

# 聚乙烯冲击压缩特性实验研究\*

黄秀光<sup>1)†</sup> 傅思祖<sup>1)</sup> 舒桦<sup>1)</sup> 叶君建<sup>1)</sup> 吴江<sup>1)</sup> 谢志勇<sup>1)</sup> 方智恒<sup>1)</sup>  
贾果<sup>1)</sup> 罗平庆<sup>2)</sup> 龙滔<sup>2)</sup> 何钜华<sup>1)</sup> 顾援<sup>1)</sup> 王世绩<sup>1)</sup>

1) (上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2009 年 11 月 3 日收到; 2010 年 1 月 14 日收到修改稿)

利用神光 II 装置第九路输出的倍频激光, 采用直接驱动方式研究了聚乙烯 ( $\text{CH}_2$ ) 材料的冲击压缩特性. 实验表明聚乙烯冲击波阵面自发辐射较强, 冲击波在聚乙烯台阶中的传播比较稳定. 采用阻抗匹配方法, 以铝作标准材料, 测量了聚乙烯的冲击绝热线, 聚乙烯冲击压强达 0.54 TPa, 冲击波速度测量相对扩展不确定度  $\sim 2\%$  ( $K=2$ ), 实验数据的一致性较好, 与已有低压实验数据及状态方程解析模型比较符合.

**关键词:** 聚乙烯, 冲击绝热线, 自发辐射, 倍频激光

**PACC:** 6250, 5235T, 6490

## 1. 引言

物质在超高压高温下的状态方程 (EOS) 测量在现代物理中的许多领域都是非常感兴趣的, 具有重要的应用价值<sup>[1-4]</sup>. 例如, 在激光惯性约束聚变 (ICF) 领域, 燃料的压缩过程就非常关键地依赖于燃料及靶丸壳层材料的状态方程特性, 人们期望通过数值模拟来准确地预判和分析这一物理过程及实验数据, 就需要有可靠的燃料及靶丸壳层材料的状态方程数据作支撑<sup>[5]</sup>. 碳氢聚合物 (塑料) 在 ICF 研究中起到了非常重要的作用, 由于它密度低、内外表面光滑、易做成球形、并具有很好的同心度, 因此, 聚苯乙烯<sup>[6,7]</sup>、聚乙烯、聚亚酰胺<sup>[8]</sup>等塑料常被用作靶丸的壳层材料, 并广泛地应用在 ICF 其他研究中. 因此, 进行这些材料的状态方程实验研究、并获得这些材料可靠的状态方程实验数据具有非常重要的学术价值及应用价值.

本文介绍在神光 II 装置上, 利用第九路输出的倍频激光首次进行聚乙烯材料冲击压缩特性研究的实验结果.

## 2. 实验方案

实验是在高功率激光物理国家实验室的神光

II 装置上进行的, 采用第九路输出的倍频激光 ( $2\omega$ ,  $\lambda_L = 0.527 \mu\text{m}$ ), 激光脉冲时间波形为梯形波, 脉宽 (FWHM) 约 2.4 ns, 激光脉冲上升沿及下降沿分别约 200 ps, 激光能量最高约 2000 J. 为了实现对靶面的均匀辐照, 采用透镜列阵 (LA)<sup>[9]</sup> 进行光束匀滑, 在靶面形成强度均匀的六角形光斑 (长轴宽  $\sim 1200 \mu\text{m}$ , 短轴宽  $\sim 840 \mu\text{m}$ ), 实验观测到固体靶中产生了平面性良好的冲击波, 平面范围约  $800 \mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>, 非常有利于状态方程等实验. 实验基本的诊断设备是可见光条纹相机与 VISAR (velocity interferometer system for any reflector) 系统<sup>[11,12]</sup>.

实验用靶采用单元体精密粘贴技术研制<sup>[13]</sup>, 各材料密度均达到其各自的正常固体密度. 靶台阶厚度采用 Wyko NT1100 白光干涉仪进行测量, 仪器测量分辨率达 0.1 nm. 所有样品表面均方根粗糙度 (RMS) 均小于 50 nm.

