

问题
讨论

关于岩浆热液矿床形成的几个问题

——以斑岩型矿床为例*

朱永峰 艾永富 赵永超

(北京大学地质学系, 北京)

提 要: 岩浆在其放气作用过程中能向地表释放出大量的金属元素, 如 Cu、Mo、Au, 如果存在适当的富集机制, 从岩浆熔体中释放出来的成矿元素在一定的地质环境中聚集并沉淀就能够形成工业矿体。岩浆液态不混溶作用是导致分散于岩浆熔体中的成矿元素有效富集并最终形成工业矿体的重要机制。在封闭体系中, 随岩浆结晶作用的进行, 挥发性组分会在残余岩浆中不断聚集并最终析出而形成岩浆热液。F 和 B 因易与 Si、Al、Na、K 等造岩元素结合而倾向于固定在熔体结构中, 并在结晶作用发生时进入矿物晶格中, 因此不易从岩浆熔体中析出而进入流体中。蚀变与矿化是两个独立的地质作用, 尽管矿化与蚀变相伴生, 但成矿作用的发生与否与蚀变作用没有本质上的联系。

主题词: 岩浆流体 热液矿床 成矿作用

产在浅成侵入体中及其周围的斑岩铜矿和斑岩钼矿就提供了世界上工业用铜和钼的一半以上^[5]。岩浆热液搬运金属成矿元素并使之富集成矿, 形成具有重要经济意义的一类矿床——岩浆热液矿床。岩浆热液如何从硅酸盐熔体中析出而导致成矿作用的发生? 对这一问题的深入讨论具有极为重要理论和实践意义。

1 岩浆是金属成矿元素的直接供给者

有关岩浆与斑岩矿床之间的成因关系已被认真地讨论过^[6]。形成这类矿床的金属及其载体是从与之相关的岩浆中活化出来的。对世界各地现代火山喷气成分的测量发现, 岩浆在其放气作用过程中能向地表释放出大量的金属元素 Cu、Mo、Au。例如, 新西兰的 White 岛火山在过去大约一万年的活动历史时间内, 每年向地表排放出 110 t 铜和 350 kg 金, 同时释放出 13 万吨 SO₂, 19 万吨 H₂O, 5 万吨 CO₂^[6]。美国阿拉斯加的万烟谷火山群在其持续三天的喷发过程中就向空中排出了大约 6000t 铜^[7,9]。与斑岩矿床紧密相关的浅成侵入体中的石英矿物中存在大量的熔融包裹体, 在这些包裹体中存在一些大小不等的气泡, 铜元素明显地富集在这种气泡中^[9]。这些地质现象清楚地表明, 在岩浆分异演化过程中, 铜强烈地富集在与硅酸盐熔体处于平衡状态的流体(气)相中。这一结论也得到了实验室证据的支持^[10], 即铜和钼优先进入与硅

* 本研究得到国家教委留学回国人员资助费资助

朱永峰, 男, 1965 年生, 博士后, 副教授, 从事岩石学、矿床地球化学的教学和研究工作。邮政编码: 100871
1994-12-17 收稿, 1995-6-7 修改回。

酸盐流体平衡的流体相中。因此,如果存在适当的富集机制,从岩浆熔体中释放出来的成矿元素在一定的地质环境中聚集并沉淀就能够形成工业矿体。

2 岩浆流体

许多岩浆在其上升穿过中上地壳时已含有分异出的自由流体。有资料表明,在深度大于30km环境中,各种大地构造环境中的玄武岩浆饱和 CO_2 和 SO_2 流体;1991年菲律宾Mount Pinatubo火山喷发前的岩浆熔体中就包含有大量不混溶的 SO_2 流体^[11]。相对 CO_2 , H_2O 在岩浆熔体中的溶解度较高,因而, H_2O 在地壳深处从硅酸盐熔体中分离出形成自由流体的可能性较小,即地壳深处形成的岩浆流体中 H_2O 所占的比例比较小。水在硅酸盐熔体中的溶解度随着压力的降低而减小,因此,它会不断从硅酸盐熔体中分离,并逐渐取代 CO_2 而成为独立的流体中的主要组成部分。因此,火山喷发及岩浆放气时析出流体的主要组分是水,而深部的流体包裹体的主要组成部分是 CO_2 等难溶气体。 SO_2 及其它气体加入到岩浆体系中能降低水及 CO_2 在流体相中的活度,导致甚至在气体含量很低时熔体也达到流体过饱和状态,从而降低了它们在熔体中的溶解度。如果岩浆在上地壳环境中已处于流体饱和状态,那么,控制流体组成的主要因素是什么?什么样的流体最可能从岩浆熔体中提取金属成矿元素而使之富集成矿?

