

车里雅宾斯克 (Chelyabinsk) 陨石的岩石矿物特征与冲击变质作用*

徐于晨^{1,2} 王世杰¹ 胡森² 欧阳自远¹ 林杨挺^{2**}

XU YuChen^{1,2}, WANG ShiJie¹, HU Sen², OUYANG ZiYuan¹ and LIN YangTing^{2**}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2014-10-09 收稿, 2014-11-10 改回.

Xu YC, Wang SJ, Hu S, Ouyang ZY and Lin YT. 2016. Petrology, mineralogy and shock metamorphism of the Chelyabinsk meteorite. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5):1581-1590

Abstract On Feb 15, 2013, a meteorite exploded extremely intense above the city of Chelyabinsk, Russia. We studied three representative fragments of the Chelyabinsk meteorite, which preserved at least part of fusion crust and show different degree of shock metamorphism. One of the fragments is almost intact with only fractures, another fragment contains thin shock-induced melt veins, and the third consists mainly of shock-induced melt pockets and thick veins. The little shocked fragment preserved the initial petrographic and mineral chemical features of the parent asteroid of Chelyabinsk, including coarse-grained texture, homogeneous compositions of olivine and pyroxene, and blurred chondrule outlines but can be recognized, which indicate a high degree of thermal metamorphism and a petrographic type of 5 of chondrites. The high and homogeneous FeO contents of Mg-Fe-silicates (Fa: 27.9mol% ~28.2mol%; Fs: 23.3mol% ~23.7mol%) and the low abundance of Fe-Ni metal classify Chelyabinsk into LL group (low FeO and low metal). The classification of Chelyabinsk as a LL5 ordinary chondrite confirms previous work, and there was no other type of lithic clasts. Fractures in silicate minerals, more abundant maskelynite, eutectic texture of troilite and metal, presence of silicate shock melt veins, chromite-plagioclase intergrowth, and melt pockets were observed in order of increasing shock degree. However, no high-pressure polymorphs of silicates have been found in the shock melt pockets or veins. Olivine fragments within the melt pockets and veins and those at their walls show significant chemical heterogeneity, similar to the typical texture of olivine transforming to ringwoodite or wadsleyite in other heavily shocked meteorites. The absence of ringwoodite and wadsleyite is likely due to retrograde metamorphism at high post-shock temperature. This suggests a very severe impact event on the parent asteroid of Chelyabinsk.

Key words Meteorite fall; Meteorite shower; Ordinary chondrite; Shock metamorphism; Impact melting; Chelyabinsk, Russia

摘要 2013年2月15日,俄罗斯车里雅宾斯克(Chelyabinsk)发生了伴随罕见的空中爆炸的大规模陨石雨事件。本文对3块代表不同冲击变质程度的车里雅宾斯克陨石碎块进行了研究。它们都具有部分熔壳,其中1块仅出现碎裂,1块含有冲击熔融细脉,1块基本由冲击熔融囊和冲击熔脉组成。冲击变质程度最低的样品,代表了该陨石母体小行星的原始岩石矿物学特征:即具有粗粒的岩石结构和均一的矿物化学组成,但仍保留一些残余球粒,表明受到了明显的热变质作用,其岩石类型可划分为5型。铁镁质硅酸盐高的FeO含量(橄榄石Fa:27.9mol%~28.2mol%,辉石Fs值:23.3mol%~23.7mol%)、以及较低的Fe-Ni金属含量,表明其化学群属于低铁低金属的LL群。我们所分析的样品与前人报导的结果相似,未发现不同岩性的岩屑,表明车里雅宾斯克陨石的原始岩矿特征较为均一。3块陨石碎块中,随着冲击程度的增强,其冲击变质特征依次表现为硅酸盐矿物的破碎、熔长石化更为普遍、陨硫铁与铁镍合金共熔、硅酸盐熔脉的形成、铬铁矿与长石共熔、以及大量熔融囊的发

* 本文受国家自然科学基金项目(41273077、41503066)资助。

第一作者简介:徐于晨,女,1987年生,博士,地球化学专业,E-mail: xuyuchen@mail.iggcas.ac.cn

** 通讯作者:林杨挺,男,1962年生,研究员,从事陨石学与行星科学研究,E-mail: linyt@mail.iggcas.ac.cn

育等。但是,在冲击熔融囊和熔脉中,以及相邻围岩中均未发现高压矿物相。熔脉中的橄榄石晶屑和相邻围岩的橄榄石颗粒表现为化学成分的不均一,在背散射电子图像中呈不同灰度的结构。这与其他强烈冲击变质陨石中橄榄石的林伍德石或瓦茨利石相变相似。该陨石中林伍德石或瓦茨利石的缺失很可能是由于强烈撞击后高温产生的退变质。这也表明车里雅宾斯克陨石的母体小行星可能遭受了非常强烈的撞击事件。

关键词 降落陨石; 陨石雨; 普通球粒陨石; 冲击变质; 冲击熔融; 俄罗斯车里雅宾斯克

中图法分类号 P185.83; P575.1

1 引言

2013年2月15日,当地时间9点22分,俄罗斯车里雅宾斯克地区上空一道白光闪过,并伴随着巨大的爆炸声,一场后来被命名为“车里雅宾斯克陨石”的陨石雨随之而降。此次陨石雨被认为是自1908年俄罗斯西伯利亚的通古斯大爆炸以来能量最大的一次空中爆炸事件。美国国家航空航天局(NASA)近地天体研究办公室在消息中提到:该巨大火球是由一个直径大约是17到20m之间的小星体高速(18.6km/s)、低角度进入地球大气层的时候发生的,辐射能高达 3.75×10^{14} 焦耳,相当于90千吨TNT爆炸所释放的能量,而在>20m的高空爆炸时释放的冲击能大约等同于440千吨TNT的爆炸能(<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs>)。

虽然车里雅宾斯克(Chelyabinsk)陨石为普通球粒陨石,但却是极其罕见的“目击降落陨石”,曾在天空中产生强烈的爆炸,不仅对建筑物造成巨大损失,并伤及1500多人。普通球粒陨石很常见,一些石陨石雨的规模也很大,如著名的吉林陨石雨、Allende陨石雨等,但均未产生如此强烈的爆炸。因此,车里雅宾斯克陨石强烈爆炸的原因,包括该陨石的化学和矿物组成、岩石结构等性质,成为研究的焦点之一。

前人对车里雅宾斯克陨石的岩石类型划分、磁化率、密度、冲击作用以及年代学都做了很多的工作。认为车里雅宾斯克陨石为LL5型普通球粒陨石,冲击程度为S4(Galimov *et al.*, 2013)。磁化率较其他LL群球粒陨石更强(Bezaeva *et al.*, 2013)较富集金属铁。由于冲击作用的影响,不同陨石块样在外观形貌上也有不同,最为明显的表现为硅酸盐的暗化致使一些陨石块样呈暗黑色,但浅色和暗色的块样在密度和孔隙度特征上一致(Kohout *et al.*, 2014)。全岩密度(浅色: $3.32 \pm 0.09 \text{g/cm}^3$; 暗色: $3.27 \pm 0.08 \text{g/cm}^3$)和颗粒密度(浅色: $3.51 \pm 0.07 \text{g/cm}^3$; 暗色: $3.42 \pm 0.10 \text{g/cm}^3$)以及样品的孔隙度(浅色: $6.0 \pm 3.2\%$; 暗色: $5.7 \pm 1.7\%$)(Kohout *et al.*, 2014)都与其他LL群普通球粒陨石相类似(Consolmagno *et al.*, 2008)。该陨石全岩Pb-Pb年龄为 $4538.3 \pm 2.1 \text{Ma}$ (Bouvier, 2013),与磷灰石Pb-Pb($4457 \pm 35 \text{Ma}$)和U-Pb年龄上限($4454 \pm 67 \text{Ma}$)(Lapen *et al.*, 2014)一致,代表其母体的形成年龄;U-Pb年龄下限为 $585 \pm 390 \text{Ma}$ (Lapen *et al.*, 2014)与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Sm/Nd等时线年龄(Galimov, 2013)一致,可能代表陨石在母体经历了某一热事

