文章编号: 1001-1455(2014)06-0673-06 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)06-0673-06

基于 SHPB 的球形压痕实验方法*

梁浩哲,宋 力
(宁波大学机械工程与力学学院,浙江 宁波 315211)

摘要: 提出一种基于霍普金森压杆装置的动态球形压痕实验方法,通过将硬质合金小球置于 2 个试件中间,实现加载过程中 2 个试件的同时压入,以得到准确的压痕力与位移的关系。利用有限元软件 ABAQUS/Explicit 对该实验方法进行了数值模拟,从实验结果的可行性、准确性等方面,对新实验方法与传统的动态压痕实验方法进行了比较;采用新方法对铝合金材料进行了实验,并得到了压入力-位移曲线等关系。研究结果表明:采用新实验方法能得到较准确的结果,能较真实地描述压痕过程。

关键词: 固体力学;球形压痕;霍普金森压杆;压痕实验
中图分类号: O347 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

利用压痕法测试材料的力学性能已有悠久的历史,与其它的材料性能测试方法相比,压痕法具有无损(微损)、便捷等优点[1-3]。传统的硬度检测就是压痕法的一种应用——通过分析压痕的最终几何量及荷载,给出材料的硬度指标。硬度按照不同的测试方法又可分为布氏、维氏、洛氏、里氏、肖氏等硬度[4]。随着实验技术的进步,已容易通过仪器化的压痕实验获取实验的压入荷载与位移(p-d)曲线,如何从 p-d 曲线中获得更多的材料力学参数成为研究者们关注的问题。W. C. Oliver 等[5]提出了由静态球形压痕力与位移的关系确定金属材料弹性模量的方法。此后,Y. P. Cao 等[6]也进行了该方面的工作;Y. T. Cheng 等[7-8]利用量纲分析方法对压痕实验进行了归纳,并结合有限元数值模拟进行分析,总结出压痕测试的基本原则。Y. P. Cao 等[9]提出了一个分析框架,从球形静压痕实验的 p-d 曲线进行反演,获得幂强化材料的弹性模量、屈服应力及硬化指数等参数。

随着压痕法测试技术的发展,研究者开始将其用于材料动态力学性能的研究。20 世纪 90 年代霍普金森压杆(SHPB)被用于动态压痕测试。G. Subhash等[10]将SHPB入射杆作为加载部件,杆与试件接触端套上锥形压头,分别采用力、位移传感器测试压入力和位移,获得相应的p-d曲线。M. Nilsson[11]采用一维应力波理论通过入射杆与透射杆上的信号来计算压头的压入位移。张新等[12]在上述装置上进行了铜、钛、铝合金动压痕实验研究。G. Subhash 的方法[10]中采用悬臂梁测量位移时程曲线,由于悬臂梁的振动模态比较复杂,各个模态被激发的程度与加载速率有关,应变测量值和端点的位移关系是不确定的,所以无法的到准确的测量结果。M. Nilsson[11]采用了传统的实验方法[10],利用入射、反射波信号来计算压头的位移,但是锥形段的存在以及压头的安装导致其有效性存在疑问。

本文中提出一种采用双试件的球形压痕测试方法;采用有限元软件 ABAQUS/Explicit 对该实验方法进行数值模拟,以评估方法的有效性与准确性;采用新测试方法对 7075 铝合金进行动态压痕实验,研究 7075 铝合金的动态力学性能。

1 动态压痕实验

1.1 实验装置

图 1 为双试件动压痕实验装置示意图。将硬质合金小球放在 2 个试件中间(如图 1(b)所示),以此

* **收稿日期**: 2013-04-25; **修回日期**: 2013-08-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(11272162)
作者简介: 梁浩哲(1988—),男,硕士研究生。

取代传统霍普金森压杆实验装置中的试件。在入射应力脉冲作用下,硬质合金小球同时压入 2 个试件,小球对其两侧试件有相同的压入力,因此能够方便地利用传统霍普金森压杆实验方法测出硬质合金小球压入试件过程中的压入位移和压入力。通过入射杆和透射杆的输出信号可得到材料的 p-d 曲线。

