

# 风化作用对铁陨石矿物学特征影响的探讨

张翰林<sup>1,2</sup>, 李艳<sup>1</sup>, 王时麒<sup>1</sup>

(1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 中国地质大学 珠宝学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 本文对南丹 IIICD 铁陨石的矿物学特征进行了研究, 并与同为铁陨石但化学分类不同的阿根廷 IAB 铁陨石和西伯利亚 IIB 铁陨石进行了对比, 重点探讨了风化作用对铁陨石矿物学特征的影响。首先用偏光显微镜、静水称重、扫描电镜观察了样品的基本矿物学特征和微形貌特征, 然后用振动式样品磁强计、X 射线衍射与电子探针能谱半定量测试研究了样品的磁学性质、物相和化学组成。研究表明, 南丹铁陨石在较强的自然风化作用下, 光泽变弱为土状光泽, 相对密度降低; 风化产生的反铁磁性物质会使陨石的磁性下降; 另外, 样品表面物相组成也发生较大变化, 以针铁矿( $\text{FeOOH}$ )和磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )等铁的次生矿物为主; 但风化壳以下的矿物物相及化学成分均未发生明显变化, 以 Fe、Ni 为主的铁纹石、镍纹石物相存在。

**关键词:** 铁陨石; X 射线衍射; 磁性测试; 风化作用

中图分类号: P578.1<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)S2-0185-08

## The effects of weathering on the mineralogical characteristics of iron meteorites

ZHANG Han-lin<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>1</sup> and WANG Shi-qi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Gemology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In this paper, the authors studied the mineralogical, magnetic, phase and chemical composition characteristics of IIICD iron meteorite from Nandan, and compared this kind of meteorite with Argentine IAB iron meteorite and Siberian IIB Iron meteorite that belong to different chemical types, focusing on the weathering effects. The mineralogical characteristics of the sample were observed by means of polarizing microscope, hydrostatic weighing, and scanning electron microscope, and the magnetic properties, phases and chemical composition of iron meteorites were studied through vibrating sample magnetometer, X-ray diffraction and electron microprobe spectroscopy semi-quantitative test. The results show that weathering can change the mineralogical properties of iron meteorite. With the strongly weathered iron meteorites from Nandan as an example, the authors have found that the luster is weakened to earthy luster, and the relative density is reduced. Moreover, antiferromagnetic substances produced by weathering can reduce the magnetism of iron meteorite. In addition, mineral phases also change greatly with secondary minerals of iron being such main phases as goethite ( $\text{FeOOH}$ ) and magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Nevertheless, below its crust of weathering, the mineral phases and chemical composition have not changed significantly, and exist as kamacite and taenite phases dominated by Fe and Ni.

**Key words:** iron meteorites; X-ray diffraction; magnetism test; weathering

收稿日期: 2014-08-12; 修订日期: 2014-09-10

作者简介: 张翰林(1990-), 女, 汉族, 硕士研究生, 从事矿物学研究, E-mail: hanlinzhang\_1102@163.com; 通讯作者: 李艳, E-mail: liyan-pku@pku.edu.cn

陨石指从宇宙空间降落到地球表面并保持其原始结构的固态物质。据统计,每年降落到地球上的陨石约有 500 个,降落到陆地上的陨石仅有 150 个左右。但每年回收的陨石其实要比降落的陨石少得多,所以陨石是一种非常珍贵的宇宙物质(王道德, 1980)。陨石分为 3 个主要的种类:石陨石、铁陨石和石铁陨石。铁陨石主要由金属 Fe-Ni 组成,同时也可能含有硅酸盐和其它包体;石陨石主要由硅酸盐组成,大都是 Fe-Mg 硅酸盐,有时也含有少量金属 Fe-Ni;石铁陨石相对少见,它含有大量镍-铁合金及多种硅酸盐矿物(Anders, 1964)。

铁陨石代表的是行星经过核幔分异后的核产物,它们记载着行星早期分馏及后期演化的信息。因为铁陨石的化学成分与内地核的相近,故对于铁陨石的各研究也有助于了解内地核的信息,为认识内地核提供更加详尽的资料(陈永亨等, 1986)。我国陨石学在近十年迎来了一个高速发展时期,收集了超过 1 万块的南极陨石(林杨挺等, 2013),但对于国内铁陨石的关注并不多。前人曾对江西南丹地区的铁陨石的冲击压缩性、元素组成及分布做过研究(傅世勤等, 1989; 李学军等, 1992),但对风化作用

对铁陨石的影响并未提及。南丹铁陨石本携带着重要的宇宙信息,但在降落后经历了近 500 年物理化学环境的变迁,矿物学特征已有所改变。为研究风化作用对铁陨石矿物学特征的影响,本文对南丹铁陨石样品的基本矿物特性、物相和成分特征进行了详细研究,并与不同种类的铁陨石进行了对比研究。由于降落到地球上的铁陨石普遍经历了风化作用,该研究还可为当前收藏热门铁陨石的鉴定提供参考依据。

