第 17 卷 第 4 期 高 压 物 理 学 报 Vol. 17, No. 4
2003 年 12 月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS Dec., 2003

**文章编号**：1000-5773(2003)04-0330-06

# Hugoniot 线上的一个经验常数
## ——来自多孔材料 Hugoniot 数据的对比研究*

代 福[1]，龚自正[1]，黄海军[1,2,3]，陈俊祥[2]，经福谦[1,2]

(1. 西南交通大学高温高压物理研究所，四川成都 610031；
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，四川绵阳 621900；
3. 辽宁大学物理系，辽宁沈阳 110036)

**摘要**：对不同初始密度样品冲击压缩 Hugoniot 数据的系统分析显示，对每种固体物质而言存在一个表征材料特性的沿其 Hugoniot 线不随冲击压力而变的经验常数 $\beta$。$\beta$ 的数值随材料而异。对金属元素而言，该经验特性常数 $\beta$ 与初始密实密度 $\rho_0$ 之间遵循同一个幂指数关系。利用该常数 $\beta$，可很方便地对不同初始密度的 Hugoniot 数据进行换算，并可以很方便地获得 Grüneisen 参数。还对 $\beta$ 值为常数的适用范围作了讨论。

**关键词**：Hugoniot 线；经验常数 $\beta$；多孔材料
**中图分类号**：O521.21 **文献标识码**：A

## 1 引 言

Grüneisen 参数 $\gamma$ 是物质高温高压物态方程和高压物性研究中的一个重要参数[1]，在处理冲击压缩数据、研究物质热弹性性质和多种热力学量的温度和压力效应、进行等温压缩、等熵压缩及冲击压缩状态之间的相互转换、确定地球内部物质组成和温度分布等问题中有重要作用。迄今，人们已经提出多种方法对 Grüneisen 参数进行过研究。其中，Alt'shuler 等人提出过用测量多孔与密实材料 Hugoniot 数据计算 Grüneisen 参数的方法(参见文献[2])，具体的计算公式是

$$\gamma=\frac{2v(p'_{\mathrm{H}}-p_{\mathrm{H}})}{p'_{\mathrm{H}}(v_{00}-v)-p_{\mathrm{H}}(v_0-v)} \tag{1}$$

其物理意义是：对于某一种材料，设其多孔样品与密实样品的初始比容分别为 $v_{00}$ 和 $v_0$，当对上述两种样品进行冲击压缩达到同一终态比容 $v$ 时，如果样品中的实测冲击压力分别为 $p'_{\mathrm{H}}$ 和 $p_{\mathrm{H}}$，则该材料在比容 $v$ 时的 Grüneisen 参数可以通过(1)式计算得到。应该说明在上式推导过程中引入了如下的假设：$\gamma$ 值仅是 $v$ 的函数，与样品中的温度状态无关。经验说明，这个假设在一定条件下是近似成立的。

考虑到密度与比容互为倒数，即有 $v=1/\rho$ 关系，则(1)式可以改写为

$$\gamma=2/(\rho\beta-1) \tag{2}$$

式中

$$\beta=\frac{\rho_0-\rho_{00}p_{\mathrm{H}}/p'_{\mathrm{H}}}{\rho_0\rho_{00}(1-p_{\mathrm{H}}/p'_{\mathrm{H}})} \tag{3}$$

显然由(3)式定义的 $\beta$ 的单位是 $\mathrm{cm^3/g}$。通过对多种材料 Hugoniot 实测数据的分析，我们发现，用

* **收稿日期**：2002-09-19；**修回日期**：2003-03-12
**基金项目**：国家自然科学基金重大项目(10299040)
**作者简介**：代 福(1977—)，男，硕士研究生.

