

吉林陨石的形成和演化过程

欧阳自远

(中国科学院地球化学研究所)

摘 要

在对吉林陨石进行多学科综合研究所取得的成果基础上,我们对吉林陨石的形成演化过程作了如下讨论:(1)太阳星云的凝聚过程:根据吉林陨石的凝聚和固化年龄和矿物的组合,探讨了太阳星云凝聚的过程;(2)吉林陨石母体的热变质过程:从稀有气体的丢失,全岩化学成分的特征,稀土元素的自纯化过程和橄榄石、斜方辉石成分的稳定性,讨论了热变质过程的特征;(3)吉林陨石母体的冷却过程:根据镍纹石的镍含量和宽度,还根据矿物中 Ar 和裂变径迹的保存性,分析了吉林陨石母体的冷却史;(4)吉林陨石母体的破碎和宇宙线照射历史:根据对宇宙成因 He^3 、 $\text{Ne}^{20,21,22}$ 、 Ar^{38} 、 Na^{22} 、 Al^{26} 、 Mn^{54} 、 Mn^{53} 和 Co^{60} 的测定结果,提出了吉林陨石的两阶段照射历史的模式。第一阶段的吉林陨石母体,年龄 10—11my, $r = 10\text{m}$,确定了各样品在母体中的相对位置;第二阶段的吉林陨石母体,年龄 0.3—0.5my, $r = 80—90\text{cm}$,确定了各样品的埋藏深度及通过大气层后的烧失量;(5)吉林陨石的降落过程:讨论了吉林陨石在太阳系空间和大气层中的轨道及降落过程。

引 言

1976 年在我国吉林市北郊降落了一场世界最大规模的石陨石雨以后^[1],各学科的科技工作者,对吉林陨石的矿物组成、化学成分、微量元素分布、有机质的成分与存在状态、结构与构造、陨石的凝聚年龄与固化年龄、径迹年龄与宇宙暴露年龄、物理力学性质、太阳系空间和大气层中的轨道、陨落过程的力学特性等进行了综合研究,发表有近百篇论文。14 个国家近 30 个实验室的有关学者也对吉林陨石作了较深入的研究,使我们对吉林陨石的凝聚和固化历史、热历史、冷却史、宇宙线辐射历史、降落史都增添了一些新的认识^[2,3]。在全世界已收集到的两千多次陨石中,除 1969 年降落在墨西哥的阿连德 (Allende) 碳质球粒陨石外,要以对吉林陨石所进行的研究工作最为系统,提供了太阳系的化学演化许多有价值的论证。

一、吉林陨石的凝聚过程

对吉林 4 号陨石 9 个全岩、球粒和基质样品作了 Rb-Sr 年龄和 Sr 同位素组成的测定,所获得的 $\text{Rb}^{87}/\text{Sr}^{86}$ - $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ 的等时线斜率为 0.0645 ± 0.0012 ,相应的等时线年龄为 (4.50

± 0.08) $\times 10^9$ 年, $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ 的初始比值为 0.7011 ± 0.0008 . 若以 $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ 的 BABI 值 (0.698990 ± 0.00047) 作为太阳系 Sr 同位素演化的参考点, 计算出吉林陨石的 Rb-Sr 模式年龄为 $(4.70 \pm 0.32) \times 10^9$ 年, 表明吉林陨石从太阳星云中分离出来并凝聚是在距今约 47 亿年前, 这和其他 H 群球粒陨石的凝聚年龄是一致的^[4,5]. 吉林陨石的固化年龄——凝聚形成吉林陨石的物质固化并形成了同位素均一化的封闭体系的年龄——为 $(4.50 \pm 0.08) \times 10^9$ 年^[3]. 我国其他实验室测定吉林陨石的固化年龄为 4.46×10^9 年和 $(4.59 \pm 0.34) \times 10^9$ 年^[3], 而 $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204}$ - $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}$ 等时线年龄为 $(4.56 \pm 0.07) \times 10^9$ 年. 吉林陨石的 Rb-Sr 和 Pb-Pb 等时线年龄与其他各类石陨石的年龄近于一致, 表明各种类型的石陨石都是在较短的时期内由同源的太阳星云物质凝聚而成.

我们对吉林陨石全岩及各矿物相作了光、薄片鉴定、X 光衍射和粉晶分析、电子探针分析、离子探针质谱分析、穆斯鲍尔谱分析和矿物包裹体的测温研究^[6,7], 共找到 40 种矿物, 其中 26 种透明矿物, 14 种不透明矿物. 根据吉林陨石的凝聚年龄与固化年龄值计算, 吉林陨石的各矿物相凝聚所经历的时间约为 0.15×10^9 年.

根据均一的太阳星云平衡凝聚模型, 我们可以将太阳星云凝聚形成吉林陨石各矿物相的物理化学环境和各矿物相的生成顺序列于表 1.

