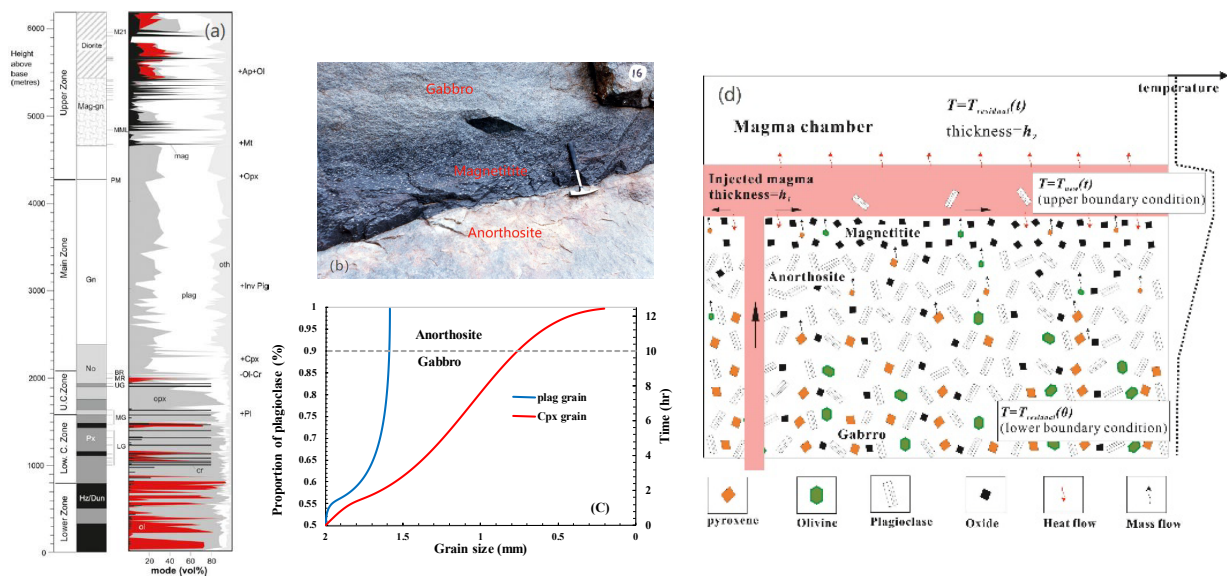


不平衡火成岩石学和矿床学

朱丹*

(中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

岩浆形成和冷却的驱动力是温度的升高和下降(地幔减压熔融可以等效地看作温度升高, 高于地幔橄榄岩的固相线), 这个过程可以定量地用传热偏微分方程精确描述(如果初始条件和边界条件能够根据地质背景精确建立)。地球上通常岩浆作用的温度变化率很小, 比如正常地幔潜能温度(1280°C)和正常扩张洋脊速度下(2 厘米/年), 地幔减压熔融的等效慢升温速率为 10^{-5} °C/年; 地球上典型层状岩体的平均降温速率通常为 10^{-3} °C/年。由于温度变化率非常小, 在这些过程中熔体和矿物能够保持化学平衡, 因此熔体和矿物的化学成分能够用热力学相平衡定量描述。因为目前地球上主要基性岩浆作用的地球动力学和化学演化能够用相平衡解释(McKenzie and Bickle, 1988), 所以热力学相平衡(鲍文反应)是火成岩石学的理论基石, Norman Levi Bowen 是这个学科的开山鼻祖(Grove and Brown, 2018)。不过层状岩体中由单矿物组成的岩石, 如斜长岩、磁铁矿和铬铁矿层, 成因一直不清楚(O'Driscoll and VanTongeren, 2017), 说明仅用热力学相平衡来解释就不够了, 需要高温体系的地球化学理论和实验结果研究这些不平衡过程(Lasaga, 1998; Zhang, 2008)。这些单矿物组成的岩石, 如布什维尔德岩体中的铬铁矿层和 Stella 岩体中的磁铁矿层(Maier et al., 2003), 不仅是世界上重要的 V-Ti 磁铁矿和铬铁矿矿床, 同时也是世界上重要的贫硫型岩浆铂族元素矿床。而贫硫型岩浆铂族元素矿床成因也一直不清楚(Naldrett, 2012)。



