

钝感火工品中新技术、新含能材料研究进展

王宇,魏超,张嵩

中国航天科技集团公司第四研究院第41研究所,西安710025

摘要 火工品的敏感度及抗干扰能力是影响弹药安全性的重要因素。因此,大力发展钝感火工品,对提高弹药安全性有重要意义。本文对钝感火工品领域的激光点火、爆炸逻辑网络和冲击片雷管等前沿技术进行了综述,介绍了其结构原理、发展历程和国内外最新的研究成果,同时通过对国内外技术水平进行比较,总结了中国与国外技术的差距及技术瓶颈,展望了上述技术未来的发展趋势。另外,对国外最新研制成功的LLM-105、DAAzF、FOX-7、TNAZ等新含能材料进行了综述,介绍了这几种含能材料在安全性和能量水平等方面的巨大优势,并对其在钝感火工品中的应用前景进行展望。最后,总结了中国在钝感火工品研究中存在的不足,并对中国应走的研究路线提出了几点建议。

关键词 火工品;激光点火;爆炸逻辑网络;冲击片雷管;含能材料

中图分类号 TJ45

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.10.011

Developing Status of New Techniques and New Energetic Materials in Insensitive Pyrotechnics

WANG Yu, WEI Chao, ZHANG Song

The 41st Institute, The Fourth Academy, Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710025, China

Abstract The sensitivity and anti-interference ability of pyrotechnics is important to ammunition safety. Therefore, improving insensitive pyrotechnics is the key point for the insensitive weapon research. Most advanced techniques, such as light, electricity, and magnetism are taking place of fire and heat in pyrotechnics, making pyrotechnics much more safety. The advances in the areas of new techniques and new energetic materials for insensitive pyrotechnics are discussed. New techniques, such as laser ignition, explosive logic circuit, and slapper detonator, are reviewed. The structure, principle, history, and latest achievements are introduced. The research level between China and developed countries is compared with each other; the developing trend of these techniques is talked about. In addition, new energetic materials invented by developed countries, such as LLM-105, DAAzF, FOX-7, TNAZ are summarized, and their developing status is introduced. By comparing the differences between China and developed countries, the shortcoming of China is pointed out, particularly some deficiencies in insensitive pyrotechnics. Some suggestions about the development strategy of insensitive pyrotechnics are given. Insensitive pyrotechnics is the key point of weapon safety, since the battle field survivability of soldiers and battle platforms become the factor of victory or defeat. It is also important to efficiently translate them into the productivity and fighting capacity by following the latest scientific research, working hard on self-determination innovation, and planning new product applications.

Keywords pyrotechnics; laser ignition; explosive logic circuit; slapper detonator; energetic material

0 引言

现代战争中,日益恶劣的战场环境使作战人员和武器平台的战场生存能力受到前所未有的挑战,提高武器弹药的使用安全性和抗打击、防殉爆能力迫在眉睫,这使得钝感弹药成为当今世界的研究热点之一。火工品在弹药中作为引传爆

装置时,处在发火序列的起始位置,往往是整个弹药中最敏感的部分。传统火工品敏感度较高、抗干扰能力弱,遇到意外刺激时容易误发火,经常成为弹药安全事故的元凶,因此在发展钝感弹药时,必须首先大力发展钝感火工品。

目前,光、电、磁等新技术发展速度较快,在火工品领域也

收稿日期:2012-10-23;修回日期:2013-01-14

作者简介:王宇,博士,研究方向为钝感火工品,电子信箱:billwang2002@163.com

得到了应用,正在逐步取代传统的传火、传热和机械式的火工品,使得新型火工品可靠性更高、抗干扰能力更强,尤其是冲击片雷管,其安全性相对传统雷管更是产生了质的飞跃;含能材料也变得更加钝感、高能,综合性能优异,为钝感火工品的发展提供强大助力。总体而言,现代火工品正在向更灵巧、更安全、更智能的方向发展,在钝感弹药、灵巧弹药领域也发挥着越来越重要的作用。本文对近些年钝感火工品领域诞生的几项新技术、新材料进行介绍。

