

亳县陨石物理力学性质的实验研究

席道瑛 谢 端

(中国科学技术大学)

主题词: 陨石; 物理力学性质; 应力—应变关系; 品质因子

提 要: 本文对亳县陨石的物理力学特性进行了多种实验方法的探讨。在 MTS 伺服控制材料试验机上测得了陨石的全程应力—应变曲线。同时, 通过单轴压缩试验确定了抗压强度、弹性模量和泊松比, 并运用频谱振幅比法对应力波衰减特性进行了研究, 给出了品质因子。此外, 还采用脉冲法给出了弹性波速度; 液体浸透法给出了密度和孔隙度。文中还将亳县陨石的测试结果与其它陨石物理力学参数进行了比较分析。最后, 还根据亳县陨石与岩石物理力学性质的对比, 推演出亳县陨石在其母体所处的环境类似于地球上地幔的顶部。

一、引言

亳县陨石于1977年10月20日下午2点30分左右降落在安徽亳县张沃公社吝子门大队境内。中国科技大学的研究人员围绕亳县陨石在矿物、结构构造、化学成分、年代、物理力学性质等方面进行了系统研究,获取了大量的数据。该陨石主要矿物有镁橄榄石、贵橄榄石、古铜辉石、顽辉石、斜顽辉石、斜长石、正长石、陨硫铁、镍纹石、铁纹石、铬铁矿、钛铁矿、磁铁矿以及新发现的张衡矿等。具有明显的球粒结构,晶形完好,双晶发育,颗粒粗大^[1]。本文内容是这一系统研究的一部分。为了了解亳县陨石物理力学性质的某些主要特征,笔者对亳县陨石的抗压强度、弹性模量、泊松比、品质因素、弹性波速度、密度、孔隙度等进行了较严格的测试和研究。

二、物理力学性质的主要实验结果

1. 应力—应变全程曲线的测定

采用MTS伺服控制材料试验机进行了加载实验,其样品尺寸见表1。该实验选用的加载应变率为 10^{-6} /秒,由计算机控制,可以实现样品的可控破裂。实验的结果由计算机绘出

表1 亳县陨石的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of Boxian meteorite

编号	样品尺寸 (cm ³)	弹性波速度(M/S)				抗压强度 (kg/cm ²)	弹性模量 (kg/cm ²)	泊松比
		V _P	\bar{V}_P	V _S	\bar{V}_S			
I	3.97×2.0×1.72		1689			386	2.9×10 ⁵	0.127
II	3.67×1.94×1.8					218	2.2×10 ⁵	0.282
III	3.44×1.8×1.6	2750	2740	1694	1773			
		2729		1772				
IV	2.52×2.1×1.6	2703	2718	1571	1653			
		2733		1734				
V	2.0×2.0×2.0	2778	2778	1709	1732			
		2778		1754				
	平均值		2481		1706	302	2.55×10 ⁵	0.204

陨石加载直至完全破坏的 $\sigma-\varepsilon$ 全过程曲线(图1)。图1为II号陨石的 $\sigma-\varepsilon$ 全程曲线,可见曲线形态与地球上岩石^[2]的 $\sigma-\varepsilon$ 全程曲线有相似之处,其可分为五个阶段:

