

安徽亳县陨石研究*

王 奎 仁

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥)

摘 要

对亳县陨石进行了透明矿物、不透明矿物、球粒、穆斯堡尔谱、热释光、化学成分、同位素年龄、包裹体、力学性态的实验、古磁场特性等研究; 确定了透明矿物 16 种; 确定了不透明矿物 12 种, 其中包括新矿物——张衡矿; 确定了亳县陨石的化学群为 LL, 岩石类型为 3—4 之间的过渡型; 对玻璃质球粒及球粒中玻璃质基质进行了研究与解释; 对主要的球粒结构类型进行了成因上解释; 对该陨石的形成与演化过程也进行了讨论。

关键词: 亳县陨石, 陨石演化过程

亳县陨石于 1977 年 10 月 20 日下午 2 时 30 分左右降落于安徽亳县张沃公社齐子门大队。1 号陨石重 5.5kg, 近似锥体(图版 1, 1), 降落于小阎庄的西南约 200m 处, 经度为 $115^{\circ}33'$, 纬度为 $33^{\circ}53'$ 。2 号陨石重约 2kg, 为椭球体, 降落于齐子门大队齐楼庄阎国民家的院内, 经度为 $115^{\circ}34'$, 纬度为 $33^{\circ}54'$ 。这两块陨石在空中运行方向均为 SW—NE 45° , 均具明显的球粒结构, 表面为灰黑色, 烧蚀层约 0.5mm 厚, 气印发育。1, 2 号陨石的密度分别为 $3.426\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $3.419\text{g}/\text{cm}^3$ 。

一、透明矿物研究

初步查明该陨石的透明矿物有镁橄榄石、贵橄榄石、透铁橄榄石、古铜辉石、顽火辉石、斜顽辉石、斜紫苏辉石、顽火透辉石、易变辉石、斜长石、正长石、白磷钙矿、石英、黑云母、白云石、方解石、刚玉等。橄榄石颜色多种, 其形态有自形、半自形、骸晶等, 无论是球粒或基质都能见到它呈环带结构, 这表明从镁橄榄石到贵橄榄石连续的演化过程。对橄榄石进行了 87 个电子探针分析, 其 Fa 值主要是集中于 24—29% (图 1), 但绝大多数为 27—29% (51 个样品)。橄榄石中 MnO 的含量较为稳定, 主要变化范围为 0.30—0.45%, 它随着 FeO 含量增高而增高。Cr₂O₃ 的含量为 0—4.87%。Al₂O₃ 的含量较低, 绝大多数为 0—0.06%, 极少数为 0.10—0.60%。辉石的颜色也是多种, 形态有自形、半自形。对它进行了 50 个电子探针分析, 其 Fs 值变化范围为 9—28% (图 2)。辉石中 MnO 的含量由 0.09—0.63%, Cr₂O₃ 的含量较橄榄石稳定, 一般为 0.20—0.95%, 斜方辉石与低钙单斜辉石中 Al₂O₃ 的含量较低, 为 0.12—0.36%,

1987 年 2 月 25 日收到修改稿。

* 参加本项工作的还有: 王俊新(部分矿物 X 射线分析); 杨海涛(穆斯堡尔谱、热释光); 刘京发(热释光); 李彬贤、顾靖飞、张翼(化学成分); 满发胜、白玉珍、倪守斌(钾-氩年龄与暴露年龄); 彭子成(铀-铅年龄和铅同位素); 郭范、吕选忠、葛宁洁(包裹体); 席道瑛、谢端(物理力学性态); 席道瑛、周桃秀(古磁场特性)。

