文章编号：1000-5773(2004)03-0203-06

水下爆炸特性的二维数值模拟研究*

梁龙河，曹菊珍，袁仙春

（北京应用物理与计算数学研究所，北京 100088）

摘要：对带有 3 mm 左右厚铝壳或钢壳的柱形 TNT、RS-211、T/Γ(35/65)以及 ROT901 装药在水下采用一端点起爆后，水中冲击波超压分布进行了二维数值模拟研究。对该四种炸药的每一种，分别考虑了药量为 1 kg、3 kg、5 kg 和 8 kg 四种 TNT 当量的柱形装药情况。柱形装药的长径比为 $L/D=1.5$ 左右。计算使用的程序为二维欧拉多流体网格法流体力学计算程序 MFIC。给出了水中冲击波超压的空间和时间分布；对铝壳和钢壳两种情况的结果进行了分析、比较；同时给出了缩比模型与 1∶1 模型之间相应物理量之间的缩比关系。

关键词：水下爆炸；超压；数值模拟

中图分类号：O383 **文献标识码**：A

1 引 言

二战以后，西方各军事强国在水下爆炸领域进行了广泛的研究工作，取得了不少成果[1~3]。近几年来，我国研究者在水下爆炸方面也开展了一定的工作，取得了一些重要成果[4~6]。但水下爆炸研究毕竟是开展较晚的学科领域，还有许多需要解决的问题。特别是在我国，既需要改进和完善实验研究的方法和手段，更需要开发、改进和完善大型模拟计算程序，提高数值模拟研究能力，因此需要开展与此相关的工作。

本文中根据当量可比性假定（即同结构等当量的不同炸药爆炸后在相同位置处产生的力学量相同），对长径比为 $L/D=1.5$ 左右、不同 TNT 当量，且带有金属壳体的柱形装药一端点起爆在水下爆炸的情况进行数值研究。模型结构如图 1 所示。使用的炸药有 TNT、RS-211、T/Γ(35/65) 和 ROT901 四种类型，药量分别为 1 kg、3 kg、5 kg 和 8 kg 四种 TNT 当量。金属壳体为 3 mm 厚的铝壳或钢壳。对每种情况水下一端点起爆后，水中冲击波超压分布进行了模拟计算；给出相应的水中冲击波峰值超压在不同方向上和离药柱中心点不同距离的若干点处的值，并对铝壳和钢壳两种情况的结果进行了分析、比较。对缩比模型与 1∶1 模型的计算结果进行了分析总结，给出了相应物理量之间的缩比关系。

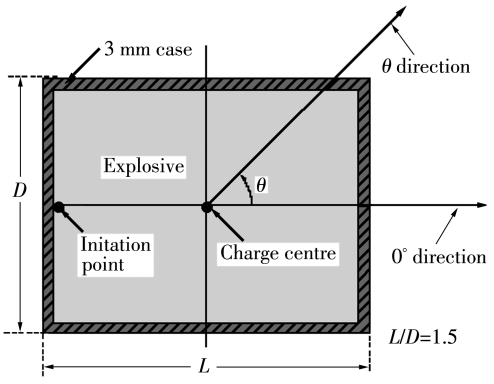


图 1 模型结构示意图

Fig. 1 Model structure

* **收稿日期**：2003-08-04；**修回日期**：2003-11-12

作者简介：梁龙河(1967—)，男，博士，主要研究方向为高温高压流体力学，弹塑性流体力学，高速碰撞.
E-mail：liang_longhe@iapcm.ac.cn

2 炸药及模型参数

在进行数值计算之前,需要确定有关炸药的 C-J 参数、装药尺寸参数、不同 TNT 当量各种炸药的当量质量以及不同缩比模型水中计算距离的对应关系等数据。

研究针对 TNT、RS-211、T/Γ(35/65)及 ROT901 四种炸药进行。经过调研,确定了在数值计算中所需要用到的该四种炸药的 C-J 参数,分别列于表 1 中。

