

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.01.002

# 铝粉比表面积与质量分数对浆状温压炸药爆炸冲击波影响的实验研究\*

李鸿宾 王建灵 张为鹏 严家佳  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

**[摘要]** 将IPN作为含能液体组分,LiF作为惰性填充物质,利用FLQT—4、FLQ56和FLQ355A 3种牌号铝粉,配备了15种浆状温压炸药。在一半密闭爆炸室中进行空中爆炸实验,从冲击波超压和冲量两个方面讨论了铝粉比表面积和质量分数对实验装药冲击波输出的影响。结果表明:铝粉比表面积增大,冲击波峰值超压和冲量减小,铝粉质量分数增大,超压减小,冲量增大;对于只含有IPN和FLQ355A铝的配方,加入60%铝粉,冲击波峰值超压达到最大值,铝粉质量分数在40%~80%之间时,冲量随着铝粉质量分数的增加而呈线性增加。

**[关键词]** 应用化学 温压炸药 后燃烧 冲击波

**[分类号]** TQ56 O382+.1

## 引言

铝粉作为一种高热值的金属添加剂,可以提高炸药的爆热、爆温,延长炸药爆炸反应的时间,从而增强炸药在周围介质中的冲量,提高炸药的做功能力,因此在混合炸药中得到了广泛应用。然而目前对于铝粉的爆炸反应机理还没有统一的认识。

苗勤书、徐更光等人<sup>[1]</sup>应用二次反应论和惰性热稀释理论解释了铝粉形状和粒度对炸药爆炸性能的影响机理,其根本原因是由于铝粉比表面积不同造成的。然而该研究是基于固态含铝炸药,对于浆状体系温压炸药是否仍然存在这种规律有待考证。陆明、郑礼木等人<sup>[2]</sup>从爆热和作功能力角度研究了铝粉质量分数对含铝膨化硝酸铵炸药性能的影响,结果表明铝粉的最佳配比为6%。冯晓军等人<sup>[3]</sup>通过空中爆炸实验,研究了梯铝炸药冲击波参数随铝粉质量分数的变化规律,结果表明,随着铝粉质量分数的增加,冲击波参数减小。含铝温压炸药中铝粉还有另一种反应形式,即后燃烧。后燃烧是一种湍流燃烧过程,反应过程非常复杂,目前关于铝粉在该阶段反应机理的研究论文较少。李疏芬、金乐骥<sup>[4]</sup>研究了铝粉粒度对含铝推进剂燃烧性能的影响,结果表明,小颗粒铝粉的燃烧反应残渣中未反应的铝含量较多,并认为是由于比表面积大的铝粉更容易发生熔联、积聚所致。但是该研究结果是推进剂燃烧

条件下得到的,能否用来对爆炸现象进行解释还需做进一步的研究。

参照国外浆状温压炸药配方,选用IPN、铝粉、LiF的简单体系,在一半密闭爆炸室中利用冲击波超压测试技术,从冲击波峰值超压和冲量角度讨论了铝粉比表面积和质量分数变化对装药冲击波输出的耦合影响,根据实验结果讨论了浆状体系炸药中铝粉的反应机理。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

选择了比表面积依次增大的3种牌号铝粉,FLQ355A、FLQT—4和FLQ56,用西安近代化学研究所自制的量气法装置测定了活性铝的质量分数;用美国ASAP2020比表面积和空隙度吸附仪测定了铝粉的比表面积,结果见表1。硝酸异丙脂(IPN),为白色透明液体,分子式 $(\text{CH}_3)_2\text{CHONO}_2$ ,沸点 $100\sim 102^\circ\text{C}$ ,闪点 $12^\circ\text{C}$ ,相对密度1.0361。LiF和铝粉的

表1 铝粉性质

Tab.1 Properties of aluminum powder

参数	形状	活性铝 质量分数/%	比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )
FLQ355A	球状	99.04	0.3760
FLQT—4	球状	99.57	0.8381
FLQ56	片状	83.92	7.2846

