

## 普通球粒陨石 Semarkona 中球粒的 Pb-Pb 法年龄

谢 智<sup>1,2,3\*</sup>, Yuri AMELIN<sup>1,3</sup>

(1. Geological Survey of Canada, Ottawa, ON, Canada; 2. 中国科学院 壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 3. Department of Geology, University of Toronto, Toronto, ON, Canada)

**摘 要:** 陨石年代学研究中常用定年工具包括短半衰期和长半衰期放射性同位素体系, 其中前者可以给出陨石形成的相对年龄, 而后者则可以给出绝对形成年龄。在长半衰期体系中, Pb-Pb 法是目前能获得高精度可靠年龄的最有效方法。普通球粒陨石 Semarkona 是最不平衡的 LL3.0 型陨石, 受后期热变质的影响很小, 因此其年龄研究对反演陨石起源有重要意义。在本文中, 对 Semarkona 中球粒用不同的化学浸洗流程, 并测定浸洗溶液和残渣中 U-Th-Pb 同位素组成, 其中浸洗后的残渣均给出相对较高的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值, 表明其中含有较多的放射成因 Pb 同位素组成, 这些残渣构成 Pb-Pb 等时线, 给出年龄为  $(4\,566.9 \pm 5.8) \text{ Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 26$ , 与  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  模式年龄在误差范围内一致。尽管 Semarkona 陨石可能经历了后期蚀变的影响, 但前人对陨石变质温度的研究结果表明, 热变质温度并未足以使球粒中 Pb 同位素体系重置, 因此获得的年龄代表 Semarkona 陨石球粒的形成年龄。

**关键词:** Semarkona 陨石; 球粒; Pb-Pb 方法

中图分类号: P597

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2006)01-0013-06

## Lead-lead dating of chondrules in ordinary chondrite Semarkona

Zhi XIE<sup>1,2,3\*</sup> and Yuri AMELIN<sup>1,3</sup>

1. Geological Survey of Canada, Ottawa, ON, Canada;

2. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3. Department of Geology, University of Toronto, Toronto, ON, Canada;

**Abstract:** Short-lived radionuclides and long-lived isotope systems are normally used to date chondrites; the former systems can provide only relative ages while the later can provide absolute formation ages of chondrules, in contrast. Among the long-lived isotope systems, Pb-Pb system is the only one that can give most precision and creditable age information until now. The ordinary chondrite Semarkona is the most unequilibrium LL3.0 type meteorite, which might be only weakly effected by later thermal metamorphism. Thus, the age of Semarkona is significantly important for the studying of the formation and evaluation of meteorite. In this paper, different leaching procedures were used for the chondrules and chondrule fragments of Semarkona, and the U-Th-Pb compositions of leachates and residues were analyzed by TIMS method. The residues normally give higher  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratio, suggesting higher radiogenic Pb compositions. These residues form a Pb-Pb isochron, and give an age of  $(4\,566.9 \pm 5.8) \text{ Ma}$  with  $\text{MSWD}$  of 26, consistent to the weighted average age of  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  model ages. Though the chondrite might experience later aqueous alteration after its formation, previous researcher's work about metamorphic temperatures of chondrite suggested that the thermal metamorphism temperature was not high enough to reset the Pb-Pb system in the chondrules, therefore, the isochron age may represent the forming time of chondrules of Semarkona.

**Key words:** chondrite Semarkona; chondrules; Pb-Pb dating method

收稿日期(Received): 2005-01-26; 改回日期(Revised): 2005-05-31; 接受日期(Accepted): 2005-07-20

基金项目: Canadian Space Agency Contract (9F007-010128/001/SR)

作者简介: 谢智 (1969-), 男, 副教授, 地球化学专业。

\* 通讯作者(Corresponding author): XIE Zhi, E-mail: zxie@ustc.edu.cn, Tel: +86-551-3607656

