

文章编号 1004-924X(2013)12-3008-07

白光轴向色差技术用于材料动态损伤测量

彭 辉^{1,2}, 李 平^{1,2*}, 裴晓阳², 贺红亮², 祁美兰³

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

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重点实验室, 四川 绵阳 621900;

3. 武汉理工大学 理学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 实验研究了轴向色差测试技术用于动态损伤样品截面形貌测量的可行性, 对材料动态损伤的损伤程度进行了高精度的表征与量化。首先, 采用基于白光轴向色差的表面轮廓测试技术, 对动态冲击实验“软回收”得到的样品截面进行测量; 然后, 对测试数据进行重构, 获得了样品截面二维图像和表面三维轮廓形貌。最后, 针对该测试方法获得的数据建立了损伤计算方法, 并利用该方法计算了材料的损伤量。结果表明: 该技术能对样品截面进行大范围连续测量(6.9 mm × 9.999 mm), 获得样品截面清晰的三维形貌, 并且将损伤度曲线的分辨率提高到 3 μm。得到的结果显示: 基于白光轴向色差的测试技术能够实现材料动态损伤的大范围、高精度连续测量, 测试工作量小, 计算损伤的方法简单, 能有效地提高损伤度曲线的分辨率。

关键词: 白光干涉术; 表面轮廓测量; 轴向色差; 动态损伤材料; 量化分析

中图分类号: O436.1; TB303 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3008

Measurement of dynamic damaged materials by white light axial chromatic aberration

PENG Hui^{1,2}, LI Ping^{1,2*}, PEI Xiao-yang², HE Hong-liang², QI Mei-lan³

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*; 2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*;

3. *School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

* *Corresponding author, E-mail: lp0703@263.net*

Abstract: The feasibility of morphologic measurement for Dynamic Damaged Materials by the white light axial chromatic aberration method was explored, and the internal dynamic damage of materials was characterized and quantized precisely. First, the surface profile measurement technique based on white light axial chromatic aberration was used to measure the cross-section of samples recovered softly from dynamic impact experiments. Then, the cross-section image and 3D surface topography were obtained by reconstruction of the test data. Finally, based on the test data, a new method to calculate the damage of samples was established and the damage curve of the samples was calculated. The re-

收稿日期: 2013-04-22; **修订日期:** 2013-06-08.

基金项目: 国防基础科研项目资助项目 (No. B1520110003); 中国工程物理研究院科学技术基金重点项目 (No. 2011A0201002); 国家自然科学基金资助项目 (No. 11202196)

sults indicate that the axial chromatic aberration measurement can measure a wide range cross-section of the sample(6.9 mm×9.999 mm) without disconnection and can receive a clearly three-dimensional morphology of the sample cross-section. The resolution of the damage curve can be improved to 3 μm. It means that the white light axial chromatic aberration method used to measure the dynamic damage sample is effectively. It can implement a continuous measurements with large-scale and high-precision and show its characteristics in smaller operation, simpler calculation and higher resolution.

Key words: white light interferometry; surface profile measurement; axial chromatic aberration; dynamic damage material; quantitative analysis

1 引 言

材料的损伤是物理学、力学、材料科学、地球科学等领域广泛关注的课题之一,其命题虽简单,但是问题却复杂^[1],是与湍流难度相当的世界性难题^[2]。层裂作为“两类动态断裂”^[3]之一,一直是理论界和工程界研究的重点课题。层裂是在冲击作用下,前后界面反射两列相向行驶的稀疏波相互作用,产生拉伸应力,材料内部发生微孔洞形核、长大、贯穿直至断裂的过程。

