文章编号：1000-5773(2009)02-0105-06

兆巴冲击压力下测量金属铝剪切粘性的实验技术改进*

李一磊[1,2]，刘福生[1]，马晓娟[1]，李永宏[1]，张明建[1]，张继春[2]

（1. 西南交通大学高压物理实验室，四川成都 610031；
2. 西南交通大学土木工程学院，四川成都 610031）

摘要：由于在测量高压下金属粘性的实验中不同测量方法得到的粘性系数值存在很大的系统偏差，所以提出和完善实验方法、获得更多可靠的实验数据显得非常必要。通过改进飞片碰撞的实验技术，在 101 GPa 压力下测量了铝样品中冲击波前沿上正弦形小扰动的振幅衰减和反向振荡现象，借助 Miller 和 Ahrens 对非理想初始流场的解析解，求得铝在此压力下的剪切粘性系数约为 800 Pa·s。

关键词：粘性；铝；小扰动；冲击波
中图分类号：O521.2 **文献标识码**：A

1 引 言

在高温高压条件下，凝聚态物质常作流体处理，其动力学过程由流体力学方程组描述。在求解该方程组时，要预先知道该物质的本构方程及某些动力学输运性质，如扩散系数、粘性系数、导热率、导电率等。在这些输运性质中，粘性系数是描述物质流场中粘应力与物质微元形变速率之间的相关性。粘性系数作为物质的基本物性参数之一，在微观上它与粒子间短程相互作用密切相关，甚至对结构相变也比较敏感[1]。因此，对物质粘性的研究也就成为物理力学或凝聚态物理领域的重要研究内容。

测量常压下液体介质粘性系数的落球法可以直接用于高温高压条件下的测量[2-3]。但这种测量方法实验技术要求高，而且就我们所关心的温度压力范围而言，该方法所能达到的温度和压力都很有限，压力仅在 10 GPa 左右，温度也局限在 2 500 K 以下。测量冲击波阵面厚度的方法也可以提供粘性测量的信息[4-8]，但由于受到 VISAR 测量系统时间分辨率（约 3 ns）的限制，难以测得冲击波前沿区内速度分布的细节，因而也不能给出准确的粘性系数值，特别是粘性系数在冲击波前沿区内随应变率变化的细节。Sakharov 等人曾采用一种化爆冲击加载技术[9-11]，在平面冲击波阵面上引入正弦型的几何小扰动，通过测量小扰动振幅的振荡式衰减过程，并利用几何相似流体的流场演化特点，发展了一种数据处理方法，从而确定出冲击压缩样品的剪切粘性系数值。Miller 和 Ahrens 曾对 Sakharov 小扰动方法做过比较严格的理论推导和分析[1]，他们对冲击波阵面上小扰动振幅的振荡式衰减过程进行严格地理论求解，指出 Sakharov 实验结果必须加上一个初始流场修正才能得到较好的解释。

由此可见，虽然大家公认粘性对冲击波阵面上小扰动振荡衰减速率具有重要的影响，但如何扣除初始流场对振荡速率的贡献还有待研究。所以，在新的实验加载条件下，探索冲击波阵面上扰动振幅的衰

