

文章编号: 1000-8055(2023)12-2912-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210388

含铝固体复合推进剂颗粒团聚现象

秦文瑾¹, 邵 宇¹, 王利坡², 齐观超¹, 严 俊¹, 娄永春³, 赵 瑜³

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093;

2. 上海交通大学 密西根学院, 上海 200240;

3. 上海航天动力技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 含 Al 固体复合推进剂在燃烧过程中, 燃烧表面存在 Al 颗粒团聚现象, 其对火箭发动机性能产生重要影响。通过分子动力学算法建立固体复合推进剂三维颗粒微观模型, 实现了模拟三维空间内 AP 颗粒和 Al 颗粒的随机分布特征。并建立了颗粒的团聚模型, 分析研究 Al 颗粒在随机填充模型中的团聚现象, 得到了不同的临界分离距离下 Al 颗粒粒径分布规律, 并将之与实验数据进行对比, 最终总结出了合适的临界分离距离与 Al 颗粒直径的经验公式。然后总结出了 Al 颗粒在气固交界面发生团聚后粒径的分布规律, 设计了 Al 颗粒在气固交界面的 Rosin-Rammler 概率分布函数, 分析得到其均匀性系数与特征系数分别为 1.445 3 与 86.49, 可用于数值模拟计算固体燃料燃烧面退移过程中表面 Al 颗粒喷射的初始粒径。

关 键 词: 固体复合推进剂; 颗粒团聚; 分子动力学; 颗粒喷射; 固体火箭

中图分类号: V435

文献标志码: A

Agglomeration phenomenon of aluminized solid composite propellant particles

QIN Wenjin¹, SHAO Yu¹, WANG Lipo², QI Guanchao¹,

YAN Jun¹, LOU Yongchun³, ZHAO Yu³

(1. School of Mechanical Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University Joint Institute,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: During the combustion process of solid composite propellants containing Al, a phenomenon of Al particle agglomeration on the combustion surface was found to have a significant impact on the performance of rocket engines. A three-dimensional particle microscopic model of solid composite propellants was established by using molecular dynamics algorithms to simulate the random distribution characteristics of AP and Al particles in three-dimensional space. And a particle aggregation model was established to analyze and study the aggregation phenomenon of Al particles in the random filling model. The distribution patterns of Al particle size under different critical separation distances were obtained, and compared with experimental data. Finally, the appropriate empirical formula for critical separation distance and Al particle diameter was summarized. Then, the distribution law of Al particle size

收稿日期: 2021-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51506118)

作者简介: 秦文瑾(1981—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事先进燃烧技术研究。

引用格式: 秦文瑾, 邵宇, 王利坡, 等. 含铝固体复合推进剂颗粒团聚现象[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 2912-2918. QIN Wenjin, SHAO Yu, WANG Lipo, et al. Agglomeration phenomenon of aluminized solid composite propellant particles[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(12): 2912-2918.

after agglomeration at the gas-solid interface was summarized, and the Rosin Rammler probability distribution function of Al particles at the gas-solid interface was designed. The uniformity coefficient and characteristic coefficient were 1.445 3 and 86.49, respectively, through analysis, which can be used for numerical simulation to calculate the initial particle size of surface Al particle injection during the retreat process of solid fuel combustion surface.

Keywords: solid composite propellant; particle agglomeration; molecular dynamics; particle injection; solid rocket

固体复合推进剂是一种高填充比颗粒复合材料,由基体、大量的氧化剂颗粒和金属燃料颗粒构成。由于固体推进剂的燃烧性能,与推进剂中氧化剂颗粒和金属颗粒的尺寸以及在基体中分布的微观形态结构密切相关,因此,为了分析固体推进剂的微观结构对燃烧性能的影响,需要首先建立一个能够准确描述固体推进剂微观结构的颗粒随机填充模型^[1]。另外,鉴于固体推进剂燃烧过程中金属颗粒(如铝、硼等)的团聚现象对火箭发动机的性能有重大的影响,而金属颗粒团聚物形成的影响因素较多,比如:固体推进剂的燃速,金属颗粒团聚物在燃面的停留时间,气相环境的压强、温度等。因此开展对固体推进剂中团聚物的特性研究,探索降低铝颗粒团聚现象,具有重要的研究价值和科学意义。

