文章编号:1000-5773(2008)02-0197-06

一个用于界面不稳定性实验研究的竖式激波管*

邹立勇,刘金宏,王 建,黄文斌,谭多望,刘仓理

(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实验室,四川绵阳 621900)

摘要:研制了一个可用于气-气界面 Rayleigh-Taylor(RT)不稳定性、气-液界面 Richtmyer-Meshkov(RM)不稳定性、气-液界面 RT 和 RM 耦合不稳定性实验的竖式激波管装置,配备了相应的光学电学测量系统,给出了装置的主要技术参数,以及典型实验的压力-时间曲线。利用这套实验装置,可以精确地控制不稳定性的初始扰动界面,观测记录界面演化发展全过程。

关键词:RT 不稳定性;RM 不稳定性;竖式激波管

中图分类号:V211.751;O351.2 **文献标识码**:A

1 引 言

流体动力学不稳定性问题在天体物理、惯性约束聚变(ICF)、水中爆炸、航空航天等领域有着广泛的应用背景,是工程应用和基础研究同时面临的重要难题。在工程应用相关的高能量密度领域,这一问题可分为 3 个研究方向:ICF 中的界面不稳定性、电磁内爆中的界面不稳定性、炸药爆轰过程中的界面不稳定性。在可压缩性相对较弱的低马赫数领域,主要可分为激波管、果冻、气炮、直线电机等实验方向。关于高能量密度领域的界面不稳定性问题,目前在国内外已经受到广泛地重视,其重要性不言而喻。相比而言,低马赫数领域的界面不稳定性与实际应用的联系不够明显,容易被人们所忽视。然而,从国外相关研究来看,低马赫数界面不稳定性不只是纯粹的基础研究,在很大程度上也与工程应用密切相关,这方面的工作与高能量密度不稳定性研究相互补充,共同解决好工程应用中的界面不稳定性问题。

美国阿拉莫斯国家实验室在 60 周年庆典之际,专门撰文说明了低马赫数实验研究的重要意义[1]。文中指出,为确保计算程序和物理模型的正确性,阿拉莫斯开展了一系列小实验,这类小实验可以得到高质量的实验数据,这对于校验程序是至关重要的,小实验产生大结果,小实验和计算程序的相互校验并不容易,计算和实验人员的良好合作是关键;雅致而精确的激波加载气柱实验将有助于理解流体动力学不稳定性这一重要物理过程,是一个极好地利用实验数据校验程序的完美范例。英国原子武器研究院的 Youngs 指出[2],激波管实验可以精确测量湍流混合过程,通过量纲分析发现,激波管中 RM 不稳定性实验雷诺数量级为 10^6,与一些工程问题接近,是可压缩过程,因此开展激波管精细实验对于解决工程问题中的不稳定性和湍流混合行为十分重要。美国威斯康星大学的 Bonazza 小组认为[3],ICF 过程中的流体动力学效应、等离子体效应、辐射效应在多个尺度上共同作用,尤其是小尺度层次上的相互耦合,使其物理过程变得异常复杂,激波管装置为研究 ICF 中的界面不稳定性提供了一个理想的环境,它能够在一个较大尺度上,将流体动力学效应从等离子体效应、辐射效应中分离出来单独进行研究。从国外的相关进展来看,随着计算机技术的发展,许多工程问题研究最重要的改变就是用数值模拟代替了

* **收稿日期**:2007-06-08;**修回日期**:2007-10-25

基金项目:国家自然科学基金(10772166);中国工程物理研究院科学技术基金(20050104);国防科技重点实验室基金(9140C6701010702)

作者简介:邹立勇(1975—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事流体力学和爆炸力学研究. E-mail:liyong.zou@gmail.com

一些大型试验。在这个过程中,需要利用相关小实验的数据来校验数值模拟程序。低马赫数不稳定性实验以确认物理问题中的总体模型和计算程序为主要目的,不同于一般的物理发现实验,是确认总体模型和计算程序的重要基础研究,对于解决实际应用中的界面不稳定性问题具有重要和直接的作用[4]。

