



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

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	BFRACT 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。



含能材料的使用环境非常复杂,在生产、加工、运输、储存、发射、穿靶、破片意外撞击时,均处于不同加载速率、应力状态和温度环境之中。含能材料在使用过程中会产生孔洞和微裂纹等各种形式的损伤。这些损伤一方面使含能材料的力学性能劣化,并可能最终导致材料破坏;另一方面,损伤对“热点”的形成具有重要的影响,从而影响含能材料的感度、燃烧甚至爆炸性质。研究含能材料的损伤对于指导含能材料配方和结构件设计,以及进行安全性评估和寿命预测等都具有重要的意义。含能材料损伤研究开始主要局限于固体推进剂,近年来,有关炸药损伤的研究也逐渐开展起来。由于含能材料损伤研究开展的时间不长,加之实验和理论研究上的困难,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。总的说来,含能材料损伤研究在很大程度上是围绕载荷和环境以及相关性能展开的,研究内容主要涉及损伤的表征、实验模拟及观测方法、损伤对含能材料的影响、损伤本构关系等各个方面^[6]。

一、含能材料的细观结构与损伤特征

含能材料的损伤包括其合成、成型及机械加工等过程中产生的初始损伤以及使用过程产生的损伤。研究含能材料的损伤首先需要对含能材料不同条件下的细观结构特征及演化进行表征,分析细观损伤机理和主要损伤特征,这方面已经开展了不少的研究。

受合成和结晶过程等的影响,在炸药晶体内部会有孔穴及气泡等初始缺陷,这方面的研究已有报道^[7]。在高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosives,简称 PBX)造型粉制备时,由于颗粒含量很高,还会产生粘结剂包覆不全。成型的含能材料中包括裂纹和孔洞等多种损伤形式,有的是成型前就存在的,有的则是在成型过程中产生的。对于熔铸炸药,如果控制不当会产生裂纹和缩孔。压制成型时则会产生更多的损伤。压制压力有时高达数百兆帕,热压时还会有温度的作用。由于颗粒含量很高,颗粒间发生接



触,接触效应将会引起应力集中。压制过程中可能会产生塑性变形、炸药颗粒断裂以及炸药与粘结剂界面脱粘等。如果条件控制不好,在成型的含能材料中有时还会产生较大的残余应力。压制过程本身是对含能材料的损伤破坏过程,这方面的研究已经引起了研究者们的关注^[8~10]。对压制前后炸药颗粒形貌和粒度分布的研究表明^[11,12],压制过程中颗粒的破碎现象很严重,颗粒破碎使炸药粒度分布发生明显的变化,压力越大,颗粒的破碎越严重。压制成型含能材料的初始损伤通常比铸装含能材料大,因而压制含能材料的冲击感度通常明显高于铸装含能材料。

含能材料在不同的载荷和环境条件下会产生不同形式的损伤。Palmer 等^[13]和陈鹏万^[12]在对 PBX 炸药对径压缩实验的实时显微观察中,观察到了颗粒断裂、界面脱粘、粘结剂基体开裂、变形孪晶以及剪切带等多种损伤破坏形式,并从理论上对 PBX 炸药发生晶体断裂和界面脱粘等的临界应力进行了近似分析。含能材料中炸药颗粒与粘结剂界面结合较弱,在超声波作用下容易发生界面脱粘^[14,15]。当用液氮对推进剂^[16]和炸药^[12]进行冷冻后能够观察到微裂纹的萌生与扩展。Skidmore 等^[17]对燃烧的 PBX 炸药进行急速冷却,在熔化重结晶区观察到 β -HMX 相变成柱状的 δ -HMX。当用落锤和气炮对 PBX 炸药进行撞击时发现^[8,14,18],颗粒破碎产生了大量微裂纹,当撞击作用激发化学反应时,材料具有与燃烧急冷实验类似的细观损伤特征。黄风雷^[19]对复合固体推进剂动态压缩的研究表明,对于丁羟复合推进剂,微裂纹从 AP 颗粒内部开始成核,并向粘结剂中成长;对于改性双基推进剂,微裂纹在 HMX 内部及固体颗粒与粘结剂界面处同时成核。

推进剂中粘结剂含量相对较高,在低应变率下,由于粘结剂的粘弹(塑)性,材料整体通常表现出典型的延性断裂特征^[20],其损伤破坏形式主要为固相颗粒脱粘、脱粘形成的孔洞膨胀以及粘结剂的开裂。但在高应变率下,推进剂又表现出典型的脆性断裂特征^[21,22],其损伤破坏形式主要为微裂纹的成核、生长和聚合。以



