

文章编号: 1004-4116(1999)02-0047-06

超大型铜镍硫化物矿床研究进展

范育新, 张铭杰

(兰州大学资源与环境学院地质系, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 超大型铜镍硫化物矿床不仅赋存有巨大的铂族贵金属资源, 而且赋存有非常重要的深源信息, 对其成矿理论的多学科综合研究具有重要的理论和实际意义。通过对超大型铜镍硫化物矿床的产出特征、时空分布、构造环境、控矿条件、母岩浆系列、成矿机理等研究现状的总结, 认为以下几方面研究具有较大潜力: (1) 矿床成因; (2) 通过构造—流体—岩浆—成矿动力学综合研究, 揭示成矿机制与全球变化的内在关系; (3) 元古宙板块构造演化与超大型矿床形成的关系。

关键词: 超大型铜镍硫化物矿床; 成矿理论; 进展

中图分类号: P618.63

文献标识码: A

超大型铜镍硫化物矿床是指金属储量 $Ni \geq 200$ 万 t, Ni 品位 $\geq 1\%$; 或 Ni 品位 $< 1\%$, 其中共生元素铜或铂族元素达到经济利用品位者^[1]。它不仅是铜、镍、铂族等多种贵金属元素超常富集的场所、典型的地质条件和完整的成矿机制长期耦合作用的结果^[2], 而且是认识地球内部结构, 揭示天体运动和地球演化规律、全球变化机制的直接窗口。对其成矿理论的多学科综合研究越来越受到国际地质界、矿业界的普遍关注, 并已成为当代地球科学的前沿研究领域之一。本文对世界范围内的超大型铜镍硫化物矿床的研究现状作一概括, 并试图提出有较大潜力的几个研究方向和新的研究突破口。

1 超大型铜镍硫化物矿床的研究意义

超大型铜镍硫化物矿床是由 UGG、UGS 和 ICI 建议提出的当前需要开展多学科综合研究的 12 个课题之一^[1]。其之所以能够引起国际地质、矿业界的普遍关注并成为地球科学界的研究热点, 是在于:

(1) 超大型铜镍硫化物矿床往往是多种元素富集的天然储源库, 如产在太古宙绿岩带中的汤普逊矿带, 产在元古宙大陆边缘裂谷的金川铜镍硫化物矿床, 产在元古宙大陆内部裂谷的萨德伯里镍矿床和布什维尔德杂岩体。这类矿床既有类似于一般矿床的成矿规律和赋存条件, 又有它独特的方面^[2,3]。对其成矿机理、构造背景、矿质来源及岩体特征等的多学科综合研究, 不仅有助于丰富成矿理论, 为寻找同类矿床提供直接理论依据, 而且可以开拓找矿思路, 为寻找

新的矿种或不同类型矿床提供间接理论基础。

(2) 超大型铜镍硫化物矿床成矿物质多为地幔来源, 其中往往赋存有非常丰富且重要的深源信息, 是了解地球深部特征和动力学机制的直接窗口。通过对其形成机理的研究, 不仅可以指导找矿, 而且可以获取地球深部结构特征和地球内部物质与能量转化、地球各层圈之间的物理化学过程及能量调整与均衡、岩浆形成与演化、岩石圈板块驱动机理的信息, 同时又有助于认识各星体之间的相互作用及全球气候与环境变化之间的关系。

(3) 从资源现状与经济发展的需要来看, 铜、镍、铂族元素等矿产的不足^[2], 严重制约着国民经济发展的步伐, 而要解决大规模经济建设与现有矿产资源不足之间的矛盾, 除继续加强提高冶炼工艺和有用元素的二次回收与综合利用外^[4], 最重要的是寻找一批超大型矿床, 并以此为依托, 建立并巩固强有力的工业基地, 作为国民经济发展的物质基础和技术后盾。

2 研究现状

超大型铜镍硫化物矿床是铂族等贵金属元素的天然储源库, 世界各国均进行了大量的开发和研究工作, 对其产出特征、控矿条件、母岩浆系列、成矿规律等方面的研究取得了可喜的进展。

