

铜镍硫化物矿床研究进展

韦延光¹, 冯本智², 邓 军¹, 王建国¹

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 吉林大学, 吉林 长春 130061)

[摘 要] 从赋矿岩体、控矿因素、成矿作用和矿体类型等方面综述了铜镍硫化物矿床的最新研究进展和成果。认为赋矿岩体由镁铁质—超镁铁质的不同岩石组成, 其锆同位素组成显示深源的特点; 岩浆的深部熔离作用使岩体的出露大小与矿床规模没有正相关性; 成矿界面主要有岩性组合界面、构造界面、构造物理—化学界面和构造流体界面等, 它们严格控制成矿物质的最终定位; 除岩浆熔离和结晶分异成矿作用外, 成矿作用强调厂硫化作用、热液成矿作用和接触交代成矿作用, 相应的形成了热液型矿体和矽卡岩型矿体。

[关键词] 铜镍硫化物矿床; 赋矿岩体; 控矿构造; 成矿作用; 研究进展

[中图分类号] P618. 63 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-2427 (2004) 03-0020-06

加拿大 Voisey 's Bay 超人型 Ni - Cu - Co 矿床 (镍储量 160 万 t) 的发现, 铜镍硫化物矿床, 甚至与镁铁质—超镁铁质岩有关的矿床又成为最近十年以来矿床地质工作的研究热点之一。在铜镍硫化物矿床研究中, 对含矿岩石的研究、矿体类型的划分、控矿构造及成矿作用的分析等都取得了明显的进步。本文综述近年来的研究成果, 拟在介绍与矿床有关的镁铁质—超镁铁质岩体特征、矿床的成矿方式、成矿过程以及控矿构造因素等新成果基础上, 对存在的问题利成矿动力学等方面进行讨论, 以便对铜镍硫化物矿床的成矿作用过程有更深入的认识, 从而有利于指导找矿。

1 赋矿岩体

铜镍硫化物矿床的赋矿岩体都是基性—超基性岩石, 除陨石撞击成因^[1]外, 它们主要分布于陆缘拉张带、大陆裂谷带及裂陷槽中。成岩时代主要有太古宙、古—中元古代及中生代 (表 1)。岩体主要呈岩墙状、岩盆状、不规则状产出, 但规模大小不一。相比之下, 国内的含矿岩体往往较小, 如金川超大型铜镍矿床的赋矿岩体出露面积不足 2km², 同为超大型矿床的布什维尔、诺里尔斯克、萨德贝里等岩体出露, 露面积达几十平方公里, 甚至大于 1 000km²。岩体的岩石类型主要包括了苏长岩—辉长岩、橄榄辉石岩—二辉橄榄岩—橄榄岩及与溢流玄武岩相当的侵入体、科马提岩等。据统计, 在橄榄岩和二辉橄榄岩中, 其 MgO 平均含量为 20.0 % ~ 32.0 %, Fe₂O₃ + FeO 含量为 11.0 % ~ 15.5 %, m/f 值为 2.3 ~ 5.0; 辉长岩、苏长岩中, MgO 平均含量为 8.0 % ~ 21.0 %, Fe₂O₃ + FeO 含量为 6.0 % ~ 18.0 %, m/f 值为 0.6 ~ 2.4。它们是 (镁) 铁质—超 (镁) 铁质岩^[6]。在 AFM 图解上^[7], 它们的投点主要落入了拉斑玄武岩系列中 (图 1), 并趋向于 M 端元, 为高 MgO 拉斑玄武岩系列。岩石的成分分析也表明造岩矿物中都有较高的 Ni 含量, 如对金川岩体的橄榄岩和二辉橄榄岩中的橄榄石、辉石作电子探针分析 (表 2) 的结果^[2], 橄

[收稿日期] 2004-03-23; **[修订日期]** 2004-06-22

[作者简介] 韦延光 (1976 -), 男, 广西梧州人, 中国地质大学地球科学与资源学院博士生。

表 1 主要铜镍硫化物矿床的产出构造环境及岩石组合^[2-5]

