

我国两个南极陨石及光明山和庄河球粒陨石 宇宙射线暴露历史*

王道德** 林杨挺

刘小汉 琚宜太

(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 在岩石矿物学研究的基础上, 测定了我国两个南极陨石、以及光明山和庄河球粒陨石的稀有气体同位素丰度, 并根据宇宙成因核素的产率, 获得了这 4 个普通球粒陨石的宇宙射线暴露年龄和气体保存年龄. 两个南极陨石的暴露年龄分别为 17.0 ± 2.5 Ma (GRV 98002) 和 0.052 ± 0.008 Ma (GRV 98004), 光明山球粒陨石为 68.9 ± 10 Ma, 庄河球粒陨石为 3.8 ± 0.6 Ma. GRV 98004(H5) 的暴露年龄是目前南极陨石中已知最低的, 而光明山球粒陨石的暴露年龄高于我国其他 H 群球粒陨石. GRV 98002 和庄河球粒陨石在宇宙射线暴露期间可能受到冲击事件或由于小的近日距轨道导致加热, 造成低的 ^4He 含量, 而 GRV 98002 和光明山球粒陨石的宇宙成因核素 ^3He 和 ^4He 则基本上同步丢失.

关键词 球粒陨石 稀有气体 宇宙射线暴露年龄

本文主要报道我国两个南极陨石 (GRV 98002 和 GRV 98004)、以及光明山和庄河普通球粒陨石的 ^3He , ^{21}Ne , ^{38}Ar 宇宙射线暴露年龄和 ^4He , ^{40}Ar 气体保存年龄. 其中, GRV 98002 和 GRV 98004 由我国第 15 次南极科考队在格罗夫山地区兰冰上首次发现^[1], 光明山和庄河陨石分别于 1976 年和 1996 年降落在辽宁庄河地区, 两地相距 20 多公里^[2]. 这 4 个普通球粒陨石的岩石化学分类及其主要分类参数列于表 1. 陨石全岩 He, Ne 及 Ar 的同位素分析是在瑞士伯尔尼大学物理研究所完成的, 样品制备和分析流程请参阅有关文献^[3~7].

表 1 GRV 98002, GRV 98004, 光明山及庄河普通球粒陨石的主要分类参数

陨石名称	Fa/mol%	Fs/mol%	Wo/mol%	An/mol%	铁纹石的钴含量 /%	文献
GRV 98002 (L5)	25.1	21.1	1.8			[8]
GRV 98004 (H5)	18.6	16.6	1.3			[8]
光明山 (H5)	19.5 (n=89) 18.5—21.6	17.3 (n=30) 16.4—18.7	1.2	12.1 (n=27) 10.2—13.5	0.39—0.55	[2]
庄河 (H5)	19.7 (n=38) 18.3—20.7	17.3 (n=28) 15.7—18.6	1.2	11.7 (n=21) 10.8—12.5	0.40—0.65	[2]

注: n 为测定的矿物颗粒数, 斜体为参数范围

2002-03-15 收稿, 2002-06-18 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40025311)及中国科学院知识创新工程资助项目(编号: KZCX2-303-4)

** E-mail: gzwangdd@public.guangzhou.gd.cn

1 宇宙射线暴露年龄计算

分析测定陨石中宇宙射线辐照产生的核素,其主要目的之一是计算其宇宙射线暴露年龄,计算式为:

$$T_s = C^s/P^s, \quad (1)$$

T_s 为陨石的宇宙射线暴露年龄(Ma), C^s 为稳定宇宙成因核素(^3He , ^{21}Ne , ^{38}Ar)的浓度($10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$), P^s 为稳定宇宙成因核素(^3He , ^{21}Ne , ^{38}Ar)的产率($10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g} \cdot \text{Ma}$). 根据稀有气体的分析结果及一些经验的同位素比值可分别计算出宇宙成因核素(c)、捕获成因核素(tr)及放射性成因核素(r)的浓度,计算所采用的同位素比值列于表 2.

