

## 半潜入喷管收敛段碳/酚醛材料烧蚀特性

巩伦昆<sup>1</sup>, 邓哲<sup>1</sup>, 魏晓林<sup>2</sup>

(1. 中国兵器工业集团有限公司 西安近代化学研究所, 西安 710065;

2. 中国兵器工业集团有限公司 山西北方兴安化学工业有限公司, 太原 030008)

**摘 要:** 采用流固热耦合数值方法, 以及 Abaqus 的 ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian, 任意拉格朗日欧拉方法) 自适应网格技术, 对位于半潜入喷管收敛段的碳/酚醛的烧蚀现象进行了预估, 与试验结果进行了对比分析。结果表明: 在收敛段, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 液滴或颗粒对材料的传热烧蚀起到了关键作用, 当气流与材料表面平行时, 液滴或颗粒的影响很小; 从碳/酚醛热分解角度出发, 基于完全碳化即被剥蚀的假设, 基本能够预估碳/酚醛材料的烧蚀特征, 烧蚀速率大约为 0.3 mm/s; 后效碳化对材料碳化过程的影响明显, 发动机工作期间, 分解层的厚度大约为 2.0 mm, 考虑后效作用, 分解层厚度可能会增加至 4.0 mm 左右; 与喉衬接触的材料区域, 喉衬的传热会明显加剧材料的碳化过程。

**关 键 词:** 碳/酚醛; 机械侵蚀; 流固热耦合; 固体火箭发动机; 收敛段

**中图分类号:** V235

**文献标志码:** A

## Ablation characteristics of carbon/phenolic at converging section in semi-submerged nozzle

GONG Lunkun<sup>1</sup>, DENG Zhe<sup>1</sup>, WEI Xiaolin<sup>2</sup>

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute,

China North Industries Group Corporation Limited, Xi'an 710065, China;

2. Shanxi North Xing'an Chemical Industry Company Limited,

China North Industries Group Corporation Limited, Taiyuan 030008, China)

**Abstract:** By solid-gas heat coupled numerical method and the ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian) adaptive meshing technique, the ablation of carbon/phenolic at the converging section in semi-submerged nozzle was investigated, and the results were validated by comparing the results with the experiment data. The results showed that the Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles and droplets had great effect on the heat transfer and ablation process at the converging section. The effects of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the ablation can be ignored when the gas traveled almost parallel to the surface. Based on the decomposition mechanism of phenolic, the ablation characteristics of carbon/phenolic can be predicted assuming that the fully charred material was ablated immediately, and the ablation rate was about 0.3 mm/s. The char formation process after the motor burnout was very important for the carbon/phenolic. The thickness of pyrolysis zone was about 2.0 mm during the operating process of the motor, and may increase to 4.0 mm considering the pyrolysis process after motor burnout. The ablation of carbon/phenolic in contact with the carbon/carbon throat can be en-

**收稿日期:** 2020-09-30

**作者简介:** 巩伦昆 (1989—), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为火箭发动机设计。

**引用格式:** 巩伦昆, 邓哲, 魏晓林. 半潜入喷管收敛段碳/酚醛材料烧蚀特性[J]. 航空动力学报, 2021, 36(11): 2379-2388. GONG Lunkun, DENG Zhe, WEI Xiaolin. Ablation characteristics of carbon/phenolic at converging section in semi-submerged nozzle [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(11): 2379-2388.

hanced owing to the heat flux through carbon/carbon throat heat transfer.

**Key words:** carbon/phenolic; mechanical erosion; solid-gas coupled heat transfer; solid rocket; convergence section

碳/酚醛材料广泛应用于大型固体发动机喷管收敛段及扩张段。通过材料的烧蚀吸热,对喷管结构起到了热防护作用。关于碳/酚醛的烧蚀机理,目前已经得到了较清晰的认识,在高温燃气作用下,酚醛树脂热分解,分解气体,主要包括 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 从表面流出,剩余的多孔碳化层结构在化学反应及气流、颗粒等冲击作用下,发生化学烧蚀和机械剥离,最终形成原始层-分解层-碳化层的物理结构,如图1所示<sup>[1]</sup>。

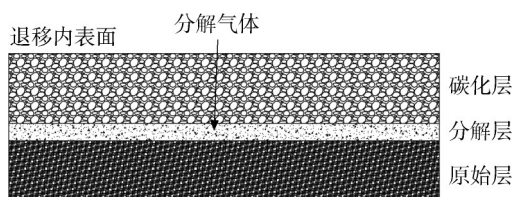


图1 碳/酚醛烧蚀结构示意图

Fig.1 Illustration of ablation of carbon/phenolic

针对碳/酚醛的烧蚀研究,国内外开展了许多的工作。从热化学烧蚀角度出发,针对酚醛分解、分解气体在多孔介质中的流动、表面化学反应等过程,开展了相关研究,建立了数值计算模型。意大利学者 Bianchi 等<sup>[2]</sup>针对碳/酚醛材料的烧蚀问题,基于热化学烧蚀机理,考虑分解气体和碳化层的影响,在气固交界面,采用能量、质量及组分守恒模型,主要研究了喉衬及下游区域的烧蚀规律。Cross 等<sup>[3]</sup>发展了针对热解烧蚀材料的热结构程序 MOPAR-MD,通过与 LeMANS 流场计算程序进行耦合计算,可以对热解材料的烧蚀率进行预估,方法中,气固交界面通过热力学反应平衡以及有限速率反应模型分别进行模拟,计算结果与试验数据比较吻合<sup>[4]</sup>。Cheng 等<sup>[5]</sup>针对碳/酚醛的烧蚀问题,建立了碳化层内的传热传质模型,同时,从原子微观角度,建立了碳酚醛的分解模型,得到了分解组分以及分解产物,为碳化层的传热传质提供参数输入。国内,张拜<sup>[6]</sup>以三维编织碳/酚醛材料为研究对象,针对纤维以及基体的特征,建立了细观模型,仿真研究了材料的体积烧蚀问题;张运法<sup>[7]</sup>基于 Abaqus 软件,通过子程序接口,建立了碳化层温度/压力/位移耦合计算模型,实现了体积烧蚀的仿真计算,同时,结合动网格技术,分析

