

吉林陨石熔渗脉的扫描电子显微镜研究

陈克樵

(中国地质科学院矿床地质研究所)

在吉林陨石熔壳的形态和结构特征的研究过程中,偶尔在吉林江密蜂地区采集到的一块陨石中发现了一种黑色的细脉⁽¹⁾。这种黑色细脉很象陨石体内经常可以见到的那种冲击玻璃。但通过双目镜下的观察、扫描电子显微镜和电子探针的形态和结构特征的研究,发现它是陨石表面的熔壳物质渗入表层的张裂隙后冷却所形成的。作者目前尚未见到有关这种细脉专门研究的报导,本文为了叙述方便,将这种黑色的细脉称为熔渗脉。熔渗脉与熔壳连接在一起的现象在标本中可以直接观察到(图版II-1,2)。

若沿充填张裂隙的熔渗脉打开,在裂隙面上可以观察到两种不同类型的熔渗脉:一种为不完全充填熔渗脉(图版II-1,2);另一种为完全充填熔渗脉(图版II-2)。这两种类型的熔渗脉紧密共生,有的两条不同类型的熔渗脉重叠,中间只隔着一层厚度约0.5—3mm的脉壁;有的一条熔渗脉中既发育有完全充填熔渗脉,也同时发育有不完全充填熔渗脉(图版II-2)。这两种类型的熔渗脉在陨石体内的宽度受陨石体表层的张裂隙所控制。深入陨石体内的深度,据观察可达5cm左右,估计最深可达10cm左右(图版II-1)。熔渗脉的厚度一般在1mm左右。

一、不完全充填熔渗脉的形态和结构特征

不完全充填熔渗脉,即熔壳的熔融物质渗入张裂隙后只附着在脉壁的一侧或脉壁的两侧,而张裂隙的中间并没有完全被熔壳物质所充填。发育有这种熔渗脉的张裂隙打开后,可以看到乌黑发亮的熔渗脉复盖在凹凸不平的张裂隙面上(图版II-1, unv)。这种熔渗脉分布范围较广,深入较深。在乌黑发亮的熔渗脉表面还可以看到许多反映熔渗脉成

因的形态特征。

1. 表面形态特征

(1) 表面的溅射和粘结现象

熔浆的溅射现象在这种类型的熔渗脉表面比较常见。这种现象记录了渗入张裂隙的熔壳物质在冷凝前受到挤压、熔浆向四面八方溅射的情形。溅射的熔浆由于粘度较大被拉成头大尾小,有时还拖着细丝。这种现象在双目镜和扫描电子显微镜下均可以观察到。溅射现象范围一般较小,从零点几mm到几mm(图版II-3,4,9)。

粘结现象是指熔浆物质与张裂隙面接触时在熔浆表面上留下的粗糙不平的粘结痕迹(图版II-9)。

(2) 表面的重结晶现象

表面的重结晶现象非常普遍。重结晶矿物主要有三种:一种为金属熔融体矿物,另两种是硅酸盐重结晶矿物。通过灯光照射,在双目镜下观察到的重结晶金属矿物在熔渗脉表面的分布犹如漆黑的夜空布满闪闪发光的繁星。这种重结晶形成的金属矿物常呈圆形或椭圆形,表面成球面突出,与基质玻璃接触处扁平,并带有一些小凹坑,形态酷似臭虫。重结晶金属矿物粒径几十 μm 至1mm不等。在发生溅射现象附近的熔渗脉表面则可见到长条状或拉成细丝状的金属矿物熔融体(图版II-6,9)。

熔渗脉表面的硅酸盐矿物重结晶,一种呈柱状,另一种呈粒状(图版II-5)。粒状硅酸盐矿物在扫描电子显微镜下可以观察到八面体的锥面突出在熔渗脉表面,它在熔渗脉表面发育不均匀,有的地方多,有的地方少。不同地方重结晶矿物的粒径也有差异,大的一般为0.05mm左右,小的为0.01mm左右。柱状硅酸盐重结晶矿物在熔渗脉表面比较少见,且常与粒状硅酸盐矿物发育在一起,其粒径一

