

文章编号: 1006-9941(2008)03-0285-05

# PETN 和 RDX 在无起爆药雷管中作为激发药的对比性研究

马宏昊<sup>1</sup>, 沈兆武<sup>1</sup>, 陈文川<sup>2</sup>, 周光辉<sup>2</sup>, 方锦雄<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230026;

2. 福建永春天湖山化工厂, 福建 永春 362615)

**摘要:** 为了探讨激发药对无起爆药雷管延期时间的影响, 通过对比 PETN 和 RDX 分别作为激发药引起无起爆药雷管延期时间的差异, 根据热点起爆理论对数据进行分析。结果表明, 对于无起爆药瞬发电雷管, PETN 和造粒 RDX 均可作为激发药, 但 PETN 的延期时间(8.33 ms)小于造粒 RDX(9.35 ms); 对于无起爆药非电延期雷管, 造粒 RDX 作为激发药时延期时间稳定, 雷管起爆可靠; PETN 可作为无起爆药瞬发非电雷管或低段别(12~13 段)非电延期雷管的激发药。

**关键词:** 爆炸力学; 无起爆药雷管; 激发药; 激发装置; 内帽; 热点起爆理论

中图分类号: TJ55

文献标识码: A

## 1 引言

无起爆药雷管<sup>[1]</sup>是利用特殊的激发装置起爆猛炸药的一种雷管技术, 无需起爆药。激发装置是无起爆药雷管技术的关键, 激发药是使激发装置发生作用的核心。目前, 经过实验验证可作为激发药的主要是 RDX 和 PETN。但两种炸药性能存在差异。纯 RDX 的热安定性优于 PETN<sup>[2-3]</sup>, 密度为  $1.74 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的 PETN 热爆炸临界温度为  $197 \text{ }^\circ\text{C}$ , 密度为  $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的 RDX 热爆炸临界温度为  $214 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 楔形实验<sup>[4]</sup>说明经相同手段处理过的 PETN 比 RDX 对冲击波更加敏感。由于电雷管和非电雷管作用于激发药的机理不同, 导致 PETN 和 RDX 分别作为激发药时雷管性能产生差异。本实验对比分析了因无起爆药电雷管和非电雷管中激发药 PETN 和 RDX 不同导致雷管延期时间和爆率的差异, 探讨了 PETN 和 RDX 作为无起爆药雷管激发药的合理性。

## 2 实验条件

### 2.1 实验装置

无起爆药雷管中的激发药燃烧产生高压气体, 推动激发装置底部形成飞片, 冲击起爆下方三次装药。被点火能力和燃烧特性是激发药选用的关键参数。图 1 和图 2 分别为无起爆药瞬发电雷管和非电延期雷管的激发结构示意图。

### 2.2 实验材料和准备

实验在某雷管生产厂实验场进行。使用 50, 64,

收稿日期: 2007-10-23; 修回日期: 2008-01-04

作者简介: 马宏昊(1980-), 男, 博士, 研究方向为爆破器材与工业安全。  
e-mail: hhma@mail.ustc.edu.cn

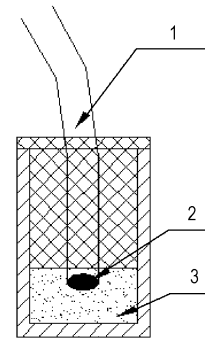


图 1 无起爆药瞬发电雷管激发结构

1—脚线, 2—点火药, 3—激发药

Fig. 1 The excitation structure of non-primary instantaneous electric detonator

1—loading wire, 2—firing powder, 3—excitation powder

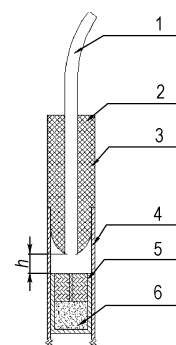


图 2 无起爆药非电延期雷管激发结构

1—非电导爆管, 2—封口塞, 3—卡口,  
4—雷管壁, 5—延期体, 6—激发药

Fig. 2 The excitation structure of non-primary delay detonator with non-electric detonating tubes

1—detonating tube, 2—sealing plug, 3—bayonet  
4—wall, 5—delay element, 6—excitation powder

