

# 陨石中前太阳颗粒及其所携带惰性气体的 原始同位素异常研究进展

侯渭, 谢鸿森, 周文戈, 刘永刚

(中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 从球粒陨石的酸不溶残渣中分离出了携带有惰性气体同位素异常的金刚石、碳化硅和石墨颗粒。这些同位素异常用太阳系内部过程是无法解释的, 它们被归因于太阳系外多种核合成组分的不完全混合, 称为原始惰性气体同位素异常, 这三种矿物颗粒被称为前太阳颗粒。介绍了这三种前太阳颗粒的分离过程、存在部位、粒度大小、所携带惰性气体组分的同位素组成, 以及这些惰性气体和携带物的成因, 并对它们的科学意义进行了简要的讨论。

**关键词:** 陨石; 惰性气体; 前太阳颗粒

**中图分类号:** P185.83

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7849(2002)03-0018-06

## 1 惰性气体原始同位素异常及携带物

20世纪60~70年代以来, 在陨石中发现了多种具有异常同位素组成的元素, 这些组成无法用太阳系的内部过程(例如, 质量分馏效应、热扩散、化学反应、放射性元素衰变和宇宙射线诱发的散裂反应等)进行解释, 它们被归因于太阳系以外多种核合成组分的不完全混合<sup>[1]</sup>。对于太阳系, 这种同位素异常组成是太阳系形成时就固有的, 因此称之为原始同位素异常。目前, 在陨石中发现原始同位素异常的元素达20多种, 其中包括惰性气体元素的原始同位素异常。陨石中的惰性气体原始同位素异常最早发现于碳质球粒陨石的全岩样品中, 直到20世纪80年代后期, 随着分离和测量技术的提高, 终于确定这些异常主要携带在一些细粒碳质物中, 这些矿物颗粒被称为前太阳颗粒。对前太阳颗粒分离物的详细测定, 促进了更多的惰性气体原始同位素异常的发现。从文献[2]可知, 陨石中原始惰性气体是陨石形成时从太阳星云中俘获的, 与太阳系过程无关, 因此陨石惰性气体的原始同位素异常显然应该与原始型惰性气体关系密切。原始型惰性气体的主要组分Q气具有正常的同位素组成, 我们这里所讨论的原始同位素异常则存在于原始型惰性气体的次要组分中。这些组分虽然所占比例很小, 但其同位素组成比Q气要复杂得多。为了叙述方便, 以下将原始同位素异常

简称为同位素异常。

20世纪70年代, Lewis等<sup>[3]</sup>用不含氧酸溶解Allende陨石(CV3)样品, 获得了原始残渣, 再用HNO<sub>3</sub>对原始残渣进行氧化溶解。可氧化部分所携带的惰性气体强烈富集了重惰性气体元素Ar, Kr和Xe; 而氧化残渣中Ar, Kr和Xe含量很低, He和Ne浓度却相当于原始残渣中的绝大部分。测量发现, 氧化残渣中所含的Xe的同位素组成与全岩样品中发现的同位素异常Xe-X相同, 即重Xe和轻Xe同位素同时富集。将这种组分中的重Xe同位素和轻Xe同位素分别称为Xe-H和Xe-L(简称Xe-HL)。10多年后, Lewis等在Allende陨石的原始残渣中分离出呈胶态的碳质物, 并对其进行了X光衍射分析, 确定它们是富金刚石的分离物。用多个Allende陨石样品进行上述的分离测定, 获得近于相同的 $n(^{136}\text{Xe})/n(^{132}\text{Xe})$ 值(0.636~0.649), 从而确证携带有Xe-HL的主要矿物相为细粒金刚石。根据多个含此类细粒金刚石的碳质球粒陨石的低冲击效应的特点, 否定了金刚石的冲击成因, 提出了这种金刚石的太阳系外成因。从而, 将这种携带有惰性气体同位素异常的金刚石称为前太阳金刚石颗粒, 或星际金刚石颗粒。后来Bernatowicz等和Tang等从碳质球粒陨石的氧化残渣中分离出了前太阳碳化硅颗粒<sup>[4]</sup>, Amari等<sup>[5,6]</sup>分离出了前太阳石墨颗粒。

Amari等<sup>[5]</sup>统计出前太阳金刚石、碳化硅和石

收稿日期: 2001-08-03

编辑: 黄秉艳

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(10032040)