\* 收稿日期:2012-10-10

基金项目:总装备部重大专项基金

作者简介:李鸿宾(1988~),男,硕士。主要研究方向:爆炸力学及炸药性能评估。E-mail:lihongbin6868@163.com

通信作者:王建灵(1962~),女,研究员,研究方向:危险品分级、炸药性能评估。

密度相似,可作为很好的惰性填充物质。

装药直径 60mm,高度随密度变化而变化,用 20g 带 8# 雷管孔的 JH—14 起爆药柱端面起爆。装药结构见图 1。浆状炸药配方参数见表 2。

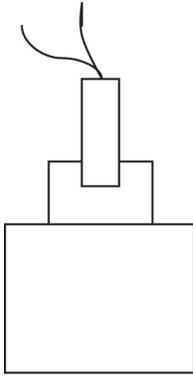


图 1 装药结构

Fig. 1 Charging structure

表 2 浆状温压炸药参数

Tab. 2 Formulation parameters of slurry thermo-baric explosives

编号	铝粉型号	质量分数%			药量/ g	装药 高度/ mm
		IPN	Al	LiF		
1#	—	100	0	0	80	28
2#	FLQ355A	20	67	13	200	55
3#		30	59	11	200	54
4#		40	50	10	200	52
5#		20	80	0	200	55
6#		30	70	0	200	53
7#		40	60	0	200	52
8#		50	50	0	200	50
9#		60	40	0	200	48
10#		FLQT—4	20	67	13	200
11#	30		59	11	200	51
12#	40		50	10	200	48
13#	FLQ56	20	80	0	200	120
14#		30	70	0	200	110
15#		40	60	0	200	100

## 1.2 实验布局

实验是在一个八角形半密闭爆炸塔中进行的,装药通过支架悬挂于空中,装药中心离地 1.4m,两支激波压力传感器( $P_1, P_2$ )和装药中心在同一水平面上,距离装药中心 0.8m。实验布局见图 2。

## 1.3 测试系统

压力传感器:137A23 自由场压力传感器(图 2 中  $P_1, P_2$ ),美国压电有限公司,量程 0 ~ 0.35MPa; 适配器 F482 型 ICP 传感器专用适配器,PCB 公司; 波形记录仪:JV—200 型波形记录仪,四川纵横公司

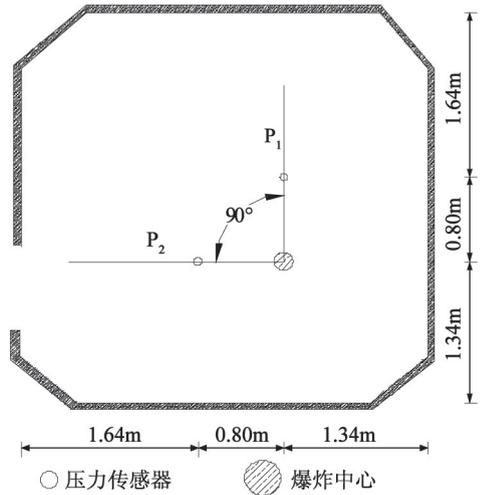


图 2 实验布局

Fig. 2 Experimental layout

生产;传感器安装支架:自行设计的高强度、减震型支架。

## 2 结果与讨论

在第 1.2 节中的爆炸塔中,对第 1.1 节所述 15 种温压炸药进行空中爆炸实验。考虑到浆状温压炸药的爆轰性质,对每发装药重复做两次。得到测点处的冲击波峰值超压和正压作用时间,将压力曲线在正压作用时间内做定积分,得到相应的冲量。将每个配方的冲击波峰值超压和冲量分别取算术平均值,结果列于表 3。

