

动态高压下斜长石的熔融和玻璃化研究^{*}

谢先德 陈鸣 王德强 王英

XIE XianDe, CHEN Ming, WANG DeQiang and WANG Ying

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2005-10-16 收稿, 2006-01-10 改回.

Xie XD, Chen M, Wang DQ and Wang Y. 2006. Melting and vitrification of plagioclase under dynamic high pressures. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 503–509

Abstract Under the shock-induced high pressures and temperatures, olivine and pyroxene in the Suizhou L6 chondrite kept intact, but plagioclase experienced melting and quenching, and transformed into maskelynite, a melted dense plagioclase glass. Two occurrence types of maskelynite can be observed in this meteorite. One is the thetomorphic maskelynite, an in-situ melted glass with reserved grain morphology of the host plagioclase. Another is the allomorphic maskelynite, that fills fractures and cracks in other nearby silicate minerals, forming melt veinlets or melt pockets. Both two glasses show similar optical and physical properties. EPMA results show that there is no obvious diffusion of chemical elements between the melt glass and the surrounding minerals or trapped mineral fragments. The shock-loading experiments on the Jilin meteorite show that plagioclase is the first molten mineral among silicate minerals in meteorite, and the formed maskelynite also occurs in the form of melt veinlets or melt pockets. According to the results of high-pressure melting and quenching experiments on some other meteorites, it has been estimated that the formation condition for both thetomorphic and allomorphic maskelynites in Suizhou is $\sim 20\text{GPa}$ and $\leq 1100^\circ\text{C}$. The results of this study are of some significance for understanding of partial melting of the mantle's peridotite and the subducted oceanic slab, as well as that of formation of the volcanic glasses and the characteristics of glassy melt inclusions in Cr-spinels in the ultramafic rocks.

Key words Plagioclase, Dynamic pressure, Shock metamorphism, Melting, Maskelynite, Suizhou meteorite

摘要 斜长石在冲击波产生的动态高温高压作用下较易熔融和淬火为非晶态物质,其矿物学名为熔长石。在随州陨石冲击变质特征的研究中,发现橄榄石、辉石等矿物除出现微裂隙外均保存完好,而多数斜长石颗粒则已熔融和玻璃化。可区分出两种形态的熔长石,一种是保持了原有矿物颗粒外形的‘继形熔长石’,另一种则以熔池状和脉状体形式产出的‘改形熔长石’。两种熔长石的光学和物理性质相似,它们的化学成分与晶质斜长石也基本相同,说明斜长石在高压下熔融时没有与周围物质发生明显的组分交换。在吉林陨石的人工冲击实验产物中,斜长石是最先熔融的硅酸盐矿物,也多以填隙的他形颗粒或脉状体和熔池的形式产出。经与其它陨石的静态高压淬火实验研究结果的比较,推定继形和改形熔长石的形成条件为 $\approx 20\text{GPa}$ 和 $\leq 1100^\circ\text{C}$ 。本研究结果对了解地幔橄榄岩和俯冲的大洋板片部分熔融作用,以及地球火山岩玻璃和超基性岩中铬尖晶石的玻璃相岩包裹体物理化学性质有一定参考价值。

关键词 斜长石; 动态高压; 冲击变质; 熔融; 熔长石; 随州陨石

中图法分类号 P589.1

^{*} 国家自然科学基金(编号: 40272028)和中国科学院广州地化所创新基金(编号: GIGCX-04-03)资助。

第一作者简介: 谢先德, 男, 1934年生, 研究员, 近代矿物学专业, E-mail: xdxie@gzb.ac.cn

1 引言

斜长石是地球岩石组中最常见的造岩矿物之一,在石质陨石和月球岩石中产出也较为普遍。陨石母体在太空中如受到其他星体的撞击,会引起陨石中的矿物产生多种形式的冲击变质效应。对斜长石而言,弱冲击时会从产生不规则的裂纹到1至数组平行裂隙,中等程度冲击时会出现面性变形特征(planar deformation features,简称PDF),强冲击时则会熔蚀成为非晶态物质,而在极强冲击和较长的保压时间下就相变成具榍铁矿(hollandite)结构的斜长石高压多形。过去,人们一直把受冲击陨石中的非晶态斜长石称为熔长石(maskelynite),认为它是一种由冲击引起的、经就地固态相变形成的斜长石玻璃,称之为diaplectic plagioclase glass (Binns RA, 1963),可译为“击变斜长石玻璃”。Chao ECT (1967)把保持原有颗粒形态、由石英和长石等矿物经冲击相变形成的玻璃称为thetomorphic glass,即“继形玻璃”。不久前,Chen M and El Goresy A (2000)首次指出陨石中常见的熔长石并不是一种固态相变成因的击变玻璃,而是由冲击产生的斜长石高压熔体经骤冷而形成的一种稠密淬火玻璃(dense quenched glass),他们还较全面地论述了陨石中熔长石的产出特征,及其与受冲击的地球和月球岩石中击变斜长石的主要区别。