OA为压密段。该曲线OA段较长,且向上凹,说明亳县陨石存在的天然裂缝和孔洞较多。

AB为线弹性段。

BC 为高应力作用下的塑性变形阶段。应力—应变曲线斜率逐渐降低，曲线向上凸，非线性地升至 C 点，应力达到极值。

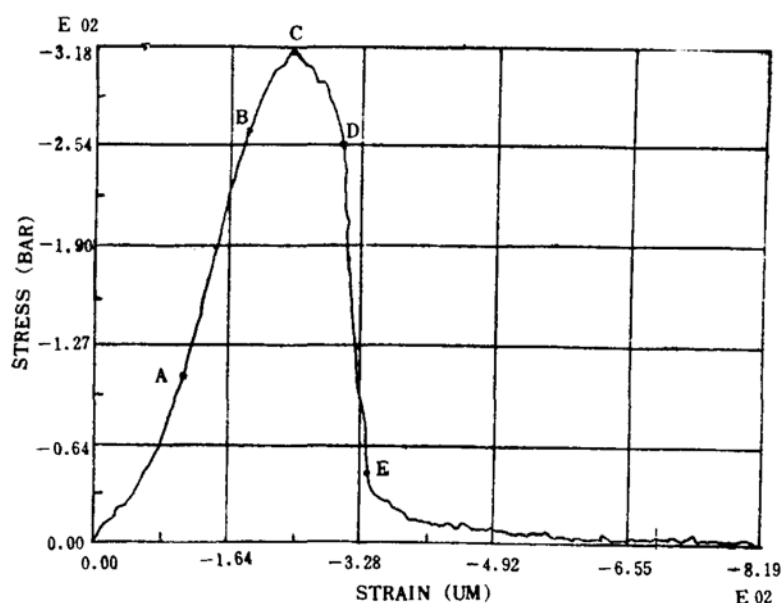


图 1 亳县陨石 II 号应力—应变曲线

Fig. 1 No. II stress-strain curve of Boxian meteorite

强度估计与亳县陨石结晶颗粒较粗、裂隙较多有关。其弹性模量比吉林陨石低、泊松比比吉林陨石高。由陨石的纵、横波速可用下述公式确定其动弹性模量(E_d)、动泊松比(ν_d)、剪切模量(μ_d)和体积模量(K_d):

表 2 亳县陨石与其它陨石力学参数的比较

Table 2 Mechanical parameters of Boxian meteorite and other meteorites

陨石名称	泊松比	弹性模量 (kg/cm^2)	抗压强度 (kg/cm^2)	参考文献
亳县陨石	0.204	5.55×10^5	302	
吉林陨石	0.11	14.4×10^5	675.6	[3]
阿拉莫戈多(Alamogordo)			2740	[4]
阿拉帕霍(Arapahoe)			3580	[4]
科维里特(Coverit)			768	[4]
德斯库布里多拉(Descubridora)			3800	[4]
荷尔布鲁克(Holbrook)			63	[4]
金布尔科(Kimb'e)			3270	[4]
拉兰德(Le Lande)			3810	[4]
莫朗德(Morland)			1627	[4]
内斯科(Ness Co)			844	[4]

$$E_d = \frac{\rho V_p^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} = 1.9 \times 10^5 \text{kg}/\text{cm}^2$$

CD 为可控破裂段。从 C 点起应力逐渐下降，应变仍继续增加， $\sigma-\varepsilon$ 曲线呈非线性下降。陨石试件上出现与轴向平行的张性破裂。

D 点试件崩溃。

如果将该 $\sigma-\varepsilon$ 曲线变换为 $\sigma-u$ (位移) 曲线，曲线的形态基本不变，曲线从 C 点后变成负斜率，属于 Wawersik 等 (1970) 所谓的 I 型破坏。

通过实验测得其抗压强度、弹性模量及泊松比，见表 2。由表可见，亳县陨石的抗压强度仅比 Holbrook 陨石高，比其它陨石都低，这种低抗压

$$\nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} = 0.052$$

$$\mu_d = \rho V_s^2 = 0.93 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$$

$$Kd = \rho (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) = 73 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$$

这就说明亳县陨石与岩石一样是受应变率影响的材料。亦是说应力速度的不同导致了亳县陨石的弹性模量和泊松比的不同。

2. 应力波衰减及品质因子测定

采用频谱振幅比法^[5]对亳县陨石进行了波衰减的测量及研究。为了消除几何扩散、界面反反射和介质内散射等的影响，采用高 Q 值的钢（一种几乎不耗散的材料）或铝（一种弱耗散材料）加工成与陨石样品几何尺寸完全相同的标准样品。其应力波振幅及陨石样品应力波振幅分别为：

$$A_1(f) = G_1(x)e^{-\alpha_1(f)x} \dots \dots \dots (1)$$

$$A_2(f) = G_2(x)e^{-\alpha_2(f)x} \dots \dots \dots (2)$$

其中，A(f)为波的振幅，f为频率，x为样品长度，G(x)为几何因子（包括几何扩散、折射、反射等），1、2分别代表标准样品和陨石样品。 $\alpha(f)$ 为与频率有关的衰减系数。

由 $\alpha = \frac{\pi f}{QV}$, V为波速

令 $Q = \frac{\pi}{\gamma V} \dots \dots \dots (3)$

则 $\alpha = \gamma f$

当两次测量系统完全相同时，Fourser 振幅比为：

$$\frac{A_1(f)}{A_2(f)} = \frac{G_1}{G_2} e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)fx} \dots \dots \dots (4)$$

$$\ln \frac{A_1}{A_2} = (\gamma_2 - \gamma_1)fx + \ln \frac{G_1}{G_2} \dots \dots \dots (5)$$

