

文章编号:1001-8166(2004)05-0767-07

高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学及其研究进展*

侯渭,周文戈,谢鸿森,刘永刚

(中国科学院地球化学研究所,贵州 贵阳 550002)

摘要:高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学是现代岩石学的前沿领域之一。它主要研究高温高压下低程度部分熔融(或含少量流体)岩石中,矿物颗粒之间熔体(或流体)形态特征、连通性,以及与周围矿物相互关系的科学。研究中较多地借鉴了材料科学的研究方法,与界面物理化学密切相关。高温高压下地幔岩石粒间熔体(和流体)形态学的研究为探讨地幔部分熔融作用、软流圈和地幔交代作用的成因提供了重要的实验依据,已成为地球深部研究的重要手段之一。目前该学科还没有为我国广大地学工作者所熟悉。为此,对高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学的基础理论、实验方法,以及某些实验研究结果进行简要介绍,从而为读者对该学科的了解提供一些便利。

关键词:高温高压;岩石;熔体;流体;二面角

中图分类号:P59 **文献标识码:**A

0 引言

岩石粒间熔体(和流体)形态学是研究低程度部分熔融(或含少量流体)的岩石中,矿物颗粒间熔体(或流体)形态特征、连通性,以及与周围矿物之间关系的科学。

高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学的形成,与部分熔融理论和实验研究的发展直接有关。从20世纪60年代, Ringwood^[1]和 Green等^[2]在探究玄武岩成因的过程中,提出了地幔岩石部分熔融的概念以来,在这个领域中逐渐形成了2个不同的研究方向:①一些研究者认为,玄武岩浆的形成与地幔岩石较高程度(15%~25%)的部分熔融作用有关。在有关的实验研究中,主要探讨此类部分熔融作用发生的温度、压力等条件;不同地幔岩石类型与各类玄武岩成因的关系;部分熔融过程中是否伴随结晶分异作用和晶体的堆积等。Kushiro^[3]在有关论文中对此类实验研究的方法和主要结果进行了综合评述。②另一些研究者认为,软流层和地幔交代

作用的成因可能与含流体的地幔岩石的低程度部分熔融作用有关。他们通过对高温高压下低程度(5%以下)部分熔融实验产物的观测,研究了少量熔体在岩石中的分布情况,存在状态,连通情况,岩石中矿物的种类、颗粒大小和熔融分数对熔体形态的影响,以及这种少量熔体在岩石中的渗透能力等,从而逐步形成了一个新的边缘学科——高温高压岩石粒间熔体形态学。与此同时,也进行了一些高温高压下岩石粒间水、二氧化碳等流体形态特征和连通性的研究,使原来仅限于地壳岩石粒间流体形态学的研究向地球深部扩展。

高温高压岩石粒间熔体和粒间流体的形态特点,分别类似于人工合成的多晶集合体—陶瓷和一些烧结形成的无机材料晶体颗粒间的玻璃质和孔隙(孔隙代表了粒间流体—空气的存在状态)。因此,在高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学的研究中,较多的借鉴了材料科学有关的研究方法,其理论基础主要与物理化学中的界面能理论密切有关。所以,开展高温高压下岩石粒间熔体(和流体)形态学

收稿日期:2003-08-13;修回日期:2003-10-24.

* 基金项目:国家自然科学基金重大项目“地球内部几个重要界面物质的高温高压物性研究”(编号:10299040);中国科学院知识创新工程重要方向项目“同步辐射高压高温实验技术及地幔地核重要矿物的物性研究”(编号:KJX2-SW-No.3)资助.

作者简介:侯渭(1942-),女,山西省榆次人,研究员,主要从事地球深部物质科学研究. E-mail: xiehongsen@sina.com

的研究,不仅对探讨软流层成因和地幔交代作用等地球深部问题有重要意义,也可为材料科学的发展提供有关高温高压方面的实验资料,对于物理化学有关界面能理论的发展也有一定的价值。

高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学在我国起步较晚,而且发展不太平衡:一方面,从 20 世纪 90 年代中期起,我国学者与国外高压实验室合作,已经在高层次上开展了一些工作,如金振民等^[4]通过差应力条件下的部分熔融实验,进行了动态非平衡条件下地幔橄榄岩粒间熔体形态学特征的研究;另一方面,到目前为止,国内刊物上对岩石粒间熔体(和流体)形态学的介绍还不多,相关的实验研究也很少开展。这种状况不仅限制了该学科在我国的发展,也影响了我们对于地幔部分熔融作用的深入研究。为此,本文将对高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学的一些基础理论、研究方法,以及近期研究成果进行简要介绍,从而为读者对该学科的了解提供一些便利。

