文章编号：1000-5773(2011)06-0487-06

高纯铝层裂的自由面速度剖面特征分析*

祁美兰[1,2]，罗　超[1]，范　端[1]，贺红亮[2]

(1.武汉理工大学理学院，湖北武汉　430070；
2.中国工程物理研究院流体物理研究所，冲击波物理与爆轰物理
国防科技重点实验室，四川绵阳　621900)

摘要：采用任意反射面激光干涉测速(VISAR)系统，对高纯铝(纯度为99.999%)材料开展了层裂实验研究，获得了未完全层裂和完全层裂样品的自由面速度剖面。基于实验测量中观察到的层裂回跳(Pullback)信号的脉冲宽度、速度幅值差异以及回跳信号上升过程中的两次速度斜率变化特征，详细讨论了高纯铝材料从出现损伤到完全断裂的过程中波剖面演化的行为特征。结合“软回收”样品的细观分析，指出这些自由面速度变化特征可能与材料中应力波的能量释放速率以及材料中晶粒的断裂行为密切相关。研究结果可以为延性金属损伤断裂的演化过程提供有意义的认识。

关键词：高纯铝；层裂；自由面速度；演化特征
中图分类号：O521.2；O347.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

层裂是材料在冲击压缩过程中，压缩波在材料前、后自由面反射形成的稀疏波相遇后产生拉伸应力引起的，是冲击载荷造成材料破坏的典型动态断裂方式。迄今为止，人们采用各种加载方式对不同材料进行了层裂实验研究[1-4]，为认识动态拉伸破坏现象提供了许多重要依据[5-6]。层裂行为的实验研究手段主要包括：(1) 通过测量样品后自由面粒子速度历史和材料内部应力历史来分析材料的层裂行为[7-9]；(2) 通过对回收受冲击样品进行损伤统计分析，获得材料的损伤断裂机理和损伤演化行为[10]；(3) 利用X光闪光照相技术、高速摄影技术等，对层裂过程进行记录分析[11-12]。其中第1种方法，即利用任意反射面激光干涉测速(VISAR)系统，直接测量样品后自由面粒子速度随时间的变化，进而获得层裂强度等层裂破坏信息，已经成为人们研究层裂问题的重要实验手段。若材料发生层裂，则新生成的自由面会改变应力波在样品中的传播路径，从而引起应力状态发生变化，这种变化在一定程度上会由样品后界面粒子速度波形反映出来。Chen等人[7]对7种具有不同微观结构的铝(包括3种晶粒度的6061铝合金、2种多晶纯铝、2种不同取向的铝单晶)进行了层裂研究，分析了初始微观结构、冲击加载应力、脉冲宽度以及加载应变率对层裂特征信号的影响，得出许多有意义的结论，但他们主要针对材料完全断裂后的层裂特点进行研究，未涉及材料断裂前的损伤特征。材料中的损伤从成核、长大、最后至贯通的过程中，会表现出与完全断裂时不同的层裂行为。本工作以高纯铝为实验材料，研究铝从出现损伤到完全断裂的过程中自由面粒子速度剖面的变化特征，着重关注未完全层裂和完全层裂时样品自由面速度剖面信号中脉冲宽度和回跳(Pullback)速度随冲击压力的变化，以及具有不同损伤程度的材料中层裂信号波形特征的变化。

* **收稿日期**：2010-07-09；**修回日期**：2010-11-30
基金项目：国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院NSAF联合基金(10876014)；中央高校基本科研业务费专项资金(2010-1a-017)；国家自然科学基金(11072119)
作者简介：祁美兰(1974—)，女，博士，副教授，主要从事高压物理与力学研究. E-mail：emmy_qi@163.com

