

文章编号: 1006-9941(2011)05-0575-05

一种炮口火焰的测试方法研究

袁治雷¹, 贺增弟², 刘林林², 吕智星², 范雪坤¹, 邹秀梅³

(1. 中北大学理学院, 山西太原 030051; 2. 中北大学化工与环境学院, 山西太原 030051; 3. 泸州北方化学工业有限公司, 四川泸州 646003)

摘要: 为了更加精确地表征炮口火焰的强度, 用 CCD (charge-coupled device) 高速摄像机拍摄了 30 mm 火炮用发射药 A 和 B, 及硝胺发射药 C 的炮口火焰。用 Image-Pro Plus6.0 图像处理软件处理了实验图像, 得火焰面积、火焰最大直径、火焰平均直径、火焰平均周长和积分光密度 (IOD)。用 Wien 公式计算了炮口火焰温度。通过这些参数表征和分析了炮口火焰的强度。结果表明, 通过所得参数分析可表征炮口火焰的形状及强度。IOD 可作为表征炮口火焰几何尺寸及辐射亮度的参量。

关键词: 兵器科学与技术; 炮口火焰; CCD 技术; 积分光密度; 炮口火焰温度

中图分类号: TJ55; O69

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.021

1 引言

炮口火焰是常见的火炮有害射击现象之一, 其大小与火炮发射药的成分、药型、装药量、膛压、制退器种类等有关。炮口火焰对于武器系统和射手本身都是极为不利的, 主要表现在: 射击时很容易暴露武器平台的位置, 危及武器平台的安全; 炮口产生的火焰闪光, 影响瞄准, 降低打击精度, 甚至丢失目标; 火焰过大, 反映出发射药燃烧不完全, 能量的利用率低。

炮口火焰的测试方法主要有红外光谱法、B 门照相法、转鼓照相法等^[1]。其中, 红外光谱法测试结果准确, 但不能得到火焰的几何形状, 且实验费用高; B 门照相法测试结果实时性能不佳, 同时实验时的环境要求苛刻, 测试结果的判读误差较大; 转鼓照相法同样存在结果判读困难的缺陷。本研究应用高速 CCD 技术^[2-3], 对炮口火焰进行拍摄, 采用专业图像分析软件进行分析计算, 利用所得参数可以更加精确地表征炮口火焰的几何尺寸及辐射亮度。

2 方法原理

物体的光谱辐射度与单色光谱的辐射度的关系为

$$M(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T) d\lambda \quad (1)$$

收稿日期: 2010-12-21; 修回日期: 2011-03-20

作者简介: 袁治雷(1984-), 男, 硕士研究生, 从事发射药炮口火焰方面研究。e-mail: viola7788521@yahoo.com.cn

对于非黑体, 根据普朗克特定律, 同时考虑灰度 $G(\lambda, T)$ 的影响, 有

$$M(\lambda, T) = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (2)$$

式中, c_1 为第一辐射常数, $2\pi^5 hc^2, 3.74 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$; c_2 为第二辐射常数, $hc/k, 1.38054 \times 10^4 \mu\text{K} \cdot \text{m}$ 。

对于炮口火焰来说, 温度一般在 2000 K 左右, 且波长 $\lambda < 1000 \text{ nm}$, 故可用维恩公式代替普朗克公式进行计算, 其误差不超过 0.1%^[4-5]。灰体的维恩公式为

$$M(\lambda, T) = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-c_2/\lambda T} \quad (3)$$

根据 CCD 的感光特性, 其灰度 $G(\lambda, T)$ 根据式 (3) 变化为

$$G(\lambda, T) = R \cdot S_\lambda \cdot \varepsilon_\lambda \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-c_2/\lambda T} \quad (4)$$

式中, S_λ 为光谱敏感函数; R 为仪器常数, 与波长无关; ε_λ 为火焰的灰体辐射系数。

对式 (4) 取对数, 可得火焰温度为

$$T = \frac{c_2}{\lambda (\ln \varepsilon_\lambda - \ln G(\lambda, T) + \ln N)} \quad (5)$$

