文章编号：1001-1455(2014)05-0636-05 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)05-0636-05

基于圆筒实验的 RDX/Al 炸药反应进程*

裴红波，焦清介，覃剑峰
（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081）

摘要：对 RDX 炸药和 2 种铝粉质量分数分别为 15%、30%的 RDX 基含铝炸药进行∅50 mm 圆筒实验，研究铝粉含量对炸药做功能力的影响，根据格尼公式分析铝粉与爆轰产物的反应进程。结果表明：在圆筒实验记录的时间范围内，铝粉质量分数为 15%的含铝炸药做功能力最强，RDX 炸药次之，铝粉质量分数为 30%炸药做功能力最弱；34 μs 时刻，铝粉质量分数为 15%的炸药，铝粉的反应度为 0.49，而铝粉质量分数为 30%炸药铝粉的反应度仅为0.21，含铝炸药中铝粉的反应时间在 50～200 μs 之间。

关键词：爆炸力学；反应进程；圆筒实验；含铝炸药；反应时间；RDX
中图分类号：O383 **国标学科代码**：1303599 **文献标志码**：A

含铝炸药是一类应用非常广泛的的混合炸药。含铝炸药是非理想炸药，其爆轰机理较复杂，目前普遍的观点是：微米级以及粒度更大的铝粉在爆轰反应区内基本不参加反应，铝粉主要在爆轰产物膨胀区发生反应[1]。虽然含铝炸药具有较高的爆热，但由于铝粉反应时间较长，这部分能量能否对炸药的毁伤效果起到支撑作用还有待研究。

对于爆轰产物中铝粉的燃烧时间目前还缺乏有效的实验测量手段，A. M. Milne 等[2]认为铝粉的燃烧时间 $t_b=\alpha d_0^2$，其中 d_0 为铝粉颗粒的直径，α 为常量，其典型取值为 4×10^6 s/m^2。当铝粉直径为1 μm 时，燃烧时间为 4 μs；当铝粉直径为 10 μm 时，燃烧时间为 400 μs。A. M. Miller 等[3]通过实验测得颗粒直径为 20 μm 的铝粉在 2 600 K 的温度下的燃烧时间约为 700 μs。

目前，对含铝炸药已经开展了较多的圆筒实验研究[4-8]，这些研究的重点在于获取含铝炸药的状态方程，分析铝粉的反应情况以及研究不同尺寸圆筒下含铝炸药做功能力的差别，鲜有关于铝粉在爆轰产物中反应进程的探讨。本文中对 RDX 炸药和 2 种含铝粉质量分数分别为 15%、30%的 RDX 基含铝炸药进行了∅50 mm 圆筒实验，分析铝粉质量分数对炸药做功能力的影响，同时考虑铝粉的二次反应并结合格尼公式，以 RDX 炸药作为参照，分析含铝炸药中的铝粉反应度随时间的变化规律。

1 实 验

实验选用以 RDX 为主体的含铝炸药，铝粉的质量分数分别为 15%和 30%，另外以 RDX 作为参比炸药，炸药制作过程中都外加质量分数为 5%的惰性黏结剂以便于药柱的压制。铝粉为球状，其中粒径为 9.8 μm，活性铝的质量分数大于 98%，炸药的配方如表 1 所示。

表 1 炸药配方

Table 1 Explosive formulations

炸药	w(RDX)	w(Al)	ρ/(g·cm^{-3})	w(Al)/w(O)	v/(m·s^{-1})
RA0	100	0	1.673	0	8 325
RA15	80	15	1.763	0.257	8 121
RA30	70	30	1.865	0.632	7 879

实验按照 GJB772A-97《炸药试验方法》中方法进行，圆筒实验采用高纯度铜管，利用氩气弹发光作

* **收稿日期**：2013-03-27；**修回日期**：2013-05-22
基金项目：国家自然科学基金项目(11172042)
作者简介：裴红波(1987—)，男，博士研究生。

光源，对准圆筒某一截面，通过条纹扫描相机记录该截面表面位移时间关系，经过数据处理得到该截面的时间-速度-位移曲线，实验装置如图 1 所示。实验过程中，用固定于圆筒起爆端和末端的电探针测定炸药爆速，数据见表 1，用高速转镜相机拍摄圆筒在爆轰产物膨胀作用下狭缝位置处端面的膨胀过程。

