

文章编号:1006-9941(2019)10-0805-07

糖颗粒对 HMX 和 RDX 两种单质炸药非冲击点火的影响

张钊,吴艳青

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 为了研究惰性糖颗粒对奥克托今(HMX)和黑索今(RDX)两种单质炸药非冲击点火机理的影响,利用配备了光学观测系统的落锤撞击装置,捕获了含惰性糖颗粒的 HMX 和 RDX 经历的破碎、熔化、溅射、点火和燃烧过程。结果表明,在含糖 HMX 颗粒炸药和含糖 RDX 粉末炸药中,点火易发生在糖颗粒的周围,燃烧会沿着糖颗粒周围向外部传播;燃烧反应前两者均发生剧烈的溅射现象;含糖 HMX 颗粒在固相中发生点火;在含糖 RDX 粉末炸药中,靠近糖颗粒周围的炸药先进入熔融状态,随后熔融区域逐渐扩展,点火点易出现在糖颗粒边缘处的 RDX 熔融液相中。对比了在 HMX/RDX 单质炸药中分别加入一个和三个糖颗粒情况下的点火频率,结果表明,三个糖颗粒的情况更容易引起炸药点火;三个糖颗粒由于破碎后产生较多的碎片,其与 HMX 或 RDX 单质炸药具有较强的相互作用,可能会在多个位置形成热点,其导致的燃烧反应会比单个糖颗粒的情况更为剧烈。采用上下极限法分析得到,糖颗粒的加入对 HMX 颗粒炸药的点火具有抑制作用,对于 RDX 粉末炸药的点火具有促进作用。

关键词: 落锤撞击;黑索今(RDX);奥克托今(HMX);点火;机理;糖颗粒

中图分类号: TJ55; O381

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018360

1 引言

奥克托今(HMX)和黑索今(RDX)是军事和民用领域广泛使用的单质炸药,在使用过程中可能混入各种杂质,含杂质炸药的安全性评价以及机理研究一直是重要的研究热点^[1-3]。撞击感度是评价炸药安全性能的重要指标之一,工程上往往采用爆炸百分数法、特性落高法来评价炸药的感度。然而,由于各国实验室设备的差异性,采用传统的评价感度的方法存在其局限性^[4-5]。为了能够准确评价炸药在低速撞击下的敏感性,观测炸药在低速撞击下的响应过程具有重要意义。

国内外很多学者利用改造的落锤实验装置进行了炸药在低速撞击下的点火-燃烧机理的研究,其中最突出的是卡文迪许实验室中 Heavens S N 等^[6]改造的

落锤装置。许多研究表明^[7-12],不同类型的惰性颗粒会对炸药的撞击感度以及点火机理造成不同程度的影响,而糖颗粒作为惰性颗粒的一种,也很可能产生相似的影响效果。Sheffield S A 等^[7]将糖作为 HMX 的代替性材料,对糖进行了动态性能测试,发现相同粒径大小的 HMX 与糖颗粒具有相似的冲击波形。Bowden F P 等^[8]通过落锤撞击实验分别研究了外加颗粒的化学性质和物理性质对炸药点火的影响,发现外加颗粒的熔点、热传导性以及尺寸对炸药点火的影响程度较大。Peterson P 等^[9]研究了掺杂石榴石的 PBX 9501 炸药的点火机理,试验结果表明石榴石有助于引起炸药发生变形并引起局部的能量集中。Reynolds J G 等^[10]研究了砂纸上砂颗粒的尺寸和 HMX 炸药尺寸对撞击点火反应的影响,发现热点易于在砂纸的凸起周围形成。吴艳青等^[11]研究了大颗粒炸药和食盐颗粒对 HMX 和 RDX 粉末炸药点火的影响,结果表明大颗粒和食盐有助于引起炸药的点火并且一定程度上提高了炸药的感度。Reynolds J G 等^[12]将糖作为 HMX 的代替材料,对糖进行了低速撞击试验,发现相同条件下糖粉末比糖颗粒更容易形成热点;在特定的落高范围内,落高对于点火的形成影响不大。可以看出,上述研究分别讨论

收稿日期:2018-12-24;修回日期:2019-01-18

网络出版日期:2019-03-25

基金项目:科学挑战计划(TZ2016001);国家自然科学基金(11572045,11472051)

作者简介:张钊(1994-),男,硕士研究生,主要从事炸药点火机理的研究。e-mail:1098747246@qq.com

通信联系人:吴艳青(1974-),女,博士,教授,主要从事炸药点火机理研究。e-mail:wuyqing@bit.edu.cn

引用本文:张钊,吴艳青.糖颗粒对 HMX 和 RDX 两种单质炸药非冲击点火的影响[J].含能材料,2019,27(10):805-811.

ZHANG Zhao, WU Yan-qing. Effect of Sugar Particles on Non-Shock Ignition of Two Kinds of Single Compounds HMX and RDX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(10):805-811.

