

doi: 10.7690/bgzd.2024.08.016

高聚物粘结炸药模压成型的数值模拟研究进展

何东坡¹, 温彤¹, 游国强¹, 刘锋¹, 黄求安², 史慧芳²(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 中国兵器装备集团自动化研究所
有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为给高聚物粘结炸药 (polymer bonded Explosive, PBX) 实际生产工艺参数制定和品质调控提供精确指导, 梳理基于连续介质假设和微粒学观点 2 种方法的 PBX 压制成型数值模拟研究进展, 介绍炸药晶体颗粒与粘结剂的物性模型、微结构损伤表征与演化, 以及 PBX 在机械载荷作用下力学行为的相关理论; 从 PBX 的材料特性以及散粒组合复合材料的特殊几何结构等角度, 分析 PBX 压制理论研究的难点, 提出基于统计学概念的 PBX 压制变形与损伤分析的设想。结果表明: 数值模拟可克服物理实验的限制, 从而得到 PBX 在热-力耦合作用下的重要信息。

关键词: 高聚物粘结炸药; 模压成型; 数值模拟; 有限元; 离散元

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Research Progress in Numerical Simulation of PBX Molding

He Dongpo¹, Wen Tong¹, You Guoqiang¹, Liu Feng¹, Huang Qiuan², Shi Huifang²(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Department of Intelligent Manufacture, China Ordnance Equipment Group Automation
Research Institute Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to provide accurate guidance for the formulation of actual production process parameters and quality control of polymer bonded explosive (PBX), the research progress of numerical simulation of PBX compression molding based on the continuum hypothesis and the perspective of microparticle science is combed, and the physical property model, microstructure damage characterization and evolution of explosive crystal particles and binders, and the related theories of the mechanical behavior of PBX under mechanical load are introduced. From the perspectives of PBX material characteristics and the special geometric structure of bulk composite composites, the difficulties of PBX compression theory research are analyzed, and the idea of PBX compression deformation and damage analysis based on statistical concept is proposed. The results show that numerical simulation can overcome the limitations of physical experiments, so as to obtain important information of PBX under the action of thermo-mechanical coupling.

Keywords: PBX; compression molding; numerical simulation; FEM; DEM

0 引言

高聚物粘结炸药 (PBX) 是由炸药颗粒和粘结剂构成的含能复合材料, 在现代高性能常规武器中应用广泛^[1-3]。炸药颗粒是 PBX 的主体, 粘结剂为聚氨酯、橡胶和塑料等高分子聚合物, 添加量通常为 5~10 wt%^[4-5]。PBX 可通过压制 (压装) 或浇铸等方法成型为规定密度和形状的武器功能部件。压制效率高, 可得到高密度和力学性能的炸药部件, 是常用的 PBX 成型方法。压制又包括等静压和模压等具体方式^[6]。前者压力均匀, 药柱的各向异性倾向低, 但工艺装备较复杂、产品加工余量大, 生产效率较低而成本高^[7-8]; 后者采用机械压力, 工艺过程与装备相对简单, 生产效率和尺寸精度高, 应用更加广泛^[9]。

PBX 模压原料是由炸药晶体颗粒包覆粘结剂

形成的“聚合物-晶体”造型粉, 为满足成型工艺与质量要求一般还需要加热。例如在相同压力条件下, HMX 热压 (70 °C) 制品的密度更高, 而晶体破碎更小^[10]。模压过程中, 晶体将出现颗粒位移、重排、弹性压缩、准弹性以及破碎等复杂的变化, 边界的粘结剂则逐渐融合, 最终得到高颗粒填充度的含能 (药柱) 部件^[11]。模压后药柱的密度对 PBX 的轰爆等性能影响很大。研究表明, 均衡压实后 PBX 中普遍存在约 1%~3% 的残余孔隙率^[12]。此外, 压力作用下晶体容易出现变形孪晶、剪切带以及颗粒断裂等不同形式的细观损伤缺陷, 从而影响 PBX 的燃烧、撞击感度以及力学性能^[13-15]。Skidmore 等^[16]通过观察 HMX 基 PBX 在不同压制量下的显微结构纤维结构发现: 压制初期, 炸药晶体未发生明显变化, 主要是颗粒重排并占领孔隙位置。随着压制程

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-05-25

第一作者: 何东坡 (1998—), 男, 河南人。

度不断增加，一些大颗粒边界开始出现裂纹，损伤明显增多，并且出现孪晶和晶内裂纹；因此，充分掌握 PBX 模压的力学行为与规律具有重要价值。PBX 模压是一个热-力耦合作用的复杂过程，由于物理实验的限制，常规手段很难直接观测到封闭于模具内部的微米级炸药颗粒受力演变特征，也难以对 PBX 压制过程进行整体的力学解析计算，更无法描述内部微细结构和力学响应^[17]。应用数值模拟可分析炸药不同组分力学参数的变化，得到压制过程力学状态数据，有助于揭示微观失效机制、优化压制工艺和控制炸药质量；因此，成为当前研究 PBX 模压变形与损伤、密度分布及演化等的重要手段。

目前，PBX 模压数值模拟主要有 2 种思路^[18-19]：

1) 以有限元法 (finite element method, FEM) 为代表的基于连续介质假设的方法，此时颗粒被视为具有连续函数特性，可被无限划分颗粒系统而不失去任何固有特性，但忽略了不连续的颗粒特性；2) 以离散元法为代表的基于微粒学观点的非连续介质模型，采用有限个不连续的理想刚性或弹性颗粒的特性来推导整个颗粒系统性质^[20]。笔者梳理了 PBX 压制成型数值模拟的研究现状，剖析了存在的问题和难点，提出基于统计学概念的研究设想，为实际生产的工艺参数制定和品质调控提供有效指导，并为相关研究提供参考。