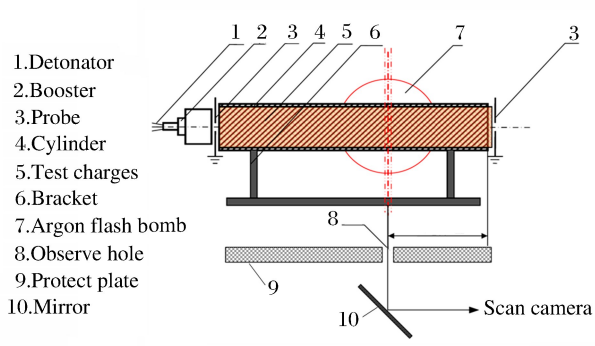

图 1　圆筒实验装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the cylinder tests

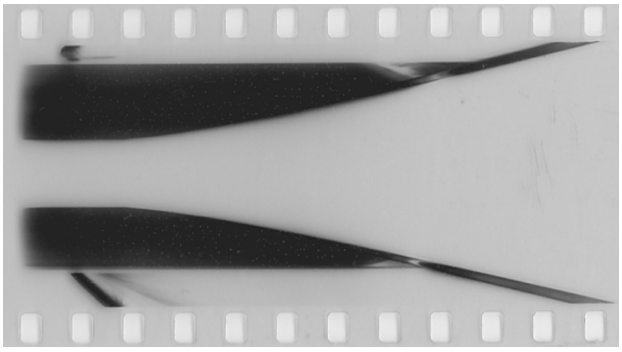

图 2　圆筒膨胀过程

Fig. 2　Cylinder expansion process

2　实验结果

炸药爆轰后圆筒壁在爆轰产物作用下沿圆筒的径向和轴向作二维运动，狭缝位置处的圆筒在爆轰产物驱动下的膨胀过程光测的结果如图 2 所示，膨胀距离$(R-R_0)$与膨胀时间 t 满足下式：

$$t=a+b(R-R_0)+c\,\mathrm{e}^{d(R-R_0)} \tag{1}$$

式中：a、b、c、d 均为拟合系数，对图 2 中光测结果进行数据拟合即可得到系数 a、b、c、d 的值。

圆筒的径向膨胀速度 u 和圆筒的比动能 E 分别为：

$$u=\frac{\mathrm{d}(R-R_0)}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{b+cd\,\mathrm{e}^{d(R-R_0)}} \tag{2}$$

$$E=\frac{1}{2}u^2 \tag{3}$$

对 3 种炸药各进行了 3 发∅50 mm 的圆筒实验，同一种炸药各发之间圆筒壁速度误差小于 1%，动能误差小于 2%。根据光测结果进行数据拟合，即可得到系数 a、b、c、d，如表 2 所示。

表 2　圆筒实验拟合系数

Table 2　Fitting coefficients of cylinder test

炸药	a	b	c	d	$v/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$
RA0	3.960	0.593 1	−3.613	−0.109 00	8 325
RA15	5.511	0.571 0	−4.601	−0.073 64	8 121
RA30	5.740	0.616 9	−4.644	−0.080 71	7 879

根据圆筒实验结果处理得到的结果如图 3～6 所示。图 3 为不同膨胀距离处炸药的筒壁速度；由图 4 可以看出实验测得圆筒膨胀到 50 mm 处所用时间约为 34 μs，装有 RA30 炸药的筒壁速度始终小于 RA0 炸药，在 0～22 μs 时间内，两者之间的速度差不断增大，但是 22 μs 之后两者之间的速度差开始减小，在 $t=34$ μs 时刻两者之间速度差由最大时刻的 6.1%缩小到 4.2%。初始时刻 RA15 炸药筒壁速度低于 RA0 炸药，但是由于 RA15 炸药加速度更大，在 $t=25$ μs 时刻，RA15 炸药的壁速开始超过 RA0 炸药，而且两者之间的差距在不但扩大，34 μs 时刻，RA15 炸药壁速比 RA0 炸药壁速高约 3%。图 5 为不同膨胀距离处炸药的比动能；图 6 为筒壁的加速度，初始时刻装填 RA0 炸药的圆筒壁加速度要大于含铝炸药，随着圆筒的膨胀，圆筒壁加速度逐渐减小，但是装填含铝装药的圆筒壁加速度下降的较为缓慢，在圆筒膨胀的后期装填含铝炸药的圆筒壁加速度反而大于 RA0 炸药。

结果表明，加入铝粉会降低筒壁初始速度，但随着圆筒膨胀，铝粉后燃效应使产生的气体膨胀做功对金属起持续加速作用，使筒壁速度增加更快，增加炸药的做功能力。RA30 炸药做功能力始终低于 RA0 炸药的，这是由于铝粉能量释放速率慢，在圆筒实验的时间范围内，只有少部分铝粉参与反应。

