

吉林陨石熔壳的扫描电子显微镜研究

(中国地质科学院矿床地质研究所) 陈克樵

吉林陨石也和其它陨石一样,通常都发育着一层黑色熔壳。这一层熔壳,记录了陨石体陨落过程中经历了熔融、气化、烧蚀、熔浆流动、微粒堆积和熔浆冷却过程中的分异、重结晶等物理化学作用过程,以及这些作用过程在陨石表面不同部位所反映出来的差异性。

吉林陨石熔壳从表面和剖面特征可分两类:发育完全的熔壳和发育不完全的熔壳。发育完全的熔壳均发育在经历了陨石体陨落的全过程或有足够时间形成完整熔壳的陨石体表面。这类陨石熔壳多为黑色;陨石体表面的熔壳特征—微气孔、微熔流、微裂隙、微粒堆积、矿物残留等现象明显;熔壳剖面分层清楚,一般可分四层(由表及里):I、玻璃质熔壳层,II、金属质点—暗色玻璃质层,III、竹叶状硅酸盐矿物微晶晶出层,IV、陨硫铁渗透胶结层;熔壳厚度通常为1mm左右。发育不完全的熔壳一般均发育在陨石体陨落过程中发生炸裂以后,接受各种物理化学作用过程较短的陨石体表面。这一类熔壳的颜色多为褐色或烟灰色;熔壳表面特征不明显;熔壳剖面分层不清楚;熔壳厚度一般少于0.2mm,有的陨石体表面仅仅被熏成烟灰色,而矿物没有发生任何物理化学变化。

本文研究的吉林陨石熔壳样品分别采自I号陨石和江密蜂地区的陨石。研究重点是发育完全的吉林陨石熔壳。

一、吉林陨石熔壳的表面形态特征

陨石熔壳表面的宏观形态特征,前人早有详细描述^[1]。本文主要通过扫描电子显微镜观察研究熔壳表面的微观形态特征。千姿百态的吉林陨石熔壳表面,在扫描电子显微镜下可以清楚地观察到微气孔、微熔流、微裂隙、微粒堆积、矿物残留等现象^[2,3](见照片1—12)。

吉林橄榄石—辉石球粒陨石的熔壳表面,微气孔现象普遍发育。扫描电子显微镜下所观察到的微气孔形态仍保持了熔浆当时的沸腾状态,形象非常壮观。表面观察到的均为开口式微气孔。这类微气孔一般有喇叭状和瓶口状两种,形状不规则。气孔大小不一,直径一般为3—30 μ ,大的可达0.1mm。气孔外观特征各异:有的气孔与气孔间的隔壁逐渐被熔融,气孔开始连通;而有的气孔表面趋向平缓;另一些表面却被微粒物质所堆积,不同程度地受到堵塞(见照片1—4)。微气孔的发育程度不同部位不甚相同,一般陨石体陨落时,前、后部位发育较差,而侧面发育较好。陨石熔壳表面微气孔发育程度的差异,反映了陨石内部成分的不均一性以及不同部位在陨石体陨落过程中所处的物理化学环境的差异性^[4]。气孔的形态和大小在一定程度上反映了微气孔的演化过程。

微熔流现象也是吉林陨石熔壳表面的一

种常见的形态特征。这种现象是粘稠的熔浆在陨石体表面流动所留下的痕迹。这种现象主要发育在陨石体陨落时的侧面。靠近陨石体前部常成蠕虫状，流纹常与气流方向平行。靠近陨石体中部和尾部常成波浪形和其它形状。波浪形的微熔流朝气流方向成缓坡，背气流方向成陡坡。微熔流的形态和发育程度反映陨石体组分和陨石体表面不同部位在陨落过程中所处的物理化学环境以及陨石体陨落过程中的前、后部位。

宏观上比较完整的吉林陨石熔壳表面，在扫描电子显微镜下可以观察到不同方向和长度的微裂隙。这些微裂隙分布没有一定规律，形状也不规则，但局部比较平直。这是不均一的脆性物质龟裂的典型形状。这种形状的微裂隙多为陨石体表面熔壳物质冷却收缩所形成。某些方向的微裂隙还可以看到错动现象，这是受碰撞等外力作用的结果。所以微裂隙的形成，直接受张应力和剪切力所控制。微裂隙宽度一般为几 μ 到几十 μ （见照片4），切割深度不等。由于微裂隙的大量发育使熔壳的完整性和连续性遭到不同程度的破坏。