自 1914 年 Hopkinson^[4]首次发现层裂现象以来,学者们针对层裂的“力学判据”开展了大量研究^[5]。1972 年, Davison 和 Stevens^[6]基于连续介质理论提出了“损伤度”概念,将材料累计的损伤与材料断裂过程中的微结构变化联系起来,试图建立层裂的“物理判据”。在“损伤度”的基础上,层裂的研究取得了长足的发展^[7-10],因此,损伤度在材料动态损伤研究中具有重要意义。其中, Seaman^[11]通过对软回收样品截面的金相图片进行孔洞统计,从实验上建立了获得“损伤度”曲线的方法。 Kondrokhina^[12]通过测试多个截面的金相照片研究了材料的内部损伤。 Belak^[13]和 Bontaz-Carion^[14]都利用 CT 扫描材料内部真实的孔洞分布,但是 CT 扫描技术受到光源和成本的限制,难以进行大范围的使用和推广。国内祁美兰等^[15-16]改进了 Seaman 的方法,在一定程度上减小了统计的工作量,但其方法通过对样品截面的划分仅能获得约百微米宽度区域的平均损伤度,这对于研究损伤演化的微观观机理略显不足。因此在材料损伤的研究中,探索以较低成本来获得高分辨率损伤度曲线的测试技术显得尤为重要。

近年来,白光干涉技术的应用越来越广

泛^[17-18],已成为光学领域最尖端技术之一^[19],特别是在超精密表面测试中^[20]的应用备受关注。该技术是一种非接触、快速、无损的表面三维形貌测试技术,它通过测量表面点的相对高度来重构表面三维轮廓,具有高精度和较强的抗干扰能力^[21],适合于大范围、高精度、不连续表面的测量。对于具有复杂构型的表面形貌,在保证快速、高精度测量的同时,还需要具备较强的抗干扰能力。因此,本文将白光轴向色差测试技术应用于层裂样品截面测试,籍此提高损伤度曲线的分辨率,研究材料的动态损伤。

2 样品制备与测试

2.1 样品制备

要测量样品截面的三维形貌,首先要对动态实验“软回收”的样品进行制样。本文样品采用材料纯度大于 99.999% 的高纯铝轧制而成。在一级轻气炮上进行冲击实验,采用对称碰撞方式,即飞片和样品均为高纯铝。在撞击实验中采用“软回收”实验装置对样品进行回收。将回收到的样品沿着冲击波加载方向进行切割,对切割后的截面进行研磨、抛光^[16]。由于高纯铝材料很软,延性强,样品容易形成划痕等新缺陷,因此在样品制备过程中要十分谨慎,尽量不要引入新的损伤。

2.2 光学色差测试结构及工作原理

轴向色差技术的测试理论较为成熟^[21-22],样品表面上各个点的空间坐标的测量原理如图 1 所示。白光光源发出的白光经过一个半透半反镜和一个物镜后照射在样品表面。由于白光是由多种单色光组成的,组成白光的各种单色光以不同的焦距聚集在物镜一侧,形成各自的单色影像。如图所示,波长为 λ_m 的单色光在样品表面聚焦,经

过物镜和半透半反镜到达空间滤波,只有在样品表面聚焦的单色光能经过空间滤波进入分光计,在视觉信号处理中形成峰值,将位置信息转换为波长信息。检测形成峰值的波长,通过计算获得被测点与物镜之间的相对高度。样品与物镜的相对位置变化由工作台的水平移动控制,从而实现样品表面的逐点扫描。

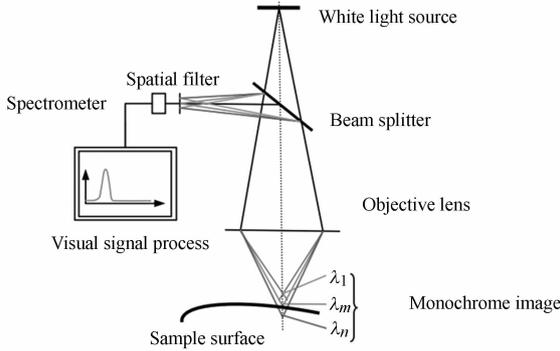


图 1 轴向色差测试原理

Fig. 1 Principle of axial chromatic aberration measurement

2.3 损伤度计算

一般将样品截面上受损区域面积与总面积之比定义为材料的损伤度^[23]。通过分析高度值,将所有测试点区分为受损区域和基体。若测试点间距为 Δ ,则每个测量点在截面上代表 Δ^2 大小的面积。设第 i 行(或列)的数据内处于损伤区域的点数为 n_i ,则损伤区域面积为:

$$S_s = n_i \times \Delta^2. \quad (1)$$

若损伤区域所在的行(或列)测量的总点数为 N_i ,则行(或列)所代表的面积为:

$$S = N_i \times \Delta^2. \quad (2)$$

则该行(或列)所代表的面积内,损伤度为:

$$D_i = \frac{S_s}{S} = \frac{n_i \times \Delta^2}{N_i \times \Delta^2} = \frac{n_i}{N_i}. \quad (3)$$

