

文章编号:0258-7106(2003)01-0095-04

# 斑岩铜矿中铂族元素的研究现状及展望\*

李晓峰 毛景文 张作衡

(中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

**摘要** 文章对当前国内外斑岩铜矿中铂族元素的研究现状进行了较为详细的阐述,指出研究与铂族元素矿化有关的斑岩铜矿的流体包裹体及其富集成矿过程,以及铂族元素对斑岩铜矿成矿环境、成岩岩浆的起源和成矿物质来源示踪是该领域的发展方向 and 前沿。

**关键词** 地质学 铂族元素 金 斑岩铜矿 综述

**中图分类号**:P618.53;P618.51

**文献标识码**:A

斑岩型铜矿在国内外铜矿资源中占有重要的地位。在我国各类铜矿中,斑岩型铜矿探明储量居首位,占总储量的 45.5%(项仁杰等,1999)。自从 Eliopoulos(1991)首次对希腊北部 Skouries 斑岩铜矿中的铂族元素和金进行研究以来,斑岩铜矿中的铂族元素就引起了人们极大的研究热情。地质学家从不同的角度探讨了富含铂族元素的斑岩铜矿的成矿环境,斑岩铜矿中铂族元素的含量、分布和赋存状态,与 Cu(Au)矿化的关系以及铂族元素的沉淀机制(Eliopoulos et al.,1991;Tarkian et al.,1995;Tarkin et al.,1999;Econmou-Eliopoulos et al.,2000;Stribrny et al.,2000;Sotnikov et al.,2001),取得了可喜的成就。斑岩铜矿中铂族元素的研究,不仅开阔了对铂族元素地球化学行为的认识,而且也将推动斑岩铜矿研究向更高层次发展。在国内,尚缺乏诸如富集机制、分布形式以及成矿控制系统等方面的系统研究。为了促进国内该领域研究的发展,本文回顾了当前国外斑岩铜矿中铂族元素的研究现状,并对其研究前景做出了展望。

## 1 斑岩铜矿中铂族元素的研究现状

由于在汽车、环境保护、航空航天以及装饰品等领域中不可替代的作用,铂族元素一直作为战略资源受到世界各国的密切关注。人们除了对岩浆 Cu-

Ni 硫化物型铂族金属矿床的勘查和研究之外,对黑色页岩型矿床中的铂族金属也倾注了巨大的热情。其中的铂族元素金属矿床评价已有新的突破,成为地质学家当前研究的热点(Piestrzynski et al.,1999;毛景文,2000)。最近发现在许多斑岩铜矿中作为伴生元素的铂族元素达到工业回收指标,有的储量可达中等规模(项仁杰等,1999),这引起了地质学家对斑岩型铜矿中铂族元素的评价和研究的兴趣。斑岩铜矿中的铂族元素作为铂族金属的潜在资源,对铂族金属需求日益增大的我国来说具有重要的意义。

严格来讲,铂族元素主要由 Os, Ir, Ru, Rh, Pd, Pt 等组成。由于 Au 与它们的化学性质相似,人们往往把 Au 也归纳于铂族元素而与其他铂族元素一起讨论。目前,国内外斑岩铜矿中铂族元素的研究主要表现在以下 4 个方面。

### 1.1 斑岩铜矿中铂族元素的含量及其特征

大多数分析结果显示, Pt, Pd 和 Au 在斑岩铜矿中具有明显的富集现象,而其他元素(Os, Ir, Rh, Ru)的含量( $w_B$ ,下同)低于检测限( $8 \times 10^{-9}$ )。铂族元素的含量只是与硫化物有关(Tarkin et al.,1995)。侵入岩的地质年代、化学成分和岩浆的类型似乎对铂族元素的含量没有什么影响(Tarkin et al.,1999)。Tarkian 等(1999)对比了世界 33 个重要斑岩铜矿中的铂族元素,结果显示,其中 23 个矿床 Pd 含量高于检测限( $8 \times 10^{-9}$ ),变化范围在  $24 \times 10^{-9}$

