

高聚物黏结炸药 损伤断裂的数值模拟

戴开达 陈鹏万◎著

NUMERICAL SIMULATION ON
DAMAGE AND FRACTURE OF
POLYMER-BONDED EXPLOSIVES



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高聚物黏结炸药损伤 断裂的数值模拟

戴开达 陈鹏万 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

高聚物黏结炸药损伤断裂的数值模拟 / 戴开达, 陈鹏万著. —北京:
北京理工大学出版社, 2020. 4

ISBN 978 - 7 - 5682 - 8380 - 9

I. ①高… II. ①戴… ②陈… III. ①高分子添加剂混合炸药 - 损伤
(力学) - 断裂 - 数值模拟 IV. ①TQ564. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 061645 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / [http: //www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 12. 25

字 数 / 213 千字

版 次 / 2020 年 4 月第 1 版 2020 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 56. 00 元

责任编辑 / 张海丽

文案编辑 / 张海丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

炸药是武器杀伤、破坏和动力能源的关键性材料。炸药的使用环境非常复杂，在生产、加工、运输、储存和使用等过程中处于不同加载速率、应力状态和温度环境之中。在外部载荷作用下，高聚物黏结炸药（PBX）内部产生微孔洞、微裂纹等形式的损伤，这些损伤在持续的外部载荷作用下不断演化累积发展成为宏观裂纹，损伤一方面使炸药力学性能劣化；另一方面使热点源增加、燃烧表面积增加、炸药敏感化，从而影响炸药的感度、燃烧甚至爆炸性能。PBX 组成比较复杂，炸药颗粒的含量很高，而且弹性模量通常远高于黏结剂的弹性模量。PBX 整体强度较低，同时具有含能敏感的特点，这些都给 PBX 的损伤研究带来了困难。PBX 的宏细观损伤断裂研究一直是 PBX 使用安全性和作用可靠性的研究热点。采用计算机模拟技术对 PBX 力学性能和宏细观损伤断裂进行预测分析，对解决 PBX 的损伤研究难点提供了一种直观和便捷的途径。数值模拟方法弥补了 PBX 宏细观损伤断裂实验测量上的不足，可以从本质上揭示高聚物黏结炸药的宏细观损伤断裂机理，对改进 PBX 的配方设计和装药性能有重要实用价值。

2000 年以来，本书作者在国家自然科学基金、NSFA 联合基金以及火炸药专项项目的资助下，长期开展 PBX 宏细观损伤的实验测量和数值模拟方法研究。本书的主要内容集中了作者近年来教学和科研工作中的研究成果，这些研究从基本现象描述提升到机理，介绍了一系列理论模型、模拟方法和计算结果，有利于读者加深理解 PBX 的损伤断裂行为和机理。我们期待，书中惯性冲击作用下损伤断裂研究能够引起国内同行对战斗部装药损伤断裂研究更多的关注。

本书共分8章。第1章概述,介绍了PBX损伤断裂的研究意义和研究现状。第2章和第3章讲述了研究材料损伤断裂的常用软件和数值模拟方法,介绍了断裂力学和损伤力学基础知识,在此基础上重点介绍了用来描述PBX损伤的本构模型,为后续章节准备了理论基础知识。第4章给出了准静态载荷下PBX损伤断裂路径预测的两个算例;第5章重点模拟了惯性冲击作用下PBX装药的损伤断裂,分析了侵彻速度、弹体材料、缓冲材料、弹体和装药头部形状、弹体和装药截面以及装药与弹体间摩擦等条件对装药损伤断裂的影响。第6章描述了扩展有限元法在PBX损伤断裂问题上的应用,模拟了巴西实验、半圆盘弯曲实验、单轴压缩含中心斜裂纹块体和带圆孔巴西实验。第7章介绍了复合材料细观力学及细观模型,介绍了基于细观结构模型对PBX有效力学性能的模拟。第8章重点介绍了界面单元模型,通过计算分析了拉伸压缩下PBX的损伤断裂过程。

必须指出的是,本书内容全部是作者及指导的学生共同工作的成果。其中,第4章和第5章是作者和刘龔龙博士及石啸海硕士合作的部分成果,西班牙马德里理工大学 David A. Cendón 教授和课题组崔云霄博士为模型的开发和应用给予了大力支持和帮助,中国兵器工业集团有限公司第二〇四所常海研究员对第5章内容的完成提出了许多宝贵的意见。第6章、第7章和第8章分别是作者和李生涛、田媛以及卢宝第硕士合作的成果,该部分内容得到了中国工程物理研究院化工材料研究所李敬明研究员的支持,得到了NSFA联合基金的资助。