即任意行(或列)数据内样品的损伤度为处于损伤区域的点数与总点数之比。利用公式(3)对测试样品所有行(或列)的数据进行计算,可以获得整个样品截面的损伤度。损伤度曲线的分辨率为两个相邻点之间的距离,这与测试点之间的间距相同。利用公式(4)可以计算 $k \times \Delta$ 宽度范围内的平均损伤度,即得到分辨率为 $k \times \Delta$ 的损伤度曲线。通过改变 k 值,可以计算测试点距任意整数倍分辨率的损伤度曲线。

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}. \quad (4)$$

3 结果与讨论

3.1 表面形貌

图 2 所示为采用金相显微镜获得的样品截面图像。从图中可以观察到明显的大、小孔洞,以及它们在截面上的位置关系,但是缺少纵向高度信

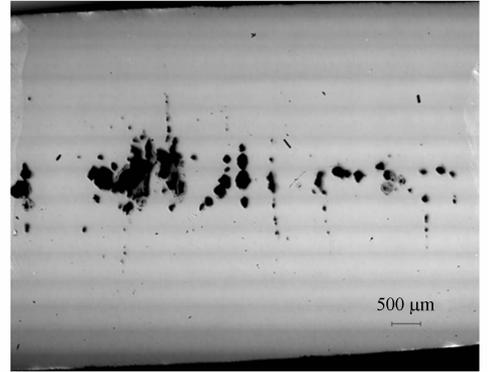


图 2 样品截面图像

Fig. 2 Cross-section of sample measured by metal-lurgical microscope

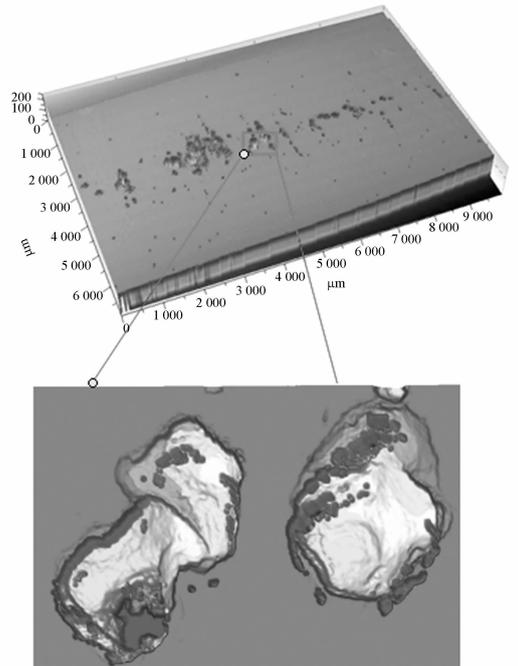


图 3 样品截面轮廓

Fig. 3 Cross-sectional profile of sample measured by axial chromatic aberration technology

息,不能获知孔洞的内部形貌。利用轴向色差测试技术对该样品截面逐点扫描测试,测试点距为 $3\ \mu\text{m}$,测试点数量为 $2\ 301 \times 3\ 334$,获得各点的空间坐标信息。图 3 为重构测试数据获得的样品截面三维形貌。由截面形貌的局部放大图可知,大孔洞内部还存在着一定数量的尺寸较小的孔洞,这是利用金相显微镜难以获得的信息。通过观察发现,孔洞之间的空间位置关系各不相同,断面截面的空间拓扑结构十分复杂。

