

小推力、长时间工作的固体火箭 发动机长喷管烧蚀、冲刷和 隔热的试验研究

常敬基执笔

摘 要

本文简要地叙述了小推力、长时间工作的固体火箭发动机长喷管的烧蚀、冲刷和隔热问题的试验研究工作。对研制过程中所遇到的不同材料在高温下的热膨胀及喷管穿火和喉部烧蚀、冲刷等问题进行了探讨。着重指出：对烧蚀、隔热采用的不同材料在结构上必须考虑高温下的热膨胀补偿及气体挥发份的逸出；整体钨渗铜喉衬入口处形成的“烧蚀台阶”造成该处流场的严重扰动，是导致喷管穿火的重要因素。另外，对造成钨渗铜喉部烧蚀、冲刷的各种因素进行了分析，认为含有大量固体微粒（ Al_2O_3 ）的高温高压高速燃气流对喉部壁的机械冲刷是主要原因。为此，正确选择整体钨渗铜喉衬内型面结构参数以减小燃气流对喉部的机械冲刷作用是解决喉部烧蚀、冲刷的关键。

试验结果表明，采取相应的改进措施后，目前的长喷管设计是成功的。

一、概 述

本文所讨论的小推力、长时间工作的固体火箭发动机，推力150~200公斤，工作时间不小于170秒，发动机采用了长喷管，长喷管延伸直线段长1000毫米，外径不大于100毫米。

发动机装药为聚硫橡胶复合固体推进剂，端面燃烧。

在满足总体设计要求及发动机结构安排允许的情况下，应使由于喷管延伸造成的能量损失最小和重量最轻。据此，采用了亚音速等截面延伸段，延伸段出口速度系数 $\lambda_2 = 0.137$ 。延伸直线段外径94毫米，防热和隔热材料采用了单一的高硅氧层压玻璃钢。

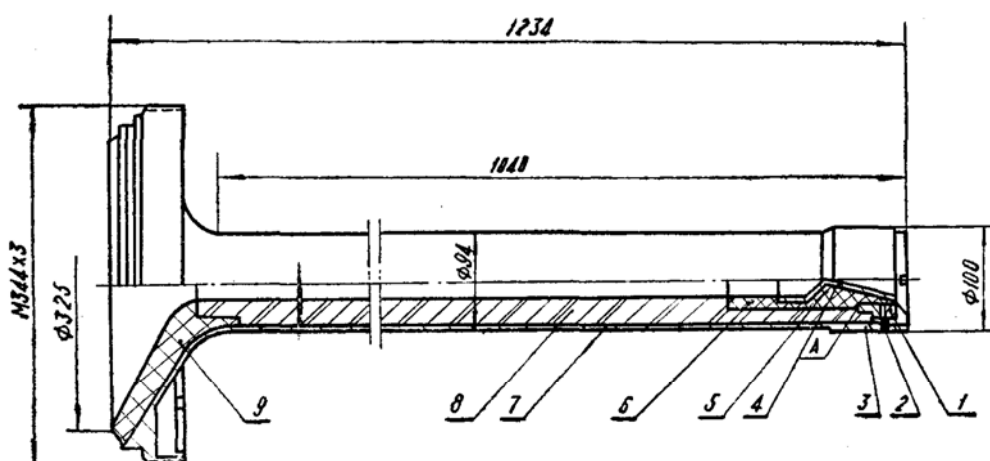


图1 长喷管的结构示意图

1.挡帽-ICr18NiTi 2.玻璃钢压环 3.卡环-35CrMnSiA 4.整体钨渗铜喉衬 5.石墨背衬 6.防热衬-碳纤维/酚醛树脂模压塑料 7.壳体-30CrMnSiA 8.玻璃钢直线段 9.收敛段玻璃钢 A处涂密封腻子

