

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.02.002

# 铝粉在 TNT 爆轰压力作用下的响应分析\*

罗一鸣 王晓峰 贾宪振

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为研究铝粉在固相炸药爆轰中的点火机理,通过建立数值仿真模型,考察了微米铝粉在 TNT 爆轰压力作用下的响应过程。计算结果显示,在爆轰压力作用下,铝粉颗粒会发生急速的压缩。颗粒的氧化层会在压缩过程中快速破裂,且氧化层的破裂耗时较短,有可能使铝粉在爆轰反应区内发生点火。同时,压缩还会造成颗粒内部温度的突然升高和迅速回落,但该过程对氧化层破裂所起的作用非常有限。

[关键词] 铝粉; 点火; 爆轰波; 压缩; 氧化层; 破裂

[分类号] TQ560.7

## 引言

铝粉颗粒在爆轰中如何响应是研究者们非常关心的一个问题,它对于了解铝粉颗粒的点火机理、反应速率以及能量释放均具有重要的意义。

国内外许多学者采用激波诱导的方式,就铝粉在两相爆轰和三相爆轰中的反应机理已经开展了大量而深入的研究<sup>[1-12]</sup>,认为铝粉氧化层的破裂是铝粉点火的先决条件,并提出了多种氧化层的破裂机制,如汽化破裂、液化破裂、热应力涨裂以及气流破碎等。

上述机制能够较好地描述铝粉在气-液两相爆轰或气-液-固三相爆轰中的点火过程,但是否适合描述铝粉在单一固相炸药爆轰中的点火仍值得商榷。因为采用激波诱导研究铝粉点火时,激波的峰值压力一般在 MPa 级,而实际的固相炸药爆轰时,其爆轰波压力一般在 10 GPa 级,在作用压力如此悬殊的情况下,其点火的机理可能是不同的。笔者认为,激波峰值压力难以对铝粉颗粒产生显著的形状改变,其影响主要以温度响应为主;而爆轰波中的高压足以对铝粉颗粒产生压缩变形而造成氧化层的破裂。文献[13]对爆轰压力下对铝粉氧化层破坏的可能性进行了初步的讨论,但对其响应过程未开展进一步的研究。

由于固相炸药爆轰是一个瞬态的过程,在微秒乃至纳秒尺度内反应已经完成。受试验与测试技术等客观条件的限制,对其反应过程的研究难以开展。目前,研究者多通过测试爆轰后的各项性能参数来

间接地推测铝粉可能存在的反应机理<sup>[14-19]</sup>。

本文通过建立 LS-DYNA 仿真模型,对铝粉颗粒在 TNT 炸药爆轰中的响应过程进行了模拟,研究了爆轰波压力作用下铝粉颗粒的变形过程与温度变化,试图更加全面地了解铝粉在固相炸药爆轰中的反应机理。

## 1 分析模型和方法

采用 LS-DYNA 程序建立了炸药爆轰与球型铝粉颗粒相互作用的计算模型,如图 1 所示。为了直观地说明炸药爆轰波对铝粉颗粒的作用,模型中只包含一个铝粉颗粒。铝粉颗粒埋于基体炸药当中,炸药从右端起爆。考虑到颗粒的对称性,为节省计算规模,只建立了四分之一模型。

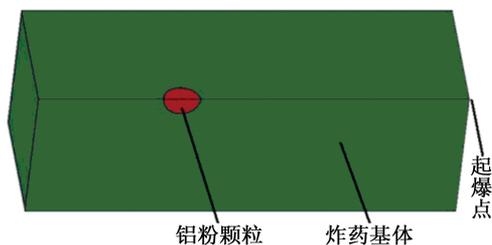


图 1 铝粉的爆轰冲击响应计算模型

Fig.1 Numerical simulation model of Al particle under detonation

铝粉颗粒直径为 13  $\mu\text{m}$ ,颗粒由纯 Al 球芯和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  壳层构成。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  均匀地包覆在 Al 球外表面,其质量占铝粉颗粒总质量的 1%,剩余的皆为纯 Al。

