

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.06.004

# 不同测试条件下炸药爆炸后有毒气体含量的差异研究\*

孙晨 夏光 赵晓莉 何振 王傲 杨文

中煤科工集团淮北爆破技术研究院有限公司检测中心(安徽淮北,235100)

**[摘要]** 为研究在不同测试条件下工业炸药爆炸后有毒气体含量的差异,分别利用大爆炸箱常压测试装置和传统小弹筒测试装置对工业炸药进行起爆测试,分析比较了测试结果。结果表明:两种测试条件下测得的炸药爆炸后有毒气体含量存在明显差异,大爆炸箱中的有毒气体含量低于小弹筒中含量。在小弹筒测试条件下,现场混装炸药较难达到完全爆轰,导致炸药产生大量的有毒气体;说明传统小弹筒测试方法对于现场混装炸药爆炸后有毒气体含量的测试相对局限。研究结果对于工业炸药尤其是现场混装炸药爆炸后有毒气体含量测试方法的完善和建立提供理论支撑。

**[关键词]** 工业炸药;大爆炸箱测试装置;小弹筒测试装置;有毒气体含量

**[分类号]** TQ560.7

## Study on the Difference of Toxic Gas Production in Explosive Explosion under Different Test Conditions

SUN Chen, XIA Guang, ZHAO Xiaoli, HE Zhen, WANG Ao, YANG Wen

Testing Center, Huaibei Blasting Technology Research Institute Co., Ltd., China Coal Science and Industry Group (Anhui Huaibei, 235100)

**[ABSTRACT]** In order to study the difference of toxic gas production in explosion of industrial explosives under different test conditions, the detonation test of industrial explosives was carried out by using the atmospheric pressure test device of the large explosion box and the traditional small cartridge test device, respectively. Test results were analyzed and compared. Results show that there are obvious differences in output of explosive toxic gas measured by the two test devices. Toxic gas test results of the explosive in the large explosion box are lower than those in the small cartridge. In addition, under the test conditions of small cartridges, it is difficult to achieve complete detonation for mixed explosives on site, resulting in the generation of a large amount of toxic gas from the explosives. Furthermore, it is explained that the traditional small cartridge test method is relatively limited for the toxic gas test of mixed explosives on site. The research results provide theoretical support for the improvement and establishment of the test method for the toxic gas production of industrial explosives, especially mixed explosives on site.

**[KEYWORDS]** industrial explosives; large explosion box test device; small cartridge test device; toxic gas content

## 引言

工业炸药以成本低、应用可靠等特点被广泛应用于各个领域的工程爆破作业中<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着国家对安全问题的重视程度日益提高,炸药在使用过程中的安全技术指标也得到高度重视。其中,较为重要的是炸药爆炸产生的有毒气体,严重威胁作业人员的身体健康<sup>[3]</sup>。目前,国内学者对于炸药爆

炸产生有毒气体方面的研究已相当丰富,涉及工艺条件、炸药包装、弹筒扩孔率、爆温、爆压以及炸药含水量等因素对有毒气体含量的影响<sup>[4-7]</sup>。但这些研究均基于传统小弹筒抽真空的测试方法之上,该方法需要抽真空进行,并且弹筒容量较小,导致测试药量受限,这与实际常压爆破作业的条件不符<sup>[8]</sup>。并且研究对象多局限在工业卷装炸药,现场混装炸药方面的研究相对匮乏。

笔者实验室前期建立了有毒气体爆炸箱测试装

\* 收稿日期:2022-06-11

第一作者:孙晨(1992-),男,硕士,助理工程师,主要从事民用爆破器材安全与性能的基础研究及检测。E-mail:117525575@qq.com

置,可以对炸药爆炸产气进行大量常压条件测试。基于实验室大爆炸箱常压测试装置,建立了针对多孔粒状铵油炸药这类现场混装炸药爆炸后的有毒气体测试方法<sup>[9]</sup>。