鉴于金属铝粉的团聚现象对复合固体推进剂的能量特性和火箭发动机的工作安全产生巨大影响,研究者们针对铝的团聚现象开展了相关的研究工作。Crump 等^[2]发现提高环境温度会使得熔点较低(900 K)的金属铝受热熔化,撑氧化层形成形状不规则的联合体。随着气相环境温度的进一步提高及燃面退移的影响,联合体不断融合汇聚,最终形成球形液滴。刘鑫^[3]利用高速摄影机观测了 5 MPa 下推进剂燃面处铝粉的团聚过程,发现了铝颗粒堆积、聚集和团聚的三个阶段,并详细论述了团聚体液滴在气相中流动时相互接触融合的“二次融合”现象。自 20 世纪 60 年代以来,研究者提出了“口袋模型”来描述推进剂中氧化剂的空间分布对铝粉团聚的影响。例如,Knott 等^[4]将分子动力学算法运用到复合固体推进剂系统中,建立了固体推进剂的颗粒填充模型。Kochevets 等^[5]则在分子动力学的基础上引入了优化算法,大大提高了该方法的效率和实用性。Habu 等^[6]构建了复

合固体推进剂表面燃烧的铝团聚模型,他采用冷浸颗粒收集装置进行测量。Jackson 等^[7]对于完善随机填充模型提出了六种计算方法,并比较了不同方法的优缺点,基于这六种算法结合固体推进剂模拟了铝颗粒团聚现象。Widener、Price 等^[8-9]开展了铝颗粒在推进剂燃面处团聚行为研究,并对铝颗粒燃烧与团聚过程进行了详细介绍。Jackson 等^[10]采用随机填充理论对 AP 复合固体推进剂的各项异性特点提出了一种多尺度建模方法,并用此方法分析了不同固体颗粒间的相互作用。Melcher 等^[11]进行了复合固体推进剂在不同压强下铝颗粒团聚现象实验研究,利用高速相机对铝颗粒火焰直径进行测量,发现火焰直径会随着颗粒直径的减小而增大。Park、Najjar 等^[12-13]对固体推进剂的颗粒团聚现象以及离开燃面颗粒团聚物的粒径分布规律进行了研究,分析实验结果表明固体结构中铝颗粒的尺寸是发生团聚现象的重要因素,起始铝颗粒尺寸越小,团聚现象越明显;Suzuki 等^[14]通过调整推进剂燃速的大小,来研究推进剂铝颗粒团聚粒径范围。实验结果表明,燃速越大,团聚粒径越小;国内的赵银等^[15]计算了铝化 AP/HTPB(ammonium perchlorate/hydroxy-terminated polybutadiene)推进剂的燃速和压力指数。然而研究者针对铝在固体推进剂中的团聚现象的研究大都从宏观角度出发,探究铝的团聚机理和团聚特性分析,未对工业上常用的铝粉颗粒在复合固体推进中的建模及分布规律开展针对性的研究。

本文针通过构建含铝固体复合推进剂(aluminum/ammonium perchlorate/hydroxy-terminated polybutadiene, Al/AP/HTPB)三维颗粒微观模型,对固体复合推进剂颗粒团聚现象展开研究,探索颗粒团聚粒径分布规律,总结在同种填充率的情况下,合适的临界分离经验公式,并验证了该方

法的可行性与实用性,设计 Rosin-Rammler 概率密度分布函数,用以满足固体燃料燃烧面推移过程中燃面铝颗粒喷射的数值模拟计算初始粒径要求。

1 理论模型

1.1 颗粒随机填充模型

分子动力学算法^[16]是构建复合固体推进剂颗粒随机填充模型的常用填充方法。其基本原理是:初始时刻在计算域中随机布置一些点颗粒,然后对这些点颗粒赋予随机运动速度以及与粒径增长率。颗粒在计算域中不断运动、生长并发生碰撞,直至达到预先设定的填充率。

点颗粒初始位置和初始速度表示如下:

$$S(t) = [R_i(t), v_i(t)] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

这里 $R_i(t)$ 、 $v_i(t)$ 分别是 t 时刻颗粒的中心位置和移动速度。初始时刻颗粒的粒径为零,然后按照增长率 a_i 进行生长,这样颗粒在 t 时刻时,粒径为:

$$d_i(t) = a_i t \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,在颗粒随机填充过程中每个颗粒的状态由 R_i 、 v_i 和 d_i 共同决定。然后需要确定颗粒碰撞时间以及碰撞后速度状态。在计算碰撞时间时,需要找出最先发生碰撞的两个颗粒。对于计算域中的两个颗粒 i 和颗粒 j ,其状态分别为 (R_i, v_i, d_i) 和 (R_j, v_j, d_j) , 假设颗粒 i 和颗粒 j 经历 Δt 时间发生碰撞,则应满足以下方程:

$$|R + V(t + \Delta t)| = \left[\frac{(V_i + V_j)}{2} (t + \Delta t) \right] \quad (3)$$

