

辉钼矿的矿物学特征对铼资源的约束^{*}王翠芝^{1,2}, 晏全香^{1,2}

(1. 福州大学紫金矿业学院 福州 350108; 2. 福建省矿产资源重点实验室 福州 350108)

摘要: 福建中生代钼矿分布广泛, 并伴生有一定的铼。对坪地、上西坑、萝卜岭、马坑等四个典型钼矿的重点研究表明, 成矿温度对辉钼矿中 Re 的形成起决定性作用, 中高温下形成的辉钼矿结晶度高, 颗粒大, 多呈片状、板状, 多型主要为 $2H$ 型, 多色性强, 微量元素含量较低, Re 含量较低; 中低温下的辉钼矿结晶度差, 颗粒小, 多呈细小鳞片状, 多型主要为 $2H+3R$ 型或 $3R$, 多色性弱, 微量元素含量较高, Re 含量也较高。部分钼矿中 Re 达伴生元素工业品位, 矿石矿物成分、结构、构造相对单一, 选矿工艺简单, Re 具有一定的综合利用价值。

关键词: 福建省; 中生代; 辉钼矿; 铼; 多型

中图分类号: P578.2⁺91 文献标识码: B 文章编号: 1001-0076(2012)06-0010-06

Constraint of Mineralogical Characteristics of Molybdenite on Rhenium Resource

WANG Cui-zhi^{1,2}, Yan Quan-xiang^{1,2}

(1. Zijin Mining College of Fuzhou University, Fuzhou 350108; 2. Fujian Key Laboratory of Mineral Resources, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Mesozoic molybdenum deposits distributed widely in Fujian province, and associated with a certain amount of rhenium. Based on field systematic investigation and petrography, through studying the characteristics of ore petrology and mineralogy of molybdenite of typical molybdenum deposits (Pingdi, Shangxikeng, Luobuling, Makeng, etc.) in Fujian Province, this paper obtain that strain of mineralogical characteristics of molybdenite on Re resource reflect in the action of temperature, the molybdenite formed under the medium-high temperature has a high degree of crystallinity, coarse grain, in sheet or plate, $2H$ polymorph mainly, strong pleochroism, low content of trace elements and Re; the molybdenite formed under the low-medium temperature has a low degree of crystallinity, fine grain, in tiny scale, $2H+3R$ or $3R$ polymorph mainly, weak pleochroism, high content of trace elements and Re. As a kind of accompanying elements, Re is of some comprehensive utilization value.

Key words: Fujian province; Mesozoic; molybdenite deposits; rhenium; polymorph

福建钼矿资源多, 目前已知 Mo 矿产地 140 处, 床(点)大多数沿着中生代火山断陷盆地边缘分布, 多集中在中生代北西向的构造-岩浆带内。这些矿 成矿与中酸性(偏碱性)岩浆活动关系密切^[1], 且大

* 收稿日期: 2012-06-03; 修回日期: 2012-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072067 紫金山金铜矿硫酸盐对成矿的指示作用)、福建省自然科学基金项目(2010J01257 辉钼矿中伴生铼资源的矿物学约束)、福州大学人才基金项目(XRC-0731 福建沿海中生代双峰式火山岩成因及矿化作用)联合资助

作者简介: 王翠芝(1965-), 女, 山东定陶人, 副教授, 博士, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学方面的教学和科研工作, 研究方向主要为矿床成矿规律及矿产开发利用。E-mail: Weuizhi@163.com。

部分钼矿中有伴生有益元素 Re, 部分已达到工业品位^[2~5]。因此, 对本区铼资源的研究是很有必要的。本文重点研究福建中生代几个典型钼矿中辉钼矿的矿物学特征来探讨其对铼资源的控制作用。

1 福建中生代钼矿概况

福建省地质条件复杂, 岩石类型多样, 沉积岩、变质岩与燕山期火山岩地层各占 1/3。闽西北、闽北地区前震旦纪地层出露广泛, 岩石多具有中~深区域变质和混合岩化, 亦为后期的钼成源提供了矿源。闽西南地区晚古生代准地台型细碎屑岩-碳酸盐岩地层出露广泛, 是本省煤、铁、锰、石灰岩等沉积矿产的重要含矿层位。晚三叠-晚第三纪地层以陆相盆地沉积及火山喷发堆积为主, 尤其是晚侏罗世-白垩纪火山岩广泛分布全省, 为本省的钼矿形成提供物源或热源, 形成本区广泛分布的各种类型的中生代钼矿^[3]。