了糖颗粒和单质 HMX 的撞击点火机理,但未涉及糖颗粒对 HMX 与 RDX 单质炸药非冲击点火的影响。

基于此,本研究对传统立式落锤仪的基座部分和落锤部分进行了改造,在落锤和基座中增加了通光孔以形成完整的光学通路,利用高速摄影仪拍摄了含糖 HMX 和 RDX 炸药的低速撞击响应过程。通过对拍摄得到的图像进行分析,得到了这两种含糖单质炸药的动态响应特点,以揭示这两类含糖单质炸药的点火-燃烧机理。

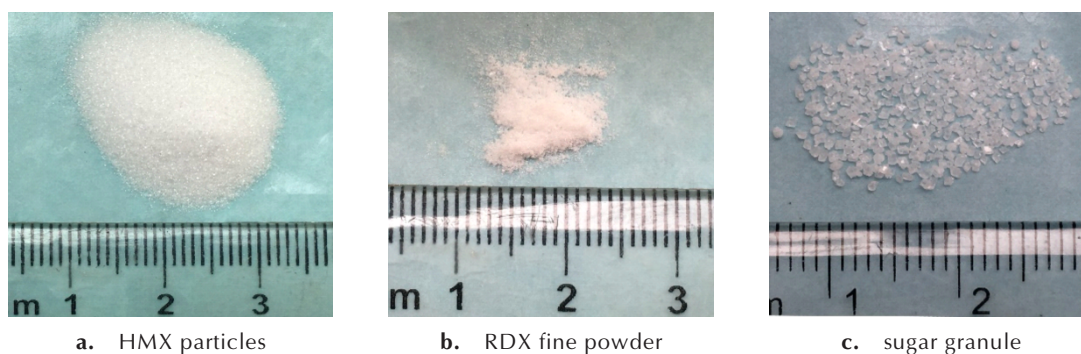


图1 试验样品

Fig.1 Experimental samples

2.2 落锤加载实验装置及试验组设置

在传统立式落锤仪的基础上,对基座与落锤进行改造,在两者内部分别加入玻璃片和钢化玻璃块,使其拥有完整的光学通路。改进后的落锤撞击光学系统如图2所示。为了使钢化玻璃能够承受较大的冲击力,在钢化玻璃与落锤之间以及钢化玻璃与基座之间都安装了铜垫圈,以起到缓冲作用。落锤仪的背面具有防二次撞击装置,可以充分保证撞击的一次性。改造后的落锤质量为5.62 kg。

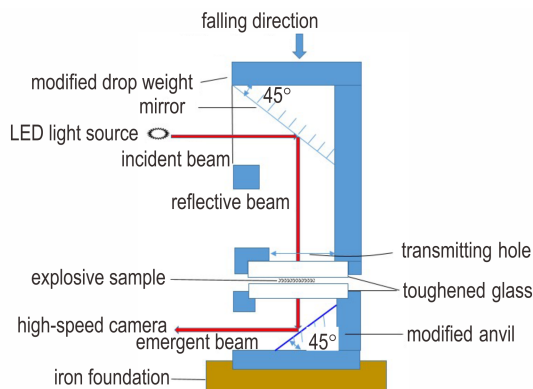


图2 落锤撞击装置光学系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the optical system of drop hammer impact device

正式进行实验前,放置少量样品进行几次试撞击,当拍摄得到的图像不发生振动,并且足够清晰时,开始

2 实验部分

2.1 试验样品

HMX 颗粒和 RDX 粉末,均由中国工程物理研究院化工材料研究所提供。HMX 为普通粗颗粒,其粒径为 200~400 μm ; RDX 为细粉末,其粒径为 10~150 μm ; 糖颗粒为单晶白砂糖,其粒径为 900~1500 μm 。HMX、RDX 和糖颗粒试验样品如图1所示。

进行试验。本实验中高速摄影拍摄频率设置为 $1.5 \times 10^5 \text{ f} \cdot \text{s}^{-1}$,即每两幅图像之间的时间差为 6.7 μs 。

按照试验样品的不同设置了四组试验,其样品分别为:HMX 与一个糖颗粒的混合物、HMX 与三个糖颗粒的混合物、RDX 与一个糖颗粒的混合物、RDX 与三个糖颗粒的混合物。为保证试验合理性,单次试验中取炸药的质量 10 mg,误差不超过 1 mg,单个糖颗粒的质量 1.0 mg,误差不超过 0.2 mg,对每组试验样品分别进行八次重复试验。

