

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.05.00X

文章编号: 1006-9941(2016)05-0418-03



温压炸药设计原则探讨

温压炸药 由于兼具常规高能炸药 (HE) 和燃料空气炸药的特点, 爆炸时可以产生持续时间较长的高温和高压, 在较为封闭的环境中还可以产生耗氧窒息作用, 因此具有更高的毁伤威力和作用效果, 自 20 世纪 80 年代问世以来越来越受到重视, 已经在 80 年代的阿富汗战争以及近年的车臣战争、伊拉克战争当中一展身手, 成为当前高能炸药发展的热点和趋势。

从炸药爆炸化学反应的本质上说, 温压炸药是炸药配方自身严重缺氧, 爆轰时产生大量未完全氧化的产物, 需要从外界得到氧继续燃烧而放出能量的高能非理想炸药。通常情况下, 温压炸药配方中富含金属燃料 (ANNA E W G. *Aspects of Thermobaric Weaponry*[J]. *ADF Health*, 2003, 4(1): 3-6.), 能够有效利用外部环境中的氧参与后燃烧阶段的释能化学反应, 这是温压炸药的本质特征体现。

温压炸药爆炸反应 一般有三个过程, 各过程的爆炸化学反应动力学行为是不同的 (Arnold W. *38th International Annual Conference of ICT, June 26-29, 2007, Germany. 1-12.*)。第一过程为温压炸药配方中主炸药 (如 HMX、RDX 等) 的无氧爆轰, 无需从外界环境得到氧, 属于分子内的氧化还原反应, 整个爆轰过程体积不变, 具有高温、高压和高反应物浓度的特性, 反应持续时间为数微秒, 产生的爆轰压力为数十吉帕; 第二过程为无氧燃烧反应, 在该过程中爆轰产物已膨胀到数倍的炸药装药半径, 但依然可以维持较高的温度和压力环境, 可以使无氧爆轰过程中无法参与反应的较大尺寸的燃料颗粒 (如大尺寸 Al 粒子或其它金属粒子等) 发生部分燃烧反应, 该过程也不需要从周围环境中吸取氧, 主要是燃料颗粒与主炸药的爆轰产物 (CO_2 、 CO 、 H_2O 等) 之间的放热反应, 反应持续时间为数百微秒, 产生的爆炸压力为数个吉帕到数百兆帕。限制该过程反应的主要问题是氧的浓度, 由于爆轰产物的体积膨胀, 导致燃料颗粒与含氧爆轰产物之间的摩尔浓度比降低, 影响了燃料在这一过程的反应, 为了提高发生燃烧释能反应的燃料比例, 通常在温压炸药配方中添加一定量的高氯酸铵 (AP), 以提高该反应过程的氧化剂浓度; 第三过程是未反应完的燃料及爆轰产物与周围环境中的氧湍流混合, 发生燃烧放热反应, 持续时间为数毫秒, 产生的压力为兆帕量级, 该过程是温压炸药爆炸反应特有的阶段。在这一过程, 由于爆轰产物已经膨胀到十倍以上的装药直径, 导致爆炸场的温度、压力急剧下降, 使得爆炸条件已经无法完全达到燃料发生燃烧反应的阈值, 因此要提高这一过程中燃料的反应完全性, 其核心是通过动力学设计和改性, 降低燃料在这一过程中的反应阈值。

温压炸药爆炸反应的三个过程是相互关联的,第一过程主炸药爆轰为第二过程的反应提供高温高压的初始反应环境,第二过程的放热反应为第三过程中燃料的后燃烧反应发生提供温度支持,同时第二过程的爆炸压力可以推动燃料粒子与周围氧的湍流混合。因此通过温压炸药配方的动力学设计,可以对温压炸药爆炸反应三个过程进行有效调节,实现对温压炸药爆炸能量及爆炸输出作用参数的时间-空间分布调整,达到对不同目标的选择性毁伤。

温压炸药的爆炸能量分为无氧爆轰能、无氧燃烧能和有氧燃烧能三部分。在配方设计时,可根据爆炸反应过程中氧化剂的来源,将其能量分为爆轰能和后燃烧能,其中爆轰能 (Energy of Detonation) 是温压炸药在无氧爆轰和无氧燃烧反应阶段释放的能量总和,后燃烧能 (Energy of Subsequence Combustion) 是温压炸药爆轰过程中未完全氧化的产物或未反应的燃料与周围空气中的氧气湍流混合燃烧放出的能量。对于温压炸药来说,其后燃烧能量通常可达到爆轰能量的 3 倍左右,是提高爆炸毁伤作用的主要能量来源和温压炸药的体现。表 1 所示为典型温压炸药的构成。对于 TNT 炸药,如果通过动力学改进或创造更好的反应条件,可以使其含有的 C 发生燃烧反应,TNT 也是一种非常好的温压炸药,基于此,国外研究者常用 TNT 作为标准炸药,分析温压炸药的爆炸反应过程和能量构成特点 (Ornellas D. *Calorimetric Determinations of the Heat and Products of Detonation for Explosives. UCRL-52821, 1982.*)。