## 0 引言

球粒陨石是陨石中的一种常见类型,其中含有球粒是其区别于其他类型陨石的一个显著特征。陨石球粒是一种成分为铁镁硅酸盐的小球体,是球粒陨石的一个主要组成部分,粒径从数毫米到小于 1 mm 不等。对陨石球粒的形成机制,一直存在不同的认识和观点,大约有超过 14 种不同的天体物理和天体化学成因假设模型<sup>[1]</sup>,而在这些模型中,陨石球粒的形成时间是一个重要的制约参数<sup>[2]</sup>。目前有多种放射成因同位素体系被用于进行陨石球粒的年代学测定,如短半衰期的核素体系  $^{26}\text{Al}$ 、 $^{53}\text{Mn}$  和  $^{129}\text{I}$  以及长半衰期的 U-Th-Pb、Rb-Sr 和 Sm-Nd 体系等。Mostefaoui *et al.*<sup>[3]</sup> 和 Russell *et al.*<sup>[4]</sup> 根据短半衰期体系的定年结果,认为陨石球粒的形成时间要较富钙铝包体(CAIs)晚 2~3 Ma; Amelin *et al.*<sup>[5]</sup> 报道了从 CR 型陨石(Acfer 059)的球粒和 CV 型陨石(Efremovka)的 CAIs 中获得高精度的 Pb-Pb 法年龄,分别为  $(4\,564.7 \pm 0.6)$  Ma 和  $(4\,567.2 \pm 0.6)$  Ma,二者间的年龄差异  $[(2.5 \pm 1.2) \text{ Ma}]$  反映其形成时的先后关系,支持上述从短半衰期体系中获得结论。然而 Bizzarro *et al.* 根据 Allende 陨石的球粒和 CAIs 中  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  方法定年结果,认为球粒和包体应该是同时形成<sup>[6]</sup>。

虽然 U-Pb 和 Pb-Pb 方法定年有很长的应用历史<sup>[7]</sup>,但早期报道的陨石年龄精度很少优于 0.3%,而且受测定技术限制,一般需要有较大量的研究样品,而且测定的样品主要是全岩(球粒+基质),如 Tatsumoto *et al.*<sup>[8]</sup> 分析的样品质量为 10~50 g,获得年龄中精度最好的是 Allende 陨石,为  $(4\,496 \pm 10)$  Ma。这种状况严重地制约了 U-Pb 和 Pb-Pb 体系对太阳系早期年代学研究中的应用。

在 U-Pb 和 Pb-Pb 年代学测定中,要获得高精度的年龄数据,除了要提高分析精度和较好地控制质量偏差,一个很重要的条件就是准确地进行普通 Pb 校正。过去 20 年对 U-Pb 体系的研究工作表明,最适合这种方法定年的矿物是含有 U 且普通 Pb 含量很低的矿物,这样才能获得精确可信的数据。因此对地球岩石的年代学研究中常用的矿物有锆石、独居石和斜锆石等;对陨石常用的有钙磷灰石和辉石等。用这些矿物定年,可以获得较为精确的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  模式年龄或等时线年龄,对经历多阶段演化的体系也可以给出较好的限制,而含普通 Pb 较高的矿

物用 U-Pb 体系定年则比较困难。Amelin *et al.*<sup>[5]</sup> 采用化学浸洗法,对 CR 型陨石(Acfer 059)的球粒和 CV 型陨石的 CAIs 进行 Pb-Pb 法和 U-Pb 年龄测定,通过化学浸洗,陨石球粒中含普通 Pb 较高的成分被选择性地先浸洗出来,残渣则给出较高的放射成因 Pb 同位素组成,结果构成很好的等时线,其中,有较高的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值的残渣给出与等时线年龄一致的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  模式年龄,而放射成因 Pb 越低, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄偏离等时线年龄越远。

Amelin *et al.*<sup>[5]</sup> 用 Pb-Pb 方法成功获得陨石球粒的形成年龄,但其选择的样品有较高的 U 含量,因此有较高的放射成因 Pb 同位素组成,而对于 Pb 含量相对较低和普通 Pb 较高的陨石球粒,通过化学浸洗是否也能获得较好的年龄则需要进行进一步实验。本文将报道对 LL3.0 型陨石 Semarkona 进行两步和四步化学浸洗的方法获得的 Pb-Pb 法和 U-Pb 法年龄。