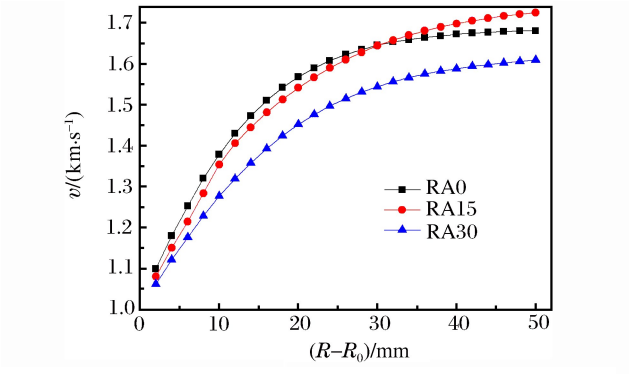

图 3 不同膨胀距离处圆筒壁速

Fig. 3 Wall velocities at different expansion distances

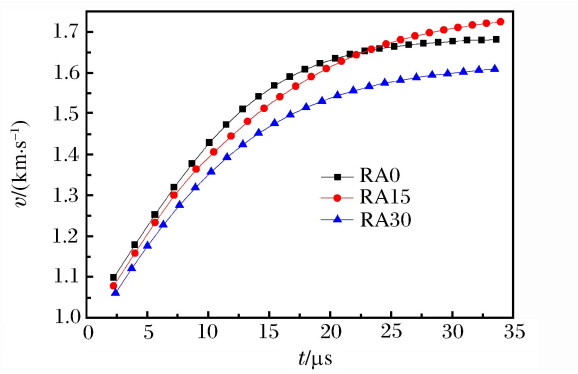

图 4 圆筒壁速度时程曲线

Fig. 4 Histories of wall velocity

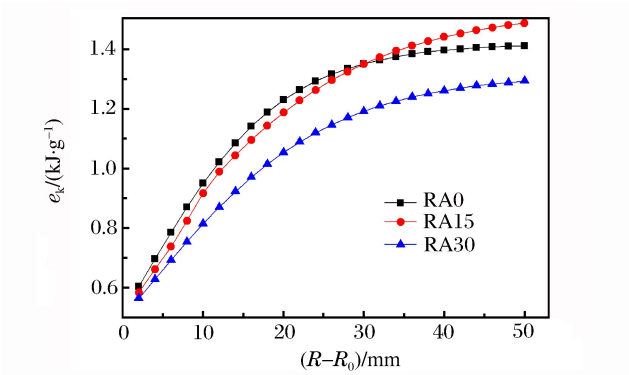

图 5 不同膨胀距离处筒壁比动能关系

Fig. 5 Wall specific kinetic energies vs expansion distances

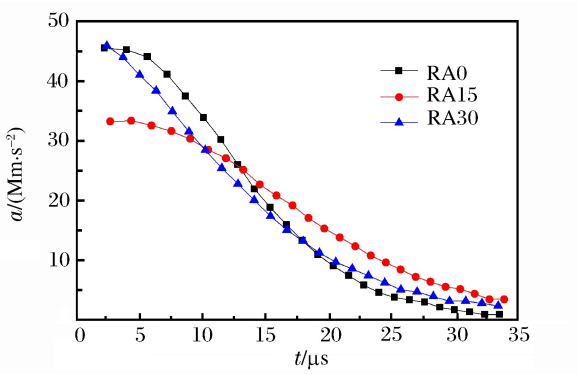

图 6 圆筒壁加速度时程曲线

Fig. 6 Histories of wall acceleration

3 铝粉反应进程分析

圆筒实验中铜管壁速与炸药爆炸释放的能量相关，根据格尼公式[9]，对于轴对称情况圆筒壁速可以用下式计算：

$$\frac{v_{\mathrm{f}}}{\sqrt{2E_0}}=\left(\frac{M}{m}+\frac{1}{2}\right)^{-\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中：v_{f}为圆筒壁膨胀速度，m 为炸药质量，M 为金属圆筒的质量，$\sqrt{2E_0}$ 具有速度量纲，称为炸药装药的格尼速度，是炸药的特征值。$E_0=E_{\mathrm{d}}-E_{\mathrm{i}}$，其中 E_{d} 为炸药爆炸释放的化学能，E_{i} 为炸药产物具有的内能。对式(4)进行变形可得到：

$$E_0=\frac{1}{2}v_{\mathrm{f}}^2\left(\frac{M}{m}+\frac{1}{2}\right) \tag{5}$$

在相同的比体积处，$E_0=\eta(v)E_{\mathrm{d}}$，这里 v 为炸药爆轰产物与炸药的比体积，$\eta(v)$为炸药能量的利用率，对于不同的炸药 $\eta(v)$在相同的比体积处近似相等，所以有：

$$E_{\mathrm{d}}=\frac{1}{2\eta(v)}v_{\mathrm{f}}^2\left(\frac{M}{m}+\frac{1}{2}\right) \tag{6}$$

