文章编号：1000-5773(2010)01-0037-06

组合式隔热陶瓷短杆高温 SHPB 实验技术*

肖大武[1,2]，李英雷[1]，胡时胜[2]

(1. 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；
2. 中国科学技术大学，中国科学院材料力学行为和设计重点实验室，安徽合肥 230027)

摘要：讨论和分析了当前高温分离式霍普金森压杆(SHPB)实验技术，为了获得材料在高温下可靠的动态力学性能，建立了一套在压杆和试件之间添加隔热陶瓷短杆的高温 SHPB 实验系统。相比于传统接触式高温 SHPB 方案，该系统可以使用在更高的冲击载荷和温度下，与机械对杆方案相比，实验装置及其控制要简便许多。结合有限元模拟，对陶瓷短杆及温度场对压杆中应力波传播的影响进行了相应的评估，并利用这套实验系统得到了 800 ℃下 HR2 抗氢钢的动态压缩应力-应变曲线。

关键词：陶瓷短杆；高温；分离式霍普金森压杆(SHPB)；抗氢钢
中图分类号：O521.3；O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

材料的力学性能与温度有密切的关系，关于温度相关的材料动态力学行为的研究已成为武器设计中的迫切需要，同时在飞行器设计、穿甲、防爆、高速切削、成型及爆炸焊接等众多领域中，冲击载荷下不同温度的材料响应研究具有重要的应用价值。对大多数金属材料而言，在高温高应变率等极端条件下，温度对流动应力的影响要比应变率的影响大得多。霍普金森杆是目前研究材料在高应变率下(10^2～10^4 s^{-1})力学特性应用最广泛的实验手段之一[1-2]，高温动态实验技术一直是研究的难点。

目前高温分离式霍普金森压杆(SHPB)装置的实验方案大体可分几种类型。一种是局部导杆和试件共同加热，在进行实验数据处理时对导杆中温度梯度的影响进行修正。Chiddister 和 Malvern[3] 采用这种方案实验中所达到的最高温度为 550 ℃，把压杆上连续变化的温度场简化为 5 个台阶温度场，然后将温度场对应力波传播的影响进行数值修正。夏开文[4-5] 则利用传热学原理推导出压杆上的温度分布，并通过有限差分的方法对波形进行修正，最高温度为 600 ℃。这种方法其实验数据处理比较复杂，且导杆的弹性限制也制约了这种方法的温度上限。或者采用异形压杆，加工不同截面积的压杆以抵消因温度梯度所引起的阻抗变化，使得在高温实验过程中压杆的阻抗保持为一常数，从而不需要对测得的实验波形进行修正。这种设计的缺点在于对于不同温度下需要使用不同形状的压杆，且需要获得压杆中准确的温度分布以及设计相应的压杆。对于导杆和试件共同加热的实验方案，由于部分压杆在实验过程中总是处于加温状态，因而温度不能太高，否则会严重影响压杆的使用寿命，且不能用于测量高温下强度仍然较高的材料，以免加载时试样嵌入到在高温下软化的压杆端面中，从而引起明显的应变测量误差。

另一种高温动态实验技术则通过单独对试件加热，待试件加热完成后，再利用机械装置将导杆与试件快速组装，在几毫秒内完成实验[6-9]。这种实验方法忽略压杆和试件中的温度变化，数据处理简单，可

* **收稿日期**：2009-02-10；**修回日期**：2009-05-26
基金项目：中国工程物理研究院科学技术发展基金重点项目(2009A0101001)
作者简介：肖大武(1983—)，男，博士，主要从事材料动力学方面的研究. E-mail：xidd@ustc.edu