68 mm管壳;该厂生产的电引火药头和导爆管,导爆管装药量 12~15 mg/m,爆速  $1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;该厂生产的 12~13 段、14~17 段、19~20 段硅系延期体;某地加工的内帽,高度 12,15,18 mm;某厂生产的卡口塞;RDX 造粒处理,加入适量某种氧化剂,造粒粒径  $\geq 600 \mu\text{m}$ ;纯 PETN。

### 2.3 实验设备

该厂导爆管雷管电子引爆机 YJDZ-B 型,自制雷管秒量记录仪。

## 3 延期时间对比实验

### 3.1 实验参数

实验中涉及到雷管的主要参数及测试参数的平均值和标准差见表 1。

### 3.2 数据处理

#### (1) 无起爆药瞬发电雷管

造粒 RDX 作为激发药的无起爆药瞬发电雷管实验数据共 60 组,对数据进行统计分析,得到数据分布图和直方图。数据分布图直观表现了数据在平均值附近的分布情况,直方图指在某一延期时间段内的延期时间数据之和,表现了某一范围内数据的分布形态(见图 3)。同理,对 PETN 作为激发药无起爆药瞬发

电雷管的 197 组数据进行统计分析(见图 4)。

#### (2) 无起爆药非电延期雷管

同样方法,对造粒 RDX 作激发药无起爆药非电延期雷管的 130 组数据进行分析(见图 5)。对 PETN 作为激发药的无起爆药非电延期雷管得到的 10 组数据进行统计分析(见图 6)。

## 4 无起爆药非电延期雷管爆率测试

测试参数及结果见表 2。

## 5 结果分析

### 5.1 瞬发电雷管结果分析

由表 1 可见,在无起爆药瞬发电雷管中,造粒 RDX 和普通 PETN 均可作为激发药,普通 PETN 作为激发药的平均秒量 8.33 ms,标准差 1.08 ms;造粒 RDX 作为激发药的平均秒量 9.35 ms,标准差 3.19 ms。造粒 RDX 的平均起爆时间比普通 PETN 慢 12%;普通 PETN 作为激发药的电雷管的延期时间标准差比造粒 RDX 小 66%。1 段电雷管的名义时间为  $(0 + 12.5) \text{ ms}$ ,PETN 和 RDX 作为激发药引起的秒量差距在允许范围内。这个差别是由无起爆药瞬发电雷管中激发药的作用机理引起的,分析如下。

表 1 无起爆药雷管实验参数及记录数据统计

Table 1 Parameters and statistic data of non-primary detonator

detonator	detonator length /mm	cap length /mm	excitation powder		delay element		amount	average delay time /ms	SD /ms
			sort	mass/g	sort	length/mm			
instantaneous	50	18	granulated RDX	0.05	\	\	60	9.35	3.19
electric detonator	50	18	PETN	0.147	\	\	197	8.33	1.08
non-electric	64	12	granulated RDX	0.05	12-13	7.2	130	341.72	48.50
delay detonator	64	12	PETN	0.147	12-13	7.2	10	427.69	58.01

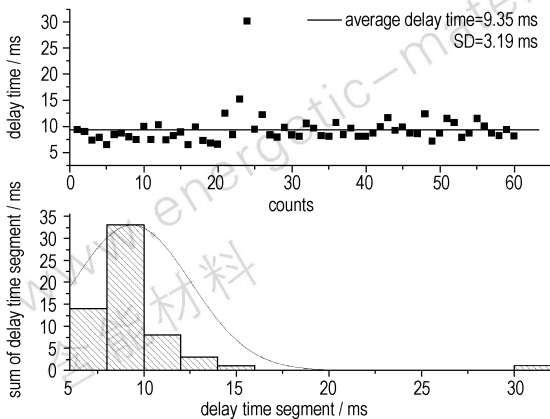


图 3 瞬发电雷管延期时间数据统计图(造粒 RDX)