1 基于连续介质假设的 PBX 模压数值模拟

1.1 基于 FEM 的数值模拟

FEM 是基于连续介质假设的数值模拟方法，目前已较为成熟，应用十分广泛。Mamalis 和 Khoei 等^[21-22]应用 FEM 分析了 PBX 模压成型。张涛等^[23]运用有限元软件 Msc.Marc 对 PBX 粉末温压成形进行了模拟，采用基于更新拉格朗日方法的热-机耦合分析法，用 Mises 屈服准则描述热弹塑性，获得了粉体几何形变、应力场及相对密度分布等数据，大小和实验数据在同一个数量级。曹兴等^[24]利用 Msc.Marc 软件及 Shima-Oyane 模型分析了 $\Phi 26\text{ mm} \times 22\text{ mm}$ 的 JO-9159 药柱不同位置粉末位移及相对密度变化，探讨了压制速率、初始密度对炸药粉成型后相对密度及回弹量的影响，并得到了粉末位移变化 (图 1)。认为 Shima-Oyane 模型可较好地模拟粉末压制过程。

为体现 PBX “离散”与“非均质”的特性，刘群等^[25]将炸药颗粒处理为按一定规律排列的直径相同的球形颗粒 (图 2)，用塑性动力学模型描述材

料应力-应变关系，选用各向同性材料模型进行炸药压制过程的热和结构的耦合分析 (图 3)。

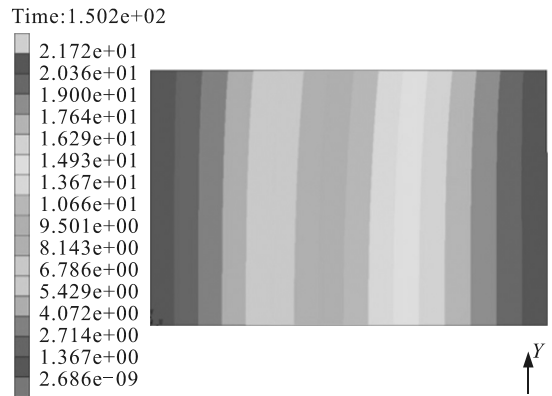


图 1 炸药粉末总位移变化^[24]

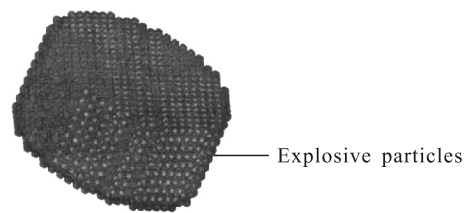


图 2 炸药颗粒药床立体模型^[25]

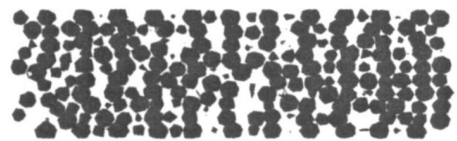


图 3 50 MPa 压力下药床轴向横截面变形 (195 μs)^[25]

岳晓媛等^[26]将 PBX 炸药粉末简化成有限个包覆有粘结剂的 HMX 球形颗粒，建立了炸药体系的 3 维细观模型 (图 4)。对压药过程进行 FEM 模拟，得出压力和保压时间对药柱质量产生影响的规律。

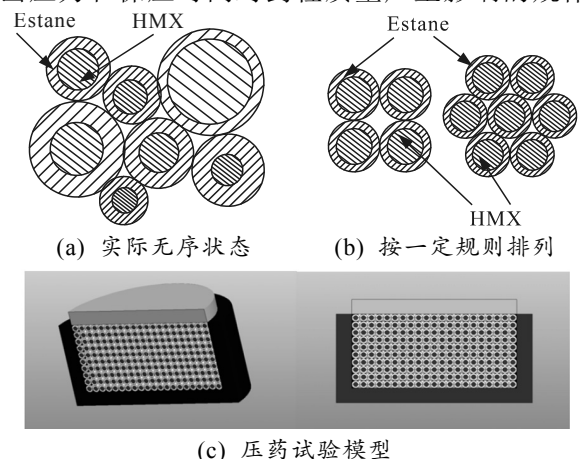


图 4 2 种药粒排列方式与压药试验模型^[26]

准确获取炸药晶体颗粒与粘结剂的物性参数并建立相应的本构方程等力学表征模型，是获得合理的 PBX 模压模拟分析结果的关键。根据受压特性，炸药晶体颗粒可看作脆性/准脆性的类混凝土材料，

其强度-压力关系应采用非线性形式建模,而粘结剂则具有很强的塑性^[27]。一些研究借用了岩石、混凝土和土壤常用的强度模型来描述炸药的屈服及硬化行为,认为利用这些唯象模型可表征 PBX 的压力依赖特性^[28-31]。王鹏飞^[32]应用 Drucker-Prager 准则对 PBX 准静态变形与破坏进行了研究。Rangaswamy 等^[33]通过三点弯曲、霍普金森压杆劈裂和巴西圆盘实验的结果,探讨了统计裂纹力学(statistical crack mechanics, SCRAM)模型的有效性,表明其可用来捕捉 PBX 9501 在失效或接近失效时的力学行为。Buechler 等^[34]提出了一种半隐式更新方案,适用于使用相对较大时间步长的模拟。除了 ViscoSCRAM 模型的粘弹性和损伤效应外,表征 PBX 还需考虑可能源于晶体塑性滑移或粘结剂在高应力状态下的不可逆重新定向导致的粘塑性行为^[35]。Bodner-Partom (B-P) 模型是一种基于状态变量的粘塑性本构模型,可以模拟应变速率、温度和加载历史效应,最初用于模拟金属在高温下的蠕变行为^[36]。B-P 方程没有明确的屈服面,可再现载荷增加时从弹性到塑性的平稳过渡;因此,也被用于模拟某些聚合物和固体推进剂等非金属材料的机械响应^[37-39]。敬仕明^[40]研究了 TATB 基 PBX 单组份力学性能,采用 3 种经典细观模型对其有效弹性模量、体积模量、剪切模量进行计算;建立了适用于不同应变率下的损伤演化方程;考虑应变率效应,建立一个准静态加载下考虑损伤演化的非线性本构方程。Palmer 等^[41]在对 HMX 单晶进行压缩时发现,压力增加时单晶中出现孪晶带;由于缺陷的影响,孪晶变形受到抑制,晶体发生断裂,表明 HMX 炸药晶体能承受一定的塑性变形,表现出“微塑性”;压力升高即表现出晶体的脆性特征。Burnside 等^[42]对颗粒进行的压实实验发现,压力越高,晶体粒径同压制前变化越大,破碎越严重。为更好地理解 PBX 在复杂应力状态下的力学行为和损伤演化,文献^[27]提出了一个结合 ViscoSCRAM 和 B-P 粘塑性的本构模型,以表征 PBX 受压时的粘弹性、粘塑性和基于微裂纹的损伤行为。文献^[43]在微裂纹演化方程中引入压力相关拉伸损伤的生长速率因子,能描述准脆性固体的张压不对称特征,从而捕捉 PBX 9502 穿孔板的拉伸裂纹和扩散剪切为主的材料损伤。

