

# 用多次冲击压缩方法研究稠密氢氦等摩尔混合气体的物态方程\*

田春玲<sup>1)2)</sup> 蔡灵仓<sup>1)</sup> 顾云军<sup>1)</sup> 经福谦<sup>1)</sup> 陈志云<sup>1)</sup>

1) 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)

2) 西南大学物理系, 重庆 400715)

(2006 年 11 月 21 日收到, 2006 年 12 月 21 日收到修改稿)

采用液氮冷却以及气体增压技术, 制备了 ~30MPa 及 ~90K 初始状态的氢、氦等摩尔混合气体样品, 以二级轻气炮作为加载工具, 用不同灵敏度设置的两套多通道瞬态高温计系统获得完整、清晰的稠密氢、氦混合气体多次冲击压缩过程的光谱辐射强度信号, 并建立起相应的实验数据处理和分析技术, 获得了 5—140 GPa 范围内氢、氦混合气体一至五次冲击两贡献物态方程, 以及一次、二次和四次冲击温度实验数据. 流体变分理论和离解模型用来分析和解释所获得的测量结果.

关键词: 氢、氦混合气体, 多次冲击压缩, 光谱辐射强度历史, 物态方程

PACC: 7847, 6400

## 1. 引 言

氢和氦(及其同位素)是结构最简单的单原子和双原子分子, 作为研究高温高压条件下凝聚态物质性质的两种经典例子, 它们一直备受人们的关注<sup>[1-3]</sup>. 近代自然科学和工程技术中的大量实际问题, 如核聚变、天体演化、金属氢等问题, 均涉及到高温高压下氢、氦的行为特性. 在核聚变过程中, 其主要的反应物与生成产物是由氘、氚、氦等元素组成的混合物<sup>[4]</sup>. 在此过程中混合物要经历一个从数十万大气压及数千度以下温度变化到千万大气压及十万度以上温度的过程. 氢和氦也是土星、木星等大行星的主要组成成分, 在研究这类星体的辐射特性、地震特征和构造它们的物质结构模型时, 都必须以氢、氦及其混合物在一定的密度( $0.1 \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 10 \text{ g/cm}^3$ )和温度( $1000 \text{ K} \leq T \leq 30000 \text{ K}$ )范围内的行为特性为基础<sup>[5]</sup>. 因此, 研究氢、氦及其混合物的高温高压状态方程对新能源的开发利用、天体物理研究中某些基础问题的解决都具有重要意义.

目前, 对于单质液氢(氘)、液氦物态方程的研究工作已有大量报道<sup>[6-12]</sup>, 但关于氢、氦混合物高温高

压状态方程的实验研究还比较有限<sup>[13, 14]</sup>. 由于氢、氦具有不同的液化温度, 人们无法制备氢、氦均匀混合的液态样品, 而只能直接冲击加载均匀混合的气体样品, 并依靠提高气态样品的初始密度以及多次冲击压缩技术来提高加载压力. 利用多次冲击压缩, 人们可以在一次实验中观测物质压强从几个吉帕变化到上百吉帕的不同冲击压缩状态的性质<sup>[13-17]</sup>. 为了研究压强引起的离解、电离等效应, 人们关注对样品冲击温度的测量<sup>[10, 13-16]</sup>. 然而, 在前面的研究中<sup>[13, 14]</sup>人们均没有精密地测量到氢、氦混合流体的冲击温度. 这主要是由于在氢、氦混合物多次冲击压缩实验中, 样品的光谱辐射强度前后变化太大, 约达 1—2 数量级, 很难在一次实验中同时测量到各次冲击压缩状态下多光谱辐射信号. 尽管俄罗斯人对多次冲击压缩下的气体氢、氦电导率变化及辐射特性有过测量报道<sup>[14-16]</sup>, 然而在他们的实验中, 很难清晰地分辨出样品在各次冲击压缩下的光辐射信号. 本工作以二级轻气炮作为加载工具, 针对样品光谱辐射强度的巨大变化范围, 用不同精度设置的两套多通道瞬态高温计测量系统, 获得了初始密度为  $0.076 \text{ g/cm}^3$  的氢、氦等摩尔混合气体完整的、清晰的一次至五次冲击压缩下的光谱辐射强度历史. 通

\* 国防科技实验室基金(批准号: 51478678905ZS7501)西南大学博士基金资助的课题.

