

装药限燃包覆层脱粘和裂缝 燃烧故障效应的试验研究^①

吕振中 蔡国飙

王英伟

(北京航空航天大学宇航学院, 北京, 100083)

(北京控制工程研究所, 北京, 100080)

摘 要: 用模拟试验研究各种脱粘和裂缝燃烧对发动机造成的故障效应, 为故障诊断和失效分析提供依据。自由装填限燃包覆层装药的脱粘燃烧, 造成燃面增大和由于压力升高造成的燃速指数增大效应; 具有贴壁的限燃包覆层的装药脱粘燃烧, 还会产生极其强烈的侵蚀燃烧效应。浅裂缝燃烧只是造成燃面增大的效应; 而深裂缝装药燃烧, 还会产生极其强烈的侵蚀燃烧效应。无论是贴壁的限燃包覆层的装药脱粘燃烧或是深裂缝装药燃烧, 均会在发动机点燃的初期, 产生十分强烈的压力峰, 如果燃烧室的安全裕度不是特别大, 则会在发动机点燃后的短暂时间内发生爆炸。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 绝热层, 仿真试验, 推进剂包覆, 裂纹, 失效模式

分类号: V435.14

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON EFFECTS OF RESTRICT LAYER DEBONDING AND CRACK BURNING

Lü Zhenzhong Cai Guobiao

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

Wang Yingwei

(Beijing Inst. of Control Engineering, Beijing, 100080)

Abstract: The fault effects on restrict layer debonding and crack burning were studied by simulated test in order to provide analysis basis of fault diagnostics for solid rocket engine. Test proved that the debonding of free load restrict layer resulted in increasing burning area and pressure exponent while the debonding of restrict layer pasted to chamber wall even resulted in effect of serious erosive burning. The debonding and the deep crack burning might cause serious pressure peak in the beginning of engine starting. If a strength margin was not big enough, a blast might happen in the very short period after ignition of the motor.

Subject terms: Solid propellant rocket engine, Heat insulation layer, Simulation test, Propellant cladding, Crack, Failure mode

1 引 言

在固体火箭发动机故障诊断技术中, 常采取推理分析与实际验证结合的方法。用原型大尺寸发动机作专项故障研究, 经费太多, 周期太长。为此发展了模拟试验的方法, 即用特殊设计的小型模拟火箭发动机, 研究单项故障的诱因与其效应间的关系。这种特殊的小型模拟

^① 收稿日期: 1998-02-28, 修回日期: 1998-06-24, 本课题为航空基金资助项目

火箭发动机的设计,要靠丰富的实践经验和巧妙的设计技巧。它不但可以验证发动机的燃烧和气流中出现的故障问题,还可以研究喷管、燃烧室及其他部件出现的故障问题。

在各种故障原因中,装药限燃包覆层脱粘燃烧频率最高,而装药裂缝燃烧引起的故障,是人们常常关心的问题。本文就再次分析和研究这两种故障因素引起的效应的破坏性,从而对具体型号的发动机的故障诊断提供研究依据。

2 限燃包覆层脱粘燃烧的故障效应

装药的限燃包覆层分为两种:一种为自由装填包覆层,其外表面与发动机内壁之间有较大间隙,发生包覆层脱粘燃烧时,所生燃气不受阻碍地释放到燃烧室中;另一种为贴壁包覆层,包覆层外表面紧贴发动机内壁,发生包覆层脱粘燃烧时,包覆层不能自由鼓胀,所生燃气必须由脱粘部位与包覆层间的窄隙流出。

2.1 自由装填包覆层装药脱粘燃烧方案与对比试验结果

采用简单的管形装药发动机,装药前段外侧表面实行包覆,可脱粘的被包覆表面积约占初始燃烧面积的 30%。为了进行对比,采用可脱粘和不可脱粘的两种装药进行对比试验,为了观察包覆层脱粘情况,在发动机点燃后,约经 0.2s,将燃烧终止,以便得到脱粘燃烧早期的药柱。