其中 $R = R_i - R_j$ 和 $V = V_i - V_j$ 分别是颗粒 i 与颗粒 j 之间的相对位置和相对运动速度。由式(4)得到 Δt 的一元二次函数:

$$A\Delta t^2 + 2B\Delta t + C = 0 \quad (4)$$

从而得到颗粒发生碰撞的最短时间为:

$$\Delta t = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{A} \quad (5)$$

然后计算碰撞后两颗粒运动速度,颗粒碰撞需满足动量守恒和能量守恒原理:

$$m_i v_i + m_j v_j = m_i V_i + m_j V_j \quad (6)$$

$$m_i v_i^2 + m_j v_j^2 = m_i V_i^2 + m_j V_j^2 \quad (7)$$

其中 m 是颗粒质量,为了简化方程式,引入质量比参数 $\gamma = m_i/m_j$, 经过代数变化后得到碰撞后的速度表达式:

$$V_i = \frac{1}{1+\gamma} [2\gamma v_j + (1-\gamma)v_i] \quad (8)$$

$$V_j = \frac{1}{1+\gamma} [2\gamma v_i + (1-\gamma)v_j] \quad (9)$$

通过前面介绍的关于分子动力学的基本理论,可总结构建填充模型基本流程:首先确定颗粒大小、数量以及颗粒填充的体积分数,同时确定颗粒的初始位置和速度,然后找出首先发生碰撞的一对颗粒,计算颗粒发生碰撞后的速度并予以更新,同时判断计算域中的颗粒是否达到所要求的体积分数,如果达到要求的体积分数,则填充模型构建完毕,否则继续进行颗粒的碰撞和生长。

1.2 颗粒团聚模型

固体推进剂在火箭发动机内燃烧的时候,由于推进剂的燃烧不可避免地会有颗粒在燃面附近发生团聚,形成很多团聚体。本文对含铝的复合推进剂的颗粒团聚现象进行研究需基于推进剂微观结构特征。此时可根据不同推进剂的配方,利用分子动力学算法构建微观颗粒填充模型,得到其三维随机分布。

本文基于 Cohen 等^[17]的研究,根据构建的推进剂三维结构中铝颗粒的分布情况,分析在不同临界分离距离下铝颗粒的团聚行为。为便于分析团聚过程,提出以下假设:

1) 没有发生过团聚的颗粒相互间可以发生团聚形成团聚体,颗粒可以和其他团聚体发生团聚。

2) 两个不同团聚体间不能发生团聚。

3) 对每个铝颗粒进行标记,以便跟踪其变化。

对于任意两个铝球颗粒 (i, j) 有着各自的半径 r_i 、 r_j 和两个铝球颗粒的球心坐标 (x_i, y_i, z_i) 、 (x_j, y_j, z_j) , 同时定义两个铝球颗粒之间的距离 $S_{i,j}$ 为:

$$S_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} - r_i - r_j \quad (10)$$