件的时间。然而,Rb/Sr体系未能得到一致年龄,可能是由于冲击作用使该同位素体系受到明显的扰动(Galimov, 2013; Galimov *et al.*, 2013)。稀有气体结果显示,在 $28.6 \pm 3.3 \text{Ma}$ (Ar-Ar体系)可能有热事件发生(Beard *et al.*, 2014),而其宇宙暴露年龄为1.2Ma(Haba *et al.*, 2014)。上述不同同位素体系给出的各种年龄以及特殊的同位素组成,都反映着该陨石经历了多次复杂的冲击后热变质事件。同时,Taylor *et al.* (2014)认为陨石中磷酸盐具有较高的H和Cl同位素组成,可能也与热事件有关。此外,收集到的陨石的质量分布和陨石大小可以用来描述陨石母体在地球大气层中飞行情况,从而限定一个完整的小行星体物理模型,并估算陨石母体的质量上限可达上百吨甚至到一千吨(Badyukov and Dudorov, 2013)。

冲击变质是陨石最重要的特征之一,是陨石研究的热点之一。强烈的冲击作用常使硅酸盐发生局部熔融,形成冲击熔脉和熔融囊,从而引起挥发性元素的迁移,以及放射性同位素体系的扰动。基于Chelyabinsk陨石中橄榄石马赛克消光、部分长石熔长石化以及高压相矿物的缺失(Stöffler *et al.*, 1991),前人将其冲击变质程度划分为S4级(Rout and Heck, 2014; Galimov *et al.*, 2013)。到目前为止,关于高压相矿物的报道只有两例,均发现于冲击熔脉中,一个是白磷钙矿的高压相矿物(Trigo-Rodríguez *et al.*, 2014),另一个是长石的高压相矿物硬玉(Ozawa *et al.*, 2014)。基于车里雅宾斯克陨石的巨大影响,罕见的空中爆炸的原因不明,强烈而复杂的冲击作用和历史,以及冲击变质往往具有很强的不均一性,我们从收集到的14块陨石中,选取冲击变质程度从低到高的3块代表性样品,开展岩石学和矿物学分析,试图对该陨石的原始岩矿特征和冲击变质特征获得新认识。

2 样品和实验条件

车里雅宾斯克陨石是目击降落型陨石,在坠落后就被采集,样品新鲜、无污染。绝大部分陨石块样都很小,形状不一。我们收集到的14块样品均具有熔壳。样品在金刚石慢速锯上切成~1mm厚切片,从中选出3块冲击熔融程度不同的代表性样品,用于本项研究。选出的3块切片最后磨制成光薄片,编号分别缩写为Chk-1、-2和-7。

样品的岩石学工作是在两台扫描电镜上进行的。一台是中国科学院地质与地球物理研究所的LEO 1450VP,配有

牛津 INCA X 射线能谱仪; 另一台是国家天文台的卡尔蔡司 SUPRA55 场发射扫描电镜, 配有牛津产 X-Max50 型电制冷能谱仪, 工作加速电压均为 15kV。拉曼光谱分析是在中国科学院理化技术研究所的显微共焦激光拉曼光谱仪 in-via reflex Renishaw 上完成的。使用 Ar^+ 离子激光器, 波长 532nm, 使用功率 4mW, 激光束斑 $\sim 1\mu m$, 光谱收集时间为每次 10s, 累计 3~5 次, 采用 Si 片标定峰位后进行分析。硅酸盐矿物的化学成分定量分析是在中国科学院地质与地球物理研究所的电子探针上完成的, 仪器型号为 JEOL JXA8100, 加速电压 15kV, 橄榄石、辉石采用 20nA 的聚焦电子束; 长石则采用束流 10nA, 束斑 $10\mu m$ 的非聚焦电子束(以避免 Na 等元素的挥发丢失)。不同元素的分析标准分别是: 角闪石 (Si, Mg 和 Fe)、硬玉 (Na 和 Al)、钾长石 (K)、钙蔷薇辉石 (Ca 和 Mn)、金红石 (Ti) 和 Cr_2O_3 (Cr)。元素的分析检出限为 (1σ , wt%): K_2O 为 0.01; SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 和 Na_2O 为 0.02; TiO_2 和 Cr_2O_3 为 0.03; FeO 为 0.05; MnO 为 0.06。硅酸盐矿物的分析结果采用的是 Bence-Albee 计算方法。

3 岩石学与冲击变质特征

3.1 岩石学特征

车里雅宾斯克陨石的岩性特征主要表现为两种: 一种呈浅色, 残余球粒结构仍可辨, 基质重结晶, 部分可见硅酸盐熔脉横穿; 另一种呈暗色, 球粒边缘已经模糊不清, 数量较少, 铁镍金属-硫化物充填于破碎颗粒的缝隙, 并发育有熔脉与熔融囊。其中, Chk-2 样品, 浅色, 未见熔脉, 硅酸盐矿物破碎; Chk-1 样品, 浅色, 存在宽为几十微米的硅酸盐熔脉; Chk-7 样品, 硅酸盐暗化, 熔脉、熔融囊广泛发育。

反光光学显微镜与扫描电镜结果显示, 选取的 3 块陨石

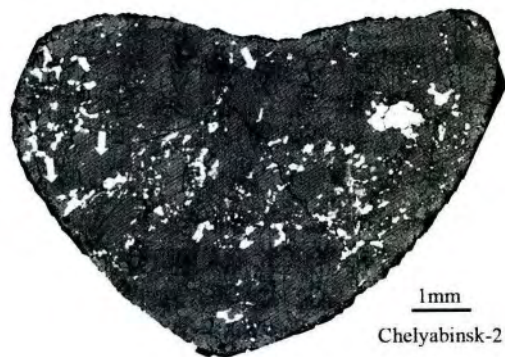


图1 Chelyabinsk-2 背散射全图

残余球粒可辨(箭头), 但边缘较模糊。硅酸盐矿物颗粒强烈破碎, 不透明矿物主要为铁镍金属与陨硫铁, 含量较少

Fig. 1 BSE mapping of Chelyabinsk-2

Chondrules (arrows) are blurred but can be recognized. Silicate minerals are strongly fractured. Opaque minerals are Fe-Ni metal and troilite, with low abundances

样品中均存在残余球粒结构, 主要为炉条状球粒, 斑状球粒, 放射状球粒等。球粒多为 1mm 左右, 边缘模糊。样品为粗粒结构, 矿物颗粒呈浑圆状, 主要矿物为橄榄石、辉石、长石, 少量的硫化物和铁镍金属不透明矿物, 副矿物有铬铁矿、透辉石、磷灰石以及白磷钙矿等。在光学显微镜下观察, 次生长石颗粒的粒度较大, $2\sim 50\mu m$ 之间。

