文章编号：1000-5773(2006)01-0039-06

水中障碍物爆炸毁伤效应的二维数值模拟*

郝 莉[1]，宁建国[2]，王 成[2]

(1. 北京建筑工程学院基础部，北京 100044；
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081)

摘要：建立了水下障碍物的爆炸毁伤效应的物理模型和计算模型。建立了守恒方程组、混凝土的动态弹塑性本构关系和破坏准则，并确定了其在大应变、高应变率及高压条件下的的屈服准则。基于多物质流体的 Euler 算法，用面向对象的 C^{++} 语言自行编制了 NM-MMIC 通用多物质二维流体弹塑性程序，对不同炸点位置、不同炸药量对轨条砦爆炸破坏过程进行数值模拟，并采用自行开发的后处理软件 VISC2D 实现了可视化，定量地反应了障碍物迎爆面所承受的压力变化过程，确定了轨条砦毁伤的最佳药量，并对毁伤程度进行了评价，得到了爆炸破障的毁伤规律。研究结果对设计和评价反水中障碍物的弹药具有一定的参考价值。

关键词：爆炸力学；毁伤效应；数值模拟
中图分类号：O383；O351.2；O24 **文献标识码**：A

1 引 言

装药在水介质中爆炸时，形成高温、高压爆轰产物，其压力远远大于周围介质的静压力，在水介质中产生水中冲击波，从而对水中障碍物产生极大的毁伤作用。水中障碍物的毁伤效应计算模型实际上是水、爆轰产物及混凝土等多物质在高应变率、高温、高压条件下的非线性动力学大变形计算，要计算出其精确解是相当困难的。尽管水下爆炸实验发展很快，但由于爆炸在极其短的时间内完成以及爆炸本身具有的破坏作用，因而造成实验的观察和测量手段都受到极大的限制，从而能获得的实验数据也就更有限了，加之存在各种不确定和干扰因素，所以，通过实验对爆炸问题进行深入细致的研究存在许多实际困难。本工作采用数值模拟的方法研究水中障碍物的爆炸毁伤效应，不仅可以节省大量的人力、物力，而且数值模拟受环境条件的影响较小，可以较容易地改变模拟条件，比较、分析不同条件下的模拟结果，调整参数组合进行计算，从而找到最佳的爆破方案。

多物质流体动力学数值模拟方法按其采用的坐标主要分为欧拉(Euler)方法和拉格朗日(Lagrange)方法，后来又出现了拉氏-欧拉两者相混合的方法，如 ALE(Arbitrary Lagrange Euler)方法，CLE(Coupled Lagrange Euler)等方法。拉格朗日(Lagrange)方法能够清晰地显示解域内部多种物质的内界面和自由界面，但材料发生大变形时，Lagrange 网格交错，甚至出现相邻网格彼此相交或重叠的情况，最终导致数值计算不稳定甚至无法进行下去。而 Euler 方法的优点在于可以处理大变形问题，随之而来的问题就是如何显示和处理界面。拉氏-欧拉混合法则是人们在长期的实践中吸取了两类方法的优点而产生的，如果预期将会发生显著流动和大变形，则计算开始时采用欧拉法，然后变换为拉格朗日网格完成最后计算。本工作采用体积份额法和简单线界面技术，成功地实现了多物质混合网格的界面处理技术，并将混凝土的累积损伤模型植入到 Euler 程序中，成功地模拟了水中障碍物的爆炸毁伤过程。

* **收稿日期**：2004-11-16；**修回日期**：2005-01-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目(10572018)；北京建筑工程学院博士科研启动基金(1004005)
作者简介：郝莉(1963—)，女，博士，副教授，主要研究方向为爆炸力学.
E-mail：haoli_haoli@126.com；haoli_haoli@sina.com

2 计算方法

使用的二维数值模拟程序是自行编制的二维多介质弹塑性流体动力学程序[1]，该程序采用以流体网格法为基础的有限差分方法，属于 Euler 型算法[2]。计算采用显式差分格式，能保证所需的计算精度和稳定性。该程序能较好地处理自由面网格和混合网格，适宜于多介质、大变形问题的模拟计算。应力、密度、比内能、速度、应力偏量等均定义在网格中心，人工粘性定义在网格边界中点。