表 1 所用四种炸药的 C-J 参数

Table 1 C-J parameters of the four used explosives

Explosive	ρ_0/(g/cm^3)	D_J/(km/s)	γ	p_J/(GPa)	q_{zy}/(kJ/g)
TNT	1.634	6.95	3.11	19.28	2.784 9
RS-211	1.640	7.65	2.77	25.46	4.385 1
T/Γ(35/65)	1.710	7.94	2.77	28.60	4.723 9
ROT901	1.880	8.05	2.87	31.48	4.477 2

对本研究中使用的四种炸药 TNT、RS-211、T/Γ(35/65)及 ROT901,用 (1) 式中的炸药当量质量估算关系式,分别估算了 1 kg、3 kg、5 kg、8 kg 等几种 TNT 当量的不同炸药的当量质量

$$W_{zy}/W_{TNT} = q_{TNT}/q_{zy} \tag{1}$$

式中:W_{zy}为某种炸药的当量质量,q_{zy}为单位质量该种炸药的初始能量,W_{TNT}为 TNT 炸药的质量,q_{TNT}为单位质量 TNT 炸药的初始能量。计算结果列于表 2 中。

表 2 所用四种炸药的几个当量质量及其半径

Table 2 Equivalent masses and radii of the four used explosives

Explosive	1.0 kg		3.0 kg		5.0 kg		8.0 kg	
	W_{zy}/(kg)	R/(cm)	W_{zy}/(kg)	R/(cm)	W_{zy}/(kg)	R/(cm)	W_{zy}/(kg)	R/(cm)
TNT	1.0	4.03	3.0	5.80	5.0	6.88	8.0	8.09
RS-211	0.635	3.44	1.905	4.96	3.175	5.88	5.080	6.88
T/Γ(35/65)	0.590	3.31	1.769	4.78	2.948	5.68	4.716	6.63
ROT901	0.622	3.28	1.866	4.72	3.110	5.60	4.976	6.56

要研究缩比模型与 1∶1 模型之间相应物理量之间的缩比关系,就要分别计算不同 TNT 当量的同种炸药水下爆炸在水中同一方向上,距离炸药中心处相应位置处的物理量分布情况。因此,首先必须按照缩比关系确定不同 TNT 当量情况下到爆炸中心的距离对应关系。表 3 中给出了根据相似规律计算的不同 TNT 当量情况下水中对应距离的计算结果。也就是说,对于某一方向(如 45°)而言,1 kg TNT 当量的炸药在 0.5 m 处产生的超压与 3 kg TNT 当量的炸药在 0.721 m 处产生的超压、5 kg TNT 当量的炸药在 0.855 m 处产生的超压以及 8 kg TNT 当量的炸药在 1.0 m 处产生的超压相同。

3 数值计算及结果分析

用二维欧拉流体力学程序 MFIC 程序[7],对结构如图 1 所示的 1 kg、3 kg、5 kg、8 kg 四种 TNT 当量,长径比为 $L/D=1.5$,带 3 mm 厚铁壳或 3 mm 厚铝壳的 TNT、RS-211、T/Γ(35/65)和 ROT901 柱形装药水下一端点起爆,水中 0°～180°之间每间隔 15°的各个方向上,不同位置处超压的分布情况进行了数值模拟研究。对 1 kg、3 kg、5 kg、8 kg 四种 TNT 当量,跟踪的位置距药柱中心点的距离见表 3。计算中采用 1 mm×1 mm 的欧拉网格,对于所计算的模型,这种网格能保证计算精度的要求。本文研究中只考虑深水中爆炸的情况,不考虑水面和水底的影响。所计算的 32 个模型壳体厚度均为 3 mm,

其它参数见表 1。计算中壳体作流体处理,不考虑断裂。程序中使用的水的状态方程形式如下

$$p = C_0^2(\rho - \rho_0) + (\gamma - 1)\rho e$$

图 2 中给出了 1 kg TNT 当量的 TNT、RS-211、T/Γ(35/65)和 ROT901 四种炸药水下一端点起爆,45°方向上几个不同距离处超压随时间的变化情况。

表 3　不同 TNT 当量情况对应的计算距离

Table 3　Corresponding distances in cases of different TNT Equivalent mass

TNT equivalent mass /(kg)	Corresponding distance/(m)									
1	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
3	0.721	0.865	1.010	1.154	1.298	1.442	1.586	1.731	1.875	2.019
5	0.855	1.026	1.197	1.368	1.539	1.710	1.881	2.052	2.224	2.394
8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8

