

气相 DDT 中过爆轰现象 产生条件的实验研究^{*}

段吉员, 王 建, 何 智

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 冲击波物理与爆轰物理
国防科技重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘要: 针对目前国际上关于气相过爆轰产生条件的 3 种不同观点, 利用压力传感器, 实验研究了氢氧混合物的爆燃转爆轰 (DDT) 全过程。获得了比较完整的、能反映气相 DDT 从爆燃成长为过爆轰再衰减为稳定爆轰的全过程压力变化曲线。分析实验结果表明, 氢氧混合物的 DDT 过程中, 过爆轰的产生需要一定条件; 在初始压力一定的情况下, 氢氧混合物 DDT 过程的转变时间或距离随氢气浓度的增加, 先减小后增大, 过爆轰的压力峰值约为稳定爆轰压力的 1.5~2 倍。

关键词: 气相爆燃转爆轰; 过爆轰; 产生条件; 实验研究

中图分类号: O381

文献标识码: A

1 引 言

在气相爆燃转爆轰 (Deflagration-to-Detonation Transition, DDT) 过程中, 常常会出现过爆轰现象。气相过爆轰是一种非稳定的爆轰状态, 其传播速度、波后压力、温度都显著高于稳定爆轰, 并且随着传播的进行, 很快自动衰减为稳定爆轰。对于一定的实验条件, 气相过爆轰的发生是确定的, 但其出现的位置很难预测, 且其产生、成长和衰减为稳定爆轰的持续时间很短, 实验研究难度很大。

近些年来, 随着现代战场作战需求的不断提高, 各国均大力开展云爆弹 (Fuel Air Explosive, FAE) 的研究工作, 以应对各种储罐、飞机、机库、导弹发射场、海上舰船等。而云爆弹的研究主要针对气相爆轰的传播规律及其对目标的毁伤作用。由于气相过爆轰的压力和温度均显著高于稳定爆轰, 因此它也成为云爆弹研究中的一个焦点。在超高速推进器的研究中, 爆轰发动机作为提供未来航空器动力的一种高效装置, 已成为国内外气体动力学研究的一个热点。而爆轰发动机研究的一个重点就是在气体混合物的起爆阶段, 如何消除 DDT 中不稳定的过爆轰影响, 以尽快形成稳定爆轰。因此, 开展气相 DDT 中过爆轰产生条件的基础实验研究, 不仅奠定了气相爆轰研究的基础, 同时也为以气相爆轰作为激励源的其它武器研究提供了依据, 既有重要的学术意义, 又有实际的应用价值。

2 国内外研究情况

近 10 年来, 国内外对气相 DDT 进行了大量的实验研究和理论分析, 得出了一些有益的结论。但是, 对于 DDT 中发生的过爆轰问题, 由于研究难度较大, 迄今为止只局限于简单因素的实验分析。

在气相 DDT 的实验研究方面, Brochet 于 1981 年首次观测到了 DDT 过程中爆轰压力高于计算的 C-J 爆轰压力的现象, 并把这种现象称为“过爆轰”, 但没有给出理论解释。Hasson 等人^[1]研究了激波

^{*} 收稿日期: 2009-06-27; 修回日期: 2009-11-12

作者简介: 段吉员 (1976—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事爆轰基础研究. E-mail: duanjiyuan2005@tom.com