Fig.3 Statistic chart on instantaneous electric detonator with granulated RDX

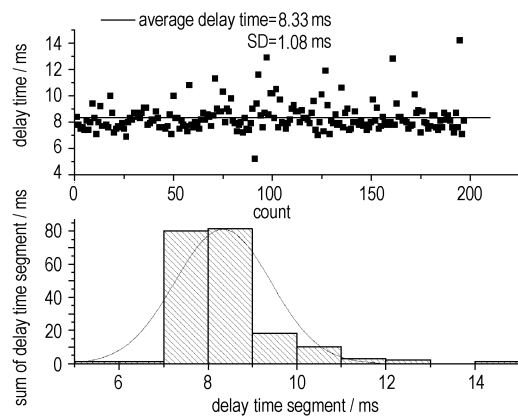


图 4 瞬发电雷管延期时间数据统计图(PETN)

Fig.4 Statistic chart on instantaneous electric detonator with PETN

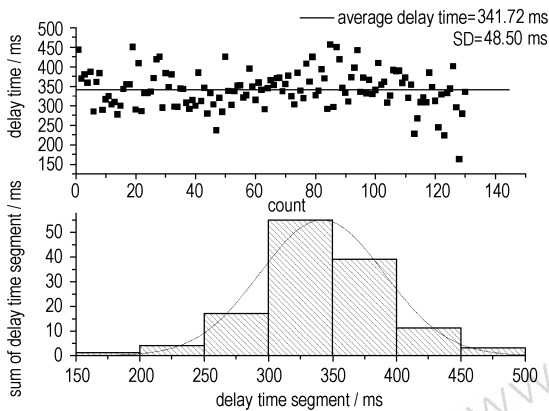


图 5 非电延期雷管延期时间数据统计图(造粒 RDX)  
Fig. 5 Statistic chart on non-electric delay detonator with granulated RDX

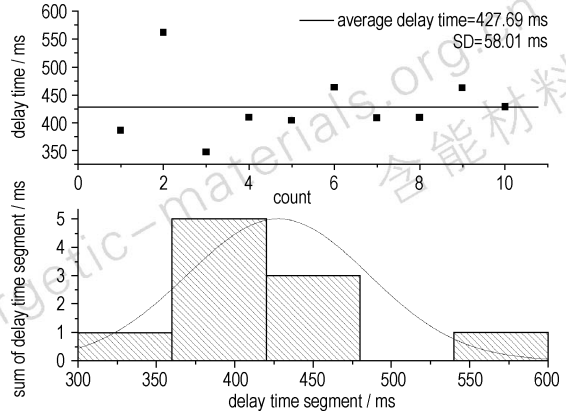


图 6 非电延期雷管延期时间数据统计表(PETN)  
Fig. 6 Statistic chart on non-electric delay detonator with PETN

表 2 非电延期雷管爆率测试参数和结果

Table 2 Parameters and results of explosion probability of non-electric delay detonator

No.	detonator length /mm	cap length /mm	excitation powder		delay element		amount	explosion probability /%	remark
			sort	mass/g	sort	length/mm			
1	64	12	PETN	0.147	12 ~ 13	9.92	134	97.8	delay element fired;
2	68	15	PETN	0.147	14 ~ 17	9.92	10	60	PETN unfired
3	68	15	granulated RDX	0.05	12 ~ 13	9.92	190	100	delay time equable; no half-explosion

Note: all exploded in series way.

无起爆药电雷管中激发药发生的是燃烧现象。电雷管密封性好,反应时间短,药头至激发药的空间可视作封闭空间,发生绝热过程。桥丝放电,引燃药头,药头燃烧释放的热量通过热传导方式到达激发药,激发药吸收热量后分子运动加剧。当热量积累到一定程度后,发生燃烧,燃烧释放气体,使封闭空间内压力增大,达到一定压力后,推动激发装置底部形成飞片,起爆雷管。从药头燃烧到激发药实现燃烧和封闭空间压力提高到临界值,这两段时间对于瞬发电雷管的延期时间有着重要影响。药头情况相同,均为绝热过程,故提供造粒 RDX 和普通 PETN 的总热量相同。在此前提下,当影响电雷管秒量的其他因素如管壳材料、长度、密封、桥丝电流、药头成分、激发装置材料、三次装药等相同时,激发药的反应速率就成为决定瞬发电雷管秒量的关键因素。

