

# 镁铁质—超镁铁质岩浆作用与成矿作用的新进展

苏尚国<sup>1</sup>, 邓晋福<sup>1</sup>, 汤中立<sup>2</sup>, 罗照华<sup>1</sup>, 余晓艳<sup>3</sup>, 李芳凝<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 长安大学 国土资源学院, 陕西 西安 710054;

3. 中国地质大学 珠宝学院, 北京 100083)

**摘要:** 镁铁质—超镁铁质岩浆作用与 Cu、Ni、Co、PGE (铂族)、V、Ti、Cr、Fe 等金属成矿作用关系密切。镁铁质—超镁铁质岩浆能否成矿主要由岩浆源区的性质、构造背景以及是否存在古老且一直活动的深大断裂等因素决定。介绍了一些世界上典型矿床的新的成矿模型及寻找与镁铁质—超镁铁质岩有关的 PGE 矿床的新技术与新方法。

**关键词:** 镁铁质—超镁铁质岩; 成矿作用; 新进展

**中图分类号:** P588.1; P611.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8527(2004)04-0454-06

## 0 引言

镁铁质—超镁铁质岩浆作用具有非常明显的成矿专属性, 它与 Cu、Ni、Co、PGE (铂族)、V、Ti、Cr、Fe 等金属的成矿作用密切相关。2004 年 8 月在意大利佛罗伦萨召开的第 32 届国际地质大会有一专题专门讨论镁铁质—超镁铁质岩石与成矿。另外两个专题: 大型及超大型矿床专题和传统及非传统矿床专题, 也与镁铁质岩浆—超镁铁质岩浆作用及成矿作用相关。

由于铂族金属的用途广泛, 近几年国际市场上铂族金属价格大幅度上涨。以 Pt 为例, 2003 年 2 月 15 日国际市场上价格为 684 美元/盎司, 2004 年 10 月 22 日其价格为 843 美元/盎司(数据来源于 <http://www.kitco.com>), 在 13 个月内上涨了 23.2%。目前铂金的价格是黄金价格的 2.0 倍。所以本届地质大会提交的与镁铁质岩浆—超镁铁质岩浆作用与成矿作用的论文中, 大都与 PGE 成矿有关。以前大多数学者认为 PGE 基本是不活动的元素, 现在已证实 PGE 的成矿作用与热液活动关系密切, 有许多论文介绍了这方面的新成果, 也有些论文介绍了与镁铁质—超镁铁质岩石相关的 PGE 矿床的找矿方法及计算机模拟成矿过程。

## 1 镁铁质—超镁铁质岩浆作用与成矿关系的新认识

### 1.1 成矿作用的主要控制因素

全球有大量的镁铁质—超镁铁质岩石产出, 为何有的含矿? 有的不含矿? 法国科学家 Nick A 2004 年认为: 镁铁质—超基性岩浆中亲铜元素的集中是由地幔源矿物和部分熔融条件所控制的。因为铂族元素在硫化物—硅酸盐熔体中具有非常高的分配系数, 因此硫化物的存在控制着部分熔融过程中铂族元素的含量。根据普遍接受的原理, 如果残留物中有 15%~25% 的硫化物熔体, 则铂族元素在硅酸盐熔体中含量很低。随着熔融程度的增加, PGE 被硫化物完全吸收, 铂族元素含量就变高。

Nick A 2004 年解释了为什么不同的岩浆其成矿可能性有差异。科马提岩和拉斑质苦橄岩都形成于熔融程度高的条件下, 在残留物中消耗了所有的硫化物, 因此这些岩浆中铂族元素含量就高, 而大洋中脊和碱性玄武岩中铂族元素含量就低, 与这些岩浆形成时低度熔融, 残留物中剩有硫化物一致。碱性苦橄岩和麦美奇岩岩浆中不相容元素的含量非常高, 表明它们形成于小于 5% 的部分

收稿日期: 2004-10-08; 改回日期: 2004-10-28; 责任编辑: 楼亚儿。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40234048, 40472051); 中国地质大学教育部“211”工程建设项目。