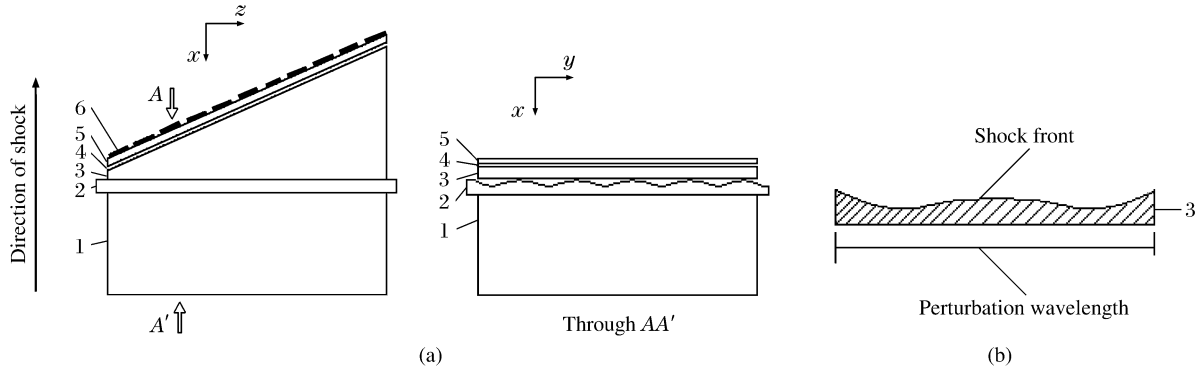
* **收稿日期**：2008-07-30；**修回日期**：2008-10-24
基金项目：国家自然科学基金(10874141)；国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NASF 联合基金(10576025)
作者简介：李一磊(1981－)，男，博士研究生，主要从事爆炸力学和高压物理方面研究. E-mail：liyileiliuhao@163.com
通讯作者：刘福生(1966－)，男，博士，研究员，博士生导师，主要从事高压物理、原子分子物理以及冲击波技术研究. E-mail：fusheng_l@sohu.com

减特性对解决物质在高温高压状态下粘性测量问题是很有必要的。本研究采用飞片碰撞的实验方法来测量铝在兆巴冲击压力下的剪切粘性系数,并与 Sakharov 的实验结果进行对比讨论。

2 实验方法及其结论分析

2.1 Sakharov 实验中存在的问题

Sakharov 实验装置如图 1(a)所示,炸药爆轰产生的冲击波依次进入样品圆盘和实验样品,在样品圆盘与实验样品接触的表面上加工制作正弦波纹。当冲击波从样品圆盘进入实验样品时,间隙的存在导致进入实验样品的冲击波阵面出现正弦状的几何扰动,即产生的冲击波具有正弦扰动特征的前沿。当扰动波阵面到达实验样品的上表面时,引起惰性气体发光透过光通板和其上的光刻条纹,并被高速相机记录。光通板上刻有许多条纹,它们分别对应冲击波不同传播距离。光通板在冲击作用下变为不透明,充当快门作用。冲击波到达某条纹的时间差反映波阵面的几何形状,不同条纹记录下的几何形状反映出冲击波随传播距离的演化特点。因此,这一系列条纹的发光历史记录了冲击波前沿随时间的演化过程。



1. Explosive assembly; 2. Sinusoidally grooved sample disc; 3. The sample;
4. Noble gas such as argon; 5. Plastic sheet; 6. Mask

图 1 Sakharov 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup designed by Sakharov

在 Sakharov 实验中,流体的初始速度场由样品圆盘中的冲击波传播到正弦型表面发生卸载,并由飞层再碰撞实验样品而产生,其初始扰动是否为小扰动,其波形是否为正弦形状直接影响测量结果。Mineev[12] 发表的实验数据表明其相对初始振幅较大($a_0/\lambda = 0.139$,其中 a_0 为初始振幅,λ 为扰动波长),因此,在 Mineev 的实验中,小扰动振荡条件应受到质疑。其后果是:进入实验样品的冲击波会产生波形畸变,使实验样品中冲击波的前沿不再为正弦形,如图 1(b)所示。而波形畸变的出现为振荡初始时刻的正确判断带来困难。冲击波实验衰减距离不再与理想正弦型扰动一致,这对振幅衰减速率或振荡"零点"位置的确定影响很大。

为了避免冲击波在间隙处发生卸载时引起流场能量在槽底部过分集中,我们提出了一种飞片碰撞的加载方式,即利用平面飞片碰撞带正弦型曲面的样品,达到在冲击波阵面上引入几何扰动的目的。这种方式可以避免在冲击波传播方向上波形畸变的产生。在沟槽波纹的设计上,采用 $a_0/\lambda = 0.05$,这比 Sakharov 更为接近小扰动条件。