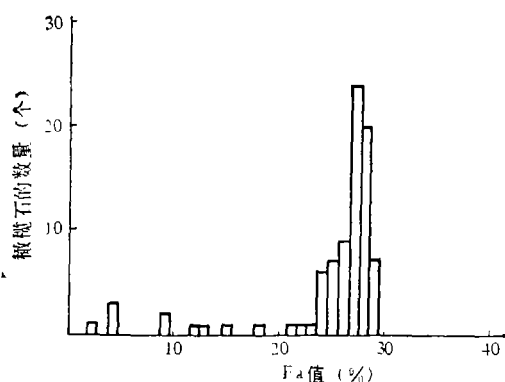


图1 橄榄石的数量与 Fa 值的关系

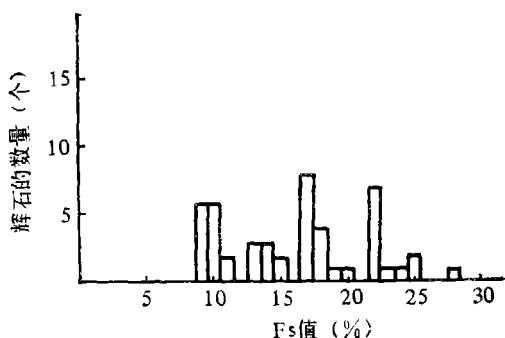


图2 辉石的数量与 Fs 值的关系

而顽火透辉石中 Al_2O_3 含量较高, 为 7.99—10.68%。斜长石与正长石都是呈微晶集合体出现, 在薄片下很难发现, 用 X 射线衍射方法易发现斜长石的特征线, 在全岩破碎的样品中能发现呈粘土状微晶集合体颗粒。斜长石的电子探针分析为: SiO_2 51.37%, K_2O 1.85%, Na_2O 7.42%, CaO 4.20%, Al_2O_3 27.13%, MgO 3.82%, FeO 2.80%, TiO_2 0.85%, Cr_2O_3 0.53%, MnO 0.07%; 正长石的电子探针分析为: SiO_2 64.95%, K_2O 16.14%, CaO 0.30%, Al_2O_3 18.33%, MgO 0.13%, FeO 0.17%, TiO_2 0.02%, MnO 0.10%。石英有两种产状, 一种为不规则粒状, 另一种为极细的颗粒与长石微晶集合体胶结在一起。其成分为 SiO_2 94—98%。方解石也有两种产状, 一种呈菱面体解理, 另一种为粘土状白色粉末, 均为 X 射线所证实。白云石的成分为: CaO 30.78%, MgO 20.28%。黑云母经电子探针和 X 射线证实, 其多型为 1M。刚玉为浅黄色, 其成分为: Al_2O_3 98.63%, TiO_2 1.33%。

二、不透明矿物研究

不透明矿物有陨硫铁、铁纹石、镍纹石、铬铁矿、镁铁尖晶石、钛铁矿、镍黄铁矿、石墨、自然铜、张衡矿(新矿物)、未知 X 矿物、方铁矿、磁铁矿等。陨硫铁为自形、半自形以及聚晶集合体等, 且双晶发育, 有接触双晶、穿插双晶、环状双晶、聚片双晶等。其电子探针分析: Fe 64.53—65.70%, S 34.51—35.42%, Co 0.02—0.05%, Ni 0.00—0.19%。铁纹石与镍纹石密切连生, 铁纹石的探针分析: Ni 2.79—13.25%, 接近熔壳部分为 14.887%。镍纹石的含 Ni 量为 25.58—56.19%。铬铁矿呈自形, 产状多种, 5 个样品的探针分析平均值为: Fe 33.54%, Cr_2O_3 59.40%, TiO_2 1.75%, MgO 1.61%, Al_2O_3 2.71%, MnO 0.50%, CaO 0.16%, SiO_2 0.31%, P_2O_5 0.06%。钛铁矿呈自形、半自形, 有时见有聚片双晶, 产状多样, 4 个样品探针分析的平均值为: FeO 43.57%, MgO 2.78%, MnO 0.81%, TiO_2 52.01%, Cr_2O_3 0.15%, Al_2O_3 0.01%, CaO 0.01%, SiO_2 0.27%。镁铁尖晶石和未知 X 矿物的含量极少, 它们均呈包裹体形式分布于贵橄榄石中, 镁铁尖晶石的探针分析: FeO 16.77%, Cr_2O_3 10.69%, Al_2O_3 53.10%, MgO 17.10%, SiO_2 0.10%, CaO 0.002%, MnO 0.06%; 未知 X 矿物的探针分析为: FeO 16.28%, Cr_2O_3 2.23%, Al_2O_3 9.69%, MgO 38.37%, SiO_2 25.61%, Na_2O 0.08%, CaO 1.42%, MnO 0.11%, SO_3 0.13%。镍黄铁矿含量

极少, 呈脉状穿切陨硫铁, 探针分析: Ni 25.29%, Fe 46.50%, Co 0.33%, S 31.91%。自然铜在该陨石中分布极不均匀, 含量也极少, 呈粒状、不规则粒状、片板状、U 形状、V 形状、链状、锯齿状等, 6 个样品的探针分析: Cu 94.12—98.81%, Fe 1.45—2.66%, Co 0.00—0.03%, Ni 1.26—2.40%, S 0.08—0.22%。石墨含量极少, 但在铁纹石、镍纹石、陨硫铁中均有出现。方铁矿除了少量出现在熔壳中外, 其大部分在该陨石不同部位均有出现。张衡矿 (Zhanghengite) 是这次在亳县陨石中发现的新矿物, 1985 年 12 月 8 日由国际矿物协会新矿物及矿物命名委员会通过及批准。它为等轴体心格子, 空间群为 $Im\bar{3}m$, 属无序结构。主要成分为 Cu, Zn, 含有 Fe, Al, Cr, Ni 等微量元素, 理论化学式为 $CuZn$, $z = 1$ 。它呈粒状、不规则粒状、树枝状。粒度大小为 $0.13 \times 0.15 - 0.35 \times 0.1 \text{ mm}^2$, $VHN = 145 - 150 \text{ kg/mm}^2$ (10g 负荷), 密度 $D_{(\text{计算值})} = 8.32 \text{ g/cm}^3$, $a = 2.952(2) \text{ \AA}$, $v = 25.72 \text{ \AA}^3$ 。

三、球粒研究(见图版 I)

亳县陨石的球粒分布均匀, 一般球粒直径为 0.5—1.5mm, 绝大部分为圆度极好的球粒, 其次为椭球形、葫芦形等。通过 X 射线衍射分析、电子探针分析、显微镜鉴定等得出其物相类型为: (1) 全部由橄榄石组成; (2) 全部由辉石组成; (3) 以斜顽辉石为主+极少量古铜辉石+少量橄榄石组成; (4) 以斜长石和顽火透辉石为主+部分斜顽辉石组成; (5) 以古铜辉石为主+少量斜顽辉石组成; (6) 以橄榄石为主, 斜顽辉石为辅组成的; (7) 以橄榄石为主+部分顽火透辉石+部分古铜辉石+部分斜长石组成; (8) 陨硫铁球粒; (9) 陨硫铁与铁纹石、镍纹石组成; (10) 铁纹石与镍纹石组成; (11) 陨硫铁、铁纹石、镍纹石、铬铁矿共同组成。通过薄片观察, 确定其结构类型有: 斑状结构、粒状结构、炉条状结构、斧形结构、A 形结构、内旋结构、三角形结构、多边形结构、星射状结构、同心多层状结构、包含结构、骸晶结构、放射状