熔壳表面常可见到扁平状微粒物质的堆积现象。这些微粒物质的粒径多为零点几 μ 到几 μ 。这种现象在微熔流发育的部位比较明显。这些部位的凹陷处和气孔旁均有较厚的微粒堆积。但是，由于陨石体在陨落过程中不同部位的剥蚀和堆积的差异性，在陨石体的另一些部位却几乎看不到这种现象（见照片2、3）。

吉林陨石熔壳表面的矿物残留现象，虽然不是很普遍，但在熔壳表面形态的扫描电子显微镜的研究过程中发现了若干种：假六方短柱状的辉石类矿物残留，粒径 $0.1 \times 0.04\text{mm}$ （见照片5）；圆形硅酸盐矿物残留，粒径 0.01mm 左右（见照片6）；形成平台状凹坑的金属矿物残留，表面直径 0.05

mm 左右（见照片7）。金属矿物的这种凹坑状残留是由于金属矿物较它周围的硅酸盐矿物熔点低而且易挥发的缘故^[1]。

在吉林陨石熔壳的个别微气孔中还发现了毛发状结晶物质（见照片8），由于该物质太细，并且位于气孔内，因此无法进行深入研究。

二、吉林陨石熔壳的组构特征

吉林陨石熔壳的物质组分和结构构造特征的研究，主要通过扫描电子显微镜的剖面形态观察和采用电子探针的化学组分测定，并以X射线粉末衍射分析配合，了解熔壳的物相组成。

熔壳剖面上的组构特征，除了进一步反映在微气孔、微裂隙、以及矿物残留等现象外，还明显地反映在熔壳的层状构造上。发育完全的吉林陨石熔壳，由表及里可以分为四层（有人只分三层）^[2]，这四层及其特征如下：

I、玻璃质熔壳层

玻璃质熔壳层位于熔壳表面。该层发育不完全，厚度变化较大，可以从 $0-120\mu$ 。层内发育大量的开口式微气孔和少数封闭式微气孔。微气孔的形态特征和熔壳表面所观察到的差不多。微裂隙穿过本层。该层主要由于熔壳物质迅速冷却，来不及分异和重结晶的结果（见熔壳剖面形态特征照片9、10的I层）。

玻璃质熔壳层主要由硅酸盐暗色玻璃组成，物质组分比较均一，化学组分以 SiO_2 、 FeO 、 MgO 为主，并含一定量的 NiO 、 CaO 、 Al_2O_3 （见表1，I层①、②，照片10中的Fe、Si线剖面分析曲线）。

II、尘埃状金属质点—暗色玻璃质层

该层紧靠I层，在玻璃质熔壳层不发育的部位直接露出表面。该层发育完全，厚度

吉林陨石和熔壳的化学组分定量分析结果

表 1

化学组分	熔壳各层电子探针定量分析结果 (%)								化学分析结果 ^(*)	
	I 层		II 层		III 层				熔壳	陨 石 (四个平均)
	(1)	(2)	金属质点	基质玻璃	微 晶		基质玻璃			
					(1)	(2)	(1)	(2)		
SiO ₂	42.64	41.17	22.61	43.24	41.69	41.05	47.55	45.74	36.30	35.49
Al ₂ O ₃	0.90	1.38	—	—	—	—	7.31	6.62	1.84	1.84
MgO	21.69	21.51	4.31	25.47	23.55	23.97	3.02	3.19	21.04	24.18
CaO	2.84	2.81	3.30	2.27	1.21	2.48	3.86	5.01	2.31	2.76
FeO	29.65	30.77	64.36	24.51	21.86	25.49	32.88	35.19	18.70	9.50
NiO	2.39	2.36	2.35	2.40	0.55	1.22	0.56	0.49	—	—
Cr ₂ O ₃	—	—	3.10	2.11	6.14	4.36	—	—	0.35	0.60
TiO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.10
MnO	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.31
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	0.33	0.24
Na ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	0.84	0.88
K ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10	0.11
Fe	—	—	—	—	—	—	—	—	11.55	16.26
Ni	—	—	—	—	—	—	—	—	1.96	1.76
Co	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08
FeS	—	—	—	—	2.83	1.23	3.40	3.13	4.03	5.25
H ₂ O*	—	—	—	—	—	—	—	—	0.36	0.35
总量	100.11	100.00	100.03	100.00	97.83	99.80	98.58	99.37	100.11	99.71

