

# 论陨石系列受晶格能控制的规律

洪庆玉 邓 涛

(研究生部) (勘探系)

**摘要** 利用计算方法求陨石的晶格能,从铁陨石、碳质球粒陨石、球粒陨石到无球粒陨石晶格能依次增高,陨石形成受晶格能控制并按晶格能由低到高的顺序出现,与地球上矿物和岩石结晶过程具有相同的晶格能控制规律。陨石晶格能系数与其平均克原子量,满足 $q \frac{1}{\mu} + \mu' \frac{1}{\mu} = 81.67 \frac{1}{\mu}$ 的函数关系。

**关键词** 陨石系列; 陨石晶格能; 晶格能控制规律

**中图法分类号** P584

## 前 言

陨石是从星际空间降落到地球上的太阳系碎片。据测定,大多数陨石的年龄比地球上已发现的任何岩石都老近十亿年。同时,有些陨石几乎完全保存着形成时的原貌,记录了太阳系早期的状态。由于陨石的起源与太阳系的起源密切相关,因此,陨石资料是人们推论太阳系起源和发展的重要依据。关于陨石的起源已提出多种观点和假说,本文试图从晶格能论证陨石的起源和各类陨石形成顺序的平衡凝聚假说,借此检验晶格能理论在行星地质学方面的应用,并用数理统计的方法推导陨石晶格能系数与其平均克原子量之间的关系。

## 1 陨石的类型及其晶格能

依照公式 $U=q \cdot \mu=n \cdot q \cdot \mu_a=R \cdot n \cdot q \cdot \mu'_a$  (洪庆玉, 1990) (4), 可用于陨石晶格能参数计算的是 $q$ 、 $\mu'_a$ 以及 $q \cdot \mu'_a$ 。 $q$ 是矿物、岩石或陨石的晶格能系数, $\mu'_a$ 是矿物、岩石或陨石平均化为一个克原子时的原子量, $q \cdot \mu'_a$ 是矿物、岩石或陨石一个克原子时的晶格能量的kJ(千焦耳数)。

陨石根据矿物和化学组成、内部构造和结构,分为两大类,即铁陨石和石陨石。它们的成分分别以含镍的铁和硅酸盐矿物为主,铁陨石占陨石总量的5.7%,石陨石占陨

石总量的92.8%。此外，还有极少数介于二者之间的类型，即石—铁陨石，其丰度只有1.5%<sup>(1)</sup>。

表1 陨石类型的晶格能参数

陨 石 类 型		q	$\mu'_n$	$q \cdot \mu'_n$	
		$\times 4.184 \text{kJ/g}$	g/mol	$\times 4.184 \text{kJ/mol}$	
铁 陨 石	六面体式陨铁	11.15	55.19	615.37	
	八面体式陨铁	11.18	55.68	622.50	
	富镍中陨铁陨石	10.81	56.27	608.28	
石 陨 石	球粒陨石	顽火辉石球粒陨石	31.34	25.25	791.34
		H型普通球粒陨石	30.05	24.87	747.34
		L型普通球粒陨石	31.97	23.67	756.73
		I型碳质球粒陨石	44.74	13.94	623.68
		II型碳质球粒陨石	38.17	17.27	659.20
		III型碳质球粒陨石	30.26	24.33	736.23
	无球粒陨石	贫钙型无球粒陨石	38.05	21.21	807.04
		富钙型无球粒陨石	36.58	22.58	825.98

注：各类陨石的化学成分资料分别据 Heide, 1964; Mason, 1965; Виноградов, 1958和1975。作者计算的晶格能参数。

表2 陨石个体的晶格能参数

陨 石	类 型	q	$\mu'_n$	$q \cdot \mu'_n$
(陨落地点)		$\times 4.184 \text{kJ/g}$	g/mol	$\times 4.184 \text{kJ/mol}$
Coya Norte	六面体式陨铁	10.71	56.10	600.83
Cayon Diablo	八面体式陨铁	10.86	56.16	609.90
Tlacotepec	富镍中陨铁陨石	10.38	57.20	593.74
吉林	H型普通球粒陨石	30.22	24.89	752.18
渥池	H型普通球粒陨石	29.90	25.12	751.09
西乌珠穆沁	L型普通球粒陨石	31.20	24.04	750.05
广饶	L型普通球粒陨石	31.57	23.83	752.31
宁强	III型碳质球粒陨石	31.54	24.03	757.91
Yurtuk	富钙型无球粒陨石	36.86	22.05	812.76
Petersburg	富钙型无球粒陨石	36.24	22.78	825.55