为确定更加精确的炸药爆炸后有毒气体含量的测试方法,本文中,主要基于大爆炸箱和小弹筒两种试验测试装置,对常见的工业炸药和现场混装炸药进行了爆炸后有毒气体含量的测定,比较了测试结果的差异性。为工业炸药爆炸后有毒气体含量测试方法的完善以及针对具体炸药选择合适的爆后有有毒气体测试装置及方法提供理论依据和技术支撑。

## 1 试验部分

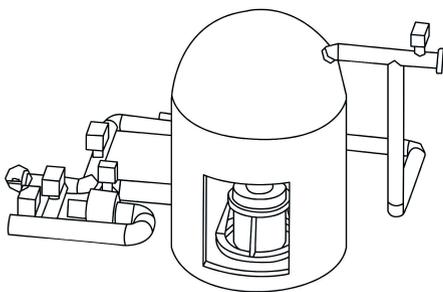
### 1.1 试验装置与主要仪器

#### 1.1.1 试验装置

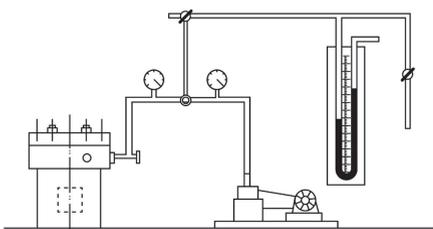
试验装置如图1所示。

图1(a)为大爆炸箱测试装置。内置钢炮:外部尺寸 $\varnothing 450\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ ,中心孔尺寸 $\varnothing 100\text{ mm} \times 420\text{ mm}$ ;主体为圆柱体,内径2.60 m,总高3.30 m,顶部为 $\varnothing 2.6\text{ m}$ 的半球体,有效容积<sup>[9]</sup>(含管道)为 $17.24\text{ m}^3$ 。

图1(b)为小弹筒测试装置。内置钢炮:外部尺寸 $\varnothing 240\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ,中心孔尺寸 $\varnothing 45\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ;主体为外径0.60 m、内径0.35 m、深度0.55 m的钢制圆筒,有效容积约 $0.05\text{ m}^3$ 。



(a) 大爆炸箱测试装置



(b) 小弹筒测试装置

图1 两种测试装置

Fig. 1 Two test devices

### 1.1.2 试验仪器设备

温度湿度计,型号 AS106A;红外线 CO 分析仪,型号 GXH-3011A1、GXH-3011N;紫外-可见分光光度计,型号 UV1900。

### 1.2 试验方案

选择的工业炸药样品(包含现场混装炸药)为岩石乳化炸药、三级煤矿许用乳化炸药、水胶炸药、重铵油炸药和多孔粒状铵油炸药。现场混装炸药均采用三级煤矿许用乳化炸药作为起爆药。均以 8# 工业电雷管作为起爆具进行起爆测试。

为便于比较,将炸药样品分为两组:工业卷装炸药和现场混装炸药。所有样品均分别在两种测试装置中进行起爆,收集爆后气体试样进行测试分析。

参照之前建立的试验方法进行大爆炸箱测试<sup>[10]</sup>。工业卷装炸药试验药量为 600 g 左右,原药卷直接进行起爆;现场混装炸药采用牛皮纸将现场混装炸药改装成直径 80 mm 的药卷进行测试,起爆药量为 100 g,总药量 600 g 左右。整个测试过程要保证装置的气密性符合要求,起爆完毕后,循环 5 min 以上,取气进行分析。

小弹筒测试参照 GB 18098—2000《工业炸药爆炸后有毒气体含量的测定》中规定的方法进行。工业卷装炸药,试验药量 110 g 左右,将药卷装入弹筒中,加入 300 g 石英砂后进行抽真空,至剩余压力小于 4 kPa 后进行接线起爆。现场混装炸药,选择 30 g 左右起爆药置于 80 g 左右现场混装炸药之上,并采用牛皮纸改装成直径 35 mm 的药卷进行起爆测试。以上针对现场混装炸药的试验均假定起爆药与受试药爆炸后有毒气体具有加和性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 工业卷装炸药爆炸后有毒气体测试

将现有的工业卷装炸药样品分别在两个测试装置中按要求进行起爆,收集气体试样进行测试分析。每种炸药样品平行试验 2 次,结果取平均值。有毒气体测试结果如表 1 和表 2 所示。

