文章编号：1000-5773(2012)01-0083-06

弹体侵彻混凝土靶板过程中磨蚀问题的计算*

杨　阳，何　涛，文鹤鸣

（中国科学技术大学中国科学院材料力学行为与设计重点实验室，安徽合肥　230027）

摘要：对弹丸在混凝土材料中侵彻时表面磨蚀速度的经验公式进行了改进。假设侵彻过程中密度保持不变，据此编制了可以计算弹丸磨蚀后弹头形状、弹体质量损失以及侵彻深度的简单差分程序。将计算得到的磨蚀后的弹头形状、质量损失与卵形弹侵彻无围压强度为63 MPa的混凝土(石英骨料)实验结果进行比较，两者基本吻合。

关键词：侵彻；磨蚀效应；混凝土；弹丸；质量损失

中图分类号：O347.1；O385　　**文献标识码**：A

1　引　言

磨蚀效应对钻地武器设计有着重要影响。但是，目前大多数的侵彻和贯穿模型都是建立在弹体刚性假设基础上的，认为弹体的形状和质量不发生改变，而实际上由于高速侵彻产生的高温高压以及弹靶间摩擦力的作用，弹体表面的一部分质量会被侵蚀掉[1-2]。弹体侵蚀一般分为由摩擦引起的磨蚀以及由热效应引起的烧蚀。对于混凝土材料，当侵彻速度不是特别高时，一般以磨蚀效应为主。由于造成弹体磨蚀的因素很多，采用传统的数值模拟方法一般很难准确地模拟出弹体的磨蚀效果。最新研究表明，当弹丸侵彻石英骨料和石灰岩骨料的混凝土靶时，尽管两种混凝土靶的强度相同，但最终的磨蚀效果却明显不同，质量损失率相差一倍左右[3]。因此，单从弹靶强度出发很难准确计算出弹体的磨蚀质量。Chen等人[4]认为，混凝土靶体骨料的莫氏硬度对弹体侵彻过程中的质量侵蚀有显著的影响。研究发现，弹丸侵彻混凝土时，弹体表面的磨蚀速度可以看作其表面应力和弹体运动速度乘积的正比例函数，其比例系数可以通过实验确定。因此，Silling[3]、Beissel[5]和Johnson[6]等人将磨蚀速度直接引入到有限元程序中来模拟弹体的侵蚀，模拟结果与实验结果吻合较好。但是无论采用Lagrange方法[5-6]还是Euler方法[3]，磨蚀问题的有限元编程实现都是非常复杂的。本研究结合磨蚀速度的经验公式和靶体响应力函数，提出一种简单的模拟弹体磨蚀的方法。

2　磨蚀模型

Silling等人[3]在研究弹丸侵彻混凝土靶体时发现，弹丸侵彻后的总质量损失(Δm)与弹丸的初始动能($mv_s^2/2$)成正比，侵彻后弹丸的质量损失可以写为

$$\Delta m/m = c_0 v_s^2/2 \tag{1}$$

式中：v_s为弹丸入射速度；m为弹体磨蚀前的质量；c_0为经验常数，其值与弹靶材料性质有关。Silling等人[3]认为c_0由弹靶强度、摩擦、热效应等因素共同决定，一般只能通过实验来确定。从(1)式中可以看出，c_0是一个与量纲相关的量，即改变任何一个弹靶参数，c_0都可能发生变化，因此极大地限制了(1)式的应用范围。Frew[1]和Forrestal[2]等人研究了不同刚度弹丸侵彻各种强度混凝土靶体时弹丸的质量损失。为了体现c_0的敏感性，图1给出了6种不同工况下弹丸质量损失与初始动能之间的关系，

