

吉林陨石的核径迹深度剖面

胡 瑞 英

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳)

K. Thiel

(联邦德国科隆大学核化学部)

摘 要

用吉林 1 号陨石的 43 块样品确定了吉林陨石的宇宙线和铀裂变径迹密度的深度剖面。这个深度剖面基本上反映吉林陨石第二(4π)照射阶段记录的银河宇宙线径迹。由钻孔 A 和 B 的径迹测定结果,求得吉林陨石通过大气层时的平均烧蚀厚度分别为 $11\pm 4\text{cm}$ 和 $14\pm 5\text{cm}$;在第一(2π)照射阶段,钻孔 A“顶部”的最小屏蔽深度约为 30cm。大约在小于 0.4 Ma 前,由于短期受热事件的影响,使通过大气层前母体的 15—20cm 厚的表层中的核径迹退火,由此导出母体近表面区的观测径迹密度与理论预期值发生偏离。

一、前 言

吉林球粒陨石(H₅)的巨大主体 1 号陨石(约 1770kg)^[1]与宇宙线相互作用提供了新的信息。宇宙线在巨大的近似球状的母体中产生的次级粒子是可观测的。中德吉林陨石第一期合作研究的成果^[2]和其他宇宙成因核^[3-5]测定结果,提出吉林陨石两阶段宇宙线照射历史的模式。第一(2π)照射阶段为 8—10Ma,第二(4π)照射阶段为 0.4Ma。虽然可以综合一系列相互吻合的测量资料恢复吉林陨石的照射历史,但有许多问题不易解释。例如,吉林陨石样品屏蔽深度都比较浅,⁶⁰Co 测定结果明显地缺乏宇宙线径迹^[6]。因为吉林陨石样品的径迹密度是石陨石中最低的,讨论这些问题是很难的。然而,由于有主体中两个定向钻孔的 43 块系统样品及其精确的深度位置,使吉林陨石径迹密度的深度剖面研究得以实现。钻孔样品间的距离精度是 $\pm 2\text{mm}$,钻孔 A, B 的总长度分别为 64.8cm 和 105.0cm(表 1, 2)。要特别注意矿物中铀含量及整个基质中的铀分布,以便有效地解释裂变径迹的干扰问题。

二、实验程序

1. 样品的制备和统计方法

图 1 表明 1 号陨石中两个互相垂直的钻孔 A 和 B 的位置及第一(2π)照射期间吉林陨石母体假设的表面。这两个钻孔相交于第二(4π)照射阶段陨石母体中心^[7]。1 号陨石坑中样品的⁶⁰Co 测量结果表明,1 号陨石的较小碎块(图 1 的右上角)没有精确地复原在原始位置,但

表1 吉林陨石钻孔A样品古径迹密度和宇宙成因核

样品	与钻孔表面的距离 (cm)	径迹数	面积 (10^{-2}cm^2)	径迹密度 (cm^{-2})	^{21}Ne ($10^{-8}\text{cm}^3\text{STP/g}$)	^{60}Co * [dpm/kg]	D^{**} [cm]
A1	0.9	16	8.519	190 ± 50	0.468	199 ± 6	6.7
A3	5.1	15	4.749	320 ± 80	0.484	(A2, A4, A6)	
A5	8.6	20	8.722	230 ± 50	--	235 ± 6	17.3
A7	12.3	10	2.900	345 ± 110	0.531	(A8, A10, A12)	
A9	15.7	15	7.062	210 ± 55	--		
A11	19.0	17	7.710	220 ± 50	0.563	250 ± 7	27.2
A13	22.2	11	6.504	170 ± 50	--	(A14, A16, A18)	
A15	25.5	4	6.157	65 ± 30	0.581		
A17	28.9	8	10.803	70 ± 30	--	274 ± 7	37.5
A19	34.2	10	7.452	130 ± 40	0.707	(A20, A22, A24)	
A21	36.1	12	8.926	130 ± 40	--		
A23	39.4	9	7.557	120 ± 40	0.736	270 ± 7	47.3
A25	42.7	15	7.118	210 ± 50	--	(A26, A28, A30)	
A27	46.1	13	6.972	190 ± 50	0.763		
A29	49.3	14	6.131	230 ± 60	0.813	271 ± 7	57.3
A31	52.6	14	6.767	210 ± 55	--	(A32, A34, A36)	
A33	56.0	27	9.335	290 ± 60	0.868		
A35	59.3	10	3.063	330 ± 100	--		
A37	63.6	13	4.359	300 ± 80	0.890		

* 括号内的样品是用来作 ^{60}Co 测量。** D 是样品与钻孔表面的平均距离,用来作 ^{60}Co 测量的。 ^{21}Ne 是根据 Weber 等人(私人通信,1985)。 ^{60}Co 是根据 Heusser 等人(私人通信,1985)。