作者简介: 苏尚国, 男, 副教授, 1965 年出生, 岩石学专业, 从事岩浆作用与成矿及变质地质学的研究工作。

熔融, 然而其铂族元素含量与科马提岩一样高。为什么会有这一现象呢? 可能的解释是: (1) 根据 Bockrath 和 Ballhaus 2002 年在 HSE 研讨会上的观点, 硫化物熔体不是留在残留物中, 而是保持在脱离的硅酸盐熔体中 (departing silicate melt); (2) 一种不明的变质交代作用, 使原岩富集不相容元素, 而不富集硫。

在碱性岩侵入作用中没有形成大的铜-镍-铂族金属矿床, 很可能归因于碱性岩浆穿过大陆地壳的方式。Nick A 2004 年研究认为拉斑玄武质苦橄岩常常形成硫化物矿床, 主要是拉斑玄武质苦橄岩同化地壳岩石导致了不混溶硫化物熔体的分离作用。由于高密度的拉斑玄武岩参与壳幔的相互作用, 使得这一作用容易进行, 并导致岩浆停止在地壳密度不连续面上。碱性岩浆含有丰富的挥发分并且密度低, 它们可以快速通过下地壳, 而且一旦二氧化碳开始去气, 含气丰富的岩浆快速上升到地表。在这种条件下, 与地壳岩石的较大同化作用就不会发生。

俄罗斯专家 Akimovich D O 2004 年通过对俄罗斯古生代西伯利亚暗色岩系 (0.245~0.25 Ga) 及古元古代 Fennoscandian 暗色岩系 (2.2~1.9 Ga) 成矿作用的对比研究, 得出与成矿有关的镁铁质—超镁铁质杂岩具有下列主要特征: (1) 矿体定位于长期发育的构造建造中, 且断裂为继承性的古老断裂 (诺里尔斯克地区建造超过 300 Ma, 且断裂继承了古元古代的裂谷系统); (2) 存在古老的高度亏损的地幔, 亏损地幔残留体中有 PGE 的堆积; (3) 存在含硫和 Cl 的沉积岩 (诺里尔斯克地区有古元古代和古生代蒸发岩, 贝辰加地区有早古元古代和太古代含硫的变沉积岩)。

俄罗斯专家 David D 等 2004 年认为, 与镁铁质—超镁铁质杂岩相关的铂族金属的形成主要受 2 个因素的控制: 一是受破坏性因素 (destructive structure) 所控制, 这些破坏性因素可以打开岩浆房的最深部流体, 由于岩浆活动和控矿构造的持续性 (duration) 以及它们的可能重新活动导致了铂族元素成矿系统与它们在空间上的一致性, 而在时代和类型上不同; 二是地壳结构决定了铂族元素的成矿可能性。他认为东欧、乌拉尔、阿尔丹—Severnaya Zemlya、远东、北极和黑龙江—阿尔泰山带是公认的跨区含铂带。这些矿带组成了一个独特的网格, 最重要的和最有前景的成矿省

(成矿区域) 位于网格的结点上。每一条矿带 (到目前为止已认识的) 都与一种或几种独特的地球地壳结构类型相关。总体上, 每一条矿带在地质时期都经历了一个长期演化。他认为在有利的地球动力学条件下, 含铂镁铁质—超镁铁质侵入体的形成是液态—流体的液化作用、分馏结晶作用和岩浆房的分异作用、岩浆混合作用、矿体内部 (intra-ore) 和矿体附近的交代作用等因素的综合结果。铂族元素矿床成因的岩浆演化趋势主要是斜长岩的出现, 在地质时期内全球成矿趋势为 Pt-Ni 向 Pd-Cu 演化。

### 1.2 对全球与镁铁质—超镁铁质岩浆有关的主要矿床进行了新的认识和评价

南非布什维尔德镁铁质—超镁铁质层状杂岩是世界最大的铂族金属矿床。其中存在两种类型的 PGE 矿床: 一种是严格受层控制的, 另一种是广义的层状。这些层连续延伸超过 100 km。

UG2 上部铬铁矿带接近转换带 (the critical zone) 上部, 它是世界上最大的单个 PGE 矿床, 也是 PGE 储矿岩石最特殊的实例。所有的 PGE 矿化都在铬铁矿中。PGE 含量在底部最高, 向上含量呈有规律的降低。在同一铬铁矿层中 PGE 含量有两个明显的倒转, 然后又回到 PGE 含量的最高位。岩浆的加入可能是引起 PGE 旋回变化的原因。