通过对光谱辐射强度记录信号特征量(时间及辐射强度值)的分析,得到了 140 GPa 范围内氩、氦等摩尔混合气体多次冲击下的压强、比容、温度等实验数据,并用化学模型(Helmholtz 自由能模型)进行了理论分析。

## 2. 实验原理及技术

氩、氦混合气体的冲击加载状态是在  $\phi 35$  mm 的二级轻气炮上实现的,实验装置及测量系统如图 1 所示。实验系统主要由气炮加载系统、磁测速系统、样品靶系统、高温计系统等组成。磁测速系统用于测量飞片击靶的速度( $W$ )。样品靶系统主要由 304 不锈钢基板、样品、蓝宝石窗口、液氮低温冷却罩、注(抽)气管等组成。样品的初态温度  $T_0$ 、初态压强  $P_0$  分别由热电偶和压力计监测。每台高温计有六至七个波长( $\lambda = 400, 450, 500, 600, 665, 700, 800$  nm)记录通道,每一通道各有一只光电倍增管,在每只光电倍增管之前都加有单色滤波片,只令相应波长的光信号进入并将它转化为电信号,并用示波器记录下来。由于样品在一次冲击下温度较低,辐射信号弱,实验中采用高灵敏度设置的高温计系统进行测量,而对于高于一次冲击较高温度的强辐射信号,则采用低灵敏度设置高温计进行测量,两台高温计同时触发。在实验中,飞片尺寸为  $32 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,基板厚 3 mm,气体样品厚度( $d_0$ )为 3.711 mm,蓝宝石窗口尺寸  $28 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ,光纤的数值孔径为 0.22 或 0.27。

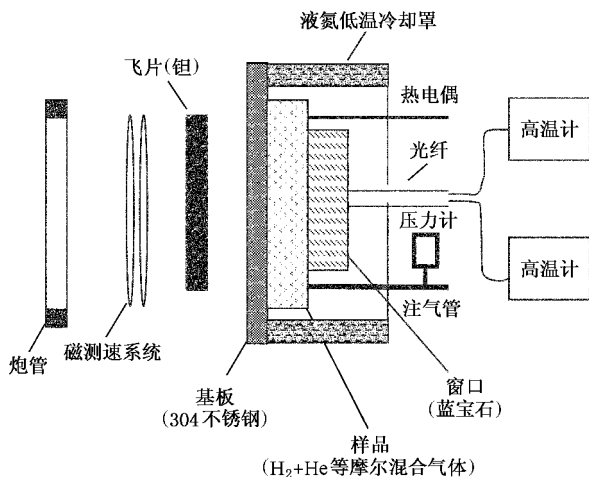


图 1 实验装置及辐射法测量系统示意图

实验加载时,由二级轻气炮将平面钽飞片加速到 5.559 km/s 的速度,使飞片平行撞击 304 不锈钢

基板。撞击后基板中产生的冲击波进入氩、氦混合气体样品,对样品进行第一次冲击压缩。一次冲击压缩中的样品压缩高温层产生的光辐射,将通过透明氩、氦混合气体(未压缩层)和蓝宝石窗口,并经光纤传入具有时间分辨本领的光学高温计。当样品中的一次冲击波到达样品/窗口界面时,除向高阻抗蓝宝石窗口中透射一冲击波外,还将反射回一冲击波对样品进行二次冲击压缩。当样品中的冲击波到达样品/基板界面时,除向高阻抗基板中透射一冲击波外,还将反射回一冲击波对样品进行第三次压缩。由于气态样品是置于高阻抗的基板和窗口之间,冲击波将在基板和窗口之间来回反射对样品实施多次冲击压缩。当冲击波从样品/窗口界面反射,对样品进行偶次(二次、四次...)冲击压缩高温层的光辐射信号将直接通过蓝宝石窗口和光纤进入高温计系统,故人们可以观察到冲击波到达样品/窗口界面时刻,对应着样品的光辐射强度信号的突变时刻。而当冲击波从样品/基板界面反射压缩样品时,如第三次、五次冲击压缩样品时,从该冲击压缩高温层发出的光辐射,需经过该冲击波阵面前方的样品压缩层之后,才能被光纤送入高温计。如果该波阵面前方的样品压缩层失去其透明性,该冲击波阵面上的光辐射将无法被测量系统记录下来,从而不能获得该次样品冲击压缩层的辐射强度信号和温度信息。

