文章编号：1000-5773(2005)01-0086-07

球缺药型罩爆炸成型弹丸数值模拟*

庞 勇，于 川，桂毓林

（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：利用 LS-DYNA 软件提供的二维轴对称拉格朗日计算编码，对钻地弹前级球缺形药型罩爆炸成型弹丸问题进行了数值模拟。讨论了计算方法的选取依据，考察了典型的射弹形成过程、壳体飞散过程以及射弹速度与动能，分析了不同模型的计算结果差异，实验结果与计算符合很好。

关键词：钻地弹；爆炸成型弹丸；数值模拟；拉格朗日方法

中图分类号：O385；TJ414 **文献标识码**：A

1 引 言

为避免重要政治、军事目标轻易被敌方摧毁，许多国家均将其加固或设置于地下，美军称之为“坚固及深埋目标”(HDBT)。为对付此类目标，多种钻地弹(Earth Penetrator)应运而生。按照侵彻方式来划分，钻地弹可分为两类：一类靠弹体直接高速度侵彻，称为动能侵彻战斗部；另一类利用前级聚能装药预先开孔，后级侵彻体随进侵彻，称为串联随进战斗部。前者对侵彻速度要求较高，而且由于混凝土靶标的非均匀性质，对着角和攻角较敏感，容易发生弹道偏转甚至跳弹；后者由于前级装药的预侵彻作用，不仅可降低对速度和抗冲击性能的要求，而且侵彻弹道稳定性得以增强，在斜碰撞情况下仍能有效工作。目前，一些国家正在开展串联随进战斗部的研制，有的型号已经投入使用，其中典型的有：美国空射巡航导弹 AGM-86 的 MWS 战斗部(图 1)，英、法合作的“Broach”战斗部和德、法合作的“Mephisto”战斗部。

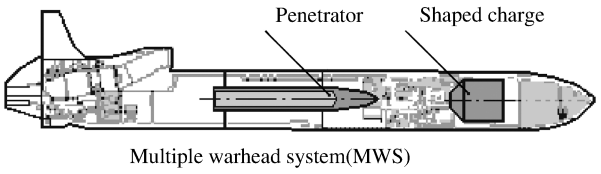


图 1 AGM-86 的串联随进战斗部

Fig. 1 Tandem following-through Warhead of AGM-86

在钻地弹前级聚能装药侵彻混凝土靶的应用中，既要保证开坑深度，更要保证坑径，以确保二级侵彻体的顺利跟进。在装药量一定的情况下，坑深和坑径是此消彼长两个矛盾的对立面，其中对坑深的要求较容易实现，于是如何提高坑径就成为问题的焦点。张明等人[1]的研究表明，采用变壁厚球缺形药型罩可以形成速度梯度小的爆炸成型弹丸，有效增加成坑直径。另外，通过使用轻金属药型罩改变聚能装药各部件间的质量分配，从而实现爆轰过程中能量分配的优化，也是提高射弹能量的一条可行途径。二战期间，德国就开展了大量聚能装药侵彻混凝土的研究并付诸于应用，最著名的当属配备于“榔寄生”(MISTEL)子母飞机的大型聚能战斗部[2]。该战斗部的铝制球缺形药型罩的锥角为 110°，直径达 2 m，装药量 1700 kg，据称试验中曾破坏 18 m 厚的钢筋混凝土。本研究结合球缺形轻金属药型罩射弹形成的特点，采用 LS-DYNA 软件提供的二维轴对称拉格朗日计算编码，对其进行了数值模拟，并与实验结果进行了比较。

* **收稿日期**：2004-01-05；**修回日期**：2004-05-17

作者简介：庞 勇(1970—)，男，助理研究员，主要从事爆炸力学研究. E-mail：zeppelin_py@yahoo.com.cn

2　计算方法

聚能装药形成的杀伤元素可分为两大类:射流型和射弹型(即爆炸成型弹丸)。由于药型罩材料的压缩性不可忽略,金属射流的形成必须满足一定的临界条件,即聚能射流形成的判据,该判据与药型罩的材料性质、几何尺寸,以及炸药的驱动情况有关。射流的形成过程,可以用定常理想不可压流体力学模型近似描述,从固定于碰撞点的动坐标系观察,罩微元在轴线处碰撞,形成流动分岔点,分离为射流和杵体两部分,也就是说材料的拓扑关系发生了变化。对这类问题,只能用欧拉方法求解。而在某些球缺形和大锥角药型罩的爆轰驱动过程中,罩顶部首先沿轴线向前运动,药型罩变形以翻转和挤压延展为主,形成的是爆炸成型弹丸。此时材料内不出现分岔点,流动的拓扑关系不变。此类问题适合用拉格朗日方法求解。图 2 为两种模型的对比,图 2(b)为文献[3]利用 EPIC-2 编码求得的球缺形药型罩爆炸成型弹丸,呈现典型的"管状分层"现象。

