高温燃气中铝凝相粒子壁面碰撞行为影响因素研究*

马志伟1,2,冯 滢1,魏志军1,谢定江1,董 维1,王宁飞1,石保禄1

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081;

2. 北京动力机械研究所 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 100074)

摘 要:为了探究发动机内凝相铝的沉积规律,采用高温甲烷/氧气火焰模拟固体火箭发动机工作 的高温环境。在前期研究的基础上,重点关注壁面温度和材料对凝相铝沉积概率的影响。实验结果表 明,碰撞速度以及壁面的材料和温度都会影响铝粒子的碰撞后行为和沉积概率;沉积的主要机理是粒子 在壁面上的传热导致粒子发生冷却凝固,从而产生强大的粘附力;壁面温度过低会导致粒子过快冷却, 降低粒子与壁面之间的粘附力,从而降低沉积概率;壁面材料的热导率以及力学性能也会对沉积概率产 生影响。

关键词:固体火箭发动机; 熔渣; 铝粒子; 碰撞; 沉积 中图分类号: V435.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 11-210841-07 DOI: 10.13675/j.cnki. tijs. 210841

Influencing Factors of Collision Behavior Between Aluminum Particles and Wall in High-Temperature Gas

MA Zhi-wei^{1,2}, FENG Ying¹, WEI Zhi-jun¹, XIE Ding-jiang¹, DONG Wei¹, WANG Ning-fei¹, SHI Bao-lu¹

(1. School of Astronautics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. State Key Laboratory of Laser Propulsion and Application, Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: To investigate the deposition pattern of condensed-phase aluminium inside the engine, a hightemperature methane/oxygen flame was used to simulate the high-temperature environment of a solid rocket motor. Based on the previous study, this work focuses on the effects of wall temperature and material on the deposition probability of condensed-phase aluminium. The experimental results show that the collision velocity, as well as the wall material and temperature, affect the post-collision behaviour and deposition probability of aluminium droplets. The main mechanism of deposition is that the heat transfer of droplets on the wall leads to cooling and solidification of particles, resulting in a strong adhesion force. However, a much low wall temperature leads to rapid cooling of particles and reduces the adhesion force between particles and the wall, thus reducing the deposition probability. The thermal conductivity and mechanical properties of the wall material also have an impact on the deposition probability.

Key words: Solid rocket motor; Slag accumulation; Aluminum particles; Collision; Deposition

^{*} 收稿日期: 2021-12-02; 修订日期: 2022-01-20。

基金项目:十三五预研领域基金重点项目(61407200201);国家自然科学基金(51676016)。

作者简介:马志伟,博士,工程师,研究领域为铝颗粒燃烧及碰撞。

通讯作者:石保禄,博士,教授,研究领域为金属颗粒燃烧,超高温火焰调控。

引用格式:马志伟,冯 滢,魏志军,等.高温燃气中铝凝相粒子壁面碰撞行为影响因素研究[J].推进技术,2022,43(11):
 210841. (MA Zhi-wei, FENG Ying, WEI Zhi-jun, et al. Influencing Factors of Collision Behavior Between Aluminum Particles and Wall in High-Temperature Gas[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(11):210841.)

1 引 言

铝粉作为一种常用的含能添加剂,广泛应用于 固体推进剂中,用于提高发动机的比冲^[1-3]。然而,铝 颗粒在发动机中的燃烧会产生大量的含铝凝相粒 子。凝相粒子在燃烧室和喷管内流动时,会与壁面 发生碰撞,在某些条件下会沉积于壁面,形成熔渣。 这些熔渣在燃烧室和喷管中的堆积会增加发动机的 消极质量,加剧绝热层的烧蚀^[4];还会减小喷管喉部 直径,增大燃烧室压强,严重时甚至会造成发动机 爆炸^[5]。

