

庄河、光明山陨石的岩石矿物学研究^{*}

林杨挺¹ 王道德¹ 刘金远² Makoto Kimura³ 王志彦²

¹(中国科学院广州地球化学研究所 510640)

²(大连自然博物馆)

³(Faculty of Science, Ibaraki University, Japan)

摘 要

庄河陨石和光明山陨石是两个降落于同一地区的 H5 型普通球粒陨石. 根据两辉石温度计求出这两个陨石的平衡温度 $< 500^{\circ}\text{C}$; 根据镍纹石的带宽与组成关系, 获得光明山陨石在其母体中的冷却速率约为 $10\text{--}100^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 而庄河陨石中普遍出现均一的四方镍纹石表明其冷却速率更低. 光明山陨石的冲击变质特征以硅酸盐颗粒破碎为主, 其冲击相为 S1; 庄河陨石中硅酸盐矿物具明显的波状消光, 并存在细小的冲击熔融脉, 其冲击相划分为 S2.

关键词 陨石—分类—冲击变质—热变质

1 引 言

庄河陨石于 1976 年 8 月 18 日北京时间 2033 降落于辽宁省庄河市石山乡磨石坊村 ($39^{\circ}40'\text{N}$, $122^{\circ}59'\text{E}$). 据当地村民介绍, 该陨石降落时曾在半空中分成两团火光, 一团掉入大海, 另一团砸入稻田地下约 1 m. 陨石重 2.9 kg, 表面熔壳因高温时与水接触形成大量裂纹. 光明山陨石于 1996 年 12 月 30 日北京时间 0800 左右降落于辽宁省庄河市光明山镇赵家村 ($39^{\circ}48'15''\text{N}$, $122^{\circ}45'50''\text{E}$), 距庄河陨石降落地仅 20 多公里. 根据发现人、该村村民王炳德介绍, 陨石是在刺耳鸣叫声持续 2—3 min 后砸向山坡的田里, 并将冻土层砸出一个大坑, 而其本身破裂成 3 块. 这三个碎块被捡起时尚烫手, 拼合后长 13 cm、宽 11 cm、厚 8.5 cm, 重 2.91 kg. 有关庄河陨石和光明山陨石的研究迄今尚无报道, 这 2 个陨石的大部分样品现保存于大连自然博物馆.

2 实验方法

陨石样品用金刚石慢速切片机切成厚约 1 mm 薄片, 并分别磨制成光薄片. 矿物化学组成的定量分析用 JEOL 733 电子探针完成, 加速电压为 15 kV. 金属相的分析校正了 $\text{Fe } K\beta$ 谱线对 $\text{Co } K\alpha$ 谱线的叠加作用. 硅酸盐分析结果用 Bence-Albee 方法, 金属相用传统的 ZAF 方法进行校正. 矿物的模式组成由电子探针快速面扫描结果统计求出^[1].

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (49873028)

2000-06-22 收到原稿, 2000-11-20 收到修定稿

3 岩石矿物学

3.1 庄河陨石

样品有轻微的氧化, 含少量铁氧化物细脉, 透光下金属或陨硫铁附近可见部分硅酸盐颗粒呈浸染状红色调。球粒边缘较模糊, 但大部分仍易辨认, 其主要结构类型为斑状和炉条状结构, 少量为放射状和等粒状结构。对 18 个球粒粒径的测量结果, 其粒径分布在 0.5 mm 和 1.0 mm 出现双峰, 另有 3 个球粒的粒径分别为 1.6 mm, 2.3 mm 和 3.8 mm, 它们均为炉条状橄榄石球粒。基质明显重结晶, 晶体粒度 $> 10\mu\text{m}$ 。主要矿物 (面积 %) 有橄榄石 (39.4)、古铜辉石 (35.7)、斜长石 (8.4)、铁纹石 (7.2) 和陨硫铁 (3.4), 含透辉石 (4.3)、磷酸盐 (磷灰石和白磷钙矿) (0.4)、镍纹石 (0.7) 和铬铁矿 (0.5) 等。长石呈粒隙分布, 粒度约 20—60 μm , 透辉石主要分布于球粒中。硅酸盐矿物颗粒破碎明显, 并常见波状消光。一些熔融细脉 ($< 400\mu\text{m}$ 宽) 大致平行贯穿薄片, 脉中金属和陨硫铁呈细粒或细脉状, 而硅酸盐矿物仅少量熔融, 大部分呈角砾状。

