

文章编号:1006-9941(2024)02-0193-11

## NEPE推进剂固化降温过程残余应力应变分析

周东谟<sup>1</sup>,谢旭源<sup>1</sup>,王瑞民<sup>1</sup>,刘向阳<sup>2</sup>,惠步青<sup>1</sup>

(1.中北大学机电工程学院,山西太原030051;2.北京理工大学宇航学院,北京100081)

**摘要:**为研究硝酸酯增塑聚醚(NEPE)推进剂药柱固化与降温过程中残余应力/应变的形成机制,基于ABAQUS有限元软件对推进剂在固化与降温过程中的温度场、固化度场和应力/应变场进行数值分析。结果表明,NEPE推进剂药柱在50℃高温固化过程中,药柱内部存在温度梯度与固化速率梯度,药柱截面中心位置温度与固化速率较高,但在固化完成时内部固化度趋于一致,药柱内部的温差不会影响药柱最终的残余应力和残余应变;NEPE推进剂药柱在固化与降温2个阶段中,总残余应力/应变基本符合应力/应变叠加原理,药柱的残余应力/应变主要由固化收缩应力/应变与降温过程产生热应力/应变构成,总残余应力在这两阶段占比分别约为20%与80%,总残余应变占比分别约为30%与70%;本方法获得的残余应力/应变与传统采用温度折算方法计算结果分布趋势基本一致,但计算结果整体偏小。

**关键词:**硝酸酯增塑聚醚(NEPE)推进剂;温度场;固化度场;固化降温;残余应力

**中图分类号:** TJ55;V512

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023224

### 0 引言

复合固体推进剂固化是指在一定的温度条件下,推进剂中的黏合剂体系化学交联形成网状大分子,液态的推进剂药浆固化成型的过程<sup>[1]</sup>。降温过程主要是靠发动机壳体散热使推进剂由固化温度降低到使用温度的过程。对于贴壁浇注的固体火箭发动机,装药在固化成型后通常伴随残余应力/应变载荷的产生<sup>[2-3]</sup>,这种载荷一直伴随着发动机的整个服役过程。固体推进剂耐负荷能力差,这些载荷的存在会引起装药力学性能发生变化,严重时会造成推进剂药柱及界面的裂纹和脱粘,最终导致固体发动机装药结构完整性破坏<sup>[4]</sup>。因此准确分析固化降温作用下发动机药柱的应力/应变响应,对保证发动机安全可靠的应用具有重要意义。

推进剂在固化过程中会发生不同程度的热膨胀和固化收缩,从而引起热应力和固化收缩应力。贴壁浇注式发动机产生的残余应力/应变主要有以下4点原

因<sup>[5-6]</sup>:(1)黏合剂体系在固化过程中自身的体积收缩引起的固化收缩应力/应变;(2)推进剂固化温度与发动机的使用温度不同;(3)推进剂和发动机壳体两者热膨胀系数有差异;(4)药柱外表面与刚性发动机壳体的内表面相粘结,药柱的位移变形受到限制。当推进剂从高粘性流体状物体转变成固态时,黏合剂体系形成交联网络结构,推进剂产生固化体积收缩,大多数推进剂在固化起始点(凝胶点)之前开始收缩,但推进剂在凝胶点之前呈流体性质,模量较小,不能承受大的剪应力,因此其收缩应力较小<sup>[7]</sup>。推进剂在凝胶点之后仍有一定的体积收缩,称为净体积收缩,由于受诸多因素的影响,有时净体积收缩变得很大<sup>[8]</sup>。这种体积收缩受发动机壳体的限制,在固化的发动机药柱内导致产生残余应力,这种在固化过程中由自身的体积收缩引起的残余应力被称为固化收缩应力,该应力的大小直接取决于净体积收缩率<sup>[9]</sup>。

目前在分析固体发动机固化降温后的残余应力/应变时,主要采用数值模拟方法开展研究,通常没有考虑固化阶段药柱固化收缩应力/应变的形成过程,而是在降温计算中基于经验将固化收缩的影响折算为等效温度效应<sup>[10]</sup>,如复合推进剂固化温度为50℃时,认为推进剂装

收稿日期:2023-10-30;修回日期:2023-12-03

网络出版日期:2023-12-29

通信联系人:周东谟(1986-),男,副教授,主要从事固体发动机装药结构完整性评估研究。e-mail:zhoudongmo@nuc.edu.cn

引用本文:周东谟,谢旭源,王瑞民,等. NEPE推进剂固化降温过程残余应力应变分析[J]. 含能材料,2024,32(2):193-203.

ZHOU Dong-mo, XIE Xu-yuan, WANG Rui-min, et al. Residual Stress/Strain Analysis of NEPE Propellant under Curing and Cooling[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(2):193-203.

药零应力温度为 58 °C, 然后采用热-力耦合计算方法分析药柱在降温过程中的应力/应变, 文献[11-12]中关于固化降温载荷下药柱的应力/应变分析即采用此种方法。对于推进剂固化收缩过程鲜有考虑, 固化降温过程中推进剂装药的残余应力/应变形成历程尚不明确。因此, 固化收缩应力问题在药柱固化降温力学响应分析过程中应得到足够的重视。

为研究硝酸酯增塑聚醚(NEPE)推进剂在固化与降温 2 个阶段的应力/应变的形成机制, 开展了 NEPE 推进剂在固化与降温过程中药柱残余应力/应变数值模拟研究, 分析了 NEPE 推进剂药柱在固化与降温过程中残余应力/应变的发展历程, 获得了各阶段不同因素对推进剂药柱残余应力/应变的影响规律。研究结果对于提高复合固体推进剂药柱残余应力/应变的评估精度、明晰其形成机理可提供一定的参考。

## 1 数学模型

### 1.1 热传导模型

推进剂固化过程中的热量主要来源于 2 个方面, 一是经壳体传递给推进剂的外界热量, 另一部分是推进剂固化过程中化学反应产生的非线性内热源。根据 Fourier 热传导定律和能量平衡原理, 推进剂固化过程中的三维瞬态热传导控制方程表示为<sup>[13]</sup>:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + Q \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为材料的密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $C_p$  为材料的比热容,  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $T$  和  $t$  分别为温度和时间,  $\text{K}$  和  $\text{s}$ ;  $k_i$  为材料 3 个方向的导热率,  $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $Q$  为推进剂固化反应产生的热量,  $\text{J}$ , 可表示为:

$$Q = \rho H_r \frac{d\alpha}{dt} \quad (2)$$

式中,  $H_r$  为单位体积材料固化反应释放的总热量,  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $\alpha$  为固化度;  $d\alpha/dt$  为材料的固化速率。

NEPE 推进剂的固化反应动力学模型及参数, 选用文献[14]所采用的 Hsich 动力学模型, 可表示为:

$$\alpha = \frac{G'_\infty - G'(t)}{G'_\infty - G'_0} = \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right], \eta = \eta_0 \exp(E/RT) \quad (3)$$

该模型采用基于流变仪测试的推进动态储能模量表征推进剂的固化动力学特性, 其中  $G'_0$ 、 $G'$ 、 $G'_\infty$  分别对于固化初始时刻、固化任意时刻、以及固化结束时的

推进剂动态储能模量,  $\text{MPa}$ ;  $\beta$  和  $\eta$  为拟合参数;  $\eta_0$  对应于与温度有关的化学反应的特征松弛时间,  $\text{s}$ ;  $E$  为活化能常数,  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $R$  为普适气体常数, 其值为  $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $T$  为绝对温度,  $\text{K}$ 。

