

文章编号: 1001-1455(2001)02-0138-06

准球面冲击波高压回收装置的研究

杨世源^{1,2}, 金孝刚¹, 董玉斌¹, 陈其峰¹, 王基生²

(1. 中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 西南科技大学材料科学与工程系, 四川 绵阳 621002)

摘要: 研究了以硝基甲烷液体炸药作为冲击波发生源的准球面汇聚冲击波超高压回收装置。在该装置上, 利用冲击波由金属球体表面向中心汇聚形成的高压, 对样品进行了冲击处理; 分析了回收的金属球体内、外破坏情况及金相组织变化。结果表明: 该装置产生的球面冲击波对称性较好, 样品回收可靠性较高; 金属球体中心附近压力超过 207 GPa; 对进行超高压冲击条件下的材料回收实验有较高的实用价值。

关键词: 冲击波; 装置; 回收; 准球面; 汇聚

* 中图分类号: O521.12 文献标识码: A

1 引言

准球面冲击波加载技术是近十年出现的冲击波新加载技术。它利用多点起爆球形炸药形成的准球面冲击波, 该冲击波经过球形汇聚, 在其包围的金属球体中心部分产生极高的压力和温度。利用这种装置, 不仅可获得比平面和柱面冲击波加载装置高得多的冲击压力(其球心处的理论计算压力值可超过 1 TPa^[1]), 而且可以实现物质的三维压缩。因此是一种极具潜力的冲击波加载方式。

Zababakhin 等研究了球面冲击波的能量汇聚后指出, 汇聚球面冲击波在球体中产生的压力按 $p = p_0 (r_0/r)^k$ ($k = 0.8 \sim 0.9$) 的规律增长^[2], 这使人们可以利用薄的球形炸药爆轰对球体加载来进行材料的全面压缩与拉伸实验^[3]。在这样的高压实验中, 对回收加载后的样品进行观察分析, 可以研究材料在超高压作用下的各种行为。

В. А. Юрочкиков 研究了受准球面冲击波加载的直径 40 mm 的实心 40X(含 0.37% C 和 1.1% Cr) 钢球的结构变化^[4]。炸药从均布在球面上的 12 个点起爆, 通过选择适当的炸药厚度, 保证冲击波作用消失后, 样品存留下来。回收的钢球中心形成了一个近乎球形的空洞, 这表明准球面冲击波聚焦在中心附近及随后中心物质随发散波运动而形成了空洞, 球体发生了膨胀。在球形汇聚冲击波作用下, 由于球体内部受到剧烈的压缩和拉伸作用容易造成球体破裂, 导致样品难以回收, 限制了实验压力的进一步提高。Kozlov 的研究^[5]表明在炸药外设置一大质量外壳被认为是克服这一缺点, 提高样品回收率的有效措施。汇聚冲击波的对称性也是影响准球面汇聚冲击波超高压回收装置回收可靠性的重要因素, 汇聚冲击波的对称性取决于球形炸药表面起爆点的个数和位置以及炸药和装置的加工精度。对应于表面均匀设置的 2、4、12 个起爆点, 回收球的外观分别呈椭球体、四面体和十二面体。这表明增加均匀分布的起爆点个数有助于提高汇聚冲击波的球面对称性。

已报道的准球面汇聚冲击波超高压装置有一个共同点, 就是采用固体炸药并将回收样品放置在金属球体中心。考虑到液体炸药比固体炸药具有更好的密度均匀性, 有利于提高冲击波汇聚的对称性, 另外, 为了探索在一套装置中对多个样品进行冲击加载的可能性, 本研究采用液体炸药并在金属球上安装多个样品的方式设计制作了准球面汇聚冲击波超高压回收装置。实验的结果, 金属球体和球内放置的

* 收稿日期: 2000-07-21; 修回日期: 2000-10-18

基金项目: 中国工程物理研究院科学基金项目(98101)

作者简介: 杨世源(1960—), 男, 博士, 副教授。

样品均完整回收。分析表明,金属球体中心处的压力达 164 GPa 以上。

2 装置设计

将样品安放在半径 R_0 的 45[#] 钢球内并距球心 $R_0/3$ 处,球体表面为硝基甲烷液体炸药,炸药外为一金属球壳;球体的定位依靠布置在球体表面的细小支撑杆来实现。球壳的作用不仅是保证液体炸药的几何尺寸和球体定位,更重要的是慢化卸载过程,减小球体内部的拉伸应力,提高装置回收可靠性。图 1 为装置示意图。

