

高温高压下不同类型糜棱岩纵波速度 “软化点”特征及其产生机理*

杨树锋 陈汉林** 董传万 程晓敢 翟双猛 齐德文

浙江大学地球科学系, 杭州 310027

摘要 在模拟地下某一深度范围的温度和压力条件下, 测量了糜棱岩的纵波速度, 并对样品进行电子探针研究. 测量结果表明, 不同的糜棱岩出现纵波速度“软化点”的温压条件不同, 与之相对应的模拟深度分别为: 糜棱岩化石英闪长岩, 25 km左右; 石英闪长质超糜棱岩, 27 km左右; 长英质超糜棱岩, 33 km左右. 指出了纵波速度“软化点”的出现与糜棱岩中矿物部分熔融有密切关系, 糜棱岩矿物组成中云母矿物对熔体的贡献最大, 而长石和石英的贡献较小. 分析表明, 糜棱岩中云母类含水矿物含量越高, 脱水程度越大, 部分熔融程度也越大, 纵波速度“软化点”出现的深度越小.

关键词 糜棱岩 高温高压 纵波速度“软化点” 含水矿物脱水 部分熔融

韧性剪切带是地球内部普遍发育的一种重要构造类型^[1], 是岩石圈深部地壳变形的主要形式之一^[2]. 韧性剪切带作为地壳深部直至地幔顶部变形的重要记录, 蕴含了大量地球深部信息, 受到地质和地球物理学家的高度重视. 本文通过对浙江省诸暨县陈蔡地区韧性剪切带中糜棱岩的高温高压下纵波速度特征研究, 揭示其纵波速度发生明显下降时的温压条件及其纵波速度发生变化时的特征; 并通过纵波速度下降前后矿物成分和结构的分析, 探讨了在模拟地球内部的温压条件下糜棱岩纵波速度出现快速下降点即纵波速度“软化点”的机理. 本研究为探讨岩石圈内部低速层的成因提供了实验依据.

1 诸暨陈蔡地区糜棱岩的发育特征

诸暨陈蔡地区韧性剪切带位于浙江省诸暨县东南陈蔡地区湮浦、大林一带, 北东向延伸至东和王家宅, 全长 20 km 以上, 宽几百米到几公里, 呈狭长的带状, 产于江绍深断裂带内(图 1). 陈蔡地区韧性剪切带内出现糜棱岩化石英闪长岩、闪长质糜棱岩类和长英质糜棱岩类(表 1). 浙江诸暨陈蔡

地区糜棱岩主要形成于 317~370 Ma, 属于晚古生代早期^[3-5].

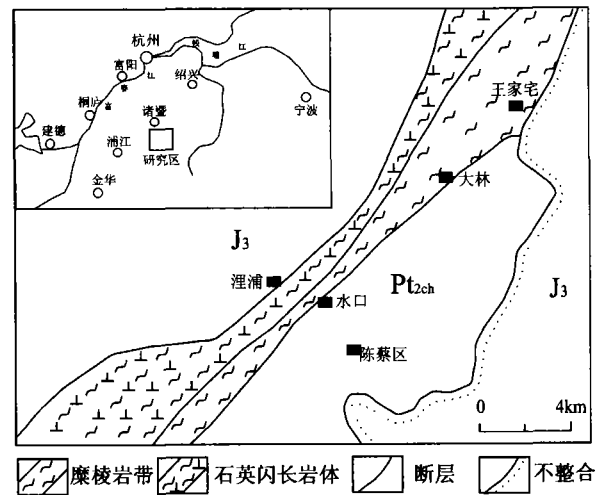


图 1 诸暨陈蔡地区糜棱岩分布图^[5]

我们选取糜棱岩化石英闪长岩、石英闪长质超糜棱岩和长英质超糜棱岩进行某一模拟深度相当的温压条件下的纵波速度测量.

2001-04-09 收稿, 2001-07-02 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 49872073, 40072096)、国家重点基础研究发展规划(批准号: G200004760402)、教育部博士点基金(批准号: 20033523)和高等学校优秀青年教师教学和科研奖励计划项目资助