表 2 计算宇宙成因核素(c)、捕获成因核素(tr)及放射性成因核素(r)浓度所采用的同位素比值^{a)}

	$(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{tr}}$	$(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{tr}}$	$(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{c}}$
$(^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar})_{\text{tr}} < 1$	8.46	0.035	0.8
$(^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar})_{\text{tr}} > 1$	12.4	0.0310	0.8
地球 Ne ^{b)}	9.80	0.0290	0.8

a) $^3\text{He}_{\text{tr}}=0$; $^4\text{He}_{\text{tr}}=0$; $(^4\text{He}/^3\text{He})_{\text{c}}=5$; $(^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_{\text{c}}=0.65$ 或 0.63 ; $(^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_{\text{tr}}=5.32$; $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{c}}=0.2$; $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{tr}}=2.9 \times 10^{-4}$; b) 由于捕获的 Ne 丰度低,许多陨石的 $(^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar})_{\text{tr}}$ 值是近似的,在此情况下, $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_{\text{c}}$ 值对选择捕获的 Ne 组分是不灵敏的

同时, $^{22}\text{Ne}_{\text{c}}$, $^{21}\text{Ne}_{\text{c}}$, $^{20}\text{Ne}_{\text{tr}}$ 可由下式分别求出¹⁾:

$$^{22}\text{Ne}_{\text{c}} = ^{22}\text{Ne}_{\text{m}} \times [1 - (^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{m}} / (^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{tr}}] / [1 - (^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{c}} / (^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{tr}}], \quad (2)$$

$$^{21}\text{Ne}_{\text{c}} = ^{21}\text{Ne}_{\text{m}} - (^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{tr}} [^{22}\text{Ne}_{\text{m}} - ^{22}\text{Ne}_{\text{c}}], \quad (3)$$

$$^{20}\text{Ne}_{\text{tr}} = ^{20}\text{Ne}_{\text{m}} - ^{22}\text{Ne}_{\text{c}} (^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{c}}, \quad (4)$$

计算式中 m 为 He, Ne, Ar 同位素及其比值的测定值. 根据 $(^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar})_{\text{tr}} < 1$, $(^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar})_{\text{tr}} > 1$ 和地球 Ne, 将表 2 的相应比值分别代入(2), (3), (4)式可获得不同的 $^{22}\text{Ne}_{\text{c}}$, $^{21}\text{Ne}_{\text{c}}$ 和 $^{20}\text{Ne}_{\text{tr}}$ 值. $^{38}\text{Ar}_{\text{c}}$ 和 $^{36}\text{Ar}_{\text{tr}}$ 的计算式为:

$$\text{当 } (^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_{\text{c}} = 0.65, \quad ^{38}\text{Ar}_{\text{c}} = ^{38}\text{Ar}_{\text{m}} [1.1392 - 0.2141(^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_{\text{m}}]; \quad ^{36}\text{Ar}_{\text{tr}} = 0.65 \times ^{38}\text{Ar}_{\text{c}},$$

$$\text{当 } (^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_{\text{c}} = 0.63, \quad ^{38}\text{Ar}_{\text{c}} = ^{38}\text{Ar}_{\text{m}} [1.1343 - 0.2132(^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_{\text{m}}]; \quad ^{36}\text{Ar}_{\text{tr}} = 0.63 \times ^{38}\text{Ar}_{\text{c}},$$