2 典型钼矿床中辉钼矿的矿物学特征及 Re 的含量

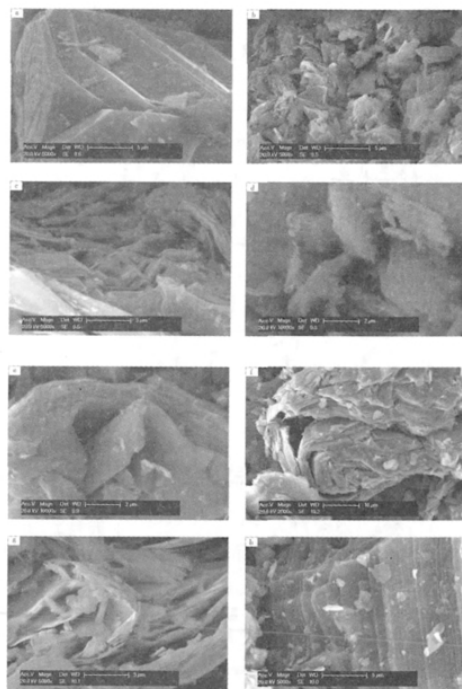
重点选择闽西北部隆起带的坪地中高温热液型、上西坑中低温热液型和闽西南拗陷带的上杭紫金山矿田罗卜岭斑岩型、马坑铁矿伴生钼矿中的辉钼矿等四个不同类型的钼矿, 分别从辉钼矿的形态、大小、多型、矿物化学成分、Re 含量等方面来研究各矿中辉钼矿的矿物学特征及其与 Re 含量的关系。

2.1 辉钼矿的形态、大小

坪地辉钼矿为中高温热液型钼矿^[4], 有两种产状。第一种产状是产于侏罗纪晚期钾长花岗岩“层节理”中黄铁绢英岩中的辉钼矿, 其多呈铅灰色, 半自形、他形鳞片状、片状(图 1-a), 结晶度较高, 多色性明显, 粒径较大, 0.01~0.7 mm, 以 0.01~0.5 mm 为主。另一种是产于钾长花岗岩及大金组黑云变粒岩地层中南北向断裂中构造角砾岩及石英脉型辉钼矿, 其多呈灰黑色, 颗粒相对较小, 呈细小片状, 自形程度较差, 但个别呈厚板状, 常常弯曲, 多色性也比较明显(图 1-b、c)。

上西坑钼矿主要产于大金组黑云变粒岩地层中的南北向断裂的构造角砾岩中, 辉钼矿呈灰黑色, 硬度较低, 呈厚板状、鳞片状、片状、六边形片状等形态, 相对坪地矿段而言, 多色性较差, 粒度相对较细

(图 1-d), 中细粒为主, 一般为 0.007~1.1 mm, 细粒级(0.2~0.02 mm)占 65.69%; 由地表往深部辉钼矿晶粒有逐渐增粗的趋势^[5]。局部辉钼矿呈玫瑰花状、束状或团块集合体, 常发生弯曲或挠曲, 一组完全解理(图 1-e、f)。



a—坪地钼矿钾长花岗岩岩体“层节理”控制的黄铁绢英岩中的片状辉钼矿; b、c—坪地钼矿南北断裂构造角砾岩中细粒及厚板状辉钼矿; d、e、f—上西坑钼矿南北断裂带硅化岩中细晶辉钼矿及构造角砾岩中弯曲的板状辉钼矿; g—罗卜岭铜钼矿体中片状的辉钼矿; h—马坑铁矿伴生钼矿体中板状辉钼矿(注: 本图均为二次电子图)。

图 1 典型钼矿中辉钼矿的形态

罗卜岭斑岩型铜钼矿中的辉钼矿, 多呈叶片状、弯曲鳞片粒状, 半自形~自形晶结构, 粒度较粗(图 1-g), 一般在 0.05~0.3 mm, 主要以独立颗粒形式分布在钾长石和粒状石英脉中或在石英与辉钼矿脉中呈细脉浸染状产出。

