

文章编号: 0258-7106 (2000) 04-0330-10

# 铜镍硫化物矿床的成因

——以诺里尔斯克(俄罗斯)和金川(中国)为例

罗照华<sup>1</sup> A A 马拉库舍夫<sup>2</sup> H A 潘妮娅<sup>2</sup> 苏尚国<sup>1</sup>

(1 中国地质大学, 北京 100083

2 俄罗斯科学院矿床地质、岩石学、矿物学与地球化学研究所, 莫斯科 109017)

**提 要:** 与超基性岩浆作用有关的铜镍硫化物矿床主要有两种成矿建造, 一种为含铬建造, 另一种为含铂建造。尖晶石类矿物成分的变化清楚地反映了这两类建造的成矿属性。含铬建造的尖晶石属于铬铁矿-尖晶石系列, 含铂建造中则为尖晶石-磁铁矿系列。从含铬建造向含铂建造转变的原因, 可以解释为超基性岩浆作用中硫的作用增加, 从而引起反应:  $4\text{FeO} + \text{S} = \text{FeS} + \text{Fe}_3\text{O}_4$  (磁铁矿), 同时分散性铂族元素的专属性特征也发生相应变化 ( $\text{Ru} + \text{Os} + \text{Ir}$ )  $\rightarrow$  ( $\text{Pt} + \text{Pd}$ )。因此, 含铬建造中主要富含 Ru、Os 和 Ir, 而含铂建造中则富含 Pt 和 Pd。超基性岩浆作用中硫的化学活动性增加与其碱度增加直接有关。因此, 含铂的超基性岩大多数情况下与富碱的玄武岩形成共生组合。当富铁熔浆发生硫化作用时, 将会导致硫化物与硅酸盐熔浆的不混融, 从而形成矿浆。据此, 金川含铂铜镍矿石不是该矿床二辉橄榄岩侵入体的分异产物, 而是含硫化物纯橄榄岩的独立侵入体, 后者也象二辉橄榄岩本身那样, 是深部岩浆源的分异产物。

**关键词:** 铜镍硫化物矿床 成因 俄罗斯诺里尔斯克 中国甘肃金川

中图法分类号: P618

文献标识码: A

本文是依据作者 1999 年在金川矿区工作的结果以及大量公开发表的研究资料<sup>[1-5]</sup>写成。研究是在金川-诺里尔斯克(塔尔纳赫)铜镍硫化物矿床对比计划框架内进行的, 这两个矿床均是这种类型的超大型矿床<sup>[6]</sup>。

## 1 含铬超基性岩建造与含铂超基性岩建造的划分及成因探讨

我们研究的这类矿床是含铂族元素的铜镍硫化物矿床, 主要是富含铂和钯, 因此, 决定了它们与超基性岩浆作用具有成因联系。各类超基性岩的岩石建造与成矿作用最明显的区别在于铬尖晶石成分的变化序列, 从含铬超基性岩建造转变到含铂建造, 尖晶石类矿物成分作有规律的变化(图 1)。

图 1 展示了含铂和含铬建造超基性岩中铬尖晶石成分变异趋势的差别。在含铬铁矿的超

基金项目: 本论文为俄罗斯国家自然科学基金委员会与中国国家自然科学基金委员会联合资助项目“中俄铜镍硫化物矿床成因对比研究”(NSFC 编号: 49911121434; RFFI 编号: No99-05-39086) 部分成果

第一作者简介: 罗照华 (1956-), 男, 江西南康人, 副教授, 从事岩石学、矿床大地构造教学与研究

收稿日期: 2000-01-25; 修订日期 2000-06-14

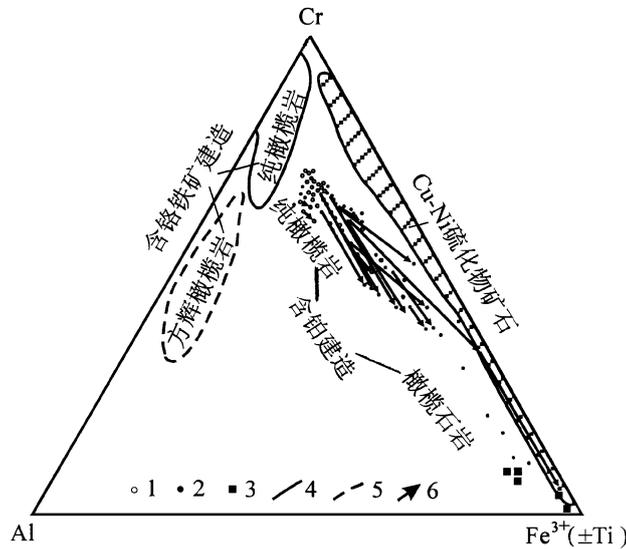
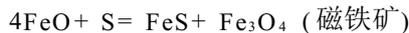


图 1 含铂和含铬建造超基性岩中铬尖晶石的成分变化

1~ 3—含铂建造 (康德辉石岩-纯橄榄岩-橄榄石岩岩体): 1—富铂铬铁矿矿石; 2—纯橄榄岩; 3—橄榄石岩;  
 4~ 5—含铬铁矿建造 (克姆皮尔塞岩体): 4—纯橄榄岩; 5—方辉橄榄岩; 6—尖晶石颗粒从中心向边缘成分变化趋势  
 Fig. 1. Compositional variation of picoties from ultrabasic rocks of Pt-bearing and Cr-bearing formations.  
 1~ 3—Pt-bearing formation (Kant pyroxenite-dunite-peridotite bodies): 1—Pt-rich chromite ore;  
 2—Dunite; 3—Peridotite; 4, 5—Chromite-bearing formation (Kemupilsai rock body);  
 4—Dunite; 5—Harzburgite; 6—Compositional variation trend of spinel grain from center to edge.