* 分析者：地质部岩矿测试技术研究所朱玉伦。

变化较大，一般为20—160 μ 左右。层内主要由雏晶状金属质点和暗色基质玻璃组成，金属质点常呈尘埃状和针状。尘埃状的一般为零点几 μ ，针状的可达零点几 μ ×几 μ 。金属质点在层内分布不均匀，也没有一定的方向性排列。但是，在与前、后层界面附近，金属质点相对比较密集，而且局部地区有针状金属质点的定向排列。故该层与前、后层的界限明显。层内金属点（按面积统计）约占30—40%左右。该层微气孔发育，多数为封闭式的不规则状，层内尚可见到硅酸盐矿物的残留。微裂隙发育，并继续穿过本层（见熔壳剖面照片9、10的II层）。

电子探针测定的II层金属质点和暗色玻璃的化学组分（见表1 II层）。金属质点中含有过量的二氧化硅和氧化镁是因为电子探针分析的电子束直径和电子束穿透深度均在1 μ

左右，而被分析的金属质点细小，故金属质点的化学组分受到了它周围和底部的基质成分的影响。扣除影响，这种含有一定量二氧化硅和氧化镁的金属质点成分近似磁铁矿。在反光显微镜下，它的反射率和反射色也基本上与磁铁矿一致。层内金属质点的含Fe量和基质中含Si量都在一定程度上变化（见照片10中Si和Fe线剖面曲线）。

III、竹叶状硅酸盐矿物微晶晶出层

竹叶状硅酸盐矿物微晶晶出层紧挨II层，它与前、后层的界限非常清楚。该层厚度较大，而且稳定，一般在260—300 μ 左右。层内主要由竹叶状硅酸盐矿物微晶和暗色基质玻璃组成。该层与II层界面附近仍发育有少量金属质点。竹叶状硅酸盐矿物微晶，粒径一般为5×40 μ 左右。在层内分布比较均匀。据统计，微晶约占60—70%。该层封闭