二、长喷管设计中的两个问题

(一) 防热和隔热材料的高温挥发份排气及不同材料高温膨胀尺寸的补偿。

在研制过程中，遇到的第一问题是如何处理防热和隔热材料的高温挥发份的排气及不同材料高温膨胀对喉部组合件密封可靠性的影响。由于防热和隔热材料在高温下有大量的气体挥发份产生，在结构上如不恰当地考虑逸出，它所形成的压力将会使防热和隔热衬里破坏。我们采用高硅氧层压玻璃钢，同时作为防热和隔热材料，布层方向垂直于气流方向，高温下布层之间酚醛树脂所产生的气体挥发份可以自由地从布层间排出。

喉部绝热衬挥发份的逸出，也是通过布层及其与喉部组合件轴向配合缝逆气流方向排出的。

整体钨渗铜喉衬、石墨背衬、石墨背衬环以及喉部绝热衬，随温度的增高，都将产生体积膨胀。但由于它们的热膨胀系数不同（图2），因而受热之后，在这些材料之间将产生很大的热应力。这种热应力会造成整体钨渗铜喉衬背壁的石墨背衬及背衬环的破坏。喉部绝热衬在受热但未达碳化之前体积膨胀，但高温碳化之后体积又有缩小的趋势。对于这些高温下，体积的变化及所引起的应力，在结构设计中应当给予充分地考虑，否则将会造成喉部组合件的破坏或破坏轴向密封。