Merensky 层 (the Merensky reef) 是一更加复杂的矿体, 常常具有两层薄的铬铁矿层, 厚 0~7 m 不等, 常有伟晶辉石岩穿插其中。当两层铬铁矿之间的间隔很窄时, 具工业意义的 PGE 矿化发生在下铬铁矿带的下部; 当两层铬铁矿之间的间隔很宽时, 上铬铁矿带含有更高的 PGE。虽然, 到目前为止, PGE 含量最高的矿石产于两铬铁矿层中, 但 PGE 矿物常常与硫化物共生。

Grant C 2004 年根据以上 PGE 的产出特征及地球化学证据显示辉石形成于转换带岩浆, 而充填斜长石形成于来自主带 (main zone) 的岩浆, 因此, 他认为 reef 带中矿物来自于两个明显不同的、未混合的层状岩浆, 没有混合岩浆; 最后得出新的 PGE 成矿过程 (模型) 是: PGE 离子簇 (PGE clusters) 一直在岩浆中存在, 因为它们太小所以没有堆积, 后来它们粘附在铬铁矿颗粒上并且下沉, 并产生了 PGE 含量高的矿石。在上铬铁矿层形成之后不混溶硫化物熔体开始堆积, 硫化

物熔体也吸收了大量的 PGE 离子簇。硫化物向下过滤通过未固结的堆晶（堆晶厚度小于 100 cm）。当两铬铁矿层之间的间隔小于 50 cm 时，硫化物熔体通过下铬铁矿层引起底板斜长岩产生矿化。当温度处在固体硫化物和铂族矿物稳定之上时，没有铂族元素的分异作用发生，铂族元素以及它的携带者铬铁矿和硫化物的定位过程就固定了。然而，随后的再平衡产生许多低温的铂族金属矿物。

俄罗斯专家 David D 2004 年对泰梅尔—诺里尔斯克（Taimyr—Norilsk）岩浆成矿省的成矿过程和期次进行了分析和总结。他认为泰梅尔—诺里尔斯克省硫化物铂族—铜—镍硫化物（Norilsk-Talnakh 型）和低硫铂族金属（upper Talnakh and Skaergaard 型）矿床是岩浆硫化物系统中单个成分唯一饱和的暗色岩系。它们是中生代陆内裂谷作用以及西伯利亚地台西北边缘构造（缝合带）联合作用的产物。这个构造活动带不仅在中生代活动，在前寒武纪一样也很活动。成矿系统以特殊的上地幔及地壳加厚为特征。它们由 5 层以上的含亲铜元素的水平黑色岩系以及厚层玄武岩组成，并被深断裂切开，作为广泛的富含地幔深部流体的超级通道。形成暗色岩系岩浆成矿系统 6 阶段的地球动力学模型已经被证实，包括：前岩浆作用和前成矿作用、火山作用、主侵入作用和成矿、主成矿和中侵入体（intra-intrusive）、晚侵入体和中成矿（intra-ore）、后侵入体（post-intrusive）和晚成矿阶段。在早二叠世西伯利亚地台的北缘洋壳已开始俯冲（第 1 阶段），洋壳沉积物为流体中水、硫和卤化物的主要来源，深达 150 km 以上亏损地幔的部分融溶是富硫及富亲铜元素岩浆的源，这导致了超镁铁质—镁铁质及中性熔体的形成，也导致了高硫和低硫饱和铂族金属（PM）矿浆的形成；第 2 阶段与第 3 阶段层状岩浆常常侵位于主裂谷边部裂谷凹槽离散的构造中（discrete structures of rift troughs）；在第 4 阶段饱和 PM 的硫化物熔体注入；在第 5 阶段可见中期成矿的碱质交代作用（intra-ore alkaline metasomatism），这是具有唯一成分和 PM 源（Norilsk-Talnakh 型）具环带型矿床就位的原因。第 6 阶段与低硫铂族金属矿床（upper Talnakh and Skaergaard 型）的形成相关。建议的模型清楚地说明了铂族金属形成的独特途径。我们认识了 OMS 岩浆作用与成矿作用的 3 种地球化学趋势：第一趋势为岩浆房中分异作用

