

固体推进剂裂纹对流燃烧 和扩展的研究分析*

韩小云 周建平

(国防科技大学航天技术系, 长沙, 410073)

摘 要: 评述了固体推进剂裂纹对流燃烧及扩展的研究, 讨论了推进剂裂纹对流燃烧的流场与裂纹的变形、扩展及其之间存在着强耦合作用。初步揭示了在不同的燃烧室压力率下单一裂纹扩展的不同模式, 指出裂纹腔内火焰的离散传播、裂纹尖端的压力突升以及对流燃烧条件下的裂纹失稳扩展极可能诱导产生 DDT 过程, 提出了需进一步深入研究的问题。

主题词: 固体推进剂, 推进剂燃烧, 裂纹扩展, 爆燃, 爆轰

分类号: V512

AN INVESTIGATION ON CRACK PROPAGATION AND CONVECTIVE COMBUSTION IN SOLID PROPELLANTS

Han Xiaoyun Zhou Jianping

(Dept. of Aerospace Technology, National Univ. of Defence Technology, Changsha, 410073)

Abstract: In solid rocket motors, crack propagation and convective combustion in solid propellants have influence on the interior-ballistic parameters seriously. Investigated results indicate that strong coupling exists among crack deformation, propagation and convective combustion dependent on the achievements of convective combustion, crack dynamic propagation and consideration of the coupling. On the one-dimensional assumption, flame spreading and parameters of convective combustion are studied in details. Crack deformation and propagation is investigated preliminary under convective combustion condition. Experimental research reveals various propagation patterns of single crack under various chamber pressure rates. It was often pointed out in literatures that DDT may be induced by discontinuous flame spreading in cracks, abrupt pressurization at crack tip and unstable crack propagation under convective combustion.

Subject terms: Solid propellant, propellant combustion, Crack propagation, Deflagration, Detonation

1 引 言

由于固体推进剂裂纹提供了额外的燃烧面积, 将导致发动机的内弹道参数极大地偏离其设计值, 进而直接影响固体火箭的外弹道参数。对流燃烧裂纹的失稳扩展可能诱导产生 DDT

* 收稿日期: 19970117, 修回日期: 19970702

过程^[1~4],使发动机在飞行过程中爆炸解体。现有的粘弹性本构理论以及粘弹性断裂力学的结论,大多是在一定的理想边界条件假设下得到的。在推进剂裂纹燃烧问题的研究中,这些结论将经受固体火箭发动机燃烧室内苛刻条件的考验:高温、高压、持续烧蚀边界及其动态变化历程。从工程实践的需要来看,该问题的研究任务主要在于:揭示固体推进剂裂纹在对流燃烧条件下的扩展机制,建立燃烧室内的压力时间曲线;揭示固体推进剂裂纹在对流燃烧条件下失稳扩展诱导 DDT 的机制,建立 DDT 临界判据。近 20 年来,国内外学者对规范裂纹对流燃烧一维流场(或从二维出发的拟一维研究)、对流燃烧条件下裂纹的变形及扩展进行了初步的研究,但对强耦合内在实质的认识远未形成。

2 固体推进剂裂纹腔中火焰传播及对流燃烧流场

在这个问题的研究中,大都以规范的扁长六面体形空腔代替裂纹,并假定裂纹不变形、不扩展,腔中参数沿长度方向成一维分布。在此假设下,讨论裂纹的高 δ 、长 l 、腔内气体流速 v 、燃烧室压力 p 等参数对裂纹腔中流场及火焰传播的影响。

Kuo 等人在 1978 年^[2]进行初步计算研究指出:裂纹内存在压力峰值,该峰值随时间增大且向裂纹顶端推移,并使得裂纹内的气体流速 v 表现出双向行为。在火焰传播的初期,燃烧室内的压力高于裂纹内的压力,气体单向流入裂纹;中期,气体双向流动;末期,气体单向流出裂纹;在裂纹顶端气体流速为零;气体温度在火焰峰前降低。 δ 减小,裂纹中的压力梯度、火焰传播速度增大。值得重视的结论是裂纹顶端的压力历程,大致两个阶段:初始阶段,裂纹顶端受燃烧室压力率 $\dot{p}$ 控制缓慢增压;稍后第二阶段,在裂纹燃烧的情况下实现压力突升, $\dot{p}_{cr} \rightarrow \infty$; $\dot{p}$ 越大, δ 越小,压力突升所需时间越短, $\dot{p}_{cr}$ 越大。这就为裂纹动态扩展提供了可能的动力边界条件;另外,为大量分布的、暴露于燃烧表面的裂纹,在高压力率 $\dot{p}$ 燃烧时实现 DDT 过程提供了一个可能的诱导机制。Kuma 等在 1980 年^[1]发现在高 $\dot{p}$ 下,裂纹顶端出现超前点火。他们定义从压力波第一次到达裂纹顶端到裂纹顶端先于火焰峰到达而点火的时间为点火延迟,并指出: $\dot{p}$ 越高,裂纹顶端温度上升、热流加速越快,点火延迟越短。这种不连续的火焰传播方式很可能为 DDT 的出现作出显著贡献。他们提供的裂纹顶端的压力时间曲线上没有压力突升的现象。看来,裂纹顶端的压力突升和超前点火机制还需进行深入的研究。