国外在低马赫数界面不稳定性方面开展的工作很多[5-6],这里主要介绍在竖式装置上开展的相关实验研究。在经典的 Lewis 实验[7]之后,英国的 Read 利用 Rocket Rig 装置研究 RT 不稳定性,与 Youngs 一起首次提出了湍流混合层气泡高度的公式[8]。随后 Jacobs 在其博士论文中提出了三维 RT 不稳定性的弱非线性理论,并由实验结果验证了这一理论[9]。后来,他进一步利用振荡竖式激波管形成初始界面的无膜实验技术研究了 RM 不稳定性[10]。俄罗斯技术物理研究院 Kucherenco 小组有 3 个界面不稳定性竖式炮装置,分别是 EKAP、SOM、OCA,研究内容包括分子混合效应、过渡层致稳作用、变加速度影响、湍流混合等。加州理工学院 Brouillette 小组的竖式激波管总高 9.4 m,采取抽金属薄板或者特制薄膜隔离技术形成初始界面,利用纹影仪、高速相机和 X 射线测量 RM 不稳定性[11]。日本名古屋工业大学的 Kishimoto 小组利用内径为 0.034 m 的竖式激波管,研究了在高压段压力 0.25 MPa 的情况下,气-液界面的 RT 不稳定性[12-13]。美国威斯康星大学 Bonazza 小组的竖式激波管总高 9.2 m,实验段 0.25 m×0.25 m,采取模块化设计,高、低压段长度可以调整,利用抽出金属隔板或特制薄膜隔离技术形成初始气体界面,能够产生马赫数从 1 到 5 的激波开展 RM 不稳定性实验[3]。日本东北大学的 Takayama 小组利用竖式激波管产生柱形汇聚激波,研究肥皂泡形成的气-气界面的 RM 不稳定性[14]。美国利弗莫尔实验室的 Dimonte 小组利用直线电机装置开展了许多实验工作,研究了初始条件、加速度等因素对 RT 不稳定性发展过程的影响[15]。

关于低马赫数界面不稳定性方面的实验研究工作,国内目前开展得很少。本工作所研制的竖式激波管装置目的就在于研究界面不稳定性及其湍流混合过程。

2 实验装置介绍

作为激波实验研究领域的主要设备之一,近半个世纪以来,激波管得到了广泛的应用[16]。传统的激波管中,高压段和低压段初始用膜片隔开,膜片破碎后,产生由高压段向低压段运动的激波。在传统激波管基础上设计和改造的本套实验装置,可以开展下面 3 类界面不稳定性实验。

2.1 气-气界面 RM 不稳定性实验

如图 1 所示,用于气-气界面 RM 不稳定性实验的竖式激波管总长 2.72 m,由高压段、低压段、试验段和尾段组成。高压段截面为圆形,长 0.55 m,外径和内径分别为 0.09 m 和 0.08 m,可以上下自由移动。低压段由两段组成,总长 1.57 m,与高压段的截面尺寸相同,整体固定在钢架上。试验段和尾段互相连通,长度均为 0.3 m,方形内截面 0.05 m×0.05 m,均可自由移动。除安装在试验段的测试窗口以外,其余各部分均由不锈钢制成。

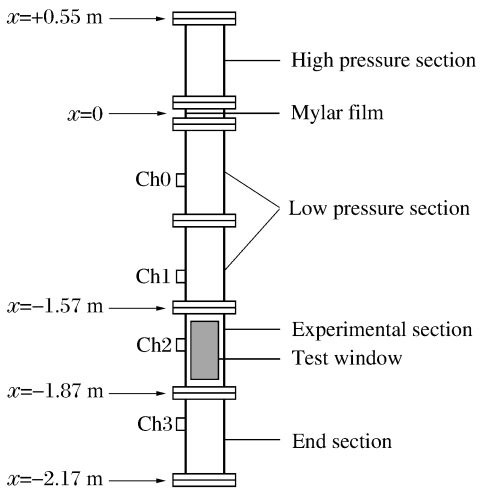


图 1 气-气界面 RM 不稳定性实验装置

Fig. 1 Experimental set-up of gas-gas interface RM instability

实验装置中安装有两类隔膜。第一类隔膜装在高压段和低压段之间,用于产生激波,材料为聚脂薄膜,根据所需产生的激波强度选取不同的厚度,一般介于 0.03～0.3 mm 之间。第二类隔膜装在试验段,用于分开两种不同的气体介质,同时预制初始界面扰动,主要由硝化纤维制成,厚度 1 μm 左右。整套装置气密性良好,各部分之间具有良好的同轴度。高压段、低压段和试验段均与真空泵相连,可以置换其中某一段或几段的实验气体,也可降低低压段的初始压力,进而开展高马赫数实验。

试验段安装有两块长 0.15 m、厚 0.025 m 的 K9 玻璃光学窗口,可以利用纹影仪等设备来进行观测。如图 2 所示,初始界面位于 K9 玻璃上沿向下 0.02 m 处,这样使得实验时可以通过调节低压段和试验段之间的微小压力差,进而精确地控制初始气体界面,也便于观测激波作用后界面演化发展的全过程。

