文章编号：1006-9941(2010)03-0324-06

几种典型固体推进剂的危险性能实验研究

秦 能，廖林泉，范红杰，李军强
(西安近代化学研究所，陕西 西安 710065)

摘 要：为进行固体推进剂的危险性能(感度特性)研究，对 NEPE 推进剂、粒铸 CMDB 推进剂、螺压 CMDB 推进剂三种典型的固体推进剂分别进行了雷管感度实验、冲击波感度实验(隔板实验)和燃烧转爆轰实验。结果显示：NEPE 推进剂对雷管引爆较敏感；三种推进剂对冲击波刺激较敏感；颗粒状的粒铸 CMDB、螺压 CMDB 推进剂和内部有孔洞的 NEPE 推进剂在燃烧转爆轰实验中发生爆轰。实验表明，推进剂的危险性能(感度)与推进剂的组成(有无敏感物质)、装药形态(颗粒或药柱)及外界约束条件(强或弱)有密切关系。实验证实，固体推进剂在一定条件下也能发生燃烧转爆轰。

关键词：物理化学；固体推进剂；危险性分级；燃烧转爆轰；雷管感度；冲击波感度
中图分类号：TJ55；V512；O64 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.019

1 引 言

火炸药在制造、运输、贮存和使用过程中常常因受到热、机械、冲击波等外界刺激而引发燃烧、爆炸事故，造成人身伤亡、设备和建筑设施破坏的严重后果。为了防止意外事故的发生，减少意外事故造成的损失，有必要对火炸药的危险性进行分级，以便针对不同的危险等级采取相应的安全对策。因此，火炸药危险等级是确定新型火炸药配方、工艺条件、防护措施、建筑物结构方式和安全距离的依据[1]。

对于固体推进剂的危险性，人们传统的认识是易发生燃烧，不具有整体爆轰的危险，但对于高能固体推进剂而言，这种传统的认识显然是不科学的。高能固体推进剂中含有大量高能炸药，制造高能固体推进剂的各种工艺均涉及到添加高能炸药，高能炸药本身具有较高的机械感度和冲击波感度，因此，如何保证高能固体推进剂在研究、制造、实验、运输、装卸、贮存、保管及处理过程中的安全性，是人们非常关注的问题。高能固体推进剂在制造、加工工房及贮存库房的设计时，均应根据其实际具有的危险性来确定建筑物危险等级及安全距离。但是，对于固体推进剂(尤其是高能固体推进剂)的危险性，我国尚未进行系统研究，缺乏必要的实验数据，高能固体推进剂生产工房和库房的设计没有依据，致使目前很多新建和改建工程无法进行，阻碍了高性能武器的装备进程。随着高能固体推进剂在高新武器装备中的应用日益增多，这个问题已越来越突出，因此，迫切需要进行固体推进剂的危险性分级研究，建立科学系统的评估程序和实验方法[2]。对不同类型的固体推进剂进行实验评估，确定配方组分与危险等级之间的关系；对不同类型的高能固体推进剂进行实验评估，研究高能炸药的加入量与推进剂危险等级之间的关系，为确定建筑物结构方式和安全距离提供依据，从而促进固体推进剂的安全生产和应用[3]。

联合国规定的爆炸品危险等级分级程序是目前国际上广泛采用的程序[4]，对于火药(固体推进剂)，雷管感度实验、隔板实验(冲击波感度)和燃烧转爆轰实验这 3 项实验是联合国规程推荐的实验[UN 编号为 5(a)，2(a)和 5(b)]，实验条件有严格规定，有明确的实验结果判断准则，实验方法简单、经济、科学合理，在固体推进剂分级实验中是必不可少的实验。雷管感度实验是联合国系列 5 试验中的 5(a)项，结果用于回答“它是有整体爆炸危险的非常不敏感爆炸性物质吗?”。推进剂和发射药一般情况下不做 1.5 项分级试验，但目前推进剂和发射药配方中炸药的含量越来越高，炸药和火药的界线就变得越来越模糊。因此，在对推进剂和发射药进行危险性分级时均有必要做 1.5 项中的雷管感度实验。隔板实验在是联合国试验系列 1 中和系列 2 中都有，结果用于回答“它是爆炸性物质

收稿日期：2009-10-12；**修回日期**：2009-11-30
基金项目：国防科技工业基础产品创新计划火炸药科研专项
作者简介：秦能(1970－)，男，博士，高级工程师，从事固体推进剂配方及工艺研究。e-mail：qinneng@126.com