管中 $\text{C}_2\text{H}_4\text{-O}_2$ 的 DDT 及爆轰特性,首次解释了其中发生的过爆轰现象:随着亚音速火焰面的加速前进,向前发射一个弱激波,当 DDT 时间较长时,冲击波在火焰面和激波管前端面之间发生反射,使前端未反应的气体压力增加,高于初始压力,温度也得到增加,爆轰阵面通过更高初始压力和温度的气体,致使实验观测到的爆轰压力高于按最初条件计算的压力,即所谓的“过爆轰”。该解释缺乏对过爆轰的具体发展过程以及弱激波与火焰阵面相互作用的分析。Teodorzyk 等人^[2]对爆轰波经过泡沫和金属网壁时发生的衰减进行了研究,研究结果为国内外学者研究 DDT 的传播规律和过爆轰问题起到了指导作用。胡栋等人^[3]用石英压力传感器测量了 $\text{H}_2\text{-O}_2$ 的 DDT 过程,实验发现:在 H_2 浓度为 72% (体积比) 时,DDT 中出现了一段过激励过程,随后过激励逐渐衰减。但是,他们对衰减为稳态爆轰时的情况不清楚,缺乏对过爆轰的出现时间或距离的量化分析。胡浩等人^[4]介绍了一种用于可燃气体 DDT 研究的实验方法,即利用声速吸收材料将一个稳定的爆轰波先衰减再加强,从而得到重复可控的火焰加速传播的 DDT 过程。他们根据实验结果建立了一个 DDT 火焰结构模型,解释了过爆轰机理。但是该方法也只能用于定性地研究 DDT 及过爆轰问题,不能真实反映其中的具体传播过程,例如不能确定过爆轰发生的时间和位置,缺乏对过爆轰发生时影响临界马赫数因素的分析。

在气相 DDT 的理论分析方面,近年来只有少量报道,且都局限于一维非定常流,均回避了其中的过爆轰问题。例如:高泰荫等人^[5]运用化学流体力学理论和两步燃烧反应原理,对一维封闭系统 $\text{CH}_4\text{-O}_2$ 混合物的 DDT 问题进行了数值模拟,研究了系统的初始条件对 DDT 转变时间及距离的影响;张德良等人^[6]采用二阶段化学反应模型和高分辨率 TVD (Total Variation Diminishing) 差分格式,对一维可燃气体的 DDT 过程进行了数值模拟,给出了可燃气体参数,如点火温度、活化能、燃烧热等,对 DDT 过程的影响。但是,他们都没有把系统的初始条件与可燃气体参数有机结合起来,均忽略了其中的过爆轰问题,研究不够完善,缺乏相应的实验论据。

目前,国内外对气相过爆轰的产生条件缺乏统一认识,存在 3 种不同观点:(1) 只要发生爆轰,必出现过爆轰;(2) 过爆轰只在爆炸极限上限附近出现;(3) 气相 DDT 中,当爆轰波速超过临界马赫数时,发生过爆轰。针对该情况,本研究利用压力传感器,从实验角度分析了气相 DDT 中过爆轰产生的条件。

3 实验方法

利用自行设计的气相爆轰实验装置和 Y-TD-1252C 型压力传感器,进行了两轮实验,分别研究了不同浓度和压力下氢氧混合气体 DDT 中过爆轰的变化规律,实验装置如图 1、图 2 所示。采用电火花点

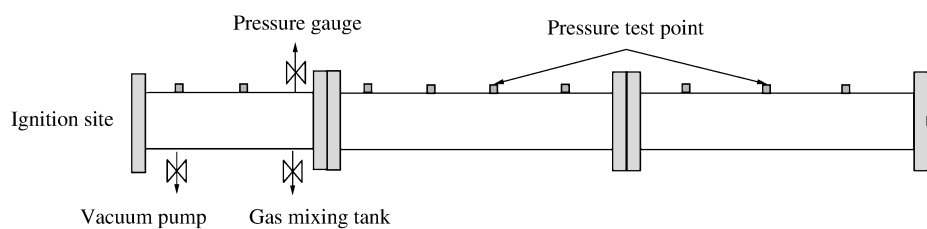


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

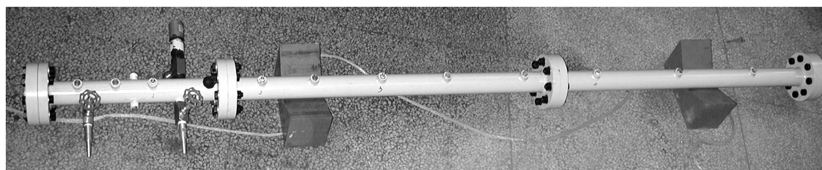


图 2 实验装置图

Fig. 2 Picture of the experimental setup

火,点火能量约为 0.25 J,压力传感器的量程为 10 MPa。两轮实验的具体参数如表 1~表 4 所示。

表 1 第 1 轮实验参数

Table 1 Experimental parameters
for the first group experiments

No.	Mixture	Initial pressure /(MPa)	Volume fraction of H ₂ /(%)
1	2H ₂ +3O ₂	0.1	40.0
2	H ₂ +2O ₂	0.1	33.3
3	H ₂ +3O ₂	0.1	25.0

