

斑岩型铜(金)矿床成矿元素大规模堆积制约机制研究

梁华英¹, 孙卫东¹, 苏文超², 莫济海¹, 胡光黔¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

斑岩型矿床规模大, 易开采, 是 Cu-Mo 最主要类型矿床, 亦是 Au 的重要类型矿床 (Halter, 2002), 因而近数十年来斑岩型铜(金)矿床一直是矿床学研究热点课题之一。研究结果表明, 斑岩铜(金)矿床与高氧逸度岩浆岩具有紧密的共生关系。这和铜、金及硫等元素在岩浆中的地球化学行为有关。因此, 为了分析岩浆形成演化与铜金大规模堆积成矿的关系, 人们对铜和硫在岩浆中的地球化学行为作了大量的工作。

现在的研究表明, 在低氧逸度条件下, 岩浆中 S 主要以 S²⁻形式存在于岩浆中, S²⁻在硅酸盐熔体中溶解度低 (Carroll 和 Rutherford, 1985), 因此在低氧逸度条件下结晶分异的岩浆易达还原硫饱和, 硫化物释出。Cu 在硫化物相和硅酸盐熔体之间的分配系数很大, $D_{Cu}^{硫化物/硅酸盐熔体} = 550 \sim 10000$ (Halter 等, 2002; Gaetan 和 Grove, 1997), 如果岩浆经历早期硫化物分离, 那么岩浆中绝大部分铜元素进入早期堆晶岩中的硫化物相中, 而难以进入岩浆晚期岩浆热液流体中, 不利于斑岩铜矿床的形成。在较高氧逸度条件下, 岩浆中的硫主要以 SO₂ 存在于岩浆中, 氧化态硫在岩浆中溶解度较高 (Gaetan 和 Grove, 1997; 朱永峰, 1998), 岩浆中不易达硫饱和, 即使达硫饱和亦只形成不富铜的石膏矿物, 岩浆中的铜在岩浆结晶分异过程中富集。铜在流体与硅酸盐熔体之间的分配系数也很大, $D_{Cu}^{流体/硅酸盐熔体} \leq 2700 \sim 316$ (Simon 等, 2006; Zajacz 等, 2008), 流体中含 S 时, $D_{Cu}^{流体/硅酸盐熔体}$ 值增大 2~5 倍 (Simon 等, 2006); Cu 也易进入低 C 低密度的气相中 (Zajacz 等, 2008)。因此, 当岩浆达流体饱和时, 岩浆结晶分异过程中富集的铜等成矿元素进入岩浆热液流体

中。铜在岩浆中地球化学行为表明, 含水氧化岩浆有利于斑岩铜矿床的开成, 斑岩铜(金)矿床多和氧化态岩浆岩紧密共生 (Sillitoe, 1997; Mungall, 2002; Audeta 等, 2004; Sun 等, 2004; Liang 等, 2006-2009)。斑岩成矿系统岩浆阶段硫主要是氧化态硫, 而在成矿阶段发生大量硫化物沉淀析出, 硫主要是还原态硫。因此, 在成矿早期, 硫从氧化态还原成还原态在成矿中起着重要的作用, 分析成矿系统硫从氧化态硫还原成还原态硫对深入了解斑岩铜(金)矿床成矿元素大规模堆积的制约机制有着重要的意义。

与中酸性岩浆作用有关夕卡岩型铜(金)矿床成矿早期多发生磁铁矿化, 斑岩型铜(金)矿床在成矿早期钾化阶段也多发生磁铁矿化。磁铁矿 (Fe₃Q) 由氧化铁 (Fe₃Q) 和氧化亚铁 (FeO) 组成, 约 2/3 为 Fe²⁺, 1/3 为 Fe³⁺。我们在玉龙斑岩铜(钼、金)矿床中发现, 石英斑晶中含石膏子矿物而未发现硫化物, 成矿早期矿化小脉石英中含石膏子矿物及硫化物子矿物 (Liang 等, 2009) 而主成矿阶段则主要为硫化物。这表明岩浆阶段硫主要为氧化态硫、成矿早期氧化态硫和还原态硫共存, 主成矿阶段成矿系统中的硫则以还原态硫为主。玉龙斑岩铜(钼、金)矿床磁铁矿交代早期结晶析出的角闪石及云母等富还原铁矿物, 磁铁矿交代早期结晶析出的富亚铁矿物, 可使岩浆系统中的氧化态硫还原成还原态硫 ($12FeO + H_2SO_4 = 4Fe_3Q + H_2S$), 有利于斑岩成矿系统中硫化物的沉淀析出; 在钾化阶段浸染状磁铁矿和钾长石紧密共生, 钾化阶段磁铁矿结晶析出, 也可使成矿系统中氧化态硫还原成为还原态硫 [$8KF_3AlSi_3Q_0(OH)_2 + 2H_2SO_4 = 8KAlSi_3Q_8 + 8Fe_3Q + 8H_2O + 2H_2S$], 为硫化物大规模结晶析出提供了丰富的物质基础; 此外, 岩浆热液系统中的铁在高压条件下以气相形迁移 (Simon 等,