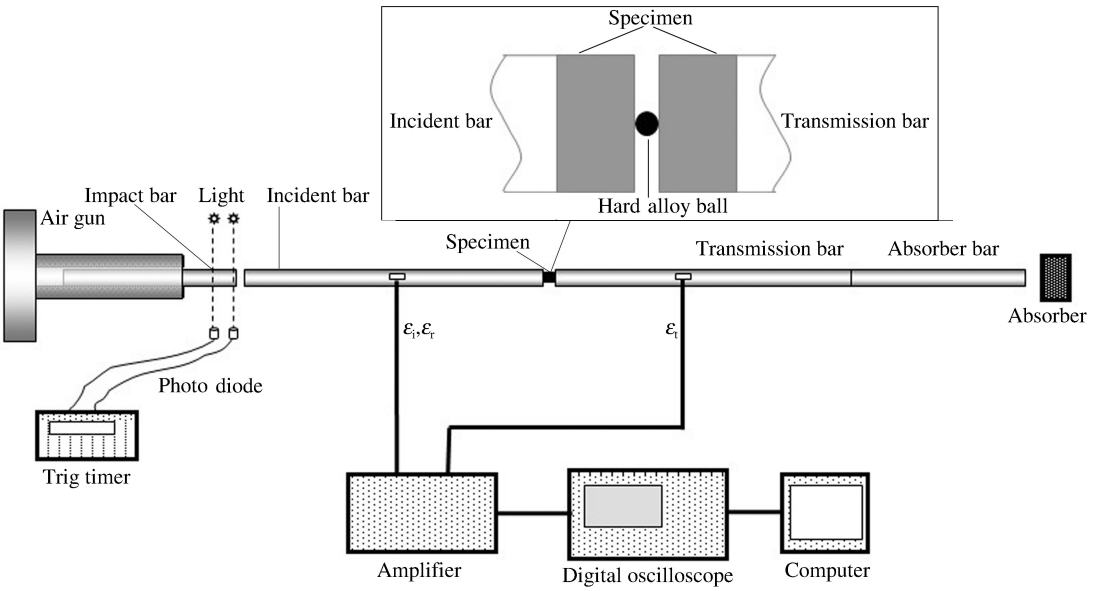

图 1 动态压痕实验装置

Fig. 1 Device for dynamic indentation experiment

1.2 实验数据处理

将测量得到的入射波信号 $\varepsilon_i(t)$、反射波信号 $\varepsilon_r(t)$ 和透射波信号 $\varepsilon_t(t)$,代入式(1),即可获得小球对 2 个试件的压入速度、加速度和压力与时间的关系:

$$\begin{cases} \dot{u}(t)=\dfrac{1}{2}c_0[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t)-\varepsilon_t(t)] \\ u(t)=\dfrac{1}{2}c_0\displaystyle\int_0^t[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t)-\varepsilon_t(t)]\mathrm{d}t \\ p(t)=A_0E_0\varepsilon_t(t) \end{cases} \tag{1}$$

式中:c_0 为应力波在杆件中的传播速度,E_0 为压杆的杨氏模量,A_0 为杆件的横截面面积,$u(t)$ 和 $\dot{u}(t)$ 为每一时刻硬质合金小球压入试件的深度与速度,$p(t)$ 为试件受到的压入力。

2 动态压痕实验的数值模拟

2.1 计算模型

利用有限元软件 ABAQUS/Explicit 中的轴对称模型,对 M. Nilsson 的方法[11] 和本文中提出的新方法进行数值模拟,并将模拟结果与实验结果进行了比对。计算中,试件与杆件之间保持波阻抗匹配:$\rho_s c_s A_s=\rho_0 c_0 A_0$,其中 ρ_s、c_s、和 A_s 分别为试件的密度、弹性波速和横截面面积。子弹为尺寸为∅14.5 mm×400 mm,入射杆与透射杆尺寸均为∅14.5 mm×1 000 mm。钢试件匹配的杆件材料为 60Si2Mn,铝合金试件匹配的杆件材料为铝合金。试件尺寸为∅14.5 mm×6 mm,试件材料模型选用 Johnson-Cook (J-C)本构模型。硬质合金小球的材料为碳化钨,直径为 1.6 mm。材料具体参数见表 1~2,其中:E 为弹性模量,μ 为泊松比,ρ 为密度,A、B、C、n 和 m 为试件的 J-C 本构常数。

