

文章编号:1672-6561(2016)03-0341-14

# 粗面玄武岩熔融-结晶过程中角闪石-熔体二面角： 温度和压力的影响

赵东宇<sup>1,2</sup>, 张波<sup>1,2</sup>, 胡贤旭<sup>1,2</sup>, 范大伟<sup>1</sup>, 周文戈<sup>1</sup>, 谢鸿森<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 地球内部物质高温高压院重点实验室, 贵州 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**矿物-熔体二面角是了解岩浆岩结构演化和岩浆动力学的重要参数。为了研究温度和压力对矿物-熔体二面角的影响,以粗面玄武岩为初始样品,在压力为 0.6~2.6 GPa,温度为 800 °C~900 °C,恒温 100 h 的条件下分别对初始样品进行了温度和压力两个系列的熔融-结晶试验。温度系列试验(3 组)条件为:恒定压力为 0.6 GPa,首先在温度为 1 350 °C 的条件下恒温 1 h,使粗面玄武岩完全熔融,然后改变温度使粗面玄武岩熔体分别在温度为 800 °C、850 °C 和 900 °C 以及恒温 100 h 的条件下结晶。压力系列试验(4 组)条件为:分别在压力和温度为 0.6 GPa、1 350 °C, 1.1 GPa、1 375 °C, 1.6 GPa、1 400 °C, 2.1 GPa、1 425 °C 和 2.6 GPa、1 450 °C 条件下恒温 1 h,使粗面玄武岩完全熔融,然后降温至 900 °C,恒温 100 h 使粗面玄武岩熔体结晶。在上述试验条件下,粗面玄武岩熔体主要结晶相为角闪石。采用在二维任意切面测定二面角的方法得到试验产物中的角闪石-熔体二面角。将试验获得的角闪石-熔体视二面角的累积频率与理论频率累积曲线进行对比,并讨论了温度和压力对二面角的影响。角闪石-熔体视二面角中值随着温度的升高而增加。这主要是由于在高温条件下,角闪石的成核密度小,生长速度快,有利于角闪石晶体的生长粗化,大的颗粒相互接触拼接形成高角度二面角,而在低温条件下,角闪石的成核密度大,生长速度慢,不利于角闪石晶体的粗化,角闪石的矿物颗粒较小且近平行排列,从而形成低角度二面角。另外,角闪石-熔体视二面角中值随着压力的升高先升高再降低,最后升高;这可能是熔体和矿物之间显著的力学性质差异造成的。试验结果证明,在岩浆结晶作用早期,随着矿物由孤立状态向拼接结构发展,矿物-熔体二面角逐渐增大。同时,将本次试验结果与前人关于岩浆结晶晚期矿物(或矿物-熔体)二面角的演化规律相结合,可以描绘出整个岩浆结晶过程中矿物-熔体二面角的变化规律。

**关键词:**二面角;熔融-结晶;粗面玄武岩;高温高压;界面能;拼接结构;结构平衡;岩浆结构演化  
**中图分类号:**P589.1;P586 **文献标志码:**A

## Amphibole-melt Dihedral Angle in the Process of Melt-crystallization of Trachybasalt: Effects of Temperature and Pressure

ZHAO Dong-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, HU Xian-xu<sup>1,2</sup>, FAN Da-wei<sup>1</sup>, ZHOU Wen-ge<sup>1</sup>, XIE Hong-sen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for High Temperature and High Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The mineral-melt dihedral angle is a very important parameter to further understand the

收稿日期:2016-01-29

基金项目:国家自然科学基金项目(41274105,41374107);中国科学院地球化学研究所青年创新科技人才培养计划项目(2013,范大伟);中国科学院 B 类战略性先导科技专项项目(XDB18010401)

作者简介:赵东宇(1990-),男,黑龙江绥化人,中国科学院大学理学硕士研究生,E-mail:zhaodongyu@mail.gyig.ac.cn.

通讯作者:周文戈(1967-),男,湖南永州人,研究员,博士研究生导师,理学博士,E-mail:zhouwenge@vip.gyig.ac.cn.

crystallization kinetics and the textural evolution of magma. Using trachybasalt as the starting material, two series of melt-crystallization experiments (temperature series and pressure series) were conducted at the pressures of 0.6–2.6 GPa, the temperatures of 800 °C–900 °C and the annealing time of 100 h, to investigate the influence of temperature and pressure on the mineral-melt dihedral angle. In the temperature series (3 groups), trachybasalt were fused at the temperature of 1350 °C, the pressure of 0.6 GPa and the annealing time of 1 h, to obtain homogeneous melts; then, the melting temperatures dropped to the crystallization temperatures of 800 °C, 850 °C and 900 °C, and annealed for 100 h. In the pressure series (4 groups), the trachybasalt were fused at the temperatures and pressures of 1350 °C and 0.6 GPa, 1375 °C and 1.1 GPa, 1400 °C and 1.6 GPa, 1425 °C and 2.1 GPa, and 1450 °C and 2.6 GPa, respectively; the samples were kept under such conditions for 1 h to ensure completely melting and proper homogeneity, and then the temperatures dropped to the crystallization temperature of 900 °C and annealed for 100 h. Amphibole was the main crystal phase in the process of trachybasalt crystallization under the above experimental conditions. The amphibole-melt dihedral angles from the experimental products were obtained by measuring the dihedral angles in the two-dimensional random sections. The effects of temperature and pressure on the dihedral angle were discussed by comparing the observed cumulative frequency of the amphibole-melt dihedral angles in the run products with the theoretical cumulative frequency curve. The median of apparent dihedral angles in amphibole-melt increases with the increase of temperature. The nucleation density of amphibole is small while the growth rate is fast at high temperature; thus, the higher temperature is beneficial to the growth and coarsening of amphibole, so that the grains impinge and form the high dihedral angle. Conversely, the nucleation density of amphibole is large while the growth rate is slow at low temperature; therefore, the low temperature impedes the growth and coarsening of amphibole, and results in the parallel grains with the small dihedral angle. Moreover, the median of amphibole-melt apparent dihedral angles increases initially, then reduces and finally increases again with the growing pressure, the possible reason is the prominent difference in mechanical properties between the melt and minerals. It is proved that the mineral-melt dihedral angle gradually increases with the development of mineral from isolation to impingement texture in the early stage of magma crystallization. Furthermore, combined the result of this study with the previous work about the evolution of mineral (or mineral-melt) dihedral angle in the late stage of magma crystallization, the evolution trend for the mineral-melt dihedral angle in the whole process of magma crystallization can be inferred.

**Key words:** dihedral angle; melt-crystallization; trachybasalt; high pressure and high temperature; interface energy; impingement texture; textural equilibrium; textural evolution of magma

## 0 引言

矿物二面角是指当3个矿物共棱接触时相邻两个矿物接触面之间所夹的二面角,而矿物-熔体二面角是指两个矿物与熔体共棱接触时相邻的固液界面间的二面角<sup>[1]</sup>。由矿物(或矿物-熔体)二面角的定义可知,在三维空间内可以测量矿物(或矿物-熔体)二面角的真值(称为“二面角真值”),是严格意义上的矿物(或矿物-熔体)二面角。而在随机二维切面内测量矿物(或矿物-熔体)二面角并不一定是严格意义上的矿物(或矿物-熔体)二面角,常称之为视二

面角(图1)。

矿物(或矿物-熔体)二面角是了解岩浆结构演化的重要参数,是岩石定量化结构分析的重要手段之一<sup>[2]</sup>。在岩石的显微结构中,矿物(或矿物-熔体)二面角与矿物的形态、颗粒大小、空间分布状态以及矿物的优选方位一样,携带了大量地质信息,而且矿物(或矿物-熔体)二面角对于显微结构的变化非常敏感,但是在研究中往往被忽略<sup>[2]</sup>。矿物-熔体二面角的研究不仅可以了解熔体(流体)在矿物颗粒间的分布、形态、连通性等特征<sup>[3-5]</sup>,同时还可以对火成岩成因、岩浆结晶演化热历史、地球圈层的形成与演化

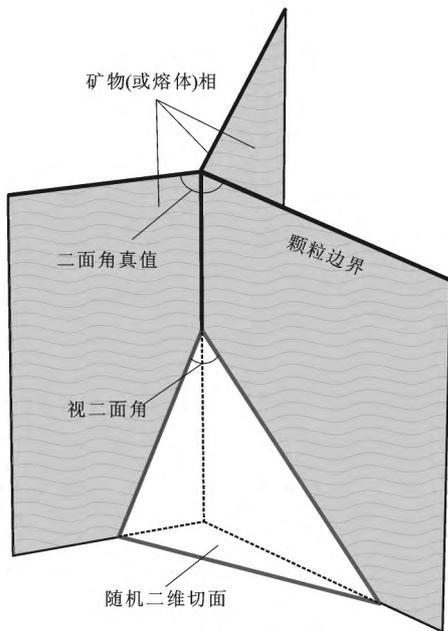


图 1 矿物(或矿物-熔体)二面角

Fig. 1 Sketch Map of Dihedral Angle Between Minerals (or Mineral-melt)

