

文章编号: 1006-9941(2013)06-0812-06

浇注 PBX 力学性能的研究进展

唐明峰^{1,2}, 李明², 蓝林钢²

(1. 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 从材料特性、力学行为特征、本构模型和实验手段四个方面详细论述了浇注高聚物粘结炸药(PBX)力学性能的研究进展, 指出动态力学测试及材料本构是目前研究浇注 PBX 的热点和难点。认为可以通过借鉴粘弹性模型、橡胶超弹性模型及推进剂模型建立浇注 PBX 的本构模型, 并指出需要结合浇注 PBX 含能敏感、软材料和大变形特性来选择和改进现有的测试技术。对力学性能预测、动态实验技术及数值模拟等方面需要开展的工作提出了一些看法。

关键词: 固体力学; 浇注高聚物粘结炸药(PBX); 力学性能; 本构模型

中图分类号: TJ55; O34

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.024

1 引言

高聚物粘结炸药(PBX)是军用混合炸药的重要组成部分。近年来, 军事战略转向局部战争和精确打击, 这对攻击机场跑道、地面加固目标、地下设施等硬目标的高速侵彻战斗部提出了更高的要求, 浇注类炸药装药以优异的抗过载力学特性在侵彻战斗部中得到广泛应用。浇注 PBX 在此类力学环境中的安全性越来越受到重视, 其力学性能特别是力学响应已成为含能材料研究的热点。

浇注 PBX 的发展始于 20 世纪 60 年代, 其威力大、安全性高、抗过载能力强, 从 20 世纪 80 年代起, 很多国家对各种侵彻弹药基本上都采用浇注 PBX 来替代早期的三硝基甲苯(TNT)或 H6、Tritonal 炸药^[1]。浇注 PBX 的一个显著特点是惰性添加剂的含量非常高, 具有其他炸药没有的弹塑性体力学性能^[2], 受力后可以产生较大的变形, 在高速碰撞过程中能将一部分撞击能量消耗和储存在粘结剂中, 使配方中主炸药颗粒所承受的外界作用力大大降低, 从而使这类炸药有较强的抗过载能力。但是, 浇注 PBX 用于侵彻战斗部时, 服役环境非常复杂, 在侵彻过程中高速冲击下, 炸药自身的力学响应

会影响其侵彻安定性和起爆可靠性, 对弹药的整体性能产生重要影响。虽然, PBX 力学性能的相关研究已有很多, 但对于浇注 PBX, 相关理论研究还处于起步阶段, 实验方面还比较零散; 而在本构模型上, 力学工作者和材料学工作者并没有很好的从物理本质上建立相应模型, 导致现有本构模型误差较大。为此, 本文从材料特性、力学行为特征、本构模型和实验方法四个方面对浇注 PBX 的研究现状进行了归纳和总结, 并进行了讨论。

2 浇注 PBX 的材料特性

浇注 PBX 主要由单质炸药、高聚物粘结剂和增塑剂等组成, 是颗粒和聚合物的复合材料, 其微观结构与普通颗粒填充的聚合物复合材料类似, 主要区别在于浇注 PBX 中炸药颗粒是主体。浇注 PBX 种类很多, 应用广泛, 比较典型的有美国的 PBXN、PBXW 系列和法国的 B 系列^[3], 表 1 给出了几种典型浇注 PBX 的配方^[4]。从表 1 配方组分上看, 浇注 PBX 的主体炸药与压装 PBX 一样, 多为黑索今(RDX)和奥克托今(HMX)等, 二者的主要区别在于粘结剂组分含量不同。一般压装 PBX 中炸药/粘结剂配比在 95:5 左右, 粘结剂含量不超过 10%(质量分数)^[5]; 浇注 PBX 中高聚物粘结剂的含量几乎均在 10%以上, 如 PBXN-110 中粘结剂组分为 12%, PBXW-123 中甚至达到了 25%^[4]。在成型方法上, 浇注 PBX 经浇注工艺而成型, 目前国内主要采用“捏合-真空浇注-固化”的制备工艺, 经原材料准备与配制、物料混合、真空浇注、加热固化成型四个步骤制成^[6], 即主体炸药颗粒通过粘结剂等添加

收稿日期: 2013-01-23; 修回日期: 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助(10832003, 113722927); 中国工程物理研究院发展基金(2013A02006)

作者简介: 唐明峰(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事炸药等高分子材料的力学性能研究。e-mail: myfengtong@sina.com