(a) 布什维尔德岩体层序和矿物组成比例; (b) 斜长岩-磁铁矿层; (c) 斜长岩形成模拟结果; (d) 斜长岩和磁铁矿层形成模型

图 1 布什维尔德岩体斜长岩和磁铁矿层形成模型

岩体生长的地球动力学研究表明岩体是通过岩浆的不断注入最终长大。当高温岩浆注入岩浆房时, 注入岩浆和下伏堆晶会发生短暂而急剧的温度变化(Huppert and Sparks, 1980), 注入岩浆的快速结晶和下伏堆晶的快速熔解是一个不平衡过程, 此过程化学演化用热力学相平衡知识来解释是不足的, 还需要地球化学动力学理论和实验结果来解释, 其中造岩矿物在玄武岩熔体中的熔解实验结果是关键。橄榄石和磁铁矿快

基金项目: 科学基金项目(批准号: XDB41020102; 42073062)

作者简介: 朱丹, 男, 1970 年生, 博士, 主要从事火成岩石学、矿床学和比较行星学研究。

速结晶的地球化学动力学过程是贫硫型岩浆铂族元素矿床形成的关键。下面通过两个实例研究来阐述上面的论断。

布什维尔德岩体是世界上最大和 PGE 矿产储量最多的岩体。岩体从下到上分为下带、主带、关键带和上带（图 1a）。下带和关键带岩石的造岩矿物是斜方辉石，在关键带中，铬铁矿是稳定的堆晶矿物。在关键带往上，斜长石成为稳定的正堆晶矿物。上带的下部，磁铁矿成为正堆晶矿物。岩体中有很多斜长岩层，主要分布在主带以上的岩相带中，磁铁矿层分布在上带中，它的下伏岩石无一例外的是斜长岩（图 1b）。岩石地球化学研究表明斜长岩层位置都有高温岩浆的注入(Yuan et al., 2017)。根据地球动力学和地球化学动力学的模拟结果，斜长岩和磁铁矿的成因模型如图 1d 所示。注入岩浆房的高温岩浆由于密度大，沿着岩浆房中的岩浆和堆晶界面注入，对堆晶快速加热，加热过程导致堆晶中的矿物溶解。溶解生成的多余粒间熔体向上迁移（由于粒间熔体含水，熔体密度小于斜长石），进入岩浆房。相对于斜长石，辉石和橄榄石的溶解速度很快，这样导致堆晶中的斜长石比例增加。岩浆反复幕式注入，导致堆晶中的斜长石比例不断增加，最终形成斜长岩。当岩体生长到上带时，此时岩体非常演化（堆晶中的辉石和橄榄石非常富铁，同时磁铁矿是正堆晶矿物），高温岩浆注入加热堆晶，产生的熔体富二价铁（因为 Fe 来自橄榄石和辉石）。这种富二价铁熔体进入岩浆房时，被快速氧化，导致岩浆只结晶磁铁矿。高温岩浆反复注入，最终导致磁铁矿层形成（图 1a）。数值模拟结果再现此过程（图 1c）。磁铁矿层的物质来源是下伏岩石的橄榄石和辉石，整个过程就好像是从辉长岩堆晶中挑选富铁橄榄石和辉石（堆晶变成斜长岩），把它们放置在斜长岩上，然后转变成磁铁矿。

对于层状岩体中斜长岩的成因，基于平衡热力学理论的经典解释是含斜长石斑晶的岩浆注入到岩浆房中，通过物理沉降形成(Yuan et al., 2017)。这种经典解释的最大问题就是：自然界几乎没有只含有斜长石斑晶的玄武质岩浆。斜长石通常与辉石或者橄榄石同时结晶。因为根据地幔和球粒陨石的实验岩石学和热力学计算，由于它们的 Al 含量不高，斜长石的结晶都是晚于橄榄石和辉石（玄武岩中斜长石菊花状斑晶是枝晶，因此也是不平衡过程形成的，另文讨论）。这个问题换一种说法就是为何辉石停止结晶了(Wager and Brown, 1968)。这是经典火成岩石学深入研究超过 50 年一直没有解决的问题。

