

文章编号:1006-9941(2005)05-0349-05

超细炸药粉体性能及其应用研究进展

曾贵玉^{1,2}, 郁卫飞², 聂福德², 徐容², 吕春绪¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 综述了超细炸药粉体的性能及应用研究现状。对超细炸药性能变化进行了分析,表明超细炸药粉体及PBX配方具有机械撞击感度低、冲击波感度高、爆速增加、高压短脉冲起爆感度增加、传爆性能变好等特性。对今后超细炸药粉体研究、应用进行了展望,提出今后的研究方向是充分发挥多学科优势,进一步开展超细炸药粒子制备、粒子活性保护、粒子分散技术及作用机理的研究,以获得具有实际应用价值的超细炸药粉体及配方。

关键词: 材料科学; 超细粉体; 含能材料; 混合炸药; 综述

中图分类号: TJ55; TQ560; TB383

文献标识码: A

1 引言

与传统材料相比,超细材料具有许多优异的性能。随着纳米材料科学技术的发展,近年来国内同行掀起了超细炸药的研究热潮。理论上,将固体炸药细化到微米级(粒径小于10 μm)及纳米级(粒径小于100 nm),其总表面积将显著增大,表面活性原子及基团增多,更有利于起爆,爆炸时释放能量更完全,并且爆速提高、爆炸威力增大、燃烧速率提高、机械感度发生变化、爆轰机理转变、爆轰波传播更快更稳定、爆轰临界直径降低、装药强度提高^[1-5],这为提高武器装备性能找到可能的突破口。因此超细炸药的制备和性能研究已引起国内外广泛关注。目前制备超细炸药粉体的方法有:机械研磨法、化学重结晶法、超临界流体法、气流粉碎法、高速撞击流法、真空蒸发冷凝法、溶胶-凝胶法、微乳液法、喷雾干燥法等^[6-17]。

由于超细炸药具有炸药及超细粉体的双重特性,因此炸药细化和应用研究落后于其它纳米材料。目前虽可批量制备微米、亚微米级超细炸药,但有效制备平均粒径在纳米级的炸药的报道不多,尤其是能批次制备开展性能和应用研究所需纳米炸药的报道很少,对于纳米炸药性能及应用研究的报道就更少。为此,本文叙述了超细炸药性能及其应用研究进展,以促进超细炸药研究工作的进一步深化。

2 超细炸药粉体性能研究

炸药超细化后性能有何改变,能否有效降低机械

感度、提高冲击波感度或改善其它性能,对改善和提高现有配方性能、开发新的起爆传爆系列具有十分重要的意义。在此着重介绍目前综合性能较优良的TATB、RDX、HMX炸药超细粉体的性能研究情况。

2.1 TATB粉体

炸药的超细化可能影响炸药的理化性能,为此,曾贵玉等人^[18]对不同方法制备的超细TATB粉体的形貌特征进行了表征,发现虽然所采用的几种细化方法得到的超细TATB粉体97%以上的粒子均小于200 nm,但不同方法得到的超细TATB粉体的形貌显著不同:气流粉碎法和直接合成法得到的粉体粒子呈球形,粒径分布宽、大小不均匀、粒子表面有凹痕;重结晶法得到的粉体粒子呈条形,粒子大小较均匀,粒径分布较窄。因此使用时要根据不同的性能要求选用适宜的超细炸药粉体。

关于温度对超细TATB冲击波起爆感度的影响,Urtiew等人^[19]的研究发现:250℃下超细TATB的冲击波感度比室温下的冲击波感度要高;高压下,250℃下超细TATB的冲击波感度与HMX基炸药室温下的冲击波感度相当。Frank等人^[20]对超细TATB爆轰能力和爆轰反应区进行了测试,结果表明:超细TATB的临界直径减小,有利于起爆传爆。

为选择适宜的超细TATB造粒成型,雷延茹等人^[21]测试了不同粒径(48 μm-粒颗粒、14 μm-粗颗粒、0.6 μm-亚微米超细颗粒)TATB粉体与液体的湿润性能,发现同一液体对细颗粒TATB的湿润性要优于粗颗粒TATB。湿润性越好,则高分子粘结剂在TATB表面的吸附量越大、更易与细颗粒TATB粒子发生吸附,从而有利于提高塑料粘结炸药(PBX)的粘接强度和力