3.2 冲击变质效应

3.2.1 Chk-2

样品的手标本呈灰白色, 金属含量较少, Fe-Ni 金属约占样品薄片总面积的 1.9% (图 1)。残余球粒模糊可辨, 主要为炉条状球粒(图 2a, b)。长石颗粒结晶较好, $2\sim 50\mu m$ 。

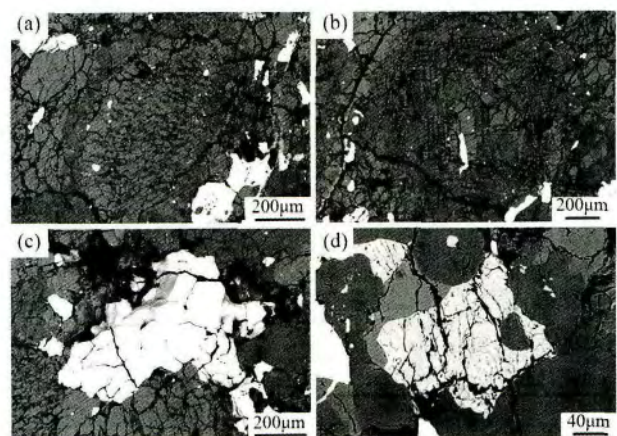


图2 Chelyabinsk-2 背散射电子图像

(a, b) 炉条状球粒; (c) 陨硫铁颗粒呈 120° 夹角生长; (d) 碎裂而未熔融的铬铁矿

Fig. 2 BSE images of Chelyabinsk-2

(a, b) BO; (c) troilite growth with an angle of 120° ; (d) unmelted, impact-fractured chromite grains

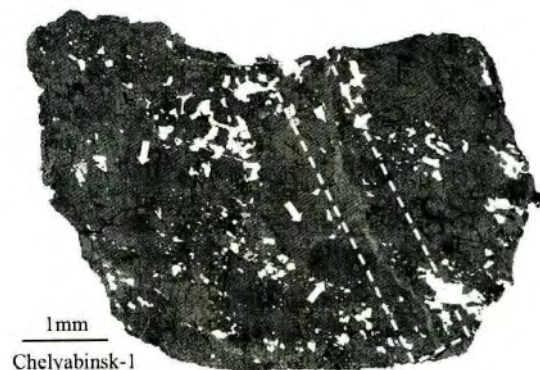


图3 Chelyabinsk-1 背散射全图

残余球粒可辨, 边缘较模糊(箭头)。硅酸盐矿物颗粒强烈破碎, 一条硅酸盐熔脉贯穿薄片(黄色虚线框内)

Fig. 3 BSE mapping of Chelyabinsk-1

Chondrules (arrows) are blurred but can be recognized. Silicate minerals are strongly fractured. A silicate melt vein across the section (within yellow dashed line box)

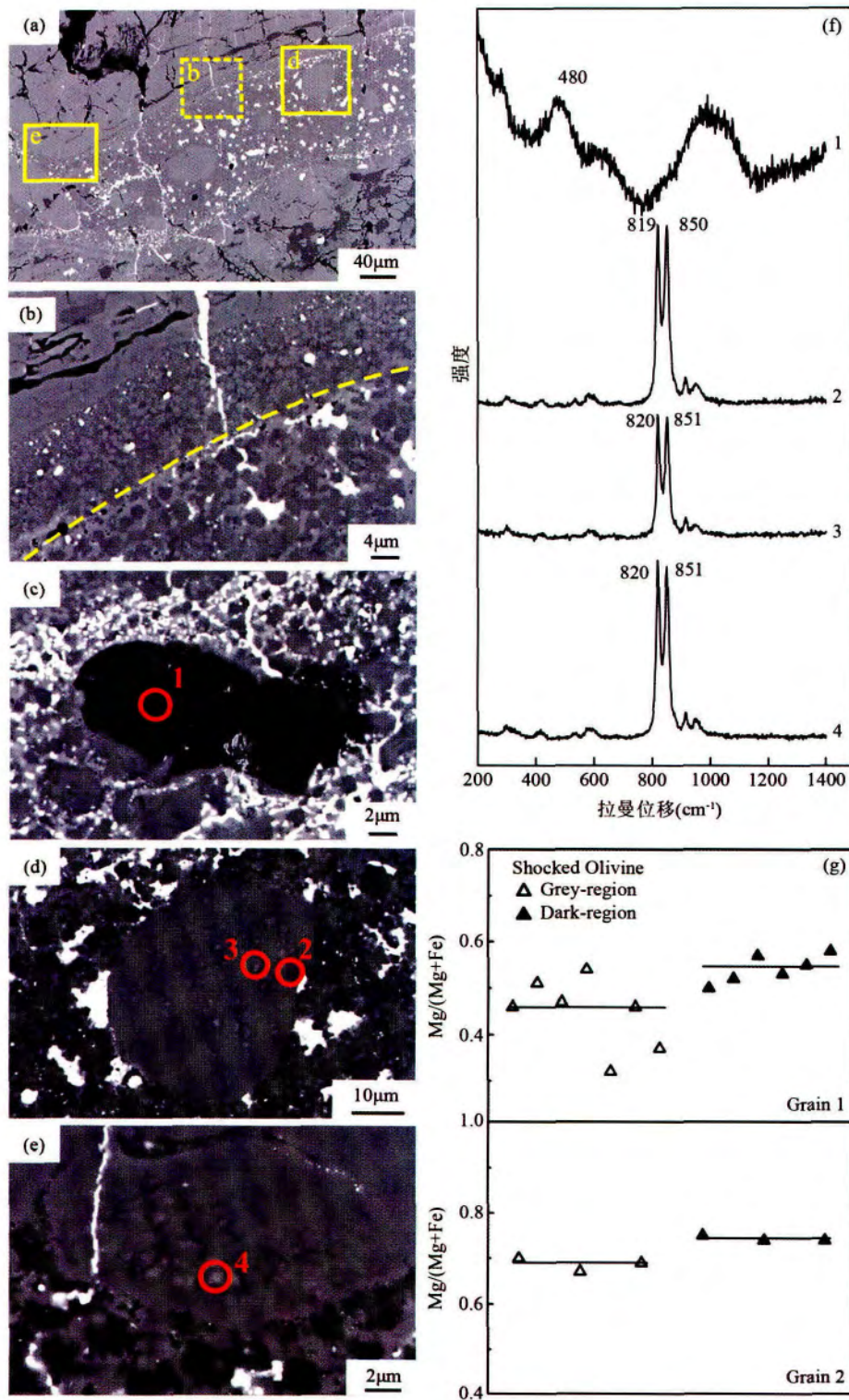


图4 Chelyabinsk-1 冲击熔脉特征

(a) 硅酸盐熔脉的背散射电子图像,由细粒硅酸盐矿物和大小不等的不透明小圆球组成,含较多圆化的硅酸盐角砾;(b) 细粒硅酸盐矿物(在a中以黄色虚线框表示),可见粒度明显的分层现象(虚线),粒度由熔脉边部往核部呈递增趋势;(c) 熔脉中长石角砾已熔长石化,圆圈1为拉曼谱1(f图)的分析位置;(d、e)分别在(a)中用黄色框标出,分别位于熔脉中央和边缘。可见橄榄石颗粒发现了明显的非均一化,由细粒的明暗二部分组成。圆圈为拉曼谱(f图)的分析位置;(f) 长石与橄榄石颗粒的拉曼谱线;(g) Chelyabinsk-1 中受冲击橄榄石 $Mg^{\#}$ 差异。Grain1 为图(d)颗粒,Grain2 为图(e)颗粒。空心三角形代表颗粒中灰色区域的 $Mg^{\#}$ 值,实心三角形代表颗粒中暗色区域的 $Mg^{\#}$ 值,图中直线为平均值