为确定宇宙射线暴露年龄,除上述宇宙成因核素的浓度外,还必须计算 ^3He , ^{21}Ne 和 ^{38}Ar 的产率. 由于不同化学群 (H,L,LL) 球粒陨石中产生宇宙成因核素的靶元素含量变化,需要引入化学组成校正因子(F). 宇宙成因核素的产率(分别用 p^3 , p^{21} 和 p^{38} 表示)是屏蔽参数 $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_{\text{c}}$ 的函数,其计算式分别为^[3]:

$$P^3 = F[2.09 - 0.43(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_{\text{c}}], \quad F_{\text{H}} = 0.98; \quad F_{\text{L,LL}} = 1.00,$$

$$P^{21} = 1.61F[21.77(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_{\text{c}} - 19.32]^{-1}, \quad F_{\text{H}} = 0.93; \quad F_{\text{L,LL}} = 1.00,$$

$$P^{38} = F[0.125 - 0.071(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_{\text{c}}], \quad F_{\text{H}} = 1.08; \quad F_{\text{L,LL}} = 1.00,$$

^4He 和 ^{40}Ar 气体保存年龄的计算式分别为:

$$T_4 = ^4\text{He}_{\text{r}} / 75200 [^{238}\text{U}](e^{0.155[t]} - 1) + 474 [^{235}\text{U}](e^{0.985[t]} - 1) + 56400 [^{232}\text{Th}](e^{0.0492[t]} - 1), \quad (5)$$

$$T_{40} = 1.805 \ln [^{40}\text{Ar}_{\text{r}} / 0.701 \times K + 1], \quad (6)$$

式中 $t = T_4$; K, ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th 为陨石全岩的平均含量($\mu\text{g/g}$ 或 $\times 10^{-6}$); 放射性成因 $^4\text{He}_{\text{r}}$ 和 $^{40}\text{Ar}_{\text{r}}$ 为测定值($10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$). H 球粒陨石: K 782×10^{-6} , Th 0.04×10^{-6} , U 0.013×10^{-6} ; L 球粒陨石: K 858×10^{-6} , Th 0.042×10^{-6} , U 0.015×10^{-6} .

1) Eugster, 2001, 个人通信

2 结果及讨论

He, Ne, Ar 同位素丰度及其比值的分析结果列于表 3, 计算的宇宙成因、捕获及放射性成因稀有气体的浓度($10^{-8}\text{cm}^3\text{STP/g}$)列于表 4. 表 5 为计算的宇宙成因核素 ^3He , ^{21}Ne 及 ^{38}Ar 的产率、宇宙射线暴露年龄及 $^4\text{He}(T_4)$ 和 $^{40}\text{Ar}(T_{40})$ 气体保存年龄.

表 3 球粒陨石 He, Ne 和 Ar 的测定结果($10^{-8}\text{cm}^3\text{STP} \cdot \text{g}^{-1}$)

陨石名称	^4He	^{20}Ne	^{40}Ar	$\frac{^4\text{He}}{^3\text{He}}$	$\frac{^{20}\text{Ne}}{^{22}\text{Ne}}$	$\frac{^{22}\text{Ne}}{^{21}\text{Ne}}$	$\frac{^{36}\text{Ar}}{^{38}\text{Ar}}$	$\frac{^{40}\text{Ar}}{^{36}\text{Ar}}$
GRV 98002 (L5)	670 ± 20	8.42 ± 0.30	6970 ± 200	26.1 ± 0.3	0.883 ± 0.010	1.047 ± 0.010	2.42 ± 0.03	2336 ± 70
GRV 98004 (H5)	1390 ± 50	0.401 ± 0.040	6170 ± 200	17715 ± 700	6.44 ± 0.99	3.31 ± 0.40	4.90 ± 0.20	5723 ± 200
光明山(H5)	1770 ± 50	21.3 ± 0.6	5150 ± 160	17.12 ± 0.17	0.863 ± 0.009	1.131 ± 0.012	0.928 ± 0.011	1652 ± 40
庄河 (H5)	374 ± 10	1.79 ± 0.05	4600 ± 150	75.9 ± 1.0	0.913 ± 0.030	1.016 ± 0.015	3.64 ± 0.10	2258 ± 100

表 4 宇宙成因、捕获和放射性成因稀有气体($10^{-8}\text{cm}^3\text{STP} \cdot \text{g}^{-1}$)