马坑铁矿伴生辉钼矿, 铅灰色, 易污手, 多为鳞片状、叶片状或不规则板状晶体, 其粒度均细小(图 1-h), 片径一般为 0.05~0.1 mm, 乃后期热液叠加的产物。常以辉钼矿-石英细脉、微脉及纯辉钼矿短细脉或呈叶片状、星散状充填于铁矿石裂隙面上, 亦有分布于矽卡岩蚀变围岩中有单钼矿, 呈微脉、细脉、团块状产出。



图2 坪地钼矿辉钼矿的X光衍射图谱与标准辉钼矿多型的峰型的对比

(1)、(2)、(3) 坪地矿段辉钼矿; (4)、(5) 上西坑矿段辉钼矿; (6) 罗卜岭铜钼矿; (7) 马坑铁矿辉钼矿; 2H、3R 峰位及峰值为 Jade5 软件加载的 PDF 卡片中的数据; 2H、3R 型辉钼矿的峰位及峰值为 Jade5 软件加载的 PDF 卡片中的数据; 衍射指数 (hkl) 数据引自文献; 数据对比时, 主要依据特征网间距 d 值来确定特征面网 $d_{hkl} = \lambda / 2 \sin \theta_{hkl}$ 。

2.2 辉钼矿的多型

本次研究的辉钼矿的X粉晶衍射样品7件, 分别采自坪地矿段“层节理”的黄铁矿绢英岩化中 I_1 矿体、南北向断裂中蚀变构造岩中的 I_6 矿体、钾长花岗岩裂隙中细脉状矿脉; 上西坑矿段的 IV_1 矿体、大金山组黑云斜长变粒岩中细脉状矿脉; 上杭紫金山矿田罗卜岭铜钼矿中的钼矿体; 龙岩马坑铁矿伴生钼矿体中。样品先后经过重力分离、电磁分离和在双筒显微镜下挑选获得, 辉钼矿纯度在 99% 以上。X 粉晶衍射在福州大学测试中心进行。

将研究的辉钼矿的 X 粉晶衍射图中衍射峰的位置及强度对比^[6,7] (图2), 发现坪地钼矿、上西坑钼矿及紫金山罗卜岭铜钼矿中的辉钼矿的多型主要为 2H 型, 而马坑铁矿中的伴生钼矿的辉钼矿为 3R 型, 面网峰值主要集中在 (006)、(004) 两组上。

2.3 辉钼矿的矿物化学成分及 Re 含量

电子探针显示 (表1), 坪地钼矿、上西坑辉钼矿、紫金山罗卜岭铜钼矿、马坑铁矿伴生钼矿中的辉钼矿的主要成分 Mo、S 均接近理论值, 而主要微量元素 W、Se、Re、Cu、Sn、Fe、Mn、As 等在各个矿区有所变化。相比而言, 坪地钼矿、上西坑辉钼矿、紫金山罗卜岭铜钼矿的辉钼矿中微量元素含量较低, 而马坑铁矿伴生钼矿中辉钼矿的微量元素含量相对较

表1 福建中生代典型钼矿辉钼矿电子探针结果表

/%

矿床	样品号(探针点数)	W	As	Se	Re	S	Mo	Cu	Sn	Fe	Mn	Total
坪地	PDI ₁ 均值(12)	0.0161	0.0001	0.0023	0.0059	40.1484	59.4903	0.0226	0.0029	0.0696	0.0025	99.8500
	PDI ₆ 均值(15)	0.0064	0.0005	0.0017	0.0126	40.2607	59.8891	0.0039	0.0131	0.0156	0.0063	100.2108
	PD 均值(29)	0.0112	0.0003	0.0020	0.0092	40.2046	59.6897	0.0133	0.0080	0.0426	0.0044	100.0304
上西坑	SXKIV1 均值(12)	0.0092	0.0014	0.0143	0.0106	39.9041	59.2719	0.0060	0.0038	0.0283	0.0033	99.4026
马坑	MK(7)	0.0094	0.0052	0.0161	0.0116	40.1957	59.6201	0.0224	0.0111	0.0069	0.1974	100.0960
罗卜岭	LBL(8)	0.0800	0.0019	0.0090	0.0001	40.2077	59.7129	0.0034	0.0051	0.0187	0.0061	100.0450
特征值	矿床	Mo + S			Re/Mo			微量元素总和				
	坪地	99.86			0.000155			0.14				
	上西坑	99.77			0.000178			0.23				
	马坑	99.72			0.000194			0.28				
	罗卜岭	99.88			0.0000017			0.12				