橄榄石 ($\text{Fa}_{18.3-20.7}$) 的化学组成十分均一, 其 Fa 值的平均标准偏差 (PMD) 为 3.1%; 次要组分为 MnO (0.18—0.60 wt%), 绝大部分颗粒的 CaO 含量低于电子探针检测限。低 Ca-辉石具有古铜辉石的化学组成 ($\text{Fs}_{15.7-18.6}\text{Wo}_{0.8-1.7}$), 含少量 TiO_2 , Al_2O_3 和 MnO (见表 1), 其 Fs 的 PMD 为 4.0%。对一个透辉石颗粒核部及边缘的分析给出均一的组成 ($\text{Fs}_{6.2-6.7}\text{En}_{47.3-47.8}\text{Wo}_{45.5-46.5}$), 次要组分为 TiO_2 (0.45—0.49 wt%), Al_2O_3 (0.54 wt%), Cr_2O_3 (0.82 wt%) 和 Na_2O (0.54—0.56 wt%)。斜长石的组成为 $\text{An}_{10.8-12.5}\text{Or}_{3.2-8.1}$ 。熔融细脉中的橄榄石、古铜辉石和斜长石角砾的化学组成与其他产状颗粒无明显差异。磷灰石含少量 FeO (0.22—0.59 wt%) 和 Na_2O (0.50—0.53 wt%), 白磷钙石含 Mg (3.68—3.79 wt%), Na_2O (3.02—3.16 wt%) 和 FeO (0.38—1.93 wt%)。铁纹石的 Co 含量落在 0.40—0.65 wt% 范围, 而 Ni 含量变化较大 (3.23—6.75 wt%)。镍纹石的 Ni 含量很高 (36.1—53.1 wt%), 而 Co 含量为 0.05—0.17 wt%。对 3 个板状镍纹石做电子探针剖面定量分析, 其中 2 个 (分别为 12 μm 和 22 μm 宽) 为均一的四方镍纹石 (Ni 含量分别为 49.6—51.1, 52.0—53.1 wt%), 另一个具 M 型环带特征, 该镍纹石宽 18 μm , 其 Ni 含量从中央的 36.1 wt% 向边缘分别升高至 45.8 wt% (与铁纹石相邻) 和 40.0 wt% (与硅酸盐相邻)。

3.2 光明山陨石

球粒边界明显, 但无玻璃, 其结构类型与庄河陨石相似。对 35 个球粒粒度的测量结果, 31 个落在 0.3—1.0 mm 之间, 4 个在落在 1.3—1.6 mm 之间, 其中后者有 3 个为放射状辉石球粒。基质已明显重结晶, 晶体的粒度 $> 10\mu\text{m}$ 。矿物成分与庄河陨石相似, 主要矿物包括 (面积 %) 橄榄石 (41.2)、古铜辉石 (34.4)、斜长石 (7.0)、铁纹石 (8.9) 和陨硫铁 (2.9), 含少量透辉石 (4.1)、磷酸盐 (磷灰石和白磷钙矿) (0.5)、铬铁矿 (0.3) 和镍纹石 (0.6) 等。斜长石的粒度 ($< 20\mu\text{m}$) 明显小于庄河陨石。硅酸盐矿物颗粒破碎, 少量橄榄石和古铜辉石呈波状消光。

橄榄石 ($\text{Fa}_{18.5-21.6}$)、低 Ca 辉石 ($\text{Fs}_{16.4-18.7}\text{Wo}_{0.8-1.8}$) 及透辉石 ($\text{Fs}_{4.8-8.8}\text{En}_{45.5-48.3}\text{Wo}_{45.7-47.7}$) 的化学组成与庄河陨石中的颗粒几乎相同 (见表 1), 其中橄榄石 Fa 值的 PMD 为 2.3%, 低 Ca 辉石 Fs 值的 PMD 为 2.6%。26 个斜长石的成分为 $\text{An}_{10.2-13.5}\text{Or}_{2.0-5.6}$, 另

有一个颗粒较贫 CaO($An_{8.7}Or_{5.7}$), 一个富 K_2O (核部: $An_{11.6}Or_{27.5}$; 边缘: $An_{11.8}Or_{17.3}$). 磷灰石的次要组分 FeO (0.09—0.28 wt%) 和 Na_2O (0.28—0.35 wt%) 较庄河陨石中的颗粒略低. 白磷钙矿含 MgO (3.67—3.95 wt%), Na_2O (3.01—3.29 wt%) 和 FeO (0.20—0.90 wt%), 其 FeO 含量同样低于庄河陨石中的颗粒. 铁纹石的 Co 含量落在 0.39—0.55 wt% 范围, 与庄河陨石相似, 但 Ni 含量相对均一 (5.35—7.10 wt%). 镍纹石具有很大的 Ni 含量变化区间 (19.9—51.4 wt%), 并与 Co 含量 (0.03—0.31 wt%) 负相关 (图 1). 对 5 个镍纹石做电子