* **收稿日期**：2010-07-02；**修回日期**：2010-09-29

作者简介：杨　阳(1984－)，男，博士研究生，主要从事冲击动力学研究. E-mail：beaccn@mail.ustc.edu.cn

通讯作者：文鹤鸣(1965－)，男，教授，博士生导师，主要从事冲击动力学研究. E-mail：hmwen@ustc.edu.cn

其中工况 1～工况 4 来自文献[2]，工况 5、工况 6 来自文献[1]。可见，不同工况下 c_0 是明显发散的。

Chen 等人[4]认为，混凝土靶体骨料的莫氏硬度对弹体侵彻过程中的质量侵蚀有显著影响。据此，可以对(1)式进行修正。假定弹体的磨蚀效果与弹靶材料的相对强度(Y_p/Y_t)、损伤数($\rho_t v_s^2/Y_t$)以及靶体的莫氏硬度(H_{Moh})有关。同时，假定修正后的无量纲化初始动能与质量损失满足幂指数关系，则弹体的质量损失可写成以下无量纲形式

$$\frac{\Delta m}{m} = p\left[H_{Moh}\frac{Y_t}{Y_p}\left(\frac{\rho_t}{Y_t}\frac{v_s^2}{2}\right)\right]^q = p\left(H_{Moh}\frac{\rho_t}{2Y_p}v_s^2\right)^q \tag{2}$$

式中：Y_p 和 Y_t 分别为弹体材料和靶体材料的屈服强度，ρ_t 为靶体材料的密度，H_{Moh} 为靶体骨料的莫氏硬度，p 和 q 为无量纲经验常数。图 2 给出了质量损失实验数据以及由(2)式拟合得出的质量损失曲线，得到 $p=0.016\,2$，$q=0.805$。

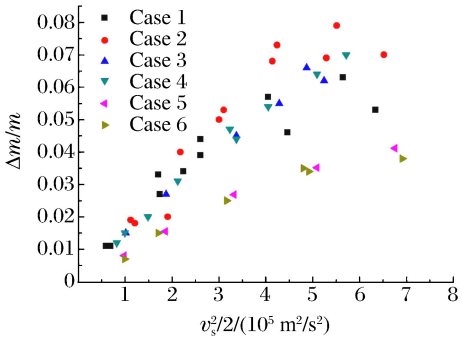


图 1 质量侵蚀与无量纲化初始动能的关系

Fig. 1 Relationship between mass loss of projectile and the dimensionless initial impact velocity

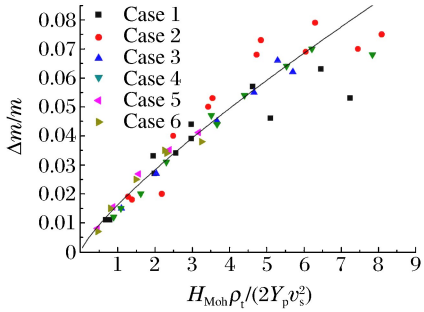


图 2 质量侵蚀与修正后的无量纲化初始动能的幂指数关系

Fig. 2 Power law relationship between mass loss of projectile and the modifed dimensionless initial impact velocity

(2)式是针对弹丸在侵彻过程中损失的总质量，而对于某个给定时刻之后的质量损失(Δm)与弹丸总质量(m)之比为

$$\frac{\Delta m}{m} = p\left(H_{Moh}\frac{\rho_t}{2Y_p}v_z^2\right)^q \tag{3}$$

式中：v_z 为给定时刻弹体轴线方向(z 方向)上的速度。由(3)式可以进一步得到单位时间($\mathrm{d}t$)内的质量损失为

$$\dot{m} = 2pq\left(H_{Moh}\frac{\rho_t}{2Y_p}\right)^q v_z^{2q-1}F_z \tag{4}$$

若不计摩擦的影响，则单位表面积 $\mathrm{d}A$ 上的质量损失率为

$$\mathrm{d}\dot{m} = -2pq\left(H_{Moh}\frac{\rho_t}{2Y_p}\right)^q v_z^{2q-1}\sigma_n\cos\varphi\,\mathrm{d}A \tag{5}$$