Fig. 4 Characteristic of shock vein in Chelyabinsk-1

(a) BSE image of silicate vein, composed of fine silicate grains, opaque phases and rounded silicates; (b) fine silicate matrix (dashed yellow box in a), grain sizes gradually increase from the outer rims of the melt vein towards the inner cores (dashed line); (c) plagioclase changes to maskelynite, circle 1 is the analysis location of Raman 1 (f); (d, e) marked with yellow box in (a), showing chemical heterogeneity, circles are the analysis locations (f), respectively; (f) Raman spectrums of maskelynite and olivines; (g) $Mg^{\#}$ in shocked olivines. Grain 1 and 2 represent the grains in (d, e), respectively. The averages of the analyses are indicated by solid lines

该样品内硅酸盐矿物颗粒破碎强烈, 但未见明显的冲击熔融特征, 是 3 块陨石中冲击变质程度最低的 1 块。部分陨硫铁颗粒之间呈 120° 夹角生长, 说明其曾受热却未熔融 (图 2c)。铬铁矿也只是发生了碎裂, 并未发现与长石的共熔现象 (图 2d)。

3.2.2 Chk-1

样品中发育有宽约几十微米的硅酸盐熔脉 (图 3)。基体矿物颗粒 (橄榄石、辉石、铬铁矿等) 破碎强烈, 一些硅酸盐矿物裂隙中充填铁镍金属-陨硫铁, 长石均已熔长石化。

硅酸盐冲击熔脉是由细粒的硅酸盐晶体和大小不等的小圆球组成, 含有较多浑圆状硅酸盐角砾 (图 4), 与基体呈不规则接触, 大量的不透明细脉呈线状垂直于熔脉分布。细粒的硅酸盐晶体, 呈自形等粒状, 约 $1 \sim 3 \mu m$, 可见粒度明显的分层现象, 靠近熔脉边部晶体颗粒粒度变小 (图 4b)。激光拉曼分析尚未在细粒的铁镁硅酸盐中发现高压相矿物。小圆球为铁镍金属与陨硫铁的共熔体, 粒度为亚微米级, 主要分布在硅酸盐晶体颗粒较大的区域。

硅酸盐熔脉中残余的硅酸盐矿物角砾主要为橄榄石和辉石, 还有少量的长石。长石颗粒具有光滑的表面, 在 $480 cm^{-1}$ 附近表现为熔长石的谱峰, 且在 $1000 cm^{-1}$ 处谱峰很宽, 为冲击变质的产物 (图 4c, f)。熔脉中与熔脉边上的橄榄石颗粒都表现出了成分的不均一化, 在背散射电子图像中呈明暗不同的细粒集合体。电子背散射图像的灰度与矿物组成的原子量相关, 富铁橄榄石亮于富镁橄榄石, 因此, 选取了熔脉内及相邻围岩的两个灰度不均的橄榄石颗粒进行了能谱的半定量分析。颗粒 1 是冲击熔脉中的橄榄石颗粒 (图 4d), 灰色区域的 $Mg^{\#}$ 变化从 0.32 到 0.54, 平均值为 0.45, 明显低于暗色区域的平均值 0.54 (范围 0.50 ~ 0.58) (图 4g); 颗粒 2 是熔脉边上的橄榄石颗粒 (图 4e), 能谱分析结果显示, 灰色区域 $Mg^{\#}$ 值平均值为 0.69, 略小于暗色区域的 0.74 (图 4g) 均指示冲击变质作用促使熔脉及熔脉边上的橄榄石发生了 Mg-Fe 的扩散。但是, 拉曼光谱分析结果显示不同点位的主峰均在 $820 cm^{-1}$ 和 $850 cm^{-1}$ 附近, 为典型的橄榄石拉曼谱, 并未发现高压相矿物 (图 4d-f)。同时, 熔脉中辉石区域的激光拉曼光谱分析也未发现其高压相。

3.2.3 Chk-7

样品的光薄片表现为明显的硅酸盐暗化现象, 是由于冲击作用使硅酸盐颗粒包含大量的微细铁镍金属-陨硫铁包裹体所致。陨石发生了强烈的冲击熔融, 熔融囊及相互连接的不规则熔脉形成一个复杂的枝网状, 环绕在残余球粒的周围, 大量的铁镍金属-陨硫铁充填于碎裂颗粒内部的裂隙中,



图 5 Chelyabinsk-7 背散射电子图

残余基体可辨 (relic)。样品大部分熔融, 以熔融囊 (melt pocket) 和不规则熔脉 (melt vein) 构成复杂网状

Fig. 5 BSE mapping of Chelyabinsk-7

Remained host clasts (relic) are readily recognizable. Most of the rock is melted, consisting of shock-induced melt pockets and irregular nets of melt veins

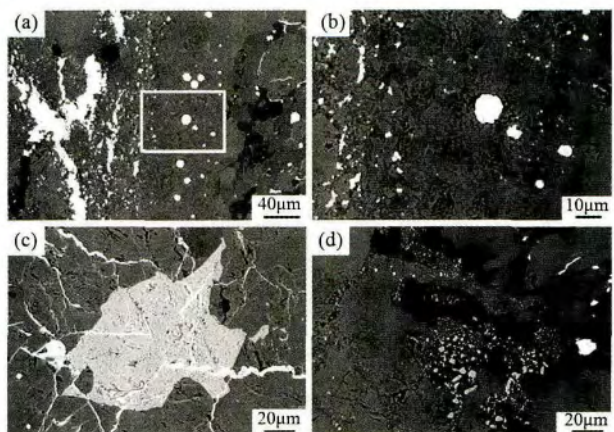


图 6 Chelyabinsk-7 背散射电子图像

(a, b) 熔融囊边部从内到外, 基质从大到小, 铁镍金属-陨硫铁共熔体; (c) 铁镍金属-陨硫铁充填破碎的铬铁矿缝隙; (d) 细粒铬铁矿 (亮灰)-长石 (暗灰) 共熔

Fig. 6 BSE images of Chelyabinsk-7

(a, b) size of matrix from core to edge becomes smaller, eutectic of troilite and metal; (c) network of thin sulfide veins; (d) fine chromite (bright grey)-plagioclase (dark grey)

表1 车里雅宾斯克陨石(1、2、7)的橄榄石化学成分分析结果(wt%)

Table 1 Chemical compositions of olivine from the Chelyabinsk meteorite (Chelyabinsk-1, -2, -7) (wt%)

