

文章编号:1006-9941(2024)10-1091-08

## HMX基高聚物粘结炸药界面增强的粒径效应

刘佳辉<sup>1,2</sup>,曾诚成<sup>1,2</sup>,郑胜军<sup>2</sup>,庞海燕<sup>1</sup>,杨志剑<sup>1</sup>,聂福德<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院研究生院, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 为研究炸药晶体粒径对高聚物粘结炸药(PBX)力学性能及界面增强效果的影响规律,以4种不同粒径HMX(160  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ 和150 nm)为主体炸药,氟树脂为粘结剂,中性聚合物键合剂为界面增强剂,制备了8种HMX基PBX。采用压缩应力应变试验、巴西试验分别获得8种PBX在常温(20  $^{\circ}\text{C}$ )和高温下(60  $^{\circ}\text{C}$ )的压缩和拉伸力学性能,采用动态热机械分析仪的三点弯曲模式获得储能模量和力学损耗因子,采用扫描电镜对PBX断面进行表征。结果表明,PBX的压缩强度和拉伸强度随HMX粒径的减小而增大,纳米HMX在力学增强方面具有很好的效果。20  $^{\circ}\text{C}$ 以纳米HMX为基的PBX-nano压缩强度和拉伸强度可分别达到61.3 MPa和5.7 MPa,较以160  $\mu\text{m}$  HMX为基的PBX-L可分别提高73.1%和63.5%。添加中性聚合物键合剂后,不同粒径的HMX基PBX压缩力学强度和拉伸力学强度均得到提高,纳米HMX的增强效应尤其显著,PBX-nano-M在20  $^{\circ}\text{C}$ 和60  $^{\circ}\text{C}$ 下的拉伸强度分别可达10.4 MPa和5.8 MPa,较PBX-nano可分别提高82.6%和101.4%。当HMX平均粒径从百微米减小至百纳米,炸药件发生界面脱粘/损伤乃至断裂所需的断裂功越大,拉伸力学强度提升幅度越大。

**关键词:** 高聚物粘结炸药(PBX);界面;粒径;力学性能

**中图分类号:** TJ55;O64

**文献标志码:** A

**DOI:**10.11943/CJEM2024013

## 0 引言

高聚物粘结炸药(PBX)是由高聚物粘结剂体系和单质炸药晶体颗粒组成的高固含量的聚合物复合材料。环四亚甲基四硝胺(HMX)基PBX因其优异的能量输出性能,在武器装药和推进剂中得到广泛应用。但是界面脱粘、力学性能薄弱一直是HMX基PBX的共性问题<sup>[1-3]</sup>。影响PBX力学性能的主要因素包括炸药晶体自身力学性能、粘结剂力学性能、炸药晶体特性以及表界面特性等<sup>[4-7]</sup>。考虑到能量的需求,往往需要对PBX中的主体炸药种类及粘结剂体系进行选择固化,从而力学性能的调控重点集中在颗粒特性及颗粒表界面改性上<sup>[8-10]</sup>。

在颗粒特性对HMX基PBX力学性能影响方面,

研究人员对HMX粒度对PBX力学性能的影响开展了较多的研究。例如,Liu等<sup>[11]</sup>对纳米HMX(中值粒径( $d_{50}$ )为60 nm)和微米HMX( $d_{50}$ 为120  $\mu\text{m}$ )的PBX压缩强度进行对比,纳米HMX基PBX的抗压强度可提高273%,这主要得益于纳米HMX具有更大的比表面积更易与粘结剂进行粘附,以及纳米HMX具有更少的裂纹和孔洞等缺陷。戎园波等<sup>[12]</sup>将纳米HMX应用于TNT/HMX熔铸炸药中,借助纳米HMX填补粗颗粒填料间的空隙、放缓颗粒的自然沉降效果,可减少药柱内部微观缺陷,从而使其抗压及抗拉强度分别提高200%和128%。李宇翔等<sup>[13-14]</sup>对比3种HMX(粒径为100~300 nm,1~2  $\mu\text{m}$ ,10~20  $\mu\text{m}$ )基PBX的压缩力学性能,同样发现压缩强度随HMX粒径的减小而显著增大。为了更深入地研究粒径分布对抗压强度和弹性模量的影响,Herman等<sup>[15]</sup>以5-碘-2'-脱氧尿苷(IDOX)为HMX的模拟材料开展了系列粒径分布对性能的影响研究,结果表明使用粗颗粒的配方力学强度仅为细颗粒配方的一半,颗粒级配更易于压制过程中颗粒的位移与填充。基于粒度与力学性能影响规律的研究可支撑基于粒度级配的PBX设计。例如,美国洛

收稿日期:2024-01-09;修回日期:2024-07-15

网络出版日期:2024-07-24

基金项目:国家自然科学基金(12102404)

作者简介:刘佳辉(1987-),男,高级工程师,主要从事混合炸药设计与应用研究。e-mail:huihui@163.com

通信联系人:聂福德(1969-),男,研究员,主要从事含能材料设计与应用研究。e-mail:niefude@caep.cn

引用本文:刘佳辉,曾诚成,郑胜军,等.HMX基高聚物粘结炸药界面增强的粒径效应[J].含能材料,2024,32(10):1091-1098.

LIU Jia-hui, ZENG Cheng-cheng, ZHENG Sheng-jun, et al. Effect of Particle Size on Interface Enhancement of HMX-based Polymer Bonded Explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(10):1091-1098.