热传导固化分析的边界条件采用第三类边界条件:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h(T_a - T) \quad (4)$$

式中,  $T_a$  为外界换热温度,  $\text{K}$ ;  $h$  为对流换热系数,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。根据对流换热系数的经验计算方法<sup>[15]</sup>, 在静止空气条件下, 自然对流换热系数大致范围为  $1.0 \sim 10.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

### 1.2 热力学模型

推进剂药柱在固化降温过程中的应变主要包括固化收缩应变  $\varepsilon_c^{\text{sh}}$  和热应变  $\varepsilon_c^{\text{th}}$ , 总应变可表示为:

$$\Delta\varepsilon_c^{\text{tot}} = \Delta\varepsilon_c^{\text{th}} + \Delta\varepsilon_c^{\text{sh}} \quad (5)$$

NEPE 推进剂的固化体积收缩率可以表示为:

$$V_{\text{sh}} = \alpha V'_{\text{sh}} \quad (6)$$

式中,  $V_{\text{sh}}$  为某固化度下的体积收缩率;  $V'_{\text{sh}}$  为总的固化体积收缩率。

推进剂的体积收缩率变化为  $\Delta V_{\text{sh}}$ , 则固化收缩应变增量  $\Delta\varepsilon_c^{\text{sh}}$  表示为:

$$\Delta\varepsilon_c^{\text{sh}} = \sqrt[3]{1 + \Delta V_{\text{sh}}} - 1 \quad (7)$$

推进剂的热应变增量  $\Delta\varepsilon_c^{\text{th}}$  可以表示为:

$$\Delta\varepsilon_c^{\text{th}} = \alpha_c \Delta T \quad (8)$$

式中,  $\alpha_c$  为热膨胀系数;  $\Delta T$  为温度增量。

考虑到 NEPE 推进剂药柱在固化过程的力学效应时间尺度较长, 故采用线弹性模型对其在固化成型过程中的力学响应进行分析。

NEPE 推进剂固化阶段完成后, 进入降温阶段, 将降温阶段的推进剂视为粘弹性材料, 三维线性粘弹性材料积分本构方程的一般形式为<sup>[16]</sup>:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_{-\infty}^t G_{ijkl}(t-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} [\varepsilon_{kl}^{\text{eff}}(\tau)] d\tau \quad (9)$$

式中,  $G_{ijkl}(t)$  为松弛函数;  $\varepsilon_{kl}^{\text{eff}}(t)$  为  $t$  时刻的有效应变。

$$\varepsilon_{kl}^{\text{eff}}(t) = \varepsilon_{kl}(t) - \varepsilon_{mn}(t) = \varepsilon_{kl}(t) - \alpha_c \theta(t) \quad (10)$$

式中,  $\varepsilon_{kl}(t)$  为  $t$  时刻材料的总应变;  $\varepsilon_{mn}(t)$  为  $t$  时刻热应变;  $\theta(t)$  为  $t$  时刻温度变化。

对于热粘弹性边值问题, 温度变化将引起热应力和热应变, 粘弹性材料的力学性能不仅与时间有关, 还与温度有着强烈的依赖关系, 即为时温等效原理<sup>[17]</sup>:

$$E(T_1, t) = E(T_2, t/\alpha_T) \quad (11)$$

式中,  $\alpha_T$  为转换因子, 采用 WLF(Williams Landel Fer-

ry) 方程<sup>[17]</sup>描述:

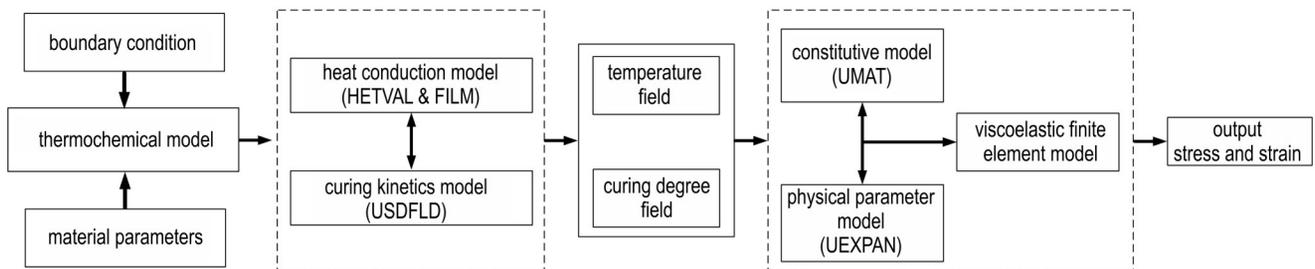
$$\log(\alpha_T) = \log\left(\frac{\tau(T)}{\tau(T_{ref})}\right) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (12)$$

式中,  $C_1$  和  $C_2$  为常数, 与材料属性相关, 可通过力学性能试验获得;  $T_{ref}$  为参考温度, K。

## 2 有限元建模

### 2.1 计算流程

基于 ABAQUS 有限元软件平台<sup>[18]</sup>, 首先采用热-化学模型模拟推进剂药柱的生热、传热过程, 计算固化阶段每个单元节点的温度和固化度值; 然后采用热-力模型计算推进剂固化降温的应力/应变, 通过模块化的顺序耦合方法来完成固化降温过程的数值计算。数值仿真流程如 Scheme 1 所示。



Scheme 1 Curing and cooling simulation for propellant

### 2.2 有限元建模

以圆管型 NEPE 推进剂装药为研究对象, 建立 1/4 三维有限元模型, 模型包含壳体、绝热层、推进剂药柱, 绝热层两端含人工脱粘层。考虑到芯模的热传导率较大, 在降温过程对发动机装药的温度历程影响较大, 故模型还包含芯模部分。模型网格类型采用三维 8 节点实体单元 C3D8H, 共 37744 个单元, 45269 个节点。圆管型 NEPE 推进剂装药模型及网格划分如图 1 所示。

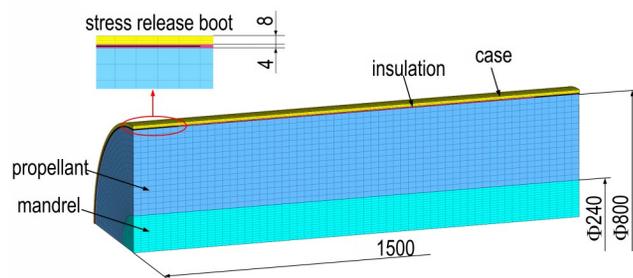


图 1 发动机模型与网格(单位: mm)

Fig.1 Motor model and mesh(unit: mm)

数值仿真中用到的子程序功能如下:

USDFLD: 定义固化度场量和固化速率场量, 并实现 HETVAL、UMAT 和 UEXPAN 子程序之间的数据传递;

FILM: 定义边界对流换热条件, 控制环境温度;

HETVAL: 定义固化过程中的反应放热, 结合 USDFLD 子程序将推进剂固化过程嵌入到传热分析中, 以实现温度场和固化度场的耦合求解;

UEXPAN: 定义 NEPE 推进剂材料的热应变及其化学反应收缩应变, 结合 HETVAL、USDFLD 子程序求解得到的温度场和固化度场计算应变;

UMAT: 定义推进剂固化过程中的弹性本构模型和降温过程中的粘弹性本构模型, 结合 UEXPAN 子程序求解得到的热应变及固化收缩应变计算药柱应力。

### 2.3 边界条件与计算工况

边界条件如下:

(1) 壳体-绝热层-推进剂界面均采用绑定(Tie)约束, 分析过程中界面不分离, 内部热传递模式为接触热传导;