其中， $\ln G_1/G_2$ ，为与频率无关的几何因子，可以消除。这样(5)式即成为一直线方程， $\gamma_2 - \gamma_1$ 为该直线的斜率。因标准样品的 Q 值高达 150000，可视作 $Q_1 \rightarrow \infty$ ，则 $\gamma_1 \approx 0$ ，所以(5)式的斜率实际上就是 γ_2 ， $\ln G_1/G_2$ 为该直线在纵轴上的截距。根据(3)式可求得陨石的品质因素 $Q_2 = \pi/\gamma_2 V_2$ ，在常温常压下测得其品质因素的平均值约为22，其值与大理岩、砂岩的 Q 值相近。。说明亳县陨石也具有衰减特性。

亳县陨石由于在 21 亿年及 16 百万年的两次冲击作用，其陨硫铁、橄榄石、辉石中裂隙明显，并有半球粒与角砾状基质^[1]。同时，亳县陨石矿物颗粒大小极不均匀，所以当应力波在陨石中传播时，将会碰到许多裂隙和大小不同的颗粒，引起波的反射、散射甚至绕射，这就导致了波的部分衰减。波在陨石样品中传播时的粘滞损失及热传导损失是波的衰减另一个重要因素。

5. 弹性波速度的测试

弹性波速度用脉冲法测量，采用 SYC—2 声波仪，其传感器频率为 500 千周—1250 千

周。测量结果见表1、表3。从表3可见，亳县陨石纵波速度较低，而横波速度却相对高一些，与吉林陨石相同。而所有陨石纵、横波速又比火成岩低，接近于沉积岩和火山灰的波速值⁽⁴⁾，这可能与陨石母体生成后曾不止一次受其它星子的撞击有关，因而，陨石中肯定留下了冲击引起的裂隙，使内部紧密的结构变得稍松散。

表 3 石陨石弹性波速

Table 3 Elastic wave speed of aerolite

陨 石 名 称	弹 性 波 速 度(M/S)		参 考 文 献
	V _p	V _s	
亳 县 陨 石	2481	1706	
吉 林 陨 石	2737	1706	[3]
比劳野策科夫(Bielaya Zerkov)	3990	—	[3]
比洛克里尼钦埃(Bielokrynitshie)	3660	1220	[3]
法明顿 (Farmington)	3850	1000	[3]
克里姆卡 (Krymka)	2760	830	[3]
库纳沙克 (Kunashak)	3570	—	[3]
米什肖夫 (Misshov)	2080	900	[3]
萨拉托夫 (Saratov)	3300	1130	[3]
塞夫鲁科夫 (Sevrukov)	4200	600	[3]

4. 密度—孔隙度的测量

亳县陨石密度采用液体浸透法测量，干陨石的密度（将体积密度）为 3.19g/cm^3 （见表4），视孔隙度为10.2%（见表5）。可见，亳县陨石的密度值介于地壳（密度为2.84）与地幔（密度为 $3.31\sim 3.52$ ）之间⁽⁶⁾。

表 4 各类陨石的密度

Table 4 Density of various classes of meteorite

陨 石 类 型	密度(克/厘米 ³)	参 考 文 献	陨 石 类 型	密度(克/厘米 ³)	参 考 文 献
LL ₄ (亳县陨石)	3.08 — 3.29		CM	2.6 — 2.9	[4]
H ₅ (吉林陨石)	3.74 — 3.84	[3]	CI	2.2 — 2.3	[4]
E ₄	3.6 — 3.8	[4]	Aub	3.2	[4]
E ₆	3.5 — 3.7	[4]	DiO	3.3 — 3.4	[4]
H	3.6 — 3.8	[4]	EuC	3.1 — 3.2	[4]
L	3.5 — 3.6	[4]	How	3.2 — 3.3	[4]
LL	3.4 — 3.5	[4]	PaL	4.3 — 5.8	[4]
CV, Co	3.3 — 3.6	[4]	IIA, IIIA ^a	7.8 — 8.0	[4]

