

我国某些普通球粒陨石金属相的元素分布

陈永亨

(中国科学院地球化学研究所)

孙用均

(中国原子能科学研究院)

王道德

(中国科学院地球化学研究所)

摘要

本文用仪器中子活化分析法测定了我国不同化学群的吉林(H_2)、信阳(H_2)、肇东(L_2)、广饶(L_6)和东台(LL_6)等普通球粒陨石金属相的Fe、Ni、Co、Cu、Cr、Mn、Ga、Ge、Ir、Au和As含量。每个陨石的金属相按粒径分为 >20 目、 $20-40$ 目、 <40 目等。根据这些结果,讨论了元素的分布规律和分馏趋势以及决定金属相组成的作用过程。

普通球粒陨石属未分异的原始球粒陨石,由于它们没有经历岩浆熔融或部分冲击熔融作用,因而保存了许多行星形成的早期历史证据。为了了解陨石母体金属相中各种化学元素在行星形成早期的化学演化历史和宇宙化学行为,本文通过测定我国一些普通球粒陨石金属相的元素含量,讨论了它们在母体形成过程中的分布规律和某些分馏趋势。

一、实验条件

首先将球粒陨石表面的熔壳切除干净,取约30g新鲜的样品,在玛瑙研钵中破碎后,将其研磨到20目左右,用手磁铁将其磁性颗粒分出,余下部分继续研磨后,再用磁铁分离,多次重复,最后非磁性部分用磁针分选。选出的磁性部分重新放到研钵中研磨,分离,弃去非磁性部分,重复2-3次后,加少量无水乙醇一起研磨,用丙酮清洗干净,烘干。用网筛按不同粒径分为 >20 目(0.9mm)、 $20-40$ 目(0.9-0.4mm)和 <40 目(0.4mm)等。

整个实验在中国原子能科学研究院进行,实验步骤为:准确称取50-100mg样品,装入聚乙烯小袋,再用电容纸包好,编号,与标准一起装入短照“跑兔”样品盒,由气动快速传动装置送入反应堆水平孔道照射,中子通量约 $10^{13}n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$,照射600s。停照后,冷却30min,在同轴Ge(Li)探测器上测量样品中的Fe、Ni、Co、Cu、Cr、Mn、Ga、Ge、Ir、Au和As的含量。详细实验条件见文献[1]。

由于一些样品数量少, 只作单次测定, 一般采用两次测定结果。对于单次测定, 在 80% 的可信度上, 各元素的平均计数统计误差为 Fe0.4%, Ni0.3%, Co0.2%, Cu1.3%, Cr12%, Mn4.7%, Ga4.6%, Ge21.0%, Ir15.6%, Au1.0%, As2.5%。

二、实验结果

实验数据结果(表 1)表明, 普通球粒陨石金属相的组成与颗粒大小有关。Ni、Ir 和 Au 含量在所有样品中(肇东陨石的珠球除外)均随颗粒的减小而增加, Ga 的含量除了东台陨石外表现出同样规律, Ge 含量由于 ^{76}Ge 的 γ 射线特征能量峰 264keV 处于低能部分, 受到康普顿峰的干扰极大, 所以大部分样品的数据未获得。但是 Ge 和 Ga 是强烈相关的元素, 相关系数为 0.94^[2], 它和 Ga 应有相同的分布规律。Co 和 As 的含量随金属颗粒的大小没有表现出明显的分布规律。Cu 含量在吉林、信阳和广饶陨石的金属中, 随颗粒的减小而增大; 在肇东陨石中, 这种趋势不明显, 而东台陨石中则呈相反的趋势。在 H 群的吉林和信阳陨石中, Cr 和 Mn 均相对富集在粗粒金属中, 在 L 和 LL 群的肇东, 广饶和东台陨石中, 它们的分布呈无规律变化。

