

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

四川隆昌铁陨石物质成分和 结构构造的初步研究

范良明

(成都地质学院)

据四川省隆昌县志卷十二记载,隆昌铁陨石于明代(1368—1644)时陨落到隆昌县城西北郊约五华里的道观坪,清乾隆二十五年(1761)掘出,被人们精心保存。对隆昌铁陨石的性质、隆昌县志有“紫色,似石非石,似铁非铁,叩之有声”的描述。1972年,成都地质学院陈列馆将该陨石运到该馆陈列,尚无前人进行过研究。本文是对隆昌铁陨石的初步研究报告。

一、外表特征

隆昌铁陨石外形呈似圆锥体状(照片1),锥体高46厘米,锥体底部为不规则的椭圆形,长44厘米,宽20厘米。表面为黑褐色,总重量158.5公斤,比重为7.572。

陨石圆锥体的顶部表面比较光滑,估计是陨石坠落穿过大气层时的前沿部分。圆锥体的中后部及底部布满了不同形状和大小的凹坑(即气印)近300个。其形状多为圆形和椭圆形,少数为长方形、三角形和蚕茧形。凹坑直径为0.2至7厘米,其中0.2至1厘米的近200个,1至2厘米的70多个,大于2厘米的21个。凹坑底部不平,多数略约向圆锥体后部倾斜,深部从0.1至3厘米不等。隆昌铁陨石表面凹坑满布表明,它在向地面坠落之前,曾遭受过宇宙尘的长期冲蚀。

隆昌铁陨石磁性较强,有明显的两极性。陨石的一端吸引罗盘磁针北极,另一端吸引南极。世界上坠落地面的铁陨石只有一部分显示磁性的两极性^[1],其原因估计是铁陨石经大气层坠落地面过程中,没有发生翻滚、旋转等方向上的改变,被地球南北极磁场磁化的结果。如有方向改变,则不显两极性。

二、熔壳

隆昌铁陨石表面发育着一层厚度变化于0.07至2毫米之间的熔壳,随着凹坑的深浅而起伏地覆盖着陨石体。熔壳表面因褐铁矿化而呈黑褐色,新鲜断面为灰黑色,质地疏松多孔。熔壳的厚度变化很有规律,在陨石圆锥体顶部高度约8厘米的一段,熔壳平整,比较光滑,厚度较薄,仅0.07至0.2毫米;中后部熔壳厚度较大,从0.3至2毫米。从顶部至中后部熔壳逐渐加厚。凹坑中熔壳的厚度比邻近突起部位的厚度要大。

熔壳的矿物成分主要为磁铁矿和铁橄榄石,另有少量锥纹石、镍纹石、石英及玻璃质。磁铁矿占熔壳矿物组成的50%以上。灰黑色,强磁性,半金属光泽。反射率 $R_{\text{绿}}$ 为18.6%,硬度570—624kg/mm²,比重4.920。经X光粉晶分析,与标准磁铁矿^[2]相同(见表1)。晶粒细小,以微晶形式成带状产出,组成起伏不平的带状集合体(照片2)。铁橄榄石约占熔壳矿物总量的

35%，黑绿色，呈椭球状晶体被包裹在磁铁矿中，长 0.3 毫米，宽 0.07 毫米，其长轴方向与磁铁矿带状方向一致，粉晶分析数据见表 1。镍纹石在熔壳中含量约 5%，锡白色，强金属光泽，呈不规则的斑点状、星点状、圆粒状或圆滑的网状细脉分布在残留锥纹石周围的磁铁矿中(照片 3)和表面凹坑内的浅色玻璃质中(照片 4)。这种镍纹石的成因，显然是原生的锥纹石、镍纹石在陨石坠落穿过大气层的过程中遭受高温氧化作用，铁受氧化形成磁铁矿和铁橄榄石，而镍被释放出来与部分铁一起形成了富镍的镍纹石。残留的锥纹石和镍纹石含量约 3—5%，呈不规则块状、椭圆状被包裹在磁铁矿中。熔壳中的玻璃质及石英含量甚微，表面凹坑内硅酸盐矿物因高温熔融而大部分与铁形成铁橄榄石，少部分冷却后以石英及玻璃质形式分散在熔壳中。