了表面动态移动对结构的影响。王潇敏<sup>[8]</sup>建立了碳/酚醛一维热响应数值模型,对关键参数进行了敏感性分析,得到了影响材料烧蚀的关键因素,进而采用反演方法,得到了材料的热物性随温度的变化,为材料的热物性预估提供了手段。Li 等<sup>[9]</sup>建立了再入飞行器头部碳/酚醛防热结构的温度场及烧蚀的耦合模型,该模型研究了分解气体对于碳化层的保护现象,文章指出,当材料烧蚀热解气体的速度大于某一临界速度时,分解气体能够有效保护材料的烧蚀,该临界速度与飞行马赫数有关系。

除了热化学烧蚀,很多情况下,机械烧蚀是不可忽略的,机械剥蚀主要受到以下因素的影响:①热解形成的碳化层疏松结构;②材料内部的温度梯度产生的热应力;③热解气体在多孔介质中形成的压差应力;④发动机燃气形成的气流剪切力,对于复合推进剂,金属颗粒的剥蚀作用不可忽视。在机械烧蚀方面,早期,Neilson 等<sup>[10-11]</sup>针对类似火箭发动机喷管的环境,研究了气流速度、角度、颗粒尺寸对烧蚀的影响,并拟合得到了侵蚀速率的经验公式。后来,Oka 等<sup>[12-13]</sup>针对金属、木材等多种材料,更加系统地研究了冲击速度、角度、颗粒尺寸、材料硬度等对烧蚀的影响,同时,总结了经验公式。需要注意的是,上述经验公式适用于相关的研究工况,对于远超过其工况的情景,其预测可靠性需要进一步验证。

Thakre 等<sup>[14]</sup>针对石墨材料的机械烧蚀问题,建立了喷管内的两相流计算模型,在流场计算方面,考虑了 Al 颗粒燃烧过程。在机械剥蚀公式方面,综合了上述学者 Neilson 等和 Oka 等的计算模型。文章分析了 Al 颗粒的分布、流动规律,对计算得到的烧蚀率进行了分析,仿真得到的结果在试验结果范围内,喷管收敛段的机械剥蚀影响较为明显,不可忽略,而在扩张段,机械剥蚀的影响很小,这与文献[15]中的结论基本一致。邓为<sup>[16]</sup>基于 Fluent 软件,研究了燃气中的金属颗粒对喷管石墨的机械侵蚀现象,研究采用学者 Oka 等提出的粒子侵蚀模型,离散相采用粒子轨迹模型,网格重生采用弹性光顺方法,分析了粒子直径、流量、收敛角等对侵蚀速率的影响,获得了喷管烧蚀形

貌。常桁等<sup>[17]</sup>针对 BEATS(弹道测试和评估系统)发动机的机械烧蚀问题,建立了两相流模型,机械侵蚀速率采用经验公式。研究表明,Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>液滴是机械侵蚀的主要因素,机械侵蚀主要发生在收敛段,燃烧室压强对机械侵蚀的影响显著。

在碳/酚醛材料的机械剥蚀方面,美国宾夕法尼亚大学 Yang 等<sup>[18-19]</sup>针对酚醛树脂以及硅橡胶隔热材料,建立了二维仿真模型。在热化学烧蚀方面,考虑了气相传热、多孔介质内的流动传热;在颗粒机械冲击方面,从剪切剥蚀以及垂直撞击两个方面分别考虑,当达到材料的极限强度时,材料即被剥蚀。同时,考虑颗粒对表面的传热影响,研究认为,热化学烧蚀和机械剥蚀存在较强的相互影响,需要综合考虑两者的影响。

通过上述研究可以发现,针对碳/酚醛材料的体积烧蚀,国内外开展了许多研究工作,在机械剥蚀方面,主要采用学者提出的经验公式,但是,公式的应用工况受限,同时,碳/酚醛材料碳化后的力学性能及抗冲刷能力也没有定量的描述数据,公开文献中,针对碳/酚醛的机械剥蚀研究相对较少。

本研究主要针对某半潜入喷管收敛段的碳/酚醛材料的烧蚀问题开展研究。结合流固热耦合方法及 Abaqus 软件的 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian)网格自适应技术,研究了碳/酚醛材料的烧蚀现象,提出了影响收敛段碳/酚醛烧蚀的关键因素以及烧蚀预估方法,为发动机喷管热防护设计工程参考。准确预估实际工作环境下的碳/酚醛材料的烧蚀速率,既能保证喷管的工作可靠性,同时能够有效减轻结构质量,优化发动机性能,因而,有着重要的工程价值。

## 1 计算方法

### 1.1 计算流程

本研究中的数值仿真计算包括两步骤。首先,通过流固热耦合方法,从表面热化学烧蚀角度,分析了碳/酚醛的烧蚀状态。

本文的耦合计算流程如下:采用 Fluent 计算流场,采用 Abaqus 计算喷管结构温度场,即, ABAQUS 把壁面温度赋予给 Fluent,同时, Fluent 把计算得到的热流密度赋予给 Abaqus 软件,最终完成流固热耦合计算。

首先,初始化流体区域和固体区域温度场。

由于流体区域特征时间很短,因此,首先假设壁面温度为 300 K,获得一稳定流场,计算时间大约为 0.1 s。固体区域初始为 300 K。

然后,流体和固体场同时运行,并进行数据交换。由于流场特征时间远小于结构场的特征时间。因此,在耦合计算中,Fluent 的时间步长为 0.001 s, ABAQUS 的时间步长为 0.01 s, Fluent 运行 10 步,与 Abaqus 进行一次数据传输,既保证了计算精度,同时,提高了计算速度。

每一个时间步,Fluent 的残差曲线都下降到残差不再变化,即认为完全收敛; ABAQUS 软件计算方面,当刚度矩阵方程迭代到软件默认的收敛准则时,认为固体域温度在该时间步已经达到稳态。