吗?”和“物质是否不太敏感不应划入第 1 类?”。系列 1 中隔板为零,系列 2 中隔板为 50 mm 厚的有机玻璃,采用 50 mm 厚的隔板会把很多种炸药(如 TATB)划为非第 1 类物质,这显然不合理。因此,本次实验不采用厚度 50 mm 的有机玻璃,而采用厚度 18 mm 的有机玻璃,因为,在美国,使用推进剂在 Naval Ordnance Laboratory Large Scale Gap Test(NOLLSGT)中的行为来辨识 1.1 级(可爆轰)和 1.3 级(不爆轰)推进剂之间的区别,已成为一种普遍的方法。美国国防部 TB700-2 中把推进剂划为 1.1 级和 1.3 级最直观的方法是标准隔板实验,其隔板厚度为 17.8 mm 的有机玻璃板。燃烧转爆轰实验结果用于回答“它是有整体爆炸危险的非常不敏感爆炸性物质吗?”。本工作参照上述三种联合国规定的实验方法,对三种典型固体推进剂的危险性能(感度特性)进行了实验研究,实验结果可作为推进剂危险性分级的依据。

2 实验部分

2.1 推进剂选取

选取三种典型推进剂,螺旋压伸工艺和颗粒浇铸工艺制备的两种 CMDB 推进剂、淤浆浇铸工艺制备的 NEPE 推进剂,配方组成见表 1,对推进剂的燃速、密度、比冲按 GJB770B -2005 中规定的相应方法进行了测试,结果见表 2。

表 1 实验推进剂配方组分

Table 1 Experimental propellant component %

propellant	DB adhesive	RDX	DEP	Al/AP	others
screw-extruded CMDB	68	18.0	6.5	–	7.5
granule-cast CMDB	57	32	–	–	11
NEPE	15	30	–	5/37.5	12.5

表 2 实验推进剂性能

Table 2 Properties of experimental propellants

propellant	ρ /g·cm^{-3}	r /mm·s^{-1} (20 ℃)	I_{sp} /N·s·kg^{-1} (10 MPa, factual value)
screw-extruded CMDB	1.615	11.49 (8 MPa)	2011.1
granule-cast CMDB	1.720	26.83 (10 MPa)	2207.3
NEPE	–	22.00 (15 MPa)	2403.5

Note: ρ is density, r is burning rate, I_{sp} is special impulse.

2.2 实验器材

2.2.1 雷管感度实验

雷管:联合国标准中没有规定雷管的型号和规格。本次实验按 GB14372 -93 的规定选用 8#工业电雷管(GB8031 -87)。

样品管:联合国规定直径是至少为 80 mm、长 160 mm、壁厚最多 1.5 mm 的硬纸版管子,管底用刚好能够留住试样的薄膜封闭,本次实验采用马粪纸卷成内径与试样外径大小相同、长度 100 mm、最厚处 1.5 mm厚的筒,底部用透明胶带封底。

见证板:联合国规定长度和宽度均为 160 mm、厚 1.0 mm 的钢板,本次实验采用长度和宽度均为 160 mm、厚 0.50 mm 的镀锌铁皮。

雷管感度实验装置示意图见图 1。

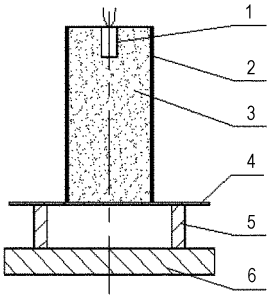

图 1 雷管感度实验装置示意图

1—雷管, 2—样品管, 3—试样, 4—见证板, 5—支架, 6—钢板

Fig. 1 Detonator sensitivity test equipment

1—detonator, 2—sample tube, 3—sample, 4—witness plate, 5—bracket, 6—steel plate

2.2.2 隔板实验

样品管:联合国标准采用冷轧无缝钢管,外径(48 ±2) mm,厚(4 ±0.1) mm,长(400 ±5) mm。本次实验采用外径(48 ±1) mm、厚(6 ±0.1) mm、长(140 ±15) mm 的冷轧无缝钢管。

样品:Φ36 mm ×140 mm。

主发药柱:采用浇注 TNT/PETN(50/50),密度为(1.58 ±0.02) g·cm^{-3},带有 8#雷管孔,与联合国采用的主发药柱相同,但密度略低(联合国标准规定为(1.60 ±0.02) g·cm^{-3})。