图 2 为 2 种试件的加载方式示意图。在入射杆和透射杆中布置波形测量点,在试件两端设置位移测量点。对于 M. Nilsson 的方法[11],采取 2 个不同角度的压头:锥头(45°半锥角如图 2(a)所示)和平头(90°半锥角)。

表 1　杆件及试件的弹性参数

Table 1　Elastic constants of the bars and the specimens

材料	E/GPa	μ	ρ/(g·m^{-3})	材料	E/GPa	μ	ρ/(g·m^{-3})
60Si2Mn	206	0.29	7.80	铝合金	71	0.28	2.70
45 钢	210	0.29	7.80	碳化钨	450	0.28	18.00

表 2　试件的 J-C 本构参数

Table 2　J-C constants of specimens

材料	A/MPa	B/MPa	C	n	m
45 钢	1 150	739	0.014	0.26	1.03
铝合金	369	684	0.008 3	0.73	1.70

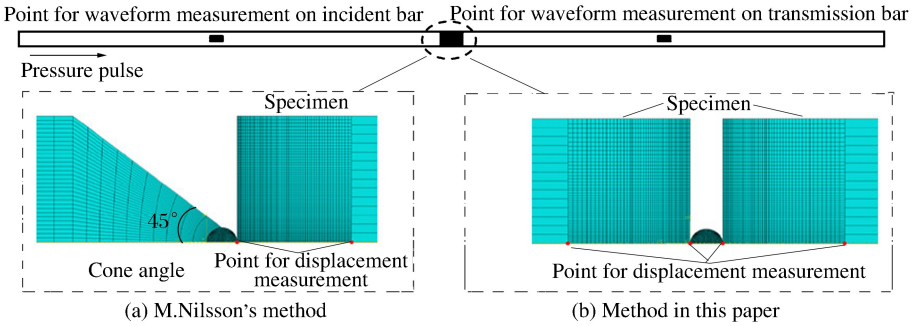

图 2　试件加载方式和位移测量基准点

Fig. 2　Specimen loading patterns and reference points for displacement measurement

2.2　实验的模拟分析

图 3 为根据 M. Nilsson 的实验方法[11]模拟得到的压入深度时程曲线，从图中可以看出，压入深度的计算值与测量值存在较大差异。造成误差的原因主要是应力波在锥形段中的反射透射，会影响最终计算结果。在实验中，小球需要焊接在锥头上，锥头与杆连接通常采用粘接的方式[12]，这使得局部的变形状况变得复杂，也会导致计算结果与实验结果有差异。图 4 为根据本文中实验方法模拟得到的压入深度时程曲线。由于排除了锥头与杆之间的波阻抗不匹配带来的影响，提高了实验的准确性，因此能够得到与位移测量点输出结果较一致的压头压入位移时程曲线。图 4(a)为铝合金计算结果，与测量点测到的结果比较一致；图 4(b)为 45 钢计算结果，虽然与测量点的测试结果存在一定的误差，但与真实压入过程吻合很好。

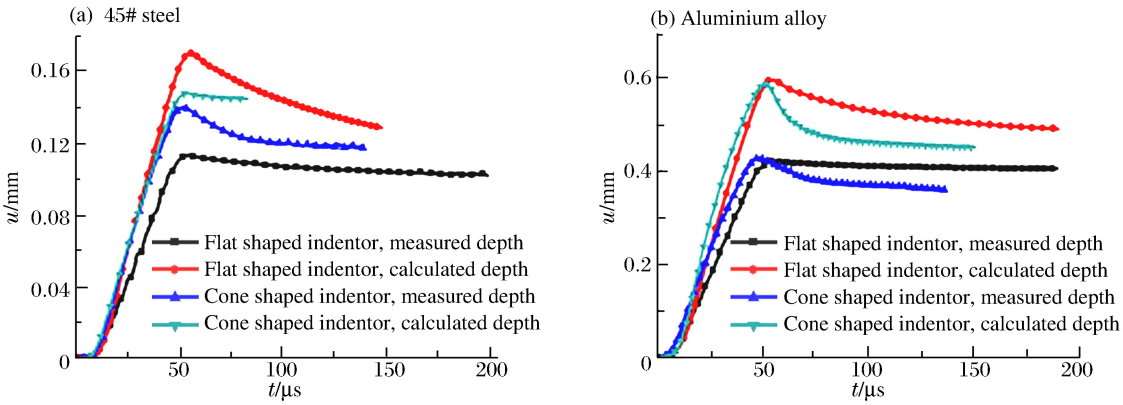

图 3　计算压痕深度与基准点测量压痕深度比较(Nilsson 方法)

