第 23 卷 第 1 期 高 压 物 理 学 报 Vol. 23, No. 1
2009 年 2 月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS Feb., 2009

文章编号：1000-5773(2009)01-0065-06

钨合金杆侵彻半无限厚铝合金靶的数值研究*

楼建锋[1,2]，王 政[1]，洪 滔[1]，朱建士[1]

(1. 北京应用物理与计算数学研究所，北京 100088；
2. 中国工程物理研究院北京研究生部，北京 100088)

摘要：使用 LS-DYNA 程序对钨合金杆侵彻半无限厚铝合金靶问题进行了数值模拟研究，参考文献中的实验数据，分别建立了在低着速与高着速情况下所适用的计算模型，标定了材料参数，计算了撞击速度从 200 m/s 到 2 500 m/s 范围内的侵彻情况，计算结果与实验数据符合较好。同时研究了影响长杆侵彻效能的主要因素，结果表明，在高着速的情况下，杆的头部形状对侵彻深度的影响很小，以杆长无量纲化的侵彻深度(P/L_0)随长径比(L_0/d)的增大而降低。

关键词：长杆侵彻；数值模型；钨合金杆；铝合金

中图分类号：O385；O347 **文献标识码**：A

1 引 言

长杆侵彻特别是钨合金杆侵彻金属靶的研究，一直是常规弹药终点威力效应研究的主要问题之一。传统应用集中在反坦克穿甲弹、离散杆破片战斗部终点毁伤中，近年来，在新型动能(杆)反导战斗部、超高速动能反舰战斗部等新型战斗部中也有所涉及。对该问题的研究主要集中在其侵彻能力及不同因素的影响规律，采用的方法主要是实验研究及理论分析。

其中，对于着速在大范围内变动的动能杆侵彻问题，动能杆在侵彻过程中的动态损伤与侵蚀失效相当复杂，以往通常使用实验研究。例如，Silsby 对着速介于 1.3～4.5 km/s 之间的钨杆侵彻半无限厚钢靶问题进行了实验研究[1]；Orphal 等对 1.5～4.5 km/s 之间的钨杆侵彻氮化铝靶做了实验[2]；Forrestal等[3-4]通过实验，研究了卵形头部和球形头部的钢杆侵彻铝(6061-T6511)靶问题，着速范围是 0.5～3.0 km/s；Wickert(2007 年)通过一系列实验，研究了着速从 200～1 900 m/s 范围内钨合金杆侵彻半无限厚铝合金(7020)靶的问题[5]。上述实验研究表明，对于着速在大范围内变动的侵彻问题，存在 3 个响应区：(1) 动能杆在低速侵彻中不会变形，侵彻深度随动能杆撞击速度的增大而增加；(2) 当撞击速度达到某个临界值后，动能杆发生侵蚀、甚至断裂，此刻侵深也会突然大幅下降；(3) 继续增大撞击速度，侵深又会逐渐增加，最终趋于一个平台。而在理论分析中，对于动能杆侵彻金属靶板，在着速较低时，通常把动能杆当成刚性体处理[7-8]；对于着速较高(大于 2 500 m/s)的情况，如果忽略弹靶强度，可以用流体侵彻模型估计侵彻深度[6]。

然而，实验研究存在数据点有限、难以进行系统全面的分析等不足；理论分析的精度及分析模型的参数也存在不足。而采用数值模拟分析能够弥补以上两者的不足，从而开展系统深入的研究。但由于在从低速到高速的侵彻中，动能杆经历从刚体到流体的变化，在材料模型的选取及相关参数的标定上存在一定难度。

* **收稿日期**：2008-01-07；**修回日期**：2008-07-20

基金项目：中国工程物理研究院科学技术基金项目(20060106，2007A09002)

