

高速粒子对固冲发动机绝热层的影响^{*}

李理¹, 杨涛¹, 姜伟²

(1 国防科技大学航天与材料工程学院, 长沙 410073; 2 武汉军械士官学校, 武汉 430075)

摘要: 固体火箭冲压发动机推进剂中多加入了大量的金属颗粒。以铝颗粒为研究对象研究了颗粒相对冲压发动机绝热层的热增量影响, 分别对 30 μm 与 10 μm 的颗粒进行了数值模拟。数值模拟结果表明热增量的影响主要集中在进气道两侧。大颗粒引起的热增问题要远大于小颗粒。大颗粒由于惯性力的作用, 轴向碰壁位置较小颗粒更靠近下游喷管。颗粒对壁面的热增量影响同颗粒速度也有很大关系, 大量的液滴与壁面碰撞后破碎飞溅。由推进剂不完全燃烧产生的固相碳颗粒对发动机的冲蚀影响较小, 实际中可以忽略。

关键词: 冲压发动机; 颗粒相; 绝热层; 冲蚀

中图分类号: V435 **文献标志码:** A

The Effects of High-velocity Particles on Solid Ramjet Insulator

LI Li¹, YANG Tao¹, JIANG Wei²

(1 College of Aerospace and Material Engineering, NUDT, Changsha 410073, China;

2 Wuhan Ordnance N. C. O. School, Wuhan 430075, China)

Abstract: High energy particles are added in solid ramjet propellant in order to enhance specific pulse. It is argued the effect of particles on insulator in heat transfer and impingement erosion. The particle in this paper is aluminum particle. The particles of two different diameters were argued in this paper. The result shows that heat transfer has been enforced in inlet-downstream area, and large particles make more heat transfer. Lots of particles break up while impinging on the insulator. Carbon particles generated by incomplete propellant burning performs little effect on insulator ablation.

Keywords: insulator; ramjet; particle; erosion

0 引言

固体火箭发动机的推进剂中添加了大量可燃的金属颗粒, 如铝、镁等颗粒以提高发动机的比冲。同时, 燃气发生器中不完全燃烧的推进剂还会产生大量的碳颗粒。由于固冲发动机特殊的富氧环境使得这些可燃颗粒在发动机内部的燃烧及运动非常活跃。一方面, 固相颗粒高速碰撞发动机绝热层, 具有冲蚀效应; 另一方面, 在发动机的高温环境中, 部分可燃颗粒及其产物一般以液态形式存在, 同绝热层之间存在较大的温差。颗粒与壁面碰撞后, 部分颗粒会附在壁面上, 附壁后颗粒热量传导进入绝热层, 加速绝热层的物性变化过程, 使得绝热层更易失效。颗粒相的粒壁作用给发动机绝热层的热防护设计带来了新的课题。

西北工业大学针对过载条件下火箭发动机的烧蚀进行了研究^[1-3]。研究中对粒子流与壁面的热量

传递处理较为简单, 认为颗粒流带给绝热层的热增量是颗粒 70% 的动能转换为热能和由温度梯度产生的热量传递之和。

目前, 以冲压发动机为背景的可燃颗粒对绝热层的影响的研究仍然比较少。冲压发动机补燃室两相内流场与火箭发动机有很大不同, 颗粒运动规律也有较大差异, 颗粒在壁面的积聚碰撞呈现一种分布特征。因此需要对冲压发动机中颗粒相对绝热层的影响做相关研究。

1 物理模型

1.1 气相模型

补燃室中燃气方程写为如式所示的输运形式^[4]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j\phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma\phi\frac{\partial\phi}{\partial x_j}\right) + S\phi \quad (1)$$