## 1 样品与实验方法

此次实验共有 3 块铁陨石标本(图 1、表 1)。样品 1 来自我国江西南丹(东经 107°42′, 北纬 25°06′)。该陨石发现于 1958 年,露出在二叠纪灰岩及其上覆的黄土之上,风化现象严重。降落时间约为 1516 年 6 月的一场较大的铁陨石雨中。据化学成分类法其为 IIICD 型。样品 2 的名称为 Campo del Cielo。自 1576 年以来在阿根廷 Gran Chaco Gualamba 省(西经 61°44′, 南纬 27°29′)发现了几块此种铁陨石。伦敦不列颠博物馆的宇宙矿物学家将此陨石归类为 IAB。样品 3 的名称为 Sikhote-Alin, 来自于



图 1 实验样品照片

Fig. 1 Photographs of the experimental samples

a—铁陨石样品 1; b—铁陨石样品 2; c—铁陨石样品 3

a—Sample 1; b—Sample 2; c—Sample 3

表 1 样品的外观特征

Table 1 Exterior features of the samples

特征编号	颜色	形态	大小/cm	质量/g	风化程度
样品 1	黑褐色	扁平,略呈梯形,表面不平整	6.2×5.5×1.2	68.12	严重
样品 2	银灰色	不规则长方体块状	3.0×1.7×1.4	29.20	较弱
样品 3	银灰色	不规则块状,表面有驼峰状突起	2.8×2.4×1.8	26.80	一般

1947 年 2 月 12 日西伯利亚 Sikhote-Alin 山脉(东经 134°39′12″, 北纬 46°09′36″)的一场巨大的与塵云相伴的流星雨。俄罗斯科学院宇宙矿物学家将其归类为 IIB 类型。

样品首先利用北京大学地球与空间科学学院偏光显微镜反射光观察, AR224CN 电子天平静水称重,获得其光学、力学特征数据;磁学特征利用北京大学物理学院应用磁学研究中心的 Lake Shore 7410

VSM 振动式样品磁强计, 每个样品取样不超过 20 mg; 物相分析在北京北达燕园微构分析测试中心, 分别使用 RigakuDmaxRb X 射线衍射仪、XD-3 X 射线衍射仪对样品进行反射和粉末衍射, 测试条件为  $\text{CuK}\alpha$  射线, 40 kV, 步宽为 0.02,  $\lambda = 1.540\ 598\ \text{\AA}$ ; 利用北京大学地球空间科学学院 JEOL JXA-8100 电子探针测试, 根据背散射图像对晶粒进行能谱半定量的测试, 用导电胶将光薄片上的测试微区与样品台连接, 依次对不同晶粒进行测试, 研究几种铁陨石元素成分; 采用北京大学化学学院环境扫描电子显微镜进行微形貌观察, 仪器型号为荷兰 Quanta200 环境扫描电子显微镜。分辨率真空模式下 3~5 nm, 最大束流 2  $\mu\text{A}$ , 放大倍数 7 倍到  $1 \times 10^6$  倍, 加速电压 200 V~30 kV, 灯丝为钨灯丝。样品边缘涂抹少量银胶(不与样品反应), 再用导电胶贴在光薄片两侧, 使样品台上的导电胶通过银胶与样品连接, 然后放进样品室中进行观察。

## 2 实验结果

### 2.1 基本矿物学特征

#### 2.1.1 光学特征

在偏光显微镜下观察样品 1、样品 2, 显微结构见图 2、表 2。样品 1 均匀基质中分布少量金属包体, 部分在抛磨过程中脱落而残留空洞。金属包体呈毫米级大小, 不规则片状或细粒状分布, 无明显定向性且含量较少, 分析原因为非岩浆型南丹铁陨石母源物质的化学组成为球粒陨石型(李学军等, 1992), 在近表面区冲击产生单独的熔体而形成(王道德等, 1995)。金属相可见断裂的纽曼线。纽曼线是与冲击效应有关的机械变形, 形成于 600℃ 以下, 是由体心锥纹石内机械双晶构成的微页理, 光片中见到它按照一定的角度交叉, 一般沿立方体对角线、晶棱和重点连线分布(王鹤年等, 1986)。