表 1 亳县陨石的穆斯堡尔谱参数

样号	名 称	化学位移 mm/s	四极分裂 mm/s	面 积 比
1	辉 石 M_2	1.14 ± 0.01	2.11 ± 0.01	48.5
	橄 榄 石	1.15 ± 0.01	2.97 ± 0.01	41.5
2	1 号陨石的球粒			
	辉 石 M_2	1.15 ± 0.01	2.11 ± 0.01	48.0
	橄 榄 石	1.15 ± 0.01	2.95 ± 0.01	43.0
3	2 号陨石的球粒			
	辉 石 M_2	1.14 ± 0.01	2.10 ± 0.01	44.0
	橄 榄 石	1.15 ± 0.01	2.95 ± 0.01	47.5
4	1 号陨石全岩			
	辉 石 M_2	1.15 ± 0.01	2.13 ± 0.01	21.5
	橄 榄 石	1.15 ± 0.01	2.95 ± 0.01	61.5
	陨 硫 铁	0.75 ± 0.02	-0.18 ± 0.04	17.0
5	2 号陨石全岩			
	辉 石 M_2	1.14 ± 0.01	2.13 ± 0.01	26.0
	橄 榄 石	1.15 ± 0.01	2.95 ± 0.01	54.0
	陨 硫 铁	0.76 ± 0.02	-0.19 ± 0.03	20.0

扇形结构、山峰状结构、海绵陨铁结构、棋盘状结构、片晶状结构、束状结构、玻璃质结构、脱玻结构、重叠结构、复合结构等。

四、穆斯堡尔谱研究

本文对亳县陨石的辉石、橄榄石以及球粒和全岩的穆斯堡尔谱进行了研究,其谱参数见表 1。1 号样品辉石中的橄榄石是由于辉石中的样品不纯所引起的。因该样品经稀盐酸处理后,再经 X 射线分析,其橄榄石特征线消失,又经穆斯堡尔谱仪测试,发现其所谓 M_1 峰也消失,这就证明了该辉石只存在 M_2 峰。1 号陨石的球粒与 2 号陨石球粒,各自的面积比不同是由于这两个球粒中彼此含辉石和橄榄石的量比不同所引起,即使在同号陨石中不同的球粒也能出现上述情况。1 号陨石与 2 号陨石的全岩中彼此相同矿物相的面积比不同也是由于各矿物相含量的差异所引起,在同号陨石全岩中的不同部位取样也同样能出现上述情况。

五、热释光研究

陨石在通过大气层时,由于大气的加热作用在表面数毫米的范围内产生了一定的温度分

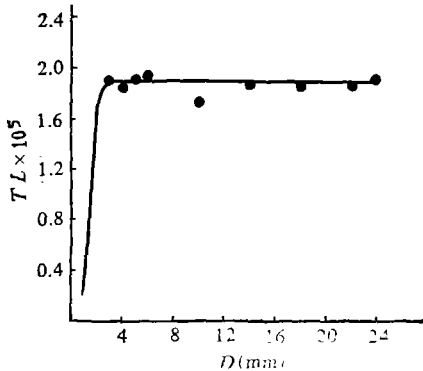


图 3 1 号陨石头部热释光与距熔壳深度的关系

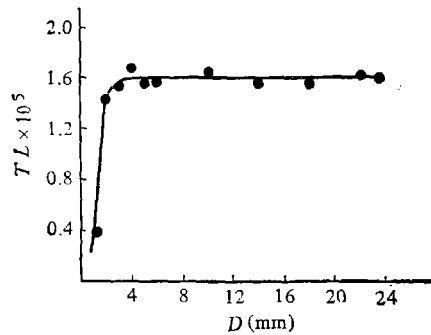


图 4 1 号陨石边部热释光与距熔壳深度的关系

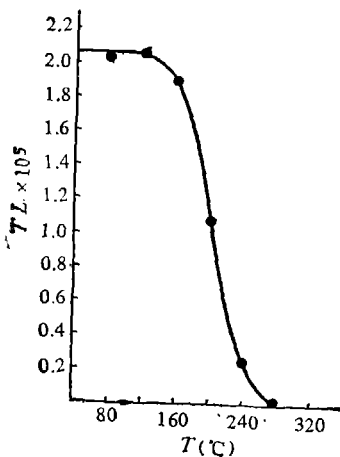


图 5 大气加热模拟实验数据表明热释光量与温度的关系图

布,通过这种温度分布状况的研究,可以对陨石进行复原工作,以及运行轨道的计算和烧蚀速率的估算等都能提供一定的参考数据,在陨石对比研究中也具有一定的意义。

亳县陨石由自然热释光测定数据,分别作出头部和边部样品热释光量与深度的关系曲线(见图 3, 4),由曲线可见,在陨石近表面处明显地存在着一个热释光的梯度。

由大气加热模拟实验数据作出热释光量与温度的关系曲线(图 5),该曲线反映了随温度的升高热释光减少,当温度低于 120°C 时,热释光几乎不变,而温度超过 300°C 时热释光已完全消除。分别将图 3 与图 5,图 4 与图 5 中的数据进行代换,获得一组温度与深度之间关系的数据,用最小二乘法处理数据,所拟合的

直线分别为:

$$\text{头部 } T = 252.6 - 34.2D, \text{ 相关系数 } r = 0.9649,$$

$$\text{边部 } T = 245.4 - 24.8D, \text{ 相关系数 } r = 0.9425,$$

因此,用热释光测得亳县陨石通过大气时产生的温度梯度值为: 头部 $G = 34.2^{\circ}\text{C}/\text{mm}$; 边部 $G = 24.8^{\circ}\text{C}/\text{mm}$.