总体方程组采用“和”分裂算法，按两个方向进行分裂。对于每个方向，方程的计算分为两个阶段：第一阶段是 Lagrange 阶段，网格随流体运动；第二阶段是输运阶段，计算通过网格边界的质量、动量、总能量和应力偏量的输运，这认为是把第一阶段即 Lagrange 阶段完成后移动了的网格重新映射到它的原始位置[3]。

在计算域中，同一网格内可能同时存在两种或三种介质。对于含两种物质的混合格，运用 Youngs 界面处理技术，当混合格中有三种物质时，采用简单线界面技术(SLIC)[1]。

对空气近似采用理想气体状态方程

$$p=(k_{\mathrm{a}}-1)\rho\cdot e \tag{1}$$

式中：ρ 是密度；e 是比内能；k_{a} 是空气的等熵指数，在计算中取 $k_{\mathrm{a}}=1.4$。

对炸药的爆轰产物采用 JWL 方程[4]，其一般形式为

$$p=A\Big(1-\frac{\omega}{R_1V}\Big)\exp(-R_1V)+B\Big(1-\frac{\omega}{R_2V}\Big)\exp(-R_2V)+\frac{\omega E}{V} \tag{2}$$

式中：p 为压力，V 为爆轰产物的相对体积，E 为能量密度。A、B、R_1、R_2、ω 为待定常数。在数值计算中，采用 TNT 炸药，其参数 $A=47.2$ GPa，$B=7.678$ GPa，$R_1=4.2$，$R_2=4.1$，$\omega=0.34$。

对于水介质，采用 Bridgman[5] 根据实验得到的静水压下的状态方程

$$p=(p_0+B)(\rho/\rho^*)^{k_1}-B \tag{3}$$

式中：p 为压力，B、ρ^*、p_0、k_1 均为常数，且 $B=30.45$ kPa，$p_0=103.4$ kPa，$k_1=7.15$，$\rho^*=1.0$ g/cm^3。

对于混凝土，状态方程采用 HJC 模型[6]。在压缩范围内

$$p=\begin{cases}\mu K_{\mathrm{elastic}} & p<p_{\mathrm{crush}}\text{(线弹性区)}\\ p_{\mathrm{crush}}+\dfrac{p_{\mathrm{lock}}-p_{\mathrm{crush}}}{\mu_{\mathrm{plock}}-\mu_{\mathrm{crush}}}(\mu-\mu_{\mathrm{crush}}) & p_{\mathrm{crush}}\leqslant p\leqslant p_{\mathrm{lock}}\text{(过渡区)}\\ k_1\bar{\mu}+k_2\bar{\mu}^2+k_3\bar{\mu}^3 & p>p_{\mathrm{lock}}\text{(密实区)}\end{cases} \tag{4}$$

式中：$\bar{\mu}=(\mu-\mu_{\mathrm{lock}})/(1+\mu_{\mathrm{lock}})$，$\mu=(\rho/\rho_0)-1$。

拉伸范围内

$$p=\begin{cases}\mu K_{\mathrm{elastic}} & \text{(线弹性区)}\\ [(1-F)K_{\mathrm{elastic}}+Fk_1]\mu & \text{(过渡区)}\\ k_1\mu & \text{(密实区)}\end{cases} \tag{5}$$

式中：p_{crush}、μ_{crush} 分别为材料空隙开始闭合时的临界压力和体应变；K_{elastic} 为弹性体积模量；p_{lock} 为材料空隙全部闭合时的临界压力；μ_{lock} 为 p_{lock} 下的体积应变；锁定体积应变 $\mu_{\mathrm{lock}}=(\rho_{\mathrm{grain}}/\rho_0)-1$，$\rho_{\mathrm{grain}}$ 为晶体密度；$F=(\mu_{\max}-\mu_{\mathrm{crush}})/(\mu_{\mathrm{plock}}-\mu_{\mathrm{crush}})$，$\mu_{\max}$ 为卸载之前所达到的最大体积应变。