表2 吉林陨石钻孔B样品古径迹密度和宇宙成因核*

样品	与钻孔表面的距离 (cm)	径迹数	面积 (10^{-2}cm^2)	径迹密度 (cm^{-2})	^{21}Ne ($10^{-8}\text{cm}^3\text{STP/g}$)	^{60}Co (dpm/kg)	D (cm)
B1	0.4	2	3.202	60 ± 40	0.846	231 ± 9	4.9
B4	6.2	5	3.267	150 ± 70	0.773	(B2, B3, B5)	
B6	9.5	2	1.858	110 ± 80	--	225 ± 8	14.3
B8	12.8	5	2.198	230 ± 100	0.800	(B7, B9, B10)	
B11	19.4	3	1.391	220 ± 120	0.754	246 ± 7	24.4
B13	22.7	2	3.179	60 ± 40	--	(B12, B14, B16)	
B15	25.9	3	2.460	120 ± 70	0.771	258 ± 9	34.9
B17	29.5	1	2.211	45 ± 45	--	(B18, B20, B22)	
B19	33.0	2	1.664	120 ± 85	0.804		
B23	39.2	2	2.742	70 ± 50	0.768	285 ± 13	44.7
B25	43.1	4	6.640	60 ± 30	0.789	(B24, B26, B27)	
B29	54.8	2	2.737	70 ± 50	0.736	273 ± 10	57.5
B31	58.5	3	2.867	105 ± 60	0.774	(B28, B30, B32)	
B33	62.7	4	4.504	90 ± 40	--	256 ± 7	74.6
B35	69.6	3	2.819	110 ± 60	0.745(B34)	(B36, B38, B40)	
B37	72.9	3	3.443	90 ± 50	0.768		
B39	76.2	2	4.735	40 ± 30	--	239 ± 11	87.1
B41	80.5	4	8.307	50 ± 20	0.776	(B42, B44, B46)	
B43	85.2	2	1.358	150 ± 100	--		
B45	88.6	1	1.677	60 ± 60	0.792	228 ± 9	97.9
B47	92.4	4	1.632	245 ± 120	--	(B48, B50, B52)	
B49	95.6	3	4.366	70 ± 40	0.811		
B51	99.2	9	4.859	185 ± 60	--		
B53	103.2	3	6.246	50 ± 30	0.846		

* 表注同表1。

是由于技术上的原因取样之前没有修正¹⁾。因此, 钻孔 B 的右边不恰好是延伸的径向位置。但样品 B53 仍然是接近表面的。钻孔 A 的样品从 A1 (“底部”) 到 A37 (“顶部”), 钻孔 B 从 B1 到 B53。此项工作是选自钻孔 A 的 19 个样品、钻孔 B 的 24 个样品进行研究 ($\geq 100\text{mg}/\text{样品}$)。将这些样品轻轻压碎、过筛、分离成不同大小的颗粒, 最后嵌入环氧树脂中。用偏光显微镜或电子探针鉴定这些矿物。

每个样品中有数百颗至千颗辉石和橄榄石嵌入, 并进行重复地研磨、抛光。辉石在室温下用 $2\text{HF}:1\text{H}_2\text{SO}_4:6\text{H}_2\text{O}$ 的混合溶液蚀刻 2min; 橄榄石在沸腾的 WN 溶液^[8]蚀刻 5h。辉石由于晶体缺陷的影响, 蚀刻后出现许多类似径迹的特征, 使辉石中径迹鉴定比橄榄石中的径迹鉴定困难得多。尽管如此, 对辉石中的径迹还是进行了统计, 并测量了径迹长度。但是最后确定径迹密度的深度剖面主要是根据橄榄石中的径迹, 其理由将在 2 和 3 节中说明。吉林陨石中的橄榄石的径迹非常少, 为了得到正确的径迹密度, 对橄榄石的所有抛光面, 无论是有径迹的、没有径迹的都作统计。用图象分析仪进行精确的面积测定, 精度为 $\pm 5.10^{-7}\text{cm}^2$, 对于 2.10^{-4}cm^2 的颗粒 (典型颗粒) 误差 $< 3\%$ 。在抛光面上, 透射光下颗粒的轮廓稍微不同于反射光下颗粒的轮廓,