如果两个铝球之间实际的距离 $S_{i,j}$ 小于设定的临界分离距离 S_d , 那么认为两个球体将会发生团聚。颗粒团聚流程图如图 1 所述。

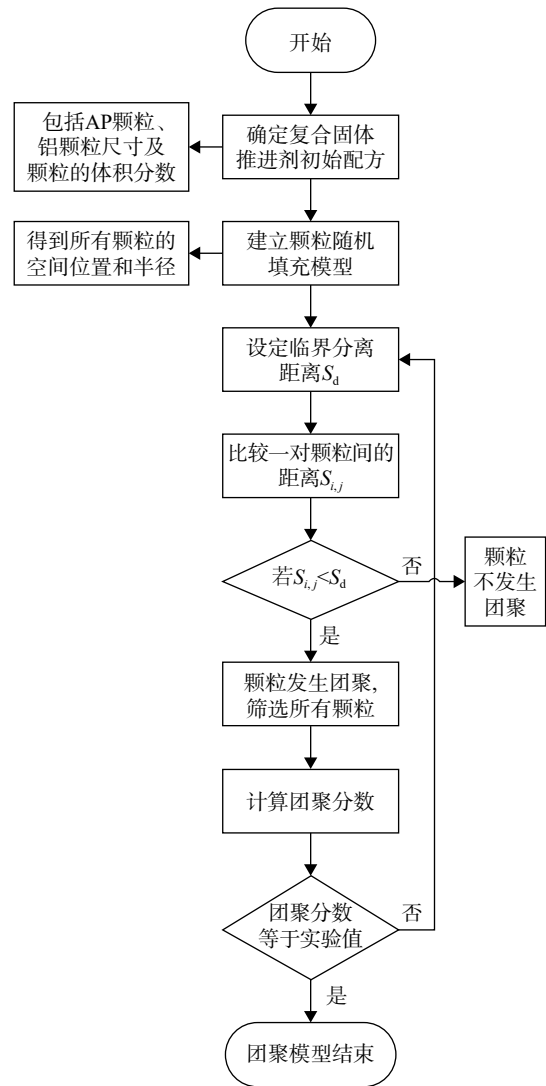


图 1 团聚流程图

Fig. 1 Flow chart of agglomeration

2 结果与讨论

2.1 三维微观模型的建立

文献 [18-19] 给出了固体推进剂常用配方, 本研究基于该推进剂配方, 复合推进剂 (Al/AP/HTPB) 的三维随机填充模型, 其中复合固体推进剂配方及组分信息如表 1 所示。同时本研究还对多种的配方进行三维微观颗粒建模, 其中 Al 和 AP 均是以颗粒状形式随机分布在推进剂中, AP 颗粒

和 Al 颗粒都是单一粒径, 在不同的推进剂配方中颗粒粒径存在差异, 但不同颗粒各自所占的质量分数是保持不变。首先以颗粒粒径为 29 μm 的 Al 和颗粒粒径为 328 μm 的 AP 为研究对象, 在此配方下用分子动力学算法在 1 mm $\times$ 1 mm $\times$ 1 mm 的正方体区域构建固体推进剂的三维填充模型, 使得该区域中填充 AP 颗粒和 Al 颗粒, 并达到预定的填充率, 如图 2 所示。图中小直径颗粒为 Al 颗粒, 大直径颗粒为 AP, 颗粒间相互交错, 随机无序地排列, 很好体现了填充的随机性。

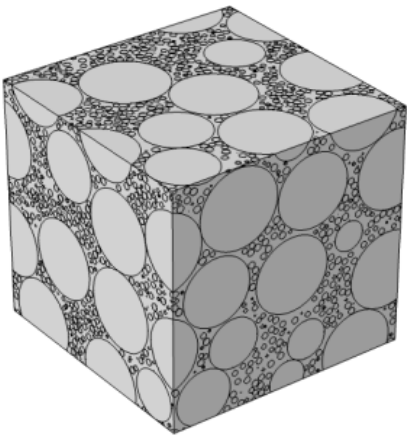


图 2 铝化 AP/HTPB 复合推进剂的随机填充模型

Fig. 2 Random filling model of aluminized AP/HTPB composite propellant

通过本次分子动力学算法计算出 AP 颗粒占的体积分数和质量分数分别为 62.40% 和 68.48%, Al 颗粒占的体积分数和质量分数分别为 11.60% 和 17.63%, 黏合剂 HTPB 占的体积分数和质量分数分别为 26.0% 和 13.89%, 计算数据与表 1 配方数据比较吻合。在保证体积分数不变的情况下, 按照工业上常用的 Al 颗粒粒径范围 (25~45 μm) 与 AP 颗粒粒径范围 (320~370 μm), 可设计十个不同的配方 [20-21]。在满足填充率要求下, 以相同的方法对这十个配方进行结构模型构建, 为颗粒团聚粒径研究提供基础。

2.2 颗粒团聚粒径分布

在预测颗粒团聚粒径分布规律时, 以 28.8 μm 的初始 Al 颗粒为例, 令临界分离距离 $S_d=8 \mu\text{m}$, Al 颗粒发生团聚现象后的粒径分布如图 3(a) 所示, 可以看到未发生团聚的颗粒数目占比最大, 质量分数达到了 29.98%, 发生团聚的颗粒粒径大部分分布在 40~80 μm 之间。随着发生团聚的颗粒微团粒径增大, 质量占比显著降低, 且分布逐

