

40-46

斑岩铜矿床研究综述^{*}

高合明

(中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002)

p 618.410.5

A

提 要 综述了板块构造、大地构造单元、区域构造、深大断裂以及地球深部热点与斑岩铜矿床形成关系的研究成果,系统介绍了斑岩铜矿床蚀变矿化分带特征、蚀变矿化物理化学条件、蚀变矿化的热力学研究、斑岩铜矿床中脉体的产状和分布特征以及成因观点,总结了斑岩铜矿床成矿物质来源与矿床成因模式,最后指出了斑岩铜矿床将来应该注意的研究方向。

关键词 斑岩铜矿床, 蚀变, 矿化, 成因模式, 脉体 铜矿床

0 引 言

斑岩铜矿床是指与中、酸性斑岩体相关,并具有钾、氢蚀变矿物晕和铜、钼、银、铅、锌、硫地球化学晕的岩浆期后中—高温热液形成的细脉浸染状硫化物铜(钼)矿床^[1]。该类型矿床具有重要的经济学和地质学意义,尤其是它的研究有助于解决矿床成因理论中的一些关键问题,因此一直作为成岩成矿理论的典型矿床加以研究,并在70年代至80年代取得了许多重大成果。近年来,一些新理论(如耗散结构论、协同论、混沌学等)的发展为一些重大矿床成因问题的解决带来了新希望。这里综述斑岩铜矿床的主要研究成果,有助于新理论与之结合,从而对斑岩铜矿床以及矿床成因理论的进一步研究具有重要意义。

1 斑岩铜矿床形成的构造背景

斑岩铜矿床形成的构造背景是指与斑岩铜矿床形成相关的全球性、区域性和局部直接控制斑岩铜矿床的构造特征。斑岩铜矿床的形成与板块构造、大地构造单元以及深大断裂存在密切关系,综合其研究资料可以发现两个明显特征:在时代上,斑岩铜矿床主要形成于中、新生代;在空间上,斑岩铜矿省常呈带状分布在褶皱带或板块构造的边缘。这为分析斑岩铜矿床形成构造背景提供了重要依据。

Sillitoe^[2]首次采用斑岩铜矿床板块成因模式来说明板块运动与斑岩铜矿床形成的关系。他认为洋壳俯冲使得富铜的洋壳和富含碱金属的洋壳沉积物进入俯冲带深部,并通过熔

* 国家自然科学基金资助项目“斑岩铜矿床成矿作用的构造地球化学动力学研究”(项目编号:49303042)。

收稿日期:1994-02-01,修改稿:1994-03-28

融作用进入斑岩岩浆而形成含矿斑岩岩浆。该模式可以解释斑岩铜矿床在时代上(中、新生代)和空间上(板块构造边缘)的分布特征。Livingston^[3]提出了斑岩铜矿床的点热源与板块构造成因模式。该观点认为:地幔中异常高温的热点产生含矿斑岩岩浆,在岩浆形成与上侵过程中,板块运动可以引起热点与板块相对位置发生变化,从而导致斑岩铜矿省呈带状分布。该模式较好地解释了斑岩铜矿省呈带状分布特征以及较古老斑岩铜矿床的成因。

前苏联学者^[4]通过全球斑岩铜矿床资料的综合整理与研究发现:古构造环境及其火山—深成岩带基底组成对斑岩铜矿床的成矿专属性具有重要决定作用。如与优地槽中辉长岩—闪长岩—石英闪长岩相关的主要为斑岩型铜、金矿化,与优地槽边缘带中闪长岩—花岗岩相关的主要为斑岩型钼、铜矿化,与冒地槽边缘带中闪长岩—闪长二长岩—二长岩对应的主要是斑岩型铜、钼矿化,而与克拉通边缘带中闪长岩—花岗闪长岩—花岗岩对应的只有斑岩型钼矿化。

Lowell^[5]对斑岩铜矿床区域构造特征进行了系统研究后认为,区域性引张环境是形成斑岩铜矿床的重要条件。Hollister 等^[6]的研究结果也证明了这一认识。该观点解释了世界上绝大多数斑岩铜矿床沿深大断裂被动侵位现象^[7]。