式中：E_{d} 为炸药爆轰能。

非理想炸药如含铝炸药，能量释放可以分为 2 个阶段：一是混合炸药中理想成分(如 TNT、RDX、HMX)爆轰快速释能过程，此过程较短，一般小于 0.1 μs；二是非理想成分的慢释能阶段，此过程一般为几十微秒到几毫秒，如图 7 所示。相对于圆筒的膨胀时间(大于 10 μs)，含铝炸药中理想成分反应时间(小于 0.1 μs)较短，可以忽略其反应时间，则圆筒膨胀过程中含铝炸药的能量释放过程可表示为：

$$E_{\mathrm{d}}=Q_{\mathrm{e}}+\lambda(t)Q(\mathrm{Al}) \tag{7}$$

式中：Q_e 为理想成分释放的能量，$Q(\mathrm{Al})$为铝粉燃烧释放的能量；$\lambda(t)$为铝粉反应度。

对于混合炸药的爆热可由经验公式计算[10]：$Q=Q_T-B(\rho_T-\rho_0)$，$Q_T=\sum Q_i\omega_i$，$B=\sum B_i\omega_i$，其中 Q 为装药密度，是密度为 ρ_0 时混合炸药爆热；Q_T 是密度为理论密度 ρ_T 时混合炸药爆热；Q_i 为混合炸药组分 i 特征热值；B 为爆热的密度修正系数；B_i 为混合炸药中组成 i 特征热值的密度修正系数，计算得到的炸药爆热如表 3 所示。

表 3 含铝炸药的爆热

Table 3 Heat of aluminum explosive

炸药	$\rho_T/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	$\rho_0/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	$Q/(\mathrm{MJ\cdot kg^{-1}})$	$Q_e/(\mathrm{MJ\cdot kg^{-1}})$	$Q(\mathrm{Al})/(\mathrm{MJ\cdot kg^{-1}})$
RA0	1.737	1.677	5.637	5.637	—
RA15	1.817	1.775	6.489	4.801	1.688
RA30	1.906	1.861	7.324	3.950	3.374

以 RA0 作为参考炸药，根据式(6)～(7)可以求出 RA15 和 RA30 炸药中铝粉反应度，如图 7 所示。从图 7 中可以看出，反应度在最开始有一个下降的过程。显然不符合实际情况，这是由于金属筒壁的加速主要是由冲击波和爆轰产物膨胀共同作用的结果。初始阶段冲击波对圆筒的加速是主要的，而冲击波对圆筒加速作用主要由 2 个方面决定：一是入射波压力，二是入射波的波阻抗。含铝炸药的入射冲击波压力小于 RA0 炸药，因此加入铝粉会使圆筒壁膨胀速度降低，但是由于含铝炸药的波阻抗大于 RA0 含铝炸药，这又有利于提高圆筒壁的速度。

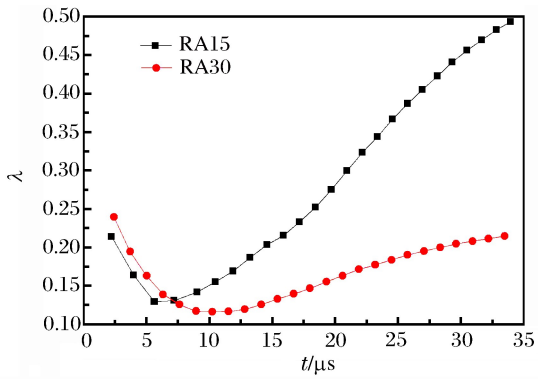

图 7 含铝炸药中铝粉反应度

Fig. 7 Reaction degree of aluminum in explosive

在圆筒膨胀的初期，圆筒与炸药爆轰产物的作用过程较复杂，激光干涉测试和数值模拟表明[10]最初圆筒壁速存在着振荡，但是采用扫描相机难以观测到这样的情况，因此初始阶段筒壁速度并不满足格尼公式，只有当圆筒膨胀到一定距离后，根据该方法求得的铝粉反应度才是有意义的，因此本文中只考虑 10 μs 后铝粉的反应度。从图 7 中可以看出，对于 RA15 和 RA30 炸药 10 μs 以后铝粉反应度随时间逐渐增大，34 μs 时刻铝粉的反应度为 0.49，如果认为铝粉的反应速率不随时间变化，据此估算铝粉的完全反应时间在69 μs，而 RA30 炸药的反应度仅为 0.21，这说明对于 RA30 炸药，此时大部分铝粉仍没有发生反应，同样如果认为铝粉的反应速率不随时间变化，则铝粉的完全时间为 162 μs。尽管 2 种含铝炸药的反应度存在着较大差别，但是考虑到 RA30 炸药中铝粉的质量分数是 RA15 炸药的 2 倍，因此在 34 μs 时刻，2 种炸药中参与反应的铝粉绝对量近似相等，这表明在铝粉的浓度对反应速率影响较小。