斯阿拉莫斯国家实验室研制的PBX 9501配方为获得更优的力学强度,采取了较宽粒径分布的HMX作为主体炸药,粗颗粒HMX和细颗粒HMX质量比为3:1<sup>[16-19]</sup>。在炸药颗粒表面改性方面,近年来发展了聚多巴胺包覆改性、中性聚合物键合剂包覆改性及类淀粉样蛋白质包覆改性等技术,在力学强度增强方面展现出较为显著的效果<sup>[20-25]</sup>。这些研究成果基于在炸药晶体与粘结剂间构筑一层具有氢键作用的功能分子层,可加强晶体与粘结剂间的界面粘附强度,从而提高强度。然而,在考虑界面增强时,并未对影响界面粘附强度的另一重要因素——颗粒粒径进行系统研究与分析。

综上,针对PBX力学性能的研究多见于对粒径与界面改性的单独探讨,鲜见将HMX炸药粒径与界面增强两因素相耦合,系统开展在不同温度下炸药压缩力学性能、拉伸力学性能的变化规律研究。而关注这个问题,不仅对于认识炸药的力学行为具有重要意义,对于HMX基PBX协同优化设计和综合性能提升具有实际意义。因此,本研究选用纳米到百微米的4种不同平均粒径的HMX为研究对象,以氟树脂为粘结剂,中性聚合物键合剂为界面增强剂,通过压缩应力应变试验、巴西试验、动态力学试验等开展粒径及界面增强耦合作用下的HMX基炸药力学行为研究,获得HMX基炸药界面增强的粒径效应规律,可为炸药力学性能的优化设计提供清晰的设计思路。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料与仪器

原材料:LD-HMX为高品质大颗粒HMX,F-HMX为高品质细颗粒HMX,自制;nano-HMX,南京理工大学粉体中心;氟聚物F2314,中昊晨光化工研究院有限公司;中性聚合物键合剂,由丙烯腈和丙烯酸羟乙酯等单体组成,黎明化工研究设计院有限公司;乙酸乙酯、乙酸丁酯、丙酮,分析纯,成都市科隆化学品有限公司;纯水,自制。

仪器:ZEISS场发射扫描电镜(SEM),Sigma 300,德国卡尔蔡司公司;激光粒度仪,Coulter LS-230,美国贝克曼库尔特;动态热机械分析仪(DMA),Netasch DMA242C,德国耐驰;材料试验机,INSTRON 5582,美国英斯特朗。

### 1.2 样品制备

为对HMX进行粒径分级,采用水筛法对LD-HMX进行筛分,使用80目和120目筛网获得的HMX标记为

L-HMX;使用180目和500目筛网获得的HMX标记为M-HMX。以L-HMX、M-HMX、和nano-HMX为主体炸药,以F2314为粘结剂,主体炸药与F2314质量比为95/5,采用水悬浮法制备HMX基PBX造型粉,得到的PBX分别命名为PBX-L、PBX-M、PBX-F和PBX-nano。在PBX-L、PBX-M、PBX-F和PBX-nano混合炸药的基础上均添加键合剂,所得配方分别命名为PBX-L-M、PBX-M-M、PBX-F-M和PBX-nano-M。制备前,F2314使用乙酸乙酯和乙酸丁酯的混合溶剂溶解,键合剂使用丙酮溶剂溶解。

采用预热模压的方式进行 $\Phi 20$  mm $\times$ 6mm、 $\Phi 20$  mm $\times$ 20mm和30 mm $\times$ 10 mm $\times$ 2 mm药柱压制。具体步骤为:根据所需药柱尺寸,称取一定质量炸药造型粉,采用120 °C预热1 h,再在模压机上进行压制。直径为 $\Phi 20$  mm药柱压制条件为:100 kN,保压5 min,复压2次。30 mm $\times$ 10 mm $\times$ 2 mm药片压制条件为:120 kN,保压5 min,复压2次。药柱压制的实际密度达到理论密度的98%。

### 1.3 表征与性能测试

采用激光粒度仪测试HMX平均粒径和粒径分布,纯水为分散溶液,并超声分散1 min。采用SEM表征HMX颗粒形貌,电压5 kV。采用DMA的三点弯曲模式对炸药试样件的动态储能模量和力学损耗因子进行表征,试样件尺寸为30 mm $\times$ 10 mm $\times$ 2 mm,加载力为1 N,振动频率为50 Hz,温度区间为0 °C至120 °C,升温速率为1 °C $\cdot$ min<sup>-1</sup>。采用材料试验机测试炸药试样件的拉伸力学性能(采用巴西圆盘实验作为间接拉伸加载手段)和压缩力学性能(压缩应力应变实验)进行测试<sup>[26-27]</sup>,试样件尺寸分别为 $\Phi 20$  mm $\times$ 6 mm和 $\Phi 20$  mm $\times$ 20 mm,测试温度分别为20 °C和60 °C。巴西圆盘和压缩试验时材料试验机的加载速率为5 mm $\cdot$ min<sup>-1</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 HMX粒径对PBX力学性能的影响

4种颗粒状态的HMX外貌如图1所示,粒径分布曲线如图2所示。L-HMX、M-HMX和F-HMX表面平整,nano-HMX颗粒团聚形成微米级颗粒。从图1可以看出,L-HMX、M-HMX和F-HMX颗粒分明,表面平整,缺陷较少(图1a~c),nano-HMX颗粒有团聚,团聚体上的HMX颗粒粒径约为150 nm(图1d)。从图2的粒径分布曲线可以看出,L-HMX、M-HMX和F-HMX的平均粒径分别为160,60  $\mu$ m和25  $\mu$ m,nano-HMX

