

文章编号: 1006-9941(2009)01-0087-04

NEPE 推进剂应力分布的数值模拟及损伤破坏趋势分析

陈 煜, 刘云飞, 夏吉东, 谭惠民

(北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081)

摘要:根据 NEPE 推进剂的组成及结构特点,采用 ANSYS10.0 有限元计算软件,建立了 NEPE 推进剂轴对称有限元计算模型。对 NEPE 推进剂在单轴拉伸作用下损伤破坏趋势进行了模拟。通过对应力集中因子 α 和脱粘角 θ 的比较,讨论了固含量、键合剂加入量、氧化剂组成及氧化剂粒度等推进剂的组成与结构条件的变化对其在单轴拉伸作用下损伤破坏趋势的影响。结果表明,采用所建立的 NEPE 推进剂轴对称有限元计算模型所模拟的力学性能规律与实验研究的趋势符合得很好。

关键词:材料科学; 数值模拟; NEPE 推进剂; 有限元; 损伤破坏趋势

中图分类号:TJ55; V512

文献标识码:A

1 引 言

硝酸酯增塑聚醚 (NEPE) 推进剂是当代高能固体推进剂的代表,它充分发挥了改性双基推进剂能量高的优点,又采用高分子预聚物为粘合剂而获得良好的力学性能,具有优越的综合性能^[1]。力学性能是衡量固体推进剂性能的重要参数,研究者们已经对 NEPE 推进剂力学性能的影响因素进行了长期研究,但主要是基于宏观力学性能方面^[2-4],研究中不仅需要制备大量的固体推进剂试样,而且研究周期也较长,无法适应研制新型武器平台的需求。

细观力学是固体力学的分支,它采用连续介质力学方法分析具有细观结构的材料的力学问题,可以对复合材料的破坏过程及机理进行研究^[5]。细观力学的方法已成为对高能固体推进剂力学性能进一步深入研究的突破点。有限元计算细观力学的发展是近十年来细观计算力学发展的主要推动力^[6]。有限元细观计算力学的最大优点^[7]在于它能够获得纤维(或颗粒)直径尺度下的完整的应力-应变场来反映复合材料宏观应力-应变响应特征,能够分析宏观有效性能对细观结构的依赖关系。

本文以 NEPE 推进剂为对象建立了 NEPE 推进剂圆柱族胞轴对称有限元模型,对其在单轴拉伸作用下损伤萌生的趋势和变化规律进行了模拟。

2 有限元模型的建立

考虑颗粒均匀和周期性分布的简单模型,将 NEPE 固体推进剂的模型认为是一个无限大线性粘弹体,具有周期变化的非均匀性,其材料参数是位置的函数。因而这种周期结构可看作单位体元在各个方向周期重复扩展而构织的。将颗粒简化为球形颗粒,其在正六方体的体元中呈蜂窝排列,如图 1a 所示。为了计算方便,进一步将八面体元(图 1b)简化为圆柱体元(图 1c)。

圆柱体半径 R_0 ,高 $H = 2R_0$,球颗粒半径为 r , Z 轴为对称轴,颗粒体积分率 f 为:

$$f = \frac{2}{3} \left[\frac{r}{R_0} \right]^3$$

在圆柱体元上下表面沿 Z 向施加均布拉伸载荷,用轴对称有限元法计算基体及界面的应力分布。由于圆柱体径向分布的各向同性,把模型进一步简化为无厚度的四分之一胞元薄片(图 1d),取胞元体中的 $RSNO$ 面作分析计算。考虑胞元间的约束条件, SN 边需保持平直。把以 ON 轴为始边,以界面上任意一点与圆心 O 连线的夹角定义为极角 θ ,因而推进剂两相界面上点的各种力学性能就是 θ 的位置函数。通过有限元分析软件建立了四分之一胞元的 6 节点三角形单元网格图。考虑到 NEPE 推进剂组分及细观结构特征,颗粒为线弹性体,基体为线粘弹体,计算时取基体和颗粒的泊松比为 0.49 : 0.3,在固定粘合剂基体组成的情况下,其松弛模量通过实验确定^[2]。颗粒的力学性能参考文献[8]获得。