构造环境	具体矿床及年龄/时代	岩石 (组合)
绿岩带	汤普逊 (大于 1 800Ma)	科马提岩
大陆边缘裂谷	金川 (1 508 ±31Ma)	二辉橄榄岩—橄榄岩
大陆内部裂谷	萨德伯里 (1 849Ma)	苏长岩—辉长岩
大陆内部裂谷	布什维尔德 (2 049 ~ 2 058Ma)	层状侵入杂岩
大陆裂谷	十月 (三叠纪)	相当于溢流玄武岩的侵入体
大陆内部裂谷	诺里尔斯克 (三叠纪)	相当于溢流玄武岩的侵入体
大陆边缘	红旗岭 (331 ~ 350Ma)	辉长岩—辉石岩—橄榄岩
大陆边缘	喀拉通克 (285 ±23 ~ 298 ±23Ma)	闪长岩—辉长苏长岩—橄榄苏长岩
大陆边缘	煎茶岭 (927.4 ±49Ma)	橄榄岩—辉石岩

榄岩中橄榄石、辉石含 NiO 分别为 0.23 % ,0.08 % ;辉石橄榄岩中则对应为 0.16 % ,0.06 % 。造岩矿物的高 NiO 含量为硫化作用和热液叠加作用成矿提供了必要条件。岩体明显具有深源的特征,锶同位素组成与上地幔现代玄武岩浆的⁸⁷Sr/⁸⁸Sr (0.704 ±0.002) 基本一致,如喀拉通克岩体的⁸⁷Sr/⁸⁸Sr 值为 0.703 3 ~ 0.704 41 ,赤柏松岩体两件样品的⁸⁷Sr/⁸⁸Sr 为 0.706 44 和 0.703 99 ,红旗岭的为 0.706 22^[8]。

2 控矿因素分析

由成矿系统理论^[9,10] ,铜镍硫化物矿床的形成与镁铁质—超镁铁质岩的产生、发展与演化密切相关,岩体的局部或者大部本身就是矿体。因此,控矿因素首先是大规模的控岩构造。如前所述,镁铁质—超镁铁质岩是幔源岩浆(可有地壳物质的加入)结晶分异的产物,因此,必须存在超壳的深大断裂作为导岩、导矿构造。铜镍硫化物矿床常常分布于板块边缘,板内裂谷带上,为此,唐红松等提出了铜镍硫化物矿床的边缘成矿效应。最近控岩构造的研究更注重与区域构造演化联系起来,取得较好的效果。如近来运用物探手段(地震 CT)对金,川岩体控岩构造的研

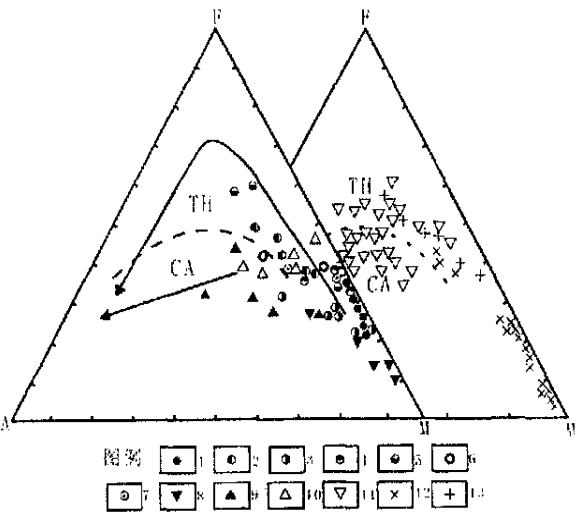


图 1 岩石 AFM 图解 (据汤中立等, 1996)

Fig. 1 The AFM diagram of wall rock
(After TANG Zhong - li et al. , 1996)

1. 金川; 2. 赤柏松; 3. 红旗岭; 4. 冷水箐; 5. 力马河;
6. 白马寨; 7. 大坡岭; 8. 煎茶岭; 9. 黄山; 10. 喀拉通克;
11. Sudbury; 12. Kambald; 13. Noril' sk

究表明^[11]，岩体北部的 F1 大断裂并非是岩体的导岩导矿构造，它是上陡下缓的铲式断裂，因此，结合区域构造格架，汤中立等认为金川地区存在大规模的推覆构造，金川矿床及其围岩都是推覆体，其下部是无根的。至于金川岩体真正的导岩构造，还有待进一步的研究。另外，控矿构造的另外一个特点是超壳的深大断裂虽然控制了赋矿岩体的产出，但矿体的定位往往直接受控于其次一级的断裂系统。

表 2 金川岩体橄榄岩和二辉橄榄岩中橄榄石、辉石电子探针分析结果

Table 2 The electron probe analysis of olivine and pyroxene in peridotite and buchnerite in Jinchuan rock - body