在激波管的低压段、试验段和尾段,共安装了 4 个传感器(见图 1),其中第 1 个用于触发光测系统(图 1 中的 Ch0),另外 3 个均为 PCB 动态压力传感器(M113A26 型),经过放大器与示波器(Tektronic TDS)相连,用来记录激波管不同位置的压力-时间变化曲线,进而计算得到激波速度。

图 3 是一次实验得到的动态压力-时间曲线,传感器位于试验段(图 1 中的 Ch2)。由该图可以看到,在两道激波之间,试验段的压力值随时间变化很小,持续时间约为 2.5 ms,这段时间可以用来开展 RM 不稳定性实验。

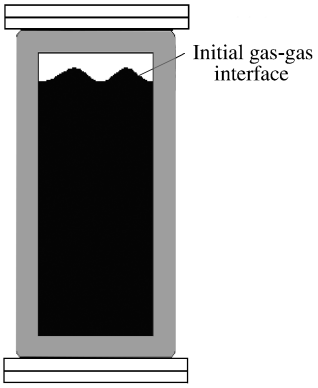


图 2　气-气界面 RM 不稳定性实验的试验段

Fig. 2　Experimental section of gas-gas interface RM instability

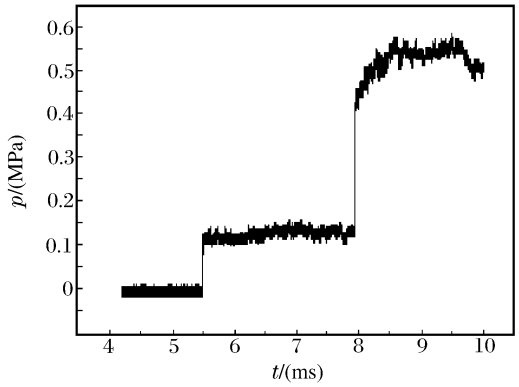


图 3　试验段测压点的压力-时间曲线

Fig. 3　Pressure-time curve from a pressure transducer located in the experimental section

2.2　气-液界面 RT 不稳定性实验

图 4 是气-液界面 RT 不稳定性实验装置,该装置由图 1 改造而成。改造时先去除图 1 中高、低压段之间的聚脂薄膜,然后将触发传感器下面的 3 段不锈钢部分更换为两段有机玻璃和一段不锈钢管,两段有机玻璃的长度分别为 0.5 m 和 0.4 m,内径均为 0.08 m,二者之间安装 20 μm 厚的铝膜和 5 mm 厚的聚四氟乙烯圆盘。从上段有机玻璃注入液体,液柱下表面由铝膜和聚四氟乙烯圆盘支撑,上表面即可形成供观测的气-液界面。实验时,首先在上段和下段同时充入一定压力的高压气体,然后关闭连通上、下段之间的阀门,最后突然释放下段的高压气体,由于压力差的作用,液柱将会向下加速运动,从而出现 RT 不稳定性。

实验时利用幅频 1000～10000 的高速数字化相机观测界面变化过程。3 个 PCB 传感器的位置如图 4 所示,可以同时记录液柱上方和下方的压力变化过程,进而准确地计算液柱的加速度。在上段气体的初始压力 2.0 MPa、水柱高度 0.1 m 的情况下,气-水界面运动的最高加速度可达到 2×10^4 m/s^2。

图 5 是在初始压力 0.175 MPa、水柱高度 0.23 m 的实验中,3 个传感器记录的压力-时间曲线。

2.3　气-液界面 RT 与 RM 耦合不稳定性实验

如图 6 所示,气-液界面 RT 和 RM 耦合不稳定性实验装置由图 4 进一步简单改造而得。改造时先在最上方的两段之间安装聚酯薄膜(与前面 RM 不稳定性实验相同),然后去除图 4 中最下端的不锈钢段,使有机玻璃段直接与大气相通。两段有机玻璃之间同样安装铝膜和聚四氟乙烯圆盘,上段有机玻璃中注入液体之后即可形成气-液界面。实验时,先在高压段充入高压气体,电破膜系统通电后,聚脂薄膜瞬间裂开,形成向下运动的激波冲击作用于气-液界面,从而出现 RT 和 RM 耦合不稳定性。本实验装置产生的第一道入射激波马赫数介于 1.05～2.5 之间,可以用来研究多种气-液界面(以及不相溶的液-液界面)之间的不稳定性问题。