材料的应力可分为体积应力和偏应力

$$\sigma_{ij}=-p\delta_{ij}+S_{ij} \tag{6}$$

式中：右边第一项反映体积的压缩和膨胀，从上面所描述的状态方程中得到；第二项为应力偏量反映畸变，对于空气、水及爆轰产物等流体，$S_{ij}=0$，对于混凝土等固体材料，在弹性范围内 S_{ij} 采用广义 Hooke 定律计算，当材料产生塑性时，实际偏应力用如下方法修正

$$S_{ij}=\begin{cases}S_{ij} & \beta>1 \quad \text{弹性变形}\\ \beta S_{ij} & \beta\leqslant 1 \quad \text{塑性变形}\end{cases} \tag{7}$$

式中：β 为偏应力修正系数。

对于混凝土采用 Lemeitre 的三轴等效应力屈服准则。

Lemeitre 根据他对脆性材料损伤的研究发现,考虑静水压在脆性材料损伤和屈服的作用是相当重要的,他提出三轴等效应力概念,在 Von-Mises 等效应力 σ_{eq} 的基础上,提出以三轴等效应力 $\tilde{\sigma}$ 代替 Mises等效应力 σ_{eq},从而建立 Lemeitre 三轴等效应力屈服准则,$\tilde{\sigma}$ 的定义是

$$\tilde{\sigma}=\sigma_{eq}R_{\nu}^{1/2} \tag{8}$$

式中:σ_{eq}为 Von-Mises 等效应力

$$\sigma_{eq}=\sqrt{3S_{ij}S_{ij}/2} \tag{9}$$

而 R_{ν} 为三轴函数,可表示为

$$R_{\nu}=\frac{2}{3}(1+\nu)+3(1-2\nu)\left(\frac{p}{\sigma_{eq}}\right)^{2} \tag{10}$$

式中:p 为静水压力,ν 为泊松比。

此时 Lemeitre 的三轴等效应力屈服准则可表示为

$$\tilde{\sigma}=\sigma_{eq}R_{\nu}^{1/2}=Y_{0} \tag{11}$$

令偏应力修正系数

$$\beta=\frac{Y_{0}}{\sigma_{eq}R_{\nu}^{1/2}} \tag{12}$$

其中屈服强度 Y_0 根据下面的公式(13)进行修正。

T. J. Holmquist,G. R. Johnson 和 W. H. Cook 针对混凝土材料的屈服应力提出了如下修正方案

$$\sigma^{*}=[A(1-D)+Bp^{*N}](1+C\ln\dot{\varepsilon}^{*}) \tag{13}$$

式中:$\sigma^{*}=\sigma/f_{c}$ 为正规等效应力,σ 为实际等效应力,即(11)式中的 Y_0,f_c 为准静态单轴抗压强度,D 为损伤度,采用损伤累积模型进行计算[1]。

混凝土的破坏准则为如下的拉伸断裂准则,即

$$p_{\theta,ij}^{n}=\begin{cases}p_{\theta,ij}^{n} & p_{\theta,ij}^{n}>p_{\theta,s}\quad 或\quad \rho_{\theta,ij}^{n}>\rho_{\theta,s}\\ 0 & p_{\theta,ij}^{n}<p_{\theta,s}\quad 或\quad \rho_{\theta,ij}^{n}<\rho_{\theta,s}\end{cases} \tag{14}$$

$$S_{xx,ij}^{n}=\begin{cases}S_{xx,ij}^{n} & p_{\theta,ij}^{n}>p_{\theta,s}\quad 或\quad \rho_{\theta,ij}^{n}>\rho_{\theta,s}\\ 0 & p_{\theta,ij}^{n}<p_{\theta,s}\quad 或\quad \rho_{\theta,ij}^{n}<\rho_{\theta,s}\end{cases} \tag{15}$$

式中:xx 代表 rr、zz、rz。

如果材料发生损伤,静水压力和材料密度的断裂临界值 p_s、ρ_s 随损伤度线性变化,即

$$p_{\theta,ij}^{n}=\begin{cases}p_{\theta,ij}^{n} & p_{\theta,ij}^{n}>p_{\theta,s}(1-D)\quad 或\quad \rho_{\theta,ij}^{n}>\rho_{\theta,s}\\ 0 & p_{\theta,ij}^{n}<p_{\theta,s}(1-D)\quad 或\quad \rho_{\theta,ij}^{n}<\rho_{\theta,s}\end{cases} \tag{16}$$

$$S_{xx,ij}^{n}=\begin{cases}S_{xx,ij}^{n} & p_{\theta,ij}^{n}>p_{\theta,s}(1-D)\quad 或\quad \rho_{\theta,ij}^{n}>\rho_{\theta,s}\\ 0 & p_{\theta,ij}^{n}<p_{\theta,s}(1-D)\quad 或\quad \rho_{\theta,ij}^{n}<\rho_{\theta,s}\end{cases} \tag{17}$$