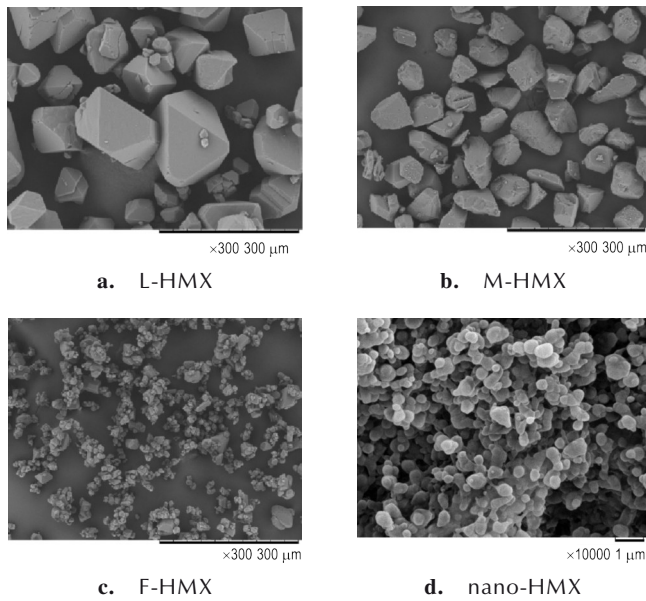


图1 不同颗粒大小的HMX

Fig.1 HMX with different particle sizes

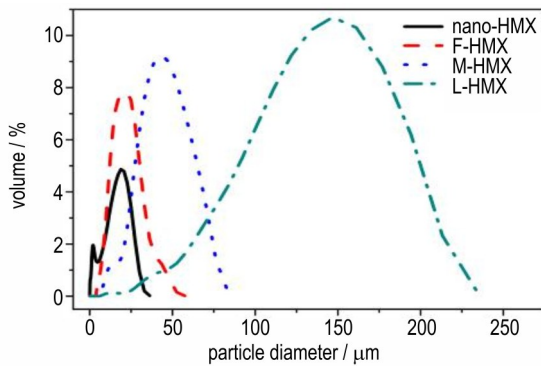
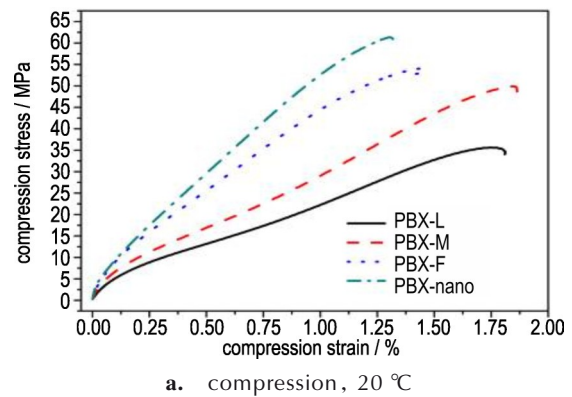


图2 HMX粒径分布曲线

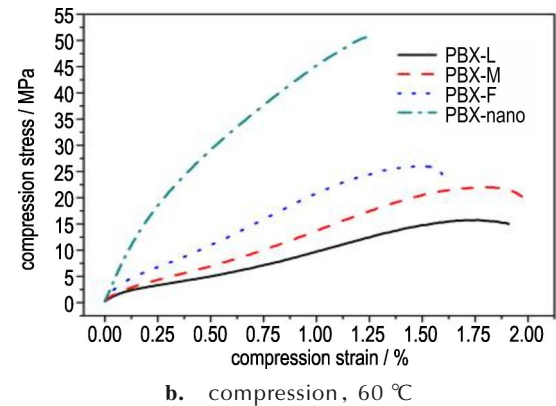
Fig.2 Particle size distribution curves of HMX

团聚体的平均粒径为 20  $\mu\text{m}$ 。

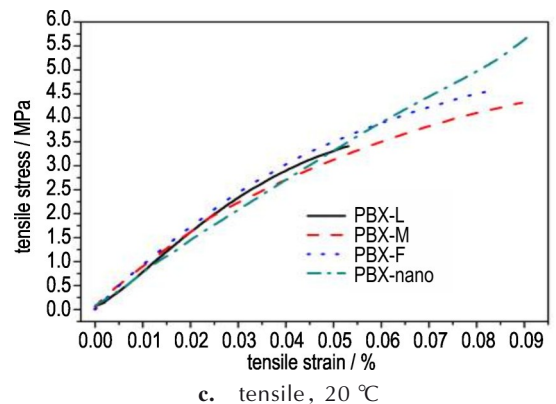
对4种HMX基炸药件进行常温和60  $^{\circ}\text{C}$ 下的压缩力学性能和间接拉伸力学性能测试,压缩应力应变曲线和拉伸应力应变曲线如图3所示。常温下(图3a和图3c),PBX-L、PBX-M、PBX-F和PBX-nano的巴西强度分别为3.4、4.3、4.6 MPa和5.7 MPa,压缩强度分别为35.6、49.8、53.8 MPa和61.2 MPa。在60  $^{\circ}\text{C}$ 下(图3b和图3d),4种炸药的巴西强度分别为2.2、2.3、2.7 MPa和2.9 MPa,压缩强度分别为15.8、22.0、26.0 MPa和50.6 MPa。同一HMX粒径下,PBX的压缩强度和拉伸强度随着温度的升高而降低,分析认为这是因为粘结剂在高温时发生软化,力学强度降低。在同一温度时,压缩强度和拉伸强度均随HMX粒径的减小而提高。其中纳米HMX在力学增强方面具有很好的效果,在20  $^{\circ}\text{C}$ 和60  $^{\circ}\text{C}$ 时,PBX-nano的压缩强度与



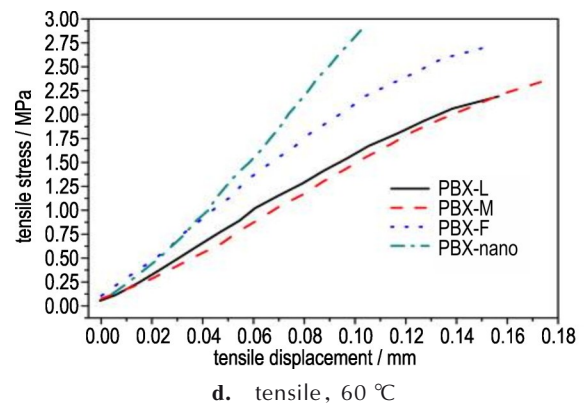
a. compression, 20  $^{\circ}\text{C}$



b. compression, 60  $^{\circ}\text{C}$



c. tensile, 20  $^{\circ}\text{C}$



d. tensile, 60  $^{\circ}\text{C}$

图3 不同粒径HMX基PBX的压缩和拉伸应力应变曲线

Fig.3 Compression and tensile curves of HMX-based PBXs with different particle sizes

