

冲击波加载技术及其在材料研究中的应用 *

杨世源^{1,2} 金孝刚² 王军霞¹ 梁晓峰¹ 贺红亮²

1. 西南科技大学材料科学与工程学院 绵阳 621010

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实验室 绵阳 621900

摘要 介绍了常用的冲击波加载技术及其在材料研究中应用的现状, 并对其进一步发展进行了探讨.

关键词 材料检测与分析技术, 冲击波技术, 评述, 合成, 改性

分类号 TB4

文章编号 1005-3093(2008)02-0120-05

Shock loading technique and the application in materials research

YANG Shiyuan^{1,2**} JIN Xiaogang² WANG Junxia¹ LIANG Xiaofeng¹ HE Hongliang²

1. School of Material Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010

2. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900

* Supported by National Natural Science Foundation of China No.10476023 and Science Foundation of Sichuan Province No.03JY-017.

Manuscript received February 28, 2007; in revised form August 10, 2007.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(0816)6089059, E-mail: yangshiyuan@swust.edu.cn

ABSTRACT The aim of this paper is to review the characteristic of different kinds of recovering devices for explode shock-wave compress experiment and the progress of materials studies by shock-wave technique.

KEY WORDS materials examination and analysis, shock-wave technique, reviews, synthesis, modification

人们在建立固体物态方程时发现, 用冲击波压缩凝聚态物质可以产生许多独特的现象, 从而将冲击波技术用于材料科学研究^[1]. 冲击波加载于物质能产生一系列极端的物理条件: 高温(数千 K)、高压(数百 GPa)和高应变率. 在这样的极端条件下, 材料的力学、物理和化学性能会产生许多独特的变化, 这为研究者从更深层次去认识常规条件下发生的物理化学现象, 发现常规条件下难以产生的新现象、新规律, 为合成新材料、建立新工艺提供新的途径. 近几十年来, 冲击波压缩作为技术手段在材料的冲击合成、改性、相变等方面的研究引起了广泛关注. 在国外, 尤其是美、俄、日等国家将冲击波技术应用于材料研究已成为材料研究领域的一个新热点. 1980 年以来, 中

国工程物理研究院流体物理研究所也开展了冲击波压缩技术在材料科学中的应用研究.

1 冲击波加载技术

研究材料在冲击波压缩作用下各种变化的前提条件是能完整回收样品, 冲击波加载装置是利用冲击波压缩技术研究材料科学的重要内容. 相对于静高压实验而言, 以化学炸药或压缩气体作为产生冲击波能源的冲击波压缩技术容易获得很宽范围的温度、压力条件. 用炸药爆轰冲击波技术可以方便地获得几万到数十万大气压的压力, 几百到数千度的高温. 根据所产生的冲击波几何特征, 炸药爆轰冲击波回收装置分为平面、柱面和球面三种基本类型.

1.1 平面冲击波技术

平面冲击波技术使用平面波发生器把点起爆的散心爆轰波改造成平面爆轰波, 对样品进行一维冲击压缩. Sawaoka 装置^[2]用炸药爆轰驱动金属平板(飞片)与目标材料碰撞输入冲击波(图 1), 是一种典型

* 国家自然科学基金 10476023 和四川省科技厅科学基金 03JY-017 资助项目.

2007 年 2 月 28 日收到初稿; 2007 年 8 月 10 日收到修改稿.

本文联系人: 杨世源, 教授

的平面冲击波加载装置, 可通过炸药用量和飞片厚度调节产生的冲击压力和温度. 这类装置结构简单, 易于加工, 便于实际测量冲击波参数, 样品回收的可靠性高, 在材料 Hugoniot 参数已知的前提下, 能较准确地估算样品中的压力. 但是, 由于边侧稀疏、撞击成坑以及受结构材料强度等因素的限制, 该装置产生的冲击波压力相对较低.