气相湍流运动方程采用标准 $k-\epsilon$ 模型, 湍流燃烧采用 Eddy-Dispersion 涡团耗散模型。

* 收稿日期: 2011-02-28

作者简介: 李理(1983-), 男, 四川彭州人, 博士研究生, 研究方向: 固体火箭冲压发动机相关技术。

1.2 颗粒相模型

1.2.1 Al 颗粒的燃烧及运动

Al 颗粒在补燃室内部相当活跃。Al 粒子燃烧模型按照 Liang 等提出的模型加以简化^[6]。认为铝只与燃气中的 O₂ 发生反应生成 Al₂O₃。颗粒粒径变化规律由式(2)确定^[7]。

$$d^{1.8} = d_0^{1.8} = k\Delta t \quad (2)$$

其中: $k = 8.33 \times 10^{-5} R X_{\text{eff}}^{0.9} p^{0.27}$, p 为压力(psi), R 为气体常数, d 为模型中粒径(cm); X_{eff} 为氧气组分浓度。

以随机轨道模型模拟 Al 颗粒运动, 颗粒的运动阻力按照式(3)计算。

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 1/6 Re_p^{2/3}) & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re \geq 1000 \end{cases} \quad (3)$$

1.2.2 粒壁作用分析

颗粒与壁面碰撞的作用方式是研究颗粒对绝热层热环境影响的关键问题。液态颗粒同壁面碰撞后, 颗粒形态及运动形式可能发生三种现象, 即飞溅、反弹和附壁沉积。

针对液滴撞壁后的运动形态判定, 一般通过一个无量纲数——韦伯数 We 来进行判断。韦伯数被定义为液滴惯性力和表面张力之比, 如式(4)所示。

$$We = \frac{\rho v_p^2 d_p}{\sigma} \quad (4)$$

颗粒撞壁后的运动形式是通过比较颗粒韦伯数与临界韦伯数 We_{cri} 来判断的。如表 1 所示, 其中 T_b 为液态颗粒的沸点。

表 1 颗粒运动形式判定准则

运动形式	We 与 We_{cri} 关系	T_w 与 T_b 关系
反弹	$We > We_{\text{cri}}$	$T_w > T_b$
飞溅	$We > We_{\text{cri}}$	$T_w < T_b$
沉积	$We < We_{\text{cri}}$	$T_w < T_b$

由于补燃室中绝热层温度基本无法达到 Al 及 Al₂O₃ 颗粒沸点温度。因此认为颗粒撞壁只产生飞溅和沉积两种现象。

We_{cri} 采用 Brazier-Smith 经验公式计算^[8-9], 如式(5)所示。

$$We_{\text{cri}} = \begin{cases} 2.5 \times 10^3 \left(\frac{\rho_p D_p \sigma_p}{\mu_p^2} \right)^{-0.2} & T_w < 1000\text{K} \\ 7.9 \times 10^{10} \left(\frac{\rho_p D_p \sigma_p}{\mu_p^2} \right)^{-1.4} & T_w > 1000\text{K} \end{cases} \quad (5)$$

飞溅液滴碰壁后的质量及运动速度参考文献[10]计算。

2 颗粒与壁面的热量传递

固相碳颗粒在低速流动下有强化壁面传热的作用^[5]。液相颗粒与壁面撞击后会同壁面发生热量交换, 强化绝热层传热, 使得壁面温升迅速。由于文中研究环境颗粒速度较高, 且与 Al 及 Al₂O₃ 颗粒相比, 碳颗粒比热较低。在此忽略碳颗粒的传热影响。

根据之前假设, 针对飞溅颗粒, 颗粒撞击引起的热增量由两部分组成, 一是由温度梯度引起的导热, 二是吸收部分颗粒损失的动能。在这里认为只有附着在表面的残留颗粒才产生了对壁面的导热, 绝热层只吸收反弹颗粒的动能损失。对于附着在绝热层表面的颗粒认为动能在碰撞过程中引起绝热层形变, 转化为机械能做功。由此可以得到附着飞溅颗粒引起的热增量如式(6)所示。以下标 0, 1 代表碰撞前后颗粒物理参数。

$$\Delta E = \Delta E_i + \Delta E_h = m_{p1} \frac{v_{p0}^2 - v_{p1}^2}{2} + (m_{p0} - m_{p1}) c_p (T_w - T_p) \quad (6)$$