在试验中,各发次之间,实际的脱粘速度各不相同,这与包覆层的原先粘结牢度、燃烧压强等因素有关。一般来说,燃烧压强高,其脱粘速度也快。

图 1 所示的是自由装填包覆层脱粘燃烧的一发试验结果(实线所示),以及与之对比的完全不脱粘的试验结果(虚线所示)。预计其初始平衡压强 $p_e=9.12\text{MPa}$,实测初始压强 $p_s=8.61\text{MPa}$ 。脱粘试验结果,燃烧一开始,实测初始压强 $p_s=10.97\text{MPa}$ 。初始压强只保持了约 0.03s 便迅速升压,直到 0.14s 时,压强达到最大,即 $p_m=29.45\text{MPa}$,此后压强成平直,这是由于测量系统饱和所致,实际的最大压强比这个数值还要大。

如果按照燃速指数为常量估计,即使包覆层全部脱粘,其最大压强也只是 $p_{em}=17.93\text{MPa}$,而实际的最大压强,远大于预计的全部脱粘的最大压强。这是由于计算压强时,燃速指数 n 假定为常数。但压强超过一定范围时, n 值随着压强增加而增加,导致实际的最大压强远远超过预计值。这也是包覆层脱粘燃烧造成爆炸的原因。

2.2 贴壁包覆层装药脱粘燃烧的试验方案与结果

依然采用管形装药发动机,其装药由前、后两段组成,前段外径较大,使其外侧的包覆层紧贴燃烧室壁,包覆层的外侧与燃烧室内径之间只有 0.05mm~0.2mm 的初始间隙。此种贴壁包覆层的可脱粘部分由前段装药的前端开始,前段装药的后端局部与外侧包覆层紧密粘

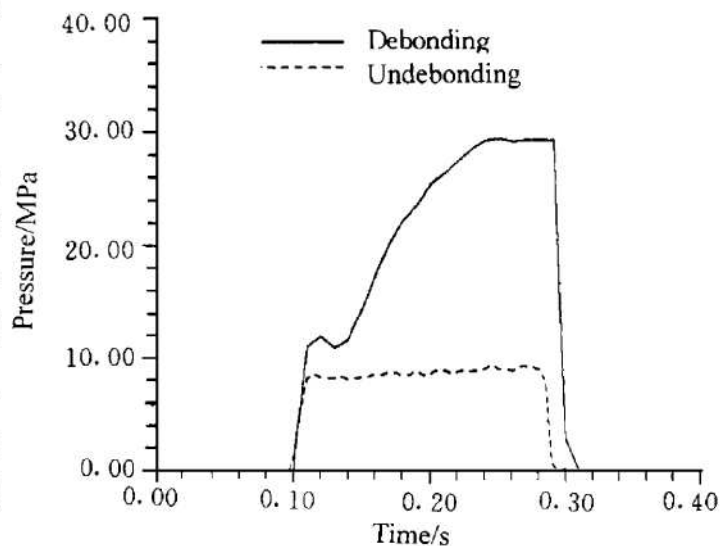


Fig. 1 Testing results of debonding of free restrictors

接, 面对脱粘包覆层的装药表面所产生的燃气, 只能向前流出, 经过燃烧室前端, 由装药内孔向后排, 装药的内孔通道要设计得足够大, 确保内孔不发生侵蚀燃烧现象。后段装药的后部开有适当长度的十字槽, 靠此十字槽的减面性, 来补偿在包覆层不脱粘情况下的增面性。设计的贴壁包覆层脱粘面积为未脱粘初始燃面的 27.6%。为了对比, 包覆层的外表面紧贴燃烧室壁的试件制成两种: 一种是可脱粘的; 另一种是不可脱粘的, 试验结果如图 2 所示。本发次试验的不脱粘设计压强取得较低, 约为 7.3MPa。由图 2 可以看出: 在燃烧初期形成较为强烈的侵蚀压强峰, 其数值为 19.13MPa, 其脱粘后, 曲线到达平坦时的压强约为 11.12MPa, 实测的压强的峰/衡比约为 1.72。也就是说, 贴壁包覆层脱粘与非贴壁包覆层脱粘燃烧的压力比为 1.72。图 2 中所示的虚线是相应的不脱粘燃烧的对比试验结果。照此估计, 当贴壁包覆层脱粘面积为未脱粘初始燃面的 27.6% 时, 其脱粘燃烧的压强峰值是不脱粘燃烧压强的 2.63 倍。