一般为 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 左右(图版II—5)。

(3) 表面的微气孔和微裂隙

熔渗脉表面的微气孔不如熔壳表面发育。见不到熔壳表面那种气孔,就连喇叭状气孔也不发育。一般发育瓶口状气孔,这种气孔不凸出熔渗脉表面,气孔口也较圆(图版II—5、6、7)。

熔渗脉表面的微裂隙比较发育,这种微裂隙比较平直,裂隙间常纵横交错,无一定方向性,其长度与宽度和熔壳微裂隙相近(图版II—12)。它也与熔壳的微裂隙一样,由熔融物质冷却收缩所形成。

(4) 表面的擦痕

熔渗脉表面的擦痕只见到一处,为一组平行的有许多粉末物质的摩擦痕迹。擦痕的范围为 $3\text{mm} \times 6\text{mm}$ 左右。擦痕方向与熔渗脉的张裂隙方向近于平行(图版II—12)。

除以上几种表面形态特征外,还有一些现象是与熔渗脉成因密切相关的。如:一些熔渗脉与熔壳物质直接相连;发育熔渗脉部位的熔壳表面略低于周围的熔壳。这些是熔融的熔壳物质渗入张裂隙后形成熔渗脉的直接证据。

2. 剖面形态特征

从不完全熔渗脉的剖面看,脉的厚度为 $0.5-1.2\text{mm}$ 左右。熔渗脉直接与脉壁的陨石物质接触,两者界线分明。前者是注入后冷却了的熔壳物质,后者具陨石的组构特征,物质组分并没有发生很大的变化(图1、2),但熔渗脉很容易从脉壁上剥离下来,因此,两者纯属附着关系(图版II—3)。

熔渗脉内部没有明显的分层现象,重结晶程度与脉表面相似,只是表面比内部的晶形发育程度好。重结晶的金属矿物在脉内较少,粒径也小,一般为似圆形、梨形以及少数为不规则形状。微气孔在层内发育较少,分布也不均匀,气孔较圆(图版II—13)。微裂隙大部分在熔渗脉中部尖灭,极少数延伸到脉壁。

由于熔渗脉与脉壁间粘结很不坚固,无法磨制两者结合在一起的切片和拍摄反映两者接触关系的剖面照片。

3. 物质组分特征

不完全熔渗脉的物质组分可分为重结晶矿物和暗色基质玻璃。重结晶矿物又分金属矿物和硅酸盐

矿物两类。对这几种组分采用扫描电子显微镜观察和电子探针的定量测定,并配合X射线分析进行研究。

(1) 金属矿物集合体

不完全熔渗脉表面及内部的金属矿物常以集合体形式产出,其颜色与黄铁矿相似,金属光泽。在扫描电子显微镜下观察,它是由许许多多小颗粒组成。集合体表面放大一万倍左右就能看到文象、树枝状和蠕虫状结构特征。在个别金属矿物集合体表面还能观察到熔蚀现象(图版II—10、11)。另外对金属矿物集合体磨制的光片进行了能谱定性分析和电子探针定量分析。能谱定性分析结果表明金属矿物集合体主要由Fe、Ni、Co、S等元素组成(见图1)。电子探针定量分析结果见表1。单颗金属矿物集合体经X射线分析所获得的粉晶数据可以与 $\alpha\text{-Fe}$ 比较,见表2。

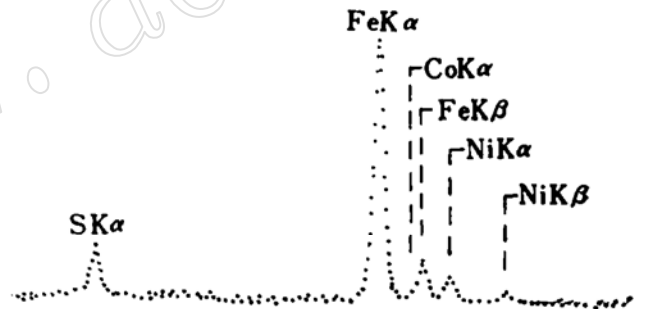


图1 金属矿物集合体的能谱分析曲线

金属矿物集合体电子探针

定量分析结果 表1

化学组分	Fe	Ni	Co	S	Σ
含量(%)	83.63	7.38	0.55	10.47	101.72
原子比	4.57	0.38	0.03	1	
化学式	$(\text{Fe}_{3.57} \text{Ni}_{0.38} \text{Co}_{0.03}) + \text{FeS}$				