1.2 柱面冲击波技术

为了提高冲击处理量以获得更多的回收样品, Riabinin^[3] 最先使用柱面冲击波技术进行材料研究. 柱面冲击波技术将粉状试样装填于金属质管状容器的柱形空腔内, 炸药置于管状容器的四周和顶部, 通过炸药滑移爆轰驱动同轴的金属圆管与样品管碰撞产生冲击波. 双管柱面冲击波回收装置 (图 2) 使用较低能量密度的炸药 (民用炸药) 可获得较高冲击波压力 (一般 30–40 GPa), 在材料的冲击合成研究中, 而且在由石墨相变合成金刚石、由石墨型氮化硼转变为金刚石型氮化硼的工业生产中得到了广泛的应用. 但是, 柱面冲击波沿试样容器管的半径方向向中心汇聚, 在半径方向存在较大的压力梯度, 即试样内部离管中心越近, 压力越高.

1.3 球面和准球面冲击波技术

球面和准球面冲击波技术利用冲击波汇聚进行三维压缩, 可以获得一般平面和柱面加载技术无法达到的高压和高温条件, 为研究材料在超高压高温条件下的结构、性能及物理化学变化创造了条件. 在国内, 本文作者^[4] 首次报道了准球面冲击波回收装置 (图 3). 准球面冲击波回收装置采用钢质球体、球壳形炸药和钢质球形外壳三层结构, 由 12 点同步起爆, 并把多个样品对称安放于偏离球心位置, 提高了装置利用率. 以硝基甲烷液体炸药为冲击波发生源, 利用冲击波由金属球体表面向中心汇聚形成的高压对材料样品进行冲击波压缩处理. 结果表明: 这种装置产生的

球面冲击波对称性较好, 样品回收的可靠性较高, 冲击波经球面汇聚后在钢球中心附近的冲击温度和压

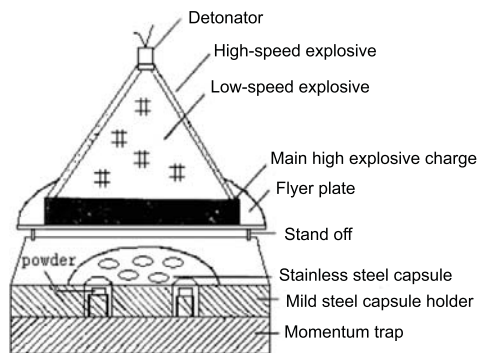


图 1 Sawaoka 平面冲击波加载装置示意图

Fig.1 Sketch map of planar shock wave device of CETR/Sawaoka

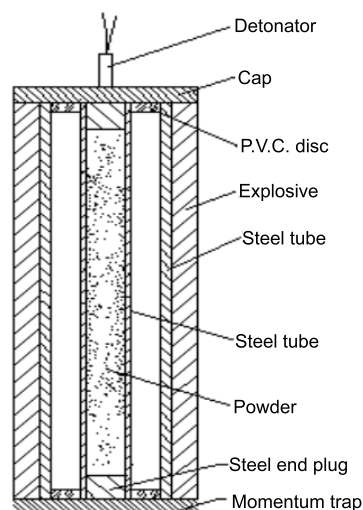


图 2 双管柱面爆轰示意图

Fig.2 Sketch map of double-tube cylindrical shock wave device

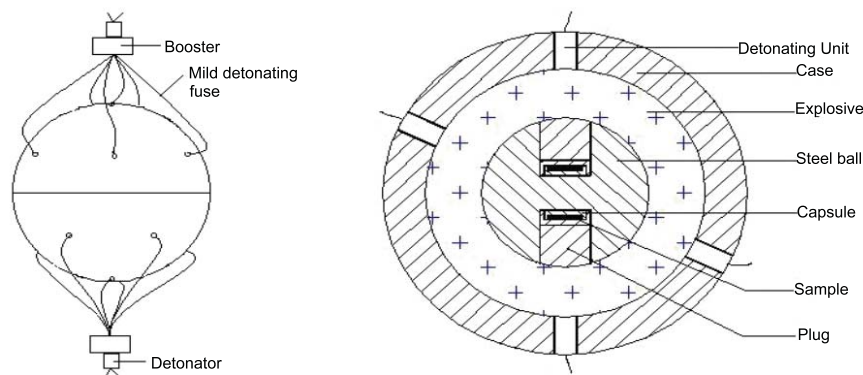


图 3 准球面冲击波回收装置示意图

Fig.3 Sketch map of quasi-spherical shock wave device

力在 5092 K 和 207 GPa 以上. 但是它的结构较复杂, 加工难度和起爆技术难度大, 试验成本较高.