(2) 壳体外表面固定, 发动机对称面设置对称约束条件; 考虑到芯模表面一般涂抹脱模剂以便于脱模, 推进剂与芯模表面设置为自由面;

(3) 芯模两端、壳体外表面与空气对流换热, 对流换热系数取值为  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[19]</sup>。

计算工况如下:

Step-1: 固化阶段, NEPE 推进剂药浆、绝热层、壳体与芯模初始温度为  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , NEPE 推进剂药浆在  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  的环境温度下固化 7 d。

Step-2: 降温阶段, 固化完成的发动机放置  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  室温环境, 自然冷却至室温。

### 2.4 材料参数

NEPE 推进剂的固化动力学参数取自文献<sup>[14]</sup>, 如表 1 所示。

表1 NEPE推进剂固化动力学参数

Table 1 Curing kinetic parameters of NEPE propellant

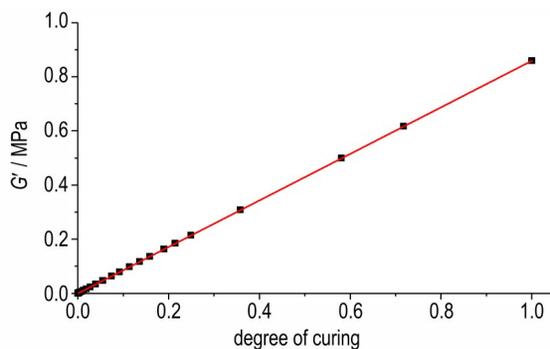
$T / K$	$E / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\eta_0 / \text{s}$	$\eta / \text{s}$	$\beta$
323.15	120.6	91686.45	133363	4.73

Note:  $T$  is the absolute temperature.  $E$  is the activation energy.  $\eta_0$ ,  $\eta$  and  $\beta$  are the fitting parameter.  $\eta$  is the characteristic relaxation time of temperature-dependent chemical reactions.

在固化阶段,根据国内外学者提出的固态高聚合物模量动静态转换公式<sup>[20]</sup>,可将固化阶段NEPE推进剂的模量表示为:

$$E'(t) \approx G'(\omega)|_{\omega = 2/(\pi t)} \quad (13)$$

由式(13)可知NEPE推进剂固化阶段的弹性模量可以近似采用固定频率 $\omega$ 测得的储能模量。文献[14]中NEPE推进剂储能模量随固化度的变化曲线如图2所示。

图2  $G'$ 随固化度的变化图<sup>[14]</sup>Fig.2  $G'$  varies along the degree of curing<sup>[14]</sup>

拟合图2数据,可获得NEPE推进剂固化阶段的弹性模量为:

$$E' = G' = 6.10 \times 10^{-5} + 0.86\alpha \quad (14)$$

式中, $E'$ 为弹性模量,MPa。

NEPE推进剂药柱在固化过程中,反应热主要源于NEPE黏合剂的反应,则固化过程中推进剂的反应热为:

$$Q = V_s \cdot Q_h \quad (15)$$

式中, $V_s$ 为反应物的体积占比; $Q_h$ 为NEPE黏合剂的反应热,参照文献[21]取值为 $134.68 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。NEPE黏合剂在NEPE推进剂中的质量占比为约为8%,考虑到推进剂药柱各组成组分密度相差不大,可将NEPE黏合剂在NEPE推进剂中的质量占比视为其体积占比。

在降温阶段,将NEPE推进剂视为粘弹性材料,其松弛模量采用Prony级数表示为:

$$E(t) = 0.868 + 0.561e^{-\frac{t}{0.0002}} + 0.474e^{-\frac{t}{0.002}} + 0.406e^{-\frac{t}{0.02}} + 0.348e^{-\frac{t}{0.2}} + 0.298e^{-\frac{t}{2}} + 0.255e^{-\frac{t}{20}} + 0.22e^{-\frac{t}{200}} \quad (16)$$

$$+ 0.185e^{-\frac{t}{2000}} + 0.165e^{-\frac{t}{20000}} + 0.147e^{-\frac{t}{200000}}$$

式中, $E(t)$ 为松弛模量,MPa。

取参考温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $C_1 = -7.053$ ,  $C_2 = 171.513$ 。其余材料参数如表2所示。

表2 材料参数

Table 2 Material properties parameters

material parameters	grain	insulation	case
density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1803	1226	7800
poisson's ratio	0.496	0.496	0.3
expansion coefficient / $\text{K}^{-1}$	$0.86 \times 10^{-4}$	$1.78 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-5}$
heat conductivity / $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.55	0.274	38.95
specific heat / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	1180	2116	512.91
elasticity modulus / MPa	$E(t)$	6.973	$210 \times 10^3$

### 3 结果分析

#### 3.1 固化过程药柱温度与固化度

利用ABAQUS软件中的Visualization模块显示计算结果云图。NEPE推进剂药柱在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下,在固化前期(24 h)、固化中期(72 h)和固化后期(168 h)的温度场云图如图3所示。

由图3可知,在固化过程中,推进剂药柱内部中心温度较周边高。固化中期(图3b)药柱内部温度高于固化初期(图3a)的温度,在固化结束时(图3c),药柱内部温度趋于均匀,接近环境温度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。显然这是由于在固化初期和固化后期药柱固化反应速率较慢,在固化中期固化反应速率较快从而使得放热速率也较快,且药柱中心位置离换热边界较远,存在一定的热聚集引起的。

推进剂药柱固化24,72 h和168 h时的固化度场云图如图4所示。

由图4可知,固化度分布与温度分布呈现出相同趋势,在固化初期和固化中期药柱内部温度相对边缘较高,因此固化初期(图4a)和固化中期(图4b)推进剂药柱内部中心固化度较周边高。固化结束时(图4c)药柱内部固化度趋于均匀,达到0.986以上。

为进一步分析NEPE推进剂药柱内部固化度和温度的变化规律,根据温度和固化度的分布特点选取10个节点进行分析,如图5所示。

各节点温度及固化度随时间的变化曲线如图6所示。

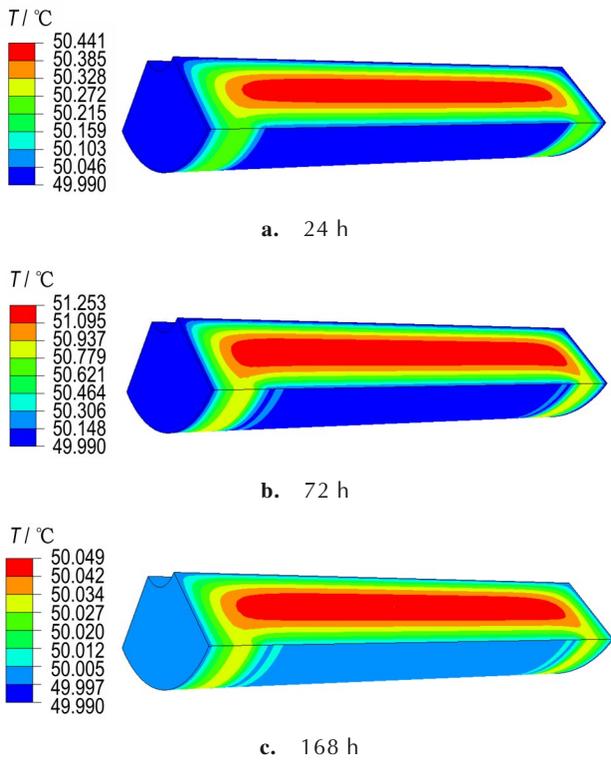


图3 NEPE 推进剂 50 °C 下固化的前中后期温度场云图  
Fig.3 Contours of the temperature under the different curing period of the NEPE propellants at 50 °C