样品号	Chelyabinsk-2		Chelyabinsk-1				Chelyabinsk-7			
	基体		基体		熔脉		基体		熔融囊	
点位	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
SiO ₂	37.2~39.9	38.1	37.7~38.7	38.2	37.5~38.2	37.9	37.6~38.2	37.9	37.4~38.1	37.8
TiO ₂	≤ 0.04		≤ 0.11		n. d.	n. d.	≤ 0.06		≤ 0.06	
Al ₂ O ₃	≤ 0.04		≤ 0.11		≤ 0.11		≤ 0.28		≤ 0.11	
Cr ₂ O ₃	≤ 0.04		≤ 1.12	0.16	≤ 0.06		0.03~0.06	0.04	≤ 0.06	
FeO	23.8~25.6	24.9	25.0~26.1	25.5	25.1~25.7	25.4	24.5~26.2	25.3	25.2~25.6	25.4
MnO	0.44~0.49	0.46	0.44~0.48	0.46	0.42~0.48	0.46	0.41~0.48	0.45	0.40~0.50	0.45
MgO	35.1~36.6	36.0	35.2~37.0	36.6	34.9~36.4	35.8	35.5~36.9	36.0	35.4~36.9	36.0
CaO	0.02~0.11	0.08	≤ 0.10		0.06~0.18	0.13	≤ 0.39	0.13	≤ 0.12	
Na ₂ O	≤ 0.04		≤ 0.07		≤ 0.11		≤ 0.10		≤ 0.08	
K ₂ O	≤ 0.02		≤ 0.06		≤ 0.03		≤ 0.04		≤ 0.04	
合计	98.6~100.4	99.5	99.6~102.5	101.0	99.0~100.4	99.8	99.2~101.7	99.9	98.7~100.7	99.8
Fa	27.5~28.3	27.9±0.3	27.4~29.2	28.1±0.5	27.9~29.1	28.4±0.4	27.7~28.7	28.2±0.4	27.8~28.6	28.3±0.3

注: n. d. 为未检测

表2 车里雅宾斯克陨石(1、2、7)的易变辉石化学成分分析结果(wt%)

Table 2 Chemical compositions of pyroxene from the Chelyabinsk meteorite (Chelyabinsk-1, -2, -7) (wt%)

样品号	Chelyabinsk-2		Chelyabinsk-1				Chelyabinsk-7			
	基体		基体		熔脉		基体		熔融囊	
点位	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
SiO ₂	54.5~55.3	54.8	54.5~55.4	55.0	54.1~55.0	54.4	54.3~54.9	54.7	54.3~55.2	54.8
TiO ₂	0.12~0.51	0.22	n. d.	n. d.	0.14~0.36	0.24	0.17~0.22	0.19	0.13~0.26	0.19
Al ₂ O ₃	0.12~0.49	0.27	0.12~0.25	0.18	0.18~0.36	0.28	0.13~0.30	0.21	0.17~0.38	0.25
Cr ₂ O ₃	0.08~0.27	0.15	0.05~0.68	0.21	0.10~0.22	0.15	0.04~0.13	0.09	0.11~0.19	0.15
FeO	15.0~15.5	15.3	15.0~15.7	15.5	15.5~16.5	16.0	15.3~15.7	15.4	15.4~15.7	15.6
MnO	0.46~0.49	0.48	0.42~0.50	0.46	0.43~0.51	0.46	0.44~0.46	0.45	0.45~0.47	0.46
MgO	27.4~28.0	27.6	27.2~28.6	27.5	26.9~27.4	27.1	26.8~27.4	27.2	26.7~28.1	27.5
CaO	0.59~0.84	0.71	0.58~0.90	0.76	0.71~0.91	0.84	0.72~0.91	0.78	0.72~1.01	0.86
Na ₂ O	0.03~0.04	0.04	≤ 0.07	0.03	0.02~0.13	0.09	≤ 0.03	0.02	≤ 0.07	0.03
K ₂ O	≤ 0.02	0.01	0.01~0.03	0.01	≤ 0.04	0.03	≤ 0.02	0.01	≤ 0.04	0.01
合计	99.4~99.9	99.6	99.3~100.7	99.8	99.2~99.9	99.6	98.6~99.9	99.0	99.4~100.0	99.8
Fs	23.0~23.6	23.3±0.2	23.2~24.0	23.6±0.3	23.8~25.2	24.4±0.7	23.5~23.8	23.7±0.2	23.5~24.2	23.7±0.4
Wo	1.2~1.7	1.4±0.2	1.13~1.78	1.5±0.2	1.39~1.80	1.7±0.2	1.25~1.82	1.5±0.2	1.38~2.0	1.7±0.3
En	75.0~75.7	75.3±0.2	74.5~75.3	74.9±0.2	73.1~74.3	73.9±0.7	74.4~75.2	74.8±0.4	73.8~75.1	74.6±0.7
PMD (%)		0.9		1.3		2.9		0.8		1.7

长石全部熔长石化(图5)。

熔融囊由细粒的硅酸盐晶体与铁镍金属-陨硫铁组成, 含有浑圆的残余硅酸盐矿物晶屑—橄榄石、辉石与少量长石(图6a)。硅酸盐晶体自形粒状, 成分不均一, 呈环带, 晶体颗粒粒度在靠近边部位置变小(图6b), 铁镍金属-陨硫铁圆球状集合体不均匀分布。Chk-7 块样中, 铬铁矿的产状有二种: 一是单颗粒铬铁矿发生破裂, 被铁镍金属-陨硫铁细脉充填(图6c); 二是铬铁矿-长石共熔, 铬铁矿呈粒状, 包裹于长石中(图6d)。

3.3 矿物成分

表1和2汇总了橄榄石和低钙辉石的电子探针分析结

果, 表3给出了不同产状长石颗粒的代表性成分分析。

橄榄石 同一陨石块样内基体与熔融区域的橄榄石成分非常均一, 不同块样之间橄榄石的化学成分也很一致, Fa 的 PMD 值均落在 1.1%~1.8% 的范围内。Chk-2 中橄榄石 Fa 值的变化范围为 27.5mol%~28.3mol%, 平均 27.9±0.3mol%; Chk-1 中基体部分橄榄石 Fa 值的变化范围为 27.4mol%~29.2mol%, 平均 28.1±0.5mol%。熔脉及熔脉附近的橄榄石颗粒 Fa 值为 27.9mol%~29.1mol%, 平均 28.4±0.4mol%; Chk-7 基体中的橄榄石 Fa 值为 27.7mol%~28.7mol%, 平均 28.2±0.4mol%。熔融囊附近的颗粒 Fa 值为 27.8mol%~28.6mol%, 平均 28.3±0.3mol% (表1)。FeO 与 MnO 含量也显示, 产于熔脉中的颗粒与基体中的颗

表3 车里雅宾斯克陨石(1、2、7)中代表性长石的化学成分分析结果(wt%)

Table 3 Representative analyses of plagioclase from the Chelyabinsk meteorite (Chelyabinsk-1, -2, -7) (wt%)