从表 1 和表 2 数据可知,3 种工业卷装炸药在大爆炸箱中起爆测得的有毒气体含量明显低于在小弹筒中的测试结果。造成这种情况的原因可能有以下几方面:首先,大爆炸箱为常压测试条件,箱体空间较大且含有空气,空气中的  $\text{O}_2$  会导致爆炸产生的 CO 向  $\text{CO}_2$  转变,从而导致 CO 含量下降,有毒气体总含量下降;其次,大爆炸箱内用于试验的白炮孔径较大,因此,覆盖试验药量的药卷需要的石英砂用量

表1 大爆炸箱有毒气体测试结果

Tab. 1 Test results of toxic gases in large explosive boxes

炸药种类	药量/ g	V(CO)/ (L · kg <sup>-1</sup> )	V(NO <sub>x</sub> )/ (L · kg <sup>-1</sup> )	V <sub>有毒</sub> / (L · kg <sup>-1</sup> )
三级煤矿 乳化炸药	600.0	7.90	0.19	9.10
岩石乳 化炸药	600.2	11.50	0.30	13.40
水胶 炸药	600.1	13.60	0.44	16.50

表2 小弹筒有毒气体测试结果

Tab. 2 Test results of toxic gases in small cartridge poisonous

炸药种类	药量/ g	V(CO)/ (L · kg <sup>-1</sup> )	V(NO <sub>x</sub> )/ (L · kg <sup>-1</sup> )	V <sub>有毒</sub> / (L · kg <sup>-1</sup> )
三级煤矿 乳化炸药	110.1	12.90	0.37	15.30
岩石乳 化炸药	110.6	16.40	0.47	19.50
水胶 炸药	110.5	17.10	1.13	24.50

远高于小弹筒中的用量,大量的石英砂会将药卷束缚得更加紧实,有利于炸药爆轰,同时,爆炸后石英砂能起到快速冷却周围气体的作用<sup>[11]</sup>,使反应向不利于CO生成的方向进行;最后,由于在小弹筒中测试需要进行抽真空操作,相当于给弹筒内施加压力,该操作很可能导致药卷状态发生改变,从而影响炸药的起爆性能。

为了进一步证实抽真空对炸药的影响,以三级煤矿许用乳化炸药为例,将炸药放进小弹筒中抽真空后取出,与未抽真空的药卷进行比较,结果如图2所示。同时,制作了3组抽真空后的炸药试样并进行爆速测试,与正常的爆速测试结果进行比较,结果如表3所示。

由图2可知,抽真空后的药卷外观状态发生了



(a) 抽真空后炸药 (b) 未抽真空炸药

图2 炸药抽真空前、后实物图

Fig. 2 Pictures of the explosive before and after vacuuming

表3 炸药抽真空前、后的爆速

Tab. 3 Detonation velocity of explosives before and after vacuuming

类别	m/s			
	v <sub>1</sub>	v <sub>2</sub>	v <sub>3</sub>	$\bar{v}$
未抽真空	4 237	4 310	4 424	4 324
抽真空	3 787	3 164	—	3 476

明显改变。从表3爆速的测试结果不难看出,抽真空后,药卷的爆速相对不稳定,其中一组试验未正常测出数值,平均爆速比原药卷测出的结果偏低。这从一定程度上说明了抽真空操作会影响炸药的性能,从而影响炸药的爆轰效果,导致爆后有毒气体测试结果与常压大爆炸箱中测试结果存在差异。

### 2.2 现场混装炸药爆炸后有毒气体测试

以三级煤矿许用乳化炸药作为起爆药,分别与重铵油炸药和多孔粒状铵油炸药改装成受试药卷,并在两种装置下进行测试,结果如表4所示。

由测试结果可知,现场混装炸药在两种测试装置下测得的爆后有毒气体含量差异比工业卷装炸药更加明显。其中,多孔粒状铵油炸药在小弹筒测试方法规定的试验药量下并未能正常取出气体试样;而单位质量重铵油炸药在小弹筒中测试得到的爆后有毒气体含量为184.3 L/kg,明显高于标准中规定的数值,并且有毒气体含量远大于在大爆炸箱中的测试结果。由于现场混装炸药为散装炸药,需要进行