2.1 冲击波发生源

选择液体炸药作为冲击波发生源,是由于液体炸药的密度比固体炸药更均匀,形成的球面冲击波对称性更好。虽然硝基甲烷的爆能较一般固体炸药低,但可以通过变化钢球尺寸、改变球面冲击波的汇聚路程来调节球内的冲击压力,同时通过炸药厚度调节压力的作用时间。此外,液体炸药成本低,操作方便。

2.2 起爆方式

在炸药球面均匀设置 12 个起爆点,进行同步起爆。根据所采用的起爆器件性能参数分析,该起爆系统 12 个起爆点的同步误差不超过 0.2 μ s。

2.3 模拟计算

钢球直径选择了 $\phi 60$ mm 和 $\phi 100$ mm 两种尺寸,包裹这两种尺寸钢球的炸药厚度分别为 40 mm 和 20 mm。图 2 为两种球体尺寸的装置爆炸时,在实心钢球 $R_0/3$ 处的压力与时间关系的数值模拟结果。结果显示 $\phi 60$ mm 球体内的汇聚压力比 $\phi 100$ mm 球体内的汇聚压力高得多,前者在 $R_0/3$ 处的峰值压力接近 170 GPa,而后者在相似位置的峰值压力还不到 50 GPa。

2.4 样品设置

球体中样品的设置,选择了对称安放 2 个和 4 个样品两种方案,这是为了研究偏离球心的样品对球面波汇聚对称性的影响,并探索在一个球体中安放多个样品的可行性,以提高装置的利用率。

2.5 样品的安装与回收

为了便于样品的安装与回收取样,采用图 1 中的样品安装方式。先将样品在样品腔体中压实,然后将样品腔体通过球体上的装样孔放入球体中,再用螺栓封堵装样孔,最后将螺栓与球体焊成一体。样品腔体和螺栓选用的材料与球体材料相同。取样时,先取出样品腔体,再取腔体中的样品。

2.6 实验

根据压力的模拟计算结果,在 $\phi 60$ mm 的球体中设置了两个装样孔,在 $\phi 100$ mm 的球体中设置了四个装样孔。样品中心与球心的距离为 $R_0/3$ 。实验时,同一球体的各装样孔内放置的样品材料密度不同;对爆炸冲击后的金属球体作切片观察,并沿半径方向对球体内部的硬度和金相显微结构进行测试分

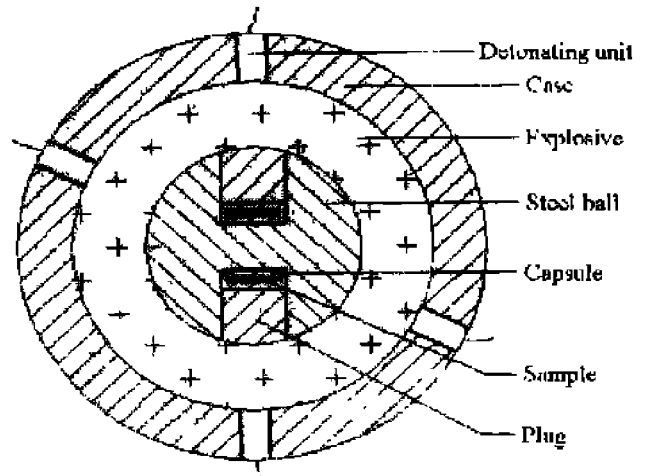


图 1 准球面冲击波加载回收装置示意图

Fig.1 Schematic of recovery device of samples loading by quasi-spherical shock wave