图 4 为图 3 局部轮廓第 124 行的二维轮廓线,二维轮廓展示了样品内表面的起伏情况以及孔洞内部的剖面形状。两个较大孔洞的二维轮廓线形貌存在较大差异,孔洞的深度分别为 $130\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 。通过对比发现,白光轴向色差测试技术不仅能实现大范围地连续测量,而且能保证良好的精度,为结果分析提供金相照片所不能提供的纵向深度信息。

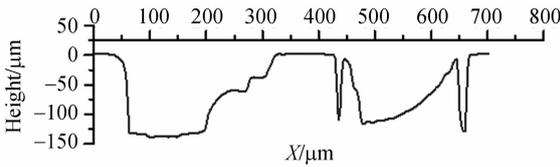


图 4 第 124 行二维轮廓线

Fig. 4 Two dimensional profile of row 124

3.2 损伤度曲线

祁美兰^[24]利用体视金相学中的 Schwartz-Saltykov^[25]方法对本文所述动态实验的同一实验样品截面的孔洞进行统计分析,获得了相应的损伤曲线,其主要损伤区域(1.0~2.5 mm)内的数据点之间的平均间距为 $100\ \mu\text{m}$ 。本文所测试点的间距为 $3\ \mu\text{m}$ 。为了使本文的空间分辨率与文献[24]的分辨率相当,利用公式(4), k 值取 33,计算损伤度曲线。损伤度曲线对比如图 5 所示,文献[24]获得的最大损伤度为 0.087 7,本文计算的最大损伤度为 0.079 8。两条曲线形貌相似,吻合度较高,由此说明本文采用的测试技术和计算方法是合理可行的。

图 6 为利用公式[3]计算获得的分辨率为 $3\ \mu\text{m}$ 的损伤度曲线与文献[24]的对比。从对比曲线可以看出,两条损伤度曲线在形状上存在较大的差异,文献[24]的损伤度曲线值存在一个单一的峰值,而本文的高分辨率曲线存在两个峰值,分

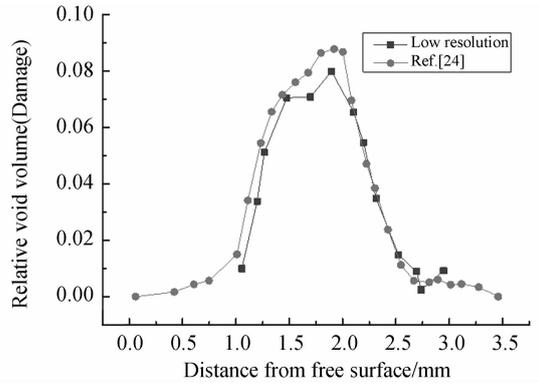


图 5 低分辨率损伤度曲线对比

Fig. 5 Comparison of low resolution damage curves between this work and ref. [24]

别为 0.106 6 和 0.115 5,均大于文献[24]的最大值。文献[24]和本文 k 值取 33 计算所得的损伤度曲线上,每个数据点是样品截面上约 $100\ \mu\text{m}$ 宽度范围内的平均损伤度,其平均化的范围较大,掩盖了损伤度曲线双峰结构的本质。通过对比发现,本文的测试方法不仅能将损伤度曲线的分辨率提高到 $3\ \mu\text{m}$,同时能降低测试和计算的工作量。

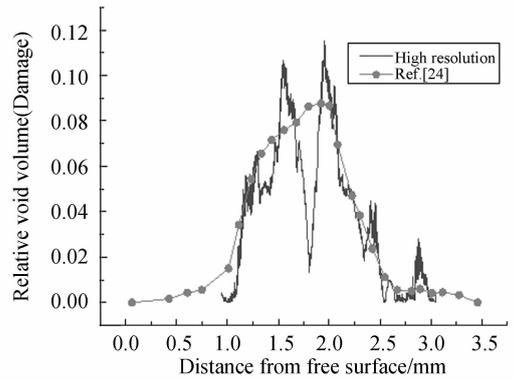


图 6 高分辨率损伤度曲线对比

Fig. 6 Comparison of high resolution damage curves between this work and ref. [24]