我们在研究随州陨石的冲击变质特征时,除发现冲击成因的熔脉内几乎所有斜长石均变为 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ -榍铁矿外,还查明陨石主体中有约20%~30%的斜长石颗粒未发生明显结构变化或部分显示有PDF外,多数的斜长石均已完全非晶化为熔长石,特别是靠近熔脉附近部位的斜长石非晶化更为明显(Xie XD *et al.*, 2001a; 2001b)。显微光学和拉曼探针的研究结果,证实了它们是斜长石在高压下熔蚀经骤冷而形成的一种稠密淬火玻璃。进一步的深入研究还查明,这些非晶化的斜长石颗粒可区分为两种类型,一种是保持原颗粒形态的斜长石玻璃,简称继形(thetomorphic)熔长石,另一种则为有着明显流动特征的熔池形或细脉形斜长石玻璃,简称改形(alomorphic)熔长石。本文就是我们对这两种斜长石熔蚀物质研究结果的初步报道。

2 分析方法

随州陨石是1986年陨落在我国湖北省随州市郊的一块L6型球粒陨石(王人镜和李肇辉, 1990)。根据稀有气体测定结果,确定随州陨石母体在约30Ma年前经受过一次太空碰撞事件(王道德, 1993),冲击强度为中等的S3-S4级(Xie XD *et al.*, 2001b)。研究前首先将随州陨石切片磨制成光薄片,再把多种微矿物学技术配合起来,对光薄片中进行测试的同一个斜长石颗粒进行原位分析,取得系统的矿物学数据。研究中采用了光学显微镜,Hitachi S-3500N型扫描电

镜(BSE-背散射电子模式)、Gameca SX-51型电子探针(加速电压15kV,样品电流10nA),以及Renishaw R-2000型激光拉曼光谱仪(Ar^+ 离子激光,514nm光束)。

3 继形熔长石的矿物学特征

随州陨石主体中的斜长石继形玻璃多为粒状,颗粒轮廓清晰(图1),粒径一般为30~200 μm ,最大可达到500 μm 。镜下为无色透明,表面光滑,无解理或裂隙,也无气泡,正交偏光下完全消光,表明原来结晶很好的斜长石在冲击波的压缩下结构遭到破坏,已相变为非晶态物质。上述物性、光性和无气泡等特征,表明这种非晶态斜长石是在高压下形成的一种稠密玻璃。这种稠密玻璃在卸压时体会急剧膨胀,致使颗粒周围的矿物中出现放射状裂缝(图1),其中有的裂缝甚至切穿了近处的熔脉。在继形熔长石中常可观察到少量来自周边矿物的细小包裹体(图1),它们多为榍铁矿和辉石等硅酸盐矿物的碎屑。以上几个方面的产状特征是斜长石曾在高压下熔蚀的有力佐证。

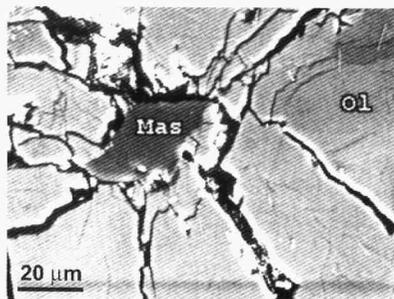


图1 随州陨石BSE图像,示继形熔长石及其周围的放射状裂缝。Mas-熔长石,Ol-橄辉石。

Fig. 1 BSE image showing the radiating fractures round the thetomorphic maskelynite grains. Mas; maskelynite, Ol; olivine.

对继形熔长石进行的激光拉曼光谱研究(图2a),查明其谱图与晶质斜长石有着明显的不同,而与钠长石成分相当的人工合成玻璃(徐培苍等, 1996)很相似(图2b)。前人的研究结果表明,在晶质斜长石结构中, Si-O 四面体彼此以共4个顶角连接成架状骨干,氧原子主要是桥氧(O_b),非桥氧(O^{nb})则很少,且 Si-O 四面体中有Al取代Si,它们的拉曼光谱主要表现为 Si-O 及 Al-O 的振动,包括506~518 cm^{-1} 峰位的 $\text{Si}(\text{Al}^{\text{IV}})-\text{O}_b-\text{Si}$ 的弯曲振动峰和1050~1150 cm^{-1} 的 $\text{Si}(\text{Al}^{\text{IV}})-\text{O}^{\text{nb}}$ 伸縮振动峰。斜长石的玻璃相为群聚态分子网络结构,其最主要的结构单元是 $[\text{SiO}_4]^-$ ——硅氧四面