2.1 产出特征

2.1.1 时空分布及构造环境

超大型铜镍硫化物矿床主要产出于太古宙、古—中元古代和三叠纪, 新元古代和古生代还没有发现这类矿床。研究表明, 除陨石撞出形成的萨德伯里镍矿为陆壳变质火山岩和沉积岩熔融物提供成矿物质外, 其它超大型铜镍硫化物矿床的矿质主要来源于相对稳定的大陆裂谷环境不均匀的上地幔^[1], 矿床就位于张性构造环境中。赋矿岩石类型有: 苏长岩—辉长岩, 如萨德伯里镍矿; 二辉橄榄岩侵入体, 如金川铜镍硫化物矿床; 相当于溢流玄武岩的侵入体, 如诺里尔斯克和十月矿床; 与科马提岩有关的, 如阿哥纽、康巴尔德、汤普逊矿床; 层状杂岩体, 如布什维尔德矿床。成矿时代及构造环境见表 1。

表 1 世界级超大型(含大型)铜镍硫化物矿床时代及构造环境^[1,5,6,7,8,9]

Table 1 Ages and tectonic settings of world-class superlarge scale
(including large scale) Cu-Ni sulfide deposits

时 代	构造环境	矿床实例(具体年龄)
太古宙	绿岩带	康巴尔德(Kambalda)、汤普逊(Thompson) (> 1 800Ma)
元 古 宙	大陆边缘裂谷	金川(1 508 ± 3Ma)
	大陆内部裂谷	萨德伯里(Sudbury) (1 849Ma)、布什维尔德(Bushveld) 杂岩体(2 049~2 058Ma)、德卢斯(Duluth) 杂岩体
显 生 宙	大陆裂谷	十月(Oktyabri sky) (三叠纪)
	大陆内部裂谷	诺里尔斯克(Noril sk) (三叠纪)
	活动的造山带	该环境形成的矿体较小, 如缅甸的Moxie 深成岩体

2.1.2 岩体规模及产状

除金川铜镍硫化物矿床含矿岩体规模较小(仅 1.34km^2) 外, 超大型铜镍硫化物矿床的含矿岩体规模普遍较大, 如萨德伯里岩盆面积大于 $1\,000\text{km}^2$, 诺里尔斯克 1 号岩体为 $(12 \times 2)\text{km}^{2[1, 10, 11]}$ 。含矿岩体产状主要为岩墙状(金川、津巴布韦)、岩盆状(萨德伯里、诺里尔斯克)、漏斗状(沃依斯贝)、不规则层状(布什维尔、斯蒂尔沃特)^[5]。岩体的空间分布有两种型式^[2], 即断续重现和分段重现, 前者如萨德伯里、布什维尔、后者如诺里尔斯克—塔尔纳赫带、耶尔岗东部裂谷带和汤普逊构造带等。很有意思的是, 国外超大型铜镍硫化物矿床分布型式是以线性延伸即分段重现为主, 仅在局部地段呈现面型分布, 而我国到目前为止, 发现的同类矿床仅金川一处, 且岩体呈孤点状, 结合其产出特征和岩体规模, 应属非常规超大型^[2, 3]。因此进一步加强对金川矿床以成因为主的综合研究将具有广泛而深远的理论和实践意义。

2.2 矿床地球化学

几乎所有的铜镍硫化物矿床都与镁铁质或超镁铁质岩体密切相关^[1, 5], 并且在太古宙绿岩带中的实践已表明镁铁质和超镁铁质岩体的母岩浆可以分为两个主要类型^[5]: 科马提岩岩浆和拉斑玄武岩岩浆。拉斑玄武岩岩浆有两个亚类, 一个亚类具有苦橄辉长岩的平均组分, 且有冷凝边, 另一个亚类较富含斜长辉长岩, 本文分别称它们为苦橄质拉斑玄武岩岩浆和富含斜长辉长岩的拉斑玄武岩岩浆。在 $1\,500\sim 1\,600$ 喷发的超镁铁质科马提岩岩浆限于太古宙, 是一些重要硫化物矿床的母岩浆^[8]。拉斑玄武岩岩浆形成的矿床主要发育于克拉通地区, 矿化不如科马提岩岩浆形成的矿床那么普遍^[5], 但却形成了重要的矿床(表 2)。

表 2 超大型铜镍硫化物矿床母岩浆系列分类^[1, 5, 6, 9]

Table 2 Primary magma series classification for super-large Cu-Ni sulfide deposits