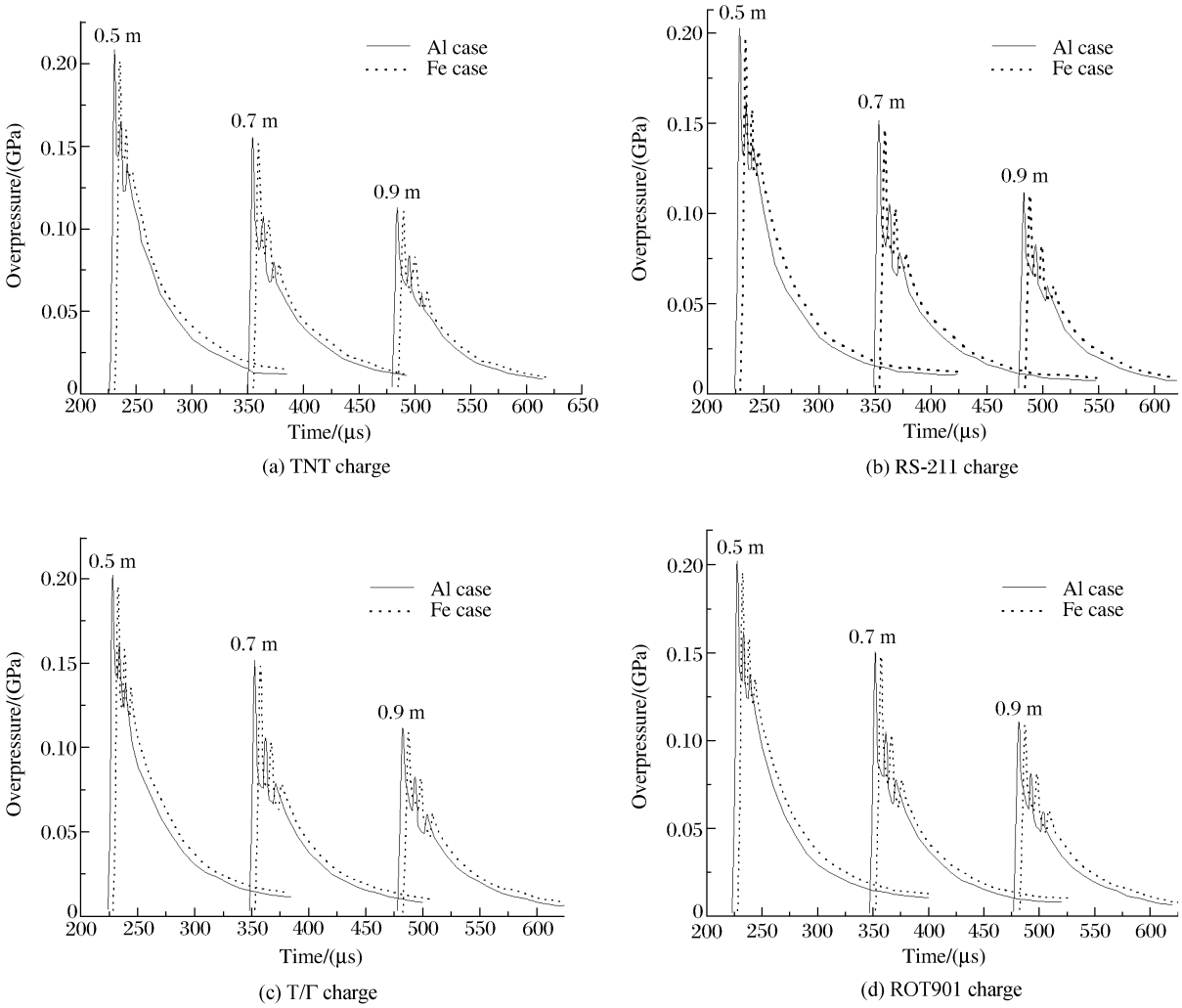


图 2　1 kg TNT 当量药柱水下爆炸 45°方向上不同距离处超压随时间的变化

Fig. 2　Overpressure time histories of different points in 45° direction generated by the underwater explosion of cylindrical charges with 1 kg TNT equivalent mass for different explosives