表 1 我国一些普通球粒陨石金属相的微量元素含量**

陨 石	元 素 金属含 量%										
		Ni%	Co%	Cu (ppm)	Cr (ppm)	Mn (ppm)	Ga (ppm)	Ge (ppm)	Ir (ppm)	Au (ppm)	As (ppm)
吉林陨石 (H ₃)	20.6										
20—40 目		6.39	0.466	122	825	156	8.0	*	2.29	0.91	13.0
40—100 目		8.82	0.478	224	394	72.4	12.7	*	2.94	1.05	14.2
<100 目		23.9	0.323	1233	297	54.2	35.4	104	8.12	2.35	11.9
信阳陨石 (H ₃)	17.6										
20—40 目		5.45	0.430	125	1714	525	13.9	*	2.05	0.835	11.2
<40 目		7.82	0.460	317	532	178	14.9	*	2.84	1.05	13.5
肇东陨石 (L ₃)	9.35										
0.9—2mm (珠球)		7.97	0.766	141	424	143	*	*	3.47	1.05	19.2
0.9—2mm (片状)		4.95	0.670	156	911	447	4.90	*	0.40	0.917	16.5
20—40 目		5.58	0.719	109	861	320	5.60	*	1.06	0.93	18.1
<40 目		8.13	0.506	362	1465	404	7.10	*	2.59	1.20	14.2
广饶陨石 (L ₆₋₇)	7.98										
>20 目		5.93	0.796	103	478	293	6.60	*	1.15	1.10	21.3
20—40 目		7.48	0.705	307	1212	24.9	11.4	*	2.19	1.25	18.8
<40 目		13.1	0.690	746	449	111	12.5	*	4.29	1.70	20.1
东台陨石 (LL ₆)	3.28										
20—40 目		22.6	1.02	1861	285	121	14.1	184	3.49	2.75	27.0
<40 目		23.6	1.06	1021	444	80.7	12.0	203	5.50	3.05	31.6

** Fe 的数据仅作参考, 未列出。* 低于检测限

表 2 给出了各个陨石不同金属颗粒中 Ni、Co、Cu、Cr、Mn、Ga、Ir、Au 和 As 的含量变化范围。它揭示出普通球粒陨石金属相的元素分布随金属颗粒大小变化很大。随着粒

表 2 不同粒度金属颗粒中元素含量变化范围

元 素 陨 石	Ni	Co	Cu	Cr	Mn	Ga	Ir	Au	As
吉林 (H ₃)	3.74	1.48	10.1	2.78	2.88	4.42	3.54	2.58	1.19
信阳 (H ₃)	1.43	1.07	2.54	3.22	2.95	1.07	1.38	1.26	1.21
肇东 (L ₃)	1.64	1.51	3.32	3.46	2.82	1.45	8.64	1.31	1.35
广饶 (L ₆₋₉)	2.21	1.15	7.24	2.70	11.8	1.89	3.74	1.54	1.13
东台 (LL ₆)	1.04	1.04	1.82	1.56	1.50	1.18	1.58	1.11	1.17

径进一步分小,变化的倍数有更大的趋势。

引起球粒陨石金属相组成变化的原因主要在于元素的化学性质及其在金属中的赋存状态。研究表明,铁纹石主要存在于粗粒金属颗粒中,镍纹石存在于细粒金属部分^[3-5]。因此,Fe和Ni的不同分配将导致微量元素在金属中的不同分配。从表1可见,随着H→L→LL群球粒陨石母体经历的氧化条件增强,金属相在球粒陨石中的百分比依次降低,更多的Fe被氧化进入硅酸盐相,而更多的Ni保存在金属相中,结果Ni在金属相中的含量随H→L→LL群依次增高^[3,5]。相应地,微量元素由于对氧的不同亲合能力而伴随着Fe和Ni的分配而重新分配。

例如,在H群球粒陨石中,母体处于较还原的形成条件,Cr和Mn由于亲铁行为而富集在粗粒金属中,而在L和LL群中,由于氧化条件增强,在金属的热扩散过程中将被氧化或硫化而进入硅酸盐或硫化物相。

Ge是一个强亲铁元素,在普通球粒陨石中,Ge主要存在于金属相中。Ga则具有较强的亲石性,在L群球粒陨石中,83%的Ga存在于硅酸盐中^[6],而且Ga在金属相中的含量随岩石类型的增加而增加。我们的结果表明,随着H→L→LL群氧化条件的增强,Ga富集在细金属颗粒中的程度有降低的趋势,在东台(LL群)中,Ga在中粒(20—40目)颗粒中较细粒(<40目)中相对富集可能就是早期氧化作用的佐证。

三、实 验 讨 论

1. 金属相的宇宙化学作用及分馏 Lavrukhina 等认为,主要决定Fe-Ni相组成的宇宙化学作用是氧化-硫化作用^[7],本实验结果表明,不同粒度的金属相组成差异甚大,根据丰度分布,不可能用单一的作用过程来解释,其中热变质作用也是一个不容忽视的因素。Ni、Ir和Au等元素由于它们的难熔性或“惰性”,热变质作用对它们的影响相对小得多,使得它们在细粒金属中富集。而Cr和Mn等“活泼”元素对热的作用特别明显,导致它们在金属相中具有广泛的分布。