六、化学成分研究

对 1 号和 2 号陨石分别进行了全岩化学分析, 计算了化学参数和标准矿物成分^[1] (见表 1—3).

表 1 亳县陨石化学成分

成分 (wt%)	1 号陨石	2 号陨石	成分 (wt%)	1 号陨石	2 号陨石
SiO ₂	40.78	40.35	Fe ^o	4.39	4.24
MgO	25.98	25.78	Ni	1.22	1.21
FeO	15.39	15.13	Co	0.064	0.062
Al ₂ O ₃	2.15	2.15	Cu	0.009	0.009
CaO	1.25	1.25	Zn	0.009	0.009
Na ₂ O	1.12	1.10	FeS	6.50	7.57
K ₂ O	0.03	0.03	C	0.08	0.08
Cr ₂ O ₃	0.51	0.48	H ₂ O ⁺	0.07	0.07
MnO	0.27	0.27	H ₂ O ⁻	0.14	0.14
TiO ₂	0.15	0.15	合 计	100.17	100.19
P ₂ O ₅	0.25	0.25	TFe	20.43	20.81

表 2 亳县陨石的主要化学参数

化学参数	1 号陨石	2 号陨石	化学参数	1 号陨石	2 号陨石
Fe/SiO ₂	0.50	0.52	Si/Mg	1.05	1.05
SiO ₂ /MgO	1.57	1.57	Fe/Si	0.54	0.55
Ni/SiO ₂	0.030	0.030	Fe ^o + Fe ^s /Si	0.22	0.24
Co/SiO ₂	0.0016	0.0015	Fe _{ox} /Si	0.319	0.32
Fe ^o /Fe	0.21	0.20			

表 3 标准矿物百分含量计算值及实测值

矿物名称	含量(wt%)计算值	含量(wt%)实测值	矿物名称	含量(wt%)计算值	含量(wt%)实测值
橄 榄 石	48.16	35.57	陨 硫 铁	6.50	7.93
辉 石	27.48		铁纹石 + 镍纹石	5.56	5.10
斜 长 石	10.55		铬 铁 矿	0.67	0.70
钾 长 石	0.17		钛 铁 矿	0.30	0.20
白磷钙矿	0.62		方 铁 矿		0.50

七、同位素年龄研究

1. K-Ar 年龄与 Ar³⁸ 暴露年龄 在该陨石不同部位取了 5 个样品, 测 Ar 是采用同位素稀释法, K 的测定应用原子吸收法, 所获得的 K-Ar 年龄为 $21 \times 10^2 \text{Ma}$, Ar³⁸ 暴露年龄集中

在 16Ma.

2. 铀铅同位素年龄测定 对该陨石全岩和四个分离相(矿物)的测定, 得出该陨石母体形成的 Pb-Pb 年龄为 $(4.54 \pm 0.01) \times 10^9 \text{a}$, 由该陨石内部等时线求得年龄为 $(4.48 \pm 0.02) \times 10^9 \text{a}$. 据 U-Pb 数据得到一致曲线上交点年龄为 $(4.54 \pm 0.02) \times 10^9 \text{a}$, 此值与陨石母体形成 Pb-Pb 年龄一致, 而下交点为 $0.4 \times 10^9 \text{a}$.

八、包裹体研究

该陨石包裹体主要有三种类型, 即熔融固化玻璃包裹体、熔融晶质包裹体和气相包裹体. 熔融玻璃包裹体的主要成分是玻璃, 多数呈淡红和棕红色, 以圆形和椭圆形为主, 长轴 3—5 μ , 多数已脱玻化, 主要分布于橄榄石中. 熔融晶质包裹体是矿物结晶时被捕获后结晶成的矿物. 气体包裹体有气相和气固两相两类, 普遍较小. 气-液-固三相或气-液二相包裹体则较少. 用淬火法测定橄榄石和辉石的熔融包裹体的均一温度为 1050—1250 $^{\circ}\text{C}$.

九、力学性态的实验研究

对亳县陨石抗压强度、弹性模量、泊松比、品质因素、弹性波速度、孔隙度等进行了严格的测试. 该陨石的应力-应变全程曲线见图 6. 通过应力-应变曲线的测量求得: 抗压强度为 302 kg/cm^2 ; 弹性模量 = $2.55 \times 10^3 \text{kg}/\text{cm}^2$; 泊松比 = 0.204. 可见亳县陨石抗压强度比一般球粒陨石都要低, 弹性模量也低, 都接近于砂岩. 其泊松比接近于硬砂岩. 该陨石的品质因素 $Q = 22.15$, 与大理岩、砂岩的 Q 值相近, 具有非常弹性性质, 可以称这种具有一定衰减的陨石为粘弹性体. 通过对弹性波速度测量得出: $v_p = 2481 \text{m/s}$; $v_s = 1706 \text{m/s}$. 它的纵波速度比一般陨石低, 而横波速度却相对地高一些. 总孔隙度为 10.15%, 也接近于砂岩的孔隙度.