引起的；第二趋势为瞬间的；第三种趋势为矿质岩浆成分在空间的再就位。

意大利科学家 Giovanni G 等 2004 年对乌拉尔 Nurali 镁铁质岩体中铂族金属的成因进行了研究。Nurali 镁铁质岩块是沿南北向分布的几个镁铁质—超镁铁质岩块之中的一个，这些镁铁质—超镁铁质岩体的分布受乌拉尔断层的控制，但被后期构造肢解了。乌拉尔断层是前寒武纪 Bashkir 基底、乌拉尔中心隆起和古生代马格尼尔斯克带火山沉积单元的缝合带。

正如研究区其他二辉橄榄岩镁铁质—超镁铁质岩块（如 Mindyak、Sakmara、Abzakov）一样，Nurali 岩块主要含有斜长石二辉橄榄岩和尖晶石二辉橄榄岩或方辉橄榄岩地幔单元。向上这些岩石逐渐过渡到方辉橄榄岩，其中纯橄榄岩包体逐渐增多。地幔单元东与橄榄岩—wherlite—辉石岩带状单元接壤，被称作过渡带（TZ）。最后辉长岩—闪长岩单元侵入到过渡带的岩石，与原生火成岩接触。

过渡带的岩石出露在一个狭窄的、大约呈南北向的、长 20 km、宽 0.2~1.3 km 的带中。在 Miass 河流铂族元素在 3 个不同层的含量明显不同。第 1 层富集铂和钯；中间层有最高的铂族元素含量，并富集钼、铌和钽；上面层位显示水平的球粒陨石的分配形式，并含有较低的铂族元素。在第 1 层没有发现含铂族元素的矿物相；在中间层发现了硫钨钼矿—硫钨钼矿（erlichmanite），钨—钽—铁合金和钽镍黄铁矿，并在上面层中发现了硫钨钼矿—硫钨钼矿和铌硫化物。尽管铬铁矿矿体构造十分不连续，但从其他铬铁矿露头获得的岩相学和地球化学特征都显示与 Miass 河流域的上述特征相关。

铂族元素的垂直分带可能与多阶段从地幔中萃取的铂族元素相关，受单硫化物固溶体熔融和单硫化物固溶体与硫化物熔体平衡的驱动，接着从独立的、空间重叠的岩浆房侵位。

侧向相关性也确信岩浆房沿着过渡带是连续的，并证实铂族元素垂直分带是所有过渡带共有的特征，这主要归因于源区的分异作用。

俄罗斯专家 Knyazev V 2004 年报道了在俄罗斯西伯利亚地台西南的 Kansk's 绿岩带中发现了 Cu-Ni-Au-PGE 矿床。绿岩带北西延长 200 km，宽约 30 km，Cu-Ni-Au-PGE 矿床的形成与玄武岩—

科马提岩的形成密切相关。镁铁质—超镁铁质岩浆作用分为两阶段: 早阶段由分异作用强的岩石组成, 全岩成分富镁, 硫化物 Cu-Ni 矿床与这一阶段的岩浆作用相关。产在该绿岩带中的 Kingash 矿床大小为  $3\text{ km} \times 1\text{ km}$ , 含矿的镁铁质—超镁铁质岩厚约 400 m, 矿石品位为:  $w(\text{Ni}) = 0.2\% \sim 1.5\%$ ,  $w(\text{Cu}) = 0.2\% \sim 1\%$ ,  $w(\text{Co}) = 0.01\% \sim 0.2\%$ , Pt 和 Pd 的品位高达  $6 \times 10^{-6}$ , Rh 的品位为  $0.6 \times 10^{-6}$ , Os、Ir 和 Ru 的品位通常小于  $0.01 \times 10^{-6}$ 。在中国也应注意寻找绿岩带中的 Cu-Ni-Au-PGE 矿床。