	橄榄岩		二辉橄榄岩	
	橄榄石	辉石	橄榄石	辉石
NiO	0.23	0.08	0.16	0.06
SiO ₂	40.20	56.02	40.06	55.56
CrO	0.06	0.28	0.01	0.06
TiO ₂	0.02	1.26	0.01	1.01
CaO	0.48	0.98	0.02	0.93
FeO	14.28	10.54	14.95	9.34
MgO	45.48	30.48	45.06	31.52
MnO	0.15	0.11	0.17	0.26
Al ₂ O ₃		0.36		0.00
Na ₂ O		0.02		0.02
K ₂ O		0.02		0.02
总计	100.90	100.15	100.43	98.78

界面控矿是目前矿床学研究的热点之一，并取得了重要进展^[12]。控矿界面主要包括岩性组合界面、构造界面、构造物理—化学界面、构造流体界面等。就铜镍硫化物矿床而言，边缘成矿效应实际就是一种广义的、大尺度的界面控矿。铜镍硫化物矿床所依附的镁铁质—超镁铁质岩体常常是复式岩体，但从成矿系统的角度考虑，各期的岩浆侵入活动共同组成一个完整的成矿过程。不同侵入期次岩浆活动之间，其界面控矿表现明显，如金川岩体中，富矿体更多地发育于由岩体下盘与蛇纹石化大理岩所组成的岩性界面上（图 2）。被认为陨石撞击成因的萨德贝里矿床，矿体也主要分布于苏长岩与蚀变玄武岩接触界面上（图 3）。这是宏观上的岩性（组合）界面控矿，同时，该界面也是构造物理—化学界面、构造—流体界面。

多数情况下，赋矿岩体是岩浆多期次脉动式侵入的产物，前人称为“复合岩体或侵入杂岩体”，比如著名的布什维尔德杂岩体。金川岩体的侵入期次问题不同学者有不同的划分，前人一般认为有 4 期或 5 期，最近研究成果认为最主要有含矿的纯橄榄岩相和几乎不含矿的辉石橄榄岩相两期岩浆侵入作用^[13]。在多期次岩浆侵入活动中，成矿物质多数在

晚期侵入体中富集或者矿体紧紧伴随这些晚期侵入体之后,从而表现出多期侵入构造的控矿作用。其原因与岩浆的深部熔离作用有关。

3 成矿作用及矿体类型

铜镍硫化物矿床的熔离富集成矿作用形成岩浆熔离型矿体已被地质工作者所认同。近年来的研究主要侧重在幔源岩浆在深部熔离之后的富集成矿作用,包括硫化成矿作用、热液成矿作用及接触交代成矿作用等,并取得了若干重要进展。

Kullerud 和 Yoder 的实验证明,在有高温气态硫存在的条件下,硅酸盐矿物结晶格架中的 Ni、Co 等很容易被活化迁移出来,形成各种硫化物。Naldrechl 认为超镁铁质岩浆侵入于富含黄铁矿建造环境中,岩浆的热作用可以破坏黄铁矿的稳定,形成磁黄铁矿,同时释放出 $1/4$ 单位的硫,并且硫可以进入岩浆体内,与硅酸盐矿物或熔浆发生反应形成铁镍硫化物,即硫化作用^[14]。硫化作用一般发育于岩浆活动的晚阶段或后期,它可使金属硫化物进一步富集,形成岩浆熔离型矿体与热液型矿体过渡类型的一种特殊矿体,这与矿石中普遍发育金属硫化物交代橄榄石、辉石等造岩矿物的现象相吻合。

铜镍硫化物矿床的热液成矿作用目前已受广泛关注。该热液成矿作用包括两个内涵:一是超镁铁质岩浆发生深部熔离作用和结晶分异作用之后,残留的富含成矿物质的熔浆中含有大量挥发性组分,随着温压的降低,当到达硫化物结晶条件时,该成矿体系已向热液体系过渡,最终固结形成的矿石具有明显的细脉状、网脉状构造和海棉陨铁状构造,应该属岩浆—热液过渡类型的矿石。另一种情况,镁铁质—超镁铁质岩浆成岩期所形成的稀疏微细浸染状矿化的岩石,在后期热液作用下,发生金属硫化物的活化,并迁移进入热液成矿系统,在合适地段沉淀富集成矿,这是传统的、典型的热液成矿作用。它可以使原来的矿体叠加改造,也可使原来