熔壳的化学分析结果与商都铁陨石和吉林陨石雨熔壳成分比较如表 2。样品采自陨石体中后

表 1 隆昌铁陨石中矿物的 X 光粉晶分析数据*

熔壳中的 磁铁矿		熔壳中的 铁橄榄石		陨石内部的 锥纹石		与熔壳接触处的 锥纹石		熔壳中残留的 锥纹石		镍纹石		陨硫铁	
I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n
2	5.00	2	4.00	2	2.90	2	2.54	2	3.00	5	2.28	1	4.60
4	4.20	4	3.50	3	2.55	6	2.24	1	2.80	10	2.08	3	3.30
2	3.70	8	3.33	6	2.24	10	2.03	1	2.70	1	2.00	8	2.96
3	3.25	10	2.82	10	2.03	4	1.435	5	2.54	8	1.80	5	2.77
6	3.00	4	2.55	1	1.48	2	1.290	4	2.25	1	1.40	2	2.65
4	2.80	8	2.49	6	1.440	10	1.170	10	2.03	8	1.275	4	2.52
4	2.70	1	2.40	3	1.295	5	1.016	1	1.72	1	1.200	5	2.25
10	2.52	4	2.30	10	1.170			3	1.62	1	1.175	10	2.10
5	2.15	1	2.20	8	1.017			4	1.49	9	1.085	4	1.92
5	2.09	1	2.08					5	1.430	8	1.045	3	1.90
2	1.77	1	2.02					1	1.30			4	1.83
5	1.72	1	1.96					9	1.170			2	1.70
7	1.60	2	1.82					2	1.098			3	1.61
3	1.53	10	1.78					5	1.017			1	1.57
8	1.48	2	1.67									1	1.50
2	1.27	6	1.52									3	1.44
5	1.09	5	1.37									1	1.280
3	1.05	3	1.34									3	1.170
		4	1.095	a = 2.880 Å		a = 2.870 Å		a = 2.860 Å					

* 分析条件：Fe靶，曝光2.5小时。分析者：刘集银

表 2 熔壳主要化学成分比较

主要化学成分 %	隆昌铁陨石熔壳*	商都铁陨石熔壳 ⁽³⁾	吉林陨石雨熔壳 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾
FeO	36.97	10.29	28.37
Fe ₂ O ₃	29.44	75.29	—
MgO	0.17	—	22.90
SiO ₂	19.35	—	40.29
Ni	4.79	3.93	—

* 分析者：成都地质学院中心实验室

部熔壳厚度较大的部位,次生氧化成褐铁矿的部分已舍去,样品全为新鲜熔壳。从表2可以看出,隆昌铁陨石熔壳与商都铁陨石熔壳比较, SiO_2 和 FeO 较富而 Fe_2O_3 的含量较低;与吉林陨石雨熔壳比较, SiO_2 和 MgO 较贫,而 FeO_3 的含量较高。上述这种明显差别,显然与不同陨石体表面化学成分的不同有关。隆昌铁陨石熔壳中颇高的 SiO_2 含量,由于表面部分凹坑中在陨石坠落前含有相当数量的硅酸盐矿物所致。

熔壳内部孔隙较多,孔隙直径0.1—1毫米,最大者达3毫米。熔壳中的主要矿物成层带状平行排列于陨石体表面。熔壳与陨石体呈逐渐过渡状态接触。

陨石熔壳形成于由宇宙空间向地面坠落的过程中。当陨石在大气层中高速运行时,其表面,特别是头部受到强大的冲击力,产生将近一万度($^{\circ}\text{C}$)的高温^[4],使表层物质不断被氧化、挥发,并伴有强烈的熔融作用。当陨石坠落至低空时,速度减慢,表面温度和压力下降,气化作用逐渐减弱至消失,仅发生熔融作用,使熔融体得以保存,最后冷却形成熔壳。由于熔融作用是在有充足氧化的大气层中进行,因此发生了强烈的氧化作用^[5],使金属铁相继被氧化成二价和三价,坠落至地面骤冷后形成微晶状磁铁矿。而部分凹坑中的硅酸盐矿物则与金属铁共熔氧化形成铁橄榄石。