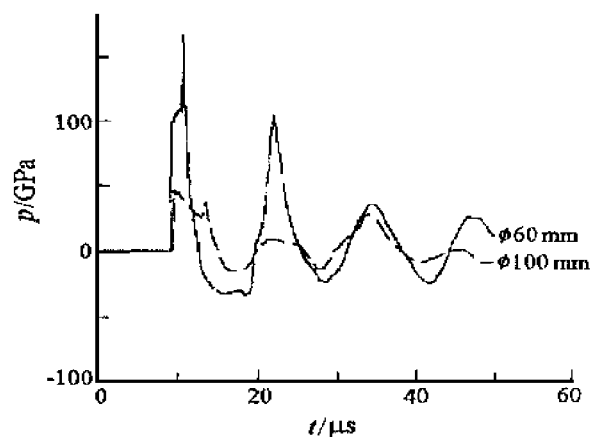


图 2 在 $R_0/3$ 处,钢球的压力与时间关系的数值模拟结果

Fig.2 Pressure versus time curves at $R_0/3$ of steel ball during shock loading

析。

3 结果与讨论

对上述两种装置的试验样品回收,球体与样品均完整。测量表明,回收的球体外形尺寸与形状相对冲击前无明显变化,但在球体表面留下了冲击波作用的痕迹。由于 12 个起爆点发生的冲击波相互作用,在球体表面留下了清晰的刻痕,从刻痕的交点来看,每三条刻痕准确地交汇于一点,肉眼看不出有偏离;这些刻痕构成一个近乎标准的球形正十二面体,十二面体的每一个面都是一个球面正五边形,正五边形的中心与起爆点的投影位置重合。这些都表明该装置所产生的球面波具有良好的球面对称性。由于两套装置的球体尺寸和装药量不同, $\phi 100$ mm 球体的表面刻痕很浅,而 $\phi 60$ mm 球体表面刻痕较深。图 3 为 $\phi 60$ mm 球体冲击后的外观照片。

将冲击后的球体沿球心剖开(剖面避开装样孔),再平行于该剖面进行切片,观察球体中心附近的变化情况。结果发现, $\phi 100$ mm 球体内部无明显变化,未发现裂纹、空洞等破坏痕迹,这是因为球内压力和温度均较低。而在 $\phi 60$ mm 球体的中心剖面和切片表面出现不少裂纹,主裂纹长度超过 1 cm;在中心附近出现空洞,裂纹分布于空洞周围呈发散状(图 4),表明中心压力和温度较高,造成金属局部熔化。

