第 32 卷 第 2 期 力 学 进 展 Vol. 32 No. 2
2002 年 5 月 25 日 ADVANCES IN MECHANICS May 25, 2002

含能材料装药的损伤及力学性能研究进展*

陈鹏万 丁雁生[1] 陈 力[1]

北京理工大学机电工程学院，北京 100081
[1] 中国科学院力学研究所，北京 100080

摘 要 研究含能材料的损伤和力学性能对于指导含能材料配方和结构件设计，以及对含能材料进行安全性评估和寿命预测等都具有重要的意义. 损伤一方面使含能材料的力学性能劣化，另一方面还影响含能材料的感度、燃烧甚至爆炸性能. 本文对含能材料损伤和力学性能的研究现状进行了综述和归纳. 对含能材料损伤的产生、实验模拟、主要损伤模式，损伤对含能材料的感度和燃烧性能等的影响，炸药单相材料的性质，影响含能材料力学性能的因素以及损伤本构关系等进行了介绍. 对其中的一些关键问题和热点问题进行了分析，并对今后需要开展的工作发表了一些看法.

关键词 含能材料，损伤，力学性能，本构关系

1 引 言

含能材料是武器杀伤、破坏和动力能源的关键性材料. 随着现代高性能武器系统的飞速发展，对提高含能材料装药在各种条件下安全性的要求日益迫切，含能材料损伤和力学性能的研究也越来越受到重视. 近几年，这方面的研究工作正逐渐成为热点.

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，后者是一类特殊的颗粒填充复合材料，为保证高能量的要求，其中的高能固体填料含量很高，对于很多的炸药材料，颗粒相含量高达 90% 以上. 混合含能材料的应用很广，本文主要针对这类材料进行讨论. 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，还需要充分考虑其含能敏感和颗粒高度填充的特征，其对外载作用下的响应包括力 - 热 - 化学反应的耦合，这样对它的研究手段、分析方法等也应有相应的不同.

含能材料的服役环境非常复杂，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、应力状态和温度之中. 含能材料在服役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，从而影响炸药的感度、燃烧甚至爆炸性质. 研究含能材料的损伤和力学性能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

收稿日期：2001-06-18，修回日期：2002-01-10
* 国家自然科学基金 (10002022)，国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金 (10076021) 及中国科学院力学所所长择优基金资助项目

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

测等都具有重要的意义. 目前, 国际上对含能材料安全性研究在很大程度上是围绕载荷和环境以及相关力学性能展开的.

2 含能材料的细观结构和损伤

2.1 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、燃烧甚至爆轰性能产生影响. 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 [1] 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. Ritchter 等 [2] 对受拉伸损伤的 H-1 推进剂的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 [3] 对受压缩损伤的 PBXW-108 的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%. 这似乎说明拉伸损伤对感度的影响比压缩损伤更大. 遗憾的是还没有更多的实验结果支持这个观点.

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 [4] 研究了时间对损伤激发的冲击感度的影响. 损伤是通过弱冲击产生的, 弱冲击和冲击起爆的时间间隔范围约 (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%. 当间隔时间增加到 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 [3] 和 Ritchter 等 [2] 的研究也表明, 损伤随时间而愈合, 而且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.

损伤的存在还会使燃烧表面积增加, 燃速提高, 从而引起推进剂的燃烧异常, 这方面的研究已有报道 [5,6]. Gazonas 等 [6] 对受压缩损伤的 M30 推进剂的燃烧性能的研究表明, 受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. 黄风雷 [7] 对不同损伤度条件下固体推进剂冲击起爆过程进行了研究, 发现复合固体推进剂随损伤度增加而引起的波后流场中压力时间剖面特性由“双峰”向“单峰”转变的现象, 并从热点形成机制对上述现象进行了分析.

有关损伤对炸药爆轰影响的研究还很少. 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 [8] 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.

2.2 含能材料的损伤

含能材料的损伤包括炸药合成、造型粉制备、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. 在合成时受结晶过程等的影响, 在炸药晶体内部会有空穴及气泡等初始缺陷, 这方面的研究已有报道 [9,10]. 在高聚物粘结炸药 (PBX) 造型粉制备时由于颗粒含量很高还会产生黏结剂包覆不全.

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, 如炸药晶体内部的孔洞以及黏结剂包覆不全等, 有的则是在成型过程中产生的. 对于熔注炸药, 如果控制

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

不当会产生裂纹和缩孔. 压制成型则会产生更多的损伤. 压制压力通常高达数百 MPa, 热压时还会有温度的作用, 压制温度可达 100°C 甚至更高. 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. 压制过程中会产生塑性变形、炸药颗粒断裂以及炸药与黏结剂界面脱粘等. 另外, 在成型的含能材料中还会有较大的残余应力. 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兴趣 [11~13]. 图 1 为热压成型的 PBX9404 的剖面形貌, 可以看出炸药颗粒中有很多微裂纹, 在一些炸药颗粒上还有平行的孪晶带. 颗粒破碎是压制过程中一个重要的现象. 陈鹏万 [12] 通过深度腐蚀对压制前后颗粒形貌和粒度分布的研究表明, 压制过程中颗粒的破碎现象很严重 (如图 2 所示), 颗粒破碎使炸药粒度分布发生变化, 压力越大, 颗粒的破碎越严重. 成型方法的差异使得压制成型含能材料的初始损伤通常比注装材料大, 因而压制含能材料的冲击感度明显高于注装含能材料.

