

文章编号: 1006-9941(2010)05-0558-05

炸药研究中的微波效应及其机制

郁卫飞^{1,2}, 张同来¹, 左军², 李刚², 杨利¹, 李金山², 黄奕刚², 黄辉²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 对炸药研究中的各种微波效应进行了综述, 包括微波测试炸药性能的技术, 应用微波进行炸药合成/制备/干燥/回收等, 应用微波引发炸药等。分析了微波对炸药作用的基本原理, 并从微波对炸药材料中各种组分的加热作用具有选择性出发, 分析认为, 微波引发炸药的过程仍遵循微波热点引发理论, 可以解释微波有意/无意引发炸药的实验及其微观机制。

关键词: 物理化学; 微波; 炸药; 热点理论

中图分类号: TJ55; O64

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.018

1 引言

微波是一种电磁波, 频率在 300 MHz ~ 300 GHz 之间, 其能量远小于化学分子内化学键的离解能, 因此只能被分子吸收而不能直接引发化学键的断裂。微波不会直接引发炸药的燃烧或爆炸, 因而具有一定的安全性。早在 1958 年, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室就研究应用微波干涉方法测试炸药的爆轰过程^[1], 此后又有多种微波技术被引入到炸药研究中。1980 年代, 随着高功率微波技术的研究, 微波对武器炸药部件的可攻击性得到重视, 并开展了一系列实验研究。1990 年代及此后, 随着微波化学反应研究的深入, 微波参与炸药合成、制备过程等可行性引起普遍重视。本文尝试对炸药研究中的微波效应进行综述。

2 炸药研究中的微波效应

2.1 微波测试技术

美国劳伦斯利弗莫尔实验室使用波长 1 cm 的微波作用于含能材料爆轰过程, 爆轰波前沿为高密度离子化区, 微波不会穿透而使波阵面成为反射面, 反射波导入微波干涉仪, 测得高能炸药的爆速。经标定, 可以获得波阵面的速度、C-J 压力、波阵面前沿有效温度等信息。类似地, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室^[2-3]采

用微波干涉技术测试了 PBX9501 炸药在各种约束条件下的燃烧、爆轰反应。

美国海军水面武器中心 (NSWC) 将微波干涉技术引入用于测试枪弹发射药点火过程^[4-5]。反应开始时, 微波吸收和反射信号显示出特征性变化, 对应于热点在冲击波前沿的发展, 实验显示反应层内的热点反应接近于一级。将微波干涉信号输出和介电性质测试, 可以测出热点浓度随时间变化的函数关系。

加拿大研究人员^[6]使用共轴波导结构宽带微波多普勒干涉技术测试实现了爆速的非插入式测试。这种非插入方式, 可以测试爆炸气体混合物中爆轰波传播的连续过程。这种共轴结构可用断面电磁模式操作, 相速和群速频率独立于无损伤介质, 允许使用宽带远距离传感技术。利用单频条件下的断面电磁模式共轴系统, 对 $C_2H_2 + 2.5O_2$ 混合物和 $C_3H_8 + 5O_2$ 混合物的低压力 (0.53 ~ 10.66 kPa) 引发实验进行了测试。结果表明, 平均爆速测试值与独立的光电测试结果误差为 2%。这种技术特别适用于极限条件下不稳定爆轰传播的测试。

美国劳伦斯利弗莫尔实验室还研究发现, TATB 和 TATB 基 LX-17 炸药的微波介电常数随着其水分的增加而增加, 从而可以利用微波介电特性来测试炸药水分^[7]。微波测试技术还被用于研究固体火箭推进剂的燃烧过程^[8], 装药结构和内弹道^[9], 探寻隐藏炸药^[10-11]。