作者简介: 侯渭(1942—), 女, 研究员, 主要从事陨石学天体化学和地球深部物质科学研究工作。

墨在全岩中的含量分别为  $4 \times 10^{-4}$ ,  $6 \times 10^{-6}$  和  $< 10^{-6}$ 。测量得出金刚石的粒度中间值为  $2 \text{ nm}^{[7]}$ 。碳化硅的粒度测量结果为  $200 \sim 6\,000 \text{ nm}$ 。石墨的粒度变化较大, 从  $100$  至  $6\,000 \text{ nm}$  以上<sup>[4]</sup>。而离子探针分析表明, 只有较粗粒的球形石墨(直径为  $800 \sim 12\,000 \text{ nm}$ ) 才含有明显的惰性气体同位素异常 [Ne-E(L)]<sup>[6]</sup>。

对球粒陨石各部分惰性气体的测量表明, 原始残渣主要与球粒陨石的基质有关<sup>[8]</sup>。已知前太阳颗粒主要产于原始残渣中的氧化残渣部分。因此可推断, 前太阳颗粒分布于球粒陨石的基质中。Nakamura 等<sup>[9]</sup>用显微激光探针进行了两个 CM 陨石——Murchison 和 Yamato-791198 的就位惰性气体的测量。测量结果表明 Q 相和前太阳颗粒都存在于球粒外的尘粒环中。在  $10 \mu\text{g}$  尺度范围内前太阳金刚石颗粒是均匀分布的。在 Murchison 样品中一个球粒周围环的局部范围内显示出了  $^{22}\text{Ne}$  的富集, 表明在环中也有 Ne-E 携带相——碳化硅或石墨存在。

## 2 前太阳金刚石颗粒的惰性气体组分及成因

Huss 和 Lewis<sup>[7]</sup>来自 7 个化学群的 14 个热变质程度低(岩石类型低于 3.8)的球粒陨石中制备了前太阳金刚石颗粒的分离物。用分步加热方法测量了它们的惰性气体。进一步确认在前太阳金刚石

中存在以下三种惰性气体组分; ①HL 组分, 其释放温度为  $1\,100 \sim 1\,600^\circ\text{C}$ 。组分中各元素分别命名为 He-HL, Ne-HL, Ar-HL, Kr-HL 和 Xe-HL。Ar-HL 的特点是具有高的  $n(^{38}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$  值。Xe-HL 和 Kr-HL 的特点是具有同位素异常。Xe-HL 同时富集轻、重同位素, Kr-HL 只富集重同位素。②P3 组分, 其是在较低温度 ( $200 \sim 900^\circ\text{C}$ ) 下释放出来的, 此组分中各元素分别命名为 He-P3, Ne-P3, Ar-P3, Kr-P3 和 Xe-P3。③P6 组分, 其释放温度则略高于 HL 组分, 此组分中各元素分别命名为 He-P6, Ne-P6, Ar-P6, Kr-P6 和 Xe-P6。P3 和 P6 组分的元素丰度模式也是行星型的, 同位素组成基本正常, 但并不与 Q 气(P1)的同位素组成完全相同(关于行星型丰度模式和 Q 气的同位素组成特点详见文献[2])。表 1 列出以上三种组分的同位素组成, 为了比较同时列出了 Q 气的数值。图 1 为来自 Tieschitz 陨石(H 群普通球粒陨石)的前太阳金刚石在温度为  $1\,015 \sim 1\,870^\circ\text{C}$  范围内释放 Xe 的谱图。从图 1 中可看出, Xe-HL 具轻、重同位素同时相对富集的特点。图中有的数值范围较宽, 反映了 Xe-P6 的影响。

Lewis 等<sup>[4]</sup>在首次从 Allende 陨石中分离出前太阳金刚石颗粒后就指出, 前太阳金刚石颗粒携带的 HL 惰性气体同位素异常(以及其它元素, 如 H 和 N 异常)是在超新星爆发中形成的, 它们由离子植入作用被碳质颗粒捕获, 因而这些碳质颗粒(如金刚石)的形成早于超新星, 可能是在超新星形成之前

表 1 前太阳金刚石中主要惰性气体组分与 Q 气的同位素成分的比较<sup>[6]</sup>

Table 1 Comparison of isotopic compositions of the major noble gas components in pre-solar diamonds with Q gas