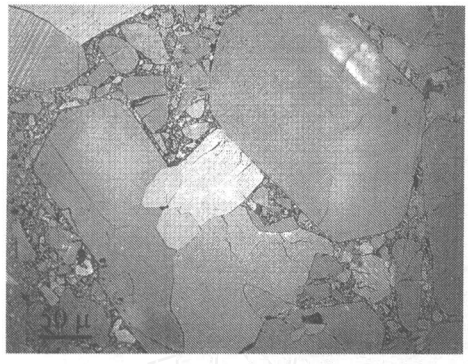

图 1 热压成型 PBX9404 剖面形貌 [13]

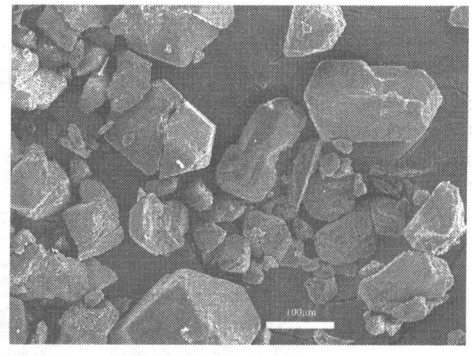

图 2 压制后 HMX 颗粒形貌

含能材料在不同的载荷和环境下会产生不同形式的损伤. Palmer 等 [14] 和陈鹏万 [12] 对 PBX 炸药间接拉伸的实时显微实验中观察到了颗粒断裂、界面脱粘、黏结剂基体开裂等多种损伤破坏形式. Palmer 等 [14] 还从理论上对 PBX 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黏结剂界面结合较弱, 在超声作用下容易发生界面脱粘 [12,15]. 当用液氮对炸药 [12] 和推进剂 [5] 进行冷冻后能够观察到微裂纹的萌生与扩展. Skidmore 等 [16] 对燃烧的 PBX 炸药急速冷却后在熔化重结晶区发现 β-HMX(奥克托金) 相变成柱状的 δ-HMX. 当用落锤和气炮对 PBX 炸药进行冲击时发现 [11,12,15], 颗粒破碎产生了大量微裂纹, 当冲击作用激发化学反应时, 材料具有与燃烧急冷试样类似的细观结构特征. 黄风雷 [7] 对复合固体推进剂动态压缩的研究表明, 对丁羟复合推进剂, 微裂纹从高氯酸氨颗粒内部开始成核, 并向黏结剂中成长, 对改性双基推进剂, 微裂纹是在 HMX 内部及固体颗粒与黏结剂界面处同时成核的.

2.3 研究手段

显微观察、超声、声发射、 X 射线衍射、核磁共振等可用于对含能材料的细观结构和损伤进行直接的观测. 另外, 也可以通过测量体积、弹性模量、泊松比等的变化来评价含能材料的损伤. Weigand[17] 通过测量材料弹性模量等的变化对一系列高聚物粘结炸药单轴压缩条件下的损伤进行了研究, 同时讨论了约束条件对损伤产生过程的影响. Zhou 等 [18] 和赵方芳等 [19] 通过声发射来研究损伤演化. Hubner 等 [20] 则通过测量含能材料的泊松比来定量表征含能材料的脱粘. McAfee 等 [21] 还采用图像处理技术对受冲击损伤的 PBX9501 炸药的损伤状态进行了分形表征.

显微镜是一种常用的观测手段, 它包括光学显微镜和扫描电子显微镜等. 光学显微镜和扫

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

描电子显微镜各有优缺点，电子显微镜具有分辨率高和景深大等优点，但电子束照射时，特别是长时间高倍数下观察时可能对试样造成损伤，另外含能材料电镜试样通常需要喷镀导电层，这样就可能掩盖损伤的细节．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系数相匹配的液体中用光学显微镜进行观察 [9,10]，这种方法可以用于黑索金 (RDX)、奥克托金 (HMX) 和泰安 (PETN) 等的观察，但由于三氨基三硝基苯 (TATB) 晶体是半透明的，用这种方法就比较困难． Skidmore 等 [11,16] 和 Demol[15] 等采用偏振光显微镜对炸药进行观察．Rae 等 [22] 则采用低真空扫描电镜对炸药进行观察，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．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 [12,14]． 由于制备显微拉伸用的尺寸很小的直接拉伸哑铃状含能材料试样比较困难，因此在实时显微观察实验中多采用间接拉伸实验 (也称对径压缩实验)．间接拉伸短圆柱试样开裂时大体沿加载线方向，这样就便于对破坏过程进行跟踪观察．