## 3. 实验结果与讨论

### 3.1. 聚乙烯冲击波阵面发光特性

在激光驱动冲击波实验研究中, 以前大多采用被动测量方法<sup>[14]</sup>, 即利用条纹相机直接记录靶背面的自发辐射信号. 由于条纹相机对信号强度的响应

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2008AA8040202) 资助的课题.

† E-mail: huangxiuguang@sohu.com

存在一定的阈值,只有当信号强度高于阈值时,条纹相机才能记录.而自发辐射信号强度与材料的冲击温度有关,冲击温度又决定于材料的冲击压强,因此,对于某一实验材料,采用被动测量方法进行诊断时就存在相应的低压极限.我们知道,在相同压强下,材料不同,其冲击温度也不一样,有的差别非常大,导致材料自发辐射强度也有较大差别,因此,研究材料的冲击发光特性(特别是强度特性)是非常重要的.另外,通过测量透明材料波阵面自发辐射强度,可以定性分析冲击波阵面传播的稳定性<sup>[15]</sup>.因此,我们研究了 CH<sub>2</sub> 材料冲击波阵面的发光特性,实验排布如图 1(a)所示,基底材料为 30 μm Al,两台阶分别为 CH<sub>2</sub> 和后表面镀 Al(膜厚 ~200 nm)的 CH<sub>2</sub>,台阶厚度 ~32 μm,CH<sub>2</sub> 密度为 0.954 g/cm<sup>3</sup>.图 1(b)是实验记录图像,在图像右

侧,对应于 CH<sub>2</sub> 台阶,由于 CH<sub>2</sub> 是透明的,当冲击波阵面传播到 Al 基底背面时,其自发辐射光就会透过 CH<sub>2</sub> 被条纹相机记录,当冲击波阵面在 CH<sub>2</sub> 中传播,其波阵面自发辐射光也会被条纹相机记录,而当冲击波阵面到达 CH<sub>2</sub> 后表面时,冲击波向真空卸载,导致 CH<sub>2</sub> 密度、温度急剧下降,其发光强度将低于条纹相机的记录阈值,条纹相机记录强度很低(甚至记录不到),因此,这一侧的图像反映了冲击波在整个 CH<sub>2</sub> 台阶中的传播历程.而在图像左侧,对应于 CH<sub>2</sub> 镀 Al 台阶,由于 Al 膜对冲击波阵面自发辐射光的阻挡,只有当冲击波阵面传播到 Al 膜后表面时,其自发辐射才能被条纹相机记录.实验表明,尽管冲击波从 Al 材料向 CH<sub>2</sub> 材料传播时,冲击波压强有较大的衰减,但 CH<sub>2</sub> 自发辐射还是较强的,这对被动测量实验是有利的.

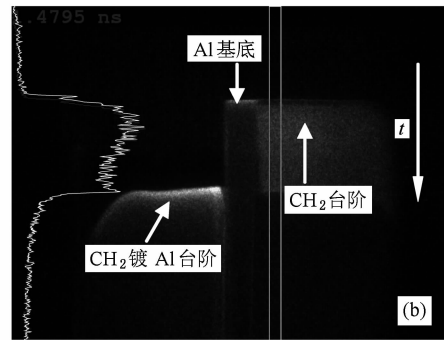
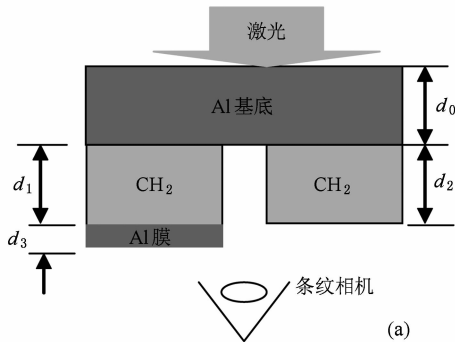


图 1 CH<sub>2</sub> 冲击波阵面自发辐射测量实验 (a) 实验排布示意图; (b) 实验记录图像

图 1(b) 中左边的白色曲线为灰框区域沿时间方向的强度扫描线,从这一强度扫描线可以看出,CH<sub>2</sub> 中波阵面自发辐射光的强度起伏不大,平均强度起伏(RMS)约 10.06%,而我们知道自发辐射强度  $I$  与冲击温度  $T$ 、比内能  $E$ 、冲击波压强  $P$  及冲击波速度  $D$  有如下近似关系<sup>[15]</sup>:

$$I \approx \sigma T^4 \propto E^4 \propto P^4 \propto D^8. \quad (1)$$

根据自发辐射光的强度起伏,由上式可以估算出 CH<sub>2</sub> 中冲击波阵面传播速度的起伏约 1.25%,定性说明冲击波在 CH<sub>2</sub> 台阶中传播是比较稳定的.