基性岩中, 铂族元素仅呈分散状态出现, 并且主要是钼、钨、铀和铯。因此, 在含铂超基性岩中主要是铁铂矿和钨矿。

从含铬建造向含铂建造过渡, 这类矿物的铬铁矿-磁铁矿成分变化趋势在图解中表现很明显, 可以解释为超基性岩浆作用中硫的作用增加:



分散性铂族元素的专属性特征的变化  $(\text{Ru} + \text{Os} + \text{Ir}) \rightarrow (\text{Pt} + \text{Pd})$  也与此有关, 变成更高的相对化学位和硫化铂, 特别是硫化钨。

业已证明, 超基性岩浆作用中硫的化学活动性增加与其碱度增加直接有关。这表现在主要橄榄岩类型的有规律置换: 方辉橄榄岩-二辉橄榄岩-异剥橄榄岩, 以及与褶皱带中火山岩的组合: 含铬铁矿建造的超基性岩从属于蛇绿岩带的拉斑玄武岩建造, 而含铂的超基性岩大部分与碱度增高的玄武岩形成共生组合。

在流体-岩浆相互作用过程中, 橄榄岩岩浆通常在一定程度上会失去稳定性, 并发育成液态不混溶。结果形成与辉石岩共生的纯橄榄岩、斜方辉石岩、二辉岩或单斜辉石岩, 与此相应, 也有方辉橄榄岩型、二辉橄榄岩型或二辉岩型橄榄岩岩浆。从纯橄榄岩建造属性的观点来看, 强调它们对铂族金属的地球化学专属性是非常重要的。

在含铬铁矿的建造中, 纯橄榄岩的特征是含有 Ru、Os 和 Ir 等杂质元素, 而在含铂建造中, 占主导的杂质元素则是铂和钨。含铂建造所特有的铂、钨纯橄榄岩可以向橄榄石岩 (镁质纯橄榄岩) 逐渐过渡。

纯橄榄岩-橄榄石岩岩浆的特征是其分异作用过程伴随着铁的强烈堆积,这也可以解释为铂和钯的有效萃取(堆积),因为它们不仅具有亲铜的地球化学性质,而且也具有亲铁地球化学性质。特殊铂矿床的形成可能就是与这种岩浆分异作用趋势有关,其例子如乌拉尔(塔吉尔市北)古雪瓦果尔斯克橄榄石-磁铁矿型铂矿石和南非布什维尔德岩体富铂纯镁铁橄榄岩。

## 2 南非布什维尔德矿床、中国红旗岭矿床以及俄罗斯塔尔纳赫矿床对比研究

布什维尔德岩体中产有世界上规模最大的铂钯矿床,其主要类型可以反映铂-钯地球化学性质的两重性。一方面说明它们与硫的高度化学亲和性(亲硫性),另一方面又说明它们与铁的高度化学亲和性(亲铁性)。与此相应,布什维尔德岩体的铂矿床一方面附属于富硫的铬铁矿和辉石层(少硫化物型矿床),另一方面又从属于富铁的纯镁铁橄榄岩,后者在侵入体下部与分层矿体的辉石岩形成共生组合,而在上部则呈筒状侵入于层状岩系之中。

根据资料<sup>[7]</sup>,纯镁铁橄榄岩(含铂 63.1 g/t)成分如下(%): SiO<sub>2</sub> 34.25, TiO<sub>2</sub> 0.05, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.45, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.10, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2.90, FeO 35.55, MnO 0.40, MgO 22.0, CaO 2.35, Na<sub>2</sub>O 0.20, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.05, H<sub>2</sub>O 0.55, 总量 99.85。纯镁铁橄榄岩的富铂性及其总是与异剥岩和苏长岩稳定共生,证明它们与富铁岩浆(异剥橄榄岩质或橄榄单斜辉石岩质岩浆)中的液态不混溶现象密切关系。在莫依湖克和傲岸维尔瓦赫特岩筒被揭露之后,发现它们呈直角切穿整个层系。但是,应当注意,也发现了很大的纯镁铁橄榄岩矿体,它与伟晶状异剥岩有关并与地层呈整合接触<sup>[7]</sup>。显然,富铁异剥橄榄岩岩浆发生了纯橄榄岩-辉石岩分离,在分离过程中,由于铂的亲铁性,富铁的纯镁铁橄榄岩岩浆富集了铂,从而决定了纯橄榄岩的工业价值,虽然在与其共生的岩石(伟晶状异剥岩等)中也可以发现铂矿物。

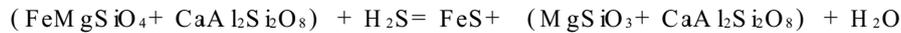
布什维尔德侵入体的美妙之处在于,侵入体中也形成了象纯镁铁橄榄岩这样的富铁岩石。这主要是因为富铁岩石与进入的透岩浆流体隔离<sup>[7]</sup>,因为在这种流体的作用下,与其相应的极其富铁的熔体应当失去稳定性,并遭受硫化作用。与这类相互作用有关的是复合(不均匀)矿石的形成,其成矿物质取决于两种作用:布什维尔德型岩浆分异作用和与富铁熔浆硫化作用有关的透岩浆流体带入成矿金属。