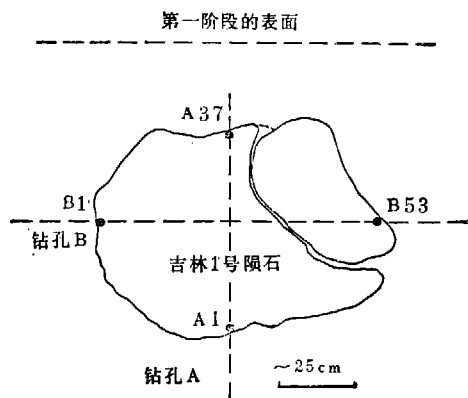


图 1 吉林 1 号陨石的两个相互垂直钻孔 A 和 B 的位置

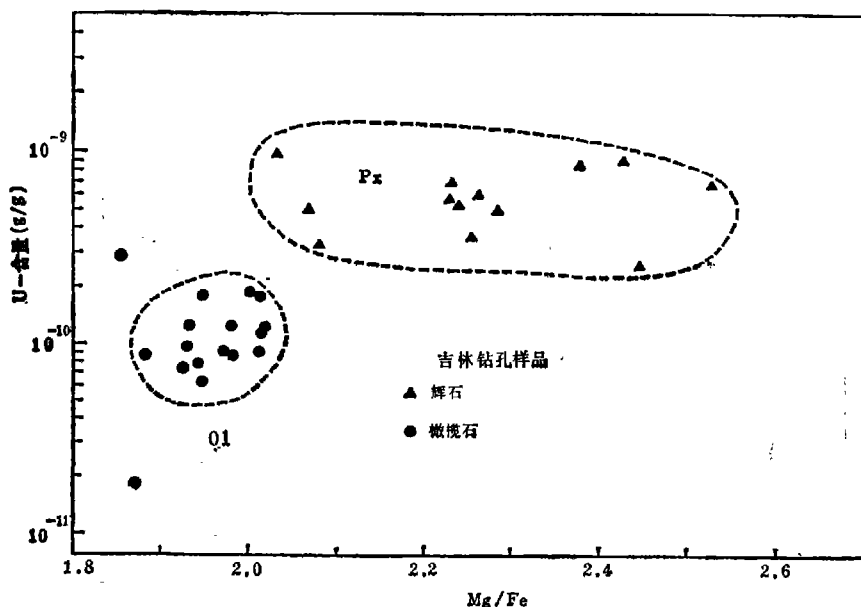


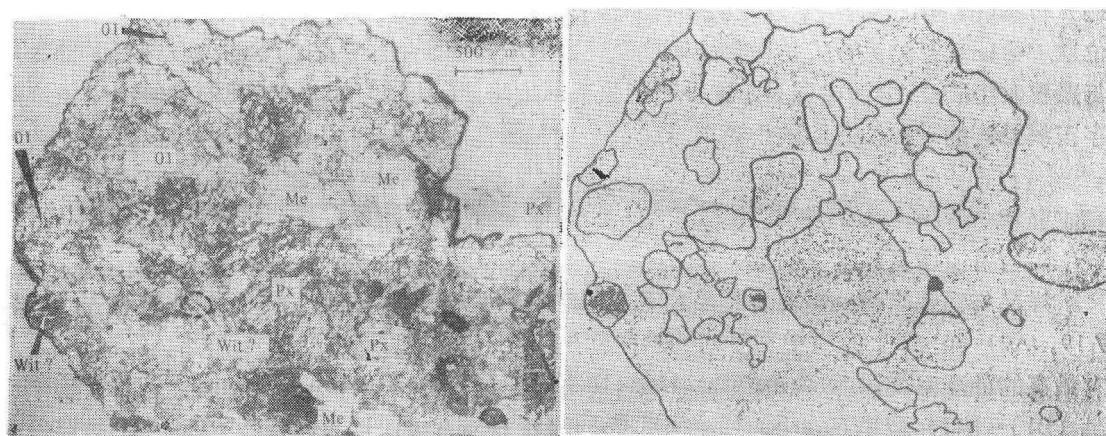
图 2 吉林陨石钻孔样品中辉石和橄榄石的铀含量与 Mg/Fe 比的关系

1) 与 Heusser 私人通信。

因此产生百分之几的附加误差。由于径迹统计数很少(参看第三段 1 节),对径迹密度总误差的影响非常小。每个径迹都测量它倾斜角和长度,径迹特征是由两个人独立地重复进行测定的。

2. 电子探针分析

具有代表性的部分橄榄石及辉石晶体是用 ARL-EMX 电子探针分析其主量元素含量的。铀含量是用铀裂变径迹技术测定的(参看 3 节和第三段 2 节)。橄榄石的 Fa 含量不偏离平衡的 H 球粒陨石^[9]的期望值 17—19mol%。测定的平均值为 $18.2 \pm 0.4 \text{ mol}\%$ 。在铀含量与 Mg/Fe 比的图中(图 2)吉林陨石中的橄榄石比辉石的分布范围狭窄。从橄榄石的径迹蚀刻特征看,化学成份是均一的,这也是利用橄榄石作为径迹测定的原因。



(a) 样品 (b) 铀分布
(Ol——橄榄石, Px——辉石, Me——金属相,
wit——白磷钙矿) (钻孔 A/样品 A5)

图 3 吉林陨石样品铀裂变径迹分布

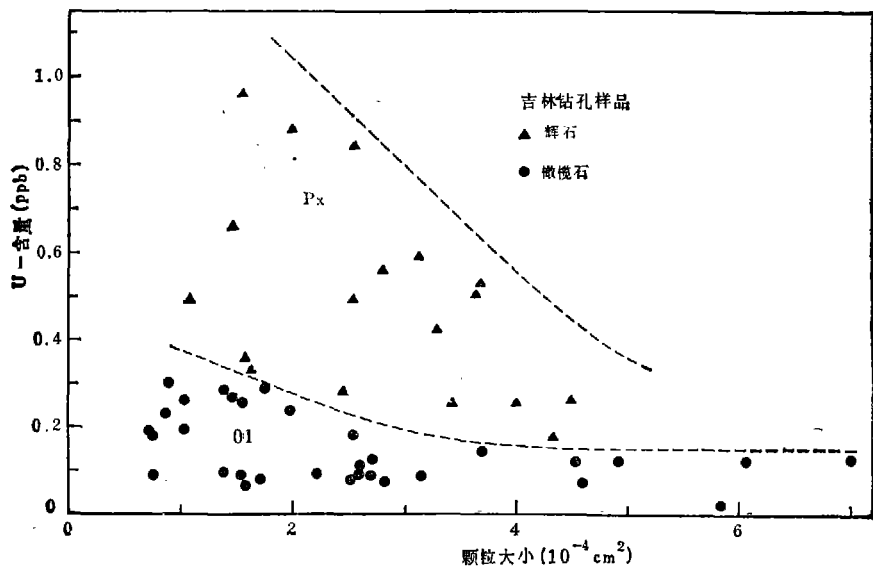


图 4 吉林陨石钻孔样品中辉石和橄榄石晶体的铀含量与颗粒大小的关系

3. 铀的测定

宇宙线径迹密度受到铀自发裂变径迹的干扰。在样品中,即在几百个橄榄石颗粒中,铀的显微分布是用照片镶嵌技术确定裂变径迹的^[10,11]。为测定低含铀量,利用 $\ll 0.1\text{ppb}$ 铀的超纯石英玻璃来代替白云母作为径迹外探测器。样品和探测器组成相间的“三明治”与 NBS. SRM. 616 标准玻璃一起(铀含量是 $72.1 \pm 1.3\text{ppb}$, $0.616\text{atom}\%^{235}\text{U}$),用 $1.2 \times 10^{18} - 1.2 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ (n 是中子通量 $\phi_{\text{热}}/\phi_{\text{总热}} = 3 \times 10^3$) 在 KFA/Jülich 的 FRJ-2 反应堆中进行照射。反应堆照射以后,把样品光片和外探测器分开,玻璃外探测器蚀刻以后($\text{HF } 23^\circ\text{C}, 5-15\text{min}$),和样品分别在显微镜下照相。把许多视野的照片镶嵌组成一个完整的样品光片图和铀裂变径迹分布图(图 3),重叠两个照片,使样品的含铀相和外探测器的铀裂变径迹相对应,确定铀的位置。特征颗粒的铀含量是用统计玻璃探测器上相应面积中径迹数测定的。在辉石中铀含量与颗粒大小成反比;而橄榄石中这种比例关系不太明显(图 4)。因此,橄榄石的铀裂变径迹对宇宙线径迹的干扰与颗粒大小无关。这也是研究橄榄石的另一个原因。