拉格朗日方法具有建模快捷方便、物质界面清晰、计算量小等优点,对外形和结构较复杂的模型有较强的求解能力。对于计算中出现的大变形问题,可以通过合理划分网格等方法加以解决。正因如此,在球缺形药型罩、大锥角药型罩的爆炸成型弹丸研究中,拉格朗日方法得到了广泛应用[4,5]。但拉格朗日方法也有其局限性,对流体计算中流动拓扑关系发生变化的情况无法胜任,只能求助于其它方法。

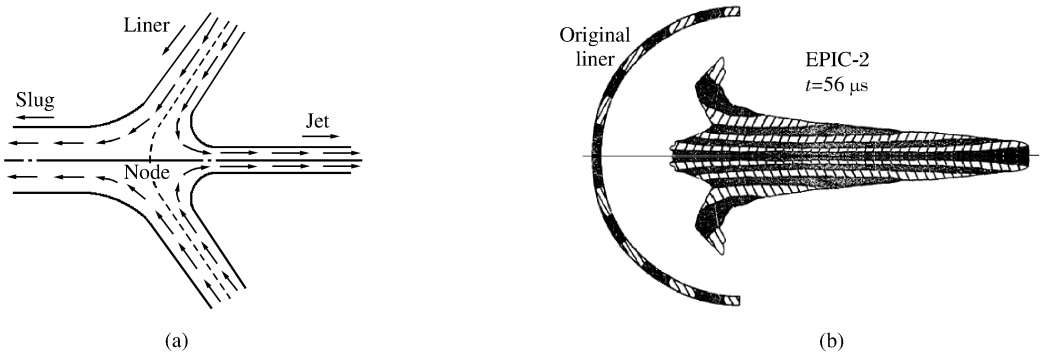


图 2　射流与射弹模型的比较

Fig. 2　Comparison between jet and explosively formed penetrator

3　模型与网格

模拟了在不同的壳体尾锥角和不同的药型罩材料、厚度情况下,球缺形药型罩的射弹形成过程。模型的壳体为后部带尾锥的钢筒,尾锥半锥角分别为 40°和 30°,药型罩为变壁厚球缺形铝、镁药型罩,镁罩厚度分别为 20 mm 和 15 mm。主装药为 Comp B 炸药,传爆药柱为 PETN。图 3 为半模型示意图,具体尺寸从略。

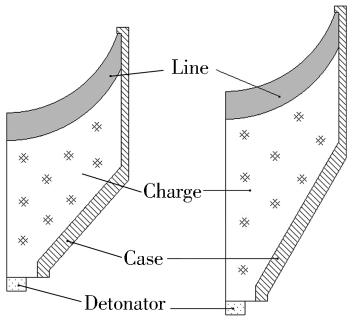


图 3　计算模型

Fig. 3　Computational model

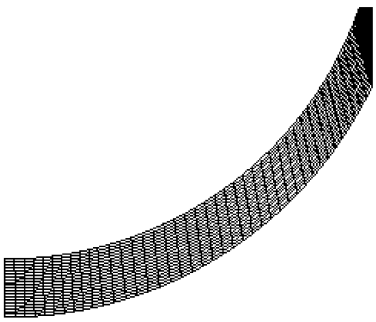


图 4　药型罩网格

Fig. 4　Mesh of the liner

计算中，主炸药和传爆药柱的材料模型和状态方程分别取为 High-Explosive-Burn 材料模型；铝、镁选用 Steinberg 材料模型；钢壳体选用 Plastic-Kinematic 材料模型[6]。表 1 为选用的状态方程和材料参数，其中钢材料采用应变失效破坏模式，失效判据为 $\varepsilon \geqslant \varepsilon_{\text{Failure}}$，$\varepsilon_{\text{Failure}}=0.8$。炸药的 JWL 状态方程参数见表 2。

计算网格的生成质量——特别是药型罩的网格质量，是本问题求解的关键。根据预测，轻金属药型罩将形成一个长径比较大的射弹，因此沿轴向加密网格，使计算单元呈扁平状(图 4)。另外，药型罩与炸药交界面处的网格匹配也很重要。