表 1 吉林陨石各矿物相的凝聚顺序

(压力为 10^{-3} 大气压)

凝聚温度 (K)	凝 聚 过 程	吉林陨石中的矿物相	备 注
>1600	难熔元素及高温金属凝聚	锆石, 碳硅石, 石墨, 钛铁矿, 尖晶石, 铬铁矿等	
1600—1400	铁镍金属凝聚	铁纹石, 镍纹石等	
1500—1200	钙镁硅酸盐凝聚	辉石, 橄榄石等	包裹体均一法测温为 1320—1470K
1100—1000	碱金属硅酸盐凝聚	斜长石, 钾长石, 白磷钙石等	
1000—570	硫化物凝聚	陨硫铁, 磷铁镍矿, 闪锌矿等	气液相包裹体均一法测温为 775K
570—540	球粒的聚集	凝聚的液滴冷凝固形成球粒, 已凝聚的球粒及尘粒高速碰撞, 冲击重熔冷凝固形成球粒和基质	

吉林陨石具有极其复杂而又多样的球粒结构, 较主要的有斑状橄榄石球粒、炉条状橄榄石——长石球粒和扇形辉石球粒. 球粒在凝聚时具有明显的旋转状、辐射状的特征, 或冲击重叠、冲击破碎和冲击角砾的发育. 球粒变化为 0.2—1.8mm, 平均为 0.8mm. 陨石中的球粒与基质的粒度表明, 太阳星云中凝聚形成的各矿物相的尘粒一般小于 1mm. 小的球粒或尘粒逐渐吸积和聚集成较大的小团块. 当星云的温度冷却到 400K 以下, 大部分含水硅酸盐如透闪石、黑云母、蛇纹石等以及在星云中聚合形成的有机质参与了组成吉林陨石的基质.

二、吉林陨石母体的热变质过程

太阳星云中各矿物相的凝聚, 尘粒的吸积与聚集, 逐渐形成了吉林陨石母体. 根据球粒陨石母体的各种模式^[8,9], 母体的半径一般 $< 100\text{km}$. 陨石母体内的中 ($T_{\frac{1}{2}} = 10^7 - 10^8$

年)和长($T_{\frac{1}{2}} \simeq 10^9$ 年)半衰期放射性同位素衰变产生的能量,将促使母体内部加热,不仅使母体内的稀有气体产生扩散丢失,而且还有可能使母体内的化学成分和矿物成分得以调整或均一化。吉林陨石中的热变质过程具有以下几方面的论据。

(1) **稀有气体的扩散丢失** 根据我国各有关实验室测得的吉林陨石的 Ar^{40} 保留年龄为 $2.37-3.84 \times 10^9$ 年,具有较宽的变化范围^[10]。我们与西德马普协会化学研究所合作,测定吉林陨石中的放射成因 Ar^{40} 和 He^4 , 它们的含量之间大体上呈线性相关,也即有同步的

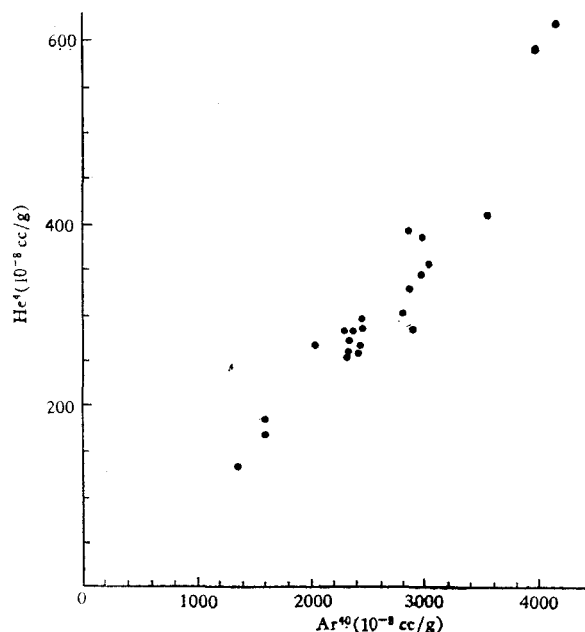


图1 吉林陨石中 He^4 与 Ar^{40} 含量之间的关系

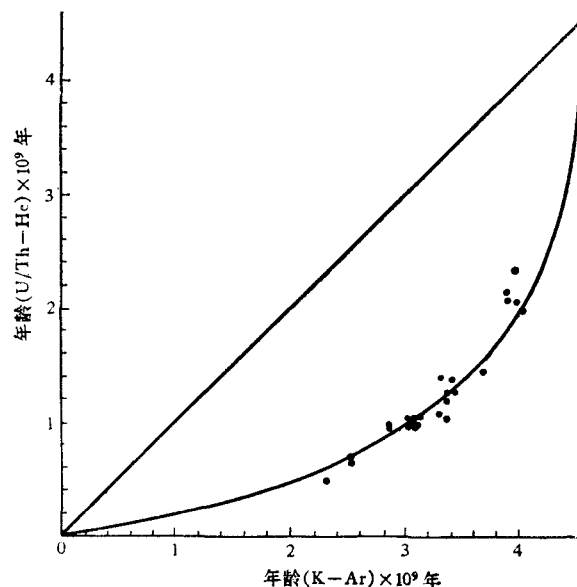


图2 吉林陨石各样品的 U/Th-He 与 K-Ar 年龄

丢失效应(图 1)。根据 H₅ 型球粒陨石中的平均轴、钍和钾的含量为 12ppb、40ppb 和 750 ppm, 计算各样品的表观的 U/Th-He 和 K-Ar 的年龄如图 2 所示。表明吉林陨石具有极其复杂的热历史, 目前还难以建立定量的母体热历史模型。