\* 收稿日期:2014-07-25

基金项目:总装备部预研基金(00402020201)

作者简介:罗一鸣(1980~),男,副研究员,研究方向为军用混合炸药设计与工艺研究。E-mail:iarmlym@126.com

模型采用 ALE 算法、流固耦合算法以及热固耦合算法进行计算。当采用 ALE 算法时,基体炸药所在的网格为 Euler 网格,网格保持不动,爆轰产物在网格内流动,铝粉颗粒为 Lagrange 网格,爆轰波和铝粉颗粒之间的作用通过流固耦合算法进行计算,从而获得铝粉颗粒的变形及破坏情况。采用热固耦合算法计算铝粉颗粒在爆轰波冲击压缩过程中的温度变化。

基体炸药为 TNT,爆轰产物状态方程采用 JWL 状态方程,即:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中: $p$  为爆轰产物压力; $V$  为相对体积; $E$  为单位体积炸药的初始内能; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  均为 JWL 状态方程参数。

$Al_2O_3$  薄膜和 Al 的本构方程均采用 Johnson-Cook 方程描述,即:

$$Y = (A + B\varepsilon_p^n) (1 + C \log \varepsilon_p^*) (1 - T_H^m) \quad (2)$$

式中: $Y$  为屈服应力; $\varepsilon_p$  为等效塑性应变; $\varepsilon_p^*$  为规范化等效塑性应变; $T_H = (T - T_r) / (T_m - T_r)$  为无量纲温度,其中  $T$  为材料的温度、 $T_m$  为材料的熔点、 $T_r$  为室温; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$ 、 $n$  为常数。

TNT、Al 及  $Al_2O_3$  的各项参数均取之于 LS-DYNA 材料库。

## 2 计算结果

### 2.1 铝粉颗粒的形变过程

通过 LS-DYNA 显示动力学分析,获得了铝粉颗粒在爆轰波作用下响应过程,其结果见图 2、图 3。

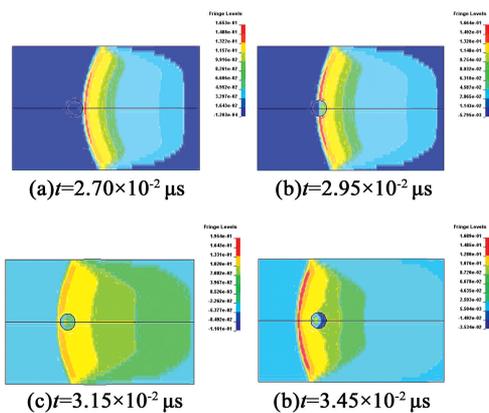


图 2 爆轰波作用于铝粉颗粒的过程

Fig. 2 Process of detonation wave acting on Al particle

从图 2 可以看出,当炸药爆轰波扫过铝粉颗粒时,铝粉颗粒内部产生压缩应力波,该应力波的传播速度小于炸药爆速。与激波作用不同的是,铝粉颗粒在固相炸药爆轰波作用下会迅速被压缩。在压缩