4 结 论

本文从实验上探索了轴向色差测试技术用于动态损伤样品截面形貌测量的可行性。与传统的金相照片相比,该测试能提供纵向深度信息,获得截面上孔洞的内部信息。轴向色差测试技术具有较强的抗干扰能力,能实现复杂截面形貌的测量。同时还可以实现大范围、高精度的连续测量,实验

的测试范围为 $6.9 \text{ mm} \times 9.999 \text{ mm}$, 能将损伤度曲线的分辨率提高到 $3 \mu\text{m}$ 。实验结果表明, 高纯铝材料的内部损伤具有复杂的空间拓扑结构, 孔洞内部形貌复杂。对比损伤度曲线发现, 当曲线分辨率为 $99 \mu\text{m}$ 时, 与前人的结果具有较好的吻合性; 但是当分辨率为 $3 \mu\text{m}$ 时, 损伤度曲线将体

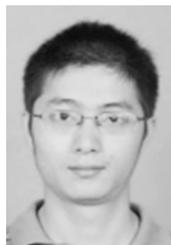
现更多的损伤局域化信息。本文所提出的测试方法和数据处理方法简单, 工作量小, 还能极大地提高损伤度曲线的分辨率。本文将轴向色差技术用于动态损伤样品的测试, 此项工作对进一步研究材料动态损伤的损伤演化动力学、损伤机理、截面特征的特征和量化有着现实意义。

参考文献:

- [1] 余茂宏. 强度理论百年总结[J]. 力学进展, 2004, 34 (4): 529-560.
YU M H. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century [J]. *Advances in Mechanics*, 2004, 34 (4): 529-560. (in Chinese)
- [2] BAZANT Z P, CHEN E P. Scaling of structural failure[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1997, 50 (10): 593-627.
- [3] 陈大年, 王德生, 马松合, 等. 两类动态断裂[J]. 爆炸与冲击, 1987, 7 (1): 27-33.
CHEN D N, WANG D SH, MA S H, *et al.*. Two kinds of dynamic fracture[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1987, 7 (1): 27-33. (in Chinese)
- [4] HOPKINSON B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1914, 89(612): 411-413.
- [5] BREAD B R, MADER C L, VENABLE D. Technique for the determination of dynamic-tensile-strength characteristics[J]. *Journal of Applied Physics*, 1967, 38(8): 3271-3275.
- [6] DAVISON L, STEVENS A L. Continuum measures of spall damage[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43 (3): 988-994.
- [7] WILLIAMS C, LOVE B. Dynamic failure of materials: a review[R]. *Army Research Lab Aberdeen Probing Ground Md Weapons and Materials Research Directorate*, No. ARL-TR-5275, 2010: 1-35.
- [8] CURRAN D R, SEAMAN L, SHOCKEY D A. Dynamic failure of solids[J]. *Physics Reports*, 1987, 147 (5&6): 253-388.
- [9] MEYERS M A, AIMONE C T. Dynamic fracture (spalling) of metals [J]. *Progress in Materials Science*, 1983, 28: 1-96.
- [10] KANEL G I. Spall fracture: methodological aspects, mechanisms and governing factors[J]. *International Journal of Fracture*, 2010, 163 (1-2): 173-191.
- [11] SEAMAN L, CURRAN D R, CREWDSON R C. Transformation of observed crack traces on a section to true crack density for fracture calculations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49 (10): 5221-5229.
- [12] KONDROKHINA I N, PODURETS A M, IGNATOVA O N, *et al.*. Space distribution of damage at early stage of spall fracture in copper [C]. *ECF19, Kazan, Russia*, 2013: 1-12.
- [13] BELAK J, CAZAMIAS J, FIVEL M, *et al.*. Microstructural origins of dynamic fracture in ductile metals[R]. *Lawrence Livermore National Laboratory, San Francisco, USA*, 2004, No. UCRL-TR-202447.
- [14] BONTAZ-CARION J, PELLEGRINI Y. X-ray microtomography analysis of dynamic damage in tantalum[J]. *Advanced Engineering*, 2006, 8 (6): 480-486.
- [15] 祁美兰, 贺红亮. 延性金属材料中损伤分布的统计方法[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30 (8): 23-26.
QI M L, HE H L. Statistic analysis of damage distribution in ductile metals under dynamic impact [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 30 (8): 23-26. (in Chinese)