组 分	$n(^{20}\text{Ne})/n(^{22}\text{Ne})$	$n(^{21}\text{Ne})/n(^{22}\text{Ne})$	组 分	$n(^3\text{He})/n(^4\text{He})$	组 分	$n(^{38}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$	$n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$	
Ne-P3	8.910	0.029 0	He-P3	$\leq 0.000\,135$	Ar-P3	0.190 0	$< 0.03$	
Ne-(HL+P6)	8.500	0.036 0	He-HL	0.000 170	Ar-HL	0.227 0	$< 0.08$	
Ne-Q	10.700	0.029 4	He-Q	0.000 159	Ar-Q	0.189 0		
组 分	$n(^{78}\text{Kr})/n(^{84}\text{Kr})$	$n(^{80}\text{Kr})/n(^{84}\text{Kr})$	$n(^{82}\text{Kr})/n(^{84}\text{Kr})$	$n(^{83}\text{Kr})/n(^{84}\text{Kr})$	$n(^{86}\text{Kr})/n(^{84}\text{Kr})$			
Kr-P3	0.006 5	0.399 0	0.203 5	0.203 6	0.311 1			
Kr-HL	0.004 3	0.030 8	0.160 0	0.199 3	0.360 3			
Kr-P6(1) <sup>①</sup>	0.006 0	0.038 5	0.203 5	0.201 7	0.313 0			
Kr-P6(2) <sup>②</sup>	0.005 3	0.035 7	0.185 0	0.200 3	0.333 0			
Kr-Q	0.006 7	0.040 1	0.203 6	0.202 5	0.307 4			
组 分	$n(^{124}\text{Xe})/$ $n(^{132}\text{Xe})$	$n(^{126}\text{Xe})/$ $n(^{132}\text{Xe})$	$n(^{128}\text{Xe})/$ $n(^{132}\text{Xe})$	$n(^{129}\text{Xe})/$ $n(^{132}\text{Xe})$	$n(^{130}\text{Xe})/$ $n(^{132}\text{Xe})$	$n(^{131}\text{Xe})/$ $n(^{132}\text{Xe})$	$n(^{134}\text{Xe})/$ $n(^{132}\text{Xe})$	$n(^{136}\text{Xe})/$ $n(^{132}\text{Xe})$
Xe-P3	0.004 51	0.004 04	0.080 6	1.042	0.159 1	0.823 2	0.377 0	0.310 0
Xe-HL	0.008 42	0.005 69	0.905 0	1.056	0.154 4	0.844 2	0.636 1	0.700 0
Xe-P6(1) <sup>①</sup>	0.004 38	0.004 44	0.089 0	1.114	0.166 0	0.821 4	0.329 1	0.310 0
Xe-P6(2) <sup>②</sup>	0.006 87	0.005 21	0.089 9	1.078	0.158 9	0.835 5	0.518 0	0.550 0
Xe-Q	0.004 67	0.004 14	0.083 0	1.040	0.163 0	0.821 2	0.377 9	0.316 5

①是假定为正常同位素组成的计算结果; ②是用测量结果的端元数值计算所得的结果

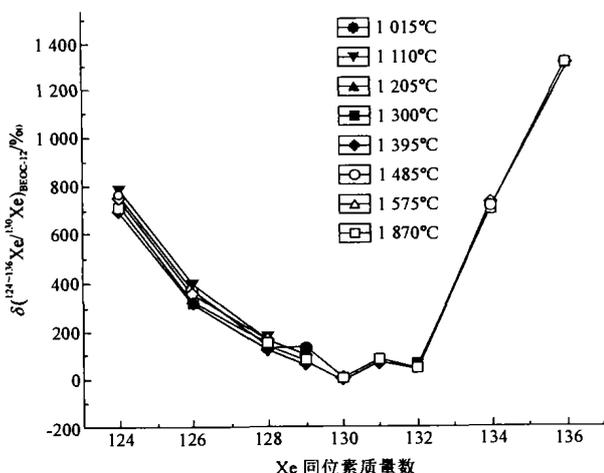


图1 Tieschitz 陨石(H3.6)中前太阳金刚石的Xe谱图<sup>[7]</sup>

Fig.1 Xenon data of pro-solar diamonds in Tieschitz chondrite  $\delta(^{124-136}\text{Xe}/^{130}\text{Xe})_{\text{BEOC-12}}(\text{‰})$ 为样品的每一个Xe同位素与 $^{130}\text{Xe}$ 的比值减去相应的标准样该比值,再被标准样该比值除之商。BEOC-12为标准样名称,代表的同位素成分。例如

$$\delta(^{124}\text{Xe}/^{130}\text{Xe})_{\text{BEOC-12}}(\text{‰}) = \left\{ \frac{[n(^{124}\text{Xe})/n(^{130}\text{Xe})]_{\text{样品}} - [n(^{124}\text{Xe})/n(^{130}\text{Xe})]_{\text{BEOC-12}}}{[n(^{124}\text{Xe})/n(^{130}\text{Xe})]_{\text{BEOC-12}}} \right\} \times 1000$$