混凝土的密度为 2.44g/cm^3;比热为 654.0 J/(kg·K);损伤参数 $D_1=0.040$,$D_2=1.000$,等效损伤参数为 0.010;强度参数 $A=0.79$,$B=1.60$,$N=0.61$,$C=0.007$,$F'_c=0.048$ GPa,正规最大强度为 7.0,剪切模量为 14.86 GPa,弹性模量为 35.7 GPa,泊松比 $\nu=0.2$;压力参数 $p_{crush}=0.016$ GPa,$\mu_{crush}=0.001$,$K_1=85$ GPa,$K_2=-171$ GPa,$K_3=208$ GPa,$p_{lock}=0.8$ GPa,$\mu_{lock}=0.1$,$T=0.004$ GPa,$K_{elastic}=16$ GPa。

3　数值模拟

3.1　计算模型

计算模型以实际障碍物轨条砦为研究对象,实际轨条砦为梯形混凝土墩结构,上边 50 cm,下边 100 cm,高为 80 cm,位于水下 3 m 处,炸药大小采用不同的药量,分别为 5.6、6.8、8 和 30 kg。药包位置距轨条砦迎爆面的中间位置分别为 0 cm(接触爆炸)、30 cm 及 100 cm,距水底 40 cm。计算域($z\times r$)取 70 m×70 m,网格划分($z\times r$)为 280×280 个,网格步长取 0.25 m。简化的破障模型如图 1 所示。

3.2 模拟结果及分析

对不同炸点位置、不同药量的爆破过程进行数值模拟，定义轨条砦的破坏体积占原有体积的百分率为毁伤率。x 为药包位置距轨条砦迎爆面的中间位置的水平距离，y 为药包位置距水底的距离。将不同情况下对轨条砦的毁伤程度作如下评价，评价结果如表 1 所示，图 2 为对典型计算方案的轨条砦的爆炸毁伤仿真计算后用 VISC2D 可视化软件显示的图像，图 3 为轨条砦迎爆面上中点处压力-时间曲线。

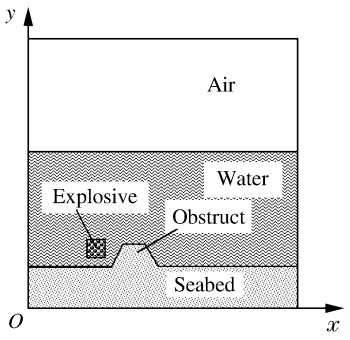


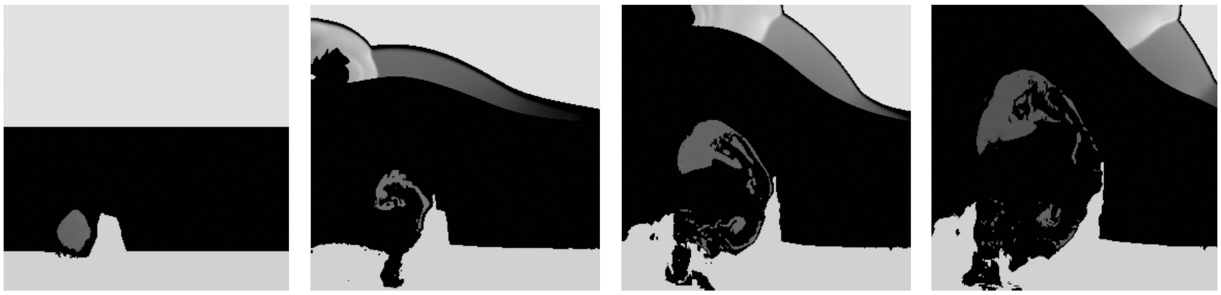
图 1 简化的破障模型

Fig. 1 The simple model of damaging obstacle

表 1 轨条砦毁伤程度评价表

Table 1 The estimation table of damage degree of obstacle

Charge /(kg)	Depth of water /(m)	Position of explosive		Damage degree /(%)
		x/(m)	y/(m)	
3.6	3	0.0	0.4	35
5.6	3	0.0	0.4	50
6.8	3	0.0	0.4	80
8.0	3	0.0	0.4	98
12.0	3	0.3	0.4	98
30.0	3	1.0	0.4	50