1 钝感火工品中的新技术

1.1 激光点火技术

激光点火技术利用激光能量来引爆或引燃含能材料。与传统的点火方式相比,激光点火的显著优点是抗电磁干扰能力强,因此,在大量使用强电磁脉冲弹(或称微波弹)的现代战场上生存能力强,大大提高了武器系统的安全性,是当今钝感弹药研究领域中的热门、前沿技术。20世纪70年代,美国基本完成了激光点火技术的基础研究,实现了激光器的低功耗和小型化,使激光点火技术走出实验室,形成可供导弹和航天器使用的技术。随后在80年代末,美国提出了LIGHT研究计划,其短期目标是让激光束先照射少量敏感的点火药,将其引燃,进而引爆主装药,并将这方面的研究成果用于洲际弹道导弹和空空导弹的GSGG激光器和YAG激光器点火系统;远期目标是不再使用其它敏感的点火药作为点火媒介,激光直接点火,即激光束直接照射到主装药上,实现引爆,实现弹药真正意义上的钝感化。目前,美国已在激光直接点火技术上获得成功,开始应用到火箭弹和导弹系统中,并建立了相应的标准和规范^[1-2]。另外,美国于2001年进行了激光点火氢燃料技术的基础性研究^[3];澳大利亚于2005年将该技术应用于静态高压内燃机中,使内燃机在使用寿命和能源利用率上都大大优于传统的火花塞式点火装置^[4];印度则将该技术应用于燃烧弹中^[5]。目前,澳大利亚正计划将该技术应用于超音速冲压喷射装置^[6]。

近些年,中国在激光点火技术上也有很多新的研究成果。南京理工大学针对激光与含能材料相互作用的机理和特性进行了深入研究,最新研制的Al/Ni纳米复合含能材料受激光点火后,存在着较长时间的火花抛洒,对实际点火/起爆过程十分有利,在激光点火装置中具有广阔的应用前景^[7]。2010年,徐娇等^[8]针对边界条件对激光点火性能的影响进行了研究,对激光点火敏感度和点火延迟时间等关键因素进行了理论分析;复旦大学的唐璜等^[9]设计了激光点火装置的光路健康度检测与内窥式光纤成像系统,用于对光纤光路和点火过程的实时监测,大大提高了激光点火系统的可靠性、安全性,对推进激光点火技术的实用化、产业化具有重要意义。2011年,西安近代化学研究所(204所)和中国航天科技集团公司第四研究院第41所针对RDX-CMDB和含CL-20的改性双基推进剂的激光点火特性进行了研究,表明中国未来有望将激光点火技术应用于固体火箭发动机中^[10-11];中国工程物

理研究院赵兴海等^[12]设计了一种控制Nd:YAG脉冲激光能量通断的光纤直接连接型光开关,建立了光纤耦合模型,能够满足激光点火系统大容量、高隔离度的需求。目前,中国可用于激光点火系统的激光器产品有:固体激光器、半导体激光器、CO₂气体激光器、闪光灯钨玻璃激光器等。激光点火技术在中国仍然不够成熟,存在使用寿命短、点火裕度不足、作用时间长等问题。因此,在武器和航天领域还未见有型号使用。另外,中国目前可实用的激光点火器只能点燃敏感的烟火剂和起爆药,即激光直接点火技术尚未得到突破。因此,中国在激光点火技术研究水平上与美国仍存在一定的差距。

1.2 爆炸逻辑网络技术

爆炸逻辑网络(Explosive Logic Circuit)作为新一代的引传爆装置,具有布尔逻辑判断和类似电路的信号处理能力,不但具有智能判断的功能,而且相对传统火工品安全性大幅度增加。它以炸药为动力源和信息载体,具有逻辑判断功能,能够准确地识别起爆时序。只有当雷管按爆炸逻辑网络设定的时序起爆时,爆炸信号才能传递至传爆药;否则爆炸信号将被爆炸逻辑网络隔离,充分确保了主装药的安全,实现起爆、传爆装置的安全化、灵巧化、智能化。

爆炸逻辑网络的关键技术就是利用爆轰波传播的间隙/接触效应和拐角效应。以拐角效应为例,在离散作用下,当爆轰波传递至不同直径的拐角形药柱时,会在拐角位置产生一个低压区。爆轰波由A向B传播时(图1(a)),D位置成为爆轰波和爆轰产物的低密度分布区,也称暗区,药柱B的直径足够大,剩余的爆轰波传播通道仍大于临界直径(R),爆轰波就可以在药柱B中继续向下传播;但若爆轰波由B向A传播(图1(b)),药柱A的剩余通道小于临界直径,爆轰波就无法在药柱A中传播下去,起到阻断爆轰传播的作用。