最后,当达到指定的计算时间后,停止计算。总的计算时间为 40 s。

通过热耦合计算发现,在进行碳/酚醛烧蚀预估时,必须要考虑 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>液滴或颗粒在材料表面的传热及侵蚀(详见下文的结果分析)。针对颗粒的侵蚀作用,文献[14-16]等根据经验公式,采用两相流计算方法,对烧蚀进行了计算。由于碳化之后的碳/酚醛材料力学性能的复杂性以及液滴或颗粒与碳/酚醛材料的作用认识不清,本文没有采用文献[14-16]中的经验公式。

基于上述原因,耦合计算完成之后,以碳/酚醛的传热分解过程作为出发点,对喷管结构进行独立的计算,不考虑流场区域,采用 Abaqus 软件,研究了碳/酚醛材料的传热及酚醛分解过程,与耦合计算中不同的是:①考虑了碳/酚醛材料的内表面退移;②材料内表面热边界采用经验公式。具体计算方法详见文中第 1.3 节。

### 1.2 流场计算模型

在热耦合计算时,需要开展流场的流动传热计算。流体区域的计算网格如图 2 所示。边界条件主要包括压力入口、压力出口、对称轴以及耦合壁面。为了准确计算壁面处的传热,在壁面处,有 30 层的四边形边界层网格,第 1 层网格高度为 0.002 mm,通过后续计算发现,壁面处的  $y^+$  为 8~20 之间,满足  $k-\epsilon$  湍流模型对网格的要求。

在流体计算方面,假设喷管入口的燃气为多组分冻结流,组分质量分数如表 1 所示,组分扩散遵守 Fick 定律,不考虑凝相粒子的作用,假设 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为气体,不考虑辐射。在流场计算方面,采用轴对称可压缩的雷诺平均 Navier-Stokes(N-S)

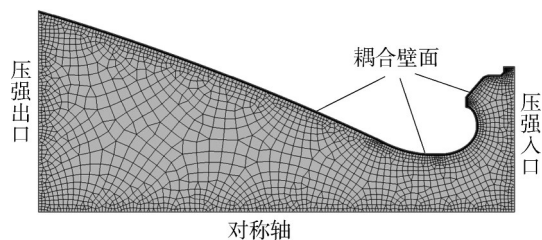


图2 流场计算网格

Fig.2 Computational mesh for fluid domain

表1 燃气组分

Table 1 Species of the gas

| 组分                             | 质量分数/% |
|--------------------------------|--------|
| H <sub>2</sub> O               | 9      |
| N <sub>2</sub>                 | 10     |
| CO                             | 23     |
| CO <sub>2</sub>                | 2      |
| HCl                            | 20     |
| H <sub>2</sub>                 | 1      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 35     |

方程,基于密度基的数值差分方法进行瞬态计算,湍流模型采用 $k-\epsilon$ 模型。

热化学烧蚀采用Fluent中的壁面反应模块,采用有限速率化学反应模型,反应速率采用阿累尼乌斯定律,如式(1)所示,其中 $p_i$ 为氧化性组分 $i$ 的分压; $m_i$ 为氧化性组分 $i$ 造成的碳/酚醛材料的质量烧蚀量; $E_i$ 为分解反应活化能; $A_i$ 表示分解反应的指前因子; $T_w$ 为材料的表面温度。化学反应及动力学参数见表2。

$$m_i = p_i^n A_i \exp(-E_i/RT_w) \quad (1)$$

表2 表面化学反应动力学<sup>[2]</sup>Table 2 Kinetic data for the surface reactions<sup>[2]</sup>

| 化学反应                                       | $A_i/$<br>(kg/m <sup>2</sup> ·s <sup>1</sup> ) | $n$ | $E_i/$<br>(kJ/mol) |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------|-----|--------------------|
| C + H <sub>2</sub> O → CO + H <sub>2</sub> | $4.8 \times 10^5$                              | 0.5 | 288                |
| C + CO <sub>2</sub> → 2CO                  | $9.0 \times 10^3$                              | 0.5 | 285                |

### 1.3 固体场计算方法

#### 1.3.1 耦合计算模型

热耦合计算物理模型如图3所示。喷管包括收敛段、扩张段、喉衬、背衬及金属壳体。喷管内表面,包括收敛段、喉衬及扩张段为耦合计算面。图4给出了收敛段碳/酚醛部件的网格。

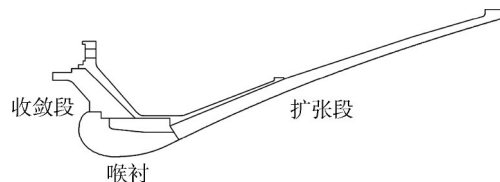


图3 喷管结构模型

Fig.3 Computational model for the nozzle

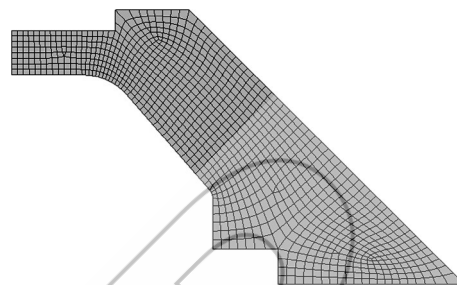


图4 碳/酚醛计算网格

Fig.4 Computational mesh for carbon/phenolic

在固体传热方面,采用傅里叶传热方程描述的瞬态传热模型。在结构温度场计算中,与空气接触的表面,假设温度为300 K,喷管内表面为热耦合区域。

碳/酚醛材料在高温下,酚醛树脂产生分解,材料的密度、导热率等会发生变化。本研究考虑酚醛树脂的分解,及材料热物性的变化。通过Abaqus自定义场函数实现。其中比热容 $c$ 、密度 $\rho$ 以及热导率 $\lambda$ 的值如下所示:

$$c = 2220\phi + 1220(1 - \phi) \quad (2)$$

$$\rho = 1.45\phi + 1.18(1 - \phi) \quad (3)$$

$$\lambda = 1.0\phi + 0.46(1 - \phi) \quad (4)$$

通过USDFLD子程序,定义碳化率 $\phi$ 作为场变量,实现了酚醛树脂的分解过程模拟,碳化率及酚醛树脂分解速率模型如式(5)和式(6)所示。其中 $\rho$ 为密度;下标c表示完全碳化的材料,v表示原始材料; $A_j$ 为指前因子; $E_j$ 为活化能。

$$\phi = \frac{\rho - \rho_c}{\rho_v - \rho_c} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_v \left( \frac{\rho - \rho_c}{\rho_v} \right)^n A_j \exp(-E_j/T) \quad (6)$$