收稿日期:2005-05-17;修回日期:2005-07-29

作者简介:曾贵玉(1969-),男,在读博士,从事含能材料及超细材料制备及性能研究。e-mail: guiyuzeng@126.com

学性能。

2.2 RDX 粉体

关于 RDX 粒度对热分解的影响,刘继华^[22]研究发现:在较低压力、相同加热条件下大粒径 RDX 先熔化、分解,然后才出现小粒径 RDX 的熔化;而涂永珍等人^[23]却发现,在硝胺丁羟基推进剂混合体系中,小粒径 RDX 更容易接受周围的热量而迅速分解。上述差异的产生可能与 RDX 粒子所处的环境条件有关。

关于炸药粒径对压力输出的影响,祝明水^[24]等人认为:在 211.7 ~ 317.5 μm 范围内,RDX 粒径越小,压力指数越大,压力输出时间越短;而大于一定粒径 ($>120 \mu\text{m}$) 的 RDX 在燃烧初期,小粒径 RDX 比表面较大,吸热较多,压力较低;小于一定粒径 ($\leq 120 \mu\text{m}$) 的 RDX 的压力变化从一开始便比较陡峭。由此可见,条件不同,粒径对 RDX 性能的影响也不相同。

在超细 RDX 的感度研究方面,刘桂涛^[25-27]等人发现,超细 RDX 粉体及其 PBX 的机械感度随着粒度降低,机械撞击感度降低,冲击波感度增高,临界直径减小,爆速增大。因此,RDX 细化后,不仅操作、贮存和使用过程的安全性得到提高,而且在特定条件下更容易起爆。有多种理论对超细 RDX 粉体撞击感度降低的原因进行了解释,其中一种解释认为,有可能是超细 RDX 粉体粒子之间的空隙太小,难以满足 RDX 由热点成长为爆炸的条件。

在 RDX 粒度对临界截面积的影响方面,陆春荣^[28]等人发现,随着炸药颗粒的减小,RDX 临界截面积逐渐减小。

2.3 HMX 粉体及其它炸药粉体

超细炸药的机械感度变化是研究者非常关注的问题,张小宁^[29-32]等人对 HMX、RDX、HNS、PETN、CL-20 等超细炸药粉体的撞击感度进行了研究,发现炸药撞击感度随着炸药粒度的减小逐渐降低,亚微米粉体炸药的撞击感度降低更明显,如超细 HMX 和 RDX 的爆炸百分数分别从普通颗粒 ($>10 \mu\text{m}$) 的 100% 和 80% 降到了 56% 和 52%。认为这可能是由于超细颗粒改变了热点形成机制和超细炸药容易进行热传导两方面的原因造成的。

在超细 HMX 的冲击片起爆方面,张景林^[30,31]等人的研究发现,与普通颗粒炸药粉体相比,亚微米 HMX、HNS、PETN 较普通粉体更容易起爆,能量输出更大。他们已将亚微米级 HMX 炸药用于高能钝感传爆药、爆炸逻辑网络以及飞片雷管装药等研究。

由此可见,炸药细化后,其机械撞击感度降低,高

压短脉冲感度和能量输出得到提高。说明超细炸药粉体在常见外力(一般的撞击、摩擦)作用下比较安全,而在特定刺激(冲击片)作用下起爆可靠性提高,这对研制低感高能炸药、促进武器小型化具有实际意义。