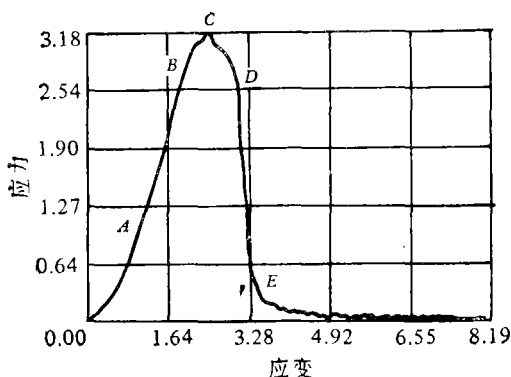


图 6 亳县陨石应力-应变曲线

十、古磁场特性的探讨

通过交变退磁处理, 消除了等温剩磁和粘滞剩磁的影响. 从图 7 的交变退磁曲线看出, 剩磁的稳定成分与剩磁的粘滞成分的方向是相反的, 导致退磁曲线向上, 使磁化强度有稍微的增加, 当交变磁场峰值达到 50 Oe 时, 增长到初始天然剩余磁化强度值的 9% 左右, 然后稍有一

些衰减,在交变磁场峰值为 550—1000 Oe 时,磁场强度趋于稳定。亳县陨石是具有稳定的剩磁。热退磁结果见图 8。该陨石的天然剩余磁性为 $720.46 \times 10^{-6} \text{emu/c.c.}$,比吉林陨石几乎低两个量级,当温度从室温上升到 200°C 时,其实、虚两曲线均同步下降,这是由于该陨石降落后存放时间较长之故,因受地磁场的重磁化而产生

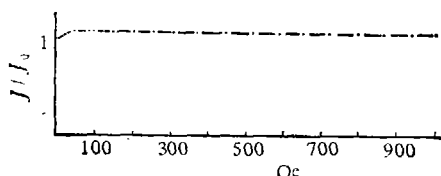


图 7 亳县陨石交变退磁曲线

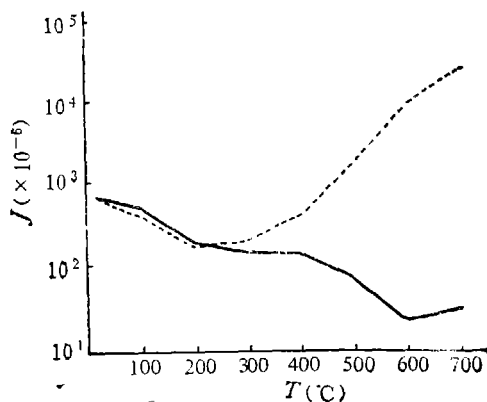


图 8 亳县陨石热退磁曲线

(图中实线表示在无磁空间中冷却的曲线,虚线表示在现代地磁场中冷却曲线)

生的粘滞磁性的结果。在 200°C 后, 300°C 前逐渐出现了稳定成分,在无磁空间中冷却时,其剩磁继续下降,而在地磁场中冷却时,剩磁性反而增高,这部分磁性的获得是受地磁场的强度的控制,这也说明地磁场强度比陨石所在天体的原始磁场要强,当温度升高到 600°C 时,样品在无磁空间中冷却后的磁性已很弱($23.9 \times 10^{-6} \text{emu/c.c.}$),这说明该陨石中主要磁性矿物的居里点温度低于 600°C ,仔细分析该曲线,可能还有从 $400\text{—}600^\circ\text{C}$ 一系列居里点温度。看来该陨石在 $300\text{—}500^\circ\text{C}$ 磁性是比较稳定的,分别采用了 300°C , 400°C , 500°C 时在不同条件下得到的剩余磁性值,而计算出陨石母体磁场强度平均值为 $(2.86 \pm 0.04) \times 10^{-2} \text{Oe}$ 。

十一 讨 论

1. 亳县陨石的化学群为 LL, 其依据^[2,3]: (1) 橄榄石的 Fa 值绝大多数为 27—29%; (2) 1 和 2 号陨石的密度为 3.426g/cm^3 和 3.429g/cm^3 ; (3) 该陨石的化学参数: $\text{Fe}/\text{SiO}_2 = 0.50, 0.52$; $\text{Fe}^\circ/\text{Fe} = 0.21, 0.20$; $\text{SiO}_2/\text{MgO} = 1.57$; (4) 根据 $(\text{Fe}_{(\text{金属相})} + \text{Fe}_{(\text{硫化物相})})/\text{Si}_{(\text{原子比})}$ 与 $\text{Fe}_{(\text{氧化物相})}/\text{Si}_{(\text{原子比})}$ 的关系图(见图 9), 亦落在 LL 群范围。

2. 亳县陨石的岩石类型应为 3 型与 4 型之间的过渡型, 其依据: (1) 大多数橄榄石成分均匀化,但也有少数 Fa 值的变化范围是大于 5% 的平均偏差(见图 1); (2) 辉石的 Fs 值的平均偏差也是大于 5% (见图 2); (3) 有较多的低钙单斜辉石存在,但斜方辉石还是多于单斜辉石; (4) 次生长石是以微晶集合体为主; (5) 有一定数量的均质原生玻璃存在; (6) 球粒轮廓很分明; (7) 碳的总含量为 0.08%。据上述特点与典型^[2]的 3 型或 4 型均不相符。