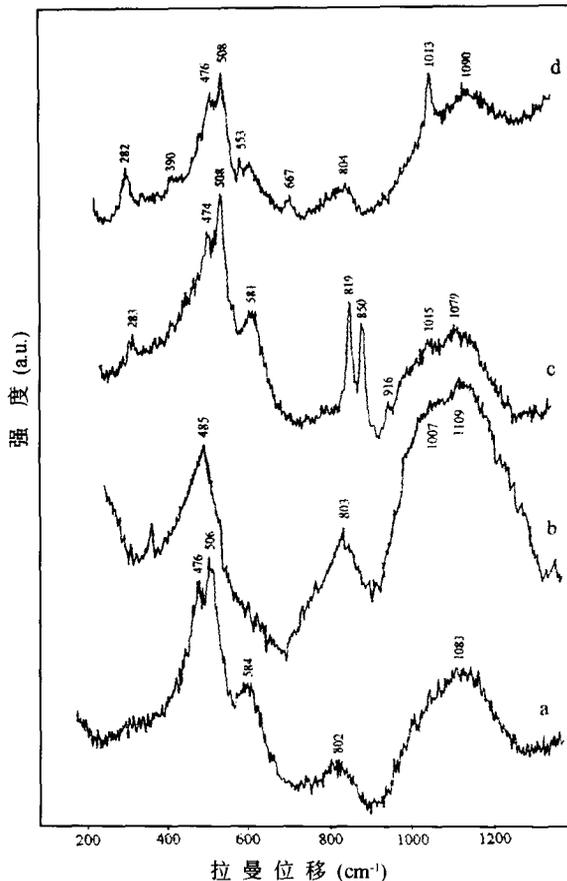


图2 斜长石玻璃的拉曼光谱

a-继形熔长石; b-人工合成斜长石成分玻璃; c-含橄榄石包裹体的改形熔长石; d-含辉石包裹体的改形熔长石

Fig. 2 Raman spectra of plagioclase glasses

a-thetomorphic maskelynite; b-synthesized plagioclase glass; c-allomorphic maskelynite with olivine inclusions; d-allomorphic maskelynite with pyroxene inclusions

体, Si(Al) - O - Si(Al) 在空间上以不同方式组合成变化莫测的网络结构, 其拉曼谱图显示为分子网络振动类型, 主要谱峰有: ① 850cm^{-1} 峰位上 Si - O^{nb} 伸缩对称振动和伸缩反对称振动的一维伸缩振动峰, 其力常数为 $65\text{md}/\text{nm}$, 是拉曼散射强度最大的谱峰; ② $420 \sim 750\text{cm}^{-1}$ 峰位上 Si - O_{br} - Si 反对称伸缩振动和变形振动的三维网络振动峰, 其力常数为 $45\text{md}/\text{nm}$, 是拉曼散射强度次大的谱峰; ③ $780 \sim 810\text{cm}^{-1}$ 峰位上 Si - O_{br} - Si 弯曲振动的二维变形振动峰, 其力常数只有 $2\text{md}/\text{nm}$, 是拉曼散射强度较弱的谱峰(徐培苍等, 1996)。

随州陨石中继形熔长石的拉曼光谱显现的谱峰均为弥散的宽峰(图2中a), 面积和强度最大的是 1083cm^{-1} 谱峰, 其次是以 506cm^{-1} 为主的强谱峰, 较弱的是 802cm^{-1} 谱峰。它们与上述斜长石玻璃相的拉曼谱图的描述是一致的, 也可与徐培苍等(1996)在 3GPa 和 1755°C 的高温高压条件下人

工合成斜长石成分玻璃($\text{SiO}_2 68.76\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 20.60\%$, $\text{Na}_2\text{O} 11.29\%$)的拉曼谱图(图2b)相对比, 与 Wolf GH and 和 McMillan PF (1995)在常压下和在 $4, 6, 8, 12\text{GPa}$ 的高压下, 对成分为 $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 的一组淬火玻璃所做的拉曼谱图也比较接近, 其最强宽峰位在 $1090 \sim 1094\text{cm}^{-1}$, 次强宽峰位在 $448 \sim 594\text{cm}^{-1}$, 较弱的峰位在 $776 \sim 790\text{cm}^{-1}$ 。

根据电子探针(EPMA)的分析结果(表1), 随州陨石中的晶质斜长石具更长石成分, 化学式为 $(\text{Na}_{0.78}\text{K}_{0.07}\text{Ca}_{0.11}\text{Fe}_{0.04})_{1.00}\text{Al}_{0.93}(\text{Si}_{2.84}\text{Al}_{0.16})_{3.00}\text{O}_8$ 。从表1可知, 继形熔长石化学成分与晶质斜长石是很相近的。从继形玻璃中 K、Na 等活泼元素的含量没有明显变化和 Fe、Mg 含量没有增高可以看出, 该玻璃颗粒与周围的橄榄石、低钙辉石等 Fe、Mg 硅酸盐矿物, 以及 FeNi 金属之间没有发生明显的组分交换。

表1 斜长石及其两种非晶态的 EPMA 分析结果(wt%)