表 1 含铝复合推进剂配方组分

Table 1 Compositin of Al/AP/HTPB formulation

参数	HTPB	AP	Al
质量分数/%	14	68	18
密度/(g/cm ³)	0.95	1.95	2.70
体积分数/%	26.11	61.99	11.90

渐呈现稀疏化,说明形成的大颗粒团比较少。作为对比,若令临界分离距离 $S_d=40\text{ }\mu\text{m}$ 时,得到颗粒团粒径的质量分数分布见图3(b)。可以看到未发生团聚的颗粒数量显著降低,粒径分布比较稀疏,且大颗粒团的数目增多。通过图3结果可得,在临界分离距离 S_d 比较小的时候,形成的大尺寸颗粒团数目比较少,主要是因为发生团聚的颗粒数量较少。当随着临界分离距离的增加,原先没有发生团聚的颗粒相继发生团聚,团聚的颗粒数目增加,说明临界分离距离的选择对合理预测颗粒团聚结果至关重要。这样基于随机填充模型中 Al 颗粒的分布情况,根据不同的临界分离距离可计算得到颗粒粒径分布规律,并将之与实验数据进行对比,最终可总结出一个合适的临界分离距离随铝颗粒初始粒径变化的分布规律。

王志新^[19]对固体复合推进剂 Al 颗粒团聚进行了测量统计,本研究对此燃料配方进行了结构建模,并对 Al 颗粒团聚进行预测,通过调整临界分离距离,可获得比较吻合实验统计规律的团聚粒径分布,如图4所示。(实验测量发现存在颗粒

破碎现象,即一些团聚颗粒发生破碎造成有部分颗粒粒径小于初始粒径)在此基础上,保持总填充率以及 AP 颗粒和 Al 颗粒各自填充率不变的情况下,改变 Al 颗粒粒径构造另外九种固体燃料配方结构,其构建思路是保持总填充率不变的情况下,改变铝颗粒粒径的大小。通过对不同配方进行团聚模型计算,可找到合适的临界分离距离 S_d 随不同 Al 颗粒初始粒径变化的分布规律,见图5。通过总结可获得合适的临界分离距离的经验公式为 $S_d=0.5D_{Al}-6.5$ 。

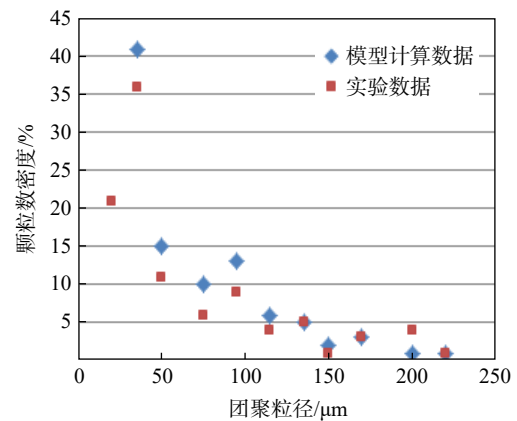
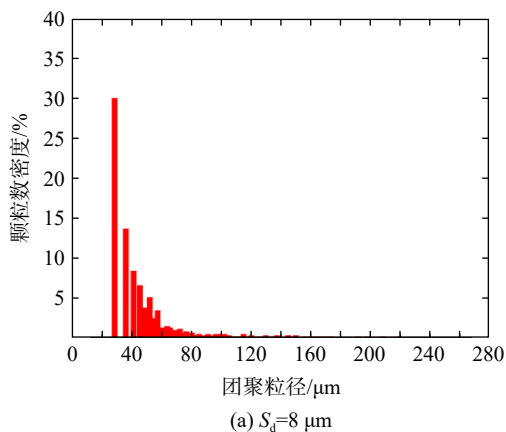
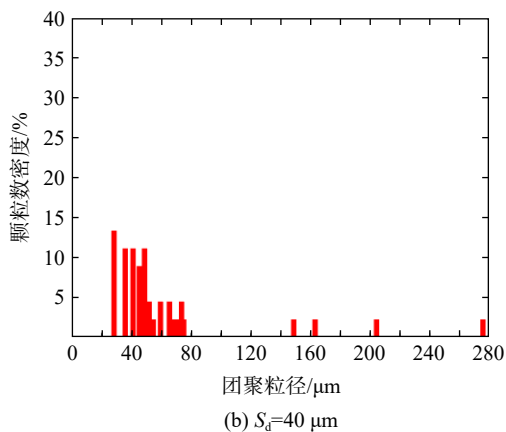