从表3各个金属相的元素/Ni比值将更清楚地看到,各个元素随Ni的化学演化及化学分馏趋势。在H群球粒陨石中,难熔元素Ir/Ni比几乎与金属颗粒的大小无关;但在L和LL群中,分馏作用却相当明显,Ir相对于Ni在细粒和珠球状金属颗粒中有大的分馏作用。导致这种现象的因素显然有两种,一是早期氧化作用造成的分馏;其次是后期热

变质作用中,金属热扩散造成的分馏作用。这种作用从 As 的分馏也可以清楚地看到,在不同的宇宙环境条件下,As 具有不同的赋存状态。从表 1 可见,As 的绝对含量随金属颗粒大小呈无规律变化,而表 3 中 As/Ni 比却显示出明显的分馏趋势。在 H 和 L 群中 As/Ni 比与金属粒径成正比,在 LL 群的东台陨石中,这种趋势刚好相反。表明在凝聚过程中,决定金属相组成的因素是氧化-硫化作用,As 相对在细粒金属中富集。在热变质作用过程中,As 易于还原回到金属组成中,因此在热扩散过程中较 Ni 有更大的分馏。图 1 表明不同化学群的球粒陨石金属相中,As 具有不同的化学分馏作用,其影响因素显然是早期的氧化-硫化作用和后期的热变质作用。在粗粒金属颗粒中,As 的分布以热变质作用为主导因素,而细粒金属中,母体经历的氧化-硫化作用仍然决定着 As 在金属中的分布。

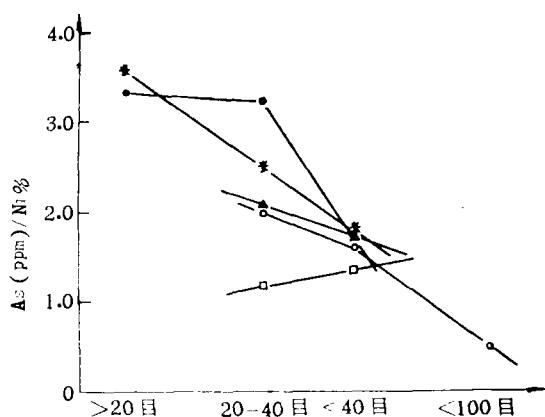
Co 和 Au 有着和 As 相近的分馏,它们具有和 Ni 相反的分馏趋势,而且这种趋势差异较小,因为它们和 Ni 一样属“惰性”的亲铁元素,抗氧化,主要存在于金属相中;其次,它们都是强烈的亲铁元素,与 Fe 有相同的演化规律。Cu、Ga、Cr 和 Mn 由于它们具有多重化学性质,而在整个母体的演化过程中,并不遵从单一的演化规律。

表 3 普通球粒陨石金属相的元素/Ni 比值*

元 素 陨 石	Co/Ni	Cu/Ni	Cr/Ni	Mn/Ni	Ga/Ni	Ge/Ni	Ir/Ni	Au/Ni	As/Ni
吉林陨石 (H ₂)									
20—40 目	0.0721	19.1	129	24.4	1.25		0.358	0.142	2.03
40—100 目	0.0542	25.4	44.7	8.21	1.44		0.333	0.119	1.61
<100 目	0.0135	51.6	12.4	2.27	1.48	4.35	0.340	0.098	0.50
信阳陨石 (H ₂)									
20—40 目	0.0789	22.9	314	96.3	2.55		0.376	0.153	2.06
<40 目	0.0588	40.5	68.0	22.8	1.91		0.363	0.134	1.73
肇东陨石 (L ₅)									
0.9—2mm (珠球)	0.0961	17.7	53.2	17.9			0.435	0.132	2.41
0.9—2mm (片状)	0.135	31.5	184	90.3	0.990		0.081	0.185	3.33
20—40 目	0.129	19.5	154	57.3	1.00		0.190	0.167	3.24
<40 目	0.0622	44.5	180	49.7	0.873		0.318	0.148	1.74
广饶陨石 (L ₆₋₇)									
>20 目	0.134	17.4	80.6	49.4	1.11		0.194	0.185	3.59
20—40 目	0.0942	41.0	162	3.33	1.52		0.293	0.167	2.51
<40 目	0.0527	56.9	34.3	8.47	0.954		0.327	0.130	1.53
东台陨石 (LL ₆)									
20—40 目	0.0451	82.3	12.6	5.35	0.623	8.14	0.154	0.122	1.19
<40 目	0.0449	43.3	18.8	3.42	0.508	8.60	0.233	0.129	1.34