表 3 冲击波参数

Tab. 3 Parameters of shock wave

编号	$\Delta p$ /MPa	$i$ /(Pa · s)	$\tau$ /ms
1#	0.150	35.12	1.10
2#	0.231	70.10	1.25
3#	0.286	63.25	1.14
4#	0.321	55.60	1.12
5#	0.285	87.12	1.50
6#	0.335	80.56	1.47
7#	0.467	70.08	1.25
8#	0.250	55.12	1.14
9#	0.230	50.25	1.12
10#	0.200	46.65	1.20
11#	0.251	38.12	1.02
12#	0.241	35.61	1.00
13#	0.180	42.50	1.12
14#	0.210	38.80	1.14
15#	0.231	35.50	1.50

## 2.1 铝粉反应机理分析

试验中所配浆状炸药爆炸过程可分为爆轰、二

次反应和后燃烧三个阶段。前两个阶段持续时间一般小于1ms,后燃烧持续几十到几百毫秒不等。

对表3中的数据进行分析,将含有相同质量IPN的1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、12<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>配方所测结果进行比较,结果见图3。

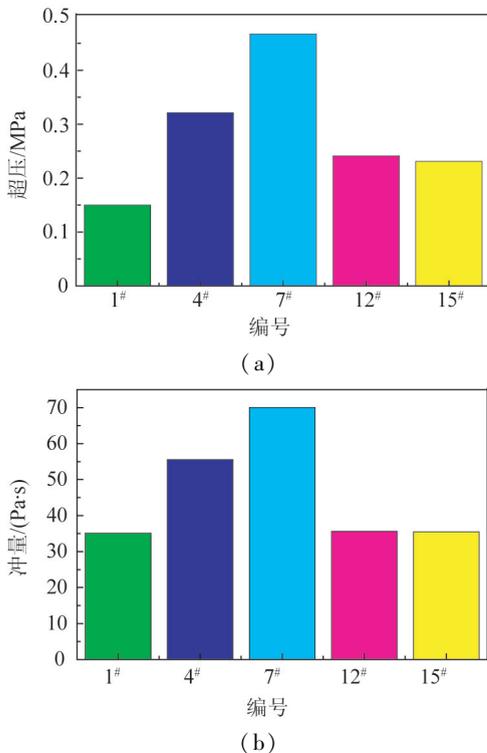


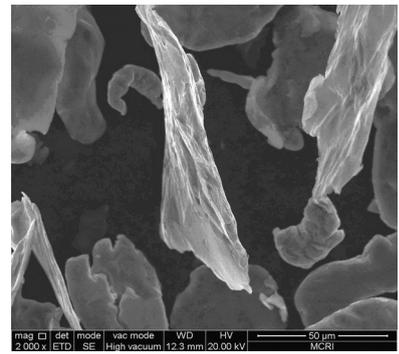
图3 不同配方冲击波参数对比

Fig. 3 Comparison of shock wave parameters for different formulas

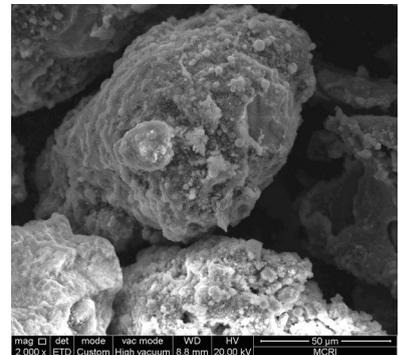
可见,含有80g纯IPN的1<sup>#</sup>配方,冲击波峰值超压和冲量都低于其他含铝配方,这说明装药中铝粉反应释能对以上两参数都有贡献,但不能确定是铝粉在哪个阶段释能所致。因为铝粉存在后续的燃烧或爆燃反应,燃烧产物压缩周围空气产生的持续压力波可能会在一定距离处形成冲击波,如果该冲击波赶上了初始冲击波,并且两者发生正向叠加,那么即使铝粉没有参与初始爆轰反应,也会在测点处表现出较大的峰值超压和冲量。要确定装药中铝粉在爆轰反应区的作用,需要直接测定装药的爆轰输出压力。