三、实验结果

1. 古径迹密度的深度剖面

样品与钻孔表面的距离及其径迹密度测定结果见表 1 和表 2。钻孔 A 内部样品 A13, A19, A21 和 A23 的橄榄石平均径迹密度是 140 ± 20 径迹/ cm^2 , 近表面样品 A7 和 A35 具有最高的径迹密度,其数值分别为 345 ± 110 径迹/ cm^2 和 330 ± 100 径迹/ cm^2 ; 钻孔 B 内部样品(B13—B41) 橄榄石的平均径迹密度是 80 ± 30 径迹/ cm^2 , 近表面样品 B8 和 B47 具有最高的径迹密度,其数值分别为 230 ± 100 径迹/ cm^2 和 245 ± 120 径迹/ cm^2 。

由钻孔 A 和 B 的结果可见,吉林陨石具有可测量的径迹密度的深度剖面(见图 5 和 6),其

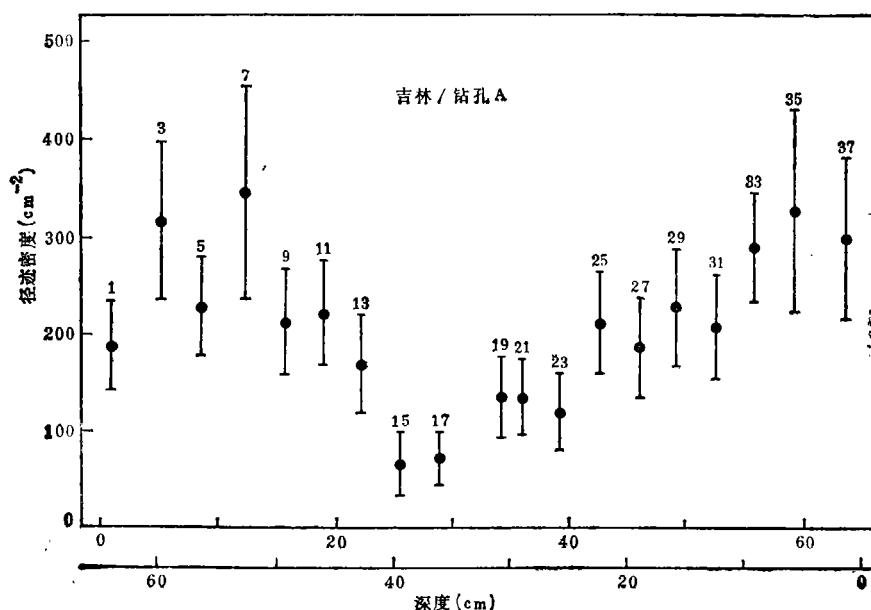


图 5 吉林陨石钻孔 A 样品径迹密度的深度剖面

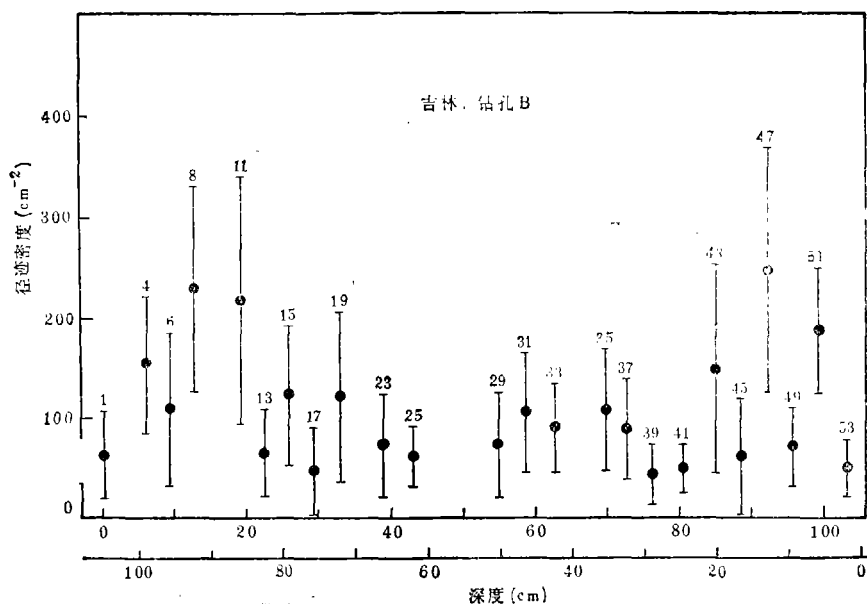


图 6 吉林陨石钻孔 B 样品径迹密度的深度剖面

径迹密度深度剖面基本特征是: 从边缘向中心, 径迹密度显著减小, 但在接近复原陨石母体的表面时, 处于 A7, B8 和 B47 以外的近表面样品的径迹密度急速下降, 下降的幅度显著地超过了统计误差的极限。这些近表面样品的观测径迹密度显著低于第二 (4π) 阶段暴露 (0.4Ma)^[2,4,12,13] 预期产生的银河宇宙线径迹密度 (详见第 3 节)。钻孔 A 的径迹密度深度剖面比较陡 (见图 5), 而钻孔 B 的深度剖面非常平缓, 钻孔内部样品的数据点形成一个坪 (见图 6)。