表 3 第 1 轮实验压力传感器布置方式

Table 3 Distribution of pressure transducers
for the first group experiments

No.	Distance to ignition position/(m)	No.	Distance to ignition position/(m)
1	0.30	5	2.50
2	0.60		
3	0.95		
4	1.65		

表 2 第 2 轮实验参数

Table 2 Experimental parameters
for the second group experiments

No.	Mixture	Initial pressure /(MPa)	Volume fraction of H ₂ /(%)
1	2H ₂ +O ₂	0.072	66.7
2	2H ₂ +O ₂ +N ₂	0.096	50.0
3	H ₂ +O ₂	0.096	50.0

表 4 第 2 轮实验压力传感器布置方式

Table 4 Distribution of pressure transducers
for the second group experiments

No.	Distance to ignition position/(m)	No.	Distance to ignition position/(m)
1	0.30	5	1.65
2	0.45	6	2.25
3	0.75	7	2.50
4	1.15		

4 实验结果与讨论

实验中,读取各传感器的峰值压力,得到了氢氧混合物的爆燃或爆轰压力随传播距离或时间的变化关系。初始压力为 0.096 MPa 时,2H₂+O₂+N₂ 前 4 个测试点和尾端面处的压力测试曲线如图 3、图 4 所示。其它实验所测得的压力曲线与之类似,只是峰值压力及其出现的时间不同。

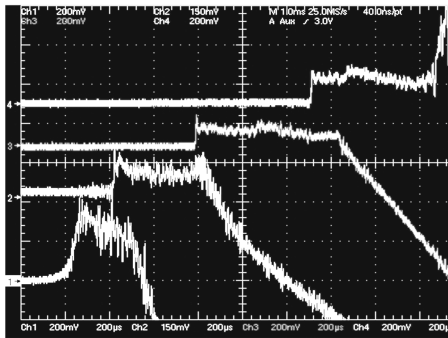


图 3 前 4 个测试点的压力曲线
Fig. 3 Pressure curves at the first four test positions

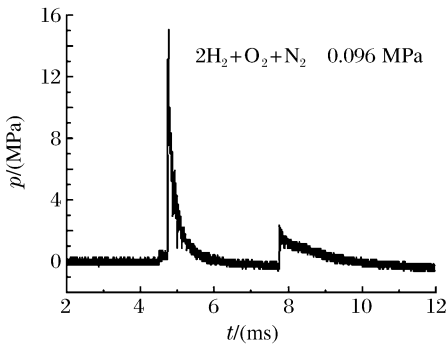


图 4 尾端面处的压力-时间曲线
Fig. 4 Pressure-time curve at the end-point

第 1 轮实验中,不同初始浓度下氢氧混合物的爆燃或爆轰压力到达各传感器的时间 t 随距离 L 、峰值压力 p_m 随距离 L 、峰值压力 p_m 随时间 t 的变化关系如图 5~图 7 所示。从图中可以看出:当 H₂ 的浓度为 25.0% 时,虽然发生了爆轰现象,但未出现不稳定的过爆轰现象;当 H₂ 的浓度为 33.3% 和 40.0% 时,DDT 过程中均出现了过爆轰现象,且 H₂ 的浓度为 40.0% 时,DDT 转变过程更快,峰值压力更大。

第 2 轮实验中,不同初始压力和浓度下氢氧混合物的爆燃或爆轰压力到达各传感器的时间 t 随距离 L 、峰值压力 p_m 随距离 L 、峰值压力 p_m 随时间 t 的变化关系如图 8~图 10 所示。由图可见:在该实