3. 由本文对玻璃质结构球粒及玻璃质基质研究得出, 凡是呈玻璃质结构球粒出现的都是辉石成分。而在斑状结构、炉条状结构以及同心多层状结构中的玻璃质基质成分为具有斜长石成分或接近斜长石成分,以及具有一定的 MgO , FeO , Al_2O_3 , 而 K_2O , Na_2O , CaO 含量是很低的玻璃质。由于辉石的内部结构复杂,由 $[\text{SiO}_4]$ 四面体以角顶相连成单链,平行 c 轴延伸,链间由中小阳离子 M_1 和较大阳离子 M_2 构成八面体和多面体组成的链联结,而且等效点

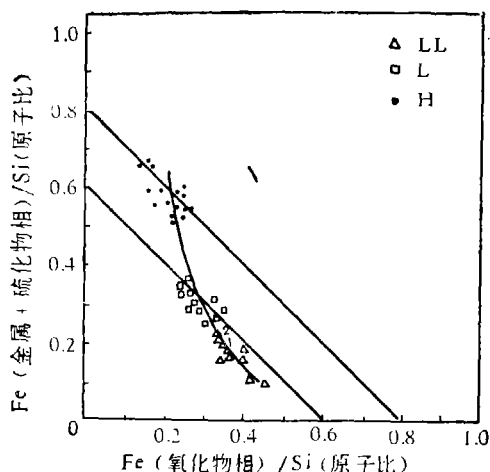


图9 球粒陨石中还原的金属相、陨硫铁相及氧化物相之间铁的分布

($\Delta 1$ 和 $\Delta 2$ 为亳县陨石的投影位置;据文献[3]简化)

系套数也多,对称程度也低,为单斜晶系(陨石中斜方辉石通常认为是由单斜辉石通过热变质作用转变而来的)。因此具辉石成分的熔融小液滴在快速冷却时其内部原子是来不及作有规则的排列,不能形成晶质矿物,只能形成玻璃质。而具有斜长石成分的玻璃质基质的形成也是斜长石的内部结构更为复杂、对称程度更低(三斜晶系)所致。

4. 亳县陨石的形成与演化过程 根据铅同位素研究,得知亳县陨石母体形成年龄为 $(4.54 \pm 0.01) \times 10^9 \text{a}$,也就是说在 $45.4 \times 10^3 \text{Ma}$ 前,该陨石母体还未形成,但其太阳星云物质已发生分馏及凝聚,其凝聚过程如下:(1) 难熔元素矿物形成: 铬铁矿、镁铁尖晶石、钛铁矿、刚玉、石墨等是亳县陨石中最早的凝聚矿物,它们都呈完好的自形晶,被包裹在橄榄石、辉石、铁纹石、镍纹石、陨硫铁中。据前人资料^[4,5],这些矿物是在 1320°C 以上凝聚;(2) 金属—硅酸盐分馏阶段: 随着太阳星云物质凝聚温度进一步降低,该陨石中镍纹石、铁纹石、自然铜、张衡矿相继形成。据前人资料及有关相图^[5,6]可推测它们可能的凝聚温度为 $1320-850^\circ\text{C}$;(3) 主要矿物相——硅酸盐相形成: 根据辉石地质温度计计算,该陨石中辉石的凝聚温度为 $1000-1200^\circ\text{C}$,这与橄榄石和辉石熔融包裹体测温的均一温度($1050-1250^\circ\text{C}$)是吻合的,在 1200°C 左右,星云物质凝聚出镁橄榄石、单斜辉石,当温度降低到 $830-730^\circ\text{C}$ 时,斜长石、正长石、白磷钙矿、石英开始凝聚^[4];(4) 硫化物相形成: 据本陨石陨硫铁差热分析得知在 520°C 有一吸热谷(见图 10),这是陨硫铁晶格破坏所致,因此陨硫铁的凝聚温度也近似此温度值。陨硫铁的形成是由于星云内部残留有大量的 H_2S , H_2 和 H_2O 等气体与已凝聚铁镍金属起反应而形成的^[4,7]。镍黄铁矿也是依上述方式形成,在光片中见到它呈脉状穿切陨硫铁,可知它的凝聚温度决不会高于陨硫铁。

星云物质的上述四个凝聚阶段是相当复杂的,很难用一种成因观点来解释,这可以从球粒结构的多样性得到证明。不同球粒结构反应了不同的物理化学环境,具橄榄石成分的熔融小液滴在快速冷却条件下可以形成骸晶,如炉条状结构与棒状结构;具橄榄石和辉石成分的小液滴在缓慢冷却条件下可以形成全晶质粒状结构球粒;斑状结构球粒中的斑晶是反映小

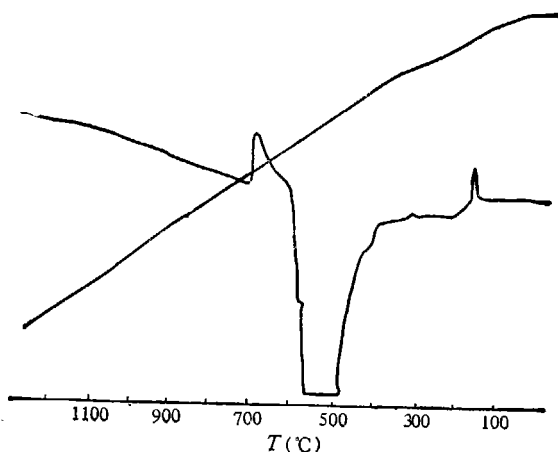


图 10 亳县陨石中陨硫铁的差热分析曲线图谱
(测试者 刘双怀)