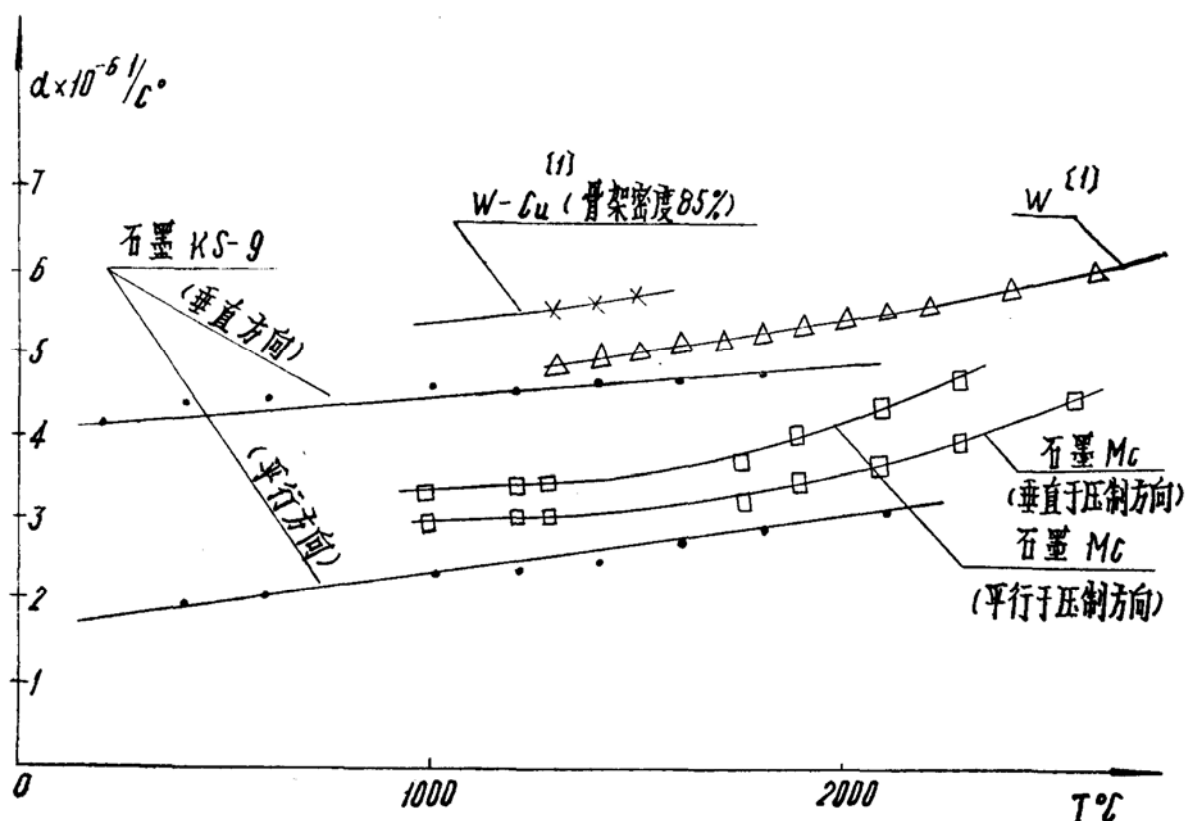


图 2

在这方面，我们是通过控制它们之间的配合尺寸公差及加添密封腻子（或胶）来实现的。考虑到整体钨渗铜喉衬与石墨背衬之间热膨胀的不同，在钨渗铜与石墨背衬之间留0.05

~0.10毫米的间隙。为了防止点火后轴向渗漏及工艺上的需要,在整体钨渗铜喉衬与石墨背衬之间用101*胶加钛白粉粘结。高温碳化后挥发份逸出,自然形成尺寸补偿环节。

由于整体钨渗铜喉衬的壁温及其高温下膨胀难以准确掌握,为了防止高温径向热膨胀时可能引起密封环节的破坏,在石墨背衬外,加了一个高密高强石墨衬环,并将石墨衬环轴向分成了三段。

为了缓和热应力和保证轴向密封,在石墨背衬与石墨衬环和喉部组合件与绝热衬套间均采用了小过盈量配合,并在轴向有密封腻子作补偿。腻子碳化前起轴向密封作用,碳化后,也自然形成了尺寸补偿空间。

(二) 整体钨渗铜喉衬入口处形成的“烧蚀台阶”对燃气流场的影响。

在研制过程中所遇到的另一问题是由于材料的烧蚀率不同所形成的“烧蚀台阶”对喷管喉部组合件的轴向密封和入口处径向烧穿的影响问题。在长喷管方案性试验研究中,发现在整体钨渗铜喉衬入口处,由于材料的烧蚀率不同而形成的“烧蚀台阶”对燃气流场扰动很大,曾造成喉部组合件轴向密封破坏和入口处径向穿火。为了解决这一问题,我们采取了以下措施:

1. 将整体钨渗铜喉衬入口平端面改成壁厚3毫米、长27毫米的前缘诱导段。
2. 在整体钨渗铜喉衬入口处加衬了一段长90毫米的酚醛碳纤维模压塑料防热衬。
3. 加强整体钨渗铜喉衬背壁密封环节(详见图1)。

试车证明,侧向穿火及轴向渗漏得到了解决。但喉部烧蚀问题仍未满意解决。

三、整体钨渗铜喉衬的烧蚀及其解决

在研制过程中所遇到的关键问题之一,是整体钨渗铜喉衬在发动机工作中被严重烧蚀冲刷扩大的问题。这给研制工作造成了很大的困难,而在过去进行普通短喷管试验研究中不曾遇到此类问题。在同样条件下,用普通喷管进行的试验,发动机工作210秒,喉部线烧蚀率为0.0015毫米/秒,而长喷管喉部的线烧蚀率则为0.015~0.022毫米/秒。发动机长时间工作,喉部的严重烧蚀冲刷扩大使燃烧室压力和发动机推力随时间的增加而明显下降——压力平均每10秒下降约1~1.5公斤/厘米²,推力平均每10秒下降约2~2.5公斤。表1列出了三次试车前后钨渗铜喉径变化情况,图3为一次试车的压力、推力——时间曲线,由此可见对内弹道参数的严重影响。因此,解决钨渗铜喉衬喉部的烧蚀、冲刷、扩大便成了长喷管试验研究的主要问题。

表 1

名 称	单 位	试 验 编 号		
		1	2	3
试车前喉径	mm	18.05	18.9	18
试车后喉径	mm	23~25.5	24.5	24.5~25
线烧蚀率	mm/S	0.0145~0.0218	0.0154	0.0208~0.022
药柱燃烧时间	S	171.5	181.67	159.0