式中变量的值取自文献[20],指前因子 $A_j$ ( $j=1,2,3$ )以及活化能 $E_j$ ( $j=1,2,3$ )分别为 $A_1=0.000\ 51$ 、 $A_2=85.4$ 、 $A_3=1\ 011\ 250$ 、 $E_1=338$ 、 $E_2=7\ 049$ 、 $E_3=15\ 677$ 、 $n=2.0$ 。

#### 1.3.2 考虑表面退移的碳/酚醛烧蚀计算模型

模型采用耦合计算中的固体域模型,不考虑

流场计算域,除了碳/酚醛收敛段的其他区域仅仅进行温度场计算,不做特别关注,材料的热物性等均采用热耦合计算中的方法。该模型与上述耦合模型的差异包括两点。

### 1) 热边界条件

与燃气接触的表面的热流密度采用巴兹公式进行计算,表面传热系数计算方法如式(7)所示<sup>[21]</sup>。

$$h = \frac{0.026 \left( \frac{\mu^{0.2} c_p}{Pr^{0.6}} \right) \left( \frac{p \cdot 10^6}{C^*} \right) \left( \frac{d_t}{R} \right)^{0.1} \left( \frac{A_t}{A} \right)^{0.9}}{\left[ \frac{T_w}{2T_c} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2 \right) + 0.5 \right]^{0.68} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2 \right)^{0.12}} \quad (7)$$

其中  $d_t$  表示喉道直径;  $\mu$  表示黏度;  $c_p$  为气体比定压热容;  $Pr$  为普朗特数;  $p$  为燃烧室总压;  $C^*$  为发动机特征速度;  $R$  为喉道处的圆角半径;  $A_t$  为喉道面积;  $A$  为当前横截面的面积;  $T_w$  为壁面温度;  $T_c$  为恢复温度;  $\gamma$  为气体比热比<sup>[21]</sup>。

虽然巴兹公式为经验公式,公式中没有颗粒相的传热考虑。但是,从计算结果表明,通过该公式得到的结果与实际偏离并不大,本文认为,这可能是由于,在收敛段,气体流速较低,由于  $Al/Al_2O_3$  液滴会冲击到碳酚醛表面,使得表面温度接近燃气总温,即 3 500 K,而巴兹公式主要考虑了马赫数  $Ma$  的影响,通过该公式计算得到的温度将接近总温。因此,可以认为,采用巴兹公式基本能够适用于本文研究工况。

### 2) 边界退移

表面退移对碳/酚醛材料的传热及碳化有着重要的影响,必须考虑烧蚀退移对温度场及材料碳化的影响。

本研究采用 Abaqus 中的 ALE 方法,该过程为网格重新划分的过程,首先进行网格的移动及光滑,主要通过软件中的参数设置进行调整,包括划分网格频率等;然后,进行数据的传递,即将原网格的变量值复制到新网格中,这是通过软件中的 remapping 技术实现的。因此,该方法适用于研究材料的烧蚀、剥落等现象。

在退移速率方面,由于材料力学性能的复杂性,同时,材料与高温气流和液滴的作用机理不完全清晰,目前,没有一个有效的数学模型,对烧蚀现象进行定量预估。

由前述热化学烧蚀计算分析可见,碳层在热化学烧蚀下的烧蚀率很低。从试验结果可见,当燃气流动方向与材料呈现一定的角度时,烧蚀明显加剧,而在该情况下,气相传热并不增强。据此推断,材料表面是在气流或者金属液滴剪切或冲击作用下,产生了剥离现象,本文认为,整个烧蚀过程为:当碳化层完全碳化之后,强度变弱,脱离

材料表面,表面剩余材料主要应为未完全碳化、强度相对较强的分解层,如果表面存在大量完全碳化区域,那么,该区域由于强度较弱,必然也会被剥离。

通过对试验后的喷管解剖发现,残余的碳化层(包含未完全碳化的分解层)相对于烧蚀层的厚度较小,剩余的碳化层厚度大约为烧蚀层的 0.3 倍左右。由于材料本身存在部分未完全分解的区域,同时,由于后效碳化作用,必然也存在一些发动机工作之后形成的部分碳化区域。由于本身剩余的材料厚度较薄,剩余的完全碳化区域可能相对较少。

基于上述观察和推测,本研究作如下假设:当碳化完成之后,碳化层基本被侵蚀掉,即,剩余材料主要为原始材料层和分解层(未完全碳化的区域),完全碳化的区域基本不复存在,或者存在少量刚刚完全碳化的区域。

网格退移速率采用 UMESHMOTION 子程序实现。在数值计算中,虽然可以得到每个网格的碳化率,但是,计算时间步较小,网格相对较粗,每个时间步的退移量无法根据每个网格的碳化率进行准确的定义。因此,在子程序中,假设退移速率为常数,通过计算不同退移速率下的剩余材料温度场和碳化状态,确定符合上述假设的退移速率,最后与试验结果进行对比,验证本文的数值方法。

## 2 仿真结果分析

### 2.1 流体及结构温度场特征

本研究中,发动机工作时间为 40 s,因此,总的计算时间为 40 s,图 5 为 40 s 时刻的喷管压强和温度云图,由图可见,温度和压力云图稳定,不存在激波及明显间断区域。在主流区域,温度分布符合预期规律。