图4 $S_d=8\text{ }\mu\text{m}$ 时铝颗粒粒径分布与实验数据对比图

Fig. 4 Comparison of aluminum particle size distribution and experimental data when $S_d=8\text{ }\mu\text{m}$



(a) $S_d=8\text{ }\mu\text{m}$



(b) $S_d=40\text{ }\mu\text{m}$

图3 Al 颗粒粒径分布图

Fig. 3 Al particle size distribution diagram

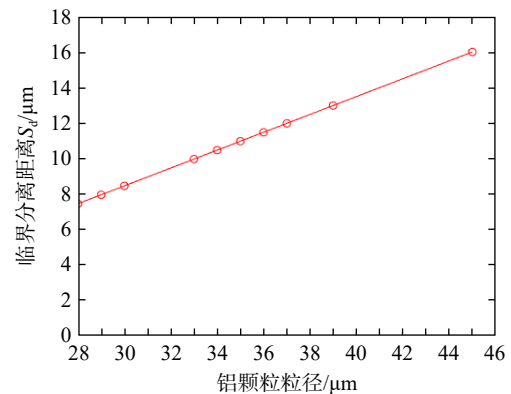


图5 临界分离距离随 Al 颗粒初始粒径变化分布规律

Fig. 5 Distribution of critical separation distance with the initial particle size of Al particles

2.3 颗粒喷射特性

根据固体复合推进剂随机填充模型以及 Al 颗粒的团聚模型,可预测出 Al 颗粒在气固交界面发生团聚后粒径的分布规律,进而为实现三元固体复合推进剂在燃烧中伴随燃面退移发生的 Al 颗粒喷射现象提供数值仿真计算边界条件。根据前文三元固体燃料配方总结出来的临界分

离距离 S_d 随 Al 颗粒粒径变化规律的经验公式可知, 当 Al 初始粒径为 $45\ \mu\text{m}$ 时, 临界分离距离 $S_d=16\ \mu\text{m}$, 此时 Al 颗粒发生团聚后的粒径分布规律如图 6 所示。从图中可以看出此分布近似符合罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)概率函数分布规律。

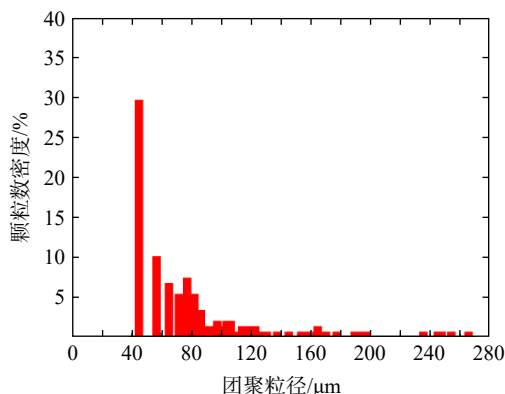


图 6 Al 颗粒粒径分布图

Fig. 6 Al particle size distribution diagram

Rosin-Rammler 分布函数的表达式为:

$$F(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{D_e}\right)^m\right] \quad (11)$$

式中 m 是均匀性系数, D_e 是特征系数, 根据具体问题设置不同参数值, 可获得满足实际需求的分布规律。若以 Rosin-Rammler 分布函数来刻画 Al 颗粒喷射初始粒径特征, 则需要根据团聚模型来确定均匀性系数和特征系数。此时 $F(d)$ 为 Al 颗粒粒径分布函数, d 成为颗粒粒径尺寸。由于 Al 颗粒粒径累积分布函数可改写为:

$$\ln\{-\ln[1 - F(d)]\} = m \ln d - m \ln D_e \quad (12)$$

由式(13)可以看出 $\ln\{-\ln[1 - F(d)]\}$ 是对 $\ln d$ 的线性函数, m 是直线的斜率, $-m \ln D_e$ 是与 $\ln\{-\ln[1 - F(d)]\}$ 轴的交点。根据图 6 中 Al 颗粒粒径分布数据进行线性拟合, 可获得图 7。