1980 年, Kuma 等人进行了更详细的模拟和实验^[5],得出在裂纹中一点的压力历程大致分为初始增压段、缓慢上升段和降压段三个阶段,这主要是由裂纹腔体积增大、裂纹开口处烧蚀张开引起的。由于火焰的传播,实现初始增压所需的时间随 x 的增大而延长,增压率随之增大,且气流先于火焰峰到达裂纹顶端。火焰进入裂纹后开始加速传播, V_f 达到极值,而后减速至裂纹顶端为零; $\dot{p}$ 越高, V_f 就越大,火焰峰到达裂纹顶端所需时间就越短;裂纹高度 δ 越小,裂纹中压力极值和 V_f 极值就越大,但加速段 V_f 越小,使得火焰峰到达裂纹顶端所需时间延长;裂纹长度 l 越长,在归一长度坐标下裂纹各点上的 V_f 越大,火焰峰到达裂纹顶端所需时间越长。在给定 δ 、 l 、 $\dot{p}$ 时,将火焰传播在时刻 t 的相对位置拟合成四次多项式: $\frac{x(t)}{l} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4$ 。对 4 种固体推进剂进行了研究,均得到相同的规律。

李桂等人在 1990 年^[6]用理论计算和实验给出了恒定燃烧室压力 p 下裂纹腔内的火焰传播和流场,指出: δ 越小或 $\dot{p}$ 越大, V_f 极值就越大,且 δ 的影响相对较大;当给定 $\dot{p}$ 时, V_f 随温度的升高而增大。他们定义火焰在裂纹开口外侧燃烧到火焰进入裂纹所需的时间为火焰渗

透时间,指出: δ 增大或 p 增大,均会使该渗透时间缩短,并进一步得出结论:火焰渗透与传播的动力是压力梯度和温度梯度。

对于两端开口的裂纹,已有学者对其火焰传播和一维流场进行了较详细的研究,在此不再赘述。固体推进剂的热传导性质将直接影响裂纹腔内火焰传播和流场特性。Crescitelli 等人在 1981 年^[7]较详细地讨论了 PMMA 和 PS 在不同填充物、不同填充方式、不同填充比下,推进剂表面的火焰传播特性。

3 固体推进剂裂纹对流燃烧时的变形及扩展

在实际裂纹的对流燃烧过程中,裂纹的变形和扩展是不可忽视的。

Kuma 等人在 1981 年^[8]仍采用单端开口的规范裂纹,在小 δ 、高 $\dot{p}$ 、不考虑裂纹扩展的情况下研究了裂纹变形和火焰传播。他们假定裂纹中气相反应、推进剂变形是准静态的;基体材料是线粘弹性的、均匀的、等温的和各向同性的,研究了从火焰进入裂纹到火焰峰到达裂纹顶端这段时间内的裂纹变形、压力历程和气流速度分布。实验及理论计算均发现裂纹变形引起裂纹局部闭合,进而引起裂纹内的局部压力峰值。随着时间的推移和裂纹内压力的升高,闭合点和压力峰值向裂纹顶端移动,并有新的闭合点和压力峰值出现和移动;且由于裂纹顶端的压力积聚,使得裂纹顶端的变形较大,这也为裂纹扩展提供了动力。在往后,由于裂纹腔内的燃气产生、压力进一步升高,超过燃烧室压力,使裂纹内的局部闭合点消失,压力分布趋于均匀。他们强调:燃烧室的增压、裂纹对流燃烧与裂纹体变形之间的耦合是十分重要的,特别是在小 δ 、高 $\dot{p}$ 的情况下。但他们对耦合的考虑尚欠妥当,提供的裂纹变形和气体流速的数值结果尚不能很好说明裂纹中局部闭合点的存在。最后指出:裂纹腔中的局部闭合与压力峰值的存在可能导致 DDT 过程;一维流场假设在裂纹顶端不适用。Smirnov 和 Dimitrienko 在 1992 年^[9]模拟出了相似的流场和火焰传播特性,并指出裂纹对流燃烧是一个自持燃烧过程。

