第17卷 第2期 高 压 物 理 学 报 Vol. 17, No. 2
2003年6月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS June, 2003

文章编号：1000-5773(2003)02-0129-06

高应变率压缩加载下LY12铝圆管的剪切断裂研究*

汤铁钢，胡海波，李庆忠，谷 岩，张崇玉，王德生

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：通过回收破片的断口观察和金相分析研究了LY12铝圆管在高应变率压缩过程中的剪切断裂现象；回收破片具有典型的剪切断裂特征，断口与径向近似成45°夹角，断口观察发现断口面经历过径向摩擦；破片金相分析表明，绝热剪切带和裂纹首先在圆管内壁附近产生，然后沿最大剪应力线向外壁扩展。利用数值计算给出了圆管在内爆压缩加载下管壁内微元的应力、应变历史，为分析LY12铝圆管的剪切断裂提供了参考。

关键词：LY12铝圆管；高应变率；剪切断裂；绝热剪切带

中图分类号：O346.1 **文献标识码**：A

1 引 言

高应变率加载下金属圆管的断裂行为一直是人们关注的问题，早在1944年，Taylor[1]就研究了爆炸载荷下金属柱壳的破碎问题，并在假定柱壳破碎的主要机制为拉伸断裂的前提下，提出了著名的Taylor断裂判据。随着进一步的深入研究(Slate[2]、Hoggat和Recht[3])发现，金属柱壳在爆轰加载下的膨胀断裂机制除了拉伸外，还存在剪切断裂的机制，而且随着加载压力的增加，剪切断裂逐渐占据主导地位(Grady[4])。1997年以来，R. L. Martineau[5]对爆轰加载下无氧铜柱壳膨胀行为的系列研究表明：当无氧铜柱壳承受内部爆轰加载时，将以10^4 s^{-1}以上的应变率膨胀，在应变大约为150%时，多条塑性不稳定性条纹准周期性地出现在壳体的表面上，不稳定性继续发展以致形成绝热剪切带，进而形成裂纹，导致壳体破碎。然而，多年来对于金属圆管的压缩过程研究一直局限于金属圆管的收敛运动规律[6,7]。1995年，V. F. Nesterenko, M. A. Meyers[8,9]等首先报道了采用厚壁圆管压塌方法研究金属材料的断裂行为，发现钛、不锈钢等材料的圆管在爆轰压缩下，发生断裂的主要机制是绝热剪切。

采用轴对称滑移爆轰波压缩LY12铝圆管内聚收敛运动，通过回收破片的宏观特征、断口扫描观察和破片截面金相细观分析，研究LY12铝圆管在高应变率(10^4～10^5 s^{-1})压缩过程中的剪切断裂现象，数值计算给出LY12铝圆管在内爆压缩加载下管壁内微元的应力、应变历史，为分析剪切失稳与断裂提供了参考。

2 实验简介

实验装置如图1所示：粉状TNT炸药均匀地填装在LY12铝圆管外围，在顶端中心点由雷管起爆传爆药柱，再引爆粉状TNT炸药，滑移爆轰波压缩LY12铝圆管内聚运动。在传爆药柱下加一个有机

* **收稿日期**：2002-06-11；**修回日期**：2002-11-15

基金项目：中国工程物理研究院行业预研基金(20010101)

作者简介：汤铁钢(1974—)，男，硕士，助理研究员.

玻璃缓冲块，以减轻爆轰波对圆管顶端的预冲击。LY12 铝圆管长 150.0 mm，外径 50.0 mm，壁厚 5.0 mm，粉状 TNT 炸药厚度为 15.0 mm，装药密度约为 1.1 g/cm^3，爆速约为 3.65 km/s。

实验时将装置放入 0.5 m 见方的沙坑里，在坑底铺上一些细木屑，便于回收 LY12 铝圆管压缩断裂后形成的破片。处于装置中心部位的 LY12 铝圆管所吸收的能量绝大部分用于内聚收敛运动，且在此过程中转化为圆管塑性变形和温升，因此断裂后形成的破片动能较小，实验回收到了 LY12 铝圆管形成的绝大多数破片。