2.4 损伤的实验模拟

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 [15] 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°C/min 和 3°C/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快速升温． Skidmore 等 [16] 和 Demol 等 [15] 则对燃烧的炸药试样急速冷却来观察热刺激的影响．低温载荷的模拟可以采用冷冻实验 [5,12]． Yvonne 等 [23] 采用高速离心的方法诱发损伤，以模拟枪炮的发射过程． Bernecker 等 [3] 则采用了一种更为理想化的方法模拟损伤，先将注装成型的炸药用机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．

对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冲击时中等应变率下损伤的产生 [5,15]．高应变率下损伤的产生则可以采用弹丸或高速飞片进行模拟 [5,7,24]． Skidmore 等 [24] 用低速气炮来模拟撞击下剪切损伤的产生．在冲击感度的研究中，对冲击损伤模拟的一个关键是对损伤“新鲜”状态的保持． Green 等 [25] 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 [4] 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 ms 内) 再次进行冲击．

3 含能材料的力学性能

含能材料力学性能的研究大致分为两类：一类是连续变形性质，即应力、应变本构关系，主要考虑应变率和温度的影响；另一类是破坏性质． 60 年代以来，美国等一些发达国家开展了一系列含能材料力学性能的研究，重点是含能材料的动态 (中高应变率) 力学性能．近几年，低温力学性能实验也日益受到重视．与炸药材料相比，推进剂力学性能的研究比较系统和深入．在炸药材料方面， TNT(梯恩梯) 和 Comp B 炸药是研究最多的材料 [26~28]．近几年，国内在含能材料力学性能研究方面开展了积极的工作 [29~32]，已建立了一些常规力学性能的测试方法．

有关炸药破坏性质的研究也有相应的报道． Rae 等 [22] 和 Palmer 等 [14] 对 PBX 炸药的破坏性质进行了研究．结果表明，在准静态间接拉伸条件下界面脱粘和黏结剂开裂是主要的破坏模式，而颗粒断裂则很少发生．但在单轴压缩条件下， PBX 中颗粒断裂很严重 [12]． Lanzerotti 等 [33] 的研究则表明，在低应变率 ($10^{-4}s^{-1}$) 下， Comp B 断裂主要沿 RDX 晶粒边界，而在应

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

变率 $4 \times 10^{-3}s^{-1}$ 或更高时， RDX 会发生穿晶断裂. Wiegand[17] 和 Gray 等 [34] 研究了温度和应变率对 PBX 及其它含能材料变形破坏的影响. 结果表明，对一些 PBX 炸药，当温度降低和应变率增加时断裂路径从黏结剂转到了炸药. 低模量 (高温度) 区破坏遵循固定应变准则，而高模量 (低温度) 区破坏遵循固定应变能准则. 目前多采用最大应变准则判断药柱结构是否发生破坏.

3.1 研究手段

研究含能材料力学性能的实验手段主要包括材料试验机、霍布金森杆、落锤、气炮、超声波等 [35~38], 应变率范围在 $(10^{-9} \sim 10^{5})s^{-1}$ 之间. 这些方法各有其特点和使用范围，彼此能互相补充. 落锤、霍布金森杆和气炮主要用于中高应变率下动态力学性能研究. 电液伺服材料实验机由于不断完善和发展，应变率范围很宽 $(10^{-9} \sim 10^{3})s^{-1}$，被广泛地用于含能材料动、静态力学性能研究.

拉伸实验和压缩实验是两类重要的常规力学性能实验. 对于炸药材料，由于其强度通常较低，制备标准的直接拉伸用哑铃装试样比较困难，因此常规实验中多进行压缩实验. 为了解决直接拉伸试样制备上的困难，间接拉伸实验也被用于炸药材料拉伸性能的测试 [39,40]. 这种方法的优点是试样制备简单 (短圆柱试样) 、所需材料少、实验费用低. 近年来，一些光学测量方法如激光散斑干涉法、云纹干涉法和电子散斑干涉法等也被用于炸药间接拉伸实验研究中 [12,41,42]. 间接拉伸实验结合这些高精度的光学测量方法和显微观察还可以对微区应变场进行测量，揭示材料的细观变形破坏机理.