高聚物粘结炸药为代表的混合炸药,由于粘结剂含量更低,材料整体脆性更大,在低应变率下就表现为典型的脆性断裂特性。但尽管粘结剂的含量很低,这类炸药也具有明显的粘弹(塑)性,其力学行为受应变率和温度的影响很大^[23]。

图 1-1 和 1-2 为 PBX 炸药^[23]和推进剂^[24]准静态条件下,循环加卸载实验中得到的典型的应力-应变曲线。图 1-1 中的虚线表示一次加载到破坏时完整的加载曲线,曲线上的数字表示加卸载的序号,卸载曲线未标出。从这两个应力-应变图可以直观的看出 PBX 炸药和推进剂的特点和差别。PBX 炸药整体的应变较小,卸载后有残余应变存在,循环加载过程中损伤的累积直观的反应在模量的变化上,可以通过模量的变化来定量表征损伤^[25]。推进剂整体的应变显著高于 PBX 炸药,由于材料存在明显的粘弹(塑)性,应力-应变曲线为非线性,塑性变形也很大,不能用弹性模量的变化表征损伤,但可以通过测量加载循环中的能量耗散进行表征^[24]。

二、损伤对含能材料的影响

损伤会对含能材料的力学性能、感度、燃烧和爆轰性能产生影响。含能材料中损伤的存在会引起结构强度和刚度下降,这些损伤在载荷、温度等的作用下进一步生长、聚合,并可能最终导致结构破坏。对于压制成型材料,压制压力、密度和材料强度的关系通常是一致的,但实验中也发现,有的药柱虽然压制压力和密度很高,但强度反而更低,这就是由于其中的损伤比较大的缘故。

损伤的存在使热点源增加,从而导致含能材料感度提高。很早的研究就表明,炸药的冲击感度随孔隙含量的增加而增加。非均质含能材料的感度不仅与损伤的数量有关,同时还与损伤的特征有关。Ramsay 等^[26]对不同类型的孔隙进行了比较,对于相同的孔隙率,拉伸损伤试样的冲击感度最高,压制成型试样的感度次之,而加玻璃微球的试样感度最低。Richter 等^[27]对受拉伸损伤

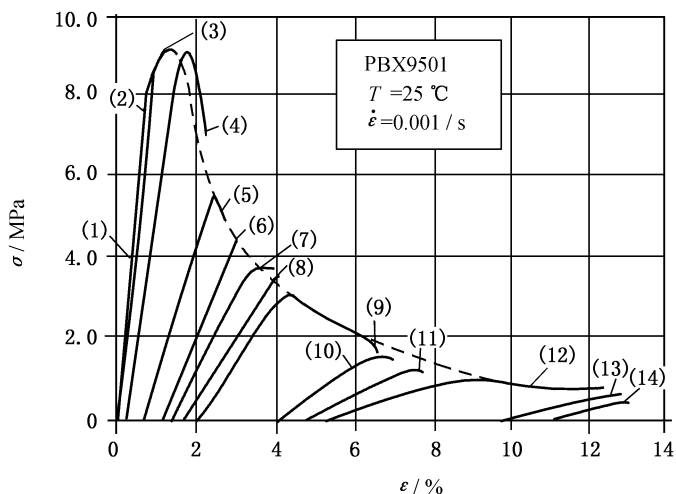


图 1-1 PBX 压缩循环加卸载的应力-应变曲线

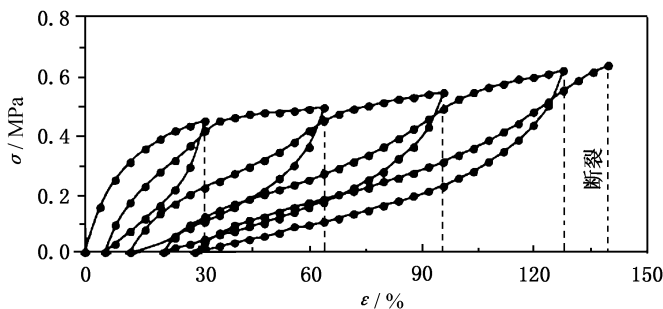


图 1-2 推进剂拉伸循环加卸载应力-应变曲线

的 H-1 推进剂冲击感度的研究表明,当残余孔隙率为 1% 时,冲击感度提高了 50%,这显著高于压制成型产生的同样大小的孔隙率对冲击感度的影响。Bernecker 等^[28]对受压缩损伤的 PBXW-108 炸药冲击感度的研究表明,当孔隙率为 3% 时,冲击感度只提