陨石名称	^3He	^{21}Ne	^{38}Ar	$^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$	^{20}Ne	^{36}Ar	^4He	^{40}Ar
	宇宙成因核素			捕获的核素		放射性成因核素		
GRV 98002 (L5)	25.7 ± 1.0	9.11 ± 0.40	0.765 ± 0.030	1.037 ± 0.010	0.87 ± 0.40	2.48 ± 0.20	536 ± 20	6970 ± 200
GRV 98004 (H5)	0.078 ± 0.005	0.0172 ± 0.0035	0.0198 ± 0.0100		0.388 ± 0.040	1.07 ± 0.06	1390 ± 50	6170 ± 200
光明山 (H5)	103.4 ± 3.0	21.8 ± 0.9	3.16 ± 0.15	1.125 ± 0.012	1.72 ± 0.60	1.07 ± 0.05	1230 ± 50	5150 ± 200
庄河 (H5)	4.93 ± 0.20	1.93 ± 0.10	0.202 ± 0.020	1.00 ± 0.02	0.24 ± 0.10	1.91 ± 0.10	348 ± 10	4600 ± 150

表 5 产率、宇宙射线暴露年龄(Ma)及气体保存年龄(Ga)

陨石名称	P_3	P_{21}	P_{38}	T_3	T_{21}	T_{38}	$T_{\text{pref.}}$	T_4	T_{40}	T_3/T_{21}	T_4/T_{40}
GRV 98002 (L5) ^{a)}	1.639	0.455	0.0504	15.7	20.0	15.2	17.0 ± 2.5	1.6 ± 0.1	4.63 ± 0.16	0.79	0.35
GRV 98004 (H5) [#]	1.580	0.309	0.0499	0.049	0.056	(0.40)	0.052 ± 0.008	3.6 ± 0.8	4.53 ± 0.15	0.88	0.80
光明山 (H5)	1.574	0.290	0.0487	65.7	75.2	65.9	68.9 ± 10	3.3 ± 0.7	4.23 ± 0.15	0.87	0.78
庄河 (H5)	1.606	0.423	0.0545	3.07	4.56	3.71	3.8 ± 0.6	1.1 ± 0.1	4.05 ± 0.15	0.67	0.27

a) ($^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$)_c=1.05; # ($^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$)_c=1.11

图 1 给出了 H 和 L 群球粒陨石的宇宙射线暴露年龄分布, GRV 98002(17 Ma)和庄河球粒陨石(3.8 Ma)分别落在相应化学群球粒陨石暴露年龄的范围内. GRV 98004 的暴露年龄仅为 0.052 Ma, 是目前南极陨石中最低的, 预计其居地年龄也非常小. Polnau 等^[10]除测定了南极 H6 型球粒陨石(ALH 76008)的宇宙射线暴露年龄(1.72 ± 0.11 Ma)外, 还分别测定了球粒和基质的暴露年龄, 结果表明, 球粒的 ^3He , ^{21}Ne , ^{38}Ar 年龄分别比全岩超过 31%, 67%和 55%. 根据其产率转化为吸积前的暴露时间为 0.9 Ma, 比全岩的宇宙射线暴露年龄长 $50 \pm 20\%$, 说明在星云环境下, 球粒在吸积进入母体之前就已被辐照, 首次证明球粒与球粒陨石全岩之间具有不同的辐照历史. 由于 GRV 98004 球粒陨石具有非常短的暴露年龄, 更有利于发现和研究球粒陨石全岩与球粒之间不同的暴露历史, 有关这项工作正在计划之中. 光明山球粒陨石的暴露年龄为 68.9 Ma, 落在 H 群球粒陨石的高端, 并且是我国已知暴露年龄最大的 H 群球粒陨石.