因此在单位面积上, 由飞溅颗粒带来的热增量如式(7)所示。其中 A_w 为计算域中撞击单元的面积。

$$q_s = \frac{m_{p1} (v_{p0}^2 - v_{p1}^2) + 2c_p (m_{p0} - m_{p1}) (T_w - T_p)}{2A_w} \quad (7)$$

同理, 对于附着颗粒, 采用文献[1]的处理方法, 认为 70% 的动能转化为热量, 驻留表面。单一颗粒在单位面积上产生的热增量如式(8)所示。

$$q_d = \frac{c_p m_{p0} (T_w - T_p) + 0.35 \times m_{p0} v_0^2}{A_w} \quad (8)$$

由式(7)与式(8)可得单位面积上的热增量如式(9)所示, 即某一单元单位面积上的热量为所有冲击颗粒所产生热增量之和。

$$q = \sum_{i=1}^n q_s + \sum_{i=1}^m q_d \quad (9)$$

3 颗粒剥蚀

颗粒对绝热层的冲蚀可以记为如式(10)所示的函数。

$$Re = \sum \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_i} \quad (10)$$

其中: d_p 为颗粒粒径; α 为颗粒速度与撞击表面法向的夹角; v 为颗粒速度; A_i 为撞击区面积; $C(d_p)$ 、 $f(\alpha)$ 、 $b(v)$ 皆为无量纲函数。计算中主要参数参照文献[11]中的数据。角度函数 $f(\alpha)$ 为分段线性分布, 如式(11)所示。

$$f(\alpha) = \begin{cases} \alpha/20 & \alpha \in (0^\circ, 20^\circ) \\ 1 - (\alpha - 20)/100 & \alpha \in (20^\circ, 90^\circ) \end{cases} \quad (11)$$

假设碳颗粒与壁面撞击后沿壁面法向速度分量为原法向分量的 70%，切向分量大小不变。

4 计算结果分析

文中研究的冲压发动机进气道采用×型布局,进气道进气方向与发动机轴线路 45°夹角。计算区域为整体发动机的 1/4,如图 1 所示。Al 颗粒粒径为 10μm。燃气由燃气发生器经由 5 个进气孔进入补燃室,空燃比为 11。燃气中颗粒相的质量百分比为 50%,燃气总温 2100K,进口总压 0.9 MPa。

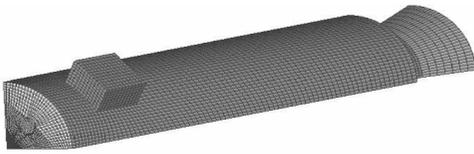


图 1 发动机及补燃室头部构型

4.1 热增量计算

液相颗粒对壁面的热增量计算结果如图 2 所示。颗粒对绝热层的热增量影响主要集中在进气道两侧的区域,特别是进气道中部以后位置是热增量非常严重的区域。对比两种颗粒的数据后进一步发现,热增量主要由飞溅颗粒产生,沉积颗粒带来的热增量远小于飞溅颗粒。而对于单一颗粒来看,由沉积颗粒带来的热增量明显高于飞溅颗粒。说明在补燃室的高速环境下颗粒动能较高,We 数较大碰撞后多产生飞溅颗粒。

由于颗粒粒径对于韦伯数有较大影响,颗粒粒径对于颗粒的运动规律也有着显著影响。为此,对粒径 $d_p = 30\mu\text{m}$ 的 Al 液滴进行了数值模拟。数值模拟结果如图 3 表明,粒径增大使得颗粒对于壁面传热量急剧增大。另一方面,在分布上,小颗粒由于惯性力较小,受进气道来流影响较大,使得颗粒大部分在进气道附近同壁面碰撞。而大颗粒则散布较大。

