

小发动机钨渗铜喉衬的烧蚀冲刷探讨

吕文树

摘 要

在长时间工作的小型发动机中,会发生钨渗铜喉衬的严重冲刷和烧蚀。本文针对此问题进行了分析和试验,提出了解决问题的技术途径。分析和试验表明:采用较大的进口角,适当小的曲率半径的喉部型面的喷管,具有抗冲刷、耐烧蚀和高效率的优良特性。

一、前 言

在研制长时间工作的小型固体火箭发动机的过程中,曾遇到一个主要的技术问题是:喷管的钨渗铜喉衬在长时间工作下,产生严重的冲刷和烧蚀,造成推力的不断下降。图1是试验后,钨渗铜喉衬受冲刷烧蚀情况的照片。解剖表明:1.喉径呈不规则的扩大,喉部不圆。2.喉部被冲成若干道沟槽,表面有很多鱼鳞坑。

这种情况表明:造成喉部严重冲刷、扩大的根本原因不是热化学烧蚀,而是高温高速的气——粒两相流对喉衬的机械冲刷的结果(热化学烧蚀所造成的喉径扩大应是均匀的)。

图2是发动机在不同的 l/d_t (l 为喷管圆柱段长度, d_t 为喉径)条件下试验后的 $p_c \sim t$ 曲线。

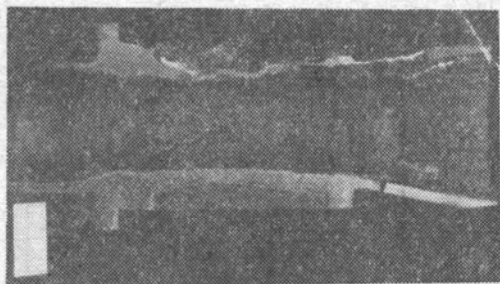


图1 喉衬照片

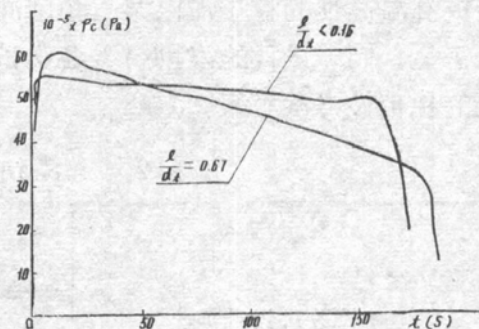


图2 不同 l/d_t 下的 $p_c \sim t$ 曲线图

可以看出:在发动机工作的初期,由于 Al_2O_3 在钨渗铜喉衬上的沉积,造成燃烧室压力 p_c 的骤升,之后由于沉积层的消融和脱落,以及喉衬的被冲刷扩大,而导致燃烧室压力的不断下降。

下面就如何改善喉衬的 Al_2O_3 沉积和冲刷作一些讨论,并找出解决问题的技术途径。

二、沉积对喉衬冲刷的影响

在发动机工作的初期,由于喷管表面温度低,液态的 Al_2O_3 微粒被迅速冷却,凝固而沉积在喷管的表面上。当喷管表面温度低于氧化层熔点时(2310K),沉积层有一个液态——固

态界面^[1]，液态氧化层在气动力的作用下，沿喷管壁面向下流流动，使沉积层不断地向喷管下流发展，沉积层不断地增厚。当沉积层的温度达到其熔点，或沉积层所承受的气动力大于沉积层的强度时，沉积层开始消融或脱落而被吹除。

厚的 Al_2O_3 沉积层可造成不好的后果：

1. Al_2O_3 粒子有动能和化学能，会给喷管造成机械损伤、热冲击和化学腐蚀。
2. 当沉积层开始消融时，不是均匀地被吹除，而是产生局部的脱落或熔潭。从而破坏了喷管的有利型面和流动的对称性。坑凹的部位产生强的涡流，造成气流偏移，很快地就把喉衬冲刷成沟槽。产生这种局面时，沉积层越厚，气流受扰动越大，破坏性也越大。因此，沉积越厚造成喉衬的冲刷也越严重。

表 1 是喉径扩大 ΔR_t 的试验结果与沉积层厚度 δ 的关系。由表中还可以看出，厚的沉积层，造成高的压力峰，导致喉衬更严重的破坏。

表 1 喉衬扩大与沉积层厚度的关系

参 数	单 位	1	2	3	4	5
P_c/P_{c0}		1.22	1.36	1.78	1.79	1.78
σ	mm	0.8	1.3	2.8	2.8	2.8
ΔR_t	mm	2.55~3.75	3.25	2.5~3.5	3.25~4.25	4.35~4.75

注： σ 是估算值。

3. 由于沉积，喉部面积减小，燃烧室压力上升，从而导致喉衬的更严重的烧蚀。
4. 偏斜的来流可把沉积层的一边先冲掉，使其形成凹坑，更加剧了流动的不对称性，造成高温高速的粒子流以某一角度冲刷喉衬的局面。
5. 同一设计的发动机，各次试车沉积情况差别较大，重现性很差。因而影响发动机性能的稳定性（参看表 2）。