等重大问题给予合理的解释<sup>[6-9]</sup>。

目前,矿物(或矿物-熔体)二面角的研究主要集中在对天然火成岩和变质岩的研究。例如,在火成岩矿物(或矿物-熔体)二面角的研究中,Holness 等开展了大量而深入的工作<sup>[2,6,10-13]</sup>,主要通过大量测定天然火成岩(火山岩和堆晶岩)的矿物(或矿物-熔体)二面角真值,并采用概率统计方法分析测量数据,获得二面角中值和标准差值,据此来判断火山岩中不同矿物的各向异性程度<sup>[10]</sup>,推断岩浆在结晶过程中的结构演化<sup>[6]</sup>以及岩浆侵位的深度<sup>[11-13]</sup>。

与天然岩石中矿物(或矿物-熔体)二面角的研究相比,利用高温高压试验手段进行矿物(或矿物-熔体)二面角的研究也主要集中于熔体在粒间的拓扑形态以及连通性、渗透性等问题<sup>[4,7]</sup>,但探讨温压条件对矿物二面角影响的研究还较少,同时以往的研究也主要集中于部分熔融过程中温压条件对矿物-熔体二面角的影响,如 Holness 等研究石英-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl 体系中矿物-流体二面角时得到了其矿物-熔体视二面角随着温度的升高而降低,随着压力的升高先升高再降低的结论<sup>[14-16]</sup>;Ikeda 等在进行透辉石-钙长石体系和透辉石-钙长石-镁橄榄石体系的部分熔融试验时,发现矿物-熔体视二面角随着温度的升高而降低<sup>[17]</sup>;郑小刚等在温度为 850~1 100 °C,压力为 2.0~4.0 GPa 的条件下进行了斜长角闪岩脱水部分熔融试验,初步探讨了温度和压

力对矿物-熔体二面角的影响,其中矿物-熔体视二面角随着温度的升高而降低,随着压力的升高先升高后降低,最后略有升高<sup>[18]</sup>。但还未有研究探讨在结晶过程中温压条件对矿物-熔体二面角的影响。另外,Holness 等基于含玻璃质火成岩、火成岩包体以及全结晶的堆晶岩中矿物和矿物-熔体二面角真值的研究,总结了岩浆结晶晚期阶段岩浆结构的演化模式<sup>[6]</sup>。但目前仅有 Ikeda 等依据高温常压部分熔融试验获得的矿物-熔体二面角数据来讨论岩浆结构演化过程中矿物-熔体二面角的演化特征<sup>[17]</sup>。还没有学者研究在高温高压条件下完全熔融的熔体发生结晶作用时其矿物-熔体二面角的演化特征,而且其岩浆结构演化模式还需要试验的进一步验证。基于此,本文在压力为 0.6~2.6 GPa,温度为 800 °C~900 °C,恒温 100 h 的条件下进行了粗面玄武岩熔融-结晶试验;在详细观察试验产物的前提下,利用电子背散射(BSE)成像技术获得了试验产物的背散射显微照片,并对照片进行了二维平面上的视二面角测量和统计分析,重点讨论了矿物结晶温度和压力对矿物-熔体视二面角的影响;利用试验获得的熔融-结晶过程中矿物-熔体视二面角变化趋势来讨论岩浆结晶过程中结构演化特征。

## 1 样品与方法

### 1.1 样品选取

试验样品为豫西伊川—汝阳新生代基性火山岩,具斑状结构和块状构造。其中斑晶主要为发生伊丁石化的橄榄石,还有少量辉石,体积分数约为 10%;基质为粗面玄武岩结构,基质矿物主要为较自形的斜长石、单斜辉石、伊丁石化橄榄石及玻璃质,体积分数约为 85%,另外还有钛铁氧化物及磷灰石等细小晶体,体积分数约为 5%。岩石的化学成分特征显示该岩石为粗面玄武岩(表 1)<sup>[19]</sup>。

### 1.2 试验过程

将岩石样品粉碎,研磨成粒径小于 15 μm 的粉末,放入温度为 200 °C 的马弗炉中焙烧 10 h 以上以除去吸附水,然后装入石墨样品腔。选择导热性较好且在试验温度和压力范围内稳定的石墨作为样品腔和加热器的材料。为了排除外界水的带入对试验造成影响,在石墨加热器以及样品腔外部都加入了氧化铝套管作为隔水层。高温高压试验的样品组装见图 2。试验前组装好的样品均在温度为 200 °C 的马弗炉中焙烧了 10 h 以上以保持干燥。

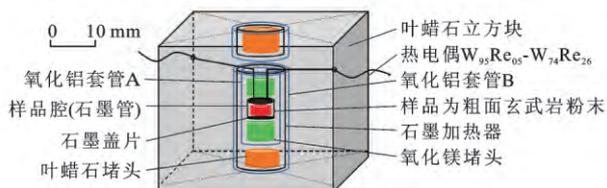
熔融-结晶试验是在中国科学院地球化学研究

表1 粗面玄武岩成分组成

Tab.1 Compositions of Trachybasalt

| 样品编号  | w(SiO <sub>2</sub> )/% | w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/% | w(TiO <sub>2</sub> )/% | w(MgO)/% | w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/% | w(FeO)/% | w(MnO)/% | w(CaO)/% | w(Na <sub>2</sub> O)/% | w(K <sub>2</sub> O)/% | w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )/% | w(CO <sub>2</sub> )/% | w(H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> )/% | w <sub>total</sub> /% |
|-------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|----------|--------------------------------------|----------|----------|----------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 10084 | 47.8                   | 14.13                                | 2.48                   | 6.44     | 7.57                                 | 3.53     | 0.16     | 8.40     | 3.90                   | 1.26                  | 0.90                                | 0.02                  | 3.33                                | 99.92                 |

注:样品的主量元素组成由湖北省地质局分析测试中心采用湿化学法分析;w(·)为元素或化合物质量分数;w<sub>total</sub>为主量元素总质量分数。



氧化铝套管 A 外径为 8.5 mm,内径为 6 mm,高为 16.5 mm;样品腔(石墨管)外径为 6 mm,内径为 4 mm,高为 3 mm;石墨盖片直径为 6 mm,高为 1 mm;叶蜡石堵头直径为 8.5 mm,高为 8.25 mm;叶蜡石立方块高为 32.5 mm;氧化铝套管 B 外径为 12 mm,内径为 10.5 mm,高为 33 mm;石墨加热器外径为 10.5 mm,内径为 8.5 mm,高为 33 mm;氧化镁堵头外径为 6 mm,内径为 2.7 mm,高为 5.75 mm

图2 样品组装

Fig.2 Schematic Diagram Showing the Assembled Sample

所地球内部物质高温高压院重点实验室的 JL-3600t 六面顶压力机上完成的。该压力机的样品腔压力采用金属熔融曲线进行标定<sup>[20-21]</sup>。样品腔的温度采用 W<sub>95</sub>Re<sub>05</sub>-W<sub>74</sub>Re<sub>26</sub> 热电偶测量,恒温过程中温度波动小于±5℃,压力波动小于±0.05 GPa。该试验主要包含温度和压力 2 个系列共 7 组试验。

(1)温度系列试验(3组):恒定压力 0.6 GPa,将温度升高至 1 350℃,使粗面玄武岩完全熔融,稳定 1 h,然后分别降温至 800℃、850℃、900℃使熔体结晶,3 组样品都恒定 100 h 后切断电源使样品淬火。

(2)压力系列试验(4组):分别在压力为 0.6、1.1、1.6、2.1、2.6 GPa 条件下将温度升高至 1 350℃~1 450℃区间,使粗面玄武岩完全熔融,稳定 1 h,然后降温至 900℃使熔体结晶,4 组样品稳定 100 h 后切断电源使样品淬火。

获得的试验产物在中国科学院地球化学研究所 EPMA-1600 电子探针上进行电子背散射成像,矿物和熔体的主量元素测试在中国科学院地质与地球物理研究所 JXA-8100 电子探针上完成。

1.3 二面角测量与误差评估

利用高温高压试验手段获得的产物中,矿物粒度较小,常常在显微镜下难以利用费氏台直接进行二面角真值的测定,因此,利用显微照片进行视二面角测定是比较通用的方法<sup>[9,17,22]</sup>。本次试验产物中