## 1 样品描述和实验方法

Semarkona 属于普通球粒陨石中 LL3.0 型陨石<sup>[9]</sup>,LL 是指其中较低的金属 Fe 和总 Fe 含量,3.0 型表明其是普通球粒陨石中受后期热变质改造影响最小的类型。由于 Semarkona 受后期改造影响最小,是最不平衡的球粒陨石,陨石球粒中的矿物组成较为原始,能提供重要的球粒的起源和形成信息,因此受到较广泛的关注<sup>[10]</sup>。但迄今为止,对其形成时代,仍没有较可靠的年龄数据进行制约。Semarkona 的球粒中主要矿物类型包括橄榄石、斜顽辉石、普通辉石、顽辉石、铬铁矿等和 Fe、Ni 合金及硫化物等。Brearley *et al.* 给出了详细的矿物相和岩石化学描述<sup>[10]</sup>,本文不再赘述。

取数十克 Semarkona 陨石样品用于实验。所有样品的处理和测定均在加拿大地质调查所地质年代学实验室完成。用手工方法将陨石球粒从陨石中小心地分离出来,并清除球粒表面粘连的基质成分。将分离出来的球粒在酒精中用超声波清洗干净,准确称取较大的球粒或球粒碎片,称样量见表 1,在玛瑙研钵中研碎到  $< 50 \mu\text{m}$ ,转移入聚四氟乙烯容器中,准备进行化学浸洗。本文采用两步和四步浸洗方法,其中四步浸洗方法参照文献[11,12]的流程修改,以检查是否可以更好地将放射成因 Pb 和普通 Pb 成分分开。具体实验步骤参照表 2,每步处理后进行离心分离,再将上层浸洗溶液转移入聚四氟乙

烯容器中。在浸洗溶液和残渣中均加入  $^{235}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}$ 、 $^{235}\text{Pb}$  混合稀释剂, 并将残渣进一步完全溶解。对于浸洗溶液和残渣溶液, 用普通的阴离子树脂分离 U、Th 和 Pb, 具体流程修改自 Lugmair *et al.* [13] 的实验方法, 整个流程的 Pb 本底小于 2 pg, U 和 Th 本底小于 1 pg。

U、Th 和 Pb 的测定在热电离子质谱 Triton TI 上完成, 均用单 Re 带, 其中 Pb 的测定用硅胶作发射剂, U 和 Th 的测定用石墨作发射剂。尽管所测样品中 U、Th 和 Pb 的含量极低, 但高灵敏度的仪器仍然可以进行可靠的测定, 获得有效数据。获得的结果对分馏、普通 Pb 和空白进行校正, 等时线年龄计算采用 Isoplot 程序 [14];  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  模式年龄计算采用的初始普通 Pb 同位素组成取铁陨石中陨硫铁的

值, 即  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 9.307$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 10.294$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 29.476$  [8, 15], 获得的结果见表 3。

## 2 结果和讨论

根据获得的 7 个陨石球粒的浸洗溶液和残渣的 Pb 同位素组成 (表 3), 两步浸洗法中, Wash 1 和 Wash 2 给出相似的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值, 范围为 16.7 ~ 19.2; 四步浸洗法中, 浸洗溶液同样给出接近普通 Pb 成分的同位素比值, 其中 Wash 1 给出最低的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值, 这一步溶解的物质主要是球粒中的金属和金属硫化物, 其比值更接近初始 Pb 同位素组成。两种方法中, 浸洗后的残渣给出相对较高的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值, 最低值为 32.58, 最高值为 229.48, 但仍低于 Amelin *et al.* [5] 在 Acfer 059 中获得的高达 2 198 的比值。相对较低的放射成因 Pb 同位素组成是由于较低的 U 含量造成的。从表 3 中可以看出, 多数球粒浸洗后的残渣中, U 和 Th 含量明显高于浸洗溶液, 而普通 Pb 含量明显低于浸洗溶液, 从  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值可知, 浸洗溶液中的 Pb 以普通 Pb 为主。对浸洗前后矿物组成的研究表明, 浸洗后主要残余矿物是辉石, 其中通常含有较高的放射成因 Pb 同位素组分。

由于浸洗溶液中普通 Pb 成分较高, 浸洗后的残渣中放射成因 Pb 较高, 因此取残渣的 Pb 同位素数据构建等时线, 给出等时线年龄为  $(4\,566.9 \pm 5.8) \text{ Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 26$  (图 1); 同时, 6 个  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值大于 100 的残渣 (Chon2—Chon7) 给出平均  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  模式年龄为  $(4\,562.2 \pm 2.6) \text{ Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 11.8$  (图 2)。尽管模式年龄和等时线年龄在误差范围内完全一致, 考虑到实验中可能存在的未完全溶解、选择性浸洗和初始普通 Pb 值的估计的准确性以及衰变常数误差等 [5], 本文将主要依据等时线年龄进行讨论。