$10^2 \sim 10^4$  a, 红巨星或行星星云阶段的产物。

Huss 和 Lewis<sup>[7]</sup>在对高度纯化的金刚石分离物的惰性气体进行了详细研究后认为,金刚石中的惰性气体组来自多个恒星源,起码3个或更多。对于Xe-HL组分,虽然根据元素核合成理论Xe-H和Xe-L不可能由同一个核合成过程形成。但至今在实验室中仍不能将Xe-H和Xe-L的携带物分离开来,因此只能将Xe-HL看作为来自不同来源的均一混合物。研究表明,许多球粒陨石(CI,CM, CV3等)的金刚石中的惰性气体的Xe-P3和Xe-HL的比例近于一个常量,表明这些惰性气体组分在进入金刚石之前就已经混合均匀了。因此,对于金刚石,其惰性气体可看作是来自同一个源,并且在原始太阳星云形成之前这些惰性气体组分就已经进入了金刚石内部。关于前太阳金刚石的成因基本上存在两种观点:一种观点认为金刚石是某恒星外层由气相直接凝聚而成的;另一种观点认为是由细粒石墨转变而来的,这种转变过程发生在爆发的恒星中,尘粒间的相互碰撞产生的冲击压促使石墨向金刚石的转变。根据后一种观点,金刚石应该与大量的石墨和非晶碳伴生,事实上并没有观察到这种现象。对前太阳金刚石的透射电镜分析发现,它们与实验室中低压下由气相生长出来的金刚石非常相似,因此前一种观点得到了较多学者的支持。

### 3 前太阳碳化硅惰性气体组分及成因

关于前太阳碳化硅颗粒中的惰性气体组分的划分和命名还不太统一。Amariet等<sup>[5]</sup>将前太阳碳化硅颗粒所携带的惰性气体组分中具有同位素异常的组分称为Ne-E(H)组分和Xe-S组分。Ne-E组分的特点是 $^{22}\text{Ne}$ 强烈富集,因此 $n(^{20}\text{Ne})/n(^{22}\text{Ne})$ 值很低。Xe-S组分的特点是富集Xe的5个中等重的同位素。前太阳石墨中也富含Ne-E组分,因其释放温度比碳化硅中的Ne-E低,故命名为Ne-E(L)组分,而碳化硅中的Ne-E则称为Ne-E(H)。

Lewis等<sup>[10]</sup>对由Murchison碳质球粒陨石(CM)中分离出来的前太阳碳化硅的惰性气体进行了详细测量。他们根据粒度将碳化硅分为14个部分,测量结果表明其惰性气体是多种同位素异常组分的混合物。其中主要的组分是N组分和G组分。N组分占碳化硅惰性气体的大部分,同位素组成基本正常。G组分的同位素组成表明与天体物理S过程有关,它包括了上述的Ne-E气和Xe-S气在内(按G组分命名应分别称为Ne-G和Xe-G)。表2列出了N和G组分的主要同位素组成。Lewis等<sup>[10]</sup>认为N和G这两种惰性气体组分可能来自红巨星(或AGB星, asymptotic giant branch)的He燃烧壳和原始包层,碳化硅颗粒则来自环绕这些恒星的原始凝聚物。应说明的是,G组分的 $n(^{20}\text{Ne})/n(^{22}\text{Ne})$ 值很低。按传统观点, $^{22}\text{Ne}$ 是 $^{22}\text{Na}$ 的蜕变产物。 $^{22}\text{Na}$ 蜕变半衰期很短,为2.58 a,其来源应与爆发的恒星(如新星)有关。然而G组分中其它气体如Ar-G, Kr-G, Xe-G的特点显示其与S过程有关,因此,仍判断G组分是红巨星He燃烧壳成因<sup>[6]</sup>。

