

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.223>



碰撞造山带地壳深熔作用:来自纳米花岗岩包裹体的观测与实验约束

李 鑫¹, 刘 强^{1*}, 樊 焰¹, 章军锋^{1,2}

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要:在碰撞造山带构造演化过程中,中下地壳深熔作用对于深部地壳物理性质与化学成分具有重要控制作用。作为深熔作用的“见证者”,纳米花岗岩包裹体是寄主岩石部分熔融作用的产物,能够为确定陆壳岩石中天然熔体特征及分析熔融机制提供关键信息。在喜马拉雅东构造结南迦巴瓦岩群的代表性岩石单元(泥质片麻岩与长英质片麻岩)中,石榴石与锆石中常包含有典型的纳米花岗岩包裹体,其代表性子矿物组合为钾长石+斜长石+石英±黑云母,这是在黑云母脱水熔融过程中、寄主片麻岩中熔体被主要转熔矿物(如石榴石等)捕获所形成一类特殊包裹体。在观测基础上,采用高温高压与高温常压手段,对纳米花岗岩包裹体进行均一化实验并获得均一化玻璃质熔体。成分分析表明,均一化熔体成分以过铝质花岗岩为主,其主/微量元素特征能够有效反演部分熔融作用的演化过程。因此,纳米花岗岩包裹体的天然观测与实验研究对于确定天然熔体特征与深入剖析碰撞造山带的地壳深熔作用具有重要启示意义。

关键词:地壳深熔;纳米花岗岩包裹体;变质演化;东喜马拉雅构造结;岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)12-4152-05

收稿日期: 2019-08-07

Crust Anatexis in Collisional Orogenic Belt: Constraints from Natural Observations and Experimental Investigation on Nanogranite Inclusions

Li Xin¹, Liu Qiang^{1*}, Fan Yu¹, Zhang Junfeng^{1,2}

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Crustal anatexis during the tectonic evolution of collisional orogenic belts has a fundamental impact on physical properties and chemical compositions of the deep crust. As the direct witness to crustal anatexis, nanogranite inclusions, which formed during partial melting of hosted crustal rocks, are key to determine the compositions of the natural melts as well as melting mechanism. Nanogranite inclusions within garnet and zircon were identified in pelitic gneisses and felsic gneisses from the Namche Barwa complex of the eastern Himalayan syntaxis. They have a typical granitic mineral assemblage of K-feldspar, plagioclase, and quartz with or without biotite. These minerals represent the former melt as a result of dehydration melting of biotite in gneisses, which is captured by peritectic minerals (like garnet). Homogenization experiments on the nanogranite inclusions were conducted under high temperature and pressure and high temperature and room pressure conditions in order to obtain homogenized glasses.

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2015CB856101)。

作者简介:李鑫(1995—),男,硕士研究生,主要从事高温高压实验与变质岩石学研究。ORCID:0000-0001-5421-8310. E-mail:240334326@qq.com

*通讯作者:刘强,ORCID:0000-0002-9674-4906. E-mail:liuqiang@cug.edu.cn

引用格式:李鑫,刘强,樊焰,等,2019.碰撞造山带地壳深熔作用:来自纳米花岗岩包裹体的观测与实验约束.地球科学,44(12):4152-4156.

Chemical analyses show that these homogenized glasses are dominated by peraluminous granites. The major- and trace-element compositions of these glasses can be used to trace the melting processes of the host rocks. A combination of natural observation and experimental investigation of nanogranite inclusions from collisional orogenic belts is crucial to gain further insights into the crustal anatexis and associated melt compositions.

Key words: crust anatexis; nanogranite inclusions; metamorphic evolution; eastern Himalayan syntaxis; petrology.

