

含铝复合推进剂燃速计算研究

国防科学技术大学 刘德辉* 彭培根

【摘要】 本文专门探讨了利用 PEM 模型计算含铝复合推进剂的燃速和压强指数。文中提出一种确定假想推进剂配方的新方法,并以此为基础建立了一个扩展和改进的 PEM 模型,利用该模型计算了含铝推进剂的燃速和压强指数。

关键词: 固体推进剂 燃烧模型 燃速预测 铝粉

R. L. Glick 等人的总体模型^[1,2] (称为 PEM 模型) 是目前公认的能较真实地描述复合推进剂燃烧过程的模型。但是,原始 PEM 模型仅适合于不含铝粉的推进剂,而实际所用的复合推进剂多数都是含铝的,为此,本文专门研究了如何将它运用于含铝推进剂的燃速模拟计算。

1 推进剂燃速计算的基本原理

Glick 为实际推进剂燃面上的每一个氧化剂粒子都与燃料表面某部分有效的燃料相缔合,因此,可把燃面看成成对的多分散氧化剂粒子/燃料表面的随机排列^[1]。若设想把具有相同粒径和周围物质的氧化剂/燃料表面对重新排列在一起的话,那么,具有相同粒径和周围物质的所有对子都是相邻的,它们构成一种假想的推进剂(pseudopropellant),因此,推进剂的燃面可以重排成一系列假想推进剂的集合,于是推进剂燃面的总质量流量便可从全部假想推进剂质量流量的加和而求得,以此为基础,Glick 提出了计算推进剂平均线燃速 $\bar{r}$ 的统计求和公式^[1]:

$$\bar{r} = \rho_{ox}^{-1} \int (\bar{m}_D^* / \xi_D^*) F_{ox} dD \quad (1)$$

式中 ρ_{ox} 、 D 和 F_{ox} 分别是氧化剂的密度,粒径和粒径分布函数^[1],而 $\bar{m}_D^*$ 和 ξ_D^* 却分别是氧化剂粒径在 $D-D+dD$ 的假想推进剂的平均质量流量和假想推进剂中氧化剂的体积分数。

若以 α_o^* 和 ρ_o^* 分别表示假想推进剂中氧化剂的质量分数和假想推进剂密度的话,那么当给定氧化剂的粒径 D 时,由文献[1]中的相应公式可求出 α_o^* 、 ξ_D^* 和 ρ_o^* 的值,于是,无铝假想推进剂中粘合剂的质量分数 α_i^* ($\alpha_i^* = 1.0 - \alpha_o^*$) 也可求得。在假想推进剂的配方等参数(α_o^* 、 α_i^* 、 ρ_o^* 、 D 和 ρ_{ox} 等) 已知的情况下,便可选择一种燃烧模型计算 $\bar{m}_D^*$,因此,对式(1)进行数值积分,便可得到 $\bar{r}$ 。由于 $\bar{m}_D^*$ 与压力有关^[1,2],于是由不同压力下的 $\bar{r}$ 便可求得燃速压强指数的值。

对含铝推进剂来说,要想利用原始 PEM 的公式计算燃速 $\bar{r}$,必须解决两个问题:一是铝粉对燃面能量的影响,二是如何确定假想推进剂中铝粉的质量分数 α_{Al}^* 。为此,本文专门研究了如何更合理地确定 α_{Al}^* 的问题。

$\alpha = 0^\circ$ 内壁 外壁

由于实际推进剂中铝粉是比较均匀地分布在粘合剂之中的,于是可以设想将铝粉和粘合剂系统构成一个新的粘合剂体系,那么氧化剂粒子便和周围的这种新的粘合剂构成氧化剂/燃

料表面对,从而原始 PEM 模型的公式都可应用到含铝推进剂的燃烧模拟之中,但在计算各参数时,原来粘合剂的密度 ρ_f 应换成新的粘合剂的密度 ρ_F 。 ρ_F 可由下式求得:

$$\rho_F = \text{新的粘合剂的质量} / \text{新的粘合剂的体积} = (\alpha_f + \alpha_{Al}) / (\alpha_f / \rho_f + \alpha_{Al} / \rho_{Al})$$