通讯联系人: 李明(1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事固体力学, 晶体力学研究。e-mail: li_ming@caep.ac.cn

物包覆后在一定的温度下浇注固化成型。值得指出的是,由于含有大量的惰性粘结剂,炸药在分子间化学交链的作用下固化成型,不仅降低了其对破片、子弹及火焰等多种刺激的敏感性,还赋予了浇注 PBX 非常优异的力学性能。同时,浇注 PBX 属于软材料的范畴,具有低模量和橡胶态物理特性两大特点^[7-8]。

表 1 典型浇注 PBX 的配方

Table 1 composition of some typical cast PBXs

| PBX | composition/% | | | | | | |
|----------|---------------------------|------|------|------------------|---------|-------------|----------|
| | explosive/inert component | | | | binder | | |
| | HMX | RDX | Al | AP ¹⁾ | polymer | plasticizer | additive |
| PBXN-105 | - | 7.00 | 25.8 | 49.8 | 3.13 | 12.9 | 1.35 |
| PBXW-109 | - | 64.0 | 20.0 | - | 7.35 | 7.35 | 1.30 |
| PBXN-110 | 88.0 | - | - | - | 5.37 | 5.37 | 1.27 |
| PBXW-114 | 78.0 | - | 10.0 | - | 5.37 | 5.37 | 1.27 |
| PBXW-123 | - | - | 30.2 | 44.8 | 4.20 | 18.8 | 2.00 |

Note: 1) AP-ammonium perchlorate

3 浇注 PBX 的力学行为特征

自 1947 年第一个 PBX 生产以来,美国等一些发达国家开展了一系列 PBX 力学性能的研究,国内也已建立了基于材料试验机测量 PBX 的拉伸强度、压缩强度、弹性模量、泊松比、蠕变性能等的标准实验方法^[9-11]。这些方法主要针对压装 PBX,而浇注 PBX 则部分借鉴了这些方法。由于材料结构特征和成型工艺特点的影响,浇注 PBX 的力学性能不仅取决于单质炸药及聚合物,还明显依赖于组分含量、实验条件等因素,表现出与其它一些材料不同的力学行为特征。

浇注 PBX 具有软材料特征和大变形能力。由于含有大量的高聚物粘结剂并采用浇注工艺制备而成,浇注 PBX 更多体现出粘结剂的粘弹性而非炸药晶体的弹脆性,在宏观上,表现为低强度、低模量及较大的临界应变。Antic 等^[12]对不同含量 HMX 的浇注 PBX 进行了拉伸实验,实验结果表明常温下(20 °C)浇注 PBX 的拉伸强度仅为零点几兆帕,弹性模量仅有几兆帕,与文献[4]的结果一致。表 2 为压装 PBX 和浇注 PBX 在准静态测试下的拉伸力学性能对比^[4,13]。由表 2 可见,与压装 PBX 相比,浇注 PBX 的拉伸强度和弹性模量均降低了一个量级,同时其临界应变接近 10%,变形能力明显增强。细观上,实验发现浇注 PBX 破坏时可能并不会出现炸药颗粒明显扭曲、破碎等微观破坏现象^[14],文献[15]虽然观察到了炸药晶体的“削平”与破碎,同时也发现高分子粘结剂的撕裂

以及炸药颗粒与粘结剂的脱离更为明显。这种不同与压装 PBX 的破坏机理,一方面能抑制浇注 PBX 中“热点”的形成,同时有利于炸药整体产生较大的变形。

表 2 压装 PBX 和浇注 PBX 的力学性能对比^[4,13]

Table 2 Comparison of the mechanical properties of a cast PBX and a compressed PBX

| explosive | T /°C | σ_m /MPa | ε_r /% | E /MPa |
|-----------------------------|-------|-----------------|--------------------|--------|
| pressed PBX ^[13] | 23 | 3.66 | 0.335 | 16.4 |
| (95% HMX/5% binder) | 6.12 | 50 | 2.04 | 0.467 |
| cast PBX ^[4] | 25 | 0.131 | 9.25 | 1.42 |
| (70% HMX/10% Al/20% binder) | 1.58 | 50 | 0.132 | 8.36 |

Note: σ_m is compressive strength; ε_r is failure strain; E is elastic modulus.

