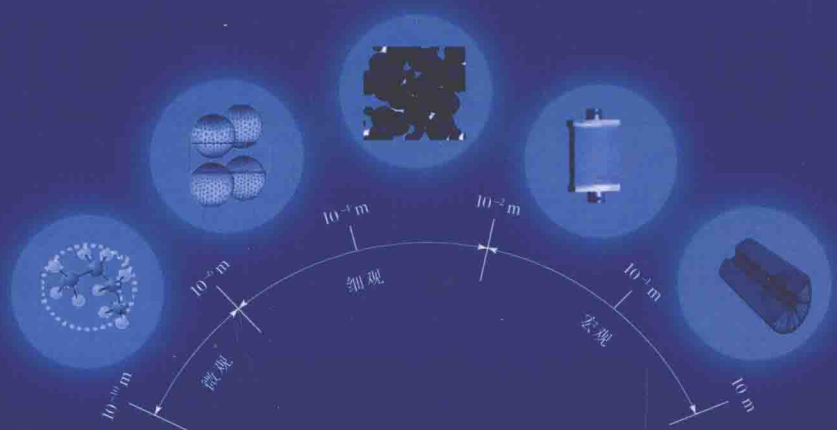




航天科技图书出版基金资助出版

复合固体推进剂 宏细观损伤机理

赵玖玲 强洪夫 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

复合固体推进剂 宏观损伤机理

赵玖玲 强洪夫 著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

复合固体推进剂宏细观损伤机理/赵玖玲, 强洪夫著. —北京:
中国宇航出版社, 2014. 12

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0856 - 4

I. ①复… II. ①赵… ②强… III. ①固体推进剂—研究
IV. ①V512

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 289661 号

策划编辑 易 新

责任校对 王 妍

责任编辑 易 新

封面设计 文道思

出 版
发 行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号
(010) 68768548

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010) 68371900
(010) 68768541

(010) 88530478 (传真)
(010) 68767294 (传真)

零售店 读者服务部
(010) 68371105

北京宇航文苑
(010) 62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2014 年 12 月第 1 版

2014 年 12 月第 1 次印刷

规 格 880×1230

开 本 1 / 32

印 张 12.5

字 数 336 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0856 - 4

定 价 90.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址:<http://www.caphbook.com>

电话:(010)68767205,68768904

序

固体推进剂是固体火箭发动机、助推器及各类固体动力装置的动力源，其性能直接影响导弹、火箭等系统的性能、寿命和可靠性。固体火箭发动机中的装药结构完整性分析及固体推进剂研究是固体推进技术领域的关键技术之一。

固体火箭发动机中的装药结构在生产、贮运、使用中要经受各种温度、湿度、力学、气氛和射线辐照等复杂环境，会引起装药的变形、变化和损伤。为此，发动机设计者需对装药设计、推进剂配方设计和对使用环境提出明确的技术要求。

固体推进剂配方设计及研究是一项复杂的系统工程，从过去的经验指导为主的大量试验比较分析法到目前的简单计算和专家系统指导下的试验法有了一定进步，但仍需很大的试验工作量，研究周期长，耗资大，有些现象和机理还不十分清楚。人们期望固体推进剂研制从设计要求出发，针对推进剂特种组分的合成、组分间的化学反应、能量特性、燃烧性能、力学性能、工艺性能及安全性能，通过建模计算，预示各种配方的性能，优化选择几组推进剂配方进行试验验证，即实现推进剂设计的数字化、智能化。

赵玖玲、强洪夫教授的专著《复合固体推进剂宏观损伤机理》就是通过研究复合固体推进剂在受力情况下，发生的变形、损伤从萌生、扩展到破坏的过程，初步建立了物理模型、数字计算和仿真方法，在复合固体推进剂配方力学性能设计研究上迈出了可贵的一步。