高了约 8%。这些研究表明,拉伸损伤对感度的影响可能比压缩损伤更大。

含能材料中的损伤会随时间而发生“愈合”,损伤的“愈合”将降低孔隙的体积。Sandusky 等^[29]研究了时间间隔对损伤引起的冲击感度的影响,损伤通过弱冲击产生,弱冲击和强冲击起爆的时间间隔为 1~5 ms。对于 H-1 推进剂,当时间间隔为 0.9 ms 时,临界起爆压力降低了 66%;当时间间隔增加到 4.8 ms 时,由于弱冲击产生的损伤在第二次冲击之前发生了“愈合”,临界起爆压力只降低了 10%。Bernecker 等^[28]和 Richter 等^[27]的研究也表明,损伤随时间而“愈合”,损伤的产生和冲击起爆之间的时间间隔越长,冲击感度增加越小。

损伤不仅对冲击起爆阈值有影响,对于爆轰的建立过程也有很大的影响。Lefrancois 等^[30]对损伤前后 PBX 炸药冲击起爆过程中的界面速度历程测量发现,损伤试样界面速度增加更快,入射冲击波压力越高,这种现象越明显。黄风雷等^[31,32]对不同损伤条件下固体推进剂冲击起爆过程的研究发现,随损伤度的增加,复合固体推进剂波后流场中压力时间曲线有“双峰”向“单峰”转变的现象。Green 等^[33]和 Guengant 等^[34]在对损伤炸药的冲击起爆研究中,观察到了延迟爆轰现象(XDT),并认为 XDT 是由于爆轰前机械损伤使炸药敏感化,然后由于二次压缩波的作用产生的。

损伤的存在还会使燃烧表面积增加,燃速提高,从而引起含能材料的燃烧异常,这方面的研究已有报道^[35~37]。Gazonas 等^[38]对受压缩损伤的 M30 推进剂燃烧性能的研究表明,损伤后的表观燃烧速率变化很大,损伤诱发的表面积是未损伤试样的 6 倍。Boggs 等^[39]对撞击损伤推进剂的燃烧转爆轰(DDT)过程进行了研究,提出通过密闭爆发器燃烧实验对“猎枪”实验产生的撞击损伤进行表征,确定损伤推进剂发生 DDT 的临界撞击速度。

损伤的存在可能引起炸药爆速甚至临界起爆直径等的变化。Kegler 等^[40]对 PETN-橡胶炸药的研究表明,损伤使炸药的密度



发生变化,并使得炸药爆速降低,它比单纯的密度改变时的影响更显著。Meuken 等^[41]的研究表明,热损伤后 HMX 基 PBX 炸药 HU45 的爆速有明显的降低。在压缩条件下,由于损伤后试样密度发生变化,在试样长度方向上爆速也发生了变化,试样两端爆速较高,中间爆速最低。

三、含能材料损伤的实验模拟及观测方法

(一) 实验模拟

可以采用不同的实验方法模拟含能材料在真实条件下产生的损伤。准静态加载和蠕变条件下损伤的产生通常可以用材料试验机模拟。Demol 等^[14]采用两种方法模拟热载荷的影响。一种是慢速升温,升温速率为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 和 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$;另一种是通过对与炸药接触的石墨棒通电,从而产生局部的瞬态热冲击。Skidmore 等^[17]则对燃烧的炸药试样急速冷却来观察热刺激的影响。Peterson 等^[42]在 PBX9501 炸药的研究中,采用了特殊的线性热梯度实验装置,通过在药柱一端和(或)两端加热,使圆柱炸药试样温度沿长度线性分布,以研究不同温度下的热损伤。低温载荷的模拟可以采用冷冻实验^[12,16]。Bernecker 等^[28]采用了一种理想化的方法模拟损伤,先将铸装成型的炸药用机械加工的方法加工成具有规则形状的立方或条状颗粒,然后将这些颗粒压制成孔隙均匀分布的试样,并以此来讨论孔隙率、颗粒尺寸及形状对冲击反应活性及感度的影响。

含能材料冲击损伤的研究尤为重要,这方面的研究也最多。用落锤试验可以模拟低速撞击时中等应变率下损伤的产生^[14,35]。高应变率下损伤的产生则可以采用弹丸或高速飞片撞击进行模拟^[12,17,19]。Skidmore 等^[17]用低速气炮来模拟撞击下剪切损伤的产生。陈鹏万等^[12,18]通过带气体缓冲器的低速气炮进行撞击加载,以模拟低强度长脉冲载荷的作用。在撞击感度的研究中,对冲击