这些研究表明, 微波技术已经应用到炸药性能测试的多个方面。

收稿日期: 2009-12-29; 修回日期: 2010-03-08

基金项目: 中国工程物理研究院技术基础基金资助项目

作者简介: 郁卫飞 (1970-), 男, 副研, 从事含能材料合成与制备研究。

e-mail: yuwf_1988@sohu.com

2.2 微波对炸药的安全性

微波干涉技术通常均使用较低的微波功率。随着高功率微波技术研究的逐渐深入,高功率微波对武器部件尤其是高能炸药的安全性成为一个有必要研究的问题。美军方在其报告中设问,微波辐射能否通过介电方式,包括表面飞弧、粒子间弧光放电、微波感生电流的热效应等,引发含能材料的爆轰? 这些问题对于高功率微波武器研制和武器防微波技术均具有重要的意义。为此,美国军方开展了全频谱高功率微波对含能材料的辐射实验研究^[12]。样品包括相对稳定的航空燃料、极其敏感的叠氮化铅及斯蒂芬酸铅起爆药等。实验中微波频率 2.88 GHz,出射功率峰值 2.09 MW,功率密度 $1.13 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$,脉冲持续时间 6.4 μs ,能量通量为 $7.11 \sim 7.34 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$,脉冲间隔 50 pps,累计辐射剂量 $21.3 \sim 22.0 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$,结果表明,实验样品没有发生爆燃、爆轰或分解现象,可知高功率微波作用对含能材料没有特殊的敏感性。

中国工程物理研究院的左军等人^[14]开展了微波加热熔融 TNT 安全性的实验。结果表明,在持续加热 40 min、最大温升 $66 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 、最高温度达 $146 \text{ }^\circ\text{C}$ 等较为极端的实验条件下,样品的表面化学和分子结构均未发生变化,实验过程未发生燃烧、爆炸现象。

加拿大国防部研究人员^[13]对家用微波炉辐射的安全性进行了验证,取样种类包括 B 炸药、含铝 RDX/TNT 炸药、RDX 基 PBX、GAP 粘接剂、NTO/HMX/GAP 基 PBX、RDX/HTPB 基 PBX 等,取样量 20 ~ 35 g。结果表明,部分样品在实验条件下发生了燃烧,但均未发生更剧烈的行为。

2.3 微波在炸药合成/制备中的应用

印度 Pune 大学研究人员^[15]在乙二醇和盐酸羟胺的 VNS (Vicarious Nucleophilic Substitution of Hydrogen) 反应中使用微波辐射制备二氨基乙二醇 (DAG),反应时间从以往的数小时缩短为 2 ~ 3 min,收率 60%,与普通方法相当。DAG 在碱性溶液中使用微波辐射 20 min 制备得到 3,4-二氨基咪唑 (DAF),收率 70%,且省去了以往文献方法中的高温高压反应条件。进一步研究表明,可采用一锅法直接从乙二醇经微波辐射制备得到 DAF,反应时间 30 min,收率 70%,收率优于两步法微波反应。

2,4-二硝基咪唑炸药合成反应的最后一步,通常以氯苯作溶剂,由 1,4(5)-DNI 经 $120 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热 50 h 反应后得到目标产物,产率约 80%。Bhaumik^[16] 等人采用微波加热的方式,将 1,4(5)-DNI 在苯腈溶剂中加

热重排得 2,4-DNI,反应 2 min 产率即可达到 79%,重现性好,易于放大,目前已用于实验室小试。刘慧君等^[17]在氯苯溶剂中对浓度 10% 的 1,4(5)-DNI 进行微波加热重排,反应 10 min 产率达到 92%。

俄罗斯圣彼得堡工学院实验^[18-19]研究比较了通常方式和微波加热在高氯酸·[四氨·双(5-硝基四唑)]合钴(III)(BNCP)炸药合成中的效应。另外,他们尝试将微波加热和通常加热方式联合^[20],用于合成高氯酸·[五氨·四唑]合钴(III)和高氯酸·[四氨·双(四唑)]合钴(III)。

法国 SNPE 研究人员^[21-22]开发了一种用微波加热处理硝化甘油(NG)生产过程母液的技术,母液为 H_2SO_4 71%, HNO_3 11%, H_2O 15%, NG 2.5%, NO_x 0.5% 的混合物,处理工艺需要降解去除 NG,重新浓缩,再循环回用。原先采用蒸汽方式将 NG 分解为 NO_x , CO_2 , CO , 和 H_2O ,改用微波加热方法,加热过程不发生接触,避免腐蚀,不发生稀释,有利于后续的浓缩。微波方法对 NG 的去除率大于 90%, H_2SO_4 回收率 82%,无需再浓缩。整个过程符合安全标准。

2.4 美国国防部退役技术项目中的微波

美国国防部弹药中心在 1990 年代设立联合退役技术项目,针对十年内 53 万吨废弹药开展处置技术研究。该项目涉及的处置过程包括军用弹药的拆卸、拆迁、回收、回用、替代销毁等,关键之处是弹药中的炸药、推进剂、烟火剂的资源回收和回用(resource recovery and reuse, R3)。海军 NSWC 的相应研究^[23-26]表明,联合退役项目中的微波加热方法已经试用于 TNT 基炸药的拆卸,并进行了实验室中试(kilograms/day)实验。

