

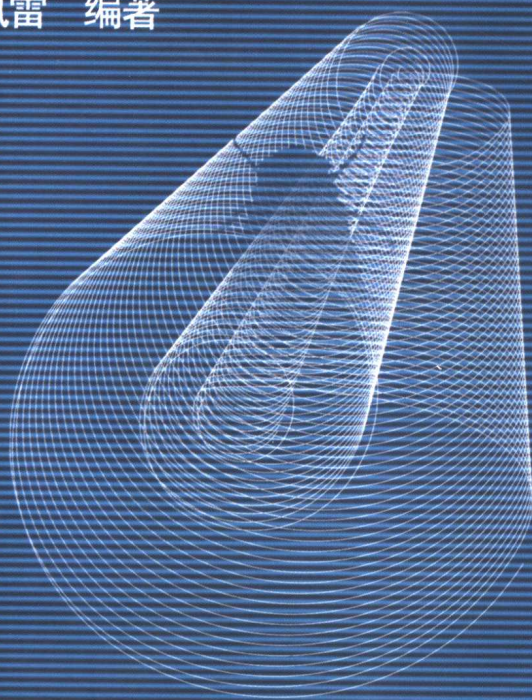
兵器科学与技术



国防科工委『十五』规划专著

含能材料损伤 理论及应用

陈鹏万 黄风雷 编著



北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社
哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划专著

含能材料损伤理论及应用

陈鹏万 黄风雷 编著

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书介绍了含能材料损伤理论和实验研究方面的最新成果,对由含能材料引申出来的损伤研究的新内容、新方法和新理论进行了重点介绍。全书共分10章,第2至第4章主要介绍含能材料机械损伤、冲击/撞击损伤以及热损伤的观测和表征;第5章和第6章主要介绍损伤对含能材料燃烧和爆炸性质的影响;第7章介绍含能材料细观损伤机理及模型;第8章和第9章主要介绍含能材料蠕变损伤和冲击损伤理论及模型;第10章主要介绍损伤与化学反应耦合理论与模型。本书适用于从事含能材料和爆炸力学工作的科技人员和相关专业的研究生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

含能材料损伤理论及应用/陈鹏万,黄风雷编著.

北京:北京理工大学出版社,2006.5

国防科工委“十五”规划专著.兵器科学与技术

ISBN 7-5640-0678-1

I. 含… II. ①陈…②黄… III. 功能材料-损伤
(力学)-研究 IV. TB34

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第050611号

含能材料损伤理论及应用

陈鹏万 黄风雷 编著

责任编辑 孙金芳 责任校对 张宏

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081)

发行部电话:010-68914775(办公室) 68944990(批销中心)

68911084(读者服务部)

<http://www.bitpress.com.cn>

chiefeditor@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:8.75 字数:218千字

2006年5月第1版 2006年5月第1次印刷 印数:2500册.

ISBN-5640-0678-1 定价:18.00元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编 委：王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。



国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们最具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、

机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者，他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、中北大学、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等，具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中，国防特色专业重点教材和专著的出版，将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出，进入 21 世纪，我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标，对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展，提升国防实力，需要造就宏大的人才队伍，而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务，落实科教兴国和人才强国战略，推动国防科技工业走新型工业化道路，加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华，实现志向，提供了缤纷的舞台，希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识，树立正确的世界观、人生观、价值观，努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任，创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好，国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



序 言

材料损伤研究至今仍为材料界一个重点研究领域。损伤力学经过几十年的发展,已成为固体力学的一个重要分支,并在许多工程实践中得到了成功的应用。“它山之石,可以攻玉”,损伤力学及与之相关的细观力学的迅猛发展,为从损伤这个新视角研究含能材料提供了新的途径和方法。

含能材料是武器杀伤、破坏和动力能源的关键性材料。含能材料的宏细观损伤研究,一直是困扰其安全使用和作用可靠性的一大难题,长期以来都没有很好地从理论和实践上予以解决。研究含能材料不仅要解决材料的力学响应问题,还要解决材料的化学响应问题,涉及力—热—化学反应的耦合,具有不同于惰性材料的特征。损伤一方面可能使含能材料的力学性能劣化,另一方面还可能引起含能材料的晶体完整性、孔隙率和比表面积等发生变化,从而影响含能材料的燃烧和爆炸性质。从这点上讲,含能材料损伤不仅涵盖了传统的损伤研究的范畴,同时在内涵上又得到了拓展。