主要结晶相角闪石颗粒较小,最大颗粒小于 500 μm [图 3(g)],在显微镜上安装费氏台测量二面角真值非常困难,即使使用也会带来较大误差,因此,角闪石-熔体二面角是在二维平面上测量背散射显微照片中的视二面角。通过大量测量背散射显微照片中的角闪石-熔体视二面角来统计分析其中值、标准差、标准误差、分布直方图以及频率累积曲线。

已有的研究证实,统计大量样本得到的视二面角中值与二面角真值几乎相等,其差别不大于 5°<sup>[2,23-25]</sup>。为了进一步证明这一经验结果,笔者测量了大别山地区变质石英岩显微照片中 161 组石英颗粒视二面角。统计得到石英视二面角中值为(123°±2°),与 Vernon 获得的变质石英岩的石英颗粒二面角中值(120°)<sup>[26]</sup>在误差范围内非常相近,因此,再次证明了视二面角的中值测量能够反映二面角真值结果。

另外,为了评估背散射显微照片中矿物-熔体视二面角测量的误差,分别对 7 组试验产物的背散射显微照片中的某个角闪石-熔体视二面角进行了超过 63 次的重复测量(表 2),重复测量的标准差小于 3.6°。Jurewicz 等研究认为,由于颗粒边界的识别以及图片的放大失真均会在视二面角测量过程中带入人为误差,所以可以用重复测量的标准差来评估,如果重复测量的标准差小于 5°,则其测量结果可以接受<sup>[25-29]</sup>。因此,本次研究采用大样本测量方法,同时通过统计分析视二面角的中值、标准差、标准误差

表2 对某一个视二面角测量及统计结果

Tab.2 Measuring and Statistical Results of One of the Apparent Dihedral Angles

| 试验编号 | 温度/℃ | 压力/GPa | 统计量 | 中值     | 标准差  | 范围            |
|------|------|--------|-----|--------|------|---------------|
| Run1 | 800  | 0.6    | 63  | 26.6°  | 3.6° | 20.5°~41.6°   |
| Run2 | 850  | 0.6    | 64  | 90.0°  | 2.4° | 85.2°~94.4°   |
| Run3 | 900  | 0.6    | 63  | 93.8°  | 1.5° | 100.5°~89.0°  |
| Run4 | 900  | 1.1    | 65  | 47.0°  | 2.8° | 42.5°~54.3°   |
| Run5 | 900  | 1.6    | 66  | 122.0° | 1.7° | 118.6°~127.1° |
| Run6 | 900  | 2.1    | 66  | 52.0°  | 1.5° | 51.0°~55.8°   |
| Run7 | 900  | 2.6    | 63  | 41.5°  | 2.2° | 37.9°~47.4°   |

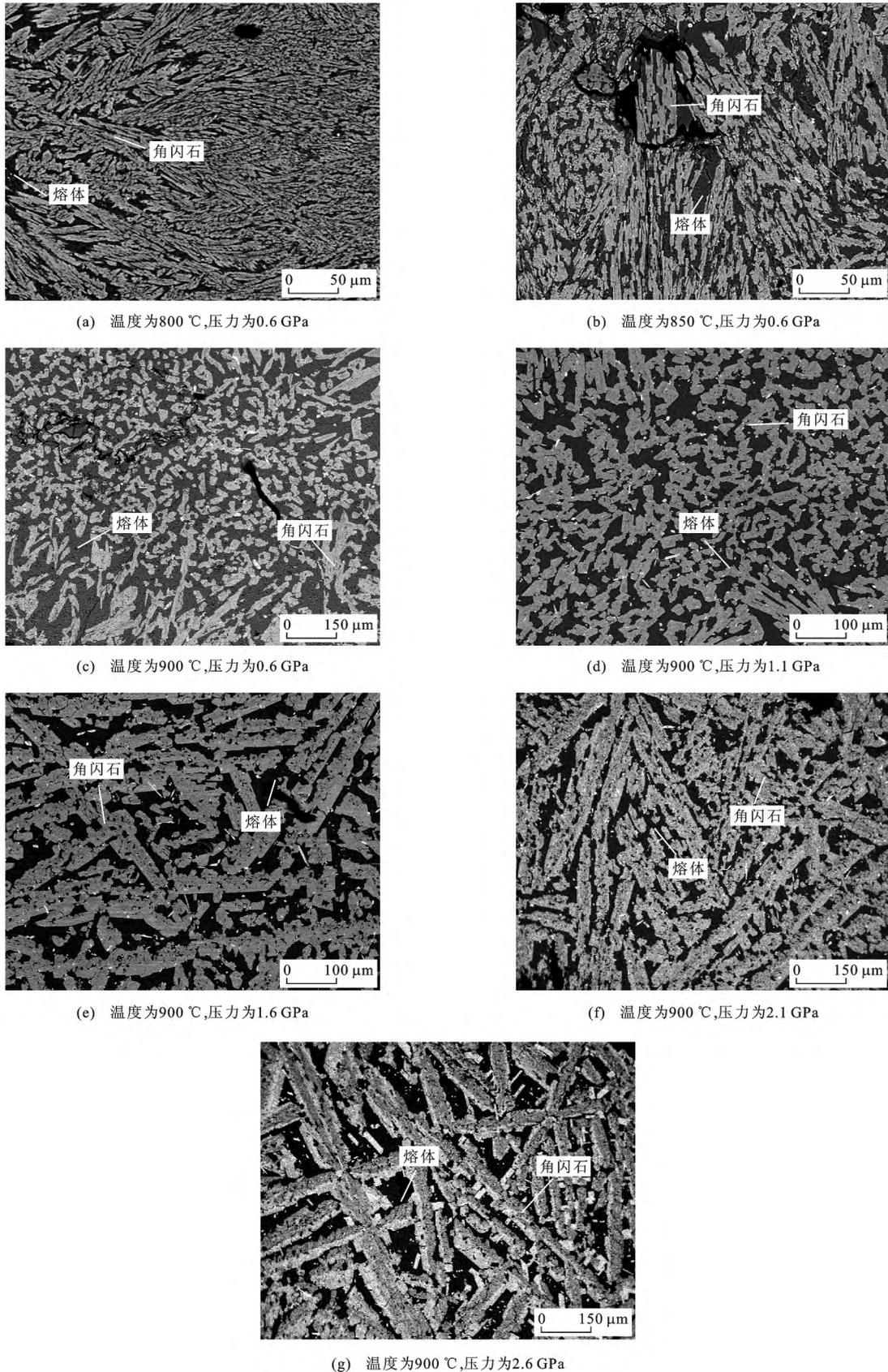


图 3 在恒温 100 h 的条件下粗面玄武岩熔融-结晶过程试验产物的背散射显微照片  
 Fig. 3 BSE Photographs of Experimental Products in the Process of Melt-crystallization of Trachybasalt at the Annealing Time of 100 h

以及频率累积曲线来讨论有关问题是可行的,所获得的结论是可靠的。

## 2 结果分析

### 2.1 试验产物组成

根据偏光显微照片以及背散射显微照片的观察,结合电子探针主量元素分析,试验产物的结晶相

主要为角闪石(表3、图3)以及少量的磷灰石、辉石和尖晶石。其中角闪石结晶程度较高,多为半自形—自形结构。温度系列的试验产物中除角闪石外,还含有少量磷灰石,而压力系列的试验产物中不仅含有少量磷灰石,还含有辉石及尖晶石等氧化物矿物(因为粒度太小而无法准确分析其成分)。试验产物中熔体为花岗闪长质熔体(表3)。