(3)式计算的 $\beta$ 值沿 Hugoniot 线基本保持不变，这个值可视之为用以表征该材料性质的一个经验常数。由于 $\beta$ 值具有这个性质，为进一步处理和分析 Hugoniot 数据带来了很大方便。下面将给出得到上述结果的具体过程。

## 2　$\beta$ 值的计算分析

为了比较全面地研究 $\beta$ 值的性质，我们选用金属、矿物、离子晶体、分子晶体等多类物质进行研究和分析。

由于金属是常用材料，均质性好，易于进行比较精确的 $\beta$ 值分析，故选用了多种金属进行研究，总计有低冲击阻抗值的铝(2024 铝)、中等冲击阻抗值的铁、铜和钴、高冲击阻抗值的钽、钨。计算中铝、铁、铜的实验数据取自文献[3]，钴、钽、钨的实验数据取自文献[4]。为了便于说明，在表 1 中列出了铁的实验数据，对上述金属材料，通过(3)式计算的结果绘于图 1。由图 1 看出所有金属材料的 $\beta$ 值都可以近似为一个不随密度变化的常数，但具体数值随材料而异(见表 2)。

**表 1　不同初始密度下铁的 $\beta$ 值[3]**

**Table 1　Value of $\beta$ of iron from different initial density[3]**

| $\rho_0$/(g/cm$^3$) | $\rho_{00}$/(g/cm$^3$) | $p_H$/(GPa) | $p'_H$/(GPa) | $\rho$/(g/cm$^3$) | $\beta$/(cm$^3$/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| 7.864 | 6.988 | 47.430 | 59.356 | 9.83 | 0.21 |
| 7.856 | 6.959 | 118.693 | 148.010 | 11.02 | 0.21 |
| 7.861 | 6.933 | 100.717 | 117.350 | 10.70 | 0.24 |
| 7.861 | 6.055 | 100.201 | 153.055 | 10.80 | 0.23 |
| 7.850 | 6.050 | 29.427 | 51.047 | 9.20 | 0.22 |
| 7.850 | 5.919 | 42.514 | 79.685 | 9.62 | 0.22 |
| 7.840 | 4.770 | 34.986 | 120.475 | 9.40 | 0.24 |
| 6.960 | 4.770 | 35.510 | 120.475 | 9.40 | 0.24 |
| 6.050 | 4.880 | 51.047 | 84.535 | 9.20 | 0.26 |

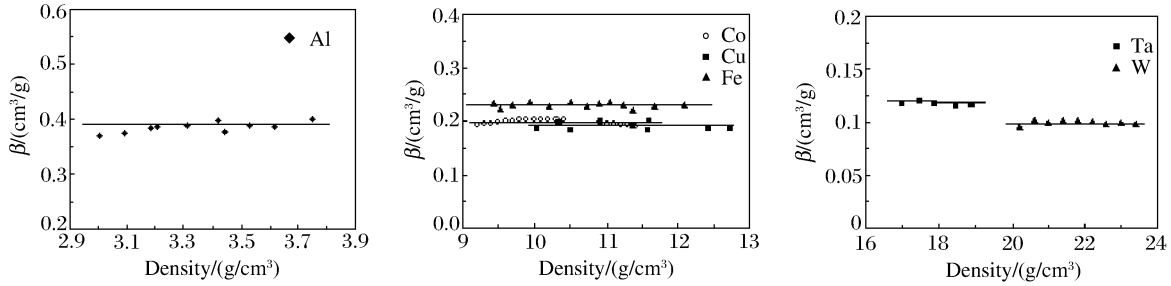



图 1　铝、铁、铜、钴、钽和钨的 $\beta$-$\rho$ 关系

Fig. 1　Relationship between $\beta$ and $\rho$ of Al, Fe, Cu, Co, Ta and W

用同种方法，我们还对离子晶体 CsI 和 KCl 作了计算，计算结果绘于图 2，$\beta$ 平均值列于表 2。对于矿物材料，我们计算了硅辉石 $CaSiO_3$、方镁石 MgO、金红石 $TiO_2$ 和水镁石 $Mg(OH)_2$，计算结果绘于图 3，$\beta$ 平均值亦列于表 2。图 4 是冰态 $H_2O$ 和 $CO_2$ 的计算结果，它们的 $\beta$ 平均值在表 2 中给出。计算用的实验数据取自文献[4]。