Table 1 EPMA results (wt%) of plagioclase and two maskelynite types

主要成分	斜长石 3	继形熔长石 3	改形熔长石 3
SiO ₂	65.57	67.20	66.45
TiO ₂	0.04	0.06	0.05
Al ₂ O ₃	21.72	21.54	21.67
FeO	0.41	0.22	0.50
MnO	0.02	0.00	0.01
MgO	0.00	0.01	0.01
CaO	2.21	2.19	2.13
Na ₂ O	8.87	8.35	8.94
K ₂ O	1.30	0.97	0.99
Cr ₂ O ₃	0.03	0.03	0.01
NiO	0.00	0.01	0.02
合计	100.38	100.76	100.77

4 改形熔长石的矿物学特征

随州陨石主体中较为常见的非晶态斜长石是改形熔长石, 它们的物理和光学性质与上节叙述的继形熔长石没有多少差别, 在镜下也是无色透明, 表面光滑, 矿物中原有的解理或裂隙已消失, 也看不到任何由冲击引起的裂纹和裂缝, 更没有气泡形成(图3, 4)。正交偏光下改形熔长石也完全消光。与继形熔长石不同的是改形熔长石多为熔池形、细脉形或网格形, 其中矿物固体包裹体较丰富, 包裹的矿物碎屑以橄榄石、辉石、铬铁矿为最常见, 特别是在一些较大的熔池中常可见到大量的铬铁矿碎粒(图3, 4, 5), 粒径多为 $1 \sim 2\mu\text{m}$, 最小仅 $0.4\mu\text{m}$ 。考虑到铬铁矿碎粒的不规则形态, 以及铬铁矿的熔点(2000°C 左右)比斜长石要高 $800^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$ 左右, 铬铁矿包裹体不太可能是陨石中的铬铁矿先熔解于斜长石的熔体之中, 再以微晶的方式从熔体中晶出的, 而应是脆性强

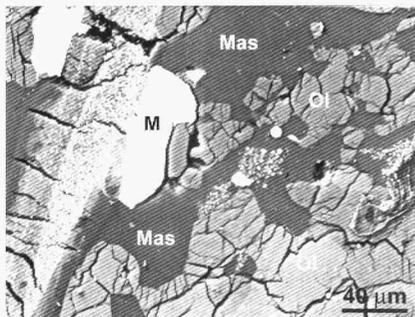


图3 随州陨石 BSE 图像, 示熔脉外侧充填于橄榄石(Ol)隙间的孪长石(Mas)产状, 长石熔泡中的微细矿物为铬铁矿、M-FeNi 金属。

Fig. 3 BSE image showing the occurrence of allomorphic maskelynite (Mas) filling fractures in olivine(Ol). Note the tiny fragments of chromite in melt pockets, M-FeNi metal.

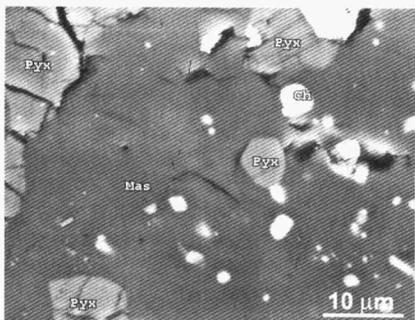


图4 随州陨石的 BSE 图像, 示含低钙辉石(Pyr)和铬铁矿(Ch)等矿物包裹体的孪长石(Mas)熔泡。

Fig. 4 BSE image showing a maskelynite (Mas) melt pocket containing mineral inclusions of low-Ca pyroxene (Pyr) and chromite (Ch).

的铬铁矿在受压后先碎裂, 随后被流动的斜长石熔体所捕获。

随州陨石中改形孪长石的拉曼图谱与孪形孪长石的基本相同, 也都是弥散的宽峰(图2中c和d), 主要的拉曼峰位为: $1079 \sim 1090 \text{cm}^{-1}$, 508cm^{-1} 和 804cm^{-1} 。由于改形孪长石含有较多的来自周边矿物的包裹体, 在其拉曼图谱上也常显示出 819cm^{-1} 和 850cm^{-1} 的晶质橄榄石特征峰(图2中c)和 1013cm^{-1} , 667cm^{-1} 和 390cm^{-1} 的晶质辉石特征峰(图2中d)。

从表1可知, 改形孪长石的化学成分与晶质斜长石的成

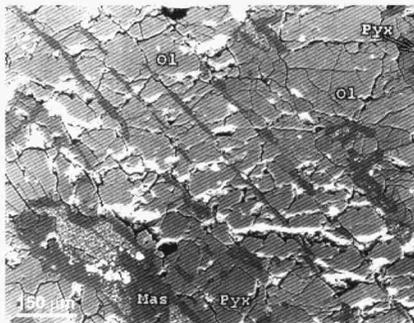


图5 随州陨石的 BSE 图像, 示充填于橄榄石(Ol)和低钙辉石(Pyr)裂缝中的孪长石(Mas)细脉和含铬铁矿微粒的孪长石熔泡。

Fig. 5 BSE image showing the maskelynite (Mas) veinlets in olivine (Ol) and low-Ca pyroxene (Pyr) and maskelynite melt pockets containing tiny chromite fragments.