表 1 光明山陨石和庄河陨石硅酸盐矿物的平均组成及变化范围 (wt%)

n	橄榄石		低 Ca 辉石		透辉石				长石	
	89*	38#	30*	28#	11*	核 #	边 #	27*	21#	
SiO ₂	39.5±0.1	39.2±0.2	56.8±0.1	56.3±0.1	54.6±0.2			66.3±0.1	65.5±0.3	
	38.6—40.3	37.9—40.0	56.0—57.4	55.4—56.9	54.0—55.0	53.3	54.3	65.4—66.9	63.3—67.1	
TiO ₂	0.01±0.00		0.15±0.03	0.15±0.02	0.43±0.04			0.02±0.01	0.03±0.01	
	< 0.07	< 0.09	< 0.42	0.04—0.22	0.32—0.54	0.49	0.45	< 0.07	< 0.09	
Al ₂ O ₃			0.17±0.03	0.17±0.02	0.64±0.15			21.3±0.1	21.0±0.2	
	< 0.02	< 0.04	0.05—0.43	0.06—0.38	0.46—1.34	0.54	0.54	20.8—22.0	20.1—21.1	
Cr ₂ O ₃			0.04±0.02	0.05±0.01	0.69±0.03			n.d.	n.d.	
	< 0.16	< 0.04	< 0.22	< 0.11	0.61—0.78	0.82	0.83			
FeO	18.1±0.1	18.2±0.2	11.4±0.1	11.4±0.2	3.41±0.40			0.37±0.08	0.29±0.06	
	16.9—20.1	16.9—19.5	10.7—12.5	10.4—12.3	2.95—5.33	3.88	4.20	0.00—0.72	—0.52	
MnO	0.37±0.02	0.37±0.03	0.43±0.03	0.45±0.03	0.14±0.04			0.01±0.01	0.01±0.02	
	0.12—0.65	0.18—0.60	0.26—0.59	0.24—0.59	0.03—0.25	0.04	0.06	< 0.07	< 0.16	
MgO	41.9±0.1	41.8±0.2	30.2±0.1	30.0±0.2	16.4±0.2			0.02±0.01	0.02±0.01	
	40.6—43.1	40.5—43.4	29.4—30.8	29.4—31.1	15.5—16.8	16.4	16.7	< 0.10	< 0.05	
CaO	0.01±0.01	0.01±0.00	0.61±0.05	0.61±0.04	22.5±0.2			2.57±0.07	2.45±0.04	
	< 0.10	< 0.05	0.41—0.89	0.39—0.86	21.7—23.0	22.5	22.1	2.17—2.96	2.27—2.56	
Na ₂ O	0.01±0.00	0.01±0.01	0.01±0.01	0.01±0.01	0.56±0.07			9.81±0.09	9.53±0.17	
	< 0.06	< 0.05	—0.06	—0.06	0.43—0.83	0.56	0.54	9.35—10.3	8.80—10.2	
K ₂ O	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.02±0.01			0.73±0.06	0.99±0.07	
	< 0.04	< 0.04	< 0.04	< 0.05	< 0.06	n.d.	0.04	0.34—1.02	0.57—1.36	
Fa/Fs/An	19.5±0.1	19.7±0.2	17.3±0.2	17.3±0.3	5.5±0.7			12.1±0.3	11.7±0.2	
	18.5—21.6	18.3—20.7	16.4—18.7	15.7—18.6	4.8—8.8	0.2	0.3	10.2—13.5	10.8—12.5	
En/Ab			81.5±0.2	81.5±0.3	47.6±0.4			83.8±0.5	82.6±0.5	
			79.9—82.3	80.4—83.5	45.5—48.3	97.4	97.4	81.9—86.2	79.4—84.6	
Wo/Or			1.2±0.1	1.2±0.1	46.9±0.4			4.1±0.4	5.7±0.5	
			0.8—1.8	0.8—1.7	45.7—47.7	2.4	2.4	2.0—5.6	3.2—8.1	

注: * 光明山陨石, # 庄河陨石; n 分析点数 (庄河陨石的透辉石仅分析 1 个颗粒的核及边部) 平均值 ±2σ; 含量变化范围用黑体字表示; n.d. 低于电子探针检测限; 用于统计的分析数据总和落在 98—102 wt% 之间; Fa/Fs/An: 橄榄石的 Fa, 或辉石的 Fs, 或长石的 An; En/Ab: 辉石的 En, 或长石的 Ab; Wo/Or: 辉石的 Wo, 或长石的 Or