0 引言

中下地壳的深熔作用是大陆碰撞造山带构造演化过程的关键环节,其熔融过程与熔体特征对于认识造山带内地壳成分演化与壳幔物质交换具有重要科学意义。通常情况下,中下地壳深熔作用由一系列递进式的子过程所构成,熔体经历由初始形成至分异演化的复杂物理化学过程(曾令森和高利娥,2017)。相对于长英质脉体等宏观观测对象,显微尺度下的纳米花岗岩包裹体能够有效识别寄主岩

石(如麻粒岩、混合岩等)初始熔体产出特征及用以分析熔融机制(Cesare *et al.*, 2009, 2015; Zeng *et al.*, 2009),是人们洞察地壳深熔作用及分析造山带岩浆作用的重要“微观世界”。

1 南迦巴瓦岩群泥质片麻岩中纳米花岗岩特征

在东喜马拉雅构造结,以南迦巴瓦岩群为代表的高喜马拉雅结晶岩系为研究碰撞造山带高压变

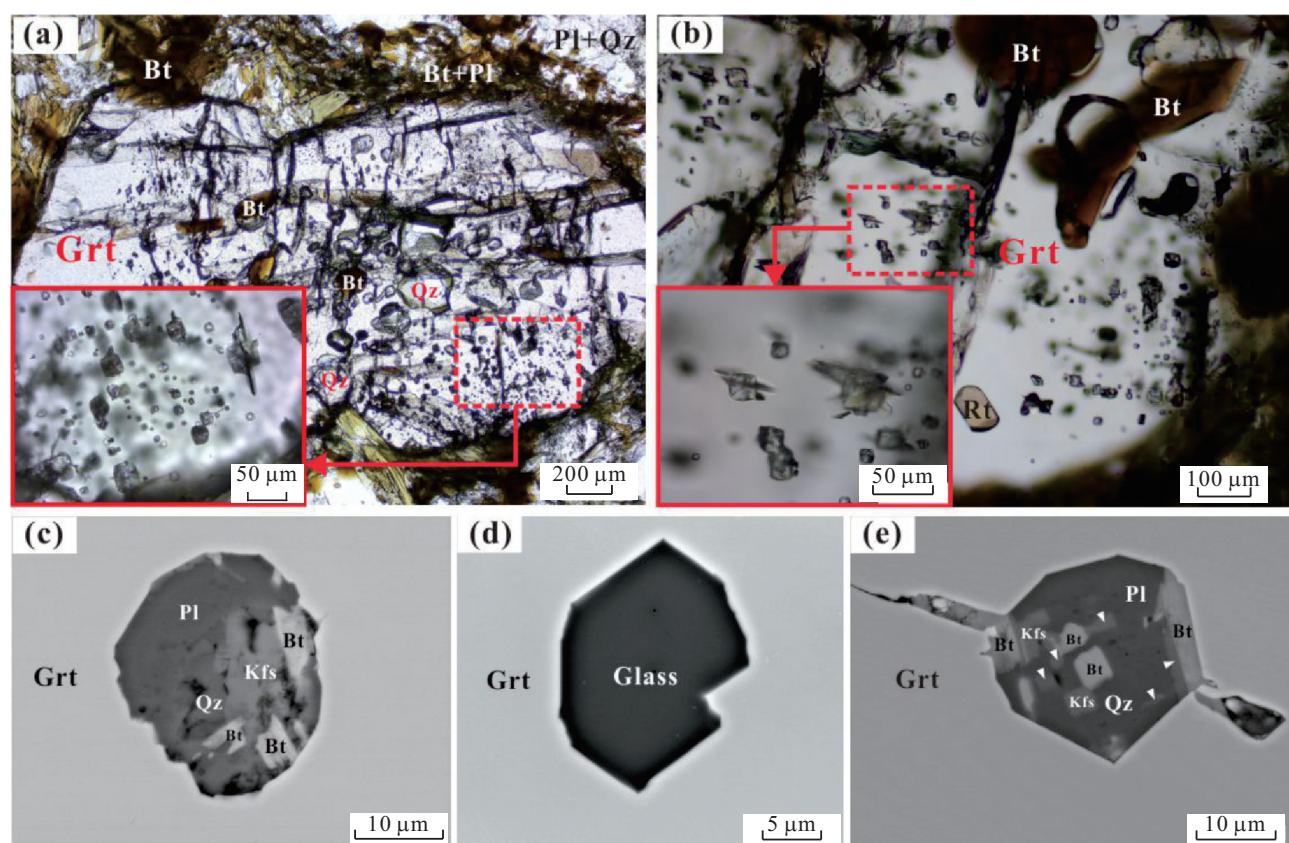


图1 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群石榴(蓝晶)黑云片麻岩石榴石中的纳米花岗岩包裹体与实验结果