见证板:联合国标准采用一边长(150 ±10) mm、厚(3.2 ±0.2) mm 的方形低碳钢板,本次实验采用 Φ70 mm ×35 mm 的 45#钢板。

隔板:Φ50 mm ×18 mm 的有机玻璃板。

雷管:联合国标准中没有规定雷管的型号和规格。本次实验采用 8#工业电雷管。

www.energetic-materials.org.cn 含能材料

实验装置：隔板实验装置示意图见图 2。

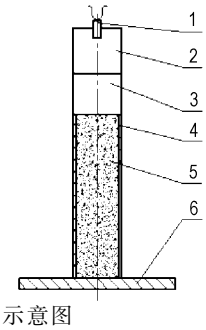

图 2 隔板实验装置示意图

1—雷管，2—主发药柱，3—隔板，4—样品管，5—样品，6—见证板

Fig. 1 Gap test equipment

1—detonator, 2—main charge, 3—gap, 4—sample tube, 5—sample, 6—witness plate

2.2.3 燃烧转爆轰实验

本次实验参考联合国三种燃烧转爆轰实验方法中 5(b)法国燃烧转爆轰实验方法执行。

样品管：联合国规定钢管采用无缝钢管，内直径 40.2 mm、壁厚 4.05 mm、长 1200 mm，钢管耐压 74.5 MPa，钢管两端采用螺帽封闭。本次实验采用的无缝钢管直径 39.9 mm，壁厚 9 mm，管长 1200 mm，钢管上还带有测速孔，封闭用螺帽壁厚大于 13 mm，其中一支螺帽有直径 2 mm 的孔用于穿点火线。

黑火药：GJB1056 小粒黑火药，每发实验用 5 g。

点火头：雷管用电点火头。

见证板：联合国规定为厚 30 mm 的铅板。本次实验按 GB14372－93 中的规定：长 1200 mm、宽 80 mm、厚 10 mm 的铅板，实际铅板厚为 8 mm。

燃烧转爆轰装置示意图见图 3。

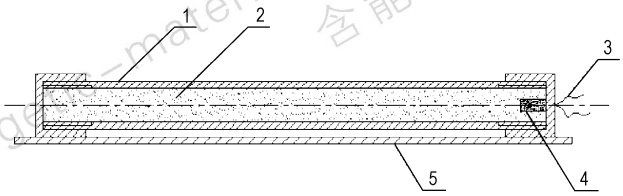

图 3 燃烧转爆轰装置示意图

1—样品管，2—试样，3—点火头及导线，4—黑火药，5—见证板

Fig. 3 Deflagration-to-detonation transition test equipment

1—sample tube, 2—sample, 3—electric match and wire, 4—black powder, 5—witness plate

3 结果与分析

3.1 雷管感度实验

推进剂雷管感度实验结果见表 3。

表 3 推进剂雷管感度实验结果

Table 3 Results of propellants detonator sensitivity test

propellant	sample state	test results	remark
screw-extruded CMDB	bareness propellant charge: Φ40 mm×100 mm with a hole for 8# detonator, the hole depth is 1/3 of the length of detonator	not exploded	propellant charge was split
granule-cast CMDB	bareness propellant charge: Φ45 mm×100 mm with a hole for 8# detonator, the hole depth is 1/3 of the length of detonator	not exploded	propellant charge was split
NEPE	bareness propellant charge: Φ45 mm×100 mm with a hole for 8# detonator, the hole depth is 25 mm	exploded	the witness plate is A3 steel, Φ300 mm×300 mm, the thickness 1 mm, the witness plate destruction condition see Fig. 4

NEPE 推进剂对雷管引爆较为敏感，在雷管产生的冲击波作用下发生了爆轰（见证板已穿孔，见图 4，根据联合国规定的实验判据，见证板穿孔结果为“＋”），其余两种推进剂对雷管引爆不敏感，雷管产生的冲击波仅使药柱裂开，未发生爆轰。

从配方组成看，该 NEPE 推进剂含有高能添加剂 RDX、敏感物质 NG，而含有敏感物质 NG 和高能添加剂 RDX 的 CMDB 两种推进剂却没被雷管引爆；NEPE 推进剂中还含有 Al 和 AP，NEPE 推进剂能被雷管引爆是否是因为配方中含有 Al 和 AP，根据目前的结果还无法下结论。可见，推进剂的雷管感度与配方组成间的关系相当复杂，还应深入研究组成变化（如高能添加剂 RDX、AP、Al 等）对结果的影响，以及各组成对结果影响大小排序。