图 6 为碳/酚醛内表面的温度沿内表面的变化规律。图中 0 位置为气流上游区域,即靠近燃烧室方向的原点位置。在本文的计算中,入口温

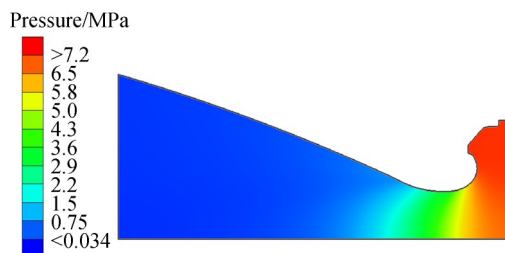


图5 喷管压强云图

Fig.5 Contour of the pressure in the nozzle

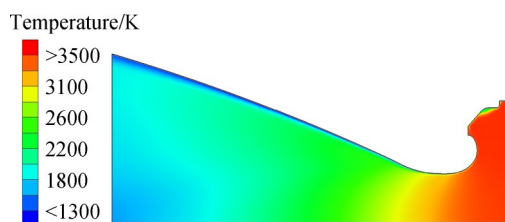


图6 喷管温度云图

Fig.6 Contour of the temperature in the nozzle

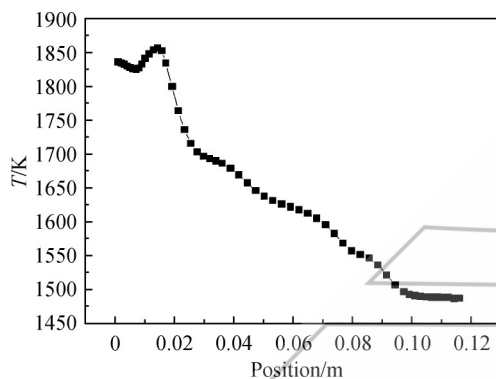


图7 碳/酚醛表面温度

Fig.7 Temperature along the inner surface of carbon/phenolic

度为 3 500 K,入口压强大约为 8.0 MPa。从图 7 中可以看出,表面温度不到 2 000 K,最低只有 1 500 K。这主要是由于,该区域的气流速度很低,表面传热系数较低,表面附近的传热接近热传导方式。根据式(1),计算热化学烧蚀,得到的烧蚀速率基本接近 0 mm/s。

由上述分析可以发现,仅仅通过热化学烧蚀机理,基于气相传热方式,无法预估碳/酚醛材料的烧蚀速率。通过观察试验烧蚀结果发现,当气流与材料表面呈现一定角度时,烧蚀明显增强,当气流与材料表面平行时,烧蚀较弱。这种现象可能是由气流的冲击或者高温燃气中的  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  冲击到材料表面,形成冲击力,引起了材料的剥落,或者是  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  液滴或颗粒附着在材料表面,增强了热化学烧蚀,同时,产生了颗粒侵蚀

现象。

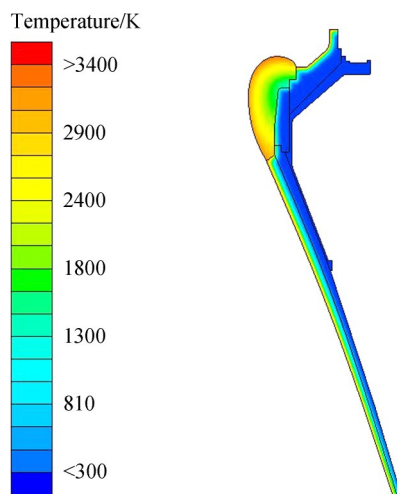
对于  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒造成的热化学烧蚀加剧以及剥蚀的影响程度,由于两个机理的交互作用很难进行衡量,本研究目前不做区分,均认为由于液滴或颗粒相造成的材料剥蚀。

由上述可见,针对碳/酚醛的烧蚀问题,必须考虑凝聚相的影响,针对材料侵蚀的定量预估,本研究针对第1章提出的假设,开展仿真研究工作,对上述假设进行进一步验证。

## 2.2 不考虑表面退移下的碳/酚醛温度场及碳化状态

图8为不考虑碳/酚醛表面退移情况下的喷管温度云图、碳/酚醛温度云图以及碳/酚醛的碳化率云图。从图8(b)的碳/酚醛温度云图可知,存在一个明显的高温渗透厚度,该厚度与图8(c)中的碳化率变化趋势基本一致,以图中明显的温度云图颜色明显变化的界面(大于 600 K)作为分析位置,厚度大约为 7.2 mm。其中,与喉衬接触的面也存在着温度梯度,这主要是由于,喉衬的热导率较大,使得温度已经传导到了碳/酚醛区域,如图8(a)所示。

碳/酚醛的碳化状态详见图8(c),其中数值1表示完全没有分解,0表示完全碳化。包括分解层的总的厚度大约为 5.7 mm,对应的温度大约为 900 K,即,在 900 K 时,碳/酚醛开始出现了明显的分解。从图中可以看出,在与喉衬接触的表面也出现了部分的碳化现象。碳/酚醛完全碳化的厚度大约为 2.0 mm,没有完全分解的厚度大约为 3.7 mm。对比基本原始材料区域可见,在不考虑烧蚀退移情况下,碳化层能够有效保护碳/酚醛结