Fig.1 Nanogranite inclusions within garnets of kyanite-bearing biotite gneiss from the Namche Barwa complex in the eastern Himalayan syntaxis and experimental results

a和b.石榴石中的纳米花岗岩包裹体分布特征(光学显微镜,单偏光);c.典型的纳米花岗岩包裹体,子矿物组合为黑云母+斜长石+石英+钾长石(电子背散射(SEM)图像);d.实验获得的玻璃质熔体,指示石榴石中纳米花岗岩包裹体达到成分均一化(1.5 GPa/850 °C)(SEM图像);e.含黑云母的多晶包裹体,其结构特征指示脱水熔融反应(白色三角形示钾长石,代表熔体假象特征)(SEM图像)。Grt.石榴石;Bt.黑云母;Pl.斜长石;Qtz.石英;Kfs.钾长石;Glass.玻璃质熔体

质—深熔作用与岩浆作用提供了重要窗口(张泽明等,2018).石榴(蓝晶)黑云片麻岩是南迦巴瓦岩群的代表性岩石单元之一,经历过高压麻粒岩相变质作用而发生明显部分熔融,是开展纳米花岗岩包裹体显微观测的理想对象(Carosi *et al.*, 2015).经过系统观察,我们在石榴(蓝晶)黑云片麻岩的石榴石中识别出以纳米花岗岩包裹体(Nanogranite inclusions)为代表的熔体包裹体及其他相关类型的多晶包裹体(图 1a、1b).其中,纳米花岗岩包裹体粒径一般在 10~30 μm ,无放射状裂纹,多分布于石榴石的幔部(图 1b),子矿物组合为黑云母+斜长石+石英+钾长石(图 1c).在观测基础上,研究使用活塞圆筒式高温高压设备,在 1.5 GPa、800~900 $^{\circ}\text{C}$ 实验环境下对石榴石中纳米花岗岩包裹体进行一系列均一化实验.实验结果表明,纳米花岗岩包裹体在 1.5 GPa、850 $^{\circ}\text{C}$ 实验环境下达到成分

均一化而获得玻璃质熔体(图 1d),证实寄主石榴(蓝晶)黑云片麻岩中纳米花岗岩包裹体的捕获条件应当为 1.5 GPa 和 850 $^{\circ}\text{C}$,这与结合前人的变质演化研究(Guilmette *et al.*, 2011; 向华等, 2013)获得的峰期变质条件相吻合.主量元素分析结果表明,均一化玻璃质熔体的 SiO_2 含量为 69.8%~75.4%, Al_2O_3 为 13.4%~15.9%, FeO 为 2.5%~5.0%, MgO 为 0.3%~0.9%, CaO 为 1.0%~3.0%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为 5.0%~7.6%, 铝饱和指数为 1.18~1.59, 总体为过铝质花岗岩特征,这与前人实验岩石学结果相吻合(Patino Douce and Harris, 1998).微量元素分析结果表明,玻璃质熔体富集大离子亲石元素(LILE)与轻稀土(LREE).通过结合其他类型多晶包裹体内子矿物组合与结构特征(图 1e),可以确定寄主片麻岩中的部分熔融主导机制为黑云母脱水熔融作用,其熔融反应为:黑云母+斜长