为了降低固体火箭发动机中熔渣沉积量,研究 人员对熔渣沉积现象及其影响因素进行了大量的实 验及仿真研究。早期发现的熔渣沉积现象主要存在 于含潜入式喷管的大型固体火箭发动机中。研究人 员主要通过测量残渣量的方式对残渣沉积过程进行 研究,分析不同发动机的残渣沉积量,进而研究不同 因素对残渣沉积量的影响,包括点火方式、发动机构 型以及装药药型及配方等^[6-10]。在含铝推进剂的小 型固体火箭发动机中,残渣沉积现象主要发生在发 动机工作前期,在喷管的收敛段及喉部位置沉积大 量的凝相粒子,其原因是发动机工作前期壁面温度 较低,液滴碰撞壁面后的粘附力大于反弹力^[11-12]。研 究表明,铝颗粒的粒径及其团聚特性对残渣沉积量 及沉积位置影响显著^[13]。

为了对熔渣沉积机制进行理论研究,研究人员 开发了不同的仿真模型对固体火箭发动机内的两相 流场进行仿真计算。Borass^[14]对含铝固体火箭发动 机中的残渣沉积现象进行理论研究,采用无粘无旋 的势流模型对潜入式喷管中的两相流流动过程进行 仿真计算,首次对潜入式喷管中的残渣沉积过程进 行描述。此后研究人员对仿真计算方法进行不断地 更新和完善。研究结果表明,捕获沉积模型和液滴 粒径分布是影响残渣沉积建模精度的关键因素^[15-16]。 但是,在固体火箭发动机中的高温高压环境下,难以 对凝相粒子的碰撞沉积过程进行直接观测,因此没 有可靠的沉积模型可供参考。

在发动机中,熔渣形成的本质是高温含铝凝相 粒子与壁面碰撞后的沉积行为。虽然液滴-壁面的 碰撞行为广泛存在于自然界与工程应用中,研究人 员对液滴的碰撞现象也进行了大量的研究,但是可 用于发动机环境下的碰撞行为规律或量化数据非常 少。液滴常选择常温下的水滴或酒精等低粘度液 滴,粒径大多为毫米级以上;壁面温度为常温,没有 考虑液滴与壁面传热造成的液滴相变对碰撞行为的 影响;液滴速度来源于自由落体,速度较低且没有考 虑气动力的影响。而在固体火箭发动机燃烧室中, 粒子为高温高粘度的氧化铝液滴,粒径多为微米级; 在发动机工作前期,壁面温度较低,粒子与低温壁面 的碰撞会发生冷却凝固而沉积于壁面,碰撞行为不 同于常温液滴的碰撞。

在近期开展的实验研究中,Ma等^[17]开发了高温 条件下含铝凝相粒子与壁面碰撞的可视化实验系 统,研究了粒子的碰撞速度、角度以及粒径对碰撞过 程的影响,总结出沉积概率随韦伯数及碰撞角度变 化的经验公式。为了得到更适用于发动机燃烧室环 境下的碰撞沉积规律,探索降低残渣沉积的有效手 段,本研究沿用之前的实验系统^[17],固定铝颗粒粒径 为75μm,研究了壁面温度和壁面材料等因素对含铝 凝相粒子与壁面碰撞行为的影响,进一步探索高温 燃气中凝相铝壁面碰撞沉积机制。

2 方 法

2.1 实验系统

实验系统示意图如图1所示,主要包括气溶胶发 生装置、切/轴射流燃烧器、水冷板及高速摄像系统组 成。利用气溶胶发生装置将铝颗粒分散并注入到燃 烧器中;利用切/轴射流燃烧器产生甲烷--纯氧火焰, 形成超高温燃气,用于加热并点燃铝颗粒,形成熔融 的铝/氧化铝粒子,粒子在下游与壁面进行碰撞。通 过高速摄像机记录碰撞过程,分析不同工况条件下 的碰撞后行为,研究影响碰撞沉积行为的关键因素。