压力对岩浆流体的组成有一定的控制作用,高压条件下,水在硅酸盐熔体中的溶解度较高^[1],因此,此时形成的岩浆流体中水的含量相对降低,流体的主要组成是 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 H_2 等难溶性气体;随着压力的降低,水不断从硅酸盐熔体中分离出而进入流体相中,从而改变了流体的组成。

岩浆熔体中水可能以分子水和羟基水两种形式存在。形成岩浆流体的水只能来自分子水,这是因为分子水在熔体结构中仅以分子键或氢键与其它元素结合,其间的结合力弱而易被破坏,从而使分子水析出而进入岩浆流体中;羟基水在熔体结构中一般与其它元素以共价键形式结合而不易从熔体结构中析出并进入流体中,在结晶作用发生时,这种羟基水倾向于进入矿物晶格(如角闪石和黑云母)中。在封闭体系中,随岩浆结晶作用的进行,分子水会在残余岩浆中不断聚集并最终析出而形成岩浆热液。相对水来说, CO_2 、 CO 、 CH_4 、 H_2 等在硅酸盐熔体中的溶解度较低,因此,它们在岩浆放气作用时首先被排出。F和B因易与Si、Al、Na、K等造岩元素结合而倾向于固定在熔体结构中,并在结晶作用发生时进入矿物晶格中,因此不易从岩浆熔体中析出而进入流体中。

岩浆流体对斑岩矿床的形成起主导作用。热液蚀变、矿化及流体包裹体研究表明:形成这类矿床的热液的初始温度很高(500~600℃),其组成以岩浆流体为主,这种热液中高密度流体和低密度气体相共存。斑岩体本身被蚀变并且具有环带状分布:中心是黑云母、钾长石带,向外转变为石英、绿泥石带,而后被绢云母、黄铁矿带所覆盖,最外围是由绿泥石、绿帘石和钠长石组成的青磐岩化带。对内华达州Yerington矿区内斑岩铜矿的稳定同位素研究表明^[12],导致钾化及铜矿化的高盐度流体来自岩浆本身,其形成温度为500~600℃,同位素组成为 $\delta^{18}\text{O}=6.5\text{‰}\sim 7.5\text{‰}$, $\delta\text{D}=-60\text{‰}\sim -80\text{‰}$;而引起绢母化的流体温度则相对较低(400℃以下),其同位素组成为 $\delta^{18}\text{O}=3\text{‰}\sim 6\text{‰}$, $\delta\text{D}=-20\text{‰}\sim -55\text{‰}$,这种流体与铜矿化无关,而且主要由非岩浆流体组成。斑岩矿床与斑岩体在空间上的密切关系强调岩浆在矿化过程中的成因意义。

3 金属成矿元素富集的主要途径

结晶作用是岩浆中成矿元素富集的重要途径。岩浆中结晶出的矿物主要是硅酸盐及氧化物,一些不能进入这些相中的元素(不相容元素)在熔体中的含量会不断富集。然而,成矿元素在熔体中的分配行为是晶体结构、熔体组成、熔体的氧化状态以及矿物结晶时温度和压力的函数。例如,Mo和Zn在Fe-Ti氧化物及金红石含量低的岩浆中较为富集^[8],富SiO₂的花岗岩中缺失铜矿化,这可能是由于早期磁黄铁矿自熔体中结晶出所致,因为磁黄铁矿是Cu(及Au)的沉淀剂,它的晶出使熔体中Cu和Au的含量较低而不能富集成矿;相反,Mo在富SiO₂的花岗岩中能富集成矿。因而,结晶分异作用会导致Mo/Cu比值增高。尽管如此,甚至在强烈的结晶分异作用发生时,岩浆中的金属含量也远不能达到斑岩矿床所需的工业品位。例如,花岗岩中W和Mo的平均含量约为 1.5×10^{-6} ,而斑岩Mo矿的品位在 1000×10^{-6} 以上,W的品位在 5000×10^{-6} 以上。因此,需要其它作用使分散在岩浆中的金属成矿元素进一步富集以便形成工业矿体。岩浆液态分离作用很可能是导致分散于岩浆熔体中的成矿元素富集而形成工业矿体的有效机制^[2]。