在此,对以上各位专家学者为本书做出的支持和帮助表示深深的谢意!同时感谢北京理工大学“兵器学科学术专著系列”计划出版基金的资助。

由于作者水平有限,难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

2019年12月于北京

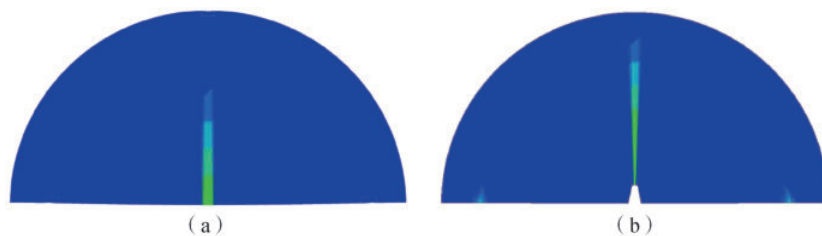


图 4-8 外载 332 N 时的裂纹扩展图

(a) 无预制裂纹; (b) 0.96 mm 预制裂纹

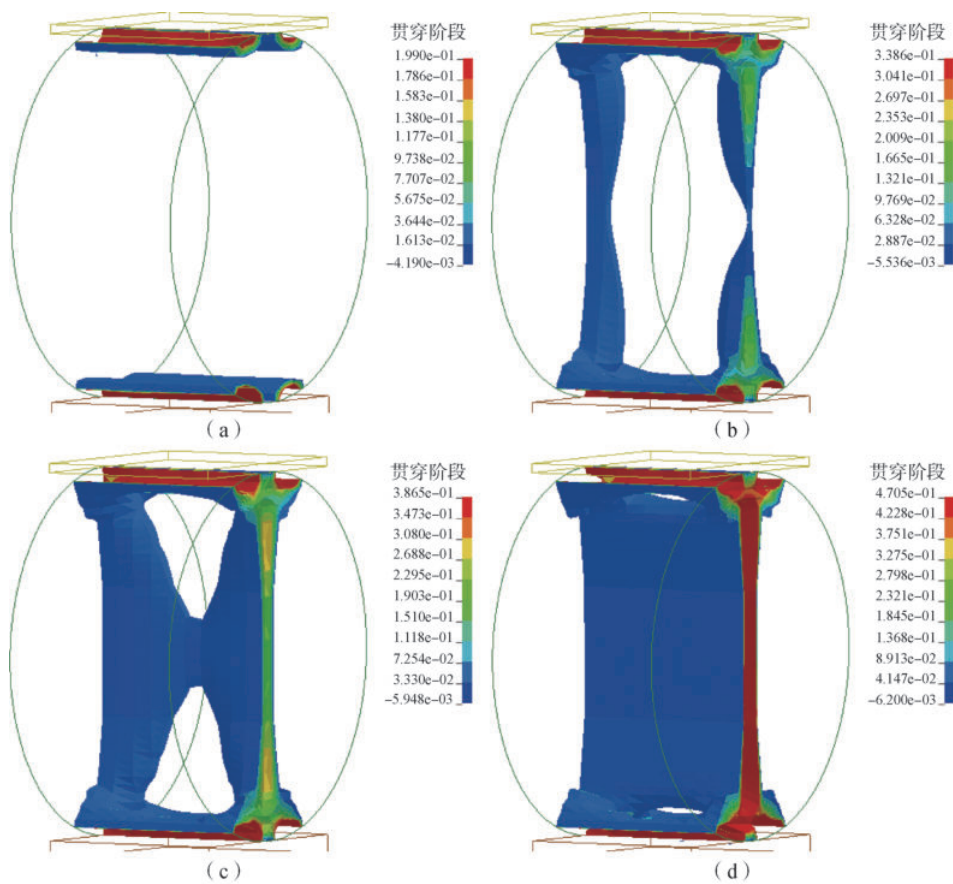


图 4-14 温度 90 °C 时的裂纹扩展云图

(a) 时刻 1; (b) 时刻 2; (c) 时刻 3; (d) 时刻 4

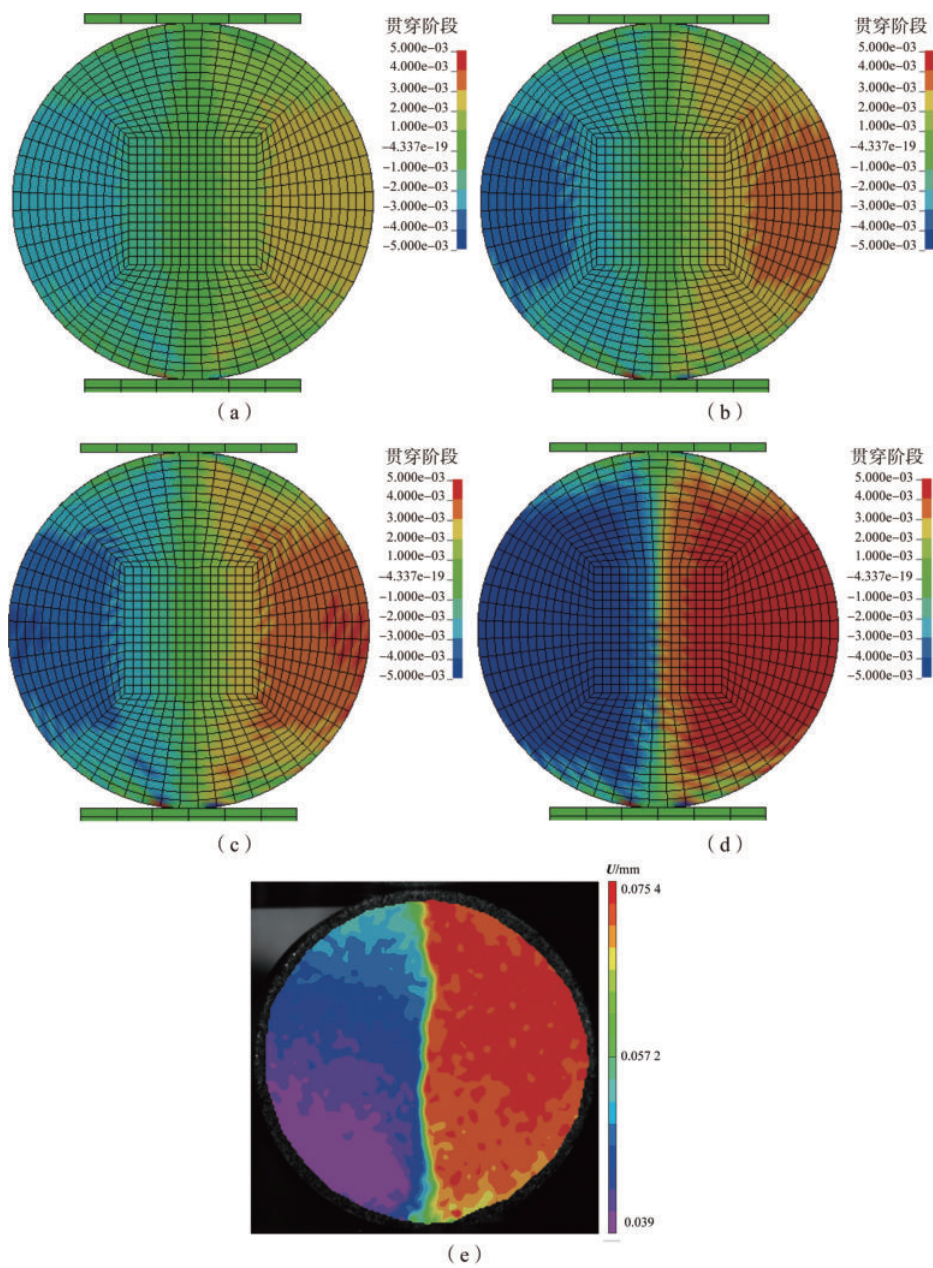


图 4-15 温度 90 °C 时 X 方向位移云图

(a) 时刻 1; (b) 时刻 2; (c) 时刻 3; (d) 时刻 4; (e) DIC 测量结果