观测表明,随碳化硅粒度的变化,元素和同位素比[如 $n(^{80}\text{Kr})/n(^{82}\text{Kr})$ 和 $n(^{86}\text{Kr})/n(^{82}\text{Kr})$ ]也发生

表2 前太阳碳化硅颗粒中G组分和N组分的同位素组成<sup>[9]</sup>

Table 2 Isotopic compositions of the G component and the N component of noble gas in pre-solar SiC

同位素比值	G组分 <sup>[10]</sup>	N组分 <sup>[10]</sup>	原始太阳星云 <sup>[11]</sup>
$n(^3\text{He})/n(^4\text{He})$	0	<0.000 260	0.000 142
$n(^{20}\text{Ne})/n(^{22}\text{Ne})$	0.082 7	8.400 0	13.700 0
$n(^{21}\text{Ne})/n(^{22}\text{Ne})$	0.000 59	0.033 00	0.033 00
$n(^{38}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$	0.660 0	0.170 5	0.188 0
$n(^{80}\text{Kr})/n(^{82}\text{Kr})$	0.032~0.044	0.195 3	0.194 0
$n(^{83}\text{Kr})/n(^{82}\text{Kr})$	0.286	0.995	1.000
$n(^{84}\text{Kr})/n(^{82}\text{Kr})$	2.40	4.93	4.99
$n(^{86}\text{Kr})/n(^{82}\text{Kr})$	1.090~2.800	1.401	1.520

相应的变化,表明碳化硅可能来自于多个不同质量、不同金属含量、不同温度和不同中子密度的红巨星。根据碳化硅中宇宙成因 $^{21}\text{Ne}$ 的含量,计算出在太阳系形成之前 130 Ma,碳化硅就遭受了宇宙射线的辐射,说明从环绕恒星壳层中碳化硅颗粒的形成至 4.6 Ga 前到达太阳系之间的时间间隔为 130 Ma。这种富含 $^{21}\text{Ne}$ 的碳化硅颗粒约占所有碳化硅颗粒的 10%或更少,这一事实表明在太阳系形成之前的短时间内曾发生过去气作用。这样,真正的宇宙射线辐射年龄可能更长,富气碳化硅颗粒先于太阳系形成的时间短则为 130 Ma,最长可达 2 000 Ma<sup>[10]</sup>。

#### 4 前太阳石墨颗粒的惰性气体组分及成因

Amari 等<sup>[6]</sup>对由 Murchison CM 陨石中分离出来的 4 个不同密度范围的前太阳石墨颗粒进行了惰性气体的测量,发现它们也是多种同位素异常的惰性气体的混合,但其组成比碳化硅更为复杂。与 S 过程有关的 Kr-S 出现两种类型:密度  $\rho_B$  为 2.15~2.20 g/mL 的石墨的  $[n(^{86}\text{Kr})/n(^{82}\text{Kr})]_s = 4.8$ ; 而密度  $\rho_B \leq 2.15$  g/mL 的石墨的  $[n(^{86}\text{Kr})/n(^{82}\text{Kr})]_s \leq 0.5$ 。说明这两种不同密度的石墨中的惰性气体来自于不同类型的红巨星的 He 燃烧壳层。据核合成理论,红巨星外部 He 燃烧壳层产生的 Ne(相当于碳化硅惰性气体中的 Ne-G 组分)的同位素组成特点是  $n(^{20}\text{Ne})/n(^{22}\text{Ne})$  约为 0.09。但所有前太阳石墨颗粒的 Ne-E(L)组分的  $n(^{20}\text{Ne})/n(^{22}\text{Ne})$  值更小,几乎由纯的 $^{22}\text{Ne}$ 组成。对单颗石墨的离子探针测定发现, $^{22}\text{Ne}$ 浓度最高的高密度石墨颗粒样品的  $n(^{20}\text{Ne})/n(^{22}\text{Ne}) = 0.0067$ ,低密度单颗粒石墨中只测定出 $^{22}\text{Ne}$ ,没有发现 $^{20}\text{Ne}$ 。因此否定了这种组分的前太阳石墨成因,认为这种富 $^{22}\text{Ne}$ 的组分应来自爆发的新星和超新星,最可能是 II 型超新星爆发所致。此外,前太阳石墨颗粒还具有其它元素的同位素异常,如具有高的 $^{18}\text{O}$ , $^{15}\text{N}$ , $^{26}\text{Al}$ 和  $n(^{12}\text{C})/n(^{13}\text{C})$ ,而有正常的 $^{17}\text{O}$ ,这种特点可能与 WR 星(wolf-rayet stars,一种质量为太阳质量 40~80 倍的恒星)的低强度 S 过程有关。因此,WR 星可能成为石墨的第 4 种来源。