3.2 推进剂隔板实验

在隔板厚 18 mm 的情况下，粒铸 CMDB 推进剂、螺压 CMDB 推进剂、NEPE 推进剂在主发药柱产生的冲击波作用下，均发生爆轰（见证钢板明显穿孔、破裂，见图 5，图 6 和图 7，根据联合国规定的实验判据，见证板穿孔结果为“＋”）。可见，上述三种推进剂对冲击波引爆较为敏感。若按照美国国防部的标准，三种推进剂的危险等级均可划为 1.1 级。

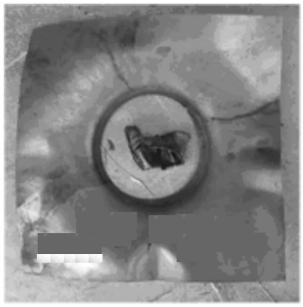

图 4 NEPE 推进剂雷管感度实验后的见证板

Fig. 4 Witness plate after the NEPE propellant detonator sensitivity test

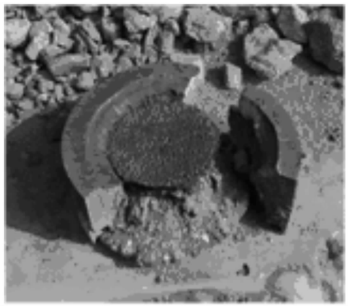

图 5 粒铸 CMDB 推进剂隔板实验后的见证板

Fig. 5 Witness plate after the granule-cast CMDB propellant shock sensitivity test

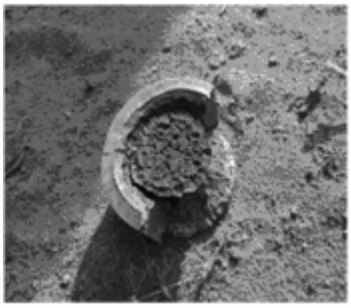

图 6 螺压 CMDB 推进剂隔板实验后的见证板

Fig. 6 Witness plate after the screw-extruded CMDB propellant shock sensitivity test

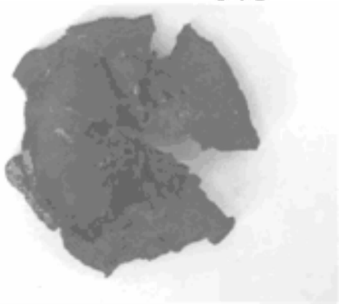

图 7 NEPE 推进剂隔板实验后的见证板

Fig. 7 Witness plate after the NEPE propellant shock sensitivity test

图 8 粒铸 CMDB 推进剂药粒 DDT 实验后钢管碎片

Fig. 8 Fragment after DDT test of the granule-cast CMDB propellant

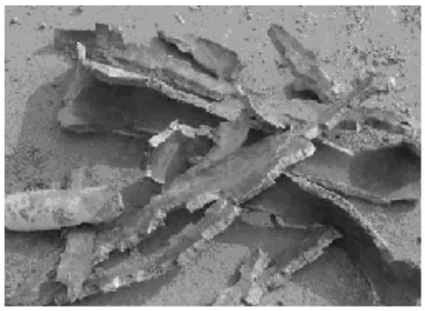

图 9 螺压 CMDB 推进剂药粒 DDT 实验后钢管碎片

Fig. 9 Fragment after DDT test for the screw-extruded CMDB propellant

图 10 NEPE 推进剂药柱 DDT 实验后钢管破片

Fig. 10 Fragment after DDT test for the NEPE propellant

3.3 燃烧转爆轰实验

燃烧转爆轰实验结果见表 4。通过实验测到了推进剂燃烧转爆轰时的稳定爆速，从而证实了固体推进剂在一定条件下也能发生燃烧转爆轰。从发生燃烧转爆轰的推进剂配方组成看，配方中均含有 RDX、NG 等感度较高的物质；另一方面，推进剂的结构（装填）形式对结果影响很大，散装颗粒（粒铸 CMDB 推进剂药粒、螺压 CMDB 推进剂药粒）以及内部有孔洞均发生了燃烧转爆轰。而在相同的实验器材下，同样是粒铸 CMDB 推进剂以药柱装填到样品管中，却未发生燃烧转爆轰；相同条件下，螺压 CMDB 推进剂以药柱形式