如前所述, 在陨石的年代学研究中常用的测定体系包括短半衰期体系和长半衰期体系。受体系本身特点的限制, 短半衰期体系只能给出相对年龄 [5], 常用于球粒和 CAIs 的形成时间对比 [6, 16], 但给出的年龄结果精度较高。而长半衰期体系则可以给出陨石球粒和 CAIs 形成的绝对年龄, 但年龄精度受到一定限制。Amelin *et al.* [5] 获得的陨石球粒和 CAIs 的 Pb-Pb 年龄分别为  $(4\,564.7 \pm 0.6) \text{ Ma}$  和  $(4\,567.2 \pm 0.6) \text{ Ma}$ , 是目前为止所能获得的精度最好的年龄, 其他体系的年龄精度虽比以前有所改进,

表 1 陨石球粒样品称样量

Table 1 The samples of chondrules for analysis

| 样号    | 样品特征     | 称样量 (mg) |
|-------|----------|----------|
| Chon1 | 球粒碎片     | 10.43    |
| Chon2 | 球粒碎片     | 3.75     |
| Chon3 | 球粒碎片     | 4.83     |
| Chon4 | 单个球粒     | 1.66     |
| Chon5 | 单个球粒     | 2.06     |
| Chon6 | 球粒碎片     | 3.67     |
| Chon7 | 陨石中无磁性部分 | 23.57    |

表 2 Semarkona 陨石球粒的化学浸洗流程

Table 2 Leaching procedures of Semarkona chondrules

| 步骤               | 浸洗溶液   | 处理                      | 时间 (min) |
|------------------|--|-------------------------|----------|
| 两步浸洗法            |  |                         |          |
| 浸洗 1<br>(Wash 1) | 7 mol/L $\text{HNO}_3$                                 | 加热 120 $^\circ\text{C}$ | 60       |
|                  | $\text{H}_2\text{O}$                                   |                         | 15       |
|                  | 6 mol/L $\text{HCl}$ + 9 mol/L $\text{HBr}$            | 加热 120 $^\circ\text{C}$ | 60       |
| 浸洗 2<br>(Wash 2) | 1 mol/L $\text{HBr}$                                   | 超声振荡                    | 30       |
|                  | 1 mol/L $\text{HBr}$                                   | 超声振荡                    | 15       |
|                  | 0.05 mol/L $\text{HNO}_3$ +<br>0.03 mol/L $\text{HBr}$ | 超声振荡                    | 15       |
| 残渣 (Res.)        | 14 mol/L $\text{HNO}_3$ + 29 mol/L $\text{HF}$         | 加热 120 $^\circ\text{C}$ | 2 d      |
| 四步浸洗法            |  |                         |          |
| 浸洗 1<br>(Wash 1) | 2 mol/L $\text{HCl}$ + 丙酮                              | 室温                      | 1 d      |
|                  | $\text{H}_2\text{O}$                                   | 室温                      | 1 d      |
| 浸洗 2<br>(Wash 2) | 1 mol/L $\text{HBr}$                                   | 超声振荡                    | 30       |
|                  | $\text{H}_2\text{O}$                                   |                         |          |
| 浸洗 3<br>(Wash 3) | 9 mol/L $\text{HBr}$                                   | 加热 100 $^\circ\text{C}$ | 1 d      |
|                  | $\text{H}_2\text{O}$                                   |                         |          |
| 浸洗 4<br>(Wash 4) | 14 mol/L $\text{HNO}_3$                                | 加热 100 $^\circ\text{C}$ | 1 d      |
|                  | $\text{H}_2\text{O}$                                   |                         |          |
| 残渣 (Res.)        | 29 mol/L $\text{HF}$ + 14 mol/L $\text{HNO}_3$         | 加热 120 $^\circ\text{C}$ | 直至完全溶解   |