三、化 学 成 分

铁陨石中Fe、Ni的含量与地球上产出的自然铁及古代人工铁中Fe、Ni的含量显然不同。因此Fe、Ni含量是鉴定铁陨石的重要标志^{[6]、[7]}。采用钻取方法从隆昌铁陨石0.5至3.5厘米深度

表 3 隆昌铁陨石的元素成分及与自然铁等的比较

元 素 成 分 %	隆 昌 铁 陨 石*	世 界 铁 陨 石 平 均 ^{(1),(10),(11)}	自然铁平均 ^{(8),(9)}	古代人工铁平均 ⁽⁸⁾
Fe	89.32	90.85	94.48	94.26
Ni	9.27	8.50	1.53	$<5 \times 10^{-3}$
Co	0.43	0.60	0.38	0.02
Cr	4×10^{-3}	0.01		1.45×10^{-3}
Mg	0.04	0.03		
Ca	0.03	0.02		
Cu	0.02	0.02		
Mn	0.01	0.05		
Si	0.38	0.01		
P	0.03	0.17		
S	0.03	0.04		
C	0.02	0.03		
K	0.11			
Al	0.04			
Ti	0.03			
Sr	0.02			
Zn	0.01			
B	0.04			
合 计	99.83	100.33	96.39	94.28
Fe/Ni	9.63	10.69	62.08	18852

* 分析者: 成都地质学院中心实验室

采样进行了化学分析, 分析结果及与自然铁等的化学元素组成对比如表 3。

从表 3 可以看出, 隆昌铁陨石元素成分与世界铁陨石平均化学元素组成接近, 是一种含镍达 9% 以上的铁镍合金。除铁镍外, 其他元素的含量不超过 1.5%。铁陨石中 Ni 的含量及 Fe、Ni 含量远高于自然铁及古代人工铁。铁镍比值 (Fe/Ni) 从铁陨石—自然铁—古代人工铁逐渐增高。

隆昌铁陨石从表面向中心, 化学组成有一定变化。根据离陨石体表面 1 厘米与 3 厘米两种深度分别采样进行化学分析的结果表明, 从陨石体浅部向深部, 镍含量从 8.93% 至 9.61%, 有明显增高趋势。而铁的含量从 89.66% 至 88.98%, 略有降低, 硅和硼的含量亦略降低, 其他元素含量无明显变化。

四、矿物组成

镜下鉴定和 X 射线粉晶分析结果表明, 隆昌铁陨石体 (熔壳除外) 主要由锥纹石和镍纹石组成。此外还含少量陨硫铁、磁铁矿、无定形炭质、 α -方英石、石英和硅酸盐玻璃等矿物。

锥纹石: 主要矿物, 含量 85% 左右。呈板状和粒状分布。强金属光泽, 强磁性, 亮白色反射色, 均质, 无内反射, 反射率 $R_{\text{绿}} 65\%$, 显微硬度 172kg/mm^2 。用 5% HNO_3 : 95% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (v/v) 浸蚀后缓慢起泡, 变黑, 显清晰的维斯台登像。主要元素含量, 经电子探针分析¹⁾, 含 Fe 90.80%, Ni 8.80%, Co 0.43%, 经计算, 其矿物化学式为 $\text{Fe}_{10}(\text{Ni}, \text{Co})$ 。X 光粉晶分析数据见表 1。处于陨石体不同部位的锥纹石其晶胞参数的大小有差别。前人的工作结果表明^[7], 锥纹石含镍量从低到高, 其晶胞参数由小变大。隆昌铁陨石体内部的锥纹石 $a=2.880\text{\AA}$, 陨石体与熔壳接触处的锥纹石 $a=2.870\text{\AA}$, 熔壳中残留的锥纹石 $a=2.860\text{\AA}$, 显然从陨石体内部向表面锥纹石晶胞参数逐渐变小, 可以认为反映了锥纹石中镍含量的逐渐降低。锥纹石主要与镍纹石、陨硫铁共生, 局部与磁铁矿相伴生。