下面将重点对 $\phi 60$ mm 球体爆炸后的情况进行解剖分析。

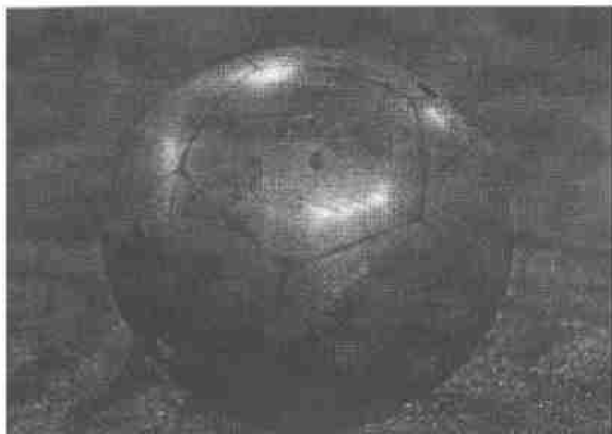


图 3 来自各起爆点的爆轰波相互作用后在球表面留下的刻痕

Fig. 3 Outward of steel ball loaded by shock waves

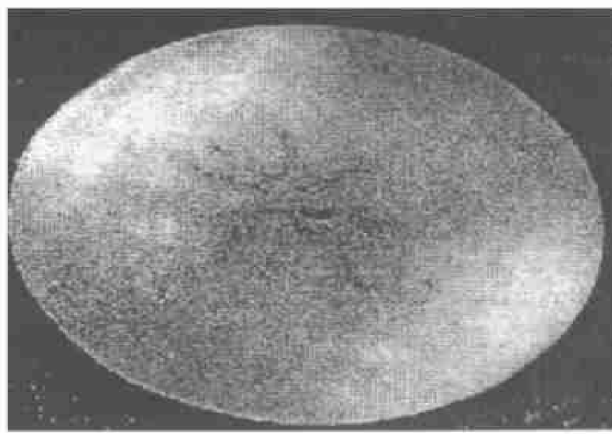


图 4 冲击处理后的球核中心剖面照片

Fig. 4 Cross section of steel ball through the cavity

经过测量, $\phi 60$ mm 球体中心附近的空洞近似呈扁椭球形,空洞的长轴指向装样孔,三轴尺寸约为 $2\text{ mm} \times 4.5\text{ mm} \times 6\text{ mm}$;空洞的中心偏离球体中心约 1.5 mm,靠近密度较低的样品一侧;空洞内表面的金属已熔化。这表明冲击波成功汇聚于球心附近并产生高压和高温,导致金属的熔化和膨胀形成空洞。空洞中心即是冲击波的汇聚中心,且由于样品对冲击波的扰动作用导致汇聚中心与球心不重合且形成的空洞呈扁椭球形。此外,在球心处还观察到为数不多的直径小于 0.5 mm 的细小微孔,这或许说明,这种样品安置方式不仅改变了冲击波汇聚中心的位置,而且扩大了冲击波的汇聚范围,从而减弱了冲击波的汇聚压力,降低了对球体的破坏作用。另外,卸载过程中稀疏波产生的拉伸应力往往使球体沿汇聚中心周围的裂纹破坏。球体破坏将导致中心的样品无法回收。如果样品不在中心,即使球体沿中心裂开,样品仍可能保存在金属球的残体中。此外,本装置的样品腔体对样品也有一定的保护作用。因此可以认为,让样品偏离球心一定距离对于提高装置中样品的回收可靠性是有利的。

为了研究球体内部的冲击压力变化情况,沿冲击后的 $\phi 60$ mm 球体靠近汇聚孔的半径方向对球体剖面的硬度进行了测试,结果见图 5。硬度测试结果显示,汇聚孔边沿的硬度值最大;远离汇聚孔,硬度降低;距汇聚孔中心半径 R 超过约 6 mm 时,硬度变化减缓。

对球体剖面的金相分析可以解释硬度的这一变化规律。图 6 是过汇聚孔剖面不同部位的显微金相结构照片。在 $R > 6\text{ mm}$ 以外的范围,组织结构基本无变化,表现出一一般 45 钢的基本特征,其主金相为

铁素体和珠光体, 颗粒尺寸较粗大(图 6(a)); 在 $R < 6 \text{ mm}$ 时, 金相组织开始发生变化, 随着向汇聚中心靠近, 铁素体增多, 珠光体减少, 且铁素体晶粒尺寸逐渐减小; 到达汇聚孔边沿约 3 mm 处时铁素体已经超细化了(图 6(b))。

铁素体数量的增加和颗粒的细化表明该区域已发生相变, 这是因为冲击波使该区域温度升高到了相变点以上, 钢中的珠光体和铁素体转变成奥氏体; 由于冲击波的作用时间短, 奥氏体晶核还来不及长大, 温度已开始下降, 细小的奥氏体晶粒又重新转变为铁素体和珠光体; 由于奥氏体晶粒细小, 析出的铁素体晶粒也同样细小。至于铁素体晶粒细化程度随 R 的改变, 可能是温度和压力共同作用的结果。

继续往内部观察, 珠光体消失, 马氏体出现并逐渐增多, 铁素体数量减少。在空洞边沿约 $1 \sim 1.5 \text{ mm}$ 的区域内已全部是板条状马氏体, 板条状马氏体呈放射状排列, 图 6(c)为汇聚空洞的全貌, 图 6(d)为放大的空洞边沿的马氏体金相照片。

金属球内部金相结构的变化情况表明, 从表面到中心, 压力和温度迅速升高。由于冲击波在球体内不同半径处产生的压力和温度、以及卸载过程中的冷却速度不同, 造成了沿孔半径方向组织结构的差异。在汇聚中心, 冲击波汇聚产生的超高压和高温, 造成金属熔化甚至汽化, 并随稀疏波呈放射状运动, 形成空洞。这些熔化或汽化的金属沿稀疏波运动方向重新定向结晶成放射状的马氏体。马氏体的出现说明内部温度的下降速度是很大的^[6], 而外部温度的下降速度相对较小。这一点不难理解, 因为冲击波作用后的球体, 其汇聚中心温度比外部温度高得多, 球体中存在温度梯度。冷却过程中, 球心的余热总是通过球体扩散到球外, 因此冷却过程实际上也是一个温度梯度下降的过程, 而温度梯度的下降即表明高温区比低温区的冷却速度更快。