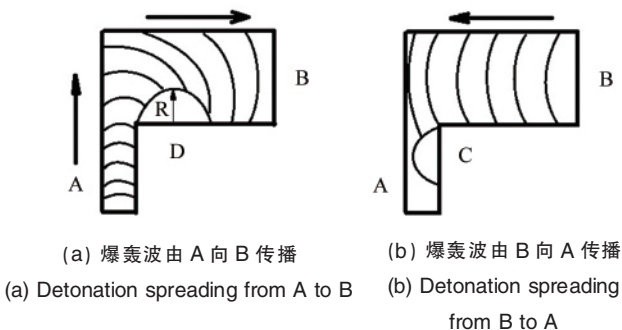


图1 爆轰波的拐角效应原理示意

Fig. 1 Corner effect of detonation wave

基于拐角效应研制的单通元件结构简单、可靠性高,在弹药的传爆装置中可以发挥智能判断和安全保险的作用,有效提高弹药的抗干扰、抗打击能力,降低弹药误爆概率。常用的爆炸逻辑基础元件有爆炸零门、破坏性爆炸桥、爆炸二极管、爆炸或门和爆炸与门等,如图2所示。

美国最先于20世纪60年代开始研究爆炸逻辑网络技术,XTX-8003、PBXC-303等炸药的研制成功使得非牛顿流体挤入小尺寸、变直径、不规则形状的装置中得以实现,解决

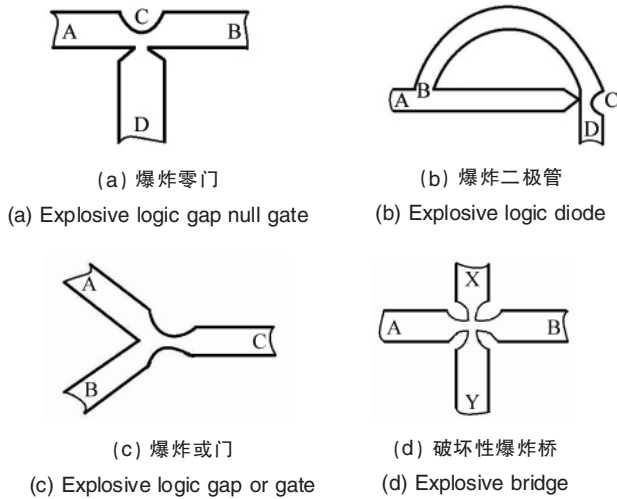


图2 爆炸逻辑元件原理示意

Fig. 2 Principle diagram of explosive logic circuit

注:图中A、B、C、D为逻辑功能区域或节点。

Notes: A, B, C, and D are the areas or points of logic function.

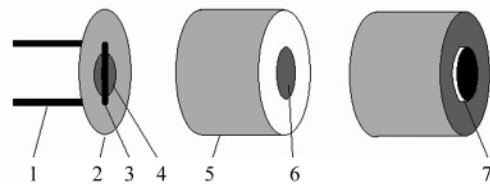
了直径在 1mm 左右的小直径装药技术;2002 年,美国发现多孔硅复合体系具有爆炸特性后,开始了含纳米多孔硅含能复合材料的爆炸逻辑网络的研究。现在,美国已经在三叉戟、响尾蛇等多个导弹型号中使用了爆炸逻辑网络。另外,纳米多孔硅爆炸逻辑网络也开始应用于计算机芯片引爆、小卫星推进器等领域^[13]。法国于 20 世纪 80 年代开始了相关的工作。现在,已经在某型号手榴弹的引信装置中使用爆炸逻辑网络^[14]。俄罗斯使用炸药溅射镀膜技术制造爆炸逻辑网络。其中,使用阴膜浇注法制造的 HMX 为主体的爆炸逻辑网络已经得到了应用^[15]。

中国从 20 世纪 90 年代开始这项技术的研究,最近 5 年发展较快,取得了诸多突破性成果。2007 年,中国工程物理研究院研制出多点导通爆炸逻辑网络闭合开关,具有电感低(小于 5nH)、耐高电压(上百千伏)、同步性好的优点,在小型脉冲功率发生器上具有广阔的应用前景^[16]。2008 年,西安石油大学和西安市兵器工业第 213 研究所研制出基于爆炸逻辑网络的电子安全系统,可以准确识别发动机点火、离轨、加速信号和起爆指令,按照爆炸逻辑网络的解除保险时序适时起爆战斗部^[17,18];西安 213 所的常红娟等^[19]研究了爆炸逻辑网络的封装技术,解决了爆炸逻辑网络的低温传爆不稳定、封装可操作性差等问题。2009 年,国防科技大学的龚柏林^[20]设计成功间隙宽度在 0.5~0.9mm 的爆炸间隙零门,在传爆装置微型化上取得了进展。2010 年,吴克刚^[21]设计了一种非时序爆炸异步与门,有效解决了传统异步与门通道交叉问题。另外,中国工程物理研究院还研制成功了多孔硅/硝酸盐复合材料,设计了八分圆爆炸逻辑网络,有望应用于定向战斗部中^[13]。北京理工大学以爆炸零门为基本元件,设计了通道转换型“二入四出”爆炸逻辑网络模块,可用于定向战斗部起爆系统^[22]。