注：各个陨石的化学成分资料分别据 Moore et al, 1971; 欧阳自远等, 1979; 侯涓等, 1982和1983; 王道德等, 1988; Craig, 1953。作者计算的晶格能参数。

铁陨石根据其晶体结构和Ni/F比值,一般分出六面体式陨铁、八面体式陨铁和富镍中陨铁陨石三个亚类。

石陨石的分类,根据有无球粒构造分为球粒陨石和无球粒陨石二个亚类。球粒陨石以其化学性质和矿物组成,分为四个组,即顽火辉石球粒陨石、H型普通球粒陨石(高铁,又称古铜辉石球粒陨石)、L型普通球粒陨石(低铁,又称紫苏辉石球粒陨石)和碳质球粒陨石。其中,碳质球粒陨石根据化学成分,分为I、II、III三型,无球粒陨石根据含钙量分为两个类型,即贫钙型无球粒陨石和富钙型无球粒陨石。无球粒陨石是相当不均匀的石陨石类,只是由于它们都缺乏陨石球粒才归为一类<sup>[1]</sup>。

依照各家发表的陨石类型的平均化学组成和陨石个体的化学全分析资料,计算出各陨石类型和陨石个体的晶格能参数(见表1和表2)。

## 2 陨石系列的晶格能控制

陨石的起源和演化与太阳系的起源和演化密切相关,在历史上提出过各种不同的假说。根据当代最新的观测资料,并为大多数学者相信的模式是太阳从原始的太阳星云中产生,即在大约 $4.6 \times 10^9$  a以前,一个星际气体和尘埃云崩解,星云基本具有太阳的成分。根据陨石样品同位素研究,星际云的崩解是由超新星触发的,崩解的云分裂成若干块,由于星际云中的涡流运动,使每个云的碎块或星云发生旋转或自转,星云中的固体颗粒聚集形成尘埃和星子,通过引力作用,星子碰撞形成了类地行星和外行星的石质核<sup>[1]</sup>。

当气体星云冷却时,固体物质可能从星云中凝聚出来,这种分离往往按照一定的化学顺序发生。如果只对比陨石的主要成分(铁—镍合金、斜方辉石和镁橄榄石)则对正在冷却的气体中气—固平衡进行计算的结果表明<sup>[6]</sup>,金属铁—镍应首先凝聚,而硅酸盐在较低的温度下形成。Lewis(1974)进一步提出平衡凝聚假说,并具体计算了各种凝聚物质出现时星云的温度<sup>[8]</sup>。在冷却开始时,星云中心部分的温度高达2000℃,足以挥发所有的星云尘埃;金属铁—镍的凝聚作用出现在1025℃,而从925℃—150℃时才凝聚出各类硅酸盐物质。

观察我们对陨石晶格能的计算结果(见表1和表2),由低到高的系列为:

富镍中陨铁陨石	$608.28 \times 4.184 \text{ kJ/mol}$
六面体式陨铁	$615.37 \times 4.184 \text{ kJ/mol}$
八面体式陨铁	$622.50 \times 4.184 \text{ kJ/mol}$
I型碳质球粒陨石	$623.68 \times 4.184 \text{ kJ/mol}$
II型碳质球粒陨石	$659.20 \times 4.184 \text{ kJ/mol}$
III型碳质球粒陨石	$736.23 \times 4.184 \text{ kJ/mol}$
H型普通球粒陨石	$747.34 \times 4.184 \text{ kJ/mol}$
L型普通球粒陨石	$756.73 \times 4.184 \text{ kJ/mol}$
顽火辉石球粒陨石	$791.34 \times 4.184 \text{ kJ/mol}$
贫钙型无球粒陨石	$807.04 \times 4.184 \text{ kJ/mol}$