(2) **化学成分的稳定性** 1979 年以前我国曾对不同部位的吉林陨石样品进行了化学全分析^[6], 相继又对 7 块不同部位的样品作了化学全分析, 再一次证明吉林陨石的化学成分是比较稳定的, 并属于高铁群(H)球粒陨石。

表 2 7 块不同部位的吉林陨石样品的平均化学成分

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
36.84 ±0.70	0.11 ±0.01	2.20 ±0.15	0.49 ±0.02	8.75 ±0.75	0.27 ±0.03	22.72 ±0.61	1.79 ±0.13	0.97 ±0.09	0.12 ±0.01
H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	P ₂ O ₅	Fe ⁰	Ni	Co	Cu	FeS	总计	
0.07 ±0.03	0.17 ±0.16	0.27 ±0.02	18.14 ±0.65	1.69 ±0.14	0.080 ±0.005	0.010 ±0.001	5.36 ±0.29	100.05	

(3) **橄榄石和斜方辉石化学成分的稳定性** 我们对 14 个不同产状的橄榄石作了电子探针分析(表 3), 其 Fa 的变化范围为 17.8—19.5%, 平均值为 18.67%; 单矿物微化分析 Fa 为 18.7%^[6]。我们与西德马普协会核物理所合作, 用电子探针测定了 30 个颗粒的橄榄石成分(表 3), 其 Fa 的变化范围为 18.1—18.7%^[7]。上述结果表明, 吉林陨石中球粒和基质的橄榄石化学组成比较稳定, 属于贵橄榄石(Fo_{81.3}Fa_{18.7})。对球粒和基质中 11 个斜方辉石的化学组成作了电子探针分析(表 3), Fs 的变化范围为 14.5—16.2%, 平均值为 15.3%; 微化分析结果 Fs 为 14.2%, 属古铜辉石(En_{81.8}Fs_{15.3}Wo_{2.9})。我们在西德马普核物理所测定了 12 个颗粒的斜方辉石(表 3), Fs 的变化范围为 15.3—15.9%。

表 3 橄榄石与斜方辉石的电子探针分析结果的平均值

重量% 矿物	氧化物	TiO ₂	V ₂ O ₅	CaO	MnO	FeO	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	总计	参考文献
橄榄石	(14)*	0.09	—	0.15	0.32	17.82	—	38.33	0.33	43.50	0.10	100.64	[6]
	(30)	0.05	0.01	0.05	0.67	17.32	0.04	38.59	0.02	43.09	—	99.75	[7]
斜方辉石	(11)	0.13	—	1.49	0.48	10.03	—	55.14	1.49	30.19	0.66	99.61	[6]
	(12)	0.13	0.06	0.87	0.74	10.49	0.32	54.97	0.40	30.96	—	98.94	[7]

* 测定矿物的颗粒数

(4) **稀土元素配分的模式** 用放射化学分离的中子活化分析, 测定了吉林陨石的全岩、球粒、磁性部分及非磁性部分中稀土元素的含量。经测定, 吉林陨石全岩和 Allende 陨石全岩中稀土元素的相对含量与 20 个球粒陨石的平均稀土元素的相对含量在实验误差范围内基本上一致, 表明吉林陨石和 Allende 陨石及它们的母体在演化过程中, 并没有产生