在显微镜下还观察到, 在放射状马氏体区域外的裂纹内壁分布着一层马氏体(图 6(e)), 且裂纹附近的铁素体呈流线形。裂纹两侧的马氏体可能是高温区的金属在稀疏波作用下, 沿裂纹运动, 并沉积在裂纹内壁重结晶而成; 而流线形的铁素体则可能是稀疏波和裂纹膨胀时产生的应力共同作用的结果。

冲击后球体中心汇聚空洞的出现及空洞内金属的熔化表明球面冲击波经过能量汇聚达到了很高的压力。假定球体中心的金属熔化发生在压力卸载至零, 残留温度刚好达到熔点。由此可以粗略估算出球体中心的冲击压力下限。

冲击温度、压力及等熵卸载温度与压缩比之间存在如下关系^[7]

$$T_H = T_0 e^{\gamma_0 \eta} + \frac{c_0}{c_V} e^{\gamma_0 \eta} \int_0^\eta \frac{\lambda \eta^2}{(1 - \lambda \eta)^3} e^{-\gamma_0 \eta} d\eta \quad (1)$$

$$p_H = \rho_0 c^2 \frac{\eta}{(1 - \lambda \eta)^2} \quad (2)$$

$$T_R = T_H e^{-\gamma_0 \eta} \quad (3)$$

式中: T_H 为冲击温度; p_H 为冲击压力; T_R 为卸载到零压时的温度; 压缩比 $\eta = (V_0 - V)/V_0$ 。

钢的有关参数^[8,9]: 熔点 $T_m = 1812 \text{ K}$; 密度 $\rho_0 = 7.89 \text{ g/cm}^3$; 格临爱森参数 $\gamma_0 = 2.2$; 声速 $c_0 = 4.58 \text{ km/s}$; $\lambda = 1.49$; 定容比热 $c_V = 23.10 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$; 熔化热 $H_m = 15340.6 \text{ J/mol}$ 。

由上述关系, 通过改变体积 V , 可计算出一系列 T_H 、 p_H 和 T_R 。计算结果与文献[10]吻合。考虑到冲击后金属已熔化, 且假定熔化是发生在压力卸载到零时, 即 $p_R \approx 0$ 。球核材料的熔点 $T_m = 1812 \text{ K}$ 。若假设球核材料在熔点时不熔化, 熔化热使球核中心温度在熔点的基础上进一步升高, 则温度的增加值为 $\Delta T = 664 \text{ K}$ 。于是球核中心卸载到零压时的温度为 $T_R = T_m + \Delta T = 2476 \text{ K}$ 。根据(1)~(3)的计算结果

