

固体火箭发动机内弹道 曲线异常现象的鉴别

谢蔚民 吴心平

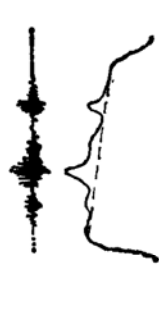
摘 要

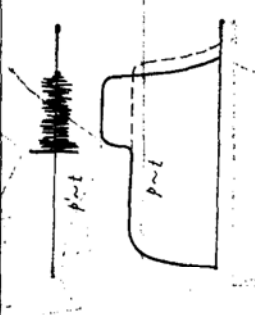
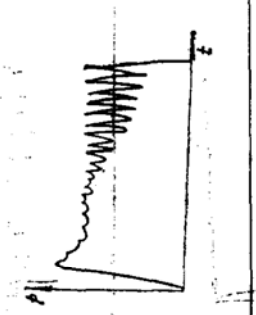
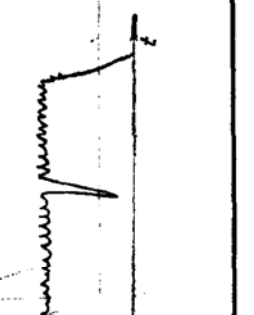
本文以表格形式给出了各种内弹道曲线异常现象的典型实例，并作了初步归纳和分析，提出一些实用的鉴别方法。其目的在于促进发动机研制人员进一步总结经验，在综合运用有关方面的研究成果和燃烧诊断技术的基础上，逐步发展一套分析、鉴别发动机内弹道曲线异常的工程方法。本文建议积极开展关于内弹道与燃烧问题的工程应用研究。其中比较重要的是，发动机起动过程的预计，固体推进剂侵蚀特性的预计或燃速辨识技术，发动机线性稳定性预计，发动机脉冲试验技术等。

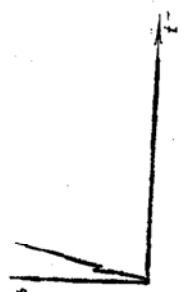
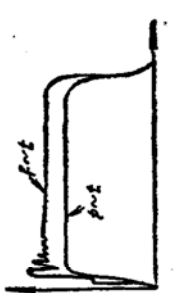
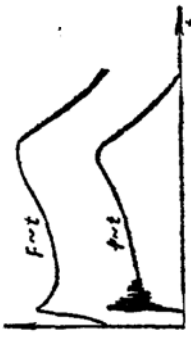
引 言

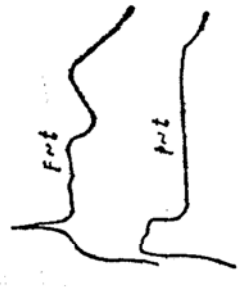
在研制和生产固体火箭发动机的过程中，为了检验发动机的实际性能、结构完整性和工作可靠性，需要进行大量试验。试验的主要内容之一就是通过推力、压力测量获得发动机内弹道曲线，并据此判断发动机工作是否正常，实际性能是否符合预定的战术技术指标等。实践表明，在发动机试验中，人们经常遇到各式各样的内弹道曲线异常现象，它们可能是发动机内部过程或局部结构发生意外变化的结果，也可能是测试系统造成的假象。因此，发动机研制人员必须善于分析、鉴别各种内弹道曲线异常的现象，以便迅速查清原因，及时排除故障。目前，内弹道曲线异常的分析、鉴别并无成规可循，只能依靠人们的经验和细致的调查研究，因而往往需要反复多次试验，花费很多的时间，这种状况显然不能满足发动机研制工作的要求。为了解决这个问题，我们应当总结过去的经验，在综合应用已有经验、燃烧研究成果以及某些实用燃烧诊断技术的基础上，逐步发展一套分析、鉴别内弹道曲线异常的工程方法。