1 理想晶体集合体粒间液体形态学特征及其物理化学意义

从本质上讲,岩石是具有紧密结构的多晶集合体;熔体和流体可以统称为液体。理想条件下,将低程度部分熔融(或含少量流体)的岩石设定为含有少量液体、等粒状、各向同性的单一晶体组成的集合体,我们将其简称为理想晶体集合体。了解理想晶体集合体粒间液体形态学特征,是进行一般岩石粒间熔体和流体形态学研究的基础和理论依据。

描述粒间液体形态学特征的最重要的参数是固液二面角。固液二面角简称二面角(dihedral angle),是指样品抛光切面上,2个相邻固液界面(切面上为2条相交的界线)间的夹角。对于理想晶体集合体来说,每个晶体可看作一个球体,少量液体则均匀的分布于整个岩石的晶粒之间,固液界面大多是曲面,二面角应定义为两相邻固液界线的切线间夹角(图1)。当二面角小于 60° 时,固液界面为凸形曲面(向液体方向凸);当二面角大于 60° 时,固液界面为凹形曲面(向晶体方向凸);当二面角等于 60° 时,固液界面为平面;当二面角等于 180° 时,固液界面是一个圆^[5]。

界面物理化学理论认为,二面角的大小主要与界面能有关,其数学关系可用下式表达:

$$\cos(\theta/2) = \gamma_{sl}/2\gamma_{ss} \quad (1)$$

式中 θ 为二面角, γ_{ss} 是两相邻固体颗粒之间的界面

能(以下简称固固界面能), γ_{sl} 是固体颗粒与相邻液体之间的界面能(以下简称固液界面能)。从(1)式可以看出,二面角的大小取决于固固界面能与固液界面能之比(以下简称界面能比), γ_{sl} 相对于 γ_{ss} 的值越小,界面能比越大,二面角越小。也可以认为,各种影响二面角的因素是通过改变体系的界面能比而起作用的;反之,通过二面角的观测可推断体系界面能比的相对大小。

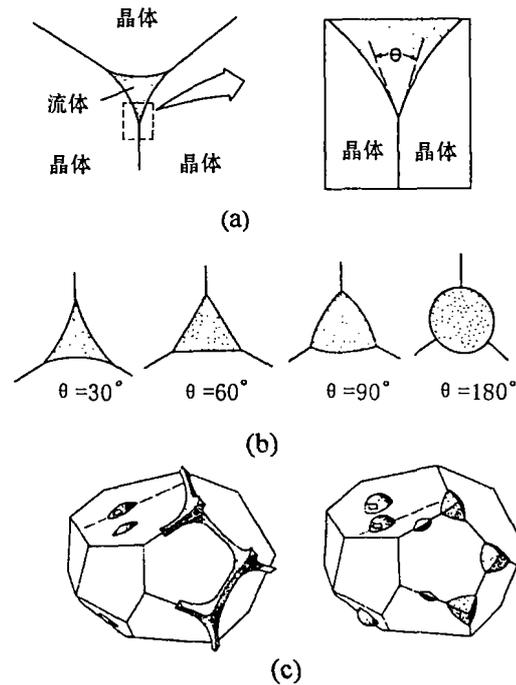


图1 理想岩石(由同一种各向同性矿物组成)中液体的形态和固-液二面角示意图^[6]

Fig. 1 Shapes of liquid and solid-liquid dihedral angles in ideal rock which is composed of the same isotropic mineral (a) 岩石中3个颗粒所围成的充满了液体的孔隙的二维切面,二面角(θ)如右侧放大的图所示;(b)不同形态孔隙的二面角值;(c)二面角大小与液体连通性关系的立体示意图;左图为二面角小于 60° 的情况,液体呈薄的透镜状和棱柱状,有好的连通性;右图为二面角大于 60° 的情况,液体呈孤立的厚透镜状和袋状,相互之间不连通