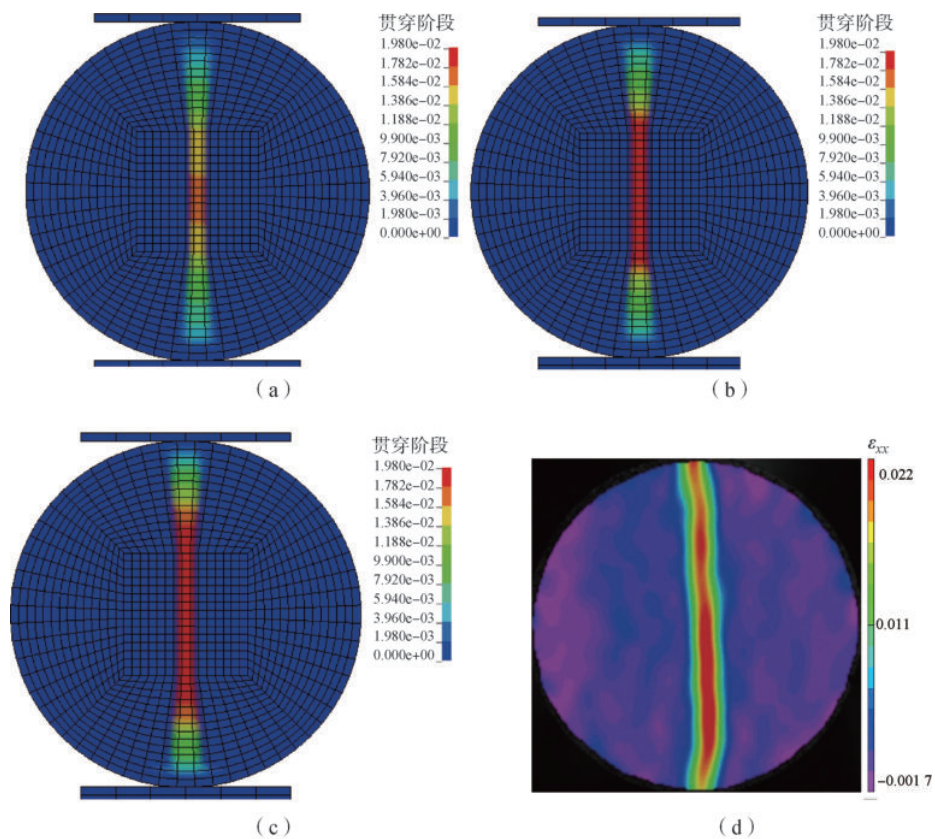


图 4-16 90 °C劈裂后 X 方向应变图

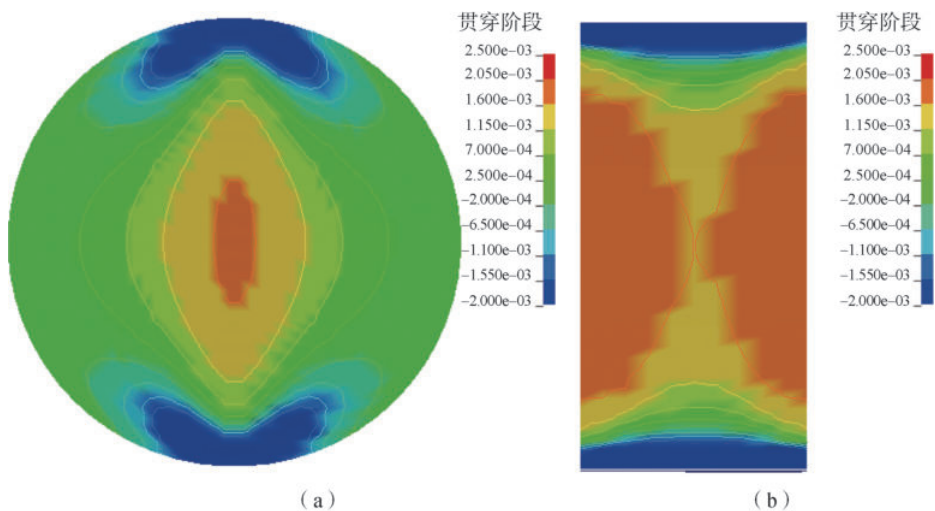


图 4-17 90 °C时 t_1 时刻 X 方向应力云图

(a) 中心横截面; (b) 铅垂子午面

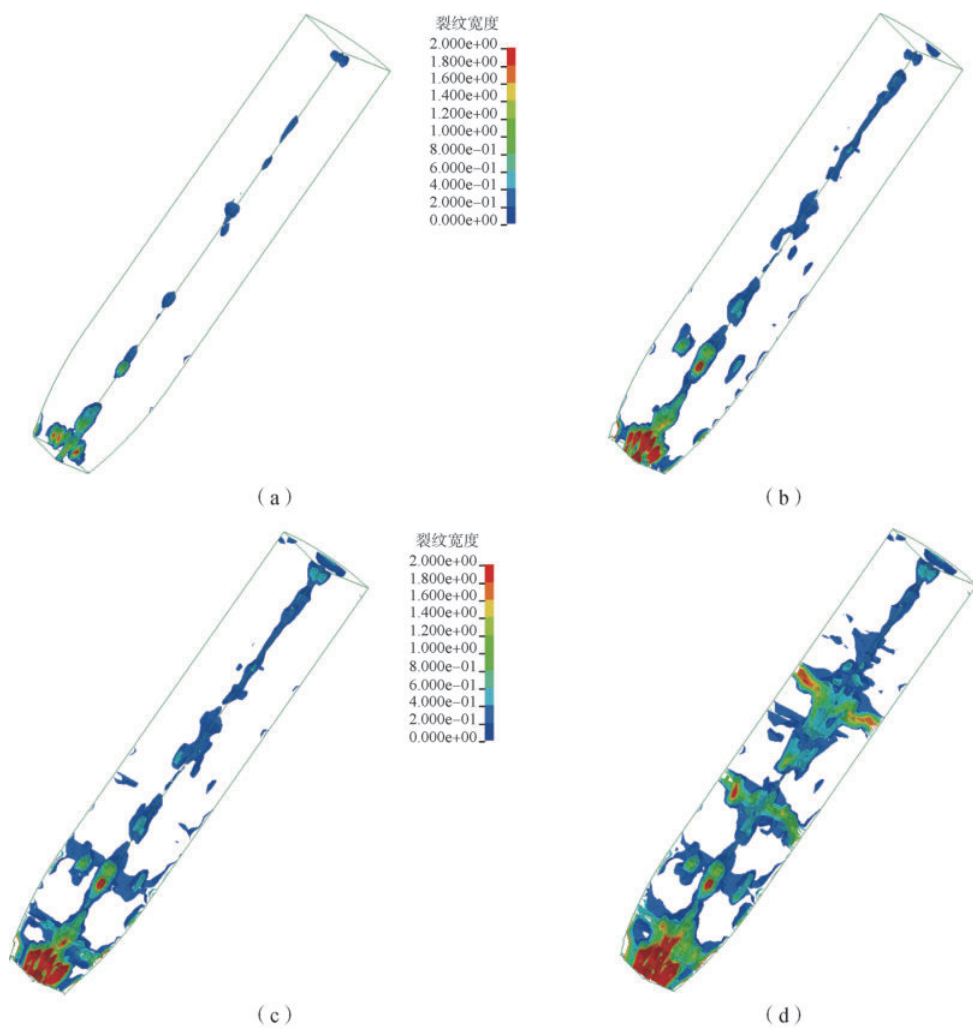


图 5-14 装药内部损伤演化过程

(a) $t = 0.25$ ms; (b) $t = 1.01$ ms;