岩浆系列	地 化 特 征	实 例	
科马提岩岩浆	$\text{Cu}/(\text{Cu} + \text{Ni}) = 0.04\sim 0.06$ $\text{Pt}/(\text{Pt} + \text{Pd}) = 0.38\sim 0.36$ $(\text{Pt} + \text{Pd})/(\text{Ru} + \text{Ir} + \text{Os}) = 0.44\sim 1.44$	西澳康巴尔德 (Kambalda), Perseverance, 加拿大汤普逊 (Thompson) 带的大型矿床	
拉斑玄武岩岩浆	$\text{Cu}/(\text{Ni} + \text{Cu}) = 0.25\sim 0.59$ $\text{Pt}/(\text{Pt} + \text{Pd}) = 0.28\sim 0.72$ $(\text{Pt} + \text{Pd})/(\text{Ru} + \text{Ir} + \text{Os}) = 7.54\sim 19.27$	苦橄质拉斑玄武岩岩浆	金川, 侵入于西澳的 Pilbara 断块上的 Munir Muni 侵入体, Radio Hill 侵入体
		富斜长辉长岩的拉斑玄武岩岩浆	萨德伯里 (Sudbury), 沃依斯贝 (Voisey's Bay), 诺里尔斯克—塔尔纳赫 (Norilsk-Talnakh) 矿带, 德卢斯 (Duluth) 杂岩体

2.3 控矿条件

超大型铜镍硫化物矿床主要形成于裂谷等张性环境中。巨大的张裂构造带为岩浆的运移、侵位及期后成分的调整等提供了良好的通道和场所^[1, 5, 10, 11]。就世界范围内的超大型铜镍硫化物矿床而言, 深大断裂及其诱发的次级断裂控制着含矿岩体的形态和产状, 并在一定程度上制约着矿床的热液叠加、后期改造及再富集作用^[1, 12, 13]。研究表明现已发现的超大型铜镍硫化物矿床普遍存在着多期次岩浆活动, 而这些岩浆活动基本上都与控制岩体的深大断裂的多期次

活动密切相关,有人称之为同生构造多级控矿^[13]。诺里尔斯克—塔尔纳赫构造带及我国金川、红旗岭等实例都很好说明了这一论断^[2,7,12]。流体的参与对于断裂的活化、岩浆的形成、演化起着催化作用,在流体作用下的碱交代作用和垃圾效应是超大型矿床形成的一种机制,矿床的规模决定于碱交代作用规模和深部 H A C O N S 流体活动强度(当然,高效富集也不容忽视)^[13,14]。

2.4 成矿机理研究

研究岩浆硫化物矿床的成矿机理实际上就是探讨母岩浆是如何产生,成矿元素是在什么因素影响下活化、迁移、富集、分离出不混溶硫化物并沉淀形成工业矿床的。金川、萨德伯里、诺里尔斯克—塔尔纳赫及西澳矿床的研究表明,在这些超大型矿床的深部存在着岩浆房^[1]。而母岩浆(岩浆房)的产生目前认为有两种机制,一种为陨石冲击形成,如萨德伯里;另一种为深部岩浆熔离所致,如金川、诺里尔斯克等^[2,10,15]。硫化物的熔离和预富集作用主要是在岩浆房中和上侵途径中完成以后再贯入到现存空间的^[1,16]。在岩浆房中或上升过程中,围岩对原始岩浆的改造,如同化、混和、混染(尤其是长英质同化混染)、外部因素(如围岩中碳的作用)下的还原作用是导致硫化物不混溶性发生的主要因素^[5],尤其是镁铁质岩浆的强烈的地壳混染分别在诺里尔斯克、萨德伯里、金川等地区得到了广泛的同位素、稀土元素、痕量元素等资料的证实^[1,5,17]。近年来研究认为,超大型矿床的形成与碱交代作用及深部 H A C O N S 流体^[13]及岩浆多期活动^[1,3,9,10,18]密切相关,硫化物不混溶程度受挥发分的制约,而这种挥发分主要是外来的,可能和与之接触的围岩,特别是碳酸盐岩有关^[9]。

3 展望

数年来,前人已对超大型铜镍硫化物矿床做了大量开发和研究工作,并普遍认为它们是硫化物从岩浆硫化物—硅酸岩熔体中熔离,并富集亲铜元素的结果^[1,5,19,20]。尽管如此,到目前为止,仍有一些方面研究薄弱,有待继续深入:

