

智利埃尔特尼恩特斑岩型铜-钼矿床^{*}

王佳新^{1,2}, 聂凤军², 张雪旋^{1,2}, 刘春花², 宋崇宇¹, 段培新¹, 于 淼¹

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

埃尔特尼恩特铜矿床(El Teniente)位于智利首都圣地亚哥市西南约 70 km(34°80′50″S, 70°82′10″W), 是世界上最大铜矿床之一。矿体主要赋存于中新世英安斑岩、英安岩及安山岩中, 主矿体长 1200 m, 宽 600 m。该矿床发现于 19 世纪初, 大规模开采始于 1905 年, 至今已经开采 100 多年。目前探明铜和钼金属储量分别为 93.7 Mt, 和 78 Mt, 平均品位分别为 0.62% 和 0.018% (James et al., 2005)。自 2004 年开始, 该矿床年产精铜超过 40 万 t, 按现有的生产规模推测, 该矿床可继续开采 100 年。埃尔特尼恩特铜矿床巨大的铜产量对智利社会经济发展发挥了重要作用。

1 成矿环境

埃尔特尼恩特铜矿床位于南美洲古大陆边缘铜(钼)矿带, 该成矿带是世界著名的斑岩型铜-钼-金矿带之一, 位于太平洋板块中的纳茨卡(Nazca)板块和南美大陆板块结合处的大陆板块一侧, 沿着平行板块结合线呈近南北向带状分布。该成矿带北起秘鲁中部, 沿安第斯山脉向南一直延伸至智利圣地亚哥以南的海岸山脉, 再向东延伸至近阿根廷边境, 全长达 3000 km, 在智利境内 2000 km。

区内主要出露 2 套岩层, 即伐尔隆建造(Farellones)和科亚-玛查理建造(Coya-Machali)。古近纪伐尔隆建造由近水平的火山岩以及火山碎屑岩序列组成, 平均厚度 2500 m, 与下部的上白垩统科亚-玛查理建造呈不整合接触关系。科亚-玛查理建造由一套细粒陆相沉积岩组成, 厚 3000 m。伐尔隆建造

存在有一定程度的矿化, 是矿床的底部岩石, 也是矿体的围岩(图 1)。

矿区构造以北东走向断裂带和岩脉群为主, 地层(伐尔隆建造)显示宽缓的褶曲, 近断层处局部形成拖拽褶皱, 许多褶皱轴的走向向北(贺明生等, 2014)。上新世-中新世时期, 伐尔隆建造被一系列中-酸性岩浆岩侵入, 主要岩石类型如表 1 所示, 其中英安斑岩及英安岩脉与铜-钼矿脉及钾化蚀变带时空分布关系密切。苏埃尔(Sewell)石英闪长岩是矿区最老的中-酸性侵入岩, 且被后期灰色斑岩侵入破坏。粗面安山岩脉是矿区最年轻的蚀变火山岩, 具绢云母化, 呈环状分布于布雷登(Braden)岩筒西南侧(图 1)。煌斑岩脉是矿区最年轻的侵入岩。

2 矿床特征

中新世英安斑岩及英安岩脉是矿区最主要的成矿母岩。英安斑岩呈北北西走向的扁平岩墙, 具强烈的黑云母化蚀变, 岩石结构及地球化学成分都被强烈破坏改造, 其岩相学特征见表 1。该岩墙长 1300 m, 宽 200 m, 岩墙的南端被布雷岩体切割; 英安岩脉呈岩枝状侵入, 出露面积小(<1 km²), 分布于布雷登(Braden)岩筒的东部和东北部(图 1)。剖面上, 英安斑岩岩墙宽度至少为 450 m, 两侧岩石浅部以火山角砾岩为主, 深部以细粒安山斑岩为主; 英安岩脉主要分布在水平面 2200 m 以下。一些学者认为成矿物质组分和流体主要来源于英安斑岩(Howell et al., 1960; Camus, 1975)。伐尔隆建造的下部安山岩是矿体的主要围岩。