液滴在缓慢冷却时形成的,而斑状结构球粒中的玻璃质是反映快速冷却的产物。但有以下几种情况:1)若球粒原始成分只具有橄榄石和辉石成分时,当在晶出橄榄石时是处于缓慢冷却阶段,还没有降低到辉石的晶出温度时,该物理化学环境突变,因而形成了具有辉石成分的玻璃质基质;2)若球粒原始成分具有橄榄石、辉石以及斜长石成分时,在晶出橄榄石和辉石时是处于缓慢冷却阶段,当还没有降低到斜长石的结晶温度时,该物理化学环境发生突变,因而形成了具有斜长石成分或近似斜长石成分的玻璃质基质;3)其它不同物相的斑晶和不同组分的玻璃质基质也是类似上述情况产生的。内旋结构、三角形结构、多边形结构等球粒都是反映熔融小液滴在冷却凝聚时是处于旋转状态下形成的。重叠结构球粒的产生是由于球粒之间可以相互碰撞,即固态球粒与液态球粒的碰撞、固态球粒与可塑性半固态球粒的碰撞、可塑性半固态球粒彼此之间的碰撞,所有这些都形成重叠结构球粒。重叠结构球粒再经历上述过程则形成多球粒重叠结构。

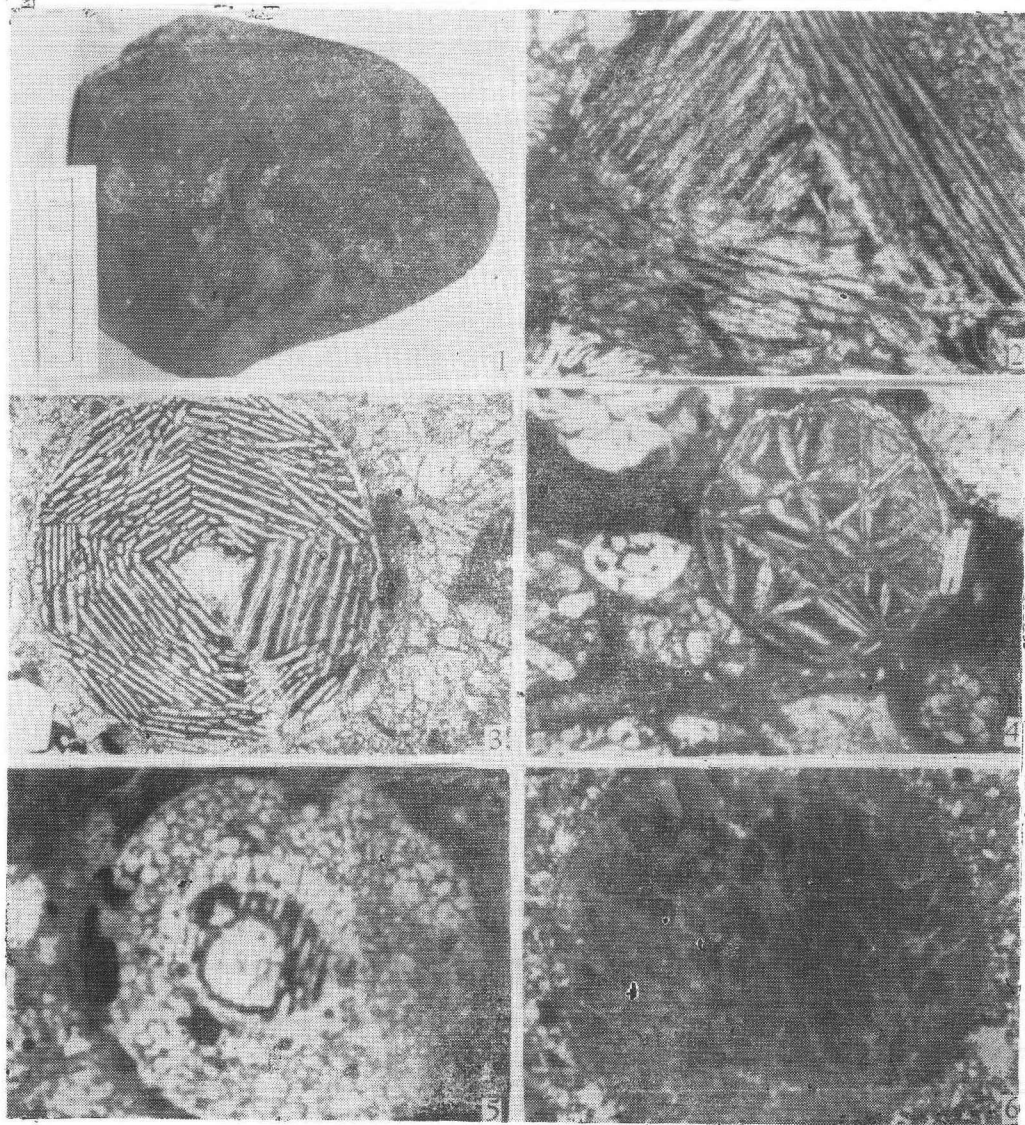
无论是球粒或是基质都是经过上述四个阶段的凝聚过程,一部分形成液滴,经冷却而形成球粒,另一部分凝聚为尘埃状晶体而成为基质,然后球粒和基质经过吸积而成为陨石初始母体,也就是在距今 $45.4 \times 10^2 \text{Ma}$ 形成了亳县陨石的初始母体。初始母体形成之后,又发生了一系列的演化:(i)热变质作用:热变质作用使亳县陨石中大部分橄榄石成分均匀化;使辉石中 Fe^{2+} 离子有序化;使单斜辉石转变成斜方辉石;使重叠球粒中见有后来生长的一组光性方位相同的辉石穿切整个重叠球粒;使极少数球粒轮廓消失;使陨硫铁重结晶、颗粒变大、晶形完好;使玻璃质球粒脱玻。热变质作用导致球粒演化过程为:玻璃质球粒→羽毛状、针状、放射状雏晶→放射状扇形结构或束状结构→板条状结构;斑状结构(玻璃质基质是辉石成分)→粒状结构。在此需要说明的是亳县陨石中不是所有的板条状辉石都是由放射状扇形结构辉石演变而来的,也不是所有的粒状结构都是由斑状结构演变而来的。同时铅同位素研究也得出亳县陨石的初始母体形成后约 $0.1 \times 10^9 \text{a}$ 有一次热事件,以及距今 $0.4 \times 10^9 \text{a}$ 还有另一次热事件。由 K-Ar 年龄得出距今 $21 \times 10^2 \text{Ma}$ 也有热事件发生,不过这 $21 \times 10^2 \text{Ma}$ 只能代表热事件发生年代的平均值概念。这些热变质作用的产生可能是由于母体内 U^{235} 的诱发裂变能、中等寿