表 5 陨石的孔隙度
Table 5 Porosity of meteorite

陨石名称	陨石类型	总孔隙度(%)	参考文献
亳县陨石	LL ₄	10.15	
吉林陨石	H ₅	9.32	[3]
Krymka	L ₈	6.7	[4]
Saratov	L ₄	18.3	[4]
Bjurbole	L ₄	16.7	[4]
Farmington	L ₅	2.9	[4]
Kunashak	L ₈	7.1	[4]
Mount Browne	L ₆	6.8	[4]
Elenovka	L	10.5	[4]
Forest Vale	H ₄	18.1	[4]
Zhovtnevgi	H	13.1	[4]
Mokoia	CM ₂	24.4	[4]
Cumberland Falls	Aub	4.3	[4]
Pesyanoe	Aub	15.1	[4]
Stannern	Euc	14.8	[4]

三、讨 论

根据铀—铅同位素年龄测定得出亳县陨石母体是在45亿年前与其它两个陨石 (Bruderherim 和modoe)^① 同时从太阳星云物质中演化形成^[7], 后又经受两次大的碰撞, 致使亳县陨石母体碎裂。亳县陨石的这一演化过程直接影响它的物理力学性质。根据它与地球岩石物理力学特性的对比, 可以具体推演亳县陨石的形成环境。众所周知, 岩石的密度、抗压强度、弹性模量是随其距地表的深度增大而增大, 孔裂度则随深度增大减小^[8]。而由于亳县陨石比吉林石陨密度小, 孔隙度稍大, 说明亳县陨石在母体所处的位置比吉林陨石稍浅一些, 如果吉林陨石处于母体 24—39km 之间^[3] 是可靠的话, 那么可以推测亳县陨石可能处于距陨石母体表面不超过 24km 的深度。同时, 从其弹性波速度比吉林陨石稍低也可佐证这一推论是合理的。另外, 从亳县陨石密度介于下地壳与上地幔顶部的密度之间, 又根据亳县陨石的成分, 将其定为石陨石, 而石陨石在母体所处位置相当于地球的上地幔, 因而, 可大体推测亳县陨石在其母体所处的环境类似于地球上地幔的顶部。即亳县陨石在脱离母体前处于温度为 360 °C 左右, 承受静压为 640 MPa 的环境中。

此外, 从衰减测量结果证实了亳县陨石存在着天然的孔洞和裂隙, 这一结果与孔隙度和其它物理力学性质测量结果相一致。

参 考 文 献

- [1] 王奎仁等, 1986, 安徽亳县陨石考察及矿物研究。科学通报, 10, p.756—759。
- [2] M.S.佩特森, 1982, 实验岩石形变——脆性域。地质出版社, p.141—144。
- [3] 林文祝, 1979, 吉林陨石物理力学性质的初步研究。吉林陨石雨论文集, 科学出版社, p.239—242。

① Bruderherim和Modoe两个陨石都属于L₆球粒陨石。

- [4] Wasson, J.T., 1974. *Meteorites*. Springer-verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp.175-177.
- [5] M.N.Toksoz, et al, 1979. Attenuation of Seismic Waves in Dry and Saturated Rock:1. Laboratory Measurements, *Geophysics*, 44, p.691-711.
- [6] 黄培华等, 1982, 地震地质学基础。地震出版社, p.11。
- [7] 彭子成, 1985, 铀铅法测定安徽亳县球粒陨石的年龄。科学通报, 16, p.1236-1239。
- [8] 武汉水利电力学院, 1979, 土力学及岩石力学。水利出版社, p.369。

Experimental Study on Physical-Mechanical Behaviours of Boxian Meteorite

Xi Daoying, Xie Duan

(University of Science and Technology of China)

Key words: Meteorite, Physical-mechanical behaviours, stress-strain relation, quality factor

Abstract

The physical-mechanical behaviours of Boxian meteorite have been studied by means of varied experimental techniques. The whole stress-strain curve of the meteorite is drawn on a MTS servo-controlled testing machine, and the compressive strength, elastic modulus and Poisson's ratio are determined as well by way of uniaxial compression. The attenuation properties of stress wave are also investigated with the aid of the pulse transmission-amplitude ratio method, and this then gives the quality factor. In addition, the elastic wave speed and the density and porosity are obtained by using pulse method and liquid-soaking method respectively.

Finally, a special analysis with discussion is given concerning the relationships between experimental results of Boxian meteorite and physical-mechanical behaviours of other meteorites or rocks in the earth. It is rather ready to point out that the surroundings of Boxian meteorite in its parent body is similar to the environment at the top of the upper mantle. It could therefore be deduced that Boxian meteorite was located some 20km beneath the surface of the parent body before separation.