表 2 钨渗铜喉衬的沉积情况（试验结果统计）

	轻 微 沉 积	中 等 沉 积	严 重 沉 积
喷管改进设计前	占40%	占10%	占50%
喷管改进设计后	占70%	占20%	占10%

钨渗铜喉衬由于具有良好的导热性能，强度高、耐烧蚀、与 Al_2O_3 结合力大，所以沉积速率大、沉积层厚。因此必须采取与非金属喉衬不同的型面设计，才有可能改善钨渗铜喉衬的 Al_2O_3 沉积。可从以下几个方面着手，实践证明是行之有效的。

1. 改进喷管的型面设计，以改变喷管内的两相流的流动特性；
2. 尽量减小喉衬的热容量，以缩短 Al_2O_3 的沉积过程，减小沉积层的厚度。在满足抗热震性能的前提下，应尽量减小钨渗铜喉衬的重量，以减小其热容量；
3. 减小 Al_2O_3 粒子流与喉衬之间的传热。如在推进剂中加少量硅油，可有效地减少 Al_2O_3 的沉积和改善喉衬的烧蚀^[2]。

三、改进喷管型面设计

1. 增大收敛角 β

增加 β 角的目的是要加速 Al_2O_3 微粒与气流之间的分离,利用微粒质量大,惯性大的特点,使其向喷管轴线压缩,产生所谓“集束效应”,降低靠近喉衬壁面燃气中 Al_2O_3 的浓度,从而减少 Al_2O_3 沉积速率,改善喉衬的工作条件。当然 β 角增加时,两相流损失及微粒撞击损失都增加,对喷管效率有一定影响,但不明显。因此可取大些,可在 $30^\circ\sim 60^\circ$ 范围内选取。

2. 采用小的喉部型面曲率半径

采用小曲率半径的钨渗铜喉衬设计是根据该材料具有高的抗热震性能提出的。这样不致于在高温下,导致喉衬的结构破坏,小的 R_c 可使气流更快地加速和转弯。由于 Al_2O_3 微粒惯性大,来不及与气流一起急转弯和加速,所以小的 R_c 加速了气流与微粒之间的分离,扩大了喉衬邻近的“无粒区”,减小近壁层气流中 Al_2O_3 的含量,从而把 Al_2O_3 沉积减小到最低强度。此外,由于气流急速转弯和加速,压力梯度大, Al_2O_3 所承受的气动力也大。这样 Al_2O_3 不但不容易沉积在喉衬上,即使沉积了,也容易被吹除,不致形成厚的 Al_2O_3 沉积层。所以,小的 R_c 设计可以改善沉积和冲刷。根据国外研究结果,非金属材料喉衬 R_c 可取等于 $(0.6\sim 1.0)d_t$,对于钨渗铜喉衬

$$R_c/d_t = 0.5\sim 0.65$$

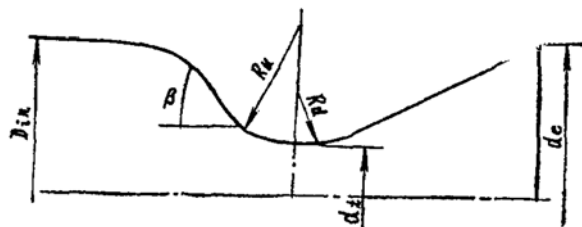


图3 喷管型面示意图

对于大推力的发动机来说,为了减小喷管重量、尺寸与提高喷管效率,可以把喉部上游的曲率半径 R_c 取大些,以减小两相流损失;下游的曲率半径 R_c 取小些。(如图3)

3. 采用无圆柱段喉道的设计

试验表明,采用长的圆柱形喉道(如图2中 l/d_t 高达0.67)是导致钨渗铜严重冲刷的重要因素。这是由于:

(1) 圆柱形喉道没有小圆弧形喉道那种两相流的“集束效应”,“无粒区”小或几乎没有,因此容易产生厚的 Al_2O_3 沉积层。

(2) 喉道内气流的压力梯度小,沉积层所承受的气动力小, Al_2O_3 容易沉积且不易被吹除,沉积过程长。

(3) 长圆柱形喉道使 Al_2O_3 微粒与喉衬接触时间长。

我国设计的固体火箭发动机喷管,往往有一段圆柱形喉道,以保持喉道的通气面积。美国设计规范^[3]也建议有一短的圆柱段,以利于喷管的制造和对中,并认为较长的圆柱段,能显著地降低喉部的烧蚀率。

作者认为传统的喷管设计方法是过去成功经验的总结,它尤其适用于石墨喷管。因为早期喉衬材料大多是石墨,它不耐烧蚀,抗热震性能差,所以采用了圆柱喉道的型面设计。但随着喉衬材料性能的不断提