图 3 给出了带有 3 mm 厚 Al 壳或 Fe 壳的 1 kg、3 kg、5 kg 和 8 kg TNT 当量的四种药柱水下爆炸，水中 45°方向上 0.7 m(对应 1 kg TNT 当量装药)及相应位置处超压变化的比较。图 4 中给出了带有 3 mm 厚 Fe 壳的 3 kg TNT 当量的 TNT、RS-211、T/Γ 和 ROT901 药柱水下爆炸，水中 45°方向上 1.01 m 位置处超压变化的比较情况。图 5 中给出了带有 3 mm 厚 Al 壳的 8 kg TNT 当量的 TNT、RS-211、T/Γ 和 ROT901 药柱水下爆炸，水中 45°方向上 1.4 m 位置处超压变化的比较情况。需要说明的是，图 2～图 5 中的压力振荡是由于金属壳体对爆轰波的多次反射造成的，并非计算原因。

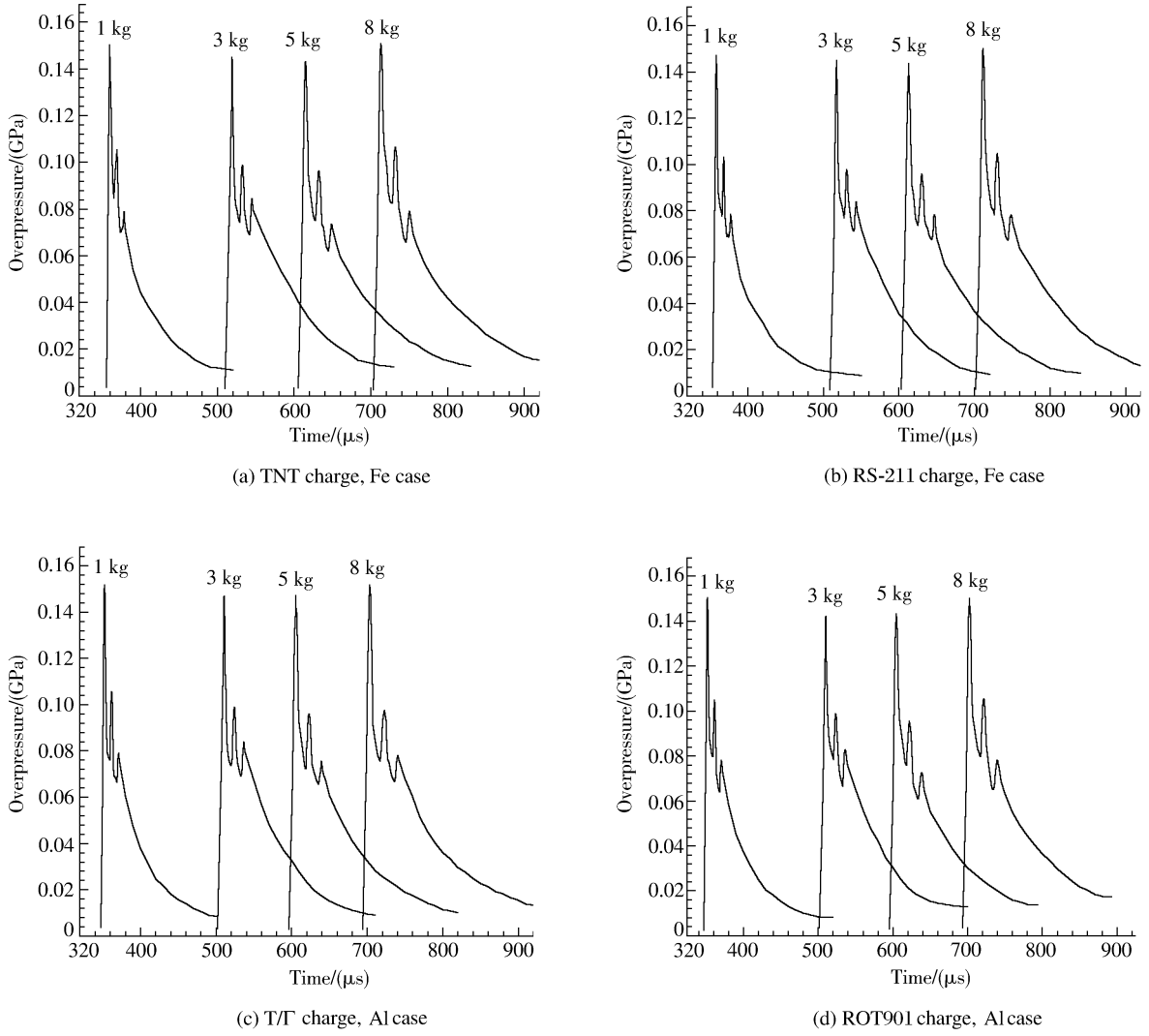


图 3 四种 TNT 当量的不同药柱水下爆炸，水中 45°方向上对应位置处超压变化比较

Fig. 3 Comparison of overpressure time histories of the corresponding points in 45° direction generated by underwater explosion of cylindrical charges with different TNT equivalent mass

由图 2 可以看出，同一 TNT 当量的带有相同厚度不同材料壳体的同一种炸药，在水中相同位置处产生的超压变化符合理论认识，表现为 Al 壳的超压峰值比 Fe 壳的略高、扰动到达时刻稍早。这是 Fe 壳密度大、反射强、吸收能量多等原因造成的。