## 2 与镁铁质—超镁铁质岩有关的热液成矿作用

### 2.1 与科马提岩相关的水热交代作用导致富 PGE 矿化

Almeida C M 2004 年报道, 最近 1 个新的富集 PGE 的矿化带在巴西太古代绿岩带科马提岩中被发现, 矿化带的  $w(\text{Pd} + \text{Pt} + \text{Ru} + \text{Rh} + \text{Ir})$  值达  $40 \times 10^{-6}$ 。该矿化带与块状 Ni-Cu 硫化物矿体不一致, 块状硫化物矿体 (Fortaleza de Minas Ni-Cu-Co-PGE 矿床) 于 1983 年被发现, 由区域剪切带控制。新发现的富 PGE 的矿化带由热液交代的围岩碎块及基质组成, 基质中包含磁铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、紫硫镍矿、磁铁矿、钴钼矿—辉砷镍矿、铂族矿物、辉镍矿 (linnaeite-polydymite)、硫镍钴矿 (siegenite)、碳酸盐以及石英。铂族矿物主要呈浸染状以包裹体形式存在于辉钴矿—辉砷镍矿 (cobaltite-gersdorffite) 中, 有时出现在硫化物、硅酸盐矿物及磁铁矿中, 同时也包含在 Pd 的锑化物 (tellurides-antimonides)、斜铋钼矿 (froodite)、irasite、砷铂矿 (sperrylite)、Ir-Rh 硫化物—砷化物、Os-Ru 砷化物以及 Ru 锑化物—砷化物中。围岩的水热交代以存在滑石-碳酸盐-石英-硫化物代替岩浆—变质矿物为特征。

热液交代作用的 PGE-Ni 矿化作用发生在新元古代巴西期的构造—热事件 (Brazilian tectonic-thermo event) 中, 与富含  $\text{CO}_2$  的流体沿巴西期断层的循环有关, 这些断层切割含镍硫化物矿体的岩浆科马提岩。

### 2.2 Cu-Ni-PGE 矿床的水热交代作用导致 PGE 矿化叠加

苏尚国 2004 年对金川 Cu-Ni-PGE 矿床的成矿

期次、铂族金属含量及赋存状态等进行了初步研究, 将金川矿床的成矿期次划分为 4 个阶段, 分别为堆晶阶段、结晶阶段、变质阶段及表生阶段。在堆晶阶段和结晶阶段形成的矿石中, 硫化物的含量与 PGE 的含量呈正相关关系, 说明硫化物岩浆对铂族元素具有明显的富集作用; 在变质阶段 (流体交代阶段) 对 Pt 具有明显的富集趋势, 对 Pd 略具富集作用, 对 Os、Ir、Ru、Rh 的富集不明显。

在变质阶段,  $\text{Pt} + \text{As} = \text{PtAs}$  (砷铂矿), 这可能是铂族金属富集的主要机理。据甘肃省地质矿产局第六地质队的资料, 在金川矿区的矿石中有 80% 以上的铂呈独立矿物存在, 其中贫铜、镍的矿石中铂矿物相占 81%, 富矿中铂矿物相占 88%, 在铂富集体中则占 96%。砷铂矿是铂元素的主要矿物, 其铂含量占矿石中总铂含量的 70% 以上。这些说明后期流体的交代变质作用对 Pt 富集起着非常重要的作用。

### 2.3 镁铁质—超镁铁质岩筒的水热交代作用导致 PGE 矿化叠加

Kojonen K 研究认为, 芬兰北部 2 057 Ma 的古老的 Keivitsa 侵入体呈圆形岩筒产出, 倾向南西, 岩体 (东部) 由边部冷凝的细粒辉长岩 (母岩浆可能为拉斑质的, 其成分为:  $w(\text{SiO}_2)$  为 52.14%、 $w(\text{TiO}_2)$  为 0.89%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 11.92%、 $w(\text{MgO})$  为 9.15%、 $w(\text{CaO})$  为 9.47%、 $w(\text{Cr})$  为  $194 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ni})$  为  $113 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Cu})$  为  $261 \times 10^{-6}$ )、中心纯橄岩—二辉橄榄岩以及超镁铁质橄榄辉石堆晶岩 (平均  $w(\text{SiO}_2)$  为 49.30%、 $w(\text{TiO}_2)$  为 0.35%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 3.44%、 $w(\text{CaO})$  为 13.95%、 $w(\text{MgO})$  为 22.95%、 $w(\text{Cr})$  为  $2\,027 \times 10^{-6}$ ) 组成。岩体 (西部) 由细粒辉长岩 (边部)、纯橄岩—二辉橄榄岩 (中心) 以及辉长岩、铁辉长岩和磁铁矿辉长岩组成。侵入体围岩为变质沉积岩—泥质岩和玄武质火山岩。侵入体东北部有一走向为南北向的 PGE 矿化带。富 PGE 的岩筒 (以 PGE + Au 品位为  $1 \times 10^{-6}$  为界) 长约 30~50 m, 宽 10~30 m, 垂直深度约 400 m, 平均矿石成分:  $w(\text{Ni})$  为 0.5%、 $w(\text{Cu})$  为 0.4%、 $w(\text{S})$  为 1.8%、 $w(\text{Os})$  为  $0.02 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ir})$  为  $0.025 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Ru})$  为  $0.034 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Rh})$  为  $0.037 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Pt})$  为  $1.093 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Pd})$  为  $0.760 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Au})$  为  $0.220 \times$