3 超细炸药粉体在混合炸药中的应用

对炸药细化后能否提高其 PBX 起爆感度和爆炸能力的问题,不少学者进行了较深入的研究。刘桂涛^[33-35]等人比较了超细 RDX 和工业 RDX 为基的 PBX 的爆速和做功能力,发现在相同实验条件下,超细 RDX 配方的爆速和做功能力优于工业 RDX 配方。在爆炸能量上,主体炸药粒径越小,混合炸药输出能量越高,随着主体炸药中细颗粒炸药含量的增加,爆速提高。说明超细炸药的爆轰更完全、更接近理想爆轰。分析这是由于超细炸药颗粒间包含的气孔数量较普通炸药多,且各个气孔的体积趋于相同、表面能相近,在冲击波作用下一旦形成爆炸热点,则热点迅速反应,所释放的能量足以迅速引爆其它未爆炸的炸药粉体。王作山^[36,37]等人研究了 HMX 粒度级配对混合炸药冲击波起爆感度的影响,发现在所研究的 HMX 粒度范围内 (1 ~ 150 μm),炸药粒度及粒度级配显著影响混合炸药冲击波起爆感度:密度较低时(如 $<90\%$ 理论密度),主体炸药粒度越细,冲击波感度越低;中等密度条件下,传爆药冲击波感度随主体炸药粒度的减小而降低;密度较高时(如 $>95\%$ 理论密度),在一定粒径范围内,主体炸药粒度越细,冲击波感度越高;将粗细两种粒度的 HMX 级配后,不论级配比例如何改变,其冲击波感度都在二者冲击波感度之间;在平均粒径接近的情况下,粒度分布范围越宽,冲击波感度越低;粒度级配的粒径比和质量比存在着最佳值,当小粒径的体积同大粒径的孔隙体积相近时,冲击波感度最低,而且能最大限度地提高高压药密度。

在炸药粒度对 PBX 炸药包覆和机械感度的影响方面,张淑玲^[38]等人研究了 RDX 粒度对 PBX 包覆及感度性能的影响,发现在以 RDX 为基的配方中,粒径越小,撞击感度和摩擦感度越低;当粘结剂含量较多时,RDX 粒度越小越容易包覆。王金英^[39]等人在研究 HMX 和 NTO 为基的传爆药配方时也发现同样的规律:随着 NTO 粒度减小,粒子包覆更均匀,且较钝感的 NTO 包覆在了 HMX 的表面,配方的机械感度降低。

在超细炸药的传爆性能上,Hill^[40]等人的研究表明,超细 TATB 具有良好的传爆性能,在美国许多传爆药配方中已得到实际应用。

对超细炸药粉体在混合炸药中的应用研究,国内外已取得不少进展。总体趋势是:随着炸药粒径的减小,PBX的机械撞击感度降低,冲击片作用下的高压短脉冲起爆感度增加,能量释放速度更快,能量释放更完全,传爆性能更好,因此有望在钝感弹药领域获得广泛应用。

4 超细炸药粉体研究需解决的关键技术问题

综合超细炸药粉体的研制及其在混合炸药中的应用研究可知,超细炸药粉体的性能及其应用研究还处于起步阶段,研究手段和理论还很不完善,不同研究者的研究结果甚至存在较大差异。因此,在今后的研究中需解决以下关键技术。

(1) 超细炸药粒子活性的保护技术

超细炸药粒子之所以具有非常规的特异性能,就在于其表面裸露原子多、粒子比表面积大、表面能高,在制备、贮存或使用过程中与空气接触时,这些高活性的原子极易与空气中的氧发生反应,导致活性降低,因此,必须采用适当的措施对其进行处理,保护粒子活性,这是其应用的前提。

为此,需要在制备过程中采用适当的表面处理技术,如表面改性技术^[41]、冻干技术或微波干燥技术^[18,42]等;也可将刚制备的超细炸药粒子进行缓慢氧化,使粒子表面生成一薄层氧化膜,以避免空气中的急剧氧化,提高粒子化学稳定性,保持其活性^[43];贮存时采用真空包装或将其浸泡在液态惰性气体或液体中,避免其急剧氧化;另一有效方法是将超细粒子直接制成所希望的形状、材料或器件,避免粒子与空气直接接触,保证粒子活性。