FEM 计算速度快,能够在接近于工程的宏观尺度上对材料性质进行研究,可以考虑热、力等多种因素的影响,但不能有效地考虑材料微观结构的性

质,对大变形问题容易网格畸变导致不收敛、网格重划分困难。为此,又发展了“无网格法”等方法。

1.2 其他模拟方法

无网格法的基本思想是将连续体离散为质点单元,所有信息都由这些质点来表达,以避免有限元方法网格重新划分的难题。唐红等^[44]应用物质点法(material point method, MPM)模拟了细观尺度下 HMX 基 PBX 压制成型过程的力学行为。MPM 是一种兼具拉格朗日描述和欧拉描述特点的粒子型数值方法,本质上属于无网格方法。分析了 HMX 基 PBX 压制成型过程中的颗粒变形、颗粒间的应力传递以及温度变化等细观力学行为。首先用圆形近似,建立了炸药颗粒随机分布的细观力学模型;然后基于物质点法对 HMX 基 PBX 炸药压制过程中力学行为进行数值模拟。计算时采用弹塑性材料模型和 Grüneisen 状态方程描述 HMX 颗粒。重点分析了压制过程中炸药晶体颗粒变形、内部应力场和温度场的变化。葛丝雨^[45]建立了一种微观-细观连续计算的多尺度模型,采用逐层级多尺度的方法,对高聚物粘结炸药(PBX)等复合材料的力学性能进行了研究(图 5 和 6)。首先在微观尺度采用分子动力学方法计算颗粒材料和聚合物材料的性质参数,通过实验验证其准确性,并作为微观到细观尺度的关键传递参数;在细观尺度建立复合材料的代表性体积元模型,采用 MPM 计算复合材料的力学性能。

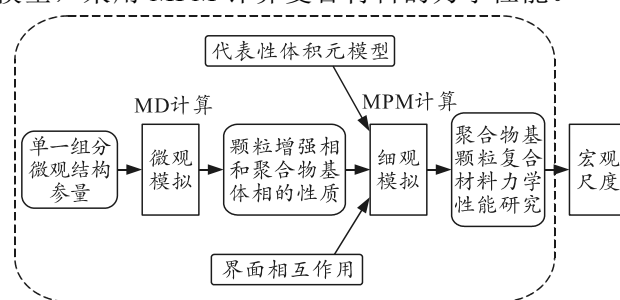


图 5 微观-细观逐层级多尺度模型框架^[45]

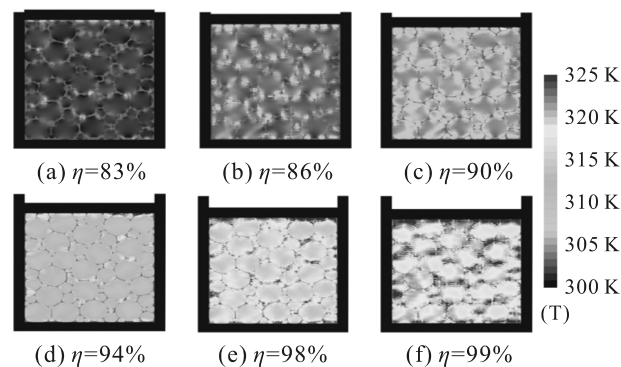


图 6 PBX 压缩过程中温度随不同填充率 η 的分布^[45]

数值流形方法 (numerical manifold method, NMM) 采用 2 套独立覆盖系统和截断不连续覆盖函数, 适合于模拟材料不连续力学行为。武鑫^[46]研究了 PBX 基体和颗粒基体界面的材料本构模型, 对 PBX 细观力学行为特征进行了 NMM 模拟。PBX 细观结构模型采用手动描绘和随机方法建立; 分析了单轴拉伸和压缩下相近体积分数 PBX 细观模型的破坏过程, 但未用于压制成型分析。Kang 等^[47]采用 NMM 模拟了 PBX 的细观力学行为, 在 NMM 模型中引入了三参数的双线性内聚接触关系 (bilinear cohesive contact relationship, BCCR) 模型来描述颗粒-粘结剂界面。

2 基于离散元法的 PBX 模压数值模拟

离散元法 (discrete element method, DEM) 源于超静定分析方法以及分子动力学, 研究对象是非连续的散粒体。DEM 是一种拉格朗日方法, 计算时把散粒体物质分离成许多众多离散元素的集合, 动态松弛法迭代求解各元素的运动方程, 通过牛顿第二定律得到应力和应变^[48-50]。DEM 没有变形协调条件的要求, 可模拟不连续的载荷传递路线, 特别适用于从细观/介观层面模拟颗粒材料内部的力学作用等问题, 更有利于从本质上揭示不连续介质的微观行为和机理。

DEM 所生成的“单元”可模拟炸药颗粒在压制过程中的力学行为, 因而在 PBX 相关研究中得到了关注。傅华等^[51]采用 DEM 模拟了 PBX 的动态巴西试验, 颗粒与基体均采用 ZWT 粘弹性模型, PBX 非均匀细观结构的损伤演化、裂纹形成过程与实验基本一致。戴斌^[52]采用 DEM 软件 PFC 对炸药颗粒压制过程进行了 2 维数值模拟。炸药颗粒采用圆形, 材料物理特性选择接触-刚度模型; 假设颗粒间为点接触且可以相对滑动, 加载过程中颗粒无破碎。得到了不同压力作用下 TATB 造型颗粒的内部接触力和位移矢量的分析结果 (图 7)。张远舸^[53]基于 BPM 粘结模型对单个炸药颗粒和 PBX 药柱整体进行 DEM 建模, 得到了压制过程的变形、力链、接触和破裂等信息 (图 8)。发现强度、弹性模量、加载速度和颗粒数等对模拟结果都有显著影响。