另外,根据 CH<sub>2</sub> 台阶和 CH<sub>2</sub> 镀 Al 台阶的厚度及冲击波在相应台阶中的渡越时间,计算了冲击波在 CH<sub>2</sub> 台阶和 CH<sub>2</sub> 镀 Al 台阶中的平均传播速度,分别为 22.16 km/s 和 22.32 km/s,两者误差小于 1%.

### 3.2. 聚乙烯冲击波阵面传播稳定性

上面通过测量冲击波阵面的自发辐射强度定

性地分析了现有激光驱动条件下冲击波在 CH<sub>2</sub> 中的传播稳定性,为了更直观、更深入地研究冲击波在 CH<sub>2</sub> 中的传播特性,我们采用 VISAR 主动诊断系统<sup>[11,12]</sup>,测量了 CH<sub>2</sub> 中冲击波阵面传播速度随时间的变化情况,实验排布如图 2(a)所示. Al 基底厚度 ~30 μm,CH<sub>2</sub> 台阶厚度 35.28 μm. VISAR 系统探针激光波长为 660 nm,脉宽(FWHM)~50 ns,峰值功率~60 kW.实验图像如图 2(b)所示.由于探针激光初始反射面是在 Al 基底后表面,在冲击波到达 Al 基底后表面之前,后表面是静止的,因此,实验图像是竖直的条纹.当冲击波传播到 Al 基底背面时,由于冲击波压强较高,冲击波卸载会导致 Al 自由面气化,使得探针激光在 Al 自由面的反射急剧下降,甚至记录系统记录不到,条纹消失.而当冲击波从 Al 材料传播到 CH<sub>2</sub> 材料中时,CH<sub>2</sub> 被压缩,在目前的压强区间(百万大气压,100 GPa),CH<sub>2</sub> 材料会变成类金属态,冲击波阵面成为很好的反射面<sup>[12]</sup>,对

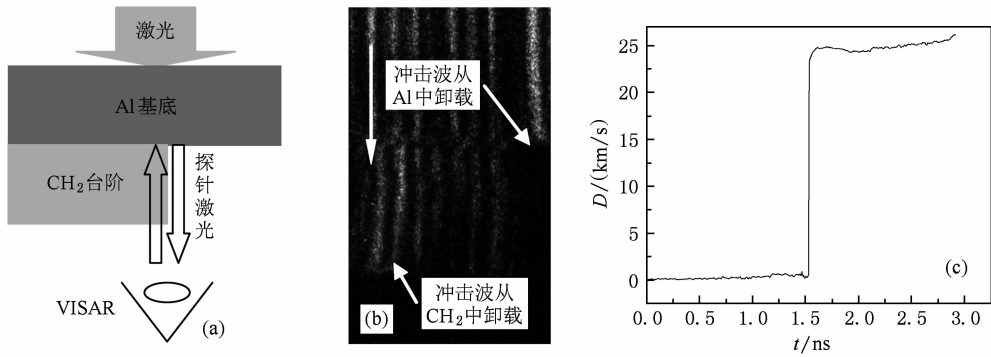


图2  $\text{CH}_2$  冲击波阵面传播稳定性实验 (a) 实验排布示意图; (b) 实验记录图像; (c)  $\text{CH}_2$  中冲击波阵面速度随时间的变化

探针激光具有较高的反射率,而当冲击波到达  $\text{CH}_2$  后表面时,冲击波卸载,反射率急剧下降,因此在  $\text{CH}_2$  台阶这边,条纹在 Al 与  $\text{CH}_2$  界面发生跳跃移动,然后随波阵面传播速度变化而产生相应的移动,冲击波阵面到达  $\text{CH}_2$  后表面后,条纹消失,这一段条纹移动情况反映了冲击波在  $\text{CH}_2$  台阶中传播速度的变化。