** E-mail: hlchen@css.zju.edu.cn

表1 陈蔡地区糜棱岩类岩石化学成分^{a)}

成分	(质量分数 $w/\%$)		
	糜棱岩化石英闪长岩	石英闪长质超糜棱岩	长英质超糜棱岩
SiO ₂	57.20	54.20	69.37
TiO ₂	0.53	0.55	0.39
Al ₂ O ₃	16.94	15.52	14.03
Fe ₂ O ₃	5.02	1.93	1.25
FeO	2.67	3.89	1.35
MnO	0.15	0.14	0.08
MgO	2.67	2.77	0.94
CaO	7.01	6.85	2.17
Na ₂ O	3.92	3.32	4.46
K ₂ O	1.03	2.00	2.35
P ₂ O ₅	0.34	0.24	0.15
烧失量	2.54	8.28	3.03
总和	100.02	99.50	99.57

a) 样品在南京大学分析测试中心测试

2 实验条件

高温高压弹性纵波速度测量是在中国科学院地球化学研究所地球深部物质研究室完成的。实验是在 YJ-3000 吨压力机的紧装式六面顶装置上, 利用 SD-1 声波检测仪进行的。

以采样地区正常地温梯度下对应于各个模拟深度条件下的温度和压力值, 作为实验时的条件。

采样地区正常地温梯度为 30℃/km, 在 25℃室

温下模拟深度与温度 $T(^\circ\text{C})$ 有如下关系

$$T = 30^\circ\text{C}/\text{km} \times H + 25^\circ\text{C}, \quad (1)$$

其中 H 表示深度, 单位为 km。

采用的对应于模拟深度的压力值是根据采样地区地壳的密度 (2.8 g/cm^3) 及重力值进行推算得出的, 模拟深度与压力 $P(\text{GPa})$ 的关系为^[6]

$$P = (H/3.5 \text{ km} + 0.001)/10, \quad (2)$$

由公式(1)和(2)可知与模拟地下深度对应的温度 T 和压力值 P 。

3 高温高压下糜棱岩类纵波速度变化特征

从图2可以看出糜棱岩的纵波速度与模拟深度的关系基本上是先逐渐升高, 然后在某一深度突然大幅度降低, 且降低后的纵波速度值基本保持在一个稳定的水平上。即在一定的温压条件下, 糜棱岩类的纵波速度存在一个快速下降点, 也称之为纵波速度“软化点”^[7]。

对比图中不同糜棱岩的曲线, 可以看出, 不同糜棱岩的纵波速度出现“软化点”的温压条件是不同的, 分别为: 糜棱岩化石英闪长岩, 相当于模拟深度 25 km 左右; 石英闪长质超糜棱岩, 相当于 27 km 左右; 长英质超糜棱岩, 相当于 33 km 左右。

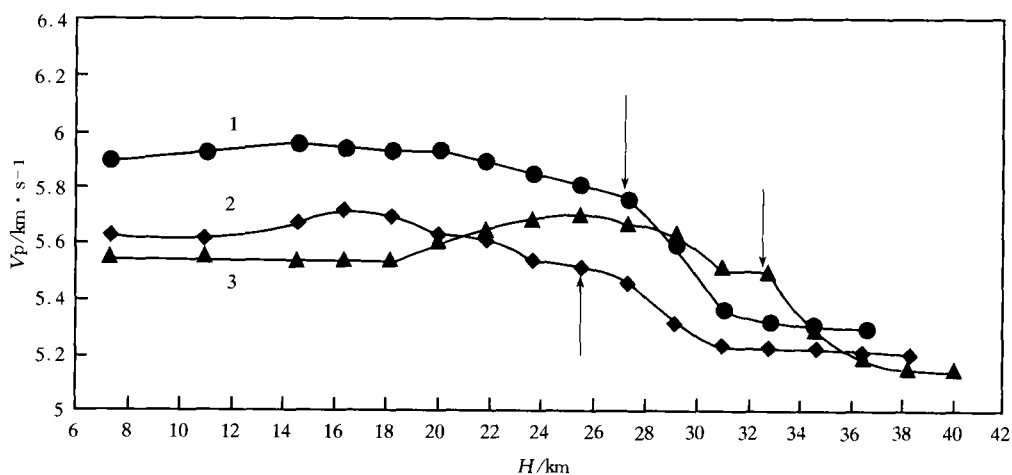


图2 糜棱岩类平均纵波速度与模拟深度的关系图

1. 石英闪长质超糜棱岩; 2. 糜棱岩化石英闪长岩; 3. 长英质超糜棱岩

箭头示: “软化点”发育的位置

4 高温高压下糜棱岩纵波速度“软化”的机制

为了深入了解糜棱岩在发生熔融时其内部组分与结构的变化及糜棱岩纵波速度出现“软化点”的形成机制,作者对“软化点”出现前后的岩石样品进行了光学显微镜观察和典型矿物的电子探针研究.