注: 电子探针数据由福建省矿产资源重点实验室测试。

高。就坪地与上西坑两个相邻的热液型钼矿相比, 其他微量元素有明显的差别, 坪地矿段辉钼矿中含两个矿区辉钼矿的微量元素种类除 W 含量相当外, Cu、Sn、Fe、Mn 相对较高, 而上西坑矿段中辉钼矿含

As、Se、Re 相对较高。紫金山罗卜岭铜钼矿中辉钼矿相对富 W 而低 Re, 马坑铁矿伴生钼矿中辉钼矿相对富 As、Mn, 如图 3。

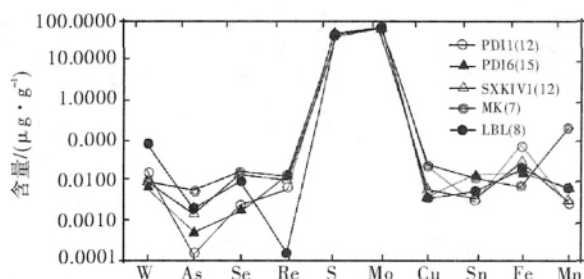


图3 辉钼矿中微量元素曲线图

PDI1(12) - 坪地 12 个点平均; PDI6(15) - 坪地 15 个点平均; SXK(12) - 上西坑 12 个点平均; MK(7) - 马坑 7 个点平均; LBL(8) - 紫金山罗卜岭 8 个点平均

四个典型钼矿的不同产状矿体中辉钼矿中的铼也有明显差异。坪地“层节理” I_1 矿体中的辉钼矿含 Re 较低两个样平均值分别为 0.010%、0.001%。坪地南北向断裂带的辉钼矿含 Re 一般稍高, 为 0.010%; 坪地东部断裂中小矿脉样为 0.015%。上西坑南北向断裂带内矿体中辉钼矿的 Re 含量与坪地矿段南北向断裂内矿体中辉钼矿的 Re 含量相似, 3 个样平均值分别为 0.012%、0.013%、0.006%。罗卜岭铜钼矿中辉钼矿中 Re 含量也较低 8 个电子探针点平均值为 1.42857 $\mu\text{g/g}$ 。马坑铁矿中伴生钼矿中辉钼矿中铼含量稍高, 7 个电子探针点平均值为 115.55 $\mu\text{g/g}$, 比陈跃升测得辉钼矿中的 Re 含量 0.0004% ~ 0.0026% 稍高点^[2], 说明马坑辉钼矿中 Re 的分布不太均匀。

3 讨论

3.1 辉钼矿赋存状态与 Re 含量的关系

杨宗锋等^[8] 2011 年统计 744 个各种产状的辉钼矿 Re-Os 的频数直方图, 综合分析认为辉钼矿与白钨矿(或黑钨矿、方铅矿、闪锌矿、自然金和自然银)共生或产在长英质脉和花岗岩中可能促使其 Re 含量降低, 与黄铜矿、黄铁矿和磁铁矿(或磁黄铁矿)共生或产在砂卡岩和碳酸岩中可能促使其 Re 含量升高, 说明辉钼矿含量变化可能与其产出状态密切相关。辉钼矿 Re 含量显示元素亲和力(亲铜亲铁)可能与元素生成的矿物结构也有关, 例如辉钼矿与磁铁矿共生时其含量显著高于与黄铁矿共生的。共生矿物同样是硫化物, 辉钼矿共生黄铁矿时