收稿日期:2008-06-19;修回日期:2008-08-25

基金项目:国防 973 研究基金资助(项目编号:61337020402)

作者简介:陈煜(1979-),男,讲师,博士,研究方向为高能固体推进剂。

e-mail: cysly@163.com

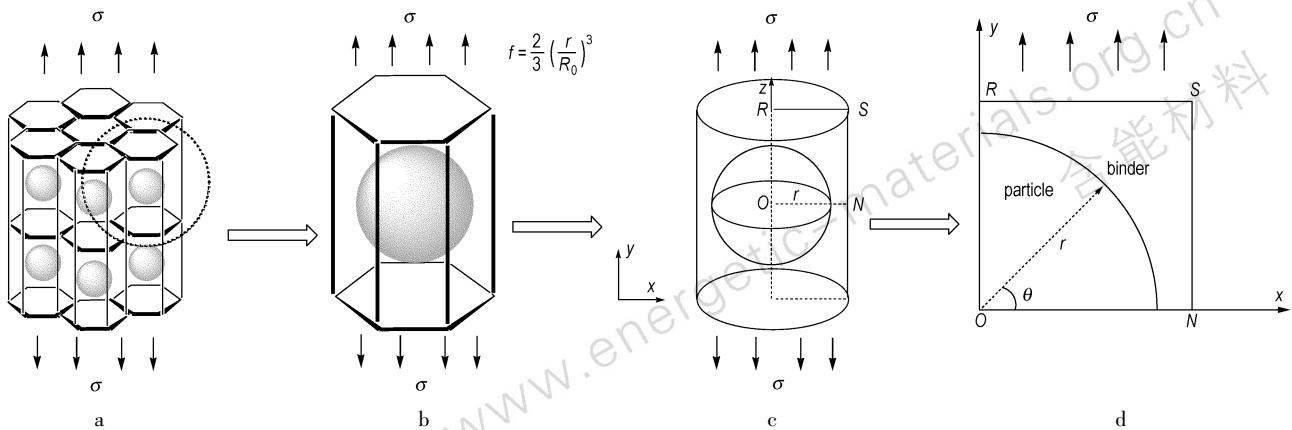


图1 NEPE推进剂轴对称有限元计算模型的建立

Fig. 1 Establishment of the axisymmetric finite element calculation model of NEPE propellants

将上述均布位移加载条件下基体内应变分布的等值线绘于图2。由图2可以看出,高应变区出现在球颗粒的极区(R点)附近,应变随极角的减小而减小,表明粘合剂基体在极区附近有明显的脱粘破坏趋势。以 $\alpha = d_n/d_0$ 来表示应力集中因子,其中 d_0 表示延胞元顶面Z向施加的拉伸应变, d_n 为某一位置粘合剂基体应变值的大小。通过比较在极区附近应力集中因子大小和最大等效应力出现位置的极角(粘合剂的初始脱粘角) β (x轴与初始脱粘点-球心连线的夹角),可以表征粘合剂基体发生脱湿破坏的趋势。

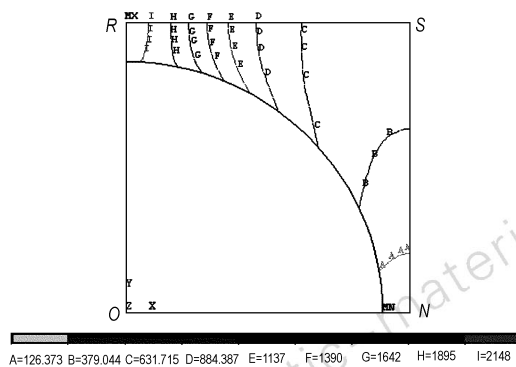


图2 单轴拉伸作用下基体应变分布等值线

Fig. 2 The strain distribution of the matrix under the unilateral tensile

3 结果与讨论

利用上述建立的有限元模型,针对作者长期研究的以P(E-co-T)共聚醚为预聚物,采用含能增塑剂进行增塑,加入含能氧化剂及其它添加剂制备的NEPE推进剂为研究对象模拟比较了不同组成与结构条件对NEPE推进剂损伤破坏趋势的影响。