含铂熔体的这种流体硫化作用过程伴随着硫、铜的带入,因此,亲硫金属元素可能引发以下反应(以标准矿物形式):



在这类成岩作用的基础上,将产生含矿(硫化物)辉石岩岩浆,它们的侵入将导致辉石岩型含铂铜镍硫化物矿石的形成。其例子如中国红旗岭矿床(Tang Zhongli<sup>[2, 3]</sup>):一个侵入于前寒武纪褶皱带结晶杂岩的侵入型矿体。这类矿床的矿石是浸染型的,具有特征的陨铁结构。这种结构反映共结型含矿熔浆的正常结晶作用,其液相线矿物为辉石。它的结晶伴随着硫化物矿化作用:辉石-辉石+充填辉石颗粒粒间的硫化物。在这种铜镍硫化物-硅酸盐系统中,通常不发育液态不混溶作用,因此矿石主要是浸染型。与此不同,在以含斜长石的含铂铁质纯橄榄岩和橄长岩熔浆为基础的矿床中,常发生硫化物熔浆与硅酸盐熔浆的不混溶,导致富的致密硫化物熔浆的分离和巨型铜镍矿床的形成,其例子如加拿大肖德别里苏长岩型矿床,俄

罗斯西伯利亚地台诺里尔斯克苦橄岩型矿床。如果以标准矿物分子的形式表示, 富铁熔浆的硫化作用图式可以用以下反应来表示:



在这种情况下产生的硫化物和硅酸盐熔浆实际上不混溶, 明显表现为浸染状矿石的水滴状结构。其实例有诺里尔斯克矿床的浸染状矿石(图2), 是熔浆中硫化物-硅酸盐液态不混溶的结果。硫化物液滴发生上(黄铁矿)、下(镍黄铁矿)分层, 一般其围岩辉长岩-辉绿岩有一圈交代变质晕圈。据报道, 其中有斜长石、单斜辉石、斜方辉石、黑云母、石榴石、磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、葡萄石、滑石、绿泥石、蛇纹石、方解石、沸石和硬石膏。交代变质晕中最为特征的是辉长岩-辉绿岩的葡萄石化。

这也是在诺里尔斯克地区侵入体底部形成巨型矿体的致密硫化物矿石成因的基础。在诺里尔斯克地区, 规模最大的的是塔尔纳赫矿床。

塔尔纳赫矿床的巨大致密硫化物矿体的寄主岩是侵入于西伯利亚地台盖层中的苦橄岩-辉长岩-辉绿岩岩床(图3)。浸染状矿石在矿床中据次要地位。根据矿石结构, 可以分成以下几种矿石: 辉长岩-辉绿岩中具有圆形硫化物析离体的滴状矿石, 常分解为下部镍黄铁矿-黄铁矿带和上部黄铜矿带; 海绵陨铁结构和填隙状矿石, 硫化物析离体相对硅酸盐晶体呈他形; 角砾状和细脉状矿石, 反映在辉长岩-辉绿岩和接触变质围岩中叠加了硫化物矿化作用。

具有特色的是塔尔纳赫矿床铂和钯的富化作用, 因此, 诺里尔斯克的矿石与上述布什维尔德矿床相近。与布什维尔德岩体一样, 在塔尔纳赫, 也可以分出含铂而少硫化物的辉石岩层和苏长岩层。塔尔纳赫侵入体的韵律性分层结构也与布什维尔德相似, 可以分出下部(主要)含矿层和上部(次要)含矿层(图4)。铂族金属的含量与铬和硫的富集呈正相关, 表明上部和下部层位的铂族元素含矿性是一致的。但是, 下部层位与上部层位具有根本的区别, 存在两类铜镍硫化物矿化作用: 致密的和极为分散的液滴状矿化。显然, 下部层位的岩浆分异作用表现较完全, 象布什维尔德侵入体一样, 达到了形成极富铁的熔浆(铁质苦橄岩、铁质橄长岩、纯镁铁橄长岩)的水平, 它们在流体的作用下会失去稳定, 遭受透岩浆硫化作用, 导致铜和亲硫金属的大规模堆积, 形成硫化物矿浆。在这方面, 无论是塔尔纳赫和布什维尔德侵入体的一般性岩石化学对比, 还是塔尔纳赫致密块状硫化物矿石和布什维尔德纯镁铁橄长

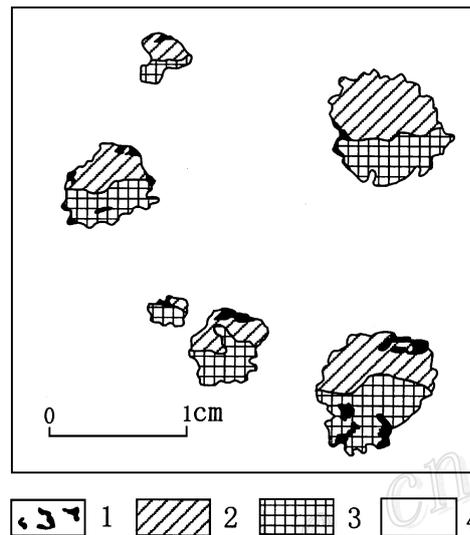


图2 诺里尔斯克矿床篋德维日河露天采场鲕粒浸染状矿石素描图

1~3—硫化物析离体矿物: 1—磁铁矿; 2—黄铜矿; 3—黄铁矿与镍黄铁矿; 4—含少量粒间硫化物浸染体的橄长辉长岩-辉绿岩

Fig. 2. Oolitic disseminated ore from Medveir

River open pit of the Norilsk ore deposit.