作者简介：楼建锋(1980—)，男，博士研究生，助理研究员，主要从事冲击动力学与爆炸力学数值模拟研究. E-mail：jflou@iapcm.ac.cn

本工作针对大速度范围内的钨合金杆侵彻半无限厚铝合金靶问题，使用有限元程序 LS-DYNA，选取不同的材料模型，通过文献中的实验数据，对计算模型进行标定校核；并在此基础上，对影响长杆侵彻效能的典型影响因素（头部形状、长径比）进行了系统地研究分析。

2 数值分析模型的建立

Wickert 对钨合金杆侵彻半无限厚铝合金靶进行了一系列实验[5]，着速范围从 200 m/s 到 1 900 m/s。其中钨合金杆密度是 17.7 g/cm^3，质量为 46.7 g，长 $L_0=90$ mm，直径 $d=6$ mm，抗拉强度为 1 370 MPa；靶由横截面为 125 mm × 125 mm、厚度为 60 mm 的铝合金 7020 板叠加而成，密度为 2.77 g/cm^3，抗拉强度约 350 MPa。

本工作采用 LS-DYNA 中的拉氏算法，用轴对称壳单元建模[11]，网格大小为 1 mm/cell。针对不同速度下弹靶作用的特点，划分不同的研究速度区间，分别选择不同的材料本构模型来研究其对分析结果的适应性。

首先，通过低着速侵彻情况的计算，对靶材料的计算参数进行标定。即，依据实验结果，着速小于 700 m/s时，把钨合金杆当成刚性体处理，选用 20 号模型（* Mat-Rigid）[11]，铝合金靶选用 15 号模型（* Mat-Johnson-Cook），状态方程为 Grüneisen 形式（* EOS-Grüneisen）。

其次，对于高着速（700～2 500 m/s）的情况，钨合金杆需要考虑侵蚀断裂，钨合金杆分别选用 15 号模型（* Mat-Johnson-Cook）和弹塑性流体模型（* Mat-Elastic-Plastic-Hydro），状态方程为 Grüneisen 形式；铝合金靶仍选用 J-C 模型。

3 数值模型的校核

参考文献[10]中的材料本构方程参数，通过调整材料的失效参数（D_1～D_5）[11]，本工作对文献中的实验模型进行了一系列的数值计算，并将计算结果与实验数据进行了比较，得到了相关模型的材料参数，结果列于表 1、表 2 和表 3，其中，ρ_0 是材料密度，E 是弹性模量，G 是剪切模量，σ_Y 是屈服强度，ε_{FS} 是侵蚀失效应变，其它参数的含义参见 LS-DYNA 关键字手册[11]。

表 1 钨合金 * Mat-Rigid 模型参数

Table 1 Parameters of rigid model for Tungsten alloy(* Mat-Rigid)

ρ_0/(g/cm^3)	E/(GPa)	Poisson ration	N	Couple	M	ALIAS
17.7	357	0.303	0	0	0	—

表 2 钨合金与 7020 铝合金 * Mat-Johnson-Cook & * EOS-Grüneisen 模型参数

Table 2 Parameters of J-C model for tungsten alloy and 7020Al (* Mat-Johnson-Cook & * EOS-Grüneisen)

Material	ρ_0/(g/cm^3)	G/(GPa)	A	B	N	C	M	TM	TR	EPS0	CP
7020Al	2.77	35	3.37×10^{-3}	3.43×10^{-3}	0.41	0.01	1.0	877	294	1.0×10^{-6}	8.75×10^{-6}
Tungsten alloy	17.7	137	1.51×10^{-2}	1.77×10^{-3}	0.12	0.016	1.0	1498	294	1.0×10^{-6}	1.35×10^{-6}

Material	PC	Spall	IT	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	C_0	S_1	GAMAO
7020Al	−9.0	3.0	0.0	2.5	1.45	−0.47	0.018	0	0.5386	1.339	1.99
Tungsten alloy	−1.75	3.0	0.0	2.0	1.77	−3.4	0	0	0.385	1.44	1.58