(1) 矿床成因的研究。前期的研究定性地阐述了元素由分散状态富集成矿及硫化物不混溶性发生的原因^[1,5,9,17],并概括了矿床的形成和分布规律^[1,5,16,21,22],但对于在岩浆产生和矿床形成过程中很重要的一个因素——成矿流体的重视明显不够,因而没有能够系统地说明矿床形成的根本原因,并对块状矿石成因的理论存在着较大分歧^[1,5,9]。近期研究表明,流体(尤其是挥发分)在岩浆的形成、元素活化、矿质搬运、堆积、成矿的全过程中起着十分重要的作用^[9,14,19,20,22~27],因此从成矿流体的角度对超大型铜镍硫化物矿床成因的研究应予以足够的重视。

(2) 构造—流体—岩浆—成矿系统动力学的综合研究将是今后超大型铜镍硫化物矿床研究的必然趋势和前沿领域之一^[12,13,18~20,24,25,27,29]。突出流体在岩浆演化和成矿动力学过程中的作用,将是新时期该类矿床研究的新突破口,微量元素和同位素、地气异常、后生地球化学异常等示踪手段的发展^[30~33],已使该项综合研究成为可能。利用 C、H、O、N、P、S、Pb-Sr-Nd-Hf-Ar、Re-Os 等同位素地质学手段,通过对典型矿区的基础性综合研究,可以揭示矿区流体的组成和来源、矿质来源、成矿驱动力、构造背景、控矿条件、地球化学背景,从而恢复矿床形成过程,完整地认识岩浆演化、成岩成矿机理,为区域成矿预测和全球成矿系统研究提供理论依据。通过对这些典型矿床的综合地质研究,力争在其周围或深部找到隐伏矿体或盲矿体,并把在这些矿床研究中取得的成果快速应用到矿产普查中,作为其工作的理论依据。我国金川,就是进

行该项工作很好的地区之一。

(3) 元古宙是地球历史中一个非常重要的阶段,在这一时期,C 群星子陨击地球,形成了主要由C 群星子形成的原始微板块^[34],并形成了丰富的矿产^[2]。我国的中朝板块、扬子古板块及塔里木板块都形成于元古宙前后^[22],可能与C 群星子陨击有关。国外已探明的许多超大型矿床都形成于这一时期,相比之下,我国对元古宙含矿性的研究还不够,这一时期的超大型矿床发现的不多^[2]。这种现状与我国的大地构造演化历史很不协调,因此用地质历史演化的动态观点^[16],通过深入对岩浆作用与成矿机制、板块构造和元古宙含矿性关系的研究,可望对超大型矿床的布局有新的认识。同时,通过对H_e、N_e、A_r等稳定同位素体系的研究^[35],对已有矿床的成因认识可能会有新的突破。

(4) 进一步加强成矿机制与天体动力学的研究,把矿床的形成机理容入天体动力学机制的研究中,进而揭示矿床形成与地球各层圈之间的物理化学过程及能量调整与均衡、板块运动、壳幔物质循环等地质过程的实质及它们之间的内在联系,从而为全球性气候变化、环境变迁、物种的消亡及星体撞击等事件提供更加确切的地质证据。

本文写作过程中,导师汤中立院士给予了全面指导和热情帮助,特此致谢。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 涂光炽. 庞然大物——与超大型矿床有关的基础研究[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1996.
- [3] 涂光炽. 试论非常规超大型矿床物质组成、地质背景、形成机制的某些独特性——初谈非常规超大型矿床[J]. 中国科学(D), 1998, 28(增): 1—6.
- [4] 唐杰,张凯,鲍长利. 贵金属资源的应用及开发[J]. 世界地质, 1998, 17(14): 98—102.
- [5] A J Naldrett. Key factor in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey Bay and other World-class Ni-Cu-PGE deposits: implications for exploration[J]. Australian Journal of Earth Science, 1997, 44: 283—315.
- [6] Gang Chai and Anthony J. Naldrett. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China[J]. Economic Geology, 1992, 87(6): 1475—1495.
- [7] Tangzhongli, Yangjiedong, Xushijin et al. Sm-Nd dating of the Jinchuan ultramafic rock body, Gansu, China[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(23): 1988—1990.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 汤中立,任端进,薛增瑞,等. 中国镍矿床[A]. 见:宋叔和主编. 中国矿床·上册[M]. 北京:地质出版社,1989: 207—270.
- [11] 刘月星,唐红松,吴厚泽. 中国铜镍硫化物矿床类型及控矿条件[J]. 矿产与地质, 1998, 12(64): 86—90.
- [12] 翟裕生,邓军,宋鸿林,等. 同生断层对层控超大型矿床的控制[J]. 中国科学(D), 1998, 28(3): 214—218.
- [13] 杜乐天. 地壳流体与地幔流体间的关系[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 172—180.
- [14] 曹荣龙,朱寿华. 地幔流体与金属成矿作用[A]. 见:地幔流体与软流层(体)地球化学[M]. 北京:科学出版社,1996, 436—459.
- [15] 徐义刚, B Orberger, S J Reeves. 上地幔铂族元素的分异——吉林汪清橄辉岩包体提供的证据[J]. 中国科学(D), 28(3): 201—207.
- [16] 汤中立. 中国铜镍矿床成矿规律的研究与展望[J]. 矿床地质, 1991, 10(3): 193—201.
- [17] Peter C Lightfoot, Reid R Keays, Gordon G Morrison et al. Geologic and geochemical relationships between the contact sublayer, inclusions, and the main mass of the Sudbury igneous complex: a case study of the whistle mine embayment [J]. Economic Geology and the Bulletin of the society of economic geologist, 1997, 92(6): 647—673.