1~3—Minerals of sulfide segregated bodies: 1—Magnetite; 2—Chalcopyrite; 3—Pyrite and pentlandite; 4—Olivine gabbro-diorite that contain small amounts of intergranular sulfide disseminated bodies.

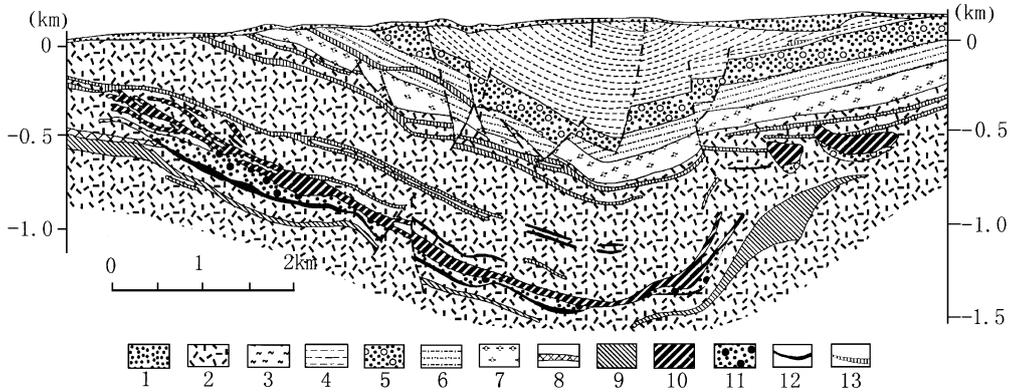


图3 塔尔纳赫侵入体(诺里尔斯克地区)地质剖面示意图

1—第四系; 2—地台盖层沉积岩; 3—7—火山岩系: 3—莫龙戈夫未分异火山岩; 4—贫镍的纳杰斯金强分异火山岩(见有含铬铁矿层); 5—夹有富镍苦橄岩层的古德其星火山岩; 6—贫镍的蛇尾尔明火山岩; 7—贫铬和镍的依瓦阱亚碱性火山岩; 8—下塔尔纳赫未分异岩床; 9—下塔尔纳赫层状侵入体; 10~12—上塔尔纳赫层状含矿侵入体: 10—辉长闪长岩; 11—苦橄岩和辉长闪长岩; 具浸染状硫化物矿化; 12—块状硫化物矿石; 13—粗面煌绿岩; 可见火山岩系与含矿侵入体对地台凹陷的专属性

Fig. 3. Geological section of Taernahe intrusive body in Norilsk area.

1—Quaternary; 2—Sedimentary rocks of platform cover; 3—7—Volcanic rocks: 3—Molongefu aschistic volcanic rocks; 4—Ni-poor Najesejin strongly differentiated volcanic rocks that contain chromite beds; 5—Gudeqixing volcanic rocks intercalated with Ni-rich picrite beds; 6—Ni-poor Sheweierming volcanic rocks; 7—Cr- and Ni-poor Ywajingya alkaline volcanic rocks; 8—Upper Taernahe ashistic sill; 9—Lower Taernahe stratiform intrusive body; 10—12—Upper Taernahe stratiform ore-bearing intrusive body; 10—Gabbro-diorite; 11—Picrite and gabbro-diorite; 12—Massive sulfide ore; 13—Tachydiabase. Volcanic rocks and ore-bearing intrusive bodies show specialization to the platformal depression.

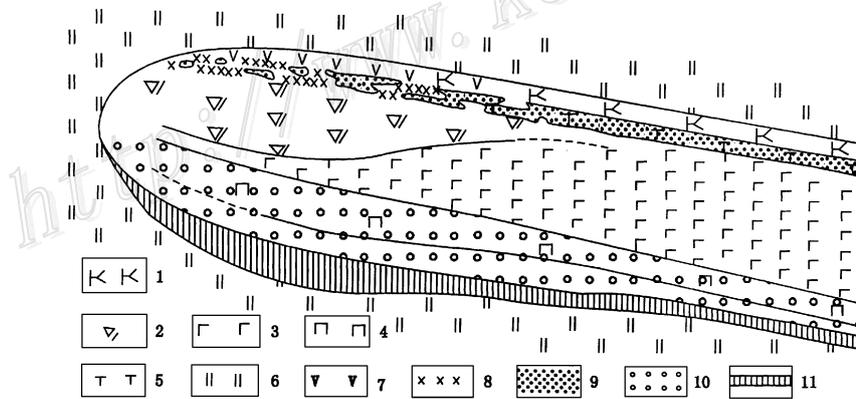


图4 塔尔纳赫侵入体上、下含矿带的分层样式

1—接触带辉长岩-煌绿岩; 2—闪长岩; 3—无橄榄石、含橄榄石和橄辉长-煌绿岩; 4—苦橄质辉长-煌绿岩; 5—斑杂状辉长-煌绿岩; 6—侵入体外接触带交代蚀变岩; 7—变侵入交代岩; 8~11—铂矿石类型: 8—变侵入交代岩中的夕卡岩型; 9—上斑杂岩中的少硫化物型; 10—苦橄岩和下斑杂岩中硫化物型, 含浸染状硫化物矿化; 11—致密硫化物矿石

Fig. 4. Stratification style of upper and lower ore-bearing zones in the Taernahe intrusive body.