Kuo 等人在 1987 年^[3]用推进剂 AP/HTPB (73/27) (粒度 $200\mu\text{m}$) 预制一个楔形裂纹进行了实验研究,为固体推进剂单一裂纹对流燃烧的四种典型模式提供了清晰的有说服力的照片:(1) 当 $\dot{p} < 1\text{GPa/s}$ 时,裂纹顶端的位移仅由表面烧蚀引起,没有力学破坏;(2) $\dot{p}$ 在 $1.4 \sim 15\text{GPa/s}$ 之间,裂纹沿初始方向扩展——这就是裂纹单向扩展模式,裂纹顶端处的增压率及压力峰值比其余地方突出地高;3) 当 $\dot{p} > 30\text{GPa/s}$ 时,裂纹以多个分支在不同的方向上辐射状扩展——这就是裂纹的多向分支扩展模式;4) 当燃烧室突然增压,裂纹扩展在主分支上伴随有局部多分支——这就是裂纹的混合扩展模式。他们最后指出:燃烧与断裂的耦合很可能导致 DDT 过程。

Griffiths 等人在 1992 年^[10]用自相似模型,在忽略断裂强度准则、将裂纹扩展速度视为恒定的可控输入参数且远小于固相波速、考虑一维等温流与裂纹表面二维弹性变形间耦合的情况下,对楔形裂纹单向扩展模式各参数的关系进行了较详细的讨论。自相似模型即是认为裂纹腔中参数的分布不取决于 x 正向的绝对位置,而取决于其相对位置 x/l ,并依此概念对燃烧速度、压力、气流速度、裂纹扩展速度、火焰传播速度、裂纹张度等进行重新定义。显然这是对问题的一种线性考虑,就火焰传播而言,这与 Kumar 等人^[5]拟合的火焰传播相对位置的时间函数在概念上是一致的。在裂纹表面无燃烧的情况下:(1) 在给定裂纹扩展速度时,裂纹腔中的压力随相对位置的增加而降低,裂纹扩展速度和燃烧室压力越大,裂纹腔中压力梯

度越大, 裂纹顶端的张度由推进剂内的应力维持, 相反, 在裂纹扩展速度和燃烧室压力较低时, 气流必须充分透入裂纹以维持裂纹的扩展; (2) 气流在裂纹顶端的低压区加速, 且气流速度随裂纹扩展速度的增加而增大, 在裂纹顶端气流速度与裂纹扩展速度等值同向; (3) 裂纹各点上对开口处的相对张度沿 x 正向减小, 裂纹扩展速度和燃烧室压力越大, 裂纹顶端越加尖锐狭窄。在裂纹表面有燃烧的情况下: (1) 燃烧室压力越高和裂纹对流燃烧越充分, 裂纹扩展速度就越大, 即燃烧室压力和裂纹对流燃烧均可提供裂纹扩展的动力; (2) 裂纹腔中存在压力峰值, 气流呈双向流动; (3) 由于燃烧的发展和压力峰值的形成, 裂纹张度在裂纹中形成一个峰值, 在给定裂纹扩展速度时, 燃烧越充分裂纹顶端就越钝。这些现象和结论再次说明裂纹的变形和扩展与裂纹对流燃烧之间是强耦合的, 但他们对强耦合的考虑是极其理想的和简化的。他们最后提醒注意在燃烧过程中固体推进剂模量的变化, 它将在较大范围内影响裂纹的扩展性质。

对多裂纹的研究还处在尝试阶段。Langhenry 在 1984 年^[11]讨论了固体推进剂应变对燃速的影响, 他认为推进剂药柱应变引起裂纹和空穴为燃烧提供了额外的燃烧面积, 进而引起燃速的增加, 并得出结论: 在一个应变阈值和压力阈值之上, 随应变的增加, 燃速迅速增加。