《复合固体推进剂宏观损伤机理》集成了作者多年在复合固体推进剂力学损伤方面的研究成果,对固体推进剂细观力学损伤问题进行了较为系统的探讨,尤其是在从宏观向微观的精细化、数字仿真研究方法上做出了贡献,其特点体现在以下三个方面。

新颖性:全书从细观视角,将多种微细观试验观察技术和数字计算方法应用于固体推进剂的损伤研究中,得出了一些新的有益的结论,初步实现了从定性研究向定量研究的转变。

实用性:全书的试验、计算和理论方法,既有一定的理论高度,又有一定的实用性,可为该领域的科技人员提供很好的参考。

系统性:全书研究方法自成体系。针对所研究的问题,从设计试验配方、选择适当的研究方法,到试验、理论和仿真有机结合,直至从多角度对问题进行综合分析,采用了固体推进剂损伤的细观结构演化和内在机理这一主线贯穿全书,研究的系统思路清晰深入。

《复合固体推进剂宏观损伤机理》的内容十分丰富,是一本很有价值的研究固体推进剂技术的参考书,特别是作者潜心研究的探索精神值得科技工作者学习。希望该书的出版能抛砖引玉,激发该领域更多、更深入的研究工作,同时也期待作者继续做出更多、更大的成绩。

叶定友

2013年12月

前 言

固体导弹武器是进行现代化战争的重要战斗力量。复合固体推进剂材料的力学性能在固体火箭发动机药柱的结构完整性中起着重要的作用，其贮存性能是推进剂配方设计指标中的一项重要特性。要达到这一指标，必须保证在复合固体推进剂配方设计阶段就能够预测到，在固体火箭发动机贮存使用过程中，复合固体推进剂在载荷作用下力学性能降低的趋势。复合固体推进剂是一种以高分子粘合剂为基体的高填充比颗粒复合粘弹性材料，这种体系决定了材料具有非常复杂的细观结构，以及在外载荷作用下发生在结构内部的多尺度物理过程而导致的复杂力学行为。

目前国内外对复合固体推进剂损伤研究不断深化，研究愈来愈定量化、精细化，尺度从宏观向细观、微观扩展。本书凝聚了作者多年来在复合固体推进剂细观研究领域的最新成果，以固体火箭发动机药柱在复杂应力条件下，由于细观力学损伤而造成其宏观力学性能下降为研究背景，针对复合固体推进剂的细观结构特征和主要损伤模式，综合运用复合固体推进剂本构理论、多尺度有限元、数字图像处理技术、分形学、统计概率、模拟退火等多学科技术，将宏细观测试试验与仿真方法相结合，揭示了推进剂细观结构对其宏观力学性能的影响规律和细观损伤的演化规律。书中的研究成果对于固体火箭发动机药柱结构的完整性分析和复合固体推进剂损伤及力学性能非线性研究具有一定的科学理论意义和工程应用价值，对于复合固体推进剂数字化配方设计和寿命安全评估具有一定的参考价值或指导意义。

本书系统介绍了研究复合固体推进剂细观力学损伤演化过程

和损伤机理的试验与数值模拟方法。为便于读者了解本书,在构成方式上,采取了总分总的顺序;在叙述方式上,采取了从试验到模拟计算,再到分析的顺序;在内容上,不仅包括详细的分析过程,还包括分析方法的建立过程。本书共分10章,第1章为绪论,提出本书的研究背景和研究方法;第2章和第3章分别基于宏观拉伸和细观拉伸两种试验方法对复合固体推进剂损伤演化进行分析,为数值模拟的研究奠定了试验基础;第4章至第6章为界面脱粘非线性数值分析平台的构建:第4章是复合固体推进剂细观结构特征胞元的建立,第5章是特征胞元计算网格的生成,第6章是界面脱粘非线性有限元分析系统;第7章至第9章基于三种方法对复合固体推进剂的损伤过程进行分析:第7章基于空穴统计增长本构理论,第8章分析复合固体推进剂细观结构对宏观力学性能的影响,第9章基于分形学方法对原位动态拉伸连续SEM图像进行分析得到固体推进剂“脱湿点”位置;第10章结合对比总结前面章节的研究方法,通过引入细观损伤变量,得出复合固体推进剂宏观细观损伤演化机制和物理演化模型,并展望了进一步研究的前景。

