

福建紫金山矿区金矿床次生富集规律初探

周友清

(紫金矿业集团东南矿产地质勘查分公司,福建 上杭 364200)

[摘 要]紫金山铜金矿属高硫化浅成低温热液型铜金矿共生矿床。金矿体赋存于氧化带中,为原生含金金属硫化物矿床经表生作用所形成的次生富集金矿床。金矿体容矿岩石和赋矿围岩基本一致,主要是中细粒花岗岩,其次是隐爆角砾岩和英安玢岩。然而金矿床仅在隐爆角砾岩和英安玢岩呈脉状似“蟹脚”出露地表区域富集成工业矿体。带着这一疑惑,作者借助在紫金山矿区工作的优势,通过对紫金山铜金矿区金矿床空间形态分布特征、隐爆相、次火山岩相、断裂构造、金属硫化物氧化特征等的分析研究,提出了紫金山铜金矿金矿床次生富集规律与紫金山火山机构隐爆相隐爆角砾岩和次火山岩相英安玢岩是否侵入地表以及出露地表的形态特征极为密切的肤浅认识。

[关键词]紫金山矿区;氧化特征;次生富集;金矿

[中图分类号]P618.51 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2015)02-0119-07

1 引言

紫金山矿床是我国东南沿海发现的特大型铜金矿床。迄今为止,紫金山铜金矿床吸引了众多单位和学者研究高硫化型矿床的成因,对于金矿床主要集中在分析研究高硫化的矿物组合特征、矿化蚀变分带特征及氧化淋漓分带特征等方面,很少有学者从金属硫化物矿床地下水的氧化溶蚀作用入手,研读紫金山金矿床的次生富集规律。作者在前人工作的基础上,通过反复查看老钻孔岩心氧化特征、紫金山露采场水文地质工程地质条件及详细阅读分析《福建省上杭县紫金山铜金矿区西北矿段铜(金)矿地质详查报告》等技术资料工作,叙述了金矿床空间形态分布特征、断裂构造、紫金山火山机构、金属硫化物氧化特征等与紫金山金矿床次生富集规律的相关性,以期为类似矿床提供对比借鉴。

2 矿区地质特征

紫金山矿区位于华南加里东褶皱系东部,东

南沿海火山活动带的西亚带,闽西南上古生化拗陷之西南,北西向云霄—上杭深断裂带北西段与北东向宣和复背斜南西倾伏端交汇部位,中生带上杭陆相火山盆地的北东缘。

区域出露地层有下震旦统浅变质岩系,上泥盆统河口相—滨海相碎屑沉积,石炭系海相、陆相、海陆交互相碎屑沉积,三叠系陆相盆地碎屑岩,白垩系石帽山群陆相火山—沉积岩。其中石帽山群下组上段分布于紫金山火山机构周边,与成矿关系密切,是本区重要的铜金含矿层位。第四系零星分布于沟谷两侧阶地。

区域构造活动十分强烈,以北东向和北西向为主,北东向主断裂与北西向构造交汇处控制了区域矿床、矿点的产出和北东向的展布,以及火山机构的产出,北东向复式背斜控制了本区岩浆的侵入,是本区的控岩控矿构造。

矿区大面积出露的是燕山早期花岗岩(紫金山复式岩体),岩性从粗粒花岗岩到细粒花岗岩,其次是分布于紫金山火山管道内的燕山晚期的火山次火山岩、火山口周边和沿北西、北东向构造裂隙充填的隐爆角砾岩和英安玢岩^[1]。金铜矿体主要分布于中细粒花岗岩中,其次是隐爆角砾岩

[收稿日期]2015-04-09

[作者简介]周友清(1963—),男,高级工程师,水文地质工程地质专业,长期从事矿山及外围地质找矿勘查水工环专业研究工作。

绝大部分金元素则以包裹金的形式存在,呈微粒状、不规则状赋存于黄铁矿、蓝辉铜矿等矿物

颗粒的解理裂隙中。
据紫金山矿区铜(金)矿详查报告资料(表 1)。

表 1 主要元素氧化前后品位及贫化富集系数对照表

Table 1 Comparison of grade and enrichment coefficient before and after oxidation of major elements

名称	Au		Cu		S	
	品位 $\times 10^{-6}$	贫化富集系数	品位 $\times 10^{-2}$	贫化富集系数	品位 $\times 10^{-2}$	贫化富集系数
氧化带	4.13	16.09	0.018	-27	0.19	-22.26
原生带	0.133		1.02		4.23	