^{*} 本研究得到国家重点自然科学基金项目(编号:41030421)和地质调查项目(编号:1212010811029)联合资助
第一作者简介 王佳新, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 岩石学、矿物学、矿床学专业。Email: wang.j.x@cugb.edu.cn

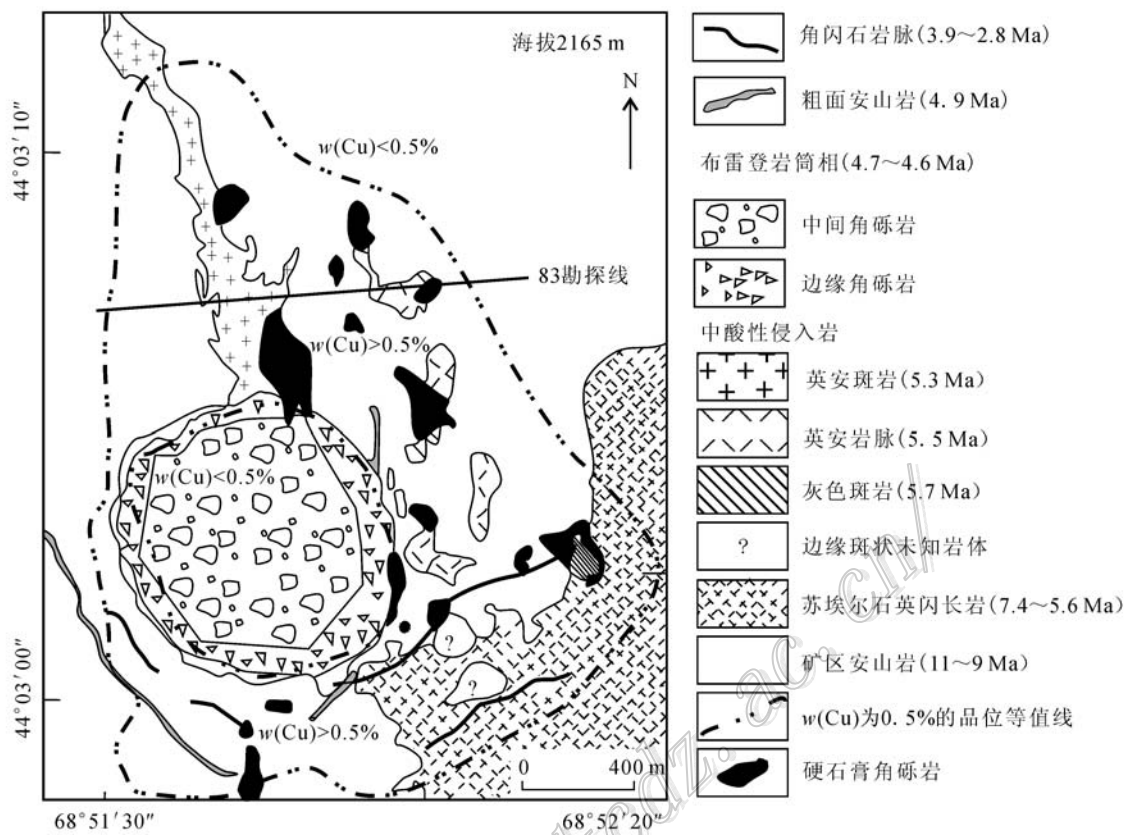


图 1 埃尔特尼恩特铜矿床 2165 m 平面地质图 (据 James et al., 2005)

表 1 埃尔特尼恩特铜矿床中酸性岩浆岩岩相特征及年龄 (据 James et al., 2005)