富钙型无球粒陨石  $825.98 \times 4.184 \text{kJ/mol}$ 

这就是说，太阳星云中固体物质凝聚的顺序将按晶格能由低到高的顺序进行，即铁陨石比石陨石先形成。这和鲍文反应系列是一致的，根据洪庆玉（1956~1973）以及 Шеломов（1964）的计算（见表3），鲍文反应系列从橄榄石到石英也是一个晶格能

表3 鲍文反应系列主要造岩矿物晶格能

矿物	Шеломов (1964) 负电性计算 $\times 4.184 \text{kJ/mol}$	洪庆玉 (1956~1973)				
		q	$\mu_{\text{a}}'$ g/mol	$\mu_{\text{a}}$ g/mol	$q \cdot \mu_{\text{a}}'$ $\times 4.184 \text{kJ/mol}$	$q \cdot \mu_{\text{a}}$ $\times 4.184 \text{kJ/mol}$
橄榄石	1697.43	34.13	21.04	49.74	718.31	1697.58
辉石	2080.18	36.37	21.81	56.49	793.23	2054.46
角闪石	2117.08	36.00	23.30	59.47	838.80	2140.92
云母	2401.27	36.86	23.00	63.85	847.78	2353.51
长石	2909.42	42.15	20.66	67.11	870.82	2828.69
石英	3226.24	52.93	20.03	60.08	1060.19	3180.03

增高的过程。说明晶格能对矿物和陨石形成的控制作用，是一条普遍的规律。

铁陨石常被解释为硅酸盐物质部分熔融或全部熔融分离出来的产物，即认为铁陨石是最后形成的。但从平衡凝聚假说和晶格能控制理论得到的证据都表明铁-镍质是最早凝聚的。我们还可以从宇宙射线暴露年龄的测定中得到进一步的证据，太空岩石由于宇宙射线的照射而发生的辐射现象会引起核的转化，根据形成新的放射性同位素量，我们可以测定陨石开始暴露于太空到撞击地球为止的时间间隔。测定结果表明，大多数石陨石的宇宙射线暴露年龄小于  $4 \times 10^7 \text{a}$ ，最大不超过  $1 \times 10^8 \text{a}$ ，而铁陨石的暴露年龄却高达  $2.3 \times 10^8 \text{a}$ ，较早形成的陨石必然有较早的机遇暴露于太空，因此，宇宙射线暴露年龄能够间接地证明陨石形成的相对顺序。这一点还可以用普通球粒陨石的情况来说明，H型和L型普通球粒陨石的暴露年龄分别是  $2.2 \times 10^7 \text{a}$  和  $2.0 \times 10^7 \text{a}$ <sup>(1)</sup>，反映出的顺序与我们根据晶格能计算的陨石形成系列中的H型和L型普通球粒陨石的先后顺序相同。

根据分析资料，碳质球粒陨石代表星云凝聚形成的原始物质，因为它们的元素丰度，同观察到的太阳中非挥发性组分的元素丰度几乎完全一致，且含有少量挥发物和有机化合物。经研究证明，在碳质球粒陨石中，I型最原始，II型次之，III型最象普通球粒陨石。I型碳质球粒陨石与众不同之处就在于含有有机质，含量为6.71%，这是证明其原始性的重要证据。在晶格能系列中，碳质球粒陨石三个类型的顺序按照I型、II型、III型依次增高，这个结果再次说明陨石形成的先后顺序确实与晶格能有关，且按照晶格能由低到高的顺序出现。

在陨石晶格能系列中，碳质球粒陨石之后是其它各类球粒陨石。一般认为，球粒陨石只是星云适度变化的产物，如上所述，III型碳质球粒陨石最象普通球粒陨石，而II型

和L型普通球粒陨石的位置在陨石晶格能系列中正好居Ⅲ型碳质球粒陨石之后。普通球粒陨石由橄榄石、辉石、铁—镍金属、陨硫铁以及少量的钠—斜长石与铬铁矿组成。这些矿物组合，与具球粒陨石成分的岩石在中等温度（500℃—1000℃）的封闭系统中预期产生的矿物组合相似<sup>(1)</sup>。