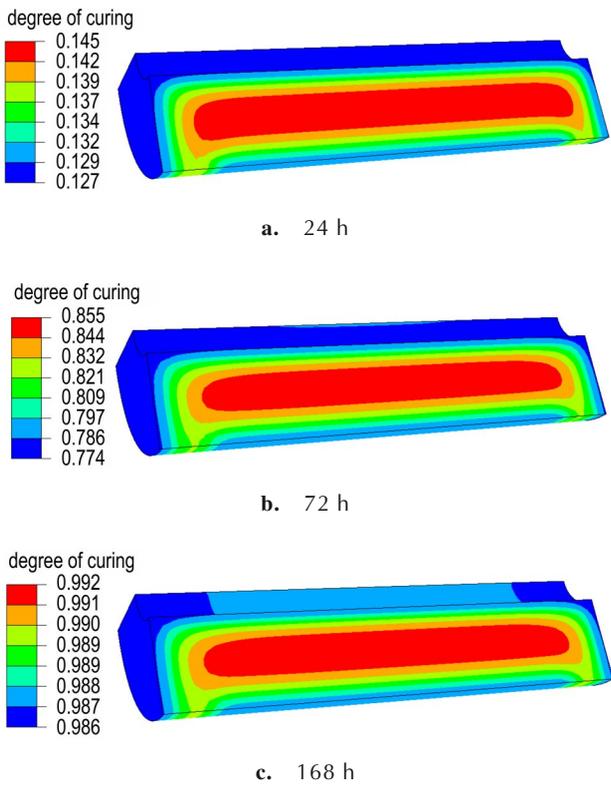


图4 NEPE 推进剂固化度场云图  
Fig.4 Contours of the curing degree of the NEPE proplants

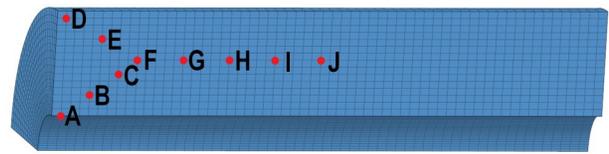


图5 分析节点的选取  
Fig.5 Schematic diagram of node selection

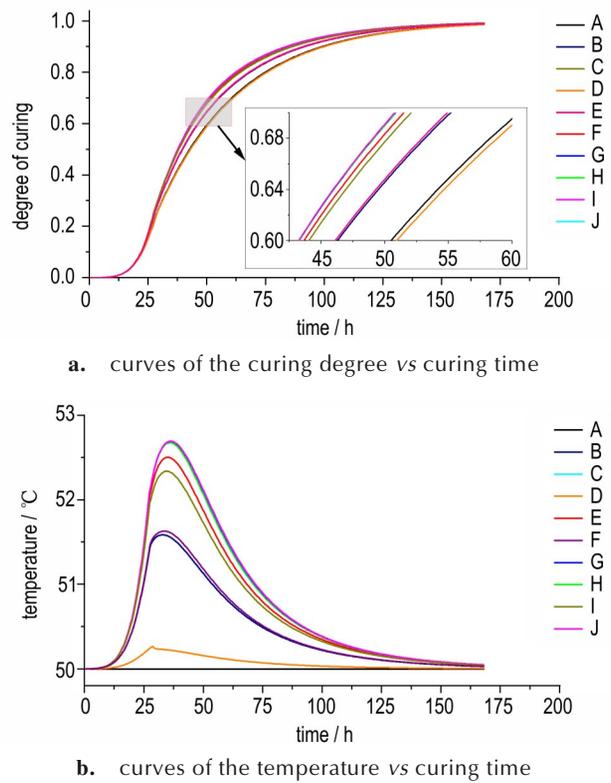


图6 不同节点的固化度和温度随时间变化图  
Fig.6 Variation histories of curing degree and temperature with curing time for different node selection

由图 6a 可知,在固化 20 h 内 NEPE 推进剂固化度增速较慢;在 20 h 到 40 h 时,固化度增速逐渐加快,在 40 h 时,固化度增速达到最大;在固化 40 h 之后,固化度增速逐渐减慢,并在 160 h 之后,固化度逐渐趋于稳定。在固化 25 h 到 130 h 间,推进剂内部 F、G、H、I、J 点的固化度明显比周边其他点高,最大固化度差在 65 h 时达到 0.10,在其余时间段内各点的固化度差异不是很明显。

由图 6b 可知,在固化过程中 NEPE 推进剂药柱内部温度整体呈现出先增大,后减小的趋势,在固化 30 h 左右内部各点的温度达到最大,各点之间的温差也达到最大。位于推进剂药柱内部的 F、G、H、I、J 点的温度较高,而位于推进剂药柱端部内孔边缘上的 A 点

和绝热层处的D点,基本上温度维持在环境温度50℃左右。在固化150h之后,推进剂内部温度基本上趋于均匀,约为50℃。

推进剂固化整体上是一放热反应,在固化前期与中期,固化程度不高,温度的不均匀引起药柱内部固化速率分布不均,从而导致药柱在固化前、中期内部存在较大温度梯度与固化度梯度。在固化后期,药柱基本固化完成,相应的固化反应速率很低,药柱内部产热速率与散热速率基本平衡,其内部温度也趋于一致。

### 3.2 固化过程药柱残余应力应变

以等效应力与总等效应变表征药柱的残余应力与残余应变。NEPE推进剂药柱固化完成时,药柱总等效应力 $\sigma_c^{\text{tot}}$ 与总等效应变 $\varepsilon_c^{\text{tot}}$ 结果如图7所示。

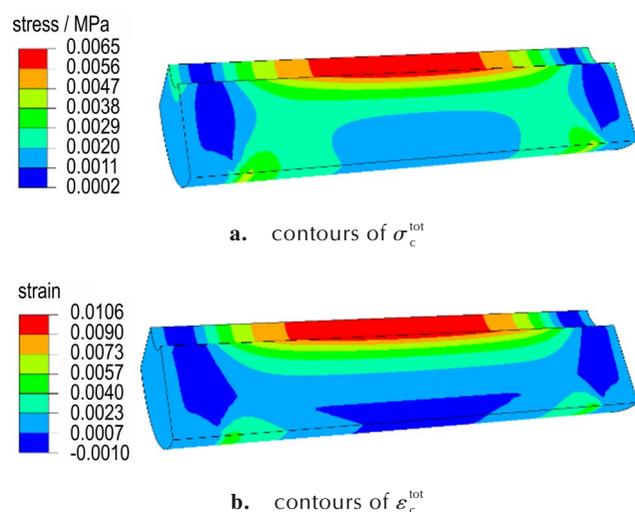


图7 固化结束时的应力应变云图

Fig.7 Contours of stress and strain at the end period of curing

由图7可知,推进剂固化完成时药柱总等效应力 $\sigma_c^{\text{tot}}$ 与总等效应变 $\varepsilon_c^{\text{tot}}$ 的药最大值均位于柱内孔中部,最大总等效应变为0.011,最大总等效应力为0.0065 MPa。为了进一步分析固化结束时NEPE推进剂药柱等效应力/应变的分布,选取如图8所示的4条路径进行分析。

固化结束时NEPE推进剂药柱等效应力/应变随路径1~4的变化曲线如图9所示。由图9可知,药柱等效应力/应变最大位置在药柱内孔中部,其次在人工脱粘层根部存在一定的应力/应变集中,其它部位应力/应变较小。