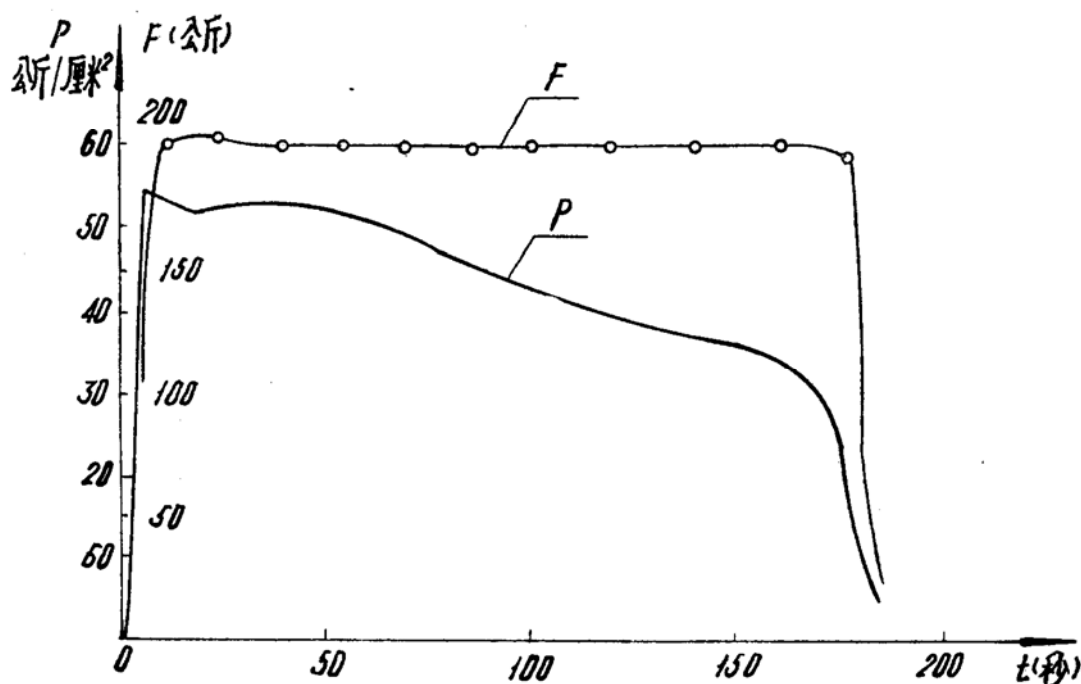


图3 7802次推力、压力随时间变化曲线

(一) 烧蚀的原因:

关于钨渗铜喉衬烧蚀机理的研究,国内外均有报导。北京钢铁研究院和中南矿冶学院都做有关这方面的实验研究。钨渗铜喉部的烧蚀主要取决于以下几个方面:

1. 含固体微粒的高温、高压、高速燃气流的机械冲刷。

热力计算表明,燃烧产物中凝固相(Al_2O_3)占15.8% (重量比)。经过170秒试车后整体钨渗铜喉衬的喉部,有明显深度不同的冲刷沟槽,则说明了含固体微粒的高温、高压、高速燃气流机械冲刷的作用。

燃气向壁的传热,在燃烧室压力一定的情况下,随喷管直径的减小而加大。因此,喉部热流量最大,壁温最高,抗烧蚀冲刷的能力也最差。

根据气体力学,燃气流过钨渗铜喉衬时,对其壁的机械摩擦应力,在燃烧室压力一定的情况下,随喷管直径的减小而加大,随燃气流速增大而增大。

从这里可以得出:①从钨渗铜喉衬入口至喉径,通道直径越来越小,燃气向壁的传热越来越大,壁温越来越高,壁抗烧蚀冲刷的能力越来越差。而燃气流速则越来越大,因此燃气流对壁的机械冲刷从入口至喉部也就越来越严重。②考虑到燃气流中固体微粒(主要是 Al_2O_3)的作用,将对壁的机械冲刷更加严重。因为这种固体微粒不仅直接以比气体分子大得多的动量冲刷壁,而且由于它本身的温度比壁温高得多,对壁产生热交换提高了壁温,从而使壁抵抗气流冲刷的能力进一步降低。如果设法,使燃气流中靠近喉部壁的固体微粒向气流中心集缩,这样会有效地减小含有大量固体微粒的燃气流对喉部壁的机械冲刷。