样品号 点位 氧化物	Chelyabinsk-2		Chelyabinsk-1				Chelyabinsk-7			
	基体		基体		熔脉		基体		熔融囊	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
SiO ₂	66.2	65.0	65.2	65.8	65.2	64.8	65.6	64.7	64.3	63.6
Al ₂ O ₃	22.8	22.5	21.3	21.2	22.3	22.4	22.1	20.4	21.9	21.7
FeO	0.93	0.73	0.77	0.33	1.65	1.11	1.01	0.76	0.92	1.09
MgO	0.09	0.06	0.17	0.06	0.22	0.32	0.22	0.19	0.22	0.31
CaO	1.80	1.82	2.03	2.20	0.84	0.77	2.60	2.51	0.41	0.79
Na ₂ O	8.86	8.65	9.71	9.43	9.07	8.93	9.65	9.79	8.67	9.27
K ₂ O	1.17	1.17	1.01	1.14	2.20	2.43	0.26	0.19	2.36	1.70
Total	101.9	100.5	100.2	100.2	101.5	100.9	101.6	98.5	98.9	98.6
单位分子的原子比(O=8)										
Si	2.865	2.855	2.877	2.898	2.855	2.852	2.854	2.895	2.876	2.859
Al	1.160	1.163	1.109	1.100	1.149	1.161	1.134	1.077	1.153	1.150
Fe	0.034	0.027	0.028	0.012	0.061	0.041	0.037	0.029	0.035	0.041
Mg	0.006	0.004	0.011	0.004	0.014	0.021	0.014	0.013	0.014	0.021
Ca	0.083	0.086	0.096	0.104	0.039	0.036	0.121	0.120	0.020	0.038
Na	0.743	0.737	0.831	0.805	0.771	0.763	0.813	0.850	0.751	0.808
K	0.065	0.065	0.057	0.064	0.123	0.136	0.014	0.011	0.135	0.097
An	9.3	9.7	9.8	10.7	4.2	3.9	12.8	12.3	2.2	4.0
Ab	83.4	83	84.5	82.8	82.6	81.5	85.7	86.6	83	85.7
Or	7.3	7.4	5.8	6.6	13.2	14.6	1.5	1.1	14.9	10.3

粒化学成分均一。

低钙辉石 基体中与熔脉、熔融囊内及附近的辉石的 F_s 值相当,不同块样之间的低 Ca 辉石在成分上也非常均一。除了 Chk-1 中熔脉附近低钙辉石 F_s 的 PMD 值相对略高(2.9%),其他的都小于2%。Chk-2 中低钙辉石的 F_s 值为 $23.3 \pm 0.2 \text{ mol\%}$, W_o 值为 $1.4 \pm 0.2 \text{ mol\%}$; Chk-1 中基质区域低钙辉石 F_s 值为 $23.6 \pm 0.3 \text{ mol\%}$, W_o 值为 $1.5 \pm 0.2 \text{ mol\%}$, 熔脉部分 F_s 值为 $24.4 \pm 0.7 \text{ mol\%}$, W_o 值为 $1.7 \pm 0.2 \text{ mol\%}$; Chk-7 中低 Ca 辉石 F_s 值 $23.7 \pm 0.2 \text{ mol\%}$, W_o 值为 $1.5 \pm 0.2 \text{ mol\%}$ 熔融区域 F_s 值 $23.7 \pm 0.4 \text{ mol\%}$, W_o 值为 $1.7 \pm 0.3 \text{ mol\%}$ (表2)。MnO 在含量上也未见明显差异(表2)。

透辉石 透辉石呈圆球状产出,不同陨石块样中透辉石的 F_s 值有一些变化,7.3mol% ~ 10.3mol%, W_o 值为 42.0mol% ~ 46.0mol%。

长石 同一块样、同一产状的长石在成分上都较为均一。但同一块样、不同产状的长石在成分上有略微的差异,靠近熔脉与熔融囊的长石颗粒相对基体富 K 贫 Ca、Na。而不同块样、同一产状的长石成分上也存在不同,暗色 Chk-7 样品基体中的长石较 Chk-1 和 Chk-2 的更富 Ca、Na 贫 K(表3、图7)。

4 讨论

4.1 化学群及岩石类型划分

Chk-1、2 和 7 基体中橄榄石和低钙辉石具有较高的

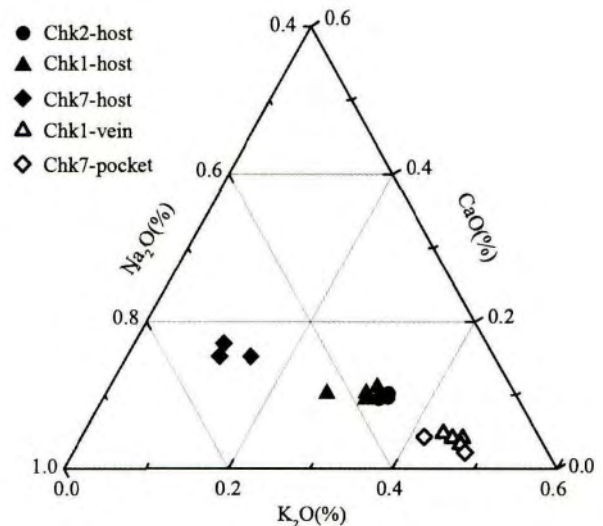


图7 Chelyabinsk 陨石的长石主要成分三角图

产于冲击熔脉(vein)和熔融囊(pocket)中的颗粒相对基体(host)富 K_2O 而贫 Na_2O 和 CaO 。实心标记代表基体中长石的组分,空心标记代表熔脉或是熔融囊的长石成分

Fig. 7 Chemical compositions of plagioclase from the Chelyabinsk meteorite

Plagioclase in the veins and pockets are more enriched in K_2O and depleted in Na_2O and CaO compared with host grains. Solid symbols represent grains in the host, and open symbols are from veins or pockets

$FeO/(FeO + MgO)$ 摩尔比。利用不同块样基体中 Fa (27.9 mol\% 、 28.1 mol\% 和 28.2 mol\%) 和 F_s (23.3 mol\% 、

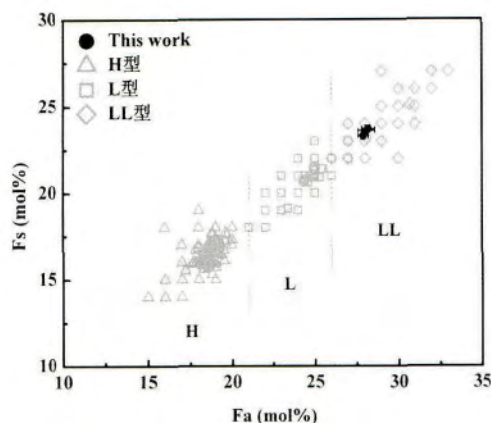


图8 Chelyabinsk 陨石中橄榄石的 Fa 与辉石的 Fs 关系, 该陨石落在 LL 群范围

前人数据来自于 NASA 美国南极陨石库 (<http://curator.jsc.nasa.gov/antmet/index.cfm>)

Fig. 8 Corresponding relation of Fa in olivine and Fs in pyroxene in Chelyabinsk meteorite, lies in the range of LL ordinary chondrite

Other data come from NASA (<http://curator.jsc.nasa.gov/antmet/index.cfm>)

23.6mol% 和 23.7mol%) 的平均值进行投图(图8), 均落在普通球粒陨石 LL 群的范围 ($Fa_{27.0-33.0}$, $Fs_{23.2-25.8}$) (Brearley and Jones, 1998)。该结果与前人对于主要硅酸盐矿物的成分分析结果(橄榄石: $Fa 27.9 \pm 0.35$; 易变辉石: $Fs 22.8 \pm 0.79$, $Wo 1.30 \pm 0.26$) 一致 (Galimov *et al.*, 2013; Yoshida *et al.*, 2014)。Chk-2 中金属含量约占金属与陨硫铁面积的 18%, 占总面积的 1.9%, 与 L/LL 群球粒陨石一致。