过程中,铝粉颗粒  $Al_2O_3$  薄膜破裂,然后从相对爆轰波传播方向的一侧开始出现剥落,使内部的纯 Al 暴露出来,其过程如图 3 所示。

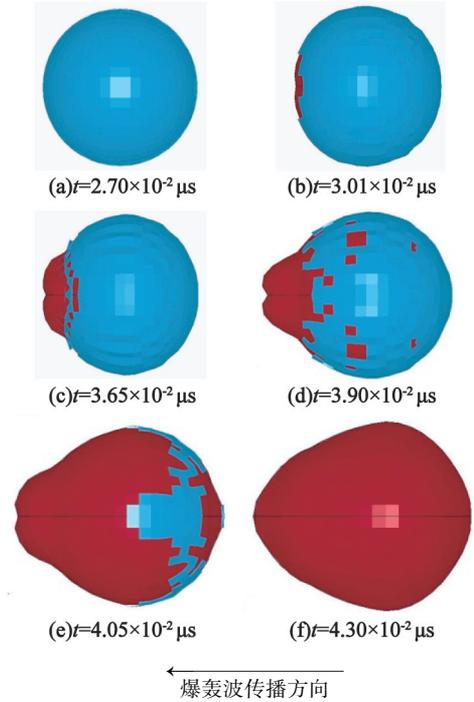


图 3 铝粉颗粒的压缩变形过程

Fig. 3 Shape changing process of Al particle

由于 TNT 固相炸药爆轰时,其爆轰前导冲击波以及后续反应区内的压力远远高于 Al 及  $Al_2O_3$  的屈服强度,因此铝粉颗粒在爆轰波作用下将发生显著的形变以及体积压缩。而 Al 及  $Al_2O_3$  具有不同的应变率,从而导致  $Al_2O_3$  壳层被破坏,随后在爆轰产物的拖曳力作用下迅速被剥离。图 3(a) 为爆轰波作用于铝粉的初始时刻;3 ns 后,铝粉氧化层便出现了破裂,如图 3(b) 所示;16 ns 后,铝粉颗粒外部  $Al_2O_3$  壳层即被完全剥离,如图 3(f) 所示。此时,纯 Al 已经完全暴露于高温的爆轰产物中。

据文献报道<sup>[20-21]</sup>, TNT 爆轰反应区厚度在 0.2 ~ 0.4 mm 之间,而 TNT 爆速为  $(6\ 928 \pm 7) \text{ m/s}$  ( $\rho_0 = 1.634 \text{ g/cm}^3$ )。假设此时铝粉颗粒沿爆轰波传播方向上的速度为 0,那么可以粗略地计算出铝粉颗粒在反应区内滞留时间应在 0.025 ~ 0.050  $\mu\text{s}$  之间。并且,受前导冲击波的加速以及爆轰产物的拖曳作用,铝粉还应在爆轰波传播的方向上具备一定的速度。因此,铝粉颗粒在反应区内的滞留时间应长于 0.025  $\mu\text{s}$ 。

因此,在爆轰压力的作用下,铝粉颗粒被压缩而导致氧化层快速破裂,且氧化层的破裂耗时较短,有可能使铝粉在爆轰反应区内发生点火;但是铝粉点火之后,其参与反应区的反应度还与爆轰产物中氧

及氧化物的浓度密切相关,限于篇幅,本文对此不进行详细讨论。

## 2.2 铝粉颗粒压缩升温

铝粉在爆轰波的冲击作用下发生绝热压缩,除了造成颗粒形变以外,还会导致其温度发生跃性的升高。为研究铝粉颗粒在爆轰波作用下温度的变化,从在铝粉颗粒内部沿爆轰波传播方向的轴线上依次选取 6 个单元,如图 4 所示。

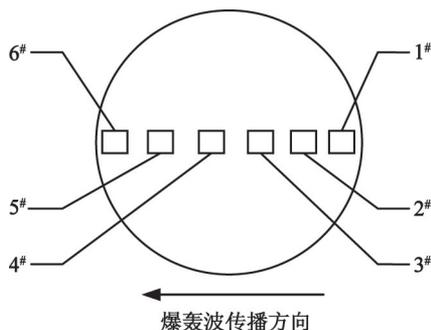


图 4 选取单元位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of site of element selected

采集了各单元在爆轰波作用下不同时间点的温度数据,其变化趋势如图 5 所示。从图中可以看出,在爆轰波的压缩作用下,铝粉颗粒在不到 10 ns 内,其内部各点迅速升温至 600 ~ 1 000 K 不等的峰值温度。当冲击波阵面离开铝粉颗粒后,其周围压力骤降,铝粉颗粒会发生绝热膨胀从而导致自身温度的迅速回落。