本书可供从事复合固体推进剂损伤机理及多尺度数值模拟方法研究工作的科研人员、相关固体火箭发动机的技术管理人员参考。本书的主要研究成果已获得了软件著作权和专利,研究方法具有一定的通用性,可以推广应用于混凝土等颗粒增强复合材料的损伤分析中。

特别感谢航天科技图书出版基金和第二炮兵工程大学“2110工程”对本书的资助。衷心感谢原中国航天科技集团公司第四研究院叶定友院长对我们研究工作给予的支持和鼓励,感谢诸多同仁的热情支持。

限于作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请专家和读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复合固体推进剂损伤研究背景及现状	1
1.1.1 复合固体推进剂损伤理论研究	2
1.1.2 复合固体推进剂损伤表征试验研究	3
1.1.3 复合固体推进剂损伤数值模拟研究	9
1.2 复合固体推进剂损伤的研究层次	11
1.2.1 宏观尺度的研究层次	12
1.2.2 细观尺度的研究层次	12
1.2.3 微观尺度的研究层次	13
1.2.4 本书的研究层次	13
1.3 本书的研究方法	14
1.3.1 研究对象和研究方法的确定	15
1.3.2 试验方法	17
1.3.3 仿真方法	19
1.3.4 理论分析方法	19
1.4 本书的研究思路和结构安排	21
第 2 章 复合固体推进剂宏观拉伸试验及分析	24
2.1 复合固体推进剂的简化配方设计方案及试件制备	24
2.1.1 配方设计目标	24
2.1.2 推进剂试件制备和试验准备	27
2.1.3 基体胶片制备和试验准备	28
2.2 准静态拉伸下复合固体推进剂拉伸试验结果及分析	29
2.2.1 键合剂含量对基体胶片力学性能的影响	30
2.2.2 键合剂含量对复合固体推进剂力学性能的影响	31

2.2.3	AP 体积分数对推进剂力学性能的影响	33
2.2.4	AP 粒径比对推进剂力学性能的影响	35
2.3	动态拉伸速率下复合固体推进剂拉伸试验结果 及分析	37
2.3.1	不同拉伸速率下键合剂含量对基体胶片性能 影响分析	37
2.3.2	不同拉伸速率下键合剂含量对推进剂性能 影响分析	41
2.3.3	不同拉伸速率下 AP 体积分数对推进剂性能 影响分析	45
2.3.4	不同拉伸速率下 AP 级配对推进剂性能 影响分析	49
2.4	拉伸断口的静态扫描电镜观察	53
2.5	小结	54
第 3 章	基于细观试验的复合固体推进剂结构定量表征	57
3.1	复合固体推进剂损伤演化的原位动态拉伸扫描 电镜试验	58
3.1.1	试样的制作和准备	58
3.1.2	动态拉伸结果和分析	61
3.2	基于联合接触角试验的界面粘附功测定	64
3.2.1	界面粘附功计算方法	65
3.2.2	颗粒和基体的接触角测试	67
3.2.3	测试结果及数据处理	70
3.3	基于 SEM 图像处理的 AP 颗粒结构参数统计	72
3.3.1	AP 颗粒的静态扫描电镜试验及结构参数的选取 ...	73
3.3.2	AP 颗粒分割算法	75
3.3.3	分析统计软件系统设计与实现	91
3.3.4	结果统计分析	100
3.4	基于微 CT 的推进剂内部空穴率测量及分析	101
3.4.1	微 CT 仪器及成像基本原理	102