二面角在界面物理化学中称为润湿角,二面角的大小反应了晶体被液相润湿的程度。二面角小,液体对晶体表面的润湿程度高,粒间液体容易相互连通;二面角大,液体对晶体表面的润湿程度低,粒间液体不容易相互连通。研究表明,二面角的大小和粒间液体的形态特征大致有以下关系:①二面角为 0° 时,液体可夹在2个晶体的晶面之间,成为薄膜状(图1a);②二面角在 $0 \sim 60^\circ$ 之间(包括等于 60° 的情况),液体分布于3个晶体颗粒晶面围成的孔隙中,并沿各晶粒的棱长方向扩展,形成断面为三

角形的棱柱状(或称为管状;图1b)。在抛光切面上,这种孔隙成为一个点,而棱柱状的液体显示出3线交于一点的特征。因此,国内的许多文献中称之为三联点状^[4];③二面角大于60°时,液体只存在于3个晶体颗粒晶面围成的孔隙中,成为孤立的袋状(图1c)。前面2种情况下,不论液体含量(即部分熔融岩石中的熔融分数)多少,岩石粒间的液体能够彼此连通。第三种情况下,粒间液体是否相互连通,与岩石中液体总含量有关。液体总含量小于某一值时,液体不能连通;只有液体含量大于该值时,粒间液体才可能相互连通。这个使粒间液体相互连通的最低含量的大小与二面角的大小有关。二面角越大,要求最低液体含量也大。

要说明的是,当晶体集合体中含液体量很高时(25%以上或更高),二面角为零,液体不再分散于晶粒之间,而是晶粒完全被液体所分隔,这时的固液界面是不稳定的。这种情况有时在陶瓷等材料中可能出现。本文所讨论的岩石是低程度部分熔融岩石或含少量流体的岩石,一般的液体含量在5%或更低,因此不会出现这种情况。

2 高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学的研究方法

地球内部高温高压状态下存在于岩石颗粒间的熔体或流体,在岩石被带到地表的过程中可能与岩石发生分离而丢失,也可能与晶体发生反应形成脉体,或在已有的晶体颗粒间结晶成细粒晶体集合体。因此,在自然岩石样品中,难以观察到地球深部高温高压状态下粒间熔体和流体的真实情况。所以,完成一项该方面的研究,一般需要先进行高温高压下的模拟实验,再通过对淬火实验产物的观测才能获得有关粒间熔体(或流体)形态学特征的信息。

对于粒间熔体的有关实验来说,快速冷却可使粒间熔体形成淬火玻璃在产物中保存下来,然后再进行产物中粒间淬火玻璃质的观测。对于有关粒间流体的实验而言,快速冷却能够较好的保存高温高压下晶体和流体间的结构关系,但在实验产物切制光薄片的过程中,大部分粒间流体会发生丢失而形成孔隙。因此,粒间流体形态学的研究往往是通过实验产物光薄片中的孔隙(或充满树脂的孔隙)的观测而完成的。

有关的高温高压模拟实验的周期都比较长,短则几十小时,长则几十天,以便在高温高压条件下,使矿物与熔体(或流体)之间达到化学平衡。有关

高温高压实验的具体装置和实验方法,各个研究者采用的不尽相同,因篇幅有限,不再详细介绍。此外,为了某种需要,有的实验可能在常压高温下进行,其实验方法将在以下小节中具体说明。光学显微镜、扫描电镜、透射电镜是对粒间熔体(和流体)形态学特征进行观测的主要手段,有时还需要使用电子探针测定熔体和周围矿物颗粒的化学成分。在实验产物粒间熔体(和流体)形态学的研究中,二面角的测量占有重要地位。目前为止,大多数学者使用扫描电镜获得实验产物任意切面的背散射电子图像,在此图像上进行粒间熔体(或孔隙)的二面角测量。任意切面上观察到的二面角被称为视二面角(apparent dihedral angle),在大量视二面角测量值的基础上取其中间值作为真正的二面角值。因此,对于某一样品中某类矿物颗粒间熔体(或流体)形成的二面角要进行上百次的测量后才能确定其真正的二面角值^[7]。此外,据 Cmiral 等^[8]报道,由于透射电镜的电子束可以倾斜,因此使用透射电镜可以直接测量粒间熔体的真正二面角值,其测量结果误差较小。