通过 550°C 条件下Fe—Ni—S三元系相图分析^[2],当这种金属矿物集合体的组分为(Fe, Ni)—71.60%, FeS—28.40%时,在集合体中还应该含有少量的 $\gamma\text{-Fe}$ 。但由于集合体的结晶程度较差,而且FeS和 $\gamma\text{-Fe}$ 的含量较低故X射线分析未能显示出这两种矿物相。金属矿物集合体虽由三种矿物所组成,但由于矿物颗粒细小,而且分布均匀,所以这

金属矿物集合体与 α -Fe的
粉晶数据对比 表2

序号	金属矿物集合体			α -Fe		
	dA	I/I ₁	hkl	dA	I/I ₁	hkl
1	2.05	100	110	2.0268	100	110
2	1.45	20	200	1.4332	20	200
3	1.185	50	211	1.1702	30	211
4	—	—	—	1.0343	10	220
5	—	—	—	0.9068	12	310
6	—	—	—	0.8275	6	220

三种元素的面分布是比较均匀的(图版II—17、20)。

(2) 硅酸盐矿物重结晶和暗色基质玻璃

硅酸盐矿物重结晶在不完全熔渗脉表面和内部的分布都较普遍。根据形态可分为柱状和粒状两种,颜色与基质玻璃一致,均为黑色。其电子探针定量分析结果见表3。

熔渗脉中的硅酸盐矿物因粒度太小无法单粒挑出作X射线分析。X射线粉末衍射分析样品是选用

硅酸盐矿物及基质玻璃的电子探针定量分析结果

表3

化学组分(%)	分析号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	FeO	Cr ₂ O ₃	FeS	Σ
硅酸盐矿物	1	42.00	1.40	28.30	2.14	22.76	0.95	2.08	99.63
	2	42.02	2.07	24.74	2.69	24.13	0.96	2.88	99.47
	3	42.13	1.70	32.88	2.05	19.57	0.84	2.19	101.35
	4	42.26	1.76	32.73	1.98	19.48	0.78	2.17	101.16
	5	51.49	1.76	30.25	1.98	11.85	0.78	2.17	100.28
	6	50.11	1.75	31.23	1.90	11.68	0.82	2.11	99.61
基质玻璃	1	43.61	1.89	15.64	2.39	33.36	0.77	2.44	100.10
	2	41.44	1.00	16.37	2.74	33.42	1.40	2.52	98.89

重结晶较发育的熔渗脉部分,分析结果见图2。根据扫描电子显微镜观察和电子探针定量分析以及X射线粉末衍射资料,初步认为熔渗脉的重结晶硅酸盐矿物为橄榄石和辉石两种。

二、完全充填熔渗脉的形态及组构特征

完全充填熔渗脉,即熔壳物质充填了张裂隙的整个空间(图版II—2、13、14、15)。在这种脉中,一般见不到溅射、粘附和擦痕等现象。微气孔的发育程度和形状特征与不完全充填熔渗脉类似。但有时能见到较大气孔,大小为0.7×2mm左右。这种气孔常呈长椭圆形(图版II—13、14、15)。微裂隙不如不完全充填熔渗脉发育。这种熔渗脉中,金属矿物集合体和硅酸盐矿物重结晶现象也与不完全充填熔渗脉类似。但金属矿物集合体很少见到臭虫状的,大部分是似圆形、梨形及不规则状。在不规则状的金

属矿物集合体表面,同样能看到局部被熔蚀的现象(图版II—13、14、15)。只有在大气孔壁上偶尔能见到这两种重结晶矿物。但发育程度较不完全熔渗脉表面发育的差(图版II—14、15)。

三、几点认识

通过这两种类型熔渗脉的形态和组构特征的研究可以获得如下认识:

1. 熔渗脉的物质来源于陨石体陨落过程中表面熔融的熔浆。

2. 熔渗脉是熔融的熔壳物质处于不完全氧化和散热比熔壳慢的近似封闭空间中逐渐冷却形成的。

3. 通过熔渗脉的研究,初步认为熔渗脉的形成需要具备以下条件:(1)适合熔渗脉形成的相对封闭的空间,即发育有近于垂直陨石体表面的具有一定长度、宽度和深度的张裂隙;(2)要有比较丰富的熔浆物质来源;(3)要使粘度较大的熔浆不断的渗入,必须要有大气压力的作用;(4)熔浆在张裂隙

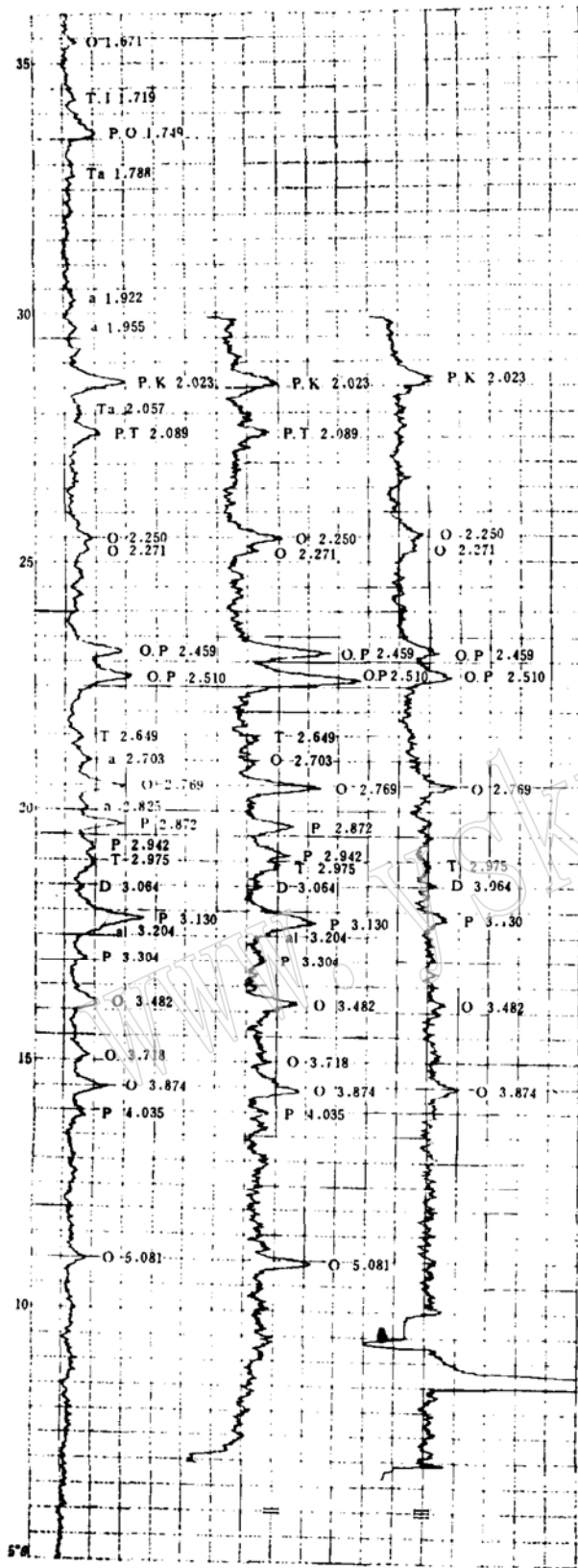


图 2 吉林陨石X射线粉末衍射曲线 (I), 吉林陨石熔壳X射线粉末衍射曲线(II), 吉林陨石熔渗脉射X射线粉末衍射曲线 (III)

(O—橄榄石、P—斜方辉石、D—透辉石、al—钠长石、a—磷灰石、T—陨硫铁、Ta—镍纹石、K—锥纹石、Ch—铬铁矿、I—钛铁矿)