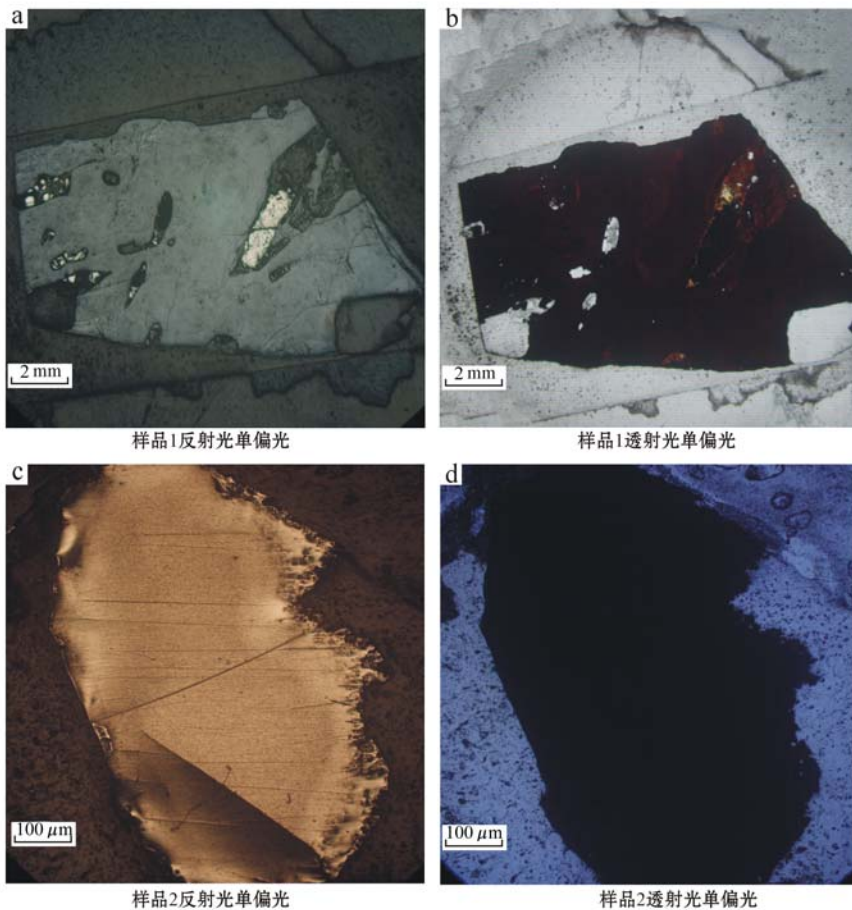


图 2 样品在偏光显微镜下的结构特征

Fig. 2 Structural characteristics of the samples under the polarizing optical microscope

表2 偏光显微镜下的矿物组成  
Table 2 Mineral composition under the polarizing optical microscope

矿物名称	镜下特征描述	图片
顽火辉石 (En)	样品 1 中唯一的透光部分, 单偏光下呈现灰白色, 不显示多色性, 晶体多为柱状, 半自形, 正中突起, 解理两组近正交解理。正交偏光下最高干涉色为一级黄白, 平行消光。	
滑石 (Tlc)	样品 1 中, 分布在顽火辉石周围的蚀变矿物, 呈鳞片状集合体。单偏光下呈现淡褐色、正低突起。正交偏光可见 II 或 III 级干涉色, 最高干涉色为三级橙, 近平行消光。消光角约为 10°。	
铁的氧化物	样品 1 中的基质部分, 偏光与正交下均为暗红色, 正交干涉色不明显。	
铁纹石 (Ka)	反射光观察可见纽曼线。透射光下不透光。	

样品 2 呈维氏台登构造, 是锥纹石与镍纹石片晶有规律地按照八面体生长的结果。样品为均一的

铁镍基质, 分布均匀, 可见清晰纽曼线。边界因具延展性而产生不平滑的翘起。

2.1.2 力学特征

使用静水称重法测试 3 块样品的相对密度。测试中用  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  依次代表样品 3 次测试的相对密度值,  $M$  代表平均相对密度。由表 3 可知, 样品 2、3 的相对密度都接近纯铁的初始密度( $\rho_0 = 7.78 \text{ g/cm}^3$ ), 而样品 1 的相对密度为  $4.25 \text{ g/cm}^3$ , 明显低于南丹铁陨石的初始密度(傅世勤等, 1989), 表明该陨石经受风化情况严重, 导致密度下降。

表 3 铁陨石样品的相对密度  $\text{g/cm}^3$

Table 3 Test result of the relative density of the samples	$\text{g/cm}^3$			
编号	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M$
样品 1	4.247 3	4.252 5	4.240 0	4.246 6
样品 2	7.358 3	7.411 9	7.366 7	7.378 9
样品 3	7.656 6	7.631 5	7.637 1	7.641 7