(2) 超细炸药粒子应用过程中的分散技术

超细炸药粒子表面能高,具有自发团聚的趋势,无论采用何种防聚集措施,也无法完全避免粒子的团聚。团聚的存在将影响粒子性能,为保证超细粒子在应用时能很好地分散到体系中,首先要保证制备的超细粒子处于良好分散状态,不存在硬团聚,超细粒子在应用体系中的均匀分散是发挥其作用的前提和保证。因此研究超细粉体在应用体系中的分散技术是一个十分重要的课题,其中包括:应用适宜的和试验方法研究超细炸药粒子在液相介质特别是在应用体系中的相互作用力及团聚形成的机理^[44],为超细炸药粉体的应用提供理论和工艺指导;开发具有多种活性基团的高性能分散剂;发挥多学科综合优势,采用适宜的物理或化学分散方法如超声分散技术^[45]等,保证粒子在体

系中良好分散。

(3) 超细炸药粒子在含能材料中的作用机理研究

超细含能材料具有的特异性能是与组份间的作用方式、爆炸理论等密切相关的,应深入研究超细粒子在含能材料中的作用机理。对超细粒子界面特性、粒子细化对混合造粒、压药等成型过程的影响、纳米粒子及纳米炸药的起爆和燃烧机理、超细炸药粒子感度变化与普通颗粒不一致的原因等问题开展更加广泛的研究。通过研究揭示超细炸药粒子在应用过程中的作用本质,提高超细炸药配方的综合性能。

5 结束语

超细炸药粉体的研究是一个方兴未艾的领域。超细炸药粉体表现出机械撞击感度降低、冲击波感度提高、爆速增加、能量释放更快更完全的趋势,超细炸药粉体及其混合炸药的研究将为低感高能炸药和武器小型化研究打下良好基础。超细炸药研究中需发挥多学科作用,进一步研究超细炸药粒子的批量制备、活性保护、分散、作用机理,以获得有实际应用前景的超细炸药粉体及配方。

参考文献:

- [1] 吕春绪. 工业炸药理论[M]. 北京:兵器工业出版社,2003.
Lü Chun-xu. Industrial Explosive Theory [M]. Beijing: Ordnance Industry Press,2003.
- [2] 孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
SUN Cheng-wei, WEI Yu-zhang, ZHOU Zhi-kui. Application Detonate Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press,2000.
- [3] Simpson R L, Urtiew P A, Ornellas D L, et al. CL-20 performance exceeds that of HMX and its sensitivity is moderate [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1997, 22: 249 - 255.
- [4] 刘志建. 超细材料与超细炸药技术[J]. 火炸药, 1995, 17(4): 37 - 40.
LIU Zhi-jian. Fine materials and fine explosive technology [J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellant*, 1995, 17(4): 37 - 40.
- [5] 徐厚宝,盛涤伦. 火工药剂细化技术评价与展望[J]. 火工品, 2000, 2: 39 - 43.
XU Hou-bao, SHENG Di-lun. Evaluation and prospect of the fining technology of loading materials for initiating explosive device [J]. *Initiations & Pyrotechnics*, 2000, 2: 39 - 43.
- [6] 曾贵玉, 聂福德, 刘晏, 等. 超细 BTF 粒子的制备[J]. 火炸药学报, 2002, 25(3): 20 - 22.
ZENG Gui-yu, NIE Fu-de, LIU Yan, et al. Preparation of ultrafine BTF particle [J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellant*, 2002, 25(3): 20 - 22.
- [7] 刘宏英, 邓国栋, 杨毅, 等. 采用 LS 型超细粉碎机对几种单质炸药超细化研究[J]. 爆破器材, 2004, 33(5): 32 - 35.
LIU Hong-ying, DENG Guo-dong, YANG Yi, et al. Study on the su-