表 1 状态方程与材料参数

Table 1 Equation of state and material parameters

Material	Equation of state	Density/(g/cm^3)	G/(GPa)	σ_y/(GPa)
Comp B explosive	JWL	1.72		
PETN	JWL	1.77		
Al	Grüneisen	2.78	28.6	0.260
Mg	Grüneisen	1.78	16.5	0.190
Steel		7.83	79.6	0.800

表 2 炸药 JWL 状态方程参数

Table 2 JWL equation of state parameters of explosives

Explosive	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	W	$v_{\text{C-J}}$/(km/s)	$p_{\text{C-J}}$/(GPa)
PETN	617	16.9	4.40	1.20	0.25	8.5	33
Comp B	524	7.68	4.20	1.10	0.34	7.9	29

4 典型计算结果

本计算中，各模型几何外形差异不大，因此射弹形成过程的物理图像基本相同。这里以锥罩半锥角为 40°的铝药型罩为例，介绍典型的计算结果。

4.1 射弹形成过程

射弹形成过程以间隔 50 μs 的形式示于图 5。

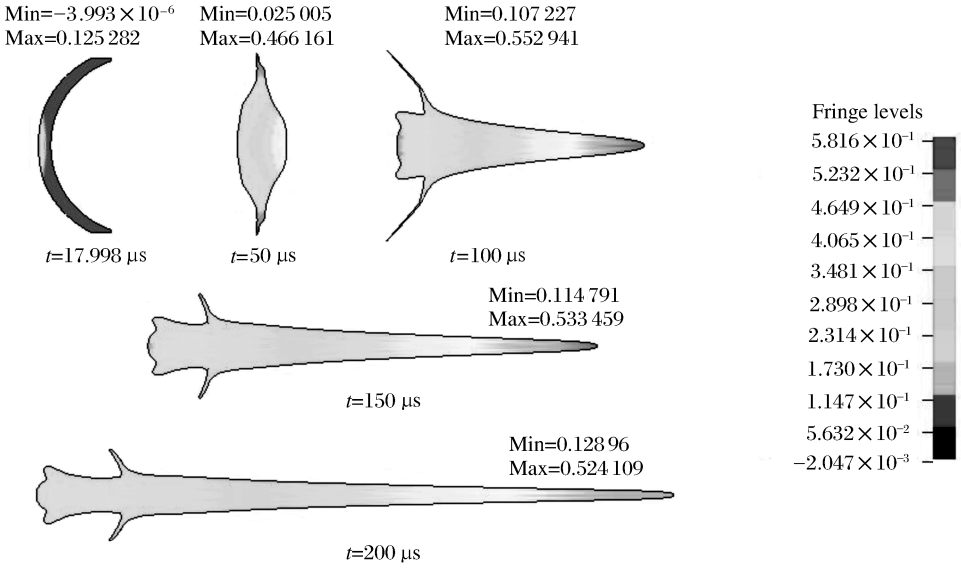


图 5 射弹形成过程及轴向速度分布

Fig. 5 Formation of projectile and distribution of axial velocity

由图 5 可以看出,药型罩顶部首先沿轴线向前运动,时间 50 μs 时,经挤压汇聚,形成了一个短粗的射弹,其头部速度为 4 662 m/s,尾部速度为 250 m/s。此时可以认为,类似小锥角药型罩射流形成的典型定常或准定常流动特征已不会出现,药型罩的变形以翻转和延展为主,不再出现流动分岔点。时间为 100 μs 时,药型罩的底部形成了一个尖细的裙状结构。在时间约为 120 μs 时,将这部分微元从计算中删除,由于其质量很小,所以这一操作对计算结果影响甚微。

4.2　壳体飞散过程

壳体前部筒体和后部壳体尾锥处的厚度分别为 6 mm 和 12 mm。图 6 为尾锥角分别为 80°、60°的两种壳体在三个时刻(t=0 μs、t=32 μs 和 t=52 μs)的位置及速度分布。可以看到,52 μs 之前,壳体除在拐角处失效断裂外,基本保持完好。前部筒体飞散速度最大超过 2 000 m/s,后部尾锥则在 1 000 m/s 左右,方向大致沿壳体法线方向。据此推算,要想使前级装药壳体所形成的破片对后级弹体不产生破坏,即使在两者距离很近时也很容易做到,这对串联随进战斗部的设计很有参考价值。