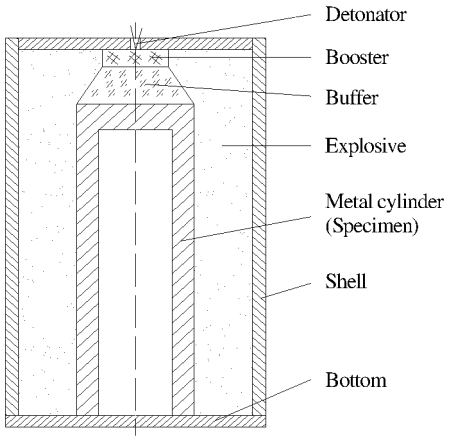


图 1 回收实验装置

Fig. 1 Configuration for recovery experiment

3 实验结果

3.1 破片宏观特征与断口观察

回收的 LY12 铝破片为长条状，长度大都在 5～10 cm 之间，只有少量短小破片；大部分破片的环向宽度(外表面)在 8～15 mm 之间。破片断口几乎与管轴平行，似乎是由一条裂纹沿纵向发展形成；宏观断口具有典型的剪切特征，宏观断口与圆管壁的径向近似成 45°夹角，即沿最大剪应力面发生。破片内壁已基本无法分辨，某些部分有熔化痕迹，如图 2 所示。

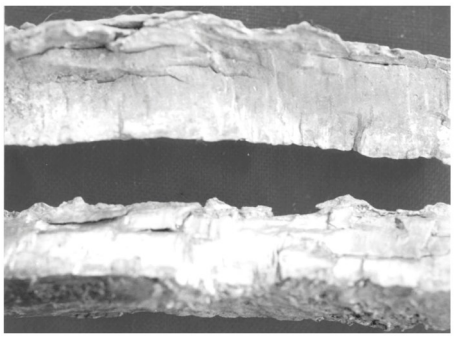


图 2 LY12 铝破片典型的断口

Fig. 2 Classic fractures of LY12Al fragments

在扫描电镜(SEM)下观察发现，断口上有明显的擦痕，如图 3 所示。从低倍照片看(图 3(a))，擦痕条纹沿断口的径向，在断口面上突出部分更严重。图 3(b)是断口面上突出部分的放大照片，从上可观察到经历严重摩擦后断口的微观形貌，断口表面由棉絮状特征的组织构成，且棉絮状特征的组织的径向尺度比轴向尺度要大，说明断口面上的棉絮状特征的组织经历过径向力的作用。棉絮状特征的组织还说明了 LY12 铝圆管在压缩过程中断裂时断口表面出现过一定程度的熔化，熔融状的金属在受摩擦

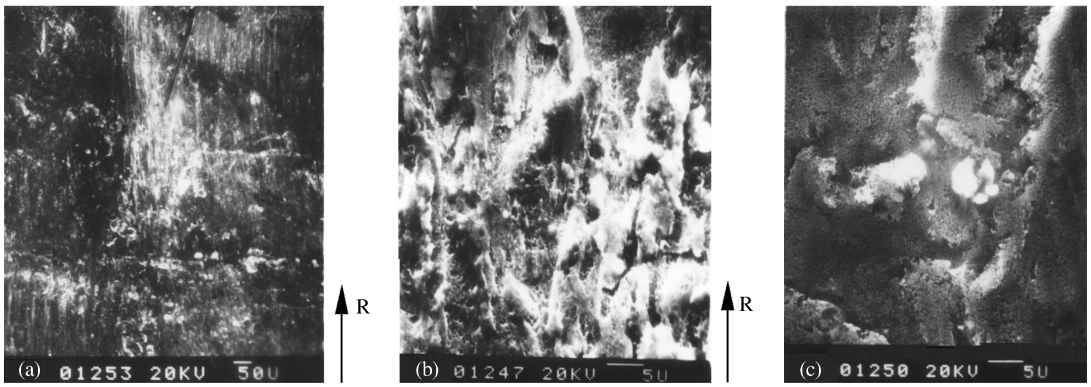


图 3 LY12 铝破片断口的 SEM 照片

Fig. 3 SEM images of the fractures in LY12Al fragments

力作用时形成了棉絮状特征的组织。断口面上擦痕较轻部位的放大照片如图 3(c)所示:可以看到部分的细微观特征,断口由若干层次组成,各层次的边沿不平整,经历摩擦而发生翻卷,由于摩擦程度较轻,没有形成棉絮状的组织形貌。断口经历径向摩擦的特征说明破片形成是由剪切断裂所致。