在研究含有固体微粒的高速气流通过拉瓦尔喷管的流动特性时,我们注意到:①固体微粒本身不参加膨胀,它的运动完全靠参与膨胀的气体分子带动的。因此,固体微粒的运动相对于气体分子有一个滞后。②固体微粒的质量比燃气流中气体分子大得多,因此,其惯性较

大。当高速燃气流通过收敛锥圆滑过渡到喉部时, 气体可以很快充满整个喉部截面 (当收敛锥角大小不一致引起气流在喉部分离时), 而行动迟缓的固体微粒, 由于在流经收敛锥被气流向中心集缩, 当运动到喉部时, 它就很难与气体分子同时充满整个喉部截面。也就是说在喉部壁面附近将会形成一个固体微粒的稀疏区。③从理论上分析, 存在一个合适的喷管内型面, 在不使气流分离的情况下, 使含有大量固体微粒燃气流对喉部壁的摩擦冲刷最小。

2. 燃气的氧化腐蚀。

据资料〔2〕报导, 在实验室条件下, 高压燃气中的 CO_2 和 H_2O 会引起高温下钨的氧化腐蚀, 生成气态的 WO_3 。但是对试验后的喷管进行显微镜和X光衍射分析却难以鉴别出这些氧化物 $\text{WO}_3(\text{g})$ 的存在。因为 $\text{WO}_3(\text{g})$ 在高温下已挥发逸出。与燃气的机械冲刷显著不同的是这种氧化腐蚀是在钨壁的表面均匀细密地进行的。因此氧化腐蚀的表面仍然是光滑的。

事实上, 后来的发动机试验表明, 在没有改变燃气成份, 仅改变喉衬内型面形状的情况下, 喉部的烧蚀得到了明显改善, 由此可见, 燃气的氧化腐蚀在我们研究的喉部烧蚀中不是主要的。

3. 试验中, 我们发现钨渗铜中钨的含量对长时间工作的整体钨渗铜喉衬的烧蚀、冲刷有一定影响。试验证明在发动机工作条件下, 钨渗铜中的铜难以起到有效的发汗冷却效果, 因为在实际发动机中喉部压力达到28公斤/厘米², 这时铜的沸腾温度接近3700℃*。因此, 长时间工作的整体钨渗铜喉衬主要靠钨基骨架本身的强度来承受烧蚀和冲刷作用。我们将钨渗铜的含钨量控制在82~86%。此时渗铜的主要目的在于改善材料的抗热震性和切削性能。

(二) 解决喉部烧蚀的技术途径。

根据我们对烧蚀原因的简单分析, 只要我们充分利用抑制烧蚀冲刷的各种因素, 合理设计整体钨渗铜喉衬的内型面, 适当提高钨含量, 进一步改善整体钨渗铜喉衬入口处气流的扰动, 就能够最大限度地发挥钨渗铜抗烧蚀、抗冲刷性能。为此, 我们采用了下面几点措施:

1. 将整体钨渗铜喉衬从入口至喉部的大圆弧过度和小收敛角改为从入口至收敛开始为直径 $\Phi 40$, 长50毫米的气流诱导段。收敛半角改为35°。改善进口流场, 增大喷管收敛锥段对燃气流中固体粒子的集缩效应。

2. 控制喉部直线段长度使其不大于3毫米。

3. 喷管扩张角为15°。

4. 把钨渗铜中钨含量提高到82%以上, 以提高钨基骨架的强度。

试验证明, 结构改进后的喷管, 其整体钨渗铜喉部的烧蚀得到了控制。

四、发动机试验结果

长喷管结构改进后, 进行了常温、高温(+50℃)、低温(-30℃)诸状态的多次发动机热试车。试验表明, 整体钨渗铜喉部的烧蚀、冲刷得到了控制, 平均线烧蚀率为0.0018毫米/秒。其压力、推力随时间的变化曲线满足了设计要求。图4是结构改进后的发动机试验曲线。