含能材料组成比较复杂,强度通常较低,同时还具有含能敏感的特点,这些都给含能材料的损伤研究带来了困难。总的说来,含能材料的损伤研究还比较薄弱,其中的理论分析一直较少,对微



(细)观损伤现象及表面(界面)特性的研究更少。近年来,含能材料的损伤研究越来越受到重视,相关的工作正逐渐成为热点。这方面的进展可以在国内外的一些专业期刊、四年一届的国际爆轰会议以及一些与冲击、燃烧及爆炸相关的国际会议中了解到。但迄今为止,国内外还没有一本专门介绍含能材料损伤研究的论著。本书的出版弥补了这个缺憾,使相关的研究和技术人员能够有机会在较短的时间内了解这方面的研究进展。

本书是作者在广泛收集国际上最新文献的基础上,总结作者在该领域的研究成果,经过系统分析整理编写而成。作者系统论述了含能材料损伤观测及表征、损伤对含能材料燃烧及爆炸性质的影响、损伤机理及模型、损伤与化学反应的耦合等方面的内容。书中从基本现象描述,提升到机理,并介绍了一系列的分析测试方法、理论模型和计算结果。本书注重先进的细观研究,注重宏观与细观的结合,因而更接近物理、力学本质。此外,书中在损伤对含能材料燃烧、爆炸和感度等性质的影响方面也有相当分量的内容,这也是本书的一个特色。本书取材丰富,体系完整,逻辑性好,完整地反映了当前含能材料损伤研究的全貌。书中不仅包含了翔实的数据和图表,同时还列出了很多重要的参考文献,可供读者深入研究。



因此,本书的出版对从事含能材料的研制、应用和教学的科学工作者及相关工程技术人员都有重要的参考价值。

中国工程院院士

2006年5月15日



前 言

从力学的观点看,损伤是材料结构组织在外界因素作用下发生的力学性能劣化并导致体积单元破坏的现象。损伤力学主要研究材料内部微观缺陷的产生和发展所引起的宏观力学效应及最终导致材料破坏的过程和规律。损伤力学经过几十年的发展,已成为固体力学的一个重要研究方向,并已在金属、混凝土、岩土和复合材料等情性材料中得到成功的应用。损伤力学及与之相关的细观力学等的迅猛发展为从损伤这个新视角研究含能材料开辟了广阔的前景。

从学术上讲,很多的含能材料,包括固体推进剂和高聚物粘结炸药等,可以看成是一类颗粒高度填充的复合材料,目前对这类极高颗粒填充度的复合材料进行数学和力学上的准确描述还比较困难。与情性材料一样,损伤的存在将会使含能材料的力学性能劣化,并可能最终导致含能材料的破坏,这属于传统的损伤力学的研究范畴。与情性材料不同的是,含能材料具有含能敏感的特点,其在外载作用下的响应涉及力—热—化学反应的耦合,损伤的存在可能对“热点”的形成具有重要的影响,从而影响含能材料的感度、燃烧和爆炸性质。从含能敏感引申出来的损伤研究往往是含能材料研究人员更为关心的问题,这方面的研究包括:获取损伤

与化学反应之间深层次的联系;定量描述损伤对含能材料燃烧、爆炸性质的影响;将损伤与化学反应进行关联和耦合,从损伤角度对含能材料的变形破坏及燃烧爆炸这一复杂过程进行统一的描述等。

近年来,本书作者在国家自然科学基金、教育部“长江学者及创新团队发展计划”、国防预研项目以及NSAF联合基金的资助下,开展了含能材料的损伤研究。国内外越来越多的研究人员正致力于这方面的研究工作,并不时有一些新的研究成果报道。目前,“含能材料损伤”完整的概念、内涵以及理论体系还没有建立起来,有关含能材料损伤研究的报道散见于各种文献中,还未见全面、系统介绍含能材料损伤研究成果的论著。有鉴于此,希望以此书介绍作者近年来在含能材料损伤研究方面的一些初步成果,同时对国内外在这方面最新的研究进展进行介绍,对其中的热点问题和未来的发展方向进行讨论。期待本书能够起到抛砖引玉的作用,引起国内同行对含能材料损伤研究更多地关注。