3.2 炸药单相材料的性质

炸药单相材料的力学性质直接影响含能材料总体的力学性能. 目前对于炸药单相材料力学性质的研究还很少. 显微硬度实验可以用来研究炸药单晶的变形破坏性质，试样中需要培养大的炸药单晶. Sandusky 等 [43] 和 Armstrong 等 [44] 分别研究了 AP(高氯酸氨) 单晶和 RDX 单晶的变形破坏性质. Palmer 等 [45] 则对 β-HMX 单晶的变形破坏进行了研究，发现在一定的压力下会出现弹性孪晶，而当压力进一步升高时孪晶变形会以塑性变形的形式保留下来. 孪晶在 HMX 、 RDX 和 TATB 炸药晶体中都曾观察到. 变形孪晶的存在说明炸药晶体能够承受一定的塑性变形，表现出“微塑性”. Zaug[46] 通过脉冲激发光散射测量声速从而得到 β-HMX 的弹性常数. Leiber[47] 还对炸药晶体的各向异性弹性常数等进行了讨论. 表 1 所示为几种炸药的硬度和模量等的比较，其中 E_t 为拉伸弹性模量， K_{IC} 为临界应力强度因子， γ 为断裂表面能. 由于培养大的 TATB 单晶比较困难，有关 TATB 性能数据很缺乏. Field 等 [41] 研究了不同炸药组分对 PBX 力学性能的影响. 结果表明，用 TATB/PETN 代替纯 TATB 时，可以使 PBX 炸药的拉伸强度显著提高，而不影响它的断裂应变；而用 TATB/HMX 代替纯 TATB 时，可以使炸药的拉伸强度显著提高，但同时使它的断裂应变降低.

表 1 几种单质炸药的力学性能比较 [14,45]

炸药	硬度 $/kgmm^{-2}$	E_t/Nm^{-2}	$K_{IC}/Nm^{-3/2}$	γ/Jm^{-2}
PETN	17.9	1.37×10^{10}	5.5×10^{4}	0.11
RDX	24.1	1.84×10^{10}	6.4×10^{4}	0.11,0.07
β-HMX	40.3	3.1×10^{10}	6.2×10^{4}	0.06
TATB	—	4.76×10^{9}	—	—

3.3 影响含能材料力学性能的因素

影响含能材料力学性能的因素很多，包括材料的组成及相互作用、成型工艺和条件、实验

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

条件和药柱的后处理等一系列因素. 材料的组成及相互作用包括炸药和黏结剂的种类和含量、炸药颗粒的形状和粒度分布、炸药与黏结剂的界面结合性能等. 试验条件包括加载方式、应力率、应变率、环境温度、湿度等.

Johnson[48] 研究了热老化对炸药力学性能的影响. 含能材料的力学性能明显受应力率、应变率和温度的影响. Wiegand[17] 和 Gray 等 [34] 的研究都表明, PBX 的抗压强度和压缩弹性模量随应变率增加而增加, 随温度的升高而降低, 但温度和应变率的变化只引起临界压缩应变的微小改变. Harrell[49] 和 Johnson[50] 还研究了 Bartherm 处理对 PBX 力学性能的影响. 所谓 Bartherm 处理就是把已压制好的药块, 装在一个用环氧化合物制成的袋内或直接浸入到一种合适的液体中, 进行数天的热循环和再加压. 利用该方法可以使药柱密度提高 0.01~0.07 g/cm^3, 达到 99.5% TMD, 并显著改善药柱的力学性能. 这是由于反复加热加压使热塑型 PBX 材料发生蠕变, 颗粒塑性变形后紧密咬合, 并降低 PBX 材料的内应力的缘故.

炸药和黏结剂界面结合强度对于含能材料的力学性能有重要的影响, 造型粉制备时黏结剂对炸药的包覆效果对于 PBX 材料的力学性能也有重要的影响. 由于 PBX 中炸药颗粒含量很高, 而黏结剂的含量很低, 造型粉制备时包覆率很难达到 100%, 黏结剂包覆层的平均厚度通常不到 1 μm. Bower[51] 研究了包覆效果对炸药力学性能和感度的影响. 目前对黏结剂的包覆率还缺乏有效的测试分析手段, 宋华杰 [52] 尝试了用光电子能谱 (XPS) 分析黏结剂的包覆效果. 目前, 黏结剂对炸药的粘结机理还没有成熟的理论, 国内外已提出的理论包括吸附理论、扩散理论、双电层理论和酸碱配位理论等. 为解决炸药和黏结剂界面脱粘, 国内外研究人员开展了很多工作 [53~55], 并提出了一些预防界面脱粘的措施. 目前, 对于 AP 的脱粘问题通过采用偶联剂已得到了较好的解决 [53], 但对于 HMX 和 RDX 等还未能有效解决.