验条件下, DDT 中均出现了过爆轰现象; 混合物为 $\text{H}_2 + \text{O}_2$ 时, 峰值压力最大, DDT 转变过程最慢; 混合物为 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$ 时次之; 当混合物为 $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 时, 即 H_2 的含量为化学当量比时, 峰值压力最小, DDT 转变过程最快。

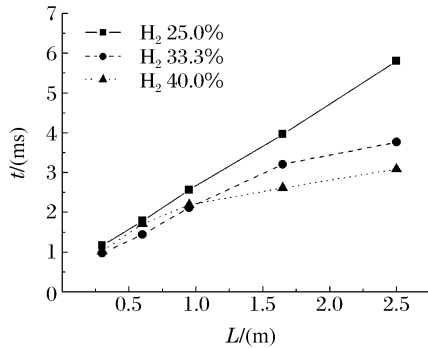


图 5 第 1 轮实验中不同浓度下 t - L 曲线
Fig. 5 t - L curves under different concentrations for the first group experiments

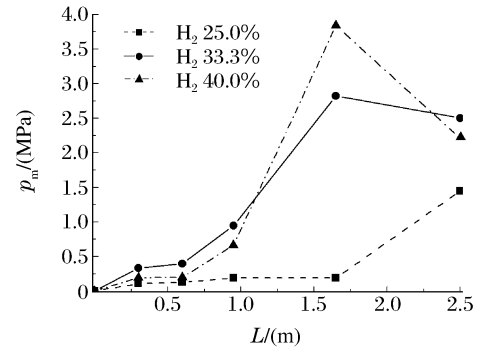


图 6 第 1 轮实验中不同浓度下 p_m - L 曲线
Fig. 6 p_m - L curves under different concentrations for the first group experiments

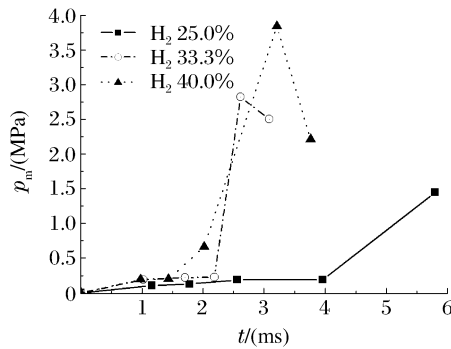


图 7 第 1 轮实验中不同浓度下 p_m - t 曲线
Fig. 7 p_m - t curves under different concentrations for the first group experiments

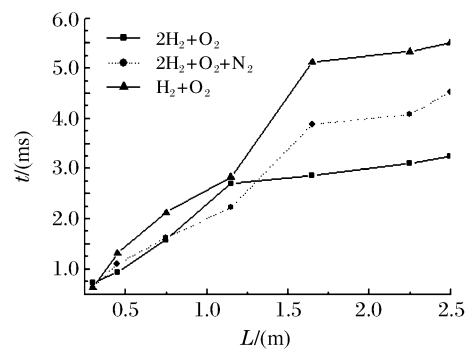


图 8 第 2 轮实验中不同浓度下 t - L 曲线
Fig. 8 t - L curves under different concentrations for the second group experiments

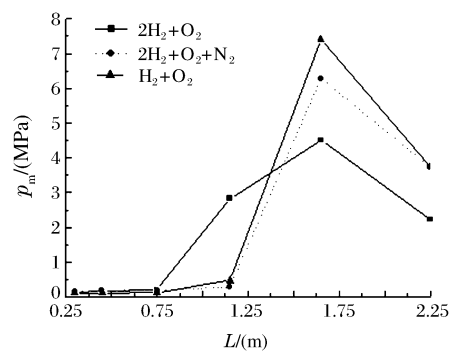


图 9 第 2 轮实验中不同浓度下 p_m - L 曲线
Fig. 9 p_m - L curves under different concentrations for the second group experiments