目前,爆炸逻辑网络已成为引信系统智能化、钝感化的关键技术和尖端技术,可有效提高火工品的可靠性和安全性,在武器弹药的安全保险和起爆状态控制机构中具有广阔的应用前景,大幅推动钝感武器的发展。

1.3 冲击片起爆技术

冲击片雷管最初是由美国于 20 世纪 70 年代发展起来的,当时主要用于核武器。随后,开始在常规武器中应用。目前,该技术在国外已经比较成熟,应用也较广泛。它主要由基片、爆炸箔、飞片、加速腔、电缆、炸药和外壳组成(图 3)。其原理为,对金属爆炸箔通以强电流脉冲,箔发生爆炸形成高温高压的等离子体,剪切并驱动置于金属箔上面的塑料薄膜(飞片)在加速腔内高速飞行,飞片撞击炸药后起爆炸药。



1-电缆 2-基片 3-爆炸箔 4-飞片 5-外壳 6-加速腔 7-炸药

图3 冲击片雷管原理示意

Fig. 3 Principle diagram of impact slapper detonator

冲击片起爆技术的问世给雷管带来了革命性的进步。其最显著的特点就是安全性高,这是因为冲击片雷管中不含敏感的起爆药,全部为相对钝感的猛炸药。另外,能量转换元件(爆炸箔、飞片)与炸药不直接接触,只有在特定的强电流脉冲作用下,爆炸箔爆炸驱动飞片以一定的速度撞击炸药才能起爆炸药,所以冲击片雷管的起爆条件在自然界及通常的战场电磁环境下是不可能产生的。而传统的桥丝式或火花式火工品的能量转换元件与炸药直接接触,意外爆炸的风险相对高很多。因此,冲击片雷管在静电、射频、核电磁脉冲、闪电、瞬变电脉冲及杂散电流等恶劣电磁环境下可靠性高、生存能力强,大幅度提高了武器系统在全寿命期间,各环境剖面下的安全性^[23]。

美国在 20 世纪 90 年代就已有数十种武器型号使用了冲击片雷管。现在,冲击片雷管已经实现量产,在陶-2B 反坦克导弹、爱国者导弹、ATACMS 陆军战术导弹中都得到应用^[23]。2004 年,美国 KDI 公司将冲击片雷管用于电子安全与解保险装置,采用微电子技术将高压电容、半导体开关、爆炸箔等集成在一个元件上,使起爆电压降到 1250V,相对以往产品大为降低^[24]。2007 年,美国 e2v 公司公布的冲击片起爆装置采用了陶瓷贴片电容和三电极触发开关,使整个装置体积进一步减小,发火能量降到 0.45J^[25]。2008 年,Prinse 等^[26]公布的微芯片式冲击片雷管,将脉冲功率和爆炸箔起爆两个单元集成在一个芯片上,使体积减小到 8cm³,发火能量降到 0.05J。2009 年,Desal^[27]提出采用沉积、光刻手段将爆炸箔、飞片和加速腔加工在基板上使之一体化,大大提高了冲击片雷管的空间和能量