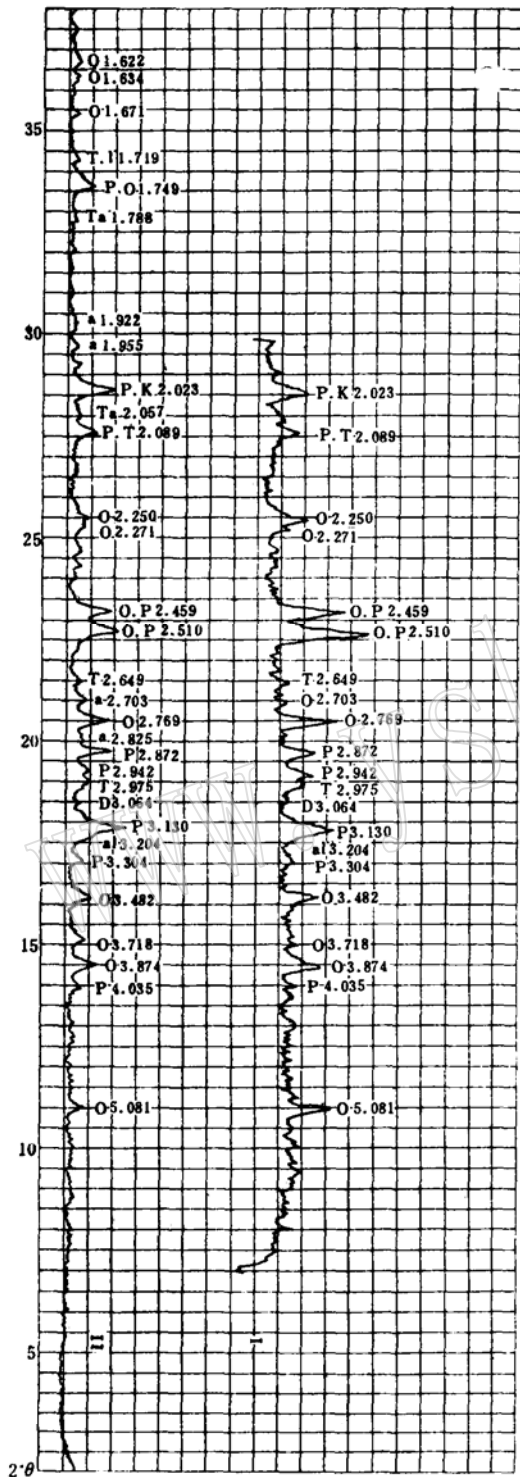


图 1 吉林陨石 X 射线粉末衍射曲线 (I),
吉林陨石熔壳 X 射线粉末衍射曲线 (II)
O—橄榄石、P—斜方辉石、T—陨硫铁

式气孔发育, 偶尔还能见到硅酸盐矿物残留。部分微裂隙在层内尖灭, 部分微裂隙继续穿过本层 (见照片 9 的 III 层)。

竹叶状硅酸盐矿物微晶晶出层中的微晶和基质玻璃的化学组分有明显的不同。微晶的化学组分以 SiO_2 、 MgO 、 FeO 为主, 而暗色基质玻璃以 SiO_2 、 FeO 、 Al_2O_3 、 CaO 为主 (见表 1, III 层)。从 III 层中 MgO 和 CaO 的面分布象上可以得到微晶和基质化学组分差异的直接反映 (见照片 11、12)。根据微晶的化学组分和熔壳粉末衍射资料, 可以初步确定该矿物为橄榄石类矿物微晶 (见图 1)。

IV、陨硫铁渗透胶结层

陨硫铁渗透胶结层位于 III 层下面, 并一直延伸到陨石体。该层与陨石体没有明显的界线, 厚度约为 $200-500\mu$ 左右。本层的特点是曾受热烘烤, 颜色变深, 层内陨硫铁曾发生重熔、渗透、充填和胶结原生矿物中的微裂隙或球粒中的微裂隙, 形成了次生陨硫铁细脉。该脉宽一般小于 1μ , 局部可达 3μ 或更宽。层内不发育微气孔。由表层延伸下来的微裂隙几乎都在层内尖灭 (见照片 9 的 IV 层)。

该层的矿物组成和化学成分几乎与陨石体完全一致, 因为除陨硫铁以外, 其它矿物的组分没有发生物理化学变化, 体系内基本上没有发生物质的带入和带出现象。所以作者对本层的物质组分没有作进一步的深入研究。

层状构造的形成反映了熔壳构质的分异和影响熔壳成因的物理化学条件在时间和空间上的差异^[5]。

三、吉林陨石熔壳形成的物理化学过程的探讨

通过对吉林陨石熔壳的表面和剖面形态以及它们的组构特征的研究, 我们可

以初步得出陨石熔壳形成的物理学环境化和演化过程。

当高速运行的陨石体以每秒15—18公里的速度冲进地球大气层时,由于大气和陨石体表面的摩擦以及陨石体前端大气产生的强烈的冲击波压缩大气,使空气分子产生分解、电离和燃烧,使陨石体周围的温度升高到20000℃左右。这时陨石体表面被加热到3000℃—3500℃,陨石表面物质开始熔融、沸腾、气化和剥蚀^[1]。在这总的物理化学过程中,陨石体的某些部位还叠加了熔浆流动、微粒堆积等过程。据推算陨石体从70公里高空到离地面10公里处的陨落过程中,烧失量可达陨石体总重量的20%。从陨石体表面、熔壳的剖面I—IV层的组构特征看,陨落时从表面至内部的温度梯度很大。熔浆表层(相当于剖面上的I、II层)处在充分氧化的物理化学环境中,而熔浆层(相当于剖面上III层)是处在不完全氧化的物理化学环境中。

研究表明,I、II、III层熔壳物质曾全部经过了重熔。IV层的物质组分中仅陨硫铁经过了重熔。根据这种情况推断,当时该层的温度最高在1000℃左右^[2]。在冷却过程中,陨石体表面温度正好与加热时相反,温度梯度仍然很大。由于熔浆表面的温度骤然下降,内部物质来不及分异和结晶,结果形成成分比较均一的暗色玻璃。向内部,随着深度的增加,熔浆的冷却速度大大的减慢,以致那些结晶温度较低,晶出能力较强的金属矿物开始结晶。随后,那些结晶温度较高,晶出能力较差的硅酸盐矿物开始晶出。由于矿物结晶时的放热效应,大大减慢了体系内温度冷却的速度,延长了矿物的重结晶时间,使得厚度大而稳定的III层晶出了大量的竹叶状硅酸盐微晶。

