

# 摘要

火炸药在机械撞击、摩擦作用下意外点火是造成其安全事故的重要原因，随之爆炸产生的冲击波又是火炸药之间殉爆和事故扩大化的主要原因。火炸药在撞击、摩擦的作用下发生爆炸的难易程度称为撞击感度和摩擦感度，在冲击波作用下发生爆炸的过程称为冲击起爆过程。因此深入研究火炸药的机械感度和冲击起爆过程，对于其安全性评估和意外事故的预防具有重要意义。本文选取几种常用烟火药剂配方，以及近年来得到广泛重视的烟花用退役单基发射药作为研究对象，采用理论、实验和数值模拟相结合的方法，对其机械撞击、摩擦感度和冲击起爆特性进行了研究，为确保烟火药剂的安全使用提供依据。

研究烟火药剂在摩擦作用下获得的能量，是比较摩擦感度实验中不同实验条件的相对强弱，以及进一步研究其摩擦感度的基础，而药剂的动摩擦系数是决定其获得能量的关键参数。为此基于摩擦感度测试仪的物理模型，结合理论分析及数值计算，得到了测算试样动摩擦系数和计算其获得能量的方法。应用此方法测算得到了六种烟火药剂药剂的动摩擦系数，以及三种试样在不同实验条件下获得的能量，并研究了摆角、表压以及动摩擦系数对试样获得能量的影响。结果表明：测算的六种烟火药剂试样的单质及混合物的动摩擦系数均在一定范围内变化，例如硝酸钾的动摩擦系数为 0.55~0.88，硫磺为 0.23~0.63；常用摩擦感度的测试条件中，试样最终获得的能量以及能量增大的速率符合下列关系： $70^\circ, 1.23 \text{ MPa} < 66^\circ, 2.45 \text{ MPa} < 80^\circ, 2.5 \text{ MPa} < 90^\circ, 3.92 \text{ MPa} < 96^\circ, 4.9 \text{ MPa}$ 。

烟火药剂在机械撞击和摩擦作用下的危险性规律是其安全性研究中基本且重要的问题。因此对典型烟火药剂药剂氧化剂与可燃剂混合后的撞击和摩擦感度进行系统的实验研究，并在实验研究的基础上，获得了烟火药剂药剂的安全配伍原则。研究发现含有退役单基药的试样，撞击感度和摩擦感度均较高；氧化剂相同，不同可燃剂撞击感度基本符合下列关系：退役单基药 > 硫磺 > 碳素粉 > 铝粉 > 镁铝合金粉，摩擦感度基本符合下列关系：退役单基药 > 镁铝合金粉 > 铝粉 > 硫磺 > 碳素粉；同时实验过程中发现，非金属可燃剂的实验现象以炸痕、烟和气味为主，没有爆音或爆音较小。而金属可燃剂爆炸产生的声响以及火光都很大。

烟花用退役单基发射药(以下简称退役单基药)的冲击起爆问题是评价和分析其使用安全性的重要方面。为此参照 GJB772A-97 中卡片式隔板法实验装置，分别开展了连续爆速实验、冲击波感度实验以及锰铜压力计实验，研究其冲击起爆的爆轰建立过程，得到临界隔板值以及临界起爆压力。结合实验结果，初步标定了退役单基药的点火增长模型反应速率方程参数，并采用非线性显式动力学有限元程序——AUTODYN 软件，对退役单基药的临界起爆特性进行数值模拟研究。结果表明：连续爆速实验中当隔板厚度为 50 mm 时，观察到了退役单基药反应冲击波不断增长的过程，并在 90 mm 处转变为爆轰；冲击波感度以及锰铜压力计实验中测得其临界隔板厚度约为 50~52 mm，临界起爆压力约在 1.35~1.49 GPa 之间。通过数值模拟的研究发现，随着隔板材料冲击阻抗的增大，退役单基药的临界隔板值逐渐减小；而随着试件壳体厚度的增加，临界隔板值逐渐增大；三种起爆方式中，面起爆的临界隔板值和临界能量通量最大。

**关键词：**烟火药剂，撞击感度，摩擦感度，动摩擦系数，冲击起爆，数值模拟