(a) 喷管温度

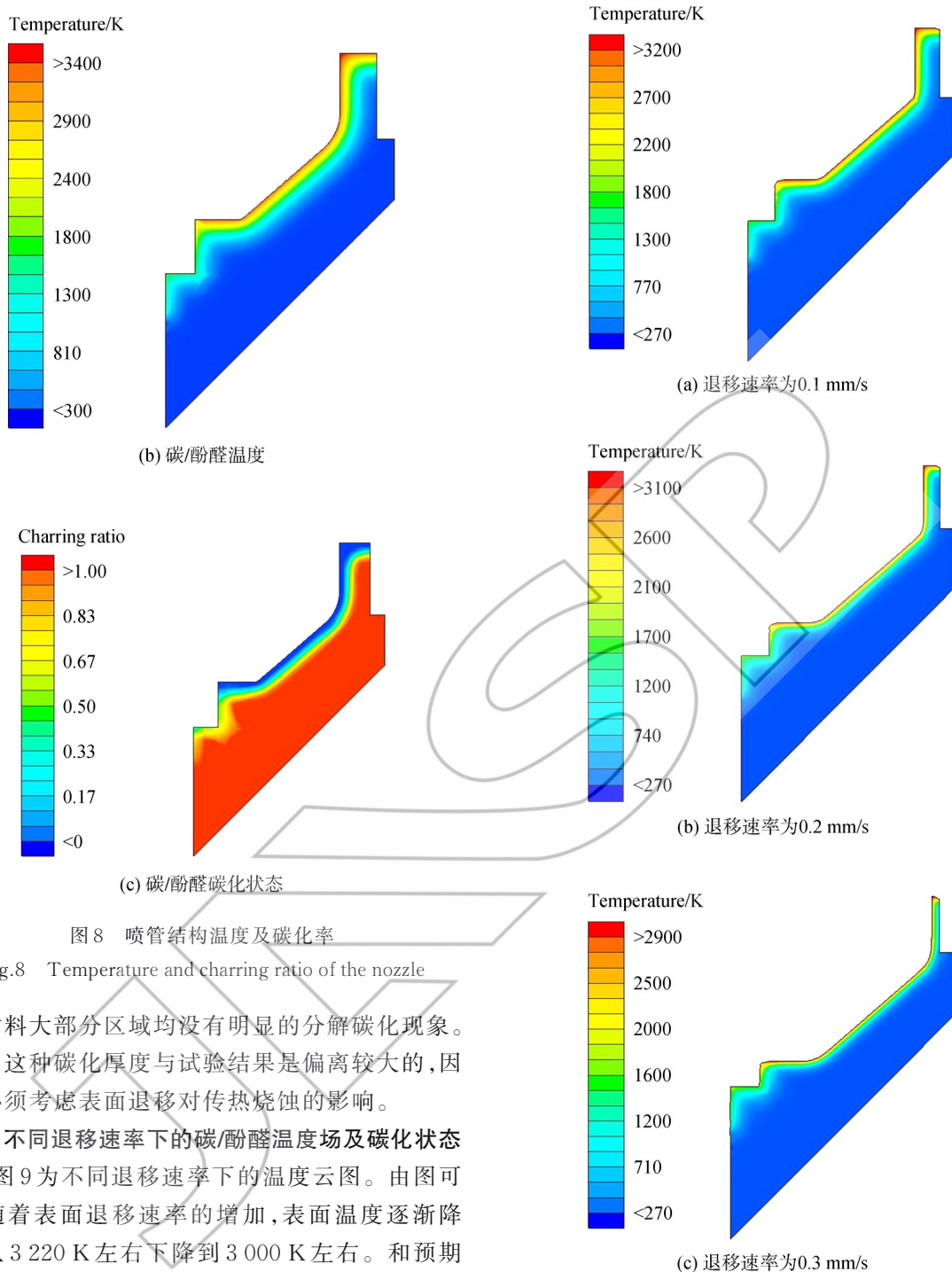


图8 喷管结构温度及碳化率

Fig.8 Temperature and charring ratio of the nozzle

构,材料大部分区域均没有明显的分解碳化现象。显然,这种碳化厚度与试验结果是偏离较大的,因此,必须考虑表面退移对传热烧蚀的影响。

### 2.3 不同退移速率下的碳/酚醛温度场及碳化状态

图9为不同退移速率下的温度云图。由图可见,随着表面退移速率的增加,表面温度逐渐降低,从3 220 K左右下降到3 000 K左右。和预期类似,随着退移速率的增加,剩余材料高温区的范围呈现下降趋势。

图10为不同退移速率下的碳化状态。表3为不同退移速率下的碳化层和分解层的厚度。数值主要取自A面上的结果,因为,从后续的试验对比发现,当气流与材料表面呈现一定的角度时,本文提出的假设更具有准确性和合理性。在退移速率为0.1 mm/s时,表面还有明显的完全碳化区域(图中蓝色区域),当达到0.2 mm/s时,完全碳化区域明显减小;而当达到0.3 mm/s时,在A面上,

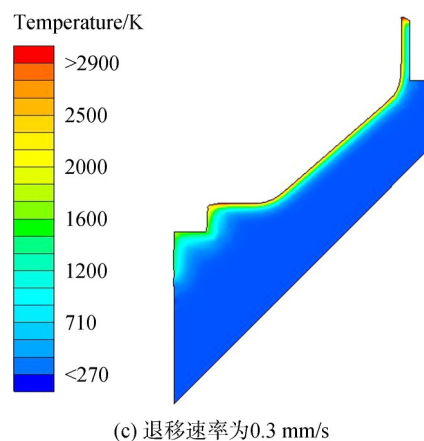
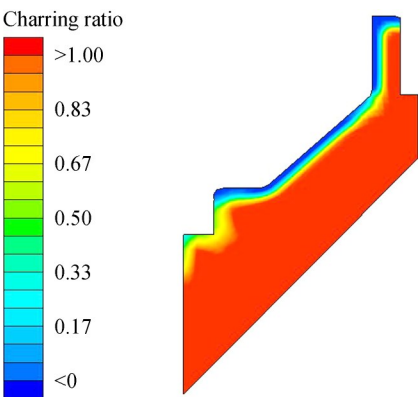


图9 不同退移速率下的碳/酚醛温度云图

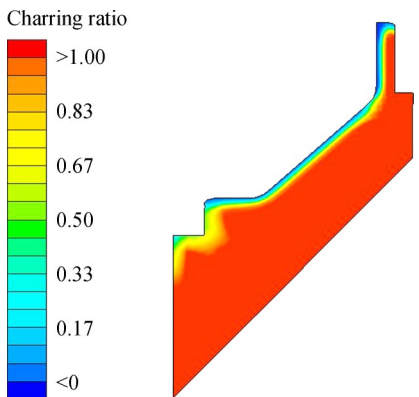
Fig.9 Temperature contour of carbon/phenolic for different regression rates