\* 本文得到国家基础研究重点规划项目(G1999043211)的资助

第一作者简介 李晓峰,男,1971 年生,岩石学、矿物学、矿床学专业。现为地质科学院博士后,从事矿床地球化学方面的科研工作。

收稿日期 2002-03-12; 改回日期 2002-05-15。李岩编辑。

$\sim 1900 \times 10^{-9}$ ; 10 个矿床 Pt 含量高于检测限 ( $8 \times 10^{-9}$ ), 变化范围在  $24 \times 10^{-9} \sim 490 \times 10^{-9}$ ; 所有矿床中 Au 的含量均大于  $130 \times 10^{-9}$ 。并且 Pd, Pt 的含量和 Au 的含量呈正相关的趋势比较明显, 其中, Au 与 Pd 的相关系数  $r = 0.72$ , Pd 与 Pt 的相关系数  $r = 0.61$ , 这表明斑岩铜矿中 Pt, Pd 和 Au 具有共同的成因。因此, 他们认为富金的斑岩铜矿是 Pd 和 Pt 的有望勘查目标。Sotnikov 等(2001)对俄罗斯和蒙古北部不同大地构造背景火成岩系列中的铂族元素研究表明, 在所有矿床中  $w_{Au}/w_{Pd}$  的值一般都在 1~3 之间; 除 Sora 矿床外, Aksug, Erdenetuin-Obo 和 Zhireken 矿床的  $w_{Au}/w_{Pd}$  值都小于 1, 而且 Cu-Pd 和 Mo-Pt 之间有明显的正相关关系。

### 1.2 富含铂族元素斑岩铜矿的成矿环境

岛弧型比大陆边缘型的斑岩铜矿具有较高 Pd 和 Pt 含量的趋势比较明显 (Tarkian et al., 1999)。大地构造背景对斑岩铜矿的 Pt, Pd 和 Au 的含量是否具有决定性的作用还需要进一步证实。Tarkian 等(1999)对 33 个重要斑岩型铜矿的研究结果显示, 其中的 23 个矿床 Pd 含量高于检测限 ( $8 \times 10^{-9}$ ), 10 个矿床 Pt 含量高于检测限 ( $8 \times 10^{-9}$ )。岛弧型矿床中大约有一半 (14 个中有 6 个) Pd 含量高 (取  $w_{Pd} = 45 \times 10^{-9}$  为边界值), 而 17 个大陆边缘型矿床中只有一个 Pd 高。相比之下, Pt 含量大多数比较低。Sotnikov 等(2001)对俄罗斯和蒙古北部不同大地构造背景的火成岩系列中铂族元素的研究表明, 岛弧环境斑岩铜矿床中的硫化物具有高的  $w_{Pd}/w_{Pt}$  值及 Au, Pd 含量。

### 1.3 斑岩铜矿中铂族金属的矿物种类和组合

在斑岩铜矿系统中, 铂族元素矿物主要以碲钨矿、碲铂矿、黄碲钨矿等碲化物的形式出现 (Eliopoulos et al., 1991; Tarkin et al., 1999), 而金主要以自然金、银金矿、碲金银矿和银金矿的形式出现。其中碲钨矿是主要的铂族金属矿物, 它可呈卵圆形以包裹体的形式存在于黄铜矿和斑铜矿中, 也可以自晶体的形式存在于硅酸盐和黄铜矿的边界, 或者在黄铜矿中被银金矿和碲金银矿所包围 (Eliopoulos et al., 1991; Tarkin et al., 1995), 又可以圆柱状、针状从 Cu-Fe 硫化物中溶离出来 (Tarkin et al., 1999)。金主要以包裹体的形成在斑铜矿-黄铜矿-磁铁矿以及黄铜矿-黄铁矿等矿物组合中存在; 富 Ag 的自然金通常与方铅矿共生。碲金银矿主要与碲银矿和碲铅矿共生, 并且被贫 Fe 的闪锌矿所包围 (Tarkin et