PBX-L相比,分别提高约26 MPa和35 MPa,提升幅度为73.1%和222.2%;PBX-nano的拉伸强度分别提高约2 MPa和0.7 MPa,提升幅度为61.5%和33.3%。

图4为4种状态HMX基PBX炸药巴西试验断口,从图4中可以看出PBX-L、PBX-M和PBX-F中的HMX既有穿晶断裂,也有沿晶断裂(图4a~c);PBX-nano未见穿晶断裂现象(图4d),这是因为纳米HMX晶体尺寸小。从裂纹形状上,PBX-L、PBX-M和PBX-F中的裂纹均出现分叉,而PBX-nano的裂纹纹口平整。微米级HMX晶体呈宝石状,当HMX在经历压制成型时,晶体之间重排并相互挤压产生晶体内部损伤,从而成为炸药件结构的薄弱点之一<sup>[28]</sup>,而且大颗粒HMX在应力传导过程中越易产生穿晶断裂。同时,颗粒粒径越大,比表面积越小,粘结剂与晶体间的粘附界面越少,越易产生界面脱粘。当炸药中的晶体为纳米颗粒时,压制过程中晶体与晶体间紧密接触,压制应力得到很好的分散,颗粒的破碎情况减少,且纳米颗粒与粘结剂的粘附面积大,晶体与粘结剂发生界面脱粘所需的功更大。在压缩加载下,PBX的断裂模式主要以晶体断裂为主,纳米HMX较微米级晶体更不易发生断裂

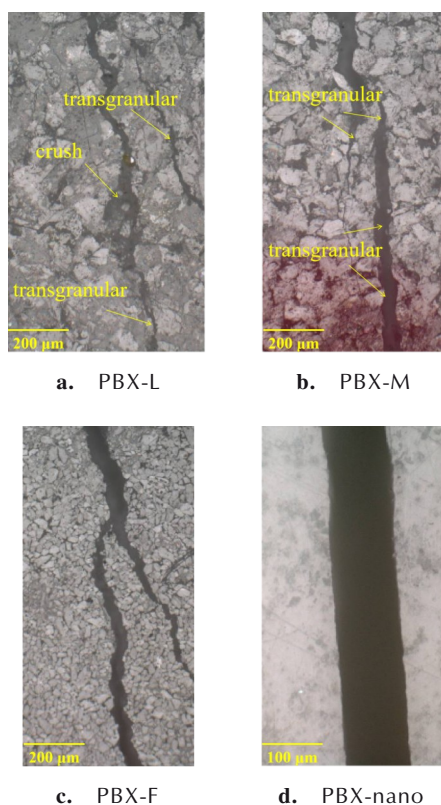


图4 经巴西试验后4种HMX基PBX断口  
Fig.4 The break of four-state HMX-based PBX after Brazilian test

破碎,压缩强度得到增强,且受温度的影响相对较小。因此,使用纳米HMX作为主体炸药时,纳米炸药对PBX的力学性能具有相对较好的增强效果。

## 2.2 HMX粒径对界面增强效应的影响

4种经表面修饰后的HMX基炸药件常温和60℃下的压缩应力应变曲线如图5a和图5b所示,间接拉伸应力应变曲线如图5c和图5d所示。

经键合剂表面处理后,不同粒径的HMX基PBX力学强度均得到提升。4种HMX基PBX(PBX-L-M、PBX-M-M、PBX-F-M、PBX-nano-M)20℃下的压缩强度提高幅度分别为7.7%、9.4%、6.6%和6.7%,60℃下的压缩强度提高幅度分别为43.3%、53.8%、58.5%和26.2%;20℃下的拉伸强度提高幅度分别为13.2%、14.6%、34.1%和82.6%,60℃下的拉伸强度提高幅度分别为15.1%、48.3%、58.1%和101.4%。拉伸强度的增加幅度较压缩强度的增加幅度更高,键合剂对HMX和氟聚物具有较好的界面增强作用。

键合剂处理有利于提高PBX在高温下的力学强度。经过键合剂处理后,4种HMX基PBX(PBX-L-M、PBX-M-M、PBX-F-M、PBX-nano-M)在60℃下的拉伸强度和压缩强度的提高幅度均比在20℃下的提高幅度大。这说明键合剂对HMX和氟聚物在60℃下仍然具有较好的界面增强作用,可显著抑制高温下粘结剂软化带来的界面脱粘。

HMX颗粒粒径是影响炸药力学增强的显著因素,HMX基PBX界面增强具有粒径效应。在20℃和60℃时,PBX-nano-M较PBX-L-M而言,压缩强度分别提高约29.7 MPa和41.2 MPa,提升幅度分别为77.5%和182.5%;巴西强度分别提高约6.5 MPa和3.2 MPa,提升幅度分别为168.4%和126.9%。这表明HMX粒径越小,键合剂对炸药件的力学增强效应越明显。

## 2.3 HMX粒径对界面增强效应的分析与讨论

炸药件在压缩和拉伸载荷作用下具有不同的破坏模式。在压缩载荷下,炸药件的破坏多以颗粒断裂为主,通常在压缩力的施加方向产生劈裂走向的裂纹;而在拉伸载荷下,炸药件的破坏以界面断裂为主。界面增强剂加强了HMX表面与氟聚物粘结剂的粘附强度,发生界面脱粘所需的功必然增加。以穿晶断裂为主的压缩载荷下,炸药晶体的破碎断裂与晶体粒径大小更为相关,晶粒越大,颗粒更易破碎。在相同晶体粒径时,界面增强可以在一定程度上增加晶体发生沿晶断裂时所需的断裂功,但不能改变晶体发生穿晶断裂