2 实验技术与方法

实验选用的加载设备为∅100 mm 一级轻气炮。材料由贵州铝厂提供，由北京有色金属研究院轧制成高纯铝棒材，纯度大于 99.999%。实验采用对称碰撞方式，即飞片和样品均为高纯铝。实验条件如表 1 所示，其中 d_s 和 d_f 分别为样品和飞片的厚度。为了控制样品处于未完全或完全层裂状态，飞片撞击速度控制在 140～320 m/s 之间，实测弹速 v_p 见表 1，其中 Shot 2 和 Shot 7 的样品发生完全层裂，其余的均产生不同程度的损伤，未完全层裂。利用 VISAR 可获得样品后自由面速度剖面。图 1 为典型完全层裂样品的后自由面速度信号。速度曲线上，第 1 个速度峰值到第 1 个速度低谷之间的速度差称为回跳速度(Δu_f)，通过分析 Δu_f 可以获得层裂强度和拉伸应变率等。图 1 中 Δt 为脉冲宽度，Δt_1 为拉伸应力增长时间。冲击压力 σ_s 的计算公式为

$$\sigma_s = \rho_0 (c_0 + \lambda u) u \tag{1}$$

式中：ρ_0 为材料密度，c_0、λ 为纯铝的 Grüneisen 状态方程参数[4]，u 为弹速的一半。

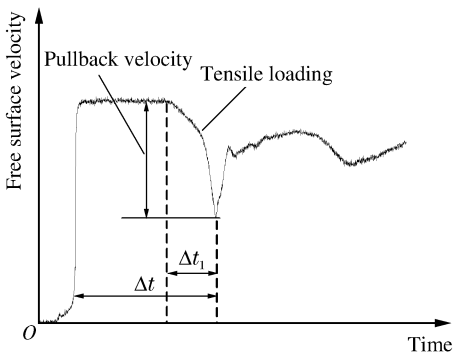


图 1 完全层裂样品的典型自由面速度剖面

Fig. 1 Typical free-surface velocity profile of sample in case of complete spall

表 1 高纯铝的实验条件和实验结果

Table 1 Experimental conditions and results of ultra-pure aluminum

Shot No.	d_s/(mm)	d_f/(mm)	v_p/(m/s)	σ_s/(GPa)	Δu_f/(m/s)	Lamination state
Shot 1	4.01	2.00	219.7	1.6	172	Incomplete spall
Shot 2	3.98	1.99	300.5	2.3	201	Complete spall
Shot 3	6.01	3.00	149.6	1.1	136	Incomplete spall
Shot 4	6.00	3.01	196.9	1.5	154	Incomplete spall
Shot 5	5.99	3.01	215.4	1.6	166	Incomplete spall
Shot 6	6.01	3.00	236.3	1.8	167	Incomplete spall
Shot 7	6.00	3.01	317.9	2.4	173	Complete spall

3 自由面速度剖面特征分析

3.1 冲击压力对脉冲宽度的影响

将 Shot 3～Shot 7(样品厚度为 6 mm)的实测自由面粒子速度 u 与弹丸速度 v_p 之差作为纵坐标，时间 t 作为横坐标，可以得到回跳速度起点在同一高度的自由面速度剖面图，如图 2 所示。从图 2 中可以看出：当冲击速度为 149.6 m/s 时，脉冲宽度明显比完全层裂时(冲击速度为 317.9 m/s)的脉冲宽度宽；随着弹丸速度接近 317.9 m/s，脉冲宽度变化减小。在 Chen 等人[7]的实验中，弹丸速度从 501 m/s 变化到 2 331 m/s，相同厚度的 1060 铝的自由面速度脉冲宽度只有轻微的变化。对比实验结果可知，未完全层裂信号的脉冲宽度受弹丸速度的影响较大。这是因为在材料中由稀疏波相互作用产生的使损伤成核长大的拉伸应力增长时间(即图 1 中的 Δt_1)与弹丸速度有关：低速冲击时，拉伸应力增长缓慢，Δt_1 相对较长；当材料发生完全层裂(高速冲击)时，拉伸应力增长迅速，Δt_1 减小，脉冲宽度减小；当弹丸速度接近或高于完全层裂的弹丸速度时，拉伸应力的增长时间相近，脉冲宽度变化不明显。图 3 给出了 5 发实验中冲击压力与脉冲宽度的关系。可见，Shot 5、Shot 6 和 Shot 7 的脉冲宽度接近，而 Shot 3 和 Shot 7 的脉冲宽度相差较远。