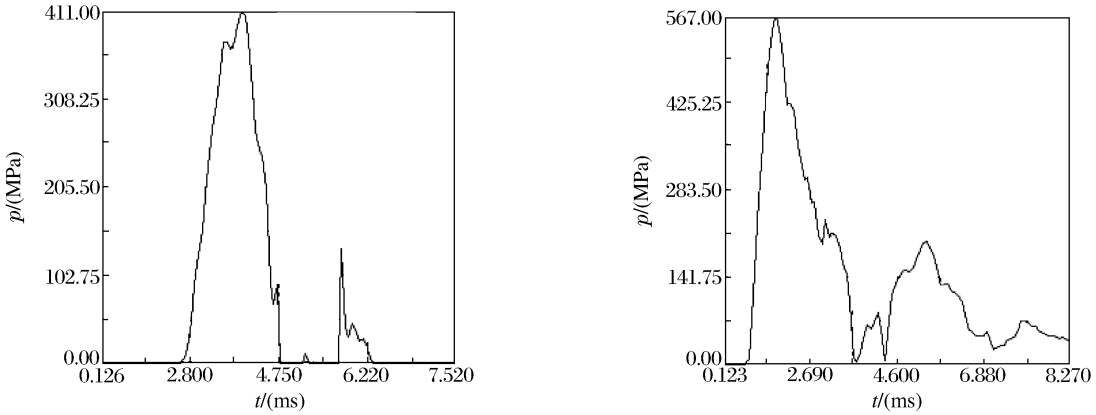


(a) n=200，t=0.24 ms (b) n=4 000，t=2.51 ms (c) n=6 000，t=3.46 ms (d) n=10 000，t=5.368 ms

图 2 爆炸毁伤计算图像(炸药量 12.0 kg，炸点(0.3 m，0.4 m)，毁伤程度 98%)

Fig. 2 The computation image of explosion damage

(Charge 12.0 kg and explosion position(0.3 m，0.4 m)，damage degree is 98%)



(a) Charge 3.60 kg，explosion position(0 m，0.4 m) (b) Charge 5.60 kg，explosion position(0 m，0.4 m)

图 3 轨条砦迎爆面上中点处(2.13 m，1.4 m)压力-时间曲线图

Fig. 3 The pressure-time curve of the middle point(2.13 m，1.4 m) of the side of the obstacle facing to the explosive

从轨条砦的毁伤程度评价表 2 可以看出,在接触爆炸中,当炸药为 3.6 kg 时,毁伤率仅为 35%;当炸药为 5.6 kg 时,毁伤率为 50%;使混凝土轨条砦结构完全破坏的理想药量是 8 kg,毁伤效果达到 98%。当炸点位置距轨条砦迎爆面的中间位置为 30 cm 时,要达到 98%的毁伤率,药量需提高到 1.6 倍。当炸点位置距轨条砦迎爆面的中间位置为 100 cm 时,要使轨条砦结构破坏一半,药量需提高到 5.3 倍。该计算结果与经过实验考证的 DYNA-2D 的计算结果极为接近[7]。

从轨条砦毁坏的可视化计算结果可观察到水面有水柱形成,这是由于自由面所产生的拉伸波所引起。从模拟曲线可看出,由于障碍物的存在,入射冲击波到达迎爆面以后,立即产生反射,使得冲击波压力迅速衰减。经过一段时间后,压力又呈上升趋势,这是由于轨条砦结构较大压缩变形产生的稀疏波,引起水下爆炸冲击载荷的衰减,结果使表面节点压力下降;另一方面,轨条砦结构 x 方向的位移对水中爆炸冲击波也有衰减作用,这使迎爆面节点的加速度时间历程产生震荡,从而使迎爆面的压力有所上升。此外,分析爆炸作用过程可知,水中爆炸冲击波首先到达迎爆面的一个单元表面,该单元较大的压缩变形对区域附近的相邻单元都会产生一定的拉伸效应,只有当水中冲击波对该单元表面作用时,这一效应才会消失,压缩变形才会表现出来,一拉一压所产生的震荡使得迎爆面所承受的压力上升,数值模拟能够定量地反应这一力学现象。