表4 现场混装炸药爆炸后的有毒气体测试结果

Tab. 4 Test results of toxic gas after explosion of mixed explosives on site

炸药种类	试验装置	起爆 药量/g	装药量/ g	V(CO)/ (L · kg <sup>-1</sup> )	V(NO <sub>x</sub> )/ (L · kg <sup>-1</sup> )	V <sub>有毒</sub> / (L · kg <sup>-1</sup> )
重铵油炸药	小弹筒	30.2	80.6	24.0	16.9	184.3
重铵油炸药	爆炸箱	100.1	500.2	21.7	1.7	37.5
多孔粒状铵油炸药	小弹筒	30.8	80.1	—	—	—
多孔粒状铵油炸药	爆炸箱	100.2	500.0	20.0	2.3	40.5

改装后测试,并且由于小弹筒测试装置的条件限制,导致测试药量受限,装药受限,在该装药直径和药量下,所用现场混装炸药样品未能达到完全爆轰,产生较多的氮氧化物 $\text{NO}_x$ ,从而导致爆炸后产生的有毒气体增加。这也从侧面说明了对于现场混装炸药而言,小弹筒测试方法相对受限。为进一步证实这一结论,对现场混装炸药爆轰性能进行了研究。

### 2.3 现场混装炸药的爆轰性能研究

以重铵油炸药为待测样品,分别在两种测试装置中起爆,观察起爆后的现象,结果如图3所示。



(a) 大爆炸箱测试结果



(b) 小弹筒测试结果

图3 炸药在两种装置中爆炸后现象

Fig.3 Phenomena after explosion of explosives in two devices

从图3可以看出:重铵油炸药在小弹筒中起爆后,打开装置发现有大量深黄色烟雾;而将同一样品

在大爆炸箱中起爆,发现起爆后为白色烟雾。多孔粒状铵油炸药也存在同样现象。事实上,当爆轰不完全,未达到稳定爆轰状态时,会生成较多的有毒气体,尤其是氮氧化物;而氮氧化物较多时,表现为黄色烟雾,严重时呈棕褐色。因此,小弹筒爆炸后出现黄色烟雾,进一步说明了现场混装炸药在小弹筒测试装置条件下,爆轰效果不好。

同时,为排除小弹筒测试因起爆药量较小、起爆能量不足导致的现场混装炸药爆轰不完全,以80g左右重铵油炸药为对象,将起爆药量从30g左右增加至40g左右和50g左右,在同样条件下起爆,测试结果见表5。

由表5测试结果可得,在小弹筒测试装置中,保持重铵油炸药装药量不变的情况下,增加起爆药量,测试得到的爆后有毒气体含量仍然较大,尤其是改装后的药卷在小弹筒中起爆后产生了较多的氮氧化物。这也进一步证实了之前黄色烟雾的现象,从而说明了现场混装炸药在小弹筒中起爆,在当前装药条件下很难达到稳定爆轰。并且由于装置条件限制,继续增加起爆药量意义不大,也说明了传统小弹筒测试方法对于现场混装炸药爆炸后的有毒气体测试有一定的局限性。

## 3 结论

1)工业炸药在大爆炸箱常压测试装置和小弹筒测试装置中测得的爆后有毒气体含量存在一定的差异。

2)在小弹筒中,工业炸药爆后有毒气体含量测试结果高于大爆炸箱中的测试结果。主要由于两种装置不同的测试条件导致;同时,现场混装炸药在小弹筒中测试,爆后有毒气体含量远超标准规定,且爆轰效果不好。

3)大爆炸箱测试装置更加适用于无雷管感度的现场混装炸药爆后有毒气体测试。两种装置下,有毒气体含量测试结果的差异研究对于完善工业炸药爆炸后有毒气体测试方法以及建立合适的针对现场混装炸药爆后有毒气体测试手段的必要性提供技

表5 不同起爆药量下现场混装炸药在小弹筒中测试结果

Tab.5 Test results of mixed explosives on site in small cartridges under different priming charges