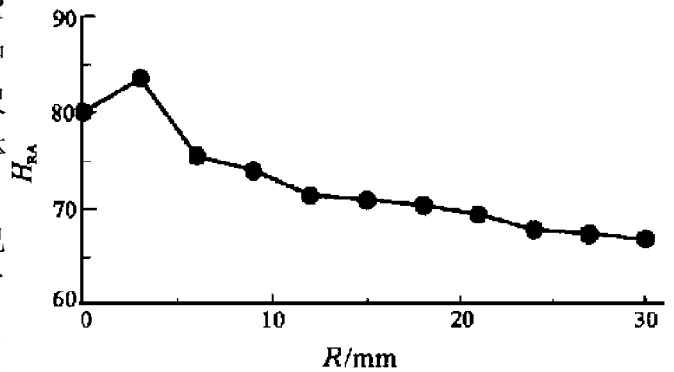


图 5 冲击后球核内部硬度值随半径 R 的变化

Fig.5 Change of hardness in the steel ball along the radius

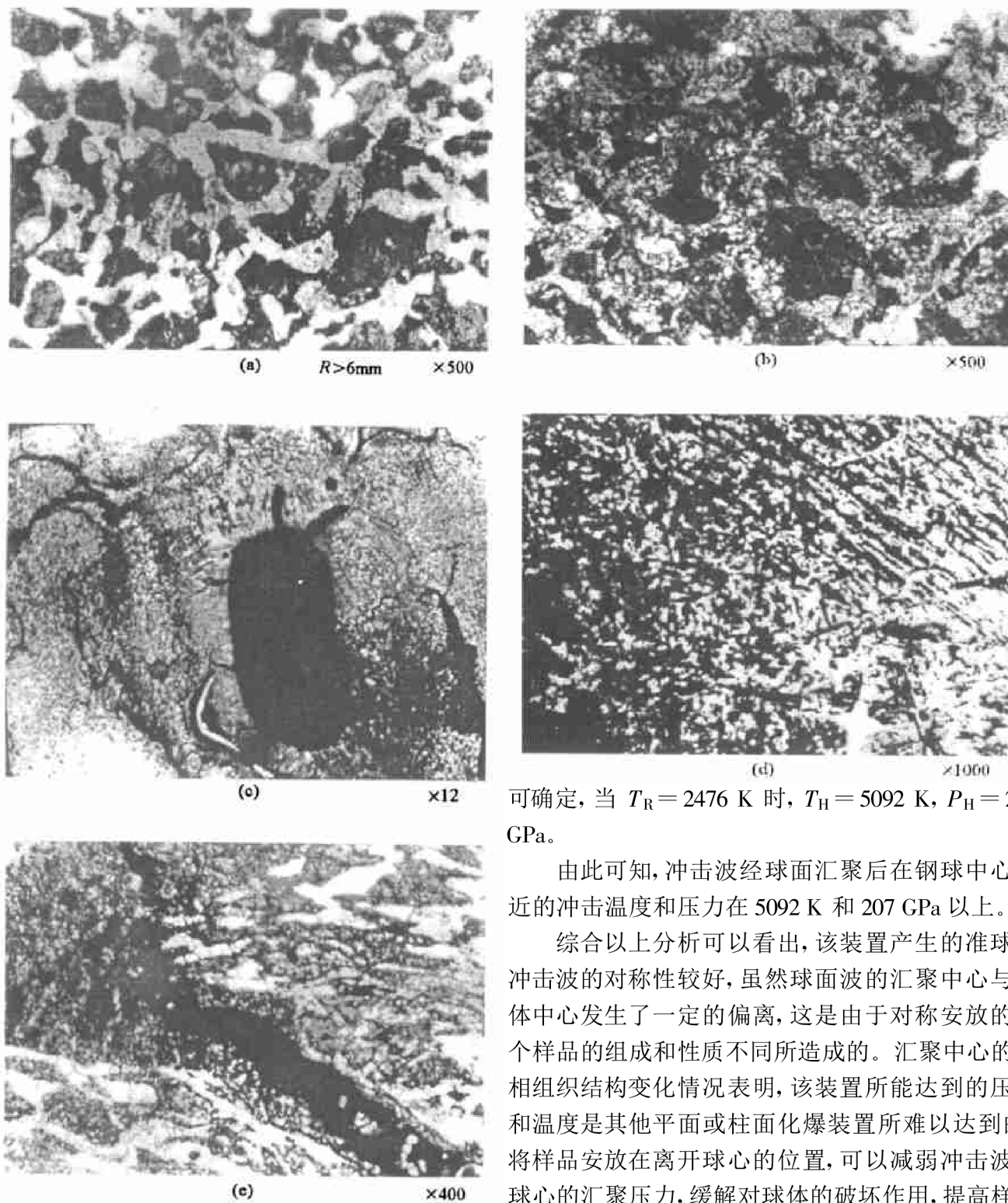


图6 冲击后,球核中心剖面不同部位的金相显微照片

Fig.6 Optical micrographs of various positions on cross section of steel ball with initial diameter of 60 mm after shock wave loading

可确定,当 $T_R = 2476$ K 时, $T_H = 5092$ K, $P_H = 207$ GPa。

由此可知,冲击波经球面汇聚后在钢球中心附近的冲击温度和压力在 5092 K 和 207 GPa 以上。

综合以上分析可以看出,该装置产生的准球面冲击波的对称性较好,虽然球面波的汇聚中心与球体中心发生了一定的偏离,这是由于对称安放的两个样品的组成和性质不同所造成的。汇聚中心的金相组织结构变化情况表明,该装置所能达到的压力和温度是其他平面或柱面化爆装置所难以达到的。将样品安放在离开球心的位置,可以减弱冲击波在球心的汇聚压力,缓解对球体的破坏作用,提高样品回收的可靠性。