1—Gabbro-diorite of contact zone; 2—Diorite; 3—Olivine-lacking, olivine-bearing and olivine gabbro-lamprophyric diorite; 4—Picritic gabbro-diorite; 5—Taxitic gabbro-diorite; 6—Metasomatic altered rocks along exocontact zone of intrusive body; 7—Meta-intrusive metasomite; 8—11—Types of Pt ores; 8—Meta-intrusive metasomite skarn type; 9—Sulfide-deficient type in upper taxite; 10—Sulfide type in picrite and lower taxite, which contains disseminated sulfide mineralization; 11—Massive sulfide ore.

岩的比较矿物学研究, 均可以得出可靠证明。

对比这两个岩体的岩石化学图解(图 5), 表明它们总体相似, 并且在塔尔纳赫侵入体图解中铜镍硫化物矿石占据了布什维尔德纯镁铁橄榄岩的位置(在富铁成分区)。它们的相似性不仅可以依据一般金属组分追索到, 而且也可以依据有别于其他矿石类型(铬铁矿型和单斜辉石岩型)的铂矿化作用的矿物学特征来证明。尖晶石成分的变化也很明显, 在纯镁铁橄榄岩(和橄榄石岩)中, 为尖晶石-磁铁矿系列固溶体, 成分接近于硫化物矿石所特有的这类矿物的铬铁矿-磁铁矿系列(图 6)。铂族金属和铬尖晶石矿化专属性的这种对应性肯定地揭示了诺里尔斯克硫化物矿石的成因本质, 同时反映了它们与铁质熔浆(苦橄岩-辉长岩-辉绿岩岩床的富铂族金属和铁的分异产物)在透岩浆流体作用下发生的硫化作用的关系。

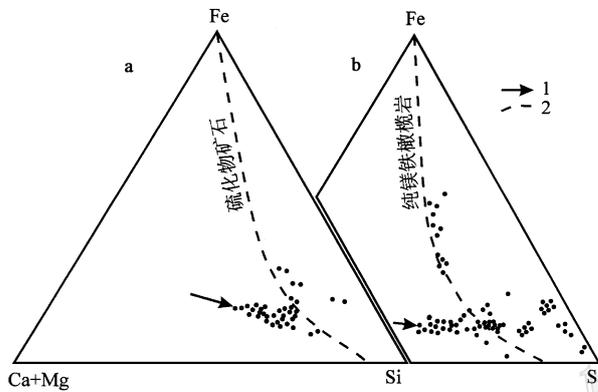


图 5 塔尔纳赫 (a) 与布什维尔德 (b) 含矿侵入体岩石化学图解

侵入体 (1) 的结晶分异作用以残余熔浆 (2) 与极富铁、也富铂族金属的分异体的分离而告终。在布什维尔德岩体中, 以这种作用为基础形成了含铂纯镁铁橄榄岩, 而在塔尔纳赫侵入体中, 熔浆遭受了硫化作用, 形成含铂的铜镍硫化物矿石

Fig. 5. Petrochemical diagram of Taernahe (a) and Bushveld (b) ore-bearing intrusive bodies. Crystallization differentiation of Intrusive (1) ends in the separation of residual melt (2) from differentiated body that contains very rich iron and rich Pt family metals. Such an action results in the formation of Pt-bearing mafic peridotite in Bushveld rock body and Pt-bearing Cu-Ni sulfide ore in Taernahe intrusive body.

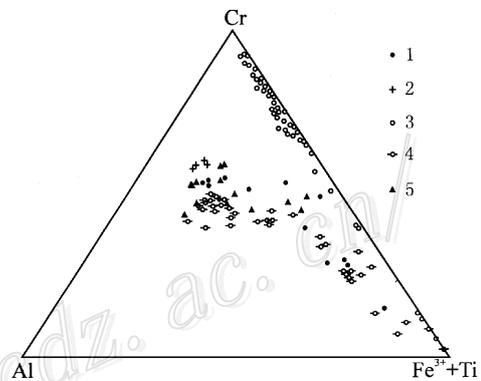


图 6 尖晶石成分的变化

1~2—东布什维尔德岩管: 1—纯镁铁橄榄岩; 2—从属于纯橄榄岩的铬铁矿; 3—澳大利亚科马提岩的硫化物矿石; 4~5—诺里尔斯克省(诺里尔斯克一号侵入体, 塔尔纳赫侵入体和曼德罗夫斯克侵入体): 4—含硫化物和铂的苦橄岩; 5—上述岩石中的铬铁矿团块

Fig. 6. Compositional variation of spinels. 1~2—East Bushveld pipes: 1—Mafic dunite; 2—Chromite belonging to dunite; 3—Sulfide ore of komatiite in Australia; 4~5—Noliersk province (Noliersk No. 1 intrusive body, Taernahe intrusive body and Mandelufusk intrusive body): 4—Sulfide- and Pt-bearing picrite; 5—Chromite lumps in above-mentioned rocks.