实现的实验温度相对也较高,然而机械装置要求控制精度高,且短时间内压杆和试件端部剧烈的温度变化有可能对压杆和试件的材料性能产生不可忽略的影响。

此外,还有一些采用温度不敏感材料来避开温度梯度影响的实验方法。如采用马氏体时效钢或Inconel合金钢进行 600 ℃以下高温实验,由于这两种材料在此温度下的弹性性能和波阻抗变化很小,因而可以忽略温度梯度场所带来的影响。或在试件两端增加保护块的高温动态实验技术,选取弹性常数对温度不敏感的保护块材料,在对试样和保护块加热的过程中,使杆处于室温状态。Lankford[10] 曾经利用氧化铝陶瓷作隔热杆,得到了氧化铝陶瓷在 1 500 ℃高温下的动态力学性能,然而对温度梯度的影响并未考虑。

本工作建立了一套组合式隔热陶瓷短杆高温 SHPB 实验系统。在压杆和试样之间添加耐高温、高强度的氧化铝陶瓷短杆,实验时将其和试样同时加热,既可保证试样温度场恒定,同时又可避开压杆温度场对应力波传播的影响。通过有限元热传导模拟,对由温度梯度分布所带来的对应力波传播的影响进行了分析,并利用这套实验系统得到了 HR2 钢在 800 ℃高温下的动态应力-应变曲线。

2 实验装置及原理

实验装置简图如图 1 所示。在试件端面和压杆之间各加一直径与压杆相同的 A95 陶瓷短杆,通过套管进行装配,套管的内径和压杆相同,可在压杆上自由滑动。试样通过套管内的两个簧片支撑定位,试样上的温度通过直接贴在试样表面的热电偶进行测定。本工作中使用的加温电阻炉的加热陶瓷管长约 110 mm,为了保证在实验温度为 800 ℃时压杆上的温度低于 200 ℃,从而可忽略温度梯度对应力波在压杆中传播的影响,实验装置中采用了一对长 100 mm 的陶瓷短杆。

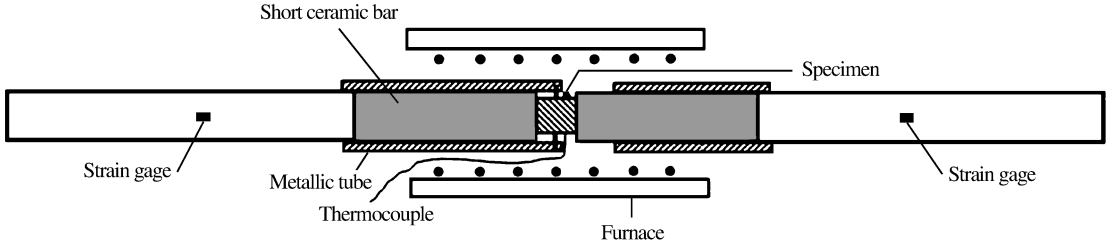
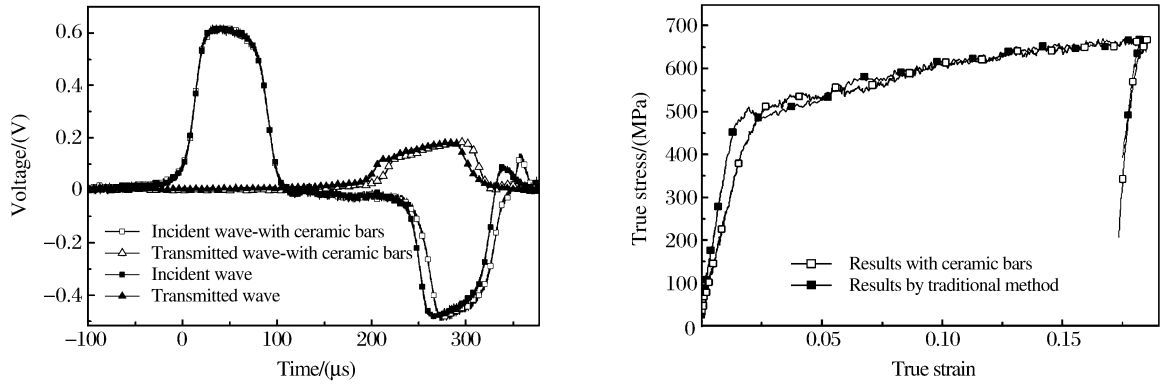