利用率。以上研究表明,在冲击片起爆领域,国外正向低压冲击片技术、一体化、小型化安全起爆技术方向发展。

20世纪80年代,中国开始研究冲击片起爆技术。近几年,已经在理论研究和产品研制上获得突破。2010年,中国工程物理研究院的付秋波^[28]对冲击片雷管的关键部件——爆炸箔进行了试验研究,用光纤台阶法测试了不同厚度和桥区尺寸的爆炸箔驱动飞片的情况,获得了最佳的爆炸箔厚度,对冲击片雷管进行了最优化设计。2011年,薛朝妹等^[29]提出了基于 Rogowski 线圈的冲击片雷管无损耗检测方法,解决了常规方法检测发火电流时测量数据存在误差,不能真实反映发火过程的问题;赵翔等^[30]对冲击片雷管中激光驱动的飞片速度进行了理论计算,为激光驱动的冲击片雷管的研制提供了理论研究基础。2012年,西安 213 所的金丽等^[31]通过实验得出,冲击片雷管在小于 8mm 的传爆间隙下,仍能可靠起爆裸装钝感 JHB-1 药柱,对研制爆炸箔直列式起爆系统具有一定参考意义;韩克华^[32,33]通过实验研究了冲击片雷管高压脉冲功率源的输出特性规律,结果表明,加载电压为 2.2kV 时,高压脉冲功率源爆发功率最大,金属桥箔转化给飞片的能量最大,为冲击片雷管优化设计提供了参考依据;中国石化的郑伟林^[34]对冲击片雷管在石油射孔弹中应用的关键技术进行了探索式研究,表明中国有望在采油领域应用冲击片雷管。目前,中国工程物理研究院已开发出多种型号的冲击片雷管,如以 HNS 为基的 CL03 冲击片雷管已成功用于某鱼雷战斗部和某空射巡航导弹中,另外,CL04 抗高过载冲击片雷管有望用于侵彻武器战斗部,CL05 插针式冲击片雷管正在开发当中^[35]。

通过对比可知,中国目前在冲击片雷管领域仍然以理论研究和性能优化为主,实际应用产品较少,而欧美发达国家已经大量、全面地实现了产品的应用。中国的主要差距在于冲击片雷管体积大、成本高。另外,中国冲击片雷管的脉冲功率源系统体积为 50~100cm³,而美国的产品小于 20cm³,差距显而易见。

2 钝感火工品中的新含能材料

2004年初,由法国、瑞典及芬兰联合组建了欧洲含能材料公司(ERENCO),一跃成为目前欧洲最大的火炸药研究、制造、销售机构。另外,法国的 Societe Nationale des Poudres et Explosifs 公司(SNPE)、美国的 Los Alamos 国家实验室、Lawrence Livermore 国家实验室等也都在钝感含能材料领域非常活跃,科研成果极为丰硕,近 20 年的时间里合成出了多种性能优异的钝感炸药,包括 LLM-105、DAAzF、FOX-7、TNAZ 等。这些新材料的诞生,在钝感弹药领域具有划时代的意义,一旦获得广泛应用,将会使钝感弹药的水平产生质的飞跃。

2.1 LLM-105

LLM-105(1-氧-2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪)首先由美

国 Lawrence Livermore 国家实验室于 1995 年首次合成,德国和英国也相继合成成功,密度为 1.913g/cm³,理论爆速为 8560m/s。它的出现是高能钝感炸药领域的重大突破。首先,它耐热性好,在温度高于 300℃ 时开始分解,在 343℃ 和 350℃ 时有放热分解;其次,机械感度低,撞击感度 $H_{50}=117\text{cm}$;最后,它的能量比三氨基三硝基苯(TATB)高 25%。因此,综合性能优异,适用于钝感传爆药、主装药,尤其是在抗高过载的钻地武器中具有巨大的应用潜力,是美国当前的研究重点之一^[36]。

目前,中国关于 LLM-105 的追踪报道较少。由于合成困难,国外也一直难以实现批量生产,美国在 2001 年达到了 2kg 量级的实验室合成量,下一步将改进合成途径、降低成本、工艺放大作为研究重点^[35]。预计 LLM-105 将会在核武器用钝感传爆药、钝感主装药中具有一定的应用前景。

2.2 DAAzF

DAAzF(3,3'-二氨基-4,4'-偶氮呋喃)首先由俄罗斯合成,美国随后仿制成功。它热稳定性好,DSC 测定 315℃ 开始分解,同时对撞击($H_{50}>320\text{cm}$,12 型)、摩擦(>36kg,BAM)和电火花(>0.36J)都不敏感,安全性能与当前广泛使用的钝感传爆药六硝基芪(HNS)相当。另外,它的密度为 1.767g/cm³,生成热较高,为 535kJ/mol,爆速 7600m/s,能量又略高于 HNS,有望取代 HNS 成为新一代的钝感传爆药^[36]。