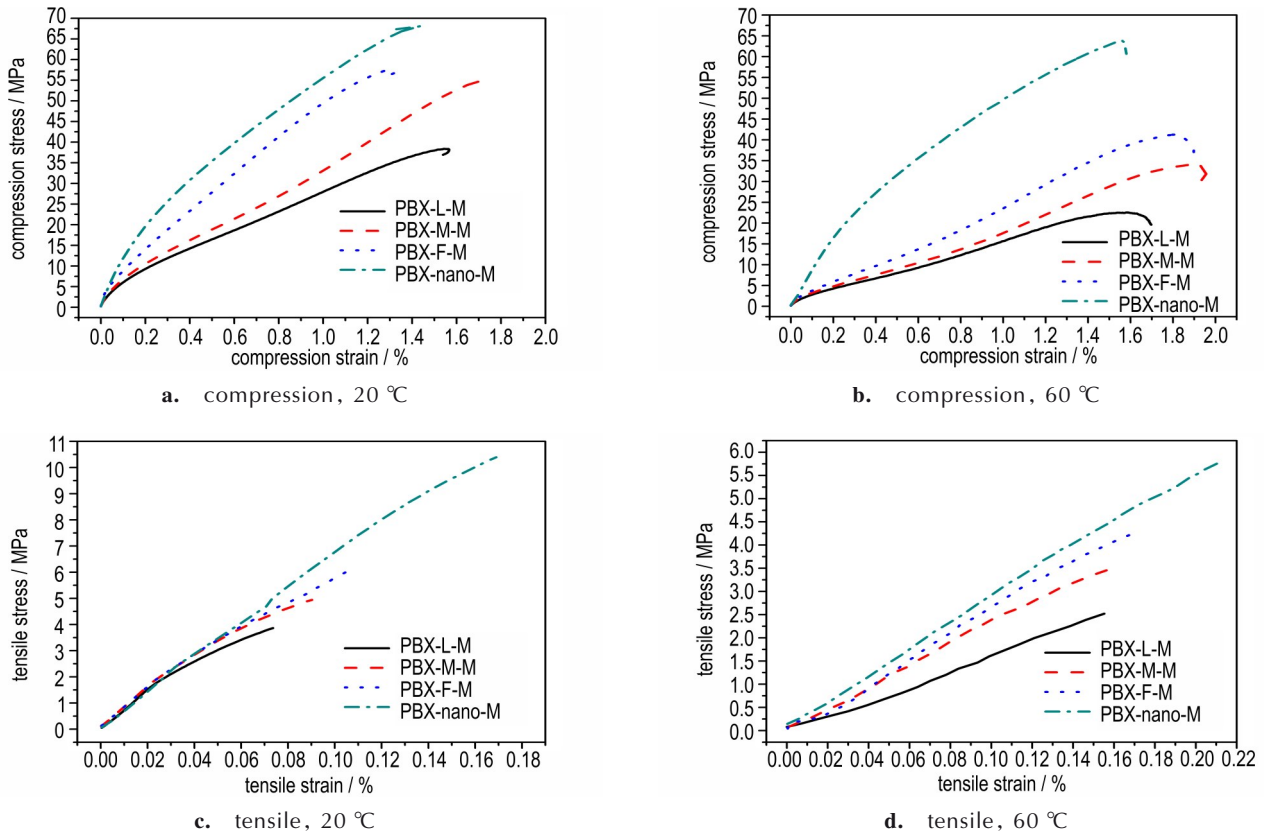


图5 经界面增强的不同粒径HMX基PBX压缩和拉伸应力应变曲线

Fig.5 Compression and tensile curves of HMX-based PBXs enhanced by interface with different particle sizes

的难易程度。以沿晶断裂为主的拉伸载荷下,界面面积大小将决定界面增强的程度。将炸药间接拉伸应力应变曲线下的曲线面积进行积分,可得到该炸药件产生断裂时需要的功——断裂功<sup>[29]</sup>。断裂功可反映材料破坏时所耗散的总能量,计算结果如图6所示。由图6可以看到,当炸药件界面得到增强时,炸药件的断裂功表现出明显的规律,即HMX粒径越小,断裂功越大。若将HMX视为规则的球体,则相同HMX质量

下,HMX的比表面积与粒径成反比关系,即nano-HMX的比表面积理论值将是L-HMX的1066倍。比表面积的增加,必然使得炸药件发生界面脱粘乃至断裂消耗更多的能量。

为了进一步分析不同状态炸药件的微观力学行为,采用三点弯曲模式对8种PBX的储能模量和力学损耗因子进行测试,结果分别如图7和图8所示。在此力学加载模式下,炸药件表现出两种变化:(1)随温