表 3 Semarkona 陨石球粒的 U-Th-Pb 同位素数据和模式年龄

Table 3 U-Th-Pb data of chondrules of Semarkona and model ages

| Sample                  | U<br>(pg) | err (%) | Th<br>(pg) | err (%) | Pb<br>(pg) | err (%) | Comm. Pb<br>(pg) | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ (3) | err (%) | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$ (4) | err (%) | $^{238}\text{U}/^{235}\text{Pb}$<br>(μ 值) | $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$<br>Age (Ma) | err<br>(Ma) |
|-------------------------|-----------|---------|------------|---------|------------|---------|------------------|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|---|---|-------------|
| Chon1 <sup>(1)</sup>    |           |         |            |         | 469.1      | 0.33    | 216.2            | 32.575 2                              | 0.22    | 0.752 66                              | 0.08    |   |   |             |
| Chon2 <sup>(1)</sup>    | 28.24     | 0.24    | 98.82      | 0.42    | 90.79      | 0.45    | 16.03            | 101.739                               | 0.42    | 0.667 98                              | 0.08    | 76.25                                     | 4 564.6   | 1.5         |
| chon2 W1 <sup>(2)</sup> | 19.36     | 0.23    | 50.55      | 0.45    | 223.2      | 0.18    | 171.4            | 16.871 0                              | 0.11    | 0.831 35                              | 0.06    | 4.89                                      | 4 221.5   | 4.3         |
| Chon2 W2 <sup>(2)</sup> | 99.93     | 0.43    | 23.69      | 1.07    | 317.2      | 1.27    | 220.6            | 17.992 1                              | 0.96    | 0.868 56                              | 0.55    | 19.61                                     | 4 542   | 26          |
| Chon3 <sup>(1)</sup>    | 45.58     | 0.22    | 164.9      | 0.42    | 124.4      | 0.66    | 12.22            | 189.972                               | 0.43    | 0.645 33                              | 0.08    | 161.52                                    | 4 559.3   | 1.2         |
| Chon3 W1 <sup>(2)</sup> | 12.10     | 0.24    | 31.77      | 0.51    | 362.5      | 0.25    | 259.0            | 17.449 3                              | 0.18    | 0.868 58                              | 0.09    | 2.02                                      | 4 501.1   | 4.7         |
| Chon3 W2 <sup>(2)</sup> | 2.31      | 0.31    | 3.81       | 0.83    | 307.5      | 0.42    | 224.5            | 16.736 0                              | 0.29    | 0.897 34                              | 0.06    | 0.45                                      | 4 592.2   | 4.6         |
| Chon4 <sup>(1)</sup>    | 16.42     | 0.22    | 58.74      | 0.41    | 40.20      | 0.57    | 3.30             | 229.485                               | 0.55    | 0.643 32                              | 0.08    | 215.42                                    | 4 564.4   | 1.3         |
| Chon4 W1 <sup>(2)</sup> | 2.64      | 0.30    | 6.32       | 3.53    | 69.48      | 0.73    | 49.60            | 17.837 9                              | 0.70    | 0.844 85                              | 0.62    | 2.30                                      | 4 407   | 31          |
| Chon4 W2 <sup>(2)</sup> | 4.71      | 0.67    | 1.95       | 2.11    | 4.63       | 0.29    | 3.14             | 18.837 4                              | 0.25    | 0.845 64                              | 0.10    | 65.00                                     | 4 486.8   | 5.1         |
| Chon 5 <sup>(1)</sup>   | 17.26     | 0.23    | 52.08      | 0.43    | 38.44      | 0.49    | 3.70             | 201.136                               | 0.46    | 0.644 55                              | 0.09    | 202.13                                    | 4 560.6   | 1.4         |
| Chon5 W1 <sup>(2)</sup> | 4.32      | 0.49    | 2.94       | 0.93    | 61.12      | 0.21    | 42.06            | 19.241 2                              | 0.14    | 0.812 40                              | 0.07    | 4.45                                      | 4 346.9   | 3.6         |
| Chon5 W2 <sup>(2)</sup> | 2.57      | 0.73    | 1.95       | 2.10    | 20.91      | 0.23    | 14.16            | 19.053 4                              | 0.18    | 0.828 49                              | 0.10    | 7.85                                      | 4 416.4   | 4.8         |
| Chon6 <sup>(1)</sup>    | 12.38     | 3.58    | 62.12      | 1.17    | 57.28      | 16.9    | 6.33             | 166.966                               | 16.8    | 0.648 56                              | 0.60    | 84.65                                     | 4 559.2   | 2.4         |
| Chon6 W2 <sup>(2)</sup> | 0.37      | 118.0   | 4.78       | 1.91    | 86.17      | 2.07    | 59.74            | 18.149 1                              | 0.25    | 0.857 21                              | 0.12    | 0.27                                      | 4 496.5   | 5.7         |
| Chon7 <sup>(1)</sup>    | 117.7     | 0.50    | 839.1      | 1.07    | 376.8      | 2.23    | 47.72            | 145.314                               | 2.20    | 0.654 42                              | 0.13    | 106.81                                    | 4 563.8   | 1.5         |
| Chon7 W1 <sup>(2)</sup> | 98.13     | 0.55    | 293.1      | 0.38    | 3 580      | 0.36    | 2 763            | 15.167 5                              | 0.16    | 0.909 47                              | 0.08    | 1.54                                      | 4 501.4   | 5.6         |
| Chon7 W2 <sup>(2)</sup> | 0.17      | 256.0   | 4.24       | 1.09    | 5.46       | 32.5    | 3.75             | 18.235 6                              | 1.46    | 0.866 56                              | 1.55    | 1.99                                      | 4 548   | 56          |
| Chon7 W3 <sup>(2)</sup> | 53.91     | 0.88    | 156.6      | 0.38    | 396.0      | 0.71    | 247.6            | 20.918 5                              | 0.51    | 0.814 49                              | 0.08    | 9.43                                      | 4 460.7   | 6.2         |
| Chon7 W4 <sup>(2)</sup> | 4.40      | 10.00   | 15.27      | 0.38    | 36.47      | 4.58    | 21.60            | 23.202 0                              | 1.15    | 0.813 37                              | 0.16    | 8.82                                      | 4 549.3   | 6.8         |