Fig. 3　Calculated indentation depths compared with the ones measured from the refence points (in Nillson's method)

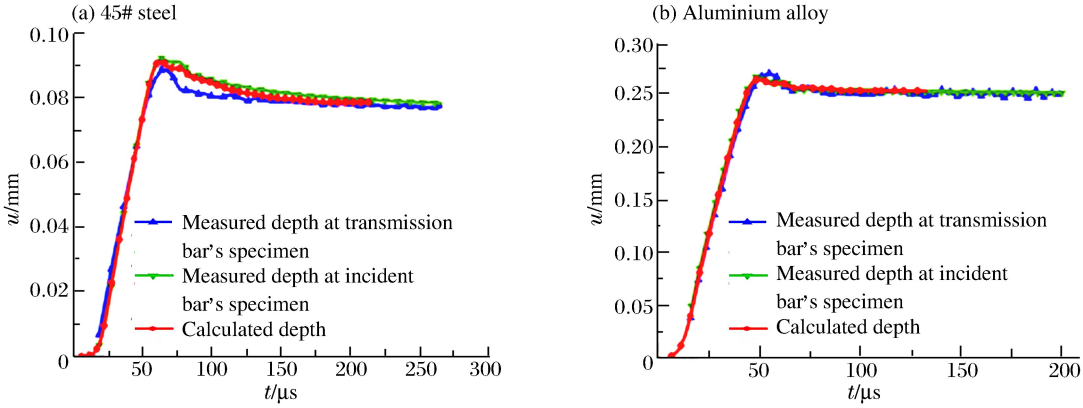

图 4 计算压痕深度与基准点测量压痕深度比较(本文方法)

Fig. 4 Calculated indentation depths compared with the ones measured from the refence points (in this paper)

图 5 为铝合金试件的 Misses 应力云图。由图 5 可以看出,在加载过程中,入射杆端试件在应力脉冲作用下首先与硬质合金小球发生碰撞,获得压痕,然后压力脉冲再通过小球,与透射杆端试件发生作用,最终透射杆端试件得到压痕。图 5 显示在撞击开始阶段,前后试件的压痕存在较小的差异,碰撞发生 10 μs 之后,Misses 应力基本上达到对称,两试件得到相同的压痕深度。

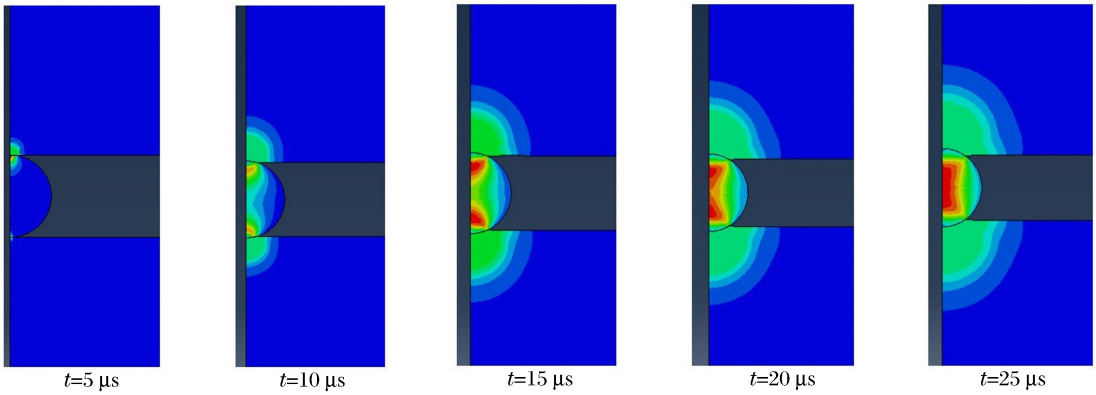

图 5 采用本文方法得到接触过程中的 Misses 应力云图

Fig. 5 Misses stress contours in the contact process using the method in this paper