为了确定 α_{Al}^* 和 α_f^* , 设假想推进剂中粘合剂和铝粉的体积分数分别是 ξ_f^* 和 ξ_{Al}^* , 于是有: $\alpha_f^* + \alpha_{Al}^* + \alpha_D^* = 1.0$, $\xi_f^* + \xi_{Al}^* + \xi_D^* = 1.0$ 。记 $A_1 = 1.0 - \alpha_D^*$, $A_2 = 1.0 - \xi_D^*$, $A_3 = \alpha_D^* / \rho_{Al} + A_4$, $A_4 = A_1 / \rho_f$, $A_5 = 1.0 / \rho_{Al} - 1.0 / \rho_f$, 则上述式子可化为: $\alpha_f^* = A_1 - \alpha_{Al}^*$, $\alpha_{Al}^* = (A_2 A_3 - A_4) / (A_5 (1 - A_2))$ 。于是对含铝推进剂, 只需通过用 ρ_F 替代原始 PEM 计算公式中的 ρ_f , 便可算出 α_D^* , ξ_D^* 以及 ρ_D^* 等参数, 进一步可由本文所建立的公式求出 $A_1 - A_5$ 以及 α_{Al}^* 和 α_f^* 的值, 于是含铝假想推进剂的配方 ($\alpha_f^* / \alpha_{Al}^* / \alpha_D^*$) 就已确定, 从而可算出 $\bar{m}_D^*$ 和推进剂燃速 $\bar{r}$ 的值来。

为了检验以上观点, 将原始 PEM 模型计算燃速的基本原理和确定 α_{Al}^* 、 α_f^* 的方法结合起来, 并选择复合火焰燃烧模型^[4] 计算 $\bar{m}_D^*$ (计算原理详见文献[4]), 由此而建立了一个扩展和改进的 PEM 模型, 并利用该模型计算了复合推进剂的燃速和压强指数。

2 计算结果与讨论

2.1 含铝推进剂燃速计算结果

文献[3]中报导了 Miller 等人共 19 个配方的 AP/Al/HTPB 推进剂的燃速实验结果, 由于这些推进剂反映了氧化剂含量, 粒径及其粒径分布对推进剂燃速的影响, 因此, 本文利用这些数据来检验作者所建立的扩展和改进的 PEM 模型。

计算时氧化剂粒径变化的步长值对二级配和三级配氧化剂分别是 $3.7\mu\text{m}$ 和 $3.2\mu\text{m}$ 。积分开始和停止时氧化剂的粒径分别取步长值和 $550.0\mu\text{m}$, 计算压力为 6.08, 6.48, 6.89, 7.30 和 7.70MPa。计算中所用参数同文献[5]。由于本文考虑铝粉对燃面能量的影响同热沉 PEM

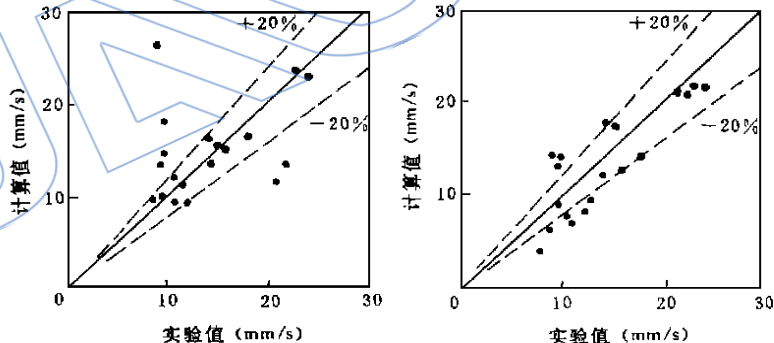


图 1 燃速计算值与 Miller 实验值的比较 (70/12/18: AP/HTPB/Al 6.89MPa)