图 2 为示波器记录到的低灵敏度设置高温计的两个波长通道的实验信号。我们可以观察到样品在多次冲击压缩下呈台阶状变化的光谱辐射强度历史。图中  $t_0$  表示冲击波从基板进入样品的时刻, $t_1$  表示冲击波第一次到达样品/窗口界面的时刻。此时从界面反射回一个冲击波对样品进行二次压缩,样品二次冲击压缩高温层发出较强的光谱辐射强度信号,其陡直的上升沿表明二次冲击压缩样品层很快到达光学厚。因此,来自样品/基板界面上反射的对样品进行第三次冲击压缩高温层的辐射信号在记录上将不能出现。 $t_2$  是冲击波第二次到达样品/窗口界面的时刻,是从样品/窗口界面反射的冲击波对样品进行第四次冲击压缩的开始时刻。 $t_3$  表示冲击波第三次到达样品/窗口界面的时刻,是从样品/窗口界面反射的冲击波对样品进行第六次冲击压缩的开始时刻。上述冲击波到达样品/窗口界面时刻的判读,也是由实验信号和理论模拟结果的对比而得到的,见图 3。

根据测量得到的第一、二、三个信号平台的光谱

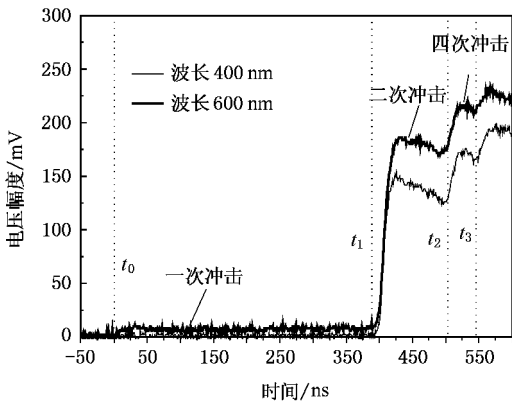


图2 典型的示波器记录光谱辐射历史信息

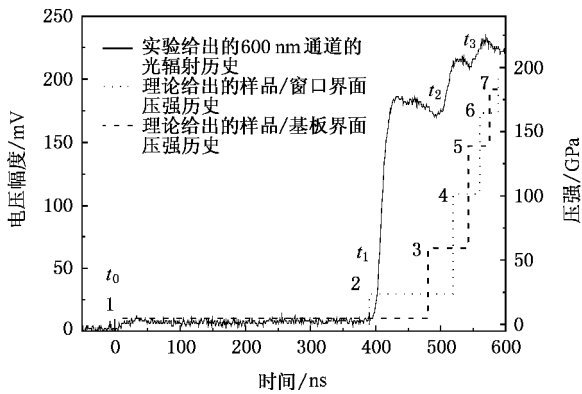


图3 示波器记录的光谱辐射强度(左坐标)时间变化与理论模型给出的基板/样品、样品/窗口界面压强(右坐标)时间变化的比较

辐射强度数据,可以得到样品的一、二、四次冲击温度.其中,样品的一次冲击压缩辐射信号在低灵敏度设置的高温计系统中记录得到的信号平台值太低,它的准确光谱辐射强度实验数据可从另一台高灵敏度设置的高温计系统获得.而根据各个光谱辐射信号平台的时间宽度可以推算出样品中各次冲击波的传播速度,确定样品的雨贡纽状态参量.在多次冲击温度测量中,蓝宝石窗口材料在冲击波来回反射冲击压缩下是否仍保持着良好的透明性至关重要.从前人的研究来看,蓝宝石在 100 GPa 的冲击压强范围是透明的<sup>[18]</sup>.在本实验中,当冲击波第三次从蓝宝石界面反射(即  $t_3$  时刻)时,蓝宝石中的压力将达 165 GPa.此后样品的光谱辐射信号台阶状的特征不再明显.因此  $t_3$  时刻后所记录的光谱辐射信号不再用来分辨冲击波传播时间间隔和获得样品的冲击温度数据.

### 3. 混合气体多次冲击雨贡纽状态参量及冲击温度的确定

对于氢分子、氦原子等几乎成球对称的简单非极性分子,其实验临界压缩因子( $z_c = P_c V_c / NkT_c$ )约为 0.30,这与 Peng 和 Robinson(PR)提出的经验物态方程给出的表观临界压缩因子 0.3074 非常接近<sup>[19]</sup>.因此,PR 方程能完全重复数十兆帕到数百兆帕范围内氢气的等温实验数据<sup>[20]</sup>.在本工作中该方程用来推算给定初始温度  $T_0$  和压强  $P_0$  下,低温稠密氢、氦混合气体样品的初始比容  $V_0$  和内能  $E_0$ .