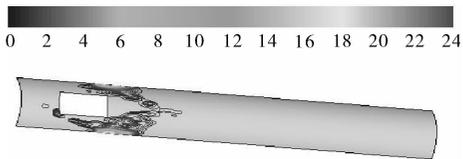


图 2 $d_p = 10 \mu\text{m}$ 颗粒壁面热增量分布

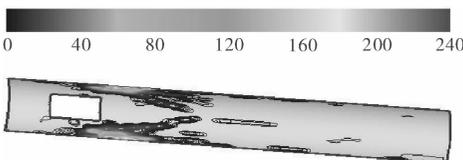


图 3 $d_p = 30 \mu\text{m}$ 颗粒壁面热增量

通过比较可得,无论液滴大小差异,液滴对补燃室绝热层的热强化作用主要在补燃室头部,进气道两侧的下流区域。这主要是受颗粒运动影响。由燃气发生器喷出的颗粒遇到进气道来流后,减速转弯向进气道两侧偏转。

如图 4 所示,为距离进气道中轴线平面周向 25°平面上的热增量与颗粒碰撞速度对比。从图中可以发现,粒子的高速并不一定导致高热增量。

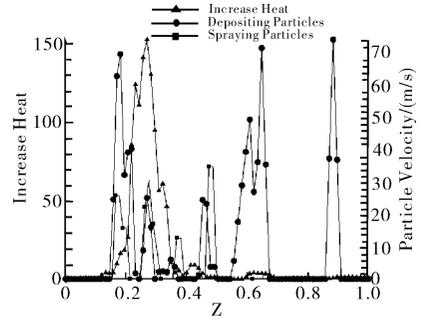


图 4 30μm 热增量与颗粒速度对比

对于飞溅颗粒,颗粒速度较大,则碰撞能量较高,颗粒撞壁后仅少量残留在绝热层上,因此由接触导热产生的热增量较小;而对于沉积颗粒,颗粒粒径较小,因此在沉积区域形成的热增量也不大。

4.2 颗粒剥蚀计算

同样,对 10 μm 与 30 μm 的颗粒引起绝热层的冲蚀进行了数值模拟。为了简化模型,未考虑不同位置上的温度差异对式(10)中的参数的影响,认为参数不变。

比较图 5 与图 6 可以得出,颗粒相产生的冲蚀率数值较小,并且呈现出一定的散布特性,在进气道下游的补燃室中部颗粒冲蚀较强。

大粒径颗粒与小粒径颗粒撞击所产生的破坏相差较大。大颗粒由于本身能量较高,因此撞击产生的破坏也较强。粒径较大的颗粒形成的冲击破坏的散布也较大。

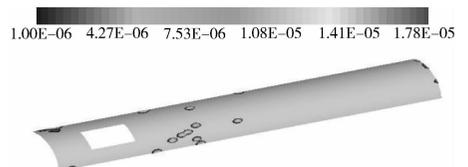


图 5 10 μm 颗粒冲蚀分布

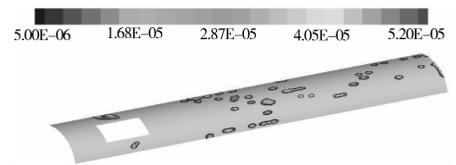


图 6 30 μm 颗粒冲蚀分布

5 结论

颗粒相对于固冲发动机绝热层的影响主要是由颗粒相与壁面碰撞产生的热增量,而由颗粒相所引起

的发动机烧蚀则比较小。

由颗粒相引起的热增量也集中在进气道两侧下游区域。这一区域在发动机中是燃气流与来流空气掺混的区域,流场较为复杂,存在涡旋及回流。受空气来流影响,颗粒相在掺混段减速转弯导致大量颗粒与临近壁面碰撞,由此导致热增量增加。

颗粒粒径大小同热增量大小有明显关系。颗粒越大,则热增越大。同时,热增效应同颗粒速度也有密切关系。因此,减轻发动机颗粒相的热增效应,可以通过调节进气道的进气角度,以此影响颗粒速度来实现。

推进剂不完全燃烧产生的固相碳颗粒总量不大,对绝热层的冲蚀效应并不明显。

参考文献:

- [1] 何国强,王国辉,蔡体敏. 高过载条件下固体发动机内流场与绝热层冲蚀研究[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(4): 4-8.
- [2] 何国强,王国辉,蔡体敏,等. 高过载条件下固体发动机内流场数值模拟[J]. 推进技术, 2002, 23(3): 4-8.
- [3] 武渊,何国强,乐发仁. 飞行过载对燃烧室化学反应流场影响[J]. 推进技术, 2007, 28(4): 341-345.