粒度和颗粒级配是含能材料设计中需要考虑的因素. 研究表明, 无论单质炸药的粒度还是造型粉的粒度都明显地影响材料的力学性能. Palmer 等 [14] 和 Field 等 [41] 对一系列 PBX 的研究表明, 炸药颗粒度减小时材料的强度提高. Johnson[56] 的研究则表明, 造型粉粒度对直接拉伸和间接拉伸性能没有明显的影响, 但却明显影响材料的蠕变性能, 当造型粉的粒度减小时 PBX 蠕变的破坏时间和破坏应变均有显著增加. 颗粒级配可以改善炸药的流散性, 提高装药密度, 改善装药的力学性能. 实验研究表明, 炸药粒度分布窄的压制成型药柱易出现裂纹, 粒度分布宽的药柱则不易出现裂纹. 当采用粒度级配时虽然密度的变化只有 1%, 但压缩强度却提高了 80%. 目前, 国外已定型炸药的主体炸药差不多都采用颗粒级配的方式, 通常是大颗粒占 75%, 小颗粒占 25%[57]. 从细观结构讲, 当颗粒细化并采用颗粒级配时, 接触点增加, 应力更加平均化, 接触应力减小, 内应力和初始损伤也将减小, 这样材料的力学性能就会相应提高.

4 本构关系和数值模拟

Browning 等 [58] 针对 PBX9502 和 PBX9501 提出了一维黏塑性损伤本构模型, 认为塑性由材料内部的损伤引起, 方程参数由蠕变实验及循环加卸载等实验得到, 但该本构方程不能很好模拟长时条件下的应力松弛. 潘颖 [59] 采用一维黏弹性蠕变损伤本构模型对 PBX 的蠕变损伤及破坏进行了研究, 损伤演化由应变控制, 对损伤演化系数及无量纲开裂时间进行了讨论, 该模型参数物理意义明确, 但在模拟蠕变第三阶段时还存在一些误差. 罗景润等 [60] 采用弹性模量下降法测量 PBX 的损伤变量, 据此得到了简单拉伸下的损伤演化方程和损伤本构关系. Zhou[18,61] 对复合固体推进剂 HTPB 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, 它是微裂纹尺度和密度的函数. 损伤演化方程从微裂纹的成核率和生长率得到. 在本构方程中

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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确定. Duncan 等[62] 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黏弹性本构模型, 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, 需由一系列的试验确定.

以上的本构模型主要用于研究含能材料的静态和准静态力学行为. 含能材料的动态性能是一个值得特别关注的问题. Seaman 等[63] 采用黏性内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 体黏弹性模型和一个微断裂模型 BFRACT, 在微断裂模型中包括微裂纹的成核、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性能实验得到. Bennett 等[64] 在对 PBX9501 的力学响应及非冲击起爆的模拟中, 采用了黏弹性统计断裂本构模型 (Visco-SCRAM), 模型中包含了黏弹性响应、统计断裂力学和热点起爆机理. Clancy 等[65] 在对 PBX9501 动态力学响应的模拟中, 本构方程同样包含黏弹性和脆性断裂, 从而可以研究材料损伤和绝热剪切带等的发展. 黄风雷[7] 根据试验观察到的固体推进剂层裂现象, 提出了类似的裂纹成核、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.

近年来, 有关含能材料细观计算力学方面的研究逐渐成为热点. Hubner 等[20] 在对推进剂研究中采用胞元模型进行有限元计算, 对于不同的颗粒填充度, 计算了不同程度界面脱粘情况下复合材料泊松比的变化, 并据此提出通过测量材料泊松比的变化来确定含能材料脱粘. Tang 等[66] 则用离散元在细观尺度上对炸药的冲击响应进行了模拟. Bardenhagen 等[67] 采用摩擦接触和界面脱粘算法在晶粒尺度上对 PBX 的剪切变形进行了模拟. Duffy 等[68] 采用 DYNA2D 对复合推进剂受落锤冲击时力学响应进行模拟, 研究了很多 AP 颗粒在黏结剂中随机分布下由于材料细观结构上的非均匀性引起的应力集中. Baer 等[69] 对大量 HMX 颗粒规则排列和随机堆积的集合体 (包含黏结剂) 在冲击作用下密实、变形和化学反应过程进行了模拟, 计算了细观尺度上应力和温度场的分布. 结果表明, 在接触点上材料的快速变形引起应力状态的大幅波动, 在晶粒边界冲击波汇聚和塑性功引起的局部能量沉积产生了"热点", "热点"的形成明显受多个晶体相互作用的影响. 这些研究为非均质含能材料细观力学行为、化学反应和冲击起爆等的研究提供了新的思路.

5 展 望

含能材料与一般的颗粒填充复合材料具有较大的差别, 它的组成比较复杂, 颗粒含量很高, 并具有含能敏感的特点, 而且其服役环境很复杂, 经常需要获取很宽的温度范围和应变率范围内的力学性能, 这些都给实验研究、理论分析和数值模拟带来了困难. 如何借鉴复合材料力学、损伤力学、细观力学等领域的研究成果, 并将它与爆炸力学紧密联系起来是任重而道远的工作, 但它对于发展高性能的武器系统至关重要. 虽然近年来这方面的研究日益得到重视, 并已取得了许多积极的成果, 但这些成果远不能满足实际应用的要求, 很多工作都需要完善和深入. 作者认为以下的一些研究课题可望成为今后的研究重点或新的探索方向:

(1) 实验研究方面: 应该进一步发展适合于开展含能材料损伤和力学性能研究的实验技术, 如超声、中子衍射等无损检测技术, 损伤破坏过程的声发射监测, 细观变形破坏的高精度云纹干涉测量; 加强对炸药和黏结剂单相材料, 特别是炸药单相材料力学性质的研究, 对炸药晶体的"微塑性"进行定量的评价, 对炸药的变形孪晶和滑移进行深入研究; 加强含能材料低温、高应变率和复杂应力状态下力学性能研究; 对含能材料受各种外界刺激下细观结构特征进行深入

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的观察，特别是冲击作用激发局部化学反应的临界条件下材料的细观结构特征，对材料的变形破坏过程进行实时显微观察；深入研究不同的损伤形式 (如拉伸损伤和压缩损伤) 、特别是冲击损伤对含能材料燃烧爆炸等的影响.

(2) 理论研究和数值模拟方面：应该加强黏结剂对炸药粘结机理，含能材料细观变形破坏机理以及含能材料 (特别是压制成型材料) 内应力产生机理等的研究；对颗粒接触效应对于初始损伤的形成和力学性能的影响进行理论分析；在实验基础上探索适合于含能材料这类极高颗粒填充度复合材料的细观力学模型，借此强化对材料宏观力学性能预报的研究；根据含能材料的损伤模式和含能敏感的特点选择合适的损伤变量，建立损伤演化方程和损伤本构关系. 在数值模拟方面，应该强化对含能材料细观结构的模拟，在此基础上对各种载荷，特别是冲击载荷作用下含能材料的力学响应和化学响应进行模拟.

参 考 文 献

1 Ramsay J B, Richter H P, Bernecker R R. Comparison of damage-created voids with other voids types in energetic materials. In: Short J M, Tasker D G eds. Proceedings Tenth International Detonation Symposium. Boston, Massachusetts, 1993. 802~807

2 Richter H P, Boyer L R, Graham K J, et al. Shock sensitivity of damaged energetic materials. In: Lee E L, Short J M eds. Proceedings of the Ninth Symposium (International) on Detonation. Portland, Oregon, 1989. 1295~1300

3 Bernecker R R, Jr Clairmont A R. Shock initiation studies of cast, damaged and granulated PBXs. In: Short J M, Tasker D G eds. Proceedings Tenth International Detonation Symposium. Boston, Massachusetts, 1993. 499~506

4 Sandusky H W, Bernecker R R. Influence of fresh damage on the shock reactivity and sensitivity of several energetic materials. In: Short J M, Tasker D G eds. Proceedings Tenth International Detonation Symposium. Boston, Massachusetts, 1993. 490~498

5 张泰华. 推进剂的损伤状态对其对燃烧稳定的影响: [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1999

6 Gazonas G A, Juhasz A A, Ford J C. Strain rate insensitivity of damage-induced surface area in M30 and JA2 Gun propellants. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1996, 21: 307~316

7 黄风雷. 固体推进剂冲击特性研究: [博士论文]. 北京: 北京理工大学, 1992

8 Kegler W, Schall R. Mechanical and detonation properties of rubber bonded sheet explosives. In: Jacobs S J ed. Proceedings of Fourth Symposium (International) on Detonation, White Oak, Maryland, 1965. 496~501

9 Spitzer D, Samirant M. Shock solicitation of PETN single crystals presenting defects and visualization of hot spots initiation. In: Short J M, Tasker D G eds. Proceedings Tenth International Detonation Symposium. Boston, Massachusetts, 1993. 831~840

10 Baillou F, Dartyge J M, Spyckerelle C, Mala J. Influence of crystal defects on sensitivity of explosives. In: Short J M, Tasker D G eds. Proceedings Tenth International Detonation Symposium. Boston, Massachusetts, 1993. 816~823

11 Skidmore C B, Phillips D S, Crane N B. Microscopical examination of plastic-bonded explosives. *Microscope*, 1997, 45(4): 127~136

12 陈鹏万. 高聚物粘结炸药的细观结构和力学性能. 中国科学院力学研究所博士后研究工作报告, 2001

13 Skidmore C B, Phillips D S, Howe P M. The evolution of microstructural changes in pressed HMX explosives. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 268~272

14 Palmer S J P, Field J E, Huntley J M. Deformation, strengths and strains to failure of polymer bonded explosives. *Proc R Soc Lond A*, 1993, 440: 399~419

15 Demol G, Lambert P, Trumel H. A study of the microstructure of pressed TATB and its evolution after several kinds of solicitations. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 404~406

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

16 Skidmore C, Phillips D, Idar D, Son S. Characterizing the microstructure of selected high explosives. LA-UR-99-1201, 1999

17 Wiegand D A. Mechanical properties and mechanical failure of composite plastic bonded explosives and other energetic materials. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 85~88

18 Zhou Jianping, Lu Yinchu. A damage evolution equation of particle-filled composite materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 1991, 40(3): 499~506