炸药颗粒的成分和尺寸对浇注 PBX 的力学性能也有显著影响。Palmer 等^[16]的研究表明,在同样的组分含量下,细晶粒的 PBX 比粗、细晶粒混合 PBX 的拉伸强度大。Walley 等^[17]通过实验同样发现,炸药颗粒越细,压缩强度越大,两者之间成线性关系。Balzer 等^[18]对某浇注型 PBX 的研究也发现了类似的规律。同时,主体炸药中加入聚合物的目的之一就是改善炸药装药的力学性能,所以聚合物本身的力学行为特征也必然会影响到浇注 PBX 的力学行为。浇注 PBX 与压装 PBX 最大的不同,就在于浇注 PBX 中高聚物(粘结剂、添加剂等)的含量较高,高聚物的力学行为特征使 PBX 能够产生较大的变形。虽然目前并无足够的实验数据对添加剂带来的影响进行系统说明,但从复合材料力学的角度来讲,这是一个必然的结果。美国科学家在研制 PBXN 系列的过程中,开发了多种力学性能优异的高聚物添加剂并尝试了不同的组分配比^[4],就是为了获得最好的综合力学性能。

对温度和应变率的敏感性是浇注 PBX 力学响应的另一特点。Michel 等^[19]在 -50 ~ 60 °C 对浇注端羟基聚丁二烯(HTPB)PBX 进行了准静态拉伸实验(5, 50, 500 mm · s⁻¹),发现其力学行为与应变率高度相关。针对浇注 PBXN-110, Blumenthal 等^[20]获得了其压缩性能与温度和应变率的关系曲线,在室温条件下(23 °C),压缩速率从 12.7 mm · min⁻¹增加到 127 mm · min⁻¹时,弹性模量从 9.21 MPa 增加到 10.3 MPa,压缩强度从 0.745 MPa 增加到 0.987 MPa,临界应变从 17.4% 增加到 18.4%;当温度从 50 °C 下降到 -15 °C 时,弹性模量从 7.29 MPa 增加到 11.4 MPa(12.7 mm · min⁻¹),而压缩强度和临界应变变化很小,名义屈服应力具有明显的温度效应。文献[21]对浇注型 PBXN-110 和

PBXW-128 的准静态实验显示(图 1), PBXN-110 的力学行为主要为非线性粘弹性, 卸载时基本是线性卸载; PNWX-128 同时呈现非线性粘弹性和粘塑性, 其卸载也是非线性的; 二者在被动围压加载下(10%应变时达到 80 MPa)的应力-应变关系具有明显的分段行为。以上结果表明, 浇注 PBX 与压装 PBX 一样^[11], 其拉伸/压缩强度、弹性模量随温度的降低和加载速率的增加而增加, 具有温度和应变率效应, 同时还表现出了压装 PBX 不具有的粘弹性行为。

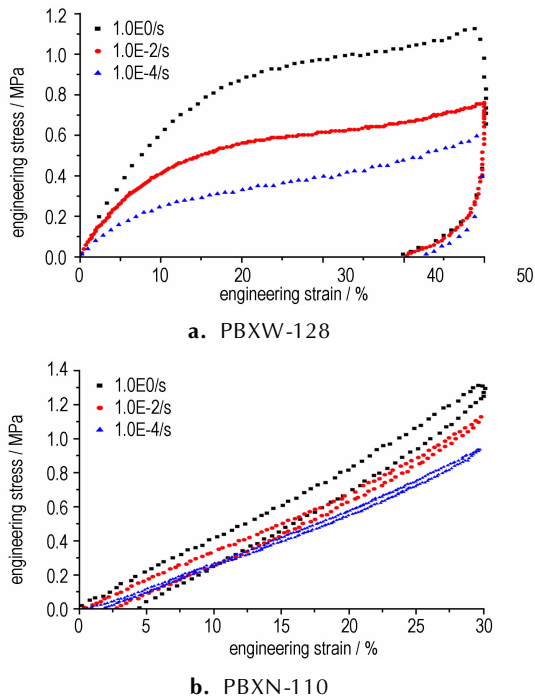


图 1 PBXW-128 及 PBXN-110 的加、卸载曲线^[21]

Fig.1 Loading and unloading curves of PBXW-128 and PBXN-110^[21]