al., 1995)。自然金、银金矿很少与铂族矿物连生, 而碲银矿偶尔可与碲钨矿连生 (Tarkin et al., 1999)。

### 1.4 斑岩铜矿中铂族元素矿化机理

斑岩铜矿中铂族元素的富集与岩浆-热液流体系统的演化具有明显的关系。Tarkian 等(1999)认为硅酸盐熔体中硫的不饱和现象及由于硅酸盐的分馏作用使硫有较高溶解度的高氧化电位是斑岩铜矿中金和铂族元素富集的可能因素, 并且岩浆演化的后期阶段的热液搬运对铂族元素的富集同样具有重要的意义。Eliopoulos 等(1991)认为希腊北部的 Skouries 斑岩铜矿中金和铂族元素的富集对岩石蚀变类型没有选择性; Au, Ag, Pd 和 Te 具有相同的成因, 它们与硅的富集有关, 而与钾质交代无关。斑岩铜矿中 Pd 和 Pt 的高含量与 Na 质高 K 钙碱性岩浆作用有关; 而与高 K 钙碱性的岩浆作用有关的则具有低含量的 Pd 和 Pt, 这种差异与在岩浆最终侵位前, 地壳物质对它们的贡献有关。Rubin 等(1997)对印度尼西亚 Ertberg 地区斑岩型、夕卡岩型和交代型矿床的贵金属矿物学研究后, 指出不同矿体间 Cu, Pd 和 Au 含量的高低与岩浆的侵位过程、热液系统的演化和贵金属的迁移机制有关。高 Cu 含 Pd 的自然金在高温阶段沉淀, 而低 Cu 不含 Pd 的自然金在低温阶段沉淀。Economou-Eliopoulos 等(2000)认为 Pd 在黄铜矿中的分布受岩浆-热液系统演化的影响。

### 1.5 热液流体中铂族元素搬运和沉淀机制的实验研究

对于斑岩铜矿系统中铂族元素能否成矿及其与金的共生机制, 众多学者从实验方面给予了论证。Mountain 等(1988)做了热力学方面的实验研究; 张生和李统锦(1995)进行了 PGE 和 Au 的热液共生富集机制探讨; Simon 等(2000)对金在斑岩铜矿体系中的分布做了实验的论证。Xiong 等(2000)的一系列热液系统中 Pd 溶解度实验表明, 如果条件允许, 在斑岩铜矿成矿的早期阶段, 成矿流体有能力搬运  $w_{Pd} = 10 \times 10^{-9}$  以上的 Pd, 最终搬运 Pd 的能力可达 10 t, 而 Os 也至少可达 3 t。这些实验结果表明斑岩铜矿中铂族元素的矿化达到一定的规模是可能的。

在国内, 许多大型斑岩铜矿中也存在着铂族元素的矿化, 如: 德兴斑岩铜矿矿石内铂族元素平均含量  $0.003 \sim 0.05$  g/t, 黑龙江多宝山斑岩铜矿已探明铂族元素储量 1 804 kg, 西藏江达县玉龙斑岩铜矿铂族元素远景储量 3.4 t (梁有彬等, 1997)。虽然许多

斑岩铜矿中铂族元素的含量达到伴生元素的工业要求,但目前尚未进行有效的回收和利用,而且对斑岩铜矿中铂族元素的相关研究尚属空白。

## 2 斑岩铜矿中铂族元素研究展望

国外斑岩铜矿中铂族元素研究表明, Pd, Pt 和 Au 是斑岩铜矿中最有望富集的铂族元素。富 Au 的斑岩体以及与 Na 质、高 K 钙碱性岩浆作用有关的斑岩体是铂族元素最有望的勘查目标。但是纵观国内外斑岩铜矿中铂族元素的研究,还存在以下几个问题: ①与铂族元素矿化有关的斑岩铜矿的流体包裹体研究有待进一步加强。虽然目前的研究结果显示斑岩铜矿中 Pt, Pd 和 Au 在中高温、高盐度热液中以氯化物的形式搬运,但这是否具有普遍的意义,还需要做系统的研究。②不同大地构造背景下,斑岩铜矿中铂族元素的分布型式及其对构造环境的指示意义缺乏深入、细致的研究工作。不同动力学背景下,幔源岩石中铂族元素具有不同的分布型式(储雪蕾等, 2001), 它的构造示踪已成功地运用于两类豆荚状铬铁矿的成因(Zhou et al., 1998)。虽然岛弧环境比大陆边缘型的斑岩铜矿富 Pt, Pd 和 Au, 但是, 不同大地构造背景下, 斑岩铜矿中铂族元素的分布型式还未见报道。另外, 还缺乏铂族元素能否作为斑岩铜矿成矿岩浆的起源和成矿物质来源的示踪剂的相关研究。③是何原因导致斑岩铜矿中相对富集 Pt, Pd 和 Au, 而其他铂族元素(即使与 Pt, Pd 和 Au 性质非常相似的 Rh) 相对贫化, 还缺乏相关的研究。④对斑岩铜矿中 Pt, Pd 和 Au 等成矿产物的来源及富集成矿过程还未取得一致的认识。Pt, Pd 和 Au 的富集机理大多数还处于推测阶段(Mathur et al., 2000; Tarkian et al., 1999); 由于缺乏不同类型岩石的铂族元素含量及其分布的可靠数据, 导致对 Pt, Pd 和 Au 的富集成矿过程也存在着争论(Xiong et al., 2000; Stribrny et al., 2000; 2001)。