事实上,美国军方早在 1970 年就开始了微波熔出炸药技术的研究^[27],他们利用微波介电加热原理,将微波馈入到炸弹内腔,使炸弹内腔的炸药成分直接熔出,并予以回收。与传统的溶解、分离、纯化、回收程序相比,微波熔出法排除了水、空气、溶剂等的使用,直接得到无污染产品,大幅提高回收效率,具有经济性和环境友好的特性。进一步研究^[28]显示,微波熔出技术耗能相对较小、过程简单、便于移动、安全性优于其他技术,回收材料适合于后续的回用或销售。已经应用微波熔出技术的炸药包括在 750 磅炸弹中试用的 Tritonal,以及 TNT, B 炸药, H-6, Amatol, Cyclitol, Octol, Tetrytol, Minol II, 和硝酸铵等,相关研究还申请了专利^[29]。

2.5 微波触发炸药的实验

日本横须贺国防研究院化学部的 Hasue 等^[30]对微波触发炸药问题进行了长期的实验研究。他们的研

研究表明,在 2.5 kW 微波作用下,乳化炸药可能由于其水分急剧蒸发而不能被触发,dynamite 炸药很容易被触发,PETN、RDX、tetryl、和 HMX 等炸药也能被触发,添加 SiC 和活性炭等高介电损耗材料的炸药样品可以在较低的功率下被触发。进一步研究^[31-32]显示,炸药样品在近熔点区域升温较快,触发能 E_{in} 约为数千焦耳;可将各种炸药按照触发延迟时间依次排序为 NH_4NO_3 , tetryl, PETN, RDX, HMX, 和 TNT; 样品在触发温度附近需要的延迟时间为 6 ~ 109 s; 而当炸药密度较高时,触发所需的平均入射功率则较小。

3 讨论

3.1 微波作用基本原理

微波的能量非常小,远远小于物质分子化学键振动所需能量,不足以直接引发化学键的断裂。物质吸收微波的原因主要是由于物质内部的偶极矩,包括极性分子的偶极矩和非极性分子之间的瞬间偶极矩,吸收微波转化为分子内能,产生吸收微波和升温的效应。极性较大的水分子吸收微波能量很强,而多数炸药呈对称分子结构,吸收微波的能力极弱。但事实上,如前文所述,微波对炸药表现出了各种截然不同、乃至看似矛盾的效应。我们尝试对此做出解释。

先将前述实验大致分成三类。第一类是用微波来测试炸药内部信息;第二类是使用微波来实现炸药的干燥、熔化等;第三类是使用微波来引发炸药。第一类微波的功率很小,一般在毫瓦至瓦级,不足以让炸药升温至快速热分解的程度,事实上也尚无此类微波引发危险的报道。第二类和第三类微波的功率较大,通常达到数百至数千瓦,辐射时间在数秒至数十分钟之间,热效应非常显著,下文尝试以热效应来解释第二类和第三类效应。

3.2 微波对单质炸药的作用

单质炸药本身吸收微波的能力往往很弱,使得空气、器壁等周边环境对微波能的吸收作用不能被忽略,且炸药吸收微波升温后,也会向环境传热。实际用于炸药材料升温的能量只占了很低的一部分。据估算^[30],炸药样品吸收功率仅为 8% ~ 26%。这使得理论上可以加热炸药至热分解乃至热爆炸的能量实际上仅仅导致炸药升温而已,只要注意温度监控,单质炸药被意外引发的可能性极小。

3.3 微波对含水分或溶剂炸药的作用

对于含水分炸药而言,单位质量水吸收微波的能力比炸药高 4 ~ 5 个数量级,即使低至 0.1% 的水分,

也会吸收大部分的微波,从而快速升温汽化,实验研究^[33-34]表明,微波干燥耗能低、耗时少,非常适合于含水炸药的干燥。这也意味着,微量水分会严重降低炸药吸收微波的量,增大微波触发炸药的延迟时间。

对于含大量有机/无机溶剂的炸药合成/制备过程而言,由于多数有机/无机溶剂吸收微波的能力均大大高于炸药材料,使得溶剂的温度高于炸药材料,只要注意溶剂温度监控,炸药被引发剧烈热分解的可能性极小。但 SNPE 的研究文献[21-22]中,微波可以催化加速溶液中残留硝化甘油的分解反应,这可以归于微波催化。