从以上分析结果可知，对于多种类型材料(金属、离子晶体、矿物等)，在本研究用于实验数据分析的热力学状态范围内，均存在一个基本上不随压力和温度变化的特征常数 $\beta$，其值随材料而异，因而表征了该材料的一个经验常数。对于 $\beta$ 值究竟代表了材料什么性质的问题，目前尚不清楚，有待进一步研究。

**表 2 某些金属、离子晶体、分子晶体及矿物等材料的 $\beta$ 平均值**

**Table 2 Average value of $\beta$ for some metals, ionic crystals, molecular crystal and minerals**

| Material | $\bar{\beta}$ /(cm³/g) | Material | $\bar{\beta}$ /(cm³/g) |
|---|---|---|---|
| Al | 0.39 | CsI | 0.495 |
| Fe | 0.23 | $Mg(OH)_2$ | 0.367 |
| Cu | 0.19 | $CaSiO_3$ | 0.354 |
| Co | 0.198 | MgO | 0.254 |
| Ta | 0.12 | $TiO_2$ | 0.225 |
| W | 0.1 | $CO_2$(Ice) | 1.09 |
| KCl | 1.388 | $H_2O$(Ice) | 0.97 |

Note: Porosity range: W (1.44), Ta (1.52), $CaSiO_3$ (1.02), $Mg(OH)_2$ (1.005), $TiO_2$ (1.008), $H_2O$, Ice (1.09), CsI (1.797), KCl (1.41), Co (2.13), Fe (1.66), Al (1.424), Cu (1.554), $CO_2$, Ice (1.31), MgO (1.07)

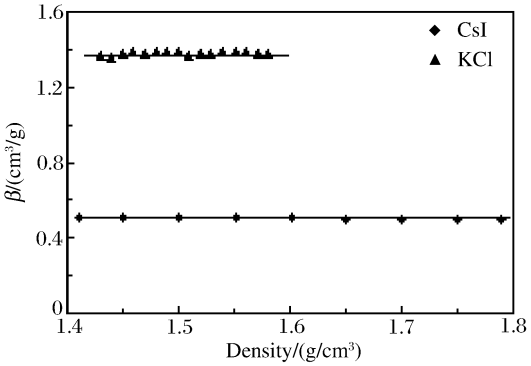



图 2 离子晶体 CsI 和 KCl 的 $\beta$-$\rho$ 关系（计算用的实验数据取自文献[4]）

Fig. 2 Relationship between $\beta$ and $\rho$ of ionic crystal CsI and KCl (Experimental data used in calculations are from Ref. [4])

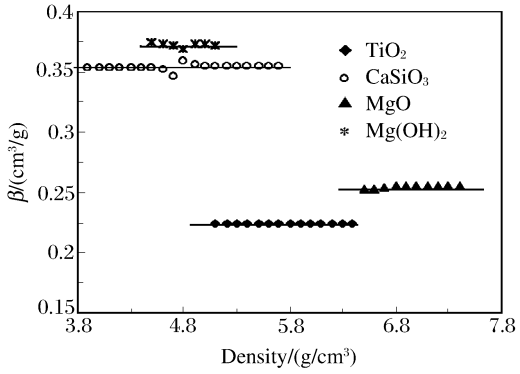



图 3 $CaSiO_3$, MgO, $TiO_2$ 和 $Mg(OH)_2$ 矿物材料的 $\beta$-$\rho$ 关系

Fig. 3 Relationship between $\beta$ and $\rho$ for mineral of $CaSiO_3$, MgO, $TiO_2$ and $Mg(OH)_2$