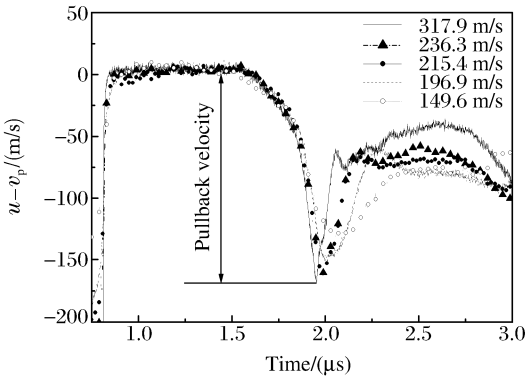


图 2 回跳速度起点在同一高度的自由面速度剖面

Fig. 2 Free-surface velocity profiles with same baseline of the pullback velocities

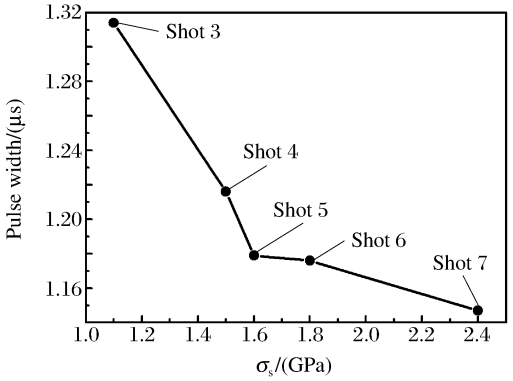


图 3 脉冲宽度随冲击压力的变化

Fig. 3 Variation of pulse width with shock pressure

3.2 冲击压力对回跳速度的影响

将弹丸速度相近、飞片和样品厚度均不同的实验(Shot 1 和 Shot 5)实测自由面速度剖面进行对比,观察脉冲宽度对回跳速度的影响,如图 4 所示。可以看出,两发实验的脉冲宽度相差近 1.5 倍,但自由面速度下降的差别很小,即回跳速度几乎相同,甚至连回跳速度的细微特征都很相似,说明高纯铝的自由面回跳速度几乎与材料中的压缩脉冲宽度无关,只受冲击压力的影响。

图 5 给出了 7 发实验样品的自由面回跳速度与冲击压力的关系。由图 5 可知,作用于样品的冲击压力与回跳速度呈分段线性关系。对于厚度为 6 mm 的样品,发生完全层裂前,随着冲击压力的增加,回跳速度变化较为明显,当冲击压力达到某个临界值时,回跳速度基本保持不变。对于厚度为 4 mm 的样品,从出现损伤到完全层裂,冲击压力对回跳速度的影响比较明显,如冲击压力相同的 Shot 1 和 Shot 5 的回跳速度之差为 6 m/s,而同样压力下完全层裂样品的回跳速度却相差 28 m/s(如图 5 中虚线所示),说明薄样品的回跳速度更容易受冲击压力的影响。

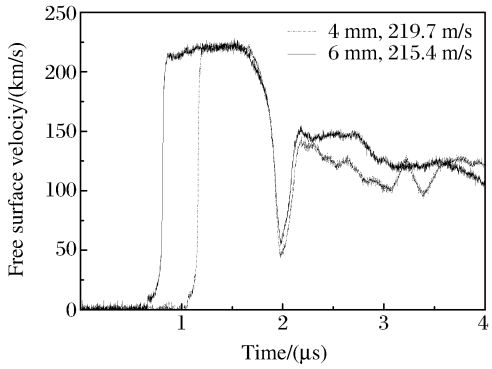


图 4 不同厚度铝样品的自由面速度剖面

Fig. 4 Free-surface velocity profiles of aluminum samples with different thicknesses

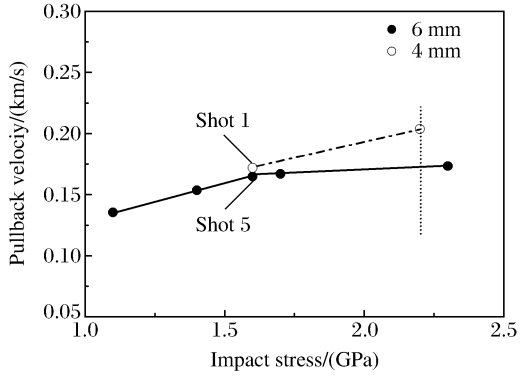


图 5 冲击压力对不同厚度铝样品回跳速度的影响

Fig. 5 Effect of impact pressure on the pullback velocity of aluminum samples with different thicknesses