相同, 因此, 计算结果可以同热沉 PEM 的计算结果互相比较。图 1 和图 2 给出了计算结果与实验结果的对比 (a. 本文计算; b. Renie 等人计算结果)。由图可知, 尽管本文对燃速计算的最大误差稍大于热沉 PEM 对燃速计算的最大误差, 但本文的方法却能使燃速和压强指数的计算都有 63% 的数据的计算误差小于 20%, 而热沉 PEM 却只能使燃速和压强指数的计算分别使 47% 和 32% 的数据的误差小于 20%^[3], 这表明同热沉 PEM 模型相比, 本文的方法可使更多的燃速和压强指数的计算值与实验值更加接近。由文献[5]可知, 对无铝推进剂的燃速和压强指数计算而言, 本文的方法并不优于热沉 PEM。由于无铝和含铝推进剂燃速计算时参数的数据并未改变, 因此产生上述变化的原因作者认为主要在于 α_{Al}^* 的处理方法。

2.2 α_{li}^* 处理方法的合理性探讨

对无铝推进剂 Glick 已经证实^[1] α_w^* 随 D 的增加而增加, 而 α_f^* 却随 D 的增加而减小, 这是因为由几何学知识可知, 在氧化剂粒子分布中细粒子相应地比大粒子有更多粘合剂相缔合, 因此, 由细粒子氧化剂所构成的假想推进剂中粘合剂所占的质量分数就较多。对含铝推进剂而言, 本文的计算表明 α_w^* 、 α_f^* 的上述变化规律仍然存在, 图 3 给出了典型的变化趋势

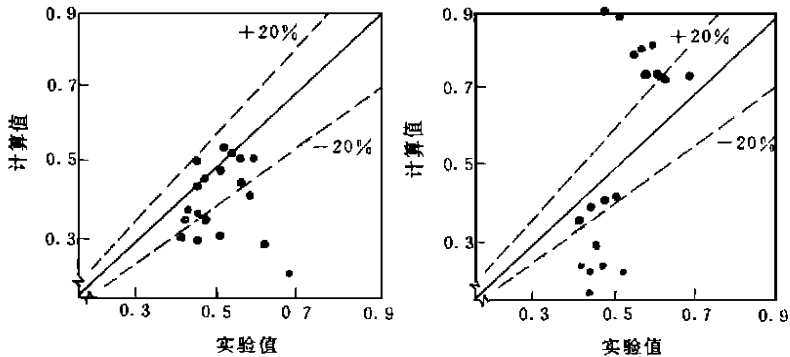


图 2 压强指数计算值与 Miller 实验值的比较

图。由于复合推进剂制造时的混合工艺实质上是将固体组分均匀地分散到液体组分之中, 因此, 推进剂中的铝粉是均匀地分布于粘合剂之中的, 于是由细粒子氧化剂所构成的假想推进剂中铝粉所占的质量分数也较多, 亦即 α_{li}^* 和 α_f^* 随 D 的变化规律是类似的。本文的计算结果证实了这一分析(见图 3), 这说明本文对 α_{li}^* 的处理是合理的, 也是比较符合实际的。

另一方面, 若按照 Renie 的观点假设每种假想推进剂中的 α_{li}^* 都相等的话, 那么由于氧化剂粒径越小, 由它所构成的假想推进剂中的 α_f^* 就越大, 因此在这些粘合剂中铝粉所占的百分含量就越多, 这表明铝粉在粘合剂中存在一种非均匀分布, 这与实际的铝粉在粘合剂中是基本均匀分布的相矛盾, 因此, Renie 对 α_{li}^* 的处理是欠恰当的。正因为如此, 对含铝推进剂的燃速和压强指数计算而言, 与热沉 PEM 相比, 本文的方法可使更多的计算值与实验值接近。

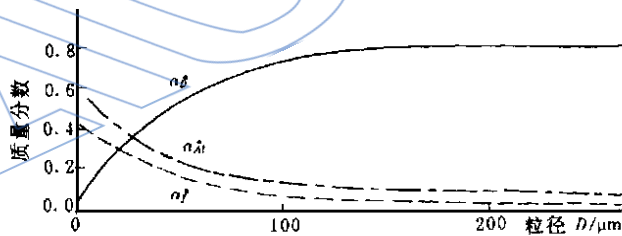


图 3 α_w^* 、 α_{li}^* 和 α_f^* 与氧化剂粒径 D 关系

分布的相矛盾, 因此, Renie 对 α_{li}^* 的处理是欠恰当的。正因为如此, 对含铝推进剂的燃速和压强指数计算而言, 与热沉 PEM 相比, 本文的方法可使更多的计算值与实验值接近。