镍纹石: 含量仅次于锥纹石, 占 10% 左右, 含量随深度增加略有增高, 呈细条状、薄片状、星点状、文象状出现在锥纹石晶体边缘。强磁性, 强亮白色反射色微带淡黄色调。反射率 $R_{\text{绿}}=68\%$, 显微硬度 $224\text{—}286\text{kg/mm}^2$ 。用乙醇加硝酸浸蚀后渐成绿色, 比锥纹石抗浸蚀性强。据电子探针分析, 其主要成分为 Fe 78.6%, Ni 21.0%, Co 0.43%, 经计算其矿物化学式为 $\text{Fe}_4(\text{Ni}, \text{Co})$ 。粉晶分析数据见表 1。

陨硫铁: 含量不多的副矿物。铜黄色, 呈不规则的椭圆状、块状分布在锥纹石晶体之间或其中。粒度一般 0.1 毫米, 个别可达 1.4×4 厘米², 金属光泽, 弱磁性, 性脆, 比重 4.672, 反射色金黄色, 反射率 $R_{\text{绿}}$ 为 34%, 硬度 $180\text{—}230\text{kg/mm}^2$ 。用乙醇加硝酸浸蚀, 反应不大, 在盐酸作用下起泡, 挥发出 H_2S 。

磁铁矿: 分布在陨石体内部的气泡空洞周围 (照片 5), 呈圆圈状, 圈厚 0.1—0.5 毫米, 另有少数呈细条带状沿陨石体内的八面体解理分布。含量随深度增加而减少。

无定形炭: 仅分布在陨石表面的部分凹坑内, 与铁陨石体接触界限清楚。其表面被熔壳覆盖。外貌似焦炭, 无固定形状。灰黑色, 不透明, 半金属光泽, 疏松多孔, 呈网格带状分布。比重小, 硬度为 $94\text{—}119\text{kg/mm}^2$, 反射率 $R_{\text{绿}}=6\%$ 。经分析其主要成分为 C 58.7%, FeO 10.30%, SiO_2 4.30%, MgO 2.81%, CaO 2.80% 等。

硅酸盐矿物: 分布于陨石表面的部分凹坑内。与陨石体界面清楚, 表面也被熔壳覆盖。与熔

1) 分析者: 峨嵋矿产综合利用研究所 王树根、骆意棠。

壳接触处显褐色, 好似遭受过高温烘烤作用。多数为无固定外形的非晶质玻璃, 呈暗黑色、灰白色或无色透明。经测定 $N=1.4750$ 。在玻璃质中心, 可见部分因脱玻化作用形成的粒状 α -方英石晶体 (照片 6) 和微细石英晶体。 α -方英石无色透明, 呈不规则椭圆状, 晶粒直径 $0.04-0.12$ 毫米, 一轴晶负光性, $N_e=1.487$, $N_o=1.484$ 。对硅酸盐矿物进行粉晶分析, 只出现 α -方英石和石英的线条。对硅酸盐矿物进行化学分析, 其结果为 (%):

SiO ₂	69.32	CaO	0.72	MnO	0.06
Al ₂ O ₃	10.27	K ₂ O	1.64	H ₂ O ⁺	1.49
Fe ₂ O ₃	9.19	Na ₂ O	1.56	烧失	1.32
FeO	2.90	TiO ₂	0.46	合计	100.68
MgO	1.61	P ₂ O ₅	0.20		

从上述分析结果看来, 硅酸盐矿物化学成分与地球上的酸性岩浆岩类平均成分近似。其成因值得进一步研究。

五、结 构 和 构 造

隆昌铁陨石可观察到下列结构和构造:

维斯台登像: 经过 5% HNO₃:95% C₂H₅OH (v/v) 浸蚀后, 可见隆昌铁陨石内的主要矿物锥纹石按八面体构造形成比较清晰的维斯台登像。锥纹石的宽度与镍含量有关。随着镍含量的增高, 锥纹石的宽度变细^[3,7]。隆昌铁陨石中锥纹石的宽度为 1 毫米左右, 属中粒八面体式陨铁。锥纹石晶体边缘有细条带状的镍纹石分布 (照片 7), 将各个锥纹石晶体分隔开。