#### 5 不同化学群球粒陨石中前太阳颗粒的分布

Huss 和 Lewis<sup>[12]</sup>对 CI, CV, CO, LL, L, H, EH 7 个化学群 18 个球粒陨石的样品进行了酸处理和

逐步加热法测量惰性气体,并根据 Ne-HL 和 Xe-HL、Ne-E(H)和 Xe-S、Ne-E(L)的浓度分别估算陨石中前太阳金刚石、碳化硅和石墨的丰度。实验结果表明,前太阳金刚石、碳化硅和石墨在各化学群的不同岩石类型中的分布是不同的。前太阳金刚石和碳化硅颗粒在上述各化学群球粒陨石(热变质程度较低的类型)中均有发现,而石墨只发现于 CI (Orgueil)和 LL3.0~3.1 陨石中。EH 群陨石中前太阳金刚石和碳化硅的丰度均高于不平衡普通球粒陨石。球粒陨石的热变质程度对前太阳颗粒的保存程度影响很大,在岩石类型  $> 3.8$  的普通球粒陨石中几乎不含前太阳颗粒。这是因为前太阳颗粒存在于基质中,热变质过程使基质受到加热,前太阳颗粒被破坏而消失,其它的基质矿物则发生强烈的重结晶作用,因而在重结晶强烈的球粒陨石中前太阳颗粒难以保存。对不同岩石类型中各类前太阳颗粒丰度的比较表明,热变质过程中金刚石最稳定,碳化硅次之,石墨最不稳定。除上述 7 个化学群的球粒陨石外,对 CM 群陨石惰性气体的研究表明,CM 群陨石中含有各种前太阳颗粒(金刚石、碳化硅和石墨)<sup>[7]</sup>。表 3 列出 18 个球粒陨石中前太阳金刚石、碳化硅和石墨的相对含量。

表 3 不同化学群球粒陨石中的前太阳颗粒的含量<sup>[11]</sup>

Table 3 Abundances of pre-solar grains in different chemical groups of chondrites  $w_B/10^{-6}$

陨 石	化学群和 岩石类型	金刚石 <sup>①</sup>	SiC <sup>②</sup>	石墨 <sup>①</sup>
Orgueil	CI	1 134	14.2	10.3
Semarkona	LL3.0	142	1.56	0.034
Krymka	LL3.1	95	0.41	<0.009
Bishunpur	LL3.1	115	1.34	0.022
Ragland	LL3.5	69.4	0.131	<0.000 31
Mazo Madaras	L3.5	52	0.090	
ALHA-77214	L3.5	53	0.020	
Julesburg	L3.7	<0.01	0.000 71	
Tieschitz	H3.6	39	0.074	
Dimmitt	H3.8	0.3	0.001 21	
Grady	H3.8	<0.02	<0.000 85	
Qingzen	EH3	59	1.53	
Indarch	EH4	29	1.25	
Abee	EH5		0.000 48	
Leoville	CV3	496	0.392	
Vigarano	CV3	281	0.166	
Allende	(CV3)	250	0.006 2	
Kainsaz	(CO3)	149	0.055	

①由分离物质量计算获得;②由 Ne-E(H)含量估算获得

#### 6 结 论

(1)在热变质程度低的球粒陨石的基质中,保存

有太阳系形成之前就已经存在于原始太阳星云中的星际颗粒,也称为前太阳颗粒。其中金刚石、碳化硅和石墨中含有的惰性气体具有原始同位素异常。

(2)同一陨石中前太阳金刚石颗粒最丰富,粒度最小(nm级)。其次为前太阳碳化硅颗粒,粒度大于金刚石。石墨数量最少,粒度变化大,量级与碳化硅类似。

(3)前太阳金刚石颗粒中携带有三种惰性气体组分,按释放温度排列,由低至高为P3,HL,P6。P3和P6的同位素组成基本正常。HL具有明显的原始同位素异常,其突出的特点是Xe的轻同位素和重同位素同时富集。根据元素核合成理论,HL组分可能是在超新星爆发中形成的,而金刚石颗粒本身可能形成于超新星之前的红巨星或行星星云阶段。Xe-H和Xe-L不可能由同一个核合成过程形成,但至今在实验室中未能将Xe-H和Xe-L的携带物分离开来。因此只能将Xe-HL看作为来自不同来源的均一混合物,它们在进入金刚石之前就已经混合均匀了。