在我们的早期探索性实验中[13],采用电探针测量方法,观测到了 42 GPa 压力下金属铝中正弦冲击波前沿扰动衰减现象,但其后期的振荡反向现象没有测到,因而振幅零点位置只能通过外推方法估计。而 Sakharov 的几何相似比计算方法[9] 和 Miller 的数值解方法[1] 都要求在实验信号中能准确确定出振幅衰减零点位置。在本研究中,通过改进实验样品的设计,冲击波正弦形前沿的衰减和反向过程都能得到观测,同时提高了冲击压力,从而获得了兆巴压力下铝的剪切粘性系数值。

2.2　飞片碰撞方法的设计

实验系统如图 2 所示,为了准确测量冲击波在样品里的传播过程中其波阵面形状的演化过程,样品的倾斜后表面布置了 50 根电探针,分为 5 组,分别对准样品不同厚度的波峰和波谷,以监测冲击波的正弦前沿在不同传播距离的振荡衰减和反向过程。为了保证电探针所安放的位置能正对样品相应厚度的波峰或波谷,并且所有电探针与样品面之间的距离保持一致以减小时间测量误差,将所有的电探针固定到一个经过精加工的有机玻璃模具里面。这个有机玻璃模具的斜面与样品的斜面有着相同的斜度,有机玻璃中的孔洞经过精细加工,能使电探针对准实验样品的监测位置。在电探针固定之后,打磨电探针裸露出模具斜面的部分,使所有电探针探头都与有机玻璃斜面处于同一平面上。在样品和有机玻璃模具之间的边缘区域贴上 10 μm 厚的铜箔,使所有电探针距离样品倾斜后表面的距离都是 10 μm。由于电探针与样品之间没有绝缘膜,在冲击波传到样品后界面时电探针会马上接通,所以在时间测量的精度上可以得到保证,误差在 1 ns 之内。如图 2 所示,每根电探针后面都连接了一定阻值的电阻,分组并联起来。这样当冲击波到达样品后界面时,随着图中电探针由下至上的依次接通,作用在示波器输入端的电压依次下降一定的幅度,这样冲击波到达样品后界面的时间就被示波器记录了下来。在本实验中,5 组电探针正对样品的 3 个波峰和 2 个波谷,每组的 10 根电探针可以记录对应的冲击波前沿振荡振幅随冲击波传播距离的衰减和反向。与 Sakharov 光测方法相比,电探针测量使实验测试技术得到了极大地简化。

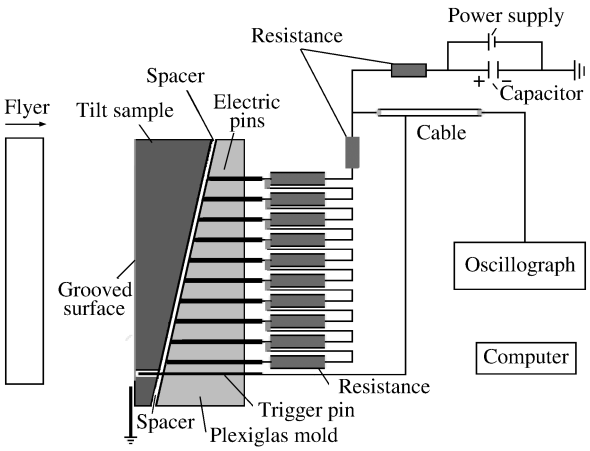


图 2　采用飞片碰撞方法的实验系统图

Fig. 2　The systematic diagram of the flyer-impact method

在本实验中,采用铜作飞片以提高冲击压力,铜飞片的直径为 25 mm,厚度为 2.5 mm。实验中铝样品的尺寸如图 3(a)所示,与前期实验相比,样品的厚度增加了,这样在电探针的测量范围内冲击波的传播距离得到了增加,以便观测小扰动振荡衰减后期的情况。同时,在样品尺寸的设计上还考虑了在电