3.2　破片金相分析

将初始样品与回收的破片沿与圆管轴线垂直的截面进行线切割,对截面进行打磨、抛光,腐蚀后进行金相细观分析,部分金相照片如图 4 所示:图 4(a)是 LY12 铝初始样品的细观形貌,可看到 LY12 铝由多相组织组成,基体是 α 相,其它相颗粒(如 S 强化相和 θ 强化相)尺寸大小不等,较均匀地分布在基体中,可以认为实验使用的 LY12 铝合金材料在宏观上是均匀的,但晶粒形状的取向存在一定的方向性,这与材料加工过程有关。

从破片截面上看,绝大多数裂纹和剪切带位于靠近圆管内壁区域。图 4(b)是回收 LY12 铝破片截面靠近圆管内壁边沿的裂纹与绝热剪切带的细观形态:越靠近内壁剪切带越明显,即剪切变形越大,随着与内壁距离的增加,剪切变形逐渐减小。这是由于局部绝热剪切变形首先在内壁处产生,局域化过程逐步向圆管外壁扩展,形成了图中所示的绝热剪切带。图中两条绝热剪切带相互近似垂直,分别在不同族的最大剪应力线上,可以看到其中一条从圆管内壁开始形成,一直向外壁扩展,占据主导地位,而另一条则始于前一条的中部,发展不及前者充分。同时还观察到绝热剪切带的后方有裂纹形成,很显然,绝热剪切带是裂纹形成的先导。

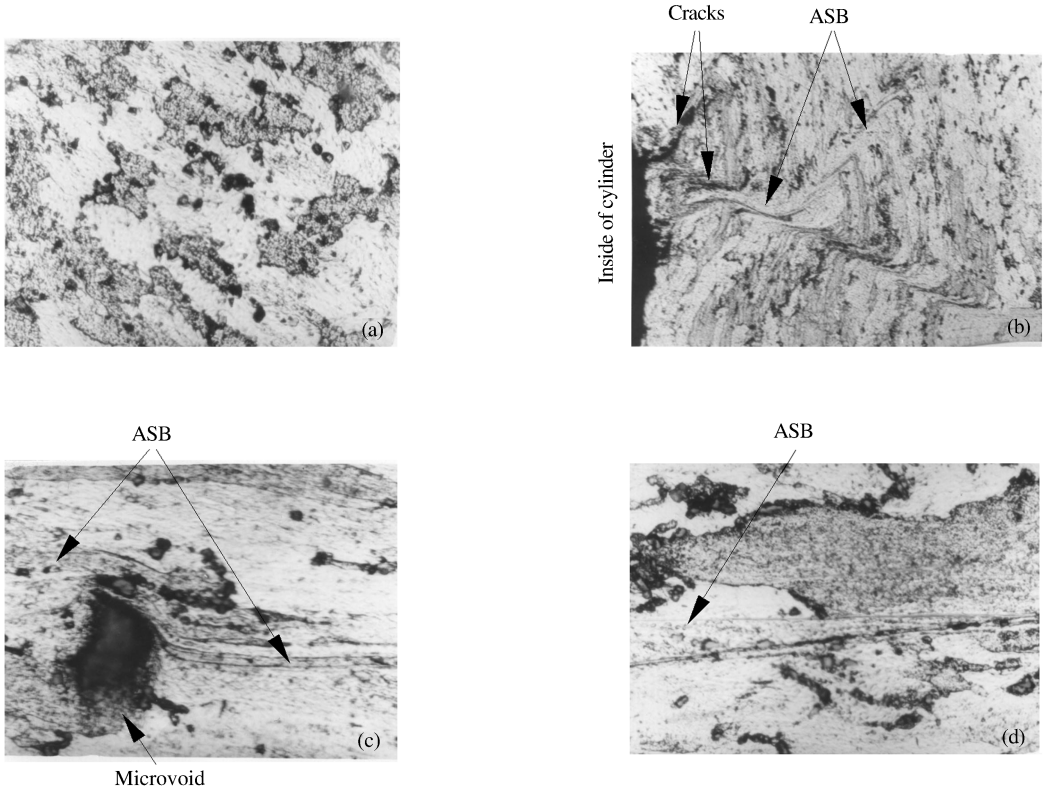


图 4　LY12 铝圆管破片中的裂纹、孔洞和绝热剪切带

(a) 初始样品(200×),(b) 绝热剪切带与裂纹(100×)

(c) 微孔洞与绝热剪切带(400×),(d) 绝热剪切带末端(400×)

Fig. 4　Microcracks, microvoids and adiabatic shear bands in the fragments of LY12 aluminum cylinder

(a) Original specimen(200×), (b) Two vertical ASB(100×)