关于铝粉燃烧机理的研究表明,铝粉颗粒在燃烧过程中会发生熔联、团聚,严重影响燃烧效率<sup>[4-7]</sup>。本实验中,铝粉是后燃烧反应阶段的主要参与者,其反应效率直接影响装药后续的能量输出。鉴于此,收集了爆炸现场残余的部分铝粉,利用扫描电子显微分析(SEM)得到了FLQ56铝粉爆炸反应前后表面形态,结果见图4。

可见,本为片状的FLQ56铝,爆炸之后发生了



(a)



(b)

(a)爆炸前;(b)爆炸后

图4 铝粉爆炸前后外观变化

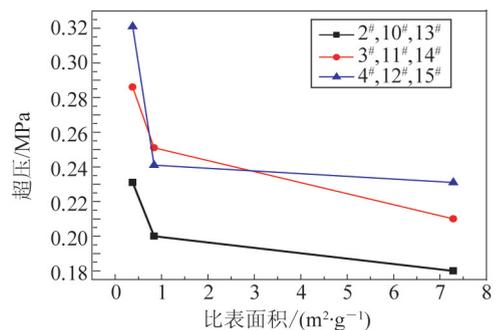
Fig. 4 Appearance change of aluminum powder after explosion

严重的层叠、团聚,图4(b)中铝团表面的球形颗粒是铝氧化物形成的氧化帽。这说明,爆炸条件下,铝粉同样存在受热熔化、团聚现象,这势必影响铝粉的反应效率和装药的能量输出。

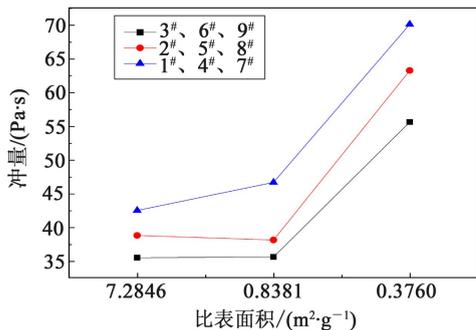
## 2.2 铝粉比表面积对冲击波峰值超压和冲量的影响

将表3中的2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>~15<sup>#</sup>配方所测结果进行分析,首先按照配方相似原则将9个配方分为3组,含有20% IPN的2<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>、13<sup>#</sup>配方为一组,含有30% IPN的3<sup>#</sup>、11<sup>#</sup>、14<sup>#</sup>配方为一组,含40% IPN的4<sup>#</sup>、12<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>配方为一组。结果见图5。

可见,不同铝粉质量分数情况下,装药中加入比



(a)



(b)

图 5 峰值超压和冲量随铝粉比表面积变化规律

Fig. 5 The shock wave peak overpressure and impulse as a function of specific surface area

表面积较大的片状 FLQ56 铝之后,两参数都大幅度减小。

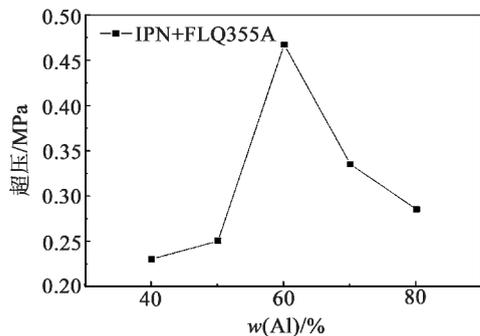
这是由于试验配方中铝粉质量分数都超过了 40%,整个装药就像是在大量铝颗粒构建的空间中填满了 IPN,观察表 2 中的装药高度,可以发现,含有 FLQ56 铝的装药都具有较大的装药高度,并且根据现场观察,该类装药中的铝粉大部分都是“干”的,很容易飞散,说明此时 IPN 不足以充分润湿所含的铝粉,装药密度较低,导致冲击波峰值超压和冲量大幅度降低。