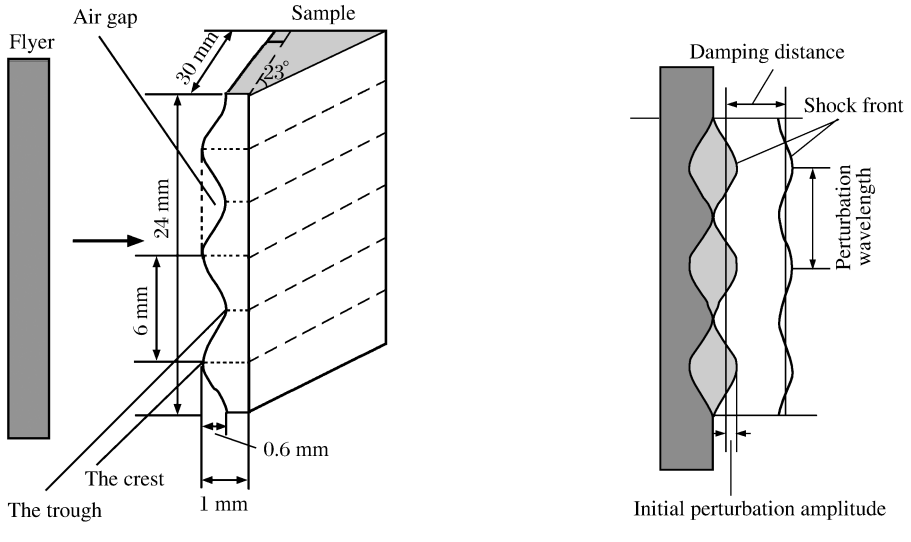


图 3　实验样品的尺寸以及冲击波前沿扰动的介绍图

Fig. 3　The size of the sample and the introduction of perturbation on shock front

探针的测量范围内边侧稀疏波的影响，由于铝在兆巴压力下边侧稀疏波的角度约为 40°[14]，因此，实验中样品未受到边侧稀疏波影响的厚度为 3.5～9.2 mm，冲击波在这个传播距离范围内的正弦前沿衰减和反向过程都能得到观测。

在实验过程中，当飞片刚接触到样品的波峰时，样品波峰处便产生相应的冲击波向样品内部传播；而当飞片接触到样品的波谷时，由于冲击波传播速度比飞片速度高，样品波峰处产生的冲击波前沿已经传播到了样品波谷的前面，这样便在样品中产生了具有正弦特征前沿的冲击波。飞片到达样品波谷时刻，飞片和样品之间的空隙闭合，此时是计算振荡衰减过程的开始时刻，如图 3(b)所示。对应的振荡振幅为振荡的初始振幅，为此时冲击波正弦前沿波峰和波谷距离的一半。

实验中，飞片的速度为 5.33 km/s，铝的初始密度为 2.718 g/cm^3，其雨贡纽参数 C_0 和 s 分别为 5.392 km/s和 1.34[14]，计算得到实验压力为 101 GPa。从示波器记录的实验信号中，冲击波接通每根电探针的时间都可以清晰地读出，精度高达 1 ns[13]。将示波器所显示的电压下跳时刻记录下来，便可以得到正弦形冲击波阵面的波峰和波谷分别到达样品边沿同一厚度的时间，从而得到冲击波在这个传播距离里的前沿波形。图 4 是所测得铝在此压力下冲击波前沿波形随样品厚度的变化，图中右边数值为电探针测量点所在位置到样品波峰处的距离。从中我们可以清楚地看到正弦冲击波前沿振幅衰减并反向的过程。从这个实验信号可以得到振幅衰减至零点的确切位置，这对于最终得到铝在高压下的粘性具有重要的意义。

振荡计算的初始时刻和初始振幅在前面已经有过定义，而初始振幅对应的时间则为飞片在从接触到样品波峰到最后接触到样品波谷所经历时间的一半。将图 4 中所测得的冲击波各个传播距离下波峰和波谷到达时差的一半除以初始振幅对应的时间，便可以得到振荡过程中的相对振幅。同时，冲击波传播的距离为正弦冲击波前沿振幅零点处的位置减去初始时刻正弦冲击波前沿振幅零点处的位置，如图 3(b)所示。将冲击波传播的距离除以冲击波阵面前沿正弦波形的波长便可得到振荡过程中的相对位移。由于实验中各个实验装置位置的安装精度控制在 0.05 mm 之内，因此整个实验的测量精度控制在 5%以内。图 5 是所测得铝在 101 GPa 压力下正弦波阵面前沿振荡相对振幅和相对位移的对应图，从图中可以看到正弦形波阵面上扰动振幅呈现先衰减到振幅“零点”，随后反向到最大值，最后再衰减的过程。