侵入岩	结 构	分布位置	矿物组成	年龄/Ma
苏埃尔石英 闪长岩	等粒结构	矿体中心部位偏东南部呈 岩株状出露	斜长石、角闪石、黑云母、钾长石、石英、 绢云母、绿泥石、绿帘石	$(7.4 \pm 1.0) \sim (7.1 \pm 1.5)$
	斑状结构 (斑晶含量 30% ~50%, 基质为细晶质)	分布于上述岩株的外围	斜长石、黑云母、钾长石、石英、绢云母、 绿泥石、硬石膏	$(6.2 \pm 0.2) \sim (5.6 \pm 0.2)$
灰色斑岩	斑状结构 (基质为不等粒 状)	侵入苏埃尔石英闪长岩, 主要分布于苏埃尔岩石 与安山岩围岩接触带	斜长石、黑云母、钾长石 (条纹长石)、硬 石膏	6.5 ± 0.1
英安岩脉	斑状结构 (斑晶含量 30% ~50%, 基质为细晶质)	主要分布于英安斑岩岩墙 东侧, 侵入苏埃尔石英 闪长岩	斑晶主要为斜长石、石英、黑云母, 基质 主要为石英、斜长石、钾长石	5.5 ± 0.2
英安斑岩	斑状结构 (自形斑晶, 基质 为细晶质)	为该岩墙的南端部分, 该 岩墙出露面积为 1500 $m \times 200 m$	斑晶主要为斜长石、石英、黑云母, 基质 主要为石英、斜长石、钾长石	5.3 ± 0.1
	斑状结构 (他形斑晶, 基质 为粗粒)	为该岩墙的中心部分	斑晶主要为斜长石、石英、黑云母, 基质 主要为石英、斜长石、钾长石	
	含有围岩捕掳体 < 20%	与上述岩体均有接触关系	斑晶主要为斜长石、钾长石、石英、黑 母, 基质主要为石英、长石、黑云母	无年龄数据
粗面安山岩	斑状结构 (斑晶含量 30% ~50%, 基质为极细粒)	围绕布尔登岩体呈东南向 环状岩脉分布, 厚度 < 15 m	斑晶主要为斜长石、石英、黑云母, 基质 主要为石英、斜长石、钾长石, 发生绢 云母化	4.8 ± 0.9
煌斑岩	细粒斑状结构	东南向薄岩墙	角闪石、辉石、橄榄石、斜长石	3.9 ± 0.2

矿区中心部位的布雷登角砾岩筒发育于成矿晚期乃至成矿期后,具低品位铜矿化,其形态呈倒锥形,地表宽 1200 m,内倾 60°~80°,目前最深钻孔控制深度为 1400 m,其下部逐渐相变为粗面安山岩。布雷登岩筒边缘的角砾岩发生矿化,形成厚 1~60 m 不等的环边,富含电气石,伴生硫酸盐、硫化物等。而中心的角砾岩无矿化,成分复杂,不具有分层性,呈细碎屑胶结结构。

铜-钼矿化主要以网脉状赋存于伐尔隆建造安山岩及英安岩类火山岩体中。如图 1 所示,0.5%铜品位线呈楔形,长 2.5 km,宽 1.8 km,深度上可达 800 m,且深部铜品位更高(>1.2%)。钼矿化较高(>0.03%)的部位主要分布于英安岩以及布雷登岩筒周围。James 等(2005)在总结前人研究的基础上,将矿床蚀变矿化分为 4 个阶段:

(1) 成矿前蚀变阶段(V₁) 矿区岩体(层)在发生矿化前发育有一期蚀变,该蚀变主要特征为斜长石斑晶局部被细粒浸染状磁铁矿交代,磁铁矿化蚀变残余主要出现在矿床边缘及安山岩类侵入岩中。此外苏埃尔石英闪长岩周围还发育有绢英岩化,但该期蚀变与矿化关系不甚密切。

(2) 晚期岩浆阶段(V₂)(5.9~4.9 Ma) 该阶段为主要成矿阶段,英安岩脉和英安斑岩在该阶段侵入,大部分 Cu(约 60%)被带入。该阶段以发育石英-硬石膏-硫化物网脉及钾化蚀变为特征,矿脉主要围绕英安斑岩和英安岩脉分布。根据矿脉及蚀变矿物组合,该阶段蚀变主要分 3 带:① 近矿体中心的钾化带;② 钾化-青磐岩化过渡带;③ 青磐岩化带。各蚀变带特征如表 2 所示。