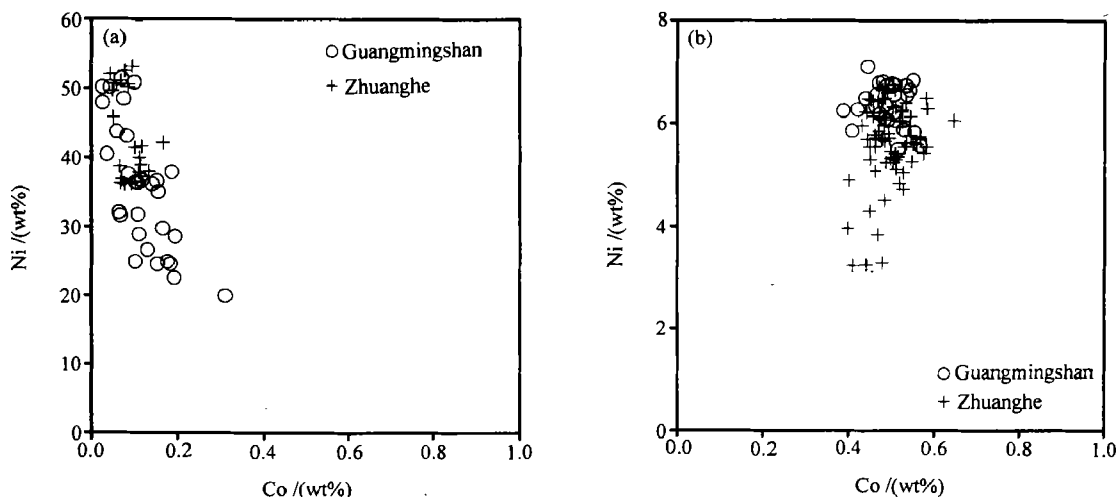


图 1 光明山和庄河陨石中镍纹石 (a) 和铁纹石 (b) 的组成

Fig.1 Compositions of taenites (a) and kamacites (b) from both Guangmingshan and Zhuanghe meteorites

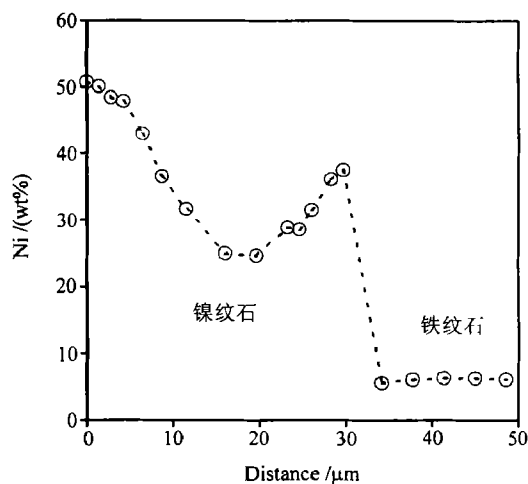


图 2 光明山陨石金属颗粒的电子探针剖面

Fig.2 Electron microprobe profile of a metal grain from the Guangmingshan meteorite

探针剖面定量分析, 均具有典型的 M 型环带结构, 其 Ni 含量由中央向边缘升高 (图 2). 除核部 Ni 含量较高 (36.7 wt%) 的一个颗粒外, 其他 4 个镍纹石核部的 Ni 含量与其颗粒的宽度呈反相关.

4 讨 论

庄河陨石的球粒不含玻璃且边界较模糊, 陨石基质明显重结晶, 次生长石颗粒较大, 以及大部分低 Ca 辉石为斜方辉石等均表明该陨石在其母体中经历了较强的热变质作用, 据 Van Schmus-Wood 分类标准^[2] 划分其岩石类型为 5 型. 不仅如此, 庄河陨石相当均一