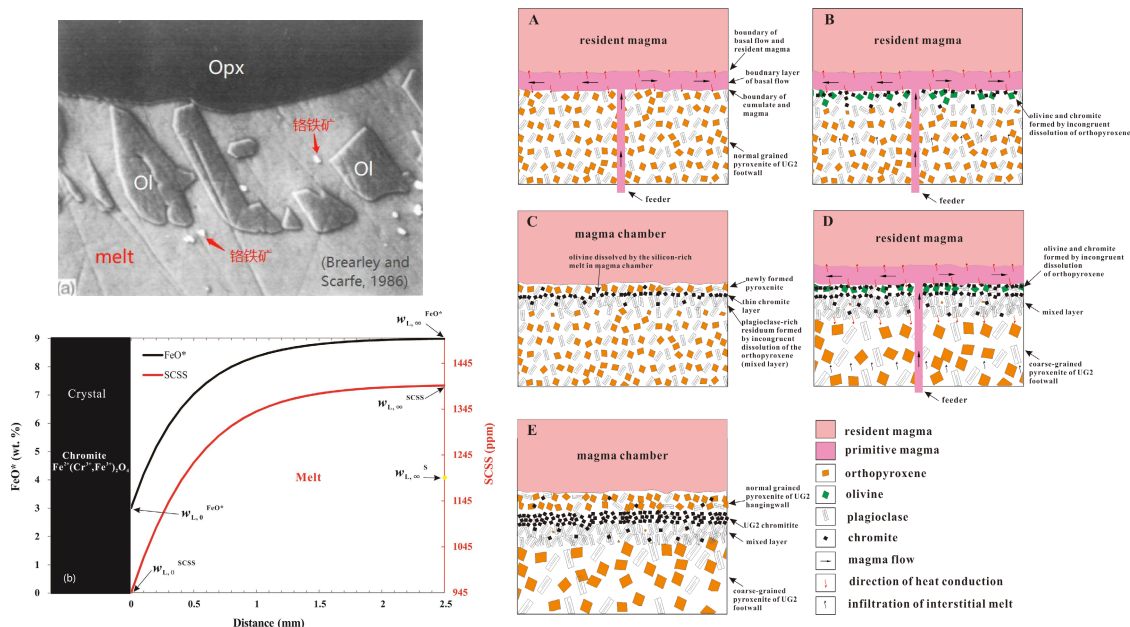


图 2 布什维尔德岩体铬铁矿和硫化物饱和模型

关键带中的铬铁矿层的成岩成矿模型（图 2）：高温岩浆注入导致斜方辉石发生不一致熔解，这个过程导致橄榄石在正在熔解的斜方辉石界面处快速生长(图 2a)。快速生长的橄榄石界面饱和铬铁矿和铬铁矿界面饱和硫化物（铬铁矿中的 Cr 主要来自斜方辉石；快速生长的铬铁矿界面由于极度贫铁，导致硫溶解度变低，从而导致硫化物形成）(图 2a 和 2b)。当岩浆房恢复到正常演化温度时，不一致熔解形成的橄榄石发生溶解

(岩浆房熔体不饱和橄榄石), 富铬铁矿的薄层形成(由硫化物原因, 此层同时富 PGE)。因为岩浆房熔体也不饱和硫化物, 硫化物也发生熔解。由于块金效应和一些硫化物被铬铁矿包裹以及铬铁矿粒度小(熔体渗透性小), 导致硫化物并不完全重新熔解。这个过程反复发生, 形成贫硫型富 PGE 层状铬铁矿矿床(图 2)。数值模拟结果再现了此过程。另外, 在整体不饱和硫的岩浆中快速生长的磁铁矿也会导致硫在磁铁矿界面饱和。

熔融和结晶过程中, 经典相平衡火成岩石学不考虑矿物的颗粒尺寸, 这是与不平衡火成岩石学的一个关键区别。相平衡实验的初始物质都是采用硅酸盐玻璃或者岩石粉末, 熔融发生很快, 细粒矿物发生熔解的速度差异难以区分(真实的地幔熔融实际上是地幔橄榄岩的组成矿物在硅酸盐熔体中的熔解, 但人们习惯称为地幔熔融)。据作者所知, 目前仅有一个采用火成岩块体作为初始熔融物质的实验报道, 实验结果表明斜长石的熔解速度大于辉石(Philpotts et al., 1998), 可以作为斜长岩形成的实验证据, 虽然原作者的研究目的并非如此。地球和太阳系类地行星的硅酸盐部分, 可以看作是矿物颗粒组成的“颗粒星球”, 这些矿物颗粒的熔解和结晶是类地行星幔和壳形成演化的关键过程。不过目前考虑矿物粒度的熔融实验还非常少, 不平衡火成岩的发展和完善还需要大量的实验研究。