装填到样品管中也未发生燃烧转爆轰。可见，配方组成、装药的密实度（密实或疏松，内部有无裂纹）及结构形式（药柱或颗粒）等对推进剂是否发生燃烧转爆轰有重要影响。文献[5－7]对不同类型的推进剂、含能添加剂在不同条件下的燃烧转爆轰进行了深入研究，文献[6]同时分析说明了实际使用中发动机内的装药是不可能发生燃烧转爆轰的。

表 4 推进剂燃烧转爆轰实验结果

Table 4 Results of propellants deflagration-to-detonation transition test

propellant	test results	remark
granule-cast CMDB propellant (columnar)	Not happened DDT, and the tube was rip by the giant gas pressure produced the propellant combustion, but two end covers were complete. The propellant extinguished after the decompression, and the unburnt part was approximately 2/5 of the total propellant.	Sample length was 1200 mm. There was a hole of Φ20 mm × 20 mm in the middle of the end columnar charge, in which lay aside the black power and igniter.
granule-cast CMDB propellant (granular)	Happened DDT, and the detonation velocity were 5604 $m \cdot s^{-1}$ and 5583 $m \cdot s^{-1}$, and the average velocity was 5593.5 $m \cdot s^{-1}$. (Fig. 8)	Granular was Φ1 mm × 2 mm. The bulk granular weight was 1.6 kg.
screw-extruded CMDB propellant (granular)	Happened DDT, and the detonation velocity were 3148 $m \cdot s^{-1}$ and 3203 $m \cdot s^{-1}$, and the average velocity was 3175.5 $m \cdot s^{-1}$. (Fig. 9)	Granular was Φ2 mm × 5 mm × 5 mm. The bulk granular weight was 0.995 kg. The charging coefficient was 43.6%.
screw-extruded CMDB propellant (columnar)	Not DDT, and the steel tube was rended long block. The propellant extinguished with the pressure discharging, and the unburnt part was approximately 1/2 of the total propellant.	Sample length was1200 mm. There was a hole of Φ20 mm × 20 mm in the middle of the end columnar charge, in which lay aside the black power and igniter. The weight was 2.28 kg.
NEPE propellant (columnar)	happened DDT (Fig. 10)	According to charge length 1180 mm, diameter 39.9 mm, the density 1.7 $g \cdot cm^{-3}$ calculated, should cast 2.5 kg materials, actual charge weight 0.746 kg, so the charging coefficient was 29.84%. After X-light surveyed and discovered the charge interior had many holes.

4 结 论

（1）NEPE 推进剂对雷管引爆较为敏感，粒铸 CMDB推进剂、螺压 CMDB 推进剂对雷管引爆不敏感。

（2）粒铸 CMDB 推进剂、NEPE 推进剂、螺压 CMDB推进剂在标准隔板实验中，在 18 mm 厚隔板下，发生爆轰，三种推进剂对冲击波引爆较为敏感。

（3）固体推进剂在一定条件下可发生燃烧转爆轰。固体推进剂配方中含有 RDX、NG 等感度较高的含能材料时，发生燃烧转爆轰的可能性增大。推进剂的结构形式（药柱或颗粒）、药柱的密实度等对推进剂是否发生燃烧转爆轰有重要影响。

参考文献：

[1] 俞统昌，王晓峰，王建灵. 火炸药危险等级分级程序分析[J]. 火炸药学报，2006，29(1)：10－14.
YU Tong-chang, WANG Xiao-feng, WANG Jian-ling. Hazard classification procedures for explosive and propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(1): 10－14.

[2] 王晓峰，王亲会，王宁飞. 开展高能固体推进剂危险性分级研究的建议[J]. 火炸药学报，2003，26(1)：59－61.
WANG Xiao-feng, WANG Qin-hui, WANG Ning-fei. Suggestion on studying hazard classification of high energy solid propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(1): 59－61.

[3] 居慧宝. 固体推进剂危险性分级方法的探讨[J]. 安全与环境学报，2004，4(6)：106－109.
JU Hui-bao. Discussion on hazard classification method of solid propellant[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(6): 106－109.

[4] United Nations Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods. UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Manual of Tests and Criteria (Fourth Revised Edition) [R]. ISBN9211390494; UN0226, 1999.

[5] 刘德辉，彭培根，王振芳，等. AP/HMX 丁羟复合推进剂燃烧转爆轰研究[J]. 兵工学报，1994(1)：32－36.
LIU De-hui, PENG Pei-gen, WANG Zhen-fang, et al. An investigation of the deflagration-to-detonation transition of the AP/HMX/HTPB composite propellant[J]. *Acta Armamentarii*, 1994(1): 32－36.