NEPE推进剂药柱在固化过程中,总等效应力 $\sigma_c^{\text{tot}}$ 主要由推进剂固化收缩引起的等效应力 $\sigma_c^{\text{sh}}$ 与热膨胀引起的等效应力 $\sigma_c^{\text{th}}$ 两部分组成,总等效应变 $\varepsilon_c^{\text{tot}}$ 类似。为进一步分析固化过程中各部分应力/应变随时间的

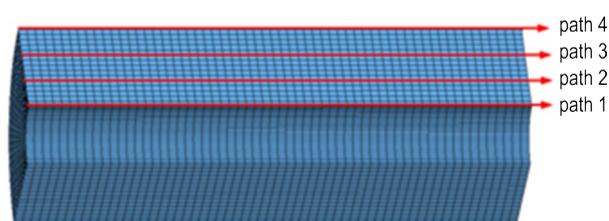


图8 分析路径选取图

Fig.8 Schematic map of path selection

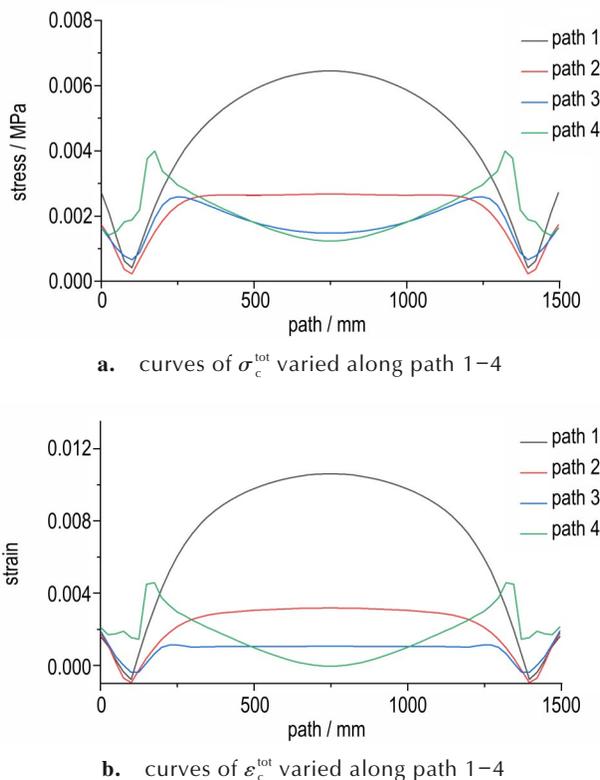


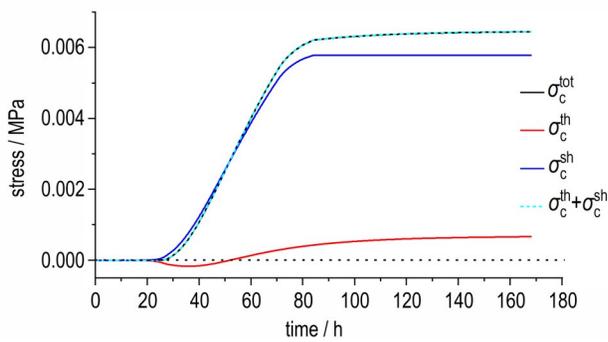
图9 应力/应变随路径变化曲线图

Fig.9 Variation histories of the stress and strain with path 1-4

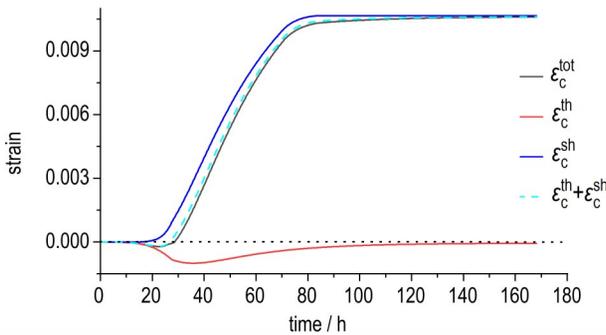
变化趋势,选取路径1中间位置的各部分应力/应变变化如图10所示。

由图10可知,在固化前24h内,药浆中的高分子黏合剂尚未形成明显的交联网络,药浆处于黏流状态,药柱内部的基本没有产生应力/应变。之后随着固化时间增长,推进剂反应程度和交联网络逐步增大,推进剂的固化收缩速率与模量逐渐增加,相应的 $\sigma_c^{\text{sh}}$ 与 $\varepsilon_c^{\text{sh}}$ 也快速增加。在固化约80h后,药柱内部的 $\sigma_c^{\text{sh}}$ 与 $\varepsilon_c^{\text{sh}}$ 快速放缓并基本保持不变。

对于热应力与热应变,由于固化过程中药柱温度变化不大,因此 $\sigma_c^{\text{th}}$ 与 $\varepsilon_c^{\text{th}}$ 整体较小。在固化30h左右时,药柱内部温差最大,对应的 $\sigma_c^{\text{th}}$ 与 $\varepsilon_c^{\text{th}}$ 也最大。固化过程中推进剂承受收缩应力/应变时,推进剂处于受拉状态,承受热应力/应变时推进剂处于受压状态,即固



a. curves of stress vs curing time



b. curves of strain vs curing time

图 10 应力/应变随时间变化曲线图

Fig.10 Variation histories of stress and strain with curing time

化收缩应力/应变与热应力/应变方向相反,因此图 10 中  $\epsilon_c^h$  为负值,而  $\sigma_c^h$  在固化后期由负变正,这是由于固化后期推进剂固化速率降低,推进剂温度也降低,药柱反向的热收缩而产生反向的热应力,因固化后期推进剂模量变大,因此  $\sigma_c^h$  由负变正。

由于推进剂药柱在固化过程中的残余应力/应变主要由固化收缩应力/应变与热应力/应变构成,由图 10 可见,  $\sigma_c^h$  与  $\sigma_c^s$  之和与总等效应力  $\sigma_c^{tot}$  基本相等,  $\epsilon_c^h$  与  $\epsilon_c^s$  之和与  $\epsilon_c^{tot}$  基本相等。这说明固化收缩应力/应变与热应力/应变之间的耦合关系并不强,可近似认为在固化阶段,NEPE 推进剂药柱内部的残余应力/应变是由固化收缩应力/应变与热应力/应变线性叠加而成。

### 3.3 降温过程药柱残余应力应变

在固化的基础上对 NEPE 推进剂药柱进行降温过程进行计算,降温完成时药柱总等效应力  $\sigma^{tot}$  与总等效应变  $\epsilon^{tot}$  云图如图 11 所示。

由图 11 可知,降温结束时,药柱产生的  $\sigma^{tot}$  与  $\epsilon^{tot}$  的最大值均位于药柱内孔中部,最大  $\sigma^{tot}$  为 0.0357 MPa,最大  $\epsilon^{tot}$  为 0.033。降温完成后药柱的  $\sigma^{tot}$  与  $\epsilon^{tot}$  沿路径 1~4 的变化如图 12 所示。