系统和定量地描述自然界发生的熔融和结晶过程, 不仅需要热力学和地球化学动力学知识, 还需要地球动力学知识(geodynamics)。这些过程都是混沌现象(蝴蝶效应), 需要根据地质背景和应用地球动力学知识描述和设定物理(温度和运动速度等)和化学初始条件和边界条件。例如地幔熔融过程中不同的地幔上涌速度(初始条件不同), 熔融生成岩浆量有很大差异, 比如超慢速洋中脊和非岩浆裂谷几乎不产生岩浆, 而正常的洋中脊地幔上涌速度产生的岩浆为 6-7 km。当边界条件不同时(比如月球岩浆洋冷凝结晶过程), 结果就会有根本的不同, 这些不平衡过程可以形成全球尺度的岩石, 比如斜长岩月亮形成(另文讨论)。太阳系星云凝聚、星子和行星增生形成和演化过程中, 温度变化通常非常快, 会导致很多化学动力学现象(包括微量元素和同位素动力学分馏), 这样才会形成多姿多彩的类地行星世界。

一些世界中最重要岩浆矿床, 比如布什维尔岩体中的梅林司基层(Merensky reef), 尽管发现已经超过 100 年, 深入研究近一个世纪, 成因依然不清楚。相信从地球化学动力学和地球动力学的角度以及结合超临界流体的理论和实验结果, 也就是用不平衡的观点来研究层状岩体中的岩石和矿床, 不久的将来将会有重要的突破。正如 Alan Boudreau 所说, 层状岩体的研究才刚刚开始(Boudreau, 2017), 我们在岩石学和矿床学的很多基础和重大问题上还没有触及到真相。

参考文献:

- Boudreau, A. E., 2017, A Personal Perspective on Layered Intrusions: Elements, v. 13, no. 6, p. 380-381.
- Grove, T. L., and Brown, S. M., 2018, Magmatic processes leading to compositional diversity in igneous rocks: Bowen (1928) revisited: American Journal of Science, v. 318, no. 1, p. 1-28.
- Huppert, H. E., and Sparks, R. S. J., 1980, The fluid dynamics of a basaltic magma chamber replenished by influx of hot, dense ultrabasic magma: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 75, no. 3, p. 279-289.
- Lasaga, A. C., 1998, Kinetic Theory in the Earth Sciences, Princeton University Press.
- Maier, W. D., Barnes, S.-J., Gartz, V., and Andrews, G., 2003, Pt-Pd reefs in magnetitites of the Stella layered intrusion, South Africa: A world of new exploration opportunities for platinum group elements: Geology, v. 31, no. 10, p. 885-888.
- McKenzie, D., and Bickle, M. J., 1988, The Volume and Composition of Melt Generated by Extension of the Lithosphere: J. Petrology, v. 29, no. 3, p. 625-679.
- Naldrett, A. J., 2012, Fundamentals of magmatic sulfide deposits, in Li, C. S., and Ripley, E. M., eds., Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry, and Genesis, Volume 62, Reviews in Economic Geology, p. 1-50.
- O'Driscoll, B., and VanTongeren, J. A., 2017, Layered Intrusions: From Petrological Paradigms to Precious Metal Repositories: Elements, v. 13, no. 6, p. 383-389.
- Philpotts, A. R., Shi, J. Y., and Brustman, C., 1998, Role of plagioclase crystal chains in the differentiation of partly crystallized basaltic magma: Nature, v. 395, no. 6700, p. 343-346.
- Wager, L. R., and Brown, G. M., 1968, Layered Igneous Rocks, Oliver & Boyd, Edinburgh.
- Yuan, Q., Namur, O., Fischer, L. A., Roberts, R. J., Lü, X., and Charlier, B., 2017, Pulses of Plagioclase-laden Magmas and Stratigraphic Evolution in the Upper Zone of the Bushveld Complex, South Africa: Journal of Petrology, v. 58, no. 8, p. 1619-1643.
- Zhang, Y., 2008, Geochemical kinetics, Princeton University Press.