浇注 PBX 的动态力学性能是一个值得特别关注的问题。Michel 等^[19]的实验结果表明, 浇注 PBX 在动态巴西实验(15 m·s⁻¹)及 Taylor 杆实验(48 m·s⁻¹)中呈现强烈非线性及典型的粘弹性。Balzer 等^[18]利用 SHPB 技术对某浇注型 PBX 进行了动态实验, 获得了不同温度和应变率下的应力-应变曲线, 并发现该型 PBX 的动态屈服强度与炸药颗粒尺寸和温度有关。Vasant 等^[22]对 PBXW-128 和 PBXN-110 进行了高应变率力学响应的测试, 在 1000/s 以上加载条件下, 观察到两种材料断裂之前均具有类似于双线性的应力-应变曲线。张子敏等^[15,23]利用 SHPB 技术对 PBXN-110 浇注传爆药(88% HMX, 12% 粘结剂)进行了冲击加载研究, 在 1770, 2100, 3500, 4000/s 应变率下, PBX 试样被压缩成饼状, 没有发生粉碎性破坏, 并且也

发现该型浇注 PBX 呈现典型的粘弹性。

上述数据表明, 即使配方相同的浇注 PBX, 动态加载下可能也会经历不同的变形-屈服-破坏-粉碎-压实阶段, 导致其力学行为较大的区别, 为实验研究带来很大的困难。此外, 对 PBX 成型件(如炸药装药)来说, 其力学行为还与应力状态^[16]、载荷作用方式、物理及化学老化^[24]等因素有关。就目前总的研究状况而言, 相关的动态测试实验与静态实验量相比略显不足, 同时由于缺乏不同种类 PBX 比较系统的实验^[25], 已有的数据还难以准确、全面地描述浇注 PBX 的力学行为特征。

4 本构模型

从浇注 PBX 材料表现出的粘弹性/粘塑性和橡胶态特性, 结合力学响应大变形的特点, 已有文献报道主要从以下几个方面建立适用于浇注 PBX 的本构关系。

4.1 粘弹性理论模型

根据高分子理论, 材料的本构关系可以表示为线性粘弹性和非线性弹性的组合^[26]。线性粘弹性可以用力学模型来表示和描述, 通常由弹性元件和粘性元件以不同的方式组合而成, 包括 Maxwell 模型、广义 Maxwell 模型、Kelvin 模型和广义 Kelvin 模型等^[27]。Michel 等^[19]仅从粘弹性出发, 设计了一种包含 5 个 Maxwell 单元的粘弹性模型, 其数值形式为:

$$S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^n + (S_{jk}\omega_{kj}^{n+1/2} + S_{jk}\omega_{ki}^{n+1/2})\Delta t^{n+1/2} + S_{ij}^{n+1/2}\Delta t^{n+1/2} \quad (1)$$

式中, S_{ij} (Pa)、 ω_{ij} (Pa) 分别为应力偏张量和旋转张量, n 为单元号, Δt (s) 为时间增量。通过 Taylor 实验和数值模拟发现, 该模型在加载起始段能得出比较精确的结果, 但是随着加载的进行, 非线性效应显现, 出现较大偏差。目前, 国内对粘弹性炸药本构模型的建立, 主要基于“朱-王-唐”(ZWT)非线性粘弹性本构模型^[28]:

$$\sigma = E_0 + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (2)$$

式中, σ (MPa) 表示名义应力, E_0 (MPa)、 α (MPa)、 β (MPa) 为弹性常数, E_1 (MPa)、 E_2 (MPa) 为线弹性模量, θ_1 (s)、 θ_2 (s) 为松弛时间, ε 为名义应变。“朱-王-唐”模型由 2 个 Maxwell 体(粘弹性项)和一个非线性弹性体(应力平衡项)组成, 两个 Maxwell 体分别描述高频、低频下的粘弹性响应。根据文献^[23]的结果, ZWT 模型对炸药应力-应变曲线线性段的描述较好, 而在屈服点附近误差开始增大。这些研究表明, 粘弹性本构模型直接用于浇注 PBX 在一定范围内是合理的, 但