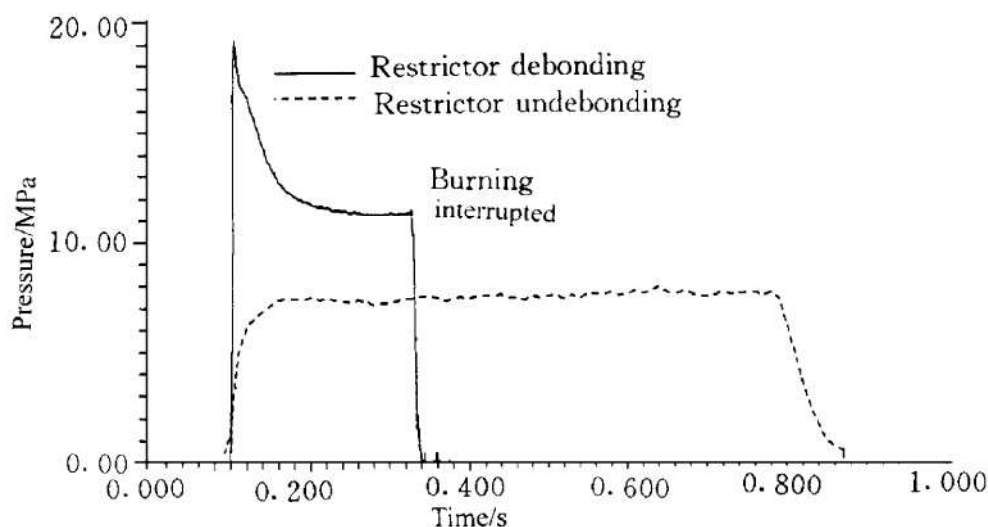


Fig. 2 Testing results with restrictor close to the wall

我们所研究的实际有故障发动机的装药形式, 大多为贴壁的限燃包覆层, 如果脱粘燃烧发生在粘壁处, 受类似的侵蚀燃烧影响, 其压强上升速率会很大。发生爆炸的可能性更大, 而且更快、更猛烈。

3 装药裂缝燃烧的故障效应

研究中首先给裂缝一个宽度上的限制, 即不超过 0.2mm。其次把装药的裂缝分为浅缝与深缝两种, 用相对深度 K_p 表示缝隙的深浅: $K_p = 2 \cdot L_f / W_f$ 。其中 L_f 为缝隙的 (平均) 深度; W_f 为缝隙的 (平均) 宽度。

当 $K_p < 120$ 时, 该缝隙为浅缝; 当 $K_p > 400$ 时, 则为深缝; 当 $120 < K_p < 400$ 时, 为混合型。只要弄清了浅缝和深缝的故障效应特点, 则混合缝隙的效应也就清楚了。仍采用小型管状装药发动机模拟试验的方法。

3.1 装药具有浅裂缝缺陷的故障效应

浅缝隙缺陷的装药试件的制作, 是将管状装药外圆表面沿着纵向切一道宽 0.04mm~0.06mm 的隙缝, 此缝隙两侧的燃烧面积约占管状装药总燃烧面积的 16%~18%, 另一种对

比试件是无缝隙的同样尺寸的管状装药。

利用两种装药试件, 作对比终止燃烧试验, 试验结果压力曲线如图 3 所示。图 3 中实线为浅缝隙试件的压力曲线, 虚线为无缝隙试件的压力曲线, 虚线较平直, 表现为等面燃烧的特点, 其平均压力 $p_n = 12.2\text{MPa}$ 。实线升到峰值后, 呈下降趋势, 这是由于缝隙处燃面的递减性所造成的, 峰值压力 $p_{fm} = 18.2\text{MPa}$ 。 p_{fm} 与 p_n 的比值约为 1.5。两条曲线均与内弹道计算结果相吻合。观察终止燃烧后的试件, 没有发现因为缝隙燃烧而造成缝隙延深现象。