表3 角闪石和熔体的主量元素分析结果

Tab. 3 Analysis Results of Major Elements of Amphibole and Melt

| 试验编号 | 组成相 | w(SiO <sub>2</sub> )/% | w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/% | w(TiO <sub>2</sub> )/% | w(TiO <sub>2</sub> )/% | w(MgO)/% | w(NiO)/% | w(FeO)/% | w(MnO)/% | w(CaO)/% | w(Na <sub>2</sub> O)/% | w(K <sub>2</sub> O)/% | w <sub>total</sub> /% |
|------|-----|------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Run1 | 角闪石 | 42.64                  | 12.67                                | 2.96                   | 0.09                   | 11.44    | 0.03     | 12.74    | 0.20     | 9.49     | 2.74                   | 0.86                  | 95.84                 |
|      | 熔体  | 57.28                  | 23.49                                | 0.07                   | 0.10                   | 0.01     | 0.02     | 0.46     | 0.01     | 9.00     | 6.82                   | 0.88                  | 98.14                 |
| Run2 | 角闪石 | 44.10                  | 14.97                                | 2.92                   | 0.02                   | 9.13     | 0.03     | 11.74    | 0.16     | 9.38     | 2.64                   | 1.14                  | 96.23                 |
|      | 熔体  | 62.33                  | 19.43                                | 0.45                   | 0.01                   | 0.49     | 0.00     | 3.10     | 0.10     | 2.70     | 0.85                   | 0.98                  | 90.44                 |
| Run3 | 角闪石 | 36.55                  | 13.49                                | 5.18                   | 0.12                   | 10.67    | 0.05     | 14.28    | 0.19     | 10.35    | 2.82                   | 0.72                  | 94.42                 |
|      | 熔体  | 58.95                  | 18.48                                | 0.78                   | 0.04                   | 1.21     | 0.03     | 6.85     | 0.09     | 3.96     | 0.80                   | 1.00                  | 92.18                 |
| Run4 | 角闪石 | 39.55                  | 15.16                                | 3.61                   | 0.04                   | 9.78     | 0.01     | 13.70    | 0.19     | 10.77    | 2.68                   | 1.74                  | 97.22                 |
|      | 熔体  | 58.19                  | 19.04                                | 0.87                   | 0.01                   | 1.05     | 0.01     | 5.54     | 0.15     | 2.96     | 1.21                   | 2.25                  | 91.27                 |
| Run5 | 角闪石 | 38.74                  | 16.52                                | 3.79                   | 0.09                   | 7.70     | 0.01     | 15.38    | 0.17     | 10.15    | 2.97                   | 1.34                  | 96.86                 |
|      | 熔体  | 61.70                  | 18.06                                | 0.72                   | 0.02                   | 0.57     | 0.03     | 3.49     | 0.06     | 2.03     | 0.74                   | 1.38                  | 88.79                 |
| Run6 | 角闪石 | 40.93                  | 16.03                                | 2.77                   | 0.10                   | 10.30    | 0.02     | 11.90    | 0.15     | 9.79     | 2.99                   | 1.85                  | 96.83                 |
|      | 熔体  | 55.29                  | 18.28                                | 0.77                   | 0.02                   | 0.67     | 0.02     | 3.16     | 0.07     | 2.38     | 4.26                   | 4.07                  | 88.98                 |
| Run7 | 角闪石 | 38.85                  | 16.37                                | 3.30                   | 0.08                   | 8.55     | 0.00     | 13.70    | 0.13     | 9.08     | 3.02                   | 2.25                  | 95.34                 |
|      | 熔体  | 59.99                  | 19.06                                | 0.80                   | 0.02                   | 0.38     | 0.04     | 3.01     | 0.06     | 1.87     | 1.02                   | 1.74                  | 87.99                 |

注:主量元素组成测试在中国科学院地质与地球物理研究所 JXA-8100 电子探针上完成;加速电压为 15 kV,电流为 20 nA,寻峰计数时间为 10 s,矿物和熔体的束斑直径分别为 1~5 μm 和 10 μm。

### 2.2 二面角测量结果

试验产物主要由角闪石和熔体组成,因此,本次研究主要测定了角闪石-熔体视二面角,即两颗角闪石颗粒晶面所夹熔体的二面角。每个样品的视二面角测量个数均在 66~201 之间(表4)。对测量结果进行数理统计分析的结果表明:在压力等于 0.6 GPa,温度分别为 800 °C、850 °C 和 900 °C,恒温 100 h 的条件下,温度系列试验(3组)样品角闪石-熔体视二面角的分布范围分别为 4.7°~175.0°、12.3°~130.8°和 15.9°~134.2°,角闪石-熔体视二面角中值分别为 35.4°、53.1°和 63.5°;在温度等于 900 °C,压力分别为 0.6、1.1、1.6、2.1、2.6 GPa,恒温 100 h 的条件下,压力系列试验(4组)样品角闪石-熔体视二面角的分布范围分别为 12.8°~125.5°、11.9°~131.3°、14.2°~134.8°和 7.3°~142.9°,角闪石-熔体视二面角的中值分别为 63.5°、65.6°、61.7°、51.9°和 71.1°(表4、图4)。

表4 角闪石-熔体视二面角测量与统计结果

Tab. 4 Measuring and Statistical Results of Amphibole-melt Apparent Dihedral Angles

| 试验编号 | 统计量 | 中值    | 平均值   | 标准差   | 标准误差 | 范围           |
|------|-----|-------|-------|-------|------|--------------|
| Run1 | 174 | 35.4° | 41.2° | 24.0° | 1.8° | 4.7°~175.0°  |
| Run2 | 156 | 53.1° | 57.0° | 25.9° | 2.1° | 12.3°~130.8° |
| Run3 | 177 | 63.5° | 67.8° | 26.1° | 2.0° | 15.9°~134.2° |
| Run4 | 201 | 65.6° | 65.6° | 25.0° | 1.8° | 12.8°~125.5° |
| Run5 | 103 | 61.7° | 65.5° | 27.6° | 2.7° | 11.9°~131.3° |
| Run6 | 66  | 51.9° | 57.2° | 24.6° | 3.1° | 14.2°~134.8° |
| Run7 | 84  | 71.1° | 69.3° | 29.5° | 3.2° | 7.3°~142.9°  |

## 3 讨论

### 3.1 数据对比

#### 3.1.1 与理论模型的对比

图4、5表示了压力为 0.6~2.6 GPa,温度为

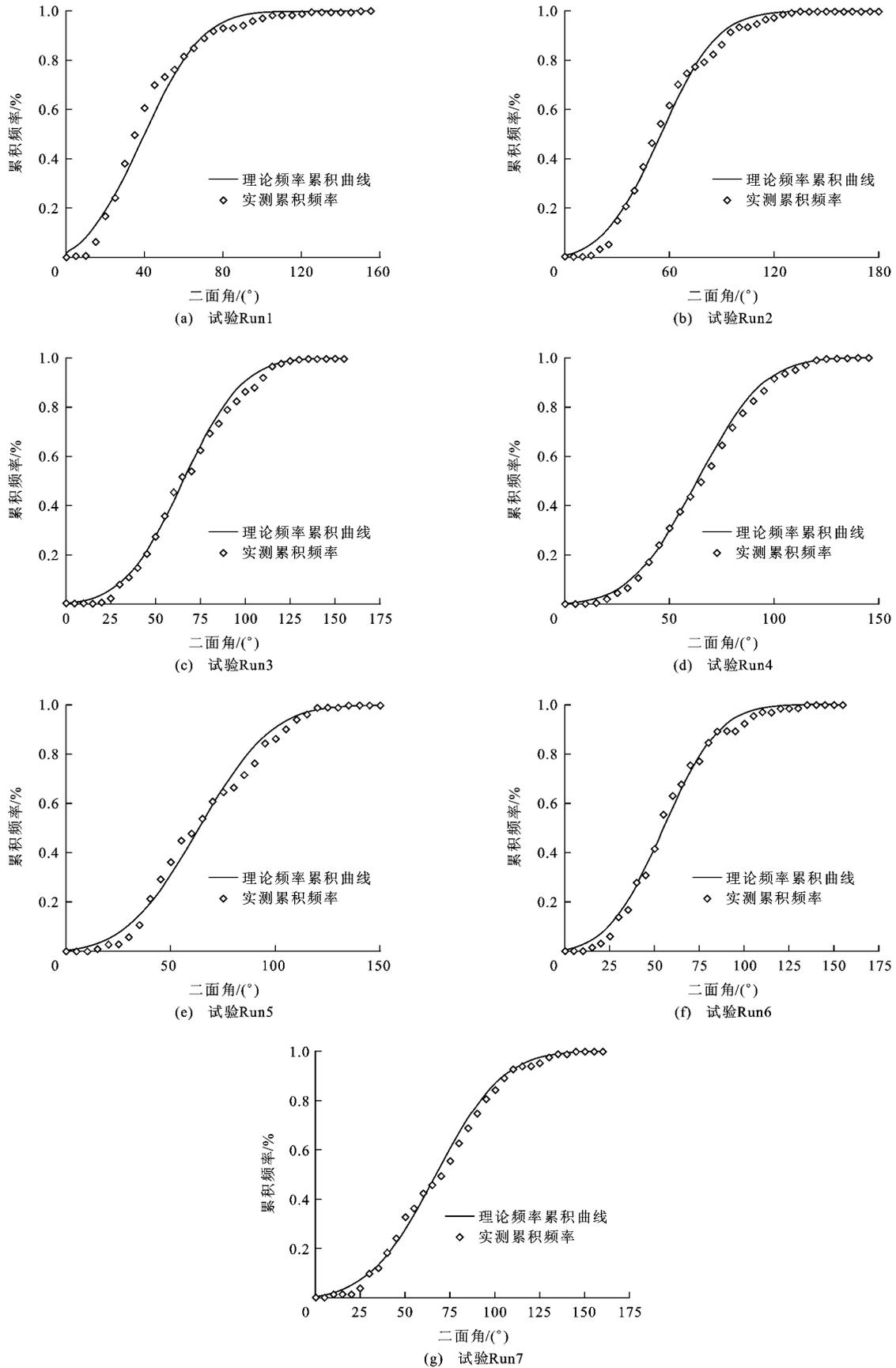


图 4 角闪石-熔体视二面角的累积频率和理论频率累积曲线

Fig. 4 Cumulative Frequency and Theoretical Frequency Cumulative Curves of Amphibole-melt Dihedral Angles