从该趋势线图中可以清晰地看到: 拟合直线的相关系数的平方为 $R^2=0.9918$, 回归系数的绝对值 R 为 0.9959, 线性回归良好, 其线性回归关系式为 $y = 1.4453x - 6.4419$, 即:

$$\ln\{-\ln[1 - F(d)]\} = 1.4453 \ln d - 6.4419 \quad (13)$$

该回归直线的斜率为 1.4453, 即所对应颗粒粒径的分布函数中 $m=1.4453$, 图中与纵坐标轴的截距为 -6.4419 , 即此时的 $-m \ln D_e = -6.4419$, 进一步求得 $D_e=86.49\ \mu\text{m}$ 。此时获得的累积分布函

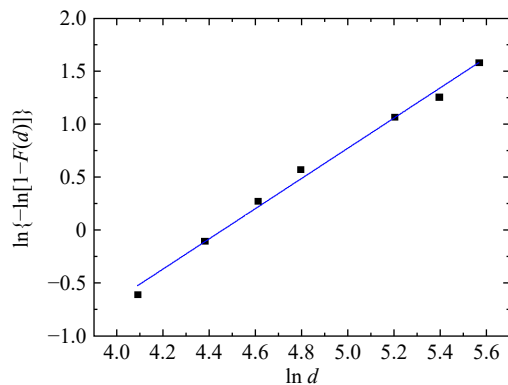


图 7 线性拟合

Fig. 7 Linear fit

数随颗粒粒径变化规律如图 8 所示。从图中可以看出, 团聚模型计算的颗粒粒径累积分布情况与 Rosin-Rammler 分布函数规律十分吻合, 即可以得到固体复合推进剂在气固交界面 Al 颗粒喷射粒径分布函数表达式:

$$F(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{86.49}\right)^{1.4453}\right] \quad (14)$$

这样在 Al 颗粒质量分数占 18%、粒径为 $45\ \mu\text{m}$, AP 颗粒质量分数占 68%、粒径为 $350\ \mu\text{m}$, HTPB 黏结剂质量分数占 14% 的配方情况下, 根据确定好的 Al 颗粒喷射初始粒径分布函数关系式, 可进行颗粒喷射两相流数值计算。

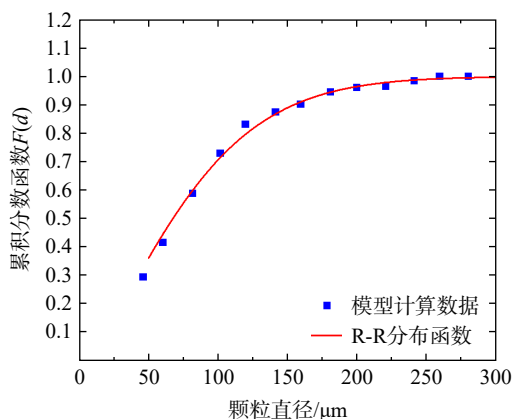


图 8 累积分布函数随颗粒粒径的变化规律

Fig. 8 Cumulative distribution function changes with particle size

3 结 论

在固体火箭推进剂中添加金属燃料, 一直是国内外的一个研究热点, 本文以 AP/HTPB 固体复合火箭推进剂为研究对象, 开展了对 Al 颗粒、

AP颗粒、HTPB黏结剂的三维随机填充结构建模以及Al颗粒团聚行为的研究,研究结论如下:

1) 以常用的一种推进剂配方为基础,用分子动力学算法建立了AP/HTPB复合固体推进剂的三维颗粒随机填充模型,实现了模拟三维空间内AP颗粒和Al颗粒的随机分布特征。

2) 建立颗粒的团聚模型,分析研究Al颗粒在随机填充模型中的团聚现象。通过与实验数据进行对比,获得不同初始粒径分布配方结构下的最合适临界分离距离,以及铝颗粒团聚粒径分布规律,并总结出临界分离距离随Al颗粒粒径变化的经验公式为 $S_d=0.5D_{Al}-6.5$ 。

3) 研究了Al颗粒在气固燃面喷射初始粒径特征。根据Al颗粒的团聚模型,总结Al颗粒在气固燃面团聚后的粒径分布规律,并以此规律设计了Al颗粒在气固交界面的Rosin-Rammler概率分布函数,分析得到其均匀性系数与特征系数1.4453与86.49,可用于数值模拟计算固体燃料燃烧面退移过程中表面铝颗粒喷射的初始粒径。