注: (1) 浸洗后的残渣; (2) W1—W4 分步浸洗溶液; (3) 对分馏、稀释剂和空白进行校正; (4) 对分馏、稀释剂、空白和初始 Pb 进行校正; (5) 年龄计算使用的初始 Pb 同位素组成见文献[8]。

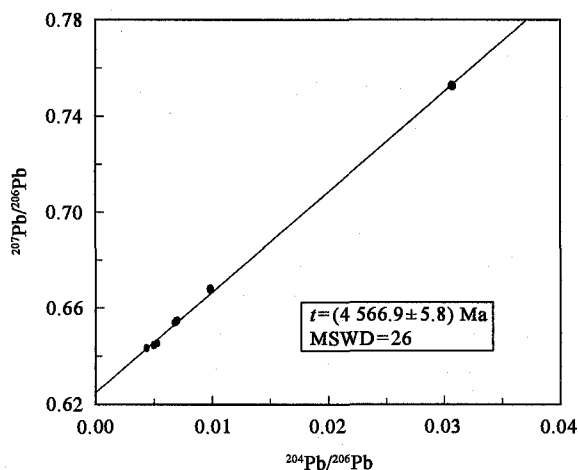


图 1 Semarkona 陨石球粒浸洗后残渣的 Pb-Pb 等时线  
Fig. 1 Pb-Pb isochron of the residues of Semarkona chondrules after leaching

但仍比短半衰期体系和 Pb-Pb 法年龄有较大差距, 如 Amelin *et al.* 用 Sm-Nd 法测定 6 个普通陨石和 1 个球粒陨石的微克级磷酸盐矿物和球粒, 获得等时线年龄为  $(4\,588 \pm 100)$  Ma<sup>[17]</sup>, 精度差于已获得的 Pb-Pb 法年龄。因此, 在目前的分析测试水平上, Pb-Pb 法是可选择的能获得高精度绝对年龄的可靠方法。

迄今为止, 有关 Semarkona 陨石球粒形成年龄的数据报道很少, Swindle *et al.* 用 K-Ar 法给出单个陨石球粒年龄, 范围为  $4\,200 \sim 4\,700$  Ma<sup>[16]</sup>; 他们根据 I-Xe 体系(半衰期为 15.7 Ma)年龄认为 Semarkona 陨石的球粒形成时间有  $\geq 10$  Ma 的跨度范围。Kita *et al.* 用 SIMS 技术测定陨石球粒的  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  体系, 根据获得结果, 他们认为球粒的形成时间范围小于 1 Ma, 但比 CAIs 的形成时间要晚约 2 Ma<sup>[18]</sup>。

