

JO-6 炸药耐热性试验研究^{*}

冯晓军 王晓峰 田 轩 黄亚峰 赵东奎
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了研究 JO-6 炸药柱的耐热性能,利用自行研制的热爆炸试验系统进行了 JO-6 炸药柱的全历程试验和 180℃ 条件下的热终止试验。探讨了装药状态对 JO-6 炸药热爆炸反应温度的影响,分析了有约束和无约束两种条件下 HMX 转晶对 JO-6 炸药柱结构和尺寸的影响。结果表明,粉态装药的热爆炸反应温度高于柱态装药,但对晶型转变温度没有明显影响,随着加热温度的升高,两种装药状态下的 JO-6 炸药均在 180℃ 会发生 HMX 的转晶吸热,同时引起试样整体结构的破坏,使得试样尺寸增大,密度减小,试样在无约束条件下的结构破坏要大于有约束条件。

[关键词] JO-6 炸药 耐热性能 热爆炸 转晶

[分类号] TJ55 TD235.2⁺¹

引言

石油射孔弹装药应具有高爆速、高爆压和良好的耐热性能^[1]。通常根据射孔弹的耐热性将其分为以 RDX(黑索今)为基的普通射孔弹、以 HMX(奥克托今)为基的高温射孔弹和以 HNS(六硝基茈)为基的超高温射孔弹等 3 种^[2-3]。国内大量使用的耐高温射孔弹装药是以 HMX 为基的 JO-6(聚奥-6)炸药,其配方为 95HMX/3F₂₆₀₃/1G/1 硅油,通常采用压装成型工艺制作^[4-5]。目前对于 JO-6 炸药耐热性能的评价主要是以药粉的 5 s 爆发点来衡量,其耐热性能可以达到 323℃ 左右^[6],但在实际应用中,JO-6 炸药是以药柱状态使用,药粉与药柱的耐热性能存在一定的差异,而且药柱的热传导、药柱尺寸的变化、组分中 HMX 晶型的转变都会对射孔弹的性能产生很大的影响,从而影响到射孔弹的穿深和射流的稳定性,这是药粉的耐热性能试验无法确定的。为了更加准确地衡量 JO-6 炸药的耐热性能,指导石油射孔弹装药的设计,本文利用自行研制的火炸药柱热爆炸试验系统,研究了 JO-6 炸药柱的耐热性能,分析了温度对 JO-6 炸药柱性能的影响。

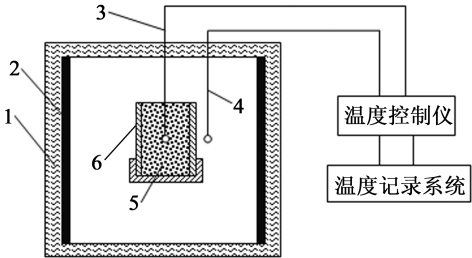
1 试验

1.1 试验装置

利用自行设计的火炸药柱热爆炸试验系统进行 JO-6 炸药柱的耐热性能试验。该系统主要由防爆加热箱体、控温仪、记录仪、控温和测温热电偶等组成^[7],系统结构如图 1 所示。

防爆加热箱体具有良好的抗爆性能和保温性能,可以承受 200g(TNT 当量)的爆炸冲击,加热系

统的设计和安装可以保证加热箱体内部的温度场均匀,各处温度差不大于 0.5℃。控温仪采用高性能可编程 PID(比例微分积分控制)调节器,控温精度可达 ±0.2℃/min。记录仪可连续实时记录试验过程的温度—时间历程。K 型热电偶用来控温和测温,精度等级为 A 级。



1 - 防爆加热箱体;2 - 加热板;3 - 测温热电偶;
4 - 控温热电偶;5 - 试样;6 - 装药容器
图 1 火炸药柱热爆炸试验装置结构图

1.2 试验方法

采用两种方法研究 JO-6 炸药柱的耐热性能。

第一种是 JO-6 炸药柱全历程热爆炸性能测试,研究 JO-6 炸药柱从室温开始加热,直到发生热爆炸反应的全过程中试样温度的变化。试验时将 JO-6 炸药压制成 Ø40mm × 40mm 的药柱,装入用 45# 钢加工成的装药容器中,容器壁厚为 3mm,下端用带螺纹的金属端盖密封,上端敞开,用热电偶测量试样中心的温度变化,以 1℃/min 的恒定升温速率加热,直到试样发生热爆炸反应。同时为了分析试样状态对 JO-6 炸药热爆炸性能的影响,也进行了相同试验