其含量又明显高于共生方铅矿和闪锌矿的辉钼矿含量。毛景文等^[9] 汇总了 8 个与磁铁矿系列(O 型)花岗岩有关的钼矿床和铜矿床, 1 个与钛铁矿系列(U 型)花岗岩有关的钨锡矿床, 1 个碳酸岩脉型钼(铅)矿床(黄典豪等^[10] 认为是幔源型矿床)中辉钼矿的 Re 含量, 提出从幔源、壳幔混源到壳源, 辉钼矿 Re 含量可能递降一个数量级的结论。因而, 研究辉钼矿中 Re 含量的影响因素, 还需要今后结合典型矿床的全面系统研究。福建中生代钼矿相对其他地区的钼矿含铼普遍较低, 其原因可能是成矿流体大部分与中生代的壳源岩浆有关。从本次重点研究的四个典型钼矿来看, 坪地中高温热液钼矿、罗卜岭斑岩型铜钼矿两个钼矿形成温度相对较高, 辉钼矿多与石英脉伴生, 而上西坑钼矿中辉钼矿多与黄铁矿、黄铜矿等硫化物伴生, 马坑铁矿中的伴生钼矿体多与砂卡岩共生, 这两个钼矿中的 Re 含量相对较高, 这一现象与前人研究成果是一致的。

3.2 辉钼矿形成温度、晶型、形态与 Re 含量的关系

对前苏联各种成因类型矿床中辉钼矿的系统研究表明: 在单个矿床和在同一类型的不同矿床中, 铼的含量总是多变的; 中温成矿阶段形成的辉钼矿或中温矿床中的辉钼矿, 其铼的含量一般比高温阶段或高温矿床中的辉钼矿高。矿床形成时的温度条件对辉钼矿晶型类型、形态特征起决定性的作用。自然界辉钼矿有六方晶系二层型的 2H 以及三方晶系三层型的 3R 两种多型, 此外, 还常见 2H + 3R 混合型。毛兴莉等^[7] 研究了福建沿海多种类型钼矿床, 认为中高温热液矿床大部分都是 2H 型, 2H 型辉钼矿一般呈亮铅灰色, 结晶较好, 颗粒较粗大, 多呈片状或菊花状、团块状集合体等, 较强的金属光泽; 2H + 3R 型辉钼矿一般结晶较差, 颗粒较细小, 多呈鳞片状或粉末状, 光泽较暗。另外 2H 型多色性明显, 呈亮白 ~ 灰白多色性, 局部有交织图案, 而 2H + 3R 型的辉钼矿表面常见大量“花斑”, 还可见菱形鳞片状、球形鳞片状多种形态^[11]。实验亦证明 2H 型一般在 900 ~ 1300 $^{\circ}\text{C}$ 形成漂亮的鳞片状辉钼矿; 2H + 3R 型 700 ~ 800 $^{\circ}\text{C}$ 形成针状、细板状、鳞片状的辉钼矿; 3R 型 700 ~ 400 $^{\circ}\text{C}$ 以下形成似球型和细晶状分泌物的辉钼矿; 400 $^{\circ}\text{C}$ 以下为非晶质的辉钼矿, 呈致密或疏松的黑色粉末状^[12]。坪地钼矿“层节

理”矿石中辉钼矿常呈片状、鳞片状,结晶程度高,多色性明显;南北向断裂带矿体中辉钼矿呈现带状,常常弯曲,结晶程度高,多色性明显;上西坑矿石特征与坪地钼矿南北向断裂带中的辉钼矿相似,只是矿石颗粒较细。罗卜岭铜钼矿与本区的斑岩有关,形成温度相对较高,结晶度较高,晶体呈片状。马坑铁矿的伴生钼矿是后期热液活动形成的,形成温度相对较低,形成的辉钼矿晶体较小,结晶度较差,污手。本研究的辉钼矿的这些特征,与上述前人研究的 2H、3R 型辉钼矿的一般特征是一致的。

2H 型和 3R 型属同质多象变体。2H 型属二层结构,3R 型为三层结构,这种结构差异导致 2H 型晶体处于稳定状态,而 3R 型处于亚稳定状态;2H 型广泛,但在中低温区多为 2H+3R 型。螺旋位错理论认为,晶体生长初期是无缺陷的,但随离子不断沿晶芽的点棱面按格子构造堆积,由于杂质元素(内应力)和热应力分布的不均匀,晶体内会产生新的特殊定向内应力,在其达到某一极限时,受该力作用的晶格沿一定剪切面位错,元素离子间存在的内应力作用产生“螺旋状力”,进而导致 3R 型辉钼矿的形