2.1.3 磁学特征

由测量所得数据(表 4)可知, 样品 2、3 具有相近的饱和磁化强度、剩余磁化强度和矫顽力, 与纯铁的

理论磁性相当, 且磁滞回线表明样品为纯软磁性, 因此可初步确定样品 2、3 的主要成分为铁, 这也是与当前已报道的实验研究结果相符。样品 3 的饱和磁化强度  $185.7 \text{ emu/g}$  略低于样品 2 的  $202.5 \text{ emu/g}$  (基本为纯铁), 而其矫顽力  $54.0 \text{ Oe}$  略高于样品 2 的  $36.1 \text{ Oe}$ , 从而说明样品 3 已被部分氧化, 非磁性氧元素的掺入导致磁稀释从而使饱和磁化强度降低而矫顽力升高, 这也为样品 3 的剩磁比  $0.010 7$  低于样品 2 的  $0.016 7$  所证实。但是在密度测试中, 样品 3 重于样品 2, 分析原因为两种陨石的初始成分含量不同, 导致样品 3 的本身密度较大, 所以略经风化

表 4 铁陨石样品的磁学性质数据

Table 4 The statistics of the magnetic properties of the samples

编号	饱和磁化强度 $B_s(\text{emu/g})$	剩余磁化曲线强度 $B_r(\text{emu/g})$	矫顽力 $H_cj(\text{Oe})$
样品 1	10.1	2.2	16.1
样品 2	202.5	3.4	36.1
样品 3	185.7	2.0	54.0

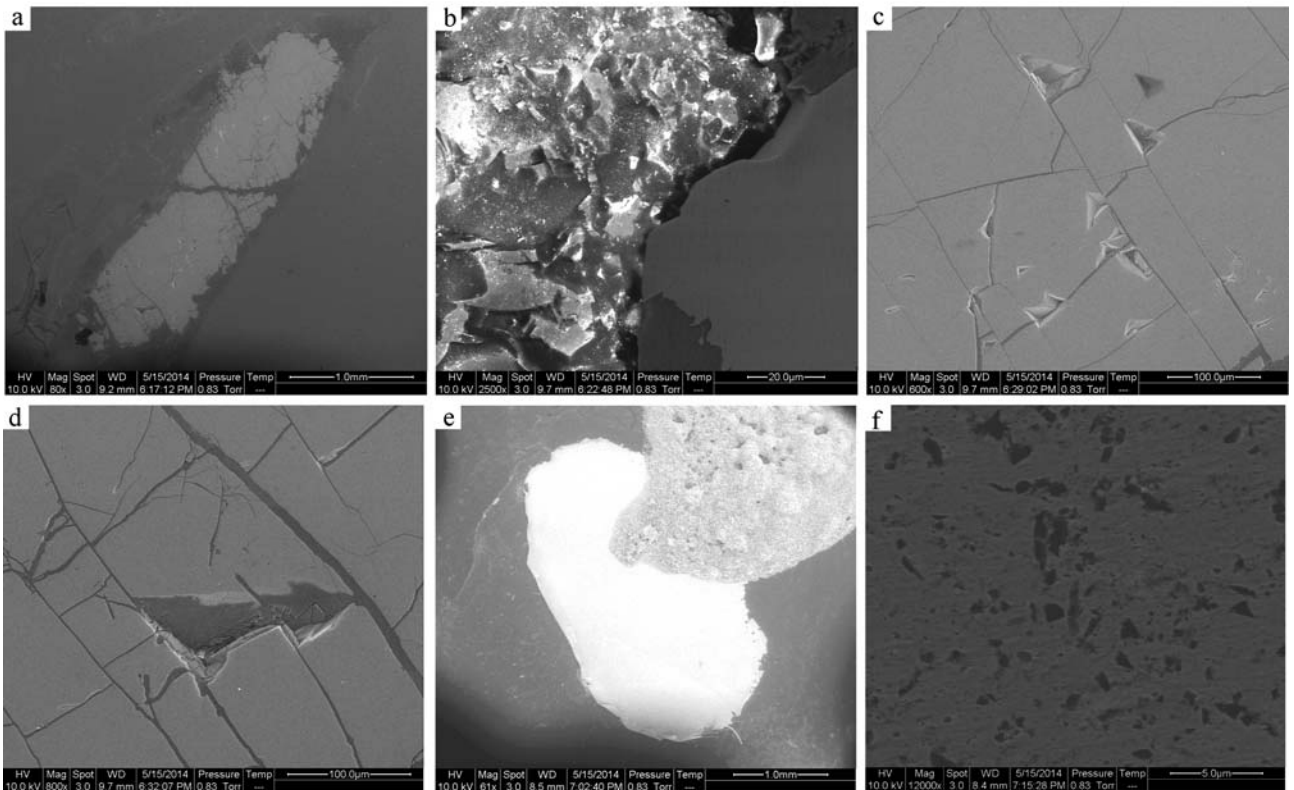


图 3 SEM(SE 模式)下矿物微观特征

Fig. 3 The microscopic characteristics of minerals under SEM (SE mode)