通过在液柱上方安装动态压力传感器,可以测量激波管内的压力-时间曲线和激波速度。图 7 为典

型的 3 通道压力-时间曲线。光测方式与前面气-液界面 RT 不稳定性实验相同。

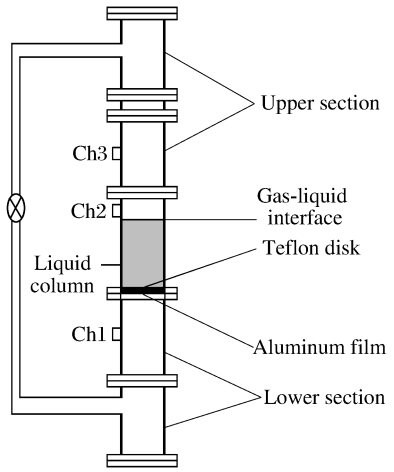


图 4 气-液界面 RT 不稳定性实验装置

Fig. 4 Experimental set-up of gas-liquid interface RT instability

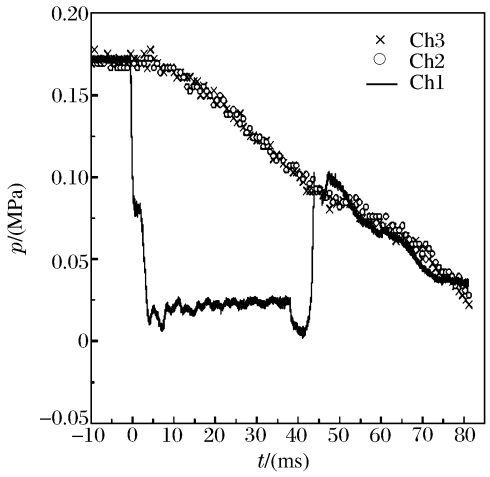


图 5 典型的三通道压力-时间曲线

Fig. 5 Typical three channel pressure-time curves

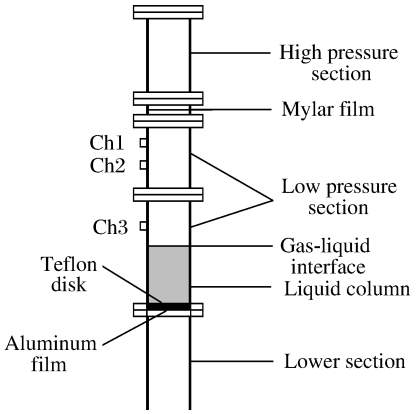


图 6 气-液界面 RT 和 RM 不稳定性实验装置

Fig. 6 Experimental set-up of gas-liquid interface RT and RM instability

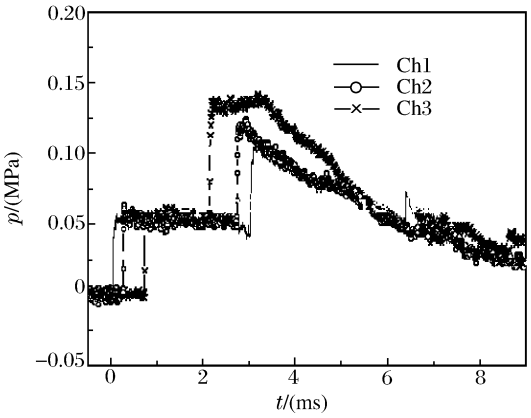


图 7 典型的三通道压力-时间曲线

Fig. 7 Typical three channel pressure-time curves

3 结 论

在传统激波管的基础上，建立了一个竖式激波管实验装置，可以开展 3 类界面不稳定性及其湍流混合实验研究：气-气界面 RM 不稳定性，气-液界面 RT 不稳定性，气-液界面 RT 和 RM 耦合不稳定性。实验时可精确控制和记录气-气 RM 不稳定性的界面初始扰动及演化发展过程，气-液 RT 不稳定性实验的最高界面运动加速度可达到 2×10^4 m/s^2，气-液 RT 和 RM 不稳定性实验的第一道激波马赫数范围为 1.05～2.5。利用这套装置开展界面不稳定性实验，可以取得详细可靠的实验数据，校验相应的数值计算程序，从而更好地理解不稳定性和湍流混合演化发展的各个阶段，为相关的工程应用问题提供有益的帮助。

本实验工作是在张 军、蒲正美、龚晏青、何 智、张光升、高 宁、黄淑萍等的帮助下完成的，谨表谢意！

References:

[1] Fishbine B. Code Validation Experiments—A Key to Predictive Science [J]. Los Alamos Research Quarterly (Fall),2002:6-14.