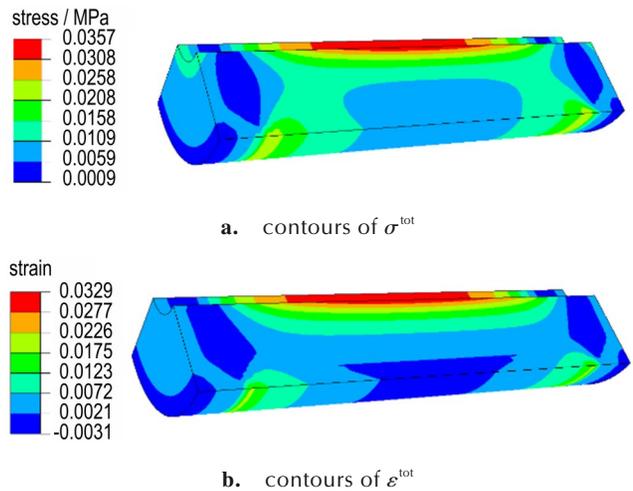
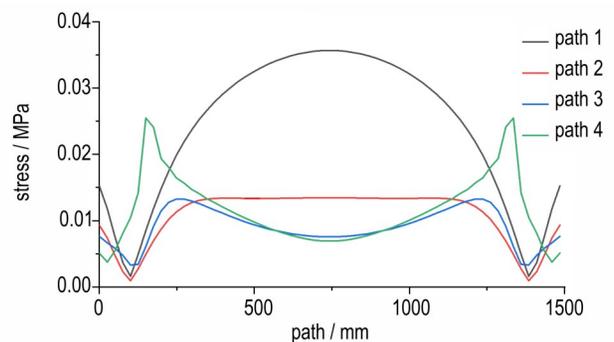
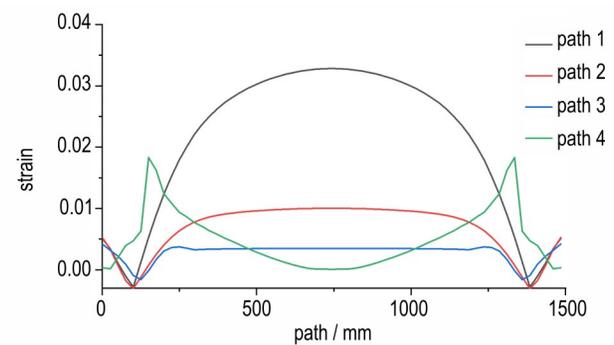


图 11 固化降温结束时的应力应变云图

Fig.11 Contours of stress and strain at the end of cooling



a.  $\sigma^{tot}$  varied along path 1-4



b.  $\epsilon^{tot}$  varied along path 1-4

图 12 应力/应变随路径 1~4 变化曲线图

Fig.12 Variation histories of the stress and strain with path 1-4

由图 12 可知,降温结束时,药柱等效力/应变最大位置在药柱内孔中部,其次在人工脱粘层根部存在一定的应力/应变集中,其它部位应力/应变较小。降温完成时药柱总等效应力  $\sigma^{tot}$  包含固化阶段的  $\sigma_c^{tot}$  与降温过程的产生的热应力  $\sigma_a^h$ ,总等效应变  $\epsilon^{tot}$  类似。固化降温完成后,路径 1 上各部分应力/应变的构成如图 13 所示。

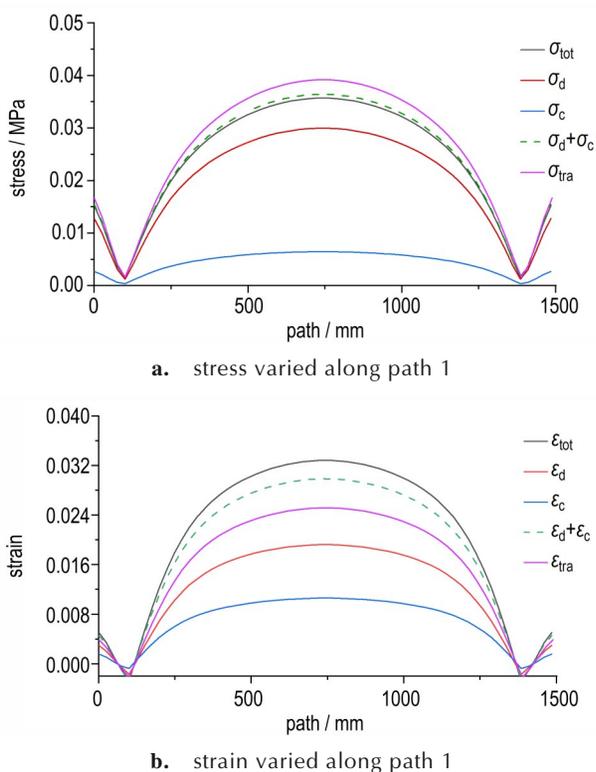


图13 各应力/应变随路径1变化曲线图

Fig.13 Variation histories of the stress and strain with path 1

由图13可见, NEPE推进剂药柱在固化降温结束后,  $\sigma_c^{\text{tot}}$ 与 $\sigma_d^{\text{th}}$ 之和与药柱残余等效应力 $\sigma^{\text{tot}}$ 基本相等,  $\epsilon_c^{\text{tot}}$ 与 $\epsilon_d^{\text{th}}$ 之和与 $\epsilon^{\text{tot}}$ 近似相等, 可近似认为在固化降温过程中NEPE推进剂药柱内部的残余应力/应变是由固化阶段残余应力/应变与降温阶段热应力/应变线性叠加而成, 但该阶段热应力/应变所占比重较大。

综合图10与图13可知, NEPE推进剂药柱在固化与降温2个阶段的残余应力/应变基本符合应力/应变叠加原理。在固化过程中, 药柱内部的温差会引起固化速率不均匀, 影响残余应力/应变的形成历程, 但最终药柱的固化度与温度趋于一致, 因此, 药柱内部的温差不会影响药柱最终的残余应力和残余应变。

表3进一步给出了在药柱固化降温过程中路径1上中心位置各部分应力/应变的比例。

由表3可知, NEPE推进剂药柱内孔处的残余应力与应变, 主要是由药柱降温载荷引起的, 即推进剂固化温度与药柱使用温度不同, 在固化成型后的降温过程中, 由于壳体的约束, 推进剂产生的热应力占比约为80%, 热应变占比约为70%。同时推进剂由于固化体积收缩产生的固化收缩应力/应变也不容忽视, 固化收缩应力占比约为18%, 固化收缩应变占比约为30%。

表3 各应力应变占比表

Table 3 The stress and strain ratio

	stage		value	ratio
residual stress (0.036 MPa)	curing	$\sigma_c^{\text{sh}}$	0.0058 MPa	18%
		$\sigma_c^{\text{th}}$	0.0007 MPa	2%
	cooling	$\sigma_d^{\text{th}}$	0.029 MPa	80%
residual strain (0.033)	curing	$\epsilon_c^{\text{sh}}$	0.011	30%
		$\epsilon_c^{\text{th}}$	0	0
	cooling	$\epsilon_d^{\text{th}}$	0.024	70%

Note:  $\sigma_c^{\text{sh}}$  is the equivalent stress caused by curing shrinkage in the curing stage.  $\sigma_c^{\text{th}}$  is the equivalent stress caused by thermal expansion in the curing stage.  $\sigma_d^{\text{th}}$  is the equivalent stress caused by thermal expansion in the cooling stage.  $\epsilon_c^{\text{sh}}$  is the equivalent strain caused by curing shrinkage in the curing stage.  $\epsilon_c^{\text{th}}$  is the equivalent strain caused by thermal expansion in the curing stage.  $\epsilon_d^{\text{th}}$  is the equivalent strain caused by thermal expansion in the cooling stage.