实验所用 VISAR 系统的标准具为 K9 玻璃,其折射率为 1.5142,标准具长度为 10.016 mm,考虑  $\text{CH}_2$  折射率(1.52)的影响后<sup>[16]</sup>,所用 VISAR 条纹常数为 3.704 km/s/Fringe.  $\text{CH}_2$  中冲击波传播速度可以用两种方法计算,一是通过冲击波在  $\text{CH}_2$  台阶中的渡越时间及  $\text{CH}_2$  台阶厚度计算冲击波传播的平均速度,  $\bar{D} = d_{\text{ch}}/t = 35.28 \mu\text{m}/1.43 \text{ ns} = 24.67 \text{ km/s}$ ,其中  $\bar{D}$  是冲击波平均速度,  $d_{\text{ch}}$  是  $\text{CH}_2$  台阶厚度,  $t$  是冲击波在  $\text{CH}_2$  台阶中的渡越时间. 二是通过干涉条纹移动计算冲击波阵面传播瞬时速度,其结果如图 2(c) 所示(其中一根条纹的处理结果),在

$\text{CH}_2$  台阶中,冲击波阵面传播平均速度为 24.83 km/s,速度起伏(RMS)1.33%,说明在目前激光条件下,冲击波在  $\text{CH}_2$  台阶中传播的稳定性较好,与冲击波阵面自发辐射测量结果基本吻合. 上述两种方法计算的平均速度基本吻合。

### 3.3. 聚乙烯冲击绝热线测量

$\text{CH}_2$  材料的冲击绝热线采用阻抗匹配法<sup>[17]</sup>进行,以 Al 作标准材料,采用条纹相机直接记录靶背自发辐射光(被动测量),实验排布示意图如图 3(a)所示. 实验中,Al 基底厚度  $\sim 30 \mu\text{m}$ ,Al 台阶厚度  $\sim 15 \mu\text{m}$ , $\text{CH}_2$  台阶厚度  $\sim 32 \mu\text{m}$ ,Al 膜厚度  $\sim 200 \text{ nm}$ (数据处理时,将剔除这层 Al 膜带来的影响). 图 3(b)是条纹相机时空分辨记录的一发实验图像,图中从上到下是时间扫描方向,从左到右是空间分辨方向. 在空间方向,中间是 Al 基底窄槽后表面冲击发光信号,左、右两侧分别是 Al 台阶和  $\text{CH}_2$  Al 台阶后表面的冲击发光信号. 用条纹相机的数据处理软

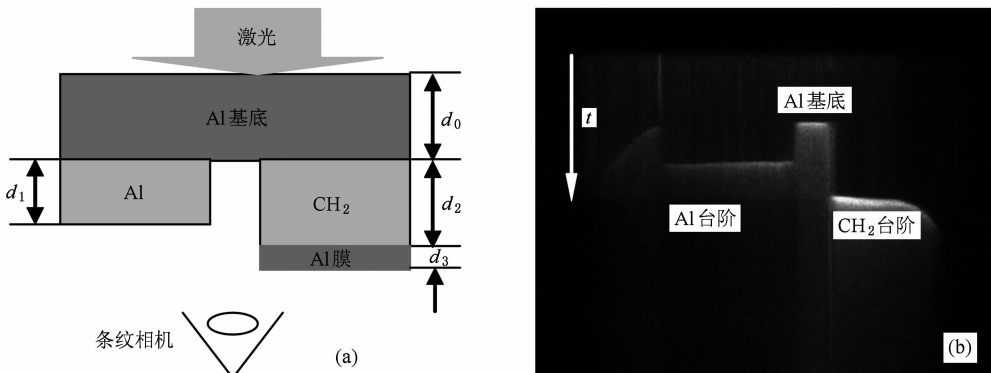
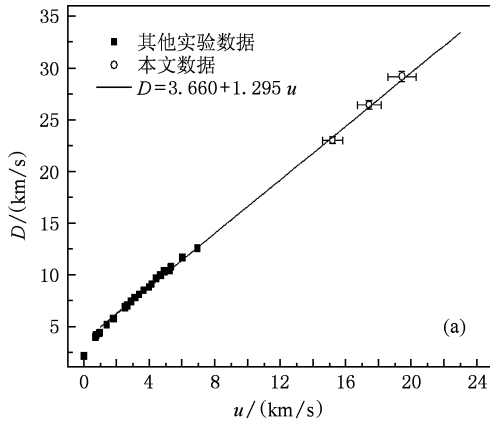