在透岩浆流体作用下发生的硫化作用的动力学方面, 经常发生液态不混溶作用, 表现为水滴状浸染矿石构造, 同时硫化物滴状物发生沉降, 并在岩床的底部形成致密块状硫化物矿石。但是, 由于分异产物、特别是富铁分异产物的硫化作用, 这样的矿石也可以独立形成。熔浆的硫化作用伴随着铜和亲铜金属的带入, 同时, 由于液态不混溶作用, 促使硫化物熔体从硅酸盐熔体中大量萃取镍和铂族金属。

熔体中发生硫化物-硅酸盐液态不混溶的解释, 在硫化作用动力学上可以避免有关硅酸盐

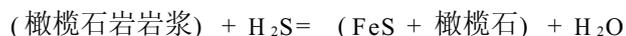
熔体中成矿组分(金属和硫)含量高得不太现实的概念,即相对于巨型铜镍硫化物矿床来说,要求母体的成矿物质含量过高。含有大量硫化物滴状物的诺里尔斯克矿床的辉长岩-辉绿岩的形成也是富铁苦橄质熔浆(同时也含有成矿物质液滴)硫化作用的结果。因此,这类岩体中硫化物矿化的规模只取决于铁质橄长岩岩浆分异过程中堆积下来的铁的数量,相应地,矿化规模也可能无限大。

因此,塔尔纳赫矿床是复杂的,含有在岩浆分异过程中富集的金属和与硫一起由透岩浆流体带入的金属。

诺里尔斯克含矿侵入体的所有研究者都注意到了它们的“镶嵌”特点,认为这是它们在不破坏其原始产状的情况下大量置换西伯利亚地台盖层以及侵入体以捕虏体的形式捕获大量地台盖层岩块的结果。这反映了侵入体侵入作用的流体特征,其主要作用机制是岩浆的置换作用,同时伴随着由透岩浆流体大量带入地台盖层岩块。

### 3 金川铜镍硫化物矿床成因及成矿预测

与金川含铂铜镍矿床有关的超基性侵入体侵入于超镁铁质侵入体中。超镁铁质侵入体走向东西-北西,长约6 km,厚度变化为20~527 m,平均约300 m,侵入于太古宇-下元古界杂岩中,后者的组成岩石有镁质大理岩、混合岩、片麻岩和角闪岩,倾向南、南西,倾角 $60^{\circ}$ ~ $70^{\circ}$ 。侵入体也是向这个方向倾斜,其规模在一定程度上受控于与角闪岩互层的混合岩化片麻岩和大理岩的接触边界。该侵入体的详细形态见汤中立(1998<sup>[3]</sup>, 1999<sup>[2]</sup>)的文章,他在详细钻探的基础上查明了侵入体与围岩的复杂接触关系。从超基性侵入体钻孔地质剖面图(图7,据汤中立,1999<sup>[2]</sup>)中可见,侵入体沿着与大量围岩(混合岩化片麻岩,特别是白云质大理岩)发生置换作用的边界侵入,通过钻探,在侵入体内部也发现有围岩碎块(置换残余)。在主要由二辉橄榄岩组成的中部最厚部位(约600 m),发现有韵律性分层的特点,出现斜长石二辉橄榄岩与异剥橄榄岩层,与产于侵入体下部的纯橄榄岩形成共生组合。在剖面图(图7)上,清晰显示了该矿床铜镍硫化物矿石组合的地质位置,矿石产于二辉橄榄岩与白云质大理岩的接触带上。在许多剖面中,可见矿石组合贯入二辉橄榄岩体,清楚表明它是侵入体的独立(第二次)形成相。矿石组合的形成一直持续到钻孔未追索到的补给通道(Фидер),可以确定侵入体与深部分异岩浆地幔岩浆源的关系。在这个岩浆源区,发生了熔体的分化,变为二辉橄榄岩(上部)和铁质橄榄石岩(下部)部分,决定了岩体的二相结构,其中每一个相都单独进行分异。富铁含铂橄榄石岩岩浆发生流体硫化作用,形成了硅酸盐-硫化物熔体,相应于该矿床的橄榄石-硫化物浸染状矿石。在岩石化学图解(图8)中,它们占据富磁铁橄榄石岩的位置,是含铂建造纯橄榄岩岩浆作用的自然分异产物。乌拉尔含铂带的古雪瓦果尔斯克矿床(塔吉尔市地区)可以作为橄榄石-磁铁矿(橄榄石岩)型铂钯矿床的代表。导致形成金川矿床的含铂橄榄石岩岩浆的流体的硫化作用,以标准矿物的形式表示,其反应式看来如下式所示:



与诺里尔斯克不同,硫化作用没有导致矿浆和硫化物-硅酸盐液态不混溶的发生,这可以解释为什么金川矿床缺乏致密的富硫化物矿石。金川矿床中产有大量浸染状矿石,品位不高

(Tang, 1998<sup>[3]</sup>, 1999<sup>[2]</sup>), 具有特征的海面陨铁结构。它反映了含矿熔浆的正常共结结晶作用: 橄榄石→ 橄榄石 + 铁镍硫化物, 同时在残余熔浆中积聚铜、亲硫金属、铂、钯和金, 残余岩浆进一步又分解为致密的镍矿型和黄铜矿型。上述情况很符合不同类型铂矿石的分布规律 (Tang, 1998<sup>[3]</sup>), 根据尖晶石成分变化规律 (Barnes, Tang, 1999<sup>[4]</sup>), 在温度最低的黄铜矿型矿石中铂和钯最为富集。

因此, 金川矿床实质上是由两个同源侵入体——二辉橄榄岩(I)侵入体和含矿纯橄榄岩侵入体(II)组成, 它们起源于同一个岩浆房, 沿不同的断裂构造带侵入。但是, 它们的分异作用是各自单独进行的, 并以不同的尖晶石成分和成分变化趋势为特征, 如图9所示 (根据 Barnes and Tang, 1999<sup>[4]</sup>发表资料编制)。在二辉橄榄岩中, 常见箭头所示的两种尖晶石成分变化趋势:  $Cr \rightarrow Al$  和  $Cr \rightarrow Fe^{3+}$ , 表明二辉橄榄岩在方辉橄榄岩-二辉橄榄岩-异剥橄榄岩系列的占据中间位置。含铂超基性岩的典型趋势是异剥橄榄岩趋势 ( $Cr \rightarrow Fe^{3+}$ ), 这种趋势在该矿床的含矿纯橄榄岩中也可以见到, 尽管其中的铬尖晶石的铬含量比二辉橄榄岩贫得多。