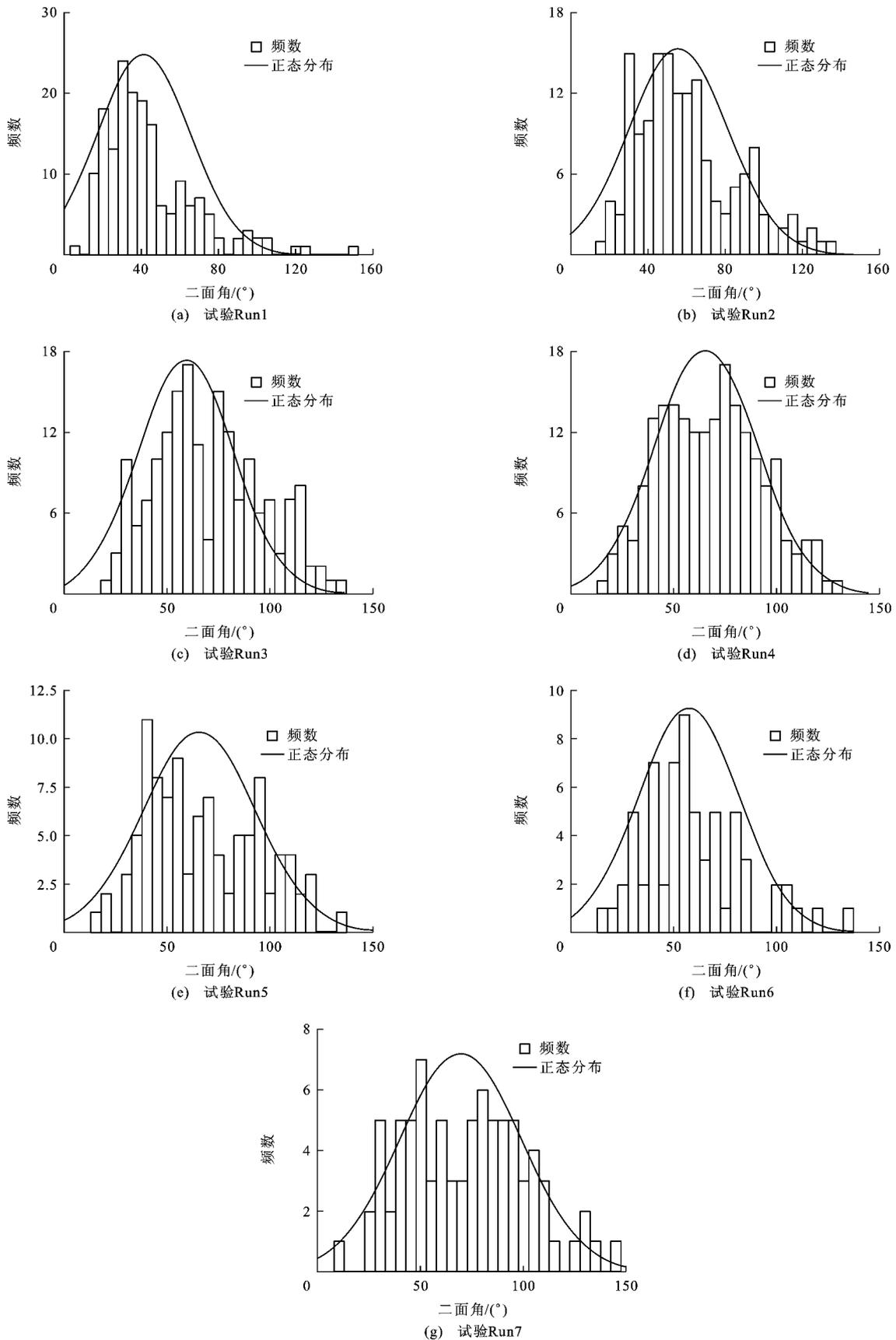


图5 角闪石-熔体视二面角的分布直方图

Fig. 5 Distribution Histogram of Amphibole-melt Apparent Dihedral Angles

800 °C~900 °C,恒温 100 h 的条件下粗面玄武岩熔融-结晶过程中角闪石-熔体视二面角的中值、标准差、统计量、频率累积曲线和分布直方图。Riegger 等认为在理想条件下,即在单一矿物相组成且矿物不具有各向异性条件下,当结构完全达到平衡时(颗粒大小相同,接触界面为具有相同曲率的曲面),矿物-熔体二面角符合正态分布<sup>[23-25,30]</sup>。因此,将实际测量获得的角闪石-熔体视二面角累积频率与理论频率累积曲线进行对比,可以判定岩石结构是否完全达到平衡。为此,在图 4 中还绘制了理论频率累积曲线,其中理论频率累积曲线是按照 Riegger 等的方法<sup>[23]</sup>绘出的。比较试验产物中角闪石-熔体视二面角累积频率与理论频率累积曲线以及试验产物的角闪石-熔体视二面角分布直方图和正态分布曲线,可以发现所有试验产物中的角闪石-熔体视二面角缺乏低角度和高角度的二面角(图 4),同时视二面角的分布直方图比正态分布曲线钝且具有宽阔的峰分布(图 5),表明试验产物中的角闪石-熔体视二面角的累积频率与理论频率累积曲线并未完全吻合,说明试验产物中角闪石-熔体的结构平衡并没有完全达到。这一结果与文献<sup>[14]~[17]、[22]、[31]</sup>的结果一致,说明短时间尺度的试验过程中平衡结构并未完全到达。另外,Holness 等在研究天然火成岩和堆晶岩的矿物-熔体(或矿物-矿物)二面角真值时,发现实际测量获得的矿物-熔体(或矿物-矿物)二面角真值的频率分布也偏离了正态分布<sup>[6]</sup>。由此说明要完全达到岩石结构的平衡需要一个漫长的时间过程,天然岩石可能无限接近平衡结构,但是真正意义上的平衡很难到达<sup>[2,6,32]</sup>。尽管如此,仔细观察 0.6 GPa 压力下温度系列试验(3 组)产物的角闪石-熔体视二面角累积频率[图 4(a)~(c)],可以发现随着温度的增加角闪石-熔体视二面角累积频率与正态分布的频率累积曲线吻合度增加,说明在其他条件相近的情况下,角闪石的结晶温度越高,角闪石-熔体结构可能越接近平衡。

### 3.1.2 与前人数据的对比

由于角闪石结晶的温压条件不同,本次试验获得的角闪石-熔体视二面角中值变化范围较大,其中温度系列试验(3 组)产物的角闪石-熔体视二面角中值变化范围为 35.4°~63.5°,压力系列试验(4 组)产物的二面角中值变化范围为 51.9°~71.1°,总的变化范围为 35.4°~71.1°。Laporte 等在压力为 1.2 GPa,温度为 975 °C,恒温 182 h 的条件下研究了角闪石-含水花岗闪长质玻璃部分熔融过程中

的角闪石-含水花岗闪长质熔体的视二面角<sup>[7]</sup>。其测量结果显示角闪石-含水花岗闪长质熔体的视二面角中值为 25°,明显小于本次试验获得的角闪石-熔体视二面角中值。首先,本次试验以粗面玄武岩为初始样品进行了熔融-结晶试验,新生矿物相角闪石从熔体中结晶得到,因此,此过程矿物二面角的大小主要受矿物生长动力学与矿物-熔体界面能的控制;而 Laporte 等以角闪石-含水花岗闪长质玻璃为初始样品进行了部分熔融试验,原始矿物相的消失以及新生矿物相的出现则主要受矿物-熔体反应动力学与矿物-熔体界面能的共同控制<sup>[7]</sup>。其次,与前人试验的温压条件差异也可能造成前人获得的矿物-熔体二面角小于本次试验值(详见第 3.2.1 节)。另外,Lupulescu 等在压力为 1.0 GPa,温度为 800 °C,恒温 48~240 h 的条件下研究了角闪石-熔体视二面角,发现熔体成分对视二面角有比较明显的影响<sup>[28]</sup>。角闪石-花岗质熔体视面角的中值为 53°~58°,而角闪石-英云闪长质熔体视面角的中值为 46°~48°。尽管 Lupulescu 等获得的角闪石-熔体视面角的中值变化范围相对较小<sup>[28]</sup>,但仍然在本次试验获得的角闪石-熔体视二面角的中值变化范围内(35.4°~71.1°)。