为了得到样品的多次冲击雨贡纽状态参数,需要建立起相应的实验数据处理与分析技术,解决好冲击波在两个界面,即基板/样品界面和样品/窗口界面处的冲击阻抗匹配问题.在多次冲击加载过程中,基板压强和粒子速度( $u$ )变化规律可用其等熵卸载线来近似描述,而对蓝宝石窗口可用其一次冲击压缩线来近似它的多次冲击压缩线<sup>[15,17]</sup>.图 4 是对多次冲击阻抗匹配过程的分析, $P-u$  平面内右边的曲线代表钢基板的等熵卸载线,左边代表窗口材料的一次冲击绝热线.它们由测量得到的飞片速度,  $W = 5.559$  km/s,以及已知的飞片材料、基板材料、窗口材料的物态方程(见表 1)得到.在已知基板和窗口材料状态方程并给定样品初始状态( $P_0, V_0, E_0, u_0$ )前提下(样品初态粒子速度  $u_0 = 0$ ),只需测量出样品中各次冲击过程所持续的时间,得到各次冲击波的速度,就可以用阻抗匹配原理确定出各次冲击雨贡纽参量,包括压力、体积以及内能,具体方法如下.

表1 钽、钢、蓝宝石的雨贡纽参数<sup>[21]</sup>

参数	钽	304 钢	蓝宝石
$\rho_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	16.65	7.87	3.985
$C$ (km/s)	3.293	4.58	11.19
$\lambda$	1.307	1.49	1.0
$\gamma_0$	1.6	2.2	1.3

根据样品的初始厚度  $d_{k-1}$  以及测量到的第  $k$  ( $k = 1, 2, \dots$ )次冲击传播时间  $\Delta t_k$ ,确定出样品中第  $k$  次冲击波波速

$$D_k = u_{k-1} \pm d_{k-1} / \Delta t_k. \quad (1)$$

对于偶次冲击( $k = 2, 4, \dots$ )的冲击波速度上式取“+”,奇次冲击( $k = 1, 3, \dots$ )上式取“-”.其中,下

标“ $k-1$ ”表示样品的第  $k$  次冲击前的状态.由测量得到的第  $k$  次冲击的冲击波速度  $D_k$ ,可在  $P-u$  图中作出样品中第  $k$  次冲击波的波直线,并有以下关系:

$$P_k = P_{k-1} + \rho_{k-1}(D_k - u_{k-1})(u_k - u_{k-1}). \quad (2)$$

根据边界连续条件,样品奇次冲击压缩冲击波的波直线与基板等熵卸载线的交点得到样品的奇次冲击压缩状态.偶次冲击波的波直线与窗口雨贡纽线的交点,得到样品的偶次冲击压缩状态.在确定样品第  $k$  次冲击压缩状态的粒子速度  $u_k$  后,样品第  $k$  次冲击压缩状态比容  $V_k$  可由以下关系得到:

$$V_k = V_{k-1}(D_k - u_k)(D_k - u_{k-1}). \quad (3)$$

在确定样品的压强  $P_k$  和比容  $V_k$  后,样品第  $k$  次冲击压缩后的内能  $E_k$  满足下列关系式:

$$E_k - E_{k-1} = \frac{1}{2}(P_k + P_{k-1})(V_{k-1} - V_k). \quad (4)$$

在一次冲击中,样品的初始厚度  $d_0$  为样品盒的长度,辐射信号第一个平台的时间宽度就等于冲击波在样品中的传播时间( $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ ).因此,一次冲击波波速  $D_1 = d_0/\Delta t_1$ .一次冲击波的波直线与基板等熵卸载线的交点得到样品的一次冲击状态(点 1 表示),见图 4.将  $P_1, u_1$  代入(3)(4)式,可以将样品一次冲击状态的其余参量  $V_1, E_1$  全部确定.以此为初始条件,根据测量得到的二次冲击波波速,在  $P-u$  平面作出二次冲击波的波直线,它与窗口雨贡纽线的交点(点 2 表示)对应样品的二次冲击压缩状态,如图 4 所示.以此类推,根据测量到的三次、四次和五次冲击波的波直线,可将样品的三次、四次和五次冲击状态得到.其中,样品的一、三、五奇次冲击压缩状态处在基板的等熵卸载线,而二、四偶次冲击压缩状态处在窗口的雨贡纽线上,如图 4 所示.