表 1 显示氧化带中金矿床平均品位比原生带中铜矿床中伴生金含量提高了 16.09 倍;铜的平均含量比原生带铜矿床平均含量降低了 27 倍;硫平均含量比原生铜矿床平均含量降低了 22.26 倍。

原生带铁矿石的矿石矿物是黄铁矿。铁在氧化带中呈相对富集趋势,但因贫乏含铁矿物而不能形成大量堆积的铁帽。

此外,银、砷元素在氧化带中也趋向贫化,较原生带铜矿床中分别降低了 2.03 和 1.89 倍。

综上所述,氧化带中主要成矿元素除金大量富集、铁略有富集外,其余铜、硫、银、砷等元素均有不同程度贫化。

4.2 金矿体次生富集与蚀变关系

紫金山矿区岩石蚀变极为强烈,除燕山晚期花岗闪长岩体和部分花岗闪长斑岩外,所有岩体均已全岩蚀变。主要蚀变类型有硅化、明矾石化、地开石化和绢云母化,金矿体就赋存于上部的强硅化带内(图 2)。该蚀变带显著特征是淋漓硅化孔洞状石英极为发育,且在淋漓石英孔洞内能见到重结晶的石英颗粒、石英簇及石英次生加大现象(照片 1)。



照片 1 淋漓孔洞状石英
Photo 1 Vuggy residual quartz

紫金山矿区燕山早期花岗岩呈酸性(包裹体测定结果,pH 值 3.46~4.13),金属硫化物中,除黄铁矿外,主要是铜的硫化物(以热液成因的蓝辉铜矿、铜蓝为主),非金属矿物中主要为石英,次为明矾石、地开石、绢英母,根据国际矿床最新研究资料,石英—明矾石—黄铁矿稳定共存的条件是:pH 值 3.5~4.5。而孔洞状石英是强酸环境下($\text{pH} \leq 2$)岩石被强酸溶解(蚀)淋漓的产物,淋漓石英孔洞内重结晶的石英颗粒、石英簇及石英次生加大现象则是富含 SiO_2 的地下水溶液随 pH 值变化沉淀析出的。说明淋漓硅化孔洞状石英并非早期矿化蚀变形成,而是后期表生氧化淋漓的产物。淋漓硅化孔洞状石英、孔洞内重结晶的石英颗粒、石英簇及石英次生加大现象说明淋漓硅化蚀变过程地下水经历了由弱酸→强酸再由强酸→弱酸的循环。

地下水由弱酸→强酸的循环同样为金溶蚀后再解离沉淀提供了良好的外部条件,紫金山矿区铜金矿床原生硫化物矿石中金元素的赋存状态主要以包裹金的形式存在,随着金属硫化物的氧化解离,呈微粒状、不规则状赋存于黄铁矿、蓝辉铜矿等矿物颗粒的解理裂隙中的金元素在酸性溶液中形成 $[\text{AuS}_2]^{-1}$ 、 $[\text{AuS}_2]^{-3}$ 和 $[\text{Au}(\text{S}_3\text{O}_3)_2]^{-8}$ 等络阴离子,这些络合物在酸性溶液中不稳定,随着 pH 值的变化、黄铁矿表生氧化作用生成的褐铁矿胶体及粘土矿物吸附剂的作用^[5],溶液中的金则重新解离吸附沉淀。金络合物与 SiO_2 溶液迁移、沉淀条件相似,故自然金多与石英密切共生。

表 2 显示与矿体围岩相比,金矿床次生富集过程中, Al^{3+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 明显被带出流失,同时带入大量 SiO_2 成分,反映了矿床在氧化淋漓环境下经历强酸性流体的强力改造。

表 2 不同类型岩矿石化学分析结果表
Table 2 Chemical analyses results of different ore (rock)

岩石名称		$\times 10^{-2}$												$\times 10^{-6}$
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Au
隐爆角砾岩	金矿石	82.49	0.45	13.97	1.42	0.24	0.01	0.33	0.08	0.02	0.05	0.03	0.22	6.36
	围岩	68.90	10.81	5.92	1.32	0.24	0.015		0.16	0.12	1.52	0.06		
英安玢岩	金矿石	91.11	0.26	6.37	0.40	0.76	0.003	0.14	0.14	0.03	0.04	0.02	0.05	3.13
	围岩	69.32	16.90	3.77	0.46	0.73	0.009	0.45	0.38	0.05	2.20	0.11		
中细粒花岗岩	金矿石	96.97	0.39	0.87	1.43	0.16	0.02	0.24	0.09	0.02	0.04	0.02	0.05	5.51
	围岩	74.96	12.88	1.23	0.53	0.08	0.048	0.37	0.31	2.34	5.89	0.09		