2.3 FOX-7

FOX-7(1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯)首先由瑞典国防研究院高能材料研究所和美国合成^[35]。晶体密度为 1.885g/cm³,生成热-133kJ/mol,计算爆速 9040m/s,爆压 36.04GPa,能量与黑索金(RDX)接近;与此同时,它的爆燃点>240℃,热稳定性好,分子内和分子间存在大量氢键,因此,感度很低,接近 TATB,所以,FOX-7 是极为理想的高能钝感炸药。另外,FOX-7 与多种聚合物、异氰酸酯和含能增塑剂相容性好,在将来有望取代 RDX,是当今全世界关注的热点。

目前,FOX-7 已有产品供应,但价格偏高,难以达到应用水平。瑞典 FOX-7 的合成已扩大到中试每批生产 7kg、每天生产两批的规模,瑞典的 EXDLO Bofors 公司准备将 FOX-7 的生产扩大到工业规模^[35,37]。

2.4 TNAZ

TNAZ(1,3,3-三硝基氮杂环丁烷)的能量水平介于 RDX 和奥克托金(HMX)之间,由美国于 1984 年首先合成。它热稳定性优异,起始热分解温度超过 240℃,安全性好,它的密度为 1.834g/cm³,生成焓达 26.1kJ/mol,能量较高(比 TNT 高约 60%)。因此,TNAZ 也是极为理想的高能钝感炸药。它最吸引人的性质是熔点低,约 100℃,是 TNT 很好的替代品。另外,TNAZ 与铝、钢、黄铜及玻璃均相容,且不吸湿。

TNAZ 目前还没有产品供应。1983 年实现最原始的 TNAZ 合成,但步骤多、得率低(<5%)。因此,当时根本无法使其商品化。后来,美国改进工艺,使得率提高到 70%。目前,TNAZ 只能以约 50kg 级的规模生产。由于工艺中使用的催化

剂过于昂贵, TNAZ 的生产成本仍较高^[37,38]。

3 结论

声、光、电、磁,尤其是电子技术、纳米材料的飞速进步,为火工品技术的发展带来了前所未有的机遇。美、俄、法等军事强国将这些新技术及时地应用到了火工品领域,收到了很好的效果,大幅度提高了新型火工品的安全性、可靠性,也令这些国家在钝感弹药技术水平上处于领先地位。中国在钝感火工品技术上的研究虽然起步较晚,但紧追国际先进水平的脚步从未停止。尤其是近些年,国家对航天和兵器工业的高度重视,使得追赶速度加快,国际尖端技术正在被逐一突破。但是,与美、俄等技术先进国家相比,中国仍然存在 10 年甚至 20 年的差距,主要体现在技术创新程度低、产品市场化应用进程缓慢等。因此,在跟踪国外最新研究成果的同时,也应该大力提倡独立的技术创新,注重新产品的应用规划,尽快将其转化成为生产力和战斗力。

钝感火工品的水平,在一定程度上决定着—个国家钝感弹药的技术水平。未来战争中,士兵和武器平台的战场生存能力也许会成为决定胜败的关键因素,应该予以高度重视,力争赶超美、俄等先进国家,跻身世界军事强国之列。

参考文献 (References)