3 高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学研究进展

3.1 简要评述

从已有的资料看来,目前高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学的研究对象十分广泛,除主要应用于与地幔岩石部分熔融作用有关的研究外,其它方面有关的研究也较多。甚至可以认为,在某种意义上,该学科作为一种研究方法,已经应用于各类地质体中流体和熔体迁移和演化过程的研究之中了。如 Laporte 等^[9]进行了与地壳深熔作用有关的粒间熔体的形态学的实验研究,并对混合岩成因进行了讨论。Ikeda 等^[8]完成了透辉石—钙长石体系和透辉石—镁橄榄石—钙长石体系在等温、冷却和加热等动力学过程中二面角的测量,从而对火山岩中聚斑状结构和花岗岩中晶体串结构的成因做出了合理的解释。Holness^[10]进行了多种矿物(石英+长石)—流体体系二面角的测量,讨论了少量矿物(长石)的加入对石英—流体二面角的影响。Hiraga 等^[11]使用透射电镜,对经过低级变质作用形成的泥质片岩中的孔隙进行了观测,获得了该岩石中不同矿物—流体的二面角值。

本文所关注的主要是与地幔岩石有关的一些实验研究结果,从已有的资料来看,该学科的研究还存

在以下不足之处:①目前还没有形成系统的理论体系,大多数文献中都大段套用物理化学中常用的理想晶体集合体粒间液体形态与界面能理论方面的论述。②岩石—流体体系、岩石—熔体体系还处于分置研究的状态,虽然在有关橄榄岩—玄武质熔体体系中,有的熔体的原始物料中含有少量的 H_2O 和 CO_2 ,但对于所含流体的数量并没有作定量的控制,也没有进行流体不同含量实验结果的比较。这与自然条件下地球深部熔体与流体常常共生在一起的情况相差较大。③对于多种矿物组成的岩石中粒间流体或熔体的研究很少,特别是关于粒间流体的研究大多是在单一矿物体系中进行的。

根据以上分析,高温高压岩石粒间熔体(和流体)形态学目前还处于兴起和发展的阶段,还有许多问题有待探讨和研究。因此,无论从理论和实验方面还有相当大的发展空间。这对于我国地学界来说,无疑是一个有利的发展机会。

3.2 橄榄岩粒间玄武质熔体形态学实验研究的主要结果及其地学意义

一般认为,地幔岩石的成分与橄榄岩类似,此外,还含有不同比例的少量玄武质成分。因此,近20多年来有关橄榄岩—玄武质熔体体系的实验研究在岩石粒间熔体形态学领域占有重要地位。此类实验大多是橄榄岩加少量斜方辉石作为地幔岩石样品,玄武岩(或含少量 H_2O 和 CO_2 的玄武岩)作为熔体样品,在高温高压(1.0~2.0 GPa, 1 200~1 400℃)下完成的,熔融分数均在5%以下。研究结果及地质意义可归纳为以下方面:

(1) 二面角的测量结果表明,橄榄石粒间(或少量橄榄石—斜方辉石粒间)玄武质熔体的二面角测量结果均小于 60° ,说明粒间熔体有好的连通性。然而,不同研究者的测量结果差别很大。如 Harte 等^[12]综合了1979—1991年间多位研究者的测量结果,二面角值均大于 0° ,变化范围为 $25 \sim 40^\circ$ 。Waff 等^[13]和 Faul^[14]分别在实验产物中观察到了薄膜状、层状的粒间熔体,说明其二面角最低值可达到 0° 。Cmiral 等^[8]使用透射电镜直接测量了实验产物中粒间熔体二面角,主要测量结果的范围为 $0 \sim 10^\circ$ 。

(2) 实验产物中,普遍观察到类似于薄膜状的粒间熔体,不同学者对它们有各自的命名方法。如 Waff 等^[13]在实验产物中观察到了分布于2个相邻颗粒晶面间的薄膜状熔体,熔体厚度为微米级。Faul^[14]对实验产物的观察发现,薄膜状熔体的厚度达 $0.2 \sim 5 \mu m$,比一般意义的薄膜状熔体(10~100

nm)要厚得多。他称这种熔体为盘状熔体,它们在二维图像上为半椭圆形,三维方向上为盘状。Cmiral 等^[8]则称厚度范围为 $10 \sim 100 \text{ nm}$ (偶然达几个 μm),分布于两颗粒之间的熔体为层状熔体;而厚度为 1 nm 的才称为薄膜状熔体。