上述数据均未能给出可靠的陨石球粒的形成年龄, 本文中获得的 Pb-Pb 法年龄  $(4\,566.9 \pm 5.8)$  Ma 是否能代表球粒的形成年龄呢? Swindle *et al.* 根据 Semarkona 陨石球粒的 I-Xe 体系测定结果认为, 陨石球粒形成后曾经历水岩蚀变 (aqueous alteration), 改变了  $^{129}\text{I}^*/^{127}\text{I}$  比值, 导致年龄变化<sup>[16]</sup>。对 Pb 同位素而言, 目前 LL 型陨石水岩蚀变温度没有可靠的数据, 只能参照 CR 型陨石的资料, Amelin *et al.*<sup>[5]</sup> 认为 CR 型球粒陨石的水岩蚀变温度不会超过  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[19-21]</sup>, 在此温度下, 陨石球粒中放射成因 Pb 赋存的主要矿物辉石 (另文发表) 中 Pb 的扩散将会很慢, 因此 Pb 同位素体系重置的可能性很小。Rubin *et al.*<sup>[22]</sup> 认为陨石球粒的形成是太阳星云闪光加热 (flash heating) 的结果<sup>[23]</sup>, Semarkona 陨石球

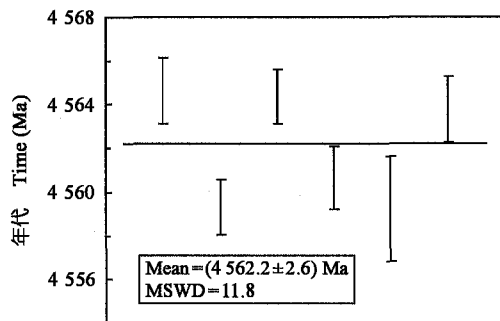


图 2 Semarkona 陨石球粒浸洗后残渣的平均  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  模式年龄

Fig. 2 Weighted average  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  model age of the residues of Semarkona chondrules after leaching

粒中保存的大多数陨硫铁 (FeS) 是原生的矿物, 对这些硫化物的研究表明陨石母体并未经明显的热变质过程。其他研究资料也表明 Semarkona 陨石是最不平衡的陨石, 属于所有陨石类型中受后期变质影响最小的类型, 其峰期变质温度为 770 K。Amelin *et al.*<sup>[24]</sup> 对 H5 型普通球粒陨石 Richardton 中球粒和磷酸盐的 Pb-Pb 法定年结果分别给出  $(4\,562.7 \pm 1.7)$  Ma 和  $(4\,550.7 \pm 2.6)$  Ma 的年龄, 他们认为这些年龄反映了陨石母体经历热变质后 Pb 同位素体系停止扩散时的封闭年龄, 年龄间的差异代表不同矿物相中 Pb 同位素体系封闭温度的差异, 在球粒中, Pb 同位素体系的封闭温度可以达到  $950 \sim 1\,150$  K。这一温度估计值高于 3 型陨石可能经历的峰期变质温度, 因此 Semarkona 陨石球粒形成后, Pb-Pb 同位素体系受后期热变质影响改造的可能性很小。

综上所述, 本文获得的 Semarkona 陨石球粒的 Pb-Pb 法年龄代表球粒形成年龄, 但由于精度影响, 不能清楚给出与 Amelin *et al.*<sup>[5]</sup> 报道的球粒及 CAIs 年龄间的区别, 也不能与 Amelin *et al.*<sup>[24]</sup> 给出的 H5 型陨石的变质年龄分开, 因此, 仍需要更进一步的详细定年工作, 以获得更高精度的年龄。

样品处理和分析测试工作得到加拿大地质调查所地质年代学实验室 Linda Cataldo 和 Nancy Joyce 的帮助; 论文成文过程中得到中国科学技术大学陈江峰教授的指点, 在此表示衷心感谢。同时感激编辑和评审专家提出的宝贵修改意见。

## 参考文献 (References):

- [1] Rubin A E. Petrologic, geochemical and experimental constraints on models of chondrule formation [J]. *Earth-Sci Rev*, 2000, 50(1/2): 3-27.
- [2] Zanda B. Chondrules [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 224(1/2):