(4)前太阳碳化硅颗粒携带的惰性气体可分为两种组分:N组分和G组分。N组分数量占绝对优势,具有正常的同位素组成。G组分中的Ne同位素具有原始同位素异常,其特点是几乎由纯的 $^{22}\text{Ne}$ 组成, $^{20}\text{Ne}$ 和 $^{21}\text{Ne}$ 含量极低。G组分中的Ar,Kr和Xe的同位素组成表明它们与核合成的S过程有关。目前认为N组分和G组分可能来自多个不同质量的红巨星的He燃烧壳层和原始包层,碳化硅颗粒则来自环绕这些恒星的原始凝聚物。

(5)前太阳石墨颗粒携带的惰性气体也是具有同位素异常的多种惰性气体的混合。主要的惰性气体组分有Kr-S和Ne-E(L)。根据其同位素组成,目前认为前太阳石墨颗粒中的惰性气体有多种来源:不同类型红巨星的He燃烧壳层、II型超新星爆发以及WR星。

除惰性气体同位素异常外,这三种前太阳颗粒中所含的其它元素如Mg,Ba和Nd也具有强烈的原始同位素异常。对单个颗粒的测定发现,Si,C和N的同位素异常也非常突出,其数值可分别达到地球值的2.7,1 000,300倍<sup>[4]</sup>。这些同位素异常的广泛存在,对太阳系物质同位素均一化的观念是个很大的冲击,也进一步证明核合成和恒星起源理论的正确性。核合成和恒星起源理论认为,恒星是元素核合成的主要场所。恒星由星际介质聚集而成,恒星演化过程中发生多种元素的核合成过程,在其生命

的后期又把核合成的产物抛向星际空间,合并入星际介质中,新的恒星又从星际介质中诞生。目前太阳系的年龄不足银河系年龄的一半,因此原始太阳星云必定接受了一代或多代恒星核合成的产物,即目前观测到的太阳系元素分布特征和同位素组成,是太阳系形成前银河系各种核合成产物累计和平均的结果。球粒陨石中前太阳颗粒的发现,说明球粒陨石的成分和结构特点不仅能反映原始太阳星云凝聚物的特点,而且还保存了原始太阳星云形成时从银河星云中继承下来的同位素特征。这也进一步说明了球粒陨石的原始性,以及进一步开展球粒陨石详细研究的必要性。

#### 参考文献:

- [1] 王先彬. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 273—344.
- [2] 侯渭, 谢鸿森, 周斌, 等. 陨石原始型惰性气体的研究进展[J]. 地质科技情报, 2002, 21(2): 29—35.
- [3] Lewis R S, Srinivasan B, Anders E. Host phase of a strange xenon component in Allende[J]. *Science*, 1975, 190: 1 251—1 262.
- [4] Lewis R S, Tang M, Wacker J F, et al. Interstellar diamonds in meteorites[J]. *Nature*, 1987, 326: 160—162.
- [5] Amari S, Lewis R S, Anders E. Interstellar grains in meteorites: I. Isolation of SiC, graphite, and diamond; size distributions of SiC and graphite[J]. *GCA*, 1994, 58: 459—470.
- [6] Amari S, Lewis R S, Anders E. Interstellar grains in meteorites: II. Graphite and its noble gases [J]. *GCA*, 1995, 59(7): 1 411—1 426.
- [7] Huss G R, Lewis R S. Noble gases in presolar diamonds I: Three distinct components and their implications for diamond origins[J]. *Meteoritics*, 1994, 29: 791—810.
- [8] Nakamura T, Nagao K, Metzler K, et al. Heterogeneous distribution of solar and cosmogenic noble gases in CM chondrites and implications for the formation of CM parent bodies [J]. *GCA*, 1999, 63(2): 241—255.
- [9] Nakamura T, Nagao K, Takaoka N. Microdistribution of primordial noble gases in CM Chondrites determined by in-situ laser microprobe analyses: Decipherment of nebular processes [J]. *GCA*, 1999, 63(2): 241—255.
- [10] Lewis R S, Amari S, Anders E. Interstellar grains in meteorites: I. SiC and its noble gases [J]. *GCA*, 1994, 58: 471—494.
- [11] Suess H E. *Chemistry of The Solar System: An Elementary Introduction to Cosmochemistry* [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1987. 55—91.
- [12] Huss G R, Lewis R S. Presolar diamond, SiC and graphite in primitive chondrites: Abundances as a function of meteorite class and petrologic type [J]. *GCA*, 1995, 59(1): 115—160.