3 实验结果与分析

3.1 单个糖颗粒的撞击试验

图3为单个糖颗粒在 15 cm 落高下的撞击响应图像。整个响应持续 1232.8 μs ,通过图3可以清晰地观察到糖颗粒经历了破碎、塑性扩展、中心熔化、局部溅射、大范围熔化并快速冷却等现象。在 576.2 μs 时,糖颗粒塑性变形结束,并在其中心区域出现熔化现象,透光性增加。在 676.7 μs 时,破碎后的样品在右下方发生了局部的溅射现象,与 649.9 μs 时的图像进行比较,可以发现颗粒的透光区域面积发生了收缩,这是由于溅射会引起能量的释放。在 917.9 μs 时,颗粒的熔化区域面积达到了最大值,此时颗粒所积累的热量达

到了最大值。随后,在 1192.6~1232.8 μs ,颗粒开始逐步发生冷却,直到颗粒全部冷却。

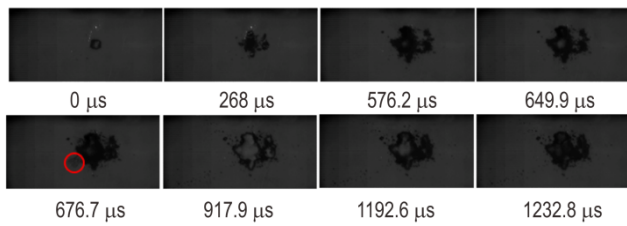


图3 落锤高度为 15 cm 时单个糖颗粒受撞击的响应过程

Fig.3 The response process of a single sugar granule subjected to the drop weight impact with the height of 15 cm

3.2 含糖 HMX 颗粒的点火-燃烧实验

在 10.5 mg HMX 中加入单个糖颗粒时的撞击响应图像如图 4 所示,落锤下落高度为 15 cm。整个响应变化过程持续 1206 μs ,其与单个糖颗粒受撞击情况下的持续时间基本一致。0 μs 图像中的白色亮点为糖颗粒,其位于整个试样的中心。由于糖颗粒的粒径大于 HMX 的颗粒粒径,在 0~40.2 μs ,糖颗粒先发生破碎并且逐步被压实。在 355.1 μs 时,位于中心位置的糖颗粒透光性开始增加,表明温度在逐步提升。在 609.7 μs 时,发生了较为均匀的溅射现象,这导致一部分能量发生了释放,使得熔融区域的温度下降,透光性降低。之后,随着炸药进一步被压缩,能量得到进

一步的积累,在 984.9 μs 时,熔融区域的面积达到了最大值。紧接着在 991.6 μs ,初始的点火位置出现在温度较高的糖颗粒周围,998.3~1005 μs 时,燃烧沿着糖颗粒周围并向未燃烧的部分快速扩展,只有少量试样冷却堆积。燃烧结束后,糖颗粒在 200 μs 后冷却完毕,熔融区域消失。

在 10.8 mg HMX 中加入三个糖颗粒时的撞击响应图像如图 5 所示,落锤下落高度为 15 cm。整个响应过程持续 2472.3 μs ,大于加入一个糖颗粒时所持续的时间,这主要是由于糖颗粒个数的增加使得样品的承载能力也增加,在相同的落高下,压缩时间会随着压缩强度增加而增加。0 μs 时的图像为加入三个糖颗粒时炸药的初始状态,三个白色亮点代表三个糖颗粒。由图 5 可知,在 294.8 μs 之前,三个糖颗粒被逐步压碎并压实,由于糖颗粒的塑性扩展,试样的面积也逐渐扩展。在 294.8~1681.7 μs ,样品被进一步压缩并伴随有多次溅射现象的发生。1681.7~2284.7 μs 时,三个糖颗粒的透光性逐渐增加,表明糖颗粒以及样品的温度在不断升高,此过程也不断发生着局部的溅射现象,在 2284.7 μs 时,融化区域的面积达到了最大值。紧接着在 2291.4 μs 时,在样品的右下方靠近糖颗粒的部分开始出现点火位置。随后,在 2298.1 μs 时,燃烧沿着三个糖颗粒的交界面处快速扩展,并且此

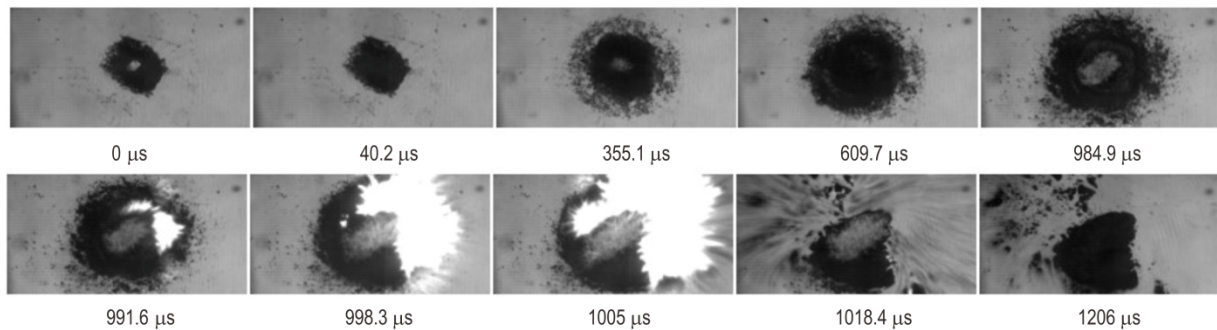


图4 落锤高度为 15 cm 时 10.5 mg HMX 中加入单个糖颗粒情况下的撞击响应过程

Fig.4 The impact response process of 10.5 mg HMX with a single sugar granule with drop weight height of 15 cm