合纹石构造: 由锥纹石和镍纹石按一定形式组成的一种构造类型。经浸蚀后, 发亮的镍纹石呈星点状 (照片 8)、条纹状 (照片 9)、网状 (照片 7、10) 和文象状 (照片 11) 分布在暗色锥纹石晶体之间。根据对锥纹石与镍纹石接触处 (照片 12) 电子探针扫描的 NiK α 曲线¹⁾ (图 1), 证明接触处镍的强度分布甚不均匀。从镍纹石向锥纹石的过渡带上, 镍含量逐渐降低。相反, 铁含量逐渐增高。过渡带的宽度从 0.1 至 0.4 毫米不等。在较大片的镍纹石分布区, 有时可见一种以镍纹石为主的合纹石构造, 可称为反合纹石构造。

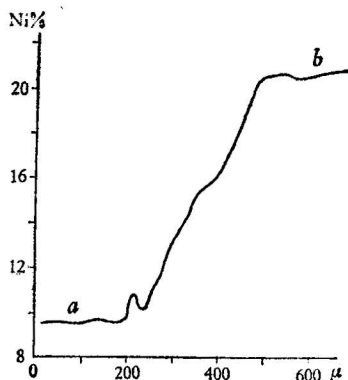


图 1 锥纹石与镍纹石接触处电子探针扫描的 NiK α 曲线
a. 锥纹石 b. 镍纹石

1) 分析者: 王树根、骆意棠。

留曼线: 隆昌铁陨石的部分锥纹石和镍纹石晶粒内, 出现直线形的留曼线。留曼线分成两组斜交, 将锥纹石、镍纹石切割成菱形, 锐角 78° , 钝角 102° 。关于留曼线的成因, 一般认为是陨石坠落地面撞击形成, 但也有人认为是原生的^[7]。

气泡空洞: 从陨石表面的熔壳至陨石体 2 厘米深度的范围内, 存在着大量气泡空洞。近表面的气泡空洞大而密; 向深部则变为小而稀。空洞直径一般 1—2.5 毫米, 大的可达 9—10 毫米。陨石表面空洞是开口的, 内部则为封闭的圆形, 紧靠空洞部分为厚 0.1—0.5 毫米的磁铁矿圈(照片 5)。当深度大于 2 厘米时, 则气泡空洞显著减少。上述表明, 气泡空洞形成于陨石向地面坠落的过程中, 由高温和强烈的氧化、挥发作用所引起, 其成因尚待进一步研究。

脱玻结构: 只发育在陨石表面凹坑内的硅酸盐玻璃质中。在一大片玻璃质中间, 不规则椭圆形的 α -方英石和石英, 呈巨大的斑点状分布。 α -方英石和石英的成因, 显然是在玻璃质形成后的漫长岁月中, 发生脱玻化作用再结晶而来, 构成了较特殊的脱玻结构(照片 6)。部分 α -方英石和石英结晶尚不完全, 处于由玻璃质向 α -方英石和石英转变的过渡状态。

隆昌铁陨石的上述结构构造中, 维斯台登像和合纹石构造属于原生构造, 其余均为次生构造。锥纹石的大量晶出发生在金属铁、镍从 γ -相转变为 α 相的时候, 构成铁陨石特有的维斯台登像。而合纹石构造形成于温度和压力迅速降低的晚期, 其余次生构造则形成于铁陨石向地面坠落过程中及之后。

六、结 语

于我国明代时坠落到四川隆昌的这块重 158.5 公斤的陨铁, 根据其矿物组成、化学成分和结构构造分析, 为一块中粒八面体式陨铁。与一般铁陨石比较, 隆昌陨铁具有以下显著特点: 表面凹坑十分发育, 部分凹坑内充填有硅酸盐矿物和无定形炭质; 磁性很强, 有明显的两极性; 由锥纹石和镍纹石组成的合纹石构造型式很多。这些特点对进一步研究陨石的成因和变化有一定意义。