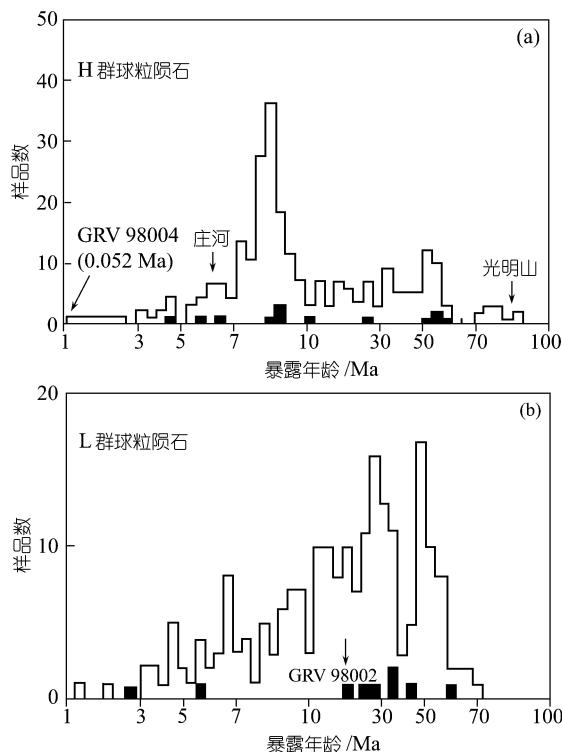


图 1 H(a)和 L(b)群球粒陨石的宇宙射线暴露年龄分布

图中用黑色充填的部分为我国 H 和 L 群球粒陨石的宇宙射线暴露年龄分布, 柱状图轮廓代表了国外 H 和 L 球粒陨石宇宙射线暴露年龄的分布特征^[9]

图 2 主要是根据我国不同类型球粒陨石宇宙射线暴露年龄及气体保存年龄的测定结果绘制的. 由于 ^4He 比 ^{40}Ar 更易丢失, ^4He 气体保存年龄(T_4)一般都低于 ^{40}Ar 气体保存年龄(T_{40}). 根据(5)和(6)式计算的 T_4 及 T_{40} 年龄见表 5. GRV 98002(L5)和 GRV 98004(H5)的 T_{40} 气体保存年龄分别为 4630 Ma 和 4530 Ma, 与球粒陨石的形成年龄相近, 表明其自形成以来保存了所有的 ^{40}Ar . 在 $T_3/T_{21} \sim T_4/T_{40}$ 的坐标图(图 2)上显示 2 种主要类型的球粒陨石, 第一类在宇宙射线暴露期间, 可能由于太阳加热或碰撞事件导致 $^3\text{He}_c$ 和 $^4\text{He}_r$ 同步丢失, 它们沿斜率为 1 的虚线分布; 第二类球粒陨石在暴露于宇宙射线之前, 即从其母体溅射之前或溅射时, 仅发生 $^4\text{He}_r$ 丢失, 但在 $\pm 15\%$ 的误差范围内, T_3 与 T_{21} 是一致的, 它们在图 2 中沿斜率为零的 2 条平行的虚线之间分布. 除这 2 种陨石类型外, 有部分球粒陨石在宇宙射线辐照开始之后丢失 He, 如启东球粒陨石(QD). GRV 98002 和庄河球粒陨石的 $T_3/T_{21} < 0.85$, 属第一类陨石, 它们在其宇宙射线暴露年龄期间受到冲击事件或因小的近日距轨道导

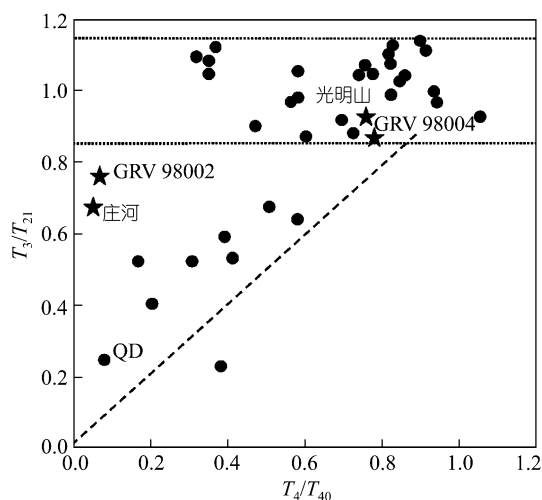


图 2 宇宙射线暴露年龄 T_3/T_{21} 值与气体保存年龄 T_4/T_{40} 值的关系
其他球粒陨石的数据引自文献[4, 11]