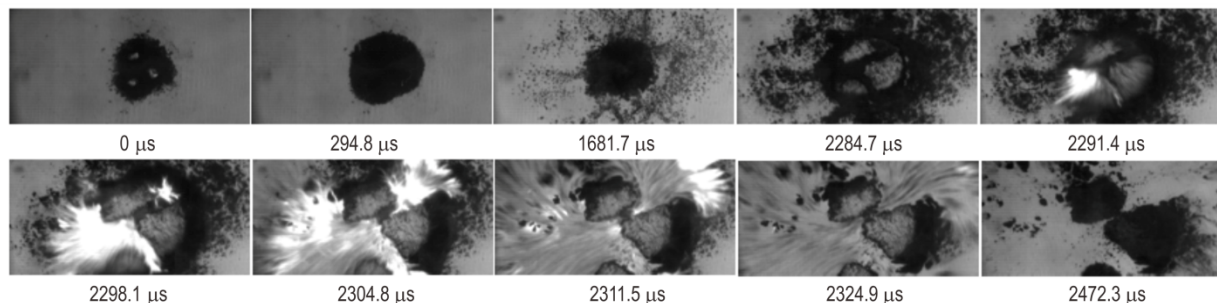


图5 落锤高度为 15 cm 时 10.8 mg HMX 中加入三个糖颗粒情况下的撞击响应过程

Fig.5 The impact response process of 10.8 mg HMX with three sugar granules with drop weight height of 15 cm

时在样品的右上方靠近糖颗粒的部分也出现了点火位置。从 2304.8 μs 开始, 两个点火位置处产生的火焰不断传播并发生汇合直至燃烧结束, 只有右下方的少量炸药没有产生燃烧。燃烧结束后, 发生熔化的糖颗粒逐步冷却。

3.3 含糖 RDX 粉末的点火-燃烧实验

在 10.2 mg RDX 粉末炸药中加入一个糖颗粒时的动态响应过程如图 6 所示, 落锤撞击高度为 20 cm, 该过程中炸药并未发生燃烧。0 μs 时的图像为样品的初始形貌, 糖颗粒位于 RDX 粉末的中心位置。由图 6 可知, 在 0~46.9 μs , 糖颗粒逐渐破碎并且被压实。46.9~274.7 μs 时, 粉末炸药连同糖颗粒被进一步压缩, 样品的平铺面积进一步增大。在 274.7~777.2 μs , 糖颗粒出现熔化, 熔化的面积逐渐增大, 透光性逐渐增强。777.2 μs 时, 可以明显观察到红圈范围内的材料与红圈外面的材料有明显的分界线, 可以断定红圈范围内的材料是糖颗粒, 而红圈范围外的材料是 RDX 粉末炸药, 故糖颗粒周围的 RDX 粉末发生了熔化, 这一现象在含糖 HMX 炸药中是不存在的。783.9~797.3 μs 时, 在 RDX 熔化部分与未熔化部分的界面处出现了溅射现象, 这可能是由于熔融区域具有较高的温度, RDX 发生了化学反应并且生成了气体产物, 推动未反应炸药粉末向四周飞溅。在 797.3~991.6 μs , 由于样品中的散热大于吸收的热量, 样品开始进入冷却阶段, 其最终状态如 991.6 μs 时的照片所示。

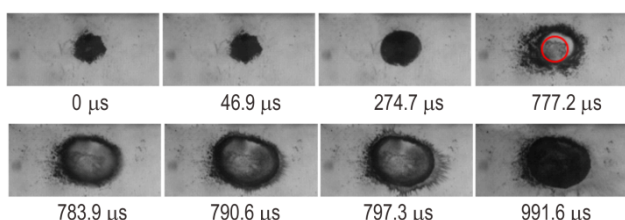


图 6 落锤高度为 20 cm 时 10.2 mg RDX 中加入单个糖颗粒情况下的撞击响应过程

Fig. 6 The impact response process of 10.2 mg RDX with a single sugar granule with drop weight height of 20 cm