3.2 装药具有深裂缝缺陷的故障效应

为了制造能在小发动机中进行试验的、而且有深裂缝的装药试件, 进行了多种方案的尝试, 最后采取了拼装的方法, 制造出具有深裂缝的装药试件。该装药试件由两段管状装药组成, 前外圆管段为外径较大的装药圆环; 内圆管段和后圆管段为一外径台阶形的装药, 其前部外径小, 正好将前外圆管段的装药套于其上, 其后部外径略大。前外圆管段装药的后端粘接在后圆管段的台肩上, 这就构成了一个前部带有圆柱形深缝隙的装药试件, 用适当的方法保持缝隙各方向宽度均匀。本试验中取缝隙深度 $L_1 = 95\text{mm}$; 宽度 $W_1 = 0.2\text{mm}$, 则燃烧开始瞬间相对深度 $K_{p0} = 950$ 。缝隙内的燃烧面积相当于无缝隙装药总燃烧面积的 22%~24%。用此种试件作终止燃烧试验, 其压力曲线如图 4 所示。

由图 4 看出存在严重的初始压力峰, 其峰值 $p_m = 17.73\text{MPa}$, 随着时间延续, 压力逐渐平缓, 其平直部分压力 p_e 约为 9.9MPa。压力比 $p_m/p_e = 1.8$ 。图中的虚线为设计压力, 其平直部分的压力 $p_d = 6.40\text{MPa}$ 。其峰值压力与设计压力之比 $p_m/p_d = 2.7$, 而有缝平坦压力与设计压力比 $p_e/p_d = 1.55$, 这个比值与单纯增大燃烧面积造成的效应相当。也就是说在此情况下, 深缝燃烧造成的增压效应要比浅隙严重得多, 而且其升压速率也快得多。如果发动机壳体的安全裕度不是特别大, 很可能在点燃后的极短时间内发生爆炸。

经过终止燃烧试验后, 原先圆柱形缝隙, 烧成了呈内外双锥形的缝隙, 即外环内侧呈喇叭形, 内柱(内管)外侧呈锥形。测量了试验前、后缝隙外环的内径和柱的外径沿长度的分布, 并绘制了外环内径和内管柱外径的烧去肉厚分布曲线, 其横座标为由缝隙底部计算的距