^{*} 收稿日期:2011-12-30
基金项目:国防火炸药基础科研专项。
作者简介:冯晓军(1976 ~),男,博士,高级工程师,主要从事炸药生产评估技术研究。E-mail:fengxj_78@163.com

条件下的粉状 JO-6 炸药全历程热爆炸性能测试。

第二种是在 180℃ 进行热终止试验,研究 HMX 的转晶影响。分两种状态进行,一种是药柱在约束条件下的热终止试验,将 $\varnothing 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的 JO-6 炸药柱约束在金属壳体内,只留上端盖敞开;另一种是将 $\varnothing 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的炸药柱在无约束条件下进行热终止试验。试验从室温开始以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的恒定升温速率加热到 180℃,恒温 4 h 后停止试验,让试样在防爆加热箱内缓慢冷却到室温状态(冷却到室温大约需要 24h)后取出试样,对其进行分析。

2 结果与讨论

2.1 JO-6 炸药全历程热爆炸试验

通过试验得到的粉态装药和药柱装药的 JO-6 炸药热爆炸全历程温度变化曲线如图 2 所示。

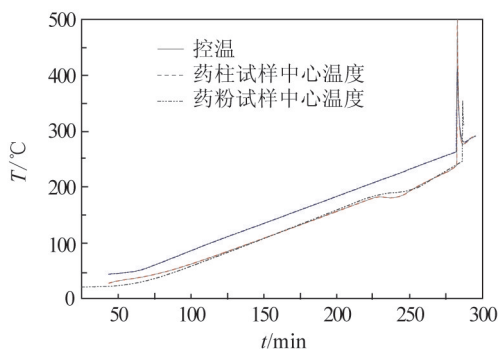


图 2 JO-6 炸药全历程热爆炸温度曲线

由图 2 所示的 JO-6 炸药试样全历程热爆炸温度—时间变化曲线分析可知,无论是粉态装药还是药柱装药,随着环境温度逐渐升高,试样的温度也逐渐升高,当温度达到 180℃ 左右时,两种装药状态的升温曲线上均出现了一恒温段。由于试验过程中环境温度是以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率逐渐升高,出现恒温段说明试样内部发生了吸热反应。对于粉态装药,该恒温段持续了大约 25min,对于药柱装药,该恒温段持续了大约 16min,然后试样温度又以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率继续升高。当粉态装药的 JO-6 炸药中心温度达到 246.1℃ 左右时,试样发生了整体快速的热爆炸放热反应,而对于药柱装药的 JO-6 炸药,当中心温度达到 237.9℃ 时发生了快速的热爆炸放热反应。这说明在 $\varnothing 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的相同装药尺寸下,粉态装药的 JO-6 炸药热爆炸温度在 246.1℃ 左右,而药柱装药的 JO-6 炸药热爆炸温度在 237.9℃ 左右。粉态装药的热爆炸温度略高于药柱装药的热爆炸温度,这主要是由两种装药状态的空隙率不同引起。粉态装药的空隙率大,在加热过程中试样局部分解放出的热量会快速地传递到空气间隙中,导致试样不易形成热点或局部形成的热点不易扩散成

长;而对于药柱装药,在加热过程中试样局部反应放出的热量会快速地积聚形成自加速分解反应的热量,而且局部的分解放热会以热传导的方式快速向与其紧密接触的试样传播,引起热点的快速扩散成长,最终导致不可逆的整体放热反应。