(c) $t = 1.88$ ms; (d) $t = 2.05$ ms

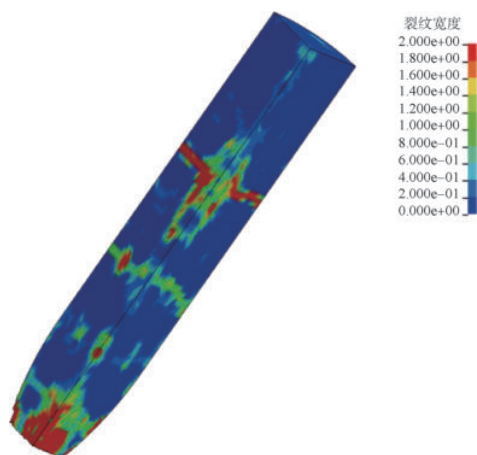


图 5-15 PBX 装药最终裂纹分布情况

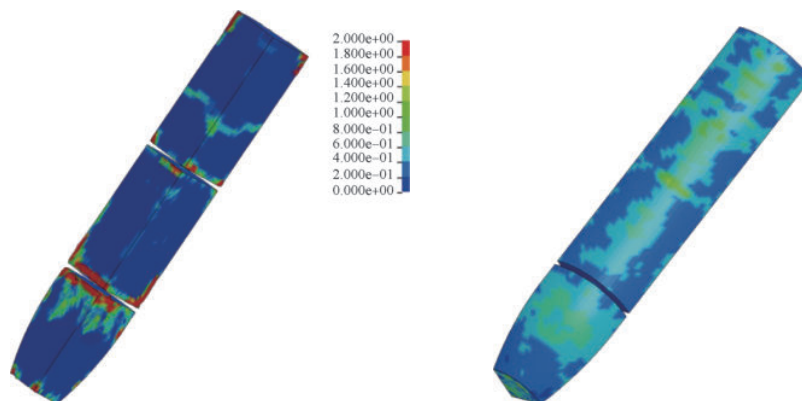


图 5-20 3 号缩比弹装药
最终裂纹分布

图 5-21 4 号缩比弹装药
最终裂纹分布

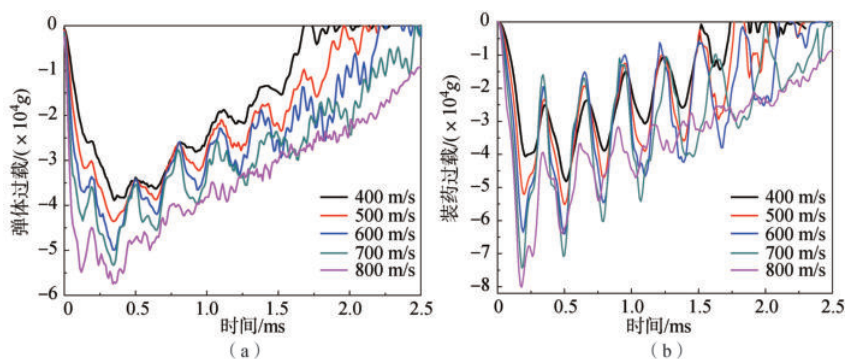


图 5-22 不同速度下弹体和装药的平均过载变化
(a) 弹体; (b) 装药

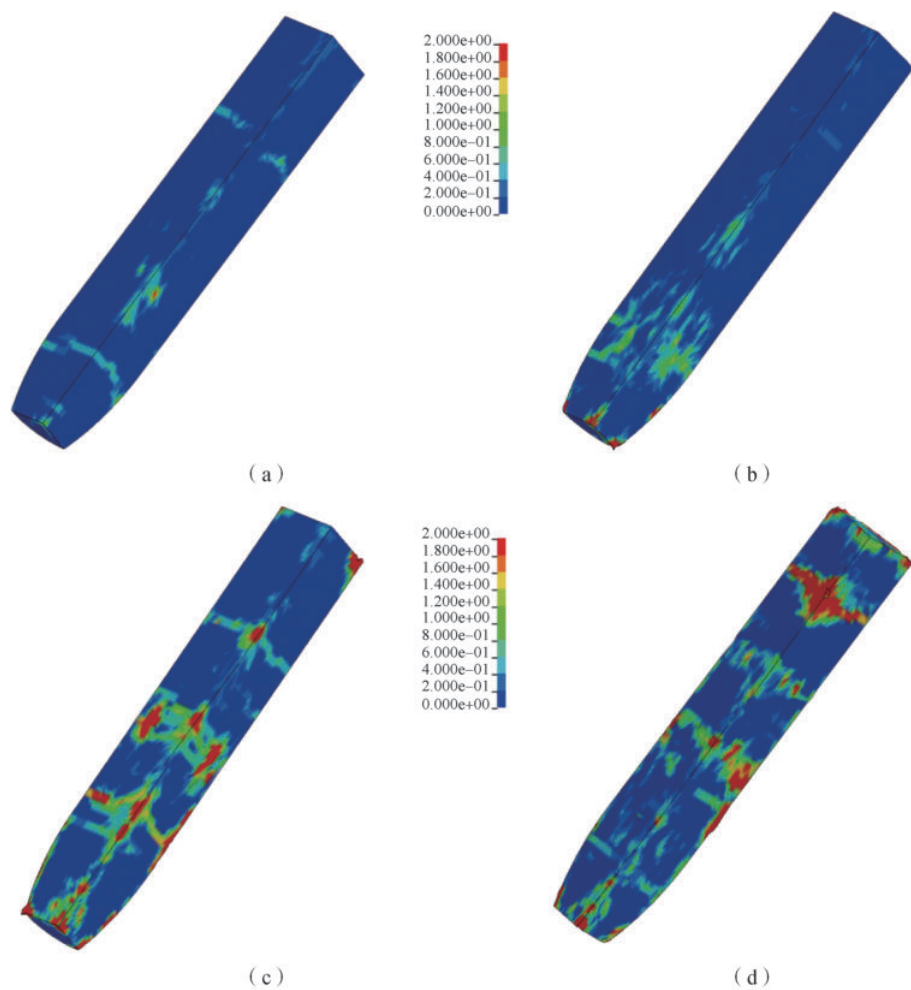


图 5-23 不同着靶速度对装药最终裂纹分布的影响