居于陨石晶格能系列最后位置的是无球粒陨石。无球粒陨石是高度分异的陨石，陨石球粒全部被破坏，因此，无球粒陨石必然是最后形成的陨石。陨石最后冷却、固化与形成的时间，可用各种放射性测年方法测定。大多数陨石的形成为4.6×10<sup>9</sup>a，但Nakhla无球粒陨石的年龄用铷—锶法和钐—钕法测定为1.3×10<sup>9</sup>a<sup>(1)</sup>，这也说明无球粒陨石是最晚形成的陨石类型。

综上所述，我们认为，在原始太阳星云的冷却过程中，气态物质凝聚成固体颗粒，颗粒再经聚集作用形成星子，其作用力来源于颗粒受高能光子、太阳风中的质子与电子以及宇宙射线的轰击产生的电力，还来源于大量颗粒所产生的集合引力，几乎全部陨石已经被证明是来自小行星带。在陨石起源和演化过程中，晶格能是一个重要的控制因素，陨石形成系列依照晶格能由低到高的顺序出现。

### 3 陨石q和μ<sub>n</sub>' 函数关系的分析

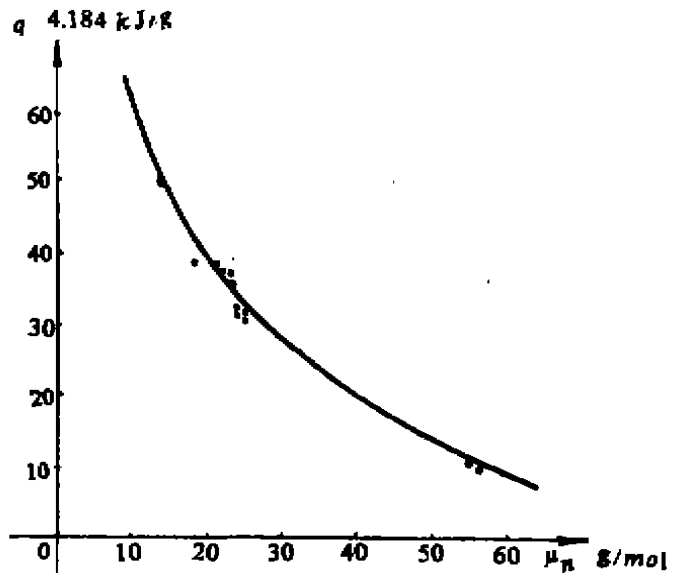


图1 晶格能系数与平均克原子量的关系

观察表1和表2就会发现，当q值作由高到低的排列后，μ<sub>n</sub>'值呈现递增的趋势，如图1所示。在Green（1959）的晶格能系数表上出现同样的趋势<sup>(2)</sup>，即轻元素的晶格能系数通常比重元素的晶格能系数大，如C、Si、Mg的晶格能系数分别是293.09、89.03、24.27，而Fe、Co、Ni的晶格能系数分别是10.38、10.52、10.56。

分析图1显示的陨石晶格能系数与其平均克原子量的关系曲线，相似于星形线在第一象限的图形，星形线的方程为

$$x^{\frac{2}{3}} + y^{\frac{2}{3}} = a^{\frac{2}{3}}$$

$$\text{令 } x = \mu_n', y = q, a^{\frac{2}{3}} = A$$

根据表1和表2所列的数据，我们可以计算出各陨石类型和陨石个体的A值。首先采用方差分析的方法，检验陨石类型和个体计算的A值有无显著差异。

A值及其平方列于表4的相应位置。

表4 A 值 及其平方

	类 型	个 体		类 型	个 体		
	19,5904	19,5134		383,7838	380,7728		
	19,6808	19,5691		387,3339	382,9497		
	19,5732	19,6040		383,1102	384,3168		
	18,5470	18,2268		343,9912	332,2162		
	18,1858	18,2106		330,7233	331,6260		
	18,3100	18,2402		335,2561	332,7049		
	19,4373	18,2699		377,8086	333,7892		
	18,0179	18,3098		324,6447	335,2488		
	18,1070	18,9390		327,8634	358,6857		
	18,9751	18,9871		360,0544	360,5100		
	19,0083			361,3155			
$\Sigma$	207,4328	187,8699	395,3027	$\Sigma$	3915,8851	3532,8201	7448,7052