式中：φ 为给定时刻弹体表面处法线方向与弹体轴线的夹角；σ_n 为弹体表面法向应力，其大小可以通过求解靶体响应力函数的方法确定。此外质量损失率还可以写为[3]

$$\mathrm{d}\dot{m} = -\rho_p v_a\,\mathrm{d}A \tag{6}$$

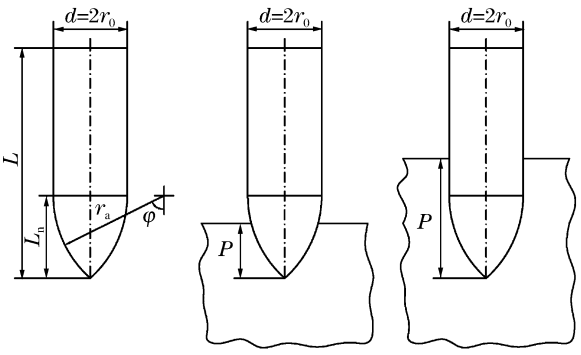
式中：v_a 为弹体表面相对于弹体的磨蚀速度。综合(5)式和(6)式可得

$$v_a = \frac{2pq}{\rho_p}\left(H_{Moh}\frac{\rho_t}{2Y_p}\right)^q v_z^{2q-1}\sigma_n\cos\varphi \tag{7}$$

3 计算程序

图 3 为卵形弹丸侵彻半无限靶体的示意图，其中 P 为侵彻深度。卵形弹的几何尺寸如图 3(a)所示，半径为 r_0，直径为 d，弹头长度为 L_n，表面弧线半径为 r_a。为了方便起见，这里用 CRH (Caliber Ra-

dius Head)来表征卵形弹头的几何形状,定义 $\psi=r_a/(2r_0)$。弹丸侵彻靶体可分为两种情形:(1)侵彻深度小于弹头长度,即 $P\leqslant L_n$,此时弹头尚未完全进入靶体就已停止运动,如图 3(b)所示;(2)侵彻深度大于弹头长度,即 $P>L_n$,即弹头完全进入靶体,如图 3(c)所示。



(a) Geometric structure (b) $P\leqslant L_n$ (c) $P>L_n$

图 3 卵形弹侵彻半无限靶体示意图

Fig. 3 Schematic diagram of an ogive-nose projectile penetrating into a semi-infinite concrete target

假设弹体在侵彻过程中所受的摩擦为库仑摩擦,摩擦系数为 μ,则弹体表面每个微小面元上受到的法向和切向阻力分别为

$$\mathrm{d}F_n=2\pi r_a^2(\sin\varphi-\sin\varphi_0)\sigma_n(v_n,\varphi)\mathrm{d}\varphi \tag{8}$$

$$\mathrm{d}F_t=2\pi r_a^2(\sin\varphi-\sin\varphi_0)\mu\sigma_n(v_n,\varphi)\mathrm{d}\varphi \tag{9}$$

式中:$\varphi_0=\arcsin(1-r_0/r_a)$;$v_n$ 为给定时刻弹体表面的法向速度,并且 $v_n=v_z\cos\varphi$;$\sigma_n(v_n,\varphi)$ 为靶体响应力函数,由 Forrestal 半经验公式[7]确定。因此,卵形弹在侵彻过程中受到靶体的轴向阻力 F_z 为

$$F_z=2\pi r_a^2\int_{\varphi_a}^{\varphi_b}[(\sin\varphi-\sin\varphi_0)(\cos\varphi+\mu\sin\varphi)]\sigma_n(v_n,\varphi)\mathrm{d}\varphi \tag{10}$$