2 材料的冲击合成

冲击波产生的高温、高压极端条件能有效地改变物质的原子间距和原子的壳层状态, 从而改变不同物质间原子的化学作用势和亲和能, 使在常规条件下发生不易反应的物质之间产生反应, 合成出具有特殊结构和性能的新材料. 研究人员已将冲击波压缩技术成功地应用于陶瓷基材料、金属间化合物和其它一些固溶体系等的合成^[5].

Bednorz 等^[6]在 La-Cu-O 系统的研究中, 用冲击波技术合成了一种具有 K_2NiF_4 结构的材料, 这种材料经高温氧化处理后具有超导性; Morosin^[7]等在 Y-Ba-Cu-O 体系中成功地用冲击波技术合成了超导相. 冲击合成超导材料最成功的例子是 Iqbal^[8,9]等在 Tl-Ba-Cu-O 体系中所做的工作, 合成了临界温度 T_c 为 55 K 的 $Tl_2Ba_2CuO_6$ 相物质. 通过对金属间化合物的冲击压缩研究, 合成出新的高温结构材料, 其中 Al 基和 Si 基的金属间化合物是冲击合成研究最多的两大体系. 在 Al 基体系中, 已经有 Ni-Al、Ti-Al 等多个二元系统的研究报告. Horie^[10]等对 30%Al(体积分)和 70%Ti 的混合粉末在不同压力条件下进行冲击压缩, 合成了钛铝化合物, 这种化合物的显微硬度达到 550-600 kg/mm², 几乎是用传统方法制备的相同材料的二倍. Yu^[11]等对 65%Nb(质量分数)和 35%Al 的混合物进行冲击压缩后, 在金相组织中观察到 Nb_2Al 和 $NbAl_3$ 两种化合物, 这种材料的显微硬度为 800-900 kg/mm². 在 Si 基体系中, 以 Ni-Si、Nb-Si 和 Ti-Si 系统^[12-14]研究较多, 合成出了一系列相应的二元化合物.

廖其龙等^[15]用柱面冲击波技术爆轰处理 $CaCO_3$ 与 $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ 的混合物, 合成了 HA(羟基磷灰石)生物陶瓷粉体; 刘建军^[16]用平面接触爆炸冲击波对 ZnO 和 Fe_2O_3 混合物粉末进行冲击压缩合成了纳米铁酸锌粉体; 王军霞等^[17]以 Pb_3O_4 、 ZrO_2 和 TiO_2 等粉体为原料冲击压缩合成了 $Pb(Zr_{0.95}Ti_{0.05})O_3$ 压电陶瓷材料. 此外, 利用冲击波技术还合成了 TiC^[18]、 TiO_2 ^[19] 等纳米粉体. 所有研究结果都表明, 与传统方法相比, 冲击合成的物质粉体粒度更细、分布更均匀, 具有很高的晶格缺陷密度, 应用性能大大提高.

3 物质的冲击相变合成

用冲击波压缩产生的超高压和超高温条件能使物质的某些高温高压相得以暴露, 从而获得普通手段和工艺条件下不能制备的新物相. 1955 年, 人们发现

冲击波压缩可引起铁元素由 α 相转变为 ϵ 相. 1961 年 DeCarli^[20] 用冲击波技术实现了人造石墨向金刚石的转变, 是冲击波压缩凝聚态物质研究的一个里程碑. 此后, 冲击波压缩技术在石墨转变为金刚石、六方类石墨型氮化硼 (gBN) 冲击相变为立方纤锌矿型氮化硼 (wBN) 等高性能超硬材料合成方面发挥了重要作用. 目前, 用炸药爆轰制备的金刚石纯度高, 质量好, 强度、硬度和绝缘性能要比静压合成的金刚石好, 且已实现小型工业化, 但所得金刚石的粒度较小, 为纳米和微米量级. 因此, 用冲击相变合成大颗粒金刚石是当今国内外需要攻克的难题.

冲击相变合成技术在合成新材料方面应用的最近例子, 是立方氮化硅的合成. 具有尖晶石结构的立方相氮化硅的密度比 α 与 β 相氮化硅高约 26%, 是继金刚石、立方氮化硼之后的又一种超硬材料. 而成立方氮化硅需要较高的静高压实验条件 (压力 13-15 GPa, 温度 1900-2100 K), 一般的实验设施难以达到. 日本的 Sekine^[21] 等利用冲击波相变技术实现了立方氮化硅的“小批量”合成, 单次实验获得的样品量达到 100 毫克以上, 样品粉末粒度为 10-50 nm. 目前, 在 IV(A) 族氮化物的高密度相及其相关材料的研究方面, 以冲击波压缩为手段的相变合成在国际上仍具有较强的竞争优势.