序号	起爆药量/ g	装药量/ g	总试验药量/ g	$V(\text{CO})/$ ( $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$V(\text{NO}_x)/$ ( $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$V_{\text{有毒}}/$ ( $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
1 <sup>#</sup>	30.2	80.6	110.8	24.0	16.9	184.3
2 <sup>#</sup>	40.7	80.3	121.0	23.4	19.8	188.4
3 <sup>#</sup>	50.6	80.5	131.1	22.8	16.2	181.5

术支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 李志军, 石小军, 张成勇. 混装炸药在川藏铁路隧道爆破施工的应用探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊2): 479-484.  
LI Z J, SHI X J, ZHANG C Y. Application of mixed explosives in tunnel blasting construction in Sichuan-Tibet Railway [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(Suppl. 2): 479-484.
- [2] 李大财, 何春辉. 露天混装乳化炸药和药卷包装炸药在金属矿山的应用比较[J]. 世界有色金属, 2016(12): 91-92.  
LI D C, HE C H. In the open air mixed loading emulsion explosive and the explosive cartridge packaging the application of metal mine [J]. World Nonferrous Metals, 2016(12): 91-92.
- [3] 金庆军. 煤矿乳化炸药爆炸有毒气体探究[J]. 山东煤炭科技, 2022, 40(3): 195-197.  
JIN Q J. Study on toxic gas of emulsion explosive explosion in coal mine [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2022, 40(3): 195-197.
- [4] 高贫, 潘峰. 工业炸药有毒气体含量测定的影响因素[J]. 爆破器材, 2014, 43(6): 30-34.  
GAO P, PAN F. Factors affecting the measurement of toxic gases produced by industrial explosives [J]. Explosive Materials, 2014, 43(6): 30-34.
- [5] 吴国群. 煤矿许用炸药爆炸后有毒气体含量的实验测定[J]. 煤炭技术, 2014, 33(5): 294-295.  
WU G Q. Determination of toxic gases content formed by detonation of permissible explosive [J]. Coal Technology, 2014, 33(5): 294-295.
- [6] 彭云昆. 浅析影响工业炸药爆炸后有毒气体含量的因素[J]. 爆破器材, 2010, 39(4): 35-38.  
PENG Y K. Analysis of factors influencing the content of toxic gases after industrial explosive explosion [J]. Explosive Materials, 2010, 39(4): 35-38.
- [7] 刘丽梅, 宁平, 吕春绪. 工业炸药爆炸后有毒气体含量测定方法标准的讨论[J]. 工程爆破, 2010, 16(1): 74-77.  
LIU L M, NING P, LÜ C X. Discussion on determination standard of toxic gas volume formed by detonation of industrial explosive [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(1): 74-77.
- [8] 高玉刚. 工业炸药有毒气体测试容器的研制[J]. 工程爆破, 2021, 27(4): 114-117, 123.  
GAO Y G. Development of toxic gas test vessel for industrial explosives [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(4): 114-117, 123.
- [9] 孙晨. 多孔粒状铵油炸药爆炸后有毒气体含量的常压测试方法[J]. 爆破器材, 2022, 51(1): 60-64.  
SUN C. Test method for volume of toxic gas produced by explosion of porous granular ammonium explosive at atmospheric pressure [J]. Explosive Materials, 2022, 51(1): 60-64.
- [10] 孙晨. 异形容器 JC-BN-500G 有毒气体爆炸箱容积标定方法[J]. 煤矿爆破, 2021, 39(3): 6-10.  
SUN C. Volume calibration method of JC-BN-500G shaped container for toxic gas explosion [J]. Coal Mine Blasting, 2021, 39(3): 6-10.
- [11] 徐龙, 姚银梅, 赵晓莉. 钢炮扩孔对小直径炸药有毒气体含量测定结果的影响[J]. 煤矿爆破, 2005(4): 15-16.  
XU L, YAO Y M, ZHAO X L. Discussions on the expanding effect of cannon on the measurement result of noxious gases from small diameter explosive tube [J]. Coal Mine Blasting, 2005(4): 15-16.

## 版 权 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部