传统方法在研究复合推进剂药柱固化降温过程中的残余应力/应变时, 通常将推进剂固化收缩引起的应力/应变折算为等效温度8℃。按传统方法计算的到NEPE推进剂药柱在固化降温结束时4条路径上的残余应力 $\sigma_{\text{tra}}^{\text{tot}}$ 与残余应变 $\epsilon_{\text{tra}}^{\text{tot}}$ 如图14所示。

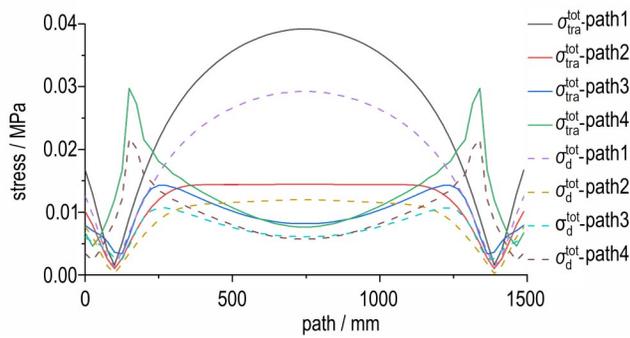
由图14可见, 按传统方法计算得到的残余应力 $\sigma_{\text{tra}}^{\text{tot}}$ 相较本研究计算结果整体偏大, 在药柱内孔中部偏大约20%, 在人工脱粘层根部偏大约10%。传统方法计算得到的残余应变 $\epsilon_{\text{tra}}^{\text{tot}}$ 除在柱内孔中部、人工脱粘层根部等应变集中部位较本研究计算结果偏大外, 最大偏差约10%, 在其余部分基本一致。究其原因在于传统的温度折算方法是将推进剂的固化体积收缩率折算为8℃的等效温度, 没有考虑装药结构因素, 且对于不同配方的推进剂, 其固化体积收缩率也存在一定的差异。

## 4 结论

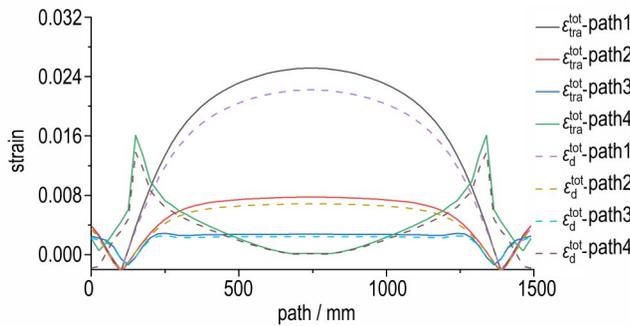
开展了考虑NEPE推进剂在固化降温过程中药柱残余应力/应变数值分析, 得到以下结论:

(1) NEPE推进剂药柱在50℃环境固化过程中, 由于药柱中心位置离换热边界较远, 存在一定的热聚集, 导致药柱内部存在温度梯度, 最高温度产生在药柱截面中心位置, 在固化结束时药柱温度场趋于与环境温度一致。内部温差导致固化过程中固化速率不均匀, 造成药柱截面中心位置固化速率较快, 但在固化完成时内部固化度趋于一致, 药柱内部的温差不会影响药柱最终的残余应力和残余应变。

(2) NEPE推进剂药柱在固化与降温过程中的残



a. comparison of residual stress varied along path 1-4



b. comparison of residual strain varied along path 1-4

图 14 应力/应变随路径 1~4 变化曲线图

Fig.14 Stress and strain varied along path 1-4

余应力/应变主要由固化收缩应力/应变与降温过程产生热应力/应变构成。对于残余应力,二者占比分别约为 20% 与 80%,对于残余应变,二者占比分别约为 30% 与 70%。可近似认为,在固化与降温 2 个阶段中药柱内部的残余应力/应变是由固化收缩应力/应变与热应力/应变线性叠加而成。

(3) 由于传统方法在计算时只将推进剂固化体积收缩率折算为等效温度而未考虑推进剂的装药结构因素,故按传统方法计算得到的残余应力/应变相较本研究计算结果整体偏大,其中,残余应力最大偏差约为 20%,残余应变最大偏差约为 10%,其余部分基本一致。

#### 参考文献:

- [1] 朱智春,蔡峨. 固体火箭发动机药柱三维温度场应力场有限元分析[J]. 推进技术, 1997, 18(2): 21-26.  
ZHU Zhi-chun, CAI E. A finite element analysis of three-dimensional temperature and stress fields for solid rocket motor grain [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1997, 18(2): 21-26.
- [2] 徐新琦,胡明勇. 固体火箭发动机药柱热粘弹性瞬态响应分析[J]. 机械设计与研究, 2004, 20(2): 69-71+9.  
XU Xin-qi, HU Ming-yong. Transient temperature and stress analysis for thermos-viscoelastic SRM grains [J]. *Machine De-*

*sign and Research*, 2004, 20(2): 69-71+9.

- [3] 潘奠华,胡明勇. 固化降温过程中固体火箭发动机材料参数的影响分析[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2006, 19(1): 63-67.  
PAN Dian-hua, HU Ming-yong. Influence of solid rocket engine material parameters when solidifying [J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2006, 19(1): 63-67.
- [4] 韦世锋. 温度和内压作用下装药结构完整性分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.  
WEI Shi-feng. Structural integrity analysis of charge under temperature and internal pressure [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [5] 孙晓飞,刘轩,占明明,等. 固化体系对 PET 型复合固体推进剂力学性能的影响研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2020, 18(4): 12-18.  
SUN Xiao-fei, LIU Xuan, ZHAN Ming-ming, et al. Research progress in influence of curing system on mechanical performance of PET type composite solid propellant [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2020, 18(4): 12-18.
- [6] 邢耀国,金广文,许学春,等. 某型固体火箭发动机综合性能试验与寿命评估[J]. 推进技术, 2004, 25(2): 176-179.  
XING Yao-guo, JIN Guang-wen, XU Xue-chun, et al. Comprehensive property tests and service life evaluation for solid rocket motors [J]. *Journal of Propulsion technology*, 2004, 25(2): 176-179.
- [7] 郑启龙. 叠氮类粘合剂环氧固化体系及其在火药中的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.  
ZHENG Qi-long. Curing system of azide binders with epoxides and its application in propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [8] 乔巍,姚卫星,马铭泽,等. 复合材料残余应力和固化变形数值模拟及本构模型评价[J]. 材料导报, 2019, 33(24): 4193-4198.  
QIAO Wei, YAO Wei-xing, MA Ming-ze, et al. Numerical simulation and constitutive models evaluation of residual stresses and induced deformations of composite structures [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(24): 4193-4198.
- [9] 杨帆,王宇东,马保吉,等. 光纤线包固化残余应变应力与变形数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2023, 43(2): 12-19.  
YANG Fan, WANG Yu-dong, MA Bao-ji, et al. Residual stress-strain and numerical simulation of deformation on fiber optic cable package curing [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2023, 43(2): 12-19.
- [10] 刘世俭,王艳茹. 固体火箭发动机药柱固化收缩应力分析[C]// 全国固体火箭发动机设计技术学术交流会. 中国宇航学会, 2000: 325-329.  
LIU Shi-jian, WANG Yan-ru. Analysis of solidification shrinkage stress of solid rocket motor grain [C]// 2000 National Academic Exchange Conference on Solid Rocket Engine Design Technology. CSA, 2000: 325-329.
- [11] 徐新琦,于胜春. 固化降温过程中推进剂药柱的瞬态响应分析[J]. 固体火箭技术, 2004, (3): 180-183.  
XU Xin-qi, YU Sheng-chun. Transient temperature and stress analysis of propellant grains during cooling process after curing [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2004, (3): 180-183.