### 2.3 铝粉质量分数对冲击波峰值超压和冲量的影响

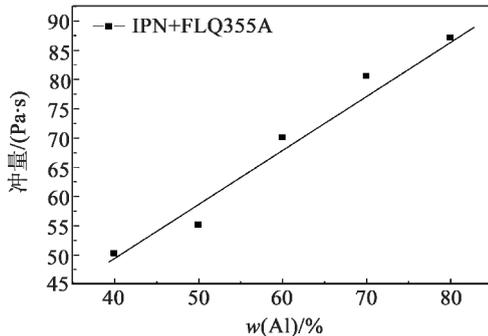
装药中加入粒径较大的球形铝粉能够得到较大的冲击波峰值超压和冲量,因此选择 FLQ355A 铝粉,考察铝粉质量分数对冲击波输出的影响,将铝粉质量分数  $w(\text{Al})$  分别为 40%、50%、60%、70%、80% 的 9#、8#、7#、6#、5# 配方所得冲击波参数进行分析,结果见图 6。

可见,随着铝粉质量分数的增加,冲击波峰值超压先增加后减小,铝粉质量分数为 60% 时达到最大值;冲量随铝粉质量分数的增加呈线性增加趋势。

这个结果说明,在装药密度变化不大的情况下,随着铝粉质量分数的增加,冲击波峰值超压和冲量



(a)



(b)

图 6 峰值超压和冲量随铝粉质量分数变化规律

Fig. 6 The shock wave peak overpressure and impulse as a function of aluminum content

都有较大的增加,铝粉和 IPN 配比为 2 : 3 时冲击波输出最优。冲量受铝粉释能的影响较大,所以当铝粉质量分数大于 60% 时,冲击波峰值超压开始下降,而冲量依然呈上升的趋势。将图 6(b) 中的实验数据进行拟合得到公式(1):

$$y = 0.991x + 9.118, 40 < w(\text{Al})\% < 80 \quad (1)$$

对于 IPN + FLQ355A 的配方体系,可以用公式(1)对冲量进行估算。

### 3 结论

影响炸药反应机理的不确定因素有很多,对于本实验中的浆状温压炸药可以根据实验数据得到以下三条结论:

1) 由于铝粉反应释能,初始冲击波得到了增强,表现出较大的峰值超压;爆炸反应过程中铝粉会发生团聚,从而影响铝粉的反应效率;

2) 铝粉质量分数较大(质量分数超过 40%) 的情况下,随铝粉比表面增大,冲击波峰值超压和冲量减小;

3) 对于 IPN 和 FLQ355A 铝粉的配方,含 60% 铝粉冲击波输出达到最优,配方中铝粉质量分数在 40% ~ 80% 之间时,冲量随着铝粉质量分数的增加而呈线性增加。

### 参考文献

[1] 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):4-5,8.  
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): 4-5, 8.

[2] 陆明,郑礼木,吕春绪,等. 含铝高威力膨化硝酸铵炸药研究[J]. 爆破器材,2000,29(6):13-16.  
Lu Ming, Zheng Limu, Lv Chunxu, et al. High strength

- expanded ammonium nitrate explosive containing aluminum powder [J]. *Explosive Materials*, 2000, 29(6): 13-16.
- [3] 冯晓军, 王晓峰, 黄亚峰, 等. 铝粉含量对梯铝炸药爆压和冲击波参数的影响 [J]. *火炸药学报*, 2009, 32(5): 1-4.  
Feng Xiaojun, Wang Xiaofeng, Huang Yafeng, et al. Effect of aluminum content on the detonation pressure and shock wave parameters of TNT/Al explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(5): 1-4.
- [4] 李疏芬, 金乐骥. 铝粉粒度对含铝推进剂燃烧特性的影响 [J]. *含能材料*, 1996, 4(2): 68-74.  
Li Shufen, Jin Leji. Effects of aluminum particle size on combustion behavior of propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 1996, 4(2): 68-74.
- [5] Glotov O G. Condensed combustion products of alumi-
- nized propellants. IV. Effect of the nature of nitramines on aluminum agglomeration and combustion efficiency [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2006, 42(4): 436-449.
- [6] Dwivedi R K, Gowda G. Thermal stability of aluminum oxides prepared from gel [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1985, 23(4): 331-343.
- [7] 严启龙, 张晓宏, 李宏岩, 等. 固体推进剂中铝粉氧化过程及其燃烧效率影响因素 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2011, 9(4): 20-22.  
Yan Qilong, Zhang Xiaohong, Li Hongyan, et al. Oxidation process of aluminum powder in solid propellant and influence factors on its combustion efficiency [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2011, 9(4): 20-22.