上述研究结果表明板块构造对全球斑岩铜矿床(尤其是中、新生代斑岩铜矿床)的形成具有重要影响,不同大地构造单元及其火山—深成岩建造对斑岩铜矿床的成矿专属性具有明显的控制作用,而区域性的引张环境、深大断裂和地下深部的热点则直接制约着含矿斑岩岩浆的形成与侵位。

2 斑岩铜矿床的蚀变与矿化分带特征

2.1 蚀变分带特征

斑岩铜矿床的蚀变具有明显的分带性,且其分带特征是斑岩铜矿床中最引人注目和最重要的成果之一。在各种蚀变分带模式中,Lowell 和 Guibert 的“二长岩”模式、Hollister 的“闪长岩”模式最具有代表性^[8,9]。

“二长岩”分带模式是指石英二长斑岩侵位到硅镁质围岩中而形成几个同心环状的蚀变分带现象。以斑岩体为中心向外蚀变带分别为:钾化带、似千枚岩化带、泥化带和青磐岩化带,且各蚀变带均具有其特定的矿物及矿物共生组合。钾化带主要由含钾硅酸盐所组成,如钾长石、黑云母、绢云母等,其中钾长石(或黑云母)是最普遍和最具有代表性矿物。似千枚岩化带主要由绢云母、石英和黄铁矿组成,其中绢云母是该带的代表性矿物。泥化带主要由高岭石、蒙脱石和绿泥石所组成,其中高岭石是该带代表性矿物。青磐岩化带则主要由绿泥石和绿帘石所组成,绿泥石和绿帘石是其代表性矿物。

“闪长岩”分带模式是指石英闪长斑岩或斜长花岗斑岩侵位到硅铝质围岩中而形成内部为钾化带、外部为青磐岩化带的分带现象。该模式中钾化带、青磐岩化带中矿物及其共生组合与“二长岩”分带模式中相应蚀变带中矿物及其共生组合基本一致。不过,“闪长岩”模式中的钾化带主要特征矿物为黑云母。

上述两种模式只描述了斑岩铜矿床的水平蚀变分带特征。Sillitoe^[10]根据一些具体资料,运用拼凑方法厘定了斑岩铜矿床顶部和深部的蚀变分带以及其它地质特征。他认为:斑岩铜矿床顶部从下到上的蚀变分带与水平方向从内到外的蚀变带一致,而深部则只出现钾

化带(内带)和青磐岩化带(外带)。其它地质特征为斑岩铜矿床顶部是火山口,伴生自然硫矿床和黄铁矿、白铁矿矿化;向下为层状火山岩,伴生爆破角砾岩筒和网脉状硫化物矿床;再向下为蚀变斑岩岩株;最底部为显晶质花岗闪长岩。这种斑岩体系合理解释了中、新生代斑岩铜矿床与陆上火山—侵入岩在形成时间、空间和成因上的联系。

2.2 矿化分带

与蚀变分带相似,斑岩铜矿床矿化也存在分带性^[8]。在钾化带中常出现辉钼矿、黄铁矿和黄铜矿化,其中辉钼矿化较强;在钾化带与似千枚岩化带接触部位以及千枚岩化带中常发生强烈的铜的硫化物矿化,形成主要的斑岩铜矿体;在似千枚岩化带外侧以及泥化带中,主要出现黄铁矿化,而铜、钼矿化较弱;在青磐岩化带中常发生金、银和黄铁矿化或铅、锌硫化物矿化。