中的渗透速度必须大于陨石体陨落过程中表面的剥蚀速度，还要具备一定的形成时间。

四、熔渗脉形成的物理化学过程的探讨

陨石体以15—18公里/秒的速度冲进地球大气层，陨石体前端压缩大气，产生强烈的冲击波，使周围的空气分子产生分解、电离及燃烧，温度高达2000℃左右，陨石体表面加热到3000℃—3500℃，此时陨石体表面不断地熔融、沸腾、汽化和剥蚀^[3]。这时，陨石体表面熔浆的上部处于充分氧化、下部处于不充分氧化的物理化学环境中。

处于上述物理化学环境中的陨石表面产生的热效应，使得陨石表面出现了不同规模和类型的微裂隙。靠近陨石体前部，微裂隙宽度约1—2mm，裂隙面近于垂直表面的张裂隙，在大气压力的挤压下，部分底层熔浆有可能渗入这些张裂隙中。因张裂隙口较窄，表面熔浆丰富，粘度又大，所以，在熔浆入口处被覆盖的情形下熔浆源源不断地被挤压进去，沿脉壁或整个裂隙往下渗透。

在熔渗脉渗透过程中（或陨石体在大气层中陨落过程中），张裂隙在张应力的作用下发生了幅度不同的相对运动，使得沿张裂隙壁渗透的熔浆受到不同程度的挤压而产生熔浆溅射和粘结现象。

陨石体进入低空时，速度大大减慢，表面温度急剧下降。尽管陨石体表面形成很大的反向温度梯度，而充填有熔浆物质的张裂隙中实际上是相对封闭的散热较慢的物理化学体系，体系内的熔浆物质并没有形成明显的温度梯度，致使熔浆中重结晶现象普遍发育，不出现分层现象。

陨石中的陨硫铁等硫化物在熔融过程中，部分硫元素被蒸发。熔融的硫化物由于熔浆物质的沸腾、流动被分解成极细小的液滴，较均匀地分布在熔浆中，处在熔浆表面的部分则被氧化成氧化物。渗入张裂隙中的熔浆，实际上相当于第III层的熔

壳物质⁽⁴⁾。这部分熔浆物质进入张裂隙后处在相对封闭的氧气不足的物理化学环境中, 温度缓慢下降, 熔浆物质在缓慢地向裂隙深处流动, 极细小的硫化物液滴开始凝聚, 并逐渐成为较大的液滴, 由于表面张力作用, 这些硫化物液滴成为球体或椭球体, 漂浮于熔浆表面的则成半球体。小液滴间的凝聚越来越紧密, 使得原来的球形被挤压成蠕虫状或树枝状。这是金属矿物的结构之一。金属硫化物熔体在较长的冷凝过程中结晶出 (Fe, Ni, Co)、FeS 和 γ -Fe 三种金属矿物。

陨石体撞击地面时所产生的冲击力, 使充填熔渗脉的脉壁间产生位移, 结果在不完全充填熔渗脉的表面留下了清晰的擦痕。

就观察到的熔渗脉发育的深度达 5cm 左右看来, 熔浆物质渗入张裂隙的速度将大大超过陨石体表面的剥蚀速度, 不然要形成渗透那么深的熔渗脉是不可能的。

熔浆物质沿张裂隙缓慢地往下流动的时候, 它本身的温度不可能使脉壁的陨石物质产生熔融, 也不可能发生熔浆与脉壁间的物质交换等物理化学过程。因此, 熔渗脉与脉壁之间纯属附着关系。

研究的陨石标本由北京大学地质系张淑媛教授提供, 研究工作曾得到武汉地质学院北京研究生部 X 光实验室彭志忠教授的指教, 作者在此一并致谢。

参 考 文 献

[1] 张淑媛, (1979)。吉林陨石结构构造的初步研究。吉林陨石雨论文集, P. 171—172, 科学出版社, 北京。

[2] Kullerud, G., yund, R. A. and MOH. G. H., (1969)。phase Relations in The Cu—Fe—S, Cu—Ni—S, and Fe—Ni—S Symposium on Magmatic ore Deposits, P. 340, The Economic Geology publishing Company, Lancaster, PA.