JO-6 炸药在这两种装药状态下的热爆炸升温曲线都在 180℃ 左右出现恒温段,这是由于 JO-6 炸药配方中的 HMX 发生了 β -HMX 向 δ -HMX 的晶型转变吸热所致^[8],从图 2 的温度变化曲线可以得出,装药状态对 HMX 的晶型转变温度没有明显的影响。对图 2 的温度变化曲线进行处理,将加热环境对试样提供的 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的温度变化减去,得到试样内部由于自身反应引起的温度变化曲线如图 3 所示,可以看出在发生 HMX 的晶型转变之前,两种装药状态下试样内部没有明显的温度变化,而在发生晶型转变时试样内部温度变化曲线上有一吸热峰。通过判读可以得到,无论是粉态装药还是药柱装药,由于 HMX 的晶型转变吸热引起的试样温度降低程度基本相同,大约为 16.4℃ 左右,JO-6 炸药的比热大约为 $1.05\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ^[2],因此,可以得到单位质量 JO-6 炸药发生晶型转变时吸收的能量大约为 17.1 kJ。对这两种装药状态下的吸热峰区间进行温度差对时间积分,得到粉态装药的积分值为 427.9,药柱装药的积分值为 522.6,该值虽然没有明确的物理意义,但可用于衡量晶型转变吸热对试样内部温度变化的影响程度,可以看出晶型转变吸热对药柱装药内部温度变化的影响明显大于粉态装药内部温度的变化。

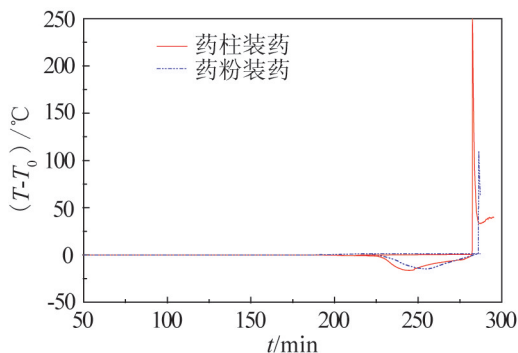


图 3 JO-6 炸药全历程温差曲线

2.2 JO-6 炸药热终止试验

图 4 为 JO-6 炸药柱在有约束和无约束两种条件下热终止试验的试样内部温度随时间变化曲线。

由图 4 可以看出,约束对于试样内部温度的变化和 HMX 晶型转变温度均没有明显的影响,曲线在 180℃ 恒温段开始出现的温度降低(图中温度曲线的“波谷”段)是由于 HMX 在 180℃ 时发生了由

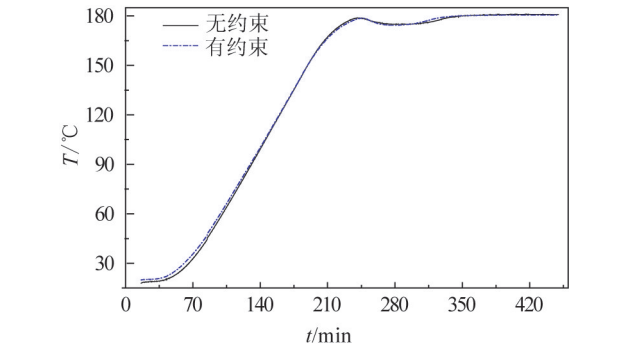


图4 JO-6 炸药热终止试验温度曲线

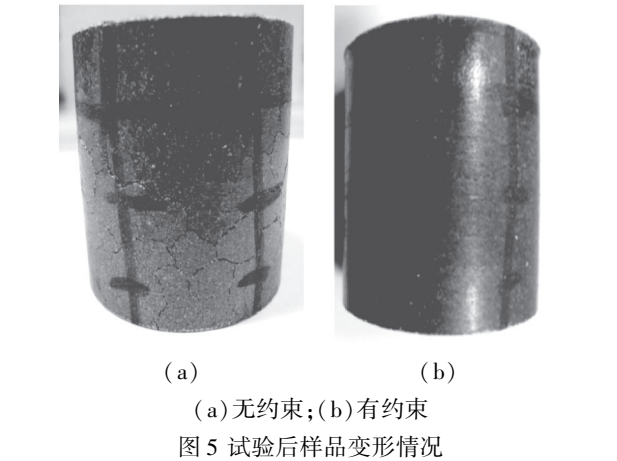
β -HMX 向 δ -HMX 的晶型转变吸热所致。表1和表2为在两种装药条件下,热终止试验后试样尺寸、密度及质量的变化分析。图5为试验结束后样品的变形照片。