期核素的衰变能和重力能使母体迅速加热^[4]以及可能为太阳辐射^[3]等所造成的。此外在热变质作用阶段,在外磁场中磁化,使亳县陨石获得古磁场强度约为 0.0286Oe,比现在行星际空间磁场大 10^3 倍左右;(ii) 冲击变质作用: 亳县陨石初始母体形成后,在太空中经过多次碰撞,从而发生了冲击变质。例如: 橄榄石、辉石、陨硫铁有明显的裂纹;部分辉石有明显的波状消光;辉石中出现一定数量的聚片双晶;脉状陨硫铁常见;金属球粒较多,形成了金属球粒群;有些球粒中见有错动现象;有些辉石中见有挤压与扭曲现象;有些矿物发生形变;(iii) 次生矿物生成阶段: 由于 LL 群陨石比 E, H, L 群具有更为氧化环境之故,因而产生了一些次生矿物,如出现了极少量的黑云母、方解石、白云石以及方铁矿等,本文中大部分方铁矿都不属于熔壳中的次生矿物,因在该陨石中不同的部位的光片中都见有方铁矿出现;(iv) 亳县陨石母体形成: 经测定亳县陨石的暴露年龄为 16Ma,也就是在距今 16Ma 前发生了一次较大的碰撞,导致了初始母体破碎,形成了亳县陨石的母体;(v) 陨落情况及其变化: 亳县陨石母体在形成后距今 16Ma 中,一直在太空中运行。直至 1977 年 10 月 20 日下午 2 时 30 分左右在安徽亳县降落,成为亳县陨石。由于该陨石和大气层相互作用,致使表面有明显的烧蚀现象,约有 0.5mm 厚的烧蚀层。在大气中由于 Fe^{2+} 迅速氧化成 Fe^{3+} ,因此在该陨石表面有磁铁矿及方铁矿产生。而且在陨石表面上铁、镍相对集中,如贵橄榄石变成了透铁橄榄石;铁纹石、镍纹石、陨硫铁的颗粒都有所增大。经热释光测定,距熔壳距离为 1mm 时其热释光损失最多,2—3mm 时损失较小,4—5mm 时其热释光基本不受影响,经计算其温度梯度值为: 陨石头部 $G = 34.2^\circ\text{C}/\text{mm}$; 陨石边部 $G = 24.8^\circ\text{C}/\text{mm}$ 。

本文电子探针分析是由地质科学研究所矿床研究所与马鞍山矿山研究院电子探针室协助完成,显微照像由周泰禧同志协助拍摄,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Wahl, W., *Miner. Mag.*, 29(1950), 416.
- [2] Van Schmus, W. R. and Wood, J. A., *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 31(1967), 747—765.
- [3] Wasson, J. T., *Meteorites*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1974, 18, 56, 175, 204.
- [4] 欧阳自远等, 地球化学, 1978, 1: 1—10.
- [5] Crossmen, L. and Clark, Jr. S. P., *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 37(1973), 635—647.
- [6] Hume Rothery, W. and Raynor, G. V., *The Structure of Metals and Alloys*, The Institute of Metals 17 Belgrave Square, London, 1962, 195.
- [7] 战新志, 地球化学, 1978, 1: 35—40.



1. 1号陨石；2. 三角形结构球粒，由橄榄石与辉石组成，正交偏光，视域长边1.55mm；3. 多边形结构球粒，由橄榄石组成，正交偏光，视域长边1.55mm；4. 星射状结构球粒，由橄榄石组成，正交偏光，视域长边1.55mm；5. 同心多层状结构球粒，正交偏光，视域长边2.64mm；6. 山峰状结构球粒，由玻璃质球粒经脱玻与波状消光所引起，正交偏光，视域长边1.55mm.