花岗岩—KBF₄—Na₂MoO₄(—WO₃)体系在1250℃条件下(常压)呈均一熔融状态,Mo、W及其它元素(F、B、Ca、K、Na等变网离子)均匀地分布在熔体网络结构中,当温度降低至1000℃时,这些元素从岩浆熔体中分离出形成成矿熔体^[2]。这种成矿熔体中MoO₃和WO₃含量分别可达50.0%(重量)和46.0%,这种熔体中同时也富集Ca,CaO的含量可高达25.0%。依这种组成特征,并结合红外光谱谱图特征我们发现在成矿熔体中存在Ca—O—Mo、Ca—F、Mo—O—W、W—O、Mo—O基团。这说明均匀的岩浆熔体当温度较低时能分离成两种熔体,一种是花岗质熔体,其中极少含成矿元素和挥发性组分(H₂O、F、B等);而另一种与之不混溶的熔体则主要由W、Mo的氧化物和挥发性组分组成。显然,后者自身冷凝固结晶即可形成斑岩矿体。在岩浆液态不混溶作用发生时,岩浆体系中的成矿元素和挥发性组分强烈地从硅酸盐熔体中分离出而形成独立的成矿熔体。这种成矿熔体起初以液滴状分散于硅酸盐熔体中,由于它富含挥发性组分而具有较低的密度和粘度,因而会如同岩浆熔体中的气泡不断向岩浆房顶部聚集^[3],并在迁移过程中不断合并长大,最终在岩浆房顶部形成大规模的工业矿体。

导致这种岩浆液态不混溶作用发生的根本原因是硅酸盐熔体结构的有序化过程^①:原始均匀的含有微量成矿元素的硅酸盐熔体随着温度的降低,熔体结构发生有序化调整,使分散于熔体网络中的成矿元素及挥发性组分相对集中,这种效果随熔体结构有序化程度的增强而加强,其结果是形成硅酸盐熔体和成矿熔体两个不混溶熔体。

4 蚀变与矿化的关系问题

由于斑岩矿床中普遍发育的蚀变现象,以及蚀变分带和矿化分带之间的对应关系,人们试

① Zhu Y F, Zeng Y S, Ai Y F, 1996, Experimental evidence for a relationship between liquid immiscibility and ore-formation in felsic magmas. *Applied Geochemistry*

② Zhu Y F, Ai Y F, 1994, Liquid immiscibility in felsic magma and ore-forming process. In: Abstracts of IAGOD, Aug. Beijing, 415~416

图找到蚀变作用与矿化作用之间的相互关系。对这一问题的探讨使人们把蚀变和矿化两种作用必然地联系起来,并得出蚀变导致了矿化的结论^[4]。蚀变作用和矿化作用是否是同一时间发生的?我们认为斑岩矿床的蚀变与矿化是两个独立的地质作用,且二者并不同时发生,它们各自的物理化学条件不完全一致,尽管矿化与蚀变相伴生,但成矿作用的发生与否与蚀变作用没有本质上的联系,蚀变强烈的斑岩体很多,但斑岩矿床却很少,就说明这一点。

初始均匀的长英质岩浆通过结晶分异作用形成与硅酸盐熔体不混溶的富含金属成矿元素和挥发性组分的“矿浆”,这种携带大量挥发性组分“矿浆”因与硅酸盐熔体之间的密度差而上升并聚集在岩浆房顶部,应当指出的是,这种矿浆实质上是一种富含挥发性组分和成矿元素的硅酸盐熔体。岩浆演化过程中出现的这种液态分离作用能使成矿金属元素初步得到富集。与造岩元素相比,挥发性组分(F、B、H₂O等)更易和成矿元素聚合形成各种离子团,因为挥发性组分与碱金属和成矿元素之间的亲和力远远大于它们与Si、Al之间的亲和力。最近的实验研究^[2]①明确地展示了花岗质岩浆中发生的液态分离作用与成矿作用之间的密切关系。

上述这种岩浆液态分离作用把岩浆房分离成两个不混溶的部分,岩浆房上部是聚集着富含金属成矿元素和挥发性组分(包括碱金属)的“矿浆”,而下部是较少含挥发性组分的硅酸盐熔体。这种矿浆形成以后,其中挥发性组分的分压会不断地增大,当其中的挥发性组分的压力增大至一定压力并超过岩浆房顶部围岩的压力时,“矿浆”会发生再沸腾,使挥发性组分以气相的形式从中分离出去,这一过程常引起强烈的爆破作用而使其顶部的围岩角砾化,这是斑岩矿床中最常见的地质现象。富含挥发性组分矿浆的再沸腾有足够的形成规模巨大的角砾岩体。大量挥发性组分与矿浆的分离使熔体中的压力突然降低,从而可能使均匀的“矿浆”分离成不混溶的两种熔体:硅酸盐熔体和成矿熔体。而且,压力的降低会引起熔体的结晶作用,导致硅酸盐矿物大量结晶,而金属成矿元素也会因温度和压力的降低而以硫化物或氧化物的形式沉淀,形成块状或浸染状矿体。与此同时,各种挥发性组分与其周围的岩石发生反应,导致一些蚀变现象的发生。因此,成矿作用常常与强烈的蚀变作用相伴随。