(3) 早期热液阶段(V₃)(4.9~4.8 Ma) 早期

热液阶段和晚期热液阶段均与绢英岩化蚀变关系密切。早期热液阶段的矿脉叠加覆盖于晚期岩浆阶段(V₂)的矿脉之上,矿脉通常厚 2 mm~3 cm,富含黄铜矿、辉钼矿及黄铁矿,脉石矿物主要为石英和硬石膏。该阶段矿脉在矿床中的分布密度不及上述晚期岩浆阶段的矿脉多(矿体中心部位<10 条/m),赋存有矿床 30%以上的铜金属量。

(4) 晚期热液阶段(V₄)(4.8~4.4 Ma) 该阶段矿脉与布雷登岩筒及粗面安山岩关系密切,在布雷登岩体 100~200 m 的范围内,矿脉数量最多且蚀变程度最强,随与岩筒距离及深度的增加,其数量和蚀变程度减少(弱)。矿区内仅该阶段矿脉穿切布雷登岩筒。该阶段矿脉包含铜-铁-钼及其他碱金属的多种硫化物及硫酸盐矿物,脉石矿物主要为石英、硬石膏、电气石、石膏、碳酸盐及重晶石,此外还含有少量黏土矿物。与早期热液阶段相比,晚期热液阶段矿脉数量较少,赋存矿床 10%的铜金属量。

3 成矿特征及初步结论

(1) 关于埃尔特尼恩特矿床的成矿类型一直存在有争议,Howell 等(1960)和 Camus(1975)认为埃尔特尼恩特矿床属于斑岩型铜-钼矿床;而 Skewes 等(2002)则认为其属于角砾岩型铜-钼矿床。James 等(2005)根据该矿床蚀变类型、硫化物组合分带、矿化类型及与侵入岩的关系等特征,对前者的观点给予了充足证据。该观点也得到了其他更多学者的认可(Kelm et al.,2009;Brzovic et al.,2007)。

(2) 埃尔特尼恩特矿床以发育多期次中酸性侵入岩为特征,其成矿斑岩与围岩的岩浆来源相同,早

表 2 埃尔特尼恩特铜矿床钾化蚀变带、钾化-青磐岩化过渡带、青磐岩化蚀变带特征

对比项目	钾化蚀变带	钾化-青磐岩化过渡带	青磐岩化蚀变带
产出部位	主要分布于近安山斑岩的区域,一些英安岩脉附近也有出现	位于海拔 2200 m 以上及英安斑岩的末端	于矿床外围,0.5%铜品位线附近及外围分布
主要蚀变矿物组合	黑云母蚀变矿物组合	钾化-青磐岩化过渡蚀变矿物组合	青磐岩化蚀变矿物组合
蚀变强度	强	中等-强	低
矿脉中主要脉石矿物	石英、硬石膏以及黑云母、钾-钠长石和少量绢云母、绿泥石	石英、硬石膏以及绢云母、绿泥石和少量钾-钠长石、磁铁矿	石英、硬石膏以及绿泥石、黄铁矿、绢云母、磁铁矿及钠-钾长石
矿脉中主要金属矿物	黄铜矿、斑铜矿	黄铜矿、黄铁矿	黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿
矿脉中主要硅酸盐矿物	黑云母	绢云母、绿泥石	绿泥石、绢云母
铜及钼的品位	铜及钼品位均较高,w(Cu)>1%,w(Mo)>0.01%	大部分铜矿化品位>1%;钼矿化强度中等,大部分为 0.01%~0.03%	铜、钼品位均较低,w(Cu)<0.5%,w(Mo)<0.01%