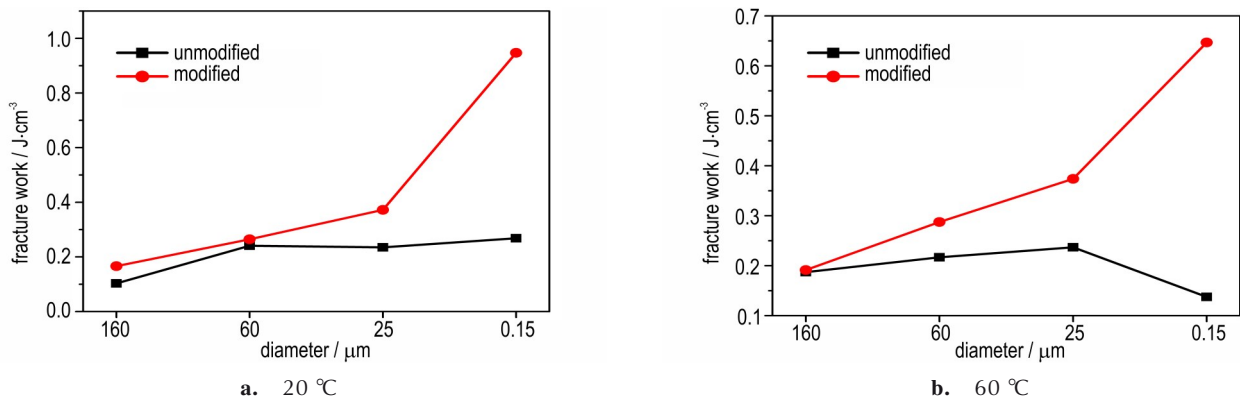


图6 不同炸药件在拉伸载荷下的断裂功

Fig.6 Fracture works of different PBXs under tensile loads

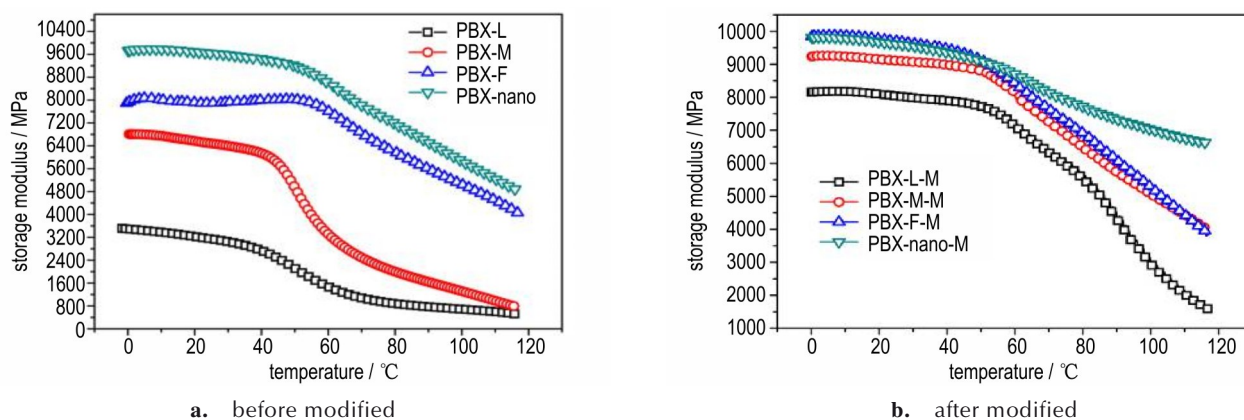


图7 不同HMX基PBX的储能模量-温度曲线

Fig.7 Energy storage modulus-temperature curves of HMX-based PBXs

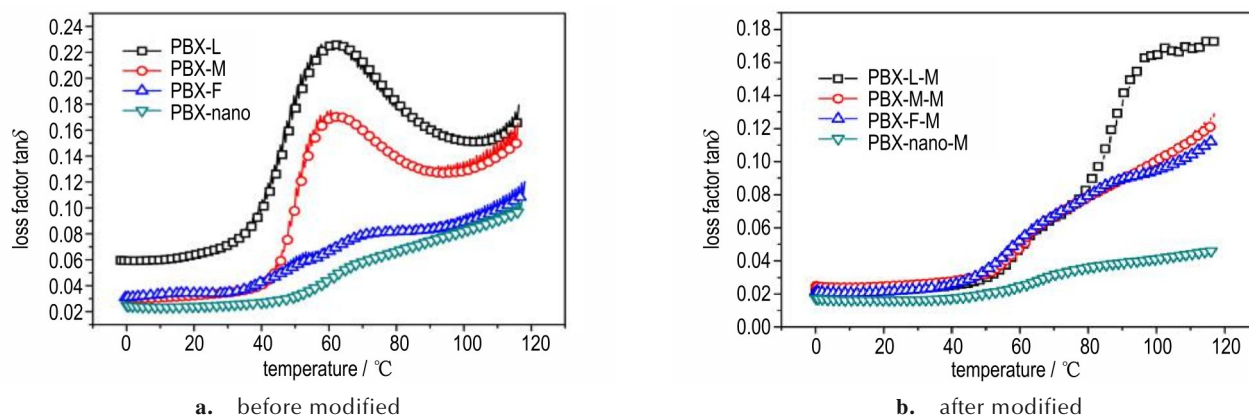


图8 修饰前后HMX基PBX的损耗因子-温度曲线

Fig.8 Loss factor-temperature curves of HMX-based PBXs

度的升高,炸药件中的高聚物材料将逐渐由玻璃态转变为粘流态,力学行为上的具体表现为储能模量降低,损耗因子增大。约45 °C时,F2314处于玻璃态,其变形主要为键长和键角的变化,在外界低频应力作用下能够很快发生变形和恢复,因此,PBX中F2314产生的力学损耗很小,主要由界面损耗主导。当温度升高,F2314开始发生玻璃化转变,PBX的力学损耗由界面损耗和粘结剂的力学损耗共同主导;(2)随着加载力在炸药试验件上的反复作用,炸药件将产生疲劳损伤,由于加载力小(1N),因此损伤主要以界面脱粘的形式出现,力学行为上的具体表现也为储能模量降低和损耗因子增大,因此,当聚合物粘结剂相同时,PBX储能模量降低的趋势和损耗因子增大的趋势可以定性地反映出PBX试验件中界面脱粘产生的程度。从图7a和图7b中可以看出,在45 °C左右,改性前后炸药的模量均开始出现较为明显的下降趋势,这是因为F2314的玻璃化转变温度即在此温度附近,粘结剂的软化导致