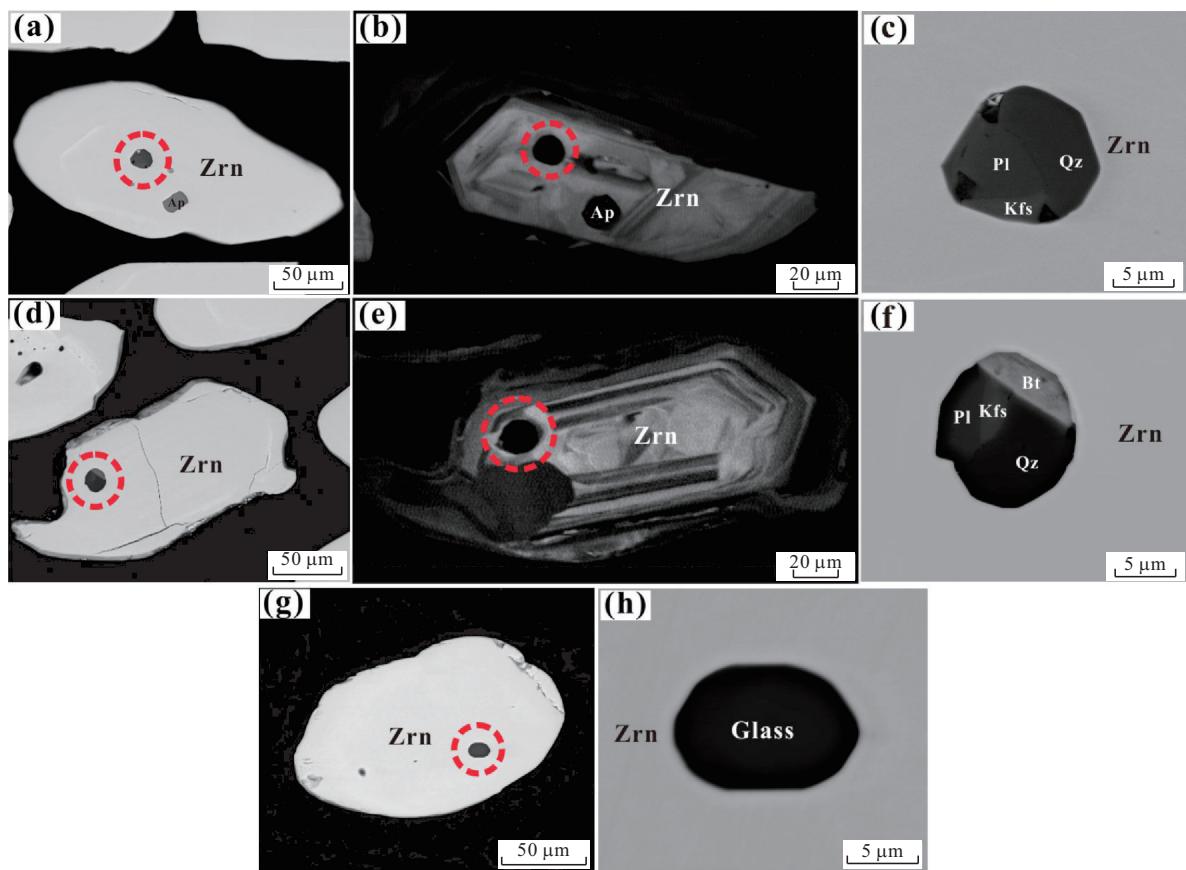


图 2 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群花岗质片麻岩锆石中的纳米花岗岩包裹体与代表性实验结果

Fig.2 Nanogranite inclusions within zircons of granitic gneiss from the Namche Barwa complex in the eastern Himalayan syntaxis and representative experimental result

a、b、d 和 e. 锆石中的纳米花岗岩包裹体(a 和 d 为 SEM 图像;b 和 e 为阴极发光(CL)图像);c 和 f. 纳米花岗岩中代表性的子矿物组合:斜长石(Pl)+石英(Qz)+钾长石(Kfs)±黑云母(Bt)(SEM 图像);g 和 h. 高温实验获得的均一化玻璃质熔体(Glass),指示锆石中纳米花岗岩包裹体达到成分均一化(1 000 $^{\circ}\text{C}$)(SEM 图像)