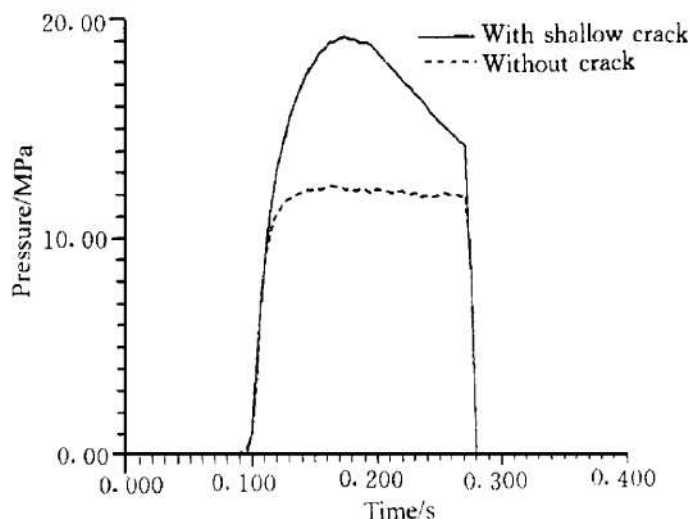


Fig. 3 Pressure history with/without shallow crack

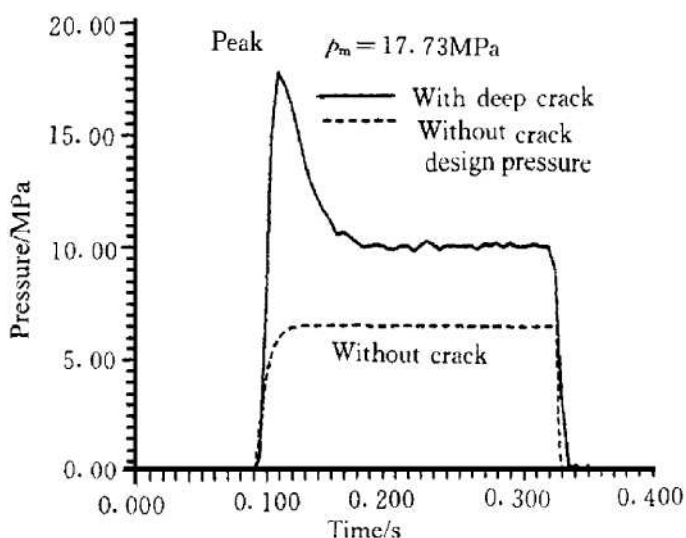


Fig. 4 Pressure history with deep crack

离, 如图 5 所示。

综合图 4, 5 可以看出, 在缝隙的燃烧过程中, 发生了两种情况: 一是在缝隙处产生了严重的侵蚀燃烧现象, 这由初压力峰和由烧去肉厚分布可以判断; 二是在缝隙处, 火焰是逐步传播到缝隙底部的, 这点也可从烧去肉厚分布来判断, 因为一般单纯的侵蚀燃烧有一段等烧去肉厚部分, 而此处的烧去肉厚分布是由缝隙底部就直线增加, 说明缝隙底部的始燃落后于缝隙口部。

4 结 论

(1) 对于具有自由装填的限燃包覆层装药脱粘燃烧的故障效应, 只是由于脱粘部分使燃烧面积加大所造成的燃烧室压力增大, 但是如果相对的脱粘面积较大, 也会造成压力过高。压力过高的同时会使发动机中的装药燃速指数变大, 从而加剧了室压的升高, 严重时会造成爆炸事故。

(2) 对浅裂缝缺陷装药燃烧的故障效应, 只是由于裂缝处增大了燃烧面积, 从而使燃烧室压力过高, 又由于裂缝燃烧面积的递减性, 相应的压力也是渐减的。

(3) 对深裂缝缺陷装药燃烧的故障效应, 除了由于裂缝处增大燃烧面积而使燃烧室压力过高外, 还在狭窄的缝隙内发生严重的侵蚀燃烧, 同样会造成很高的燃烧初始压力峰, 使发动机在点燃初期压力便急速上升, 有可能在极短的瞬间内发生爆炸。

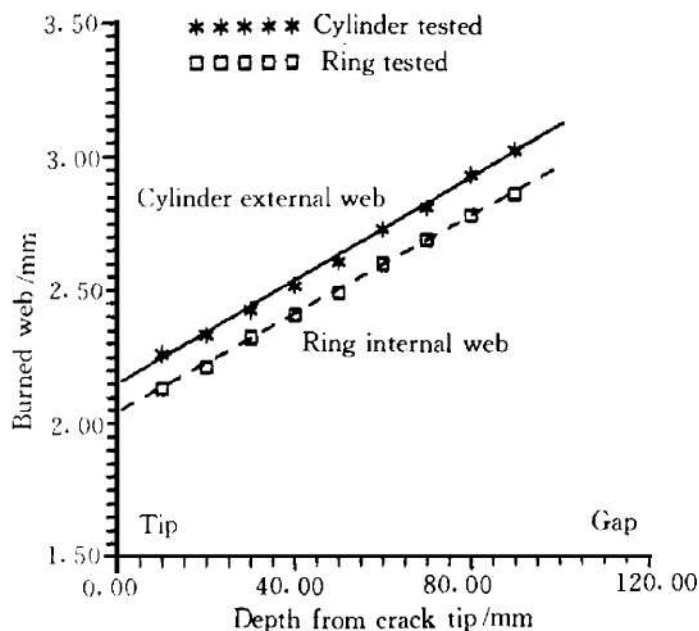


Fig. 5 Burning web distribution in burned crack slot

参 考 文 献

- 1 Wu S R, Lu Y C, Kuo K K, et al. Combustion-induced crack/debonding in a metallized propellant. AIAA 92-3506
- 2 Kamaty H, Arora R, Kuo K K. Erosive burning measurements and predications for a highly aluminized composite solid propellant. AIAA 82-1111