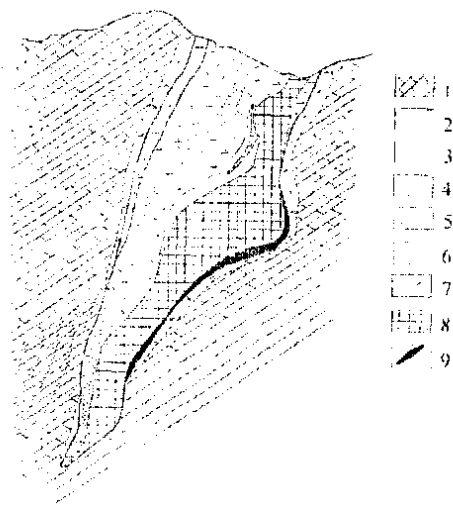


图2 金川矿区地质剖面示意图

(据甘肃第六地质队修编)

Fig. 2 The sketch profile of Jinchuan mining area (After the Sixth Geological Exploration Party, Gansu Province)

1. 大理岩; 2. 橄榄辉石岩; 3. 二辉橄榄岩; 4. 混合岩; 5. 黑云片麻岩; 6. 星点状岩体 (岩浆熔离矿体); 7. 矽卡岩; 8. 海绵陨铁状富矿体 (岩浆熔离矿体); 9. 矽卡岩型矿体

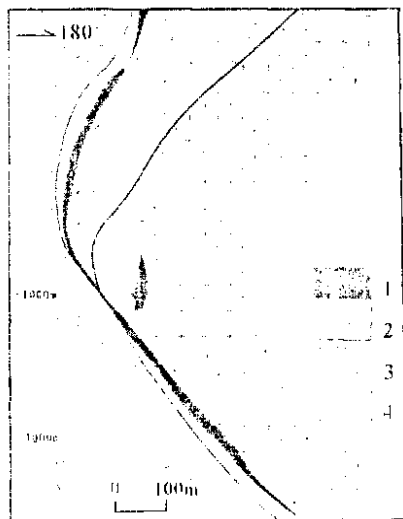


图3 萨德贝里矿区剖面示意图

(据 A. J. Naldren 等, 1999)

Fig. 3 The sketch profile of Sudbury (After A. J. Naldren et al., 1999)

1. 矿体; 2. 花岗岩; 3. 蚀变玄武岩; 4. 苏长岩

含少量硫化物的岩石重新富集成矿, 形成新的富矿体。对应的矿石中往往含有较高的 Au、PGE 等有用组分。因此, 目前的铜镍硫化物矿床的矿体类型划分中, 有许多学者建议把热液型矿体单独划分出来。

矽卡岩型矿体也见发育于含矿镁铁质—超镁铁质岩与钙质围岩的接触带上。过去通常认为, 矽卡岩化成矿作用主要发生于中酸性岩与钙质围岩的接触带上。因此, 该类型矿体一直未受到足够的关注。金川铜镍硫化物矿床的矽卡岩型矿体主要发育于含矿岩体下盘的接触带上, 造岩矿物主要有透辉石、刚起石、角闪石、金云母、蛇纹石, 属典型的镁质矽卡岩矿物组合。该类型矿体品位高, 并且与岩浆熔离型富矿相伴产出, 开采方便。目前也得到地质界及矿业公司的重视。

4 讨论

铜镍硫化物矿床依附的镁铁质—超镁铁质岩石, 从岩浆的产生、发展、演化到最后的定位、成岩成矿是一个复杂的成矿系统。对铜镍硫化物矿床来说, 大岩体可形成大型—超大型矿床, 小岩体也可以赋大矿。岩浆的深部熔离预富集作用是成矿的基础和必要条件。岩浆的深部熔离、与围岩的同化、混染作用而引起岩浆性状的改变, 可以反映在一些指示元素的地球化学行为上。通过高温高压模拟实验, 在特定的岩浆体系分异结晶过程中, 有关 Ir、Os 等指示元素的地球化学行为目前积累了一定的资料^[1], 但反映在不同岩浆体系演化过程中或者不同构造背景条件下, 这些地球化学指示元素在体系中的分配状况尚未得到广泛的统一。

岩体大小与矿床规模的关系问题。大岩体可形成大型—超大型矿床, 小岩体也同样可以赋大型—超大型矿床, 但仅小岩体是不能形成大矿床的, 它赋大矿床的关键是岩浆经过了充分的熔离作用, 使后期的岩浆中含有足够的成矿物质。对于复式岩体, 成矿物质常常伴随晚期的岩浆活动, 由于前期的不含矿岩浆与后期的富矿岩浆的定位空间不同, 造成了小岩体赋大矿的现象, 这种现象在国内较普遍。因此, 作成矿系统全面研究时, 确定矿床附近(不同空间尺度)含矿的与不含矿的镁铁质—超镁铁质岩体的联系是至关重要的。