PBX 作为非均质颗粒复合材料, 内部颗粒形态各异、粒径分布广且呈无规则排列 (图 9(a))^[54], 如何构建符合实际的晶体模型存在较大难度。于继东^[55]利用 Voronoi 拼图建立了可近似反映炸药实际细观结构的 2 维离散元几何模型。另外一些研究使

用了数字图像处理技术进行建模, 如 Scott 等^[56]运用断面 X 射线照相技术, 在不同角度下对 PBX 药柱进行一系列拍照取样, 通过图像处理重构出 PBX 的 3 维模型 (图 9(b)), 进而分析了不同 HMX 含量和形貌对 PBX 体积模量和剪切模量的影响。

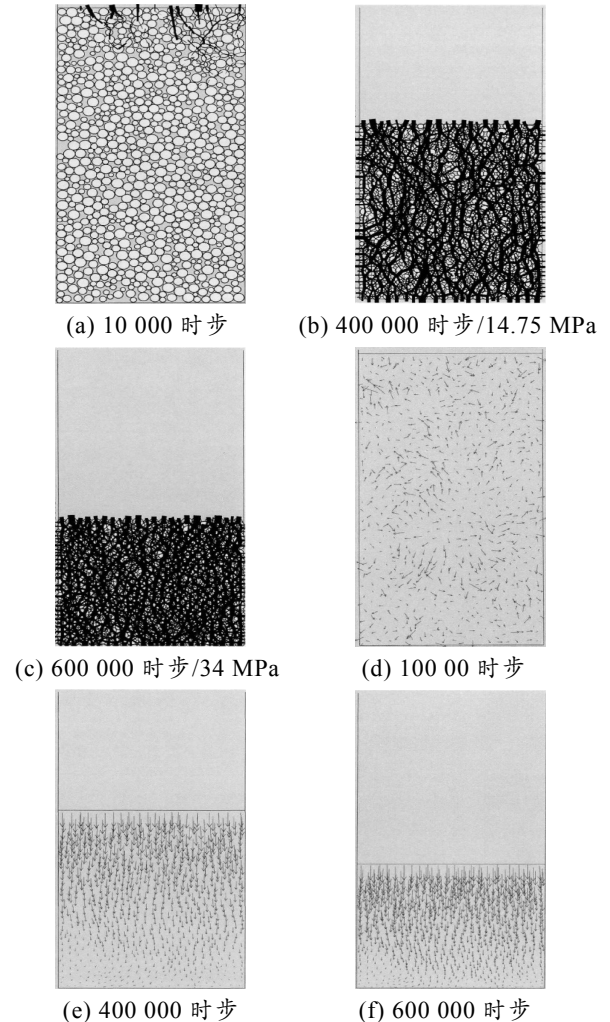


图 7 压制过程颗粒力链与位移的 DEM 模拟结果^[52]

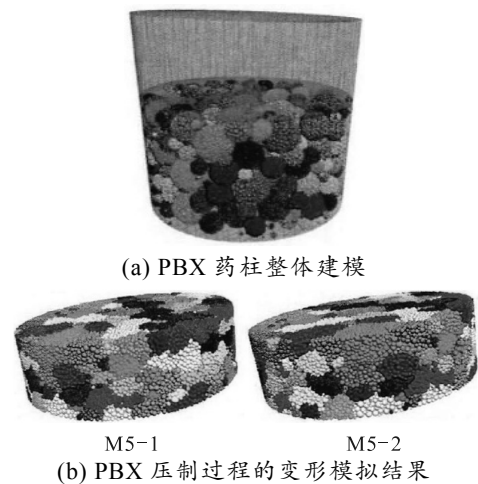
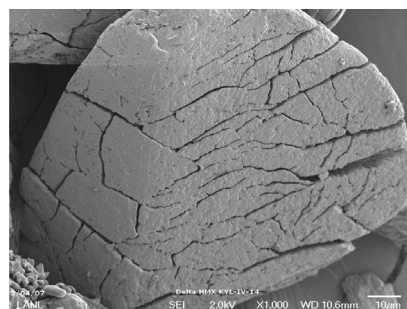
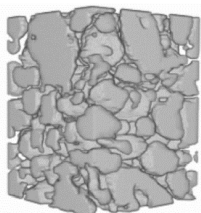


图 8 基于 BPM 模型对 PBX 建模^[53]



(a) 单个 HMX 破裂晶体的扫描电镜^[54]



(b) PBX 药柱的 CT^[56]

图 9 PBX 炸药颗粒形态及其 CT 扫描

PBX 压制成型时，脆性晶体在受力条件下会产生损伤与破裂，而周围包覆的粘结剂在高温下呈现特殊的流变性。如何建立合理的接触模型，以及正确处理晶体损伤与破裂，无论对于 PBX 压制成型还是应用性能的分析都是关键问题^[57]。由于 DEM 将材料表示为相互作用的独立元素的组合，因此 PBX 可以近似为由不同的内聚力或胶结效应模型结合在一起的离散元素（颗粒）的组合^[58]。

文献[59-60]利用 X 射线计算机断层扫描(μ CT)和扫描电镜(SEM)技术，获得并重建了真实的 PBX 晶体形状，结合 DEM 建立了复合粒子的 3 维离散元模型，并以键的生成来模拟颗粒的粘结，以键的断裂来模拟颗粒的破碎(图 10)。