$10^{-6}$ 、 $w(\text{Pt})/w(\text{Pd}) = 1.77$ 、 $w(\text{Pt})/w(\text{Pt} + \text{Pd}) = 0.5 \sim 0.7$ 。

富 PGE 的岩筒主要由水热交代的(变质的)橄榄单斜辉石岩和橄榄二辉石岩组成。PGE 最富带中岩石组成为: 橄榄石 (22.8%)、透辉石 (53.8%)、紫苏辉石 (9.20%)。次要矿物有阳起石、蛇纹石、绿泥石、滑石、绿帘石、金云母、碳酸盐。铂族矿物包括硫镍钼铂矿 (30%)、砷铂矿 (26%)、铈铂矿 (20%)、铈钼矿 (12%)、黄碲钼矿—六方铈钼矿—六方碲钼矿 (3%)、钼碲镍矿 (2%) 等。三维模型显示 PGE 与 Ni 含量之间有很好的空间分布关系, 而 PGE 含量的最大值与 Cu、S 含量的峰值之间有漂移。低品位的厚约 500 m 的 Cu-Ni 浸染状硫化物在东西方向延伸约 1.0 km, 南北方向延伸约 0.6 km。三维 Cu、S、Ni 及 PGE (+ Au) 品位变异图显示它们具有不同的变异方向, 可能是连续脉动式成矿作用的结果。

#### 2.4 富 $\text{CO}_2$ 流体对镁铁质—超镁铁质岩石水热交代作用产生的矿化作用

Mohammad A 2004 年报道, 在巴基斯坦 Swat 山谷缝合线混杂岩带 (suture melange group) 中, 超镁铁质岩石与富碳酸盐的岩石 (具滑石或石英的菱镁矿, 有或没有白云石) 的接触带局部地段富含祖母绿 (emerald)。从野外产状、矿物成分及地球化学特征来看, 祖母绿是由于变质作用过程中含  $\text{CO}_2$  流体的释放, 而这些含  $\text{CO}_2$  流体对蛇纹石化超镁铁岩的交代作用而成的。局部的晚期水热活动影响了易裂的富菱镁矿的岩石, 产生了石英脉或网状脉、祖母绿、富铬电气石以及含镍镁的铬云母。矿物组合及矿物化学显示 3 种含铬的硅酸盐矿物是围岩与超镁铁质岩石接触带水热交代作用的产物。

详细的地球化学对比揭示: 与无矿岩石对比, 含矿富菱镁矿岩中的硼和铍 (beryllium) 含量非常高, 并且也富砷、铅、锆、铷、钡、钨、锡、铈和钇。富集硼和铍的岩石似乎受构造的控制, 硼和铍含量非常高的岩石产在细小的花岗岩脉或中新世淡色花岗岩中, 这些细小花岗岩脉切穿花岗岩质片麻岩。地球化学特征显示淡色花岗岩不是祖母绿中铍的来源。

### 3 利用计算机技术模拟镁铁质岩浆的成矿过程

在俄罗斯 Transbaikalia Arsentyev 地体中, 钛

磁铁矿—钛铁矿矿化作用常常产于层状辉长岩—斜长岩系列中。按照矿体的产状及形态特征, 矿化作用可划分为同生成因 (syngenetic) 与后生成因 (epigenetic)。同生成因的矿化常常为浸染状矿石和海绵状矿石; 而后生成因的矿石常认为是块状矿石 (massive ore)。玄武质岩浆的重力结晶分异作用是出现同成因矿化的原因。分异作用的主要特征是由浅色层和暗色层构成的互层。