工作过程中得到峨嵋矿产综合利用研究所电子探针组、成都地院陈列馆、X 光室、中心实验室和照相室等单位以及刘集银、帅德权、杨家和等同志的大力协助与支持, 借此向他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

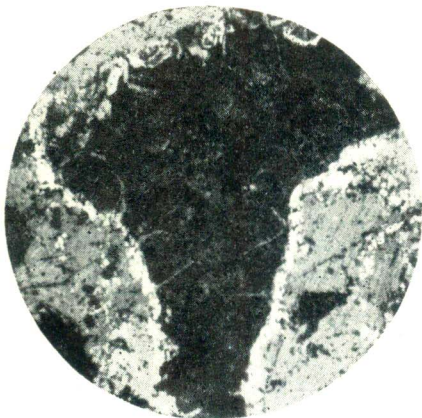
- [1] 常子文, 1965, 漫谈陨石。《天文爱好者》, 第 12 期。
- [2] Михеев В. И., 1957, Рентгенометрический определитель минералов, Госгеолтехиздат.
- [3] 欧阳自远、佟武、周景良, 1964, 三块铁陨石的矿物成分及形成条件的研究。《地质科学》, 第 3 期。
- [4] 中国科学院“吉林陨石雨”联合考察组, 1977, 吉林陨石雨的初步考察。《中国科学》, 第 1 期。
- [5] 阎育顺, 1977, 吉林陨石雨熔壳的初步研究。《地球化学》, 第 4 期。
- [6] 侯英、李肇辉、林祥铨, 1964, 铁陨石化学组成的研究。《科学通报》, 8 月号。
- [7] 欧阳自远、佟武, 1965, 三块铁陨石的化学成分、矿物组成与构造。《地质科学》, 第 2 期。
- [8] Цухров Ф. В., 1960, Минералы. изд. АН. СССР.
- [9] J. 霍夫斯, 1976, 稳定同位素地球化学。科学出版社。
- [10] Mason B., 1962, Meteorites, N. Y. and London.
- [11] Кринов Е. Л., 1955, Основы Метеоритики. ГИТТЛ, Москва.



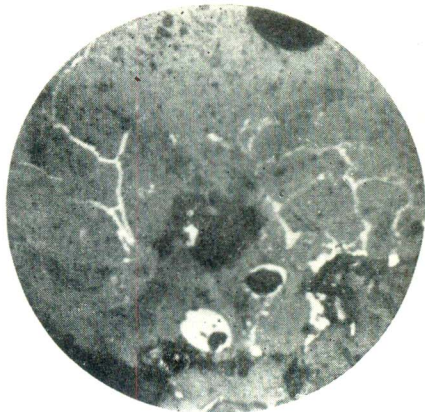
照片 1 四川隆昌铁陨石



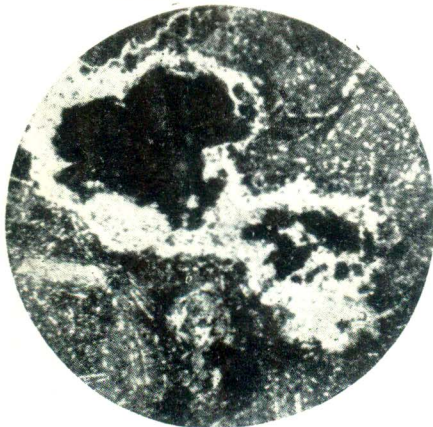
照片 2 熔壳。微晶磁铁矿（白色）成层带状分布，中间包裹铁橄榄石（灰色），下部为锥纹石（灰黑色）。
(浸蚀光片， $\times 40$)



照片 3 残留在熔壳中的锥纹石（灰黑色）。周围为磁铁矿（灰白色）、镍纹石（密集白色圆点），其他黑色为空洞。
(浸蚀光片， $\times 100$)



照片 4 陨石表面部分凹坑内的玻璃质中（灰色）的锥纹石（白色）。
(光片， $\times 100$)