2.3 蚀变矿化的物理化学条件

大量研究结果表明^[1,4,11,12],斑岩铜矿床蚀变矿化温度一般在 100~600℃ 之间,发生钾化作用的温度一般为 300~580℃、似千枚岩化温度为 280~380℃、泥化和青磐岩化温度为 100~300℃。氧逸度一般为 10^{-20} ~ 10^{-40} bars,硫逸度一般为 10^{-5} ~ 10^{-20} bars,成矿深度约为几公里。热液流体常呈中性、弱碱性或弱酸性,含盐度一般为 10~50%(wt),并富含 NaCl 和 KCl, K/Na 值一般为 0.26~0.59;同时还富含 Cu、Mo、Pb、Zn 等成矿元素。流体氢、氧同位素研究结果表明:引起钾化作用的热液主要是岩浆热液,产生泥化和青磐岩化的热液来源于地下水、地下水与岩浆热液的混合则导致千枚岩化作用。

2.4 蚀变分带机制

目前人们主要从稀溶液与矿物的平衡图解来认识斑岩铜矿床蚀变分带机制。在各种稀溶液中, $K_2O + Al_2O_3 + SiO_2 + H_2O$ 体系最为重要^[13],图 1 是该体系在不同温度条件下溶液与矿物的平衡关系。从图 1 可以看出:当温度较高、 a_{K^+}/a_{H^+} 值较大时,出现钾化带代表矿物钾长石,反映钾化带的形成;当温度和 a_{K^+}/a_{H^+} 值适中时,出现白云母,代表似千枚岩化带的形成;当温度和 a_{K^+}/a_{H^+} 值较低时,出现高岭石,代表泥化带的形成。如果体系中富含 Na、Ca、Mg、Fe 等组分时,便可以出现黑云母、蒙脱石以及青磐岩化带代表矿物绿泥石和绿帘石的形成。稀溶液与矿物的平衡关系为进一步分析斑岩铜矿床的蚀变分带提供了基础。

斑岩铜矿床蚀变分带机制目前主要有三种观点。第一种观点认为温度是控制蚀变分带的主要因素。当温度从高到低(见图 1 中 A 到 B),体系依次出现钾长石(代表钾化带)、白云母(代表似千枚岩化带)和高岭石(代表泥化带)。斑岩体侵位后可以形成以近岩体到远离岩体、温度由高到低的温度场,这种温度场导致由岩体到远离岩体依次形成钾化带、似千枚岩化带和泥化带的蚀变分带现象。第二种观点认为水—岩反应产生蚀变分带。体系经过图 1 中从 C 到 D 的过程便会依次高岭石、白云母和钾长石。斑岩体侵位后可以形成由近岩体到远离岩体、温度由高到低的温度场,该温度场使得围岩中流体沿球形轨迹向斑岩体运动。在流体运动过程中,流体不断与岩石发生反应而产生由外向内依次出现泥化带、似千枚岩化带和钾化带的蚀变分带现象。第三种观点认为两种流体(岩浆热液和地下水)的综合作用产生蚀变分带。一方面,斑岩岩浆分异形成的岩浆热液在斑岩体及其周围产生钾化带,并向外流动;另一方面,斑岩体的热能使得围岩中的地下水球形状向斑岩体流动,在流动过程中发生水—岩反应而在外围形成青磐岩化带和泥化带;此后,向内流动的地下水与向外流动的岩浆热液发生混合形成千枚岩化带。蚀变分带机制还可以归结为氢和钾的交代作用^[9]。当斑岩岩浆含

钾较高时,钾和氢的交代作用强烈,于是产生钾化带、似干枚岩化带、泥化带和青磐岩化带,即“二长岩”分带模式;当斑岩岩浆含钾较低时,钾和氢的交代作用较弱,此时只能形成钾化带和青磐岩化带,即“闪长岩”分带模式。