- a—样品 1, 铁纹石包体; b—样品 1, 顽火辉石包体; c—样品 1, 铁纹石表面定向排列的三角凹坑; d—样品 1, 铁纹石表面的碎裂纽曼线;
- e—样品 2, 整体特征; f—样品 2, 细小空洞
- a—the kamacite inclusion of Sample 1; b—the enstatite inclusion of Sample 1; c—the directionally arranged triangle pits on the kamacite of Sample 1; d—the broken Neumann line on the kamacite of Sample 1; e—the overall feature of Sample 2; f—the tiny holes of Sample 2

后仍重于样品 2。

相对于样品 2 和样品 3,样品 1 的磁性参数有很大的差别,具有低的饱和磁化强度、相对较高的矫顽力和剩磁比。

2.1.4 微形貌特征

微形貌特征如图 3 所示。图 3a 为样品 1 中铁纹石包体与铁氧化物(针铁矿、磁铁矿)基质,结构致密,基质矿物分布均匀。图 3b 为斜方辉石与基质的交界处,辉石表面凹凸不平,晶形发育不完整,紧密镶嵌在铁氧化物基质中。铁纹石表面有许多较定向排列的三角形凹坑(图 3c),揭示其结晶形态为八面体。其表面发育错位的次生纽曼线(图 3d),为降落过程中机械变形所致。

图 3e 为样品 2 的整体形貌图(右上角为银胶),矿物分布均匀,成分较一致,主要为铁陨石。再放大至高倍下(12 000 倍)观察,可见细小孔洞随机分布在铁纹石中,形状不同,直径一般小于 1 μm(图 3f),可以得知该样品结构很致密。

2.2 物相组成

样品 1 由于风化严重,脆性较大,外层金属含量低,可进行研磨。为了解铁陨石风化的产物,选取了样品 1 外层风化侵蚀严重的部分,剥蚀和研磨后进行了粉晶衍射测试,图谱如图 4 所示,显示主要矿物为针铁矿(FeOOH)和磁铁矿(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)(表 5)。根据国际衍射数据中心的标准数据库 JCPDS-ICDD 中两种矿物的 RIR 值计算出其相对含量(表 6)约各占 50%左右。

样品 2、样品 3 的 X 射线平面反射衍射图谱如图 5、图 6 所示,X 射线主要谱线数据如表 7、表 8 所

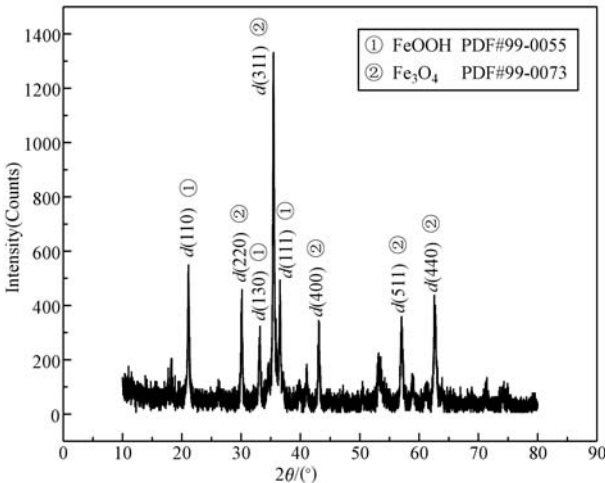


图 4 样品 1 的 X 射线粉晶衍射图谱及主要物相 Fig.4 X-ray powder diffraction pattern of Sample 1 and the main phases

表 5 样品 1 的 X 射线粉晶测试主要谱线数据 Table 5 The main spectral data of Sample 1 from X-ray powder diffraction

Table with 4 columns: 名称, d 值/Å, d 值/Å, d 值/Å. Rows include 针铁矿 (FeOOH) and 磁铁矿 (Fe3O4) with sample and card values.

表 6 样品 1 的矿物相对含量 Table 6 The relative amount of the minerals in Sample 1

Table with 3 columns: 矿物名称, RIR 值(I/Ic), 相对含量. Rows include 针铁矿 (FeOOH) and 磁铁矿 (Fe3O4) with 50% relative content.

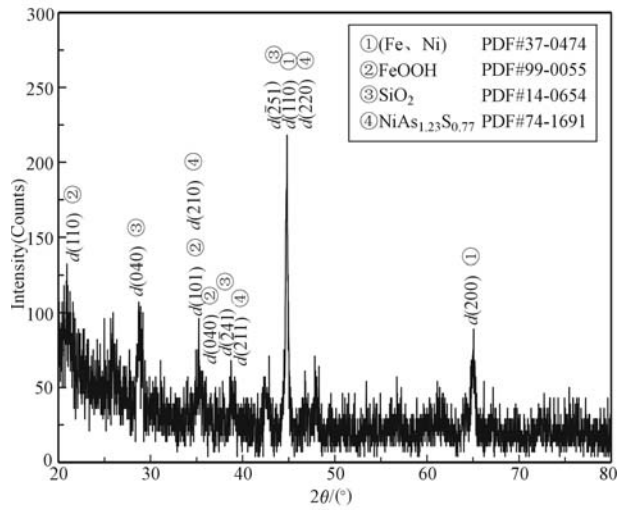


图 5 样品 2 的 X 射线衍射图谱及主要物相 Fig. 5 X-ray diffraction pattern of Sample 2 and the main phases