- [12] 周红梅, 李季颖, 袁嵩, 等. 固化降温过程中固体火箭发动机药柱温度场应力场分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2015, (1): 104-106.  
ZHOU Hong-mei, LI Ji-ying, YUAN Song, et al. Temperature field and stress field analysis of SRM's grain during cooling process after curing[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2015, (1): 104-106.
- [13] 王幸东. 三维编织复合材料的瞬态热传导研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.  
WANG Xing-dong. Investigation of transient thermal transfer of 3D braided composites[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [14] 张伟, 樊学忠, 陈永铎, 等. NEPE推进剂固化交联的流变学研究[J]. 高等学校化学学报, 2009, 30(6): 1230-1234.  
ZHANG Wei, FAN Xue-zhong, CHEN Yong-duo, et al. Rheological study on the crosslinking of NEPE propellant[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2009, 30(6): 1230-1234.
- [15] 邓斌, 申志彬, 段静波, 等. 考虑对流换热影响的固体发动机热力耦合分析[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(1): 42-46.  
DENG Bin, SHEN Zhi-bin, DUAN Jing-bo, et al. Thermo-mechanical coupling analysis of SRM considering effects of convective heat transfer[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 35(1): 42-46.
- [16] 许进升, 鞠玉涛, 郑健, 等. 复合固体推进剂松弛模量的获取方法[J]. 火炸药学报, 2011, 34(5): 58-62.  
XU Jin-sheng, JU Yu-tao, ZHENG Jian, et al. Acquisition of the relaxation modulus of composite solid propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(5): 58-62.
- [17] 许进升, 杨晓红, 赵磊, 等. 聚合物时温等效模型有限元应用研究[J]. 应用数学和力学, 2015, 36(5): 539-547.  
XU Jin-sheng, YANG Xiao-hong, ZHAO Lei, et al. Finite element application of the time-temperature superposition principle (TTSP) to polymer[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, 36(5): 539-547.
- [18] 田维平, 王春光, 王伟. 固体火箭发动机设计理论及仿真技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2021: 123-154.  
TIAN Wei-ping, WANG Chun-guang, WANG Wei, Design theory and simulation technology of solid rocket motor[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2021: 123-154.
- [19] 童心, 许进升, 李博. 循环加载下复合推进剂的非线性热粘弹性本构模型[J]. 固体火箭技术, 2023, 46(2): 195-203.  
TONG Xin, XU Jin-sheng, LI Bo. A nonlinear thermo-viscoelastic constitutive model of composite solid propellant under cyclic loading[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(2): 195-203.
- [20] 赵伯华, 沈庭芳, 沈月萍. 动态力学实验诊断应力松弛模量的研究[J]. 北京理工大学学报, 1995, 15(3): 339-343.  
ZHAO Bo-hua, SHEN Ting-fang, SHEN Yue-ping. Study to diagnose stress relaxation modulus on the basis of dynamic mechanics experiment[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 1995, 15(3): 339-343.
- [21] 徐婉, 邓剑如, 张丽. NEPE推进剂中活泼氢组分的固化反应动力学研究[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(5): 560-563.  
XU Wan, DENG Jian-ru, ZHANG Li. Study on curing reaction kinetics of active hydrogen components of NEPE propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2010, 33(5): 560-563.
- [22] 吴兴宇, 崔庆忠, 徐军. HTPB/TDI粘结体系的固化反应动力学[J]. 含能材料, 2016, 24(11): 1097-1101.  
WU Xing-yu, CUI Qing-zhong, XU Jun. Curing reaction kinetics of HTPB/TDI bonding system[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(11): 1097-1101.
- [23] 王小英, 钱勛, 薛元利, 等. NEPE推进剂初始模量与平衡模量关系研究[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(2): 216-221.  
WANG Xiao-ying, QIAN Xu, XUE Yuan-li, et al. Relationships between the initial modulus and the relaxation modulus of NEPE propellants[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2022, 45(2): 216-221.
- [24] 胡焕性, 张志忠, 赵凤起, 等. 高能量密度材料3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃性能及应用研究[J]. 兵工学报, 2004, 1(2): 155-158.  
HU Huan-xing, ZHANG Zhi-zhong, ZHAO Feng-qi, et al. A study on the properties and application of high energy density material DNTF[J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 1(2): 155-158.
- [25] 兰艳花, 刘亚青, 付一政, 等. 高能推进剂NEPE组分PEG与铝颗粒模型的分子动力学模拟[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2009, 7(4): 49-51+54.  
LAN Yan-hua, LIU Ya-qing, FU Yi-zheng, et al. Molecular dynamics simulation on PEG and Al particle models of high energy NEPE propellant ingredient[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2009, 7(4): 49-51+54.
- [26] 朱宏春, 王吉强, 苗建波. NEPE推进剂药浆固化初期特殊流变性能研究[J]. 推进技术, 2013, 34(10): 1420-1425.  
ZHU Hong-chun, WANG Ji-qiang, MIAO Jian-bo. Research of NEPE propellant slurry rheological characteristic in curing early period[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(10): 1420-1425.
- [27] LI X, JIN B, GUO Z, et al. Thermodynamics and kinetics of click reaction between benzyl aside and different alkynes by microcalorimetry[J]. *Organic Process Research & Development*, 2019, 24(2): 163-171.
- [28] YUE W, ZHOU L, RONG L, et al. Simulation and visual tester verification of solid propellant slurry vacuum plate casting[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2020, 45(6): 871-879.
- [29] 刘仔, 权恩, 褚佑彪, 等. 固体火箭发动机加压固化理论及仿真研究[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(5): 576-579+596.  
LIU Zai, QUAN En, CHU You-biao, et al. Theoretical and simulation research on pressure cure of solid rocket motor[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(5): 576-579+596.
- [30] 丁安心, 李书欣, 倪爱清, 等. 热固性树脂基复合材料固化变形和残余应力数值模拟研究综述[J]. 复合材料学报, 2017, 34(3): 471-485.  
DING An-xin, LI Shu-xin, NI Ai-qing, et al. A review of numerical simulation of cure-induced distortions and residual stresses in thermoset composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(3): 471-485.

## Residual Stress/Strain Analysis of NEPE Propellant under Curing and Cooling

ZHOU Dong-mo<sup>1</sup>, XIE Xu-yuan<sup>1</sup>, WANG Rui-min<sup>1</sup>, LIU Xiang-yang<sup>2</sup>, HUI Bu-qing<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To study the formation mechanism of residual stress/strain of the nitrate ester plasticized polyether (NEPE) propellant grain during the curing and cooling stages, the temperature field, curing degree field and stress/strain field of the propellant were numerically analyzed via ABAQUS finite element software. The results show that there are temperature gradient and curing rate gradient in the NEPE propellant grain during the curing process at 50 °C. The temperature and the curing rate are notably higher at the center of the grain, and they eventually reach a consensus at the end of curing. The temperature difference in the propellant does not affect the final residual stress/strain. The total residual stress/strain during curing and cooling obey the principle of stress/strain superposition, and they are mainly composed of the curing shrinkage stress/strain and thermal stress/strain during cooling. For the total residual stress, the proportions of the two stages are approximately 20% and 80%, respectively, and for the total residual strain, the proportions are about 30% and 70%, respectively. Compared with the traditional method, the residual stress/strain calculated in this study have the same distribution characteristics, but the values are smaller.

**Key words:** nitrate ester plasticized polyether (NEPE) propellant; temperature field; curing degree field; curing and cooling; residual stress

**CLC number:** TJ55;V512

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023224

(责编:王馨逸)