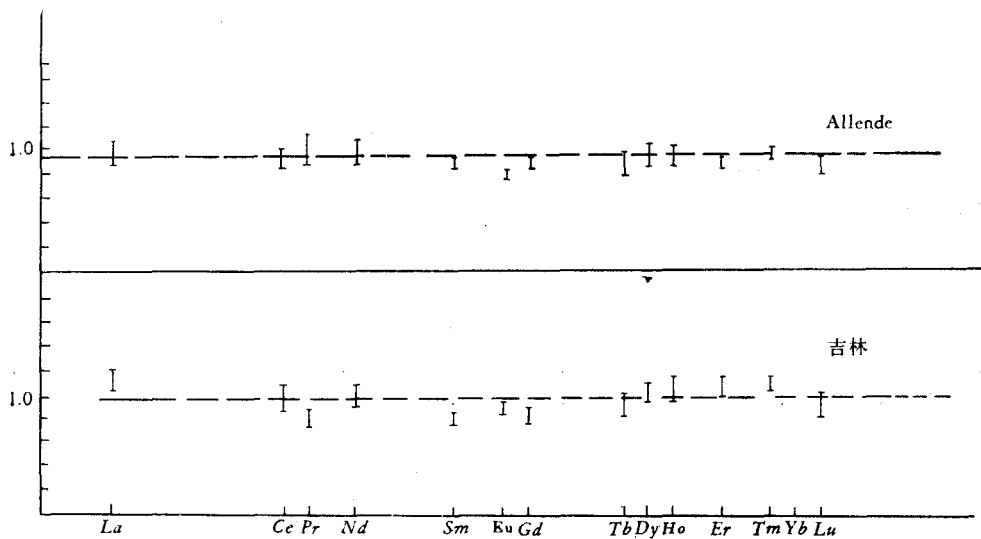


图3 Allende 陨石全岩,吉林陨石全岩中稀土元素相对丰度与 20 个球粒陨石稀土元素的平均相对丰度 (=1) 的比较图

稀土元素的相对分馏(图 3)。但令人惊异的是吉林陨石球粒中稀土元素的总量只及球间基质的二分之一左右,球粒中稀土元素的相对含量与 20 个球粒陨石的平均稀土元素的相对含量相比,轻稀土元素的含量呈现出明显的线性匮乏,即这种匮乏与其离子半径成正比。球粒中的 Eu 相对比较富集,说明吉林陨石球粒中的稀土元素发生了明显的迁移。对一些热变质程度不同的陨石中的球粒所测得的稀土元素丰度进行对比^[4],发现球粒中轻稀土元素含量的相对匮乏随陨石变质程度的加深而变得明显(图 4)。造成上述球粒中稀土元素配分模式,可能是由球粒在凝聚时,含有宇宙丰度的稀土元素配分模式,在后期的热变质过程中,由于某些球粒的脱玻璃化和重结晶,稀土元素作为杂质在结晶自纯化作用下被排出球粒而渗入基质,特别是与 Fe^{+2} 和 Mg^{+2} 离子相差较大的轻稀土元素被排出球粒的量相对较多,因而形成了变质程度加深而稀土元素的线质匮乏就愈明显。Eu 在还原条件下,往往以二价离子形式存在,比其他稀土元素易于保留在硅酸盐中,因而形成了 Eu 的正异常(图 4)。

(5) 其他 吉林陨石全岩的裂变径迹研究表明,球粒边界外的裂变径迹密度大于球粒内部的密度,说明球粒中的铀含量低于球间基质中的铀含量,这种现象可以由球粒在热变质重结晶过程中,由于自纯化作用,铀原子作为杂质被排斥到周围的基质中来解释。在吉林陨石中广泛存在着脱玻璃化与重结晶现象,由玻璃质→隐晶质→雏晶→纤维束状辉石、粒状橄榄石和微晶长石。

综上所述,吉林陨石在热变质过程中,化学成分趋于稳定,尤其是橄榄石和斜方辉石中的 Fa(铁橄榄石)和 Fs(铁辉石)分子的含量变化范围很小;含有少量单斜辉石;长石以微晶集合体产出;玻璃质含量较少,大部分已脱玻璃化;球粒轮廓部分较清晰,部分尚可辨认。根据上述岩石学的特征,吉林陨石属于 H_2 型球粒陨石。