3.1 固含量对损伤破坏趋势的影响

对固含量的变化对NEPE的力学性能的影响进行数据采集和研究,比较极区应力集中因子(图3)及脱粘角(图4)随固含量的变化。当固含量较小时, α 随固含量的增大变化缓慢,脱粘角在固含量为5%时有一个最大值。由此可见,当固含量较小时,其对粘合剂基体具有补强作用,可以提高材料的力学性能。但随着固含量的逐渐增大,其补强作用逐渐被固体粒子与粘合剂基体的弱的相互作用所破坏,固体颗粒与粘合剂之间相互作用的破坏趋势越来越明显。当固含量较大时($>62\%$), α 随固含量的变化呈现迅速增大,脱粘角迅速减小,表明固含量较高时,随固含量的增大,推进剂在单轴拉伸作用下的破坏趋势更加明显。这与文献[9]关于固含量对推进剂力学性能的影响的实验结果一致。

3.2 键合剂含量对损伤破坏趋势的影响

键合剂是一种能增强材料中基体与填料之间界面粘结性能的助剂。在含有海因的22#键合剂与NEPE推进剂粘合剂与固体颗粒相互作用性能研究的基础上^[10],22#键合剂的加入量对NEPE推进剂在单轴拉伸作用下的损伤破坏趋势模拟结果见图5。由图5可以看出,随键合剂加入量的增大, α 逐渐降低, β 的度数逐渐增大。这些均表明,随22#键合剂加入量的增大,可以大大提高粘合剂基体与颗粒之间的相互作用力,提高NEPE推进剂的力学性能,降低在单轴拉伸作用下的损伤萌生的趋势。这与22#键合剂在NEPE推进剂中键合效果的研究结果相一致^[11-12]。

3.3 氧化剂组成对损伤破坏趋势的影响

AP和RDX两种氧化剂的组成对NEPE推进剂拉伸破坏行为的影响模拟见图6。由图6可看出,只加入

RDX 的推进剂, α 相对较小, β 度数较大, 表明该配方的推进剂力学性能较好。随 AP 含量的增大, 粘合剂基体极区的应变增大, β 度数变小, 推进剂在单轴拉伸作用下损伤萌生的破坏趋势逐渐增强。由于 RDX 中的硝基与 22# 键合剂分子中的羰基有较强的诱导作用^[10], 而 AP 与 22# 键合剂的相互作用较弱, 因此, 随 AP 含量的增大, 推进剂在单轴拉伸作用下的破坏趋势逐渐增强。

3.4 氧化剂粒度对损伤破坏趋势的影响

固定 RDX 的粒度为 90 目, 改变 AP 的粒度, 比较 AP 粒度变化对 NEPE 推进剂在单轴加载作用下破坏趋势的影响, 模拟结果见图 7。由图 7 可以看出, 随 AP 粒度的增大, 基体界面极区的应变增大, β 度数减小。固定 AP 的粒度为 90 目, 改变 RDX 的粒度, 比较 RDX 的粒度变化对 NEPE 推进剂在单轴加载作用下破坏趋势的影响(图 8), 模拟结果也显示, 减小 RDX 的粒度有利于提高 NEPE 推进剂的力学性能。这些都表明, 减小氧化剂的粒度有利于提高粘合剂与固体粒

子的相互作用力, 这与文献[4]对实验研究结果的总结相一致。在有限元模型的模拟过程中, 减小颗粒的粒度相当于增大了颗粒的密度, 减少了固体粒子的体积分数, 增大了粘合剂与固体颗粒的相互作用力。而对于实际的推进剂体系, 颗粒粒度的减小, 意味着固体颗粒比表面积的增加, 同时也增加了固体颗粒与粘合剂之间产生相互作用的接触面积, 当受到外力作用时, 应力分布趋于平均, 使得推进剂抗张强度增加。可见, 采用有限元模拟和实际体系的作用效果是等同的。