由于第二个信号平台的宽度( $t_2 - t_1$ )是冲击波

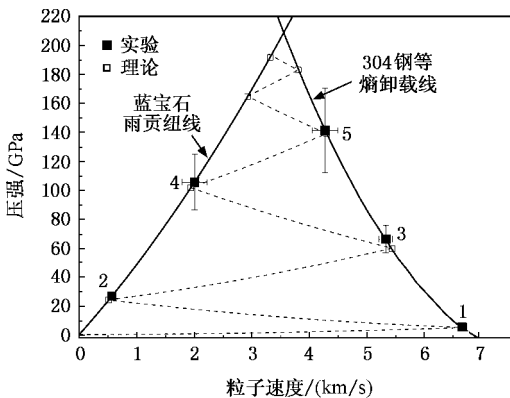


图 4 多次冲击压缩下氢氦混合气体的压强-粒子速度关系

在样品中二次冲击传播时间与三次冲击传播时间之和,第三个信号平台的宽度( $t_3 - t_2$ )是冲击波在样品中四次冲击传播时间与五次冲击传播时间的之和,在划分二、三次以及四、五次冲击波传播时间比例时,引用了理论计算结果,理论给出的二、三次冲击传播时间比例为(0.70:0.30),四、五次冲击时间比例为(0.58:0.42).在以上四个时间测量点  $t_0, t_1, t_2, t_3$  的判读中,每个都存在 1—2 ns 的判读误差.因此,随着冲击次数增加,由时间判读引起的传递误差增大,雨贡纽状态参量的测量精度降低.表 2 中给出

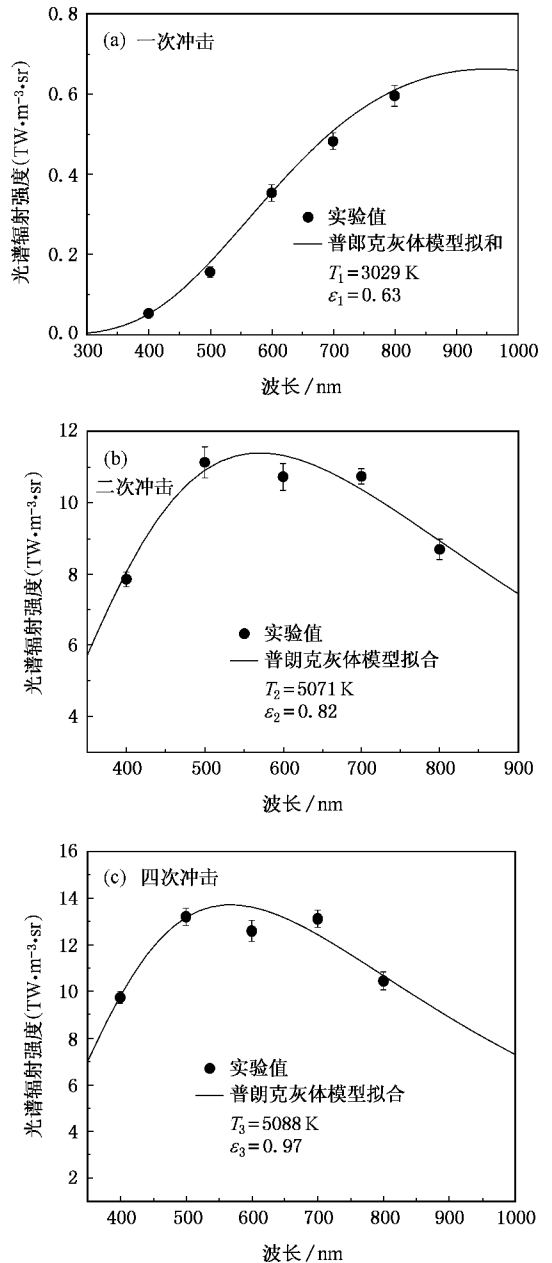


图 5 样品一次、二次和四次冲击光谱辐射特性的普朗克灰体模型拟合

了各次雨贡纽状态参量的测量结果.

根据辐射信号各平台的光谱辐射强度数据,可以得到样品的各次冲击温度.假设样品的冲击辐射特性可用灰体辐射规律来描述<sup>[22]</sup>

$$I_{\text{gre}}(\epsilon, \lambda, T) = \epsilon \cdot I_{\text{pl}}(\lambda, T), \quad (5)$$

其中  $I_{\text{gre}}$ ,  $I_{\text{pl}}$  分别为灰体和黑体的光谱辐射强度,  $\epsilon$  是灰体发射率.按普朗克公式

$$I_{\text{pl}}(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} [e^{c_2/\lambda T} - 1]^{-1}, \quad (6)$$

$I_{\text{pl}}(\lambda, T)$  表示温度为  $T$  的黑体辐射体,在单位面积和单位时间内,向单位立体角内辐射的单位波长间隔内的能量.其中  $C_1 = 1.1910 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2/\text{sr}$ ,  $C_2 =$

$1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ .由测出的多个波长的光谱辐射强度数据,用最小二乘法通过(5)式可以拟合出样品的各次辐射温度(冲击温度)  $T$  和灰体发射率  $\epsilon$ <sup>[23]</sup>.图 5(a)为样品一次冲击压缩状态光谱辐射强度的实验值及其普朗克灰体模型的拟合结果.图 5(b)是样品二次冲击压缩状态辐射特性的拟合结果,图 5(c)是样品四次冲击压缩状态辐射特性的拟合结果.由图 5(b)和(c)可见,样品的二次冲击温度  $T_2$  和四次冲击温度  $T_4$  几乎不变,只是灰体发射率发生了变化.表 2 最后两行中列出了各次冲击温度、灰体发射率的测量结果.