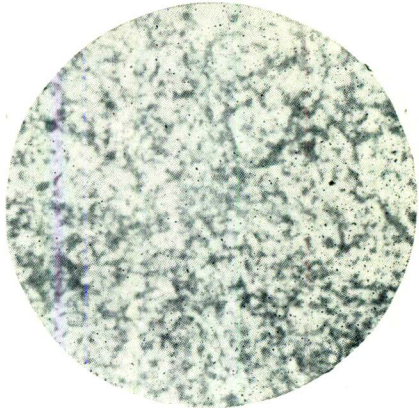
照片 5 陨石体内部的空洞（黑色），周围被磁铁矿（白色）圆圈围绕，其余为锥纹石（灰色）和镍纹石（白色细条带）。
(浸蚀光片， $\times 100$)



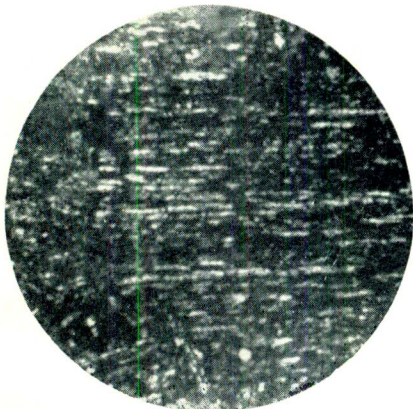
照片 6 陨石表面凹坑内的玻璃质（黑色）中的 α -方英石（灰白色）。
(正交偏光， $\times 100$)



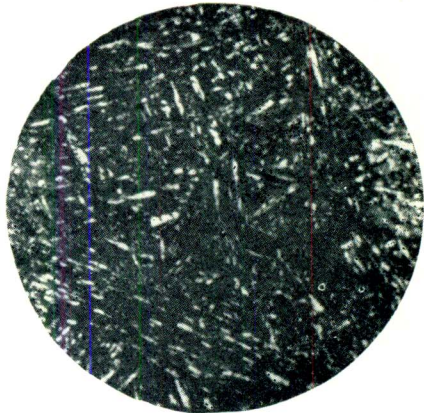
照片 7 锥纹石晶体（黑色）之间的镍纹石（白色）。
(浸蚀光片, $\times 50$)



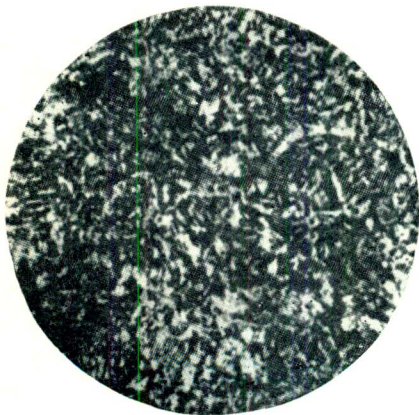
照片 8 星点状合纹石构造。灰黑色—锥纹石；白色—镍纹石。
(浸蚀光片, $\times 200$)



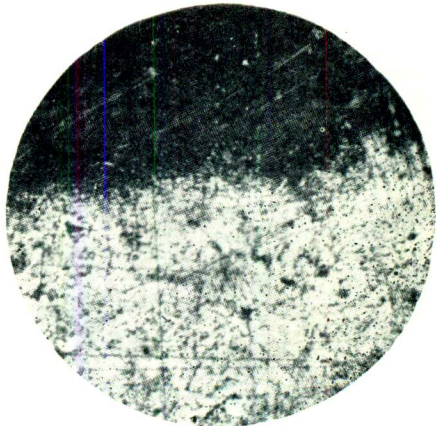
照片 9 条纹状合纹石构造。灰黑色—锥纹石；白色—镍纹石。
(浸蚀光片, $\times 200$)



照片 10 网状合纹石构造。灰黑色—锥纹石；白色—镍纹石。
(浸蚀光片, $\times 200$)



照片 11 文象状合纹石构造。灰黑色—锥纹石；白色—镍纹石。
(浸蚀光片, $\times 200$)



照片 12 锥纹石与镍纹石接触关系。灰黑色—锥纹石；白色—镍纹石。
(浸蚀光片, $\times 250$)