- [1] Setchell R E. Prompt laser ignition and transition to detonation in a secondary explosive, ConF-9404141[R]. University of California, 1999.
- [2] Roman N B M. Laser ignition of explosives and its application in a laser diode based ignition system[C]. Sweden: Proceedings of 16th International Pyrotechnics Seminar, 1991.
- [3] Lee T W, Jain V, Kozola S. Measurements of minimum ignition energy by using laser sparks for hydrocarbon fuels in air: Propane, dodecane, and jet-A fuel[J]. *Combustion and Flame*, 2001, 125(4): 1320-1328.
- [4] Weinrotter M, Kopecek H, Winter E, et al. Application of laser ignition to hydrogen-air mixtures at high pressures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, 30(3): 319-326.
- [5] Srivastava D K, Weinrotter M, Iskra K, et al. Characterisation of laser ignition in hydrogen-air mixtures in a combustion bomb [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(5): 2475-2482.
- [6] Brieschenk S, O'byrne S, Kleine H. Laser-induced plasma ignition studies in a model scramjet engine [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 160(1): 145-148.
- [7] 金晓云, 胡艳, 沈瑞琪, 等. Al/Ni 纳米复合含能材料的制备及其激光点火性能研究[J]. *爆破器材*, 2012, 41(3): 12-15.
Jin Xiaoyun, Hu Yan, Shen Ruiqi, et al. *Explosive Materials*, 2012, 41(3): 12-15.
- [8] 徐娇, 吴立志, 沈瑞琪, 等. 边界条件对激光点火性能的影响 [J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 418-423.
Xu Jiao, Wu Lizhi, Shen Ruiqi, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 418-423.
- [9] 唐璜, 冯阳, 赵栋, 等. 激光点火检测系统的研究 [J]. *激光杂志*, 2010, 31(2): 46-47.
Tang Huang, Feng Yang, Zhao Dong, et al. *Laser Journal*, 2010, 31(2): 46-47.
- [10] 郝海霞, 裴庆, 南宝江, 等. RDX-CMDB 推进剂激光点火特性 [J]. 含能材料, 2011, 19(3): 276-281.
Hao Haixia, Pei Qing, Nan Baojiang, et al. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2011, 19(3): 276-281.
- [11] 郝海霞, 南宝江, 安亭, 等. 含 CL-20 改性双基推进剂激光点火特性 [J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 1-7.
Hao Haixia, Nan Baojiang, An Ting, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 1-7.
- [12] 赵兴海, 杨波, 单光存, 等. 激光点火系统用高功率光纤开关[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(4): 939-942.
Zhao Xinghai, Yang Bo, Shan Guangcun, et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(4): 939-942.
- [13] 黄亨建, 罗华平, 阳世清, 等. 炸药网络、挠性炸药及反应材料在高效毁伤弹药中的应用[C]//2008 年钝感弹药学术研讨会论文集. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008: 48-53.
Huang Hengjian, Luo Huaping, Yang Shiqing, et al. Application of explosive logic circuit, flexibility explosive and reaction materials in high energy ammunition [C]// Proceedings of Insensitive Ammunition Symposium. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2008: 48-53.
- [14] Reass W A, Bowman D W, Gribble R F, et al. Capacitor and rail-gap development for the Atlas machine Marx modules [C]//10th IEEE International Pulsed Power Conference. Chengdu, 1995: 522-527.
- [15] Mangeant C, Lassalle F, Eplattenier P L, et al. SYRINX Project: Compact pulse-current generators devoted to material study under isentropic compression loading [C]//13th IEEE Int Pulsed Power Conference, Wuhan, 2001: 254-257.
- [16] 王桂吉, 孙承纬, 谭福利, 等. 多点导通爆炸逻辑网络闭合开关研制 [J]. *实验力学*, 2007, 22(2): 137-141.
Wang Guiji, Sun Chengwei, Tan Fuli, et al. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(2): 137-141.
- [17] 党瑞荣, 谢雁, 宋国亮, 等. 爆炸逻辑网络电子安全控制系统研究[J]. *火工品*, 2008, 5(10): 18-21.
Dang Ruihong, Xie Yan, Song Guoliang, et al. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008, 5(10): 18-21.
- [18] 金丽, 于江, 兰小东, 等. 一种爆炸逻辑元件的设计 [J]. *火工品*, 2009(4): 27-29.
Jin Li, Yu Jiang, Lan Xiaodong, et al. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009(4): 27-29.
- [19] 常红娟, 于江, 王者军, 等. 爆炸逻辑网络封装技术研究 [J]. *火工品*, 2008(6): 12-14.
Chang Hongjuan, Yu Jiang, Wang Zhejun, et al. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008(6): 12-14.
- [20] 龚柏林, 卢芳云, 李翔宇, 等. 爆炸逻辑间隙零门实验研究[J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(3): 25-28.
Gong Bailin, Lu Fangyun, Li Xiangyu, et al. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, 31(3): 25-28.
- [21] 吴克刚. 一种基于间隙爆炸零门的爆炸逻辑元件研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2010, 30(3): 91-98.
Wu Kegang. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(3): 91-98.
- [22] 温玉全, 焦清介, 蔡瑞娇, 等. 一种“二入四出”爆炸逻辑网络研究[J]. *含能材料*, 2005, 13(1): 22-25.
Wen Yuquan, Jiao Qingjie, Cai Ruijiao, et al. *Energetic Materials*, 2005, 13(1): 22-25.
- [23] 何碧, 只永发, 蒋小华. 冲击片起爆与点火技术[C]//2008 年钝感弹药学术研讨会论文集. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008: 91-95.
He Bi, Zhi Yongfa, Jiang Xiaohua. Techniques of impact slapper deto-