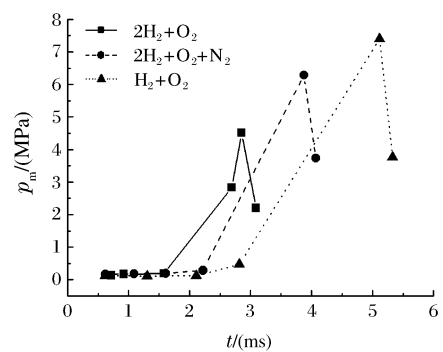


图 10 第 2 轮实验中不同浓度下 p_m - t 曲线
Fig. 10 p_m - t curves under different concentrations for the second group experiments

进一步分析实验结果, 发现: 在氢氧混合物的 DDT 过程中, 不仅在 H_2 的爆炸极限上限附近出现了过爆轰现象, 在 H_2 小于或等于当量比时也出现了过爆轰现象, 而在爆炸极限下限附近时则未出现, 这

说明过爆轰的产生具有一定的临界条件;实验测得的压力峰值明显大于稳定爆轰时的计算压力峰值,约为计算值的 1.5~2 倍,如表 5 所示。

表 5 实验结果
Table 5 Experimental results

Mixture	Initial pressure /(MPa)	Volume fraction of H ₂ /(%)	DDT time /(ms)	DDT distance /(m)	Detonation pressure/(MPa)	Over-detonation pressure/(MPa)
H ₂ +3O ₂	0.100	25.0			1.4	
H ₂ +2O ₂	0.100	33.3	2.2	1.65	1.8	2.8
2H ₂ +3O ₂	0.100	40.0	2.0	1.20	2.2	3.8
H ₂ +O ₂	0.096	50.0	2.8	1.65	4.1	7.5
2H ₂ +O ₂ +N ₂	0.096	50.0	2.2	1.65	3.7	6.3
2H ₂ +O ₂	0.072	66.7	1.6	1.15	2.2	5.2

5 结 论

利用压力传感器,实验研究了氢氧混合物在 H₂ 含量等于化学当量比、低于当量比以及爆炸极限下限附近时的 DDT 全过程,获得了比较完整的、能反映气相 DDT 从爆轰成长为过爆轰再衰减为稳定爆轰的全过程压力变化曲线。实验结果表明,除了在爆炸极限下限附近时未发现过爆轰现象外,其余情况均出现了明显的过爆轰。也就是说,在氢氧混合物 DDT 过程中,过爆轰的产生需要一定条件。从实验角度验证了此前国内外关于气相过爆轰产生条件的 3 种不同观点。通过实验还发现:在初始压力一定的情况下,氢氧混合物 DDT 的转变时间或距离随氢气浓度的增加,先减小后增大,过爆轰的峰值压力约为稳定爆轰峰值压力的 1.5~2 倍。

References:

[1] Hasson A, Avinor M, Burcat A. Transition from Deflagration to Detonation, Spark Ignition, and Detonation Characteristics of Ethylene-Oxygen Mixtures in a Tube [J]. Combust Flame, 1983, 49(1-3): 13-26.

[2] Teodorczyk A, Lee J H S. Detonation Attenuation by Foams and Wire Meshes Lining the Walls [J]. Shock Waves, 1995, 4: 225-236.

[3] Hu D, Long S C, Wu C Q, et al. Study on Explosive Limit and DDT of Explosible Gas [J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 10(4): 266-274. (in Chinese)

胡 栋, 龙属川, 吴传谦, 等. 可燃性气体爆炸极限和爆燃转变成爆轰的研究 [J]. 爆炸与冲击, 1989, 10(4): 266-274.

[4] Hu H, Pang S L, Kuang Q S. Study of Deflagration-to-Detonation Transition of Combustible Gas [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2005, 28(3): 311-314. (in Chinese)

胡 浩, 庞士磊, 况青松. 可燃气体爆燃转爆轰问题的研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(3): 311-314.

[5] Gao T Y, Huang J T, Li Y M, et al. Numerical Study on the Effect of Initial Conditions on Explosible Gas DDT [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 20(Supplement): 26-31. (in Chinese)

高泰荫, 黄军涛, 李元明, 等. 初始条件影响可燃气体 DDT 特性的数值研究 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 20(增): 26-31.