3.3 回跳信号中的两处速度突变

在弹丸撞击速度为 317.9 m/s 的样品自由面速度曲线上,从速度最低点向上回跳的过程中,速度曲线出现了两次明显的斜率变化,如图 6 所示。第 1 次变化发生在初始快速上升转向缓慢上升阶段(见图 6 中圆圈 1),这一特征在材料未完全层裂的自由面速度剖面中没有发现。Chen 等人[7]在实验中也观察到了这一现象,称其为“Shoulder 效应”。他们发现:单晶铝中出现 Shoulder 效应所需的压力比其它铝低,如在 4 GPa 压力下铝单晶信号中会表现出这一特征,而 1060 铝却需要 9 GPa 的冲击压力;

Shoulder 效应随冲击压力的增加会变得更加明显;此外,Shoulder 效应除了与冲击压力有关,还依赖于晶粒尺寸的变化。在本实验中:当冲击压力为 2.2～2.3 GPa 时,在样品的层裂信号中即出现明显的 Shoulder 效应,这一压力远比 1060 铝所需的压力低。此外,材料还未完全断裂时就已表现出 Shoulder 效应(如图 7 中的 Shot 6),说明材料在由损伤成核、长大到贯通导致断裂的过程中,Shoulder 效应是逐渐出现的,这可能是由材料中出现损伤后应力波的能量释放速率不同造成的。在低速冲击下,成核的孔洞较少,能量释放较缓慢;随着弹丸速度的增加,孔洞会聚成更大的孔洞,使能量快速释放,速度上升速率越来越大,达到一定速度时会表现出 Shoulder 效应,曲线上升变得越来越陡,如图 7 中 1 号线所示。

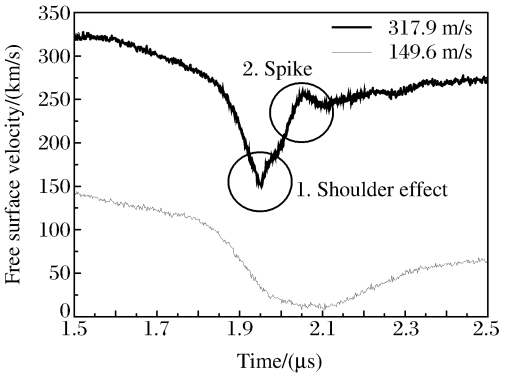


图 6 自由面速度曲线上的两处“速度突变”

Fig. 6 Two “sudden changes” in the free-surface velocity profiles

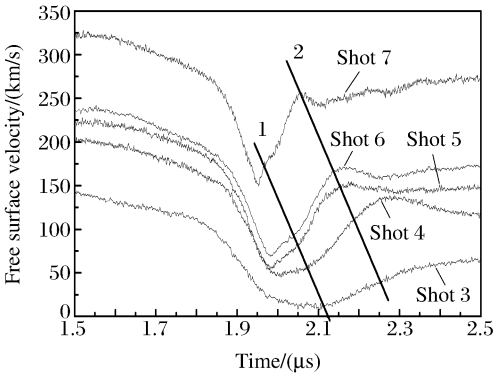


图 7 不同冲击压力下的 Shoulder 效应及尖峰现象

Fig. 7 Shoulder effect and spikes under different impact stresses

第 2 次斜率变化发生在速度第 2 次上升到最大值时,速度从最大值突然下降,形成一个“尖峰信号”(见图 6 中圆圈 2)。当弹丸速度为 149.6 m/s 时,没有出现尖峰;随着弹丸速度的增加,尖峰变得越来越明显(见图 7 中 2 号线)。该现象在单晶铜[13-14]和单晶铝[15]中都出现过,而在多晶材料中则很少观察到,这可能与材料的断裂物理机制相关。本实验中:在低速冲击下,材料中的损伤主要成核在晶界或二相粒子处(如图 8 所示);由于高纯铝的晶粒较大,高速冲击下除了沿晶界或二相粒子处孔洞生长贯通外,还会发生穿晶断裂,如图 9 所示,能量通过穿晶断裂的方式快速释放,自由面粒子速度瞬间突然增加,这很可能是单晶材料断裂时表现出尖峰的原因。