Roza B 利用 Omagmat 软件估计层状侵入体中结晶序列、矿物相成分和堆晶相成分, 最后获得了估计的原生熔体成分。利用 QFM 作缓冲剂 (buffer QFM), 熔体中水的含量为 0.5%, 模拟岩浆成岩成矿过程, 模拟结果与地质、岩相学和矿物数据完全一样 (广泛发育的岩浆角闪石和橄榄石被吸收)。按照模拟结果, 基性斜长石 ( $\text{An} = 75\%$ ) 首先结晶, 其温度为  $1100 \sim 1150^\circ\text{C}$ ; 在  $1000 \sim 1100^\circ\text{C}$  时, 铁橄榄石含量约占  $15\% \sim 20\%$  的橄榄石开始结晶。这些特征也与岩石的实际结构一致。模拟结果是橄榄石与斜长石的比例为  $30\%:70\%$ , 也与岩石的实际结果一致。试验结果证实了块状矿石中广泛存在浸染状和海绵状矿石。块状矿石是由于磷的富集在晚期阶段结晶形成的。很明显, 氟和磷的高度集中与原生玄武岩浆中碱的增加密切相关, 而氟和磷的增加导致岩浆熔离, 可能在这一阶段熔离作用能够发生, 从而导致了块状矿化作用的形成。

### 4 新技术和新方法

Olegovich D K 2004 年介绍了俄罗斯在寻找与镁铁质—超镁铁质有关的 PGE 矿床时的一些方法。由于镁铁质—超镁铁质侵入体的密度大以及具有高的磁性, 因而重力和磁性测量仍然是开始勘探镁铁质—超镁铁质侵入体的常规方法。

在研究层状侵入体的内部结构方面, 磁性测量起着非常重要的作用。层状侵入体 (如 Stillwater、Fedorova-Pana、Burakovski、Monchegorski) 仍具有很强的剩余磁性。磁化特征与岩石显微构造等特征相关。对于受到破坏的层状侵入体 (或结构复杂的侵入体) 有效的方法是磁性测量与电磁感应法 (inductive EM-survey) 相结合。作为晚期结晶阶段的标志层, 铁辉长岩容易进行磁性填图。PGE 常常受制于分异磁场的水平 (differentiated magnetic field level)。在层状水平层中, PGE 与低磁部分一致, 可

能与铁的重新分配 (re-distribution) 有关。

感应极化 (induced polarisation, 即 IP) 方法的效率与仪器的选择有明显的相关关系。在已测试的仪器中“Tellur StP” (俄罗斯制造) 以及配套软件是最好的。对于南非 Platreef 型的含 PGE 的硫化物矿化作用 (硫化物含量为 1% ~ 5%, 厚度为 5 ~ 50 m), 利用 IP 预测的效率为 85%; 对于 Stillwater 型的矿化 (硫化物含量为 0.5% ~ 2%, 厚度 < 2 m), 利用 IP 预测的效率为 25% ~ 65%。

在芬兰已经证实利用底板上部岩石 (top-of-the-

bedrock) 的地球化学方法指导铂族金属的勘探是相当有效的。预测 Stillwater 型矿化的几率约为 65%。根据 Cocker B 的研究, 更经济的高科技勘探镁铁质—超镁铁质岩石成矿的方法还有扩散萃取法 (diffusion extraction, MDE)、苔藓—地衣古生物地球化学法 (moss-lichen biogeochemistry)、土壤气体地球化学方法 (soil gas geochemistry) 以及岩石地球化学 (lithogeochemistry)。

(参考文献均引自 Abstracts of the 32nd International Geological Congress, Italy. 2004)

## ADVANCES IN MINERALIZATION ASSOCIATED WITH MAFIC-ULTRAMAFIC IGNEOUS ROCKS

SU Shang-guo<sup>1</sup>, DENG Jin-fu<sup>1</sup>, TANG Zhong-li<sup>2</sup>, LUO Zhao-hua<sup>1</sup>,  
YU Xiao-yan<sup>1</sup>, LI Fang-ning<sup>1</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** Mineralization of Cu, Ni, Co, PGE, V, Ti, Cr, Fe are associated with mafic-ultramafic rocks. Why some mafic-ultramafic rocks bear deposits, and some not? The characteristics of primary magma, degree of partial melting, tectonic setting of mafic-ultramafic rocks, and an old fault with long-term activity are the main controlling elements. In this paper there are some introductions to new mineralization processes of some famous deposits, for example, Bushveld Cu-Ni-PGE deposits. There are also some introductions to also new geophysical and geochemical methods to explore PGE deposits associated with mafic-ultramafic rocks.

**Key words:** mafic-ultramafic igneous rocks; mineralization; advances