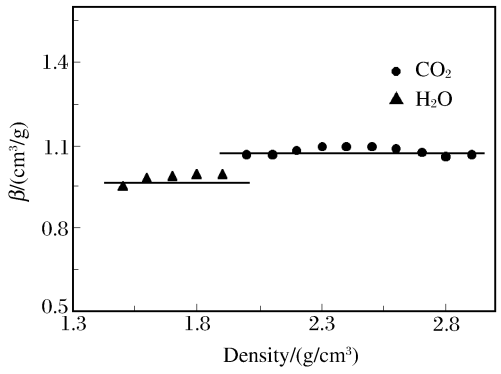



图 4 冰态 $H_2O$ 及 $CO_2$ 的 $\beta$-$\rho$ 关系

Fig. 4 Relationship between $\beta$ and $\rho$ for $H_2O$ and $CO_2$, both are in ice state

## 3 $\beta$ 值性质的进一步研究

### 3.1 经验常数 $\beta$ 合理性的补充证明

实践中，我们经常遇到两类情况，一类是对某种材料，既测量了它的密实样品的 Hugoniot 线，又测量了它的多种孔隙率（即具有不同初始密度）样品的 Hugoniot 线；另一类是对于许多天然的和人工压制的岩石、矿物样品，很难达到理想的密实状态，在这种情况下，能否通过测量两种不同孔隙率样品的 Hugoniot 线来推算其密实样品的 Hugoniot 线呢？第一类情况大都是金属元素，本文图 1 分析的金属均属此类情形。对于这类情况，我们只要把通过部分多孔样品数据与密实样品数据分析后得到的 $\beta$ 值，用于从其它未参与上述求 $\beta$ 值的多孔样品数据推算出“理论”的密实样品的 Hugoniot 数据，然后把它与实测密实样品数据进行比较，即进行交叉检验。如果两者符合性很好，就能对 $\beta$ 值合理性给出补充证

明。为此，我们将(3)式改写为

$$p_{\mathrm{H}}=p'_{\mathrm{H}}\,\frac{\rho_0(\beta\rho_{00}-1)}{\rho_{00}(\beta\rho_0-1)} \tag{4}$$

具体的做法是：将事先确定的 $\rho_0$(密实样品初始密度)及 $\beta$ 值代入(4)式，然后把参与(4)式计算的多孔样品实测数据 $p'_{\mathrm{H}}$ 及该多孔样品的初始密度 $\rho_{00}$ 代入，便可求得对应于该多孔样品冲击压缩 $v_{\mathrm{H}}$(实测值)的密实样品的冲击压力 $p_{\mathrm{H}}$。图 5、图 6、图 7 分别给出了对 Al(2024 铝)、Fe、Cu 三种金属元素的上述计算结果(实验数据取自文献[3])。不难看出，由多孔样品实测数据换算的数据点，都位于密实样品的实测 Hugoniot 线上或位于曲线两侧的附近处。交叉检测的结果进一步支持了 $\beta$ 值的合理性。