4 结　论

圆筒实验结果表明：铝粉质量分数为 15%的含铝炸药做功能力最强，RDX 炸药次之，铝粉质量分数为 30%炸药做功能力最弱。在圆筒实验记录的结束时刻(约 34 μs)，铝粉质量分数为 15%的炸药，铝粉的反应度为 0.49，而铝粉质量分数为 30%炸药铝粉的反应度仅为 0.21，估算得到的铝粉的完全反应时间在 50～200 μs 之间。在进行含铝炸药配方设计时必须同时考虑铝粉的含量和反应时间，才能达到最佳的使用效果。

参考文献：

[1] Victorow S B. The effect of Al_2O_3 phase transitions on detonation properties aluminized explosives[C]// Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. San Diego, USA, 2002.

[2] Milne A M, Longbottom A W, Evans D J. The burning rate of aluminum particles in nitromethane in cylinder tests

[C]// Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. San Diego, USA, 2002.

[3] Miller P J. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion of non-ideal explosives[C]// Proceedings of MRS Symposium, Materials Research Society 1996:413-419.

[4] Trzcinski W A. Studies of detonation characteristics of aluminum enriched RDX compositions[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2007,32(5):392-400.

[5] Brousseau P. Detonation properties of explosives containing nanometric aluminum powder[C]// Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. San Diego, USA, 2002.

[6] 于川,李良忠,黄毅民. 含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 爆炸与冲击,1999,19(3):274-279.
Yu Chuan, Li Liang-zhong, Huang Yi-min. Studies on JWL equation of state of detonation product for aluminized explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(3):274-279.

[7] 计冬奎,高修柱,肖川,等. 含铝炸药作功能力和 JWL 状态方程尺寸效应研究[J]. 兵工学报,2012,33(5):552-555.
Ji Dong-kui, Gao Xiu-zhu, Xiao Chuan, et al. Study on dimension effect of accelerating ability and JWL equation of state for aluminized explosive[J]. Acta Armamentarii, 2012,33(5):552-555.

[8] 卢校军,王蓉,黄毅民,等. 两种含铝炸药作功能力与 JWL 状态方程研究[J]. 含能材料,2005,13(3):144-147.
Lu Xiao-jun, Wang Rong, Huang Yi-min, et al. Study on work ability and JWL equation of state of two aluminized explosives[J]. Energetic Materials, 2005,13(3):144-147.

[9] 张宝坪,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社,2001.

[10] Baudin G, Lefrancois A, Bergues D, et al. Combustion of nanophase aluminum in the detonation products of nitromethane[C]// Proceedings of the 11th International Detonation Symposium. Snowmass, USA, 1998.

Reaction process of aluminized RDX-based explosives based on cylinder test*

Pei Hong-bo, Jiao Qing-jie, Qin Jian-feng

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The copper cylinder tests were carried out to explore the effects of the aluminum contents on the performances of aluminized RDX-based explosives. In the tests, the outer diameter of the copper cylinder was 50 mm and the mass fractions of aluminum in the three RDX-based explosives were 0, 15% and 30%, respectively. In the three explosives tested, the acceleration ability of the explosive with the aluminum mass fraction of 15% was highest. However, the acceleration ability of the explosive with the aluminum mass fraction of 30% was lower than that of the pure RDX. The Gurney formula was used to analyze the reaction process of aluminum with detonation products in the aluminized RDX-based explosives. About 49% aluminum by mass had reacted in the explosive with the aluminum mass fraction of 15% at 34 μs, while in the explosive with the aluminum mass fraction of 30%, only about 21% aluminum by mass had reacted. And the reaction time of aluminum powder with the size of 10 μm was 50-200 μs.

Key words: mechanics of explosion; reaction process; cylinder test; aluminized explosive; reaction time; RDX

---

* Received 27 March 2013; Revised 22 May 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11172042)
Corresponding author: Pei Hong-bo, hongbo2751@sina.com

(责任编辑 王易难)