4.3 金矿体次生富集与隐爆相一次火山相关系

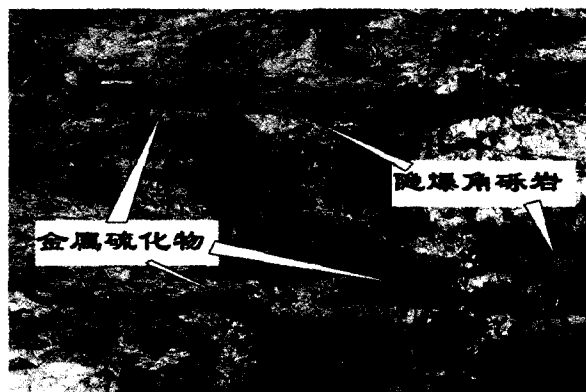
紫金山矿区铜金矿容矿母岩主要是燕山早期的中细粒花岗岩,其次是燕山晚期的隐爆角砾岩和英安玢岩。中细粒花岗岩为区内出露面积最大的岩体,出露面积 12.5 km²,约占紫金山区域面积的 40%,燕山晚期的隐爆角砾岩和英安玢岩在岩筒的北西和南东大量出露地表,形成宽约 1 000 m、长约 2 000 m 隐爆角砾岩和英安玢岩密集带,总体呈“螃蟹状”(图 1)。从图 1 发现金矿体主要分布在隐爆角砾岩和英安玢岩呈脉状似“蟹脚”出露区域(面积约 0.35 km²,约占中细粒花岗岩区域出露面积的 3%);隐爆角砾岩和英安玢岩似“蟹身”大面积出露地表或呈隐伏状或远离火山机构区域,往往构成低品位矿体富集或金矿贫化或金矿化相对较弱的区域。这一现象说明紫金山矿区金矿体次生富集规律与隐爆角砾岩和英安玢岩是否侵入地表以及出露地表的形态特征极为密切,究其原因:

(1) 金属硫化物矿床中,地下水的氧化溶蚀作用首先沿构造裂隙发育及金属硫化物富集部位进行,随后沿先期氧化溶蚀通道向四周及下部扩展^[6]。隐爆角砾岩和英安玢岩的侵入,造成侵入接触部位的中细粒花岗岩因次火山—隐爆作用而进一步碎裂,为地下水提供了良好的先期入渗通道。

同时因与侵入岩体未接触一侧的岩体,受次火山—隐爆作用影响相对较弱,岩体碎裂程度较接触部位相对较小,以及隐爆角砾岩、英安玢岩胶结好,结构致密,其节理裂隙较中细粒花岗岩欠发育的特点(花岗岩中节理裂隙 100 条/米、隐爆角砾岩 10 条/米、英安玢岩 7 条/米),以脉状出露地

表的隐爆角砾岩、英安玢岩岩脉及与侵入岩体未接触一侧的中细粒花岗岩体,客观上形成了一道道透水性相对差的“挡水坝”。再加以这些沿北西向构造裂隙侵入的隐爆角砾岩、英安玢岩岩脉发育于山脊由北东向南再折向南西山体走势呈“S”型的中部(两侧隆起的山脊阻挡了地下水向两侧的迳流、排泄),走向又与山坡坡向近于垂直,大大降低了地下水侧向及沿山坡方向向下的氧化、剥蚀速度,为入渗的地下水提供了良好的赋存空间,给赋存空间内地下水的氧化、溶蚀、运移创造了良好的时、空条件。

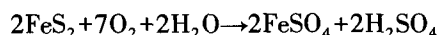
(2) 隐爆角砾岩和英安玢岩侵入过程携带大量的金属硫化物(主要是黄铁矿,其次是蓝辉铜矿、硫砷铜矿),并在侵入岩体内部及其围岩构造裂隙内大量富集(照片 2)。