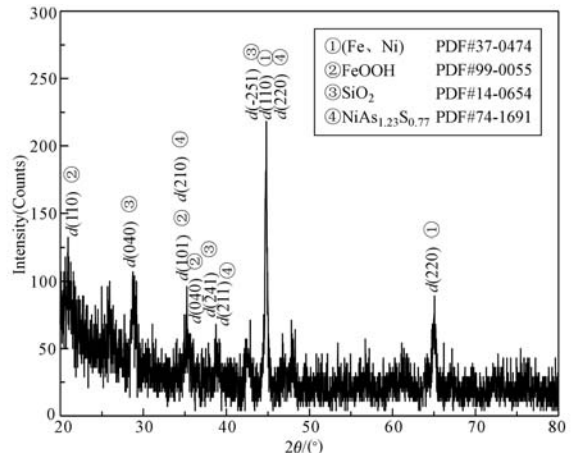


图 6 样品 3 的 X 射线衍射图谱及主要物相 Fig. 6 X-ray diffraction pattern of Sample 3 and the main phases

表 7 样品 2 的 X 射线测试主要谱线数据  
Table 7 The main spectral data of Sample 2 from X-ray diffraction

名称		d 值/Å	d 值/Å	d 值/Å
铁纹石 (Fe, Ni)	样品值	2.023 4	1.430 6	—
	卡片值	2.028 0	1.434 0	—
针铁矿 (FeOOH)	样品值	4.190 7	3.426 7	2.536 3
	卡片值	4.179 7	3.380 9	2.527 1
柯石英 (SiO <sub>2</sub> )	样品值	3.426 7	3.109 9	2.023 9
	卡片值	3.430 0	3.090 0	2.030 0
辉砷镍矿 (NiAs <sub>1.23</sub> S <sub>0.77</sub> )	样品值	2.536 3	2.323 6	2.023 9
	卡片值	2.551 5	2.329 2	2.017 1
铜蓝 (CuS)	样品值	2.801 3	1.899 0	1.554 2
	卡片值	2.812 3	1.895 8	1.556 0
氧化钴 (CoO)	样品值	2.124 4	2.457 0	1.510 3
	卡片值	2.130 7	2.460 2	1.506 6

表 8 样品 3 的 X 射线测试主要谱线数据  
Table 8 The main spectral data of Sample 3 from X-ray diffraction

名称		d 值/Å	d 值/Å	d 值/Å
铁纹石 (Fe, Ni)	样品值	2.023 0	1.432 5	—
	卡片值	2.028 0	1.434 0	—
针铁矿 (FeOOH)	样品值	4.244 3	2.533 7	2.503 4
	卡片值	4.179 7	2.527 1	2.489 9
柯石英 (SiO <sub>2</sub> )	样品值	3.087 3	2.330 0	2.023 0
	卡片值	3.090 0	3.090 0	2.030 0
辉砷镍矿 (NiAs <sub>1.23</sub> S <sub>0.77</sub> )	样品值	2.545 9	2.321 4	2.023 0
	卡片值	2.551 5	2.329 2	2.017 1
氧化钴 (CoO)	样品值	2.458 4	2.126 3	—
	卡片值	2.460 2	2.130 7	—

示。通过分析,样品 2 较对应的矿物为铁纹石(Fe, Ni)、柯石英(SiO<sub>2</sub>)、针铁矿(FeOOH)、铜蓝(CuS)、辉砷镍矿(NiAs<sub>1.23</sub>S<sub>0.77</sub>)和氧化钴(CoO),样品 3 较对应的矿物为铁纹石(Fe, Ni)、柯石英(SiO<sub>2</sub>)、针铁矿(FeOOH)、辉砷镍矿(NiAs<sub>1.23</sub>S<sub>0.77</sub>)和氧化钴(CoO)。

### 2.3 成分分析

实验主要对样品 1、2 进行分析,样品 1 共打点 16 个,样品 2 打点 4 个。经计算,Fe、Ni 和 P 的单位质量内摩尔含量如表 9 所示。在前几次打点测试中,C 元素的含量均明显较高(低于 Fe),说明铁陨石样品中本身含有 C。因探针样品室内油的挥发会导致测试结果中 C 元素含量增加,因此暂不考虑 C 元素的准确含量。样品 1 的 1-1、1-2、1-3 和 1-7 点 Fe、Ni 与 P 比例值接近,可能含有矿物陨磷铁镍石(Fe, Ni)<sub>3</sub>P。点 1-5 成分几乎全为 Fe,此处为较纯的铁纹石,分布在磷铁镍矿间隙。分布在另一条间隙的点 1-4、1-6