Fig. 1 Schematics of the experimental system

本实验采用了两种拍摄模式对碰撞过程进行拍摄记录:常规拍摄和显微拍摄。常规拍摄采用普通镜头(AF-S 50mm f/1.8G),利用高速相机对凝相粒子碰撞前后的运动状态进行拍摄记录,用于获取大量的碰撞数据。显微拍摄搭配显微镜头(Questar QM 1)和聚光灯,利用阴影法对微米级凝相粒子的碰撞变形的动力学过程进行详细拍摄,用于分析碰撞机理。显微拍摄模式如图2所示。由于高速拍摄模式下显微镜头的进光量很小,无法捕捉到粒子的自发光,所以采用阴影法进行拍摄。为了防止壁面对光路的遮挡,需将相机与壁面偏离一定角度。





2.2 实验条件

本实验利用切/轴射流燃烧器产生高温火焰,以 此加热并点燃铝颗粒,形成熔融铝粒子。以甲烷作 为燃料,氧气作为氧化剂,并添加少量的二氧化碳作 为稀释气。将甲烷与二氧化碳混合后经气溶胶发生 装置底部的入口进入气溶胶发生装置,携带铝颗粒 经上极板的喷嘴喷出,形成气溶胶射流。射流通过 燃烧器的轴向入口注入燃烧器,在燃烧室中与切向 注入的氧气混合后燃烧。为了得到高温火焰,在不 同的工况中保持全局当量比(假定甲烷和氧气充分 混合)为1,氧摩尔分数(氧气在氧化剂中的含量)为 0.8,根据热力计算结果可知,其绝热燃烧温度 (T_{i}) 可 达2900K^[18]。在测试过程中,由于火焰场中添加的铝 颗粒数量非常少,可以忽略铝颗粒对火焰燃烧温度 的影响。通过调节气体流量改变气流速度,从而得 到不同的碰撞速度。每个粒子的碰撞速度通过测 量粒子碰撞前所运动的时间和距离计算得到,范围 在 2~24m/s。

在燃气下游放置与火焰轴线固定夹角的水冷壁 面,熔融粒子在燃气的带动下与壁面发生碰撞。通 过控制冷却水的流量可调节壁面温度,在壁面侧边 中心位置处打孔,插入热电偶对壁温进行实时测量。 实验中采取的壁面温度分别为400K,800K和1000K, 在热电偶显示达到相应温度时开始加入铝颗粒进行 观察和测试。壁面材料分别选取了黄铜、石墨、氧化 镁陶瓷和石英玻璃。铝粉的标称粒径选用75μm,通 过电镜扫描得到的颗粒尺寸及表面形态如图3所示。



Fig. 3 SEM images of sample

3 结果与讨论

3.1 数据处理方法

通过逐帧分析视频图像,可以得到粒子碰撞前 后的运动状态。根据标定的摄像机空间分辨率和图 像帧率,可以得到单个粒子的瞬时运动速度。为了 减小计算误差,取碰撞前3~5帧图像的平均速度作 为粒子碰撞壁面时的速度。在常规拍摄中,主要从 宏观角度观察不同碰撞条件下粒子的碰撞后行为, 并分析影响不同碰撞后行为的关键因素,得到区分 碰撞后行为的实验判据。正如 Dupuy 等^[19]所述,常规 拍摄模捕捉到的粒子碰撞后行为主要分为反弹、沉 积和飞溅三种,此处的所指的飞溅是反弹飞溅。由 于碰撞过程复杂,难以得到区分不同碰撞后行为的 临界值,在同一碰撞速度下,不同粒子往往发生不同 的碰撞后行为。因此,借鉴 Dupuy 等^[19]的处理方法, 采用概率统计的方式对实验数据进行分析。通过大 量数据的概率学统计,得到了粒子碰撞的沉积概率 φ ,其计算公式为 $\varphi = n/N, n$ 和N分别表示发生沉积 的颗粒数量和碰撞的燃烧颗粒总数量。为了得到准 确的统计结果,每一工况下至少统计上千个铝粒子 的碰撞数据。