的矿物化学组成(橄榄石 Fa 值的 PMD 为 3.1%, 古铜辉石 Fs 值的 PMD 为 4.0%), 以及橄榄石很低的 CaO 含量 ($< 0.05 \text{ wt}\%$) 等同样反映该陨石的矿物化学组成趋近平衡状态, 与上述岩石类型的划分是一致的. 庄河陨石高的金属含量和铁纹石/镍纹石比值 (~ 11), 以及主要矿物的化学组成, 包括橄榄石的 Fa 值、低 Ca 辉石的 Fs 值、铁纹石的 Co 含量等均落在 H 群球粒陨石的范围^[3]. 据此, 我们将庄河陨石划分为 H5 型. 同庄河陨石相比, 光明山陨石的球粒边界较清晰, 且斜长石的粒度明显较小, 其热变质程度略低于前者, 但仍属 5 型球粒陨石. 另一方面, 光明山陨石的矿物化学组成较庄河陨石更均一, 其中橄榄石 Fa 值的 PMD 为 2.3%, 低 Ca 辉石 Fs 值的 PMD 为 2.6%, 表明矿物化学组成与岩石结构特征对陨石热变质程度的反映灵敏度有一定的偏差. 光明山陨石的矿物模式组成与庄河陨石基本相同, 具有高金属含量和高铁纹石/镍纹石比值 (~ 15) 的特征. 从表 1 还可以清楚地看出, 其硅酸盐相的化学组成在分析误差内与庄河陨石完全相同. 据此, 我们也将光明山陨石划分为 H5 型.

庄河陨石的硅酸盐颗粒明显破碎, 并常见波状消光. 薄片中还出现数条近似平行的熔融细脉, 但细脉主要由硅酸盐矿物的角砾组成, 熔融玻璃质含量很少. 对细脉中的主要矿物相分析表明, 其化学组成与其他产状颗粒相同. 根据普通球粒陨石冲击相划分标准^[4], 可将庄河陨石的冲击相划分为 S2 级. 光明山陨石除硅酸盐颗粒的破碎特征外, 偶见波状消光, 因此将其冲击相划分为 S1 级.

根据二辉石温度计^[5], 由共生的古铜辉石和透辉石的化学组成给出庄河陨石和光明山陨石的最终平衡温度 $\leq 500^\circ\text{C}$, 表明这 2 个陨石均经历了较缓慢的冷却过程. 庄河陨石中镍纹石具有高 Ni 的化学组成, 特别是大部分为均一的四方镍纹石, 反映了金属相在 400°C 的完全偏析反应^[6] 和陨石在母体中缓慢的冷却过程. 光明山陨石的冷却速率可据镍纹石的宽度与其核部的 Ni 含量关系^[7] 获得, 在 $700\text{--}400^\circ\text{C}$ 范围内的冷却速率约为 $10\text{--}100^\circ\text{C}/\text{Ma}$.

参 考 文 献

- [1] Lin Y, Kimura M. Petrographical and mineral chemical study of new EH melt rocks and a new grouplet of enstatite chondrites. *Meteor. Planet. Sci.*, 1998, **33**:501—511
- [2] Van Schmus W R, Wood J A. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967, **31**:747—765
- [3] 王道德等. 中国陨石导论. 北京: 科学出版社, 1993
- [4] Stoeffler D, Keil K, Scott E R D. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, **55**: 3845—3867
- [5] Lindsley D H, Andersen D J. A two-pyroxene thermometer. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, Houston: Lunar Planet. Inst., 1983. **14**:A 887—906
- [6] Reuter K B, Williams D B, Goldstein J I. Low temperature phase transformations in the metallic phases of iron and stony-iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1988, **52**:617—626
- [7] Wood J A. Chondrites: Their metallic minerals, thermal histories, and parent bodies. *Icarus*, 1967, **6**:1—49

PETROGRAPHIC AND MINERAL CHEMICAL STUDY OF THE ZHUANGHE AND GUANGMINGSHAN METEORITES

LIN Yangting¹ WANG Daode¹ LIU Jinyuan² Kimura Makoto³
WANG Zhiyan²

¹(Guangzhou Institute of Geochemistry, The Chinese Academy of Sciences, 510640)

²(Dalian Museum of Natural History)

³(Faculty of Science, Ibaraki University, Japan)

Abstract

The Zhuanghe and Guangmingshan meteorites fell in 1976 and 1996, respectively. Both of them fell in Zhuanghe city, Liaoning province, within a distance about 20 km apart. These two meteorites are similar in texture, mineral modal composition and mineral chemistry, and are classified as H5 chondrites. Their final equilibrium temperatures are lower than 500°C according to the two-pyroxene thermometer. Cooling rate of Guangmingshan in its asteroidal body is 10—100°C/Ma, based on the correlation between the band width and composition of taenite; Zhuanghe probably cooled slower, as indicated by common occurrence of tetrataenite. Guangmingshan was weakly shocked, showing only fracturing of silicates; it is classified into S1 of shock grade. Undulant distinction of silicates is common in Zhuanghe, and there are also fine-grained impact-induced melt veins, suggesting a shock grade of S2.

Key words Meteorite, Classification, Shock, Metamorphism