- [16] DUAN F, QI M L, HE H L. Damage distribution of high purity aluminum under the impact loading [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 160-162: 1001-1005.
- [17] 马小军, 高党忠, 杨蒙生, 等. 应用白光共焦光谱测量金属薄膜厚度[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 17-22.
MA X J, GAO D ZH, YANG M SH, *et al.*. Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 17-22. (in Chinese)
- [18] 张以谟, 井文才, 张红霞, 等. 数字化白光扫描干涉仪的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(6): 560-565.
ZHANG Y M, JING W C, ZHANG H X, *et al.*. Computerized white light scanning interferometer and the application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 560-565. (in Chinese)
- [19] 王淑珍, 谢铁邦, 常素萍. 复合型超精密表面形貌测量仪[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 828-835.
WANG SH ZH, XIE T B, CHANG S P. Combined profilometer for ultra-precision surface topography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 828-835. (in Chinese)
- [20] 涂龙, 余锦, 樊仲维, 等. 并行共焦显微检测技术及其研究进展[J]. *激光与光电子进展*, 2012, 49: 08006.
- TU L, YU J, FAN ZH W, *et al.*. Parallel confocal microscopic detection technique and its research progress [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49: 08006. (in Chinese)
- [21] 王晶, 洪海涛, 邹志华. 基于光学色差传感器的表面粗糙度测量[J]. *仪器技术与传感器*, 2006(10): 4-5.
WANG J, HONG H T, ZOU ZH H. Measurement of roughness surface using optical chromatic sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006(10): 4-5. (in Chinese)
- [22] CHRISTOPHER P, AIKO R, KLAUS K, *et al.*. Diffractive elements for chromatic confocal sensors [J]. *Dgao Proceedings*, 2005: 106-107.
- [23] THISSELL W R. Experimental quantitative damage measurements and void growth model predictions in the spallation of tantalum [J]. 2000, 505: 451-454.
- [24] 祁美兰. 高纯铝拉伸型动态破坏的临界行为研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
QI M L. *Critical Behavior in Dynamic Tensile Fracture of High Purity Aluminum* [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [25] TAKAHASHI J, SUITO H. Evaluation of the accuracy of the three dimensional size distribution estimated from the Schwartz-Saltykov method [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, 34A: 171-181.

作者简介:



彭辉(1986—),男,重庆人,博士研究生,2008年于北京理工大学获得学士学位,主要从事材料动态损伤方面的研究。E-mail: penghui299@163.com



祁美兰(1974—),女,内蒙古人,副教授,1998年于武汉汽车工业大学获得学士学位,2001年,2007年于武汉理工大学分别获得硕士、博士学位,现为美国卡耐基研究所访问学者,主要研究方向为极端条件下固体材料的损伤与断裂、高压物理学。E-mail: emmy_qi@163.com



裴晓阳(1980—),男,河南洛阳人,助理研究员,2002 于复旦大学获得学士学位,2005 年于中国工程物理研究院获得硕士学位,主要从事材料在动态载荷下损伤破坏的实验理论分析和理论研究工作。E-mail: peixiaoyang2000@ sina.com



贺红亮(1963—),男,湖南人,研究员,博士生导师,现为冲击波物理与爆轰物理重点实验室副主任,主要从事材料在高应变率加载下的弹-塑性响应、动态损伤与断裂、结构相变等方面的研究。E-mail: honglianghe@263.net

导师简介:



李平(1966—),男,四川广安人,研究员,博士生导师,1987 年于成都科技大学获得学士学位,1990 年于中国科学技术大学获得硕士学位,2002 年于北京理工大学获得博士学位,现为中国工程物理研究院流体物理研究所科技委委员,主要从事爆炸力学、冲击动力学等方面的研究。E-mail: lp0703@263.net

(版权所有 未经许可 不得转载)