期岩浆喷发形成的火山岩即为后期成矿岩浆侵入的围岩。根据矿床学中的相关定义,特尼恩特属同生斑岩矿床。

(3) 埃尔特尼恩特矿床铜-钼矿化主要以脉状、网脉状赋存于安山岩、英安班岩和英安岩脉中。根据脉状矿化的蚀变类型、矿物组合和相互穿插关系,可以将其分为4阶段,每阶段又包含若干期次。值得注意的是,在这若干期次的脉状、网脉状蚀变矿化中,仅初期和末期的脉体中含有铜-铁硫化物,说明矿床整个形成过程中,热液流体中始终含有铜元素,而铜的沉淀富集主要取决于环境因素。

(4) 埃尔特尼恩特成矿斑岩 SiO_2 含量较低,特征参数 $A/\text{CNK} < 1$, 主要为钙碱性岩, Sr 含量高, $\text{Sr}/\text{Ba} > 1$, Rb/Sr 比值低, Th/U 比值高, 轻重、稀土元素分馏明显, 铀异常不明显, 属于洋壳重熔型壳幔混合岩浆岩。

(5) 尽管埃尔特尼恩特矿床赋存于两大区域级断裂的交叉部位, 但矿脉形成过程中, 远场应力作用不及侵入岩体周边的局部应力影响大。

(6) 该矿床与中新世-上新世岩浆弧的侵入活动关系密切, 该侵入活动持续时间长, 矿床主要形成在侵入活动的后期。其地质演化过程如下: ① 11~7 Ma, 伐尔隆建造被一期铁镁质-中性岩浆侵入, 苏埃尔石英闪长岩于随后侵入, 成矿前期(V_1)蚀变与苏埃尔石英闪长岩的侵入关系密切。② 中酸性深成岩体的侵入发生于中新世晚期, 该阶段由于流体出溶作用形成了大量晚期岩浆阶段(V_2)的矿脉以及少量含黑云母的角砾岩, 同时围岩发生广泛的黑云母蚀变。③ 晚期岩浆阶段一直持续到 4.95~4.90

Ma, 接着进入到早期热液阶段(V_3)。早期热液阶段持续时间较短, 且以形成绢英岩化富黄铜矿矿脉为特征。④ 随着局部应力的减弱, 晚期热液阶段(V_4)形成了一系列陡倾斜的矿脉及断裂。粗面安山岩及布雷登岩筒于该阶段侵入(4.8 Ma), 这些岩体与晚期热液阶段的矿脉分布和蚀变特征有密切的关系。布雷登岩体的形成及角砾岩化作用的发生, 标志着岩浆活动的结束。⑤ 成矿期后(3.8 Ma)煌斑岩脉的侵入是矿区最后一期侵入活动。

参考文献/References

- 贺明生, 唐珂, 邹赣生. 2014. 智利斑岩型铜矿地质特征及成矿规律[J]. 地质与资源, 23(3): 305-310.
- Brzovic A and Villaescusa E. 2007. Rock mass characterization and assessment of block-forming geological discontinuities during caving of primary copper ore at the El Teniente mine, Chile[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 44: 565-583.
- Camus F. 1975. Geology of the El Teniente orebody with emphasis on wallrock alteration[J]. Econ. Geol., 70: 1341-1372.
- Howell F H and Molloy J S. 1960. Geology of the Braden orebody, Chile, South America[J]. Econ. Geol., 55: 863-905.
- James C, David R, John L and Holly S. 2005. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit[J]. Econ. Geol., 100: 979-1003.
- Kelm U, Helle R, Matthies A and Morales. 2009. Distribution of trace elements in soils surrounding the El Teniente porphyry copper deposit, Chile: The influence of smelter emissions and a tailings deposit[J]. Environmental Geology, 57: 365-376.
- Skewes A, Arévalo A, Floody R, Zúñiga P H and Stern C R. 2002. The giant El Teniente breccia deposit: Hypogene copper distribution and emplacement[J]. Society of Economic Geologists Special Publication, 9: 299-332.