



燃料空气炸药发展趋势分析

1. 燃料空气炸药及云爆剂的内涵与特点

燃料空气炸药是指燃料(云爆剂)与空气混合后形成的气相或多相爆炸性混合物,在二次起爆装药的引爆下,可实现云雾爆轰,起到大面积毁伤作用。其中,云爆剂是战斗部的主装药,具有超级负氧性,其储存状态通常为液态或半固体的凝胶态。与常规炸药自身携带氧化剂并在发生爆轰反应时主要依靠自身供氧的形式不同,云爆剂本身几乎不含氧化剂,不具备组分内发生爆轰反应的条件,只有在与空气充分混合后形成燃料空气炸药后才具有爆炸性。

燃料空气炸药的主要特点为毁伤范围大,且以软杀伤为主,适宜大面积杀伤有生力量和摧毁电子通讯设备等软目标。针对爆炸工质,战斗部仅携带爆炸所需的还原剂,大大提高了装药的能量密度;此外,云爆剂组分多为石油化工的一次或二次产品,原料丰富、价格便宜,应用广泛。

2. 云爆剂的设计原则

(1)能量最大化原则。高化学潜能是云爆剂配方设计的长期诉求,获得高威力的途径有两条:1)选择高能量燃料品种,提高云爆剂的化学潜能;2)优化战斗部结构及引战匹配,使云爆剂潜能充分转化为毁伤效能。

(2)体系稳定性原则。云爆剂液相组分应具有良好的理化稳定性。在含铝云爆剂中,还需关注高能金属粉颗粒的沉降问题,充分考虑液态燃料和阻沉降体系的高粘度特征。

(3)抛撒均匀性原则。云爆剂应具有良好的抛撒性,应选取粘度和表面张力较低的液体组分。对于含铝云爆剂来说,这与体系稳定性原则相矛盾,需兼顾二者优缺点。

(4)易起爆原则。该设计原则要求抛撒形成的云团容易实现二次起爆,意味着液态燃料应具有易挥发、爆炸极限宽和点火能相对较低等特点。另外,云爆剂中的高能金属粉应具有较高的活性和较低的活化能。

(5)经济性原则。针对云爆弹装药量大的特点,需综合考虑原材料的低成本、来源广泛性等因素开展配方设计。

(6)安全性原则。安全性是云爆剂配方设计的重点之一,需要考虑药剂安全性(原材料、云爆剂)、装药安全性以及使用安全性。系统的安全设计是保障云爆剂可靠生产和使用的前提条件。

3. 燃料空气炸药的发展趋势

燃料空气炸药是战斗部在终点毁伤时爆炸抛撒云爆剂形成的,与战斗部结构密不可分。因此,本文从云爆剂本身、战斗部抛撒过程两部分阐述燃料空气炸药的发展趋势。

(1)云爆剂

1)本质安全化

本质安全化依然是云爆剂未来发展的重点。此部分具有两方面内涵:其一,应加强云爆剂配方本质安全化设计,

系统且深入地对云爆剂体系进行理论研究和试验研究,确保云爆剂拥有良好的安定性和相容性。在配方设计原则的基础上,减少甚至剔除高感度组分,加强云爆剂和接触材料(密封材料、战斗部壳体材料等)、异物之间(水、酸碱物质等)的相容性研究,这一过程涉及云爆剂生产安全和使用安全。其二,应加强云爆剂的密封设计和点火源管控,在密闭条件下,云爆剂本质上仅为混合燃料,不会发生燃爆现象,但云爆剂在与空气意外混合后会形成可燃云雾,从而具备燃爆风险。因此,可通过发展凝胶云爆剂,使其具有准固态特性,降低或避免泄漏可能性。

2) 高能量密度

针对体积受限的应用平台,需设计体积能量密度更高的云爆剂配方。液体云爆剂具有相对较高的质量潜热及较好的雾化和起爆性能,但仅适合于重量受限的平台。选用密度较高的液体组分是提高云爆剂密度的有效方案,例如大分子石油烃、合成类高密度烃(ZHOU J, DING L, AN J, et al. Study on the thermal behaviors of nano-Al based fuel air explosive[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 130(2): 1111-6.),但这类燃料的云雾往往难以起爆,添加敏化剂又会影响云爆剂的整体能量水平,平衡其可燃性和装药能量密度是今后的一项重要工作。同时,在液体云爆剂的基础上进行金属化,开发凝胶云爆剂,也是进一步提高其能量密度的重要研究方向。美国较早地进行了云爆剂凝胶化的开发研究;俄罗斯在炸弹之父的燃料中加入纳米级的高能金属粉,大幅提升了云爆剂的能量密度。