- [18] 翟裕生 关于构造—流体—成矿作用研究的几个问题[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 230—236
- [19] 李兆麟, 杨荣勇, 孙晓明, 等. 地质作用中的流体形成演化及成矿作用[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 237—244
- [20] 张文淮, 张志刚, 伍刚. 成矿流体及成矿机制[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 245—252
- [21] 王之田, 秦克章. 中国大型铜矿类型、成矿环境与成矿集中区的潜力[J]. 矿床地质, 1991, 10(3): 119—120
- [22] 裴荣富, 熊群尧. 中国特大型金属矿床成矿偏在性与成矿构造聚敛(场)[J]. 矿床地质, 1991, 18(1): 37—46
- [23] 自然科学基金委. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1996
- [24] 曹荣龙. 地幔流体的前缘研究[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 161—171
- [25] 贾跃明. 流体成矿系统与成矿作用研究[J]. 地学前缘, 1996, 3(1): 253—258
- [26] 赖绍聪. 岩浆作用的物理过程研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2): 153—158
- [27] 胡瑞忠, 毕献武, 何明友. 哀牢山金矿带矿化剂对金成矿的制约[J]. 中国科学(D), 1998, 28(增): 24—30
- [28] 张连昌. 韧性剪切作用动力学及控矿作用研究进展[J]. 地质与勘探, 1999, 35(2): 10—13
- [29] 陆德复. 流体的运动、涡流及其与矿床形成的关系讨论[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 232—239
- [30] 丁汝福. 国内外寻找隐伏矿化探新方法研究进展[J]. 地质与勘探, 1999, 35(2): 30—34
- [31] 刘树田, 连长云, 季桂娟. 用于寻找隐伏矿床的后生地球化学[J]. 世界地质, 1998, 17(2): 27—32
- [32] 郑海飞, 谢鸿森, 郭捷. 微量元素比值研究岩浆源区成分的可靠性: 玄武岩熔融实验研究[J]. 矿物学报, 1998, 18(4): 541—545
- [33] 翟裕生, 邓军, 崔彬, 等. 成矿系统及综合地质异常[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 99—104
- [34] 柳志青. 超大型矿床全球背景——大陆板块源于天外的探讨[J]. 矿床地质, 1991, 10(2): 171—177
- [35] 胡瑞忠, 毕献武. 马厂箐铜矿床黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系[J]. 中国科学(D), 1997, 27(6): 503—508

PROGRESS ON THE STUDY OF SUPER-LARGE Cu-Ni SULFIDE DEPOSIT

FAN Yu-xin ZHANG Ming-jie

(Geology Department of Resources & Environment College,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Super-large Cu-Ni sulfide deposit not only hosts huge amount of PGE, but also contains important information of deep earth. Comprehensive study on its mineralization theory of has been one of the forward position fields in geoscience. Based on the summation to the current studies on its occurrence features, ore-control factors, space-time distribution, primary magma series and the mineralization mechanism, following aspects are considered potential and of important implications theoretically and practically: genesis of super-large Cu-Ni sulfide deposit; study on the system dynamics of tectonics - fluid - magma - mineralization, to reveal inner relations between mineralization mechanism and global change; relationship between Proterozoic plate tectonic environment and mineralization of super-large Cu-Ni sulfide deposit.

Key words: Super-large Cu-Ni sulfide deposit; Mineralization theory; Progress