样品具有残余球粒结构, 但轮廓较模糊。矿物明显重结晶, 次生长石颗粒较大 ($2 \sim 50 \mu m$) 指示其岩石类型为 5 型。橄榄石与低钙辉石的化学组成很均一, Chk-2、1 和 7 基体中橄榄石 Fa 值的 PMD 分别为 1.1%、1.8% 和 1.4%, 低 Ca 辉石 Fs 值的 PMD 分别为 0.9%、1.3% 和 0.8%。不同块样之间, 橄榄石与辉石的化学成分也相似, 符合 5 型岩石类型的划分。因此, 所分析的 3 块独立陨石块样, 均为 LL5 型普通球粒陨石, 并与前人报导的该陨石的其他样品相似, 未发现不同岩性的岩屑。

4.2 冲击变质作用

本研究所有分析的样品外表熔壳基本完整, 是高空爆炸后母体不同区域的样品采样。不同块样的冲击变质程度极不均一, 其中 Chk-2 代表了基本未受冲击的母岩特征, Chk-1 受到较强的冲击, 形成冲击熔脉, 而 Chk-7 代表了最强烈的冲击变质作用, 样品大部分熔融, 残留的硅酸盐角砾也发生了强的暗化现象。Chk-2 陨石中硅酸盐矿物和铬铁矿均表现出强烈的破碎, 部分陨硫铁颗粒呈 120° 夹角生长。Chk-1 中硅酸盐矿物破碎; 铁镍金属与陨硫铁形成共熔体; 由细粒、多

晶的硅酸盐基质组成的较粗的硅酸盐熔脉, 与母岩不规则接触; 冲击熔脉中及边部的橄榄石颗粒中存在明暗不同的细粒集合体; 长石熔长石化。Chk-7 中硅酸盐暗化、铁镍金属-陨硫铁微粒充填破碎的硅酸盐颗粒、铬铁矿与长石共熔、熔融囊发育。基于 Stöfler *et al.* (1991) 的球粒陨石冲击程度划分标准, 网状冲击熔脉与熔融囊的发育以及长石熔长石化的岩石学特征, 表明车里雅宾斯克陨石的冲击变质程度已达到了 S4。

铁镍金属和陨硫铁因共熔点较低, 为 $988^\circ C$ (Rubin, 1992, 2002), 在冲击作用过程中极易发生熔融与移动, 充填于破碎硅酸盐的裂缝、装饰颗粒的边界(包括橄榄石、辉石和长石), 反映了普通球粒陨石冲击变质程度的大小。大量的细粒铁镍金属-陨硫铁颗粒包裹体的形成会导致普通球粒陨石硅酸盐的暗化。而车里雅宾斯克陨石的铁镍金属-陨硫铁共熔、陨硫铁充填硅酸盐裂隙、以及硅酸盐的暗化等特征, 表明其在小行星母体曾经历过较强的冲击作用。

Rubin (2003) 提出不透明矿物铬铁矿的产状也能反映陨石样品的冲击变质强度, 随着冲击变质程度的升高, 依次表现为: (1) 未熔融但碎裂的铬铁矿颗粒(图 2d); (2) 被不透明细脉横穿的铬铁矿(图 6c); (3) 铬铁矿-长石共熔体(图 6d)。不同的铬铁矿产状对陨石母体经历的冲击程度所产生的温度具有一定的指示作用。其中, (1) 指示该陨石所经历的温度低于 $988^\circ C$; (2) 所代表的温度在 $988^\circ C$ 到 $1635^\circ C$ 之间; 而(3) 的出现是在冲击作用下, 熔融升温, 导致相邻的硅酸盐和铬铁矿颗粒被熔融后, 重新结晶而成, 表明熔融温度已高于 $1635^\circ C$, 指示该陨石在母体至少经历了 S3 程度的冲击变质作用 (Rubin, 2003)。车里雅宾斯克陨石不同冲击程度的块样中也发现了相应的冲击变质特征。Chk-2 和 Chk-1 中的铬铁矿均表现为(1), 而(2)和(3)只出现在 Chk-7 样品中。因此, 车里雅宾斯克陨石的冲击变质程度至少为 S3。综上所述, 车里雅宾斯克陨石的冲击变质程度被划分为 S4, 与 Galimov *et al.* (2013) 的冲击变质程度划分结果一致。

不透明熔融细脉在普通球粒陨石中常见, 是冲击变质程度较低的产物。随着冲击变质程度的增强, 靶岩发生部分熔融的程度增大, 表现为更宽更多的熔脉, 以及大量熔融囊的出现等。大量冲击熔体的出现, 由于其良好的压力传递, 使靶岩处在一个相对均一的高压条件下。相反, 温度具有极大的不均一, 表现为从熔体中的极高温到基体中的低温。

静高压实验研究表明, 高温高压条件下, 矿物会发生相变, 或伴随着元素的扩散, 如橄榄石相变为林伍德石或瓦茨利石、辉石相变为镁铁榴石等。这些高压矿物相在快速淬火的过程中能被保存下来。目前为止, 在车里雅宾斯克陨石中仅有关于白磷钙矿的高压相 (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2014) 和长石的高压相——硬玉 (Ozawa *et al.*, 2014) 的报导, 但还未发现橄榄石和辉石的高压相矿物。

当高温持续时间较长时, 高压矿物相会发生退变质, 但仍可表现出不均一的粒状集合体。Chk-1 中熔脉及相邻围岩

的橄榄石颗粒的背散射电子图像亮度明显不均一, 表现为微米或次微米大小的微粒集合体。能谱半定量分析结果显示, 颗粒中呈灰色的区域较暗色区域在 $Mg^{\#} (Mg/(Mg + Fe))$ 上普遍偏低。这种 $Mg^{\#}$ 上的差异与基体中橄榄石颗粒均一的化学组成不一致, 很可能是冲击变质作用下, 橄榄石发生相变, 并产生了元素的迁移。原位激光拉曼光谱分析并未发现有高压相矿物的存在, 可能是由于围岩温度较高, 高压相不能快速淬火而导致的退变质。

高压卸载后, 较高的温度条件下, 细粒、自形的硅酸盐颗粒结晶, 充填在冲击熔脉及熔融囊中 (Hu *et al.*, 2011)。Chk-1 的冲击熔脉和 Chk-7 的熔融囊中, 可见约 $1 \sim 3 \mu m$ 、自形等粒的硅酸盐颗粒从中部向两侧呈粒度递减趋势 (图 4b、图 6b)。而 Chk-7 冲击熔融囊中自形的粒状硅酸盐微晶, 可见明显的成分环带, 从中央向边缘 FeO 含量升高的现象, 指示着更高的围岩温度导致在高压卸载后, 更加缓慢的结晶过程。但激光拉曼分析表明, 基质中铁镁硅酸盐矿物为橄榄石和辉石, 未见其高压相。

冲击作用引起的元素迁移可能会影响陨石块样的同位素年代学测定。冲击程度不同的块样中, 橄榄石和低 Ca 辉石的化学成分基本不变, 跟 Sm-Nd 体系未受扰动一致。而冲击熔脉 (Chk-1) 和熔融囊 (Chk-7) 中的钠长石较基体中的颗粒更富 K、贫 Na 和 Ca。K₂O 在 Chk-1 和 7 的基体中分别约占 1% 和 0.2%, 而在熔脉和熔融囊中均达到了 ~2%, 如此显著的成分差异表明钠长石颗粒在强烈的冲击作用下, 由于温度升高, 发生了挥发性 K 元素的迁移, 与 Rb-Sr 体系受扰动无法准确测量 (Galimov *et al.*, 2013) 相一致。