4 材料的冲击波活化改性

冲击波除产生高温高压外, 还对粉体有细化、均化作用, 能够破坏粉末团聚体, 在产物中引入大量结构缺陷, 使材料处于高内能的微观结构状态, 显著提高了粉体的化学活性. Morosin^[22] 等发现, 在超导体的冲击改性过程中产生的缺陷成为流体流动的通道. 这种晶格缺陷大多是介稳的, 使粉体具有更高的烧结活性. Kuznetsova^[23] 等的研究证明了冲击加载可显著影响 $LiNbO_3$ 、 $LiTaO_3$ 、 Sr_2NbO_7 和 $Ca_2Nb_2O_7$ 粉末的缺陷状态, 大量缺陷和对材料的粉碎作用造成其合成和烧结温度大幅降低, 从而简化了这些铁电材料的生产技术. 此外, TiO_2 ^[24]、羟基磷灰石粉体^[25]、PZT95/5^[26] 等冲击波活化处理后, 其性质明显改善.

5 冲击压实

Akashi 和 Sawaoka^[2] 在碳化物和硼化物的冲击合成研究中发现, 反应体系可放出大量热能. 这使人们意识到, 可以利用这部分热能所产生的高温对这些高熔点的粉体进行冲击压实. 他们对添加了 TiC 的 Ti 和 C 混合物进行冲击压缩实验, 获得了显微硬度达 1100-1300 kg/mm² 的 TiC 密实材料. 另外, 他们还将此方法扩展到 $TiC-Al_2O_3$ 、SiC、c-BN 和金

金刚石等其它高硬度材料的压实. 在对金刚石进行压实时添加一定量的 Si 和 C 粉, 利用 SiC 在冲击合成反应中放出的高热量促进体系烧结, SiC 在材料中起着粘结剂的作用, 这样获得的压实金刚石硬度可从 $2,200 \text{ kg/mm}^2$ 提高到 $4,700 \text{ kg/mm}^2$. Ward^[27,28] 等也用该方法对 TiB_2 、 B_4C 、SiC、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 进行了冲击合成反应辅助压实的研 究, 获得了相对密度超过 96% 的高硬度材料.

基于冲击波压缩技术的特点, 人们还在积极探索其在材料研究方面的新用途. 如爆炸烧结, 即利用炸药爆炸产生的冲击波用于性能相差悬殊的不同材料间的烧结以及用于高熔点材料的烧结. 冲击波压缩技术在爆炸焊接和爆炸涂层以及材料的高压物态方程研究等方面也有重要的应用^[29,30].

6 展 望

冲击波技术作为产生极端条件的一种加载手段, 对于超高温、超高压条件下的材料研究有着独特的优势, 这是其他传统手段所无法比拟的. 但是, 目前人们的研究重点主要集中在新材料的发现和冲击处理后材料的结构和性能变化, 而对于冲击波处理过程中的材料变化的机理还缺乏全面的认识, 对冲击波作用下反应机制和反应动力学, 以及开始反应时的临界条件还没有一个统一可接受的理论. 同时, 开拓冲击波技术在新材料研究与开发中的应用领域, 也成为凝聚态物理和材料科学工作者共同努力的方向. 需要指出的是, 为了深入研究冲击波技术对材料的影响和实现新材料生产的工业化, 还有许多问题需要解决, 如冲击波压力均匀性、冲击参数的控制、冲击压实过程中对材料的破坏、样品回收和规模化生产成本高等. 随着冲击波压缩回收装置的发展和相关同步测量技术的进步, 人们对物质在冲击波条件下的变化规律的认识必将更加深入.