从氧化层的汽化破裂机制、液化破裂机制可以看出,由温度导致的氧化层破裂,其必备条件是颗粒中的纯 Al 发生相变,即颗粒温度升高至其沸点(2 740 K)或熔点(933 K)以上。而压缩升温仅能使铝粉颗粒内部的局部瞬时达到熔点温度,随即温度又快速下降,该过程对氧化层破裂所起的作用将非常有限。

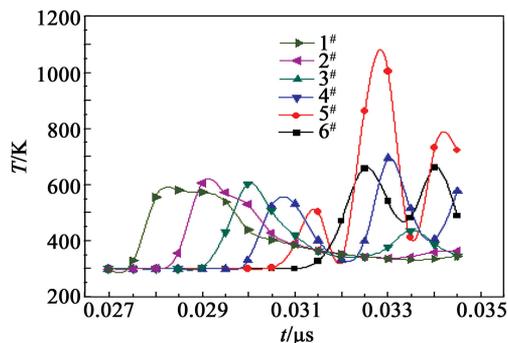


图 5 在 TNT 爆轰波作用下铝粉颗粒温度变化趋势

Fig. 5 Temperature changes of Al particle under TNT detonation wave

## 3 结论

本文对铝粉颗粒在 TNT 炸药爆轰中的响应过程进行了模拟,得到以下结论:

- 1) 铝粉颗粒在固相炸药爆轰波作用下会迅速被压缩;
- 2) 颗粒压缩变形会导致氧化层快速破裂,且氧化层的破裂耗时较短,有可能使铝粉在爆轰反应区内发生点火;
- 3) 压缩还会造成颗粒内部温度的突然升高和迅速回落,但该过程对氧化层破裂所起的作用非常有限。

## 参考文献

- [1] Sichel M, Baek S W, Kauffman C W, et al. The shock wave ignition of dusts[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 1985, 23 ( 9 ): 1374-1380.
- [2] Veysiere B, Khasainov B A. A model for steady, plane, double-front detonations ( DFD ) in gaseous explosive mixtures with aluminum particles in suspension [ J ]. Combustion and Flame, 1991, 85(1-2): 241- 253.
- [3] 李招宁, 胡栋. 铝粉粒度和氧气含量对铝粉快速反应影响的研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(1): 75-80. Li Zhaoning, Hu Dong. Study of the influence of the aluminum particle size and oxygen on the reaction of aluminum dust[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(1): 75-80.
- [4] 郑波, 胡栋, 丁敬. 铝粉尘激波点火的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(2): 174-181. Zheng Bo, Hu Dong, Ding Jing. Experimental study of shock wave ignition of aluminum dust[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(2): 174-181.
- [5] Boiko V M, Poplavski S V. Self-ignition and ignition of aluminum powders in shock waves [ J ]. Shock Waves, 2002, 11(4): 289-295.
- [6] 洪滔. 铝颗粒在激波后气流作用下的点火[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(1): 35- 39. Hong Tao. Theoretical study of shock wave ignition of aluminum particles [ J ]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(1): 35- 39.
- [7] 洪滔, 秦承森. 铝颗粒激波点火机制初探[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(4): 295- 299. Hong Tao, Qin Chengsen. Mechanism of shock wave ignition of aluminum particle [ J ]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 295- 299.
- [8] Fedorov A V, Kharlamova Yu V. Ignition of an aluminum particle[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2003, 39(5): 544-547.
- [9] Kwon Y S, Gromov A A, Ilyin A P, et al. The mecha-