表1 JO-6 炸药无约束条件下热终止试验

参数	试验前		试验后		参数变化比/%
尺寸/mm	上	39.93	上	41.94	5.0
	中	39.91	中	41.88	4.9
	下	39.89	下	41.83	4.9
	高	40.81	高	42.64	4.5
密度/(g·cm ⁻³)	1.743		1.512		-13.3
质量/g	88.9188		88.7646		-0.17

表2 JO-6 炸药约束条件下热终止试验

参数	试验前		试验后		参数变化比/%
尺寸/mm	上	39.94	上	39.85	-0.18
	中	39.91	中	39.90	-0.03
	下	39.87	下	39.87	0
	高	40.56	高	42.75	5.40
密度/(g·cm ⁻³)	1.752		1.663		-5.08
质量/g	88.8277		88.6982		-0.15



(a) 无约束;(b) 有约束
图5 试验后样品变形情况

由表1和表2及图5的结果分析可以看出,当JO-6 炸药柱无约束时,在180℃恒温4 h后终止试

验,试样整体结构完整性已经破坏,试样表面和内部出现了很多大的裂纹,尺寸发生了变化,径向尺寸增大5%,轴向尺寸增大4.5%,轴向和径向的尺寸增大比例基本相同,试样密度减小了13.3%,质量损失约0.17%;而JO-6 炸药在约束条件下进行180℃恒温4 h后终止试验,试样的整体结构比较完好,出现的裂纹较少,径向尺寸略有缩小,但轴向尺寸发生了大的变形,增大了5.4%,而且沿轴向上端未约束方向出现明显的凸起,试样密度减小了5.08%,试样失重比无约束条件下的略小,为0.15%。

试样结构和尺寸的变化一方面是由于加热后,试样发生了热膨胀,内部产生了热应力,使得试样产生了胀大和裂纹;另一个更重要的原因是由于JO-6 炸药配方中的HMX在180℃时发生了转晶变化, β -HMX的晶体密度为1.905 g/cm³,而 δ -HMX的晶体密度为1.80g/cm³^[9],因此转晶的变化使得HMX晶体的体积发生胀大,从而引起试样结构和尺寸的变化。当试样没有约束时,其膨胀在轴向和径向同时进行,因此轴向和径向的尺寸变化比例基本相同;当试样被约束在上端开口的容器中时,径向膨胀受到了限制,试样只能沿着轴向无约束端膨胀,所以出现在无约束端的轴向凸起。从图5的对比也可以看出,在有约束作用时,可以减少药柱由于HMX的晶型转变引起的结构整体破坏。

由表中结果分析还可以看出,试样在180℃热终止试验时发生了失重,分析认为这主要是由炸药配方中的氟橡胶在180℃时的热失重引起,由资料^[10]知,氟橡胶在180℃的热失重大约为0.058%,JO-6 炸药配方中氟橡胶含量为3%,通过计算其失重大约为0.174%,其值与无约束条件下的失重值基本相同,当有壳体约束时,氟橡胶的热失重会受到一定的限制,从而使得试样的失重量略有减小。

3 结论

- 1)装药状态对HMX的转晶温度没有明显的影响,但对JO-6 炸药热爆炸反应温度有影响,在装药尺寸下,粉态装药热爆炸温度在246.1℃左右,而药柱装药热爆炸温度在237.9℃左右,粉态装药的热爆炸温度略高于药柱装药的热爆炸温度。
- 2)180℃左右时JO-6 炸药中的HMX会发生 β -HMX向 δ -HMX的晶型转变而吸热,晶型转变吸热对药柱装药内部温度变化的影响明显大于对粉态装药内部温度的变化,晶型转变同时会引起药柱体积胀大,使药柱产生大量裂纹,药柱整体结构完整性受到破坏。

[J]. Mater. Lett., 2008, 62(12-13):1757-1760.

[5] Oommen C., Jain S. R. Ammonium Nitrate: A Promising Rocket Propellant Oxidizer [J]. J. Hazard. Mater., 1999, 67(3):253-281.

[6] Wu H. B., Chan C. K. Effects of Potassium Nitrate on the Solid Phase Transition of Ammonium Nitrate Particles [J]. Atmos. Environ., 2008, 42(2):313-322.