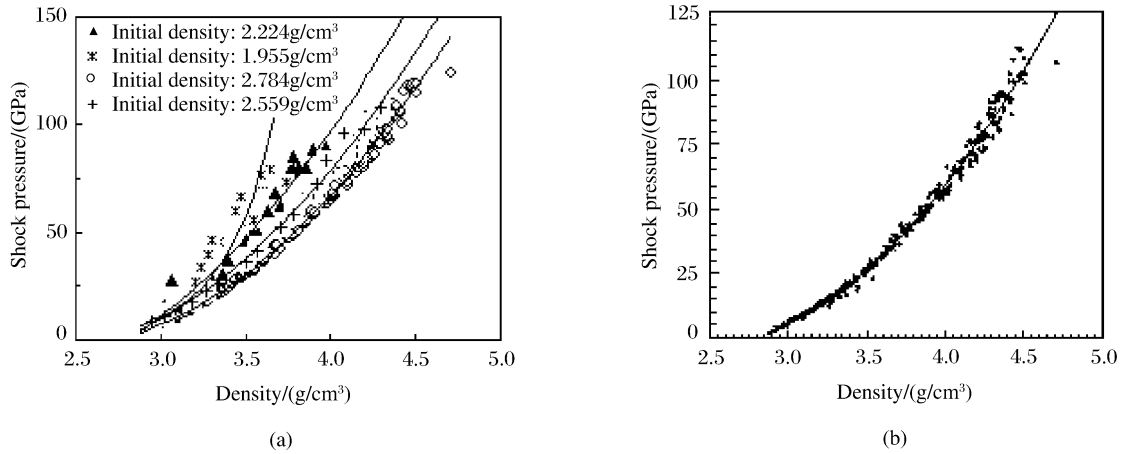



图 5　(a) 不同初始密度铝的 $p$-$\rho$ Hugoniot 关系，(b) 用公式(4)将 (a)中的数据换算到密实密度下的结果及与密实铝 $p$-$\rho$ Hugoniot 线(实线)的对比

Fig. 5　(a) Shock pressure vs. density of several porous Al, (b) Comparison of the modified $p$-$\rho$ Hugoniot in (a) using Eq. (4) to no-porous density with Hugoniot of no porous sample (solid line) of Al

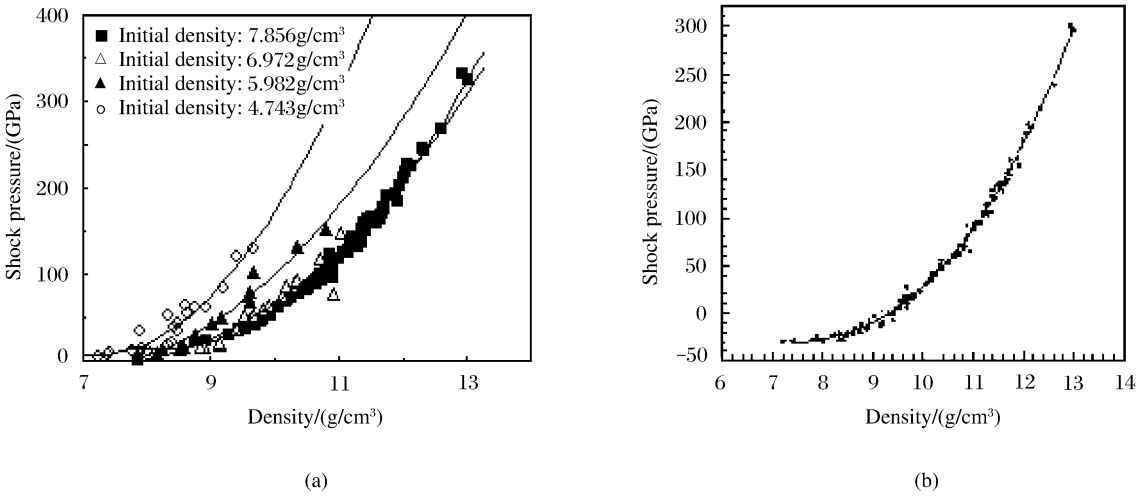



图 6　(a) 不同初始密度铁的 $p$-$\rho$ Hugoniot 关系，(b) 用公式(4)将(a)中的数据换算到密实密度下的结果及与密实铁 $p$-$\rho$ Hugoniot 线(实线)的对比

Fig. 6　(a) Shock pressure vs. density of several porous iron, (b) Comparison of the modified $p$-$\rho$ Hugoniot in (a) using Eq. (4) to no-porous density with Hugoniot of no porous sample (solid line) of iron