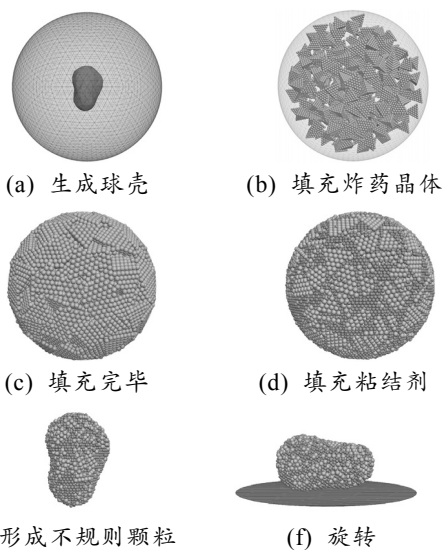


图 10 基于真实形状与非均质微结构生成的造型粉颗粒 DEM 模型^[59]

在此基础上，Wang 等^[60]研究了粘结剂涂层对聚合物-晶体复合颗粒断裂细观力学的影响，分析了复合材料颗粒在冷成型过程中微裂纹的扩展和力链的分布规律(图 11 和 12)。

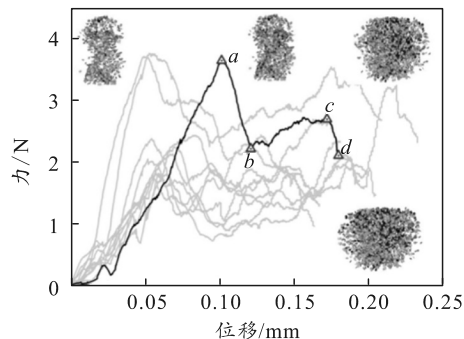


图 11 单个球形颗粒破碎试验的力-位移曲线与不同微裂纹的分布^[60]

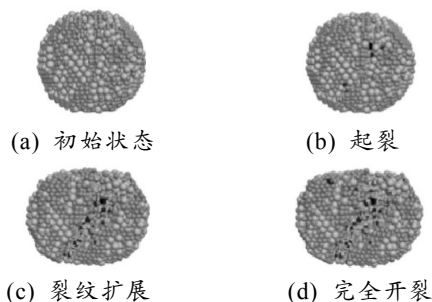
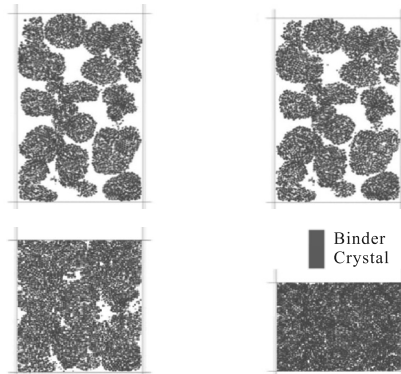


图 12 单个球形颗粒破碎试验的加载过程的颗粒状态^[60]

Guo 等^[61]采用类似建模方法，在 PFC3D 软件中建立了单轴压缩下 PBX 造型粉的 3 维离散单元模型，分析了 PBX 压实过的接触力和裂纹数。考虑到 HMX 晶体是脆性的，而粘结剂是延展性的，分别采用平行键模型和接触键模型对晶体和粘结剂进行建模(图 13)。采用传统的线性模型来确定不同晶体之间以及加载板与颗粒之间的相互作用机制。模拟结果与实验接近，即含有较小 HMX 晶体的 PBX 成型粉的内力在挤压过程中更容易达到均匀状态。考虑到 PFC3D 的计算能力，颗粒的数量设置为 50 个。另外，整个模型的处理过程十分繁琐。



(a) 不同应变下(010)面的变形试样

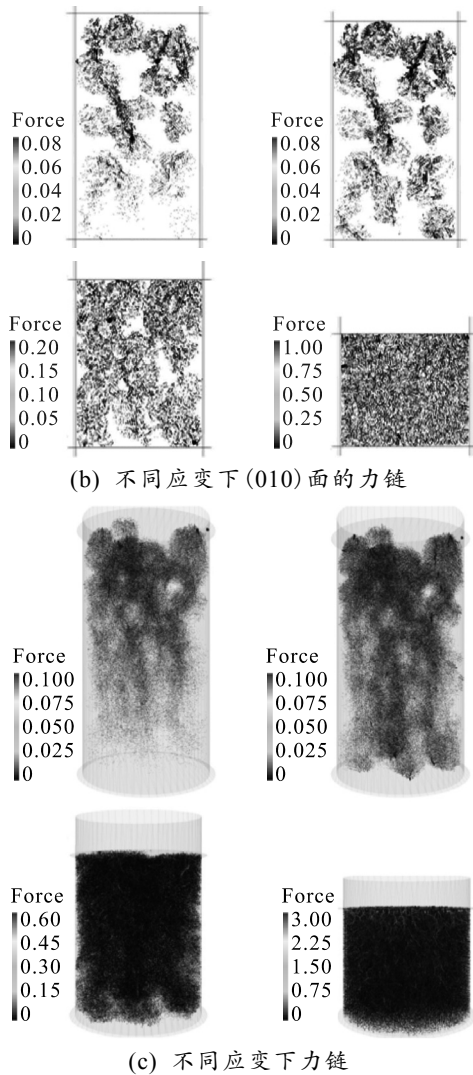


图 13 不同应变下的 S-PBX-L 试样^[61]

总体上, DEM 为研究 PBX 模压致密过程与颗粒间孔隙、晶体破碎、裂纹扩展和接触力等密切相关的各种细观力学行为提供了一种可行的方法。

3 PBX 模压数值模拟存在问题与解决思路

PBX 作为颗粒填充度高(颗粒含量大于 80%)的聚合物-晶体复合材料,具有十分复杂的微(细)观结构和力学特性。炸药颗粒的粒径分布广(1~1 000 μm),颗粒与粘结剂性能差别大(弹性模量相差 3~4 个数量级)^[62]。另外,由于模压成型通常在热态下进行,粘结剂在高温下具有率(速度)相关等流变特性;因此, PBX 模压过程分析需要考虑炸药晶体的物性、形态与分布状态以及粘结剂的物理特性。目前,对 PBX 药柱复合材料成品在各种机械载荷乃至热-力耦合条件下的性能以及损伤演化等研究较多,但针对 PBX 压制成型过程的研究较少。笔者认为,当前 PBX 模压数值模拟存在的难点与解决思路包