模量的降低。对比不同粒径HMX的炸药件(图8a和图8b),使用L-HMX的炸药件随温度的升高损耗因子的变化总是最大的状态。界面增强后,各PBX的损耗因子的变化量更小,尤其是使用纳米HMX的PBX-nano-M,其模量随温度升高的下降幅度和损耗因子随温度升高的增大幅度均为所有配方中最小,表明在力热复合加载下,PBX-nano-M试验件内出现的损伤最小,这也解释了PBX-nano-M能够具有最好力学强度的原因。

### 3 结论

(1)在20 °C和60 °C下,HMX基PBX的压缩力学强度和巴西力学强度均随HMX粒径的减小而增大,以纳米HMX为基的PBX-nano,其压缩强度和拉伸强度较以160 μm HMX为基的PBX-L分别提高73.1%和63.5%,纳米HMX在力学增强方面具有显著的

效果。

(2)添加键合剂后,各配方的压缩力学强度和拉伸力学强度均可得到提高,HMX基PBX界面增强具有明显的粒径效应,HMX粒径越小,键合剂对炸药力学增强的效应越明显。随粒径减小,比表面积增大导致炸药件发生界面脱粘/损伤乃至断裂所需的断裂功增大是粒径效应的主要原因。

(3)综合考虑炸药粒径和界面增强对力学性能的影响,可将PBX的力学性能进行最优化设计。

参考文献:

[1] GUO Y, LIU R, CHEN P., et al. Mechanical behavior of PBX with different HMX Crystal Size during die pressing: Experimental study and DEM simulation[J]. *Compos. Sci. Technol.*, 2022, 222: 109378.

[2] AGRAWAL P. Some new high energy materials and their formulations for specialized applications[J]. *Propellants Explos. Pyrotech.*, 2005, 30: 316-328.

[3] LIU J, YANG Z, LIU S, et al. Effects of fluoropolymer binders on the mechanical properties of TATB-based PBX[J]. *Propellants Explos. Pyrotech.*, 2018, 43: 664-670.

[4] 唐明峰,温茂萍,涂晓珍,等.高温及机械应力对PBX力学行为的影响规律及机理分析[J].*含能材料*, 2018, 26(2):150-155. TANG Ming-feng, WEN Mao-ping, TU Xiao-zhen, et al. Influence and mechanism of high temperature and mechanical stress on the mechanical behaviors of PBXs[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(2): 150-155.

[5] GE Siyu, ZHANGWenyong, SANG Jian, et al.. Mesoscale simulation to study constitutive properties of TATB/F2314 PBX[J]. *Materials*, 2019, 12, 3767.

[6] IDAR D J, THOMPSON D G, GRAY G T, et al. Influence of polymer molecular weight, temperature and strain rate on the mechanical properties of PBX 9501 [J]. <http://lib-www.lanl.gov/la-pubs/00818430.pdf>.

[7] 杨学林,曾诚成,巩飞艳,等.聚多巴胺改性的CL-20和FOX-7炸药力学性能及热稳定性[J].*含能材料*, 2021, 29(11): 1049-1060. YANG Xue-lin, ZENG Cheng-cheng, GONG Fei-yan, et al. Mechanical properties and thermal stabilities of CL-20 and FOX-7 explosives modified by polydopamine[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(11): 1049-1060.

[8] 罗观,殷明,郑保辉,等.高格尼能钝感浇注PBX设计及性能[J].*含能材料*, 2014, 22(4):487-492. LUO Guan, YIN Ming, ZHENG Bao-hui, et al. Design and Performance of an insensitive cast PBX with high Gurney energy [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(4):487-492.

[9] 乔炳旭,李小东,燕翔,等.粘结剂种类和含量对HMX基PBX烤燃响应特性的影响研究[J].*兵器装备工程学报*, 2021, 42(12): 261-267. QIAO Bing-xu, LI Xiao-dong, YAN Xiang, et al. Study on influence of binder type and content of HMX-Based PBX on response behavior under cook-off conditions[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(12): 261-267.

[10] 李小东,张锡铭,杨武,等. CL-20/FOX-7基PBX的制备及其性能表征[J].*含能材料*, 2019, 27(7):587-593. LI Xiao-dong, ZHANG Xi-ming, YANG Wu, et al. Preparation and property characterization of CL-20/FOX-7 polymer bonded explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(7): 587-593.

[11] LIU J, HAO G, RONG Yu, et al. Application and properties of nanometric HMX in PBX [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2017, 53(6): 744-749.

[12] 戎园波,肖磊,王庆华,等.微/纳米HMX粒度级配对比TNT基熔铸炸药性能的影响[J].*火炸药学报*, 2018, 41(1):36-40. RONG Yuan-bo, XIAO Lei, WANG Qing-hua, et al. Effect of micro/nanometer HMX gradation on the properties of TNT-based castable explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(1): 36-40.

[13] LI Yuxiang, WU Peng, HUA Cheng, et al. Determination of the mechanical and thermal properties, and impact sensitivity of pressed HMX-based PBX [J]. *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, 2019, 16(2): 299-315.

[14] 李宇翔,吴鹏,花成,等.微纳米HMX基PBX力学、导热性能及药片撞击感度[J].*含能材料*, 2018, 26(4):334-338. LI Yu-xiang, WU Peng, HUA Cheng, et al. Mechanical, thermal conductive properties and tablet impact sensitivity of micro-nano-HMX based PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(4): 334-338.

[15] HERMAN M J, WOZNICK C S, SCOTT S J, et al. Composite binder, processing, and particle size effects on mechanical properties of non-hazardous high explosive surrogates[J].*Powder Technology*, 2021, 391, 442-449.

[16] SHEFFIELD S, GUSTAVSEN R, ALCON R. Porous HMX Initiation studies-sugar as an inert simulant [C]//AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics 1998, 429: 575-578.

[17] YEAGER J, WOZNICK C, THOMPSON D, et al. Development of a New Density and Mechanical Mock for HMX [C]// 16th International Detonation Symposium, Maryland, United States, 2018.