4 讨论及结论

目前学术界在固体推进剂裂纹对流燃烧扩展的研究方面所取得的进展, 包括对单一裂纹在对流燃烧条件下扩展的几种典型模式有了直观形象的感性认识, 并对控制条件有了大致了解; 对裂纹对流燃烧与裂纹变形扩展之间强耦合的存在有了共识, 并开始了对耦合实质的试探性研究, 但尚无较为清晰的认识; 迫切需要在非燃条件下对动态载荷作用下的固体推进剂裂纹动力扩展进行研究, 对粘弹性断裂力学的研究提出了新的要求; 对于不变形不扩展的规范裂纹腔内的拟一维流场和火焰传播的研究讨论相对充分一些, 对裂纹顶端处流场还需作深入的探讨, 它是提供裂纹扩展的比较重要的动力因素; 对固体推进剂大量分布裂纹对流燃烧扩展的研究尚未起步; 学者们已经认识到固体推进剂裂纹对流燃烧失稳扩展及推进剂损伤极可能诱导 DDT 过程^[1~4,8], 但尚未将其拟为课题进行正面的研究。

参 考 文 献

- 1 Kumar M, Kuo K K. Ignition of solid propellant crack tip under rapid pressurization. AIAA Journal, 1980, 18 (7)
- 2 Kuo K K, Chen A T and Davice T R. Convective burning in solid propellant cracks, AIAA Journal, 1978, 16 (6)
- 3 Kuo K K, Moreci J, Mantzaras J. Different modes of crack propagation in burning solid propellant. , Journal of Propulsion and Power, 1987, 3(1)
- 4 Bernecker R R. The deflagration-to-detonation transition process for high-energy Propellant-a review, AIAA Journal, 1986, 24(1)
- 5 Kumar M S, Kovacic S M and Kuo. K, K Flame propagation and combustion processes in solid propellant cracks. AIAA Journal, 1981, 19(5), AIAA80-1206R
- 6 李 桂, 徐向东. 固体火箭发动机药柱裂纹燃烧的实验研究. 推进技术, 1990(2)
- 7 Crescitell S. Influence of solid phase thermal properties on flame spread over polymers. Combustion Science

碰到加力室防振屏壁面,可能烧坏防振屏。而稳定器尾缘壁面附近的平均燃油浓度很低,不利于火焰的传播。

5 结 论

本文对轨道扩散法进行了改进,并编制了较通用的加力燃烧室浓度计算程序和结果显示软件。对两种真实加力燃烧室不同喷油和稳定器布置下的燃油浓度分布进行了计算和分析。

应用该方法和计算程序,可获得两态燃油比例,最大油气比,穿透深度,浓度分布均匀性和各区平均油气比等详细数据。为加力室的设计和调节,避免加力筒体过热,避免振荡燃烧,提高燃烧效率提供了有力的辅助手段。

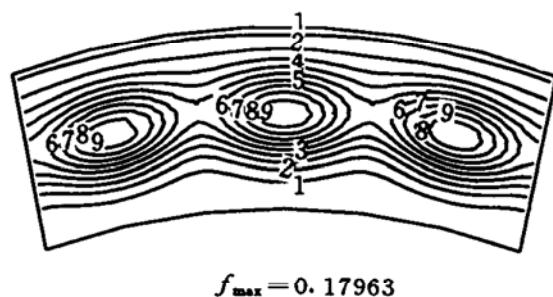


Fig. 8 Contour of fuel/air ratio on cross section

参 考 文 献

- 1 杨茂林. 加力燃烧室浓度场计算方法研究. 中国航空学会第八届燃烧及传热传质学术研讨会, 1992
- 2 覃洪波. 带辐射式稳定器的加力燃烧室燃油浓度分布计算. 中国航空学会第八届燃烧及传热传质学术研讨会, 1992

(上接第 44 页)

- and Technology, 1981, 27
- 8 Kumar M and Kuo K K. Effect of deformation on flame spreading and combustion in propellant cracks. AIAA Journal, 1981(12), AIAA 81-4325
- 9 Smirnov N N, Dimitrienko I D. Convective combustion of porous compressible propellants. Combustion and flame, 1992(89)
- 10 Griffiths S K, Nilon R, H. Similarity analysis of fracture growth and flame spread in deformable solid propellants. Combustion and Flame, 1992(88)
- 11 Laghenry M. T. 魏爱良译. 复合固体推进剂应变对燃速的直接影响. 国外固体火箭技术, 1986(2)