3) 高系统稳定性

燃料空气炸药的可靠作用与云爆战斗部、引战匹配等设计密不可分,这对云爆剂的系统稳定性提出了极高的要求。为适应未来大当量、高着速的制导云爆弹,云爆剂需发展更稳定的物理结构,避免分层、板结和液体晃动带来的质心偏离。在不影响抛撒、雾化的基础上,尽可能地降低云爆剂本身的蒸气压和膨胀系数,实现云爆剂与战斗部空占比、结构强度的最优匹配。此外,云爆剂及其混合云雾应具有低的点火阈值,提高燃料空气炸药二次起爆的可靠性。总之,云爆剂的稳定性设计需要紧密结合战斗部设计进行开展,需根据实际要求而进行实时调整,以达到最优匹配。

4) 低成本化

云爆战斗部装药逐渐向大当量发展,其装药量一般为百公斤级至吨级。因此,高装药量导致的成本不可忽



图1 云爆剂及其战斗部的发展概况

视,而云爆剂低成本化有利于实现云爆弹的大量装配。低成本的要求有:①原材料来源广泛、有可靠的质量指标,原料的自身成本和输运成本低成本化;②在云爆剂拥有成熟制造工艺、本质安全化生产的前提下,其制造产线应结合高效生产和自动化生产进行低成本化的设计。

(2)云爆战斗部

1)整体式战斗部

子母式云爆弹结构及作用过程极其复杂,导致装药量、作战效能和作用可靠性受到较大的影响。各国在后续的研究中,大力发展整体式云爆弹技术。20世纪80年代后,新装备的云爆弹主要采用整体式战斗部结构,典型代表如俄罗斯的ОДАБ-500系列、炸弹之父(FOAB)以及美国的BLU-96/B等。

2)大尺寸云爆战斗部

云爆弹趋向重型/巨型战斗部设计,装药量可达数吨以上(ZHANG F, RIPLEY R C, YOSHINAKA A, et al. Large-scale spray detonation and related particle jetting instability phenomenon[J]. Shock Waves, 2015, 25(3): 239-54.)。在20世纪60年代,云爆弹装药量不足100公斤,如美国CBU-55/B,总装药量仅为97.2公斤,经过多年发展,截至2007年,俄罗斯的FOAB已达到7100公斤。由此可知,不断突破大药量云爆弹技术,是云爆弹今后发展的目标之一。

3)与高落速、高制导精度相适配的战斗部技术

由于受云爆剂抛撒技术的限制,最初的云爆弹采用直升机低速投放,20世纪80年代后,主要通过轰炸机投放,采用减速伞减速、调姿,如俄罗斯ОДАБ-500PM。针对航空兵作战和精确打击任务等需求,高速平台投放技术得到了较大发展,云爆弹可搭载于各作战飞机、导弹、火箭等高速平台使用。如美国的BLU-96/B,采用电视制导技术,云爆剂抛撒时的速度达到了200~300米/秒。开发与高落速、高制导精度相适配的云爆剂及其战斗部技术,是今后发展的重点(吴力力,丁玉奎,甄建伟.云爆弹关键技术发展及战场运用[J].飞航导弹.2016,(12):41-6.)。

目前,国外相关报道较少,具有研发能力的主要为美国、俄罗斯等军事大国,国内通过近几十年的技术积累,已装备如250 kg航弹的燃料空气炸弹。总的来看,整体式战斗部、大装药量、高落速和制导功能是燃料空气炸弹的发展趋势。针对高毁伤威力和强环境适应性等要求,相关单位研发了新型的液态或凝胶态云爆剂。但是,无论是云爆剂还是战斗部,在应用方面还存在一定的短板。在实际的研制中,瓶颈集中于大威力战斗部和引战匹配技术的开发或优化(王溪濛,薛琨.多云雾区协同爆轰超压毁伤威力及分区优化研究[J].兵工学报.2024:1-15.)。而全弹试验成本高、动态匹配系统复杂无疑给燃料空气炸药的开发提高了难度。基于以上问题,相关科研单位近年来针对燃料空气炸药的基础问题,从瞬态云雾浓度场(郭明儒,姜文忠,金鑫,等.燃料空气炸药固体燃料浓度动态分布试验研究[J].兵工学报.2016,37(02):226-31.付胜华,姜文忠,李楚宝,等.云爆子引信与云团高速交会的云雾浓度探测试验方法[J].兵工学报.2021,42(05):897-902.)、粒度-湍流场(CHEN J C, MA X, MA Q J. Study on concentration and turbulence of solid-liquid FAE in dispersal process[J]. Defence Technology, 2018, 14(6): 657-60.)及多相爆轰耦合机制(BAI C, LIU W, YAO J, et al. Explosion characteristics of liquid fuels at low initial ambient pressures and temperatures[J]. Fuel, 2020, 265: 116951. LIU W, BAI C, LIU Q, et al. Effect of metal dust fuel at a low concentration on explosive/air explosion characteristics[J]. Combust Flame, 2020, 221: 41-9.)等方面着手,在爆炸分散、爆轰机理以及瞬态测试等方面进行了大量研究。有望和燃料空气炸药的工程研制相结合,突破瓶颈。

王伯良

南京理工大学