要获得更精确的结果需要对现有模型进行修正和改进。

4.2 橡胶类超弹性本构模型的借鉴

迄今为止,文献上基本没有浇注 PBX 本构模型报道,而鉴于浇注 PBX 的另一个特点是橡胶态物理特性,从工程应用的角度来说,可以借鉴橡胶超弹性本构模型来描述浇注 PBX 的大变形力学行为。橡胶材料有限变形本构模型包含统计力学模型和连续介质力学模型(基于变形不变量、基于伸长率)两种^[29],以应变能密度函数表达为主。ANSYS/LS-DYNA 数据库中即引入了常用的 Mooney-Rivlin 模型、Neo-Hookean 模型、Yeoh 模型及多项式模型等^[30]。此类模型有较广的应变适用范围,可能适用于浇注 PBX 炸药准静态加载下的力学描述,其缺点是没有考虑到粘性效应,在应变率增大时有较大的误差。一个可行的方案是,采用分段式的本构方程,小变形时用已有的唯象型本构模型描述,在大变形阶段采用上述橡胶超弹本构模型,同时,需要引入应变率相关项,以解决大应变时的应变率效应。

4.3 推进剂本构模型的借鉴

固体推进剂与浇注 PBX 均为颗粒填充复合材料,二者在配方上比较接近,且同属于软材料的范畴,在宏观力学性能上有相似之处。固体推进剂的建模思路对浇注 PBX 本构方程的建立具有指导意义。固体推进剂本构主要考虑非线性粘弹性/弹塑性,具体有两个方向。一是基于复合材料力学,利用基体材料的本构模型,用颗粒增强系数 β 经过换算得到推进剂整体的材料本构,如单轴应力下有简单关系^[31]: $\sigma(\varepsilon) = \beta\sigma^m(\varepsilon)$, 其中指标 m 代表基体。二是直接从材料整体出发建立方程^[32-33]。对于浇注 PBX,两种方法均有借鉴意义。比如对 HTPB 基浇注 PBX,考虑到组分的相似,HTPB 复合固体推进剂的本构模型就可以尝试直接使用或修正后适用。值得指出的是,一部分针对固体推进剂提出的本构模型非常复杂,浇注 PBX 借鉴时,需要精心设计实验以得到准确的模型参数。

4.4 混合模型

基于浇注 PBX 力学性质的复杂性,同时考虑到单一模型的局限,可以结合以上几种模型的思路来描述浇注 PBX 的本构行为,比如用超弹性模型表示粘弹模型的非线性弹性项,最简单的形式即为线性叠加。Bo Song 等^[34]用此方法成功描述了橡胶材料的单轴冲击压缩和拉伸时的本构行为:

$$\sigma = D_0(\lambda^2 - 1/\lambda) + f_1(\varepsilon)(\lambda - 1/\lambda^2) + f_2(\varepsilon)(1 - \exp(\varepsilon/\varepsilon_r)) \quad (3)$$

式中,前两项为超弹模型,第三项表示粘弹性, f_1 (MPa)、 f_2 (MPa) 分别表征大应变和小应变时的应

变率效应, λ 是伸长率, D_0 (MPa)、 ε_r 均为材料常数。目前,国内这方面也已有用于橡胶材料的相关实验报道^[35]。此外,一部分学者研究多孔材料的压缩行为时,将压缩应力分解为弹性模量和一个与应变有关的形状函数的乘积^[36],对于工程应用非常方便且能描述变形全过程,虽然物理含义并不明确,但形式简单,使其具有适用于浇注 PBX 的可能性。

5 大变形测试的实验技术

通常,材料的力学性能测试离不开拉伸实验和压缩实验。目前实现的手段包括材料试验机、间接拉伸实验、Taylor 杆、落锤、Hopkinson 杆、气炮等,涵盖了 $10^{-9} \sim 10^7$ /s 的应变率测试范围^[37],可以实现从蠕变到高速冲击响应的各类实验。这些方法各有优点,需要根据实验设计具体选择。

材料试验机最初主要用于准静态下的力学性能测试。近年来,随着电液伺服材料试验机的发展和完善,其测试能力已扩展到 10^3 /s^[37],可以运用到浇注 PBX 的动、静态力学性能测试中。同时,加载速率的增大,使其具有了与其它动态测试结果对比的能力。由于浇注 PBX 压缩强度较低,辅助夹具难以夹持,且制备标准的哑铃形试件比较困难,故一般对其进行压缩实验。为了获得拉伸数据,可以采用间接拉伸实验(也称巴西实验、直径圆盘实验)。间接拉伸实验的优点是简单易行、试样制作简单,且圆盘面易于进行表面处理,因而有利于各种高精度光学测量方法的实施,例如采用数字散斑相关方法,可精确实现对材料拉伸破坏过程中全场变形及微区域变形的测量^[38],不仅能获得其拉伸力学性能,还可以通过观测细观变形研究其破坏机理。