[3] 张德良等, (1979)。大气层中“吉林陨石雨”飞行轨道计算和现象分析。吉林陨石雨论文集, P. 240。

[4] 陈克植, (1982)。吉林陨石熔壳的扫描电子显微镜研究。岩矿测试, 第1卷第4期, P. 19—24。

图 版 说 明

- 图版 II—1, 发育熔渗脉的陨石标本 × 1
 图版 II—2, 熔渗脉与熔壳连接及不完全充填熔渗脉与完全充填熔渗脉的共生关系 × 15
 图版 II—3, 不完全充填熔渗脉表面的溅射现象及熔渗脉与脉壁的关系 × 10
 图版 II—4, 不完全充填熔渗脉表面的溅射现象 × 220
 图版 II—5, 不完全充填熔渗脉表面的两种硅酸盐矿物重结晶(粒状和柱状) × 450
 图版 II—6, 不完全充填熔渗脉表面的金属矿物集合体及微气孔 × 100
 图版 II—7-8, 不完全充填熔渗脉表面的硅酸盐矿物重结晶 × 250, × 1000
 图版 II—9, 不完全充填熔渗脉表面的溅射现象和粘附痕迹 × 240
 图版 II—10-11, 金属矿物集合体的文象、树枝状结构及表面的熔蚀现象 × 10000
 图版 II—12, 不完全充填熔渗脉表面的擦痕及微裂隙 × 15
 图版 II—13, 完全充填熔渗脉中的微气孔及各种形状的金属矿物集合体 × 100
 图版 II—14-15, 完全充填熔渗脉中的微气孔、金属矿物集合体及微气孔壁上的金属矿物和硅酸盐矿物重结晶 × 250
 图版 II—16, 完全充填熔渗脉中微气孔壁上的金属矿物集合体的蠕虫状结构 × 10000
 图版 II—17, 熔渗脉中金属矿物集合体的剖面形态 × 300
 图版 II—18, 金属矿物集合体中 Fe 元素面分布 × 300
 图版 II—19, 金属矿物集合体中 S 元素面分布 × 300
 图版 II—20, 金属矿物集合体中 Ni 元素面分布 × 300
- 注: 1.m—陨石体, fc—熔壳, unv—不完全充填熔渗脉, v—完全充填熔渗脉
 2. 图版 II—1—3 为实体显微镜照片; 图版 II—4—16 为扫描电子显微镜的二次电子象; 图版 II—17 为扫描电子显微镜的反射电子象; 图版 II—18—20 为扫描电子显微镜(带探针)的元素特征 X 射线象。

Scanning Electron Microscope Study of Fuse Leakage Veins in Jilin Meteorite

Chen Keqiao

Abstract

The occurrence of fuse leakage vein means that fused crust material melted under the action of external dynamics, percolated into slight tension fissures, and after gradual cooling, formed dark veinlets. The black permeated cemented veinlets may penetrate as deep as 10 cm into the meteorite but some of them penetrated only a few centimeters under the surface. There are three occurrences of the secondary veinlets observed: (1) only one side of the crevice was coated by the fused material, thickness of the veinlets 0.2-0.6mm, (2) Both sides of the tension cracks are coated by the fused material with incomplete or without fused stuffing in the middle part and 0.2-1mm in thickness, (3) The whole crevices were completely filled by the fused black material. In the first occurrence of the permeated stock works there is the trace of splash, shooting and striae of the fused permeation. The metallic minerals in the secondary veinlets are mainly Fe, Ni and a little sulfide in the form of bed-bug on the surface of the veinlets which is mainly composed of the olivine and pyroxene etc. began to crystallize. All of these can be found on the surface of veinlets of types one and two, mentioned above.

Besides, direct connection of the fused primary crust and the secondary veinlets is found among some of the specimens. The open gap of the veinlets on surface of the meteorite was cemented by the fused crust. This, together with the composition shows that the secondary veinlets were formed under relatively weaker oxidation condition. The shooting of the viscous fusion indicated that during the formation of the secondary veinlets by permeation there occurred compression by the relative movement of the side-walls. The trace of the stria on the surface of the secondary veinlets showed also that the relative movement of the side-walls occurred after the consolidation of the fused materials. It may be inferred that the rate of cooling of the secondary veinlets was somewhat slower than that of the fused crust, so that there was the possibility of occurring silicate minerals (orthopyroxene etc.) on the surface of the veinlets.