基金项目: 中国科学院创新项目 (KZCX2-YW-Q04-2); 国家自然科学基金 (40772054, 40472049)

2004), 主要以气相迁移的亚铁被氧化形成磁铁矿 ($12\text{FeCl}_2 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 = 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + 24\text{HCl} + \text{H}_2\text{S}$), 也使岩浆中的氧化态硫还原成为还原态硫, 有利于硫化物结晶析出。

人们已对中酸性岩浆成矿系统成矿元素大规模堆积制约机制大量的工作, 提出斑岩铜(金)矿床成矿元素沉淀析出控制因素主要有: 温度降低、不同来源流体混合、水岩反应等 (Hemley

和 Hunt 2002, Hedenquist等, 2002, Herzaikhan等, 1999, Liu和 McPhail, 2005)。我们的研究结果表明, 除上述因素外, 岩浆成矿系统在成矿早期阶段发生磁铁矿化, 使成岩系统中的氧化态硫在成矿早期阶段还原成为还原态硫, 为硫化物大规模沉淀析出提供了充足物质基础, 在斑岩铜(金)矿床成矿中也起着重要的作用 (Simon等, 2004)。

参 考 文 献:

- 朱永峰. 硫在岩浆熔体中的溶解行为综述. 地质科技情报, 1998, 17: 35-38.
- Audebert A, Petke T, Dolejs D. Magnetic anhydrite and calcite in the ore-forming quartz-monzodiorite magmatism at Santa Rita, New Mexico (USA): genetic constraints on porphyry Cu mineralization. *Lithos*, 2004, 72: 147-161.
- Carroll R, Rutherford M J. Sulfide and sulfate saturation in hydrous silicate melts. In Proc 15th Lunar and Planetary Science Conf (Part 2). *J Geophys Res Suppl*, 1985, 90: 601-612.
- Gaetani G A, Grove L T. Partitioning of moderately siderophile elements among olivine-silicate melt and sulfide melt: constraints on core formation in the Earth and Mars. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61: 1829-1842.
- Halter W E, Petke T, Heinrich C A. The origin of Cu/Au ratios in porphyry-type ore deposits. *Science*, 2002, 296: 1844-1846.
- Hedenquist J W, Arribas A J, Reynolds T J. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 2002, 93: 373-404.
- Hemley J J, Hunt J P. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems. 2. Some general geologic applications. *Economic Geology*, 2002, 87: 23-43.
- Herzaikhan A, Williams Jones A E, Gammons C H. Factors controlling copper solubility and chalcopyrite deposition in the Sungun porphyry copper deposit. *Iran Mineralium Deposita*, 1999, 34: 770-783.
- Liang H Y, Campbell I H, Allen C, Sun W D, Liu C Q, Yu H X, Xie Y W, Zhang Y Q. Zircon $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet. *Mineralium Deposita*, 2006, 41: 152-159.
- Liang H Y, Sun W D, Su W C, Zaman R E. Porphyry copper-gold mineralization at Yulong, China: promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration. *Economic Geology*, 2009, 104: 587-596.
- Liu W H, McPhail D C. Thermodynamic properties of copper chloride complexes and copper transport in magmatic hydrothermal solutions. *Chemical Geology*, 2005, 221: 21-39.
- Mungall J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 2002, 30: 915-918.
- Sillitoe R H. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1997, 44: 373-388.
- Simon A C, Petke T, Candela P A, Piccoli P M, Heinrich C A. Magnetite solubility and iron transport in magmatic-hydrothermal environments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 4905-4914.
- Simon A C, Petke T, Candela P A, Piccoli P M, Heinrich C A. Copper partitioning in a melt-vapor-brine-magnetite-pyrrhotite assemblage. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70: 5583-5600.
- Sun W D, Arculus R J, Kamenskikh V S, Bains R A. Release of gold-bearing fluids in convergent margins: prompted by magnetite crystallization. *Nature*, 2004, 431: 975-978.
- Zajacz Z, Halter W, Petke T. Determination of fluid/melt partition coefficients by LA-ICP-MS analysis of coexisting fluid and silicate melt inclusions: Controls on element partitioning. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 2169-2197.