分基本相同。虽然改形孪长石含有较多的其他矿物包裹体, 但从其K、Na、Fe、Mg、Al等元素氧化物的含量基本保持不变就可看出, 改形孪长石在熔融和迁移过程中并没有与周围的橄榄石、低钙辉石、铬铁矿和FeNi金属等矿物, 以及被其捕获的矿物包裹体发生过明显的组分交换。

5 讨论

随州陨石主体中产生的斜长石玻璃虽有两种类型, 但它们都有着共同的物理和光学特征, 如①: 颗粒表面平坦光滑, 无解理或裂隙; ②: 观察不到任何气泡; ③: 正交偏光下完全消光; ④: 颗粒内可见到从周边或附近矿物捕获来的固体包裹体。⑤: 化学成分与晶质斜长石基本相同, 说明与周边矿物没有发生明显的组分交换。从以上的共同特征可知, 这两种孪长石都是在冲击高压和高温下形成的斜长石稠密淬火玻璃。然而, 它们间也还存在着一些明显的差别, 主要有: ①: 孪形孪长石保有斜长石颗粒的原有形貌, 多为单个的细小不规则粒状, 而改形孪长石则完全破坏和改变了斜长石颗粒的原有形貌, 多呈熔池形和细脉形; ②: 孪形孪长石为原地熔融形成, 而改形孪长石发生过一定程度的移位, 即斜长石的冲击熔体曾被挤压到临近矿物或矿物间的裂隙和裂缝中冷凝成玻璃; ③: 两类孪长石都含有其它矿物的固体包裹体, 但孪形孪长石捕获的包裹体数量较少, 且都来自与其紧密相邻的某种矿物, 而改形孪长石因有迁徙过程, 其中的包裹体除数量较多外, 矿物种类也较丰富, 特别是在一些熔池中常可见到数量巨大的铬铁矿碎粒(图3, 4, 5)。

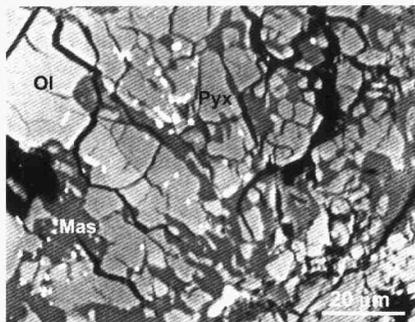


图6 吉林陨石经78GPa人工冲击后的BSE图像,示斜长石熔体(Mas)充填于橄榄石(Ol)和辉石(Pyx)的裂隙中,形成池(最左侧)和熔脉(中部)。

Fig. 6 BSE image showing the plagioclase melt (Mas) pockets and veinlets in olivine (Ol) and pyroxene (Pyx) of the Jilin meteorite experimentally shocked at 78 GPa pockets.

为了对普通球粒陨石中斜长石熔融的压力温度($P-T$)历史有所了解,我们查询了有关斜长石人工冲击实验的资料,结果发现,长石晶体在固态相变为击变玻璃的压力为26~34GPa,而熔化成熔融玻璃的压力为42GPa(Ostertag R, 1983); Kernouve 球粒陨石中的斜长石在室温下变为非晶态时的冲击波压力为25~30GPa,但如陨石靶样在冲击前预热到920K,其转变为非晶态时的冲击波压力则下降为20~25GPa(Schmitt RT, 2000)。前人的研究还发现,玄武质Zagami 无球粒陨石中所有斜长石均已转变成熔长石,推定所受到的冲击压力为30GPa,温度为1000°C(Langenhorst F and Poirier JP, 2000)。

我们用微粉学技术对受人工冲击的吉林陨石样品也进行了深入的研究,取得了斜长石冲击熔融特征的资料(Dai CD *et al.*, 1991; Xie XD *et al.*, 2001c)。研究结果表明,冲击波峰压在12.27、39.53GPa的条件下,实验产物中都没有观察到斜长石的熔融现象,但在冲击峰压达到78GPa、冲击温度达1120°C的时候,实验产物中的所有的斜长石均已熔融(Xie XD *et al.*, 2001c),形成的熔长石多以不规则形颗粒分布于橄榄石或辉石的周围,还有的被挤压进了橄榄石或辉石颗粒中的裂隙内形成熔长石的熔池和细脉(图6),其表面平坦光滑,无裂隙,也无气泡,但可见少量橄榄石和辉石等矿物包裹体。以上现象说明熔长石是斜长石在有围压(53~78GPa)的情况下经熔融、迁移,最终在附近的其它矿物裂隙中淬火形成了熔池状、熔脉状的熔长石。受人工冲击的吉林陨石样品与随州陨石主体中熔长石在产状上的相似性,说明它们在成因上也是相同的,即它们都是斜长石在冲击产生的高压高温下,经熔融和骤冷而形成的一种稠密淬火玻璃。