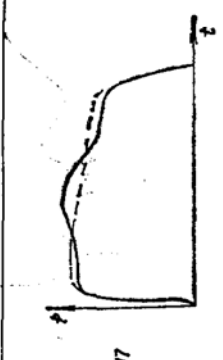
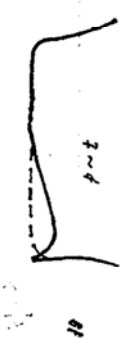
过去，我们曾协助国内一些厂、所进行动态压力测试和故障分析，接触到不少内弹道曲线异常的现象，同时也从国外文献资料中看到一些实例分析。本文挑选一部分有代表性的例子加以分类、整理，进行初步归纳、分析，其目的不过是抛砖引玉，促进交流，以便更加全面地总结大家的经验。

序号	内弹道曲线	特点	条件	分析	鉴别
1		具有初始压力峰		点火药过多、过细或装填密度较大。	(1)调整点火药量或粒度, 观察曲线变化情况; (2)启动过程计算。
2		(1)初始压力峰 (2)减面性 (3)拖尾	装填密度、喉通比J或通气参量 α 值较大。	侵蚀效应	(1)调整有关参数, 观察曲线变化情况; (2)应用侵蚀试验或燃速辨识技术 ^[3] 确定推进剂的侵蚀特性。
3		断续燃烧		(1)燃烧室压力低于临界压力; (2)点火药过少。	(1)增加点火药量, 提高工作压力, 观察发动机工作状态; (2)应用试验发动机测定临界压力。
4		(1)平均压力曲线不规则变化或形成二次压力峰; (2)动态压力检测发现有频率较高的压力振荡。	不含铝推进剂、发动机长径比(L/D)较小。 含铝推进剂、L/D较大	横向高频不稳定或伴有旋涡形成。 纵向中频不稳定, 速度耦合。	(1)动态压力测量及频谱分析; (2)燃烧室声场分析; (3)发动机稳定性计算。

序号	弹道曲线	特点	条件	分析	鉴别
5		(1) 平均压力突然跃升到某一新水平上; (2) 动态压力检测有中间压力振荡。	(1) 发动机长径比 $L/D > 10$ (2) 高压压力 (3) 推进剂燃速较低 (4) 工作过程中, 有某种固体碎片 (如点火器碎片, 包复片等) 通过喷管。	纵向脉冲触发不稳定。	进行发动机的脉冲试验。
6		(1) 平均压力曲线下凹; (2) 动态压力检测有高频压力振荡。	(1) 双基药; (2) 压力振幅不大。	高频不稳定, 压力耦合。	(1) 动态压力测量及频谱分析 (2) 声场分析。
7		(1) 低频压力振荡 (200 赫芝) 以下; (2) 振幅较大时, 伴有平均压力下降或断燃。	(1) 低工作压力 (2) 小 L^* 值 (或 α 值较大) (3) 低温	L^* 不稳定	(1) 调整有关参数, 观察发动机工作状况; (2) L^* 燃烧器试验。
8		低频压力振荡, 伴有压力突降及恢复。	(同上)	在 L^* 不稳定的条件下发生脉冲触发 (有固体碎片穿过喷嘴)。	脉冲实验。

序号	内弹道曲线	特点	条件	分析	鉴别
9		点火后很快发生爆炸。	(1)推进剂含硝酸炸药， (2)大发动机。 其它	裂缝燃烧和爆燃转爆轰 (DDT)。(4) (1)高频不稳定与药柱 (自由装填)振动耦合导致 药柱破裂。(5) (2)药柱强度不足，点 火冲击引起药柱破裂	(1)动态压力测量及频 谱分析； (2)药柱强度计算； (3)药柱裂缝检验。
10		动态压力检测有不同频率的振荡信号。		干扰： 工频干扰 (50赫芝)， 电台干扰 (音频)， 接线干扰 (随机信号)。	(1)频谱分析； (2)测试回路内接监听 喇叭； (3)检查测试线路布置、 接地、接线情况。
11		推力曲线起始段有规则的衰减振荡，但压力曲线没有相应的变化。		试车系统机械振动。	
12		推力曲线正常，压力上升滞后，并有典型的衰减振荡。	旋转台试验，飞行试验。	测压管线较长，形状复杂，故压力信号滞后。在点火冲击下，管内发生衰减的自由振荡。	