[6] 贾祥瑞，黄风雷，浣石，等. 弱约束条件下 NEPE 推进剂燃烧转爆轰研究[J]. 爆炸与冲击，1996，16(4)：312－316.
JIA Xiang-rui, HUANG Feng-lei, HUAN Shi, et al. An experimental study on DDT of NEPE propellant at weak confinement [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1996, 16(4): 312－316.

[7] 赵同虎，张新彦，李斌，等. 颗粒状 HMX、RDX 的燃烧转爆轰实验研究[J]. 含能材料，2003，11(4)：187－190.
ZHAO Tong-hu, ZHANG Xin-yan, LI Bin, et al. Experimental study on the deflagration to detonation transition for granular HMX, RDX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(4): 187－190.

Sensitivity Performances of Several Typical Solid Propellants

QIN Neng, LIAO Lin-quan, FAN Hong-jie, LI Jun-qiang
(*Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an* 710065, *China*)

Abstract: Through deflagration-to-detonation transition (DDT) test, detonator sensitivity test and shock sensitivity test (gap gest), the sensitivity performances of three typical solid propellants, such as NEPE propellant, granule-cast CMDB propellant and screw-extruded CMDB propellant were studied. Results show that the NEPE propellant is sensitive to the detonator igniting, and three typical solid propellants are sensitive to the stimulation of the shock-wave, and there are deflagration-to-detonation transition in the small grain shape granule-cast CMDB propellant, and the interior of the sheet shape screw-extruded CMDB propellant and the NEPE propellant have the cavity. The experiments show that propellant's sensitivity performances have the close relationship with the propellant's composition (have or not have sensitive component), the charge shape (granule or pole) and the outside constraint condition (strong or weak confinement). Tests validate that solid propellant can also occur deflagration-to-detonation transition under some conditions.

Key words: physical chemistry; solid propellant; hazard classification; deflagration-to-detonation transition (DDT); detonator sensitivity; shock sensitivity

CLC number: TJ55; V512; O64 **Document code**: A **DOI**: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.019

读者·作者·编者

会议信息

第六届国际高技术高分子材料学术会议
6th International Symposium on High-Tech Polymer Materials Synthesis, Characterization and Applications
时间：10 月 18 ~ 21 日；地点：厦门
内容及范围：高技术高分子材料的所有领域，包括光电材料、微电子封装材料、生物与医用材料、航空航天材料等
承办单位：中国科学院化学研究所高技术材料实验室
会议秘书长：孙文华（中国科学院化学研究所） 会议联系人：杨士勇（中国科学院化学研究所）
通讯地址：北京 2709 信箱 邮编：100190 联系电话：010 - 62564819 电子邮箱：sunwh@iccas.ac.cn

2010 年海峡两岸高分子学术研讨会
时间：10 月 11 ~ 14 日；地点：苏州
内容及范围：交流各自的最新研究成果，探讨高分子科学与技术的新进展
承办单位：中国科学院化学研究所
会议秘书长：王俊景（中国科学院化学研究所） 会议联系人：王俊景（中国科学院化学研究所）
通讯地址：北京 2709 信箱 邮编：100190 联系电话：62588927 电子邮箱：wangj@iccas.ac.cn

第六届海峡两岸分析化学学术会议
时间：9 月 19 ~ 21 日；地点：大连
内容及范围：分析科学及相关技术的新成就、新进展进行学术交流和讨论
承办单位：中国科学院大连化学物理研究所
会议秘书长：许国旺（中国科学院大连化学物理研究所） 会议联系人：许国旺（中国科学院大连化学物理研究所）
通讯地址：辽宁省大连市沙河口区中山路 457 号 邮编：116023
联系电话：0411 - 84379530 电子邮箱：xugw@dicp.ac.cn

第五届上海国际分析化学研讨会（AnalyticaChina2010）
时间：9 月 15 ~ 17 日；地点：上海；预计参加人数：200
内容及范围：交流分析化学及相关仪器新进展
承办单位：中国化学会、慕尼黑展览（上海）有限公司
会议主席：汪尔康（中国科学院长春应化所） 张玉奎（中国科学院大连化学物理研究所）
Antonius Kettrup 教授（Technische Universitat Munchen）
会议联系人：张灿（中国化学会）
通讯地址：北京 2709 信箱 邮编：100190 联系电话：61568157 传真：62568157 电子邮箱：zcc@iccas.ac.cn