5 结论

经过岩石学、矿物学以及拉曼光谱分析, 我们可以得到以下结论:

(1) 车里雅宾斯克陨石具有粗粒的岩石结构和均一的矿物化学组成, 但仍保留一些残余球粒, 表明受到了明显的热变质作用, 其岩石类型可划分为 5 型; 橄榄石高的 Fa 值 (27.9mol% ~ 28.2mol%) 和辉石高的 Fs 值 (23.3mol% ~ 23.7mol%)、以及较低的 Fe-Ni 金属含量, 表明其化学群属于低铁低金属的 LL 群。确证其为 LL5 型普通球粒陨石, 与前人报导的结果一致。

(2) 硅酸盐矿物强烈破碎、长石熔长石化、铁镍金属与陨硫铁共熔、铬铁矿与长石共熔、硅酸盐熔脉的形成以及熔融囊的发育等结构特征, 均指示着车里雅宾斯克陨石在母体经历了强烈的冲击变质, 其强度达到了 S4 级, 与前人对其冲击变质程度划分相符。

(3) 该陨石在空中强烈爆炸, 形成大量小块体散布在很大的区域, 可能与其母体小行星曾受到强烈冲击变质, 造成的不均一性 (熔融囊和脉的分布, 基体的破裂等) 有关。

(4) 不同陨石块样之间冲击变质程度的显著差异, 反映

了冲击变质作用的强烈不均一性。除 Chk-2 样品基本未发生熔融外, Chk-1 和 Chk-7 二块陨石的熔融十分明显, 其中 Chk-1 以冲击熔脉的形式出现, 而 Chk-7 主要为冲击熔融囊。

(5) Chk-1 样品的冲击熔脉由细粒自形等粒状硅酸盐组成, 可见分层现象, 靠近边缘粒度明显较小。激光拉曼分析表明, 铁镁硅酸盐均为橄榄石和辉石, 未见其高压相。熔脉中分布有圆化的硅酸盐角砾, 其中橄榄石颗粒的背散射电子图像亮度明显不均一, 表现为微米或次微米大小的微粒集合体。熔脉边缘的橄榄石颗粒同样具有相似的不均一特征。这一现象与火星陨石 Y984028 中橄榄石和辉石的冲击变质特征相似, 表明橄榄石在高压条件下发生了相变。激光拉曼分析未能证实高压相的存在, 很可能是由于退变质的结果。

(6) Chk-7 样品的熔融囊中, 橄榄石自形微晶可见明显的成分环带, 从中央向边缘 FeO 含量升高, 反映了高压卸载后, 高的围岩温度导致的更加缓慢的结晶过程。对基体和冲击熔脉或熔融囊中橄榄石和辉石的定量分析, 未发现明显的成分差异。但是, 熔脉和熔融囊中的长石相对基体中的颗粒表现出 K₂O 含量升高而 Na₂O 和 CaO 含量降低的趋势, 反映了强烈冲击作用对碱金属元素的重新分配, 这对于 Rb-Sr 同位素体系有重要影响。

致谢 样品由刘荣财提供, 在此致以衷心的感谢。

References

- Badyukov DD and Dudorov AE. 2013. Fragments of the Chelyabinsk meteorite shower: Distribution of masses and sizes and constraints on the mass of the largest fragment. *Geochemistry International*, 51 (7): 583 - 586
- Beard SP, Kring DA, Isachsen CE, Lapen TJ, Zolensky ME and Swindle TD. 2014. Ar-Ar analysis of Chelyabinsk: Evidence for a recent impact. In: 45th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI, 1807 - 1808
- Bezaeva NS, Badyukov DD, Nazarov MA, Rochette P and Feinberg J. 2013. Magnetic properties of the Chelyabinsk meteorite: Preliminary results. *Geochemistry International*, 51 (7): 568 - 574
- Bouvier A. 2013. Pb-Pb chronometry of the dark melt lithology of the Chelyabinsk LL chondrite. In: Proceedings of Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution V Conference. Sudbury, Canada: LPI, 3087 - 3087
- Brearley AJ and Jones RH. 1998. Chondritic meteorites. In: Papike JJ (ed). *Planetary Materials. Reviews in Mineralogy*. Washington: Mineralogical Society of America, 36: 1 - 398
- Consolmagno GJ, Britt DT and Macke RJ. 2008. The significance of meteorite density and porosity. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 68 (1): 1 - 29
- Galimov EM. 2013. Chelyabinsk meteorite-an LL5 chondrite. *Solar System Research*, 47 (4): 255 - 259
- Galimov EM, Kolotov VP, Nazarov MA *et al.* 2013. Analytical results for the material of the Chelyabinsk meteorite. *Geochemistry International*, 51 (7): 522 - 539
- Haba MK, Sumino H, Nagao K *et al.* 2014. Noble gases in the Chelyabinsk meteorite. In: 45th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI, 1732 - 1733
- Hu S, Feng L and Lin YT. 2011. Petrography, mineral chemistry and shock metamorphism of Yamato 984028 lherzolitic shergottite.

- Chinese Science Bulletin, 56(15): 1579–1587
- Kohout T, Gritsevich M, Grokhovsky VI *et al.* 2014. Mineralogy, reflectance spectra, and physical properties of the Chelyabinsk LL5 chondrite—insight into shock induced changes in asteroid regoliths. *Icarus*, 228: 78–85
- Lapen TJ, Kring DA, Zolensky ME *et al.* 2014. Uranium-lead isotope evidence in the Chelyabinsk LL5 chondrite meteorite for ancient and recent thermal events. In: 45th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI, 2561–2562
- Ozawa S, Miyahara M, Ohtani E *et al.* 2014. Jadeite in Chelyabinsk meteorite and the nature of an impact event on its parent body. *Scientific Reports*, 4: 5033
- Rout SS and Heck PR. 2014. Shock features in the Chelyabinsk LL5 chondrite: Preliminary results. In: 45th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI, 2159–2160
- Rubin AE. 1992. A shock-metamorphic model for silicate darkening and compositionally variable plagioclase in CK and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(4): 1705–1714
- Rubin AE. 2002. Post-shock annealing of Miller Range 99301 (LL6): Implications for impact heating of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(18): 3327–3337
- Rubin AE. 2003. Chromite-plagioclase assemblages as a new shock indicator: Implications for the shock and thermal histories of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(14): 2695–2709
- Stöffler D, Keil K and Edward RDS. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12): 3845–3867
- Taylor LA, Liu Y, Guan Y *et al.* 2014. Metamorphism in the Chelyabinsk meteorite. In: 45th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI, 2346–2347
- Trigo-Rodríguez JM, Moyano-Camero CE, Mestres N and Bischoff A. 2014. A Raman study of Chelyabinsk LL5-6 chondrite breccia: Investigating the signatures of shock-induced melting in near earth asteroids. In: 45th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI, 1729–1730
- Yoshida S, Mikouchi T, Nagao K *et al.* 2014. Mineralogical variation of Chelyabinsk with depth from the surface of the parent meteoroid. In: 45th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: LPI, 2509–2510