PBX 的动态力学性能测试主要是应用分离式 Hopkinson 压杆技术。目前面临的首要任务是对传统的 SHPB 技术进行改进,使之适用于浇注 PBX 的动态实验。首先,浇注 PBX 的波速很低,导致试件内部的应力不均匀性十分突出,而应力均匀性正是 SHPB 实验的前提之一。为此,可以采用波形整形技术^[39],利用合金铜、橡胶等材料组成的整形器对入射波整形,延长加载时间,使试件在破坏前达到应力平衡,同时实现常应变率加载。为了进一步提高测试精度,还可以对传统数据处理方法进行调整,如有研究者^[40]提出考虑应力不均匀性的解耦法等。其次,由于浇注 PBX 的波阻抗 ρC 很小,进入透射杆中的应力波信号十分微弱,导致常规的电阻应变片无法进行记录。一个可行的解决办法是采用高精度的半导体应变片和石英晶体薄膜压力传感器提高透

射波信号的信噪比^[41]。另外,可以改进实验装置,如采用粘弹性杆^[42]、空心杆^[43]等提高透射波信号的强度。

材料性能通过实验获得,反过来也为实验技术提供指导。对浇注 PBX 来说,如何选择、改进现有实验手段必须依据其含能敏感、软材料及大变形等特点,同时这也是发展新研究方法的理论基础。

6 展 望

作者认为以下几个方面是浇注 PBX 今后研究的热点或重点探索方向:

理论上,进一步开展对浇注 PBX 中单质炸药材料力学性能的研究,从颗粒接触效应和界面作用的角度研究二者对 PBX 力学性能的影响;从颗粒高度填充复合材料的角度,建立浇注 PBX 的细观复合材料力学模型,探讨其在浇注 PBX 力学性能预测上的应用;从工程应用的角度,进一步加强对浇注 PBX 材料粘弹性、大变形方面的探索,发展便于工程运用的唯象本构模型。

实验方面,从方法上发展新的动态测试技术并对现有技术进行改进(如分离式 Hopkinson 杆),使之适合于研究浇注 PBX 力学行为;加强浇注 PBX 在动态加载、复杂应力条件及大变形下的实验研究;完善散斑、云纹等光学方法在实验全场应变测试特别是动态测试时的相关技术,同时加强对浇注 PBX 在载荷作用下的细观结构变化进行实时显微观察;从实验上获得已有浇注 PBX 产品在不同温度、应变率下系统的实验数据,建立浇注 PBX 系统力学性能数据库。

同时,需要从材料学的角度对浇注 PBX 进行细观结构的数值模拟,发展有限元、离散元及有限差分等方法在浇注 PBX 力学性能预测上的应用,为进一步的实验研究提供新思路。

参考文献:

- [1] Hoffman D M, Hawkins T W. Clean, agile alternative binders, additives and plasticizers for propellant and explosive formulations [R]. Lawrence Livermore National Lab, CA (United States), 1994.
- [2] Vadhe P P, Pawar R B, Sinha R K, et al. Cast aluminized explosives (Review) [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2008, 44 (4): 461-477.
- [3] Spycykerelle C, Freche A, Eck G. Ageing of reduced sensitivity RDX and compositions based on reduced sensitivity RDX, an update [J]. *Insensitive Munitions & Energetic Materials*, 2006, 1:1-11.
- [4] Gordana A, Vesna D. Characteristics of cast PBX with aluminum [J]. *Scientific Technical Review*, 2006, 56(3-4): 52-58.
- [5] 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.
- [6] Carl M A, Jack M P. Cook-off studies on the general purpose cast explosives PBXC-116 and PBXC-117 [R]. Naval Weapons Center China Lake CA, 1976.
- [7] 黄辉, 董海山. 一类对撞击不敏感的新型炸药[J]. 含能材料, 2002, 10(2): 74-77.
HUANG Hui, DONG Hai-shan. Studies on new explosives insensitive to impact [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2002, 10(2): 74-77.
- [8] 常双君, 赵芦奎, 杨雪芹, 等. PBX 浇注炸药撞击感度的影响因素研究[J]. 火工品, 2010(3): 44-46.
CHANG Shuang-jun, ZHAO Lu-kui, YANG Xue-qin, et al. Study on influence factors of impact sensitivity of PBX cast explosive [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(3): 44-46.
- [9] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及其相关物性[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. Performance of high explosives and correlates[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [10] 马丽莲. 高能炸药拉伸应力-应变曲线测定方法的研究[J]. 含能材料, 1993, 1(3): 28-35.
Ma Li-lian. Measurement of tensile strain-stress curve of energetic explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1993, 1(3): 28-35.
- [11] HAO Ying, LI Jing-ming. Dynamic mechanical properties of the plastic bonded explosive during aging process [C]//Theory and Practice of Energetic Material. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology, 1999:178-185.
- [12] Gordana A, Vesna R, Zoran B. Influence of content and dispersion of octogene and oxidizer on the mechanical properties of cast aluminized PBX [J]. *Scientific Technical Review*, 2008, 7(2): 51-59.
- [13] Thompson D G, Idar D J, Gray III G T, et al. Quasi-static and dynamic mechanical properties of new and virtually-aged PBX 9501 composites as a function of temperature and strain rate [C]//Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. Arlington, VA: the Office of Naval Research, 2002: 363-368.
- [14] 李媛媛, 高立龙, 李巍, 等. 抗过载炸药装药侵入安全性试验研究 [J]. 含能材料, 2010, 18(6): 702-705.
LI Yuan-yuan, GAO Li-long, LI Wei, et al. Experimental researches on security of insensitive explosive charge during penetration [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(6): 702-705.
- [15] 张子敏, 仲凯, 许碧英, 等. 浇注型 PBX 炸药的动态力学性能研究 [J]. 火工品, 2010(6): 30-33.
ZHANG Zi-min, ZHONG Kai, XU Bi-ying, et al. Study on dynamic mechanic performance of cast PBX explosive [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(6): 30-33.
- [16] Palmer S J, Field J E, Huntley J M. Deformation, strengths and strains to failure of polymer bonded explosives [J]. *Proceedings of the Royal Society of London (Series A: Mathematical and Physical Sciences)*, 1993, 440: 399-419.
- [17] Walley S M, Siviour C R, Drodge D R, et al. High-rate mechanical properties of energetic materials [J]. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 2010, 62(1): 31-34.
- [18] Balzer J E, Siviour C R, Walley S M, et al. Behavior of ammonium perchlorate-based propellants and a polymer-bonded explosive under impact loading [J]. *The Royal Society*, 2004, 460: 781-806.
- [19] Michel Q, Patrick R, Philippe C. Constitutive models for PBX at high strain rate [C]//Michael D F, Lalit C C, Robert S H. AIP Conference Proceedings. Snowbird, Utah: American Institute of Physics, 2000: 687-690.
- [20] Blumenthal W R, Thompson D G, Cady C M, et al. Compressive properties of PBXN-110 and its HTPB-based binder as a function of temperature and strain rate [C]//Proceedings of the 12th Inter-