高,圆柱形喉道的最有利长度应不断减小。对于钨渗铜喉衬来说,无圆柱形喉衬、小 R_c 的型面设计,具有沉积小、抗冲刷和高效率的优良性能。若从工艺上考虑,需要有一圆柱段喉道时也可以,根据我们的经验,圆柱段长

度最好是

$$l/d_t = 0 \sim 0.15$$

对于非金属喉衬来说,无圆柱段喉道的型面设计仍具有效率高,重量轻的优点^[4]。由于非金属喉衬不耐烧蚀,不易沉积,强度低,一般可取^[3.5] $l/d_t = 0.05 \sim 0.5$ 。

四、试验结果

1. 试验发动机参数

- (1) 喷管面积比: $\frac{A_e}{A_t} = 6.26$;
- (2) 燃烧室压力: $p_c = 4.9 \text{ MPa}$;
- (3) 发动机工作时间: $t_a \geq 150 \text{ s}$;
- (4) 装药: 聚硫复合推进剂;
- (5) 喷管喉衬材料: 钨渗铜。

2. 试验结果

表4是试验结果统计表,图2是典型的 p_c

$\sim t$ 曲线,而图4是喉衬烧蚀率 ϵ 、比冲 $\frac{I}{I_0}$ 与 $\frac{l}{d_t}$ 的关系曲线。

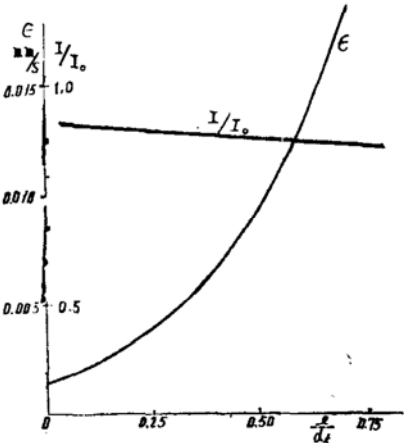


图4 喉衬烧蚀率 ϵ 、 I/I_0 与 l/d_t 关系 (I_0 为一元理想流比冲)

表4 喷管型面对钨渗铜喉衬烧蚀性能的影响

№	喷管型面			平均烧蚀率 ϵ (mm/s)	平均喉径扩大 (%)	比冲效率 $\frac{I}{I_0}$	说 明
	β (°)	$\frac{l}{d_t}$	α (°)				
1	10	0.67	10	0.0186	37	0.877	喉部被冲刷成数条深沟,凹凸不平,喷管的型面被破坏。推力——时间曲线中,推力下降大。
2	35	0.44	10	0.0092	17.5	0.914	喉衬被冲刷的程度有所改善,但仍被冲成几条沟槽,喉道不圆整。
3	35	< 0.16	15	0.0027	4.8	0.907	喉衬冲刷问题基本解决,推力——时间曲线平稳。
4	35	0	15	0.0014	2.8	0.937	喉部圆滑,无沟槽

从这些数据和曲线可以看出:

- (1) 喉道圆柱段的长度 l 对喉衬的冲刷和喷管的效率影响很大。如当 $\frac{l}{d_t} = 0.67$ 时(原设计),喉衬被冲刷得十分严重,效率极低(仅0.877),随着 $\frac{l}{d_t}$ 的减小,喉衬被冲刷的情况

逐步改善, 喷管效率不断地提高。

当 $\frac{1}{d_t} < 0.16$, 喉衬的冲刷明显地改善, 压力——时间曲线平稳, 发动机的内弹道性能基本满足设计的要求。

$\frac{1}{d_t} = 0$ 及小喉部型面曲率半径的喷管, 具有烧蚀率低, 无冲刷和高效率的优良性能。

(2) 无圆柱段喉道或小的圆柱段喉道的喷管, 不但效率高, 不受冲刷, 性能的重现性也好。如 $\frac{1}{d_t} = 0.67$ 的喷管, 烧蚀率的标准偏差为 0.00342mm/s , 而 $\frac{1}{d_t} < 0.16$ 的喷管, 标准偏差为 0.00114mm/s 。

总之, 采用较大的进口角, 小的喉部型面曲率半径, 无喉道圆柱段或小的喉道圆柱段的喷管, 我们成功地解决了钨渗铜喉衬的严重冲刷问题, 使发动机效率提高了3.4%以上。

参 考 文 献

- (1) Daul Kuentzmamn, Specific impulse losses in solid propellant rockets. NASA N75-2057.
- (2) Ramohalli, K., Effect of silicone oil on nozzle heat transfer in solid propellant rockets. AIAA78-1012.
- (3) NASA, Sp8115.
- (4) Thies, C.E., et.al, Effect of nozzle configuration and defects on motors efficiency. AIAA81-1379.
- (5) Platzek, H., Preliminary solid rocket motor design techniques. AD/A063474.