3.2 韦伯数的定义

根据前人的研究结果可知,液滴的碰撞特性主要受法向韦伯数(We)的控制,结合实验数据与前人的研究,此处考虑韦伯数对沉积概率的影响。韦伯数的计算公式如下

$$We = \frac{\rho v_n^2 d}{\sigma} \tag{1}$$

式中*p*,*v_n*,*σ*和*d*分别表示液滴的密度、法向速度、表 面张力和直径。根据显微拍摄得到的液滴直径可以 看出,铝颗粒燃烧形成的熔融液滴与初始颗粒直径 相差不大。因此在本实验条件下,可以用颗粒直径 近似作为碰撞的直径。采用与前期研究相同的处理 方法^[17],液滴的密度及表面张力等物性参数的选取 2500K下的氧化铝的物性参数^[20]。

3.3 沉积概率影响因素分析

3.3.1 壁面温度对沉积概率的影响

针对不同壁面温度对粒子碰撞沉积概率的影响,以黄铜作为材料,分别设置壁面温度(T_w)为400K 和800K进行碰撞实验。通过观察实验现象发现,在 T_w=400K下,粒子发生飞溅的概率大大增加,不能忽 略飞溅粒子在不同碰撞后行为中所占的比例,所以 对三种不同的碰撞后行为进行统计,所得结果如图4 所示。从图中可以看出,在低韦伯数下,粒子碰撞后 主要发生反弹行为;随着韦伯数的增大,反弹粒子所 占的比例逐渐降低,粒子开始发生沉积和飞溅行为; 当韦伯数继续增大时,发生反弹和沉积的粒子同时 减少,飞溅行为成为最主要的碰撞后行为。



Fig. 4 After-collision behavior of particles with copper wall under T_w =400K

在 T_w=800K下,产生飞溅行为的粒子数量极其有限,因此只对反弹和沉积行为进行统计,得到了沉积概率随韦伯数的变化规律,如图5所示。从图中可以 看出,随着韦伯数的增加,粒子沉积概率逐渐增加。

为了验证上述实验结果,设置T_w=1000K分别进行重复实验。与T_w=800K时的实验结果相同,T_w=



Fig. 5 After-collision behavior of particles with copper wall under T_u =800K

1000K下粒子基本不发生飞溅行为。为方便对比,不同壁面温度下粒子的沉积概率随韦伯数的变化如图6所示。从图中可以看出,壁面温度对粒子碰撞沉积概率的影响很大。在碰撞速度相同的情况下,壁面温度越高,碰撞沉积概率越大。分析其原因,可能是因为黄铜材料的弹性模量受温度影响而发生改变所导致。温度的降低,使得壁面的刚度增大,增加了粒子碰撞所受到的弹性力,从而加剧了形变量,甚至克服表面张力的作用形成飞溅。这与前人关于等离子体喷涂的粘附强度的研究结果一致:随着壁面温度的升高,粘附强度逐渐增大,粒子发生沉积的概率提高^[21]。其主要原因是加热壁面可以延迟粒子的凝固,以便它们能更好地穿透表面,并促进粒子和基材之间的扩散,从而增强附着力。



为了解释不同壁面温度下凝相粒子碰撞沉积概 率的统计结果,采用显微拍摄模式对粒子与400K和 800K壁面碰撞的动态变形过程进行拍摄,分析温度 变化对碰撞变形过程的影响。由于阴影法拍摄得到 的是光斑尺寸,不同位置处的颗粒遮挡形成的光斑 存在较大差别,因此图中所示颗粒的尺寸并不完全 代表颗粒的真实大小。粒子与400K壁面碰撞变形的 典型状态形态如图7所示,分为沉积、反弹和飞溅三 种不同行为。从图中可以看出,随着碰撞速度的增 大,粒子碰撞后的变形程度更加明显,液滴边缘开始 发生飞溅;且粒子碰撞后不易恢复其表面形态,保持 碰撞后的扁平状。