* 除 Co/Ni 的单位为%/ %外,其余元素均为 ppm/ %。

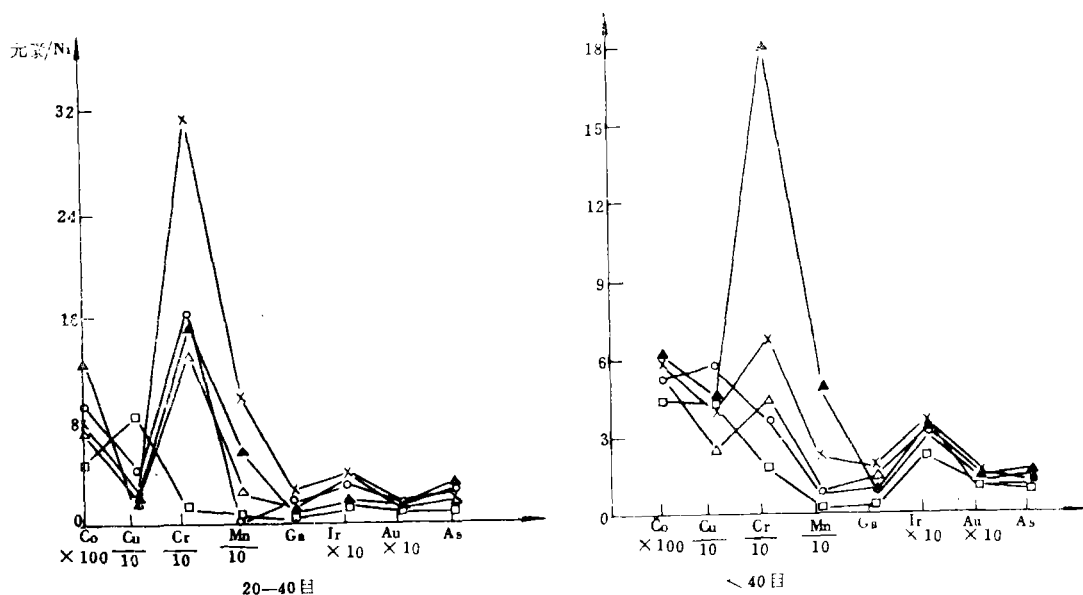
图 2 表明了同一粒径的球粒陨石金属颗粒中,元素/Ni 的化学分馏趋势。在不同母体来源的 H、L 和 LL 群中,Cr、Cu 和 Mn 相对于 Ni,在群间有较大的分馏,Ga 和 As 具有中等分馏作用,Co、Ir 和 Au 的分馏作用较小。



- 吉林陨石 (Jinlin chondrite) ▲ 信阳陨石 (Xinyang chondrite)
● 肇东陨石 (Zhaodong chondrite) * 广饶陨石 (Guangrao chondrite)
□ 东台陨石 (Dongtai chondrite)

图 1 不同粒径金属颗粒中 As/Ni 的分馏

Fig. 1 As/Ni ratio as a function of metal grain size



- × 信阳陨石 (Xinyang chondrite) △ 吉林陨石 (Jinlin chondrite) ▲ 肇东陨石 (Zhaodong chondrite)
○ 广饶陨石 (Guangrao chondrite) □ 东台陨石 (Dongtai chondrite)

图 2 球粒陨石金属相元素/Ni 分馏趋势

Fig. 2 Element/Ni ratio variations of chondritic metal phases

2. 金属相的热历史 研究资料表明,普通球粒陨石的母体形成温度为 570—450K,后期经历的热变质温度对 3 型非平衡球粒陨石为 450—650K,6 型平衡球粒陨石为 950—1150 K^[8],对 7 型陨石 Shaw,热变质温度高达 1573K^[9],金属硫化物已达到分离熔融的条件。对低平衡程度的球粒陨石所经历的变质作用,温度虽然达不到金属的熔点温度,但是在长期缓慢的热扩散作用下,分散在硅酸盐球粒和基质中的金属颗粒在原地或经过

短距离迁移和集中, 形成较大的颗粒, 有些则可聚集形成粒径可达 20—30mm 的金属块体^[10]。

3. 颗粒产状与微量元素的分布 选取了肇东陨石金属相相同粒径 (0.9—2mm), 不同产状的金属颗粒, 一种是珠球状的金属球粒, 一种是片状的不规则的金属块体, 将它们的元素组成对比列于表 1。显然, 它们的组成明显不同。表 3 给出了它们的元素/Ni 比值, 除 Ir 外, 所有元素相对于 Ni 在片状金属块体中表现出大的分馏, 而 Ir/Ni 比在珠球状颗粒中较片状颗粒中大近 5 倍。可能是珠球状颗粒来源于局部细粒金属颗粒的熔融集中产物; 而片状金属块体来源于局部热扩散或者有大量局部硫化物还原加入, 结果大大地稀释了难熔元素的含量, 而富集了非难熔亲铁元素。