本书共分10章,第2至4章主要介绍含能材料机械损伤、冲击/撞击损伤以及热损伤的观测和表征;第5章和第6章主要介绍损伤对含能材料燃烧和爆炸性质的影响;第7章介绍含能材料微观损伤机理及模型;第8章和第9章主要介绍含能材料蠕变损伤和冲击损伤理论及模型;第10章



主要介绍损伤与化学反应耦合理理论与模型。本书第1、2、4、7、8章由陈鹏万撰写,第5、6、9章由黄风雷撰写,第3章和第10章由陈鹏万和黄风雷共同撰写,全书由陈鹏万负责统稿和定稿。

特别感谢中科院力学所丁雁生研究员的悉心指导以及对本书一些研究工作所做的贡献。本书的部分内容取自研究生戴开达和黄涛的硕士学位论文,一些内容取材于中国工程物理研究院、国防科技大学、中科院力学所等单位的研究成果,另外还用较多的篇幅反映了国外一些相关研究机构的研究成果。本书的图表工作由甯尤军、钱莹、李学彬和黄涛等协助完成。北京理工大学恽寿榕教授和中国兵器工业集团204所胡焕性研究员认真审阅了书稿,并提出了许多宝贵的意见。著名含能材料专家、中国工程物理研究院董海山院士欣然为本书作序,对作者给予了殷切的希望和热情的鼓舞。在此,对上述单位和同志表示深深的谢意。

本书的构思时间较长,但由于作者水平有限,又无本方面专著可借鉴,难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2006年4月于北京

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 损伤力学与复合材料损伤	1
1.2 含能材料细观结构与损伤研究概述	2
第 2 章 含能材料机械损伤的观测与表征	14
2.1 含能材料的初始损伤	14
2.2 机械载荷作用下细观结构的演化	25
2.3 损伤演化过程的测量	36
第 3 章 含能材料冲击/撞击损伤的观测与表征	44
3.1 高聚物粘结炸药低速撞击损伤的观测及表征	44
3.2 平板低速撞击下损伤推进剂的细观结构	59
3.3 冲击激发局部化学反应时含能材料的细观结构	65
3.4 热载荷与冲击联合作用下损伤炸药的细观结构	71
3.5 惯性冲击作用下损伤炸药的细观结构	74
第 4 章 含能材料热损伤的观测与表征	77
4.1 低温热损伤	77
4.2 高温热损伤	78
4.3 辐照损伤	90
4.4 热损伤含能材料的超声波表征及断裂行为	93
4.5 热损伤含能材料的渗透率	98
第 5 章 损伤对含能材料燃烧性质的影响	101
5.1 损伤对含能材料热分解性质的影响	101
5.2 损伤对推进剂燃烧性质的影响	104
5.3 损伤对炸药燃烧性质的影响	112
5.4 损伤对推进剂燃烧转爆轰的影响	116



第 6 章	损伤对含能材料爆炸性质的影响	120
6.1	热损伤对冲击起爆的影响	120
6.2	炸药晶体损伤缺陷对冲击感度的影响	123
6.3	机械损伤对冲击起爆的影响	126
6.4	损伤炸药低速撞击下的危险性	134
6.5	损伤推进剂冲击起爆的拉氏测量及分析	137
第 7 章	含能材料的细观损伤机理与模型	143
7.1	细观损伤机理概述	143
7.2	界面脱粘理论及模型	146
7.3	高聚物粘结炸药细观损伤破坏的流形元法模拟	155
第 8 章	含能材料的蠕变损伤	168
8.1	推进剂的蠕变损伤	168
8.2	高聚物粘结炸药的蠕变损伤	175
第 9 章	含能材料冲击损伤模型及应用	185
9.1	含损伤的 ZWT 模型	186
9.2	BFRAC 微裂纹损伤模型	188
9.3	固体推进剂动态断裂的脆性损伤模型	196
第 10 章	损伤与化学反应耦合理论与模型	202
10.1	损伤与化学反应耦合模型(CDAR)	202
10.2	基于 SCRAM 模型的损伤化学反应模型	210
10.3	CHARME 模型	219
附录	炸药组成及符号表	223
参考文献		225