根据经典热起爆理论:在存在一种含能物质的一定区域内,若该物质的热分解动力学性质和热传导性质已知,可根据热传导方程(1)计算临界条件和延滞时间<sup>[5]</sup>。

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q \frac{\partial \Lambda}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $c_p$ 、 $\rho$ 、 $\lambda$  分别代表含能物质的定压比热容、密度和热传导系数,  $T$  为温度,  $Q$  为单位体积内的反应分解

热,  $\Lambda$  为含能物质已反应的百分数,  $\frac{\partial \Lambda}{\partial t}$  表示物质发生化学反应的速率。

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial t} = k(1 - \Lambda)^m \quad (2)$$

式中,  $k$  为物质的化学反应速率常数,  $m$  为反应级数。Arrhenius 公式:

$$k = k_0 e^{(-E/RT)} \quad (3)$$

式中,  $k_0$  为指数前系数,  $R$  为气体常数,  $R = 8314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $E$  为活化能。

选取 PETN 和 RDX 参数见表 3<sup>[6]</sup>。

表 3 炸药动力学参数

Table 3 The dynamics parameters of PETN and RDX

explosive	$k_0/s^{-1}$	$E/kJ \cdot \text{mol}^{-1}$	$m$
PETN	$10^{15.2988}$	160.5	0.9510
RDX	$10^{11.4800}$	136.5	0.5440

将表 3 数据代入式(2)和式(3)中,分别得到 PETN、RDX 的化学反应速率,二者相除:

$$\left(\frac{\partial \Lambda}{\partial t}\right)_{\text{PETN}} = 10^{3.8188} \cdot e^{\frac{-2.8867 \times 10^{-2}}{T}} (1 - \Lambda)^{0.4070} \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial \Lambda}{\partial t}\right)_{\text{RDX}}$$

$$T = 273.15 + t \geq 273.15,$$

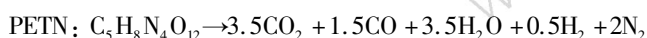
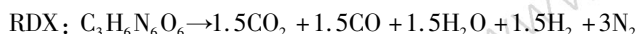
$$\text{故(4): 右式} \geq 6588.6(1 - \Lambda)^{0.4070} \quad (5)$$

$$\text{令(5)右式} > 1, \text{则: } 1 - \Lambda > 4.14 \times 10^{-10} \quad (6)$$

不等式(6)右边接近无穷小,而  $0 \leq \Lambda \leq 1$ ,

$$\text{故有: } \frac{\left(\frac{\partial \Lambda}{\partial t}\right)_{\text{PETN}}}{\left(\frac{\partial \Lambda}{\partial t}\right)_{\text{RDX}}} > 1 \quad (7)$$

式(7)说明 PETN 的化学反应速率快于 RDX。RDX 和 PETN 爆炸反应方程式<sup>[7]</sup>分别为:



可见,相同条件下,1 mol PETN 比 1 mol RDX 反应释放的气体总量多。结合式(7),说明在相同条件下,无起爆药瞬发电雷管内 PETN 的燃烧反应速率快于 RDX,产生更多气体。相对于 RDX,PETN 可使激发装置内气体压力更快达到形成飞片的临界压力。PETN 作为激发药的无起爆药瞬发电雷管从桥丝点火到飞片形成的时间短于 RDX,因此出现图 3、图 4 中的差异。

## 5.2 非电延期雷管结果分析

对比图 5 和图 6 可知,普通 PETN 作为激发药的延期时间标准差大于造粒 RDX,即普通 PETN 的延期准确度低于造粒 RDX;从表 2 可知,在 68 mm 无起爆药非电延期雷管中,普通 PETN 作为激发药会出现拒爆现象,主要原因是激发药 PETN 未被点燃。可见,无起爆药非电延期雷管中普通 PETN 作为激发药的性能不如造粒 RDX,分析如下。