3 铝合金动态力学性能的实验测量

采用双试件方法对 7075 铝合金试件进行动态压痕实验,实验在∅14.5 mm 霍普金森压杆装置上进行,选用规格为∅14.5 mm×400 mm 的子弹进行打击,得到 3.5、8 和 12 m/s 等 3 种打击速度下的实验结果。图 6 为实验测得的典型波形(电压信号),由于透射波信号非常微弱,透射杆上采用了半导体应变片。

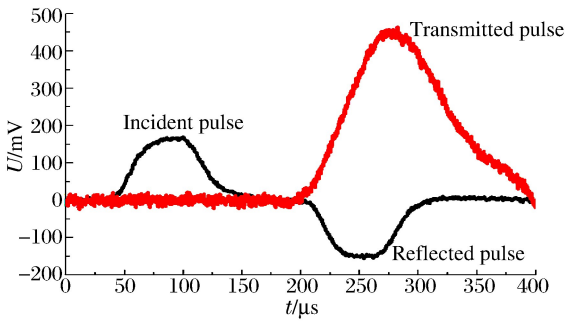

图 6 实验波形图

Fig. 6 Experimental waveforms

图 7 为波形处理得到的相关曲线,其中应变率强化作用明显。由图 5 也可观察到,压痕范围内应变分布非常复杂,在凹痕顶部应变由内向外依次变小(但未到零),应变率难以给出。G. Subhash 等[10]将压痕的压入速度与压痕几何尺寸的比值定义为平均应变率,其中压痕几何尺寸为压痕深度或对角线