19 赵方芳，罗景润，田常津等. 利用声发射技术监测颗粒填充聚合物材料的裂纹扩展过程. 高压物理学报， 2000, 14(3): 235~240

20 Hubner C, Geibler E, et el. The importance of micromechanical phenomena in energetic material. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1999, 24: 119~125

21 McAfee J M, Skidmore C B, Cunningham G S, et al. Explosive morphology from fractal analysis of micrographs. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 443~445

22 Rae P J, Goldrein H T, Palmer S J P, Field J E. Studies of the failure Mechanisms of polymer-bonded explosives by high resolution moiré interferometry and environmental scanning electron microscopy. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 235~239

23 Yvonne M, Lanzerotti D, Pinto J. Fracture surface topography of TNT, Composition B and Octol. In: Short J M, Tasker D G eds. Proceedings of Tenth Symposium (International) on Detonation, Portland, Oregon, 1993. 190~198

24 Skidmore C B, Phillips D S, Asay B W, et al. Microstructural effects in PBX 9501 damaged by shear impact, LA-UR-99-3233

25 Green L, James E, Lee E. Energetic response of propellants to high velocity impact. In: Short J M ed. Proceedings of Eighth Symposium (International) on Detonation, Albuquerque, New Mexico, 1985. 284~293

26 Wiegand D A, Pinto J, Nicolaids S. The mechanical response of TNT and a composite, composition B, of TNT and RDX to compressive stress, I: uniaixal stress and fracture. *J Energetic Materials*, 1991, 9: 19~80

27 Pinto J, Wiegand D A. The mechanical response of TNT and a composite, composition B, of TNT and RDX to compressive stress, II: triaixal stress and yield. *J Energetic Materials*, 1991, 9: 205~263

28 Wiegand D A, Pinto J. The mechanical response of TNT and a composite, composition B, of TNT and RDX to compressive stress, III: dependence on processing and composition. *J Energetic Materials*, 1991, 9(5): 349~414

29 Han X P, Li L X, Zhang Y C. A study on dynamic compressive properties of energetic materials at low temperatures. *Journal of Energetic Materials*, 1999, 17: 191~196

30 Han X P, Zhang T H, Zhao Z H. Experimental investigation of adiabatic shear bands formation in TNT explosives under impact. *Journal of Energetic Materials*, 1997, 15: 185~191

31 董海山，周芬芬. 高能炸药及相关物性能. 北京：科学出版社， 1989

32 韩小平，张元冲. 含能材料动态力学性能实验研究. 爆炸与冲击， 1995, (1): 20~27

33 Lanzerotti M Y D, Pinto J. Fracture surface topography of TNT, Composition B and Octol. In: Short J M, Tasker D G eds. Proceedings Tenth International Detonation Symposium. Boston, Massachusetts, 1993. 190~198

34 Gray III G T, Idar D J, Blumenthal W R, et al. High- and low- strain rate compression properties of several energetic material composites as a function of strain rate and temperature. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 229~231

35 Dagley I J, Ho S Y, et al. High strain rate impact ignition of RDX with ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymers. *Combustion and Flame*, 1992, 89: 271~285

36 Field J E, Palmer S J P, Pope P H, et al. Mechanical properties of PBX's and their behavior during drop weight impact. In: Short J M ed. Proceedings of Eighth Symposium (International) on Detonation, Albuquerque, New Mexico, 1985. 635~644

37 Weirick L J. Shock-wave characterization of energetic booster-rocket propellant WAK-2 and its simulant UGS. SAND89-0917, 1989

38 Sutherland H J, Kennedy J E. Acoustic characterization of two unreacted explosives. *Appl Phys.* 1975, 46(6): 2349~2444

39 Johnson H D. Mechanical properties of high explosives. MHSMP-74-19, 1974

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

40 Johnson H D. Mechanical properties of LX-10-1 evaluated with diametric disc test. MHSMP-79-08, 1979

41 Field J E, Parry M A, Palmer S J P, et al. Deformation and explosive properties of HMX powders and polymer bonded explosives. In: Lee E L, Short J M eds. Proceedings of the Ninth Symposium (International) on Detonation, Portland, Oregon, 1989. 886~896

42 Goldrein H T, Huntley J M, Palmer S J P, et al. Optical techniques for strength studies of polymer bonded explosives. In: Short J M, Tasker D G eds. Proceedings Tenth International Detonation Symposium. Boston, Massachusetts, 1993. 525~535

43 Sandusky H W, Glancy B C, Carlson D W, et al. Deformation and shock loading on single crystals of Ammonium Perchlorate relating to hot spots. In: Lee E L, Short J M eds. Proceedings of the Ninth Symposium (International) on Detonation, Portland, Oregon, 1989. 1260~1270

44 Armstrong R W, Elban W L. Cracking at hardness microindentations in RDX explosive and MgO single crystals. *Materials Science and Engineering*, 1989, A111(1-2): 35~43