为了定量描述粒子的变形程度,通过视频图像 测量了粒子碰撞壁面后的铺展直径(D')和碰撞发生 前的初始直径(D),并将两者的比值定义为铺展因子 ξ,即ξ = D'/D。粒子碰撞的示意图及直径测量方式 如图8所示^[17]。图中D'_{max}表示粒子碰撞后的最大铺

0µs	33µs	50µs	67µs	100µs	117µs	183µs	217µs
•							100μm
(a) $v=9.5$ m/s, rebound							
0µs	33µs	50µs	67µs	83µs	117µs	150µs	216µs
							100μm
(b) $v=10.2$ m/s, deposition							
0µs	33µs	50µs	67µs	100µs	133µs	167µs	216µs
				6	' •	l l	100μm

(c) v=12.5 m/s, splashing

Fig. 7 Temporal variation of deformation process with T_w =400K

展直径,对应于最大铺展因子 ξ_{max} 。

根据图示的测量方式,对多个粒子的碰撞变形 过程进行了观测,并对粒子的碰撞速度与最大铺展 因子之间的关系进行了统计,两种壁面温度下粒子 的碰撞速度与最大铺展系数之间的关系如图9所示。 由于此处难以对粒子的相态、尺寸及物性参数等的 差异进行精确控制,导致不同粒子的铺展因子散度 较大,但在一定程度上显示了铺展因子随速度的变 化趋势。



Fig. 8 Schematic diagram of droplet diameter variation^[17]



Fig. 9 Maximum spread factor of droplets varying with collision velocity

从图中可以看出,在两种壁面温度下,粒子碰撞 后的最大铺展因子都随碰撞速度的增大而增大;在 同一碰撞速度下,降低壁面温度会加剧粒子碰撞后 的变形程度,从而增大最大铺展因子。因为降低温 度会提高壁面材料的刚度,进而增大液滴受到的反 弹力。当粒子变形程度过大时,容易使液滴边缘突 破表面张力的约束发生飞溅,增大飞溅概率。同时, 壁面温度过低也会使液滴快速冷却凝固,降低液滴 与壁面的接触时间,无法形成有效的粘附力,从而降 低沉积概率。这与Hawland等^[22]的实验结论相同,即 提高壁面材料的刚度能促进粒子的飞溅;壁面温度 过低会降低喷涂涂层的附着效果。

3.3.2 壁面材料对沉积概率的影响

黄铜材料的力学性质受温度影响较大,为了进一步研究不同材料对碰撞后行为和碰撞沉积概率的影响,同时更贴近发动机的工作环境,选择常用于发动机喷管喉衬的石墨材料作为壁面进行重复实验,选取400K,800K和1000K作为壁面温度。实验统计结果如图10所示,图中同时画出了黄铜壁面温度在400K与800K时粒子的沉积概率作为对比。

从图中可以看出,在不同的壁面温度下,随着韦 伯数的增大,粒子碰撞后的沉积概率先增加,之后基 本保持不变,但是不同壁面温度下的沉积概率并不 相同。在石墨壁面温度较低时,粒子碰撞后的沉积 概率较低;随着壁面温度的升高,沉积概率也明显提 高。壁面温度 800K时,铝粒子与石墨壁面和黄铜壁 面碰撞的沉积概率较为接近。



Fig. 10 Deposition rate of particles colliding with graphite wall under different temperature

在黄铜壁面和石墨壁面的碰撞实验中,粒子的 沉积概率在壁面温度较低时差别较大。因此,选取 氧化镁陶瓷和石英玻璃作为壁面材料,壁面温度选 取400K进行重复实验,研究铝粒子与不同材料低温 壁面的碰撞后行为。