## Experiment Study on the Effect of Specific Surface Area and Content of Aluminum Powder on Shock Wave Output of Slurry TBE

LI Hongbin, WANG Jianling, ZHANG Weipeng, YAN Jiajia

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

[ABSTRACT] Fifteen kinds of slurry TBE were fabricated by using IPN as energetic liquid composition, LiF as inert material, and aluminum powder FLQT-4, FLQ56 and FLQ355A. Air burst experiments were carried out in a half-confined explosion chamber to reveal the influence of specific surface area and particle size of aluminum powder on the shock wave output in view of overpressure and impulse. The result shows that peak overpressure and impulse decrease with the increase of aluminum specific surface area, while an increase in aluminum content leads to decreased overpressure and increased impulse. For the formula of IPN and FLQ355A, the peak overpressure of shock wave reaches to the maximum value with the addition of 60% aluminum powder, and the impulse increases linearly with the addition of aluminum powder in a range of 40% -80%.

[KEY WORDS] applied chemistry, thermo-baric explosive, afterburning, shock wave output

## 民爆专利信息

专利名称: 全保险型人雨弹引信

专利申请号: CN200610095035.3 公开号: CN1908572

申请日: 2006.08.16 公开日: 2007.02.07

申请人: 长安汽车(集团)有限责任公司

全保险型人雨弹引信, 一种涉及高炮用的人工消雷增雨弹引信。本发明主要包括引信体、上药盘、下药盘、回转体、托座、压螺、传爆管, 其主要特征是在现有技术的基础上改进了上、下两个药盘, 在上药盘底面与下药盘顶面的盘面上分别开有一个为  $134^\circ \sim 136^\circ$  的圆环形凹槽, 圆环形凹槽通过直线凹槽与中心圆凹槽贯通, 在下药盘上端的右侧装有接火药柱, 下药盘内装有回转体, 下药盘和回转体的左、右对应的两侧, 分别装有离心保险螺塞、离心簧、离心销和保险销、火药保险螺塞, 对传爆管的外形尺寸也作了改进。本发明的优点是: 碎片小、爆炸充分, 使用分布、延时可靠性好, 起爆更

完全。

专利名称: 一种安全气囊产气药及其制备方法

专利申请号: CN200510088724.7 公开号: CN1903805

申请日: 2005.07.29 公开日: 2007.01.31

申请人: 比亚迪股份有限公司

本发明提供了一种安全气囊产气药及其制备方法, 该产气药含有叠氮化钠, 其中, 该产气药还含有金属硫化物和(或)金属氧化物、碱金属的硝酸盐和助剂; 以产气药总质量为基准, 所述产气药中叠氮化钠的质量分数为 30% ~ 70%, 金属硫化物和(或)金属氧化物的质量分数为 25% ~ 60%, 碱金属的硝酸盐的质量分数为 0.1% ~ 10%, 助剂的质量分数为 0.1% ~ 10%, 所述助剂选自铝的氧化物或硫化物, 铝的氧化物, 碱土金属的硅酸盐中的一种或几种。由于本发明提供的产气药具有良好的流散性及一致性, 产气效率高。

(王元荪)