45 Palmer S J P, Field J E. The deformation and fracture of β-HMX. *Proc R Soc Lond A*, 1982, 383: 399~407

46 Zaug J M. Elastic constants of β-HMX and Tantalum, equations of state of supercritical fluids and fluid mixtures and thermal transport determinations. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 487~490

47 Leiber C. Aspects of the mesoscale of crystalline explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2000, 25: 288~301

48 Johnson H D. The effects of thermal age to the mechanical properties of RX-03-BB. MHSMP-76-15B, 1976

49 Harrell J D. Bartherm processing of small LX-14 pressings. MHSMP-75-20F, 1975

50 Johnson H D. Mechanical properties of TATB/Kel-F 800 formulation. MHSMP-76-7A, 1976

51 Bower J K, Klob J R, Pruneda C O. Polymeric coatings effect on surface activity and mechanical behavior of high explosives. *Ind Eng Chem Prod Res Dev.* 1980, 19: 326~329

52 宋华杰. TATB/氟聚物复合材料的界面作用与力学性能研究: [硕士论文]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2000

53 Bellerby J M, Kiriratnikom C. Explosive-binder adhesion and dewetting in Nitramine-filled energetic material. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1989, 14: 82~85

54 Martin E C, Yee R Y. Effects of surface interactions and mechanical properties of PBX's on explosive sensitivity. Report NWC-TP-6560, 1984

55 徐庆. 高聚物粘结炸药包覆过程及粘结机理的初步探讨. 含能材料, 1993, 1(2): 1~5

56 Johnson H D. An investigation of the effect of granule size on the mechanical properties of LX-14. MHSMP-79-26, 1979

57 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂编著. 军用混合炸药. 北京: 兵器工业出版社, 1995

58 Browning R V, Gurtin M E, Williams W O. A one-dimensional viscoplastic constitutive theory for filled polymers. *Int J Solids Structures.* 1984, 20(11/12): 921~934

59 潘颖. PBX 复合材料内应力和损伤的初步研究: [博士论文]. 北京: 北京理工大学, 2000

60 罗景润, 李大红, 张寿齐等. 简单拉伸下高聚物粘结炸药的损伤测量及损伤演化研究. 高压物理学报, 2000, 14(3): 203~208

61 Zhou Jianping. A constitutive model of polymer materials including chemical aging and mechanical damage and its experimental verification. *Polymer*, 1993, 34(20): 4252~4256

62 Duncan E J S, Margetson J. A nonlinear viscoelastic theory for solid rocket propellants based on a cumulative damage approach. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1998, 23: 94~104

63 Seaman L, Simons J W, Erlich D C, et al. Development of a viscous internal damage model for energetic materials based on the BFRACT microfracture model. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 265~267

64 Bennett J G, Haberman K S, et al. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives. *J Mech Phys Solids*, 1998, 46(12): 2303~2322

65 Clancy S P, Johnson J N, Burkett M W. Modeling the viscoelastic and brittle fracture response of a high explosive in an eulerian hydrocode. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 317~319

66 Tang Z P, Horie Y, Psakhie S G. Discrete meso-element modeling of shock processes in powders. In: Davison L, et al eds. High-pressure Shock Compression of Solids IV. New York, Springer, 1997. 143~176

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

67 Bardenhagen S G, Brackbill J U, Sulsky D L. Shear deformation in granular material. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 243~246

68 Duffy K P, Mellor A M. Numerical modeling of composite propellant response to drop weight impact. *Journal of Energetic Materials*, 1993, 11: 261~292

69 Baer M R, Kipp M E, Swol F. Micromechanical modeling of heterogeneous energetic materials. In: Short J M, Kennedy J E eds. Paper Summaries-Eleventh International Detonation Symposium, Snowmass, 1998. 65~66

PROGRESS IN THE STUDY OF DAMAGE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ENERGETIC MATERIALS*

Chen Pengwan Ding Yansheng[1] Chen Li[1]

School of Mechatronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

[1]Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract The study of damage and mechanical properties is of importance for the design of formulas and structures, safety assessment and life prediction of energetic materials. Damage deteriorates the mechanical properties of energetic materials, and it also influences the sensitivity, combustion and even detonation properties of energetic materials. In this paper, the progress in the studies on the damage and mechanical properties of energetic materials is reviewed. The production and experimental simulation of damage, the damage modes in energetic materials, and the influences of damage on the shock sensitivity, combustion and even detonation properties of energetic materials are introduced. The mechanical properties of explosive crystals, the influencing factors of the mechanical properties and constitutive laws including damage are also reviewed. Some suggestions for further investigation are also made.

Keywords energetic materials, damage, mechanical properties, constitutive relations

*The project is supported by National Natural Science Foundation of China(10002022), Joint Foundation of Chinese Natural Science Committee and Chinese Academy of Engineering Physics(10076021), and Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net