显然, 在地幔岩浆源原始分层过程中, 与镁具有很高化学亲和力的铬富集在上部富镁的二辉橄榄岩质熔浆中, 而下部则是极富铁的橄榄石岩熔浆, 并在后来发生了流体硫化作用 (橄榄石岩熔体 +  $H_2S =$  含硫化物的纯橄榄岩熔浆 +  $H_2O$ )。但是, 硫化作用并不改变熔浆之间的铬-铝比值。由于含矿熔体结晶分异的结果, 产生了具有海绵陨铁结构的含硫化物纯橄榄岩 (浸染状矿石), 其尖晶石成分相对贫铬, 尖晶石与磁铁矿形成固溶体(II), 并在原生铬尖晶石颗粒边部形成次变边。在这方面, 金川具有代表性特征, 因为富铁熔浆的硫化作用未导致在熔浆中发生分离出致密富镍硫化物熔浆的液态不混溶, 象诺里尔斯克或与南澳大利亚科马提岩有关的次火山岩型矿床那样, 在其致密富镍硫化物矿石中含有实际上不含铝的铬铁矿-尖晶石固溶体。与它们不同, 金川的致密矿石贫镍, 属于残余含矿熔浆强烈熔离分异作用的晚期产物。

从成因角度来看, 包含信息最丰富的是硫化物中铂族耐熔元素混入物 (Os、Ir、Ru、Rh), 它们总是最大限度地富集在早期温度最高的矿石中。在这方面, 它们与趋向于堆积在晚

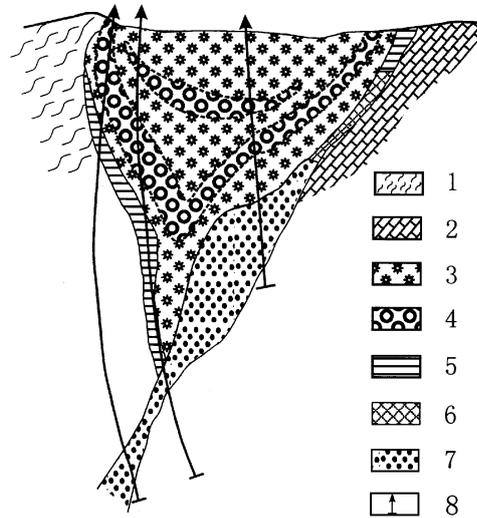


图7 金川矿床二辉橄榄岩中部钻孔地质剖面示意图

(据 Tang Zhongli<sup>[2]</sup>剖面 34 简化)

1~2—太古界-下元古界杂岩: 1—混合岩化片麻岩; 2—白云质大理岩; 3—二辉橄榄岩; 4—斜长石二辉橄榄岩; 5—二辉岩; 6—贯入型富矿石; 7—铜镍矿石; 8—钻孔

Fig. 7. Geological section along the middle drill holes of the Jinchuan ore deposit.

1~2—Archean-Lower Proterozoic complexes: 1—Migmatized gneiss; 2—Dolomitic marble; 3—Lherzolite; 4—Plagioclase lherzolite; 5—Websterite; 6—Injection type rich ore; 7—Cu-Ni ore; 8—Drill hole.

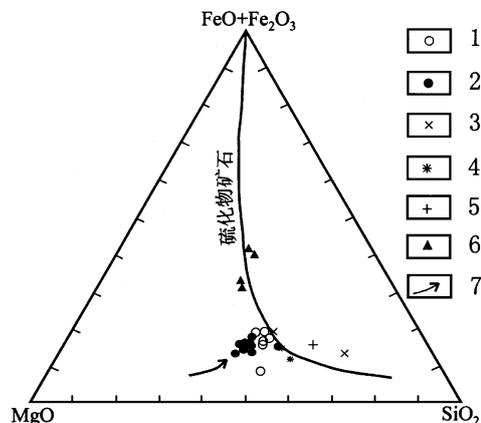


图8 金川矿床含矿侵入体岩石化学图解 (wt%)  
(岩石和矿石平均成分对比, 原始资料据[3])  
1—二辉橄榄岩; 2—纯橄榄岩; 3—橄榄二辉岩; 4—二辉岩; 5—浸染状铜镍矿石; 6—致密镍黄铁矿-黄铜矿矿石; 7—含矿岩浆  
变异趋势。实线表示深部岩浆房中铜镍硫化物-硅酸盐熔浆分层  
曲线

Fig. 8. Petrochemical diagram of ore-bearing intrusive body in the Jinchuan ore deposit.

1—Lherzolite; 2—Dunite; 3—Olivine websterite; 4—Websterite; 5—Disseminated Cu-Ni ore; 6—Massive pentlandite-chalcocopyrite ore; 7—Variation trend of ore-bearing magma. Solid line refers to layering curve of ore-silicate melt

in the deep magma chamber.