[6] Zhang D L, Xie W, Guo C M. Effect of Parameters on Explosible Gas DDT [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 20(Supplement): 48-51. (in Chinese)

张德良, 谢 巍, 郭长明. 可燃气体 DDT 过程及参数的影响 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 20(增): 48-51.

Experimental Study on the Generating Condition of Over-Detonation during the Gaseous DDT

DUAN Ji-Yuan, WANG Jian, HE Zhi

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics,
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: To verify the three current international views on the generating condition of over-detonation during gaseous deflagration-to-detonation transition (DDT), the DDT process of gaseous hydrogen-oxygen mixture was experimentally studied by using pressure sensors. The whole pressure histories of gaseous DDT from detonation to DDT and then to stable detonation were obtained. The experimental results showed that the generation of DDT requires certain physico-chemical conditions, and for certain initial pressure conditions, the transformation time (or distance) decreases firstly and then increases with increasing concentration of hydrogen. The peak pressure in over-detonation is about 1.5~2 times as much as that in the stable detonation.

Key words: gaseous deflagration-to-detonation transition; over-detonation; generating condition; experimental study

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物,在国内外公开发刊。力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果,读者对象为国内外科技工作者。征稿内容为动态及静态高压技术,人工合成新材料,高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究,动态及静态高压研究中的测试技术,高温高压下的相变,高温高压物态方程等。接受中、英文稿件。

1. 来稿应具有科学性、先进性和实用性,论点明确、论据可靠、数据准确、逻辑严谨、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在 6000~8000 字以内,请使用中华人民共和国法定计量单位。论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用网站(www.gywlxb.cn)的作者投稿系统进行投稿。

2. 所投稿件不得涉及国家及本单位机密,投稿时请附本单位保密审查意见,由审查者签名并加盖公章。

3. 文章标题字数应在 20 字以内。文中图、表应有自明性,所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照,图、表中的文字一律用英文。

4. 第一作者应确保全体作者同意文章署名,需提供第一作者、通讯作者简介(姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等),以及所有联系方式(通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等),以备联系。请注明论文(工作)的资助项目(资助项目名称和批准号),简要介绍工作背景和论文意义。

5. 来稿应保证文章版权的独立性,严禁抄袭,文责自负,请勿一稿多投。

重点注意事项

▲ **中英文摘要** 摘要用第三人称书写,语言要简练,应有具体内容。要求:(1) 拥有与论文同等量的主要信息,重点包括 4 个要素:即研究目的、方法、结果和结论。(2) 以提供论文梗概为目的,不得评论、解释论文内容。中文摘要应在 200~400 个字之间,英文摘要不少于 120 个实词。为便于 Ei Compendex 以及国外其它数据库收录,英文摘要中尽量避免特殊字符(各种数学符号、上下脚标及希腊字母)及由特殊字符组成的数学表达式;第一句不要与英文题名重复;尽量用短句子并避免句形单调;用过去时态叙述主要工作,用现在时态叙述结论,尽量用主动语态代替被动语态。

▲ **参考文献** 参考文献应是公开出版物。请充分著录参考文献,引用条数不宜太少,并尽量引用近期国内外文献,采用“顺序编码制”著录。中文参考文献必须附英译文,著录项目应齐全。

▲ **版权与稿酬** 《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据——数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等,并被 Ei Compendex 光盘收录。凡经本刊录用的稿件,其著作权(包括光盘版和网络版版权)便自动转让给《高压物理学报》编辑部,编辑部不再另行通知。来稿一经发表,即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念,慎重对待每一篇来稿,尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道,重大创新性成果可在 3 个月内刊出。

通信地址: 四川绵阳 919 信箱 110 分箱《高压物理学报》编辑部, 邮政编码: 621900

网 站: www.gywlxb.cn; 电子邮件: gaoya@caep.ac.cn (征订、咨询)

电 话: (0816)2490042; 传 真: (0816)2485139

《高压物理学报》编辑部