石+石英→石榴石+钾长石+花岗质熔体。将哈克图解与相关微量元素(如 Rb/Sr-Ba 等)变化特征相结合,表明寄主片麻岩内的脱水熔融作用由黑云母分解至逐步熔融的演化过程所构成(杨晓松等,2001),即体系中花岗质熔体被转熔石榴石捕获,结晶后形成纳米花岗岩包裹体,其均一化成分代表寄主片麻岩部分熔融作用形成的初始熔体。

2 南迦巴瓦岩群长英质片麻岩中纳米花岗岩特征

与泥质片麻岩相比,长英质片麻岩的熔融机制、熔体特征及岩浆作用意义同样是造山带中下地壳深熔作用的重要研究内容(曾令森和高利娥,2017)。通过对比观察研究,我们在南迦巴瓦岩群花岗闪长质—花岗质片麻岩的锆石中识别出典型的纳米花岗岩包裹体,从而为研究分析该类片麻岩的部分熔融作用提供了重要证据。锆石中的纳米花岗岩包裹体粒径一般在 10~20 μm,无放射状裂纹,子矿物组合为斜长石+石英+钾长石±黑云母(图 2),多分布于锆石变质增生边与残留核的边界(图 2e)。通过基质矿物组合和子矿物特征分析,显示该类包裹体是锆石捕获寄主岩石中长英质熔体而形成,其熔融过程应与寄主片麻岩中黑云母脱水熔融反应密切相关。使用 0.1 MPa 高温炉,在 1 atm、1 000 °C 和控制氧逸度(CO-CO₂)条件下,对该类纳米花岗岩包裹体进行均一化实验而获得了成分均一化的玻璃质熔体(图 2g,2h)。以花岗质片麻岩样品为例,主量元素结果显示,均一化的玻璃质熔体成分可以划分为两种主要类型(A 类和 B 类)。其中,A 类熔体的 SiO₂ 平均含量为 68.8%,Al₂O₃ 为 15.0%,FeO 为 0.6%,CaO 为 1.5%,K₂O+Na₂O 为 13.0%,Na₂O/K₂O 为 0.9,具有过碱质花岗岩特征;B 类熔体的 SiO₂ 平均含量为 76.4%,Al₂O₃ 为 13.5%,FeO 为 0.9%,CaO 为 1.3%,K₂O+Na₂O 为 7.7%,Na₂O/K₂O 为 0.6,具有过铝质花岗岩特征。对比表明,A 类熔体应该代表寄主片麻岩的初始熔体,B 类熔体则代表分异演化后的熔体,其成分特征可以与高喜马拉雅淡色花岗岩进行较好类比。上述观测分析结果表明,在深熔作用中,花岗质片麻岩中的天然熔体存在明显的分异演化过程。

3 结语

总体来说,我们以东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群代表性岩石单元中的纳米花岗岩包裹体为切入点,表明在大陆碰撞造山带中下地壳的深熔作用过程中,经历高压麻粒岩相变质作用的俯冲陆壳岩石能够较好地保留由黑云母脱水熔融作用形成的天然熔体包裹体,其总体成分特征以过铝质花岗岩为主,主量元素与微量元素特征能够有效反演寄主片麻岩部分熔融作用的递进式演化过程,这对于深入认识碰撞造山带中下地壳深熔作用与天然熔体特征具有重要启示意义。