除薄膜状熔体,以及处于三晶体颗粒围成的,具有三角形断面的棱柱状熔体外,还观察到了由3个以上颗粒晶面围成多边形(四边形、五边形或更多边形)断面的熔体^[8,13]。Cmiral 等^[8]称此类熔体为大尺寸粒间熔体。

(3) 由于橄榄石是具有强烈各向异性的矿物,橄榄石集合体粒间熔体的形态与理想晶体集合体的情况有很大差别。其主要特点是熔体与晶体的固液界面不完全为曲面,也有的是平面状晶面作为固液界面。平面状晶面(flat)简称F面。Waff 等^[13]注意观察了F面作为固液界面的分布情况,发现三角形断面的棱柱状粒间熔体的60%以上具有一个以上的F面作为固液界面。Cmiral 等^[8]的观察结果是:大尺寸粒间熔体(多边形断面)至少有2个固液界面为F面。

(4) Waff 等^[13]通过几个实验结果比较发现,各类形态的粒间熔体的相对比例与熔融分数有以下关系:在熔融分数很低时(小于1%),熔体主要分布于三颗粒结合处,呈孤立的袋状。当熔融分数较高(大于1%,小于5%),有较多断面为三角形的棱柱状熔体出现,它们往往与薄膜状熔体连接形成相互连通的网。Faul^[14]的一组实验的熔融分数均在3%以下,观测发现,产物中熔体的分配是不均匀的。不同部位的熔融分数与熔体形态的统计表明,随着熔融分数的增加,薄膜状熔体(Faul称之为盘状熔体)的相对比例增加,而袋状熔体的相对数量减少。后者的比例最低可下降至整个粒间熔体含量的10%。在局部熔融分数低至0.1%的地方,仍发现有薄膜状熔体(即盘状熔体)存在。Cmiral 等^[8]发现,减小晶体颗粒度与增加熔融分数有类似的效果,都使二面角减小,即粒间熔体的连通性增强。比如,晶体颗粒为 $43 \mu m$,熔融分数为2%的实验产物,和晶体颗粒为 $7 \mu m$,熔融分数为1%的实验产物的二面角测量结果接近,其中 $0 \sim 10^\circ$ 的二面角都占粒间熔体的75%以上。

(5) 综上所述,高温高压(1.0~2.0 GPa, 1 200~1 400℃)条件下,熔融分数低于5%时,橄榄石集合体粒间玄武质熔体形态特征的总体趋势是:二面角较小(小于 60°),薄膜状熔体和棱柱状熔体数量

较多。因此,粒间熔体应有较好的连通性和可渗透性。然而,作为该体系主要矿物的橄榄石具有强烈的各向异性,使不少粒间熔体的固液界面为F面。F面的形成并不完全与界面能有关,它们主要是部分熔融过程中晶面保持平衡稳定态的结果。F面的出现,使二面角与界面能的关系变得更为复杂,第1节中公式(1)已不能直接用于表达该体系二面角与界面能的关系。同时,只根据二面角测量值也不能完全说明粒间熔体的连通和渗透情况^[8,13]。

(6) 目前,二面角以及橄榄石各向异性对于该体系中粒间熔体连通性和可渗透性的控制作用还没有统一的认识。因此,不同学者根据实验结果作出的地质推论也不相同。如Harte等^[12]根据二面角的测量结果指出,在地幔岩石中只有非常少量的熔体存在时(小于1%~5%),熔体极易分散于整个岩石中,并在三维方向上相互连接成为熔体网。在重力压实作用下,由于这些熔体的粘度很低,它们可能发生移动。以此为依据,Harte等^[12]认为,部分熔融地幔岩石中,粒间玄武质熔体的连通和向上运移是地幔交代作用的物质来源。Waff等^[13]强调了橄榄石各向异性的影响,他们认为上地幔中橄榄石可能产生定向排列,即(010)面沿水平方向排列。其结果导致沿水平方向熔体的渗透性增强,而垂直方向上的渗透性减弱,使熔体不能直接向上迁移,而是形成了一个水平方向的部分熔融带,即软流层。