- perfining of explosive by LS superfine pulverizers[J]. *Explosive Materials*, 2004, 33(5): 32-35.
- [8] 曾贵玉,尹莉莎,聂福德,等. 冲击结晶技术制备亚微米 TATB 粒子的研究[J]. *火炸药学报*, 2001, 24(4): 13-15.
ZENG Gui-yu, YIN Li-sha, NIE Fu-de, et al. Preparation of submicron TATB particle by crush crystallizing[J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellant*, 2001, 24(4): 13-15.
- [9] 金良安,刘学武,李志义. 基于超临界反溶剂过程的高性能炸药微粉制备原理与实现方法[J]. *兵工学报*, 2003, 24(4): 464-467.
JIN Liang-an, LIU Xue-wu, LI Zhi-yi. Study on the principle and method of preparation of dynamite powder through the supercritical anti-solvent process[J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(4): 464-467.
- [10] 曾贵玉,聂福德,王建华,等. 高速气流碰撞法制备超细 TATB 粒子的研究[J]. *火工品*, 2003, 1: 1-3.
ZENG Gui-yu, NIE Fu-de, WANG Jian-hua, et al. Preparation of ultrafine TATB particle using high speed airflow impacting[J]. *Initiations & Pyrotechnics*, 2003, 1: 1-3.
- [11] 陈潜,何得昌,徐更光,等. 高速撞击流法制备超细 HMX 炸药[J]. *火炸药学报*, 2004, 27(2): 23-25.
CHEN Qian, HE De-chang, XU Geng-guang, et al. Preparation of ultrafine particle of HMX explosive using the technology of high-speeding impinging streams[J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellant*, 2004, 27(2): 23-25.
- [12] 何得昌,郑波. 窄分布纳米级 HMX 的制备[J]. *含能材料*, 2004, 12(1): 43-45.
HE De-chang, ZHENG Bo. Preparation of HMX with nanometer particle distribution[J]. *Hanneng Cailiao*, 2004, 12(1): 43-45.
- [13] 信息平台. 纳米炸药横空出击[J]. *矿业快报*, 2002, 16: 8.
Information Platform. Across-air hitting out of nanometer explosive[J]. *Express Information of Mining Industry*, 2002, 16: 8.
- [14] Simpson et al. Sol-gel manufactured energetic materials [P]. USP 6666935, 2003.
- [15] 彭加斌,刘大斌,吕春绪,等. 反相微乳液-重结晶法制备纳米 RDX 的工艺研究[J]. *火工品*, 2004, 4: 7-10.
PENG Jia-bin, LIU Da-bin, LU Chun-xu, et al. Study on the preparation technology of nanometer RDX [J]. *Initiations & Pyrotechnics*, 2004, 4: 7-10.
- [16] 陈厚和,孟庆刚,曹虎,等. 纳米 RDX 粉体的制备与撞击感度[J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(4): 382-384.
CHEN Hou-he, MENG Qing-gang, CAO Hu, et al. Preparation and impact sensitivity of nanometer explosive powder of RDX [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(4): 382-384.
- [17] 杨光成,聂福德. 超细 HMX 的制备与表征研究[J]. *含能材料*, 2004, 12(6): 350-353.
YANG Guang-cheng, NIE Fu-de. Preparation and characteristic of ultrafine HMX [J]. *Hanneng Cailiao*, 2004, 12(6): 350-353.
- [18] 曾贵玉,聂福德,张启戎,等. 超细 TATB 制备方法对粒子结构的影响[J]. *火炸药学报*, 2003, 26(1): 8-11.
ZENG Gui-yu, NIE Fu-de, ZHANG Qi-rong. Effect of preparation methods of ultrafine TATB on particle structure [J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellant*, 2003, 26(1): 8-11.