如果两个钻孔径迹密度的变化是来自吉林陨石第二 (4π) 暴露阶段银河系宇宙线的辐照作用, 那么钻孔两边样品的径迹密度应该达到非常高的数值 (见第 3 节), 但未观测到这种情况。产生这个差别的原因将在下面讨论。

2. 铀的分布和自发裂变的干扰

钻孔 A 样品的铀分布记录在超纯石英玻璃外探测器上 (图 3), 铀的径迹密度分布表明, 辉石比橄榄石富含铀。通过数百个单矿物测出了他们的平均铀含量: 辉石的平均铀含量是 $0.59 \pm 0.22\text{ppb}$; 橄榄石是 $0.12 \pm 0.06\text{ppb}$ 。我们测定的橄榄石的铀含量和 Pellas 等人^[6]测定的另一组吉林陨石中橄榄石铀含量 $0.18 \pm 0.05\text{ppb}$ 基本吻合。大量样品裂变径迹密度的测定, 表明吉林陨石铀的分布是不均匀的。这一特点与矿物成分及结构特征有关。主要含铀相是基质中的细粒透明矿物、粒间充填物及副矿物包裹体, 金属相的铀含量非常低, $< 0.02\text{ppb}$ 。

裂变径迹来自样品中的 ^{238}U 自发裂变, 其关系式:

$$\rho_s = \frac{\lambda_f}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1) \cdot K \cdot C(U)$$

[λ_f , λ 是 ^{238}U 自发裂变常数及 α 衰变常数, t 是样品的年龄, K 是几何因子, $C(U)$ 是样品的铀含量, ρ_s 是自发裂变径迹密度]。上式 $\lambda_f = 8.46 \times 10^{-17}\text{a}^{-1}$ ^[14], $\lambda = 1.5513 \times 10^{-10}\text{a}^{-1}$ ^[15],

表 3 吉林 1 号陨石通过大气层的烧蚀

样品	通过大气后深度 $x_1(\text{cm})$	测量的径迹密度* $\rho_{01}(x_1)(\text{cm}^{-2}0.4\text{Ma}^{-1})$	修正的径迹密度 $\rho(\text{cm}^{-2}\text{Ma}^{-1})$	通过大气前深度 $x_2(\text{cm})$	烧蚀厚度 $\Delta x = x_2 - x_1(\text{cm})$
A3	5.1	320	1.5×10^3	20	14.9
A5	8.6	230	650	22.5	13.9
A7	12.3	345	1.5×10^3	19.5	7.2
A9	15.7	210	510	23.5	7.8
B4	6.2	150	510	23.5	17.3
B6	9.5	110	220	28	18.5
B8	12.8	230	1.1×10^3	20.5	7.7
B47	12.6	245	1.2×10^3	20	7.4
B51	5.8	185	760	22.5	16.7

* $\rho = \frac{2.9}{0.4} (\rho_{01}(x_1) - \rho_0)$ 用 ρ_0 (钻孔 A) = 140cm^{-2} 和 ρ_0 (钻孔 B) = 80cm^{-2} .

$t = 3.9 \times 10^9 \text{a}^{[13,16]}$, $K = 4.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-2}$. Pellas 等也是用这些值计算橄榄石中的铀含量的。把我们测定的橄榄石的铀含量 $C(\text{U}) = 0.12 \pm 0.06 \text{ppb}$ 代入上式, 得出橄榄石裂变径迹密度是 220 ± 110 径迹/ cm^2 . 该值与我们测定的钻孔内部样品径迹密度基本相吻合, 所以确认钻孔深部的径迹密度是由 ^{238}U 自发裂变产生的。有趣的是, 我们测定的裂变径迹密度 140 ± 20 径迹/ cm^2 (钻孔 A), 80 ± 30 径迹/ cm^2 (钻孔 B) 中没有 ^{244}Pu 的裂变径迹。这个结果和 Pellas 等测定的结果一致^[6]。

为了获得吉林陨石近表面样品的银河宇宙线径迹, 从测定的径迹密度中减去裂变径迹即可。图 5 和图 6 表明, 两个钻孔中吉林陨石表面样品银河宇宙线径迹是零, 只有钻孔 A 的“顶部”例外(图 1, A37)。钻孔 A “顶部”的径迹反映的是第一 (2π) 照射阶段的存贮, 这将在下面讨论。

3. 大气层的烧蚀和理论银河宇宙线径迹密度的深度剖面

根据实验径迹密度的深度剖面形状, 假设除裂变径迹外主要是第二 (4π) 照射阶段产生的银河系宇宙线径迹, 第二照射阶段大约是 $0.4\text{Ma}^{[2,4,12,13]}$ 。理论径迹密度的深度剖面是根据 Fleischer^[17] 和 Bhattacharya 等人^[18] 的径迹产率曲线确定的。利用吉林陨石通过大气层前的半径约 $85\text{cm}^{[12,13,19]}$, 确定 1 号陨石通过大气层的烧蚀厚度, 讨论理论曲线^[18]。因为理论曲线只给出了长石和辉石的银河系宇宙线径迹, 而实验径迹密度 ρ_{01} 是在橄榄石中测定的, 所以要乘以记录效率比, $\frac{1}{2} (\eta_{\text{长石}} + \eta_{\text{辉石}}) / \eta_{\text{橄榄石}} = 2.9^{[20]}$ 。这些理论曲线适合于可蚀刻径迹长度为 $10\mu\text{m}$, 吉林陨石中恰好测量到这种长度的径迹(图 7)。对钻孔近表面样品测定的径迹密度 $\rho_{01}(x_1)$ 要经过裂变径迹本底 ρ_0 (ρ_0 (钻孔 A) = 140 径迹/ cm^2 , ρ_0 (钻孔 B) = 80 径迹/ cm^2) 的修正, 并换算成宇宙线照射年龄为 1Ma 。用径迹密度