- national Detonation Symposium. Washington, DC: Office of Naval Research, 2002; 530–549.
- [21] Ozgen U C. Mechanical behavior PBXW-128 and PBXN-110 under uniaxial and multiaxial compression at different strain rates and temperatures [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2004, 8: 55–65.
- [22] Vasant S J, Richard J L. Resolving mechanical response of plastic bonded explosives at high strain-rate using Split Hopkinson Pressure Bar [C] // Michael D F, Naresh N T, Yasuyuki H. AIP Conference Proceedings. Atlanta, Georgia: American Institute of Physics, 2002; 701–704.
- [23] 张子敏, 许碧英, 贾建新, 等. 基于 Hopkinson 杆技术分析典型传爆药的动态力学性能[J]. 含能材料, 2012, 20(1): 62–66. ZHANG Zi-min, XU Bi-ying, JIA Jian-xin, et al. Analysis on dynamic properties of typical boosters based on Hopkinson bars [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2012, 20(1): 62–66.
- [24] Campbell M S, Garcia D, Idar D. Effects of temperature and pressure on the glass transitions of plastic bonded explosives [J]. *Thermochimica Acta*, 2000, 357: 89–95.
- [25] David J F, Gary W L, Paul D P, et al. Measurement of the stress/strain response of energetic materials as a function of strain rate and temperature: PBX9501 and Mock 9501 [C] // Schmidt S C, Tao W C. AIP Conference Proceedings. Seattle, Washington: American Institute of Physics, 1996, 370: 145–148.
- [26] Tschoegi, Nicholas W. The phenomenological theory of linear viscoelastic behavior: an introduction [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- [27] Christensen R M. 粘弹性力学引论 [M]. 郝松林, 老亮, 译. 北京: 科学出版社, 1990.
- [28] 王礼立, 施绍裘, 陈江瑛, 等. ZWT 非线性热粘弹性本构关系的研究与应用 [J]. 宁波大学学报(理工版), 2000, 12(13): 141–149. WANG Li-li, SHI Shao-qiu, JIANG Ying, et al. Research and application of a nonlinear viscoelastic constitutive model (ZWT model) [J]. *Journal of Ningbo University (NSEE)*, 2000, 12(13): 141–149.
- [29] Mary C B, Ellen M A. Constitutive models of rubber elasticity: A review [J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2000, 73(3): 504–523.
- [30] ANSYS® Mechanical APDL, Release 12.0, Help System, Hyperelastic Material Models [CP]. ANSYS, Inc.
- [31] 彭威, 周建平, 任均国. 复合固体推进剂非线性粘弹性本构方程的微观力学分析 [J]. 固体火箭技术, 1999, 22(4): 23–26. PENG Wei, ZHOU Jian-ping, REN Jun-guo. Micromechanics analysis on nonlinear viscoelastic constitutive model for composite solid propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1999, 22(4): 23–26.
- [32] Robert Z, Mariusz P, Tomasz W. Modeling of solid propellants viscoplastic behavior using evolutionary algorithms [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2010, 7(4): 289–300.
- [33] Renganathan K, Rao B N, Jana M K. Failure assessment on a strip biaxial tension specimen for a HTPB-based propellant material [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 1999, 24(6): 349–352.
- [34] Song B, Chen W N, Ming C. Novel model of uniaxial strain rate dependent stress-strain behavior of ethylene-propylene-diene monomer rubber in compression or tension [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, 92(3): 1553–1558.
- [35] 王宝珍, 胡时胜, 周相荣. 不同温度下橡胶的动态力学性能及本构模型研究 [J]. 实验力学, 2007, 22(1): 1–6. WANG Bao-zhen, HU Shi-zheng, ZHOU Xiang-rong. Research of dynamic mechanical behavior and constitutive model of rubber under different temperatures [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(1): 1–6.
- [36] Sherwood J A, Frost C C. Constitutive modeling and simulation of energy absorbing polyurethane foam [J]. *Polymer English Science*, 1992, 32(16): 1138–1146.
- [37] 余同希, 邱信明. 冲击动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [38] 周忠彬, 陈鹏万, 黄风雷. PBX 材料宏观断裂行为的数字散斑相关法实验研究 [J]. 高压物理学报, 2011, 25(1): 1–7. ZHOU Zhong-bin, CHEN Peng-wan, HUANG Feng-lei. An experimental study on the micro/macro fracture behavior of PBX using digital speckle correlation method [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(1): 1–7.
- [39] Song B, Chen W. Split Hopkinson bar techniques for characterizing soft materials [J]. *Latin American Journal of Solids and Structure*, 2005, 2(2): 113–152.
- [40] 宋博, 宋力, 胡时胜. SHPB 实验数据处理的解耦方法 [J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(2): 167–171. SONG Bo, SONG Li, HU Shi-sheng. Coupling solved method of SHPB experimental data processing [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998, 18(2): 167–171.
- [41] Chen W, Lu F, Zhou B. A quartz crystal embedded split Hopkinson bar for soft materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40: 1–6.
- [42] Bacon C. An experimental method for considering dispersion and attenuation in a viscoelastic Hopkinson bar [J]. *Experimental Mechanics*, 1998, 38: 242–249.
- [43] Chen W, Zhang B, Forrestal M J. A split Hopkinson bar technique for low-impedance materials [J]. *Experimental Mechanics*, 1999, 39: 81–85.

Review on the Mechanical Properties of Cast PBXs

TANG Ming-feng, LI Ming, LAN Lin-gang

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Properties of cast PBXs are reviewed including mechanical behaviors, material characteristics, experimental techniques and constitutive models. Some hot-spots and difficulties such as dynamical mechanical properties analysis and constitutive models are summerized. The establishment of the models of cast PBXs may refer to Visco-elastic models, hyper-elastic models and the constitutive model of solid properlants. Characteristics of energetic sensitivity, soft material and large deformation are suggested to improve the experimental methods. The directions for future research are also forecasted, such as estimation of mechanical properties, dynamic testing methods and numerical simulation.

Key words: solid mechanics; cast PBXs; mechanical properties; mechanical behavior

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.024