参考文献:

- [1] LUBACHEVSKY B D, STILLINGER F H. Geometric properties of random disk packings[J]. *Journal of Statistical Physics*, 1990, 60(5/6): 561-583.
- [2] CRUMP J E, PRENTICE J L, KRAEUTLE K J. Role of the scanning electron microscope in the study of solid propellant combustion: II behavior of metal additives[J]. *Combustion Science and Technology*, 1969, 1(3): 205-223.
- [3] 刘鑫. 基于光学拍摄技术的含铝固体推进剂燃面处铝团聚研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
LIU Xin. Investigation on aluminum agglomeration on the burning surface of solid propellants by optical observation technology[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)
- [4] KNOTT G M, JACKSON T L, BUCKMASTER J. Random packing of heterogeneous propellants[J]. *AIAA Journal*, 2001, 39(4): 678-686.
- [5] KOCHETS S, BUCKMASTER J, JACKSON T L, et al. Random packs and their use in modeling heterogeneous solid propellant combustion[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(4): 883-891.
- [6] HABU H, SHIMADA T, HASEGAWA H. Study on Al/Al₂O₃ agglomeration particle size distributions for solid propellants[R]. AIAA 2006-5249, 2006.
- [7] JACKSON T, NAJJAR F, BUCKMASTER J. An aluminum injection model based on random packs for solid propellant rocket motor simulations[R]. AIAA 2004-4042, 2004.
- [8] WIDENER J, LIANG Y, BECKSTEAD M. Aluminum combustion modeling in solid propellant environments[C]//35th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Los Angeles, US: AIAA, 1999: 577-592.
- [9] PRICE E W. Combustion of metalized propellants[J]. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1984, 90(9): 479-513.
- [10] JACKSON T L, BUCKMASTER J, CAMPBELL M, et al. The burning of 3D random-pack heterogeneous propellants[R]. Salt Lake City, US: 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2001.
- [11] MELCHER J C, KRIER H, BURTON R L. Burning aluminum particles inside a laboratory-scale solid rocket motor[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, 18(3): 631-640.
- [12] PARK K S, XIA G, HEISTER S D. Modeling two-phase flow with stochastic coalescence/breakage model[R]. AIAA 2010-6578, 2010.
- [13] NAJJAR F M, FERRY J P, HASELBACHER A, et al. Simulations of solid-propellant rockets: effects of aluminum droplet size distribution[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006, 43(6): 1258-1270.
- [14] SUZUKI S, CHIBA M. Combustion efficiency of aluminized propellant[C]//Proceedings of the 25th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Monterey, US: AIAA, 1989: 2309-2317.
- [15] 赵银, 田德余, 江瑜. 含铝复合固体推进剂的燃烧模拟计算[J]. *航空动力学报*, 1987, 2(2): 147-152, 188-189.
ZHAO Yin, TIAN Deyu, JIANG Yu. Modeling calculations for ap/ai/htpb composite solid propellant combustion[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1987, 2(2): 147-152, 188-189. (in Chinese)
- [16] 史佩, 李高春, 王玉峰, 等. 复合推进剂颗粒填充模型的分子动力学模拟方法[J]. *计算机与应用化学*, 2007, 24(5): 665-668.
SHI Pei, LI Gaochun, WANG Yufeng, et al. Generation of composite propellant filler packing model by molecular dynamics method[J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2007, 24(5): 665-668. (in Chinese)
- [17] COHEN N S. A pocket model for aluminum agglomeration in composite propellants[J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(5): 720-725.
- [18] VERMA S, RAMAKRISHNA P A. Effect of specific surface area of aluminum on composite solid propellant burning[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2013, 29(5): 1200-1206.
- [19] 王志新. 数字全息技术用于固体推进剂铝燃烧测量实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
WANG Zhixin. Experimental research on measurement of aluminum combustion in solid propellant by using digital holography [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)
- [20] MILLER R. Effects of particle size on reduced smoke propellant ballistics[C]// Proceedings of the 18th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Cleveland, US: AIAA, 1982: 1906-1914.
- [21] JIN Bingning, WANG Zhixin, XU Geng, et al. Three-dimensional spatial distributions of agglomerated particles on and near the burning surface of aluminized solid propellant using morphological digital in-line holography[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 106: 106066.1-106066.14.

(编辑: 张 雪)