- [19] Urtiew P A, Forbes J W, Garcia F, et al. Shock initiation of UF-TATB at 250 degrees C [R]. UCRL-JC-141805, 2001.
- [20] Frank Alan, Chau Henry, Lee Ron, et al. Reaction zones in ultrafine TATB [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2003, 28(5): 259-264.
- [21] 雷延茹,刘永刚,罗顺火. 高聚物溶液在固体炸药表面上的湿润性[J]. *粘接*, 2004, 25(4): 4-7.
LEI Yan-ru, LIU Yong-gang, LUO Shun-huo. Wetting capability of polymer solution on surface of solid explosive [J]. *Adhesion in China*, 2004, 25(4): 4-7.
- [22] 刘继华. 火药物理化学性能 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
LIU Ji-hua. Powder Physical Chemistry Performance [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
- [23] 涂永珍,王朝珍,徐浩星. 硝酸推进剂燃烧性能的实验研究[J]. *含能材料*, 1996, 4(1): 18-22.
TU Yong-zhen, WANG Chao-zhen, XU Hao-xing. Experimental study of nitromine propellant combust performance [J]. *Hanneng Cailiao*, 1996, 4(1): 18-22.
- [24] 祝明水,龙新平,蒋小华. 不同粒径 RDX 的燃烧特性研究[J]. *含能材料*, 2004, 12(1): 40-42.
ZHU Ming-shui, LONG Xing-ping, JIANG Xiao-hua. Study on the combustion characteristics of RDX with different particle sizes [J]. *Hanneng Cailiao*, 2004, 12(1): 40-42.
- [25] 刘桂涛,曲虹霞. 超细 RDX 爆轰感度与撞击感度、摩擦感度的研究[J]. *南京理工大学学报*, 2002, 26(4): 410-413.
LIU Gui-tao, QU Hong-xia. A study on impact sensitivity, friction sensitivity and brisance of superfine RDX [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2002, 26(4): 410-413.
- [26] 曾贵玉,李海波,曹虎,等. 纳米 RDX 的撞击感度与分析[J]. *含能材料*, 2004, 12(1): 40-42.
ZENG Gui-yu, LI Hai-bo, CAO Hu, et al. Impact sensitivity and analysis of nanometer RDX [J]. *Hanneng Cailiao*, 2004, 12(1): 40-42.
- [27] 杨斌林,陈荣义,曹晓宏. RDX 炸药粒度对其爆轰性能的影响[J]. *火工品*, 2004, 3: 50-53.
YANG Bin-lin, CHEN Rong-yi, CAO Xiao-hong. Influence of particle size of RDX on the detonation properties [J]. *Initiations & Pyrotechnics*, 2004, 3: 50-53.
- [28] 陆春荣,刘玉存. RDX 的粒度对临界截面积的影响[J]. *华北工学院学报*, 2004, 25(5): 368-370.
LU Chun-rong, LIU Yu-cun. Effect of RDX particle size on critical diameter [J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2004, 25(5): 368-370.
- [29] 张小宁,徐更光,徐军培,等. 超细 HMX 和 RDX 撞击感度的研究[J]. *火炸药学报*, 1999, 1: 33-36.
ZHANG Xiao-ning, XU Geng-guang, XU Jun-pei, et al. A study about impact sensitivity of ultrafine HMX and RDX [J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellant*, 1999, 1: 33-36.
- [30] 张景林,吕春玲,王晶禹,等. 亚微米炸药的感度选择性[J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(1): 59-62.
ZHANG Jing-lin, LU Chun-ling, WANG Jin-yu, et al. Selectivity of the sensitivity of the submicron explosive [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(1): 59-62.