在 10.5 mg RDX 粉末炸药中加入三个糖颗粒情况下的动态响应过程如图 7 所示, 0 μs 时刻图像中的三个白色亮点为三个糖颗粒, 落锤撞击高度为 20 cm, 该过程中炸药并未发生燃烧。由图 7 可知, 在 0~294.8 μs , 糖颗粒被逐渐压碎并压实, 粉末同时也发生塑性扩展。763.8~804 μs 时, 随着试样被进一步压缩, 其温度进一步提高, 在右上方出现了较强的溅射现象。在 1139 μs 时, 试样的熔化面积达到最大值, 并且

可以清晰地分辨出熔融的糖颗粒和熔化的 RDX 炸药。由于试样未达到点火温度, 随后试样开始发生冷却, 最终状态如 1299.8 μs 时的图像所示。

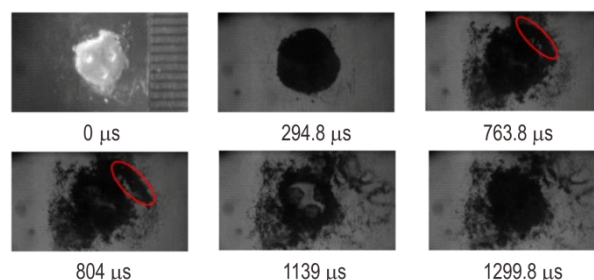


图 7 落锤高度为 20 cm 时 10.5 mg RDX 中加入三个糖颗粒情况下的撞击响应过程

Fig. 7 The impact response process of 10.5 mg RDX with three sugar granules with drop weight height of 20 cm

图 8 所示为在 9.8 mg RDX 粉末炸药中加入三个糖颗粒情况下的动态响应过程, 落锤撞击高度为 20 cm, 该过程中炸药发生了点火和燃烧现象。由图 8 可知, 在 0~402 μs , 糖颗粒和粉末炸药被逐渐压缩。402~670 μs 时, 糖颗粒开始出现熔化并且熔化面积逐步扩大, 同时也不断发生着溅射现象。在 670 μs 时, 可以看到处于三个糖颗粒交界处的 RDX 粉末的透光性也发生了一定程度的变化, 表明其处于熔化状态。红色箭头指出了位于熔融 RDX 炸药区域左下方的热点。676.7 μs 时, 热点逐渐发展并形成了明显的燃烧。683.4 μs 时, 有三处发生局部点火, 上面的两处点火点均位于糖颗粒边缘处的 RDX 熔融区域中。696.8 μs 时各点火处的燃烧迅速连通。703.5 μs 时, 燃烧从右上方糖颗粒和右下方糖颗粒所围成的界面处开始扩展。随着燃烧结束后, 试样开始逐步发生冷却, 最终状态如 991.6 μs 时的图像所示。

3.4 HMX 和 RDX 两种试样中分别加入一个和三个糖颗粒的点火频率

15 cm 落高下, 在具有相同质量 (10 ± 1) mg 的 HMX 颗粒中分别加入一个和三个糖颗粒, 分别进行 8 次试验下的点火频率试验结果如表 1 所示。20 cm 落高下, 在具有相同质量 (10 ± 1) mg 的含糖 RDX 粉末中分别加入一个和三个糖颗粒, 分别进行 8 次试验下的点火频率试验结果如表 2 所示。从表 2 中的燃烧频率可以看出, 无论是对 HMX 还是 RDX 炸药, 加入三个糖颗粒的情况下点火频率更大, 这是由于三个糖颗粒在撞击之后能够形成较多的碎片, 应力集中的位置较多, 加上其与单质炸药会形成较强的相互作用, 使得接触面的位置处容易形成热点, 最终引发燃烧反应的剧

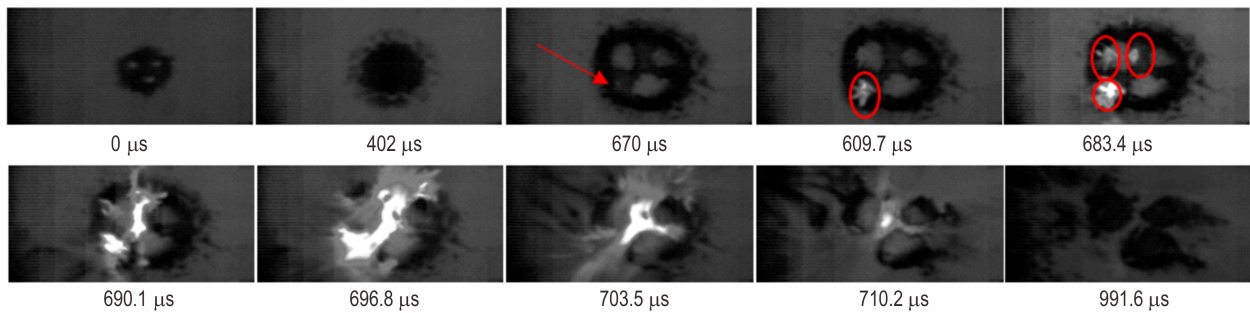


图 8 落锤高度为 20 cm 时 9.8 mg RDX 中加入三个糖颗粒情况下的撞击响应过程

Fig.8 The impact response process of 9.8 mg RDX with three sugar granules with drop weight height of 20 cm

表 1 15 cm 落高下 HMX 颗粒炸药中加入不同糖颗粒个数的点火-燃烧频率

Table 1 Ignition and combustion frequency of HMX particle explosive with different number of sugar granules at the drop-height of 15 cm

experimental groups	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	ignition frequency
adding one sugar granule	1	0	0	0	1	0	1	0	3/8
adding three sugar granules	0	1	1	0	1	1	0	1	5/8

Note: 1 is for ignition; 0 is for no ignition.