部分区域(主要是靠近燃烧室的区域)已经不存在完全碳化区域,而在其他区域,还存在着完全碳化区域,说明这些区域的烧蚀速率会大于0.3 mm/s。在A面完全碳化区域的分解层厚度大约为2.0 mm。

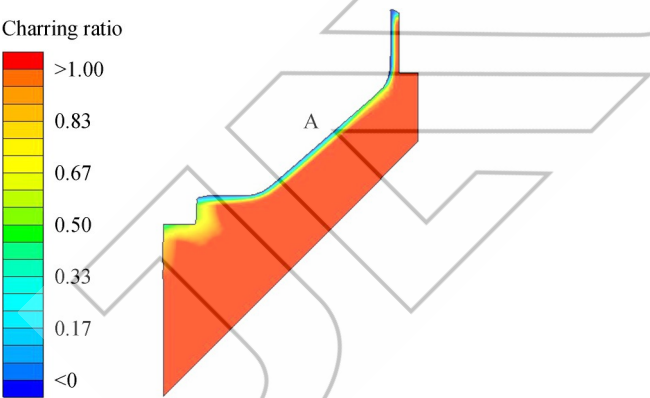
本研究没有继续开展0.4 mm/s的仿真计算,



(a) 退移速率为0.1 mm/s



(b) 退移速率为0.2 mm/s



(c) 退移速率为0.3 mm/s

图 10 不同退移速率下的碳/酚醛碳化率  
Fig.10 Charring rate contour of carbon/phenolic for different regression rates

表 3 不同工况下的材料表面分解层厚度  
Table 3 Thickness of pyrolysis zone material surface at different conditions

| 退移速率/(mm/s) | 碳化层厚度/mm | 分解层厚度/mm |
|-------------|----------|----------|
| 0.1         | 2.0      | 2.7      |
| 0.2         | 1.0      | 2.2      |
| 0.3         | 0~0.5    | 2.0      |

一方面是由于,A面上已经有部分区域不存在完全碳化层,虽然有部分区域仍然存在完全碳化区域,但是,该区域面积很小,预计这些区域的退移速率在0.4 mm/s左右;另一方面,上游区域逐渐变小,上游区域(图中的上部区域)网格畸形严重,仿真无法顺利完成,如需要开展继续的研究,需要针对不同区域,设置不同的退移速率,但是,不同区域的设置依据准则很难确定,本文认为,该方法的工程意义不大,因此,没有继续开展相关工作。

3 仿真结果验证

通过对试验后的碳/酚醛收敛段进行解剖,然后对形貌进行测量,获得材料的烧蚀和碳化性能。解剖后,沿轴向每隔10 mm测量一次相关尺寸,总计15个尺寸,收敛段为碳/酚醛复合材料,在每个轴向位置,分别测量剩余厚度、未碳化厚度,然后用原始厚度减去剩余厚度即为此部位的烧蚀量,用剩余厚度减去未碳化厚度即为碳化的厚度。连接各个点,最终得到烧蚀包络线。图11为烧蚀后的材料形貌,其中,材料在解剖过程中有部分的脱落现象。



图 11 试验后碳/酚醛的表面形貌  
Fig.11 Surface profile of the carbon/phenolic after experiment

图12为烧蚀与碳化的仿真与试验对比结果。其中,烧蚀仿真结果是根据0.3 mm/s的烧蚀速率乘以时间得到的,而碳化位置是在烧蚀界面基础上增加2.0 mm得到的。

首先,从烧蚀方面看,在吻合程度上,B、C面的仿真与试验结果基本吻合,B斜面的下游以及C面上,计算结果略低于试验结果,而从图11也可以看出,计算得到的材料表面仍存在一些完全

碳化的区域,预计烧蚀速率为  $0.3\sim 0.4\text{ mm/s}$ ,由此可以说明,仿真与试验结果还是比较吻合的。而在 A 面上,预估烧蚀量明显高于试验结果,本文认为,这主要是由以下原因造成的,在 A 面上,气流速度与材料表面基本呈现平行关系,预计  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  在该部分的沉积不会很明显,该区域的烧蚀可能以热化学烧蚀为主,气相传热起到主要的作用,因此,预估烧蚀量超过了试验结果的两倍。在最前缘(图 12 最左端的面),气流与材料表面呈现垂直关系,烧蚀预估结果比较吻合,由此充分说明了气流方向对粒子沉积以及相应的烧蚀效应的重要性。

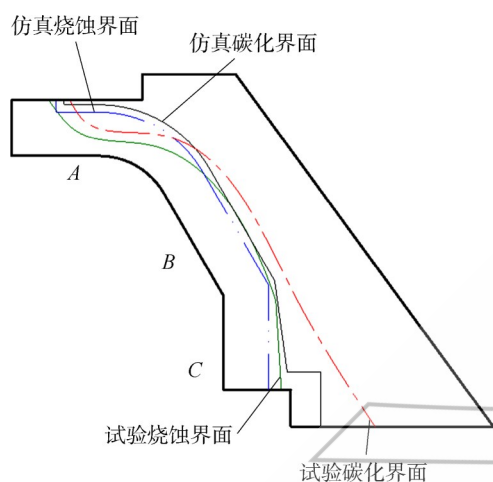


图 12 烧蚀量仿真与试验结果对比

Fig.12 Comparison of computational and experimental ablation of material

从碳化角度对比分析可见,在 A 和 B 面,试验得到的碳化厚度相对于烧蚀界面,大约为  $4.0\text{ mm}$ ,而仿真结果得到的碳化厚度大约为  $2.0\text{ mm}$ ,这种差异的主要原因是,试验得到的碳化层存在着后效碳化问题,根据仿真结果推测,后效碳化厚度和试验阶段的碳化厚度相当。在 C 面以及与喉衬接触的台阶位置,碳化层明显变厚,仿真与试验的差异的主要原因有两点:一方面,和 A、B 面类似,由于喉衬的存在,产生了更明显的后效碳化过程;另一方面,喉衬表面存在的表面退移,厚度变薄,使得实际的碳/酚醛温度会高于本研究仿真结果。