由图 3 可知，在壳体、长径比和炸药相同，而 TNT 当量不同时，药柱水下爆炸在水中相应位置处产生的超压基本上满足缩比关系，相差不是太大，只是扰动开始的时间有一些差别。由图 4 和图 5 可知，在壳体、长径比和 TNT 当量相同，而炸药不同时，药柱水下爆炸在水中相同位置处产生的超压变化非常接近，只是扰动开始的时间略有不同，这说明相同 TNT 当量的不同炸药水下爆炸产生的能量很接近，基本符合当量可比性假设。

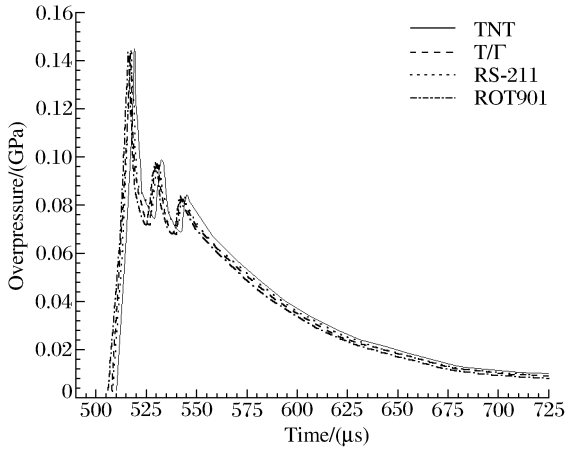


图 4　带 3 mm 厚 Fe 壳、3 kg TNT 当量的四种药柱水下爆炸时,在水中 45°方向上 1.01 m 处超压变化的比较

Fig. 4　Comparison of overpressure time histories of the point at 1.01 m in 45° direction generated by underwater explosion of cylindrical charges of 3 kg TNT equivalent mass with 3 mm Fe case

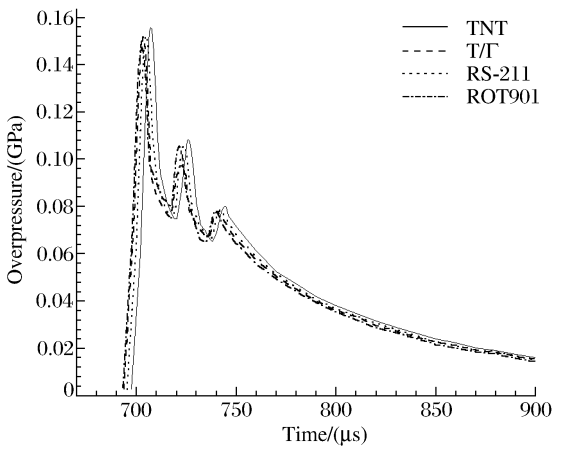


图 5　带 3 mm 厚 Al 壳、8 kg TNT 当量的四种药柱水下爆炸时,在水中 45°方向上 1.40 m 处超压变化的比较

Fig. 5　Comparison of overpressure time histories of the point at 1.4 m in 45° direction generated by underwater explosion of cylindrical charges of 8 kg TNT equivalent mass with 3 mm Al case