式中:$[\varphi_a,\varphi_b]$表示弹体受力区间,φ_a、φ_b 与弹丸在靶体中所处位置、靶厚以及弹头形状有关。

在(10)式中,唯一需要确定的量是弹体的受力区间$[\varphi_a,\varphi_b]$,而弹体的受力区间与它在靶体中所处位置有关。如图 3(b)、图 3(c)所示,当弹丸侵彻半无限靶体时,侵彻过程可以分为两种情况:(1)当 $P\leqslant L_n$ 时,即弹丸肩部尚未进入靶体,此时弹丸的轴向位移 z 满足 $z\leqslant L_n$;(2)当 $P>L_n$ 时,即弹头完全进入靶体,此时 $z>L_n$。因此,(10)式中的积分范围$[\varphi_a,\varphi_b]$在部分侵彻和完全侵彻两种情况下可以分别表示为:$[\varphi_0,\varphi_1]$和$[\varphi_1,\pi/2]$,其中 $\varphi_1=\arccos(\cos\varphi_0-z/s)$。

将整个侵彻过程分解为很多小部分,每一部分都含有相同的位移增量 Δz,在每个位移增量内,令弹丸的加速度相等。根据牛顿第二定律,在每个位移增量步内,可以得到如下关系

$$v_{i+1}=(v_i^2+2a_i\Delta z)^{1/2} \tag{11}$$

$$\Delta t=(v_{i+1}-v_i)/a_i \tag{12}$$

$$a_{i+1}=F(z_{i+1},v_{i+1})/m \tag{13}$$

$$z_{i+1}=z_i+\Delta z \tag{14}$$

$$t_{i+1}=t_i+\Delta t \tag{15}$$

式中:i 为增量数,Δt 为时间增量,a_i 为第 i 步的加速度,$F(z_i,v_i)$为弹丸在侵彻过程中所受的轴向阻力,可由(10)式计算出。

如图 4 所示,取弹体运动的绝对坐标系为Oxz,表征自身弹型变化的相对坐标系为 $O'rh$,则弹丸以速度 v_z 在绝对坐标系 Oxz 中沿 z 方向运动,而弹体表面的节点以相对速度 v_a 在相对坐标系 $O'rh$ 中运动。设从弹头尖部开始,沿弹体表面弧线的增量数为 j,则第 j 个节点的坐标为 r_j 和 h_j,它的切线方向与轴向(h)的夹角为 θ_j。可见,磨蚀对弹丸运动的影响主要集中在加速度项,因此在加速度项部分插入以下程序

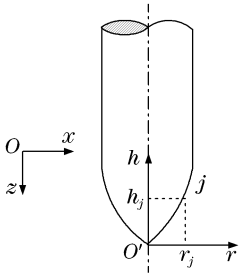


图 4 卵形弹丸坐标系

Fig. 4 Coordinate of the ogive-nose projectile

法向速度 $$v_{n,i+1,j+1}=v_{z,i+1}\sin\left[\frac{1}{2}(\theta_{i,j}+\theta_{i,j+1})\right] \tag{16}$$

磨蚀速度 $$v_{a,i+1,j+1}=\frac{2pq}{\rho_p}\left(\frac{H_{Moh}\rho_t}{2Y_p}\right)^q v_{z,i+1}^{2q-2}\sigma_{n,i+1,j+1}v_{n,i+1,j+1} \tag{17}$$

节点半径 $$r_{i+1,j+1}=r_{i,j+1}-v_{a,i+1,j+1}\cos\left[\frac{1}{2}(\theta_{i,j}+\theta_{i,j+1})\right]\Delta t \tag{18}$$

节点高度 $$h_{i+1,j+1}=h_{i,j+1}+v_{a,i+1,j+1}\sin\left[\frac{1}{2}(\theta_{i,j}+\theta_{i,j+1})\right]\Delta t \tag{19}$$

节点切向角度 $$\theta_{i+1,j}=\arctan\left(\frac{r_{i+1,j+1}-r_{i+1,j}}{h_{i+1,j+1}-h_{i+1,j}}\right) \tag{20}$$