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of SHPB apparatus

添加陶瓷短杆后可能会对应力波传播带来一定影响,为此首先在常温下对常规和添加陶瓷短杆两种条件下进行了对比实验。实验在∅14.5 mm 的 SHPB 装置上进行,压杆材料为 35CrMnSiA,试样材料为 LY12 铝合金,尺寸为∅5 mm×5 mm。为消除弥散振荡给波形带来的影响,在入射杆打击端添加了波形整形器,实验的实测波形及处理得到的应力-应变曲线如图 2 所示。由图 2(a)可以看出,两种实验条件下加载的入射波形基本保持一致,反射波和透射波除了陶瓷短杆带来的延时,波形特征也基本一致。采用两波法处理得到的应力-应变曲线如图 2(b)所示,可以看出添加陶瓷短杆使得弹性变性段应变偏大,在流动应力段两者重合很好。这是由于处理过程中引入了陶瓷短杆的弹性变形,在试样弹性变形段,陶瓷的弹性变形会带来一定影响,而进入塑性变形段之后,试样的塑性变形要远远大于陶瓷短杆的弹性变形量,因此添加陶瓷短杆对应力-应变曲线的流动应力段基本不产生影响。

对于高温实验中温度梯度场的影响,采用数值模拟的手段进行分析和评估。以实验温度 800 ℃为例,采用 Ansys Multiphysics/Ls-Dyna 模块。模型为 1/2 二维模型,先稳态求解得到实验系统模型的温度分布,再将求得的温度分布作为载荷边界条件导入到模型中进行动力学分析。模拟中采用的材料参数见表 1 和表 2。压杆材料为 35CrMnSiA,采用各向同性弹性模型,试样材料为 HR2 钢,采用双线性模型。陶瓷的导热系数则根据 Bass[11] 给出的常压下热传导系数的经验公式外推得到。假定试件和在加热炉内的陶瓷杆为恒热源,保持 800 ℃不变,常温为 26 ℃,空气的热交换系数为 50 W/(m^2 · K)。



(a) Waves　　(b) True stress-true strain curves

图 2　常温下常规方法和添加陶瓷短杆方法 LY12 铝试样的实验结果

Fig. 2　Experimental results of LY12Al alloy by traditional method and the method of adding short ceramic bars on SHPB at normal temperature

表 1　材料参数

Table 1　Material parameters

Materials	ρ/(g/cm^3)	E/(GPa)	ν	Y/(MPa)	E_t/(GPa)	K/[W/(m·K)]
Pressure bar	7.60	208	0.29			40.0
A95 ceramic	3.65	340(26 ℃)	0.30			
Sample	8.00	100	0.30	400	1.0	16.3

表 2　不同温度下 A95 陶瓷杨氏模量[12]和导热系数

Table 2　Young's modulus and thermal conductivity of A95 ceramic at different temperature

T/(℃)	E/(GPa)	K/[W/(m·K)]	T/(℃)	E/(GPa)	K/[W/(m·K)]
26	340	21.8	600	280	9.1
200	320	14.7	800	260	7.9
400	300	11.1			

通过计算得到的透射杆(入射杆同)的温度分布结果如图 3 所示,图中横坐标为透射杆离试样和压杆接触面的轴向距离。由图可知,压杆的端头和陶瓷短杆接触处的温度约为 120 ℃,因此压杆上的温度梯度基本可忽略不计。相同加载条件下理想高温 SHPB 实验(即无陶瓷短杆和温度梯度场影响)以及添加陶瓷短杆并考虑温度场分布的数值模拟结果的比较如图 4 所示。由图 4(a)可见,两种条件下的反射、透射信号基本相似,形状基本不变,只是塑性变形区初始段的幅度略有变化。两种条件下的应力-应变曲线均采用两波法处理得到,如图 4(b)所示。数值模拟得到的添加陶瓷短杆并考虑温度梯度场的应力-应变曲线初始段的偏差稍微大一些,但进入塑性变形段后,误差迅速降至 5%以下。因此,本方法