击损伤模拟的一个关键是对损伤“新鲜”状态的保持。Green 等^[33]用弹丸对试样进行第一次冲击损伤后,随即进行第二次冲击。在这种情况下,试样由于没有受到约束,第一次冲击产生的损伤往往过于严重。为此,Sandusky 等^[29]先用弱冲击(~ 0.1 GPa)作用于试样,使试样受到轻微的损伤,然后在损伤仍保持“新鲜”时(约几个毫秒内)再次进行冲击。Yvonne 等^[43]采用高速离心的方法诱发损伤,以模拟枪炮的发射过程。Lefrancois 等^[44]为研究侵彻过程中高减速度的作用,采用缩比弹进行侵彻实验。

(二) 观测方法

对含能材料损伤进行表征,首先要用合适的观测方法获取材料内部的损伤缺陷状况,监测损伤发展过程,根据观察到的主要损伤模式,建立合适的损伤模型来进行分析。含能材料的损伤测量包括直接测量和间接测量,直接测量方法包括显微观察、声超声、声发射、X 射线、小角中子散射^[42,45]和小角 X 射线散射^[42,44]等,间接测量方法包括测量密度、体积、弹性模量^[25]和泊松比^[46]等的变化。

1. 显微观察

显微观察可以采用偏振光显微镜、折射率匹配的光学显微方法、扫描电镜和原子力显微镜等多种方法。为减少电子束照射可能带来的损伤,可采用低真空扫描电镜^[47],这种方法无需在试样表面喷涂导电层,能够更准确地揭示材料损伤的细节。为了对炸药晶体内部的损伤缺陷进行观察,可以将炸药浸入与炸药晶体折射率相匹配的液体中用光学显微镜进行观察^[48,49]。如果采用配备有加载装置的显微镜,还可以对材料的损伤演化及破坏过程进行实时观察^[12,47]。为了对细观损伤结构进行定量分析,可以借助图像处理技术对显微照片进行统计分析,获取诸如微裂纹、孔洞和变形带大小、取向和分布等信息^[42,50]。

2. 超声波测量

超声波测量是研究含能材料损伤的一种有效的无损检测方



法,通过测量损伤前后声阻抗的变化来评价损伤。可以利用声速变化、幅值衰减以及频率的变化等来测量损伤发展,通过声速变化来定义损伤是一种常用的方法^[18,51,52]。将超声波装置与加载装置配合使用还可以对拉伸和压缩等不同加载条件下的损伤进行实时测量。采用声-超声方法可以对含能材料进行更有效的测量,目前应用较广的方法是浸水或脱水式超声 C 扫描^[53,54]。Knollman 等^[55]在对推进剂的损伤研究中,建立了基于超声波测量的细观损伤模型,将宏观的超声波参量(声速和声衰减等)与细观损伤参量(有效孔洞尺寸和数密度等)联系起来。

3. 声发射

声发射通常是指在外力或内应力作用下,材料或构件内部缺陷和微结构状态变化时,以弹性波形式释放出的应变能。采用声发射方法可以得到加载过程中声发射事件数、声发射振铃计数、声发射能量累积、声发射能量变化率、声发射信号幅度等随时间和载荷的变化情况。采用声发射技术可以用来检测损伤的起始与扩展。许多材料的声发射存在明显的门槛值,载荷小于某一特定值时,声发射测得的累积能量为 0 或很小,载荷超过该值后,声发射信号急速增加。因此,可以将此值作为损伤演化阈值^[56],用它可以对损伤演化方程参数进行标定。通过声发射能量定义损伤,还可以获得损伤度的演化^[57]。此外,根据声发射信号幅度、持续时间等参数,还可以在在一定程度上识别含能材料的细观损伤特征,如晶体断裂、基体开裂和界面脱粘等^[58]。

4. 高能 X 射线

高能 X 射线照相系统用直线加速器作高能 X 射线源,用照相法检测固体发动机等的各种内部缺陷,可以发现含能材料中的气孔、杂质、裂纹和其他潜伏性问题,确定药柱结构的完整性以及各界面粘接缺陷和人工脱粘区内的异物等。Liu 等^[59]用 X 射线对固体推进剂损伤演化过程进行了监测,图 1-3 为拉伸加载条件下孔隙率随应变的演化过程,可以发现高能 X 射线与膨胀计测量结