参 考 文 献

- 1 D.Bancroft, E.Peterson, S.Minshall, Polymorphism of iron at high pressure, *Journal of Applied Physics.*, **27**(3), 291(1956)
- 2 A.B.Sawaoka, T.Akashi, Very high pressure sintering of shock synthesized wurtzite type boron nitride powders. In: R.A.Graham, A.B.Sawaok, *High Pressure Explosive Proceedings of Ceramics*, (Traps. Tech. Publ., 1987) p.119
- 3 Yu.M.Riabini, Certain experiments on dynamic compression of substances, *Soviet Phys. Tech., Phys.*, **1**, 2575(1956)
- 4 YANG Shiyuan, JIN Xiaogang, DONG Yubin, CHEN Qifeng, WANG Jisheng, Recover device of samples treated under high-pressure by quasi-spherical shock wave loading, *Explosion and Shock Waves*, **21**(2), 38(2001)
- (杨世源, 金孝刚, 董玉斌, 陈其丰, 王基生, 准球面冲击波高压回收装置的研究, *爆炸与冲击*, **21**(2), 38(2001))
- 5 N.Naresh, Thadhani, Shock-induced chemical reactions and synthesis of materials, *Progress in Materials Science.*, **37**, 117(1993)
- 6 J.G.Bednorz, K.A.Muller, Possible high- T_c superconductors in the Ba-La-Cu-O system, *Z.Phys.*, **B64**, 189(1986)
- 7 B.Morosin, R.A.Graham, E.L.Venturini, D.S.Ginley, W.F.Hammer, *Shock Waves in Condensed Matter - 1987*, edited by S.C. Schmidt and N.C. Holmes, (Elsevier, Amsterdam, 1988)p.439
- 8 Z.Iqbal, Superconducting properties and microstructure of shock synthesized high- T_c cuprates, in: *Progress Of 2nd World Congress on Superconductivity* (Houston, Texas, 1990)
- 9 Z.Iqbal, N.N.Thadhani, *Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in Materials*, edited by M.A., Meyers, L.E. Murr, K.P. Staudhammer, (Marcel Dekker, 1991) p.821
- 10 Y.Horie, D.E.P.Hoy, I.Simonsen, R.A.Graham, B.Morosin, Shock-wave synthesis of titanium aluminides, in: *Shock Waves in Condensed Matter*, edited by Y.H.Gupta (New York, Plenum Press, 1986) p.749
- 11 L.H.Yu, M.A.Meyers, N.N.Thadhani, Reaction-assisted shock consolidation of RSR Ti-Al alloys, *J. Mat. Res.*, **5**(2), 302(1990)
- 12 B.R.Krueger, T.Jr.Vreeland, Correlation of shock initiated and thermally initiated chemical reactions in a 1:1 atomic ratio nickel-silicon mixture, *J. Appl. Phys.*, **70**(10), 5362(1991)
- 13 L.H.Yu, M.A.Meyers, Shock-induced consolidation and synthesis of silicides, *J. Matls. Sci.*, **26**, 601(1991)
- 14 Kakoli Das, Amit Bandyopadhyay, Y. M. Gupta. Shock wave synthesis of titanium silicide (Ti_5Si_3)[A], in: *Shock Compression of Condensed Matter*, edited by M. D. Furnish, Y. M. Gupta, J. W. Forbes, (Portland, Oregon: AIP Conference Proceedings 706, 2003) p.1094
- 15 LIAO Qilong, YANG Shiyuan, CAI Lingcang, ZHOU Dali, YIN Guangfu, ZHENG Changqiong, Synthesis of hydroxypatite powder by shock wave treatment method, *Chinese Journal of High Pressure Physics*, **16**(4), 49(2002)
(廖其龙, 杨世源, 蔡灵仓, 周大利, 尹光福, 郑昌琼, 用冲击波合成法制备羟基磷灰石粉体, *高压物理学报*, **16**(4), 49(2002))
- 16 LIU Jianjun, TAN Hua, XU Kang, HE Hongliang, Shock synthesis of zinc ferrite and its photocatalytic activity, *Chinese Journal of High Pressure Physics*, **11**(2), 90(1997)
(刘建军, 谭 华, 徐 康, 贺红亮, 纳米铁酸锌的冲击波合成及它的光催化活性, *高压物理学报*, **11**(2), 90(1997))
- 17 WANG Junxia, YANG Shiyuan, HE Hongliang, LIANG Xiaofeng, ZHANG Baoshu, LIU Wei, Structure and properties of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ powder synthesized by shock-wave technique, *Journal of The Chinese Ceramic Society*, **33**(6), 18(2005)
(王军霞, 杨世源, 贺红亮, 梁晓峰, 张宝述, 刘 伟, 冲击波合成 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ 粉体的结构和特性, *硅酸盐学报*, **33**(6), 18(2005))