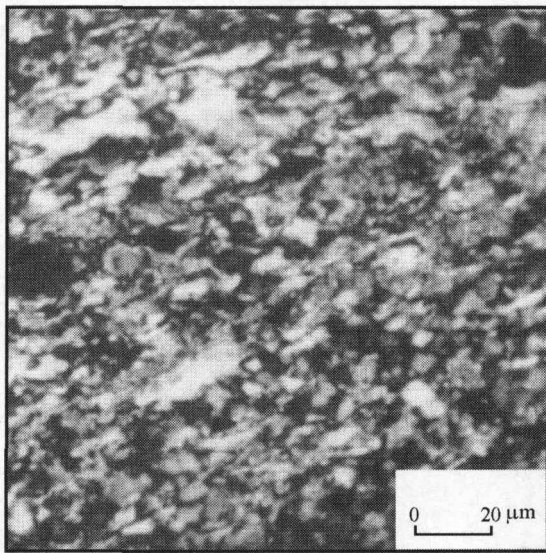
4.1 “软化点”出现前后矿物特征及成分的变化

对“软化点”前后样品进行系统分析后发现,“软化点”出现后样品的组成如下:

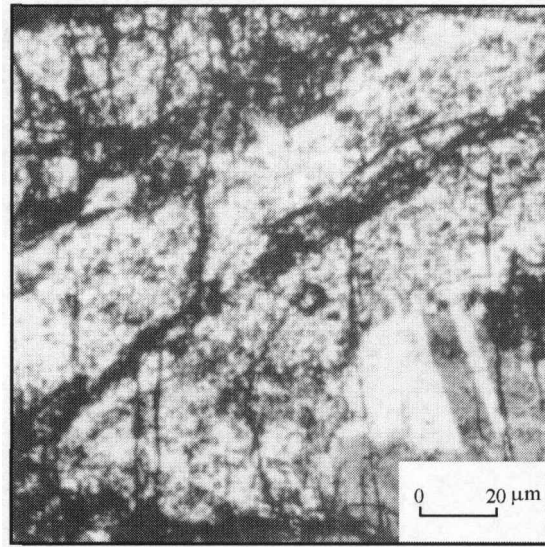
玻璃:“软化点”出现后糜棱岩岩石中生成了玻璃质.它在显微镜下表现为:褐色、黄褐色、全消光、均质、呈条带状展布,并可见到黑白流纹(图3).在条带中有微晶质存在,微晶质呈现出各种形状,如针状、球状等.经过与“软化点”出现前的样品对比,发现出现玻璃质的位置基本上是“软化点”出现前样品中呈现出塑性流动基质的位置,其

主要成分为石英、长石、细小的呈鳞片状的黑云母、绢云母、绿泥石等(图3).这说明在高温高压下,陈蔡地区的糜棱岩发生了部分熔融,从而导致了纵波速度的快速下降(即“软化点”的出现).在显微镜下统计确定熔体的含量大致为10%~15%.对熔体所做的探针分析表明:熔体中SiO₂含量大于64%,属酸性;而Al₂O₃的含量为16%~23%,FeO的含量为1.28%~2.85%,MgO的含量为0.5%~1.2%之间,CaO的为0.56%~2.9%之间.

钾长石、斜长石:“软化点”出现前岩石中的钾长石碎斑具有明显的波状消光,而斜长石颗粒碎斑可见到双晶叶片弯曲,有膝折现象.因为长石的能干性较强,所以镜下的长石碎斑没有明显的变形,只见到长石的破裂现象.纵波速度快速下降后岩石中的钾长石、斜长石碎斑形状没有明显改变,只是消光减弱.基质中的长石小颗粒则不易观察,熔体中存在的微晶质可能部分为未熔融的长石小颗粒.



“软化点”出现前



“软化点”出现后

图3 长英质超糜棱岩样品纵波速度“软化点”出现前后显微镜下观察结果

石英:“软化点”出现前岩石中的石英可见到明显的动态重结晶的石英小颗粒组成的显微层.“软化点”出现后石英小颗粒组成的显微层消失,取而代之的是石英的“流动状”结构.和“软化点”出现前比,样品中石英碎斑形状没有太大的变化,只是出现了明显的破裂纹.

云母:“软化点”出现前岩石中的黑云母,受到了强烈的绿泥石化,主要见到了呈细小鳞片状的云母小颗粒,还见到较多的绢云母.“软化点”出

现后显微镜下云母消失.

4.2 造岩矿物对熔体的贡献

陈蔡地区糜棱岩中主要的造岩矿物为石英、长石、黑云母.“软化点”出现后在原岩中未观察到黑云母存在,表明原岩中的黑云母都转化为玻璃,这说明云母是熔体的主要贡献者.