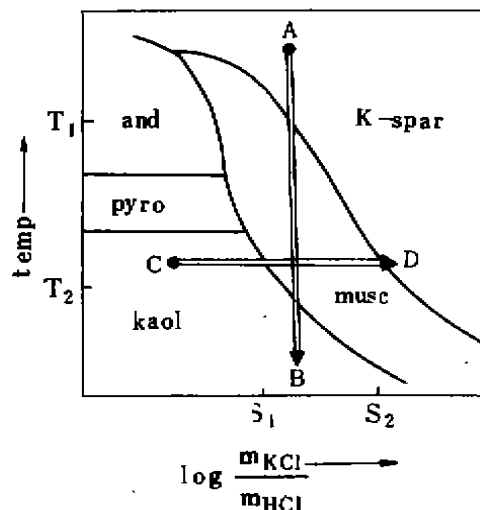
2.5 矿化作用

在蚀变过程中伴生矿化作用,图2反映蚀变过程中对应的矿化作用。当蚀变过程为黑云母→钾长石+绿泥石→白云母时,相对应的矿化作用为磁铁矿→黄铜矿+磁铁矿+黄铁矿→黄铁矿,即铜的矿化主要发生在钾化带和似干枚岩化带之间。有些学者认为地下水与富含矿质的岩浆热液混合引起物理化学条件变化,导致成矿物质的沉淀而形成矿体,这两种流体恰好在似干枚岩化带中混合,因此,铜矿化主要发生在似干枚岩化带及其与钾化带的接触部位。

3 斑岩铜矿床的脉体特征

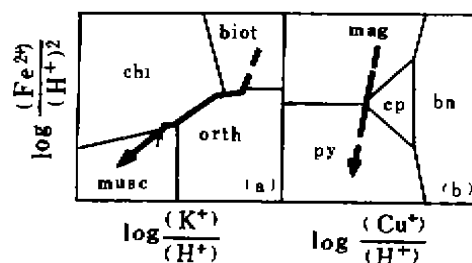
斑岩铜矿床的脉体一般是指与斑岩铜矿床具有成因联系、且与斑岩铜矿床蚀变岩具有相似矿物组合的各种脉体。斑岩铜矿床中脉体十分丰富,且其分布与产状均具有一定规律^[12,14,15]。在斑岩体顶部脉体最发育;在强蚀变带中脉体较发育;在弱蚀变中脉体较少;且脉体发育程度整体上以斑岩体为中心呈对称分布。而脉体的产状特征主要表现为脉体的走向总体上围绕斑岩体呈同心环状和放射状分布。上述脉体特征说明其成因主要与斑岩体的侵位与演化相关,并进一步反映斑岩体系演化过程中应力的聚集、释放与成矿物质的集中、迁移具有成因联系。

斑岩铜矿床中脉体的成因观点主要有三种。第一种观点认为区域应力作用产生各种裂隙,热液流体充填到裂隙中而形成脉体;第二种观点认为斑岩体侵位导致围岩中形成同心环状和放射状裂隙^[14],流体充填到裂隙中而形成脉体;第三种观点则认为脉体的形成主要与斑岩体系的演化相关^[17]。随着斑岩体系的演化,热胀冷缩效应、岩浆二次沸腾作用和孔隙流体差异热膨胀产生各种脉体,其中水力断裂作用是其主要形成机制。



K-spar 钾长石 and 红柱石
musc 白云母 pyro 叶腊石
kaol 高岭石

图1 $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 体系在不同温度、组分下的矿物共生组合关系以及斑岩铜矿床蚀变分带过程示意图 (据 Montoya 和 Hemley)



biot 黑云母 chl 绿泥石
orth 钾长石 musc 白云母
mag 磁铁矿 cp 黄铜矿
py 黄铁矿 bn 斑铜矿

图2 斑岩铜矿床蚀变过程及其伴生的矿化作用 (据 Beane 和 Titley)

4 斑岩铜矿床成矿物质来源

斑岩铜矿床成矿物质来源是一个复杂而又尚未完全解决的问题。不过国内外大量研究结果表明^[1,4,11,12,18],斑岩铜矿床形成略晚于斑岩体形成时代,并在空间上主要分布于斑岩体中或其内外接触带中,表现出形成时代与空间上的一致性,说明其成矿物质与斑岩体相关。斑岩铜矿床的成矿专属性也难以用成矿物质来源于围岩来解释。此外矿床中硫、铅的同位素与斑岩中硫、铅同位素组成一致,氢、氧同位素资料也反映产生钾化和矿化的流体为岩浆热液。这些均表明成矿物质主要来源于斑岩岩浆。