5 结 论

本文试图对与岩浆活动有关的成矿作用中存在的一些问题进行理论分析,以便对一些常见的地质现象作出较为合理的解释。我们的观点是:岩浆是形成工业矿体的元素主要供应者;岩浆液态不混溶作用是导致分散于岩浆熔体中的成矿元素有效富集并最终形成工业矿体的重要机制;蚀变作用与矿化作用虽然紧密伴生,但二者之间的关系是“兄弟”而非“父子”关系。

参 考 文 献

- 1 朱永峰等. 水在硅酸盐熔体中的溶解机理论——水与硅酸盐熔体的反应. 地质地球化学, 1994, (6)
- 2 朱永峰等. 长英质岩浆中的液态不混溶与成矿作用关系的实验研究. 岩石学报, 1995, 11(1): 1~8
- 3 朱永峰. 长英质岩浆中不混溶流体的运移机理. 地学前缘(矿床学专辑), 1994, 1(3/4): 119~126
- 4 胡受奚等. 矿床学. 北京:地质出版社, 1982

① Zhu Y F, Zeng Y S, Ai Y F. 1996, Experimental evidence for a relationship between liquid immiscibility and ore-formation in felsic magmas. Applied Geochemistry.

- 5 Evans A M. Ore geology and industrial minerals, an introduction (3rd edition). Oxford, Blackwell Sci. Pub., London, 1993
- 6 Sillitoe R H. The tops and bottoms of porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, 1973, 68: 799~815
- 7 Lowenstern J B. Evidence for a copper-bearing fluid in magma erupted at the Valley of ten thousand smokes, Alaska. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1993, 114: 409~421
- 8 Hedenquist J W, Lowenstern J B. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 1994, 370: 519~527
- 9 Lowenstern J B et al. Evidence for extreme partitioning of copper into a magmatic vapor phase. *Science*, 1991, 252: 1345~1460
- 10 Candela P C, Holland H D. The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, 48: 373~380
- 11 Wallace P J, Gerlach T M. Magmatic vapor source for sulfur dioxide released during volcanic eruptions; evidence from Mount Pinatubo. *Science*, 1994, 265: 497~499
- 12 Dilles J H et al. Oxygen and hydrogen isotopic characteristics of hydrothermal alteration at the Ann Mason porphyry copper deposit, Yerington, Nevada. *Econ. Geol.*, 1992, 87: 44~63

SOME PROBLEMS CONCERNING THE FORMATION OF MAGMATIC HYDROTHERMAL DEPOSITS

Zhu Yongfeng, Ai Yongfu and Zhao Yongchao

(Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

Key words: magmatic fluid, hydrothermal deposit, ore-forming process

Abstract

Through convection, hydrothermal system derived from magmatic fluids causes the diffusion of large proportion of heat from the depth of the earth to the surface. At the same time, these fluids transport metals, forming a very important class of ore deposit, namely hydrothermal deposits. Porphyry copper and molybdenum deposits, for example, provide more than half of these metals for the world. Magmatic fluids serve as the major source for many components in hydrothermal deposits. These components consisting of metallogenic elements and their carriers find their ways to and eventually get concentrated in magmatic fluids. Under low pressure (e. g. in a volcanic environment), some ore-forming elements such as Cu, Au, Mo and S might get concentrated in magmatic fluids, which, in turn, can form economic deposits once the proper mechanism for metallic concentration comes into being. In addition, the immiscibility of magmatic liquids might cause the separation of the magmatic system into two immiscible parts: silicate melt and fluids, with the latter being enriched in ore-forming elements and volatiles. In this paper, the following points are emphatically pointed out: (1) ore-forming elements in hydrothermal deposits are derived directly from magma; (2) magmatic fluids play a leading role in the formation of hydrothermal deposits; (3) magmatic liquid immiscibility seems to be an important factor causing ore-forming elements to be separated from silicate melt and get concentrated; (4) though closely associated with mineralization, alteration is not the cause responsible for the ore-forming process.