表 2 20 cm 落高下 RDX 粉末炸药中加入不同糖颗粒个数的点火-燃烧频率

Table 2 Ignition and combustion frequency of RDX powder explosive with different number of sugar granules at the drop-height of 20 cm

experimental groups	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	ignition frequency
adding one sugar granule	0	0	0	0	0	0	0	0	0
adding three sugar granules	0	1	0	0	0	1	0	0	1/4

Note: 1 is for ignition; 0 is for no ignition.

烈程度也较大。图 9 为试样的断裂模式示意图,落锤冲击下,糖颗粒首先发生破碎,然后产生具有一定飞散速度的碎片,这些碎片与周围的粉末微粒炸药发生一定程度的相互作用。显然,糖颗粒的个数越多,产生的破片个数也越多,破片与炸药的相互作用程度就越强,越容易造成应力的不均匀,越容易引起温升的不均匀分布,从而越易于在糖颗粒周围的炸药中形成热点。

分别对具有相同质量(10±1) mg 的纯 HMX 颗粒和纯 RDX 粉末进行 25 次落锤撞击试验,得到 HMX 颗粒炸药百分之百发生爆炸的最低高度为 8 cm, RDX 粉末炸药百分之百不发生爆炸的最大高度为 22 cm。然而从表 1 和表 2 可以看出,15 cm 落高下含糖 HMX 炸药不能发生百分之百点火,20 cm 落高下, RDX 粉末炸药出现了点火,这说明糖颗粒的加入对 HMX 的点火具有抑制作用,对于 RDX 的点火具有促进作用。

3.5 糖颗粒对炸药的点火-燃烧影响分析

以上试验图像是每组混合物的代表性试验。从所有发生燃烧的混合物的试验照片中都能够清楚地看到,明显的燃烧现象均是在炸药与糖颗粒的界面处产

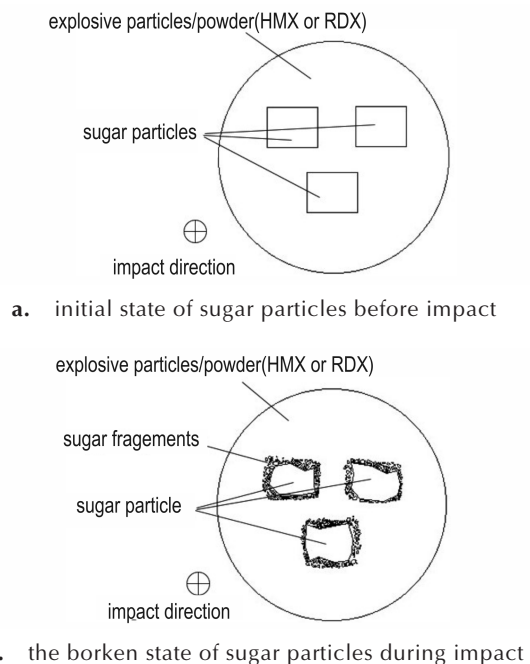


图 9 糖颗粒断裂示意图

Fig.9 Schematic diagram of the fracture of sugar particles

生的, 燃烧反应前两者均发生剧烈的溅射现象。颗粒与单质炸药在相互接触时的力学行为是引发热点形成并最终发展成可见燃烧反应的因素之一。吴艳青^[13]、王明扬^[14]利用扫描电镜对 HMX 和 RDX 粉末炸药和颗粒炸药的显微形貌进行了观测, 其显微形貌分析结果表明, 不论是粉末炸药还是颗粒炸药, 其形状都是不规则的(HMX 尤为突出, 表面多棱角), 而且表面比较粗糙, 存在很多缺陷。当落锤对混合物加载时, 首先与糖颗粒接触。糖颗粒受压后发生变形和破碎, 表面的缺陷处会出现应力集中。加上与单质炸药的细小粉末微粒的不断摩擦, 使得接触面附近的能量不断积累, 温度快速上升, 很可能产生局部热点, 并发展为宏观的燃烧反应。