(c) Microvoid and ASB(400×), (d) The tip of ASB(400×)

图 4(c)为破片截面上微孔洞及绝热剪切带,从中可以看到微孔洞与绝热剪切带的相互关系。微孔洞的直径约为 50 μm,其后方有一条宽度约 15 μm 的绝热剪切带,前方是一条宽度仅为 5 μm 的绝热剪切带。由此照片可以看到绝热剪切带在扩展过程中遇到微孔洞时的情形,绝热剪切带的宽度小于微孔洞直径,无法直接穿越微孔洞,但它绕过微孔洞,平移一定距离后继续沿原方向扩展。已有研究表明,材料在高应变率变形过程中,内部微孔洞常常是剪切变形局域化的始发点,因此照片上的情形也可以看成绝热剪切带遇到比自身尺度大的微孔洞时,扩展方向发生偏转,偏离了最大剪应力线后停止扩展,此时在微孔洞前方沿最大剪应力线重新形成绝热剪切带。图 4(d)为一条绝热剪切带末端形态,剪切带穿过了 LY12 铝合金中的多相组织,剪切带内的细微观组织发生了变化,晶粒较剪切带外显得细小均匀,从图 4(c)中的绝热剪切带也能观察到这一特征。绝热剪切带在形成过程中经历了高温与剧烈塑性变形,剪切带内晶粒细化可能是重结晶的结果[11]。

4 管壁内应力场计算及分析

采用 LS-DYNA3D 有限元程序对实验装置的简化模型进行了计算, LY12 铝圆管采用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程;TNT 炸药采用 High-Explosive-Burn 模型和 JWL 状态方程。计算时没有考虑材料的断裂,仅分析管壁内应力、应变的变化历史。简化模型假定 LY12 铝圆管沿轴向变形很小,相对径向变形可以忽略,于是计算时只取环向截面上的一层单元。

由图 5 可以看出,圆管内壁的最大剪应力值较圆管外壁的值大,而且达到最大值后衰减较快。显然,圆管在压缩过程中应变一直增加(图 6),剪应变也应如此,则剪应力的降低说明材料发生了整体屈服。内壁塑性变形较外壁剧烈,材料软化程度较外壁严重,因而出现剪应力迅速下降的现象。从计算出的应力、应变历史看,圆管在压缩过程中其内壁的环境更加有利于绝热剪切局域化的形成,这与回收观察到裂纹和剪切带由内壁向外壁扩展的现象相吻合。

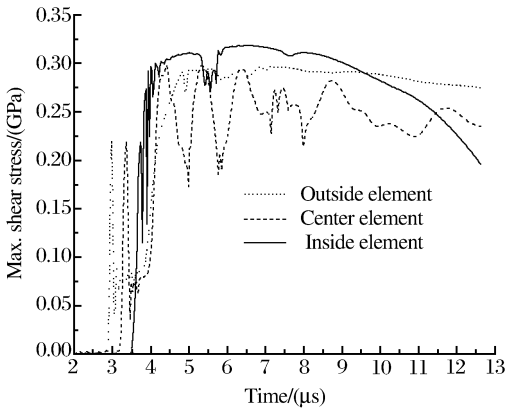


图 5 圆管内壁、外壁及中间单元的最大剪应力历史

Fig. 5 Maximum shear stress history curves of elements in the inside, middle and outside of cylinder wall

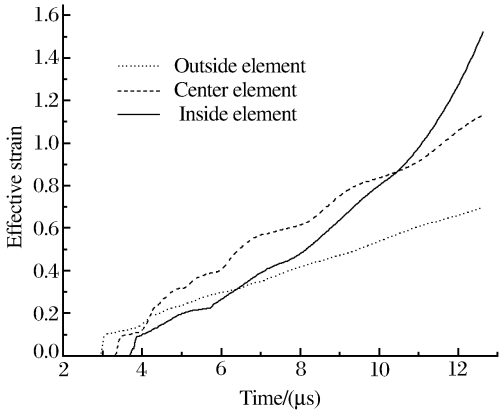


图 6 圆管内壁、外壁及中间单元的等效应变历史

Fig. 6 Effective strain history curves of elements in the inside, middle and outside of cylinder wall