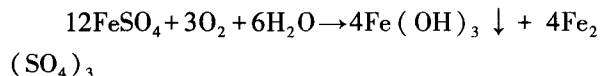
照片 2 隐爆角砾岩

Photo 2 Cryptoexplosion breccia

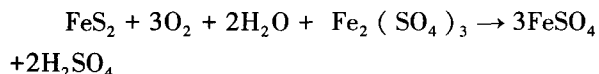
由于金属硫化物的稳定性差、抗氧化能力弱,在表生作用下,极易氧化、分解,金属硫化物的这一特性加速了地下水的氧化、溶蚀,改变着地下水的酸碱度(pH 值)。以黄铁矿为例,其氧化反应方程式如下:



生成的硫酸亚铁(FeSO_4)不稳定,进一步氧化成硫酸铁和氢氧化铁。



$\{\text{Fe}(\text{OH})_3\}$ 经脱水后形成黄钾铁矾—褐铁矿—针铁矿—赤铁矿系列矿物,其中主要为褐铁矿。硫酸铁 $\{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3\}$ 作为氧化剂又与黄铁矿反应



黄铁矿循环氧化反应方程式显示,金属硫化物的氧化反应与水及水中游离氧(O_2)的关系极为密切。自然条件下地下水中的游离氧(O_2)含量较低,且随深度加深而逐渐减少,水中游离氧(O_2)消耗后重新获得补充的条件亦随深度加深而逐渐降低,因此,金属硫化物剧烈的氧化反应实际发生在地下水游离氧(O_2)补给条件较好的地下水沿裂隙补给潜水含水带径流通道及潜水含水带表面附近,进而说明金属硫化物氧化引起地下水酸碱度改变首先由潜水带表面开始,尔后逐渐向深部水体扩散。在枯水或干旱季节,地下水得不到有效的补给,随着金属硫化物循环氧化对地下水的消耗及地下水自然蒸发损耗等因素的影响,“挡水坝”内的地下水酸性逐渐增强,这一现象正好解释了氧化带内淋漓硅化孔洞状石英极为发育的原因;随着丰水季节的到来,地下水的补给条件得到了极大的改善,“挡水坝”内的地下水被稀释后酸性逐渐降低,水中的 SiO_2 离子以及随金属硫化物的氧化解离生成向下迁移的金络合物则随pH的变化,在岩石构造裂隙或溶蚀孔洞内重新解离吸附沉淀富集。而铜矿物氧化形成的硫酸铜溶液因其具有很大的溶解性,在缺乏碳酸盐介质的情况下,不能形成稳定的铜的次生矿物,最终随地下水排泄流失,这也是在氧化带内铜矿床贫化的原因。

隐爆角砾岩和英安玢岩似“蟹身”大面积出露地表或呈隐伏状或远离火山机构区域,则因其地表部分岩性均一,岩石结构构造、矿物组合、裂隙发育程度等大致相同,地下水渗入、氧化、溶蚀作用及岩石抗风化能力等条件基本趋于一致,金属硫化物氧化解离后随地下水侧向径流排泄快,不利于金的络合物重新解离吸附沉淀富集。这就是隐爆角砾岩和英安玢岩似“蟹身”大面积出露地表或呈隐伏状或远离火山机构区域,往往构成

低品位矿体富集或金矿贫化或金矿化相对较弱的原因。

4.4 岩体含水介质垂直分带与金矿体次生富集关系

水文地质学上根据地下水含水介质、水力性质和岩石富水性的差异将岩体划分为透水带、含水带(潜水含水带)、隔水带三种类型。根据潜水含水带内地下水的运动状态,又将潜水含水带分为潜水含水带流动带和潜水含水带滞水带二个亚带(图3)。紫金山矿区金矿体次生富集特征与岩体含水介质分带具如下相关性:

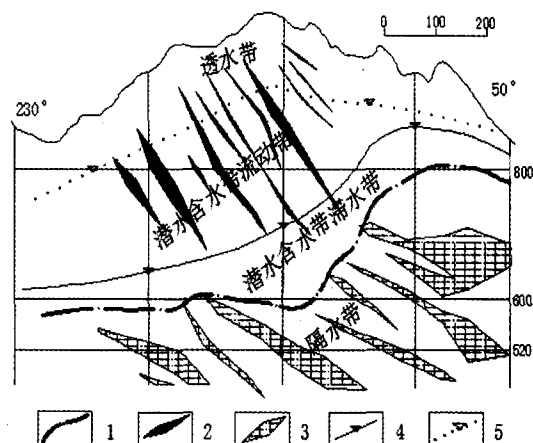


图3 含水介质分带示意图

Fig. 3 Scheme of water-bearing medium zonation

1—风化带底界;2—金矿体;3—铜矿体

4—丰水期潜水位线;5—枯水期潜水位线

(1) 透水带

位于潜水面以上至地表之间,顶部多为强风化岩覆盖,下部由弱风化岩组成。透水带风化裂隙发育,透水性较好,地下水以垂直运动为主,径流短,流动快,含游离氧丰富,氧化活动剧烈。透水带为地下水排泄及下部风化裂隙潜水含水带的补给通道。处于该带的原生矿石中的黄铁矿、蓝辉铜矿等金属硫化物因氧化作用形成硫酸铜溶液及随金属硫化物的氧化解离生成的金的络合物随地下水向下渗透流失,共生的铜矿石强烈贫化成为废石,而原生的金矿石相对贫化,形成较广泛分布的金矿化异常带。

从总体上讲,紫金山矿区氧化淋滤作用使透水带内的原生硫化矿石受到彻底损坏,原生金矿石受到相对破坏,在矿床上部形成一个金的次生贫化的“淋滤帽”。但受紫金山矿区地壳隆升运动及地下水下切的影响,大部分次生富集金矿体

被抬升至现代潜水面以上的透水带中,因此,矿区透水带内还保留大量次生富集金矿体。

(2) 潜水含水带

① 潜水含水带流动带

位于潜水含水带的上部,地下水以水平迳流为主,以上部快下部慢为特征,顶部始终通过透水带风化裂隙与地表空气相通,地下水游离氧(O_2)补给条件较好,有利于金属硫化物在其表面的氧化解离。氧化解离后产生的氧化淋漓溶液则随地下水向下渗流,穿过潜水面,进入“缺氧”的地下水上的流动带,某些金属在流动带的富集,大大提高了矿床的工业价值。因此,潜水含水带流动带往往成为某些金属矿床的主要次生富集带。由于地下水潜水面受气候影响呈现季节性变化,故潜水含水带流动带同样具季节性变化的特征。紫金山矿区铜金矿床原生硫化物矿石氧化解离生成的硫酸铜、金的络合物氧化淋漓溶液随地下水进入潜水含水带流动带后,铜矿物氧化形成的硫酸铜溶液因其具有很大的溶解性,在缺乏碳酸盐介质的情况下,不能形成稳定的铜的次生矿物,最终随地下水排泄流失;而金的络合物因在酸性溶液中不稳定,随着 pH 值的变化、黄铁矿表生氧化作用生成的褐铁矿胶体及粘土矿物吸附障的作用,溶液中的金则重新解离吸附沉淀。该带的主要特点:氧化淋滤作用比较彻底,金属硫化物几乎流失殆尽,故季节性潜水含水带流动带为原生硫化物矿石氧化剧烈活动带,该带的这一特性在由年度丰水季节向枯水季节或由地质历史时期丰水季节向枯水季节循环氧化转换过程中,为金属硫化物的氧化解离及金属硫化物氧化物解离后产生的金的络合物重新氧化解离吸附沉淀富集创造了良好的条件。

② 潜水含水带滞水带

位于潜水含水带流动带至风化带底界之间,地下水处于相对静止状态。潜水含水带滞水带因其游离氧(O_2)少及游离氧(O_2)消耗后补给条件差,致使金属硫化物在其内部氧化活动弱,氧化活动对地下水 pH 值影响小,金属硫化物氧化解离生成的少量硫酸铜、金的络合物溶液也因滞水带内地下水流动缓慢、氧化活动对地下水 pH 值影响低而“滞留”在滞水带内。但随着丰水季节地下水对滞水带的补充稀释,“滞留”在滞水带内金属硫化物氧化解离生成的少量硫酸铜、金的络合物氧化溶液因此随地下水水流带出流失。金属硫

化物在滞水带内的氧化解离作用虽然弱且缓慢,但经漫长地质历史时期周而复始的循环往复,仍造成滞水带内金属硫化物氧化解离、流失,最终导致滞水带金属硫化物矿床的贫化。这正好解释了为什么紫金山金铜矿在金矿与铜矿之间存在 20~50 m 无矿带或贫矿带的原因。

局部地下水沿构造裂隙向下流动,形成规模小,品位低,零星分布的金矿体,且随着标高降低逐渐尖灭。故潜水含水带滞水带呈现次生金矿体相对贫化特征。

(3) 隔水带

埋藏于风化带以下,由坚硬一半坚硬完整新鲜岩石组成。局部受断裂构造或构造裂隙影响,可夹薄层透镜状承压水含水带,并常与顶部潜水含水带发生水利联系,但水量小,基本不流动,不含或基本不含游离氧(O_2),氧化作用终止。因此,隔水带为金属硫化物矿石原生带。