非电延期雷管依靠导爆管的输出能量点燃延期体。导爆管的点火峰压是反映导爆管点火强度的重要指标<sup>[8]</sup>。导爆管点火峰压随消爆腔体积增加单调递减,说明导爆管爆轰输出的点火介质流对雷管装药的强制性热能传递在随着消爆腔体积的增加而减小。Si 系延期药在一定范围内随着点火药量的增加,延期时间减少<sup>[9]</sup>。说明外界点火能力的强弱对延期药的燃烧速度有影响。当消爆腔长度增加,导爆管雷管输出冲击波到达延期药表面时,压力已衰减,此时延期药接收到的导爆管输出能量减小,延期药产生的燃烧速度降低<sup>[10]</sup>,导致延期体点火能力下降<sup>[9]</sup>。

实验中使用的是造粒 RDX,粒度  $d \geq 600 \mu\text{m}$ ;普通 PETN,未经造粒,密度约  $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。造粒 RDX 粒度大,颗粒间有大量气泡,易形成较多热点。当延期药燃烧至底部,向外喷出火焰和一部分延期药时<sup>[11]</sup>,造粒 RDX 在压力作用下密度变大同时,内部的热点在

火焰和压力作用下迅速升温,造粒 RDX 内氧化剂的反应加速了升温过程,最终实现 RDX 的燃烧。

普通 PETN 颗粒细小,内部不易形成热点。在延期药燃烧压力作用下,密度加大,孔隙率下降。对于细小颗粒,形成的平均热点尺寸较小,由于热损失加剧,热点温度降低,热点维持的时间缩短,需要更高的点火能量才能使热点温度升高到使炸药燃烧<sup>[12]</sup>。实验中 64 mm、68 mm 导爆管雷管的消爆腔长度分别是 6 mm、7 mm,使用的延期体分别是 12~13 段、14~17 段。延期体的喷火能力随着段别的增加而减小<sup>[13]</sup>。12~13 段硅系延期药需要比造粒 RDX 更长时间积累热量,才能点燃 PETN,故出现图 5、图 6 的差异。14~17 段硅系延期药喷火能力更弱,消爆腔更长,导致部分 PETN 不能被点燃,出现表 2 中的拒爆现象。

可见,无起爆药非电延期雷管中,PETN 被延期药点燃的能力弱于 RDX,需要的起爆时间长于 RDX;消爆腔对导爆管点火峰压的衰减和延期体点火能力的差别,导致 PETN 作为激发药时出现拒爆。

## 6 结论

(1) 对于无起爆药瞬发电雷管,造粒 RDX 和 PETN 均可作为激发药使用。普通 PETN 作为激发药的延期时间(8.33 ms)低于造粒 RDX(9.35 ms),性能更好。

(2) 对于无起爆药非电延期雷管,造粒 RDX 可作为激发药使用,延期时间稳定,性能可靠。普通 PETN 可在非电瞬发电雷管或低段别(12~13 段)非电延期雷管中使用,在高段别(14~17 段)非电延期雷管中,普通 PETN 不能被点火使雷管拒爆。

(3) 若需要使用 PETN 作为无起爆药非电延期雷管激发药,建议造粒 PETN 以改善 PETN 性状。

### 参考文献:

- [1] 沈兆武. 冲击飞片式无起爆药雷管[P]. CN87106394. 8.
- [2] 欧育湘. 炸药学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006.
- [3] 郑孟菊. 炸药的性能及测试技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1990.
- [4] 陈荣义. PETN、RDX 颗粒的爆轰性能[D]. 长沙:长沙矿冶研究院,2002.
- [5] 章冠人,陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1990.
- [6] 贾祥瑞,杜霞,李冬香. 炸药热安定性的快速评定方法[J]. 机械工程学院学报,1994,6(2): 124-128.  
JIA Xiang-rui, DU Xia, LI Dong-xiang. A quick method evaluating of explosive thermal stability [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 1994, 6(2): 124-128.
- [7] 炸药理论编写组. 炸药理论[M]. 北京:国防工业出版社,1982.
- [8] 刘大斌. 塑料导爆管的起爆、传爆及输出性能研究[D]. 南京:南