4　结　论

对计算结果进行分析总结,并由图 2～图 5 可得出如下结论:

(1) 在壳体厚度相同的情况下,对同一种类和相同 TNT 当量的炸药而言,在水中相同位置处,带 Fe 壳的装药所产生的超压峰值比带铝壳的稍低,扰动开始时间略有延迟;

(2) 对于带有相同厚度同种材料壳体的同一 TNT 当量相同长径比的不同炸药柱水下爆炸来说,我们的 MFIC 程序给出的水中同一位置处产生的超压变化非常接近,基本上满足当量相似律;

(3) 对于带有相同厚度同种材料壳体的不同 TNT 当量相同长径比的同一种炸药柱水下爆炸而言,MFIC 程序给出的水中相应位置处产生的超压变化也相差不太大,基本上满足理论上的相似关系,只是在扰动开始的时间上有一些差别。

References:

[1] Gonor A L. Calculation of the Flow Ensuing Upon Underwater Explosion of a Spherical Charge [J]. Fluid Mech Sov Res(USA),1991,20(6):13－20.

[2] Swift E. Recent Work on Measurement of Underwater Explosion Pressures [R]. AD-838838,1968.

[3] Boticario L A. Dynamic Response of Cylindrical Shells to Underwater Explosion [R]. AD-A245804/0/HDM,1991.

[4] Liang L H,Cao J Z,Wang Y S. One-Dimensional Numerical Simulations of Underwater Spherical Explosions [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2002,16(3):199－203. (in Chinese)
梁龙河,曹菊珍,王元书. 水下爆炸特性的一维球对称数值研究 [J]. 高压物理学报,2002,16(3):199－203.

[5] Chi J C,Ma B. Underwater Explosion Wave by a Spherical Charge of Composition B-3 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,1999,13(3):199－204. (in Chinese)
池家春,马　冰. TNT/RDX(40/60)炸药球水中爆炸波研究 [J]. 高压物理学报,1999,13(3):199－204.

[6] Li Y M,Ni Z F. Numerical Calculation on Flow Field of the Bubble Pulse by Explosion Underwater [J]. Explosion and Shock Waves,1996,16(4):377－381. (in Chinese)
李玉民,倪芝芳. 水中爆炸气泡脉动流场的数值计算 [J]. 爆炸与冲击,1996,16(4):377－381.

[7] Xu G R,Yu Z L,Liao Z M,et al. An Eulerian Numerical Method for the Multi-Material Compressible Fluid Dynamics [J]. Journal on Numerical Methods and Computer Applications,1980,1(3):163－172. (in Chinese)
许国荣,于志鲁,廖振民等. 多物质可压缩流体力学数值方法 [J]. 数值计算与计算机应用,1980,1(3):163－172.

2-D Nummerical Simulation of Characteristics of Underwater Explosions

LIANG Long-He, CAO Ju-Zhen, YUAN Xian-Chun

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing* 100088)

Abstract: The characteristics of underwater explosions, especially the distributions and the time histories of shock wave overpressures, which are generated by the underwater explosions of cased cylindrical charges initiated in one-end-point, are numerically simulated by using a two-dimensional multi-fluid hydrodynamic fortran code named MFIC. The cylindrical charges studied here are of four different explosives, including TNT, RS-211, T/Γ(35/65) and ROT901. For each explosive four TNT equivalents, 1 kg, 3 kg, 5 kg, and 8 kg, are considered. Each cylindrical charge has a length to diameter of $L/D=1.5$ and with a 3 mm thick Fe case or Al case. The spacial distributions of peak overpressure of underwater shock wave and overpressure time histories are obtained. Some overpressure time histories of different points and of different explosives for both Al case and Fe case are presented. The results of Fe case are compared with those of Al case.

Key words: underwater explosion; overpressure; numerical simulation

《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