表 1 典型温压炸药的构成

Table 1 Energy structure for typical thermobaric explosives

explosives	energy of detonation $Q_b / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	energy of subsequence combustion $Q_h / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	Q_h / Q_b
TNT	4326.0	12542.0	2.90
53HMX/35Al/12binder	5775.7	16120.3	2.79

温压炸药的性能评价除了常规炸药的爆轰性能要求外,更重要的是对其爆炸反应动力学性能的评价。动力学性能参数是温压炸药配方设计科学合理性和爆炸化学反应过程独特性的表征,主要包括爆轰能量释放速率、后燃烧反应速率、燃料反应速率及反应完全性、爆炸作功能力及作功效率等,这是指导温压炸药配方设计,提高温压炸药爆炸毁伤作用的核心参数。对于这些参数的测量需要通过多种试验手段和方法进行综合测量与分析评价。

温压炸药配方设计不能只从化学反应的热力学角度考虑,而应该基于对炸药爆炸化学反应的动力学特性和规律的研究与分析来设计,这是温压炸药配方设计的核心和关键。温压炸药设计的难题是炸药配方中的燃料(如 Al 粉)在爆炸反应第三阶段的点火和反应完全性,这主要由燃料在炸药爆炸过程中的反应动力学特性决定。

内爆型温压炸药, 由于爆炸反应在较为封闭的环境中进行, 爆炸场的温度和压力易于维持, 而且由于燃料粒子与固壁发生的反射 R-M 效应, 促进了燃料粒子与环境中氧的湍流混合燃烧, 这些条件均可以提高温压炸药爆炸化学反应的动力学性能, 因此在温压炸药配方设计时, 主要是进行提高燃料反应完全性和燃烧反应速率的设计。

空爆型温压炸药, 爆炸反应在空旷环境中进行, 一方面爆炸反应后温度和压力迅速下降, 导致温度很难达到燃料的反应阈值, 另一方面爆炸冲击波推动空气向外扩展, 使得氧气与燃料粒子的深度混合较为困难, 浓度比减小, 这些使得燃料粒子在爆炸反应的第三阶段不易点火和提高反应完全性, 因此在进行空爆型温压炸药设计时, 必须从降低燃料的点火阈值, 提高燃料的反应完全性、改善燃料粒子与环境中氧的混合度、提高燃料燃烧反应速率等多方面进行综合设计。通常在空爆型温压炸药配方中添加一定量的易于在爆炸第一和第二阶段反应, 且能够释放大量热量的氧化剂, 使爆炸场具有一定的高温条件, 从而便于提高燃料的点火概率和反应完全性; 另一种方法是对燃料进行处理, 以提高燃料反应的动力学活性, 降低燃烧反应的阈值条件, 常用的方法有纳米化、活性包覆、燃料粒子复合化等。

温压炸药的发展应该向爆炸能量输出结构的多样化和配方的高能量密度化进行。主要是通过动力学设计, 实现爆炸能量输出结构的时间-空间分布可控、可调及多样化, 以便与实际作用目标有效匹配; 在温压炸药组分中使用新型高活性燃料(如纳米铝、纳米复合物、机械活化含能材料(MAEC)等)、高能量密度材料(如六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)、二羟基-5,5'-联四唑二羟胺盐(HTAO)等), 通过组合配方装药方式, 提高对爆炸环境中氧的利用率, 实现温压炸药的高能量密度化。

总之, 温压炸药的配方设计应该基于爆炸化学反应动力学理论, 打破传统高爆炸药自身封闭体系的设计思想, 考虑到温压炸药的使用环境, 进行与爆炸环境相互作用的开放体系设计, 其核心点是燃料化学反应的动力学设计及爆轰与后燃烧过程的能量分配设计。温压炸药的性能研究重点在爆炸动力学性能的测量与评价, 关注燃料的反应完全性和爆炸反应速率。

王晓峰, 冯晓军

西安近代化学研究所

e-mail: fengxj_78@163.com