5 结 论

紫金山矿床的形成是在特定的区域地质构造环境和矿田、矿床构造与蚀变矿化等因素复合作用的必然产物。金矿体主要赋存于隐爆角砾岩和英安玢岩呈脉状似“蟹脚”出露区域 650 m 标高以上的氧化带中,其次生富集规律与紫金山火山机构隐爆角砾岩和英安玢岩是否侵入地表以及出露地表的形态特征极为密切。

(1) 紫金山火山机构隐爆角砾岩和英安玢岩呈脉状似“蟹脚”侵入地表形态对金矿体的次生富集起到了至关重要的作用。其一:使中细粒花岗因次火山—隐爆作用而进一步碎裂,为地下水提供了良好的先期入渗通道;其二:客观上形成了一道道透水性相对差的“挡水坝”,大大降低了地下水侧向的流失速度及地下水沿山坡方向向下的氧化、剥蚀速度,为入渗的地下水提供了良好的赋存空间,给“挡水坝”内的地下水氧化、溶蚀、运移创造了良好的时、空条件。

(2) 紫金山火山机构隐爆角砾岩和英安玢岩侵入过程携带有大量金属硫化物,并在侵入岩体及其围岩构造裂隙内大量富集,因金属硫化物的稳定性差、抗氧化能力弱,在表生作用下,极易氧化、分解特性,加速了地下水的氧化、溶蚀,改变着地下水的酸碱度(pH 值)。为金属硫化物氧化解离后产生的金的络合物重新氧化解离吸附沉淀富

集创造了良好的条件。

隐爆角砾岩和英安玢岩似“蟹身”大面积出露地表或呈隐伏状或远离火山机构区域,则因其地表部分岩性均一,岩石结构构造、矿物组合、裂隙发育程度等大致相同,地下水渗入、氧化、溶蚀作用及岩石抗风化能力等条件基本趋于一致,不利于金的络合物重新解离吸附沉淀富集,往往构成低品位矿体富集或金矿贫化或金矿化相对较弱区域。

[参考文献]

[1] 张锦章. 紫金山矿集区地质特征、矿床模型与勘查实践

[J]. 矿床地质, 2013, 0258-7106(2013)04-0757-10.

[2] 陈景河. 紫金山铜(金)矿床成矿模式[J]. 黄金, 1999, 20(7): 6-11.

[3] 福建省闽西地质大队. 福建省上杭县紫金山铜金矿区西北矿段铜矿地质详查报告[R]. 1993.

[4] 福建省闽西地质大队. 福建省上杭县紫金山铜金矿区西北矿段金矿地质详查报告[R]. 1994.

[5] 李肃平, 周丽, 李和平, 等. 黄铁矿吸附-还原金络合物的实验研究进展[J]. 地球与环境, 2013, 41(2): 185-192.

[6] 罗进权. 福建紫金山金矿氧化特征[J]. 贵州地质, 2009, 26(3): 180-194.

Primary Discussion of Au Secondary Enrichment Regularity in Zijinshan Deposit

ZHOU You-qing

(Zijin Mining Group Co. Ltd, Shanghang 364200, Fujian, China)

[Abstract] Zijinshan Cu-Au deposit bears high-sulphur low temperature shallow-seated hydrothermal feature. The gold ore body occurs in oxidation zone, it is secondary-enrichment gold deposit which is formed by hypergenesis in the primary gold-riched sulfide deposit. The main composition of the host rocks and wall rocks in Zijinshan Cu-Au deposit is the middle-fine grained granit, the second is the concealed explosion breccia and dacite porphyry. The concealed explosion breccia and dacite porphyry outcrop on the surface spread the northwest and southeast of Zijinshan volcanic pipe like a crab. The gold ore body only enriches where the concealed explosion breccia and dacite porphyry occurs. After studying the spatial distribution form of the gold ore deposit, Zijinshan volcanic apparatus and the oxidation characteristics of metal sulfide in Zijinshan Cu-Au deposit comparatively. In this paper, it puts forward the perspective that there are close relations between secondary-enrichment rule in Zijinshan Cu-Au deposit and the morphological characteristics of cryptoexplosive breccia and dacite-porphyrity formed after intruding into or crop out the earth's surface.

[Key words] Zijinshan mining area; Oxidation characteristics; Secondary enrichment; Gold deposit