References

- Carosi, R., Montomoli, C., Langone, A., et al., 2015. Eocene Partial Melting Recorded in Peritectic Garnets from Kyanite-Gneiss, Greater Himalayan Sequence, Central Nepal. *Geological Society, London, Special Publications*, 412:111–129.
- Cesare, B., Ferrero, S., Salvioli-Mariani, E., et al., 2009. “Nanogranite” and Glassy Inclusions: The Anatetic Melt in Migmatites and Granulites. *Geology*, 37(7): 627–630.
- Cesare, B., Acosta-Vigil, A., Bartoli, O., et al., 2015. What can We Learn from Melt Inclusions in Migmatites and Granulites? *Lithos*, 239: 186–216. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.09.028>
- Guilmette, C., Indares, A., Hébert, R., 2011. High-Pressure Anatetic Paragneisses from the Namche Barwa, Eastern Himalayan Syntaxis: Textural Evidence for Partial Melting, Phase Equilibria Modeling and Tectonic Implications. *Lithos*, 124(1–2): 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.09.003>
- Patino Douce, A. E., Harris, N., 1998. Experimental Constraints on Himalayan Anatexis. *Journal of Petrology*, 39(4):689–710. <https://doi.org/10.1093/petroj/39.4.689>
- Xiang, H., Zhang, Z.M., Dong, X., et al., 2013. High-Pressure Metamorphism and Anatexis during the Subduction of Indian Continent: Phase Equilibria Modeling of the Namche Barwa Complex, Eastern Himalayan Syntaxis. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11):3792–3802(in Chinese with English abstract).
- Yang, X.S., Jin, Z.M., Huenges, E., et al., 2001. Experimental Study on Dehydration Melting of Natural Biotite-Plagioclase Gneiss from High Himalayas and Implications for Himalayan Crust Anatexis. *Chinese Science Bulletin*, 46(3):246–250(in Chinese with English abstract).

Zeng, L. S., Gao, L. E., 2017. Cenozoic Crustal Anatexis and the Leucogranites in the Himalayan Collisional Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5):1420—1444(in Chinese with English abstract).

Zeng, L. S., Liang, F. H., Asimow, P., et al., 2009. Partial Melting of Deeply Subducted Continental Crust and the Formation of Quartzofeldspathic Polyphase Inclusions in the Sulu UHP Eclogites. *Science Bulletin*, 54(15): 2580—2594.

Zhang, Z. M., Kang, D. Y., Ding, H. X., et al., 2018. Partial Melting of Himalayan Orogen and Formation Mechanism of Leucogranites. *Earth Science*, 43(1): 82—98(in

Chinese with English abstract).

附中文参考文献

向华,张泽明,董昕,等,2013.印度大陆俯冲过程中的高压变质与深熔作用:东喜马拉雅构造结南迦巴瓦杂岩的相平衡模拟研究. *岩石学报*,29(11):3792—3802.

杨晓松,金振民,Huenges, E.,等,2001.高喜马拉雅黑云斜长片麻岩脱水熔融实验:对青藏高原地壳深熔的启示. *科学通报*,46(3):246—250.

曾令森,高利娥,2017.喜马拉雅碰撞造山带新生代地壳深熔作用与淡色花岗岩. *岩石学报*,33(5):1420—1444.

张泽明,康东艳,丁慧霞,等,2018.喜马拉雅造山带的部分熔融与淡色花岗岩成因机制. *地球科学*,43(1):82—98.

《地球科学》

2020 年 1 月 第 45 卷 第 1 期 要目预告

- 华北克拉通北缘新太古代清原绿岩带 BIF 与 VMS 共生矿床的构造背景及成因联系 张连昌等
 北拉萨块体唐江穷果岩体中由同源岩浆不同期次之间混合产生的暗色包体:一种新的暗色包体岩石成因 陈伟等
 Pb 同位素对努日铜钼钨多金属矿床成矿物源的制约 闫国强等
 石榴石 U-Pb 定年对山西义兴寨金矿床角砾岩筒时间的限制和金矿成因的指示 张立中等
 内蒙古海苏沟岩体中钼矿床成岩成矿年代学、地球化学及地质意义 谢元惠等
 广西苗儿山铀矿田张家铀矿床成矿时代:沥青铀矿微区原位测定 郭春影等
 东秦岭丹凤地区伟晶岩型铀矿矿化特征与成矿模式 王江波等
 冀中坳陷饶阳凹陷北部烃源岩生物标志物特征与油源对比 杨帆等
 海拉尔盆地呼和湖凹陷下白垩统烃源岩地球化学特征及热演化史 崔军平等