致太阳加热, 造成 $^4\text{He}_r$ 丢失, 故 T_4/T_{40} 值较低; GRV 98004 和光明山球粒陨石的 $T_3/T_{21} > 0.85$, $^3\text{He}_c$ 和 $^4\text{He}_r$ 近于同步丢失. 综上所述, 根据 T_3/T_{21} 值与 T_4/T_{40} 值的关系, 可划分 3 类球粒陨石, 即: (1) $T_3=T_{21}$, $T_4=T_{40}$; (2) $T_3 < T_{21}$, $T_4 < T_{40}$; (3) $T_3=T_{21}$, $T_4 < T_{40}$. 此外, 球粒陨石一般都显不同程度的冲击变质作用^[12,13], 并导致稀有气体不同程度的丢失.

致谢 瑞士伯尔尼大学物理研究所 Eugster 教授和他领导的实验室协助进行了稀有气体分析, 大连市博物馆刘金远提供了光明山和庄河球粒陨石样品, 在此特表示深切谢意.

参 考 文 献

- 1 琚宜太, 刘小汉. 格罗夫山地区陨石回收. 极地研究, 2000, 12(2): 137~141
- 2 林杨挺, 王道德, 刘金远, 等. 庄河、光明山球粒陨石的矿物岩石学研究. 空间科学学报, 2001, 21(1): 36~41
- 3 Eugster O. Cosmic-ray production rates for ^2He , ^{21}Ne , ^{38}Ar , ^{83}Kr , and ^{126}Xe in chondrites based on ^{81}Kr -Kr Exposure ages. *Geochim Cosmochim Acta*, 1988, 52(6): 1649~1662
- 4 王道德, 易惟熙, Eugster O. 我国球粒陨石稀有气体的研究. 地球化学, 1992, (4): 313~333
- 5 王道德, 陈永亨, 李肇辉, 等. 中国陨石导论. 北京: 科学出版社, 1993. 1~505
- 6 王道德, 王瑞田. 郛城球粒陨石的稀有气体及宇宙射线暴露年龄. 科学通报, 1999, 44(1): 82~83
- 7 王道德, 林杨挺, 刘金远. 光明山球粒陨石宇宙射线暴露年龄及气体保存年龄. 科学通报, 2001, 46(10): 854~856
- 8 Grossman J N. The Meteoritical Bulletin, No. 2000 August. *Meteorit Planet Sci*, 2000, 35(Suppl): A206
- 9 Marti K, Graf T. Cosmic ray exposure history of ordinary chondrites. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1992, 20: 221~243
- 10 Polnau E, Eugster O, Krahenbuhl U, et al. Evidence for a precompaction exposure to cosmic rays in a chondrule from the H6 chondrite ALH76008. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(6): 925~933
- 11 Eugster O, Michel Th, Nidermann S, et al. The record of cosmogenic, radiogenic, fissiogenic, and trapped noble gases in recently recovered Chinese and other chondrites. *Geochim Cosmochim Acta*, 1993, 57(6): 1115~1142
- 12 陈鸣, 谢先德, El Goresy A, 等. 球粒陨石冲击脉体冷却速度率对 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_2$ 多形转变的制约. 中国科学, D 辑, 1998, 28(3): 310~315
- 13 谢先德, 陈鸣, 戴诚达, 等. 球粒陨石天然和实验冲击特征对小行星冲击事件 P - T 条件的启示. 中国科学, D 辑, 2000, 30: 123~127