铝粒子与氧化镁陶瓷壁面的碰撞后行为统计结 果如图11所示。从图中可以看出,在低温壁面下,粒 子与氧化镁壁面碰撞后,粒子在碰撞后也会发生反 弹、沉积和飞溅三种行为,随着碰撞韦伯数的增加, 粒子的碰撞后行为由反弹逐渐转变为飞溅和沉积, 且发生沉积的概率与石墨壁面接近。这可能是因为 氧化镁陶瓷的力学性能与石墨材料的力学性能比较 接近导致。



Fig. 11 After-collision behavior of particles colliding with MgO wall under T_w =400K

由于石英玻璃壁面下粒子碰撞后基本不发生飞 溅行为,所以对粒子与石英玻璃壁面碰撞的沉积概 率进行了统计,统计结果如图12所示,图中同时给出 了壁面温度为800K时粒子与黄铜壁面和石墨壁面碰 撞的沉积概率作为对比。从图中可以看出,对于石 英玻璃壁面,粒子碰撞后不会发生飞溅行为,随着碰 撞韦伯数的增大,粒子的碰撞沉积概率逐渐上升直 至接近100%,说明其碰撞后行为由反弹逐渐转变为 沉积。这与壁面温度为800K高温下的黄铜壁面和石 墨壁面碰撞时的结果基本一致。造成这种现象的原 因可能是石英玻璃的热导率较低,碰撞表面在受到 火焰加热后温度迅速升高,而测温表面的温度上升 缓慢,从而造成碰撞表面的温度远高于400K,导致碰 撞表面发生软化,降低了碰撞表面的刚度,使粒子碰 撞后受到的反冲作用力减小,从而降低了粒子的变 形程度和受到的反弹力,沉积率因此显著增大。同 时,由于石英玻璃材料在高温下硬度较低,壁面在受 到碰撞后容易发生塑性变形而形成凹坑,并与铝粒 子发生融合,从而增大液滴与壁面之间的粘附力,导 致粒子更容易发生沉积。



Fig. 12 Deposition probability of droplets colliding with different walls

4 结 论

本文利用粒子-壁面碰撞实验系统对高温条件 下含铝凝相粒子与壁面的碰撞行为进行了实验研 究,探索了影响粒子碰撞后沉积的关键因素,实验所 得结论如下:

(1)粒子碰撞时的韦伯数越大,碰撞壁面后的变 形越明显,粒子与壁面之间的接触面积和粘附力越 大,增加了沉积概率。

(2)壁面温度对碰撞后行为影响显著:壁面温度 可以改变粒子与壁面之间的传热性能以及壁面的力 学性能,从而影响粒子的碰撞后行为。通常来说壁 面温度越低,铝粒子与壁面的传热量增大,粒子的过 快冷却降低了粒子与壁面之间的粘附力,从而飞溅 概率增大,沉积概率降低。

(3)壁面材料对碰撞后行为影响显著:主要表现 在不同材料壁面在不同温度下力学性能的差异对碰 撞后行为的影响。壁面刚度较大时,粒子碰撞后受 到的反冲作用力越大,导致粒子碰撞后的变形程度 越大,从而增大粒子发生飞溅的概率,降低沉积 概率。