- [31] 张景林,王晶禹. 炸药细化技术[R]. GF报告:HG 1998 012. 北京:兵器科学研究院,2000.
ZHANG Jing-lin, WANG Jing-yu. Explosive fining technology [R]. GF report: HG1998012. Beijing: Academy of Weapon Science, 2000.
- [32] 徐永江,金韶华,欧育湘,等. 三种粒度 ϵ -六硝基六氮杂异伍兹烷热分解及撞击感度研究[J]. 火炸药学报,2001,1: 47-48.
XU Yong-jiang, JIN Shao-hua, OU Yu-xiang, et al. Study on decomposition and impact sensitivity of Hexanitrohexaazaisowurtzitanin three particle sizes [J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellant*, 2001, 1: 47-48.
- [33] 刘桂涛,吕春绪,曲虹霞. 超细RDX爆速和作功能力的研究与测试[J]. 爆破器材,2003,32(3): 1-3.
LIU Gui-tao, LU Chun-xu, QU Hong-xia. Study and test on detonation velocity and power of superfine RDX [J]. *Explosive Materials*, 2003, 32(3): 1-3.
- [34] 柴涛,张景林. HMX粒度、粒度级配对混合传爆药性能影响的研究[J]. 中国安全科学学报,2000,10(3): 71-74.
CHAI Tao, ZHANG Jing-lin. Effects of particle size and gradation of HMX on the shock sensitivity and the output of explosive compositions based on HMX [J]. *Journal of Chinese Safety Science*, 2000, 10(3): 71-74.
- [35] WANG Shu-feng, YANG Yan-qiang, SUN Zhao-yong, et al. Fast spectroscopy of energy release in nanometric explosives [J]. *Chemical Physics Letters*, 2003, 368: 189-194.
- [36] 王作山,郑敏,刘玉存. HMX粒度对HMX/F2641冲击波起爆感度的影响研究[J]. 华北工学院学报,1999,20(2): 171-173.
WANG Zuo-shan, ZHENG Min, LIU Yu-cun. The Influence of HMX granular on the shock sensitivity of HMX/F2641 [J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 1999, 20(2): 171-173.
- [37] 刘玉存,王作山,柴涛,等. HMX粒度及其级配对塑料粘结炸药冲击波感度和爆炸输出能量的影响[J]. 兵工学报,2000,21(4): 357-360.
LIU Yu-cun, WANG Zuo-shan, CHAI Tao, et al. Influence of HMX particle size and gradation on the shock sensitivity and output of a PBX explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2000, 21(4): 357-360.
- [38] 张淑玲,刘天生,肖秀友. RDX粒度对某塑性炸药包覆和机械感度性能的影响[J]. 华北工学院学报,2002,23(4): 296-298.
ZHANG Shu-ling, LIU Tian-sheng, XIAO Xiu-you. Study about the effect of RDX particle size on the coating of plastic explosives and its mechanical sensitivity [J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2002, 23(4): 296-298.
- [39] 王金英,柴涛,张景林,等. PBX传爆药撞击感度影响因素的研究[J]. 华北工学院学报,2004,25(4): 289-292.
WANG Jin-ying, CHAI Tao, ZHANG Jing-lin, et al. Study on the influence factors of impact sensitivity of PBX booster [J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2004, 25(4): 289-292.
- [40] Hill L G, Seitz W L, Forest C A, et al. High explosive corner turning performance and the LANL Mushroom test [R]. LA-UR-97-2509, 1997.
- [41] 高濂,孙静,刘阳桥. 纳米粉体的分散及表面改性[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
GAO Qian, SHUN Jing, LIU Yang-qiao. Dispersal and surface modification of nanometer powder [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [42] 郁卫飞,曾贵玉,聂福德,等. 两种炸药的微波干燥[J]. 含能材料,2004,12(2): 101-103.
YU Wei-fei, ZENG Gui-yu, NIE Fu-de, et al. Microwave drying of two kinds of explosive [J]. *Hanneng Cailiao*, 2004, 12(2): 101-103.
- [43] 杨继红,杨阳,施南华. 颗粒物后处理技术概论[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
YANG Ji-hong, YANG Yang, SHI Nan-hua. The generality of particle behind-disposing technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [44] 袁凤英,秦清风. 超细炸药粉体团聚-分散机理研究[J]. 火工品,2003,2: 32-33.
YUAN Feng-ying, QIN Qing-feng. Study on reunion-dispersion mechanism of ultrafine explosive [J]. *Initiations & Pyrotechnics*, 2003, 2: 32-33.
- [45] 王平,秦德新,辛芳,等. 超声波在超细炸药制备中的应用[J]. 含能材料,2003,11(2): 107-109.
WANG Ping, QIN De-xin, XING Fang, et al. Application of ultrasonic technique in the preparation of ultrafine explosives [J]. *Hanneng Cailiao*, 2003, 11(2): 107-109.

Review on Properties of Ultrafine Explosives Powder and its Application

ZENG Gui-yu^{1,2}, YU Wei-fei², NIE Fu-de², XU Rong², Lü Chun-xu¹

(1. College of Chemistry Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The properties and application of ultrafine explosive powder including TATB, RDX, HMX were reviewed. And research trend of ultrafine explosive powder was also proposed such as particle active protecting technology, particle dispersing technology and acting mechanism to obtain ultrafine explosive powder and formulas with actual application value.

Key words: materials science; ultrafine powder; energetic material; mixing explosive; review