[7] Lang A. J., Vyazovkin S. Ammonium Nitrate-Polymer Glasses: A New Concept for Phase and Thermal Stabilization of Ammonium Nitrate[J]. J. Phys. Chem. B, 2008, 112(36):11236-11243.

[8] 倪欧琪, 张兴明, 孔德让, 等. 岩石粉状乳化炸药及其制造方法: 中国, 1566039[P]. 2005-01-19.

[9] 倪欧琪, 吴洁红, 张兴明, 等. 煤矿许用粉状乳化炸药及其制造方法: 中国, 1336355[P]. 2002-02-20.

[10] 倪欧琪, 张兴明, 唐双凌, 等. 粉状乳化炸药的制备方法: 中国, 1765853[P]. 2006-05-03.

[11] 李艺, 惠君明. 几种添加剂对硝酸铵热稳定性的影响[J]. 火炸药学报, 2005, 28(1):76-80.

The Effect of Potassium Nitrate on Inhabiting AN_{IV} ~ AN_{III} Phase Transition of Ammonium Nitrate and Its Application in Powdery Emulsion Explosive

ZHANG Kaiming^{①②}, NI Ouqi^{①②}, YU Zhenquan^{①②}

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②National Quality Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] This paper studies the effect of potassium nitrate (KNO₃) on inhabiting the AN_{IV} ~ AN_{III} phase transition of ammonium nitrate (NH₄NO₃) and its application on improving anti-caking property for powdery emulsion explosive. Experiment results from differential scanning calorimetry (DSC), high-low temperature and compressive strength test show that the addition of 2% KNO₃ could inhabit AN_{IV} ~ AN_{III} phase transition totally, improve the crystallization and thermal stability of NH₄NO₃, reduce the compressive strength of powder emulsion explosive and resolve its caking phenomenon effectively.

[KEY WORDS] potassium nitrate, ammonium nitrate, phase transition, powdery emulsion explosive

(上接第 3 页)

3)JO-6 炸药在高温下会出现热失重现象,这是由其配方中的氟橡胶在高温下的热失重引起。

参 考 文 献

[1] 李晋庆. 几种新型石油射孔弹的研究和讨论[J]. 爆破器材, 2003, 32(4):27-30.

[2] 孙国祥, 王晓峰, 孙富根, 等. 油气井射孔器用炸药及其安全性[J]. 爆破器材, 2002, 31(2):4-9.

[3] 赵捍东, 张会锁, 王芳, 等. 不同炸药对聚能射流影响的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2006(S1):229-331.

[4] 孙国祥. H781 炸药研究报告[R]. 二〇四所档案馆, 1996.

[5] 石健. 无杆堵射孔弹的研制[J]. 爆破器材, 1998, 27(1):30-32.

[6] 赵省向. JO-6 炸药热安全性研究[R]. 二〇四所档案馆, 1995.

[7] 冯晓军. 火炸药柱热爆炸试验系统研制报告[R]. 二〇四所档案馆, 2006.

[8] 刘子如. 含能材料热分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[9] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989.

[10] 兵器工业第二〇四研究所. 火炸药手册(第四分册)[M]. 1987.

Experimental Study on Heat-resistance Property of JO-6 Explosive

FENG Xiaojun, WANG Xiaofeng, TIAN Xuan, HUANG Yafeng, ZHAO Dongkui
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to investigate the heat-resistance properties of JO-6 explosive, a temperature ramp test and an isothermal test at 180℃ were carried out using the self-constructed thermal explosion test system. The influence of the charge state on the thermal explosion temperature of JO-6 explosive was discussed and the influence of polymorphic transformation of HMX in both confined and unconfined conditions on its structure and dimension were analyzed. The results show that the thermal explosion temperature of powdery explosive is higher than that of cylindrical charge, while the charge state has no influence on polymorphic transformation temperature. With the temperature increasing, the occurrence of decalescence at 180℃ during the polymorphic transformation of HMX in JO-6 explosive, despite the two charge states, leads to the destruction of the sample, resulting in increasing in dimension and decreasing in density. The sample destruction of unconfined was more serious than that of confined condition.

[KEY WORDS] JO-6 explosive, heat-resistance property, thermal explosion, polymorphic transformation