- nate and ignition[C]//Proceedings of Insensitive Ammunition Symposium. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2008: 91-95.
- [24] Sowder M. Electronic safety and arming fuzes (ESAF) for conventional bomb weapons "technology in bomb fuzing" [C]//48th Annual Fuze Conference. New York, 2004, 4: 26-28.
- [25] 吕军军, 李明愉, 曾庆轩, 等. 爆炸箔起爆系统的发展 [J]. 科技导报, 2011, 29(36): 61-65.
Lu Junjun, Li Mingyu, Zeng Qingxuan, et al. Science & Technology Review, 2011, 29(36): 61-65.
- [26] Prinse W, Scholtes G. A development platform for a microchip EFI[C]//52th Annual Fuze Conference. Kansas City, 2008, 3: 13-15.
- [27] Desal A. Efficient exploding foil initiator and process for making same: US, 0151584 A[P]. 2009-06-18.
- [28] 付秋波, 蒋小华, 郭非, 等. 爆炸箔尺寸对飞片速度的影响[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 434-436.
Fu Qiubo, Jiang Xiaohua, Guo Fei, et al. Acta Armamentarii, 2010, 31(4): 434-436.
- [29] 薛朝妹, 党瑞荣. 基于 Rogowski 线圈的冲击片雷管检测[J]. 探测与控制学报, 2011, 33(2): 27-30.
Xue Zhaomei, Dang Ruirong. Journal of Detection & Control, 2011, 33(2): 27-30.
- [30] 赵翔, 苏伟. 基于激光驱动的飞片速度的理论计算 [J]. 激光与红外, 2011, 41(7): 753-757.
Zhao Xiang, Su Wei. Laser & Infrared, 2011, 41(7): 753-757.
- [31] 金丽, 杨振英, 张玉若, 等. 一种直列式传爆序列的装药传爆性能试验研究[J]. 含能材料, 2012, 20(1): 105-108.
Jin Li, Yang Zhenying, Zhang Yuruo, et al. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(1): 105-108.
- [32] 韩克华, 任西, 秦国圣, 等. 高压脉冲功率源输出特性[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(4): 24-29.
Han Kehua, Ren Xi, Qin Guosheng, et al. Journal of Detection and Control, 2012, 34(4): 24-29.
- [33] 韩克华, 王丽萍, 任西, 等. 高压脉冲功率源与冲击片雷管发火能量匹配关系特性试验方法[J]. 火工品, 2012(3): 45-49.
Han Kehua, Wang Liping, Ren Xi, et al. Initiators & Pyrotechnics, 2012(3): 45-49.
- [34] 郑伟林. 射孔弹电雷管无损监测方法及能量分析[J]. 火工品, 2012(3): 50-53.
Zheng Weilin. Initiators & Pyrotechnics, 2012(3): 50-53.
- [35] 王昕. 美国不敏感混合炸药的发展现状 [J]. 火炸药学报, 2007, 30(4): 78-80.
Wang Xin. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007, 30(4): 78-80.
- [36] Talawar M B, Sivabalan R, Senthikumar N. Synthesis, characterization and thermal studied on furazan- and tetrazine-based high energy materials[J]. Hazardous Materials, 2004, 113(1-3): 11-25.
- [37] 欧育湘. 含能材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 11-19.
Ou Yuxiang. Energetic materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 11-19.
- [38] Huynh M H, Hiskey M A, Chavez D E, et al. Synthesis, characterization and energetic properties of diazido heteroaromatic high-nitrogen C-N compound[J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127(36): 12537-12543.

(责任编辑 张玉肖, 马骁骁)

· 学术动态 ·



第 22 期“科学家与媒体面对面”综论 “转基因技术的安全管理”

随着转基因技术的快速发展,转基因农作物种植面积在国内外不断扩大,转基因产品已经步入人们的日常生活中,但对转基因技术研究及生产应用的认识和观点出现诸多碰撞和冲突,而焦点是转基因技术的生产及其产品对人体和环境的风险。

2013年1月8日,中国科协组织召开第22期“科学家与媒体面对面”活动,邀请农业部科技教育司巡视员石燕全、中国农业科学院副院长吴孔明、中国疾病预防控制中心研究员杨晓光、中国科学院遗传研究所研究员朱祯、环保部南京环境科学所研究员刘标、中国科学院大学教授肖显静、农业部科技发展中心副主任周云龙等专家,为新华社、《人民日报》、《光明日报》、《科技日报》、《北京日报》、《中国科学报》等媒体记者解读“转基因技术的安全管理”。

直播访谈见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35623/14445641.html>。