表 3 钨合金 * Mat-Elastic-Plastic-Hydro & * EOS-Grüneisen 模型参数

Table 3 Parameters of Elastic-Plastic Hydrodynamic model for tungsten alloy (* Mat-Elastic-Plastic-Hydro & * EOS_Grüneisen)

ρ_0/(g/cm^3)	G/(GPa)	σ_Y/(GPa)	ε_{FS}	C_0	S_1	GAMAO
17.7	137	1.5	1.5	0.385	1.44	1.58

图 1 是以杆长无量纲化的侵彻深度(P/L_0)随着着速变化的曲线,其中黑点是 Wickert 的实验数据,点划线是低着速时刚体模型的计算值,虚线是较高着速时 J-C 模型的计算值,实线是弹塑性流体模型的计算值。

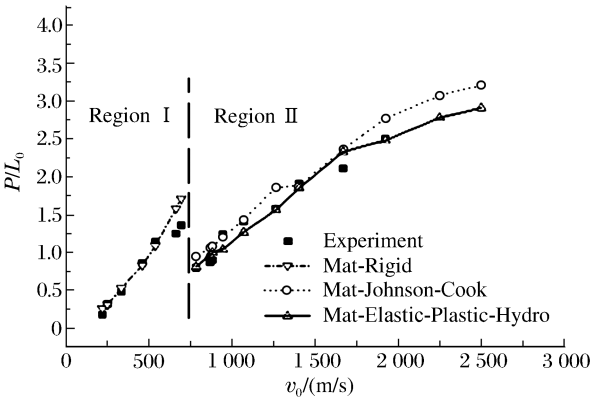

图 1　侵彻深度(P/L_0)随着着速变化的曲线

Fig. 1　Penetration within the impact velocity regime from 200 m/s to 2 500 m/s

从图 1 中可以看到,在着速小于 700 m/s 阶段,侵彻深度随动能杆撞击速度的增大而增加;当撞击速度达到 800 m/s 左右,侵深突然大幅降低;继续增大撞击速度,侵深又会逐渐增加,最终趋于一个平台。数值计算结果与实验数据符合较好,由此表明,本工作建立的数值模型,能够较好地模拟着速在 200～2 500 m/s 之间钨合金杆侵彻半无限厚铝合金(7020)靶的问题。相对于使用 J-C 模型的计算值,使用弹塑性流体模型的计算值更接近实验结果,这可能是由于在 J-C 模型中用于描述侵蚀失效的参数较多而不易标定引起的,因为材料的失效参数对计算结果的影响较大。由此,在类似问题的数值研究中,如果不考虑钨合金杆在高速冲击时由于高温熔化而引起的材料属性的变化,那么使用弹塑性流体本构模型能够进行简单有效地数值分析。

另外,在图 1 中可以看到,着速在 800 m/s 附近,侵彻深度突然大幅下降,侵深比着速 695 m/s 时减少了约 40%,这是因为撞击速度达到临界值后,钨合金杆发生了严重的侵蚀断裂和质量消耗,本工作数值模拟结果与实验结果的比较如图 2 所示,数值计算中钨合金杆采用弹塑性流体本构模型。而着速在 600～700 m/s 之间时,计算结果与实验数据有较大差别,这是因为在数值模型上仍然把动能杆当成刚性体处理,然而实验中得到,着速为 540 m/s 时,侵彻后钨合金杆头部几乎没有变形;而着速在 664 m/s 和 695 m/s 时,杆头部发生了塑性变形,如图 3 所示。因此,如果要更好地模拟着速在 600～700 m/s 之间的侵彻情况,钨合金杆需要选择考虑弹塑性变形的本构模型,并通过实验数据标定材料参数。