图3  $\text{CH}_2$  冲击绝热线测量实验 (a) 实验排布示意图; (b) 实验记录图像

件可以得到冲击波在各台阶中的渡越时间, 根据实验前测定的各台阶厚度, 可以求出冲击波在各台阶中传播的平均速度. 这样, 由一发实验, 可得到一对冲击波速度, 即标准材料 Al 中的冲击波速度  $D_s$  和待测材料  $\text{CH}_2$  中的冲击波速度  $D_M$ . 根据阻抗匹配法原理<sup>[17]</sup> 及误差处理方法<sup>[18]</sup>, 可以得到待测材料  $\text{CH}_2$  的冲击波压强  $P$ 、粒子速度  $u$  等其他状态参量及其相应的测量不确定度. 实验结果如图 4 所示, 图



中空圆点是我们的实验数据,  $\text{CH}_2$  中最高压强达 0.54 TPa, 远高于已有的实验数据压强, 冲击波速度测量精度达 2% ( $K=2$ ). 图中实心方点是已有的在化爆和气炮实验中获得的实验数据, 其压强较低, 最高才 83 GPa<sup>[19]</sup>. 图中实线是  $\text{CH}_2$  的一个状态方程解析模型 ( $D = 3.660 + 1.295u$ )<sup>[20]</sup>. 从图 4 可以看出, 三发实验数据的一致性较好, 与已有低压实验数据及状态方程模型符合得非常好.

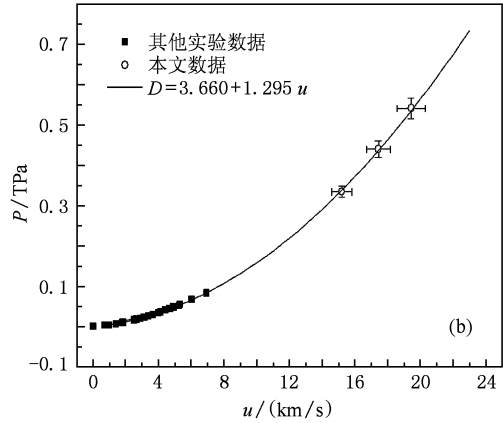


图 4  $\text{CH}_2$  材料冲击绝热线实验数据与其他实验数据及理论模型比较 (a) 冲击波速度-粒子速度曲线 ( $D-u$  线); (b) 压强-粒子速度曲线 ( $P-u$  线)

## 4. 结 论

在神光 II 装置上, 研究了聚乙烯材料的冲击压缩特性, 研究表明聚乙烯冲击波阵面自发辐射较强, 说明其冲击温度较高. 在现有激光驱动条件下,

冲击波在聚乙烯台阶中的传播是比较稳定的. 获得了冲击波压强高达 0.54 TPa 的聚乙烯冲击绝热线实验数据, 实验数据精度高, 一致性好, 与已有实验数据及状态方程模型符合较好.

致谢: 高功率激光物理国家实验室神光 II 装置运行组的高效运行.

- [1] Nellis W J 2000 *Planet Space Sci.* **48** 671  
 [2] Nguyen J H, Holmes N C 2004 *Nature* **422** 339  
 [3] Song P, Cai L C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1879 (in Chinese) [宋 萍、蔡灵仓 2009 物理学报 **58** 1879]  
 [4] Fu S Z, Huang X G, Wu J, Wang R R, Ma M X, He J H, Ye J J, Gu Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1877 (in Chinese) [傅思祖、黄秀光、吴 江、王瑞荣、马民勋、何钜华、叶君建、顾援 2003 物理学报 **52** 1877]  
 [5] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339  
 [6] Cauble R, Perry T S, Bach D R, Budil K S, Hammel B A, Collins G W, Gold D M, Dunn J, Celliers P M, DaSilva L B,