式中, $N = RS_\lambda c_1 / \lambda^5$, 为一常数, 可通过黑体标定求得。

对于不同灰度的炮口火焰的图象, 已知 $N, G, \varepsilon_\lambda$, 就可求解出温度值。

火焰的积分光密度 (IOD) 为

$$IOD = \iint_A G(\lambda, T) dA \quad (6)$$

式中, A 为火焰面积, m^2 。

通常, 火焰面积、火焰最大直径、火焰平均直径、火

焰平均周长都可从不同角度来表征炮口火焰的几何尺寸,炮口火焰的辐射亮度可用火焰温度表征,而积分光密度作为炮口火焰几何尺寸及辐射亮度的综合体现,可以表征炮口火焰的强度^[6-8]。

3 炮口火焰测试实验及图像处理

3.1 测试仪器及测试条件

测试平台: 30 mm 弹道炮。

主要测试仪器: Redlake 公司的 MotionScope PCI 1000SC 型高速摄像仪。测试参数: 拍摄速度 500 幅/s, 光圈 2.8。

图像处理软件: Image-Pro Plus6.0 软件。

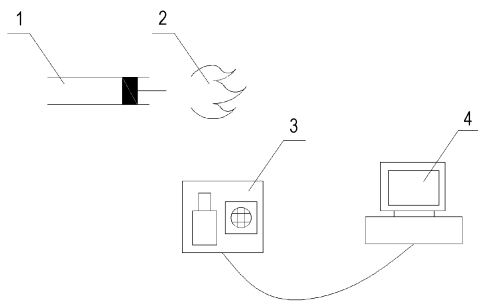


图 1 测试系统示意图

1—30 mm 弹道炮, 2—炮口火焰, 3—摄像机, 4—数据采集处理器

Fig. 1 The sketch map of the test system

1—30 mm cannon, 2—muzzle flash, 3—camera, 4—figure collector and processor

3.2 测试步骤

(1) 记录实验环境温度、相对湿度。

(2) 测试装置预热: 开启仪器系统电源, 预热不小于 0.5 h。

(3) 将摄像机设置增益为 0, 自动白平衡关闭, 光圈选为 2.8, 采集速度 500 幅/s。

(4) 在炮口沿炮弹飞出的方向设立标尺, 并用高速摄像机拍摄, 作为图片处理标尺。

(5) 在夜间中, 采用高速摄像机对炮口火焰进行拍摄, 得到炮口火焰照片序列。

3.3 图像处理步骤

(1) 根据标尺图像, 用 IPP 软件得到测量标准。

(2) 将待处理图像导入 IPP 图像处理软件中。

(3) 通过图像序列得到叠加图像, 处理得到火焰面积 A 、火焰最大直径 D_m 、火焰平均直径 D_{me} 、积分光密度 (IOD)、火焰平均周长 P_e 。

(4) 通过单张处理的方式得到图像灰度, 并据此计算火焰温度。

(5) 导出数据。

4 实验结果分析

4.1 实验图像处理

在 30 mm 弹道炮测试平台上进行射击实验, 用高速摄像机对三种不同发射药的炮口火焰进行拍摄, 得到的照片序列如图 2 ~ 图 4 所示。其中, 发射药 A 和发射药 B 是当前 30 mm 火炮所用制式装药, 发射药 C 是一种新型在研的含硝酸铵发射药。

采用 IPP 软件进行图像分析照片序列叠加, 得到炮口火焰叠加图表示火焰整体传播过程, 通过对其分析得到与炮口火焰相关的火焰面积、火焰最大直径、火焰平均直径、火焰平均周长以及积分光密度。三种不同发射药炮口火焰照片进行序列叠加图如图 5 所示, 其对应的 3D 光密度图如图 6 所示。

