续吸收试验件结构热,冷却泵腔

及主副导管。

试验时需要不断改变 N_2O_4 灌注时间、排放时间及灌注排放次数的组合顺序,进行多种灌注排放程序的试验。为了区别模拟地面试车状态与飞行状态的冷却效果,试验件入口压力取两种状态。试验结果表明,采用排放冷却可以明显地降低泵壳体温度。

5 结论

通过对某型泵压式液体火箭发动机的氧化剂泵壳体在滑行期间的冷却方式进行研究,得出以下结论:

(1) 氧化剂泵壳体在发动机第一次工作结束后由于没有采取冷却措施,在滑行期间温度有所升高,升高到足以使氧化剂气化的程度,所以必须在滑行期间对氧化剂泵壳体进行可靠冷却,以保证其可靠工作。

(2) 经过仿真计算和地面模拟试验后认为,通过采用排放氧化剂的措施,可使氧化剂泵壳体的温度降到其可靠工作的程度。

参考文献:

- [1] 汪天汉, 向华, 颂华 译. 液氢涡轮泵的热动力改进[J], 国外导弹技术, 1979, (5).
- [2] 陶文铨. 数值传热学[M], 西安: 西安交通大学出版社, 1997.

(编辑: 陈红霞)