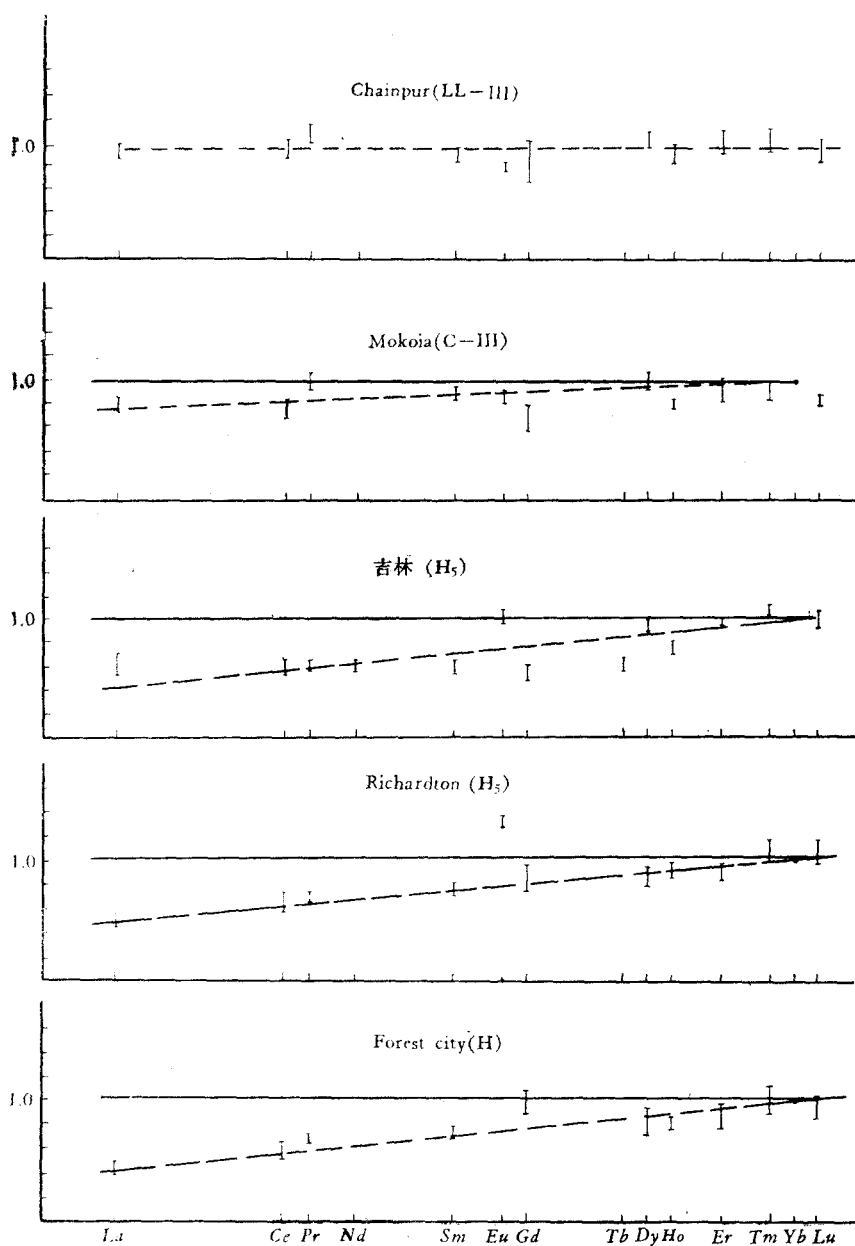


图 4 球粒中稀土元素的相对丰度与 20 个球粒陨石全岩的稀土元素的平均相对丰度 (=1) 的对比图

三、吉林陨石母体的冷却过程

如何确定吉林陨石热变质对所经受的最高温度是一个困难的问题。一般理论上估算 H₅ 型球粒陨石的热变质温度为 900—1200K, 我们试图通过实验找到佐证。对吉林陨石进行分段加热, 并观察矿物形态和结构的变化, 当加温到 1070K 时, 扇形的辉石球粒晶体

继续增长,表明吉林陨石热变质的温度 $\leq 1100\text{K}$ 。

母体受热后,随着热能的扩散而冷却。确定母体的冷却速率一般采用经典的方法,即测定陨石中镍纹石的镍含量与镍纹石的宽度,根据金相学的实验结果,计算金属熔体的冷却速率。根据表 4 的结果,冷却速率为 $0.5^{\circ}\text{C}/10^6$ 年。

表 4 吉林陨石中铁纹石与镍纹石的电子探针分析结果平均值

重量 % 矿物	元素	Cr	Fe	Ca	Co	Ni	Cu	P	S	Si	Mg	总计	化学式	资料来源
铁纹石 (5)* (52)	—	91.37	—	0.67	7.84	—	—	—	0.1	—	—	99.88	$\text{Fe}_{12.3}\text{Ni}(\text{Co})$	[6]
	0.04	93.17	0.01	0.50	5.87	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	99.63	$\text{Fe}_{1.4}\text{Ni}(\text{Co})$	[7]
镍纹石 (1) (22)	—	67.36	—	0.28	31.08	—	—	—	—	—	—	98.72	$\text{Fe}_{2.26}\text{Ni}(\text{Co})$	[6]
	0.03	66.02	0.02	0.12	33.17	0.19	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	99.59	$\text{Fe}_{2.1}\text{Ni}(\text{Co})$	[7]
四面体 (1)	—	50.66	—	0.2	50.66	—	—	—	—	—	—	101.52	$\text{Fe}_{1.05}\text{Ni}(\text{Co})$	[6]
镍纹石 (7)	0.04	48.51	0.00	0.08	50.76	0.42	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	99.48	$\text{FeNi}(\text{Co})$	[7]

* 分析矿物的颗粒数

我们还根据吉林陨石母体中对 Ar 和裂变径迹保留的年龄以及居里点温度的测定值综合估算吉林陨石母体的冷却速率。

我们选择了各种冷却速率进行计算,经筛选后, $1^{\circ}\text{C}/10^6$ 年的数值比较适合。当母体的热变质温度为 $1000-1100\text{K}$ 时,按每百万年冷却 1°C 计算,距今 4.2×10^9 年时温度为 $750-850\text{K}$; 距今 $4.0-3.9 \times 10^9$ 年时温度为 $450-600\text{K}$; 经测定吉林陨石中橄榄石与斜方辉石的 Pu-U 裂变径迹保留年龄分别为 $(4.0 \pm 1.3) \times 10^9$ 年及 $(3.9 \pm 0.14) \times 10^9$ 年^[3],表明母体自 4.0×10^9 年以来足以保留矿物中的裂变径迹。吉林陨石的 Ar^{40} 保留年龄在 $(2.3-3.9) \times 10^9$ 年范围内,大部分为 $(3.0-3.4) \times 10^9$ 年之间,当时母体的温度已达到足以保存 Ar^{40} 的所需要的 $< 300\text{K}$ 的环境。根据吉林陨石 11 个样品的天然剩磁的测定,平均为 4.41×10^{-2} 高斯,磁化率为 1.68×10^{-1} ,居里点温度为 $400-650^{\circ}\text{C}$ 。吉林陨石母体形成后迅速受到加热,超过吉林陨石的居里点温度,因而吉林陨石的磁化应该在热变质后期,即温度冷却到 650°C 以后的热剩磁。根据上述冷却速率,母体冷却到吉林陨石居里点温度的时间,大约距今 4.2×10^9 年。