- nism of combustion of superfine aluminum powders[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133(4): 385-391.
- [10] 罗艾民, 张奇, 白春华, 等. 爆炸热作用所致的铝粉颗粒温度响应[J]. *火炸药学报*, 2005, 28(1): 35-38.
- Luo Aimin, Zhang Qi, Bai Chunhua, et al. Temperature response of aluminum particle heated by thermal effects of explosive detonation[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(1): 35-38.
- [11] 胡栋, 叶松, 吴旌贺, 等. 铝粉点火微观机理的光谱研究[J]. *高压物理学报*, 2006, 20(3): 237-242.
- Hu Dong, Ye song, Wu Jinghe, et al. The spectro-studies on micro-mechanism of shock ignition for aluminum[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, 20(3): 237-242.
- [12] 炎正馨, 邓军, 张雁妮. 纳米铝粉点火机理的快速光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(8): 2057-2061.
- Yan Zhengxin, Deng Jun, Zhang Yanni. Study on the ignition mechanism of aluminum nanoparticle by fast spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(8): 2057-2061.
- [13] 裴明敬, 田朝阳, 胡华权, 等. 铝粉在温压炸药爆轰过程中的响应分析[J]. *火炸药学报*, 2013, 36(4): 7-12.
- Pei Mingjing, Tian Zhaoyang, Hu Huaquan, et al. Response analysis of aluminum in the process of thermobaric explosive detonation[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(4): 7-12.
- [14] 苗勤书, 徐更光, 王廷增. 铝粉粒度和形状对含铝炸药性能的影响[J]. *火炸药学报*, 2002, 25(2): 4-8.
- Miao Qinshu, Xu Gengguang, Wang Tingzeng. Mechanism analysis of the influence of Al shape and size on the detonation properties of aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25(2): 4-8.
- [15] 李静, 王伯良, 赵新颖, 等. 高含铝炸药爆轰过程中
- 的能量分析[J]. *爆破器材*, 2013, 42(2): 10-13.
- Li Jing, Wang Boliang, Zhao Xinying, et al. Energy analysis in the explosion process of high aluminized explosive[J]. *Explosive Materials*, 2013, 42(2): 10-13.
- [16] 陈朗, 龙新平, 冯长根, 等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 6-7.
- [17] 冯博, 王晓峰, 冯晓军, 等. HMX基含铝炸药铝粉反应率的估算[J]. *爆破器材*, 2013, 42(4): 20-23.
- Feng Bo, Wang Xiaofeng, Feng Xiaojun, et al. Reaction rate evaluation on the aluminum powder in HMX-based aluminized explosives [J]. *Explosive Materials*, 2013, 42(4): 20-23.
- [18] 荣吉利, 项大林, 李健, 等. 含铝炸药水下爆炸特征研究[J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(3): 221-225.
- Rong Jili, Xiang Dalin, Li Jian, et al. Study on underwater explosion character of aluminized explosive [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(3): 221-225.
- [19] 张松林, 张庆明, 武斌, 等. 铝热剂中铝粉保护膜受热失效的实验研究[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(1): 96-99, 126.
- Zhang Songlin, Zhang Qingming, Wu Bin, et al. Experimental study on the thermal damage mechanisms of aluminum particle protective film in thermite [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(1): 96-99, 126.
- [20] 丁傲. 凝聚相爆轰的几个问题[J]. *力学情报*, 1973(3): 58-70.
- [21] 焦清介, 金兆鑫, 徐新春. 铸装TNT/RDX爆轰过程导电性及反应区厚度实验[J]. *含能材料*, 2009, 17(2): 178-182.
- Jiao Qingjie, Jin Zhaoxin, Xu Xinchun. Electrical conductivity and reaction zone width measurement of detonation process for cast TNT/RDX compositions [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(2): 178-182.

## Response Analysis of Aluminum Particle under Pressure of TNT Detonation

LUO Yiming, WANG Xiaofeng, JIA Xianzhen

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to clarify the ignition mechanism of Al particles in the detonation of solid explosives, the response of micro Al particles under pressure of TNT detonation was studied by numerical simulations. The calculation results show that Al particle is compressed rapidly under detonation wave pressure. The rupture of oxide shell was caused by compression so fast that the aluminum particles will be ignited in detonation reaction zone. Meanwhile, the internal temperature of aluminum particle will suddenly increase and fall back during the compression process, but this phenomenon is not dominant for oxide shell rupture.

[KEY WORDS] aluminum particle; ignition; detonation wave; compression; oxide shell; rupture