3.4 微波对炸药-添加剂-水分混合体系的作用

实际炸药配方中,往往存在着多种组分,其中的炸药材料往往是吸收微波能力最弱的组分,而水分通常是吸收微波能力最强的组分,此外还含有一些添加剂如石墨、石蜡等,这些添加剂吸收微波能力介于炸药和水分之间。典型地,以炸药材料、添加剂、水分组成的三元体系为例,如图 1,在 $0 \sim t_1$ 期间,馈入微波主要被水分吸收,使水分快速升温汽化;在 $t_1 \sim t_2$ 期间,汽化水分完全离开;在 $t_2 \sim t_3$ 期间,馈入微波主要被添加剂吸收,添加剂快速升温直至临界温度 T_2 ,这时炸药的温度升幅很小,毗邻添加剂的炸药受到传热作用的影响,温升较大;在 $t_2 \sim t_3$ 期间,添加剂继续升温并传热,毗邻添加剂的炸药温度超过临界温度,引发热分解。

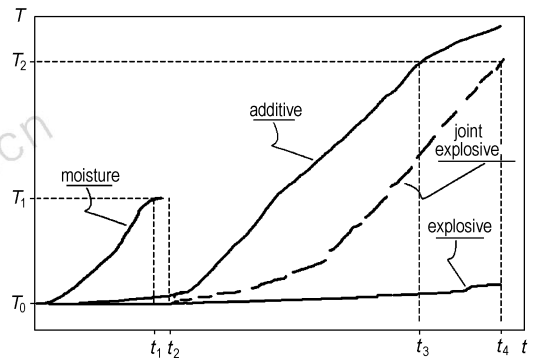


图 1 混合炸药各组分吸收微波升温的示意图

Fig. 1 Heating process of explosives-moisture-additive trinary system

在微波引发炸药的实验中,一般使用炸药-添加剂二元体系,其引发过程可用图中 $t_2 \sim t_4$ 时段来予以解释,即随着微波加热的进行,添加剂先于炸药快速升温并越过临界温度 T_2 ,然后以热传导方式促使毗邻炸药升温并被引发。

从图 1 可清楚地看出,引发危险的材料不会是水或炸药本身,而是吸收微波能力强、升温速度快于炸药的添加剂,这些添加剂成为引起毗邻炸药材料超温和导致炸药被引发的“热点”。可以想象,通常监测手段,只能测得图 1 中“explosive”线所示的作为主要组分的炸药的温度,而难于测得图 1 中“additive”线所示微量添加剂的温度及“joint explosive”线所示毗邻炸药的温度,这样的实验呈现出一种表象,即微波能在较低温度下引发炸药。但若考虑微波对不同组分的加热作用具有选择性时,就自然而然地意味着,这种表象在本质上仍然遵循热点理论。

3.5 讨论

在以往文献中,微波引发炸药的文献和微波用于炸药干燥、熔出等报道并存,但缺少对这些看似互相矛盾的实验现象的合理解释。本文给出的定性说法,可以较好地解释我们的实验现象^[14,35],也能在一定程度上解释已有文献中的实验现象。

从本文的定性说法,可以引申出两个观点。一是,对于某种特定的炸药配方,必须了解其添加剂组成,及其对微波的吸收能力,并且加上必要的安全试验,才能确切地知道,这种配方是否适合于微波加热。已经被证明适用的配方,即使微调了其中的添加剂用量,也可能对其微波效应造成极大的改变。二是,对于微波引发炸药的实验,所用添加剂的微波吸收能力越强,引发越容易。

4 结 语

低功率的微波测试仪器可用于炸药性能的测试,测试过程安全可靠。

微波对炸药的有意或无意引发,仍遵循热点引发理论,本质上是由于微量组分快速升温并引起毗邻炸药超温而形成的引发。炸药组分中不含有吸收微波能量较强的添加剂材料,可以充分地避免意外引发。

普通功率的微波辐射,可用于炸药合成、制备、分解、干燥等许多方面,这些应用的安全性受到炸药中微量添加剂等的影响,需要以具体的实验来进行验证。

普通功率的微波辐射,可用于炸药的引发,炸药中掺加吸收微波能量较强的添加剂,可使引发更容易。

参考文献:

- [1] Kury J. Informal progress report of the explosives group [R]. NTIS: DE97051333,1997.
 [2] Asay B, Dickson P, Henson B, et al. Effect of temperature profile on reaction violence in heated and self-ignited PBX 9501 [C] //

AIP Conference Proceedings, 620 (Shock Compression of Condensed Matter, Pt. 2), 2002: 1065 - 1068.