表 2 氢氦等摩尔混合气体多次冲击雨贡纽状态参量及冲击温度、灰体发射率测量结果

冲击状态 参量	初态	一次	二次	三次	四次	五次
$P/\text{GPa}$	0.0272	$4.9 \pm 0.1$	$26.5 \pm 1.6$	$66.0 \pm 9.5$	$105.4 \pm 19.2$	$141.2 \pm 29.2$
$V(\text{cm}^3/\text{mol})$	40.09	$11.98 \pm 0.31$	$6.65 \pm 0.53$	$4.86 \pm 0.80$	$3.99 \pm 1.07$	$3.55 \pm 1.26$
$E(\text{kJ}/\text{mol})$	14.11	$83.6 \pm 1.2$	$167.4 \pm 10.6$	$249.9 \pm 28.9$	$324.3 \pm 68.6$	$379.3 \pm 128.8$
$T/\text{K}$	88	$3029 \pm 300$	$5071 \pm 300$	-	$5088 \pm 300$	-
$\epsilon$	-	0.63	0.83	-	0.97	-

## 4. 理论计算及结果讨论

在目前的冲击压缩状态下( $T < 10^4 \text{ K}$ ,  $P \leq 140 \text{ GPa}$ )理论计算主要考虑氢分子的离解反应( $\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{H}$ ).假定冲击压缩后样品由氢分子( $\text{H}_2$ )、氢原子( $\text{H}$ )和氦原子( $\text{He}$ )组成,三种组分可以均匀混合,各组分粒子间的相互作用用 exp-6 势来描述.对于同类组分  $\text{H}_2\text{-H}_2$ ,  $\text{He-He}$  的作用势参数通过拟合各自的静高压和动高压实验数据而得到<sup>[8,9]</sup>,  $\text{H-H}$  的相互作用势参数采用文献[11]给出的数值.对于异类组分  $\text{H-H}_2$ ,  $\text{H-He}$ ,  $\text{He-H}_2$  间的相互作用则采用 Lorentz-Berthelot 混合法则得到<sup>[24]</sup>,见表 3.运用流体变分理论处理粒子间的相互作用引起的非理想效应<sup>[25]</sup>,建立体系的 Helmholtz 自由能模型,并由热力学关系得到压强、内能等量.在恒定温度和恒定比容情况下,体系达到离解平衡时,  $\text{H}$  粒子数  $N_{\text{H}}$ ,  $\text{H}_2$  粒子数  $N_{\text{H}_2}$  应使体系的 Helmholtz 自由能最小,此时氢分子的离解度  $\alpha = \frac{N_{\text{H}}/2}{N_{\text{H}}/2 + N_{\text{H}_2}}$ .

理论计算给出的样品各次冲击压缩  $P-u$  曲线,如图 4 中虚线所示.其中样品一次冲击压缩  $P-u$  理论曲线与基板等熵卸载线的交点,对应着样品的一

次冲击压缩状态的理论预估值,该理论预估值与实验值完全重合.样品二次冲击压缩  $P-u$  理论曲线与窗口材料的  $P-u$  线的交点,对应着样品二次冲击压缩状态的理论预估值,该理论预估值与实验值也有很好的一致性.对于样品三、四、五次冲击压缩状态的压强、粒子速度,理论计算与实验结果在测量误差范围也符合得较好.

表 3 各组分粒子间的势参数

势参数	H-H	$\text{H}_2\text{-H}_2$	He-He	H- $\text{H}_2$	$\text{H}_2\text{-He}$	H-He
$\alpha$	13.0	11.1	13.1	12.013	12.058	13.050
$\epsilon/\text{K}$	20.0	36.4	10.8	26.982	19.827	14.697
$r_i^*/\text{\AA}$	1.4	3.43	2.967	2.415	3.199	2.184