4. 球粒陨石金属相组成与铁陨石组成的对比 为了获得铁陨石对应的母体球粒陨石, 必须考虑热变质作用和岩浆分异作用对球粒陨石金属相组成的影响。Ni 是一个“惰性”元素, 几乎全部存在于金属相中, 一般选用它和元素的比值来表示元素的分馏趋势。这里将我国 13 个铁陨石的元素/Ni 比值范围列于表 4, 以求与表 3 的数据相对照。

从表中可以看出, Co、Cu、Cr 和 As 对 Ni 的比值在球粒陨石金属相中较铁陨石中有更大的范围, 因为这些元素在热变质作用下具有较大的分馏趋势, 在母体的岩浆分异中, 它们在相中将重新分配。Ga、Ir 和 Au 在球粒陨石金属相的比值范围小于铁陨石, 这些元素在热变质作用过程中的分馏相对较小。因此, 可以看出, 不同球粒陨石的颗粒度的金属颗粒在不同的岩浆分异或冲击熔融条件下, 分异出不同化学群的铁陨石是可能的。

表 4 我国 13 个铁陨石(包括 IAB、IIIB、IIICD、IVA、IIIE 和一个未分群铁陨石)和表 3 数据的元素/Ni 比值范围*

元素 陨石	Co/Ni	Cu/Ni	Cr/Ni	Ga/Ni	Ge/Ni	Ir/Ni	Au/Ni	As/Ni
铁 陨 石	0.0427— 0.0691	10.8— 33.3	1.01— 44.4	0.234— 11.3	0.0128— 774	0.015— 0.707	0.0756— 0.244	0.0484 1.88
球粒陨石金属相	0.0135— 0.135	17.4— 82.3	12.4— 314	0.508— 2.55	—	0.081— 0.435	0.098— 0.185	0.50— 3.59

* 铁陨石数据取自文献 [11]

四、初步结论

1. 普通球粒陨石金属相的元素分布与金属颗粒的大小和产状有关。
2. 普通球粒陨石金属相在热变质作用过程中, 经历了较明显的分馏。
3. 普通球粒陨石金属相的组成不仅取决于氧化-硫化作用, 而且与热变质作用有关。
4. 不同球粒陨石金属相, 由于不同的分异条件和环境可能分异出不同化学群的铁陨石。

致谢: 本工作实验过程中得到倪帮发同志的帮助和支持, 并提供了计算机处理程序, 方秀英同志提供了吉林陨石金属相样品, 在此谨致谢忱。

参 考 文 献

- [1] 陈永亨和孙用均, 地球化学, 第3期, 第1页, 1986.
[2] Crock, J. H., *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 36, p. 517, 1972.
[3] Rambaldi, E. R., *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 31, p. 224, 1976.
[4] Rambaldi, E. R., *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 33, p. 407, 1977.
[5] Rambaldi, E. R., *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 36, p. 347, 1977.
[6] Chou, C. L. and A. J. Cohen, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 37, p. 315, 1973.
[7] Lavrukhlina, A. K. et al., *Geochemistry International*, Vol. 19, p. 35, 1982.
[8] Wasson, J. T., *Meteorites, Classification and Properties*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, p. 191, 1974.
[9] Rambaldi, E. R. and J. H. Larimer, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 33, p. 61, 1976.
[10] 王道德和谢光德, 空间科学学报, 第1卷, 第85页, 1981.
[11] 王道德等, 地球化学, 第2期, 第109页, 1983.

The Distribution of Elements in the Metal Phase of Some Chinese Ordinary Chondrites

Chen Yong-heng

(Institute of Geochemistry, Academia Sinica)

Sun Yong-jun

(Institute of Atomic Energy, Academia Sinica)

Wang Dao-de

(Institute of Geochemistry, Academia Sinica)

Abstract

The concentrations of Fe, Ni, Co, Cu, Cr, Mn, Ga, Ge, Ir, Au and As in the metal phases of Jinlin (H₅), Xinyang (H₅), Zhaodong (L₅), Guangrao (L₆₋₇) and Dongtai (LL₆) ordinary chondrites in China are determined by instrumental neutron activation analysis. For each meteorite various metallic fractions were analyzed: <20 mesh, 20—40 mesh, >40 mesh and so on. In terms of these results, the elemental distribution and fractional trends and the processes determining the composition of the metal phase are discussed.