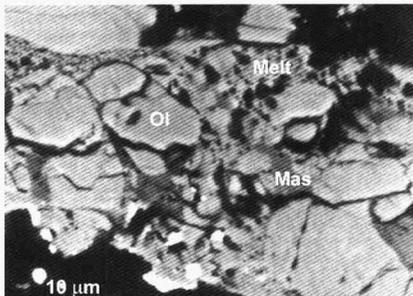


图7 吉林陨石经78 GPa人工冲击后的BSE图像,示橄榄石(Ol)粒间的矿物混合熔体(Melt)和斜长石熔体(Mas)。

Fig. 7 BSE image showing the mixed melt of minerals (Melt) and plagioclase melt (Mas) between olivine (Ol) grains in the Jilin meteorite experimentally shocked at 78GPa.

在冲击峰压为78GPa时,实验产物中除斜长石熔体普遍发育外,还可观察到由其它耐高温矿物,如橄榄石、辉石和铬铁矿等发生局部熔融,形成这些矿物的混合熔体的现象(图7),而当实验压力进一步增高到83GPa、93GPa和133GPa时,斜长石与上述矿物则完全混熔在一起,形成一种多组分的全岩熔体,因而不再见有单一的斜长石的熔体相产出(Xie XD *et al.*, 2001c)。混合熔体和全岩熔体中许多圆形气泡的存在表明,它们与陨石中不含任何气泡的斜长石稠密玻璃在成因上是有差别的。前者是在压力卸除后的开放条件下冷凝的,而后者则是在封闭的高压条件下淬火形成的。

由于天然冲击事件与室内的人工冲击实验在压力保持时间上有着十分明显的差别(Chen M *et al.*, 1996),我们不能用人工冲击实验中斜长石-熔长石转变的 $P-T$ 数据来标定陨石中熔长石形成的 $P-T$ 条件。我们认为随州陨石主体中斜长石-熔长石转变的压力条件不可能像人工冲击波实验结果所获得的42GPa(Wolf GH and McMillan PF, 1995)或>53GPa(Xie XD *et al.*, 2001c)那么高。考虑到陨石等天然冲击事件中压力和温度的保持时间可达数秒种(Chen M *et al.*, 1996),我们认为,取Kernouve 球粒陨石样品有预热的冲击实验中所确定的压力下限(20GPa)作为陨石中斜长石非晶化的压力条件较为合理。另外,随州陨石主体中FeNi和FeS颗粒没有显示熔融迹象,说明冲击平衡温度没有达到它们的熔点($\approx 1100^\circ\text{C}$)。由此可以推定该陨石主体中斜长石-熔长石转变较为可能的条件是:压力约为20GPa,温度约为 $\leq 1100^\circ\text{C}$ 。

对球粒陨石中斜长石的熔融和玻璃化的研究,特别是改形熔长石的产状特征和形成条件的研究结果,对我们认识地幔橄榄岩的部分熔融作用有一定帮助,对了解火山岩玻璃的

物理化学性质,以及超基性岩中铬尖晶石的玻璃相岩浆包裹体的特征都有一定的参考意义。例如,黑龙江五大连池富钾碱性玄武岩中玻璃基质(含 SiO_2 51.46%, Al_2O_3 15.78%, Na_2O 3.25%, K_2O 5.59%, 其他 1.42%)的拉曼光谱上显示出 $947 \sim 1170\text{cm}^{-1}$ 强宽峰和 518cm^{-1} 、 782cm^{-1} 等次强谱峰;浙江寿昌流纹质凝灰岩石英中岩浆包裹体(含 SiO_2 73.70%, Al_2O_3 14.02%, FeO 8.00%, Na_2O 5.32%, K_2O 6.15%, 其他 8.55%)的拉曼光谱上显示出 $990 \sim 1106\text{cm}^{-1}$ 的强宽峰和 460cm^{-1} 、 806cm^{-1} 等次强谱峰,以及浙江宁海珍珠岩(含 SiO_2 70.26%, Al_2O_3 12.88%, CaO 3.66%, Na_2O 2.55%, K_2O 1.22%, 其他 1.80%)的拉曼光谱上显示出 $1062 \sim 1140\text{cm}^{-1}$ 的强宽峰和 489cm^{-1} 、 786cm^{-1} 等次强谱峰(徐培苍等, 1996),上述几种火山岩样品的拉曼光谱与我们研究的随州陨石中熔长石的拉曼谱图都相当接近,说明它们的主要物相组成都是斜长石成分的玻璃。又如对新疆西准噶尔萨尔托海超基性岩和铬铁矿的研究发现,不少铬尖晶石中的玻璃相岩浆包裹体具有钠长石成分,如 EPMA 测定编号为 82A-75B 包裹体的组成为: SiO_2 60.92%, Al_2O_3 28.63%, Na_2O 9.28%, 其他 0.90%, 合计 99.73%, 该岩浆包裹体成分与随州陨石中熔长石的成分十分近似(表 1)。对该包裹体进行的激光拉曼光谱研究,也发现类似于随州陨石中熔长石的两个主要宽峰,即 $960 \sim 1155\text{cm}^{-1}$ 的最强宽峰和 $471 \sim 594\text{cm}^{-1}$ 的次强宽峰(徐培苍等, 1996),说明它是典型的斜长石玻璃相。