括(但不限于):

1) PBX 材料的物性测试与表征。

PBX 作为聚合物-晶体的复合材料,模压过程存在晶体颗粒、粘结剂以及结合界面的交互作用,力学行为十分复杂,涉及许多难题。例如,单个晶体颗粒可认为是脆性材料。与韧性材料相比,脆性材料常常因变形量小而“均匀效应”很弱,局部微缺陷对整体断裂的作用明显,缺陷分布的随机性也给分析带来挑战。此外,颗粒形态千差万别,高温下还具有率相关的粘弹性、粘塑性等特性。传统力学性能试验方法并不完全适用炸药晶体的介观物性测试。包覆在离散晶体颗粒上的薄层粘结剂材料也具有粘弹、塑性与粘流态等行为。PBX 作为非均匀多组分复合结构,模压过程中不仅具有非连续介质的静水应力效应、体积压实等典型特征,还存在热-力耦合条件下晶体-聚合物接触界面的复杂作用,与温度、速度、几何形状以及边界条件等多个因素相关。

2) 数值计算方法。

现有 FEM、DEM 等主流数值模拟方法在分析 PBX 模压问题时有着各自的优、缺点。对于 FEM,基于连续介质力学的宏观唯象类本构难以揭示材料细观结构与宏观响应的内在关系。由于本构关系不明确, FEM 在揭示 PBX 非均质性引起的局部损伤和失效机制方面存在较大局限^[19, 50]。此外, FEM 很难实现含能复合粒子的运动和晶体破碎分析。DEM 虽然对于模拟离散介质具有先天优势,但目前主要适用于分析低压状态疏松颗粒的流动,难以考虑炸药晶体颗粒的“微塑性”变形与损伤、破裂等,处理复杂边界接触条件的理论尚不完善。此外,计算时间随颗粒数量成级数增加。

粘结剂对 PBX 压制过程影响很大,为得到可靠的分析结果,需要在 FEM 以及 DEM 模拟中考虑颗粒边界粘结剂流变特性的作用;但 PBX 晶体颗粒上包覆薄层粘结剂的特殊结构,导致 FEM 的网格划分、物性赋予以及基于颗粒建模的 DEM 处理均存在困难。针对 PBX 这类颗粒复合材料,需要在现有理论上,开发合适的模压过程热-力耦合变形与失效模拟方法。一些研究采用了将 FEM 与 DEM 结合的“多粒子有限元法”等^[63-65]。

3) 非均质离散颗粒介质的“个性”与“共性”。

针对单个炸药晶体颗粒测试得到的几何与物性数据仅代表个例。由于炸药晶体在尺度、形态结构以及性能等方面的差异,细观尺度的试验结果将不

具有“可重复性”;但离散介质有着其“共性”的特点和内在规律。正如对个体而言,“世界上没有 2 片相同的树叶”,但从整体上讲人们又可以根据一片具体树叶判断其种类。这要从统计学的角度进行思考。事实上, SCRAM 模型就具有类似的做法。为保证分析结果具有统计学意义,需要足够的样本数量,同时还需要在与分析效率之间建立平衡。

4) PBX 损伤包括晶体本身存在的孔洞、裂纹等初始缺陷和压制与服役过程引入的损伤。

数值模拟可以更好地了解 PBX 损伤产生的本质和规律,预测损伤的产生并尽量减少损伤。需要深入探讨不同炸药晶体在热-力作用下的微(细)观结构演化,梳理压力、温度、晶体品质和粘结体系对 PBX 模压过程宏观性能与晶体损伤的影响,并建立有效的损伤表征和演化模型。

4 结束语

PBX 模压成型是一个影响因素众多的复杂动态过程。数值模拟可克服物理实验的限制,得到 PBX 在热-力耦合作用下的流动变形、密度分布、晶体损伤等重要信息。由于问题的复杂性,当前以 FEM 为代表的基于连续介质假设的数值方法,以及以 DEM 为代表的基于微粒学观点的非连续介质模型离实践需求仍有较大距离,有必要针对 PBX 离散、脆性等材料特性并引入统计等理论工具,在物性测试与表征、数值方法等方面开展广泛而深入的研究。

参考文献:

- [1] 李敬明,温茂萍,黄毅民. 热循环对 TATB 基高聚物粘结炸药性能的影响研究[J]. 含能材料, 2005, 13(4): 208-210.
- [2] 孙业斌,惠君明,曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 255.
- [3] RAE P J, PALMER S J P, GOLDREIN H T, et al. Quasi-static studies of the deformation and failure of PBX 9501[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2002, 458(2025): 2227-2242.
- [4] BAILLOU F, DARTYGE J M, PYCKERELLE C S, et al. Influence of Crystal Defects on Sensitivity of Explosives[C]. Tenth Symposium (International) on Detonation. Boston, 1993: 816-823.
- [5] THOMPSON D G, OLINGER B, DELUCA R. The Effect of Pressing Parameters on the Mechanical Properties of Plastic Bonded Explosives[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2005, 30(6): 391-396.
- [6] 孙建. 等静压炸药装药技术发展与应用[J]. 含能材料, 2012, 20(5): 638-642.
- [7] TIMOKHOVA M I. Quasi-Isostatic Pressing Technique for Powdered Materials[J]. Refractories and Industrial Ceramics, 2003, 44(6): 364-366.
- [8] DAI B, LAN L G, ZHANG W B, et al. Study on the State of Internal Stress and Strain of TATB-based Polymer Bonded Explosive Using Strain Markers and Cone-Beam Computed Tomography[J]. Cent. Eur. J. Energ. Mat., 2017, 14(3): 688-707.
- [9] 温茂萍,李明,李敬明. 等静压、模压 JOB-9003 炸药件力学性能各向同性[C]//中国工程物理研究院科技年报(2005). 北京: 原子能出版社, 2005: 466-467.
- [10] 梁华琼,雍炼,唐常良,等. 压制过程中 PBX 炸药颗粒的破碎及损伤[J]. 火炸药学报, 2010, 33(1): 27-30.
- [11] 屈可朋,陈鹏,李亮亮,等. 含能装药损伤研究进展[J]. 飞航导弹, 2018(11): 92-96.
- [12] 庞海燕,李明,温茂萍,等. 温度对 PBX 炸药压制的作用[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(1): 21-23.
- [13] 刘佳辉,刘世俊,黄明,等. 压制 PBX 中炸药晶体损伤的研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(3): 372-378.
- [14] FIELD J E, PARRY M A, PALMER S J P, et al. Deformation and explosive properties of HMX powders and polymer bonded explosives[C]//Morat W J. Proceedings of the 9th International Symposium. Portland, OR: Office of Naval Research, 1989: 886-896.
- [15] BORNE L. Explosive crystal microstructure and shock-sensitivity of cast formulations[C]//The Eleventh International Detonation Symposium. Snowmass; Los Alamos National Lab, 1998: 331-343.
- [16] SKIDMORE C B, PHILLIPS D S, HOWE P M, et al. The evolution of microstructural changes in pressed HMX explosives[J]. Eleventh International Detonation Symposium, 1998: 556-564.
- [17] 曹雷. 含能材料损伤本构模型的数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [18] 刘超,石艺娜,梁仙红. 冲击作用下非均质炸药热点形成的离散元方法[J]. 计算物理, 2014, 31(5): 523-530.
- [19] HOU Y F, XU J S, ZHOU C S, et al. Microstructural simulations of debonding, nucleation, and crack propagation in an HMX-MDB propellant[J]. Materials & Design, 2021: 109854.
- [20] 张欣,王文庆,武锦涛,等. 颗粒流动模型研究进展[J]. 中国粉体技术, 2007, 13(6): 36-40.
- [21] MAMALIS A G, VOTTEA I N, MANOLAKOS D E. Fabrication of metal/sheathed high-Tc superconducting composites by explosive compaction/cladding: Numerical simulation[J]. Materials Science & Engineering B, 2002, 90(3): 254-260.
- [22] KHOEI A R, SHAMLOO A, AZAMI A R. Extended finite element method in plasticity forming of powder compaction with contact friction[J]. International Journal of Solids & Structures, 2006, 43(18-19): 5421-5448.

- [23] 张涛, 赵北君, 朱世富, 等. PBX 粉末成形的数值模拟研究[J]. 材料工程, 2009(5): 68-72.
- [24] 曹兴, 赵捍东, 曹红松, 等. 炸药粉末压制工艺参数对药柱质量的影响[J]. 火炸药学报, 2021, 44(1): 72-77.
- [25] 刘群, 陈朗, 鲁建英, 等. 炸药颗粒压制成型数值模拟[J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 421-426.
- [26] 岳晓媛, 张会锁, 黄鸿鑫, 等. 压药工艺参数对成型药柱质量的影响研究[J]. 兵工自动化, 2021, 40(1): 84-87, 96.
- [27] LIU M, HUANG X C, WU Y Q, et al. Numerical simulations of the damage evolution for plastic-bonded explosives subjected to complex stress states[J]. Mechanics of Materials, 2019, 139(C): 13179.
- [28] LE V D, GRATTON M, CALIEZ M, et al. Experimental mechanical characterization of plastic-bonded explosives[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(21): 5802-5813.
- [29] CALIEZ M, GRATTON M, FRACHON A, et al. Viscoelastic plastic model and experimental validation for a granular energetic material[J]. International Journal of Energetic Materials & Chemical Propulsion, 2014, 13(4): 339-371.
- [30] 黄西成, 李尚昆, 魏强, 等. 基于 XFEM 与 Cohesive 模型分析 PBX 裂纹产生与扩展[J]. 含能材料, 2017, 25(8): 694-700.
- [31] 魏强, 黄西成, 陈刚, 等. 高聚物粘结炸药动态损伤破坏的数值刻画[J]. 兵工学报, 2019, 40(7): 1381-1389.
- [32] 王鹏飞. 基于 Drucker-Prager 准则的 PBX 准静态变形与破坏研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2015.
- [33] RAGASWAMY P, LEWIS M W, CHENG L, et al. Modeling the mechanical response of PBX 9501[C]//Proc. 14th Int. Detonation Symp. Coeur d'Alene. Idaho, USA, 2010: 11-16.
- [34] BUECHLER M A, LUSCHER D J. A semi - implicit integration scheme for a combined viscoelastic - damage model of plastic bonded explosives[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2014, 99(1): 54-78.
- [35] GRATTON M, GONTIER C, ALLAH S R F, et al. Mechanical characterisation of a viscoplastic material sensitive to hydrostatic pressure[J]. European Journal of Mechanics, 2009, 28(5): 935-947.
- [36] BONDER S R. Constitutive equations for elastic-viscoplastic strain-hardening materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 1975, 42(2): 385-389.
- [37] FRANK G J, BROCKMAN R A. A viscoelastic-viscoplastic constitutive model for glassy polymers[J]. International Journal of Solids & Structures, 2001, 38(30-31): 5149-5164.
- [38] ZAIRI F, NAIT-ABDELAZIZ M, GLOAGUEN J M, et al. Modelling of the elasto-viscoplastic damage behaviour of glassy polymers[J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(6): 945-965.
- [39] PYRZ M, ZALEWSKI R. Modelling of the Viscoplastic Behaviour of Homogeneous Solid Propellants[J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2015, 12(1): 159-174.
- [40] 敬仕明. PBX 有效力学性能及本构关系研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2009.
- [41] PALMER S J P, FIELD J E, HUNTLEY J M. Deformation, Strengths and Strains to Failure of Polymer Bonded Explosives[J]. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, 1993, 440(1909): 399-419.
- [42] BURNSIDE N J, SON S F, ASAY B W, et al. Particle characterization of pressed granular HMX[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 1998.
- [43] LIU C, THOMPSON D G. Crack Initiation and Growth in PBX 9502 High Explosive Subject to Compression[J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 2014, 81(10): 101004.
- [44] 唐红, 周俊辉, 吕珂臻, 等. PBX 压制过程中细观力学行为的二维数值模拟[J]. 含能材料, 2016, 24(7): 651-656.
- [45] 葛丝雨. 高聚物基颗粒复合材料力学性能的微观细观多尺度模拟[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.
- [46] 武鑫. 高聚物粘结炸药 (PBX) 的细观力学行为模拟研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- [47] KANG G, CHEN P W, GUO X, et al. Simulations of meso-scale deformation and damage of polymer bonded explosives by the numerical manifold method[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2018, 96: 123-137.
- [48] 温彤, COCKS A C F. 粉末材料压制过程的 DEM 分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(7): 1-4.
- [49] YU M, YANG B Y, CHI Y, et al. Experimental study and DEM modeling of bolted composite lap joints subjected to tension[J]. Compos. B Eng., 2020, 190: 107951.
- [50] LIU M, HUANG X C, WU Y Q, et al. Modeling of the deformation and damage of plastic-bonded explosive in consideration of pressure and strain rate effects[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 146: 103722.
- [51] 傅华, 李俊玲, 谭多望. PBX 炸药动态 Brazilian 试验及数值模拟研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(2): 148-154.
- [52] 戴斌. 模压过程 TATB 造型颗粒结构演变与应力响应研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2015.
- [53] 张远舫. PBX 造型粉的致密化行为与密度演化规律研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2018.
- [54] PARKER G R, HEATWOLE E M, HOLMES M D, et al. Deflagration-to-detonation transition in hot HMX and HMX-based polymer-bonded explosives[J]. Combustion and Flame, 2020, 215: 295-308.