3.4.2 推进剂微 CT 扫描试验	107
3.4.3 结果分析及空穴率测定	114
3.5 小结	116
第 4 章 复合固体推进剂细观结构特征胞元的自动化建立	118
4.1 基于显式表征方法的复合固体推进剂细观模型重构 ...	119
4.1.1 基于 MD 的胞元生成算法	119
4.1.2 圆形颗粒模型	124
4.1.3 椭圆形颗粒模型	128
4.1.4 重构算例	134
4.2 复合固体推进剂细观结构统计特征分析	136
4.2.1 概率函数	137
4.2.2 概率函数的 Monte-Carlo 模拟	142
4.2.3 各态历经性、统计均匀性和各向同性验证	145
4.2.4 概率函数统计结果分析	147
4.3 基于 PGA 的复合固体推进剂细观模型优化	152
4.3.1 细观结构模型优化基本方法	153
4.3.2 混合遗传算法设计与应用	157
4.3.3 质量弹簧系统	163
4.3.4 优化算法的 GPU 并行设计	166
4.3.5 模型有效性验证	178
4.4 小结	186
第 5 章 细观结构特征胞元计算网格的自动生成	187
5.1 理论及技术基础	187
5.1.1 网格分类及算法比较	187
5.1.2 自适应网格生成技术	195
5.1.3 曲线/曲面的隐式表示方法	200
5.2 二维网格生成算法	202
5.2.1 Delaunay 网格的局限性	202
5.2.2 基于 MC 和可变概率函数的初始节点分布	204
5.2.3 基于“力平衡”的网格光顺化算法	207

5.2.4 复合材料三角形网格的自适应生成	211
5.3 网格划分系统软件及算例分析	221
5.3.1 网格自动生成算法实现	221
5.3.2 算法有效性分析	229
5.3.3 网格自动生成系统界面设计与实现	235
5.4 小结	237
第6章 界面脱粘非线性有限元分析系统	238
6.1 非线性有限元分析	238
6.1.1 近似不可压特性的处理方法	239
6.1.2 界面脱粘现象的分析	251
6.1.3 几何非线性处理方法	258
6.2 基于压缩存储模式的面向对象有限元系统结构设计 ...	262
6.2.1 面向对象系统结构	263
6.2.2 基于压缩存储方式的线性方程组求解	272
6.3 基于能量的界面模型参数的确定	282
6.4 界面脱粘双尺度非线性有限元分析	284
6.4.1 细观到宏观的双尺度算法	284
6.4.2 边界条件的施加	286
6.4.3 仿真模型的统计分析 & 验证	286
6.5 大粒径差的复合固体推进剂多步有限元分析方法	289
6.6 小结	292
第7章 基于空穴增长本构理论的复合固体推进剂损伤分析 ...	294
7.1 复合固体推进剂空穴统计增长本构模型	295
7.1.1 粘弹性本构模型假设	295
7.1.2 弹性分量的均质化过程	298
7.1.3 粘性本构方程	301
7.1.4 ABAQUS 中 UMAT 计算过程	304
7.2 对初始模量的影响因素分析	306
7.2.1 基体模量对推进剂初始模量的影响分析	306
7.2.2 体积分数对推进剂初始模量的影响分析	308