中的 Fe、Ni 与 P 的含量接近,为另一种矿物相。结果中也测试到 Na、Si、K、Cr、Ag 元素的存在。样品 2 成分均一,以 Fe、Ni 和 C 为主。

表 9 样品 1、2 电子探针成分测试结果(摩尔含量)

Table 9 The chemical composition of Sample 1 and 2 measured by EMPA (mol)

打点	P	Fe	Ni	晶体化学式
1-1	0.30	0.69	0.27	(Fe, Ni) <sub>3.2</sub> P
1-2	0.31	0.74	0.27	(Fe, Ni) <sub>2.9</sub> P
1-3	0.34	0.76	0.28	(Fe, Ni) <sub>3.1</sub> P
1-4	0.46	0.76	0.03	(Fe, Ni) <sub>1.7</sub> P
1-5	0.05	1.18	0.05	(Fe, Ni) <sub>24.6</sub> P
1-6	0.50	0.66	0.05	(Fe, Ni) <sub>1.4</sub> P
1-7	0.17	0.76	0.28	(Fe, Ni) <sub>6.1</sub> P
2-1	1.19	0.07		Fe <sub>1.19</sub> Ni <sub>0.07</sub>
2-2	1.26	0.08		Fe <sub>1.26</sub> Ni <sub>0.08</sub>
2-3	1.02	0.07		Fe <sub>1.02</sub> Ni <sub>0.07</sub>
2-4	1.26	0.06		Fe <sub>1.26</sub> Ni <sub>0.06</sub>

1-1~1-7 为样品 1, 2-1~2-4 为样品 2。

## 3 讨论

在基本矿物学特征测试中,样品 1 南丹陨石的外观、结构与矿物组成与样品 2 有明显差异,结构疏松,脆性大,铁镍合金含量少而铁的次生矿物含量高,推测原因除南丹铁陨石母源物质的化学组成为球粒陨石型,未经过完全熔融和强烈分异结晶作用外,还为经受了较强的风化作用所致。另外,该陨石的相对密度和磁性也明显低于样品 2、3。样品 1 的低饱和磁化强度、较高的矫顽力和剩磁比说明主要成分不再是铁,分析原因:矿物成分分布不均,而取样部分仅有 10.9 mg 且为风化程度较强、含铁镍金属较少的外层,铁陨石中的铁本应以零价存在,但是南丹铁陨石被风化的现象严重,铁镍金属可被氧化为其氧化物,如具有弱的反铁磁性的针铁矿,从而显示弱于铁的磁性(施倪承等,2004)。

微形貌观察中,可得知铁陨石内部结构致密,与前人描述相符。其特征矿物铁纹石(王道德等,2005)可以八面体晶体发育,受应力产生纽曼线;样品 1 中铁纹石为包体形式存在,而样品 2 中几乎都是铁纹石,整体均一为不透明的金属光泽,说明铁纹石可以次要矿物和主要矿物两种形式存在于铁陨石中。

X 射线衍射测试中,3 块样品均包含属铁陨石特征矿物,但样品 1 与 2、3 有显著差异。2、3 中铁纹石为铁陨石的特征物相,柯石英为超高压变质作用形成的标志矿物,曾在陨石坑中被发现(徐培苍等,

1992), 针铁矿和辉砷镍矿也均在文献中出现过。样品 1 的外层风化部分中检测到矿物种类较少, 以铁氧化物为主。针铁矿与磁铁矿约各占一半, 且两种产物均为铁的风化产物, 验证了该南丹陨石的风化程度较强。此处针铁矿的特征也与前述偏光镜下矿物特征和磁性测试结果相符。

电子探针的成分测试中, 样品 1、2 的主要成分均为 Fe、Ni, 但样品 2 的含量较高 (FeO 84.91%, NiO 5.32%) 且稳定, 样品 1 中 Fe 的相对含量略低于样品 2, Ni 的相对含量较高, 且变化较大, 推测为铁被氧化后, 导致铁的相对含量下降。微量元素有 C、P、Na、Si、K、Cr 和 Ag, 样品 2 以 C 为主, 样品 1 含量丰富, 基质中物相差异较大, 但所含元素种类相同, 可见风化对铁陨石元素含量的影响较小。由于电子探针测试的是样品 1 内部的化学成分, 而 XRD 测试的是样品外部的风化层, 所以其成分测试与物相组成结果稍有出入, 也证明了风化是由外向内的侵蚀过程, 陨石内部仍以 Fe、Ni 形成的铁纹石、镍纹石为主。结合 XRD 分析样品 2, 推测矿物主要为铁纹石、镍纹石与陨碳铁。