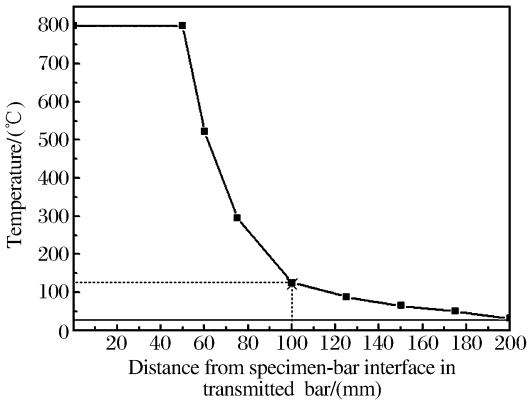
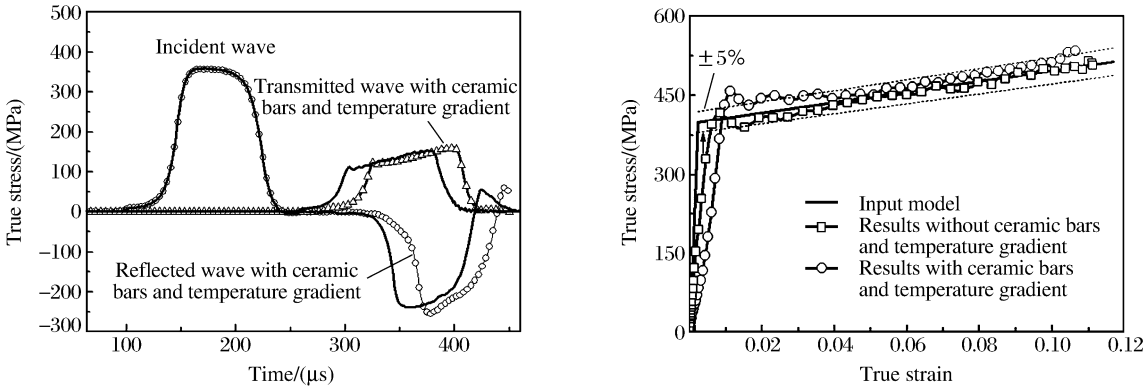


图 3　实验温度 800 ℃下透射杆的温度分布

Fig. 3　Variation of temperature along the tranmitted bar away from the specimen-bar interface at 800 ℃

适用于流动应力的测试。

对于传统接触式高温 SHPB 方案，由于压杆一部分被加热，因此实验温度不能太高，否则对其弹性力学性能和使用寿命将带来很大影响，且不能用于测量高温下强度仍然较高的材料。而组合式隔热陶瓷短杆高温 SHPB 实验方案，由于在杆和试样间添加了耐高温的 A95 陶瓷块，可以实现 800 ℃甚至更高的实验温度，因而在进行高温实验时可以保证压杆上的温度场对其弹性性能的影响可以忽略。且 A95 陶瓷在高温下仍具有极高的强度(1 000 ℃温度下，屈服强度约 2 GPa[12])，对于在高温下强度较高的材料依然可以适用，与机械对杆方案相比，实验装置要简便，只需在传统 SHPB 装置上加装加温装置和陶瓷短杆即可。机械对杆方案中试样端面附近的区域存在较大的温度梯度，因此对机械控制精度要求极高，而机械控制精度显然有极限。试样尺寸也不能太小，否则不能近似认为整个试样温度均匀。且在实验温度和试样尺寸变化时都要重新更改控制参数，操作极其不便。此外，在机械对杆方案中，在极短时间内压杆和试样上剧烈的温度变化也会对微观组织带来不确定的影响，进而影响其力学性能。