Holness 等测量了天然火山岩包体中的角闪石-玻璃质二面角真值<sup>[6,10]</sup>,其中值的变化范围较宽(28°~63°),标准差的变化范围也比较大(14°~25°)。其二面角真值中值的变化范围在本次试验二面角中值的变化范围内(35.4°~71.1°),但变化范围相对较窄;而其标准差小于本次试验获得的角闪石-熔体视二面角标准差(24.0°~29.5°)。角闪石的各向异性可能为角闪石-熔体二面角中值变化范围较宽及标准差较大的主要原因之一<sup>[2,6,10]</sup>。由于角闪石具有很强的各向异性性质,所以不同角闪石晶面具有不同的界面能。当不同角闪石晶面相互接触时,就形成不同的二面角;在角闪石-熔体体系中,矿物-熔体二面角不具有唯一值,而是多个角闪石-熔体二面角构成的范围。具体表现为二面角的频率直方图分布较宽并且出现多峰分布的特征<sup>[16,25]</sup>。本次试验结果也显示出类似特征(图 5)。另外,尽管角闪石-熔体任意切面上的视二面角中值与二面角真值非常接近,但是视二面角是在角闪石-熔体任意切面上测量的,其数值的离散程度比二面角真值离散程度要大,这可能导致本次试验所获得的角闪石-熔体视二面角中值的变化范围更大,标准差整体偏高。

### 3.2 温度和压力对矿物-熔体二面角的影响

矿物和熔体本身的性质是矿物-熔体二面角大小的决定因素<sup>[14-16]</sup>。温度与压力通过改变矿物和熔体的物理化学性质(矿物-熔体界面能与化学势等),从而影响着矿物形态及结晶程度以达到影响矿物-熔体二面角的效果。

#### 3.2.1 温度的影响

图6表示在压力为0.6 GPa,恒温100 h的条件下获得的角闪石温度与角闪石-熔体视二面角中值的关系。由图6可以看出:随着角闪石温度的升高,角闪石-熔体视二面角中值有较明显的增加;当角闪石温度依次从800 °C升高到850 °C和900 °C,角闪石-熔体视二面角中值依次从35.4°升高到53.1°和63.5°。二面角的标准差也随温度的升高而逐渐升高,由800 °C的24.0°升高到900 °C的26.1°。

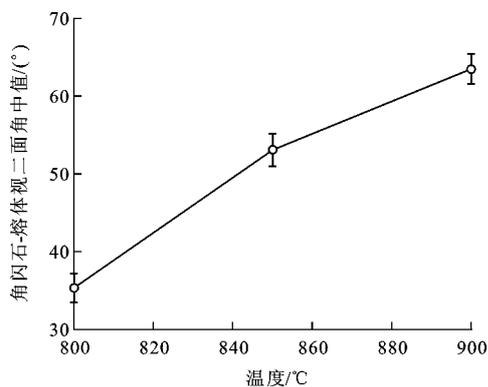


图6 在压力为0.6 GPa,恒温100 h的条件下结晶温度与角闪石-熔体视二面角中值的关系

Fig. 6 Relationship Between Median of Amphibole-melt Apparent Dihedral Angle and Crystallization Temperature at the Pressure of 0.6 GPa and the Annealing Time of 100 h

本次熔体结晶试验获得的角闪石-熔体视二面角中值随温度升高而升高的变化趋势与部分熔融过程中<sup>[4,17-18]</sup>矿物-熔体视二面角的中值随温度的变化趋势不一致。例如,Laporte在压力为0.65~1.00 GPa,温度为800 °C~900 °C,恒温时间超过100 h的水饱和条件下测量了石英-钙长石体系和花岗岩体系部分熔融过程中矿物-熔体视二面角<sup>[4]</sup>。试验结果显示随温度的升高矿物-熔体视二面角逐渐降低。在花岗岩体系中,当压力为1.0 GPa时,石英-熔体视二面角由温度为800 °C时的18°降低到900 °C时的12°;而在石英-钙长石体系部分熔融试验中,当恒定压力为0.65 GPa,温度从850 °C升高至900 °C时,矿物-熔体视二面角从18°降低至15°。Ikeda等的部分熔融试验中也观察到了矿物-熔体视

二面角随温度的升高而逐渐降低的趋势<sup>[17-18]</sup>。Ikeda等在温度为1280 °C~1350 °C,恒温5~48 h的条件下进行透辉石-钙长石体系部分熔融试验,发现随着温度的升高矿物-熔体的视二面角从53°降低至36°<sup>[17]</sup>;郑小刚等在恒定压力为2.0 GPa,温度为850 °C~1000 °C,恒温25~150 h的条件下进行斜长角闪岩部分熔融试验,发现随温度的升高矿物-熔体的视二面角中值从72°~84°区间下降至52°~57°区间<sup>[18]</sup>。结晶和部分熔融过程中控制二面角的主要因素不同,可能导致了本次熔融-结晶试验获得的矿物-熔体视二面角与温度的关系与前人的部分熔融试验获得的矿物-熔体视二面角随温度变化关系的差异。在结晶过程中,矿物的生长动力学机制和矿物-熔体界面能控制着矿物-熔体二面角的大小,而在部分熔融过程中,矿物-熔体反应动力学和矿物-熔体界面能控制着矿物-熔体二面角的大小,具体体现为结晶和部分熔融试验路径上的不同。

在结晶过程中,当矿物在相对较高的温度条件下结晶时,岩浆过冷度相对较小,矿物的成核速率较小而生长速率相对较快,因此,结晶颗粒少但容易长成较大的矿物晶体;当矿物在相对较低的温度条件下结晶时,岩浆过冷度相对较大,矿物的成核速率相对大而生长速率相对较缓慢,因此,结晶颗粒较多但粒度较小。在相同的结晶生长时间内(如100 h)以及高温条件下,粒度较大的角闪石颗粒间相互接触拼接[图3(c)],形成高角度二面角;而在低温条件下,粒度较小的角闪石颗粒近似平行排列结构[图3(a)],具有低角度二面角。在本次试验中,随着温度的升高,矿物-熔体结构由远离拼接结构(Impingement Texture)向拼接结构发展,角闪石-熔体视二面角中值由角闪石生长动力学和角闪石-熔体界面能控制,因此,角闪石-熔体视二面角随角闪石温度的升高而增加。而在部分熔融过程中,高温条件更有利于熔融过程的进行。熔融温度的升高促进熔融作用的发生以及矿物相与熔体的反应,部分熔融程度加大,熔体含量增大。因此,在部分熔融过程中,随温度的升高矿物-熔体二面角降低,更加有利于熔体在粒间的连通。

#### 3.2.2 压力的影响

图7表示在温度为900 °C,恒温100 h的条件下角闪石-熔体视二面角与压力的关系。从图7可以看出,随着压力的升高角闪石-熔体视二面角先略有升高然后明显降低,最后显著升高。具体表现为:当压力从0.6 GPa升高到1.1 GPa,角闪石-熔体视

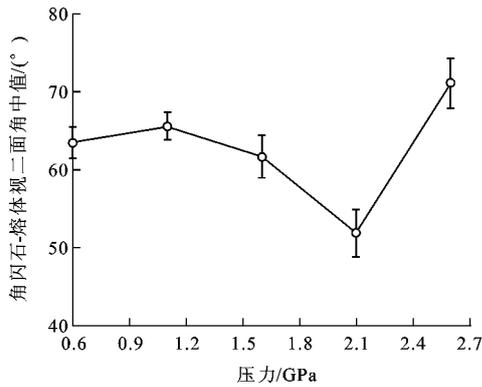


图7 在温度为900 °C,恒温100 h的条件下结晶压力与角闪石-熔体视二面角中值的关系

Fig. 7 Relationship Between Median of Amphibole-melt Apparent Dihedral Angle and Crystallization Pressure at the Temperature of 900 °C and the Annealing Time of 100 h

二面角中值从64°升高到66°;当压力依次升高到1.6 GPa和2.1 GPa,角闪石-熔体视二面角中值逐渐从66°减小至62°和52°;之后,随着压力进一步升高至2.6 GPa,角闪石-熔体视二面角中值迅速增加,从52°增加到71°。本次熔融-结晶试验获得的角闪石-熔体视二面角中值随压力的变化趋势与Holness等获得的矿物-熔体视二面角中值随压力的变化趋势<sup>[15-16,18]</sup>基本一致,即矿物-熔体视二面角中值随着压力的升高而增加,然后当压力达到临界值后随着压力的继续升高而降低。但是在Holness的试验<sup>[15-16]</sup>中没有出现随着压力进一步升高,石英-流体视二面角中值再次升高的现象。