$$\rho(x_2) = \frac{2.9}{0.4} (\rho_{01}(x_1) - \rho_0)$$

可以从理论曲线导出半径 85cm 的吉林陨石母体通过大气层前样品的深度 x_2 。差值

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

对于钻孔中不同位置的样品应该是个常数, 它代表精确的大气烧蚀厚度(表 3)。表 3 给出了

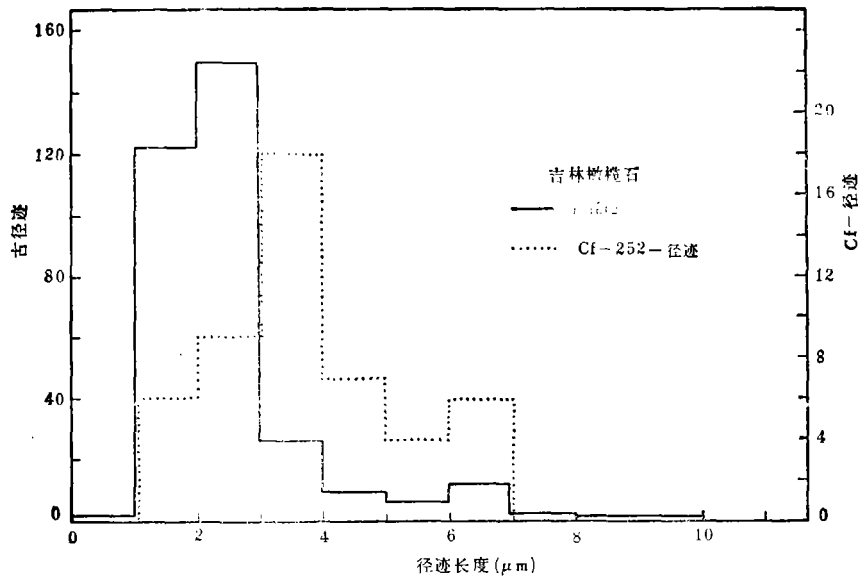


图 7 吉林陨石中橄榄石古径迹和 ^{252}Cf 裂变径迹长度分布曲线

吉林陨石通过大气层的平均烧蚀厚度 Δx (钻孔 A) $= 11 \pm 4\text{cm}$, Δx (钻孔 B) $= 14 \pm 5\text{cm}$. 因为样品 A27—A35 可能有第一 (2π) 照射阶段的径迹, 所以没有包括在 Δx 的计算中 (第 4 节). 每个样品通过大气层前的深度 x_2 是用测定样品通过大气层后的深度 x_1 , 即 $x_2 = x_1 + \Delta x$ 推导出来的. 理论径迹产率曲线指出了长石和辉石每一个百万年银河系宇宙线记录的效率 ρ_{thcor} . 从理论径迹密度的深度剖面得出的橄榄石中的径迹密度与测定的径迹密度相一致. 理论径迹密度与测定的径迹密度关系可采用以下公式表示:

$$\rho_{\text{ul}}(x_1) = \frac{0.4}{2.9} \rho_{\text{thcor}}(x_2) + \rho_0.$$

理论径迹密度的深度剖面如图 8 和图 9 的实线所示.

4. 讨论

图 8 和图 9 中给出了实验和理论径迹密度的结果及 Weber 等¹⁾测定的 ^{21}Ne , Heusser 等²⁾测定的 ^{60}Co 曲线. ^{60}Co 曲线可以确定第二 (4π) 照射阶段通过大气层前吉林陨石母体的中心. 沿钻孔的方向, 从表面样品 A1 到通过大气层后吉林陨石母体中心的深度是 47.4cm; 从表层样品 B1 到陨石母体中心的深度是 50.4cm. 在钻孔 A 中 (见图 8) ^{60}Co 的深度剖面与陨石母体中心是不对称的, 一种可能的解释是在钻孔 A 的“顶部”有较大块的陨石失落了 (见图 1). 按照这种解释, 钻孔这端应采用重于于裂变径迹本底上的理论径迹密度深度剖面. 所以, 样品 A25—A37 测定的径迹密度明显地高于理论径迹密度. 这些径迹密度的偏高不能归于第二 (4π) 照射阶段, 而是来自第一 (2π) 照射阶段.

^{21}Ne 对第一 (2π) 照射阶段很灵敏, 能清楚地反映样品在第一照射阶段 (约 10Ma) 吉林陨石母体内部的位置²⁾. 钻孔 A 的 ^{21}Ne 含量从 A1 向 A37 稳定增加, 说明了 ^{21}Ne 在第一 (2π)

1), 2) 私人通信 (1985).