(a) Waves (b) True stress-true strain curves

图 4 800 ℃下常规方法和添加陶瓷短杆方法的数值模拟结果

Fig. 4 Numerical results by traditional method and the method of adding ceramic platens on SHPB at 800 ℃

在实验数据处理中，机械对杆方案不考虑温度梯度的影响，仍按常规方法处理。与传统接触式高温 SHPB 方案一样，组合式隔热陶瓷短杆高温 SHPB 实验方案在进行高温实验时，试样上的温度场是均匀的，但由于加载系统的一部分和试样一块被加热，都存在温度梯度场的影响。夏开文等[4]在进行高温实验时采用的是传统接触式高温 SHPB 方案，数据处理中通过有限差分法对波形进行了修正，实验温度为 400 ℃时，修正前与修正后的波形形状基本不变，幅度变化了 10%。而通过前面的数值模拟分析可知，800 ℃下添加陶瓷短杆及温度梯度场带来的影响在试样进入塑性变形段后可以控制在 5%以下，而本身 SHPB 实验初始段的不确定度就不小，因此本工作并未对温度梯度场带来的影响进行修正，仍采用常规方法进行数据处理。综上所述，组装式隔热陶瓷短杆高温 SHPB 实验系统较传统接触式高温 SHPB 实验系统，可以测量温度范围更宽以及更高加载条件下材料的高温动态力学性能，且装置操作简单，避免了机械对杆式高温 SHPB 方法中对机械装置控制精度极高的要求。

3 HR2 钢高温实验结果及分析

采用本工作中建立的高温 SHPB 实验系统，研究了不同温度下 HR2 钢的动态压缩力学性能，实验温度分别为 15、200、400、600 和 800 ℃，采用的试样尺寸为∅7.5 mm×7.5 mm，实验结果如图 5 所示。从图中可以看到，HR2 钢表现出较强的温度相关性，随实验温度的升高，材料的流动应力明显呈下降趋势，800 ℃时，其屈服强度较常温时下降了 50%以上，且在不同温度下其应力-应变曲线的塑性段基本平行，这表明温度对 HR2 钢的加工硬化行为影响不大。

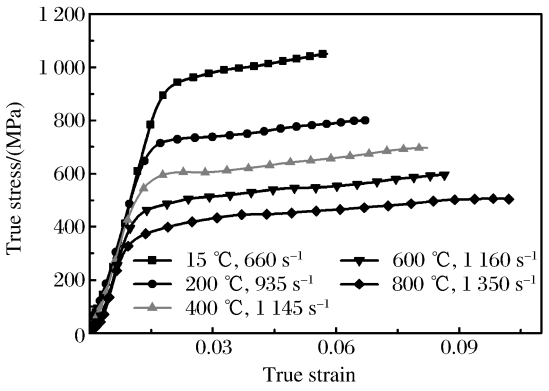


图 5　常温至 800 ℃下 HR2 钢的动态 SHPB 实验结果

Fig. 5　Stress-strain curves of HR2 steel from normal temperature to 800 ℃

4　结　论

在常规 SHPB 系统的基础上通过加装高强度、耐高温的 A95 陶瓷,建立了一套组合式隔热陶瓷短杆高温实验装置。相比于传统接触式高温 SHPB 方案,该高温实验装置可以使用在更高的加载和温度下,并对压杆起保护作用,延长了其使用寿命;与机械对杆方案相比,其实验装置和控制则要简便许多。通过部分实验和有限元模拟,对添加陶瓷短杆及温度梯度场带来的附加影响进行了评估,结果表明,800 ℃下,这套实验系统的测量误差可以控制在 5%以下。采用这套实验装置研究了 800 ℃下 HR2 抗氢钢的动态压缩力学性能,实验结果表明,该抗氢钢具有明显的温度软化效应。

References:

[1] Zukas J A, Nicholas T, Swift H F, et al. Impact Dynamics [M]. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1992.