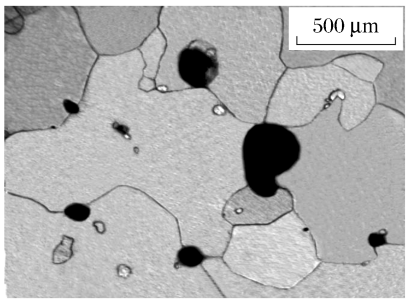


图 8 冲击速度为 196.9 m/s 时样品中的晶粒与损伤

Fig. 8 Grains and damages in the sample suffered with 196.9 m/s impact velocity

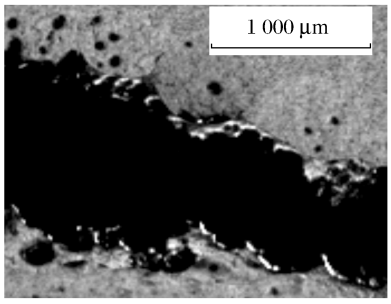


图 9 冲击速度为 317.9 m/s 时层裂样品的金相图

Fig. 9 Metallographic photo of the sample suffered with 317.9 m/s impact velocity

4 结 论

对高纯铝样品进行了弹丸速度为 149.6～317.9 m/s 的平板撞击实验,使样品产生部分层裂及完全断裂损伤。通过分析样品层裂回跳信号的脉冲宽度、速度幅值之间的差异以及回跳信号上升过程中出

现的两次速度斜率的变化,发现:对于未完全层裂和完全层裂样品,冲击压力对样品自由面速度信号中脉冲宽度、回跳速度以及回跳信号中速度突变的影响不同。结合"软回收"样品的细观分析,认为自由面速度变化特征可能与材料中应力波的能量释放速率以及材料中晶粒的断裂行为有密切关系。研究结果可为延性金属损伤断裂的演化过程提供有意义的认识。

感谢经福谦院士、陈大年教授及李平研究员给予的帮助。

References:

[1] Seaman L, Curran D R, Shockey D A. Computational Models for Ductile and Brittle Fracture [J]. J Appl Phys, 1976, 47(11): 4814-4826.

[2] Golubev V K, Pogorelov A P. Effect of Loading Conditions and Initial State on the Spall Fracture of an Explosive RDX-Based Compound [J]. J Appl Mech Tech Phys, 1999, 40(5): 791-795.

[3] Fortov V E, Kostin V V, Eliezer S. Spallation of Metals under Laser Irradiation [J]. J Appl Phys, 2008, 70(8): 4524-4531.

[4] Tollier L, Fabbro R, Bartnicki E. Study of the Laser-Driven Spallation Process by the Velocity Interferometer System for Any Reflector Interferometry Technique. Ⅰ. Laser-Shock Characterization [J]. J Appl Phys, 1998, 83(3): 1231-1239.

[5] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic Failure of Solids [J]. Phys Rep, 1987, 147(5-6): 303-313.

[6] Zhu W H, Yoshida M. Spall Strength of Thin Aluminum Foils at Ultra High Strain Rate [J]. J Mater Sci Lett, 2002, 21(20): 1569-1572.

[7] Chen X, Asay J R, Dwivedi S K. Spall Behavior of Aluminum with Varying Microstructures [J]. J Appl Phys, 2006, 99(2): 023528.

[8] Romanchenko V I, Stepanov G V. The Dependence of Critical Stress upon the Time Parameters of Load at Spalling in Copper, Aluminum, and Steel [J]. J Appl Mech Tech Phys, 1980, 21(4): 141-157.

[9] Xu W W, Tang Z P, Zhang X H. Stress Wave Analysis of Abnormal Spall in Metal Target Relating to Phase Transition [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(1): 18-23. (in Chinese)
徐薇薇,唐志平,张兴华. 相变引起金属靶板异常层裂的应力波分析 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(1): 18-23.

[10] Qi M L, He H L, Yan S L. Critical Fracture Behavior of High Purity Aluminum under Impact Loading [J]. Acta Phys Sin, 2007, 56(10): 5965-5968. (in Chinese)
祁美兰,贺红亮,晏石林. 动态拉伸加载下高纯铝破坏的临界行为研究 [J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5965-5968.