(a) 400 m/s; (b) 500 m/s; (c) 700 m/s; (d) 800 m/s

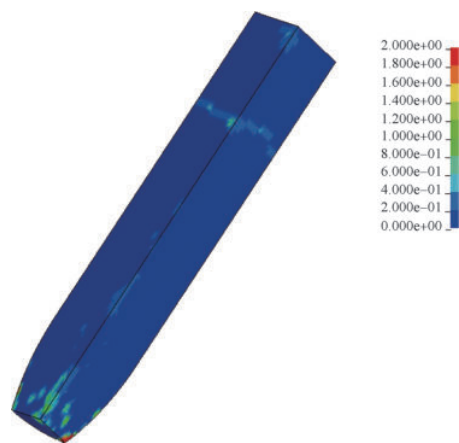


图 5-25 装药最终裂纹区分布

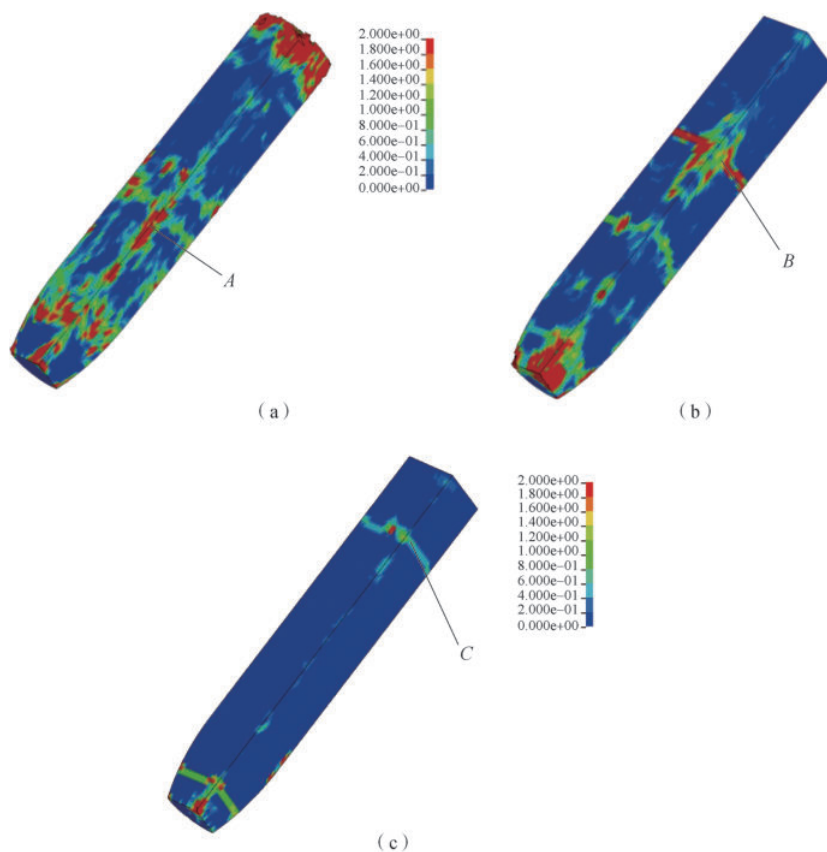


图 5-28 装药的最终损伤示意图

(a) $\Psi=1$; (b) $\Psi=2.6$; (c) $\Psi=4$

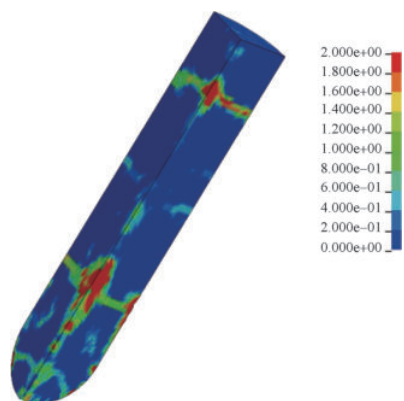


图 5-36 装药最终裂纹分布

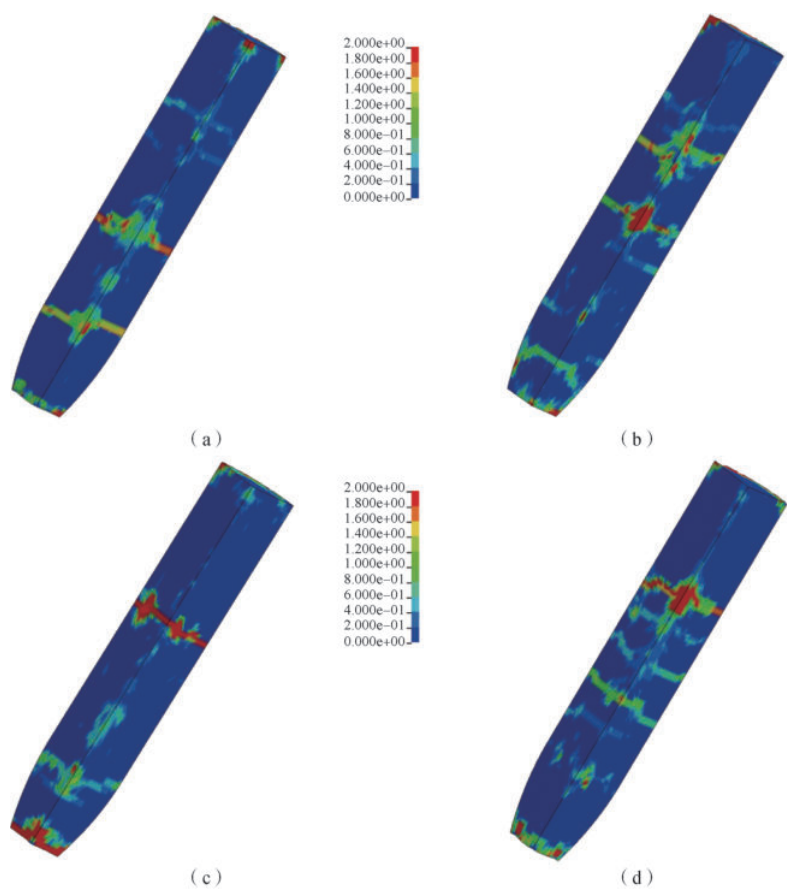


图 5-38 不同缓冲材料对装药最终裂纹分布的影响