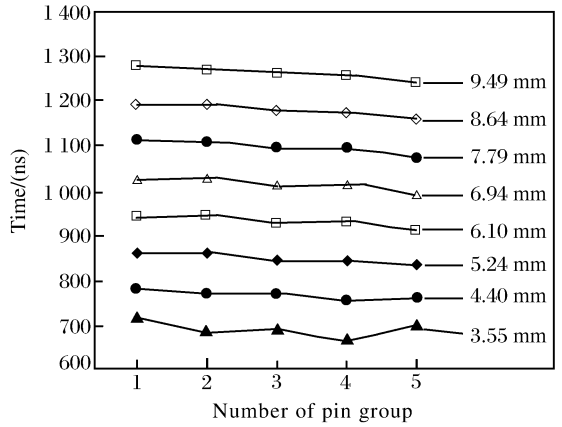


图 4 101 GPa 压力下冲击波前沿扰动随铝样品厚度变化的整形图

Fig. 4 Perturbation development with thickness of Al sample on 101 GPa

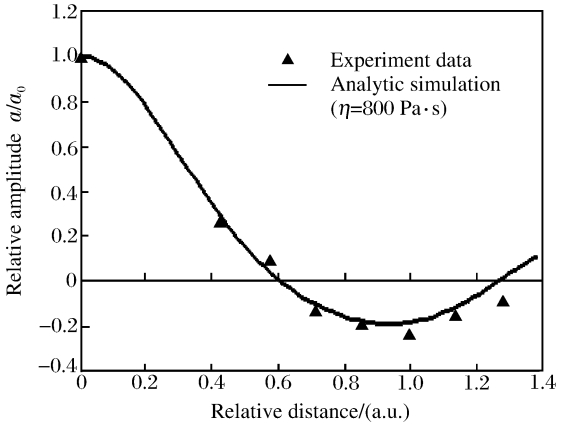


图 5 101 GPa 压力下冲击波前沿振荡衰减曲线

Fig. 5 The oscillatory damping curve of perturbed shock front on 101 GPa

2.3 实验结果分析

与 Zaidel[15]的理论分析比较，Miller 和 Ahrens 对小扰动的理论分析方法最为全面和可靠。将铝的

雨贡纽参数带入文献[1]中的(86)式和(96)式,运用 Miller 和 Ahrens 解非理想初始流场的公式,得到的理论模型曲线如图 5 所示,对应铝的剪切粘性系数 η 约为 800 Pa·s,压力为 101 GPa。这里所测得的粘性系数值比 Mineev[12] 运用 Sakharov 测量方法测得粘性系数值小 1 个数量级。为了找出引起 Mineev 实验误差的原因,我们利用二维流体力学方程组数值解技术,对冲击波正弦扰动问题进行数值模拟,发现在 Mineev 的实验中由于波形畸变的产生使得其实验中初始流场变得异常复杂,导致实验过程与解析解理论分析模型大相径庭。

3　结　论

本研究运用改进的飞片碰撞实验技术,在测量高压下金属粘性方面上取得了进展。实验中,观测到了铝在 101 GPa 压力下冲击波正弦前沿的衰减和振荡现象;运用 Miller 和 Ahrens 非理想初始流场的解析解,求得铝在这个压力下的粘性值为 800 Pa·s。为研究金属在高压下的粘性提供了一套新的实验技术。

感谢经福谦院士和陈俊祥研究员对本项目的大力支持,同时也感谢薛学东老师在轻气炮实验中所提供的帮助。

References:

[1] Miller G H, Ahrens T J. Shock-Wave Viscosity Measurement [J]. Rev Mod Phys, 1991, 63(4): 919-947.