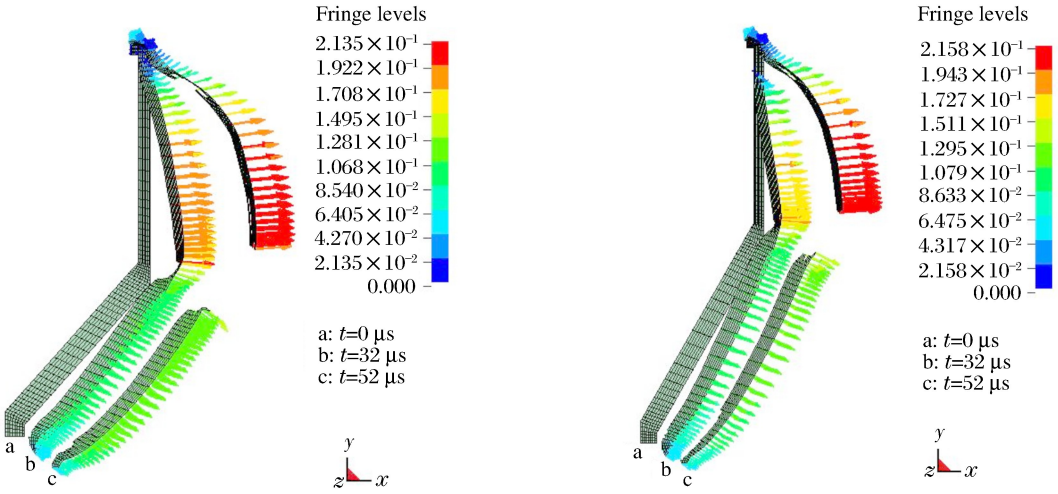


图 6　壳体飞散过程及速度矢量分布

Fig. 6　Scattering and velocity vectors of the case

4.3　射弹速度

图 7 为药型罩前、后表面中心节点速度沿时间方向的分布。时间约 65 μs 时,射弹头部速度达到最大值 5.836 km/s,之后逐渐降低。从局部放大图中,可以清晰地看到应力波在药型罩内的多次反射过程。时间为 500 μs 时,前后节点仍有相当大的速度梯度,说明射弹仍在拉伸。实际应用中,炸高决定射弹长度不超过 1 m,即时间在 200 μs 之内。

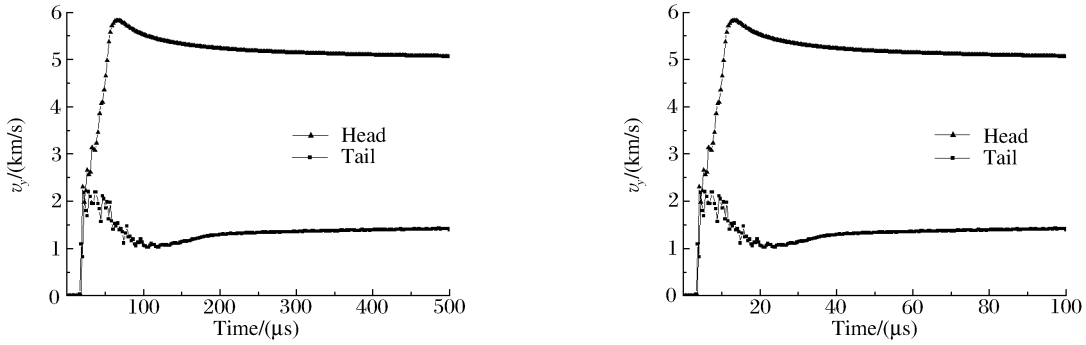


图 7　射弹速度及其局部放大

Fig. 7　EFP velocity and its blow-up

4.4 射弹动能

图 8 为射弹动能随时间的分布曲线。射弹动能在 120 μs 时基本达到最大值，选择炸高时，可参考这一数据。120 μs 后曲线有一个台阶状下降，这是删除药型罩底部裙状结构的反映，之后动能基本保持不变。

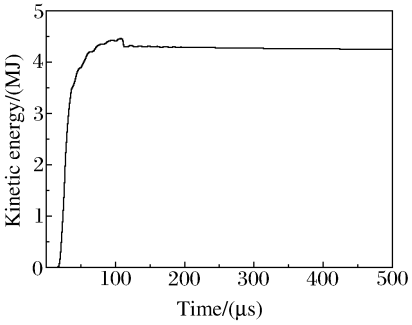


图 8 射弹动能

Fig. 8 Kinetic energy of EFP

4.5 前级爆轰对后级的影响

计算了前级装药爆炸对后级弹体的冲击作用，弹体重量 26.2 kg。弹体加速度峰值约 $2.35\times10^4 g$（g 为重力加速度），但作用时间极短。弹体速度增量仅有约 3.2 m/s，装药内部压力峰值仅 0.08 GPa。