[18] BURCH A, YEAGER J, BAHR D. Nanoindentation of HMX and idoxuridine to determine mechanical similarity [J]. *Crystals*, 2017, 7, 335.

[19] SKIDMORE C B, PHILLIPS D S, SON S F, et al. Characterization of HMX Particles in PBX 9501 [C]//AIP Conf. Proc., 1998, 29: 579-582.

[20] GONG F, ZHANG J, DING L, et al. Mussel-inspired coating of energetic crystals: A compact core-shell structure with highly enhanced thermal stability [J]. *Chem. Eng. J.*, 2017; 309: 140-150.

[21] LIN C, LIU S, QIAN W, et al. Controllable tuning of energetic crystals by bioinspired polydopamine [J]. *Energ. Mater. Front.*, 2020, 1: 59-66.

[22] HE G, YANG Z, PAN L, et al. Bioinspired interfacial reinforcement of polymer based energetic composites with a high loading of solid explosive crystals[J]. *J Mater. Chem. A*, 2017, 5: 13499-13510.

[23] YANG X, GONG F, ZHANG K, et al. Enhanced creep resistance and mechanical properties for CL-20 and FOX-7 based PBXs by crystal surface modification [J], *Propellants Explos.*

- Pyrotech.*, 2021, 46: 1–8.
- [24] 伏成玉, 周星宇, 杨鹏. 基于蛋白质类淀粉样聚集的表面功能化[J]. 化学学报, 2023, 81(11): 1566–1576.  
FU Cheng-yu, ZHOU Xing-yu, YANG Peng. Surface functionalization based on protein amyloid-like aggregation [J]. *Acta Chimica Sinica* 2023, 81(11): 1566–1576.
- [25] 杨庆敏, 刘永春, 陈立新, 等. 纤维蛋白原类淀粉样聚集膜的制备及其性能研究[J]. 高分子学报, 2020, 51(8): 890–900.  
YANG Qing-min, LIU Yong-chun, CHEN Li-xin, et al. Study on the amyloid-like fibrinogen-based nanofilm [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2020, 51(8): 890–900.
- [26] 戴开达, 李生涛, 陈鹏万. 基于XFEM的PBX炸药巴西实验断裂行为研究[J]. 北京理工大学学报自然版, 2018, 38(2): 111–117.  
DAI Kai-da, LI Sheng-tao, CHEN Peng-wan. Study on Fracture Behavior of the Brazilian test of PBX explosives based on XFEM [J]. *Transactions of Beijing institute of Technology*, 2018, 38(2): 111–117.
- [27] BERENBAUM R, BRODIE J. Measurement of the tensile strength of brittle materials [J]. *Br. J Appl. Phys.*, 1959, 10: 281–286.
- [28] 刘佳辉, 刘世俊, 黄明, 等. 钢膜压制下高品质HMX晶体的损伤规律[J]. 火炸药学报, 2012, 35(3): 42–46.  
LIU Jia-hui, LIU Shi-jun, HUANG Ming, et al. Crack and damage in insensitive HMX crystal during pressing [J]. *Chinese Journal of Explosives & Proellants*, 2012, 35(3): 42–46.
- [29] 温茂萍, 庞海燕, 唐明峰, 等. 基于应力应变曲线的断裂能参数表征炸药韧性[J]. 含能材料, 2015, 23(4): 351–355.  
WEN Mao-ping, PANG Hai-yan, TANG Ming-feng, et al. Toughness measurement of explosive based on fracture energy of the stress-strain curve [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(4): 351–355.

## Effect of Particle Size on Interface Enhancement of HMX-based Polymer Bonded Explosives

LIU Jia-hui<sup>1,2</sup>, ZENG Cheng-cheng<sup>1,2</sup>, ZHENG Sheng-jun<sup>2</sup>, PANG Hai-yan<sup>1</sup>, YANG Zhi-jian<sup>1</sup>, NIE Fu-de<sup>1</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics (CAEP), Mianyang 621999, China; 2. Graduate School, China Academy of Engineering Physics (CAEP), Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In order to study the influence of explosive crystal particle size on mechanical properties and interfacial enhancement of polymer bonded explosive (PBX), HMX-based PBXs were prepared by using four kinds of HMX with different particle sizes (160  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$  and 150 nm) as main explosive. The fluorine resin and neutral polymeric bonding agent were used as binder and interface enhancement agent, respectively. The compressive stress-strain test and Brazilian test were performed to obtain the compressive and tensile mechanical properties of 8 types of PBXs at room temperature (20  $^{\circ}\text{C}$ ) and high temperature (60  $^{\circ}\text{C}$ ), respectively. The storage modulus and mechanical loss factor were obtained using the three-point bending mode of dynamic mechanical analysis. The cross-sections of PBXs were characterized by scanning electron microscopy. Results show that both the compressive and tensile mechanical strength of explosive increase with the decreasing of HMX particle size, in which the nano-HMX based PBX (PBX-nano) shows the highest strength. The compressive strength and tensile strength of PBX-nano are 61.3 MPa and 5.7 MPa, increasing by 73.1% and 63.5% from PBX-L, respectively. By adding the bonding agent, the compressive mechanical strength and tensile mechanical strength for all the PBXs are significantly improved, especially the PBX-nano. The tensile strength of PBX-nano-M at 20  $^{\circ}\text{C}$  and 60  $^{\circ}\text{C}$  are up to 10.4 MPa and 5.8 MPa, which are 82.6% and 101.4% higher than that of PBX-nano, respectively. When the average particle size of HMX decreases from 100  $\mu\text{m}$  to 100 nm, the greater the fracture energy required for interface debonding/damage and even fracture of explosive, the greater the increase in tensile mechanical strength.

**Key words:** polymer bonded explosive (PBX); interface; particle size; mechanical property

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024013

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China (No. 12102404)

(责编: 姜梅)