此处

$$s = 2, n_1 = 11, n_2 = 10, n = 21,$$

$$\sum_{j=1}^s \frac{s_j^2}{n_j} = \frac{1}{11} \times (207,4328)^2 + \frac{1}{10} \times (187,8699)^2 = 7441,1796$$

$$\frac{(\sum_{j=1}^s s_j)^2}{n} = \frac{(395,3027)^2}{21} = 7441,1536$$

$$\sum_{j=1}^s ss_j = 7448,7052$$

故得

$$S_A = \sum_{j=1}^s \frac{s_j^2}{n_j} - \frac{(\sum_{j=1}^s s_j)^2}{n} = 0,0260$$

$$S_E = \sum_{j=1}^s ss_j - \sum_{j=1}^s \frac{s_j^2}{n_j} = 7,5256$$

$$S_T = \sum_{j=1}^s ss_j - \frac{(\sum_{j=1}^s s_j)^2}{n} = S_A + S_E = 7,5516$$

自由度分别为

$$f_A = s - 1 = 1, f_E = n - s = 19, f_T = n - 1 = 20,$$

得方差分析表 5。

表5 A值的方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F比
组间	0.0260	1	0.0260	0.07
组内	7.5256	19	0.3961	
总和	7.5516	20		

因 $F_{0.05}(1, 19) = 4.38 > 0.07$ , 故在水平0.05之下通过陨石类型和个体资料计算的A值没有显著差异, 计算值的不同是由随机波动引起的。

A值的变化在18.0179和19.6808之间, 我们分别求出A值的均值和方差

$$\bar{A} = 18.8239, s^2 = 0.3610$$

$$\text{因 } 18.8239 = 81.67^{\frac{2}{3}}$$

故我们将 $q$ 和 $\mu_a'$ 的关系表达为

$$q^{\frac{3}{2}} + \mu_a'^{\frac{3}{2}} = 81.67^{\frac{3}{2}}$$

利用这个公式, 我们可以检验某些物质是否属于陨石。例如, 以澳大利亚玻璃陨石的成分计算, 它的 $q = 45.46$ ,  $\mu_a' = 20.85$ , 算得 $A = 20.3129$ , 远大于18.8239, 超出了陨石的A值范围, 故不属于真正的陨石。这与现在对玻璃陨石研究得出的结论相符, 即玻璃陨石不是星际起源的, 而是陨石或慧星撞击地球形成的。

## 参 考 文 献

- 1 格拉斯, B. P. 著, 陈书田等译. 行星地质学导论. 地质出版社, 1986
- 2 格林, J. 著, 李亿斗译. 元素地球化学表. 中国工业出版社, 1962
- 3 洪庆玉. 论岩石风化的能量控制及其成矿意义. 地球化学, 1973; (3)
- 4 洪庆玉. 论地球化学能量理论在地球演化上的意义. 西南石油学院学报, 1990; 12(2)
- 5 洪庆玉、邓涛. 论地球化学外能与内能的转换. 西南石油学院学报, 1990; 12(4)
- 6 Grossman, L., Condensation in the primitive solar nebula, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972; 36
- 7 Heide, F., *Meteorites*, Chicago, University of Chicago Press, 1964
- 8 Lewis, J. S., The chemistry of the solar system, *Scientific American*, 1974; 230(5)

# ON RULE OF METEORITE SERIES CONTROLLED BY THE CRYSTAL LATTICE ENERGY

Hong Qingyu    Den Tao

( Dept. of Postgraduates ) ( Dept. of Oil Exploration )

## Abstract

The crystal lattice energy of meteorites can be found with a calculating method. It increases in proper order from iron meteorites, carbonaceous chondritic meteorites, chondritic meteorites to non-chondritic meteorites. The formation of meteorites is controlled by the crystal lattice energy. The formation series arises from low to high sequence according to the crystal lattice energy, and has the same rule controlled by the crystal lattice energy as the crystalline process of the minerals and rocks in the earth. The coefficient of the crystal lattice energy and the average gram atomic weight of meteorites accord with the following function relation:  $q^{\frac{2}{3}} + 11 \frac{1}{n} \frac{2}{3} = 81.67 \frac{2}{3}$ .

**Key Words:** Meteorite; Series; Crystal lattice energy of meteorite; Rule controlled by crystal lattice energy