* 30个大气压下, 铜的沸点为3700℃〔2〕

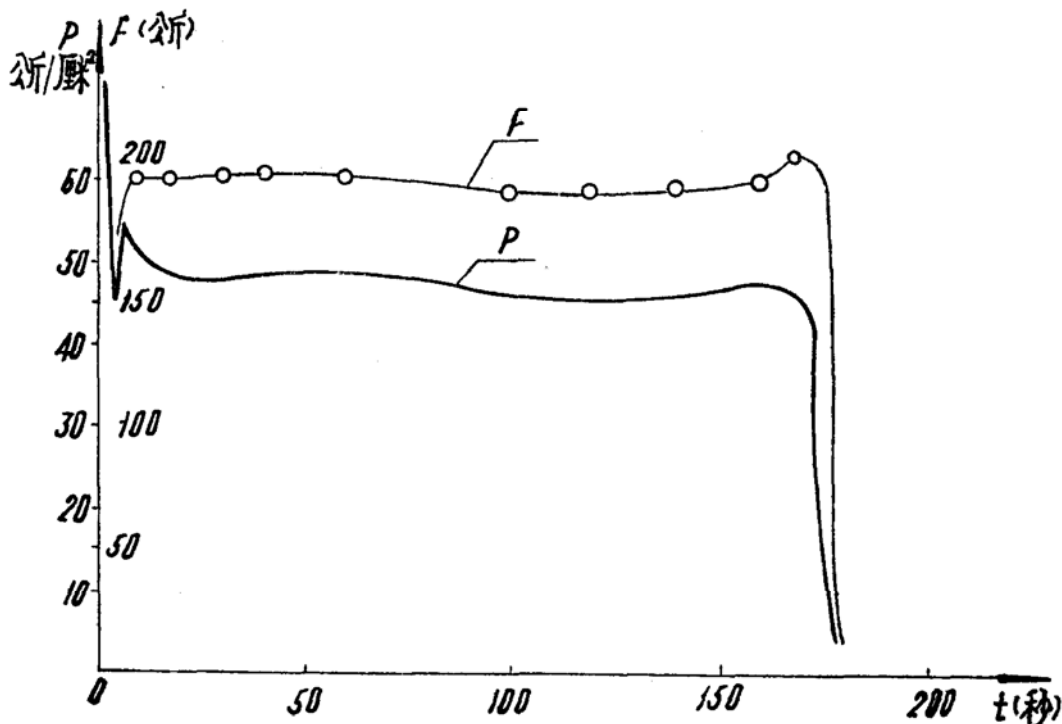


图4 7913次推力、压力随时间变化曲线

五、结 束 语

在小推力、长时间工作的固体火箭发动机长喷管试验研究中，针对由于喷管延伸所带来的主要问题——各种材料的热膨胀以及整体钨渗铜喉衬入口处由于不同材料形成的严重“烧蚀台阶”对喉部组合件的密封和穿火的影响，合理地选择材料和结构设计，保证了工作的可靠性和结构的完整性。并针对整体钨渗铜喉部的烧蚀冲刷，进行了分析，认为整体钨渗铜喉径的扩大主要是由于含有大量固体微粒的燃气流对喉部壁的机械冲刷所造成的。基于以上分析，对钨渗铜喉衬内型面进行了改进设计，并适当提高钨渗铜含钨量，以提高抗冲刷能力。试验证明，以上措施是有效的，喉部烧蚀率得到了控制，发动机的压力、推力~时间曲线达到了设计要求。

参加本工作的还有：王礼恒，李溯滋，周佩璋，凌兴云，吕文树，童秀荣，丁振宗，郑炳森，朱光宇，雷明明，李章勋

参 考 文 献

- 〔1〕陈正求等《钨、钼渗铜、银材料》北京钢铁研究院 1976年8月
- 〔2〕陈正求等《固体燃料火箭发动机钨基喉衬材料的抗烧蚀问题研究》北京钢铁研究院 1980年

更正：图2中石墨KS-9应为石墨KS-8。图3中纵座标60、20、30…应为10、20、30…。