靶体响应力函数 $$\sigma_{n,i+1,j+1}=A+Bv_{h,i+1,j+1}+Cv_{h,i+1,j+1}^2 \tag{21}$$

瞬时质量 $$m_{i+1}=\sum_j\frac{\pi}{2}(r_{i+1,j+1}+r_{i+1,j})(h_{i+1,j+1}-h_{i+1,j})\rho_p \tag{22}$$

单元阻力 $$\mathrm{d}F_{z,i+1,j+1}=\frac{\pi}{2}(\sigma_{i+1,j+1}+\sigma_{i+1,j})(r_{i+1,j+1}^2-r_{i+1,j}^2) \tag{23}$$

瞬时阻力 $$F_{z,i+1}=\sum_j\mathrm{d}F_{z,i+1,j} \tag{24}$$

瞬时加速度 $$a_{i+1}=F_{z,i+1}/m_{i+1} \tag{25}$$

式中：v_h 为空穴膨胀速度；A、B、C 为多项式系数，反映了靶体材料的抗侵彻性能。因为弹丸在运动过程中产生的体积压缩与弹形改变量相比非常小，因此假设弹体在运动过程中密度不变。

4 算 例

根据 Forrestal 等人[2]的实验结果，选取工况 3 进行计算。对于石英骨料混凝土靶，密度为 2 300 kg/m^3，无围压压缩强度为 63 MPa；弹体材料为 4340 Rc45 高强钢，屈服强度为 $Y_p=1\,481$ MPa，密度 $\rho_p=7\,810$ kg/m^3，直径为 20.3 mm，质量为 0.478 kg，CRH 为 3，长径比为 10。由第 2 节可知，$p=0.016\,2$，$q=0.805$。根据文献[7]，采用 Forrestal 半经验公式，对于无围压压缩强度为 63 MPa 的混凝土，(21)式中的靶体响应力函数系数分别为 $A=540$ MPa，$B=0$，$C=2\,300$ kg/m^3。

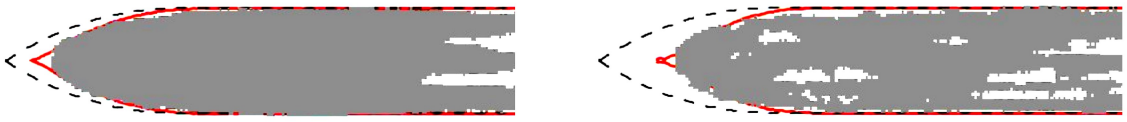
将以上参数带入程序进行求解，表 1 列出了弹体侵彻后的质量损失和侵彻深度的计算结果及实验结果[2]，其中质量损失的计算结果由(1)式和(2)式给出，不考虑磨蚀效应的侵彻深度结果由(11)式～(15)式给出。从表 1 中可以看出，采用第 3 节的差分程序可以较好地计算出弹体的侵彻深度和质量损失率，磨蚀效应对侵彻深度的影响不大。

表 1 卵形弹磨蚀后质量损失和侵彻深度的计算结果与实验结果比较

Table 1 Comparisons of experimental and calculated results for the mass loss and penetration depth of ogive-nose projectile

v_s/(m/s)	$\Delta m/m$/(%)				P/(m)		
	Present model (Eq. (2))	Procedure	Model[3] (Eq. (1))	Exp.[2]	Calc. (with abrasion)	Calc. (without abrasion)	Exp.[3]
612	2.87	2.80	2.43	2.70	0.49	0.50	0.48
985	6.18	6.26	6.30	6.60	1.07	1.14	0.92

图 5 给出了弹体磨蚀后的形状，其中图 5(a)为入射速度等于 612 m/s 时的结果，图 5(b)为入射速度等于 985 m/s 时的结果。图 5 中，虚线和实线分别表示弹头原本的形状以及通过计算得到的磨蚀后的形状，阴影部分为实验观测结果。由图 5 可知：对于弹丸侵彻混凝土过程中的磨蚀问题，虽然采用差分程序预测的弹头形状与实验照片存在一些差异，但采用这种简单的差分程序能比较好地模拟出弹体磨蚀后的形状；从实验照片中可以看出，当速度较高时弹头形状比较不规则，这可能是因为在侵彻过程中弹头前端发生了断裂，而差分方程不能反映这一现象。