[2] Meyers M A. Dynamic Behavior of Materials [M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.

[3] Chiddister J, Malvern L E. Compression-Impact Testing of Aluminum at Elevated Temperatures [J]. Exp Mech, 1963, (3): 81-90.

[4] Xia K W, Cheng J Y, Hu S S. Application of SHPB Apparatus to the Measurement of High Temperature Dynamic Mechanical Behavior of Materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(3): 307-313. (in Chinese)
夏开文,程经毅,胡时胜. SHPB 装置应用于测量高温动态力学性能的研究 [J]. 实验力学, 1998, 13(3): 307-313.

[5] Xia K W, Liu W Y, Tang Z P. Experimental Study of Dynamic Properties of 30CrMnSiA Steel at High Temperature [J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(4): 310-316. (in Chinese)
夏开文,刘文彦,唐志平. 30CrMnSiA 的高温动态力学性质的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(4): 310-316.

[6] Zhang F J, Xie R Z. Auto-Assembling Technique Used in High Temperature Experiment of SHPB [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 281-284. (in Chinese)
张方举,谢若泽. SHPB 系统高温实验自动组装技术 [J]. 实验力学, 2005, 20(2): 281-284.

[7] Xie R Z, Zhang F J, Yan Y X, et al. High Temperature SHPB Experimental Technique and Its Application [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 330-334. (in Chinese)
谢若泽,张方举,颜怡霞,等. 高温 SHPB 实验技术及其应用 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 330-334.

[8] Nemat-Nasser S, Isaacs J B. Direct Measurement of Isothermal Flow Stress of Metals at Elevated Temperatures and High Strain Rates with Application to Ta and Ta-W Alloys [J]. Acta Mater, 1997, 45(3): 907-919.

[9] Li Y L, Suo T, Guo W G, et al. Determination of Dynamic Behavior of Materials at Elevated Temperatures and High Strain Rates Using Hopkinson Bar [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 487-492. (in Chinese)
李玉龙,索　涛,郭伟国,等. 确定材料在高温高应变率下的 Hopkinson 杆系统 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 487-492.

[10] Lankford J. Temperature Strain Rate Dependence of Compressive Strength and Damage Mechanisims in Aluminium Oxide [J]. J Mater Sci, 1981, 16(6): 1567-1578.

[11] Bass J D, Svendsen B, Ahrens T J. The Temperatures of Shock Compressed Iron [A]//Manghnani M H, Syono Y. High Pressure Research in Mineral Physics [C]. Washingtong D C: Geophys Union, 1987: 393-402.

[12] Wachtman J B, Lam D G. Young's Modulus of Various Refractory Materials as a Function Temperature [J]. J Amer Ceram Soc, 1959, 42: 254-260.

High Temperature SHPB System with Heat Insulation for Short Ceramic Bars

XIAO Da-Wu[1,2], LI Ying-Lei[2], HU Shi-Sheng[1]

(1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: To obtain dynamic behavior of materials at very high temperature, a new experimental system of high temperature split Hopkinson pressure bar (SHPB) is investigated. The steel bars in the inside section of the furnace are replaced with relatively close acoustic impedance matched short ceramic bars. Compared to the traditional high temperature SHPB system, this system can be used under higher loading and higher experimental temperatures, and it is more convenient than the auto-assembling high temperature SHPB system. In addition, the effect of impedance mismatch is investigated by numerical simulation, which proves veracity of the results. The dynamic compressive properties of anti-hydrogen steel at high temperature up to 800 ℃ are tested by this system. Results show that the flow stress of material decreases with the increase of the temperature.

Key words: short ceramic bars; high temperature; split Hopkinson pressure bar (SHPB); anti-hydrogen steelA

《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，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

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