从吉林陨石熔壳的剖面形态和组构特征看,I、II层全部由氧化物组成(不包括层

内个别残留矿物),而III层的硅酸盐矿物微晶和基质玻璃的物质组分中普遍含硫化物。这充分说明I、II层是处于完全氧化的物化环境中形成,III层是处于不完全氧化的物化环境中形成。

吉林陨石熔壳中,由表及里各层的厚度和矿物的重结晶程度随着深度的增加而增加,这是陨石体表面的熔融物质冷却时存在的反向温度梯度和冷却速度的差异性的有力证据。

吉林陨石熔壳的扫描电子显微镜研究

图版 I 说明

- | | |
|---|-------|
| 照片1, 熔壳表面的微气孔形态 | ×100 |
| 照片2, 无微粒堆积的微气孔形态 | ×3200 |
| 照片3, 熔壳表面的微粒堆积现象 | ×1200 |
| 照片4, 熔壳表面的微裂隙和微气孔 | ×240 |
| 照片5, 熔壳表面的辉石类矿物残留 | ×300 |
| 照片6, 熔壳表面的硅酸盐球粒残留 | ×1400 |
| 照片7, 熔壳表面的金属矿物残留 | ×200 |
| 照片8, 熔壳表面毛发状物质重结晶 | ×2000 |
| 照片9, 熔壳剖面分层 | ×160 |
| (I、暗色玻璃质熔壳层; II、尘埃状金属质点—暗色玻璃质层; III、竹叶状硅酸盐微晶晶出层; IV、陨硫铁渗透胶结层) | |
| 照片10, 熔壳剖面I、II层及Si、Fe线剖面分析曲线 | ×800 |
| (上一条为Si含量变化曲线。下一条为Fe含量变化曲线) | |
| 照片11, 熔壳剖面III层中Ca元素面分布象 | ×750 |
| 照片12, 熔壳剖面III层中Mg元素面分布象 | ×750 |

参 考 文 献

- [1] Кринов, Е. Л., (1955), Основы Метеоритики. Гостехиздат.
- [2] 闵育顺, (1979), 吉林陨石熔壳的组成特征及其形成过程的探讨, 吉林陨石雨论文集, P. 280—288, 科学出版社, 北京。
- [3] 曲永新, (1979), 吉林陨石熔壳的扫描电子显微镜初步观察, 吉林陨石雨论文集, P. 289—294, 科学出版社, 北京。
- [4] 林同骥等, (1979), 吉林陨石烧蚀图象分

析, 吉林陨石雨论文集, P. 270—279, 科学出版社, 北京。

〔5〕 Ramdohr, P., (1973), The opaque minerals in stone meteorites.

〔6〕 郭崇山, (1979), 吉林陨石雨岩石化学与

透明矿物初步研究, 吉林陨石雨论文集, P. 83, 科学出版社, 北京。

〔7〕 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. 249, 科学出版社, 北京。

Scanning Electron Microscope Study of Fused Crusts of Meteorites from Jilin

Chen Keqiao

Abstract

There are two types of fused crusts of meteorites, the primary and the secondary. The former may begin to form once the meteoritic body enters the atmosphere of the earth, while the latter may be created on the new surface formed when the meteorite is broken or shattered due to unbalanced stress and strain. The primary fused crust is greyish black, without the original meteoritic surface characteristics but with evident gaseous prints, vesicles, residue and new accretions formed during falling of the meteorite. The micro stratification of the crust is distinct, four layers can, in general, be recognized, (I) Hyaline fused crust layer. It is the outmost true fused layer consisting mainly of dark glass, incompletely developed, and 0—120 μ in thickness; (II) Metal particle-dark hyaline layer. Abundant dusty exdissolved metal particles and magnetite crystallites are found set in a glassy groundmass. This layer is completely developed and from 20 to 160 μ thick; (III) Bamboo-leaf-like silicate microcrystalline layer. Bamboo-leaf-like microcrystalline silicate minerals are found set in a dark glassy groundmass and this layer is about 260-300 μ thick; and (IV) Troilite leakage-cemented layer. In this layer, remelting, permeating and cementing phenomena are found only with troilite, and other silicate minerals basically remain unchanged, these producing an obscure boundary between this layer and the underlying one. The thickness of this layer is 200-500 μ .

陈克樵：吉林陨石熔壳的扫描电子显微镜研究

图版 I