7.2.3 基体空穴率对推进剂初始模量的影响分析	308
7.3 拉伸速率对微结构演化的影响分析	309
7.3.1 粘性参数取值分析	309
7.3.2 拉伸速率对微结构演化影响分析	312
7.4 小结	314
第8章 复合固体推进剂细观结构对宏观力学性能影响分析 ...	317
8.1 MAPO 对复合固体推进剂宏观性能影响分析	317
8.1.1 综合对比分析	317
8.1.2 基体模量对复合固体推进剂性能影响分析	320
8.1.3 颗粒/基体界面性能对复合固体推进剂性能 影响分析	321
8.2 体积分数影响分析	324
8.3 形状因素影响分析	328
8.4 颗粒级配影响分析	330
8.5 空穴率影响分析	334
8.6 小结	335
第9章 基于分形学的复合固体推进剂损伤演化分析	337
9.1 基于分形分析的主体思路	338
9.2 基于动态连续 SEM 图像的两种分形维数提取	339
9.2.1 复合固体推进剂动态扫描图像的预处理	339
9.2.2 基于二值图像的计盒维数提取	341
9.2.3 基于灰度图像的差分盒维数提取	349
9.3 复合固体推进剂 SEM 图像中微裂纹面积和 应变参数的提取	353
9.3.1 复合固体推进剂微裂纹面积比参数的提取	353
9.3.2 复合固体推进剂应变参数的提取	356
9.4 复合固体推进剂细观损伤特性分析及软件系统构建 ...	361
9.4.1 两种分形维数和微裂纹面积/应变参数的 关系曲线	361
9.4.2 系统设计及实现	363

9.4.3 特征分析	365
9.5 小结	366
第 10 章 复合固体推进剂宏观损伤演化机理综合分析	368
10.1 复合固体推进剂损伤演化分析	368
10.1.1 基于空穴统计增长本构模型研究空穴率随 应变的演化过程	368
10.1.2 基于数值仿真平台研究初始空穴率对宏观 性能的影响规律	370
10.2 细观损伤变量的确定	371
10.2.1 复合固体推进剂宏观损伤变量的定义	371
10.2.2 复合固体推进剂损伤演化过程分析	373
10.3 损伤演化机制及演化模型	375
10.4 小结	377
参考文献	379

第 1 章 绪 论

1.1 复合固体推进剂损伤研究背景及现状

固体导弹武器是进行现代化战争的重要战斗力量。固体火箭发动机以其使用维护方便的优势成为当今乃至未来导弹动力装置的重要选择。随着各国早期产品存量增多,固体火箭发动机延寿需求紧迫,更为重要的是,应从产品设计阶段就保证发动机的长寿命^[1]。如今,各国军队对未来固体火箭发动机都提出了全寿命免维护的更高要求,要求其寿命至少在 10 年以上。

固体火箭发动机主要由药柱、燃烧室、喷管和点火装置 4 部分组成。从目前导弹武器贮存和使用情况来看,药柱是导弹武器不可维修的最薄弱环节之一,其结构的完整性直接影响着导弹在部队的服役年限。药柱是复合固体推进剂在壳体中经贴壁浇铸、固化等一系列工艺过程而形成的一个整体,在实际贮存过程中,要经历复杂的非平衡、非线性损伤失效演化过程。要保证药柱结构的完整性,就必须使其具备良好的力学性能^[2]。

复合固体推进剂材料的力学性能对于药柱的结构完整性有着重要的作用,贮存性能是其配方设计的一项重要特性。要达到这一指标,必须保证复合固体推进剂在配方设计阶段就能够预测到固体火箭发动机贮存使用阶段在载荷作用下复合固体推进剂力学性能降低的趋势,而清楚掌握复合固体推进剂的损伤机理,对复合固体推进剂的配方设计具有重要的指导作用。实际上,在新配方、新工艺不断涌现的国防高科技领域,损伤机理的研究已成为决定各项产品贮存和服役期限的关键因素。

1.1.1 复合固体推进剂损伤理论研究

在过去的 30 多年中,国内外学者对复合固体推进剂材料的损伤本构模型进行了大量的研究。在已提出的模型中,大多数是从连续介质力学角度基于唯象理论建立复合固体推进剂本构关系,并包含了许多用来拟合试验数据的材料参数。在处理大量实际问题时,这些理论被证明是比较成功且具有现实意义的。但这些理论大都将复合固体推进剂作为连续均匀介质来研究,对材料细观结构的影响很少计及,其基于唯象学的损伤方程在描述材料由于损伤而导致的微结构演化时,需要大量的试验数据来校核模型中的相关参数,而这些材料参数往往缺乏物理背景,不便于推广,容易造成误解。如何建立可行的宏细观关联本构理论,并使其中参数具有合理的物理微观基础,是复合固体推进剂理论研究的主要方向^[3,4]。