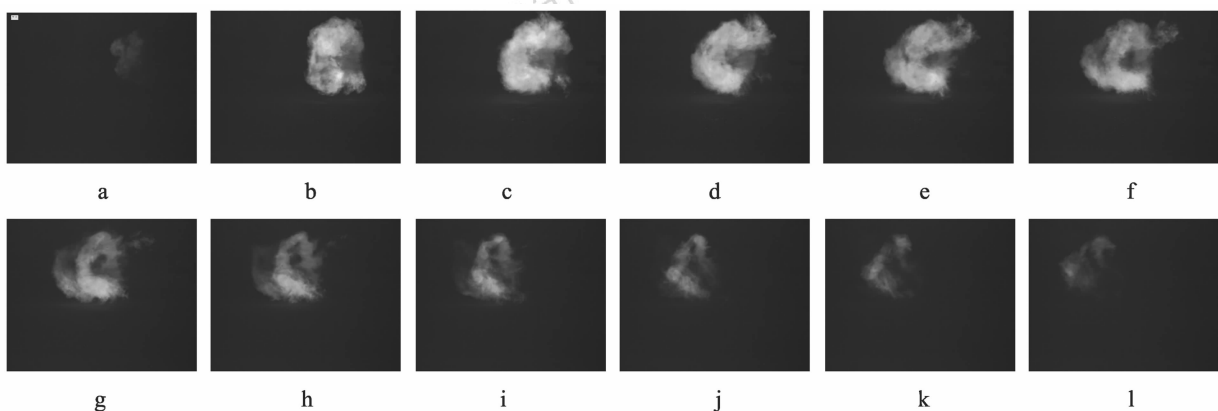


图 2 发射药 A 的炮口火焰照片序列

Fig. 2 The muzzle flash photographs of propellant A

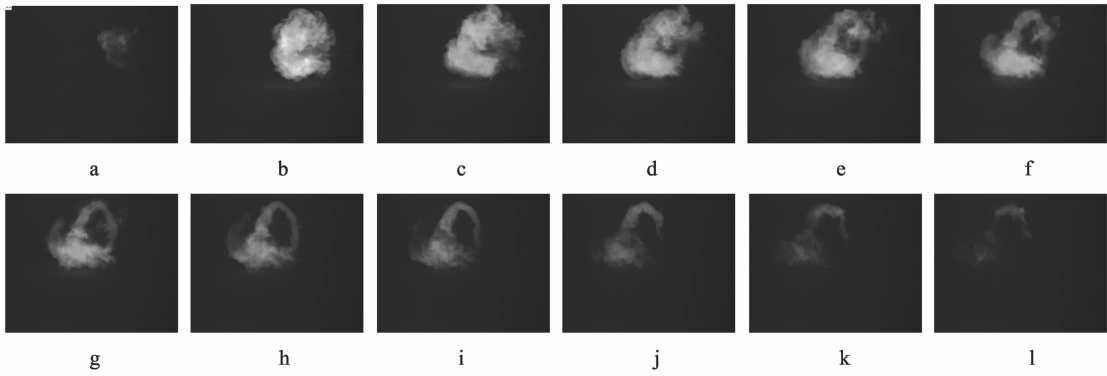


图3 发射药 B 的炮口火焰照片序列

Fig.3 The muzzle flash photographs of propellant B

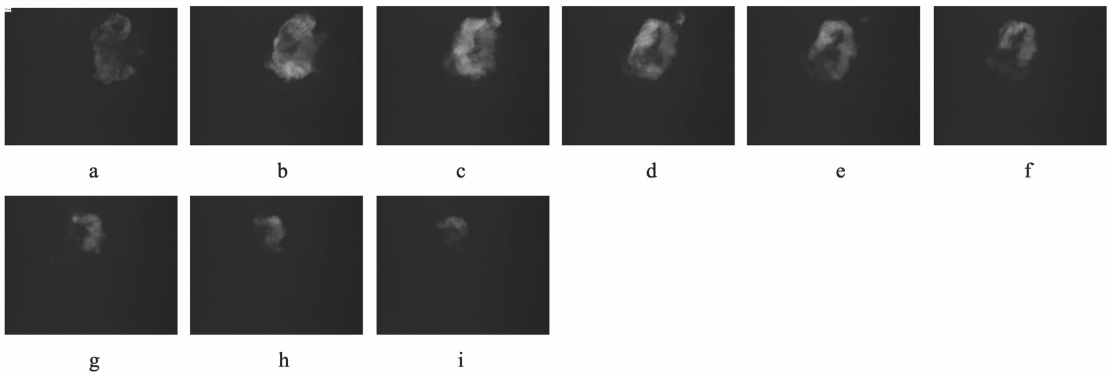


图4 发射药 C 的炮口火焰照片序列

Fig.4 The muzzle flash photographs of propellant C

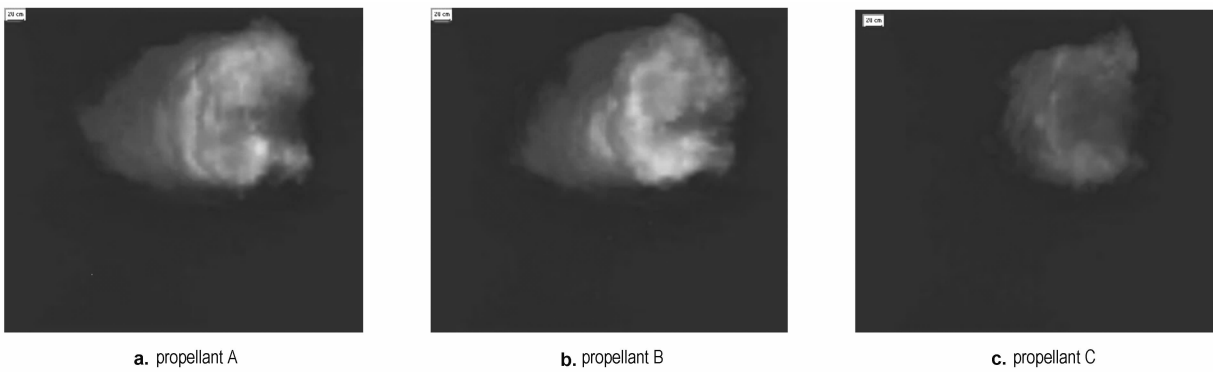


图5 发射药 A、B、C 的炮口火焰叠加图

Fig.5 The overlapped photographs of muzzle flash for propellant A,B and C