针对目前国内外斑岩铜矿中 Pt, Pd 和 Au 的研究现状, 今后斑岩铜矿中铂族元素的研究, 应立足于不同大地构造背景下的斑岩铜矿, 以岩浆-热液流体的演化为主线。通过对不同矿化(蚀变)带铂族元素的含量、铂族金属的种类和赋存状态及其与铜(金)矿化关系的研究, 探讨不同成矿环境条件下, 斑岩铜矿中铂族元素的含量、分布型式、赋存状态和富集成矿过程, 进而探求铂族元素作为地球化学示踪剂示

踪斑岩铜矿产出的大地构造背景, 以及判断斑岩铜矿成矿岩浆的起源和成矿物质来源的可能性, 从而为深化斑岩铜矿的研究(高志明, 1995; 王奖臻等, 2001) 和寻找新类型的铂族元素矿产资源提供理论支持。

## References

- Chu X L, Kong M and Zhou M F. 2001. The platinum-group element geochemistry in chemical geodynamics [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 112~122 (in Chinese with English abstract).
- Economou-Eliopoulos M E and Eliopoulos D G. 2000. Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper system of Greece and their genetic significance [J]. *Ore Geol. Rev.*, 16: 59~70.
- Eliopoulos D G and Economou-Eliopoulos M E. 1991. Platinum-group element and gold contents in the Skouries porphyry copper deposit, Chakidiki Peninsula, Northern Greece [J]. *Econ. Geol.*, 86: 740~749.
- Gao H M. 1995. A summary of researches on porphyry copper deposits [J]. *Advance in Earth Science*, 10(1): 40~46 (in Chinese with English abstract).
- Liang Y B and Li Y. 1997. Genetic types and geological characteristics of platinum group element deposits in China [J]. *Mineral Resources and Geology*, 11(3): 145~151 (in Chinese).
- Mao J W. 2001. A tendency to mineral deposits research related to black shales [J]. *Mineral Deposits*, 20(4): 402 (in Chinese).
- Mathur R, Ruiz J, Titley S, et al. 2000. Different crustal sources for Au-rich and Au-poor ores of the Grasberg Cu-Au porphyry deposit [J]. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 183: 7~4.
- Mountain B W and Wood S A. 1988. Chemical controls on the solubility, transport and deposition of platinum and palladium in hydrothermal solutions: thermodynamic approach [J]. *Econ. Geol.*, 83: 492~510.
- Piestrzynski A and Sawlowicz Z. 1999. Exploration for Au and PGE in the Polish Zechstein copper deposits (kupferschiefer) [J]. *J. Geochem. Explor.*, 66: 17~25.
- Qin K Z, Wang D B, Wang Z T, et al. 1999. Types, geological background, metallogenic provinces and ore-forming systematics of major copper deposits in eastern China [J]. *Mineral Deposits*, 18(4): 359~371 (in Chinese with English abstract).
- Rubin J E and Kyle J R. 1997. Precious metal mineralogy in porphyry-, skarn- and replacement-type ore deposits of the Ertsberg district, Irian Jaya, Indonesia [J]. *Econ. Geol.*, 92: 535~550.
- Simon G, Kesler S E, Essene E J, et al. 2000. Gold in porphyry copper deposits: experimental determination of the distribution of gold in the Cu-Fe-S system at 400 °C to 700 °C [J]. *Econ. Geol.*, 95: 259~270.
- Sotnikov V, Berzina A N, Economou-Eliopoulos M E, et al. 2001. Palladium, platinum and gold distribution in porphyry Cu ± Mo deposits