四、吉林陨石母体的破碎及宇宙线照射历史

吉林陨石的母体长期在太阳系空间运行,一方面受到银河系宇宙线及太阳宇宙线的照射,产生许多种宇宙成因核素,为我们探讨宇宙线照射史提供了大量的事实根据;另一方面受到太阳系空间其他小天体的碰撞,致使吉林陨石母体破裂、瓦解。

吉林陨石中保存有许多受到冲击、破碎的证据,如橄榄石、辉石和隐晶质球粒的破碎;矿物中出现裂纹;辉石、白磷钙石呈现出波状消光的特征;钛铁矿见有明显的聚片双晶,并有轻微的折曲;球粒和基质破碎形成角砾;铁纹石中出现清晰的由冲击而产生的留曼线。

上述矿物结构上的变化,充分反映了吉林陨石曾受到轻度的冲击变质的影响,冲击压一般小于 $10\text{Kb}^{[16]}$ 。

我们曾经用 γ - γ 低本底符合谱仪对吉林陨石中的宇宙成因核素 (Na^{22} 、 Al^{26} 、 K^{40} 、 Sc^{46} 、 Cr^{51} 、 Mn^{54} 和 $\text{Co}^{56,57,58,60}$) 作了测定^[12]。西德、日本和美国的有关实验室也对吉林陨石中的宇宙成因稀有气体和 γ 放射性同位素作了研究^[10,13-17]。这些研究结果表明,吉林陨石具有极其复杂的碰撞分裂史和宇宙线照射史。用单阶段暴露模式难以解释吉林陨石的辐照历史,看来采用两阶段暴露模式能圆满地说明吉林陨石的辐照历史。1980 年我们对吉林 1 号陨石选取了 13 个顶角样品,并在一个参考直角坐标系中测定各样品的位置;同时选取了 10 个散落的碎块样品,在西德曼因兹化学研究所合作测定上述样品中的 $\text{He}^{3,4}$ 、 $\text{Ne}^{20,21,22}$ 、 $\text{Ar}^{36,38,40}$ 、 Kr 和 Xe ,在西德海德堡核物理研究所测定宇宙成因的 Na^{22} 、 Al^{26} 、 K^{40} 和 Co^{60} ,在西德科隆大学核化学研究所测定宇宙成因的 Mn^{53} ,在日本东京大学测定宇宙成因的 Mn^{53} 和 Cl^{36} 。综合上述测定结果,使我们对吉林陨石的宇宙线照射历史研究获得了较充分的实验数据。概括起来,吉林陨石的宇宙线照射史可归纳为以下两个阶段:

吉林陨石的母体在距今 $(10-11) \times 10^6$ 年前,曾受到一次冲击、破碎,而使现今的吉林陨石包含在一块半径大约是 10m 的分裂碎块之中——我们称这个块体为“第一阶段的吉林陨星”。我们根据各样品中 Ne^{21} 的含量,可以恢复各样品在“第一阶段吉林陨星”中的相对位置[图 5(a)]。所测定的吉林陨石的各样品,大约埋藏在距表面 0.2—2m 的部位,因而各样品只能接受 2π 几何条件的宇宙线照射。

“第一阶段的吉林陨星”在距今 $(0.3-0.5) \times 10^6$ 年前,又遭受到一次碰撞、瓦解,分裂出“第二阶段的吉林陨星”。根据我们所测定的各样品中的 Na^{22} 、 Al^{26} 、 Mn^{54} 和 Co^{60} 的比放射性,可以恢复各样品在“第二阶段的吉林陨星”中的精确位置。我们采用 P. Eberhardt^[18] 等人的 H 群球粒陨石 Co^{60} 的比放射性与埋藏深度的模型,计算各样品的埋藏深度。

表 5 各样品在“第二阶段吉林陨星”中的埋藏深度*

样品编号	$\text{Co}^{60}(\text{dpm/kg})^{**}$	样品埋深 (cm)	样品编号	$\text{Co}^{60}(\text{dpm/kg})^{**}$	样品埋深 (cm)
1-6	99 ± 7	15—16.5	1-9	191 ± 7	29.5—35
1-2	100 ± 5	15.5—17	1-1	195 ± 8	30—35.5
1-7	108 ± 9	16—18	1-4	229 ± 7	38—54
1-3	169 ± 8	25—28	5-032	72.3 ± 3.5	11—12
1-8	169 ± 7	25—28	V-15-010	68.8 ± 5.2	11—12
1-5	181 ± 9	27.5—31	VI-20-065	124 ± 12	21—23