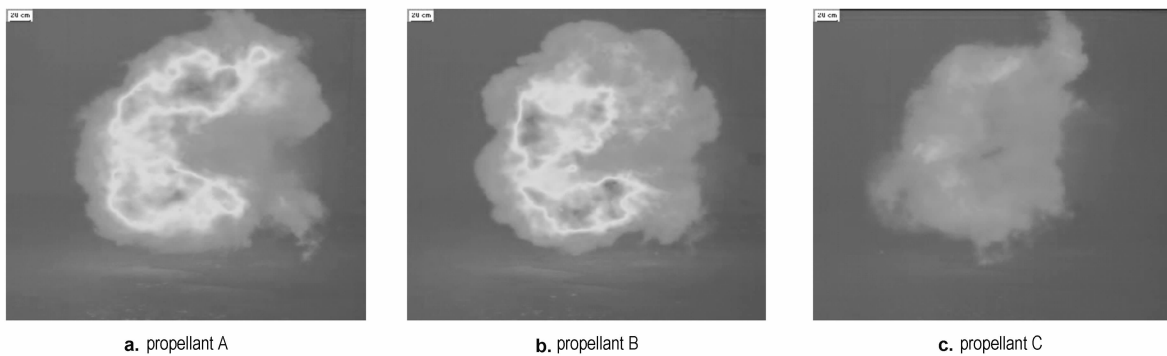


图6 发射药 A、B、C 的炮口火焰 3D 光密度

Fig.6 The 3D optical density photographs of muzzle flash for propellant A,B and C

对单张照片处理得到图像灰度,并据此计算火焰温度。选取三种发射药炮口火焰照片序列中亮度最高的,分别为图 2c、图 3b 以及图 4c。

4.2 炮口焰强度的表征方法

使用火焰面积 A 、火焰最大直径 D_m 、火焰平均直径 D_{me} 及火焰平均周长 P_e 表征火焰几何尺寸,使用火焰温度 T 表征火焰辐射亮度,使用积分光密度 (IOD) 综合表征炮口火焰的几何尺寸及辐射亮度。

使用 Image-Pro Plus6.0 图像处理软件对炮口火焰的叠加图像进行处理,得到火焰几何尺寸相关参量及积分光密度。选取照片最高亮度区,计算此区域的平均灰度的值,再由式(5)可求出火焰区最高温度,计算结果如表 1 所示。