(7) 为了解橄榄岩中其它少量矿物各向异性对粒间熔体连通性的影响,Schafer等^[15]进行了常压高温下玄武质熔滴下落的实验研究。采用类似玄武岩玻璃质碎块为原始物料,将其熔融成熔滴,熔滴下落至橄榄石、斜方辉石、透辉石、尖晶石等矿物表面成为淬火熔滴(玻璃)。测量不同矿物的不同晶面与熔滴之间的固液界面,与熔滴—空气之间气液界面所夹的二面角,再计算出了不同矿物的晶面能各向异性。计算结果表明,从透辉石—橄榄石—斜方辉石—尖晶石,晶面能各向异性依次减少。根据矿物晶面能各向异性与熔体渗透性的关系,Schafer等^[15]认为,随岩石中透辉石含量增加,粒间玄武质熔体的渗透性增强;随岩石中顽火辉石含量增加,粒间玄武质熔体的渗透性下降;尽管尖晶石的各向异性很低,但尖晶石自身具有高的表面能,表面能增加有利于粒间熔体的渗透,因此随岩石中尖晶石含量增加,粒间熔体的渗透性也增强。据此,Schafer等^[15]推断,稳定地块之下地幔中的方辉橄榄岩的存在可能不利于部分熔融形成的熔体的迁移;而熔体

可能很容易通过尖晶石二辉橄榄岩而迁移。

3.3 石英岩、橄榄岩等岩石粒间流体形态学实验研究的主要结果

一些研究者选用与石英岩和橄榄岩等岩石相近的原始物料,加入H₂O、CO₂、H₂O—CO₂或NaCl等可溶性盐溶液,在0.1~1 GPa压力,450~1 150℃温度下进行实验,通过对实验产物抛光切面上孔隙形态的观测,获得粒间流体形态学特征如下:

(1) 大部分粒间流体呈袋状,其次为透镜状。如Watson和Brenan的石英—H₂O—CO₂、橄榄石—H₂O—CO₂、斜方辉石—H₂O—CO₂体系的实验产物中,孔隙的形状主要为袋状。产物切片经过剥离后进行电子显微镜观察,发现许多矿物晶面上有小的圆形凹坑,因此推断在2个矿物颗粒界面之间曾有小的透镜状流体分布。在钙长石—CO₂的实验产物中,除观察到与上述类似的袋状和透镜状孔隙外,还有少数孔隙呈球形,断面为圆形。上述透镜状孔隙一般在1 μm以下,袋状孔隙一般只有几个μm至10 μm,球形孔隙的最大直径达50 μm^[6,16-18]。

(2) 由于石英、橄榄石等矿物都具有各向异性,晶体—流体界面既有曲面,也有平面(F面)。Hollness^[17]关于石英—H₂O—CO₂体系的实验表明,相同实验条件(温度、压力、时间)下,随流体中CO₂比例增加,石英颗粒的晶面倾向于变得浑圆状,晶体—流体界面中F面的相对数量减少。不同压力下的实验产物比较,随压力增加,石英颗粒的晶面也倾向于变浑圆状,F面的相对数量减少。而在压力低、周期短的实验产物中石英的平面状晶面比较发育,F面的相对数量较多。

(3) 二面角的测量结果表明,大部分流体二面角值在60°左右或60°以上。多项实验产物中都没有观察到呈薄膜状的流体(二面角为0°),因此,在实验给定的温度、压力和流体成分的范围,矿物颗粒间流体的连通性较差^[16-19]。要说明的是,关于流体连通性的讨论,一般指流体含量较低的体系。60°作为流体连通和不连通的二面角临界值,一般限于流体含量在1%或更低的情况。当流体含量高于1%时,流体连通和不连通的二面角临界值也随之增高。如Bargen等^[20]认为,流体含量为2%时的二面角临界值为65°。

(4) 实验表明,在温度压力不变条件下,石英—流体体系和橄榄石—流体体系粒间流体二面角随流体成分的变化规律是^[6,17]:

- 温度压力相同的条件下,在石英—H₂O—

CO₂ 体系和橄榄石—H₂O—CO₂ 体系中,二面角随流体中 CO₂ 含量增加而增加。温度、压力和流体成分相同的条件下,石英—流体(纯水或 H₂O—CO₂) 二面角总是小于橄榄石—流体(纯水或 H₂O—CO₂) 二面角;而石英—纯 CO₂ 与橄榄石—纯 CO₂ 的二面角值接近。如 1GPa, 1 000℃ ± 条件下,石英—纯水、石英—H₂O—CO₂ (CO₂ 浓度为 50%)、石英—H₂O—CO₂ (CO₂ 浓度为 90%) 二面角分别为 57°、70° 和 95°; 而橄榄石—纯水、橄榄石—H₂O—CO₂ (CO₂ 浓度为 50%)、橄榄石—H₂O—CO₂ (CO₂ 浓度为 90%) 的二面角分别为 65°、75° 和 90° 以上。