- 18 JIA Ligai, XIONG Daiyu, Mechanism of titanium carbide synthesis by shock-wave, *Nonferrous Metals*, **53**(4), 1(2001)
(贾丽改, 熊代余, 冲击波方法合成 TiC 机理的研究, 有色金属, **53**(4), 1(2001))
- 19 YANG Shiyuan, JIN Xiaogang, LI Jufen, WANG Junxia, Preparation of nanometer crystallite of TiO₂ by shock waves technology, *Chinese Journal of Materials Research*, **19**(2), 189(2005)
(杨世源, 金孝刚, 李菊芬, 王军霞, 利用冲击波技术制备 TiO₂ 纳米晶, 材料研究学报, **19**(2), 189(2005))
- 20 P.S.DeCarli, J.C.Jamieson, Formation of diamond by explosive shock, *Science*, **133**, 1821(1961)
- 21 T.Sekine, He Hongliang, T.Kobayashi, Shock-induced transformation of β -Si₃N₄ to a high-pressure cubic-spinel phase, *Applied Physics Letters*, **76**, 3706(2000)
- 22 B.Morosin, E.L.Venturini, R.A.Graham, High-pressure shock modification and synthesis of superconducting ceramic oxides, *Synthetic Metals*, **33**, 185(1989)
- 23 E.M.Kuznetsova, L.A.Reznichenko, O.N.Razumovskaya, Shockwave activation of high-temperature ferroelectric powders, *Technical Physics Letters*, **26**(9), 767(2000)
- 24 LIU Jianjun, YU Yingchun, LI Yingjun, HE Hongliang, TAN Hua, XU Kang, Shock activation of titanium oxide and its photocatalytic activity, *Chinese Journal of High Pressure Physics*, **13**(2), 138(1999)
(刘建军, 于迎春, 李英骏, 贺红亮, 谭华, 徐康, TiO₂ 的冲击波活化及其光催化活性, 高压物理学报, **13**(2), 138(1999))
- 25 LIAO Qilong, YANG Shiyuan, CAI Lingcang, ZHENG Changqiong, Shock-activating and sintering of hydroxypapatite agglomerate, *Chinese Journal of High Pressure Physics*, **17**(3), 9(2003)
(廖其龙, 杨世源, 蔡灵仓, 郑昌琼, 羟基磷灰石团聚体的冲击波活化与烧结研究, 高压物理学报, **17**(3), 9(2003))
- 26 LIU Li, HAN Junwan, Shock activation and modification of PZT 95/5 piezoceramics, *Chinese Journal of High Pressure Physics*, **10**(3), 199(1996)
(刘利, 韩钧万, PZT-95/5 压电陶瓷的冲击波活化改性研究, 高压物理学报, **10**(3), 199(1996))
- 27 R.Ward, N.N.Thadhani, P.A.Persson, Shock compression of high-performance ceramics, in: *Metal and Ceramic Matrix Composites: Procession, Modelling and Mechanical Behavior*, edited by R.B.Bhagat, A.H.Clauer, P.Kumar, A.M.Ritter, (TMS, Warrendale, Pennsylvania, 1990) p.193
- 28 P.A.Persson, R.Ward, N.N.Thadhani, Shock-induced reaction synthesis (SRS) assisted compaction of ceramics, in: *Shock Wave in Condensed Matter*, edited by S.C.Schmidt and N.C.Holmes, (North-Holland Publishers, 1990) p.539
- 29 F.Grignon, D.Benson, K.S.Vecchio, M.A.Meyers, Explosive welding of aluminum to aluminum: analysis, computations and experiments, in: *Shock Compression of Condensed Matter*, edited by M.D.Fernish, Y.M.Gupta, J.W.Forbes, (Portland, Oregon: AIP Conference Proceedings 706, 2003) p.1098
- 30 D.Meuken, E.P.Carton, Explosive welding and cladding, in: *Shock Compression of Condensed Matter*, edited by M.D.Fernish, Y.M.Gupta, J.W.Forbes, (Portland, Oregon: AIP Conference Proceedings 706, 2003) p.1110