(a) 有机玻璃; (b) 聚四氟乙烯; (c) 酚醛树脂; (d) 尼龙 6

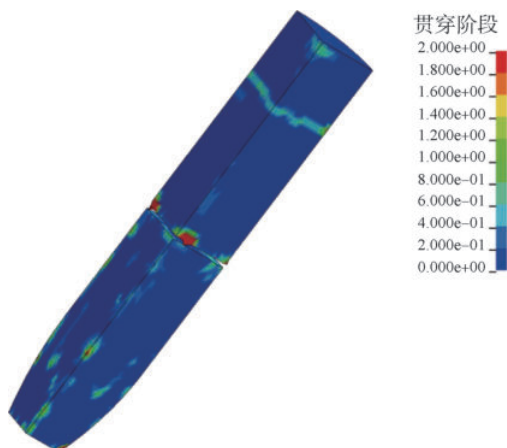


图 5-43 装药最终裂纹分布

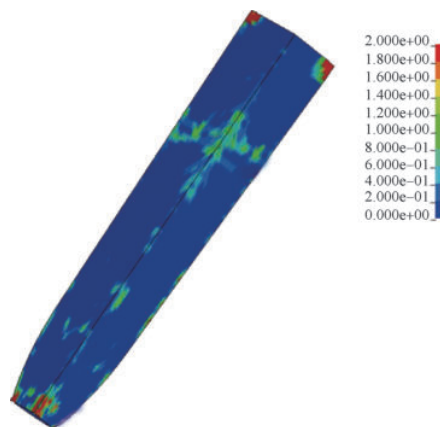


图 5-49 装药最终裂纹分布

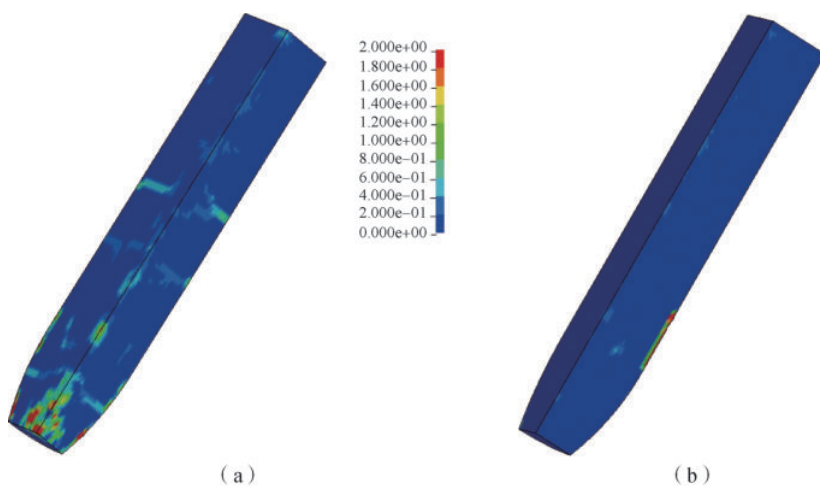


图 5-52 摩擦系数为 0.05 和 0.1 时装药最终裂纹分布

(a) 摩擦系数为 0.05 的裂纹; (b) 摩擦系数为 0.1 的裂纹

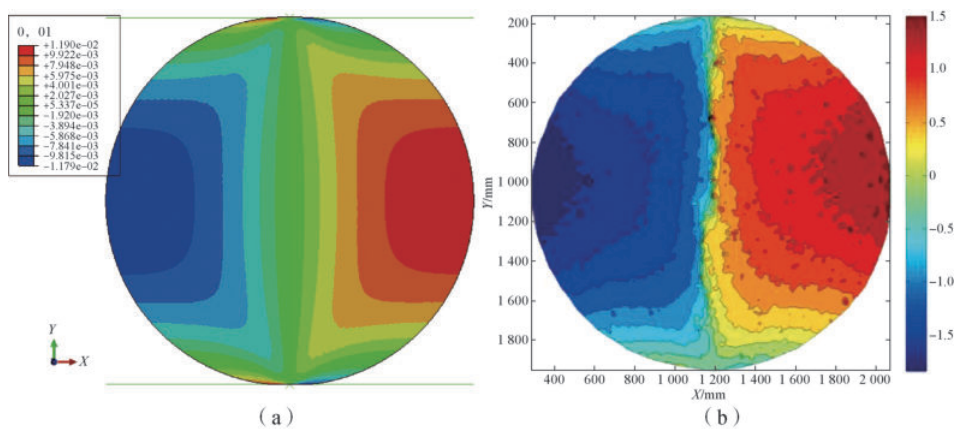


图 6-9 圆盘试样开裂前位移场分布

(a) 计算中水平位移场; (b) 实验中水平位移场^[9]