另外, 颗粒周围积存气体的快速压缩与塌陷也是在两种材料交界处诱发放火和燃烧的重要因素之一。Bowde F P 等^[15]曾将气体的绝热压缩作为一个重要的热点产生机制, 这一点后来被 Bourne N K 等^[16-17]证实。由于炸药粉末微粒的尺寸与糖颗粒的尺寸相差较大, 二者之间不能形成较为密集的堆积, 会留下较多的空间。另外, 在放置炸药微粒粉末与糖颗粒的混合物时, 糖颗粒与周围的炸药微粒粉末之间也会因操作问题而存在细小的空间。落锤撞击下, 糖颗粒首先发生破碎并逐步压实, 当试样的压实部分与钢化玻璃形成一个闭合区域后, 颗粒周围积存的气体更难逸出。钢化玻璃对这些积存气体不断压缩做功, 使得气体及邻近的炸药被持续加热, 热量集中, 温度快速上升, 并最终引发积存气体的崩溃坍塌。在这一过程中, 糖颗粒与粉末交界处很可能产生热点, 并引发燃烧。相比之下, 粉末微粒之间的空隙在经历试样前期变形扩展后已经大量减少并且分布相对均匀, 受到加载后积存的气体较少, 不容易发生坍塌并形成热点, 因此很难像颗粒与微粒粉末的交界处那样容易出现燃烧点。

Swallow G M 等^[18]在研究聚合物对炸药的影响时曾指出, 聚合物的热力学性能对于炸药敏感化起到重要的作用。表 3 为 HMX、RDX 和糖颗粒这三种材料的导热系数、比热以及熔点数据^[19-20]。从表 3 可以看出, 三者导热系数和比热相近, 糖颗粒的熔点较低。在落锤撞击下, 尺寸较大的糖颗粒会先发生变形和破碎, 并且迅速熔化, 在混合物中首先达到熔融状态, 从以上试验图像也可以看到糖颗粒率先达到熔融。之后糖颗粒和粉末微粒炸药一同被压缩, 由于糖颗粒以及糖颗粒周围的温度较高, 被压缩的粉末微粒的温度从糖颗粒中心到远离糖颗粒呈现出递减的趋势, 以上试验图像中熔融区域总是从糖颗粒中心向四周扩展的现象也

可以验证这一点。所以, 由于糖颗粒周围的温度较整个试样区域要高, 十分容易在糖颗粒周围诱发放热点。

表 3 HMX、RDX、糖颗粒的热力学参数^[19-20]

Table 3 Thermodynamic parameters of HMX, RDX and sugar granule^[19-20]

material	thermal conductivity / $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	specific heat / $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	melting point/ $^{\circ}C$
HMX	0.345	1.05	282
RDX	0.213	1.13	205.5
sugar granule	0.30	1.26	186

4 结论

(1) 利用配备了光学观测系统的落锤撞击装置, 捕获了含糖 HMX 和 RDX 单质炸药在低速撞击加载下的动态响应过程, 观察到含糖炸药经历的破碎、熔化、溅射、点火和燃烧过程。

(2) 在含糖 HMX 颗粒炸药和含糖 RDX 粉末炸药中, 点火易发生在糖颗粒的周围, 燃烧会沿着糖颗粒周围向外部传播, 燃烧反应前两者均发生剧烈的溅射现象。在糖颗粒的边缘处容易发生点火, 一是由于糖颗粒的比热较低, 容易快速升到较高温度; 二是由于糖颗粒边缘处往往存在糖颗粒形成的碎片与单质炸药之间较强的相互作用; 三是由于糖颗粒与单质炸药之间的积存气体具有绝热压缩作用。含糖 HMX 炸药在固相中发生点火, 而在含糖 RDX 炸药中, 点火点易出现在糖颗粒边缘处的 RDX 熔融液相中。

(3) 在试样相同而糖颗粒个数不同的试验中, 三个糖颗粒的情况下较易发生点火, 这说明破碎形成的碎片越多, 碎片与单质炸药之间的相互作用也就越强, 更易于在多个位置处形成热点, 越容易引起点火。

(4) 糖颗粒的加入对 HMX 颗粒炸药的点火具有抑制作用, 对于 RDX 粉末炸药的点火具有促进作用。

参考文献:

- [1] Bowden F P, Yoffe A D. Fast reactions in solids[M]. London: Butterworth's Scientific Publications, 1958.
- [2] Field J E. Hot spot ignition mechanisms for explosives[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1992, 339(1654):269-283.
- [3] 夏先贵, 柏劲松, 林其文, 等. 含铝炸药起爆机理的研究[J]. *含能材料*, 1999, 7(3):133-136.
XIA Xian-gui, BAI Jing-song, LIN Qi-wen, et al. A Study on Initiation Mechanism of Al-containing Explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1999, 7(3): 133-136.