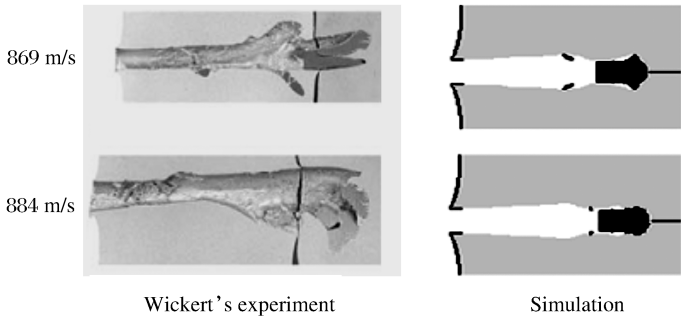

图 2　着速为 869 和 884 m/s 时,数值模拟与实验结果的比较

Fig. 2　Comparision between simulation and experiment at different impact velocity

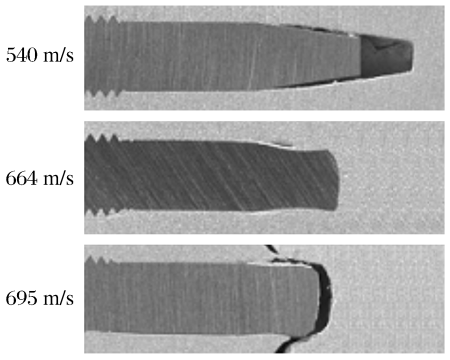

图 3　着速为 540、664 和 695 m/s 时侵彻后钨合金杆头部的形状[5]

Fig. 3　Shape of the projectile nose at the end of penetration with different velocity[5]

4　长杆侵彻效能相关影响参数的分析

在经过校验的数值分析模型及参数的基础上,对长杆侵彻效能的相关影响参数开展分析,研究钨合金杆头部形状与长径比两个典型因素对侵彻效能的影响规律。

4.1 头部形状对侵彻深度的影响

针对钨合金杆头部形状对侵彻深度的影响，分析了 3 种钨合金杆头部形状，包括平头形、截锥形和半球形，如图 4 所示。计算了着速分别是 540 m/s、1 405 m/s 和 2 500 m/s 时的情况，其中在低着速(540 m/s)时，将钨合金杆当成刚性体处理，另外两种高着速情况，使用弹塑性流体模型。

表 4 列出了不同头部形状下侵彻深度的计算结果，可以看到，着速为 540 m/s 时，平头形头部的钨合金杆的侵彻深度比截锥形的和半球形的减少了约 20%；而在高着速情况下，杆头部形状对侵深的影响很小，这是因为从钨合金杆着靶开始时刻，杆头部就发生了侵蚀失效，从而不会影响后续侵彻过程。图 5 显示了高着速情况下侵彻初期($t=20\ \mu s$)，钨合金杆头部的侵蚀变形情况。

表 4 不同头部形状下侵彻深度的比较

Table 4 Comparison of the penetration of different nose shape

Impact velocity /(m/s)	Penetration/(mm)		
	Flat nose	Truncated cone	Hemispherical
540	76.7	97.9	93.5
1 405	166.2	166.2	168.3
2 500	262.1	262.2	260.7