4 结 论

采用所建立的 NEPE 推进剂轴对称有限元计算模型, 对固含量、键合剂加入量、氧化剂组成及氧化剂粒度等条件对 NEPE 推进剂力学性能的影响规律进行了模拟, 模拟结果与文献报道的实验规律相一致, 说明采用此模型对 NEPE 推进剂力学性能规律的模拟是可行的, 可以为此类推进剂力学性能的优化研究提供参考。

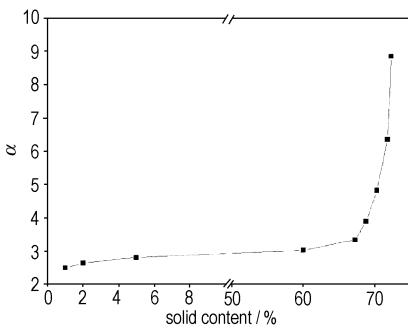


图 3 固含量对 NEPE 推进剂极区应力集中因子 α 的影响

Fig. 3 Effect of solid particle content on the polar stress concentration factor α of NEPE propellants

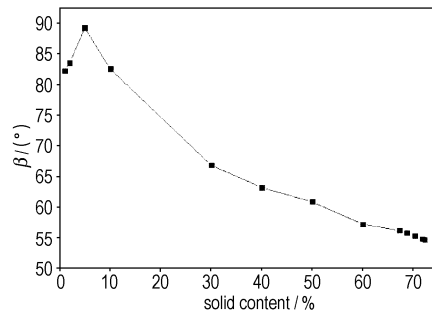


图 4 固含量对 NEPE 推进剂脱粘角的影响

Fig. 4 Effect of solid particle content on the debond angle of NEPE propellants

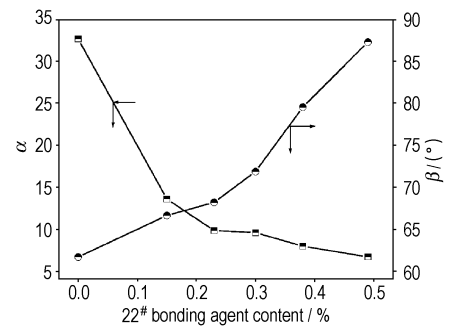


图 5 键合剂含量对 NEPE 推进剂损伤破坏趋势的影响

Fig. 5 Effect of bonding agent content on the damage trend of NEPE propellants

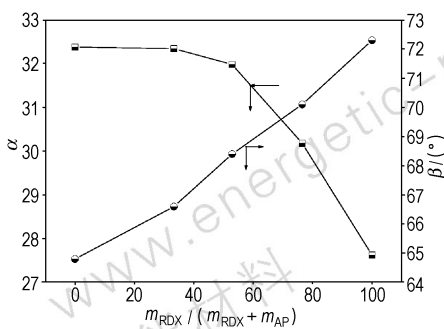


图 6 氧化剂组成对 NEPE 推进剂损伤破坏趋势的影响

Fig. 6 Effect of oxidant composition on the damage trend of NEPE propellants

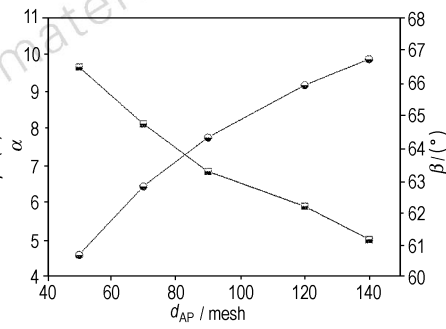


图 7 AP 粒度对 NEPE 推进剂损伤破坏趋势的影响

Fig. 7 Effect of AP particle diameter on the damage trend of NEPE propellants

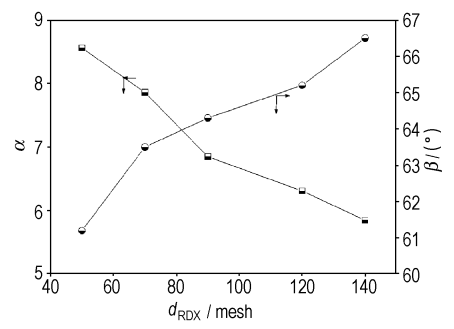


图 8 RDX 粒度对 NEPE 推进剂损伤破坏趋势的影响

Fig. 8 Effect of RDX particle diameter on the damage trend of NEPE propellants

参考文献:

- [1] FANG C, LI S F. Experimental research of the effects of superfine aluminum powders on the combustion characteristics of NEPE propellants[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2002, 27(1): 34-38.
- [2] 苏明. NEPE 推进剂粘合剂力学性能的影响因素研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2007.
SU Ming. Study on the effecting factors of the mechanical properties of NEPE propellant[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007.
- [3] 张伟, 谢五喜, 樊学忠, 等. 扩链和交联剂对 NEPE 推进剂胶片高温力学性能的影响[J]. 含能材料, 2007, 15(4): 349-351.
ZHANG Wei, XIE Wu-xi, FAN Xue-zhong, et al. Effects of chain extenders and cross linkers on mechanical characteristics of binder film of nepe propellant at high temperature[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(4): 349-351.
- [4] 庞爱民. NEPE 类推进剂力学性能调节的新技术[J]. 固体火箭技术, 2000, 23(3): 49-53.
PANG Ai-min. New technique for tailoring the mechanical properties of NEPE propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2000, 23(3): 49-53.
- [5] Besteric M, Ivan J, Pesjek L, et al. Damage mechanism of Al-12Al₄C₃[J]. *Materials Letters*, 2004, 58: 867-870.
- [6] CAO R, YAO H J, CHEN J H, et al. On the mechanism of crack propagation resistance of fully lamellar TiAl alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 420: 122-134.
- [7] Karel M, Philippe H G. Finite element formulation for modeling particle debonding in reinforced elastomers subjected to finite deformations [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 196: 620-633.
- [8] Palmer S J P, Field J E, Huntley J M. Deformation, strengths and strains to failure of polymer bonded explosives[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Containing Papers of a Mathematical*, 1993, 440: 399-400.
- [9] 陈胜. 高能固体推进剂性能的探索研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2007.
CHEN Sheng. Exploration and research on the properties of high-energy solid propellant[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007.
- [10] 张斌, 罗运军, 谭惠民. 多种键合剂与 CL-20 界面的相互作用机理[J]. 火炸药学报, 2005, 23(8): 23-26.
ZHANG Bin, LUO Yun-jun, TAN Hui-min. Interactional mechanism of the interface between CL-20 and some bonding agents[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 23(8): 23-26.
- [11] 姚维尚, 吴文辉, 贾展宁, 等. 硝酸推进剂的界面键合作用[J]. 北京理工大学学报, 1995, 15(6): 74-78.
YAO Wei-shang, WU Wen-hui, JIA Zhan-ning, et al. Investigation on interfacial bonding in HMX-containing model propellant composite [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1995, 15(6): 74-78.
- [12] 姚维尚, 吴文辉, 戴健吾, 等. 硝酸推进剂界面键合的表征研究[J]. 推进技术, 1995(3): 57-62.
YAO Wei-shang, WU Wen-hui, DAI Jian-wu, et al. The characterization of interfacial bonding in nitramine filled propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1995(3): 57-62.

Numerical Simulation of Stress Distribution and Analysis of Damage Trend of NEPE Propellants

CHEN Yu, LIU Yun-fei, XIA Ji-dong, TAN Hui-min

(School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the composition and structure properties of the NEPE propellants, the finite element calculation model of the NEPE solid propellants was established by the ANSYS 10.0 finite element calculation software. The damage trend and variation regularity of the NEPE propellants under unilateral tensile was simulated. Effects of the solid particle content, bonding agent content, composition and particle diameter of the oxidant on the damage trend of NEPE propellants were discussed by comparing the stress concentration factor α and the debond angle θ . The results show that the mechanical performance simulated by the established finite element model of the NEPE solid propellants is in good agreement with the experimental regularity.

Key words: materials science; numerical simulation; NEPE propellant; finite element calculation model; damage trend