• 石英—盐溶液体系实验表明,随流体中盐类 (NaCl 或 KCl、CaF₂、Na₂CO₃) 浓度增加,二面角明显下降。如 1 GPa、1 000℃ 条件下,石英—纯水、石英—NaCl 水溶液(浓度约为 12%) 和石英—NaCl 水溶液(浓度约为 37%) 的二面角分别为 57°、48°、40° 左右。

• 相同的温度压力下,橄榄石—H₂O 体系中分别加入 NaCl、KCl、CaF₂ 和 Na₂CO₃ 溶液,其二面角值测量结果与橄榄石—纯水的二面角(65°左右)没有明显差别。

(5) 实验表明,温度不变的条件下,石英—流体(纯水、H₂O—CO₂、H₂O—NaCl) 体系中,二面角随压力增加作以下变化:压力升高至某一临界值之前,二面角基本不变或略有增加;压力超过其临界值后,随压力升高,二面角逐渐减小。不同温度的压力临界值不同,恒定温度高的,临界压力也高。对于石英—H₂O 和石英—H₂O—CO₂ 体系来说,恒定温度分别为 600℃、800℃ 和 1 000℃ 时,临界压力分别为 0.35~0.4 GPa、0.6~0.64 GPa 和 0.78~0.9 GPa^[17,18]。

(6) 压力不变(0.4 GPa) 条件下,石英—流体体系二面角随温度的变化规律是:在较低温度(600℃左右以下)和较高温度(1 080℃以上)时,二面角值都较低,且随温度变化大;中等温度范围内(600~1 080℃),二面角值较高,且基本不随温度变化^[18]。

3.4 小 结

根据以上有关的实验研究结果,可对地幔岩石中粒间熔体和流体的存在状况提出以下看法:

(1) 橄榄岩粒间熔体的二面角较小,熔体的连通性较好;而橄榄岩粒间流体的二面角较大,流体的连通性较差。因此,在没有发生部分熔融,岩石中裂隙不发育的情况下,橄榄岩中的粒间流体很难发生迁移,流体有可能长期分散在岩石中而不发生分离。

如果岩石发生部分熔融,流体会很快与熔体结合,形成含水(及 CO₂) 的熔体。根据硅酸盐结构理论^[21],水加入熔体会使熔体聚合度下降,粘度下降,有利于粒间熔体的连通和渗透。如果加入的流体富含 CO₂,会使熔体的聚合度增加,粘度增大,结果使粒间熔体的连通渗透性下降。

(2) 橄榄石具有强烈的各向异性,上地幔橄榄岩中橄榄石的排列方向直接影响着粒间流体和熔体的渗透方向和迁移能力。因此,有必要对来自上地幔的橄榄岩包体中橄榄石的排列方向和其它物性的各向异性特征进行观测,再通过与上地幔地球物理观测资料的比较,就能确定出上地幔岩石中橄榄石的定向排列情况。在提供了以上资料的情况下,才可能对上地幔中橄榄石各向异性对粒间熔体和流体的渗透方向和软流层的成因问题进行讨论。

(3) 与石英岩比较,橄榄岩中含水流体的二面角较大。因此,在以橄榄岩为主的上地幔中,孔隙流体的连通性和渗透性比地壳底部差。含水体在上地幔中的迁移方式应以裂隙中的流动为主。

参考文献 (References):

- [1] Ringwood A E. Mineralogical constitution of the deep mantle[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67:4 005-4 010.
- [2] Green D H, Ringwood A E. The genesis of basalt magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1967, 15:103-190.
- [3] Kushiro I. Partial melting experiments on peridotite and origin of mid-ocean ridge basalt[J]. *Annual Review on Earth and Planet Science*, 2001, 29:71-107.
- [4] Jin Zhenming, Green W H, Zhou Yi. Melt topology in partially molten peridotite during ductile deformation[J]. *Nature*, 1994, 372:164-167.
- [5] Ye Ruilun (叶瑞伦), Fang Yonghan (方永汉), Lu Peiwen (陆佩文). *Physical Chemistry of Inorganic Material* [M]. Beijing: Press of Chinese Architecture Industry, 1986. 103-115 (in Chinese).
- [6] Watson E B, Brenan J M. Fluids in the lithosphere, 1. experimentally-determined wetting characteristics of CO₂-H₂O fluids and their implications for fluid transport, host-rock physical properties, and fluid inclusion formation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 85: 497-515.
- [7] Ikeda S, Toriumi M, Yoshida H, et al. Experimental study of the textural development of igneous rocks in the late stage of crystallization: The importance of interfacial energies under non-equilibrium conditions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 142:397-415.
- [8] Grimal M, John D, Gerald F, et al. A clock look at dihedral angles and melt geometry in olivine-basalt aggregates: A TEM study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 130:336-