- [4] 于占龙, 吴晓青. 炸药撞击感度试验的研究[J]. 安徽化工. 2003, 29(2): 20-22.
YU Zhan-long, WU Yan-qing. Study on the explosive impact sensitivity[J]. *Anhui Chemical Industry*, 2003, 2: 20-22.
- [5] Rice B M, Hare J J. A quantum mechanical investigation of the relation between impact sensitivity and the charge distribution in energetic molecules[J]. *J Phys Chem A*, 2002, 106(9): 1770-1783.
- [6] Heavens S N, Field J E. The ignition of a thin layer of explosive by impact[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1974, 338(1612): 77-93.
- [7] Sheffield S A, Gustavsen R L, Alcon R R. Porous HMX initiation studies. sugar as an inert simulant[J]. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 1997, 429(1): 575-578.
- [8] Bowden F P, Gurton O R. Initiation of explosives by impact and friction: the influence of grit[J]. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 1949, 198(1054): 337-349.
- [9] Peterson P, Browning R, Roemer E, et al. Experimental study of grit particle enhancement in non-shock ignition of PBX 9501 [C]//American Institute of Physics. AIP, Baltimore, 2006, 845(1): 1041-1044.
- [10] Reynolds J G, Hsu P C, Hust G A, et al. Effect of sandpaper and grain size on non-shock initiated reactions in HMX[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(10):1191-1202.
- [11] Wu Y Q, Guo H F, Huang F L, et al. Effects of large-sized granules on ignition and burning of powdery explosives under drop-weight impacts[J]. *Combustion Science and Technology*, DOI: 10.1080/00102202.2018.1448801.
- [12] Reynolds J G, Hsu P C, Hust G A, et al. Hot spot formation in mock materials in impact sensitivity testing by drop hammer [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(11): 1303-1308.
- [13] 吴艳青, 鲍小伟, 王明扬, 等. RDX/HMX 颗粒炸药落锤撞击点火-燃烧机理[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 339-346.
WU Yan-qing, BAO Xiao-wei, WANG Ming-yang, et al. Ignition and burning mechanisms of RDX/HMX particles subjected to drop-weight impact[J]. *Explosion & Shock Waves*, 2017, 42(11): 1303-1308.
- [14] 王明扬, 吴艳青, 黄风雷, 等. RDX 颗粒炸药低速撞击响应的试验研究[C]//全国强动载效应及防护学术会议暨复杂介质/结构的动态力学行为创新研究群体学术研讨会. 北京, 2014.
- [15] Bowden F P, Yoffe A D. Initiation and growth of explosives in liquids and solids [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1952.
- [16] Bourne N K, Field J E. Bubble collapse and the initiation of explosion [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1991, 435(1894): 423-435.
- [17] Bourne N K, Field J E. Explosive ignition by the collapse of cavities [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1999, 455(1987): 2411-2426.
- [18] Swallowe G M, Field J E, Hutchinson C D. Impact experiments on thin layers of polymers and intermediate explosives [M]. *Shock Waves in Condensed Matter*. Springer US, 1985(1986): 891-898.
- [19] 董海山. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 249-264.
DONG Hai-shan. High explosive and its related properties [M]. Beijing: Science Press, 1989: 249-264.
- [20] Bai Z S, Horibe K, Sei I O. Studies on thermal properties of food (Part 2): intrinsic thermal conductivity of sugar and heat transfer mechanism of food model[J]. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 1996, 58(5): 49-55.

Effect of Sugar Particles on Non-Shock Ignition of Two Kinds of Single Compounds HMX and RDX

ZHANG Zhao, WU Yan-qing

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To study the effect of inert sugar particles on the non-shock ignition mechanism of two kinds of single compounds octogen (HMX) and hexogen (RDX), the processes of undergoing the crushing, melting, sputtering, igniting and combustion of HMX and RDX single compound containing inert particles were captured by a drop weight impact device equipped with an optical observation system. Results show that the ignition is easy to occur around the sugar particle in the cases of HMX fine particle and RDX powder containing sugar. The combustion will propagate outward along the periphery of the sugar particle, and intense sputtering phenomena occur before the combustion reaction. In the HMX particle with sugar, the ignition occurs in the solid phase. In the RDX powder explosive with sugar, the explosive near the sugar particle enters into the melting state firstly, then the melting region expands gradually, and the ignition points are easy to appear in the molten liquid phase of RDX at the edge of the sugar particle. The ignition frequency of HMX and RDX with one or three sugar particles respectively was compared. Results show that the cases of three sugar particles are more likely to cause the ignition of explosives, because the more fragments are produced after crushing, which interact strongly with HMX or RDX single compound, and may lead the hot spots to form in multiple locations, and the combustion reaction will be more intense than that of the cases of single sugar particle. Finally, the upper and lower limit analysis shows that the addition of sugar particles can inhibit the ignition of HMX fine particles and promote the ignition of RDX powder explosive.

Key words: drop-weight impact; hexogen (RDX); octogen (HMX); ignition; mechanism; sugar particles

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018360

(责编:高毅)