- Foord M E, Wallance R J, Stewart R E, Woolsey N C 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1248  
 [7] Pzaki N, Ono T, Takamatsu K, Tanaka K A, Nakano M, Kataota T, Yashida M, Wakabayashi K, Nakai M, Nagai K, Shigemori K, Yamanaka T, Kondo K 2005 *Phys. Plasmas* **12** 124503  
 [8] Takamatsu k, Ozaki N, Tanaka K A, Ono T, Nagai M, Watari T, Sunahara A, Nakano M, Kataoka T, Takenaka H, Yoshida M, Kondo k, Yamanaka T 2003 *Phys Rev. E* **67** 056406  
 [9] Deng X M, Liang X C, Chen Z Z, Yu W Y, Ma R Y 1986 *Appl. Opt.* **25** 337  
 [10] Huang X G, Fu S Z, Shu H, Ye J J, Wu J, He J H, Ma M X, Gu Y, Luo P Q, Long T 2007 *Chinese Journal of Lasers* **34** 743

- (in Chinese) [黄秀光、傅思祖、舒桦、叶君建、吴江、何钜华、马民勋、顾援、罗平庆、龙滔 2007 中国激光 **34** 743]
- [11] Barker L, Hollenbach R 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 4669
- [12] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, Hicks D G, Boehly T R, Armstrong W J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4916
- [13] Ye J J, Zhou B, He J H, Fu S Z, Huang X G 2008 *Atomic Energy Science and Technology* **42** 825 (in Chinese) [叶君建、周斌、何钜华、傅思祖、黄秀光 2008 原子能科学技术 **42** 825]
- [14] Rothman S D, Evans A M, Horsfield C J, Graham P, Thomas B R 2002 *Phys. Plasmas* **9** 1721
- [15] Holmes N C, Cauble R, Celliers P, Collins G, DaSilva L, Hammel B, Stewart R, Strand O, Sullivan A 1996 *Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-ID-123693*
- [16] Song Y F, Zhu Z Y, Ji T, Ge M, Chen X L, Liu Q 2007 *Acta Phys. -Chim. Sin* **23** 177 (in Chinese) [宋玉峰、朱智勇、吉特、葛敏、陈西良、刘崎 2007 物理化学学报 **23** 177]
- [17] Jing F Q 1986 *Introduction to Experimental Equation of State* (Beijing: Science Press) P194 (in Chinese) [经福谦 1986 实验物态方程导引 (北京: 科学出版社) 第 194 页]
- [18] Fu S Z, Huang X G, Ma M X, Shu H, Wu J, Ye J J, He J H, Gu Y, Luo P Q, Long T, Zhang Y H 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 043517
- [19] <http://teos.ficp.ac.ru/rusbank>
- [20] Nellis W J, Ree F H, Trainor R J, Mitchell A C, Boslough M B 1984 *J. Chem. Phys.* **80** 2789

## Experimental study on shock compression properties of polyethylene\*

Huang Xiu-Guang<sup>1)†</sup> Fu Si-Zu<sup>1)</sup> Shu Hua<sup>1)</sup> Ye Jun-Jian<sup>1)</sup> Wu Jiang<sup>1)</sup> Xie Zhi-Yong<sup>1)</sup>

Fang Zhi-Heng<sup>1)</sup> Jia Guo<sup>1)</sup> Luo Ping-Qing<sup>2)</sup> Long Tao<sup>2)</sup> He Ju-Hua<sup>1)</sup> Gu Yuan<sup>1)</sup> Wang Shi-Ji<sup>1)</sup>

1) (Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)

2) (Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

(Received 3 November 2009; revised manuscript received 14 January 2010)

### Abstract

Shock compression properties of polyethylene ( $\text{CH}_2$ ) were studied at SG-II laser facility. The experimental results show that the self-emission is high, which emits from the shock-front in polyethylene. And the shock-front propagates through the polyethylene step almost with constant velocity. The Hugoniot equation of state (EOS) of polyethylene was measured by using the impedance-matching method with aluminum as standard material. Pressures are high up to 0.54 TPa in polyethylene, and the relative expanded uncertainties of the measured shockwave velocity are about 2% ( $K=2$ ). Moreover, the consistency of our data is good, and our data are also consistent with existing experimental data and EOS model.

**Keywords:** polyethylene, hugoniot equation of state, self-emission, double frequency laser

**PACC:** 6250, 5235T, 6490

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA8040202).

† E-mail: huangxiuguang@sohu.com