表 1 炮口火焰参数计算结果

Table 1 The calculated values of the muzzle flash parameters

propellants	A /cm ²	D_m /cm	D_{me} /cm	P_e /cm	IOD /cm ²	T /K
A	48410.4	295.1	244.8	1150.2	5980595	2338.2
B	44940.5	271.2	237.7	1117.9	5668820	2325.1
C	29587.4	266.4	192.2	964.4	2322119	2237.4

硝酸铵作为一种发射药组分,具有使用成本低廉、能量水平较高的优点,但是由于硝酸铵具有较强的吸湿性,且含硝酸铵发射药一般炮口烟焰现象比较严重,大大限制了其在发射药装药中的应用。而由表 1 可知,A、B、C 三种发射药其炮口火焰面积、最大直径、平均直径、平均周长、积分光密度以及火焰最高温度都依次减小,各个参数与实际情况相符。故此新型含硝酸铵装药(发射药 C)具有比制式装药(发射药 A 和 B)更小的炮口焰,在一定程度上解决了含硝酸烟发射药炮口火焰较强的问题。

由实验数据分析可知,火焰面积、火焰最大直径、火焰平均直径、火焰平均周长可以从不同角度对炮口火焰的几何尺寸进行表征,炮口火焰最高温度可以表征火焰的辐射亮度,积分光密度作为炮口火焰几何尺寸及辐射亮度的综合体现,可以表征炮口火焰的强度。

基于高速 CCD 技术,可以直观得到炮口火焰的几何形状,通过 IPP 图像处理软件对拍摄照片进行计算与分析,在很大程度上降低了人为因素引起的误差,而且可以定量地对各发射药炮口火焰的强度进行分析,为进一步评估武器系统炮口火焰的强度提供现实依据。该方法弥补了红外光谱法不能得到火焰的几何

形状的缺点,同时解决了 B 门照相法测试结果实时性差、人为判读误差较大的不足。

5 结 论

使用 CCD 高速摄像机对炮口火焰进行拍摄,通过 IPP 软件对所得图像处理得到炮口火焰的各参数,通过相关公式计算出火焰最高温度和积分光密度,通过对各参数的分析可以对炮口火焰的强度进行更加准确的表征;本测试方法操作简单、实时性好,且在一定程度上降低了人为判读误差。

参考文献:

- [1] 王宏,孙美,冯伟,等. 发射药枪口烟焰检测技术研究[J]. 火炸药学报,2002,25(2): 57-58.
WANG Hong, SUN Mei, FENG Wei, et al. Study on the measurement technique for muzzle smoke and flash of deterred propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25(2): 57-58.
- [2] 雷志勇,李翰山. 线阵 CCD 测量高速弹丸图像信息处理研究[J]. 半导体光电,2009,30(5): 751-754.
LEI Zhi-yong, LI Han-shan. Study on high speed projectile image processing in linear CCD measure system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(5): 751-754.
- [3] 罗红娥,陈平,顾金良,等. 线阵 CCD 立靶系统全视场测量误差分析[J]. 光电技术,2009,35(3): 391-393.
LUO Hong-e, CHEN Ping, GU Jin-liang, et al. Error analysis on the linear CCD crossing measurement system [J]. *Optical technique*, 2009, 35(3): 391-393.
- [4] 由富恩,张存芳,付乐勇,等. 辐射测温仪原理及其标定[M]. 北京: 中国计量出版社,1990.
YOU Fu-en, ZHANG Cun-fang, FU Le-yong, et al. Theory and standardization of radiation thermometers [M]. *Beijing: Chinese Mensuration Press*, 1990.
- [5] 周海叶. 基于 CCD 图像传感器的高温熔体表面温度场测试技术研究[D]. 长沙: 中南大学,2004.
ZHOU Hai-ye. Research on the measuring of surface temperature field of high temperature smelting metal based on the CCD [D]. *Changsha: North University of China*, 2004.
- [6] 贺增弟,刘幼平,何利明,等. 硝酸铵对炮口焰的影响研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2008,29(6): 538-541.
HE Zeng-di, LIU You-ping, HE Li-ming, et al. Impacts of ammonium nitrate on muzzle flash [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2008, 29(6): 538-541.
- [7] 贺增弟,刘幼平,何利明,等. 发射药氧平衡对枪口焰的影响[J]. 火炸药学报,2008,31(6): 57-59.
HE Zeng-di, LIU You-ping, HE Li-ming, et al. The effectes of propellant oxygen balance on muzzle flash [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2008, 31(6): 57-59.
- [8] 孔德仁. 枪口火焰测试方法研究[J]. 测试技术学报,1998,12(4): 19-23.
KONG De-ren. Some work on gunpoint flash measurement [J]. *Journal of Measurement Technique*, 1998, 12(4): 19-23.