## 4 总结

(1) 常规测试结果表明, 风化作用可对铁陨石矿物学性质产生明显影响。铁陨石常呈块状集合体, 表面可发育熔壳和气印, 风化较强时表面呈土状光泽, 内部为金属光泽; 偏光显微镜下风化较强的南丹铁陨石主要为铁的氧化物; 另外, 风化也可导致铁陨石相对密度的下降; 铁陨石结构致密, 特征矿物铁纹石可以八面体形式发育。

(2) 铁陨石的磁性与地球的铁磁性质大致相同, 但当陨石风化严重时, 外层中金属含量下降, 部分铁可能被氧化, 导致磁性下降。

(3) 风化作用对南丹铁陨石的矿物组成有明显影响, 以针铁矿、磁铁矿等铁的次生矿物为主, 明显不同于其他以铁纹石为主的铁陨石。但内部的化学成分没有明显变化, 铁元素的相对含量略低于风化较弱的铁陨石样品。

## References

Anders E. 1964. Origin, age, and composition of meteorites[J]. *Space Science Reviews*, 3(5-6): 583-714.  
Chen Yongheng and Sun Yongjun. 1986. Multisamples trace element

distribution of Xinjiang iron meteorite and its geochemical implications[J]. *Geochimica*, 3: 271-277(in Chinese).  
Fu Shiqin, Jin Xiaogang and Chen Pansen. 1989. Studies on the shock adiabatics and equation-of-state of Nandan iron meteorite[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 3(3): 226-232(in Chinese).  
Li Xuejun, Chai Zhifang, Liu Yongzhong, et al. 1992. Micro-distribution patterns of trace elements in NanDan iron meteorite [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 12(3): 214-221(in Chinese).  
Lin Yangting, Miao Bingkui, Wang Daode, et al. 2013. Research progress in meteorites and cosmochemistry (2001-2010) [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(1): 40-5(in Chinese with English abstract).  
Shi Nicheng, Bai Wenji, Ma Zhesheng, et al. 2004. A preliminary study of the crystal chemistry mineralogy, and ore deposits of earth's core-mantle material[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 169-176(in Chinese with English abstract).  
Xu Peicang, Li Rubi, Wang Zhihai, et al. 1992. The raman spectrum study of high pressure metamorphic coesite in central China[J]. *Northwest Geoscience*, 13(2): 111-119(in Chinese).  
Wang Daode. 1980. Introduction of meteorites types [J]. *Geology geochemistry*, 2: 9-18(in Chinese).  
Wang Daode and Chen Yongheng. 1995. Inspiration from study of Antarctic meteorites V: The chemical compositions of Antarctic meteorites and their classification [J]. *Antarctic Research*, 7(1): 17-24(in Chinese).  
Wang Daode, Miao Bingkui and Lin Yangting. 2005. Mineralogic-Petrologic characterisitic of meteorites and their classification[J]. *Chinese Journal of polar research*, 17(1): 45-74(in Chinese with English abstract).  
Wang Henian, Qiu Detong, Li Ying, et al. 1986. The discovery of Shandong Junan large stone-iron meteorite[J]. *Chinese Science Bulletin*, 18: 1408-1411 (in Chinese).

## 附中文参考文献

陈永亨, 孙用均. 1986. 新疆铁陨石多样品的微量元素分布及其在地球化学中的意义[J]. *地球化学*, 3: 271-277.  
傅世勤, 金孝刚, 陈攀森. 1989. 南丹铁陨石冲击绝热线和状态方程的研究[J]. *高压物理学报*, 3(3): 226-232.  
李学军, 柴之芳, 刘永忠, 等. 1992. 南丹铁陨石微量元素的微区分布特征[J]. *空间科学学报*, 12(3): 214-221.  
林杨挺, 缪秉魁, 王道德, 等. 2013. 陨石学与天体化学(2001-2010)研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 32(1): 40-55.  
施倪承, 白文吉, 马喆生等. 2004. 核-幔物质晶体化学、矿物学及矿床学初探[J]. *地学前缘*, 11(1): 169-176.  
徐培苍, 李如璧, 王志海, 等. 1992. 华中高压变质柯石英的拉曼谱学研究[J]. *西北地质科学*, 13(2): 111-119.  
王道德. 1980. 陨石类型简介[J]. *地质地球化学*, 2: 9-18.  
王道德, 陈永亨. 1995. 南极陨石研究的启示 V: 南极铁陨石的化学组成及其分类[J]. *南极研究*, 7(1): 17-24.  
王道德, 缪秉魁, 林杨挺. 2005. 陨石的矿物-岩石学特征及其分类[J]. *极地研究*, 17(1): 45-74.  
王鹤年, 邱德同, 李 瑛, 等. 1986. 山东莒南大型石-铁陨石的发现[J]. *科学通报*, 18: 1408-1411.