既然成矿物质主要来源于斑岩岩浆,那就可以根据斑岩岩浆的形成进一步了解成矿物质来源。根据含矿斑岩体系特征及其区域地质背景可知,产于克拉通边缘或造山带中、与偏酸性深成岩套相关、且具有铜钼矿化斑岩岩浆是由地壳重熔形成的,故其成矿物质主要来源于地壳;产于岛弧区、主要与偏基性岩套相关、且常具有铜矿化的斑岩岩浆可能是由洋壳和地壳深部物质混熔而成,其成矿物质主要来源于下地壳、洋壳和海洋沉积物;产于陆壳板块缝合线附近和大陆板块内部、直接受深大断裂控制、且与超基性岩—花岗岩套相关的含矿斑岩体则可能为上地幔分异、并遭受下地壳混染而形成的,其成矿物质主要来源于上地幔和下地壳。因此,不同构造环境中的斑岩铜矿,其成矿物质来源不同。

在斑岩岩浆上侵过程以及侵位后的岩浆演化所导致流体向斑岩体运动过程中,岩浆和热液流体也可以萃取一些成矿物质,因此,围岩也可能提供部分成矿物质。

5 斑岩铜矿床成因模式

斑岩铜矿床成因模式常常指斑岩岩浆侵位后所发生的岩浆结晶演化与蚀变矿化作用。近几十年来,各国地质学家主要根据成矿物质来源的不同认识提出了多种成因模式,其中具有代表性的有以下四种:

(1)正岩浆成因模式:该观点认为成矿物质和产生蚀变与矿化流体来源于斑岩岩浆。斑岩岩浆侵位后的演化可以形成由近岩体到远离岩体温度从高到底的温度场,同时分异出岩浆热液,热液由岩体向外围运动,并在温度场的控制下会依次形成钾化带、似千枚岩化带、泥化带和青磐岩化带,且在钾化带和似千枚岩化带之间这种特定的温度场中发生矿化作用,形成矿体。

(2)对流成因模式:该观点认为成矿物质并非来源于斑岩岩浆,而是来源于围岩。水未饱和的斑岩岩浆侵位后的演化可以形成由近岩体到远离岩体温度从高到低的温度场,导致围岩中的流体球形状向斑岩体运动。在运动过程中流体不断与岩石发生反应,一方面依次形成青磐岩化带、泥化带、似千枚岩化带和钾化带;另一方面不断萃取成矿物质,并在似千枚岩化带与钾化带之间这种特定的物理化学条件下发生矿化作用,形成矿体。

(3)混合成因模式:该观点认为成矿物质主要来源于岩浆,部分来源于围岩。岩浆侵位后的演化分异出岩浆热液,产生钾化带后向外流动;同时,岩浆演化也会引起围岩中的流体流动,并不断发生水—岩反应形成青磐岩化带、泥化带,再向内流动,与向外流动的岩浆热液发生混合。这两种流体的混合形成似千枚岩化带,并改变物理化学环境,导致成矿物质的沉淀

而发生矿化作用。

(4)脉动喷发成因模式:该观点认为成矿物质来源于岩浆。侵位后斑岩岩浆在其演化过程中的不同阶段可以形成带不同性质的热液流体,并发生脉动喷发作用而形成各种蚀变带及其相对应的脉体^[19]。

6 将来的研究方向

斑岩铜矿床的研究虽然取得了许多重大成果,但有些方面的研究还需加强。如含矿斑岩岩浆的成因机制,含矿岩浆中成矿物质的析离过程,矿化分带机制,脉体特征及成因机制,斑岩铜矿床中物质演化、应力演化、蚀变矿化作用之间的成因关系等等。此外,斑岩铜矿床还要加强系统的成矿作用动力学研究,它包括岩浆形成的动力学、岩浆侵位的动力学、岩浆结晶演化的动力学、蚀变与矿化作用动力学、应力演化的动力学、脉体形成的动力学和应力与化学反应耦合作用的动力学。