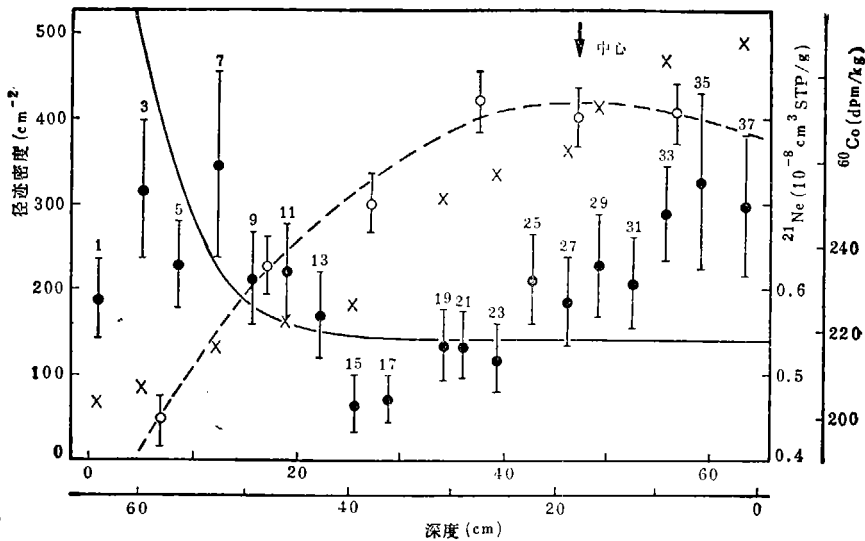


图 8 吉林陨石钻孔 A 实验和理论径迹密度

(—为理论剖面采用 $\Delta x = 11\text{cm}$, $\times$ —— ^{21}Ne 根据 Weber 等人, $\circ$ —— ^{60}Co 根据 Heusser 等人)

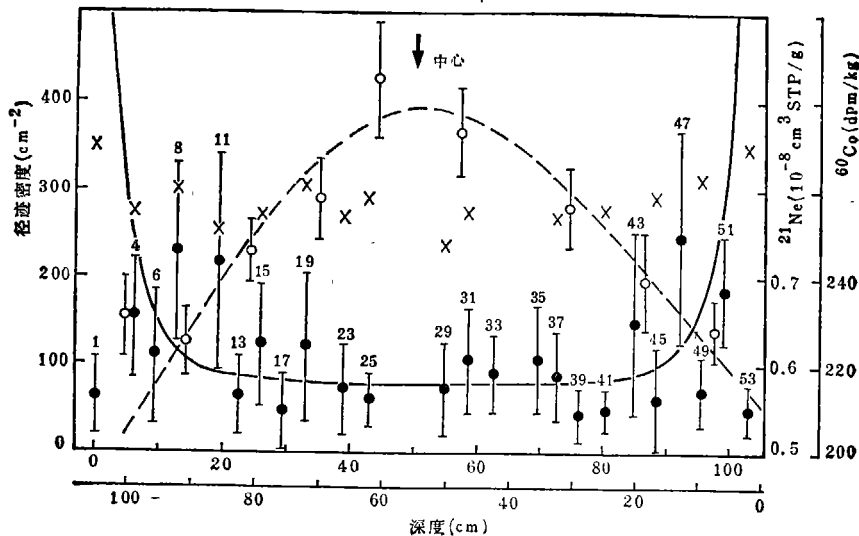


图 9 吉林陨石钻孔 B 实验和理论径迹密度

(—为理论剖面采用 $\Delta x = 14\text{cm}$, $\times$ —— ^{21}Ne 根据 Weber 等人, $\circ$ —— ^{60}Co 根据 Heusser 等人)

照射阶段已经加入到吉林陨石母体中(参看图 8)。钻孔 B 的 ^{21}Ne 含量基本不变。这表明钻孔 B 的确是平行于第一 (2π) 照射阶段母体的表面(见图 1)。但是钻孔 B 两端的 ^{21}Ne 含量稍有增加。这可归因于吉林陨石的第二 (4π) 照射阶段。事实上接近钻孔两端的样品 (B1, B4, B8, B45, B49 及 B53) ^{21}Ne 平均值 (约 $0.04 \times 10^{-8}\text{cm}^3\text{STP/g}$) 比内部的 ^{21}Ne 平均值 (约 $0.77 \times 10^{-8}\text{cm}^3\text{STP/g}$) 要高。对于可比较的深度来说,这两个值的比大约和两个照射阶段的时间比 (约 $0.4\text{Ma}/8\text{Ma}$) 相一致。

通过大量样品测定的径迹密度深度剖面与理论径迹密度深度剖面有明显的偏离 (参看图

8 和图 9), 除样品 A15 和 A17 明显地落在理论剖面以下外, 还有以下几处样品有偏离:

1. 钻孔 A 的“底部”(A1, A3, A5) 和钻孔 B 的两端(B1, B4, B6, B49, B51, B53) 测定的径迹密度比理论预期值低 10 倍以上。这意味着在钻孔 A 的“底部”大约 5cm 的表面样品和钻孔 B 的两端样品没有银河宇宙线径迹。这种现象可能是局部的热事件影响, 使银河宇宙线径迹退火, 只剩下比较稳定的裂变径迹。从吉林陨石中橄榄石的古径迹长度分布曲线(参看图 7)也可看到粒子径迹的退火现象。虽然初级宇宙线径迹长度的峰值通常较低^[17], 但是大量径迹长度为 $2.5\mu\text{m}$, 显然太短。尤其是橄榄石中的径迹包括银河宇宙线径迹和裂变径迹。为了解释实验径迹密度深度剖面的两边银河宇宙线径迹的消失和裂变径迹的幸存(参看图 8 和图 9), 需要有特殊的退火条件。Yabuki^[21] 根据 Yamato 74014 陨石中橄榄石宇宙线径迹退火的 Arrhenius 曲线指出, 橄榄石中银河宇宙线径迹完全消失的温度条件大约是,