- 345.
- [9] Laporte D, Watson E B. Experimental and theoretical constraints on melt distribution in crustal sources: The effect of crystalline anisotropy on melt interconnectivity [J]. *Chemical Geology*, 1995, 124:161-184.
- [10] Holness M B. The effect of feldspar on quartz- H_2O - CO_2 dihedral angles at 4 kbar, with consequences for the behaviour of aqueous fluids in migmatites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, 118(4):356-364.
- [11] Hiraga T, Nishikawa O, Nagase T, et al. Morphology of intergranular pores and wetting angles in pelitic schists studied by transmission electron microscopy [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141: 613-622.
- [12] Harte B, Hunter R H, Kinny P D. Melt geometry, movement and crystallization, in relation to mantle dykes, veins and metasomatism [A]. In: Cox K G, McKenzie D, White R S, eds. *Melting and Melt Movement in the Earth* [C]. London: Oxford Science Publications, 1993. 1-21.
- [13] Waff H S, Faul U H. Effects of crystalline anisotropy on fluid distribution in ultramafic partial melts [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B6): 9 003-9 014.
- [14] Faul U H. Permeability of partially molten upper mantle rocks from experiments and percolation theory [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B5): 10 299-10 311.
- [15] Schafer F N, Foley S F. The effect of crystal orientation on the wetting behaviour of silicate melts on the surfaces of spinel peridotite minerals [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143:245-261.
- [16] Laporte D, Watson E B. Direct observation of near-equilibrium pore geometry in synthetic quartzites at 600-800°C and 2-10.5kbar [J]. *Journal of Geology*, 1991, 99:873-878.
- [17] Holness M B. Equilibrium dihedral angles in the system quartz- CO_2 - H_2O -NaCl at 800°C and 1-15kbar: The effects of pressure and fluid composition on the permeability of quartzites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 114: 171-184.
- [18] Holness M B. Temperature and pressure dependence of quartz-aqueous fluid dihedral angles: The control of adsorbed H_2O on the permeability of quartzites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 117:363-377.
- [19] Hiraga T, Nishikawa O, Nagase T, et al. Morphology of intergranular pores and wetting angles in pelitic schists studied by transmission electron microscopy [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141: 613-622.
- [20] Bagen N V, Waff H S. Permeabilities, interfacial areas and curvatures of partially molten system: Results of numerical computations of equilibrium microstructures [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B9): 9 261-9 276.
- [21] Mo Xuanxue(莫宣学). Structure of magma melt [J]. *Geological Science and Technology Information (地质科技情报)*, 1985, 4(2):21-31 (in Chinese).

THE MORPHOLOGY OF MELT (AND FLUID) IN INTERGRANULAR PORES OF ROCK UNDER HIGH-TEMPERATURE AND HIGH-PRESSURE AND SOME DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THIS BRANCH

HOU Wei, ZHOU Wen-ge, XIE Hong-sen, LIU Yong-gang
(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: The morphology of melt (and fluid) in intergranular pores of rock under high-temperature and high-pressure is one of forward branches in modern petrology. In this branch, the morphological features of melt (and fluid) in intergranular pores of rock, interconnectivity, and the relation between melt (or fluid) and mineral crystals around them under high-temperature and high-pressure are studied. Some observational methods of materials science are used in the study of this branch. The interfacial energy theory of physical chemistry is theoretical basis of this branch. The studies of morphology of melt (and fluid) in intergranular pores of mantle rock under high-temperature and high-pressure are very important for partial melting of mantle, asthenosphere, and metasomatism of mantle. In this paper, the theoretical basis, experimental method, and some results of this branch are reviewed.

Key words: High-temperature and high-pressure; Rock; Melt; Fluid; Dihedral angle.