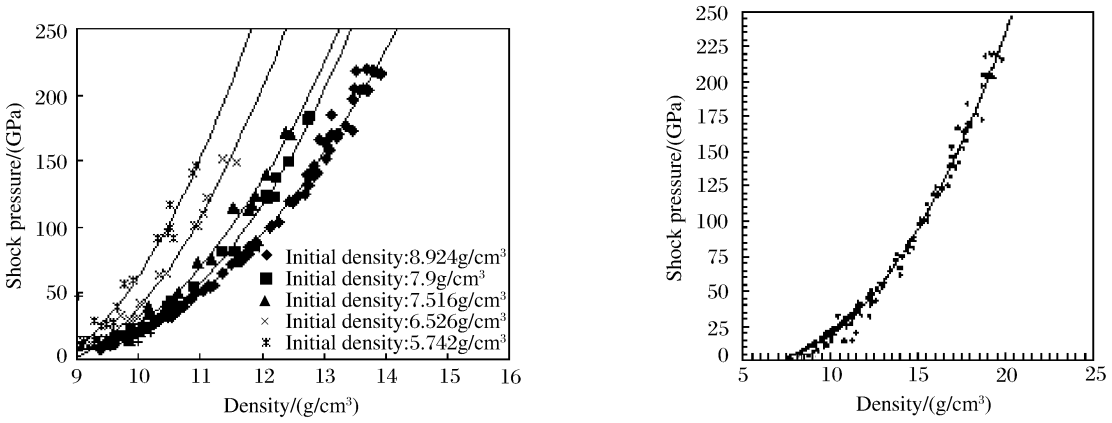



图 7 (a) 不同初始密度铜的 $p$-$\rho$ Hugoniot 关系，(b) 用公式(4)将(a)中的数据换算到密实密度下的结果及与密实铜 $p$-$\rho$ Hugoniot 线(实线)的对比

Fig. 7 (a) Shock pressure vs. density of several porous coppers. (b) Comparison of the modified $p$-$\rho$ Hugoniot in (a) using Eq. (4) to no-porous density with Hugoniot of no porous sample (solid line) of copper

从上述第一类情况的检验结果看，第二类情况的解决是不难的。具体地说，可以先对两种孔隙率样品进行 Hugoniot 线测量，利用(3)式得到该材料的 $\beta$ 值(此时可以把 $\rho_0$ 和 $\rho_{00}$ 分别看作两种孔隙率样品的初始密度)。第二步，如果知道了密实材料的密度，则又可以将多孔样品数据代入(4)，便可计算出密实样品的 Hugoniot 线。

### 3.2 金属元素 $\beta$ 值的变化规律

金属元素由于其构成粒子简单，由原子实(或离子)和电子组成，特别有趣的是，其 $\beta$ 值随材料的初始密度 $\rho_0$ 呈单调递减的变化规律，见图 8 所示，并可用下式表示

$$\beta_{\text{metal}} = 1.217\rho_0^{-0.884} \tag{5}$$

式中 $\beta$ 的单位是 $\text{cm}^3/\text{g}$，$\rho_0$ 的单位是 $\text{g}/\text{cm}^3$。对于那些缺乏充分实验数据计算其 $\beta$ 值的金属材料，利用(5)式对其多孔或密实材料 Hugoniot 参数作某种预测，也许是很有用的。