球粒陨石中斜长石的部分熔融能形成熔长石的研究,对我们认识大洋板片俯冲时的部分熔融作用也有一定参考意义。最近,我国学者在哈萨克斯坦-准噶尔板块东北缘新疆富蕴县境内下泥盆统地层中,发现了与大洋板块俯冲作用有关的埃达克岩(Adakite)-富铌玄武岩组合(Niu HC *et al.*, 1999; Zhang HX *et al.*, 2005),该产地的埃达克岩与由俯冲的大洋板片熔融形成的典型埃达克岩具有完全一致的元素地球化学特征(较低的 K_2O 含量、较高的 Al_2O_3 、 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 、 Sr 值,以及类似于 MORB 的 Sr 、 Nb 同位素组成特征),因而认为该地埃达克岩是古亚洲洋板块向南俯冲过程中由大洋板片直接发生部分熔融形成的。我们比较了富蕴县埃达克岩中的安山质岩石与随州陨石中的斜长石熔体的化学组成(表 2),发现两者之间存在一些共同点,即 SiO_2 、 Al_2O_3 、和 K_2O 含量都比较接近, CaO 、 Na_2O 含量的差别也不很大,它们都具有 K_2O 含量低和 Al_2O_3 含量高的特点,但二者之间也有着明显的差别,主要是前者的镁、铁氧化物含量比斜长石熔体高,但这可以从二者的矿物组成有差别而获得较好的解释。埃达克岩中的安山质岩石为斑状结构,斑晶以自形斜长石为主,约占全岩体积的 20%~40%,但还含有 2%~5% 的自形单斜辉石和角闪石斑晶,安山岩的基质也是由占全岩体积约 30%~70% 的斜长石构成,同时也含有约 5% 的绿泥石,在岩石薄片中没有发现斜长石的玻璃相残留。这就是说,该安山质岩石含有约 90%~93% 的晶质斜长石,而余下

的约 7%~10% 暗色矿物含量则是引起该岩石中镁、铁氧化物含量比随州陨石中不含暗色矿物的斜长石熔体要高的主要原因。另外,埃达克岩中的英安质岩石也是以斜长石为主要矿物成分,即由占全岩体积约 20% 的自形斜长石斑晶和 80% 的基质斜长石和石英组成(Zhang HX *et al.*, 2005)。从以上的对比结果可以看出,随州陨石受到的冲击温度($\leq 1100^\circ\text{C}$)低于橄榄石和辉石等耐火矿物的熔点,但高于斜长石的熔点,因而引发了陨石中斜长石单个矿物的部分熔融(fraction melting),故熔体中没有镁、铁质硅酸盐矿物晶出,而新疆富蕴县境内的埃达克岩以晶质斜长石为主要组成,并见有单斜辉石、含水的角闪石和绿泥石等铁、镁硅酸盐矿物的自形晶体,说明该岩石是由大洋板片直接发生部分熔融后经冷结晶形成的,熔体的温度应高于斜长石的熔融温度。根据辉石系列的高温相图(王濮等, 1984),初步推定其熔融温度约在 1300°C 到 1400°C 之间。

表 2 新疆北部埃达克岩与随州陨石中斜长石熔体的化学成分(wt%)比较

Table 2 Comparison of chemical composition (wt%) between the adakite of northern Xinjiang and the plagioclase melt in the Suizhou meteorite

样品	埃达克岩* FY-01	埃达克岩* FY-12	斜长石熔体** 分析数 3
SiO_2	64.21	64.52	66.45
TiO_2	0.61	0.61	0.05
Al_2O_3	17.02	17.20	21.67
Fe_2O_3	5.38	5.35	—
FeO	—	—	0.50
MnO	0.07	0.07	0.01
MgO	1.74	1.84	0.01
CaO	4.52	4.56	2.13
Na_2O	5.12	4.50	8.94
K_2O	1.12	1.13	0.99
Cr_2O_3	—	—	0.01
P_2O_5	0.21	0.22	—
NiO	—	—	0.02
合计	100.00	100.00	100.77

* 引自 Zhang HX *et al.* (2005);

** 为本文中的改形熔长石。

6 结论

在太空中曾遭受过其它星体撞击的随州陨石主体中存在着继形熔长石和改形熔长石两种斜长石熔体,由于它们都是由冲击产生的斜长石高压熔体经骤冷而形成的一种稠密淬火玻璃,故它们有着一些共同的物理和光学特征,但因前