斑岩铜矿床中成岩成矿作用以及脉体的形成实际上是一复杂的动力学过程,而耗散结构理论、协同论、混沌学等复杂性科学正是研究复杂动力学过程的新理论。借助这些理论可以更深刻地认识上述斑岩铜矿床研究中的一些问题,这对斑岩铜矿床的、甚至整个矿床成因理论的研究均具有重要意义。

主 要 参 考 文 献

- [1] 芮宗瑞等. 中国斑岩(铜)矿床. 北京:地质出版社,1984. 340.
- [2] Sillitoe R H. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Econ Geol.* 1972, 67: 184—197.
- [3] Livingston D E. A plate tectonic hypothesis for the genesis of porphyry copper deposits of the southern Basin and Range Province. *Earth Planet Sci Letters.* 1973, 20: 171—179.
- [4] 克里夫佐夫 A И, 米加切夫 И Ф, 波波夫 B C [苏]. 世界斑岩铜矿床. 王肇芬, 赵俊磊, 王璞译. 北京:地质出版社, 1986. 265.
- [5] Lowell J D. Regional characteristics of porphyry copper deposits of the Southwest. *Econ Geol.* 1974, 69: 60—617.
- [6] Hollister V F. Regional characteristics of porphyry copper deposits of South America. *Soc Mining Engineers AIME Trans.* 1974, 255: 45—53.
- [7] 冶金工业部地质研究所著. 中国斑岩铜矿. 北京:科学出版社, 1984.
- [8] Lowell J D and Guilbert J M. Lateral and vertical alteration—mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ Geol.* 1970, 65: 373—408.
- [9] Hollister V F. *Geology of the porphyry copper deposits of the Western Hemisphere.* New York: Soc Mining Engineers AIME, 1978. 219.
- [10] Sillitoe V F. The tops and bottoms of porphyry copper deposits. *Econ Geol.* 1973, 68: 799—815.
- [11] Titley S R and Beane R E. Porphyry copper deposits. *Econ Geol* 75th Annu, 1981. 799—815.
- [12] Titley S R ed. *Advances in geology of the porphyry copper deposits of southwestern North America.* Tucson: Univ Arizona Press, 1982.
- [13] Hemley J J. Some mineralogical equilibria in the system $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$. *Am J Sci.* 1959, 257: 241—270.
- [14] 朱训等. 德兴斑岩铜矿. 北京:地质出版社, 1983. 336.
- [15] 高合明. 德兴斑岩铜矿床蚀变、矿化、脉体和裂隙的成因统一性研究. 见: 1992年中国科学院地球化学研究所矿床

- 开放研究室年报. 北京:地震出版社,1993. 191—197.
- [16] Koide J and Bhattachar Ji S. Formation of fractures around magmatic intrusions and their role in ore localization. *Econ Geol*,1975,70,781—799.
- [17] Knapp R B and Kinght J E. Differential thermal expansion of pore fluid; fracture propagation and microearthquake production in hot pluton environments. *J Geophys Res*,1977,82,2515—2522.
- [18] Candela P A and Holland H D. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal fluid system, the origin of porphyry-type ore Deposits. *Econ Geol*,1986, 81,1—19.
- [19] Фоминес В-Л 等(苏). 铜—钼矿床分带性的形成机制. 国外地质,1990,(1),36—38.

A SUMMARY OF RESEARCHES ON PORPHYRY COPPER DEPOSITS

Gao Heming

(*Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002*)

Abstract

The main achievements of the genetic relationships between porphyry copper deposits and plate tectonics, tectonic unit, regional structure, long and deep regional fracture and hot point in the mantle are summarized. The most important characteristics of zoning of alteration and mineralization and the primary features of distribution and dips of veins in porphyry copper deposits as well as genetic views for the veins are synthesized. The significant investigations about physico-chemical conditions of rock-forming and ore-forming processes, the sources of ore-forming matter, the major genetic patterns for the deposits and some important aspects which should be studied in detail by complex sciences are show in this article.

Key words: Porphyry copper deposit, Alteration, Mineralization, Vein, Genetic pattern.