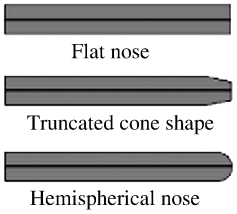

图 4 钨合金杆头部的 3 种形状

Fig. 4 Different shape of the projectile

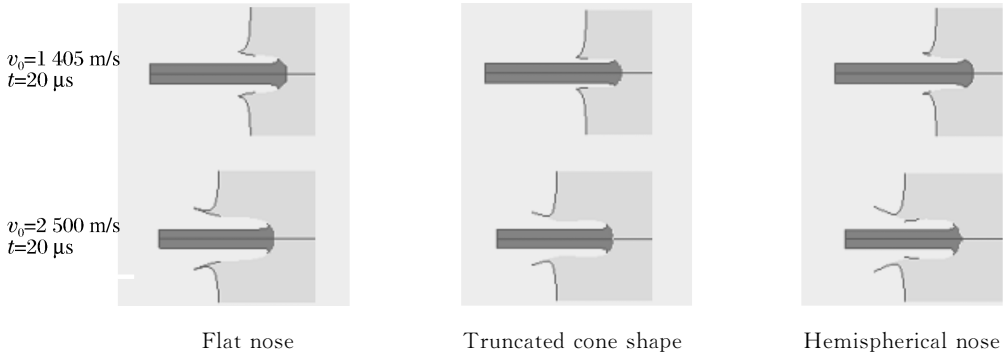

图 5 着速分别为 1 405 m/s 和 2 500 m/s 时，不同头部形状的钨合金杆侵彻情况比较

Fig. 5 Penetration of the projectile with different nose shape($v_0=1\ 405$ m/s and $v_0=2\ 500$ m/s, $t=20\ \mu s$)

4.2 侵彻深度与长径比的关系

在长杆侵彻的研究中，侵彻深度与长径比的关系一直是重要的内容。这里，对于着速为 2 500 m/s 的情况，分析了在钨合金杆侵彻中，长径比为 5、10、15 和 20 时的侵彻深度。图 6 显示了不同长径比所对应的无量纲侵彻深度(P/L_0)，结果反映以杆长无量纲化的侵彻深度(P/L_0)随长径比(L_0/d)的增大而降低，表明采用增大长径比提高动能杆侵彻能力的方式将随着长径比的不断增大，其效率逐渐降低。

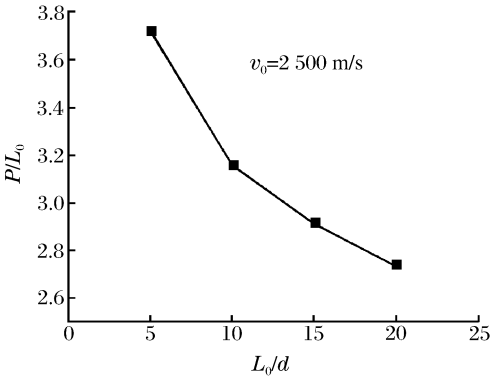

图 6 侵彻深度(P/L_0)随长径比(L_0/d)的变化曲线

Fig. 6 Curve of penetration versus the ration of length over diameter

5 小 结

使用 LS-DYNA 程序对着速在大范围内变动的钨合金杆侵彻半无限厚铝合金靶(7020)问题进行了数值研究。

参考 Wickert 的实验数据[5],分别建立了低着速与高着速情况下适用的计算模型,标定了材料参数,计算了侵彻速度在 200～2 500 m/s 范围内的侵彻情况。在低着速(<600 m/s)与高着速(700～1 900 m/s)的情况下,计算结果与实验数据符合得较好。研究结果表明,对于着速在大范围内变动的侵彻问题,在数值分析中应根据动能杆的侵蚀及质量消耗情况划分不同的着速区间,选用不同的本构关系,分别建立数值模型,并标定相应的材料参数,特别是材料的断裂损伤参数,将大大提高数值模拟分析的精度和效率。

同时,研究了钨合金杆头部形状对侵彻深度的影响,数值结果表明,在较低的撞击速度下,头部形状对侵彻深度的影响较大,而在高着速的情况下,影响很小。

另外,也对侵彻深度与长径比的关系进行了数值研究,结果反映以杆长无量纲化的侵彻深度(P/L_0)随长径比(L_0/d)的增大而降低,表明采用增大长径比提高动能杆侵彻能力的方式将随着长径比的不断增大,其效率逐渐降低。以上结论可为对长杆侵彻类问题的分析提供参考。

References:

[1] Silsby G F. Penetration of Semi-Infinite Steel Targets by Tungsten Rods at 1.3 to 4.5 km/s [A]//8th International Symposium on Ballistics [C]. Orlando, Florida, 1984.