果具有较好的一致性。20 世纪 80 年代以来,高能 X 射线计算机层析检测系统(X-CT)开始应用于含能材料的无损监测,这种方法较之常规的高能 X 射线照相法具有分辨率高、方便快捷等优点。阳建红等^[60]用 CT 对 HTPB 复合固体推进剂的损伤进行了测量,在微裂纹类型单一的假设下,建立了基于 CT 测量的损伤模型。

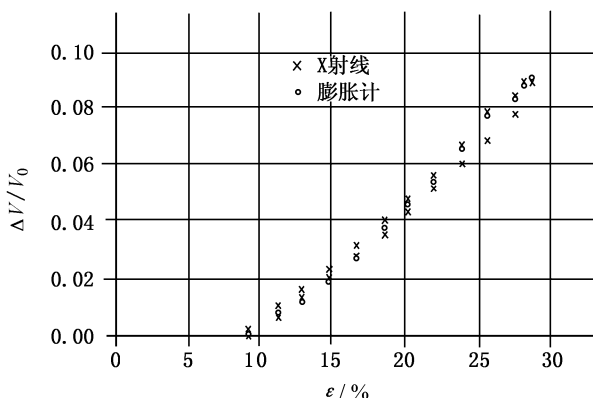


图 1-3 推进剂拉伸过程中孔隙率随应变的演化

5. 膨胀计

含能材料中微孔洞和微裂纹等不同形式的损伤引起的体积变化,可以通过气体膨胀计^[61]/液体膨胀计^[27, 39]来测量,变形过程中试样体积的变化通过测量试样排开的液体/气体的量来确定。采用膨胀计可以测量未损伤含能材料的初始孔隙率、变形过程中孔隙率的演化、卸载时与时间相关的孔洞塌缩以及损伤“愈合”后的孔隙率。由于膨胀计通常是与加载装置配合使用,因此可以同时给出应力应变曲线。膨胀计具有较高的测量精度和较大的测量范围,采用拉伸膨胀计可测量的最小体积变化为 10^{-5} cm^3 ,最大孔隙率可达 50%。



四、含能材料损伤本构关系

对含能材料的损伤本构关系已有过不少研究^[62~66], 损伤模型主要分为两大类, 一类为连续介质损伤力学模型, 另一类为微裂纹细观损伤模型。Browning 等^[67]针对 PBX9502 和 PBX9501 提出了一维粘塑性损伤本构模型, 认为塑性由材料内部的损伤引起, 本构方程参数由蠕变实验及循环加卸载等实验得到, 但该模型还不能很好模拟长时间条件下的应力松弛。丁雁生等^[68]采用一维粘弹性蠕变损伤模型对 PBX 炸药的蠕变损伤及破坏进行了研究, 损伤演化由应变来控制。罗景润等^[25]采用弹性模量下降法测量 PBX 炸药的损伤, 得到了简单拉伸下的损伤演化方程和损伤本构关系。Zhou 等^[56, 69]对 HTPB 复合固体推进剂的损伤本构关系进行了研究, 通过对微裂纹系统的分析导出损伤变量, 它是微裂纹尺度和数密度的函数, 损伤演化方程由微裂纹的成核率和生长率得到。本构方程中包含了力学损伤和化学老化, 本构方程中的材料常数根据老化实验、膨胀实验、声发射和松弛实验等来确定。Duncan 等^[70]在对固体火箭推进剂的研究中, 采用了包含累积损伤的非线性粘弹性本构模型, 其中的非线性部分包含应变率项、损伤项及非线性指数。该模型与实验结果符合较好, 但方程中参数较多, 需由一系列的试验来确定。

含能材料的动态损伤本构关系是一个研究热点。Seaman 等^[71]采用粘弹性微裂纹损伤模型对含能材料的撞击响应进行模拟, 该模型包括一个广义 Maxwell 体粘弹性模型和一个微裂纹损伤模型。微裂纹模型包括微裂纹的成核、微裂纹的生长及裂纹的聚合等, 材料参数由一系列不同应变率下的力学实验得到。黄风雷等^[72]根据实验观察到的固体推进剂层裂现象, 提出了类似的裂纹成核和成长断裂模型, 采用损伤度的概念描述断裂过程, 建立了相应的损伤演化方程。Clancy 等^[73]在对 PBX9501 动态力学响应的模拟中, 本构方程同样包含粘弹性和脆性断裂, 从而可以研究材