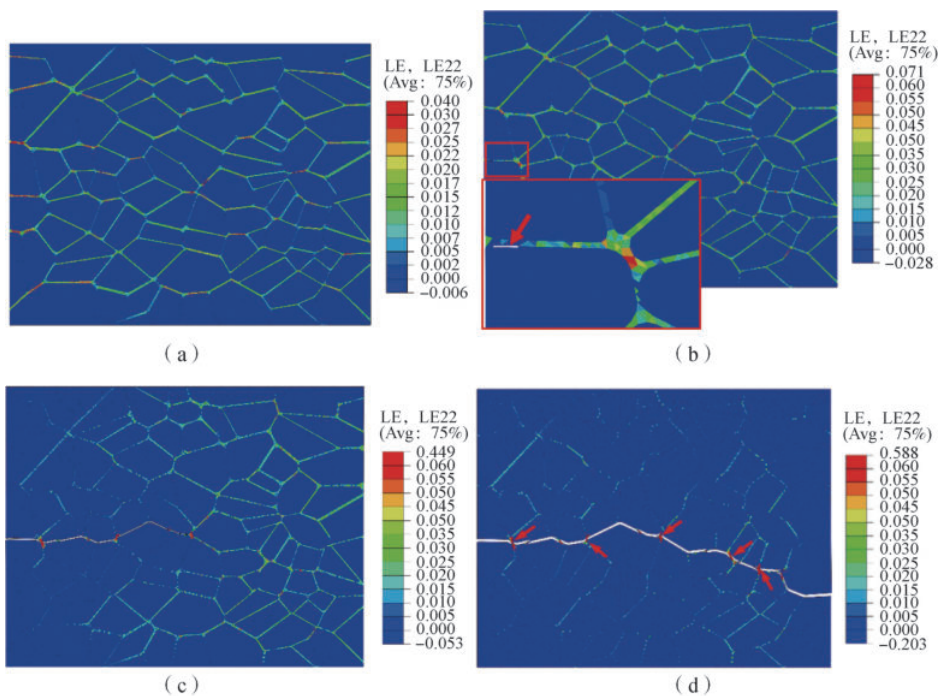


图 8-21 应变为 0.16%、0.41%、0.45% 和 0.5% 时的 Y 方向应变云图和损伤断裂演化图

(a) 应变为 0.16%; (b); 应变为 0.41%;
(c) 应变为 0.45%; (d) 应变为 0.5%

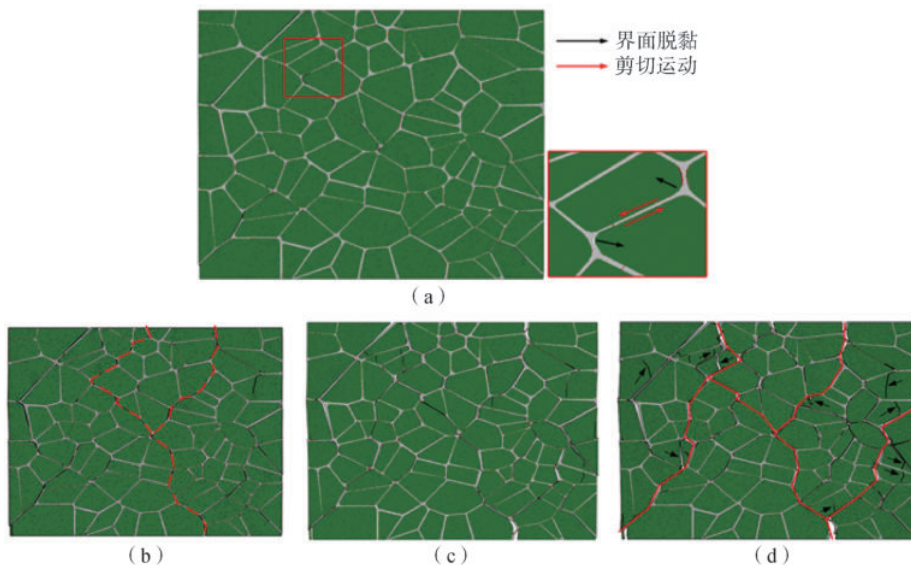


图 8-26 应变在 0.96%、1.2%、1.77% 和 2.88% 时 PBX 9501 的损伤演化过程
(a) 应变为 0.96%；(b) 应变为 0.96%；(c) 应变为 1.77%；(d) 应变为 2.88%

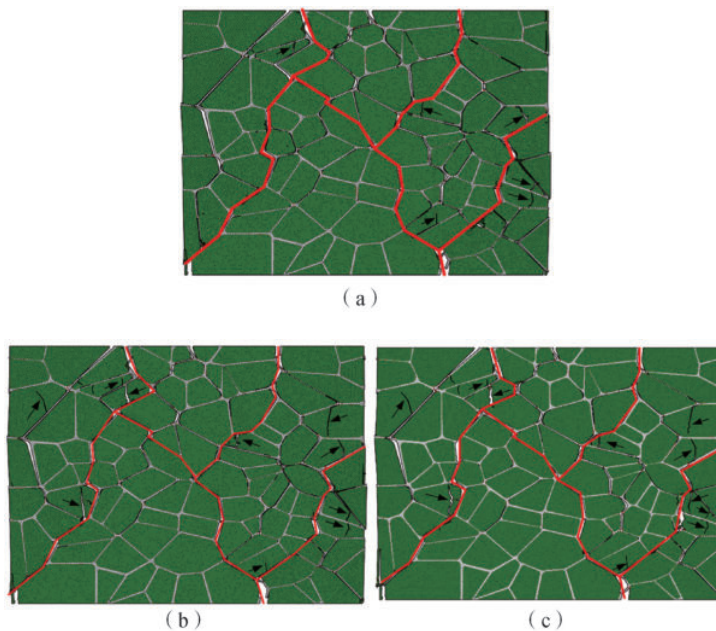


图 8-30 PBX 9501 在 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 和 10^{-2} s^{-1}
三种应变速率下的压缩失效路径
(a) 10^{-4} s^{-1} ；(b) 10^{-3} s^{-1} ；(c) 10^{-2} s^{-1}

目 录

CONTENTS

第 1 章 概述	001
1.1 高聚物黏结炸药损伤断裂的研究意义	001
1.2 高聚物黏结炸药损伤断裂的实验研究现状	002
1.2.1 高聚物黏结炸药宏观断裂的实验研究	002
1.2.2 高聚物黏结炸药细观损伤的实验研究	003
1.3 高聚物黏结炸药损伤断裂的数值模拟研究现状	005
1.3.1 高聚物黏结炸药宏观尺度损伤破坏的数值模拟	005
1.3.2 高聚物黏结炸药细观尺度损伤破坏的数值模拟	007
参考文献	009
第 2 章 材料损伤断裂的数值模拟方法	015
2.1 材料损伤断裂模拟常用软件	015
2.1.1 ANSYS/LS – DYNA 有限元软件	015
2.1.2 ABAQUS 有限元程序	022
2.2 材料损伤断裂的数值模拟方法	025
2.2.1 节点分离法	025
2.2.2 EFG 法	026
2.2.3 扩展有限元法	027
2.2.4 CZM	028
2.2.5 DDA 方法	029