水中冲击波与障碍物相互作用可以产生绕流现象。当入射冲击波与构件相遇后即产生反射,前壁上的超压陡然升高至反射超压,然而构件边缘以外的冲击波并未受到阻拦,于是在拐角处形成压力差,引起水介质在这个小区域内的流动。同时由构件拐角处向高压力区传播稀疏波,起到消减反射冲击波中压力的作用,其传播速度与反射波波头后的参数相应。

4　结　论

水下爆炸对轨条砦的作用模型涉及多物质材料,本工作中自行编制了 NM-MMIC 通用多物质二维流体弹塑性程序,实现了四种介质的流体弹塑性计算,将不同炸点位置、不同炸药量对轨条砦爆破过程进行数值模拟,通过数值模拟,对水下爆破效应做出了毁伤程度评价。研究结果对设计和评价反水中障碍物的弹药具有一定的参考价值。

References:

[1] Hao L. Theoretical Foundation and Its Application of Two Dimension Hydro-Elastoplastic Code in Multi-Material [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003. (in Chinese)
郝　莉. 多物质二维流体弹塑性程序的理论基础及其应用研究 [D]. 北京:北京理工大学,2003.

[2] Ning J G, Chen L W. Fuzzy Interface Treatment in Eulerian Method [J]. Science in China, Ser E, Engineering & Materials Science, 2004, 47(5): 550-568.

[3] Hao L, Ma T B, Ning J G. Numerical Simulation of a Shaped Charge Jet [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(1): 19-22. (in Chinese)
郝　莉,马天宝,宁建国. 聚能射流问题的数值模拟 [J]. 北京理工大学学报,2003,23(1):19-22.

[4] Xu X Sh, Zhang W X. Theoretical Introduction to Equation of State [M]. Beijing: Science Press, 1986: 405-408. (in Chinese)
徐锡申,张万箱. 实用物态方程理论导引 [M]. 北京:科学出版社,1986:405-408.

[5] Henrych J. Explosion Dynamics and Its Applications [M]. Beijing: Science Press, 1987: 154.
Henrych J. 爆炸动力学及其应用 [M]. 北京:科学出版社,1987:154.

[6] Holmquist T J, Johnson G R. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Pressures [A]. //14th International Symposium on Ballistics [C]. Quebec, Canada, 1993: 591-600.

[7] Guo W Zh. Study on Damage Effect of Underwater Obstruct by Blasting [R]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2000. (in Chinese)
郭文章. 水中障碍的爆炸毁伤效应研究 [R]. 北京:北京理工大学,2000.

2D Numerical Simulation of Explosive Damage Effect on Obstacles in Water

HAO Li[1], NING Jian-Guo[2], WANG Cheng[2]

(1. *Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing* 100044, *China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The physical and computational models of explosive damage effect of obstacles in water are proposed. The conservation equations, the dynamic elastic-plastic constitutive relation and damaging criterion of concrete are established, together with the yielding criterion subjected to large strains, high strain rates and high pressures. Meanwhile, based on the multi-material Eulerian algorithm, the NM-MMIC code, which is a general 2D multi-material elastic-plastic hydrodynamics code with C^{++} language, is applied to simulate the damaging effects of obstacles in water by explosion with different charges and at different positions. The whole process of underwater explosion are visualized by VISC2D code. The pressure variation of the side of the obstacle facing to the explosive are demonstrated quantitatively. The optimum damage charge is obtained. The damaging degree, and the damage laws of the obstacle in water are evaluated. These results are valuable in designing and estimating ammunitions against obstacles in water.

Key words: explosion mechanics; damaging effect; numerical simulation

声 明

为适应我国科技期刊信息化建设需要，扩大学术交流渠道，《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、数字化科技期刊群、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等。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，其文稿刊登后可供以上数据库及期刊服务网收录、转载并上网发行；其作者文章著作权使用费与稿酬一次付清，本刊不再另付其它报酬。如作者不同意将文章编入以上数据库，请在来稿时声明，编辑部将做相应处理。

《高压物理学报》编辑部