者是原位就地成因,后者为流动和迁移的异地成因,两者之间存在着产状上的明显差别。经与其它陨石的人工高压淬火实验研究结果相比较,推定随州陨石主体中继形和改形熔长石的形成条件为 20GPa 和 $\leq 1100^{\circ}\text{C}$ 。关于随州陨石中斜长石熔融和玻璃化的研究,对认识地幔橄榄岩的部分熔融、俯冲的大洋板块的部分熔融作用和了解地球火山岩玻璃的物理化学性质,以及对超基性岩中铬尖晶石的玻璃相包裹体性质的认识都有一定参考价值。

致谢 本文由国家自然科学基金(项目编号: 40272028)和中国科学院广州地球化学研究所创新基金(项目编号: GIGCX-04-03)资助。本所的牛贺才研究员和张海祥博士为本项研究提供了有关新疆富蕴县境内埃达克岩-富铌玄武岩组合的有关资料,王道德研究员和戴诚达博士提供了受人工冲击吉林陨石的光薄片,中国科学院地质与地球物理研究所的韩秀玲高级工程师协助完成了随州陨石中斜长石的部分电子探针分析,作者在此一并致谢。

References

- Binns RA. 1963. Stony meteorites bearing maskelynite. *Nature*, 140: 670 - 671
- Chao ECT. 1967. Shock effects in certain rock-forming minerals. *Science*, 156: 192 - 202
- Chen M and El Goresy A. 2000. The nature of maskelynite in shocked meteorites: not a diaplectic glass but a glass quenched from shock-induced dense melt at high pressure. *Earth Planet. Sci. Letters*, 179: 485 - 502
- Chen M, Sharp TG, El Goresy A, *et al.* 1996. The majorite-pyrope + magnesio-w site assemblage: constraints on the history of shock veins in chondrites. *Science*, 271: 1570 - 1573
- Chen M, Xie XD and El Goresy A. 2004. A shock-produced (Mg, Fe) SiO_3 glass in the Suizhou and meteorite. *Met. Planet. Sci.*, 39: 1798 - 1808
- Dai CD, Wang DD and Jin XG. 1991. Shock-loading experimental study of Jilin meteorite. *Chinese Sci. Bull.*, 36: 1984 - 1987
- Langenhorst F and Poirier J P. 2000. 'Eclogitic' minerals in a shocked basaltic meteorite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 176: 259 - 265
- Niu HC, Xu JF, Yu XY, Chen FR and Zheng ZP. 1999. Discovery of Mg-rich volcanic rock series in the western Altai area, Xinjiang, and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 44: 1685 - 1687
- Ostertag R. 1983. Shock experiments on feldspar crystals. *J. Geophys. Res.*, 88: B364 - 376
- Schmitt RT. 2000. Shock experiments with the H6 chondrite Kernouve; Pressure calibration of microscopic shock effects. *Meteorit. Planet. Sci.*, 35: 545 - 560
- Wang DD. 1996. *An Introduction to Chinese Meteorites*. Beijing: Science Press, 101 - 106 (in Chinese)
- Wang P, Pan ZL and Wen LB. 1984. *Systematic mineralogy (2nd volume)*. Beijing: Geological Publishing House, 285 - 301 (in Chinese)
- Wang RJ and Li ZH. 1990. *Comprehensive studies on the Suizhou meteorite*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 - 62 (in Chinese)
- Wolf GH and McMillan PF. 1995. Pressure effects on silicate melt structure and properties. *Review in Mineralogy*, 32: 505 - 561
- Xie XD, Chen M, Wang DQ, *et al.* 2001a. Natural $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ -hollandite in the shock melt veins of Suizhou L6 chondrite. *Chinese Science Bulletin*, 46: 1121 - 1126
- Xie XD, Chen M and Wang DQ. 2001b. Shock-related mineralogical features and *P-T* history of the Suizhou L6 chondrite. *European Journal of Mineralogy*, 13: 1177 - 1190
- Xie XD, Chen M, Dai CD, *et al.* 2001c. A comparative study of naturally and experimentally shocked chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 187: 345 - 356
- Xu PC, Li RB, Wang YX, *et al.* 1996. Raman spectroscopy in earth sciences. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1 - 176 (in Chinese)
- Zhang HX, Niu HC, Sato H, Yu XY, Shan Q, Zhang BY, Ito J and Nagao T. 2005. Late Paleozoic adakite and Nb-enriched basalts from northern Xinjiang, northwest China: Evidence for the southeastward subduction of the Paleo-Asian Oceanic Plate. *The Island Arc*, 14: 55 - 68

附中文参考文献

- 王人镜, 李肇辉. 1990. 随州陨石综合研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 - 62
- 王道德. 1993. 中国陨石导论. 北京: 科学出版社, 101 - 106
- 徐培苍, 李如壁, 王永祥等. 1996. 地学中的拉曼光谱. 西安: 陕西科技出版社, 1 - 176
- 王濮, 潘兆鲁, 翁玲宝. 1984. 系统矿物学(中册). 北京: 地质出版社, 285 - 301