[2] Youngs D L. Turbulent Mixing-Shock Tube Turbulent Mixing Experiments [J]. Discovery—The Science & Technology Journal of AWE,2004,8:4-16.

[3] Anderson M H,Puranik B P,Oakley J G,et al. Shock Tube Investigation of Hydrodynamic Issues Related to Inertial Confinement Fusion [J]. Shock Waves,2000,13:377-387.

[4] Chen S H,Li P,Zou L Y,et al. Turbulent Mixing and Nuclear Weapon [R]. Institute of Fluid Physics,CAEP,2006. (in Chinese)
陈森华,李　平,邹立勇,等. 湍流混合与核武器 [R]. 绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所,2006.

[5] Cabot W H,Cook A W. Reynolds Number Effects on Rayleigh-Taylor Instability with Possible Implications for Type Ia Supernovae [J]. Nature:Physics,2006,2(8):562-568.

[6] Zabusky N. Vortex Paradigm for Accelerated Inhomogeneous Flows: Visiometrics for the Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov Environments [J]. Ann Rev Fluid Mech,1999,31:495-535.

[7] Lewis D J. The Instability of Liquid Surfaces when Accelerated in a Direction Perpendicular to Their Planes [J]. Proc Royal Soc Lond,1950,A202:81-98.

[8] Read K I. Experimental Investigation of Turbulent Mixing in Rayleigh-Taylor Instability [J]. Physica D,1984,12:45.

[9] Jacobs J W. Three-Dimensional Rayleigh-Taylor Instability:Experiment and Theory [D]. Los Angeles:University of Califorlia,1986.

[10] Jacobs J W,Krivets V V. Experiment on the Late-Time Development of Single-Mode Richtmyer-Meshkov Instability [J]. Phys Fluids,2005,17:034105.

[11] Brouillette M,Bonazza R. Experiments on the Richtmyer-Meshkov Instability:Wall Effects and Wave Phenomenon [J]. Phys Fluids,1999,11:1127-1142.

[12] Wang X L,Shi H H,Kishimoto M. Experimental Study of Rayleigh-Taylor Instability in a Shock Tube Accompanying Cavity Formation [J]. Jpn J Appl Phys,2001,40:6668-6674.

[13] Shi H H,Kishimoto M. Fluid Mechanics in the Transient Acceleration of a Liquid Column [J]. Explosion and Shock Waves,2003,23(5):391-397. (in Chinese).
施红辉,岸本薰实. 瞬态加速液柱的流体力学问题研究 [J]. 爆炸与冲击,2003,23(5):391-397.

[14] Hosseini S H,Takayama K. Experimental Study of Richtmyer-Meshkov Instability Induced by Cylindrical Shock Waves [J]. Phys Fluids,2005,17:084101.

[15] Dimonte G. Dependence of Turbulent Rayleigh-Taylor Instability on Initial Perturbations [J]. Phys Rev E,2004,69:056305.

[16] Glass I L,Sislian J P. Nonstationary Flows and Shock Waves [M]. Oxford:Oxford Science Publications,1994.

A Vertical Shock Tube for Experimental Studies on Interfacial Instability

ZOU Li-Yong,LIU Jin-Hong,WANG Jian,HUANG Wen-Bin,
TAN Duo-Wang,LIU Cang-Li

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research*,
Institute of Fluid Physics,*CAEP*,*Mianyang* 621900,*China*)

Abstract: A new vertical shock tube was developed in order to investigate different stages of the development of hydrodynamic interfacial instability. The versatile shock tube permits the execution of three

kinds of experiments on the turbulent mixing of fluids induced by the (1) Richtmyer-Meshkov instability at the gas-gas interface(initial perturbations are imposed on a thin nitrocellulose membrane),(2) Rayleigh-Taylor instability at the gas-liquid interface(acceleration of the contact boundary of different density fluids $g_1 \leqslant 2\times10^4$ m/s^2),and (3) combined Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instability at the gas-liquid interface (the first shock wave Mach number ranges from 1.05 to 2.5). The main benefits of such a facility are that it allows,first,to perform multiple experiments of interfacial instability and,second,to measure different transition phases from the beginning to the fully developed turbulent mixing stages.

Key words:Rayleigh-Taylor(RT) instability;Richtmyer-Meshkov(RM) instability;vertical shock tube

《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,在国内外公开发行。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6 000～8 000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》。请使用电子邮件投稿(gaoya@caep.ac.cn),也可提供软盘。

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,请提供第一作者、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出版权)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

电子邮件:gaoya@caep.ac.cn (投稿、征订、咨询)

电　　话:(0816)2490042;传真:(0816)2282695

《高压物理学报》编辑部