(1) 本文建立了一个扩展和改进的 PEM 燃烧模型, 在该模型中采用了一种新的确定含铝假想推进剂配方的方法, 分析表明这种方法是合理的。

(2) 利用建立的燃烧模型计算了多种推进剂的燃速和压强指数, 结果表明对含铝 AP/HTPB 推进剂来说, 同 Renie 等人的热沉 PEM 相比, 本模型可使更多的计算值与实验值接近。

参 考 文 献

- 1 Glick R L. Steady-state Combustion of Nonmetalized Composite Solid Propellant. AD-A019674, 1975
- 2 Glick R L, Condon J A. Statistical Analysis of Polydisperse Heterogeneous Propellant Combustion: Steady State. Proc. of 13th JANNAF Combustion Meeting, CPIA publication 281, 1976, 11: 313
- 3 Renie J P, Osborn J R. Combustion Modeling of Aluminized Propellants. AIAA Paper 79- 1131
- 4 彭培根, 刘德辉. 高氯酸铵/ 硝酸推进剂燃烧模拟. 推进技术, 1990, (4): 63
- 5 刘德辉. 高氯酸铵/ 硝酸复合固体推进剂燃烧模拟计算研究. 国防科技大学, 1989

fact, the effects of these coefficients and g expressions on reaction rate and temperature profiles are significant. This paper aims at providing optimal values of these coefficients and rational g expression. Numerical calculations were carried out for recirculating reacting flow behind a bluff-body burner. It is shown that C_R is given by $C_R = (\Delta T^* / 1000)^2 g^{1/2} / g_{\max}^{1/2} \ln(1 + 2g_{\max}^{1/2} / g^{1/2})$, C_{g1} is defined as $C_{g1} = 2 / \sigma_f$, C_{g2} is 2 in this prediction.

The prediction is in favourable agreement with the experimental measurements.

A CALCULATION RESEARCH ON BURNING RATE OF ALUMINIZED COMPOSITE PROPELLANT

Liu Dehui and Peng Peigen

(National University of Defense Technology)

ABSTRACT

A research has been completed by applying PEM model to combustion simulation of aluminized propellants. The effects of aluminium particles on the surface energy of the propellant are taken into consideration so simply as the heat sink PEM model of J. P. Renie et al, but a new method to determine the pseudopropellant's formulations is presented in this paper, thereby an extended and modified PEM model is developed. According to this model, the burning rates and pressure exponents of aluminized propellants are calculated. The results show that our model makes the calculated results of burning rates and pressure exponents more approach to their experimental data as compared with the heat sink PEM model of J. P. Renie et al.

DESIGN PRINCIPLE OF CHANGE-SPEED INVOLUTE CONICAL GEAR TRAIN

Shen Qian

(Nanjing Aeronautical Institute)

ABSTRACT

A theory of hobbing involute conical gears on a hobber with a horizontal feed motion is described in the light of the gear engagement principle. The relations among some important parameters of the imaginary rack-shaper cutter and the generated gear are analyzed, and the design method of a change-speed train mainly composed of intersected involute conical gears is considered in detail. It has many special advantages such as many speed degrees only with a few gears, adjustable gear clearance by changing position of the gear along with their axes respectively. Because in designing this kind of train it is very important how to minimize the volume and size and how to maximize the changeable speed degrees and the difference between the highest degree and the lowest degree. A practical method is provided to control some key parameters to reach these goals. The present theory is proved correct and the method is shown practical by tests of a sample change-speed train.

OPTIMAL TOOTH PROFILE MODIFICATION OF HELICAL GEARS FOR IMPROVING RESISTANCE TO SCUFFING

Fang Zongde and Shen Yunwen

(Northwestern Polytechnical University)

ABSTRACT

An approach is presented to increase scuffing load capacity of helical gears. Firstly, the flash temperature distribution on tooth is evaluated by using 3-D