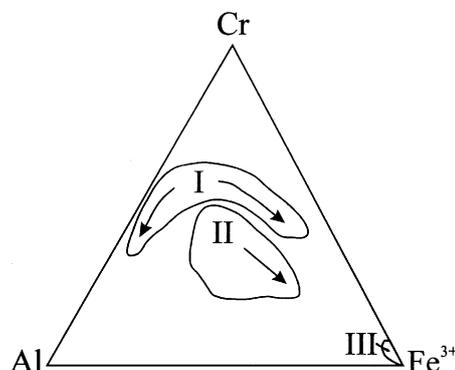


图9 金川矿床二辉橄榄岩 (I) 与铜镍硫化物矿石 (II) 中铬尖晶石  
晶石的成分变化

箭头表示变化趋势, 铬尖晶石和磁铁矿成分变化区 (III) 据文献 [4] 资料圈定

Fig. 9. Compositional variation of picotites in lherzolite (I) and Cu-Ni sulfide ore (II).

Arrows indicate variation trend. Compositional variation region (III) is delineated on the basis of Reference [4].

期分异产物中的 Pt 和 Pd 不同。在金川矿床中, 最富耐熔铂族元素的是具有海绵陨铁结构的浸染状矿石中的硫化物 (平均值, 单位 ppb, 据 Tang, 1998<sup>[3]</sup>): Os= 149, Ir= 145, Ru= 131, Rh= 77, Pd= 1173, Pt= 1855, Au= 1887, Ni= 14%, Cu= 10%)。这种类型比其它类型的矿石占优势, 同时也实际上形成了金川超大型矿床。其它类型的矿石明显要少于它, 根据铂族元素的分布判断, 它们是分裂为致密镍黄铁矿-磁黄铁矿矿石 (括号中的数字) 和黄铜矿型矿石 (硫化物数据, ppb) 的残余熔浆的最终分异产物: Os= 21 (35), Ir= 7 (22), Ru= 16 (30), Rh= 5 (14), Au= 1887, Pd= 4230 (111), Pt= 26487 (62); Cu= 31 (3)%, Ni= 19 (8)%。晚期的富铜分异产物比原始浸染状矿石富含挥发分, 以及砷、锑、硒, 表明它们与岩浆期后低温作用和热液成矿作用有关, 后者超出了侵入体范围之外, 进入到了围岩中。

最后再次强调, 含铂铜镍矿石不是该矿床二辉橄榄岩侵入体的分异产物, 而是含硫化物纯橄榄岩的独立侵入体, 后者也象二辉橄榄岩本身那样, 是深部岩浆源的分异产物。这些关系的阐明可以最合理地成矿作用空间分布前景作出评价, 因为成矿物质的供给通道具有北西走向。从这个角度来看, 金川矿床的深部勘探看来是十分不足的。

### 参 考 文 献

- 1 汤中立. 金川铜镍硫化物 (含铂) 矿床成矿模式及地质对比 [M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- 2 Tang Zhongli, Jinchuan copper-nickel sulphide deposit [M]. Geological Publishing House, Beijing, China, 1999, 84.
- 3 Tang Zhongli Barnes S J. Mineralization mechanism of magmatic sulphide deposits [M]. Geological Publishing House,

- Beijing, China, 1998, 85.
- 4 Barnes S J, Tang Zhongli. Chrome spinels from the Jinchuan Ni-Cu sulphide deposit, Gansu Province, People's Republic of China [J]. *Econ. Geol.*, 1999, 94 (5): 343~ 356.
  - 5 Marakushev A A. Origin of the Earth and the nature of its endogenic[M]. Nauka Publishing House, Moscow, Russia, 1998, 255.
  - 6 Маракушев А. А., Паңеях Н. А., Зотов И. А. и др., Петрологические модели формирования рудных месторождений-гигантов // Геология руд [J]. месторождений. 1998, (3): 3~ 26.
  - 7 Вагнер П. А. Месторождения платины и рудники Южной Африки [M]. М.: Цветмет, 1932, 279.

## THE ORIGIN OF COPPER-NICKEL SULFIDE DEPOSITS — Exem plified by Norilsk (Russia) and Jinchuan (China)

Luo Zhaohua<sup>1</sup>, A A Marakushev<sup>2</sup>, H H Paniakh<sup>2</sup> and Su Shangguo<sup>1</sup>

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083;

2 Institute of Mineral Deposits, Petrology, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow 1009017)

**Key words:** copper-nickel sulfide deposit, origin, Norilsk in Russian, Jinchuan in Russian

### Abstract

There are two metallogenic formations for copper-nickel deposits related to ultrabasic magmatism, namely chrome- and platinum-bearing formations. Their mineralization is clearly reflected in the compositional variations of spinel group minerals. Spinel from chrome-bearing formations are of chromite-spinel series, while those in the platinum-bearing formation are of spinel-magnetite series. Contribution of sulfur to ultrabasic magmatic processes leads to transformation of metallogenic formations from chrome- to platinum-bearing ones and causes the following reaction:  $4\text{FeO} + \text{S} = \text{FeS} + \text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetite). At the same time, the specialization of dispersed platinum group elements will take corresponding transformation:  $(\text{Ru} + \text{Os} + \text{Ir}) \rightarrow (\text{Pt} + \text{Pd})$ . Accordingly, chrome-bearing formation is mainly rich in Ru, Os and Ir, whereas latinum-bearing formation is rich in Pt and Pd. The increase of sulfur chemical activities in ultrabasic magmatic processes is directly related to its alkalinity. Therefore, platinum-bearing ultrabasic rocks are mostly associated with alkali-rich basalts. When sulfurization takes place in iron-rich metals, it will cause immiscibility between sulfide and silicate melts and lead to the formation of ore magma. Therefore, Jinchuan platinum-bearing copper-nickel orebodies are independent intrusives of sulfide-bearing dunites instead of being differentiates of lherzolite intrusives in the deposit. Such independent intrusives are differentiates of deep magma source like lherzolite itself.