5 分析及讨论

按不同药型罩材料、厚度和壳体尾锥角的组合计算了 6 种模型，计算结果见表 3。

表 3 各模型计算结果

Table 3 Results of different models

Model	Angle of tail /(°)	Material	Thickness of liner /(mm)	m_{charge} /(kg)	m_{liner} /(kg)	m_{total} /(kg)	$E_{k,max}$ /(MJ)	Kinetic energy effectiveness	$E_{k,EFP}/m_{total}$ /(J/g)
1	80	Al	15	4.298	1.444	13.187	4.4638	0.2214	338.50
2	60	Al	15	5.063	1.444	15.154	4.923 6	0.207 3	324.90
3	80	Mg	20	4.101	1.329	12.962	4.488 6	0.233 3	346.29
4	60	Mg	20	4.867	1.329	14.930	4.901 6	0.214 7	328.31
5	80	Mg	15	4.298	0.923	12.667	4.894 0	0.242 7	386.36
6	60	Mg	15	5.063	0.923	14.633	5.308 2	0.223 5	362.76

对不同影响因素形成的结果差异分析如下。

5.1 壳体尾锥角

比较模型 1、3、5 与模型 2、4、6 可以发现，壳体尾锥角减小，装药质量增多，射弹最大动能随之增加，但其能量利用率（定义为射弹动能与炸药反应能之比）反而降低，射弹动能与总质量之比也有所下降。在壳体尾锥角减小的同时，增加了前级装药的长度和质量，因此在战斗部设计时应综合考虑其利弊。

5.2 药型罩材料

模型 3 和模型 4 与模型 1 和模型 2 相比，材料由铝改为密度更低的镁，厚度由 15 mm 增加为 20 mm，虽然装药量减少了，但最大射弹动能基本不变，射弹能量利用率和动能与总质量之比均呈增加趋势，显示药型罩密度的减小有利于前级装药性能的提高。

5.3 药型罩厚度

将模型 3 和模型 4 中药型罩厚度减小为 15 mm，得到模型 5 和模型 6。此时药型罩质量显著下降——降幅达 31%，总质量也有所减小，但最大射弹动能却大幅提高。

上述对比分析表明，装药各部件的质量分配对爆轰过程中能量分配存在很大影响。本文模型中，在一定的范围内减小药型罩材料的密度或厚度，不仅可减小前级装药的总质量，而且可显著提高射弹的最大动能。

6 实　验

图 9 为前级装药,图 10 为实验装置示意图。实验靶标为 2 m×2 m×2 m 的立方体无钢筋混凝土砼,上方覆盖长、宽均为 1 m、厚 6 mm 的钢板。前级装药放置于钢板上的木支架上,尾锥半锥角分别为 40°和 30°,药型罩材料为纯铝和铝镁合金两种。弹体为惰性弹,位于前级装药上方,用来考察前级装药壳体以及爆轰波对其作用。



图 9　前级装药

Fig. 9　Shaped charge

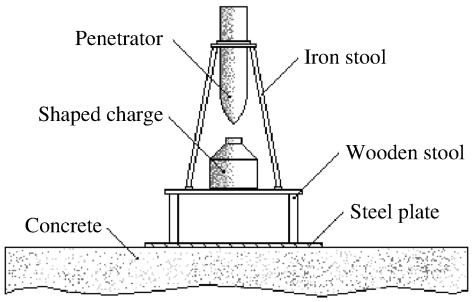


图 10　实验装置示意图

Fig. 10　Schematic diagram of experiment set-up

实验结果与计算结果符合很好。纯铝药型罩形成的射弹没有击穿 2 m 混凝土砼,而铝镁合金药型罩形成的射弹则将其完全击穿(图 11),证明其对混凝土靶标的侵彻作用明显高于前者。后级弹体无破片打击痕迹,无变形,说明前级壳体破片不会与弹体发生碰撞,炸药爆轰冲击波对弹体作用很小。测得的射弹头部速度均超过 5 km/s,与计算结果一致。



图 11　混凝土砼破坏情况

Fig. 11　Damage of concrete

7 结　论

结合计算分析和实验结果可得如下结论:

(1) 对于流动拓扑关系不变的某些球缺形和大锥角药型罩的爆炸成型弹丸问题,利用拉格朗日方法求解是行之有效的。

(2) 通过改变药型罩的密度和厚度,调整前级装药各部件的质量分配,可以实现爆轰过程中能量分配的优化,对串联随进战斗部的设计有积极的指导意义。

(3) 由计算结果得出的规律得到了实验验证。

References:

[1] Zhang M. Numerical Simulation of Jet Formation and Penetration into Concrete Target [A]. Collection Papers on Detonation [C]. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 1998. 177－185. (in Chinese)
张　明. 射流形成及其侵彻混凝土靶的数值计算 [A]. 爆轰研究论文集 [C]. 绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所,1998. 177－185.

[2] Kennedy D R. Warhead: An Historical Perspective [A]. Seebass A R. Warhead [C]. [s. l.]: AIAA, 1993. 1－60.

[3] Harrison J T. A Two Stage, Hydrodynamic, Numerical Technique, 'Hoil' and an Analysis of the Results of a Hemispherical, Shaped Charge Liner Collapse [R]. BRL-MR-3494, 1986.

[4] Chou P C, Walters W P, Ciccarelli R D, et al. Jet Formation Mechanics of Hemispherical Warheads [R]. BRL-CR-545, 1985.

[5] Bender D, Carleone J. Explosively Formed Projectiles [A]. Seebass A R. Warhead [C]. [s. l.]: AIAA, 1993. 367－386.
[6] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual [Z]. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2001.

Numerical Simulation of EFP Formation with Hemispherical Liner

PANG Yong, YU Chuan, GUI Yu-Lin

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

Abstract: The EFP formation with Hemispherical Liner is simulated using 2-D axisymmetric lagrangian code provided by LS-DYNA. The criterion of numerical method is discussed, and the typical processes of EFP formation, velocity and kinetic energy are studied. Differences between 6 models are analyzed, and the calculated results are in good agreement with the experimental observations.

Key words: Earth Penetrator; EFP; numerical simulation; lagrangian method

《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。《高压物理学报》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。《高压物理学报》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。《高压物理学报》接受中、英文稿件。

来稿应论点明确、数据可靠、逻辑严密、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在6000～12000字以内，论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用中华人民共和国法定计量单位。第一作者应确保全体作者同意文章署名，并提供所有联系方式，简要介绍工作背景和论文意义。来稿应一式3份。稿件中所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。

自1987年创刊以来，《高压物理学报》取得了较大的成就。2001年，《高压物理学报》被科技部和国家新闻出版总署评为“中国期刊方阵”双效期刊。国际主要检索系统“EI Compendex”和“CA”一直收录《高压物理学报》文章。由北京高校图书馆期刊工作研究会和北京大学图书馆编著的《中文核心期刊要目总览》连续四版把《高压物理学报》列为物理学类核心期刊(北京大学出版社，1992年、1996年、2000年、2004年)。据中国科学引文数据库公布的“2000年影响因子最高的中国科技期刊300名排行榜”显示，《高压物理学报》影响因子为0.3627，全国排名第94名，列物理类期刊第3名。

《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个月甚至更短时间内刊出。为缩短邮寄时间，编辑部建议作者使用电子邮件投稿。

重点注意事项

▲ 中英文摘要　作为文章精华部分，中、英文摘要一定要仔细斟酌，特别是英文摘要，其质量直接决定文章能否被EI Compendex收录。《高压物理学报》要求文章的中文摘要在200～400个字之间，英文摘要不少于120个单词；摘要内容千万不要泛泛而谈，应有具体内容。为促进论文的国际交流，英文摘要必须：(1) 拥有与论文同等量的主要信息，应重点包括4个要素：即研究目的、方法、结果、结论等，结果、结论是最重要的；应要素齐全，繁简得当。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。(3) 英文摘要中尽量避免特殊字符(希腊字符、上下标)及特殊字符组成的数学表达式，且第1句不要与英文题名重复。

▲ 参考文献　科技论文必须引用参考文献，《高压物理学报》要求作者应充分著录参考文献，并尽量引用近期期刊文章。中文参考文献必须附英译文，著录项目齐全。

▲ 版权与稿酬　《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》和万方数字化科技期刊群。凡经本刊录用的稿件，作者便自动将光盘版和网络版出版权转让给《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)。

来稿请寄：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；gywl@chinajournal.net.cn (投稿、征订、咨询)

电　　话：(0816)2490042；传真：(0816)2282695

《高压物理学报》编辑部启