- of Russia and Mongolia[J]. *Ore Geol. Rev.*, 18: 95 ~ 111.
- Stribny B, Wellmer F W, Burgath K P, et al. 2000. Unconventional PGE occurrences and PGE mineralization in the Great Dyke: metallogenic and economic aspects[J]. *Mineralium Deposita*, 35: 260 ~ 281.
- Stribny B, Wellmer F W, Burgath K P, et al. 2001. Unconventional PGE occurrences and PGE mineralization in the Great Dyke: metallogenic and economic aspects—a reply[J]. *Mineralium Deposita*, 36: 103 ~ 104.
- Tarkian M and Koopmann G. 1995. Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Philes) porphyry copper-gold deposit, Luzon island, Philippines[J]. *Mineralium Deposita*, 30: 39 ~ 47.
- Tarkian M and Stribny B. 1999. Platinum-group element in porphyry copper deposits: a reconnaissance study[J]. *Mineralogy and Petrology*, 65: 161 ~ 183.
- Wang J Z, Li Z Y, Hu R Z. 2001. Research progress in porphyry copper deposit[J]. *Advance in Earth Science*, 16(4): 514 ~ 519 (in Chinese with English abstract).
- Xiang R J, Ru X L. 1999. Platinum metals in porphyry copper deposits in China[J]. *Geol. Techn. Abroad*, 3: 29 ~ 33 (in Chinese).
- Xiong Y L and Wood S A. 2000. Experimental quantification of hydrothermal solubility of platinum-group elements with special reference to porphyry copper environments[J]. *Mineralogy and Petrology*, 68: 1 ~ 28.
- Xiong Y L. 2001. Discussion of “unconventional PGE occurrences and PGE mineralization in the Great Dyke: metallogenic and economic aspects” by B. Stribny, F W Wellmer et al. [J]. *Mineralium Deposita*, 36: 101 ~ 102.
- Zhang S and Li T J. 1995. The preliminary study of the mechanism of hydrothermal paragenesis and enrichment for PGE and gold[J]. *J. Precious Metallic Geol.*, 4(2): 86 ~ 90 (in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Sun M, Keays R R, et al. 1998. Controls on platinum-group elements distribution of podiform chromitites: a case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belt [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 677 ~ 688.

#### 附中文参考文献

- 储雪蕾, 孔敏, 周美夫. 2001. 化学地球动力学中的铂族元素地球化学[J]. *岩石学报*, 17(1): 112 ~ 122.
- 高合明. 1995. 斑岩铜矿床研究综述[J]. *地球科学进展*, 10(1): 40 ~ 46.
- 梁有彬, 李艺. 1997. 中国铂族元素矿床类型和地质特征[J]. *矿产与地质*, 11(3): 145 ~ 151.
- 毛景文. 2001. 与黑色页岩系有关的矿床研究的动向. *矿床地质*, 20(4): 402 ~ 403.
- 秦克章, 汪东波, 王之田. 1999. 中国东部铜矿床类型、成矿环境、成矿集中区与成矿系统[J]. *矿床地质*, 18(4): 359 ~ 371.
- 王奖臻, 李朝阳, 胡瑞忠. 2001. 斑岩铜矿研究的若干进展[J]. *地球科学进展*, 16(4): 514 ~ 519.
- 项仁杰, 茹湘兰. 1999. 中国斑岩铜矿中的铂族元素[J]. *国外地质科技*, 3: 29 ~ 33.
- 张生, 李统锦. 1995. PGE和金的热液共生富集机制初探[J]. *贵金属地质*, 4(2): 86 ~ 90.

## Background and Development of Researches on Platinum Group Elements in Porphyry Copper Deposits

LI XiaoFeng, MAO Jing Wen, ZHANG ZuoHeng  
(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

### Abstract

More and more attentions have been paid to the study of platinum group elements (PGE) in porphyry copper deposits. Following platinum elements deposits related to magmatic Cu-Ni sulfide deposits and black shales, the PGE in porphyry copper deposits seem also to play an increasingly important role in the mineral deposit researches. This paper describes the background of the researches on PGE in porphyry copper deposits and points out that the PGE tracers for tectonic setting of porphyry copper deposits and fluid inclusions pertaining to the PGE and Au mineralization are promising areas in the researches on porphyry copper deposits.

**Key Words:** porphyry copper deposits; platinum group elements