图 6 比较了实验和理论给出的氢氦混合气体各次冲击压缩状态的压强-比容关系.在理论计算中也给出了不考虑氢分子离解的计算结果.从图 6 可见,实验数据点与理论计算值间一致性较好,特别在一、二冲击压缩状态.随着冲击次数的增加,观测到的氢氦混合流体的压缩率较理论预估值低.而两种理论模型给出  $P-V$  线靠得较近,表明氢分子离解对于混合气体多次冲击雨贡纽线的影响并不明显.图 7 比较了实验和理论得到一、二、四冲击温度与冲击压强的变化关系.从图 7 可见,离解模型能够对样品

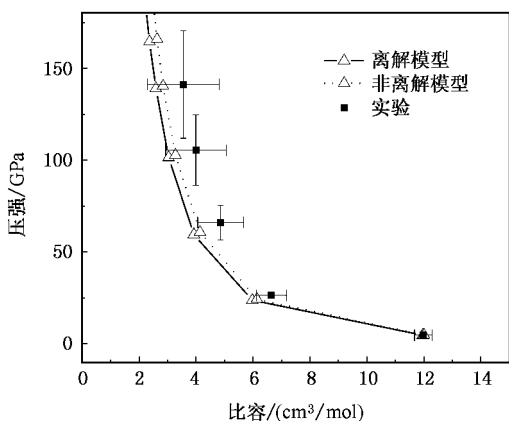


图6 氢氦混合流体的多次冲击压缩状态压强与体积的关系

的一、二次的冲击温度的测量结果做出合理描述.在冲击压强为 5 GPa 时,温度约为 3000 K 的一次冲击压缩状态,样品中的氢分子离解度  $\alpha = 0.3\%$ ;此时离解效应可以忽略,离解和非离解模型都能对体系的温度做出合理描述.但在冲击压强为 27 GPa 时,温度约为 5071 K 的二次冲击压缩状态,离解模型估计此时约有 7% 的氢分子发生了离解,吸收了部分冲击波能量,致使样品的冲击温度理论预估值较非离解模型的值低,而与实验值更为接近.从二次冲击压缩状态到四次冲击压缩状态,样品的压强从 27 GPa 提高到 105 GPa,而实验测量到的样品冲击温度并不发生变化,仍保持在 5100 K 左右.对于四次冲击压缩状态,离解模型给出的氢分子离解度为 32%,冲击温度的预估值为 7400 K.虽然该值已较非

离解模型预估值低 1400 K,但仍较测量值高.对于四次冲击温度实验与理论结果的巨大差异,仍需要我们从实验和理论两方面中做出进一步研究.如在理论计算中考虑压致电离的影响,以及考证蓝宝石窗口在 100 GPa 时的透明性等.

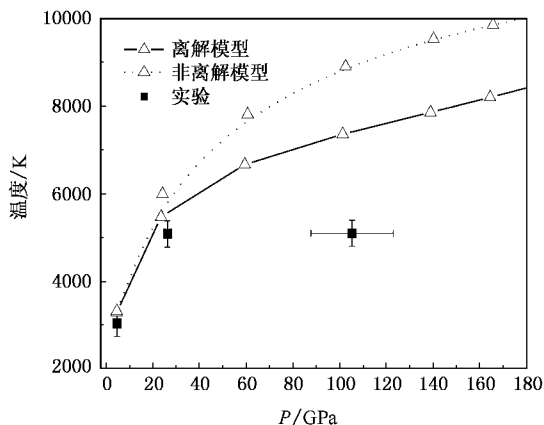


图7 氢氦混合流体的多次冲击压缩状态冲击温度与压强的关系

本工作发展了气体样品的准等熵多次冲击压缩过程的辐射信号测量技术,获得气体样品完整、清晰的多次冲击压缩光谱辐射强度历史信号.并建立起相应的实验数据分析和处理技术,得到了压强最高至 140 GPa 氢氦混合气体多次冲击雨贡纽物态方程,以及一次、二次和四次冲击温度实验数据.这对于建构氢氦混合物高温高压物态方程理论模型,认识氢氦混合物原子、分子结构变化及粒子间相互作用规律具有重要意义.