5 结 论

通过对爆轰压缩加载下 LY12 铝圆管内聚运动过程及断裂后的破片观测和金相分析,得到了以下初浅认识。

(1) 滑移爆轰压缩加载下,LY12 铝圆管以 $10^4 \sim 10^5\ s^{-1}$ 的应变率内聚运动断裂后形成的破片为长

条状,具有典型的宏观剪切断裂特征,断口与径向近似成 45 °夹角,及沿最大剪应力线形成;扫描观察发现断口受到径向摩擦。

(2) 破片金相分析表明:绝热剪切带和剪切裂纹首先在圆管内壁附近产生,随后沿最大剪应力线向外扩展;绝热剪切带的大量存在说明 LY12 铝圆管在应变率为 $10^4 \sim 10^5\ s^{-1}$ 的压缩加载下对绝热剪切较为敏感。

(3) 数值计算给出的应力、应变历史说明压缩过程中圆管内壁的环境较外壁更加有利于绝热剪切局域化的形成,与回收破片分析结果相吻合。

References:

[1] Taylor G I. Science Papers of Sir G. I. Taylor [M]. London:Cambridge University Press,1963. 387.

[2] Slate P M B,Billings M J W,Fuller P J A. The Rupture Behavior of Metals at High Strain Rates [J]. J Inst Metals, 1967,95:244－251.

[3] Hoggatt C,Recht R. Fracture Behavior of Tubular Tombs [J]. J Appl Phys,1968,39:1856－1862.

[4] Grady D E, Hightower M M. Fracture of a 4140 Steel Cylinder under High Explosive Loading [R]. Sand-90-0882C,1990.

[5] Martineau R L. A Viscoplastic Model of Expansioning Cylindrical Shells Subjected to Internal Explosive Detonations [R]. LA-13424-T,1998.

[6] Zhang K. The Experimental Study on the Flying Process of the Metal Cylinder with Outer Explosive Loading [A]. The Proceeding of Detonation Driving and Instable Growing-up of Detonation [C]. Kunming, China, 1985. (in Chinese)
张　凯. 圆筒在外布炸药滑移爆轰载荷作用下飞行姿态和实验研究 [A]. 爆轰驱动和爆轰不定常增长会议论文集 [C]. 昆明,1985.

[7] Feng J B. Deformation and Fracture of the Metal Cylinder with Internal Explosive Load [D]. Mianyang: Post-Graduate Department of CAEP,1988. (in Chinese)
封加波. 爆炸载荷下金属柱壳的变形和破坏规律研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院研究生部,1988.

[8] Nesterenko V F,Meyers M A,Wright T W. Collective Behavior of Shear Bands [A]. Murr L E,Staudhammer K P,Meyers M A. Metallurgical and Materials Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena [C]. The Netherlands,1995. 397－404.

[9] Meyers M A,Nesterenko V F. High-Strain-Rate Deformation of Tantalum:The Thick-Walled Cylinder Method [A]. Murr L E,Staudhammer K P,Meyers M A. Metallurgical and Materials Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena [C]. The Netherlands,1995. 487－494.

[10] Tang T G. Study on the Shear Fracture of Steel Cylinder under Imploding Load [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2002,16(1):75－79. (in Chinese)
汤铁钢. 内爆压缩加载下抗氢钢圆管剪切断裂研究 [J]. 高压物理学报,2002,16(1):75－79.

[11] Tang T G. Studies on the Thermoplastic Instability and Shear Fracture of Metal Cylinder under Imploding Load [D]. Mianyang:Post-Graduate Department of CAEP,2002. (in Chinese)
汤铁钢. 内爆加载下金属圆管的热塑剪切失稳与断裂研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院研究生部,2002.

Shear Fractures of LY12 Aluminum Cylinder under High-Strain-Rate Implosive Loading

TANG Tie-Gang, HU Hai-Bo, LI Qing-Zhong, GU Yan
ZHANG Chong-Yu, WANG De-Sheng

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: In this paper, the shear fracture performances of LY12 aluminum cylinder were studied under

explosive loading. The recovered fragments showed shear characteristics. The fracture surface formed along the maximum shear stress curves. SEM images of the recovered fragments illustrate that the fracture surfaces have undergone friction. The adiabatic shear bands and microcracks all initiate near the inside wall and develop along the maximum shear stress curves to the outside wall of the cylinder. The histories of stress and strain from numerical calculations indicate the adiabatic shear bands initiate more easily near the inside of cylinder than in other zones, which corresponds to the results of metallographic analysis.

Key words: LY12 aluminum cylinder; high-strain rate; shear fracture; adiabatic shear band

《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》连续三版把《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)。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