(上接第 110 页)

同的特点:曲线斜率最初比较大,但是随着炸药配比度的增大逐渐变小,这说明:1)在一定范围内,炸药配比度的增大对提高破片的初速很明显;2)当炸药配比度达到一定程度后,再增大炸药配比度对提高破片初速的效果就不太明显了。因此,在实际装药中要合理装配。另外,文中还根据试验数据,拟合了具有一定适用范围的破片初速和装药配比度的关系式为:

$$y = -18505 \exp(-x/0.37) + 1655 \quad (2)$$

式中: y 代表初速, x 代表炸药配比度, $x > 0, y > 0$ 。

通过对计算结果的分析,说明数值模拟结果与实验结果基本吻合,利用 LS-DYNA 软件对低附带毁伤战斗部的能量输出进行数值模拟的方法在工程实践上具有一定的预测作用。

3 结论和建议

1)试验结果证明通过调整炸药配比度可有效控制陶瓷球的初速,进而调节战斗部的能量输出。并由试验数据拟合了破片初速与装药配比度在一定条件下的关系式为: $y = -18505 \exp(-x/0.37) + 1655$,在文中的陶瓷低附带毁伤战斗部中,陶瓷球初速为 875m/s 时,参考图 5 可得炸药陶瓷配比度应在 1.2 左右为宜。

2)数值仿真结果与试验结果比较吻合,通过数值仿真可以方便的改变炸药与陶瓷球的质量配比,反映

- [4] 杨涛,方丁酉,唐乾刚. 火箭发动机燃烧原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2008.
- [5] 高翔,周劲松,骆仲泱,等. 气固两相流中颗粒运动强化器壁对流传热的机理[J]. 化工学报, 1998, 49(3): 294-302.
- [6] Liang Y, Beckstead M W. Numerical simulation of quasi-steady, single aluminum particle combustion in air[C]//36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1998.
- [7] John C M. Buring aluminum particles inside a laboratory-scale SRM[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(3): 631-640.
- [8] 贺征,郜冶,顾璇. 液滴与壁面碰撞模型研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(3): 267-270.
- [9] 贺征,顾璇,郜冶. SRM 两相内流场模型计算[J]. 推进技术, 2007, 28(6): 595-598.
- [10] Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C. Droplet-wall collisions; Experimental studies of the deformation and breakup process[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(2): 151-173.
- [11] Edwards J K, McLauri B S, Shirazi S A. Evaluation of alternative pipe bend fittings in erosive service[C]//ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2000.

初速变化规律,这对今后开展类似方面的研究具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 陈永新. 美国发展低附带毁伤战斗部技术[C]//2007 年战斗部与毁伤效率专业委员会第十届学术年会论文集, 2007: 21-24.
- [2] 刘素梅,王中,杨彩宁,等. 美国研制低附带毁伤 DIME 弹药[J]. 飞航导弹, 2009(5): 41-43.
- [3] Michael Sirak. US reveal urban warfare munitions[J]. Jane's Defence Weekly, 2005, 42(14)
- [4] 黄良钊,张安平. Al_2O_3 陶瓷的动态力学性能研究[J]. 中国陶瓷, 1999, 35(1): 13-15.
- [5] 肖汉宁,高朋召. 高性能结构陶瓷及其应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [6] 陈智刚,赵太勇,侯秀成. 爆炸及其终点效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [7] 谭多望,王广军,龚曼青,等. 球形钨合金破片空气阻力系数实验研究[J]. 高压物理学报, 2007, 21(3): 231-236.
- [8] 马永忠,李其祥,杨光. 对弹丸破片速度衰减规律的探讨[J]. 弹箭与制导学报, 2000, 20(3): 59-44.
- [9] 时党勇,李裕春. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 8-11.
- [10] Dr Brian Gladman. LS-DYNA keyword user's manual [M]. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2003.