与温度类似,压力也主要是通过影响矿物和熔体的物理化学性质来影响矿物-熔体二面角。矿物与熔体具有很多明显不同的性质,如密度、硬度和压缩性都显著不同。通常,在压力作用下熔体更容易发生变形。在低压条件下,压力对熔体和矿物的力学性质影响均不显著,压力不足以明显改变熔体在颗粒间的拓扑学形态以及颗粒形态或边界性质。因此,在低压条件下,随着压力的增加,矿物-熔体视二面角中值变化不大。达到一定压力以后,随着压力的升高,压力对熔体力学性质的影响比对矿物的影响要大得多,因此,压力作用显著改变粒间熔体形态但不足以改变矿物颗粒的性质,压力的作用使熔体向颗粒边界运移。随着压力的继续升高,熔体在矿物颗粒间边界逐步趋于连通,矿物-熔体二面角随压力的升高显著降低。随着压力的进一步升高,压力对矿物的影响比熔体更加显著,这时压力的作用是挤出矿物颗粒边界的熔体,使熔体向多矿物接触点

运移,熔体在矿物颗粒间边界逐步趋于不连通,因此,表现为矿物-熔体二面角显著升高。除此之外,受压力的影响,矿物的结晶程度、形态等差异也可能影响矿物-熔体二面角的大小。另外,一般认为矿物-熔体二面角中值的统计误差在小于5°条件下即被认为数据合理<sup>[25-29]</sup>,本次试验中矿物-熔体二面角的统计误差均小于5°(表2),但从图7可以发现,压力从0.6 GPa升高到1.6 GPa的过程中,矿物-熔体二面角的变化比较微弱,仅在5°范围内,因此,统计误差可能会对低压条件下矿物-熔体二面角随压力的变化趋势产生一定的干扰,随着压力的升高统计误差的干扰逐渐减弱。

### 3.3 熔体结晶演化过程中的矿物-熔体二面角

岩浆结晶演化过程就是岩浆由全熔状态转变为全晶质或矿物+玻璃质状态的过程。设想一个最简单的岩浆结晶演化过程:当岩浆开始结晶时,矿物在存在大量熔体的条件下生长,常常形成具有自形晶面的晶体,呈相对孤立分散状态随机分布;经过较长时间的结晶生长,孤立的矿物粒度增大,逐渐相互接触,构成骨架,控制着矿物间的熔体形态,形成拼接结构;之后,随着矿物颗粒更进一步的生长,熔体含量进一步减小,向着全固结平衡方向演化。实际的岩浆结晶演化过程要比上述理想化过程复杂得多。

Holness等依据大量火山岩、火山岩包体及堆晶岩中矿物-熔体(或者矿物-矿物)二面角真值的研究,总结了岩浆结晶晚期矿物-熔体结构演化过程中矿物(或矿物-熔体)二面角真值的演化特征(图8)<sup>[6]</sup>。在岩浆结晶晚期,矿物颗粒已经相互接触,形成拼接结构。矿物-熔体结构的进一步演化主要受矿物颗粒间界面能最小化作用的控制。岩浆形成拼接结构时,矿物-熔体二面角中值约为60°,二面角标准差较大,为25°~30°。在岩浆结晶晚期,拼接结构形成以后,矿物-熔体的结构演化有可能向2个方向发展。其一,在较快冷却的条件下,岩浆形成含有大量玻璃质的火成岩,矿物-熔体的结构由拼接结构向着含有熔体(玻璃质)平衡的方向演化。这一过程中伴随矿物-熔体二面角中值和标准差的降低<sup>[6]</sup>,二面角中值由约60°降低到约30°,二面角标准差由25°~30°区间降低到10°~15°区间。其二,在缓慢冷却的条件下,岩浆经过漫长的结晶过程形成全结晶的堆晶岩,矿物-熔体的结构从拼接结构向着全固结的方向演化,最终形成接近平衡的全固结矿物结构。这一过程中伴随着矿物-熔体二面角中值的增大及其标准差的降低<sup>[6]</sup>,矿物-熔体(矿物)二面角中

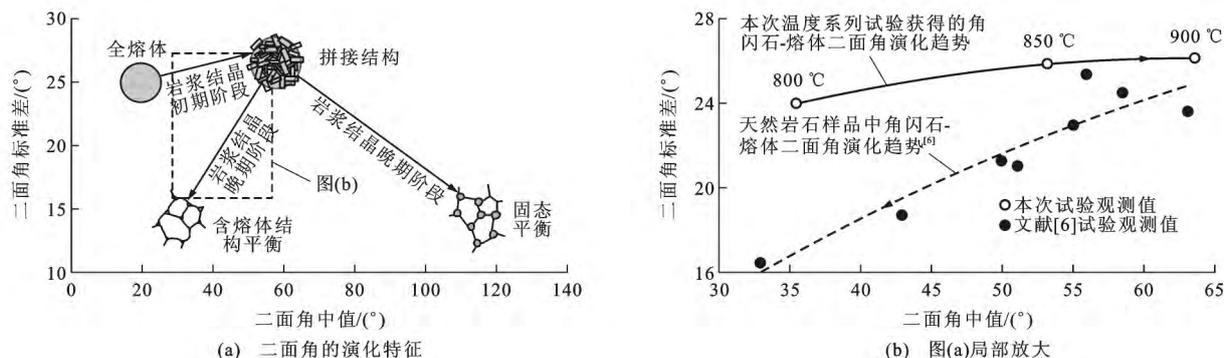


图8 岩浆结晶过程中二面角的演化特征

Fig. 8 Schematic Diagram of the Evolution of Mineral-melt Dihedral Angle During the Magma Crystallization

值由约  $60^\circ$  增大到约  $120^\circ$ , 标准差由  $25^\circ \sim 30^\circ$  区间降低到  $10^\circ \sim 15^\circ$  区间(图 8)。

本次试验结果显示:在压力为 0.6 GPa, 恒温 100 h 的条件下,随着角闪石温度的升高(从  $800^\circ\text{C}$  升高到  $900^\circ\text{C}$ ),矿物-熔体视二面角中值逐渐升高,从  $35.4^\circ$  升高到  $63.5^\circ$ ,二面角标准差从  $24^\circ$  升高到  $26.1^\circ$ (表 4)。另外,对比矿物-熔体视二面角累积频率与理论频率累积曲线[图 4(a)~(c)],高温条件下的矿物-熔体视二面角累积频率与理论频率累积曲线更吻合,说明在相同压力(0.6 GPa)和相同恒温时间(100 h)的条件下,高温时形成的矿物-熔体结构更趋向于接近平衡。表面上看,本次试验结果与 Holness 的研究结果<sup>[6]</sup>相矛盾(图 8),但仔细观察本次温度系列试验(3 组)产物的背散射显微照片[图 3(a)~(c)]可以发现,在压力为 0.6 GPa,温度为  $800^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ ,恒温 100 h 的条件下,角闪石结晶颗粒并没有完全互相接触。随着温度的升高,角闪石-熔体结构仅仅向着拼接结构方向发展,并没有形成完全的拼接结构。因此,本文试验结果与 Holness 等的研究结果<sup>[6]</sup>并不矛盾。本文试验结果揭示了岩浆结晶形成拼接结构之前(即岩浆结晶初期阶段)的矿物-熔体结构演化,而 Holness 等的研究结果<sup>[6]</sup>揭示了岩浆结晶形成拼接结构之后(即岩浆结晶晚期阶段)的结构演化。由本次试验结果可知,在岩浆结晶形成拼接结构之前的早期阶段,矿物-熔体结构由远离拼接结构向拼接结构发展的过程中,矿物-熔体二面角逐渐增大,其二面角主要由矿物生长动力学控制逐渐转变为由矿物-熔体界面能控制。因此,可以将本次试验结果与 Holness 等获得的岩浆结晶晚期矿物(或矿物-熔体)二面角的演化规律<sup>[6]</sup>相结合,初步得到较为完整的岩浆结晶过程中矿物-熔体二面角的演化模式(图 8)。当然,这一模式还需要接受更多野外和试验工作的检验。

## 4 结 语

(1)在压力为 0.6 GPa, 恒温 100 h 的条件下,粗面玄武岩熔体在温度分别为  $800^\circ\text{C}$ 、 $850^\circ\text{C}$ 、 $900^\circ\text{C}$  时结晶,形成的主要结晶相为角闪石。随着角闪石温度的增加,角闪石-熔体结构向接近拼接结构演化,其视二面角中值增大。

(2)在温度为  $900^\circ\text{C}$ , 恒温 100 h 的条件下,粗面玄武岩熔体在压力分别为 0.6、1.1、1.6、2.1、2.6 GPa 时结晶,形成的主要结晶相为角闪石,角闪石-熔体视二面角随压力的升高先略有升高,之后明显降低,最后显著升高。

(3)利用粗面玄武岩熔融-结晶试验中温度系列试验,获得了岩浆结晶形成矿物拼接结构之前矿物-熔体二面角的演化特征。随着矿物由孤立状态向拼接结构发展,矿物-熔体二面角逐渐增大。

参 考 文 献 :

References :

- [1] SMITH C S. Grains, Phases, and Interphases: An Interpretation of Microstructure[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1948, 175(5): 15-51.
- [2] HOLNESS M B. Decoding Dihedral Angles in Melt-bearing and Solidified Rocks[J]. Journal of the Virtual Explorer, 2010, 35(2), doi: 10.3809/jvirtex.2011.00265.
- [3] CMIRAL M, GERALD J D F, FAUL U H, et al. A Close Look at Dihedral Angles and Melt Geometry in Olivine-basalt Aggregates: A TEM Study[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1998, 130(3): 336-345.
- [4] LAPORTE D. Wetting Behavior of Partial Melts During Crustal Anatexis: The Distribution of Hydrous Silicic Melts in Polycrystalline Aggregates of Quartz[J].