通过对其他造岩矿物在“软化点”出现前后所做的电子探针结果进行对比,以及对熔体的电子探针结果与母岩的化学成份对比发现,熔体不是由母

岩整体熔融所致,而是低熔点矿物完全熔融,高熔点矿物部分熔融的产物.表2列出了对长英质超糜棱岩样品所做分析的平均结果,熔体 SiO₂ 的含量小于母岩,而大于钾长石,说明母岩中的石英矿物只是部分熔融;熔体中 Al₂O₃ 的含量远大于母岩,而小于长石;Na₂O 的含量远小于斜长石;K₂O 的含量则远小于钾长石,说明母岩中斜长石、钾长石发生了部分熔融;熔体中 FeO+MgO 的含量与母岩基本一致,却远大于钾长石、斜长石中的含量;在黑云母、绢云母、绿泥石中 FeO, MgO 含量高,出现“软化点”后岩石样品中没有观察到它们的存在,因此可以得出“软化点”出现后岩石中的黑云母、绢云母、绿泥石等富含 FeO, MgO 元素的矿物完全熔融,是熔体的主要贡献者.

表2 长英质超糜棱岩样品“软化点”出现前后钾长石与熔体的化学成分对比^{a)} (w/%)

成分	熔体中平均含量		“软化点”出现前钾长石中的含量		原始样品中平均含量	
	6-2 ^{b)}	10-2 ^{b)}	6-2	10-2	6-2	10-2
SiO ₂	69.48	69.97	65.17	65.76	72.39	69.37
TiO ₂	0.04	0.09	0.02	0.00	0.20	0.39
Al ₂ O ₃	19.75	18.90	19.23	21.44	13.70	14.03
FeO	1.55	2.64	0.01	0.01	1.71	2.60
MnO	0.03	0.11	0.02	0.00	0.04	0.08
MgO	0.54	0.77	0.01	0.00	0.53	0.94
CaO	0.95	3.15	0.00	0.30	1.42	2.17
Na ₂ O	2.56	1.74	0.06	11.50	3.56	4.46
K ₂ O	1.65	0.86	14.29	0.04	4.04	2.35
总量	96.59	97.00	99.34	99.05	99.71	99.57

a) 测试在南京大学现代成矿作用国家重点实验室用 Jxa-8800 M 型电子探针完成.仪器的加速电压为 20 kV, 电流为 20 nA, 修正法为 ZFA; b) 样品编号, 6-2 和 10-2 为长英质超糜棱岩

在显微镜下观察时,虽然石英没有明显的变化,但通过对熔体的电子探针研究发现它有部分熔融的证据.图4是长英质超糜棱岩样品 6-2 在岩石出现“软化点”之后,熔体电子探针测量点草图,其中 9, 12 为远离石英矿物, 10, 11 为靠近石英矿物边缘.结果显示石英矿物边上的探针点 SiO₂ 的含量明显高于远离石英矿物探针点的 SiO₂ 含量,而且石英矿物边上的 Al₂O₃, FeO, MgO, CaO, Na₂O 的含量则明显低于远离石英矿物的探针点(表3).由此可知,岩石出现“软化点”之后,石英发生部分熔融.

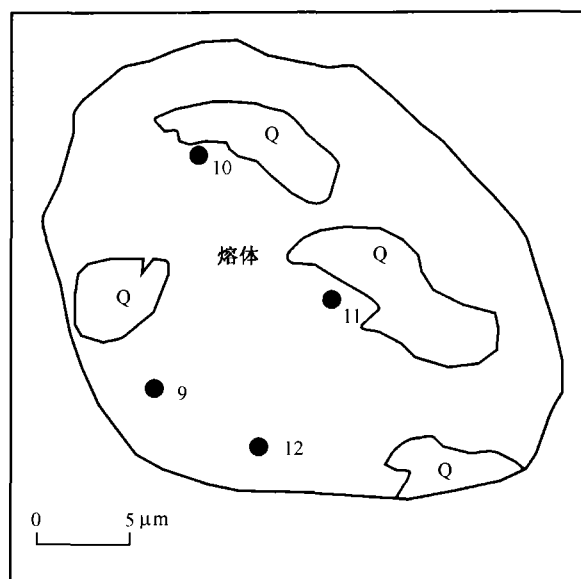


图4 熔体与石英的电子探针测点分布

表3 长英质超糜棱岩样品 6-2 出现“软化点”后熔体电子探针结果^{a)} (w/%)