4 结 论

(1) 以硝基甲烷炸药为冲击波发生源、采用多样品安装方式的准球面汇聚冲击波超高压装置,在加载的金属球体中心附近实现了 164 GPa 以上的超高压,且加载的金属球体和球内样品均完整回收;该装置作为研究超高压条件下材料行为的一种手段是可行的。它使冲击波经球面汇聚,获得其它平面或柱面化爆装置所难以达到的超高压和高温。

(2) 对加载后金属球体表面和内部的变化情况分析表明,汇聚冲击波的对称性较好,这说明本装置

采用的 12 点起爆系统, 具有良好的起爆同步性。

(3) 本装置采用的多样品安装方式, 对球面波会产生扰动, 造成汇聚中心发生偏离, 扰动也减弱了冲击波在球心的汇聚压力, 缓解了对球体的破坏作用, 提高了冲击样品回收的可靠性。

参考文献:

- [1] KOZLOV E A, LITVILOV B V, KABIN I G, et al. The Acquisition and Investigation of Sub-microcrystal Structure Materials in Experiments on Loading of Metal Spheres by Spherically Converging Shock Waves[A] . SCHMIDT S C, DICK R D, FORBES J W, et al. Shock Compression of Condensed Matter-1991[C] . Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers B V, 1992. 535—538.
- [2] ZABABAKHIN E I, ZABABAKHIN I E. Phenomenon of Unlimited Cumulation[M] . Moscow: Nauka, 1988. 56—66.
- [3] SHOROKHOV E V, Yermakov A Y, Buzanov V I, et al. Shock-wave Loading Influence on Chemical Reactions Running in Hematite Using Cumulative Systems[A] . Murr L E, Staudhammer K P, Meyers M A, et al. Metallurgical and Materials Applications of Shock-wave and High-strain-rate Phenomena[C] . Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers B V, 1995. 677—681.
- [4] ГОРОДНИКОВ В А, САДОВОЙ А А, СОФРОНОВ В Н. Роль диссипативных процессов в экспериментах по реализации всесторонне сжатия и растяжения при взрывном нагружении шаров [J] . Физика Горения и Взрыва, 1998, 34(1): 96—101.
- [5] KOZLOV E A. Experimental Check of E I Zababakhin Hypothesis Concerning Limitation of Energy Cumulating in the Spherically Converging Shock-wave Front in the Medium with Phase Transitions[A] . SCHMIDT S C, DICK R D, FORBES J W, et al. Shock Compression of Condensed Matter-1991[C] . Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers B V, 1992. 169—171.
- [6] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体[M] . 北京: 科学出版社, 1980. 1—7.
- [7] 徐锡申, 张万箱. 实用物态方程理论导引[M] . 北京: 科学出版社, 1986. 517—534.
- [8] 饭田修一, 大野和郎, 神前熙, 等. 物理学常数用表[M] . 张质贤. 北京: 科学出版社, 1981. 87.
- [9] 经福谦. 实验物态方程导引(第二版)[M] . 北京: 科学出版社, 1999. 317—323.
- [10] 热尔诺科列托夫, 等. 高能量密度下凝聚物质的冲击压缩和绝热膨胀的实验数据[M] . 韩钧万. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1997. 85—86.

Recover Device of Samples Treated under High-Pressure by Quasi-Spherical Shock Wave Loading

YANG Shi-yuan^{1,2}, JIN Xiao-gang¹, DONG Yu-bin¹, CHEN Qi-feng¹, WANG Ji-sheng²

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

2. Department of Material Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, Sichuan, China)

Abstract: Recover devices of samples treated under super-pressure loading by quasi-spherical converging shock wave using nitromethane liquid explosive were studied. High-pressure acting on samples were produced by shock wave front converging in metallic ball. Destruction and metallograph of metallic ball after shock treatment were studied. The results show that shock waves front is spherical Symmetry and recovery of samples is reliable. The pressure near the center of metal ball is higher than 207 GPa. The devices can be significantly used in investigating recover samples of materials loaded by ultrahigh pressure shock waves.

Keywords: shock wave; device; recover; quasi-spherical; converge