- [1] Wang C X, Tian Y M, Jiang M, Cheng X L, Yang X D, Meng C M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5784 (in Chinese) [王彩霞、田杨萌、姜明、程新路、杨向东、孟川民 2006 物理学报 **55** 5784]
- [2] Tian C L, Liu F S, Cai L C, Jing F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 764 (in Chinese) [田春玲、刘福生、蔡灵仓、经福谦 2006 物理学报 **55** 764]
- [3] Chen Q F, Cai L C, Chen D Q, Jing F Q 2005 *Chin. Phys.* **14** 2077
- [4] Lindl J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [5] Guillot T 1999 *Scienc* **286** 72
- [6] Nellis W J, Holmes N C, Mitchell A C *et al* 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1248
- [7] Nellis W J, Mitchell A C, van Thiel M *et al* 1983 *J. Chem. Phys.* **79** 1480
- [8] Ross M, Ree F H, Young D A 1983 *J. Chem. Phys.* **79** 1487

- [9] Ross M, Young D A 1986 *Phys. Lett. A* **118** 463
- [10] Holmes N C, Ross M, Nellis W J 1994 *J. Phys. Rev. B* **52** 15835
- [11] Juranek H, Redmer R 2000 *J. Chem. Phys.* **112** 3780
- [12] Saumon D, Chabrier G 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5122
- [13] Zhang M J, Liu F S, Tian C L *et al* 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2190
- [14] Ternovoi V Ya, Kvitov S V, Pyalling A A *et al* 2004 *JETP Lett.* **79** 8
- [15] Ternovoi V Ya, Filimonov A S, Pyalling A A *et al* 2001 *Shock Compression of Condensed Matter* (New York: Melville) p107
- [16] Ternovoi V Ya, Filimonov A S, Fortov V E *et al* 1999 *Physica B* **265** 6
- [17] Nellis W J, Weir S T, Mitchell A C 1999 *Phys. Rev. B* **59** 3434
- [18] Urtiew 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 3490
- [19] Xu X S, Zhang W X 1986 *Introduction to applied equation of state* (Beijing: Science Press) p81, 92 (in Chinese) [徐锡申、张万箱

- 1986 实用物态方程基础(北京 科学出版社 第 81 92 页] [ 23 ] Cai L C , Chen Q F , Gu Y J *et al* 2005 *Science in China Ser. C* **35** 369 ( in Chinese ) [ 蔡灵仓、陈其峰、顾云军等 2005 中国科学 G 辑 **35** 369 ]
- [ 20 ] Beenakker J J M , Vreker F H , Van Itterbeek A 1959 *Physica* **25** 9
- [ 21 ] Thomas S D , Thomas J A 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 4259
- [ 22 ] Jing F Q 1999 *Introduction to experimental equation of state* ( Beijing Science Press ) p300 ( in Chinese ) [ 经福谦 1999 实验物态方程基础(北京 科学出版社 第 300 页 ]
- [ 24 ] Thiel M van , Ree F H 1996 *J. Chem. Phys.* **104** 5019
- [ 25 ] Ross M 1979 *J. Chem. Phys.* **71** 1567

## Investigation of the pressure-volume-temperature equation of state for dense hydrogen-helium mixture using multi-shock compression method<sup>\*</sup>

Tian Chun-Ling<sup>1,2)</sup> Cai Ling-Cang<sup>1)</sup> Gu Yun-Jun<sup>1)</sup> Jing Fu-Qian<sup>1)</sup> Chen Zhi-Yun<sup>1)</sup>

1) *Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics Research , Institute of fluid physics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China )*

2) *Department of Physics , Southwest University , Chongqing 400715 , China )*

( Received 21 November 2006 ; revised manuscript received 21 December 2006 )

### Abstract

The multi-shock Hugoniot and shock temperatures of gaseous hydrogen-helium equimolar mixture with initial pressure and temperature of  $\sim 30$  MPa and  $\sim 90$  K have been measured up to 140 GPa using two-stage light gas gun and shock reverberation technique. Two kinds of multi-channel pyrometer systems with different sensitivities , were used in experiment for diagnostics , because the thermal radiation of the sample in the first-shock state is lower than that in the multi-shocked states by a magnitude of one to two orders. The measured pressure , volume and temperature are respectively 5 GPa ,  $12.0 \text{ cm}^3/\text{mol}$  and 3030 K in the first-shock state , 27 GPa ,  $6.7 \text{ cm}^3/\text{mol}$  and 5070 K in the second -shock state , and 105 GPa ,  $4.0 \text{ cm}^3/\text{mol}$  and 5090 K in the fourth-shock state. The results for the first- and second-shock states are well described by the fluid perturbation theory and dissociation model. It demonstrates that the dissociation of molecular hydrogen of the compressed sample is negligible in the first-shock state , while about 7% and 32% of molecular hydrogen undergo dissociation in the second- and fourth -shock states , respectively. The fourth-shock temperature measured was lower than the prediction for  $\sim 2000$  K.

**Keywords :** hydrogen-helium mixture , multiple shock compression , spectral radiance history , equation of state

**PACC :** 7847 , 6400

<sup>\*</sup> Project supported by the Foundation of Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research ( Grant No. 51478678905ZS7501 ) and Doctor 's Foundation of Southwest University.