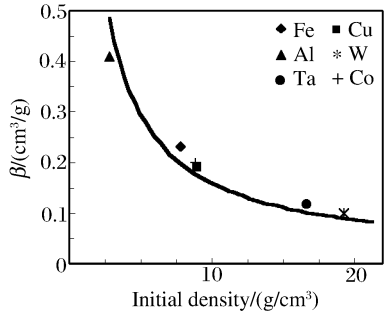



图 8 金属平均 $\beta$ 值与初始密度的关系

Fig. 8 Average $\beta$ vs. initial density of metals

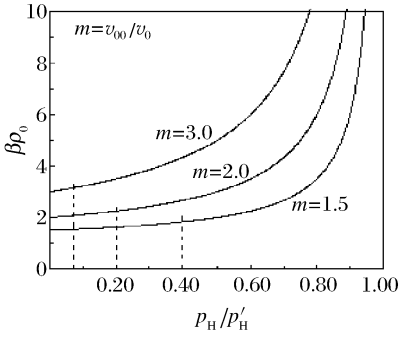



图 9 $\beta\rho_0$ 与 $p_H/p'_H$ 的关系

Fig. 9 Relationship between $\beta\rho_0$ and $p_H/p'_H$

## 4 关于常数 $\beta$ 局限性的讨论

$\beta$ 是根据(1)式得出的，故 $\beta$ 为常数的适用范围受到相应的限制。在从 Hugoniot 状态方程和 Grüneisen 状态方程推导(1)式的过程中本身假定：$\gamma$ 值仅是 $v$ 的函数。通过(1)式我们发现当 $v \to v_0$ 时，$\gamma$ 值受 $v_{00}$ 的影响很大，特别是当 $v = v_0$ 时，$\gamma$ 成了 $v_{00}$ 的函数，这与上述假定相悖。故我们讨论 $\beta$ 时也必须在一定的压力范围之内。

分析发现，$v_0$ 与 $v_{00}$ 之间的差异越小越能体现 $\beta$

为常数的结论。事实上，$v_{00}$不能太小。为了考察孔隙率对常数 $\beta$ 的限制，由(3)式可得：$\beta=v_0(m-\bar{\omega})/(1-\bar{\omega})$，式中 $m=v_{00}/v_0$ 为材料的孔隙率，$\bar{\omega}=p_H/p'_H$。分别取 $m$ 值为 1.5、2 和 3，计算了在相应 $m$ 下 $\beta\rho_0$ 与 $\bar{\omega}$ 的关系(如图 9 所示)。从图 9 可以看出：随着 $m$ 值的增大，$\beta\rho_0$ 近似为常数的区域(图中虚线左边区域)减小。或者说，随着孔隙率的增大，$\beta$ 值为常数的压力范围变窄。因此，可以说，经验常数 $\beta$ 在一定的孔隙率和压力范围之内适用。关于经验常数 $\beta$ 性质的进一步分析仍在进行之中。

## References:


[1] Wu Q, Jing F Q, Li X Z. Behaviour of Grüneisen Parameter at High Pressure and Temperature Inferred from Shock Compression Data [J]. Chinese Phys Lett, 2002, 19: 528.

[2] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. Beijing: Scientific Press, 1986. 371. (in Chinese). 经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 北京：科学出版社，1986. 371.

[3] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [Z]. Berkeley: University of California Press, 1979.

[4] Ahrens T J. Mineral Physics & Crystallography: A Handbook of Physical Constants [Z]. Washington D C: American Geophysical Union, 1995.


# An Empirical Material Constant on the Hugoniot of Solids: From Comparative Study of Porous Materials


DAI Fu[1], GONG Zi-Zheng[1], HUANG Hai-Jun[1,2,3], CHEN Jun-Xiang[2], JING Fu-Qian[1,2]

(1. *Institute of Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 610031, *China*;
2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
3. *Department of Physics, Liaoning University, Shenyang* 110036, *China*)



**Abstract**: From the systemically comparative study of previous experimental solid Hugoniot data of different porous samples, a new material parameter $\beta$, which keeps in constant along Hugoniot for all kinds of solid materials, was revealed. For different materials, the value of $\beta$ is different. There exist an universal power relationship between material constant $\beta$ and initial density $\rho_0$ for metal. By using this constant $\beta$, Hugoniot data between different porous samples can be converted very simply, and Grüneisen parameter can also be obtained very easily. The limitation of this empirical material parameter being as a constant was discussed with variations of pressure and porosity.



**Key words**: shock Hugoniot; empirical material constant $\beta$; porous sample