- [55] 于继东. 炸药冲击响应的二维细观离散元模拟[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2007.
- [56] SCOTT G, BARDENHAGEN. Microstructure effects on PBX mechanical response[J]. High Explosives and Organic Materials, 2007: 40-41.
- [57] 傅华, 李克武, 李涛, 等. 非均质结构 PBX 炸药的动态压缩过程模拟[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(1): 17-23.
- [58] SADRMANESH V, CHEN Y. Simulation of tensile behavior of plant fibers using the Discrete Element Method (DEM)[J]. Composite Part A, 2018, 114: 196-203.
- [59] HU G Y, ZHOU B, FU R, et al. Discrete element modeling of the compression molding of polymer-crystal composite particles[J]. Powder Technology, 2021, 390: 112-125.
- [60] WANG H B, LI J M, HU G Y, et al. Effect of Binder Coatings on the Fracture Behavior of

Polymer-Crystal Composite Particles Using the Discrete Element Method[J]. Coatings, 2021, 11(9): 1075.

- [61] GUO Y C, LIU R, CHEN P W, et al. Mechanical behavior of PBX with different HMX crystal size during die pressing: Experimental study and DEM simulation[J]. Composites science and technology, 2022, 222(3): 109378.1-109378.10.
- [62] 王竟成. 高聚物粘结炸药力学性能的细观预测方法[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2018.
- [63] 孙龙, 焦明华, 尹延国, 等. 粉末颗粒压制变形的细观模拟分析[J]. 锻压技术, 2013, 38(5): 169-173.
- [64] FRENNING G. An efficient finite/discrete element procedure for simulating compression of 3D particle assemblies[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2008, 197(49-50): 4266-4272.
- [65] 郭岩岩, 历长云, 冀国良, 等. 粉末致密化过程数值模拟研究现状[J]. 材料导报, 2022, 36(18): 1-7.

(上接第 42 页)

参考文献:

- [1] 王晓峰. 燃烧、爆炸品危险性分级方法和判据[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2017.
- [2] 杨家福. 火药、炸药、弹药、引信及火工品生产安全技术管理规程[S]. 北京: 中国工期工业总公

司, 1994.

- [3] 王凯民. 火工品工程-系统设计与试验验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [4] 钱仲. 火工品试验方法. 电火工品静电感度试验[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1990.
- [5] 王魁全. 火工品试验方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2004.

(上接第 46 页)

4 结束语

Web 服务软件已在国防建设与国民生活等领域得到广泛应用。为提高 Web 服务软件的可靠性, 需要进行软件测试以提高软件产品质量。由于 Web 服务软件具有层级接口众多与操作重复性多等特点, 采用手动方式进行软件测试不仅周期长、效率低, 且较难覆盖所有需求点。为解决上述问题, 笔者基于自动化测试框架, 提出一种 Web 服务软件自动化测试技术的具体实现方法, 并以综合安全监管系统软件作为测试对象进行应用研究。首先基于软件需求规格说明等技术文档, 对被测软件进行测试需求分析与策划, 然后利用 Web 服务自动化测试技术进行综合安全监管系统软件的自动化测试。结果表明: 采用自动测试框架的 Web 测试技术。能够提高软件测试效率并增强软件测试充分性。

参考文献:

- [1] 侯俊, 周红, 马春燕, 等. 面向 WEB 服务的测试用例

自动化生成方法[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(1): 149-155.

- [2] 丁志军, 周泽霞. Web 服务组合测试综述[J]. 软件学报, 2018, 29(2): 299-319.
- [3] 杨利利, 李必信. Web 服务测试问题综述[J]. 计算机科学, 2008, 35(9): 258-265.
- [4] 朱建华. 基于 Spring 的 Web 自动化测试平台设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [5] 胡铮. 软件自动化测试工具实用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 6-11.
- [6] 樊付星, 黄大庆, 周末. 基于 Web 的自动化测试框架的研究与实现[J]. 电子设计工程, 2012, 20(20): 36-38.
- [7] SAMER H, MALCOLM M. An approach for specification-based test case generation for web services[C]//IEEE/ACS International Conference Computer Systems and Applications. Washington: 2007: 16-23.
- [8] 姜瑛, 辛国茂, 单锦辉, 等. 一种 Web 服务的测试数据自动生成方法[J]. 计算机学报, 2005, 28(4): 568-576.
- [9] 罗作民, 朱燕, 程明. Web 服务测试工具 SOAPUI 及其分析[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(5): 155-158.