(a) v_s= 612 m/s　　(b) v_s= 985 m/s

图 5　卵形弹磨蚀后的形状

Fig. 5　Nose shape after abrasion

下面对影响磨蚀过程的弹体材料屈服强度(Y_p)和靶体莫氏硬度(H_{Moh})进行研究。研究弹体材料屈服强度(Y_p)的影响时,将弹体材料换为 AerMet100 Rc53 钢,其屈服强度 Y_p=1 820 MPa;研究靶体莫氏硬度(H_{Moh})的影响时,将靶体材料莫氏硬度换为 H_{Moh}=3,则弹体质量的损失率如表 2 所示。从表 2 中可以看出,相对于弹体材料,靶体的莫氏硬度对磨蚀过程的影响更大。

表 2　弹体材料屈服强度和混凝土莫氏硬度对卵形弹磨蚀的影响

Table 2　Effect of yield strength of projectile and Mohs hardness of concrete on the mass abrasion of ogive-nose projectile

v_s/(m/s)	$\Delta m/m$/(%)		
	4340 Rc45, H_{Moh}=7	AerMet100 Rc53, H_{Moh}=7	4340 Rc45, H_{Moh}=3
612	2.9	2.4	1.5
985	6.2	5.2	3.1

5　结　论

根据修正的弹体表面磨蚀速度和靶体响应力函数,编制了计算弹体磨蚀后形状和质量损失的差分程序,通过计算结果与实验结果的比较,证明了模型的准确性。该程序不但能比较准确地预测出速度较低时弹体磨蚀后的形状、质量损失和侵彻深度,而且计算简单,便于应用,可用于钻地武器弹体结构的设计。计算结果表明,磨蚀效应对弹头形状有较大影响,对侵彻深度的影响不大。

References:

[1] Frew D J, Hanchak S J, Green M L, et al. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods [J]. Int J Impact Eng, 1998, 21(6): 489-497.

[2] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(5): 465-476.

[3] Silling S A, Forrestal M J. Mass loss from abrasion on ogive-nose steel projectiles that penetrate concrete targets [J]. Int J Impact Eng, 2007, 34(11): 1814-1820.

[4] Chen X W, He L L, Yang S Q. Modeling on mass abrasion of kinetic energy penetrator [J]. Eur J Mech A, 2010, 29(1): 7-17.

[5] Beissel S R, Johnson G R. An abrasion algorithm for projectile mass loss during penetration [J]. Int J Impact Eng, 2000, 24(2): 103-116.

[6] Beissel S R, Johnson G R. A three-dimensional abrasion algorithm for projectile mass loss during penetration [J]. Int J Impact Eng, 2002, 27(7): 771-789.

[7] He T, Wen H M. Determination of the analytical forcing function of target response and its applications in penetration mechanics [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(10): 1249-1261. (in Chinese)
何　涛, 文鹤鸣. 靶体响应力函数的确定方法及其在侵彻力学中的应用 [J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(10): 1249-1261.

An Abrasion Algorithm for Ogive-Nose Steel Projectile Penetrating Concrete Target

YANG Yang, HE Tao, WEN He-Ming

(*CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: A finite difference program is developed to predict the mass loss, nose shape change, and penetration depth of a steel projectile which penetrates into concrete targets based on the modified empirical equation of nose surface abrasion velocity and the assumption that the density of the projectile is constant. The model predictions are compared with the experimental results available in the literature, and good agreements are found between the present calculations and the experimental observations in terms of nose shape and mass loss.

Key words: penetration; abrasion; concrete; projectile; mass loss

《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