# DEVELOPMENT OF STUDIES ON PRE-SOLAR GRAINS IN METEORITES AND ITS CARRYING PRIMORDIAL ISOTOPIC ANOMALY OF NOBLE GAS

HOU Wei, XIE Hong-sen, ZHOU Wen-ge, LIU Yong-gang

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550002, China)

**Abstract:** The diamond, SiC and graphite grains with isotopic anomaly of noble gas are separated from original residue of chondrites. However these isotopic anomalies of noble gas can not be interpreted by the process of solar system, and they are attributed to a mixed type of many nuclear synthesized materials outside of the solar system. Accordingly, this type of anomaly is called primordial isotopic anomaly of noble gas, carried by diamond, SiC and graphite grains which are called pre-solar grains. Hence, the authors of this paper introduce the separation of the pre-solar grains from chondrites, grain sizes of diamond, SiC and graphite grains, their position in the chondrites, isotopic composition of the noble gases carried by the pre-solar grains and the origin of these gases and pre-solar grains. Also the authors give a brief discussion of their scientific significance.

**Key words:** meteorite; noble gas; pre-solar grain

## 庐山变质核杂岩成因的新认识

崔学军, 曾佐勋

(中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

变质核杂岩主要有3种类型,即盆岭型、古老大陆边缘型和古陆核增生型变质核杂岩。这些变质核杂岩都是伸展型的,即它们是由于地区性的伸展作用所形成的,因此可以统称为伸展型变质核杂岩。江西庐山变质核杂岩由古老变质岩核(下元古界星子群)、褶皱层(中元古界双桥山群)和盖层三部分组成,按上述分类可划分为古老大陆边缘型变质核杂岩,因此它也是伸展体制下形成的,但前人对伸展体制是何时出现的还存在分歧。由于庐山变质核杂岩主体是庐山“透镜状山体”,它正好位于赣江断裂北段西侧,是夹在赣江断裂两条次级断裂——庐山西侧的沙河—德安断裂与庐山东侧的湖口—德安断裂之间的一个巨型“透镜体”构造,应该属于赣江断裂的组成部分,因此庐山变质核杂岩的形成必然与赣江断裂中—新生代的演化有关。对赣江断裂中—新生代演化历史的研究表明,赣江断裂自侏罗纪形成以来共经历了5次构造性质的转变:① $J_1\sim_2$ 时的压扭性质;② $J_3\sim K_1$ 时的左行平移性质;③ $K_1\sim K_2$ 时的伸展性质;④ $K_2$ 末至E时的右行平移性质;⑤晚近时期的差异性升降。现针对庐山变质核杂岩的形

成究竟与哪期构造活动有关的问题,进行简要分析。

Ar-Ar法测年成果表明庐山“透镜状山体”东西两侧的次级断裂——庐山西侧的沙河—德安断裂与庐山东侧的湖口—德安断裂是在 $J_3\sim K_1$ 时期形成的,此时赣江断裂的左行平移必然使夹在二者之间的庐山“透镜状山体”处于挤压状态,即发生转换挤压,从而使庐山“透镜状山体”上升,山体两侧相对下降,但这种转换挤压还不足以使下部变质岩抬升至地表;随后 $K_1\sim K_2$ 的伸展作用使山体两侧继续下降,山体相对上升,此时期的伸展作用可能是形成庐山变质核杂岩的关键,这一时期庐山地区强烈的岩浆热拱作用也使其加速上隆; $K_2$ 末至E时期的右行平移作用导致已经形成的庐山“透镜状山体”的北西、南东侧背向拉伸,从而使山体进一步抬升;对新构造运动的研究表明,晚近时期庐山南东侧的鄱阳湖又变为沉降,庐山山体仍相对抬升。

综上所述,形成庐山变质核杂岩的伸展体制是地区性的,不是单一一个时期伸展作用的结果,而与赣江断裂中—新生代整个演化过程密切相关。

(2002-06-28)