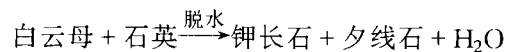
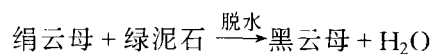
成分	熔体			
	9 ^{b)}	10	11	12
SiO ₂	65.84	72.13	70.46	64.41
TiO ₂	0.04	0.01	0.07	0.00
Al ₂ O ₃	22.16	18.55	18.55	22.35
FeO	1.81	1.57	1.28	1.72
MnO	0.03	0.04	0.03	0.03
MgO	0.63	0.50	0.48	0.73
CaO	1.40	0.56	0.88	0.99
Na ₂ O	2.94	2.13	2.62	3.21
K ₂ O	1.62	1.79	1.55	1.80
总量	96.48	97.38	95.92	95.23

a) 测试单位、仪器与方法均与表2相同; b) 为电子探针测量点号

4.3 富含 FeO, MgO 的云母等矿物熔融过程

根据对“软化点”出现后样品的鉴定可以得出糜棱岩发生了部分熔融,而且玻璃质的位置基本上是在“软化点”出现前岩石样品中呈现塑性流动的基质中(绢云母、绿泥石、白云母).

含水矿物绢云母、绿帘石、白云母等在一定温压条件下会发生脱水反应^[8-10]:



这样,岩石体系中将出现自由流体相的水,在一定压力条件下,含水矿物的脱水温度明显低于干

燥体系岩石的熔点。脱水作用将会大大降低岩石的固相线温度，使熔点变低，在较低温压条件下物质将发生部分熔融甚至全部熔融^[11~14]。大多数实验研究表明，含水矿物的脱水往往是岩石初熔的开始，除非又形成了另一种新的更稳定的含水矿物^[15]。Ringwood^[16]曾提出地幔中含有0.1%的水即可造成石榴石地幔岩的部分熔融，从而产生地幔中的低速带。

实验的糜棱岩中含水矿物含量的不同，导致在一定温压条件下发生脱水反应的程度也不同，而且脱水反应后岩石体系中自由水的多少也不一样，从而导致岩石固相线温度降低程度不一，岩石部分熔融程度的差异及其纵波速度下降特征的不同。

综合分析，可以得出岩石出现“软化点”的原因是岩石的部分熔融所致，而岩石的部分熔融所形成的熔体主要是岩石中含水的、富含FeO、MgO的矿物(如黑云母、绢云母、绿泥石等)完全熔融，长石、石英部分熔融的产物。岩石发生部分熔融所形成熔体的大致含量为10%~15%。

致谢 该项研究得到中国科学院地球化学研究所谢鸿森、郭捷研究员的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 何绍勋, 等. 韧性剪切带与成矿. 北京: 地质出版社, 1996
- 刘喜山, 等. 变形变质作用及成矿. 北京: 中国科学技术出版社, 1992
- 王执均. 江山-绍兴深断裂若干岩石类型的探讨. 浙江地质, 1988, 4(1): 15
- 李福佩. 浙北诸暨陈蔡地区韧性剪切带的研究. 浙江大学学报, 1991, 25(6): 644
- 董传万. 诸暨陈蔡地区韧性剪切带中糜棱岩类的研究. 浙江地质, 1992, 8(1): 16
- 都城秋穗. 变质作用与变质带. 北京: 地质出版社, 1979
- 谢鸿森, 等. 高温高压下测量岩石矿物纵波波速的新方法及其意义. 中国科学, B辑, 1993, 23(8): 861
- Smyth J R, et al. A new high pressure hydrous phase in the peridotite-H₂O system. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 146(1): 9
- Ito K. Measurement of elastic velocities in granulite and amphibolite having identical H₂O free bulk compositions up to 850°C at 1GPa. Earth Plan Sci Lett, 1995, 133: 255
- Popp T, et al. Thermal dehydration reactions characterized by combined measurements of electrical conductivity and elastic velocities. Earth Plan Sci Lett, 1993, 120: 43
- 谢鸿森, 等. 高温高压下蛇纹岩脱水的弹性特征及其意义. 地球物理学报, 2000, 43(6): 806
- 周文戈, 等. 2.00Pa, 室温-1160°C条件下安山岩纵波速度与相变. 地球科学, 1999, 24(3): 261
- Muller H J, et al. Elastic wave velocities of granite at experimental simulated partial melting conditions. Phys Chem Earth, 1997, 22(1-2): 93
- Seipold U, et al. Thermal properties of gneisses and amphibolites—high pressure and high temperature investigations of KTB—rock samples. Tectonophysics, 1998, 291(1): 173
- 郑海飞, 等. 高温高压下含水矿物对岩石熔点影响的实验研究. 地质学报, 1995, 69(4): 326
- Ringwood A E. Composition and Petrology of the Earth's Mantle. New York: McGraw-Hill, 1975