苏联学者 L. M. Kachnaov^[5]于 1958 年在研究高温蠕变断裂时首次提出了“损伤因子”的概念,20 世纪 70 年代形成了“连续介质损伤力学”,80 年代后期,损伤理论在多相非均匀介质的细观力学研究方法中取得应用。细观力学方法中经常应用的有广义自洽法,微分法和 Mori-Tanaka 方法(简称 M-T)。彭威^[6]通过细观力学方法研究了复合固体推进剂中颗粒形状、颗粒间相互作用对总体应力—应变关系的影响。Christensen^[7]基于刚性球状颗粒增强复合材料的体积弹性模量比较了三种方法数值计算的精度,得出结论:广义自洽法所得结果最为精确,M-T 与其接近,微分法结果偏硬;广义自洽理论不能显式地给出复合材料的宏观模量,在工程中难以应用。因此,M-T 方法被广泛应用于理论研究。Tan H.^[8,9]用 M-T 方法研究了复合固体推进剂的非线性脱粘过程,研究表明:细观解析方法计算量小,能够抓住宏观响应的主要特征,但不能够抓住失效过程中粒子间的相互作用,只能对低体积分数模型进行分析,对于高体积分数模型则失效。

Ravichandran^[10]用内变量模拟颗粒复合材料损伤的本构模型,

采用 M-T 方法和 Eshelby 等效夹杂理论来考虑由于损伤造成的弹性模量和体积模量的下降,然后计及这些细观损伤建立本构关系;彭威从复合固体推进剂的组分和细观结构演化特征出发,以细观损伤力学和不可逆热力学为基础,建立了考虑颗粒增强和界面脱湿损伤的粘弹性本构,由颗粒增强因子与基体粘弹本构方程相乘的表达式,以模量的下降为损伤因子建立了复合固体推进剂的损伤演化发展方程;阳建红^[11,12]分别以声发射能量和 CT 数变化为损伤变量,建立了复合固体推进剂非线性粘弹性损伤本构关系。

以上模型均基于大量现象常量来描述复合材料损伤效应的变形特征函数,要求由验证试验来校核这些常量参数,有些单轴拉伸模型应用在多轴应力状态时要进行修正,有些模型不能再现材料在大量损伤累积下宏观应力剧烈下降的材料响应。

为了正确描述孔洞随机增长而形成的宏观本构,固体力学的复合材料均质化理论首先求出含孔材料的等效性能,将其当作均匀等效基体加入颗粒,再分析这种颗粒/基体等效体系。这种均匀化的方法与自洽法相似,在很大程度上计入了孔洞演化的统计随机性^[13,14]。美国 Illinois 大学 Sofronis 教授及其学生 F. Xu^[15]采用的这种复合材料均质化理论,从线粘弹性微分本构模型、线粘弹性对应原理和虚功原理出发,并引入背应力改善模型对应力松弛的描述,提出一个包含空穴统计增长过程的宏观本构模型(简称空穴统计增长本构模型),模型将复合固体推进剂材料的损伤演化通过空穴的不断成核和聚合来描述,其中的参数通过松弛试验和单轴拉伸试验进行校核。

在该本构模型中,损伤体系的等效弹性模量以各材料组分相(基体、颗粒和孔洞)的体积分数作为参变量,能够反映损伤各阶段材料弹性性能的改变,其分量均以显式数学表达式给出,物理意义较其他本构明确,工程应用也更方便,并在一定程度上描述了复合固体推进剂的细观损伤过程。

1.1.2 复合固体推进剂损伤表征试验研究

复合固体推进剂材料内部微裂纹萌生和损伤累积是一个力学性