- [3] Zucker J M, Dickson P M, Parker G R, et al. Quantification of reaction violence and combustion enthalpy of plastic bonded explosive 9501 under varying confinement [C] // International Annual Conference of ICT, 36th (Energetic Materials), 85/1-85/12 (English) 2005 Fraunhofer-Institut fuer Chemische Technologie.
 [4] Glancy B C, Sandusky H W, Krall A D. Microwave interferometric hot spot density measurements in energetic materials [C] // Shock-Compression Condens. Matter-1991, Proc. Am. Phys. Soc. Top. Conf. ,7th, Meeting Date 1991: 663 - 666.
 [5] Glancy B C, Sandusky H W, Krall A D. Microwave interferometry of shock waves. II. Reacting porous media [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(10): 6328 - 6334.
 [6] Lee J J, Pavlasek T J F. Development of a broadband microwave interferometer for diagnostic measurements of detonations [C] // Non-Intrusive Combust. Diagn. , [Pap. Int. Symp. Spec. Top. Chem. Propul.]. 3rd, Meeting Date 1993: 285 - 293.
 [7] Pyper J W, Buettner H M, Cerjan C J, et al. The measurement of bound and free moisture in organic materials by microwave methods [R]. NTIS: DE87008745, 1984.
 [8] Anicin B A, Jojic B, Blagojevic D, et al. Flame plasma and the microwave determination of solid propellant regression rates [J]. *Combustion & Flame*, 1986, 64(3): 309 - 319.
 [9] 杨敏涛. BS310 微波干涉仪在武器研制中的应用 [J]. *测试技术学报*, 1996, 10(2,3): 164 - 169.
 YANG Min-tao. Application of BS310 microwave interferometer in weapon manufacture [J]. *Journal of Test and Measurement Technique*, 1996, 10(2,3): 164 - 169.
 [10] Kuznetsov A. Concept of a combined mobile device for explosives and landmines identification based on timed neutron source and electromagnetic UHF waves [J]. *NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*, 2002, 66: 21 - 32.
 [11] 黄平, 石未凡, 张存林, 等. 六硝基芪的太赫兹光谱研究 [J]. *含能材料*, 2009, 17(5): 544 - 548.
 HUANG Ping, SHI Wei-fan, ZHANG Cun-lin, et al. Study on tera-hertz spectroscopy of HNS [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(5): 544 - 548.
 [12] Murray F J, Moore C E, Wilczek F J. Microwave resonant absorption of potential exothermic compounds [R]. NTIS: ADA 279798, 1989.
 [13] McIntosh G. Effect of 2.45 GHz microwave radiation on diverse explosive DREV memorandum No. Tm-9702 [R]. NTIS: MIC-98-02114/XAB, 1997.
 [14] 左军, 韩超, 雍炼. 微波加热熔融 TNT 安全性的实验研究 [J]. *含能材料*, 2006, 14(4): 283 - 285.
 ZUO Jun, HAN Chao, YONG Lian. Safety of heating TNT in microwave oven [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(4): 283 - 285.
 [15] Kusrkar R S, Goswami S K, Talawar M B, et al. Microwave mediated fast synthesis of diamino glyoxime and 3, 4-diaminofurazan: Key synthons for the synthesis of high energy density materials [J]. *Journal of Chemical Research*, 2005, 4: 245 - 247.
 [16] Bhaumik K, Akamanchi K G. 2,4-Dinitroimidazole: Microwave assisted synthesis and use in synthesis of 2,3-dihydro-6-nitroimidazo[2,1-b] oxazole analogues with antimycobacterial activity [J]. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 2004, 41(1): 51 - 55.
 [17] 刘慧君, 樊月琴, 冯峰, 等. 微波辅助合成 2,4-二硝基咪唑 [J]. *含能材料*, 2010, 18(1): 1 - 3.