- Contributions to Mineralogy and Petrology, 1994, 116 (4):486-499.
- [5] WATSON E B, BRENAN J M. Fluids in the Lithosphere: 1. Experimentally-determined Wetting Characteristics of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Fluids and Their Implications for Fluid Transport, Host-rock Physical Properties, and Fluid Inclusion Formation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1987, 85(4):497-515.
- [6] HOLNESS M B, CHEADLE M J, MCKENZIE D. On the Use of Changes in Dihedral Angle to Decode Late-stage Textural Evolution in Cumulates[J]. Journal of Petrology, 2005, 46(8):1565-1583.
- [7] 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(3/4):161-184.
- [8] SHI C Y, ZHANG L, YANG W G. Formation of Interconnected Network of Iron Melt at Earth's Lower Mantle Conditions[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(11):971-975.
- [9] YOSHINO T, MIBE K, YASUDA A, et al. Wetting Properties of Anorthite Aggregates: Implications for Fluid Connectivity in Continental Lower Crust[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107(B1):ECV10-1-ECV10-8.
- [10] HOLNESS M B. Melt-solid Dihedral Angles of Common Minerals in Natural Rocks [J]. Journal of Petrology, 2006, 47(4):791-800.
- [11] HOLNESS M B, NIELSEN T F D, TEGNER C. Textural Maturity of Cumulates: A Record of Chamber Filling, Liquidus Assemblage, Cooling Rate and Large-scale Convection in Mafic Layered Intrusions[J]. Journal of Petrology, 2007, 48(1):141-157.
- [12] HOLNESS M B, TEGNER C, NIELSEN T F D, et al. A Textural Record of Solidification and Cooling in the Skaergaard Intrusion, East Greenland [J]. Journal of Petrology, 2007, 48(12):2359-2377.
- [13] HOLNESS M B, SAWYER E W. On the Pseudomorphing of Melt-filled Pores During the Crystallization of Migmatites[J]. Journal of Petrology, 2008, 49(7):1343-1363.
- [14] HOLNESS M B, GRAHAM C M. Equilibrium Dihedral Angles in the System H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl-calcite, and Implications for Fluid Flow During Metamorphism[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1991, 108(3):368-383.
- [15] HOLNESS M B. Equilibrium Dihedral Angles in the System Quartz-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl at 800 °C and 1-15 kbar: The Effects of Pressure and Fluid Composition on the Permeability of Quartzites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1992, 114(1):171-184.
- [16] HOLNESS M B. Temperature and Pressure Dependence of Quartz-aqueous Fluid Dihedral Angles: The Control of Adsorbed H<sub>2</sub>O on the Permeability of Quartzites [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 117(3/4):363-377.
- [17] 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(4):397-415.
- [18] 郑小刚, 李和平, 周文戈. 斜长角闪岩脱水熔融过程中熔体连通性的实验研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(1):35-42.
- ZHENG Xiao-gang, LI He-ping, ZHOU Wen-ge. The Experimental Study on the Connectivity of Melt in the Process of Partial Melting of Plagioclase Amphibolite [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(1):35-42.
- [19] 周文戈, 张本仁, 赵志丹, 等. 豫西新生代基性火山岩地球化学特征及源区性质[J]. 矿物岩石, 1998, 18(3):51-57.
- ZHOU Wen-ge, ZHANG Ben-ren, ZHAO Zhi-dan, et al. Geochemical Characteristics and the Provenance of Cenozoic Basic Volcanic Rocks in Western Henan Province, China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1998, 18(3):51-57.
- [20] 傅慧芳, 朱成明. 静态超高压容器中温度、压力等参数的测试[J]. 物理, 1980, 9(3):193-195.
- FU Hui-fang, ZHU Cheng-ming. Testing Parameters Such as Temperature, Pressure in Static Super High Pressure Apparatus[J]. Physics, 1980, 9(3):193-195.
- [21] 单双明, 汪日平, 郭捷, 等. YJ-3000t 型紧装式六面顶大腔体高温高压实验装置样品室的压力标定 [J]. 高压物理学报, 2007, 21(4):367-372.
- SHAN Shuang-ming, WANG Ri-ping, GUO Jie, et al. Pressure Calibration for the Sample Cell of YJ-3000t Multi-anvil Press at High-temperature and High-pressure[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(4):367-372.
- [22] MIBE K, YOSHINO T, ONO S. Connectivity of Aqueous Fluid in Eclogite and Its Implications for Fluid Migration in the Earth's Interior [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2003, 108(B6):ECV6-1-ECV6-10.

- [23] RIEGGER O K, VANVLACK L H. Dihedral Angle Measurement[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1960, 218 (5): 933-935.
- [24] STICKLES C A, HUCKE E E. Measurement of Dihedral Angles [J]. Transactions of the Metallurgical Society of Aime, 1964, 230(4): 795-801.
- [25] JUREWICZ S R, JUREWICZ A J G. Distribution of Apparent Angles on Random Sections with Emphasis on Dihedral Angle Measurements[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 1986, 91(B9): 9277-9282.
- [26] VERNON R H. Microstructures of High-grade Metamorphic Rocks at Broken Hill, Australia[J]. Journal of Petrology, 1968, 9(1): 1-22.
- [27] VERNON R H. Comparative Grain-boundary Studies of Some Basic and Ultrabasic Granulites, Nodules and Cumulates[J]. Scottish Journal of Geology, 1970, 6 (4): 337-351.
- [28] LUPULESCU A, WATSON E B. Low Melt Fraction Connectivity of Granitic and Tonalitic Melts in a Mafic Crustal Rock at 800 °C and 1 GPa[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 134(2): 202-216.
- [29] ELLIOTT M T, CHEADLE M J, JERRAM D A. On the Identification of Textural Equilibrium in Rocks Using Dihedral Angle Measurements[J]. Geology, 1997, 25(4): 355-358.
- [30] HARKER D, PARKER E R. Grain Shape and Grain Growth[J]. Transactions of the American Society for Metals, 1945, 34: 156-201.
- [31] HOLZHEID A, SCHMITZ M D, GROVE T L. Textural Equilibria of Iron Sulfide Liquids in Partly Molten Silicate Aggregates and Their Relevance to Core Formation Scenarios[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 2000, 105(B6): 13555-13567.
- [32] SAWYER E W. Criteria for the Recognition of Partial Melting[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A; Solid Earth and Geodesy, 1999, 24(3): 269-279.

## 《地球科学与环境学报》2016 年度约稿函

尊敬的各位专家学者：

《地球科学与环境学报》(以下简称《学报》)自 1979 年创刊以来,得到了各位专家的支持,使期刊得到了快速发展。《学报》系地学综合性权威学术期刊,刊登的主要内容有基础地质与矿产地质、水资源与环境、工程地质、应用地球物理和地球信息科学等。为了不断提升《学报》的学术质量和影响力,特向各位专家学者约稿,诚盼各位专家学者能鼎力支持《学报》的发展。

《学报》目前的优势包括：

- 1、中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源。
- 2、特约稿不收取版面费,并且刊出后向作者支付一定稿酬。
- 3、发表周期短。
- 4、对学术质量高、有重大基金项目支持的论文优先发表。
- 5、刊登综述类论文。
- 6、可同期刊登同一主题的系列成果。

联系地址:西安市南二环路中段长安大学杂志社《地球科学与环境学报》编辑部

邮政编码:710064

电 话:029-82334686

E-mail:dkyhxb@chd.edu.cn;jesechd@163.com

投稿网址:<http://jese.chd.edu.cn/>

《地球科学与环境学报》编辑部