另外, 基于镁铁质—超镁铁质岩浆的深源性, 更具体详实的深部构造控制条件和地球动力学研究还有待继续深入。同时, 构造—流体—岩浆—成矿系统的综合研究对该类矿床的认识会带来新的突破^[15]。因此, 所有的这些问题会是将来进一步研究铜镍硫化物矿床的重要内容和新的研究方向。

参 考 文 献

- [1] A. J. Naldrett, M. Asif, E. Schandl, *et al.*. Platinum - group elements in the Sudbury ores: Significance with respect to the origin of different ore zones and to the exploration for footwall orebodies [J]. *Econ. Geol.*, 1999, Vol. 94, 185 - 210.
- [2] 汤中立, 李文渊. 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.
- [3] 汤中立, 蔡体梁, 杜笑菊, 编译. 国外铂族元素的地质矿床及资源分析 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1989, 230 - 285.
- [4] 解广轰, 汪云亮, 范彩云, 等. 金川超镁铁岩侵入体及超大型硫化物矿床的成岩成矿机制 [J]. *中国科学 (D)*, 1998, 28 (增): 31 - 36.
- [5] 王瑞廷, 赫英, 王东生, 等. 煎茶岭含钴硫化镍矿床成矿作用研究. *西北大学学报 (自*

- 然科学版), 2003, 33 (2): 185 - 190.
- [6] 陈殿芬. 我国一些铜镍硫化物矿床主要金属矿物的特征. 岩石矿物学杂志 [J]. 1995, [12] 14 (4): 345 - 354.
- [7] 汤中立, 李文渊. 中国与基性—超基性岩有关的 Cu—Ni (Pt) 矿床成矿系列类型 [J]. [13] 甘肃地质学报. 1996, 5 (1): 58.
- [8] 王炳恩, 王泽利, 秦 宽. 吉林省红旗岭矿区磁黄铁矿—镍黄铁矿矿石建造特征及其成因分析. 1997, 68 (2): 22 - 27. [14]
- [9] 翟裕生, 王建平, 邓 军, 等. 成矿系统与矿化网络研究 [J]. 矿床地质, 2002, 21 (2): 106 - 112. [15]
- [10] 邓 军, 杨立强, 方 云, 等. 成矿系统嵌套分形结构和自有序效应 [J]. 地学前缘, 2000, 7 (1): 133 - 146.
- [11] 石应骏, 张朝文, 寸树苍. 龙首山推覆构造的发现及其地质意义 [J]. 科学通报, 1995, 40 (9): 812 - 813.
- 邓 军, 吕古贤, 杨立强, 等. 构造应力场转换与界面成矿 [J]. 地球学报, 1998, 19 (3): 244 - 250.
- 罗照华, 马拉库舍大. 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 [J]. 矿床地质, 2002, 19 (4): 330 - 339.
- 刘月星. 铜镍硫化物矿床成矿作用及成矿模式研究 [J]. 矿产与地质. 1997, 60 (4): 225 - 230.
- 邓 军, 杨立强, 翟裕生, 等. 构造—流体—成矿系统及其动力学的理论格架与方法体系 [J]. 地球科学, 2000, 25 (1): 71 - 78.

The study development of Cu - Ni sulfide ore deposit

WEI Yan-guang¹, FENG Ben-zhi², DENG Jun¹, WANG Jian-guo¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Jilin University, Changchun 130061, China)

[Abstract] The study development of Cu - Ni sulfide deposit is discussed according to the ore - bearing rock - bodies, ore - controlling factors, mineralization and deposit types. It shows that ore - bearing rock - bodies are made up of different mafic and super - mafic rocks and their Sr isotope implies and their deep origin; because of its deep differentiation by liquation, the deposit scale isn't positive correlation with the outlet size of rock - body; ore - forming interfaces, including lithological association interface, tectonic interface, tectonic physical - chemical interface and tectonic fluid interface, strictly control the final location of ore - forming materials; except magmatic liquation and crystallization differentiation, it includes sulfurization, hydrotogenesis and contact metasomatism; as a result, hydrothermal type ore body and skarn type ore body are formed.

[Key words] Cu - Ni sulfide ore deposit; ore - bearing rock - body; ore - controlling structure; mineralization; study development