$$T[K] = \frac{32100}{\ln t[s] + 38.3},$$

如在约 420°C 、加热 1h, 约 370°C 、加热 24h, 可出现银河宇宙线径迹全部消失的退火事件。考虑到吉林陨石通过大气层时的烧蚀厚度约 11—14cm (参看第 3 节), 可以预期测定的径迹密度深度剖面呈现短期加热事件, 只影响通过大气层前陨石母体表面大约 15—20cm 的深度。这个热事件必定发生在第二 (4π) 照射阶段银河宇宙线径迹的深度剖面已经形成的时间, 即不大于约 0.4Ma 前。Wagner^[22] 等测定的热释光表明, 在最后 33000a 期间, 吉林陨石熔壳约为 7cm 以下没有受到温度 $> 320^\circ\text{C}$, 时间 $>$ 数秒的照射。那么径迹退火事件必定比 33000a 要早。这种情况完全与 Müller 和 Jessberger^[16] 假设的热历史模型相吻合。

但是应指出, 一些实验结果之间尚有矛盾, 如 ^{60}Co 含量低的吉林陨石样品含有高的径迹密度, 而且径迹没有明显的退火现象^[6]。这个矛盾可能与吉林陨石表面的冲击加热作用不均匀, 表面冷的部位有可能保存已形成的径迹有关。

2. 钻孔 A “顶部”样品的实验径迹剖面与理论径迹剖面有明显的偏离(参看图 1 和图 8, 样品 A25—A37)。根据 ^{21}Ne 的测定^{[13]1)}, 钻孔 A “顶部”的样品接近第一 (2π) 照射阶段的陨石母体的表面。预期这些样品有第一阶段银河宇宙线径迹的贡献。从表 1 和裂变径迹本底计算得到样品 A37 的银河宇宙线径迹密度约 160 ± 80 径迹/ cm^2 , 与第二 (2π) 照射阶段陨石母体的中心距离是 16.2cm (63.6cm—47.4cm)。假设通过大气层前陨石母体对 ^{60}Co 的最大值是对称的(参看图 8), 可推得通过大气层前样品 A37 的埋藏深度约为 40cm (47.4—16.2 + 11cm)。根据 Bhattacharya 等^[19]的径迹产率曲线, 对于这种屏蔽深度的长石和辉石在 10Ma 大约产生 100 径迹/ cm^2 , 橄榄石产生约 30 径迹/ cm^2 , 相当于实验值(约 80 径迹/ cm^2)的下限。此外, A37 测定的径迹密度是 160 径迹/ cm^2 , 此值相当于在第一照射阶段 A37 的屏蔽深度约 30cm。

欧阳自远教授亲自提供了吉林 1 号陨石的钻孔样品, P. Pellas, G. Heusser, H. W. Weber, E. K. Jessberger 和 C. Perron 与我们进行了卓有成效的讨论并提出了有价值的建议, 此外, 我们的研究工作还得到了 Max-Planck 协会的部分资助。作者在此一并深表感谢!

1) 和 Weber 私人通信(1985)。

参 考 文 献

- [1] 吉林陨石雨论文集编辑组, 吉林陨石雨论文集, 科学出版社, 1979.
- [2] Begemann, F., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **72**(1985), 246—310.
- [3] Heusser, G., Kirsten, T. and Ries, D., *Meteoritics*, **14**(1979), 412—414.
- [4] Honda, M., Horie, K., Imamura, M. et al., *Geochem. J.*, **14**(1980), 83—89.
- [5] Honda, M., Nishiizumi, K., Imamura, M. et al., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **57**(1982), 101—109.
- [6] Pellas, P. and Bourot-Denise, M., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **72**(1985), 286—298.
- [7] Ouyang, Z., and Heusser, G. et al., *Abstracts of the 5th Int. Conf on Geochronology, Cosmochronologie and Isotope Geology*, Nikko, Japan, June 27-July 2, p 294—295. 1982.
- [8] Krishnaswami, S., Lal, D., Prabhu, N. and Tamhane, A. S., *Science*, **174**(1971), 287—291.
- [9] Wasson, J. T., *Meteorites, Their record of early solarsystem history*, Freeman, W. H. and Co., New York, 1985, 27.
- [10] Thiel, K., Herr, W. and Becker, J., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **16**(1972), 31—44.
- [11] Thiel, K., Saager, R. and Muff, R., *Nucl. Instr. Methods*, **173**(1980), 223—227.
- [12] Heusser, G., Ouyang, Z., Kirsten, T. et al., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **72**(1985), 263—277.
- [13] Begemann, F., Zhaoxue Li, Schmitt-Strecker, S. et al., *ibid.*, **72**(1985), 247—262.
- [14] Thiel, K. and Herr, W., *ibid.*, **30**(1976), 50—56.
- [15] Steiger, R. H. and Jager, E., *ibid.*, **36**(1977), 359—362.
- [16] Muller, N. and Jessberger, E. K., *ibid.*, **72**(1985), 276—285.
- [17] Fleischer, R. L., Price, P. B., Walker, R. M. et al., *J. Geophys. Res.*, **72**(1967), 331—353.
- [18] Bhattacharya, S. K., Goswami, J. N. and Lal, D., *J. Geophys. Res.*, **78**(1973), 8356—8363.
- [19] Ouyang Ziyuan, *Abstracts of the 5th Int. Conf. on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology*, June 27-july 2, 1982, Nikko, Japan, P 292—293.
- [20] Bagolia, C., Doshi, N., Lal, D. et al., *Nuclear Track Detection*, **2**(1978), 29—35.
- [21] Yabuki, H., *Jour. Fac. Sci.*, Hokkaido Univ., Ser IV, **18**, 85—104, 1978.
- [22] Wagner, G. A., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **72**(1985), 304—306.