* 按陨星的半径为 80—90cm 计算

** 换算成降落时样品所具有的比放射性

根据各样品在参考直角坐标系中的位置及其埋藏的深度即可以恢复“第二阶段吉林陨星”的形状和大小[图 5(b)]。“第二阶段的吉林陨星”大约是一个半径为 85—90cm 的近似球状体,重约 4.5—5.5 吨。由于陨星体积较小,各样品均受到 4π 几何条件的宇宙线的照射。所测定的样品离表面最近者约 11cm,表明“第二阶段吉林陨星”通过地球大气层降落时,表面的烧失量(假设为均衡烧失)为 1.5—1.7 吨,占 30%。

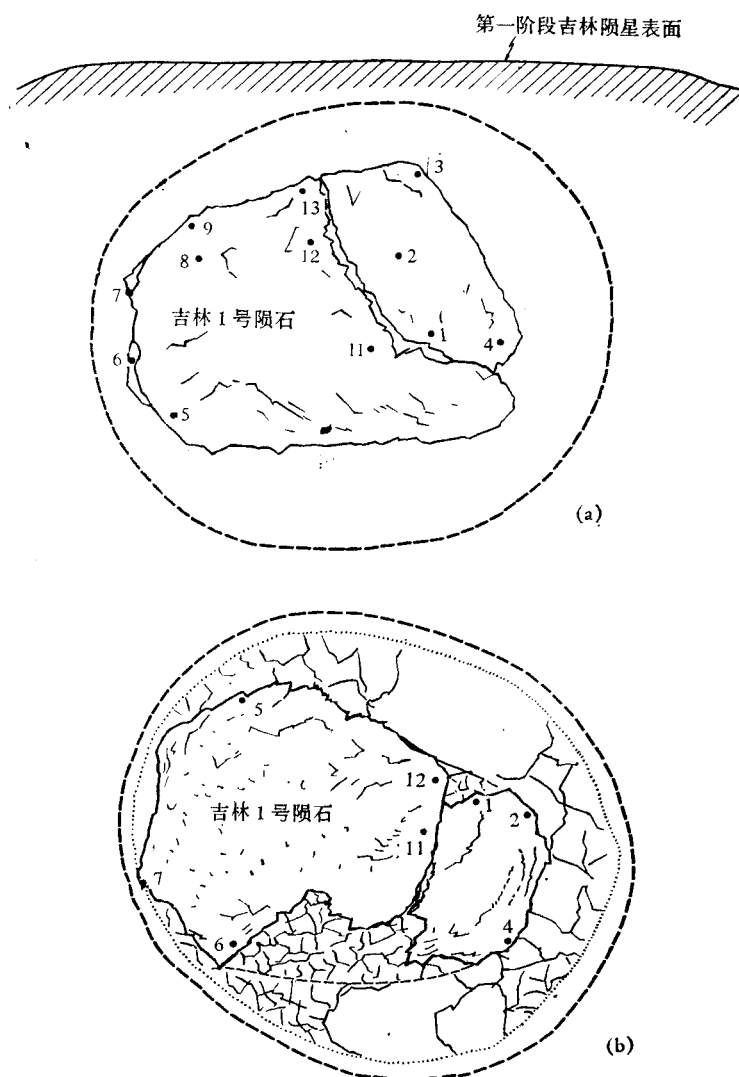


图5 吉林陨石两阶段照射历史的示意图

- (a) “第一阶段的吉林陨星”及各样品在陨星中的位置
 (b) “第二阶段的吉林陨星”及各样品在陨星中的位置

五、吉林陨石通过地球大气层的降落过程

“第二阶段的吉林陨星”在太阳系空间的运行轨道为半长径 $a = 1.82\text{AU}$ ，偏心率 $e = 0.48$ ，轨道倾角 $i = 6.3^\circ$ ，近日点角距 $\omega = 32.9^\circ$ ，升交点黄经 $\Omega = 167.5^\circ$ ，近日距 $q = 0.94\text{AU}$ ，远日距 $Q = 2.71\text{AU}$ 。根据吉林陨石中 Al^{26} 的测定值^[12,19,20]，计算“第二阶段吉林陨星”在太阳系空间运行的远日距 $Q = 2.16\text{AU}$ 。“第二阶段吉林陨星”的运行轨道与阿波罗小行星较相似。