[2] Funakoshi K, Kanzaki M, Yasuda A, et al. Viscosity Measurement of Albite Melt under High Pressure Using an *in Situ* X-Ray Radiography Technique [A]//Manghnani M H, Nellis W J, Nicol M F. Science and Technology of High Pressure: Proceedings of AIRAPT-17 [C]. Hyderabad, 2000: 1023-1026.

[3] Dobson D P, Crichton W A, Vocadlo L, et al. *In Situ* Measurement of Viscosity of Liquids in the Fe-FeS System at High Pressures and Temperatures [J]. American Mineralogist, 2000, 85(11): 1838-1842.

[4] Grady D E. Strain-Rate Dependence of the Effective Viscosity under Steady-Wave Shock Compression [J]. Appl Phys Lett, 1981, 38(10): 825-826.

[5] Chhabildas L C, Asay J R. Rise-Time Measurements of Shock Transitions in Aluminum, Copper, and Steel [J]. J Appl Phys, 1979, 50(4): 2749-2758.

[6] Swegle J W, Grady D E. Shock Viscosity and the Prediction of Shock Wave Rise Times [J]. J Appl Phys, 1985, 58: 692-701.

[7] Liu C L. Phenomenological Description of Viscous Coefficient on the Shock Wave Front [J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(1): 61-67. (in Chinese)
刘仓理. 冲击波阵面上粘度的一种唯象描述 [J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(1): 61-67.

[8] Zhang R Q. The Viscous Coefficient of Elastic-Viscoplastic Solids under Shock Loading [J]. Explosion and Shock Waves, 1984, 4(2): 16-21. (in Chinese)
张若棋. 在冲击载荷下弹-粘塑性固体的粘性系数 [J]. 爆炸与冲击, 1984, 4(2): 16-21.

[9] Sakharov A D, Zaidel R M, Mineev V N, et al. Experimental Investigation of the Stability of Shock Waves and the Mechanical Properties of Substances at High Pressures and Temperatures [J]. Sov Phys Doklady, 1965, 9: 1019-1022.

[10] Mineev V N, Mineev A V. Viscosity of Metals under Shock-Loading Conditions [J]. J Phys Ⅳ France, 1997, C3: 583-585.

[11] Godunov S K, Deribas A A, Kozin N S. Wave Formation in Explosive Welding [J]. J Appl Mech Tech Phys USSR, 1971, 12(3): 398-406.

[12] Mineev V N, Funtikov A I. Viscosity Measurements on Metal Melts at High Pressure and Viscosity Calculations for the Earth's Core [J]. Physics-Uspekhi, 2004, 47(7): 671-686.

[13] Liu F S, Yang M X, Lin Q W, et al. Shear Viscosity of Aluminum under Shock Compression [J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(3): 747-749.

[14] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [M]. Berkley: University of California Press, 1980: 260-261.

[15] Zaidel R M. Development of Perturbations in Plane Shock Waves [J]. J Appl Mech Tech Phys USSR, 1967, 8(4): 20-25.

Improvement on Experiment Technique of Measuring Shear Viscosity of Aluminum under Shock Compression

LI Yi-Lei[1,2], LIU Fu-Sheng[1], MA Xiao-Juan[1], LI Yong-Hong[1], ZHANG Ming-Jian[1], ZHANG Ji-Chun[2]

(1. *Laboratory of High Pressure Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 610031, *China*;
2. *School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 610031, *China*)

Abstract: Because there are great systematic deviations in viscosity coefficients at high pressure when measured by different experiment techniques, it is necessary to improve the experiment technique and obtain more reliable experiment data. In this paper, by the method of improvement on flyer-impact technique, the oscillatory damping and reverse-phase oscillation process on sinusoidally small-perturbed shock front of aluminum at 101 GPa is detected. The shear viscosity coefficient is deduced to be about 800 Pa · s based on Miller and Ahrens' analytic solution for non-ideal initial condition.

Key words: viscosity; aluminum; small-perturbation; shock wave

《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