A Method to Measuring Muzzle Flash of Gun Propellants

YUAN Zhi-lei¹, HE Zeng-di², LIU Lin-lin², Lü Zhi-xing², FAN Xue-kun¹, ZOU Xiu-mei³

(1. School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. Luzhou North Chemical Industry Co., Ltd., Luzhou 646003, China)

Abstract: In order to characterize the intensity of the muzzle flash more accurately, a high speed CCD (charge-coupled device) camera was used to shoot the muzzle flash of gun propellants A and B used in 30 mm gun, and nitramine gun propellant C just-in-time, and the image processing software Image-Pro Plus6.0 was used to edit the photographs of the experiment to get the flash area, the maximum dimension of the flash, the average flash area, the average circumference of the muzzle flash, and the integral optical density (IOD). The flame temperature was calculated by Wien formula. The intensity of the muzzle flash was characterized and analyzed through the comparison of the obtained parameters. The results show that the shape and intensity of the muzzle flash can be characterized by analyzing the parameters obtained. The IOD can be used as a parameter of characterizing the geometry and radiance of the muzzle flash.

Key words: armament science and technology; muzzle flash; CCD technology; integral optical density; temperature of muzzle flash

CLC number: TJ55; O69

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.021



中国化学会第五届全国化学推进剂学术交流会在滨城大连隆重召开

第五届全国化学推进剂学术交流会于2011年9月7日~9月9日在滨城大连隆重召开。会议由中国化学会主办,中国科学院大连化学物理研究所承办。中国运载火箭技术研究院总指挥王珏研究员、陕西师范大学校长房喻教授、航天科工集团六院孙翔宇副院长、黎明化工研究院王新德总工程师等莅临了会议并做大会报告。大会主席、中国科学院大连化学物理研究所所长张涛研究员出席本次会议并致开幕词。

本次会议是历届规模最大的一次盛会,来自航天科技集团、航天科工集团、中国兵器工业集团、中国科学院、高校及相关企业共52家单位、约150位代表参加了会议。大会共收到稿件122篇,论文集收录111篇,6位专家作了大会特邀报告,30人次进行了口头报告,39人做了墙报展示。会议组织者为本次会议建立了专门网站,为参会者提供更加便捷与贴心的服务。

本届交流会的主题是:高能燃料科学与技术。会议涵盖了化学推进剂研究各主要方向,同时也呈现出新的发展特点。首先,科学、技术研究与现实任务需求对接更加紧密,从大会特邀报告的内容到用户单位参会人数的比重,充分体现了工程应用对基础研究的需求和重视,而论文报道的研究进展也进一步印证了基础研究对工程应用的推动和支撑;其次,对国际最新研究热点,国内专家学者看的清、瞄得准,进展很大,其中凝胶推进技术和碳氢燃料研究无论从研究的广度和深度,都有了明显的突破。

本次会议为国内推进剂研究机构和推进剂工作者搭建了有效的交流平台,促进了化学推进剂这一研究领域的学术交流,通过本届大会,达到了研究单位之间的学习与借鉴以及研究单位与用户单位之间的合作与发展的目的,对提升我国化学推进剂的研究和应用水平具有重要的现实意义。

会议期间召开了学术委员会会议,评选出38篇优秀论文,讨论了成立专业委员会的有关事宜,并组建了专业委员会筹备小组,确定了第六届全国化学推进剂学术交流会于2013年在酒泉卫星发射中心举行。

中国科学院大连化学物理研究所
航天催化与新材料研究室
丛昱 供稿