的长度，则上述实验的平均应变率分别约为 3.5×10^4、4.0×10^4 和 4.2×10^4 s^{-1}，一般 SHPB 实验很难达到。

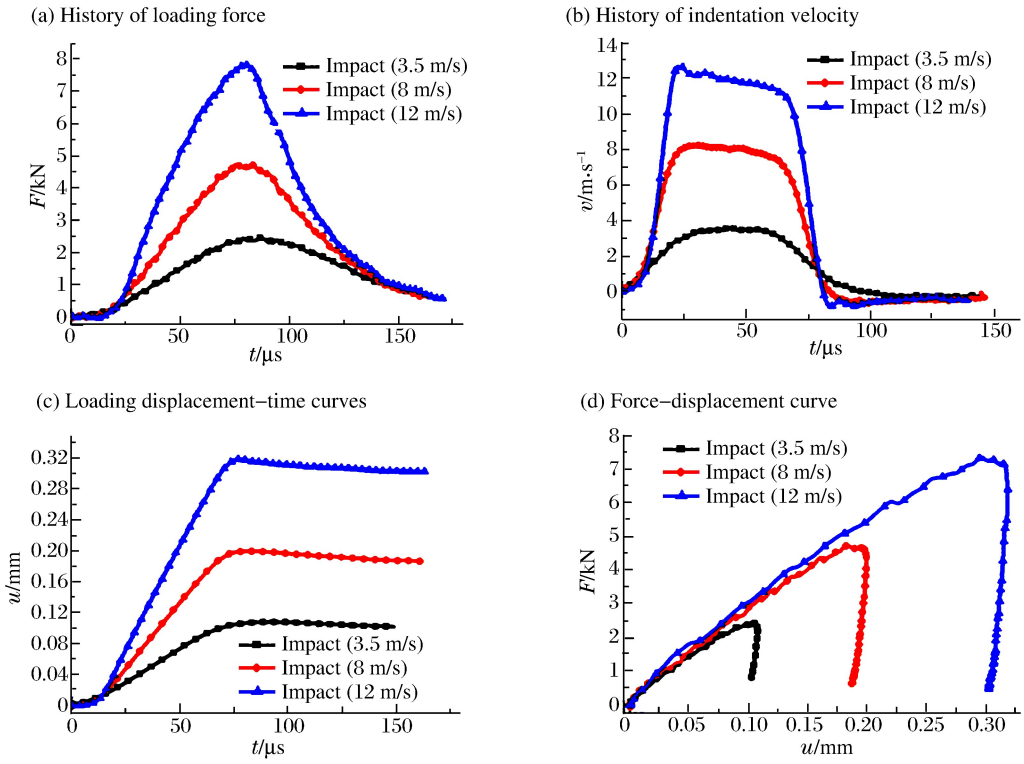

图 7　双试件新方法的波形处理结果

Fig. 7　Waveforms aquired by using the new method with double specimens

4　结　论

提出了双试件动态压痕实验方法，通过数值模拟对其与现有实验方法进行比较，结果表明采用双试件法能够得到较现有方法更准确的压头压入位移-时间曲线，且双试件法的理想实验条件更易满足，实验可靠性更高。在对铝合金材料进行实际实验后，得到 4×10^4 s^{-1} 左右的平均应变率估计值。该方法可在传统 SHPB 上轻易实现，同时数据处理简单，能够用于 $10^4\sim10^5$ s^{-1} 应变率范围内材料动态性能的研究。

参考文献：

[1]　Ahn J H, Kwon D. Derivation of plastic stress strain relationship from ball indentions: Examination of strain definition and pileup effect[J]. Journal of Materials Research, 2001,16(11):3170-3171.

[2]　Hernot X, Bartier O, Bekouche Y, et al. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006,43(14/15):4236-4153.

[3]　Lee H, Lee J H, Pharr G M. A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005,53(9):2046-2063.

[4]　Taber D. A sample theory of static and dynamic hardness[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science, 1948,192(1029):247-274.

[5]　Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992,7(6):1564-1583.

[6]　Cao Y P, Qian X Q, Lu J. On the determination of reduced Young's modulus and hardness of elasticplastic materi-

als using a single sharp indenter[J]. Jounral of Materials Research, 2006,21(1):215-224.

[7] Cheng Y T, Cheng C M. Relationships between hardness, elastic modulus, and the work of indentation[J]. Applied Physics Letters, 1998,73(15):614-616.

[8] Cheng Y T, Cheng C M. Scaling, dimensional analysis and indentation measurements[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2004,44(4):91-149.

[9] Cao Yan-ping, Lu Jian. A new method to extract the plastic properties of metal materials from a instrumented spherical indentation loading curve[J]. Act Materialia,2004,52(13):4023-4032.

[10] Subhash G, Koeppel B J, Chandra A. Dynamic indentation hardness and rate sensitivity in metals[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1999,121(3):257-263.

[11] Nilsson M. Dynamic hardness testing using a Split-Hopkinson pressure bar apparatus[R]. Sweden: Swedish Deference Research Agency, 2002.

[12] 张新,侯兵,李玉龙.基于霍普金森压杆系统的动态压痕实验[J].爆炸与冲击,2011,31(3):256-262.
Zhang xin, Hou Bing, Li Yu-long. Dynamic indentation experiment based on the Split-Hopkinson pressure bar system[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(3):256-262.

A method of spherical indentation experiment based on the split Hopkinson pressure bar system*

Liang Hao-zhe, Song Li

(*Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo* 315211, *Zhejiang, China*)

Abstract: A new technique for testing dynamic spherical indentation of materials was proposed. It was implemented by putting a WC alloy ball between two specimens, one of which was bonded with the input bar and the other was bonded with the output bar. Then the two speciemens were pressed in the process of indentation. With this simple arrangement we can accomplish a very accurate measurment of force and displacement during the indentation. A finite element simulation was carried out by using the ABAQUS/Explicit software to evaluate this new experimental technique. The results show that the new method gives a more accurate result than other dynamic indent experimental methods. In addition, by testing the alumimum alloy materials, the curves of the indentation force and depth were gotten based on the new technique. The investigation diaplays that the technique proposed can porvide more accuate results and refect the indentation process more truely.

Key words: solid mechanics; spherical indentation; SHPB; indentation experiment

* Received 25 April 2013; Revised 26 August 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11272162)
Corresponding author: Liang Hao-zhe, haozheliang2010@yeah.net

(责任编辑 王小飞)