- 1-17.
- [3] Mostefaoui S, Kita N T, Togashi S, Tachibana S, Nagahara H, Morishita Y. The relative formation ages of ferromagnesian chondrules inferred from their initial aluminum-26/aluminum-27 ratios [J]. *Meteorit Planet Sci*, 2002, 37(3): 421-438.
  - [4] Russell S S, Srinivasan G, Huss G R, Wasserburg G J, MacPherson G J. Evidence for a widespread  $^{26}\text{Al}$  in the solar nebula and constraints for nebula time scales [J]. *Science*, 1996, 273(5276): 757-762.
  - [5] Amelin Y, Krot A N, Hutcheon I D, Ulyanov A A. Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions [J]. *Science*, 2002, 297(5587): 1 678-1 683.
  - [6] Bizzarro M, Baker J A, Haack H. Mg isotope evidence for contemporaneous formation of chondrules and refractory inclusions [J]. *Nature*, 2004, 431(7006): 275-278.
  - [7] Patterson C. Age of meteorites and the earth [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1956, 10(4): 230-237.
  - [8] Tatsumoto M, Knight R J, Allegre C J. Time differences in the formation of meteorites as determined from the ratio of lead-207 to Lead-206 [J]. *Science*, 1973, 180(4092): 1 279-1 283.
  - [9] Sears D W, Grossman J N, Melcher C L, Ross L M, Mills A A. Measuring the metamorphic history of unequilibrated ordinary chondrites [J]. *Nature*, 1980, 287(5785): 791-795.
  - [10] Brearley A J, Jones R H. Chondritic meteorites [M]//Ribbe P H. *Reviews in Mineralogy* (vol. 36). Washington: The Mineralogical Society of America, 1998: 3-1-3-398.
  - [11] Frei R, Kamber B S. Single mineral Pb-Pb dating [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 129(1/4): 261-268.
  - [12] Frei R, Villa I M, Nögler Th F, Kramers J D, Przybyłowicz W J, Prozesky V M, Hofmann B A, Kamber B S. Single mineral dating by the Pb-Pb step-leaching method: Assessing the mechanisms [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61(2): 393-414.
  - [13] Lugmair G W, Galer S J G. Age and isotopic relationships among the angrites Lewis Cliff 86010 and Angra dos Reis [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56(4): 1 673-1 694.
  - [14] Ludwig K R. Isoplot/Ex Version 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronol Center Spec Publ 1a, 2001: 1-55.
  - [15] Göpel C, Manhès G, Allègre C J. U-Pb systematics in iron meteorites: Uniformity of primordial lead [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1985, 49(8): 1 681-1 695.
  - [16] Swindle T D, Grossman J N, Olinger C T, Garrison D H. Iodine-xenon, chemical, and petrographic studies of Semarkona chondrules: Evidence for the timing of aqueous alteration [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55(12): 3 723-3 734.
  - [17] Amelin Y, Rotenberg E. Sm-Nd systematics of chondrites [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 223(3/4): 267-282.
  - [18] Kita N T, Nagahara H, Togashi S, Morishita Y. A short duration of chondrule formation in the solar nebula: Evidence from  $^{26}\text{Al}$  in Semarkona ferromagnesian chondrules [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(22): 3 913-3 922.
  - [19] Zolensky M E. Mineralogy and matrix composition of "CR" chondrites Renazzo and EET 87770, and ungrouped chondrites Essebi and MAC 87300 (abstract) [J]. *Meteoritics*, 1991, 26: 414.
  - [20] Weisberg M K, Prinz M, Clayton R N, Mayeda T K. The CR (Renazzo-type) carbonaceous chondrite group and its implications [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1993, 57(7): 1 567-1 586.
  - [21] Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope studies of carbonaceous chondrites [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(13/14): 2 089-2 104.
  - [22] Rubin A E, Sailer A L, Wasson J T. Troilite in the chondrules of type-3 ordinary chondrites: Implications for chondrule formation [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(15): 2 281-2 298.
  - [23] Boss A P. A concise guide to chondrule formation models [M]//Hewins R H, Jones R H, Scott E R D. *Chondrules and the Protoplanetary Disk*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 257-263.
  - [24] Amelin Y, Ghosh A, Rotenberg E. Unraveling the evolution of chondrite parent asteroids by precise U-Pb dating and thermal modeling [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69(2): 505-518.