序号	内弹道曲线	特点	条件	分析	鉴别
13		压力曲线明显波动, 推力曲线有相应变化, 但相对较弱。	(1) 双钻推进剂; (2) 喉部直径很小。 ($dt = 4.5 \sim 5.5$ 毫米)	喉部沉积物反复沉积和脱落。	
14		初始压力偏低, 后部有凸起。	飞行试验; 遙测压力; 自由装填。	(1) 测压管线较长, 压力上升滞后; (2) 侵蚀效应较强, 有初始峰减值性, 后期由于轴向过载, 药柱破裂, 燃面增大。	
15		后期压力明显下降, 并保持平稳, 下降段最长可达总工作时间的1/3, 总冲变化不明显。	双基药, 高温, 有较强侵蚀效应, 自由装填。	由于侵蚀, 药柱后部变薄破碎、吹出, 使总燃面减小。	
16		(1) 压力突降, 同时出现推力峰; (2) 后期推力曲线下凹。		喉衬部分吹掉(非对称)压力下降, 推力瞬时增大。因推力偏心, 发动机在后期发生了纵向倾斜(12°)使推力曲线出现下凹现象。	

序号	内弹道曲线	特点	条件	分析	鉴别
17		(1) 压力曲线中段略微凸起。 (2) 高频压力检测没有压力振荡。	复合药浇注。 采用横向隔板, 分段装药之间有包复片等。 其它	由于浇注工艺造成装药组分不均匀, 中段燃速大于始段和末段[6, 7]。 燃烧产物发生回流, 使局部燃速增大。 由于脱粘等原因使燃面增大。	
18		压力后部拱起, 拖尾。	旋转发动机。	向心加速度导致燃速增大, 气体旋涡的侵蚀效应, 及减小喉部有效面积的效应。	
19		(1) 压力曲线起始段下凹 (2) 动态压力测试没有压力振荡。	缓燃推进剂; 低温; 壁面损失大; T形发动机。	壁面热损失影响较大。	

讨 论

上表列出19种有代表性的现象,其中也包括人们比较熟悉的一些情况,例如,1、2、3、18、19等。按照发生的原因,可以将表列现象大体归纳为三类:1~9是发动机内部燃烧过程的反映,10~12属于测试系统造成的假象,13~19则与发动机(或装药)结构的变化或特殊工作条件有关。测试引起的问题,只要加以注意并不难防止和排除。第三类现象比较复杂,其中有些也与装药的燃烧间接有关,例如侵蚀效应导致装药后段的破碎等。实际上,比较难于分析、鉴别和解决的问题乃是各种非稳态燃烧过程和侵蚀效应造成的内弹道异常。因此,我们应当积极开展内弹道与燃烧方面的工程应用研究,为发动机研制人员提供有效的分析、鉴别手段,其中比较重要的是:发动机起动过程的预计,固体推进剂侵蚀特性预计或燃速辨识技术,发动机线性稳定性预计,发动机脉冲试验技术等。此外,动态压力检测具有十分重要的作用,应当作为试车中的例行手续,而不应看作额外负担。即使无法安装动态压力传感器,也应代之以壳体振动或动态应变的测量。这样,一旦发生异常现象,可以立即弄清是否不稳定燃烧所致,以便集中力量,迅速排除故障。

参 考 文 献

- (1) 吴心平,“几个固体火箭发动机型号不稳定燃烧的初步研究报告”,西北工业大学科技资料总字第386期,1977年4月
- (2) 谢蔚民编,《固体火箭发动机不稳定燃烧》,航空专业教材编审组,1984年1月
- (3) 陈步学等,“固体火箭发动机药柱侵蚀燃速辨识”,西北工业大学科技资料 YH8405,1984.4.
- (4) 《固体火箭发动机原理》(中册),西北工业大学八〇二教研室,1983.7
- (5) “An example of failure by acoustic coupling of a free standing double base propellant grain”。AIAA-81-1525
- (6) “Ballistic anomaly trends in subscale solid rocket motors”。AIAA-82-1092
- (7) “Differences between actual and predicted pressure-time histories of solid rocket motors”。AIAA-82-1094