[2] Orphal D L, Franzen R R, Piekutowski A J, et al. Penetration of Confined Aluminum Nitride Targets by Tungsten Long Rods at 1.5～4.5 km/s [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18: 355-386.

[3] Piekutowski A J, Forrestal M J, Poormon K L, et al. Penetration of 6061-T6511 Aluminum Targets by Ogive-Nose Steel Projectiles with Striking Velocities between 0.5 and 3.0 km/s [J]. Int J Impact Eng, 1999, 23(1): 723-34.

[4] Forrestal M J, Piekutowski A J. Penetration Experiments with 6061-T6511 Aluminum Targets and Spherical-Nose Steel Projectiles at Striking Velocities between 0.5 and 3 km/s [J]. Int J Impact Eng, 2000, 24: 57-67.

[5] Wickert M. Penetration Data for a Medium Caliber Tungsten Sinter Alloy Penetrator into Aluminum Alloy 7020 in the Velocity Regime from 250 m/s to 1 900 m/s [A]//23rd International Symposium of Ballistics [C]. Tarragona, Spain, 2007: 1437-1444.

[6] Stilp A J, Hohler V. Long Rod Penetration Mechanics [A]//Zukas J A. High Velocity Impact Dynamics [C]. New York: John Wiley & Sons, 1990: 321-404.

[7] Forrestal M J, Okajima K, Luk V K. Penetration of 6061-T651 Aluminum Targets with Rigid Long Rods [J]. J Appl Mech, 1988, 55: 755-760.

[8] Warren T L, Forrestal M J. Effects of Strain Hardening and Strain-Rate Sensitivity on the Penetration of Aluminum Targets with Spherical-Nosed Rods [J]. Int J Solids Struc, 1998, 35: 3737-3753.

[9] Tate A. Further Results in the Theory of Long Rod Penetration [J]. J Mech Phys Solids, 1969, 17: 141-150.

[10] Johnson G R, Cook W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Rates and High Temperatures [A]//7th International Symposium on Ballistics [C]. The Netherlands: The Hague, 1983: 541-547.

[11] Livemore Software Technology Corporation. LS-DYNA 971 Keyword User's Manual [Z]. [s. l.]: Livemore Software Technology Corporation, 2007.

Numerical Study on Penetration of Semi-Infinite Aluminum-Alloy Targets by Tungsten-Alloy Rod

LOU Jian-Feng[1,2], WANG Zheng[1], HONG Tao[1], ZHU Jian-Shi[1]

(1. *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing* 100088, *China*;
2. *Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing* 100088, *China*)

Abstract: Used the LS-DYNA procedure to set up numerical model on penetration of semi-infinite

aluminum-alloy targets by tungsten-alloy rod over a wide velocity range has been discussed. The mass of penetrator is about 46.7 g with a length over diameter ratio of 15. Based on experiment results from the reference, distinguished analytical models were used individually in case of relative high impact velocity and low one, and parameters of constitutive equations including failure parameters for aluminum alloy 7020 and tungsten alloy were calibrated. Penetration experiments within the impact velocity from 200 m/s to 2 500 m/s were numerically simulated, and the numerical results were in good agreement with experiments. In addition, the effect of projectile nose to penetration was investigated, and the relationship between length over diameter ratio and penetration was obtained. In the case of high impact velocity, the nose shape has little effect on penetration. Numerical results indicate that dimensionless penetration decreases as length over diameter ratio increases.

Key words: rod penetration; numerical model; tungsten-alloy rod; aluminum alloy

《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》。请使用电子邮件投稿(gaoya@caep.ac.cn)，也可提供软盘。

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

电子邮件：gaoya@caep.ac.cn (投稿、征订、咨询)

电　　话：(0816)2490042；传真：(0816)2282695

《高压物理学报》编辑部