- 京理工大学, 2002.
- [9] 高玉珍. 毫秒雷管延期时间的影响因素探讨[J]. 煤矿爆破, 2003(1): 15-17.
- GAO Yu-zhen. Investigation in the influence factors on delay time of millisecond detonator[J]. *Coal Mine Blasting*, 2003(1): 15-17.
- [10] 孙玉玲, 颜事龙, 王卫国. 硅系延期药燃烧过程的研究[J]. 煤矿爆破, 2006(4): 1-3.
- SUN Yu-ling, YAN Shi-long, WANG Wei-guo. Study on combustion process of silicon type delay explosive[J]. *Coal Mine Blasting*, 2006(4): 1-3.
- [11] 马志刚, 王瑾, 葛雷, 等. 高速摄影法研究铅芯延期体的燃烧特性[J]. 火工品, 2006, 6(3): 39-41.
- MA Zhi-gang, WANG Jin, GE Lei, et al. Study on the burning characteristic of delay element with lead tube by high speed photography[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2006, 6(3): 39-41.
- [12] 刘玉存, 王作山, 吕春玲, 等. 黑索今粒度及粒度级配对接高分子粘结炸药冲击波感度的影响[J]. 兵工学报, 2005, 26(1): 126-128.
- LIU Yu-cun, WANG Zuo-shan, Lü Chun-ling, et al. Influence of particle size and gradation of RDX on the shock sensitivity of a polymer bonded explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(1): 126-128.
- [13] 黄寅生. 延期体喷火能力的光电测量[J]. 煤矿爆破, 1994(2): 12-14.
- HUANG Yin-sheng. Photoelectricity measure on the firing capability of the delay element[J]. *Coal Mine Blasting*, 1994(2): 12-14.

## Research on the Performance of PETN and RDX as the Excitation Powder

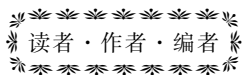
MA Hong-hao<sup>1</sup>, SHEN Zhao-wu<sup>1</sup>, CHEN Wen-chuan<sup>2</sup>, ZHOU Guang-hui<sup>2</sup>, FANG Jin-xiong<sup>2</sup>

(1. Modern Mechanics Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Yongchun Chemical Factory, Yongchun 362615, China)

**Abstract:** The difference of the delay time of non-primary detonator was compared by using PETN and RDX as the excitation powder, and the data were analyzed based on hot spot initiation theory. The results show that in non-primary instantaneous electric detonator, PETN and granulated RDX can be used as the excitation powder, but the delay-time of PETN (8.33 ms) is shorter than that of granulated RDX (9.35 ms), in non-primary non-electric delay detonator, the delay-time of the granulated RDX as the powder is steady; PETN can be used as the excitation powder in instantaneous or lower non-primary non-electric delayed detonator.

**Key words:** explosion mechanics; non-primary detonator; excitation powder; excitation set-up; cap; hot spot initiation theory



## 日本第三届国际含能材料及应用研讨会召开

由日本火药学会主办的第三届国际含能材料及应用研讨会(The 3rd International Symposium on Energetic Materials and their Applications)于2008年4月24日~25日在日本东京召开。来自日本、美国、英国、法国、俄罗斯、加拿大、瑞典、南非、波兰、印度及中国等20余个国家的近200余名专家学者参加了会议,论文摘要集收录论文94篇。

会议分主会场和分分会场同时进行报告,内容包括数值模拟、爆破、化学分析、气体发生器、危险与安全、推进剂、含能材料、冲击压缩、热分析等领域,如韩国学者 Jai-ick Yoh 作了题为“极端条件下爆炸的热力学和动力学”报告,比利时学者 M. Asahara 作了题为“球形爆轰波的传播的数字研究”的报告,日本学者 S. Abe 作了题为“化学安全事故数据库的相关信息系统——爆炸事故案例研究(II)”的报告,法国学者 Adam Collins 作了题为“钝感炮弹和战斗部用浇铸 PBX 相关技术”的报告等。更多的论文进行了张贴报告,中国工程物理研究院化工材料研究所曾贵玉和郁卫飞的两篇论文受到多名专家的关注。

本次会议体现了近年来含能材料领域的最新进展和动态,反映了国际关注的领域和内容,起到了交流、学习和提高的目的。

(中国工程物理研究院化工材料研究所 曾贵玉 供稿)