在后期工作中,将进一步改进实验方法和测试 手段,开展精细化测试,定量化统计铝液滴碰撞壁面 结果,并得出更加精确的结论。

致 谢:感谢十三五预研领域基金重点项目和国家自然 科学基金的资助。

参考文献

- [1] 张宏安,叶定友,侯 晓,等.含铝复合推进剂燃烧
 场凝相微粒分布实验研究[J].固体火箭技术,2001, 24(1):24-27.
- [2] 王宁飞,陈 龙,赵崇信,等.固体火箭燃烧室内微粒分布的实验研究[J].推进技术,1995,16(4):24-27. (WANG Ning-fei, CHEN Long, ZHAO Chong-xin, et al. An Experimental Study on Distribution of Particulates in Solid Rocket Motors [J]. Journal of Propulsion Technology, 1995, 16(4):24-27.)
- [3] Sundaram D S, Puri P, Yang V. A General Theory of Ignition and Combustion of Nano- and Micron-Sized Aluminum Particles [J]. Combustion and Flame, 2016, 169: 94-109.
- [4] 关轶文.高温氧化铝沉积条件下绝热层烧蚀机理研究 [D].西安:西北工业大学,2019.
- [5] 雷 宁,熊 唯.国外固体火箭发动机铝熔渣机理研 究[J].飞航导弹,2019(2):89-94.
- [6] Frederick Jr R, Nichols J, Rogerson J. Slag Accumulation Measurements in a Strategic Solid Rocket Motor [C]. Lake Buena Vista: 32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1996.
- Perkins F, May D, Beus R. Assessment of Propellant Relative Slag Potential by Direct Measurement of Slag in Subscale Motors [C]. Lake Buena Vista: 32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1996.
- [8] Salita M. Deficiencies and Requirements in Modeling of Slag Generation in Solid Rocket Motors [J]. Journal of Propulsion and Power, 1995, 11(1): 10-23.
- [9] JasperLal C, Sridharan P, Krishnaraj K, et al. Investigation of Slag Accumulation in Solid Rocket Motors [C]. San Jose: 49th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2013.
- [10] Hess E, Chen K, Acosta P, et al. Effect of Aluminized-Grain Design on Slag Accumulation[J]. Journal of Space-

craft and Rockets, 1992, 29(5): 697-703.

- [11] 张 唯.固体火箭发动机喷管喉部沉积过程的传热分析[J].推进技术,1984,5(3):3-12.
- [12] 贾林祥.含铝固体推进剂火箭发动机喷管沉积的实验 与传热分析[J].推进技术,1985,6(1):1-10.
- [13] 王德全,夏智勋,胡建新,等.固冲发动机沉积数值 模拟与试验研究[J].固体火箭技术,2009,32(1): 38-42.
- [14] Borass S. Modeling Slag Deposition in the Space Shuttle Solid Rocket Motor [C]. Cleveland: 18th Joint Propulsion Conference, 1982.
- [15] Smith-Kent R, Perkins F, Abel R. A Potential, Twophase Flow Model for Predicting Solid Rocket Motor Slag
 [C]. Monterey: 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1993.
- [16] Cesco N, Dumas L, Hulin A, et al. Stochastic Models to the Investigation of Slag Accumulation in a Large Solid Rocket Motor[C]. Seattle: 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1997.
- [17] Zhiwei Ma, Zhijun Wei, Ying Feng, et al. Experimental Study on the Collision Behaviors of Micron-Sized Aluminum Droplets with Solid Wall in High Temperature Burned Gas [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 115: 106791.
- [18] Li B, Shi B, Zhao X, et al. Oxy-Fuel Combustion of Methane in a Swirl Tubular Flame Burner under Various Oxygen Contents: Operation Limits and Combustion Instability [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 90: 115-124.
- [19] Dupuy P M, Fernandino M, Jakobsen H A, et al. Probability Description of Single Droplet Events at High Pressures: Droplet-Wall Collision Case[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2011, 3 (3): 476– 483.
- [20] Xia S Y, Hu C B. Review of Physical Property Calculations of Liquid Aluminum and Alumina [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(5): 961-969.
- [21] Morks M F, Tsunekawa Y, Okumiya M, et al. Splat Morphology and Microstructure of Plasma Sprayed Cast Iron with Different Preheat Substrate Temperatures [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2002, 11(2): 226-232.
- [22] Howland C J, Antkowiak A, Castrejón-Pita J R, et al. It's Harder to Splash on Soft Solids[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(18): 184502.

(编辑:刘萝威)