第 1 章 绪 论

1.1 损伤力学与复合材料损伤

从纯力学角度看,损伤是材料结构组织在外界因素作用下发生的力学性能劣化并导致体积单元破坏的现象。损伤并不是一种独立的物理性质,它泛指材料内部的一种劣化因素,与所涉及的材料和工作环境密切相关。从细观的、物理学的观点来看,损伤是材料组分晶粒的位错、滑移、微孔洞、微裂隙等微缺陷形成和发展的结果;从宏观的、连续介质力学的观点来看,损伤又可认为是材料内部微细结构状态的一种不可逆的、耗能的演变过程。损伤力学主要研究材料内部微观缺陷的产生和发展所引起的宏观力学效应及最终导致材料破坏的过程和规律。

Kachanov 在 1958 年首次引入了“连续性因子”和“有效应力”的概念来描述低应力脆性蠕变损伤。Rabotnov 在 1963 年进一步引入了“损伤因子”的概念。1986 年,Kachanov 出版了第一本有关损伤力学的专著。1992 年,Lemaitre 出版了有关损伤力学的教程。我国损伤力学研究的广泛开展开始于 20 世纪 80 年代,虽然起步较晚,但发展很快,已取得了许多积极的成果^[1~5]。损伤力学经过几十年的发展,理论体系逐渐完善,已成为固体力学的一个重要分支。损伤力学的研究已深入到金属、混凝土、岩土和复合材料等各个领域,在许多工程实践中得到了成功的应用。

复合材料是由两种或两种以上的材料经过物理方法组合而成的,它通常是一种多相非均质的各向异性材料。按基体的不同,复合材料通常可分为聚合物基复合材料、金属基复合材料和无机非金属材料三大类。“复合材料损伤”的概念是由美国 Reifsnider 教授于 1977 年在研究复合材料疲劳破坏时明确提出



来的。

复合材料损伤机制的研究比起各向同性材料和一般均质各向异性材料来说都要复杂困难得多,在复合材料中,很少有单一的损伤模式,即使复合材料组件由于产生宏观裂纹而引起破坏,裂纹传播也不会像金属材料那样以预想的方式发生,而总是变向进行。由于复合材料的各向异性和非均质特性,其损伤状态也具有各向异性,有时需要用一组损伤变量来进行描述。

复合材料的损伤研究与金属材料一样,可分为两类模型和方法,即细观力学模型和连续介质损伤力学模型(Continuum damage mechanics, CDM)。前者针对复合材料的代表性单元体,直接模拟损伤机制;后者是把损伤机制笼统地纳入损伤变量的“黑盒子”中,从连续介质损伤力学的角度找出宏观的控制参数。复合材料的损伤研究首先需要进行损伤表征,根据复合材料的损伤观测结果,分析主要损伤模式,选取适当的损伤变量,建立合适的损伤模型来进行损伤分析。

1.2 含能材料细观结构与损伤研究概述

一般意义上的含能材料包括炸药、推进剂和发射药等,按材料组成可分为单质含能材料和混合含能材料两大类,在混合含能材料中有一类高颗粒含量的材料,它们的应用很广泛。为保证高能量的要求,这类含能材料中的高能固体填料含量很高,对于很多的炸药材料,颗粒相含量可高达 90% 以上,远高于一般的惰性复合材料。混合含能材料的应用很广,本书主要针对这类材料进行讨论。含能材料具有含能敏感和颗粒高度填充的特点,其在外载作用下的响应包括力—热—化学反应的耦合,具有不同于惰性复合材料的损伤特征。在借鉴复合材料力学、细观力学和损伤力学等的研究成果时,需要充分考虑这些特点,对它的研究手段、分析方法等也有相应的不同。