由上述可知,为了获得更准确的碳化层厚度以及 A 面的烧蚀情况,一方面,在 A 面上,以热化学烧蚀速率作为移动速度,而不是本文的烧蚀准则,另一方面,在计算中,考虑喉衬的退移,同时,计算后效碳化的作用。

综上所述,试验和仿真结果的差异主要是由仿真方法中的考虑因素不完全导致的,通过上述对比,从原理上,基本能够证明本文提出的烧蚀假设的合理性,从仿真结果上,说明本文提出的碳/酚醛烧蚀预估方法的预测准确性。

## 4 结 论

本文通过流固热耦合方法以及 Abaqus 的 ALE 自适应网格技术,对半潜入喷管收敛段的碳/酚醛的烧蚀进行了仿真预估,获得了碳/酚醛的烧蚀沿空间的变化规律,分析了碳/酚醛的烧蚀机理,确认了本文提出的方法在碳/酚醛烧蚀方面的预估能力,并提出了一些不足之处。主要得到以下结论:

- 1) 在半潜入喷管收敛段,碳/酚醛材料的烧蚀机理及烧蚀规律与气流方向有很大关系,当气流以一定角度流向材料表面时,  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  液滴或颗粒的侵蚀效应占主要地位,当气流与材料表面平行时,气相对流引起的热化学烧蚀起主要作用。
- 2) 在液滴颗粒的影响区域,表面完全碳化的区域会直接被烧蚀掉,后效碳化效应明显,碳化层大约为  $2.0\text{ mm}$ ,后效碳化后,碳化层厚度达到  $4.0\text{ mm}$ 。
- 3) 本文提出的烧蚀假设以及数值仿真方法能够较准确地预估碳/酚醛在液滴或颗粒作用下的烧蚀状态,具有一定的工程价值。

## 参考文献:

- [1] 郑雷,蔡峨,冯文澜.碳酚醛材料的温度场及烧蚀研究[J].推进技术,1990,1:14-19.  
ZHENG Lei, CAI Er, FENG Wenlan. Investigation on temperature profile and ablation of carbon-phenolic material[J]. Journal of Propulsion Technology, 1990, 1: 14-19. (in Chinese)
- [2] BIANCHI D, TURCHI A, NASUTI F, et al. Chemical erosion of carbon-phenolic rocket nozzles with finite-rate surface chemistry[J]. Journal of Propulsion and Power, 2013, 29(5): 1220-1230.
- [3] CROSS P G, BOYD I D. Two-dimensional modeling of ablation and pyrolysis with application to rocket nozzles[J]. Journal of Propulsion and Power, 2017, 54(1): 212-224.
- [4] CROSS P G. Coupled simulations of finite-rate ablation with pyrolysis in rocket nozzles[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2020, 34(2): 381-392.
- [5] CHENG G C, VENKATACHARI B S, COZMUTA I. Multi-scale simulations of in-depth pyrolysis of charring ablative thermal protection material[J]. Computers and Fluids, 2011, 45: 191-196.

- [6] 张拜. 防热材料烧蚀行为和热响应的数值仿真研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.  
ZHANG Bai. Numerical simulation on ablation behavior and thermal response of thermal protection materials[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 张运法. 低密度碳/酚醛复合材料高温响应数值模拟分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
ZHANG Yunfa. Numerical simulation analysis of high temperature responses of low-density carbon/phenolic composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [8] 王潇敏. 树脂基热防护材料烧蚀传热机理及参数分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.  
WANG Xiaomin. Mechanism and parameters analysis on ablative heat transfer of resin based thermal protection material [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [9] LI Weijie, HUANG Haiming, WANG Qing, et al. Protection of pyrolysis gases combustion against charring materials surface ablation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 102:10-17.
- [10] NEILSON J H, GILCHRIST A. Erosion by a stream of solid particles[J]. *Wear*, 1968, 11(2):111-122.
- [11] NEILSON J H, GILCHRIST A. An experimental investigation into aspects of erosion in rocket motor nozzles[J]. *Wear*, 1968, 11(2):123-143.
- [12] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1 effects of impact parameters on a predictive equation[J]. *Wear*, 2005, 259(1/2/3/4/5/6):95-101.
- [13] OKA Y I, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2 mechanical properties of materials directly associated with erosion damage[J]. *Wear*, 2005, 259(1/2/3/4/5/6):102-109.
- [14] THAKRE P, RAWAT R, CLAYTON R. Mechanical erosion of graphite nozzle in solid-propellant rocket motor[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2013, 29(3):593-602.
- [15] GEISLER R L. A global view of the use of aluminum fuel in solid rocket motors[J]. *AIAA-2002-3748*, 2002.
- [16] 邓为. 固体火箭发动机喷管内粒子侵蚀数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.  
DENG Wei. Numerical study of particle erosion in solid rocket motor nozzle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [17] 常桁, 刘一白, 刘宇, 等. 固体火箭发动机碳基材料喷管机械侵蚀特性[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(3):756-762.  
CHANG Heng, LIU Yibai, LIU Yu, et al. Mechanical erosion characteristics of carbon-based nozzle in solid rocket[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(3):756-762. (in Chinese)
- [18] YANG B C, CHEUNG F B. Numerical investigation of thermo-chemical and mechanical erosion of ablative materials[R]. *AIAA-93-2045*, 1993.
- [19] YANG B C, CHEUNG F B, KOO J H. Prediction of thermo-mechanical erosion of high-temperature ablatives in the SSRM Facility[R]. *AIAA-95-0254*, 1995.
- [20] POTTS R L. Hybrid integral/quasi-steady solution of charring ablation[J]. *AIAA-90-1677*, 1990.
- [21] 鲍福廷, 侯晓. 固体火箭发动机设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2016.

(编辑: 张 雪)