- LIU Hui-jun, FAN Yue-qin, FENG Feng, et al. Synthesis of 2,4-dinitroimidazole by microwave heating[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(1): 1–3.
- [18] Zhilin A Yu, Ilyushin M A, Tselinskii I V. Tetraamine-cis-bis(5-nitrotetrazolato-N2) cobaltate (III): Explosive for a safe initiating agent[J]. *Khimicheskaya Fizika*, 2002, 21 (8) : 54 – 57.
- [19] Ilyushin M A, Tselinskii I V, Zhilin A Yu, et al. Complex ammine cobalt (III) perchlorates as nontoxic (green) initiating explosives[C] // *Sovremennye Problemy Tekhnicheskoi Khimii, Materialy Dokladov Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi i Metodicheskoi Konferentsii*, Kazan, Russian, Dec. 22 – 24, 2004: 35 – 41.
- [20] Zhilin A Yu, Ilyushin M A, Tselinskii I V, et al. Complex energetic perchlorates of cobalt (III) aminates, with cyclopentamethylenetetrazole as ligand[J]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2005, 78(2): 188–192.
- [21] Cartier J P. Microwave thermal treatment of acid residues[C] // *Recents Prog. Genie Procedes*, 5 (12, Electr. Genie Procedes), 1991: 139–141.
- [22] Jean-Paul B. treatment of residuary acids by microwaves[C] // *AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings, Austin, TX, United States, Nov. 7–12, 2004, IC2/1-IC2/3*.
- [23] Burch D, Griggs J, Johnson M, et al. Recovery/reuse of energetics from military munitions [C] // *Proc. Int. Pyrotech. Semin.*, 24th, 1998: 101–112.
- [24] Burch D, Griggs J, Johnson M, et al. Demilitarization technology development for military munitions [C] // *Proc. Int. Pyrotech. Semin.*, 27th, 2000: 811–820.
- [25] Burch D, Griggs J, Johnson M, et al. Development of demilitarization technology for military munitions[C] // *Proceedings of the International Disposal Conference, 2nd, Linköping, Sweden, Nov. 9–10, 2000, Meeting Date 2000: 71–80*.
- [26] Burch D, Griggs J, Johnson M, et al. Demilitarization technology development[C] // *Proc. 28th Int. Pyrotech. Semin.*, 2001: 125–137.
- [27] Hayes R W. Melting explosives from obsolete 750 pound bombs with the use of microwave heating [C] // *Proceedings of Microwave Power Symposium, Milwaukee, US, 1974*.
- [28] Hayes R W, Frandsen R O. Microwave meltout of explosives from loaded munitions [C] // *CPIA Publ.*, 674 (Vol. 1, 1998 JANNAF Propellant Development & Characterization Subcommittee and Safety & Environmental Protection Subcommittee Joint Meeting, Vol. 1), 1998: 345–356.
- [29] Perry W L, Son S F, Assay B W. Microwave heating of energetic materials: NTIS: PAT-APPL-10-883 277 [P]. 2004.
- [30] Hasue K, Tanabe M, Nakahara S, et al. Initiation of explosives by microwave irradiation [J]. *Kogyo Kayaku*, 1985, 46 (2) : 87 – 92.
- [31] Hasue K, Watanabe N, Nakahara S, et al. Initiation of explosives by microwave heating [J]. *Kogyo Kayaku*, 1986, 47 (2) : 70 – 76.
- [32] Hasue K, Tanabe M, Watanabe N, et al. Initiation of some energetic materials by microwave heating [J]. *Propellants, Explos., Pyrotech.*, 1990, 15 (5) : 181 – 186.
- [33] YU Wei-fei, ZHANG Tong-lai, HUANG Yi-gang, et al. Effect of microwave irradiation on TATB explosive [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 142: 952–954.
- [34] 李永祥, 崔建兰, 王建龙, 等. 微波干燥 RDX 新技术研究 [J]. *火炸药学报*, 2008, 31 (3) : 41 – 43.
LI Yong-xiang, CUI Jian-lan, WANG Jian-long, et al. Study of a new technology about microwave desiccation of RDX [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31 (3) : 41 – 43.
- [35] 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 desiccation of TATB and RDX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12 (2) : 101 – 103.

Microwave Effects and Mechanism in Explosives Materials

YU Wei-fei^{1,2}, ZHANG Tong-lai¹, ZUO Jun², LI Gang², YANG Li¹, LI Jin-shan², HUANG Yi-gang², HUANG Hui²

(1. State Key Laboratory of Explosive Science and Technology, School of Mechano-Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Various microwave effects on explosive materials were summarized in this study including microwave measurement of explosive performance, microwave application to explosives synthesis/preparation/desiccation/recycle, and microwave initiation of explosives materials. From microwave fundamental and selective heating effect to components, it was derived that hotspot initiation theory should be effective in explanation of microwave initiation process including intentional/accidental initiation experiments and mechanism.

Key words: physical chemistry; microwave; explosive; hotspot theory

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.018