根据陨落过程的力学分析和大气层内轨道的研究，吉林陨星大约以 15—18 公里/秒

的相对速度追上地球。进入大气层的人射角可能为 $16^{\circ}15'$ 。陨星在通过大气层时受到最大的动压达 100 大气压/厘米², 表面温度达 2—3 千度, 陨星周围空气被加热到近 2 万度。在距地面 30 公里以上的高空为直线弹道, 在 17—23 公里高处曾发生过多小次的爆裂, 使陨星边缘的部位不断剥落[图 5(b)]。陨星通过大气层的过程中, 表面物质气化、熔融, 形成一层厚为 0.7—1mm 的熔壳。由于陨星表层受到多次剥离, 熔壳的形成也是多次的。熔壳主要由磁铁矿微晶、雏晶和熔融的硅酸盐组成, 含有较多的气泡。熔壳里层逐渐变成磁铁矿和熔融的原生矿物。根据热释光的测定^[21], 吉林陨星穿过大气层时, 陨星体内部的温度梯度在距熔壳表面 5mm 范围内为 $31^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, 同稳态连续烧蚀模型的理论计算值较接近。在距熔壳表面 2 厘米以内, 所测得的归一化热释光几乎是一个常数, 表明通过大气层时表面的加热过程未能达到比 2 厘米更深的部位。

吉林陨星通过大气层过程中不断受到剥离, 尤其在大约 19 km 高处曾发生过一次主爆裂, 使陨星分裂成许多碎块, 散落下来形成了规模壮观的吉林陨石雨。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院“吉林陨石雨”联合考察组, 中国科学, 1, 38, 1977.
- [2] 欧阳自远等, 地球化学, 1, 1, 1978.
- [3] 欧阳自远等, 吉林陨石雨论文集, 科学出版社, 12, 18, 22, 295, 1979.
- [4] Wasserburg, G. J. et al., *Earth Planet Sci. Letters*, 7, 33, 1969.
- [5] Kaushal, S. K. and Wetherill, G. W., *J. Geophys. Res.*, 74, 2717, 1969.
- [6] 中国科学院地球化学研究所吉林陨石雨物质成分研究小组, 中国科学, 3, 329, 1978.
- [7] Liu, S., Ouyang Z. and El. Goresy, A., *Earth Planet Sci. Letters*, Preprint, 1982.
- [8] Miyamoto, M., *Lunar Planet. Sci. XI*, Houston, Lunar Planet. Inst., 737, 1980.
- [9] Wassen, J. T., *Meteorites*, Berlin, Springer, 1974.
- [10] Begemann, F. et al., *Z. Naturforsch.*, 35a, 37, 1980.
- [11] Schmitt, R. A., et al., *Origin and Distribution of the Elements*, Pergamon Press, 273, 1968.
- [12] Ouyang, Z. and Zhou, X., *16th International Cosmic ray Conference*, Conference Paper 2, OGH, 315, 1969.
- [13] Honda, M. et al., *Geochemical J.*, 14, 83, 1980.
- [14] Heusser, G. et al., *Meteoritics*, 14, 412, 1979.
- [15] Weber, H. et al., *Meteoritics*, 14, 588, 1979.
- [16] Honda, M. et al., *Earth Planet Sci. Letters*, Preprint, 1982.
- [17] Heusser, G. and Ouyang, Z., *Earth Planet Sci. Letters*, Preprint, 1982.
- [18] Eberhardt, P. et al., *Earth Science and Meteoritics*, 143, 1963.
- [19] Лаврухина, А. К., Ядерные реакции в космических телах, наука, Москва, 1972.
- [20] Lavrukhina, A. K. and Ustinova, G. K., *Earth Planet Sci. Letters*, 15, 4, 1972.
- [21] 刘京发等, 科学通报, 17, 1057, 1981.

THE PROCESS OF THE FORMATION AND EVOLUTION OF THE JILIN METEORITE

Ouyang Zi-yuan

(*Institute of Geochemistry, Academia Sinica*)

Abstract

On the basis of the data from a multidisciplinary integrated study of the Jilin meteorite, we have made a discussion on the formation and evolution of it involving the following aspects: (1) the fractionation-condensation of the solar nebula, based on the condensation conglomeration age and the mineral association of the Jilin meteorite; (2) the thermometamorphic history of the Jilin parent body, based on the data on the loss of rare gases, the chemical composition of the whole rock, the self-purification of REE and the compositional stability of olivine and orthopyroxene; (3) the cooling process of the Jilin parent body, in reference to the Ni content and range of taenite as well as to the retention of argon and fission tracks in the minerals; (4) the breakup of the Jilin parent body and its cosmic ray irradiation history. Based on the measurements of the cosmogenic nuclides as He^3 , $\text{Ne}^{20,21,22}$, Ar^{38} , Na^{22} , Al^{26} , Mn^{54} , Mn^{53} , Co^{60} etc, a two-stage model of irradiation history of the Jilin meteorite has been proposed. From the data on the Jilin parent body of the first stage (the age=10—11 my and $r=10$ m) and that of the second stage (the age=0.3—0.5 my and $r=80$ —90 cm), we have defined the relative positions of the samples in the parent body, and their burial depths as well as the post-atmospheric loss on ignition, respectively; (5) the falling process of the Jilin meteorite, the orbits of the Jilin meteor in the solar system and in the atmosphere, and its falling process have been discussed.