[11] Bread B R, Mader C L, Venable D. Technique for the Determination of Dynamic-Tensile-Strength Characteristics [J]. J Appl Phys, 1967, 38(8): 3271-3275.

[12] Bontaz-Carion J, Pellegrini Y P. X-Ray Microtomography Analysis of Dynamic Damage in Tantalum [J]. Adv Eng Mater, 2006, 8(6): 480-486.

[13] Schwartz A J, Cazamias J U, Fiske P S, et al. Grain Size and Pressure Effects on Spall Strength in Copper [J]. AIP Conf Proc, 2002, 620: 491-494.

[14] Minich R W, Cazamias J U, Kumar M, et al. Effect of Microstructural Length Scales on Spall Behavior of Copper [J]. Metall Mater Trans A, 2004, 35(9): 2663-2673.

[15] Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V, et al. Spallations near the Ultimate Strength of Solids [J]. AIP Conf Proc, 1994, 309: 1043-1052.

Characteristics Analysis of Free-Surface Velocity Profiles of Ultra-Pure Aluminum

QI Mei-Lan[1,2], LUO Chao[1], FAN Duan[1], HE Hong-Liang[2]

(1. *School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *China*;
2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: A series of plate impact experiments were conducted to probe into the free-surface velocity profiles characteristics of ultra-pure aluminum (Purity: 99.999%) by a velocity interferometer system for any reflector (VISAR). Based on the observed differences of pullback signals in amplitude, pulse width, and two "sudden changes", the wave profile evolution during fracture process of ultra-pure aluminum from incipient spall to complete rupture is discussed in detail. The reasons for these change behaviors are analyzed with the mesoscopic analysis of "soft-recovery" sample. This paper points out that these characteristics are possibly related to the release rate of stress wave energy and the fracture behavior of material grain. These analysis results are helpful to understand the evolution process of ductile metal dynamic damage.

Key words: ultra-pure aluminum; spall; free-surface velocity; evolution characteristics

第九届全国爆炸力学学术会议第一轮(征稿)通知

经中国力学学会批准,第九届全国爆炸力学学术会议计划于 2012 年 7 月底在青海省西宁市举行,本次会议由中国力学学会爆炸力学专业委员会主办,中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室承办。会议旨在对爆炸力学有关研究领域近年来取得的新进展开展交流和讨论,以便更好地促进本学科的发展,主要包括下列 11 个专题的内容,望广大从事爆炸力学及相关领域研究的专家、学者踊跃投稿,现将有关具体事宜通知如下。

一、征文范围

(1) 爆炸驱动与冲击加载技术
(2) 应力波理论与效应
(3) 材料本构关系与动态断裂
(4) 爆炸冲击效应及其应用
(5) 爆轰学与钝感高威力炸药技术
(6) 结构动态响应与安全防护
(7) 冲击吸能与应用
(8) 爆炸加工与爆破工程
(9) 爆炸冲击实验与诊断技术
(10) 爆炸与冲击数值模拟
(11) 其它爆炸力学问题

二、征文要求

(1) 凡未在国内外学术刊物和会议上发表过的论文均可投稿,所投稿件需通过本单位保密审查。会议现接收论文全文。

(2) 来稿请用 Word 文档编排,内容包括题目(二号黑体)、作者姓名(小四号仿宋)、单位、地址、邮编(均为小五号宋体)、摘要(五号宋体)、关键词(五号仿宋)、正文(小四号宋体)、图表和参考文献等。

(3) 请将稿件通过电子邮件发送至会议专用邮箱(bzlxhy2012@163.com),投稿截止日期为 2012 年 4 月 20 日。请在稿件首页右上角注明专题代号和作者通讯方式。

所有来稿均交由会议学术委员会审稿,审查优秀的稿件将推荐在《爆炸与冲击》或《高压物理学报》增刊上发表。

三、投稿联系方式

投稿专用邮箱: bzlxhy2012@163.com; 传 真: 0816-2485139

联系人: 王 影(Tel: 0816-2490042,13989285830); 安焕新(Tel: 0816-2485105,13689678097)

通信地址: 四川绵阳 919 信箱 110 分箱,邮政编码: 621900

中国力学学会爆炸力学专业委员会
中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室
2011 年 12 月