成。在辉钼矿形成过程中,某些与钼离子半径、电荷相近的离子,如 Re^{4+} 、 W^{4+} 、 Ti^{4+} 、 Nb^{4+} 、 Ta^{5+} 、 Sn^{4+} 、 V^{4+} 、 Zr^{4+} 、 Fe^{3+} 可取代辉钼矿中的 Mo^{4+} ,其中 Re^{4+} 、 W^{4+} 最有可能^[13]。因为铼的地球化学质与钼十分相似,地壳中的铼资源主要是以类质同象的形式存在于辉钼矿中,其含量与辉钼矿的成矿条件、矿床类型和辉钼矿结晶体的类型等有关,随辉钼矿的成矿温度的升高而减少。因而,一般而言,从高温到低温,由于与围岩不断物质交换,热液中杂质元素的含量和种类增多,2H 型含杂质少,3R 型含杂质多,Re 含量也相对较高^[10]。另外,构造运动也会引起晶格的滑动,造成螺旋位错,导致 3R 型的形成,还会影响晶体的形态,使晶体发生弯曲。本区辉钼矿微量元素主要含一定的 W、Se、Re、Cu、Sn、Fe、Mn,另外,有少量 As。但与其他地区的辉钼矿中微量元素总量和 Re 含量相比并不算高(表 2),这也与一般的 2H 型辉钼矿含杂质少(尤其是 Re 含量较少)、3R 型的辉钼矿含杂质高(尤其是 Re 含量较高)的特征是吻合的。

表 2 不同多型的辉钼矿中化学成分对比

序号	矿床名称	多型	Mo/%	S/%	Mo+S/%	Re/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	杂质/%	其他组分
1	大石沟	2H	58.20	37.80	96.00	381	4.00	Mn、Fe、Ti、Ce、Co、U、Ta、Nb、Sn、Zr、V、La、Yb、Lu、Cr
2	金堆城	2H	58.80	39.40	98.20	21	1.80	Fe、Ti、Mn、Co、Nb、Ce、La、Ta、Bi、W、Ca、Cr、V
3	石家湾	2H	57.90	37.50	95.40	23	4.60	Fe、Ti、Ni、Ce、La、Mn、Co、Cr、Ta、
		2H+3R	56.80	36.90	93.70	42	6.30	Ca、Sn、Nb、Y、V、Zr、Bi
4	南泥湖	2H	54.05	38.94	92.99	38	7.01	Fe、Re
5	马圈	2H	58.87	40.23	99.10	18	0.90	Fe、Re
6	黄背岭	2H	58.23	38.50	96.93	8	3.07	Fe、Re
7	白乃庙	3R	57.66	37.44	95.10	1800	4.90	Fe、Re
8	三保	2H	59.60	39.88	99.48	30	0.52	Se、Te
9	紫云	2H+3R	59.01	34.20	93.21	50	6.79	Se、Te
10	坪地	2H	59.67	40.19	99.86	92	0.14	
11	上西坑	2H	59.63	40.14	99.77	106	0.23	
12	罗卜岭	2H	59.71	40.21	99.88	1	0.12	W、As、Se、Re、Cu、Sn、Fe、Mn
13	马坑	3R	59.62	40.20	99.72	116	0.28	

注:表中 1~3 陈福根^[11],1984;4~7 韩吟文^[14],1988;8~9 毛兴莉等^[7];10~13 本文。

3.3 铼资源的综合利用

从矿产综合利用的角度看,福建钼矿的 Re 含量相比其他类型的钼矿而言是比较低的,大部分钼矿中辉钼矿的矿物特征与上述讨论的 2H 型辉钼矿矿物特征是一致的,即形成温度较高,颗粒大,结晶

度高,多呈片状、鳞片状,虽已达综合利用的工业品位^[15],但不是太高,且变化较大,因此,从经济的角度来看,如果要综合利用,收益不会太大,但本区矿石矿物单一,选矿工艺简单,还是具有一定的综合利用价值。

目前,辉钼矿选冶要经过辉钼矿石破碎、磨碎,选出钼精矿,然后添加药剂钼矿物与其他矿物分离,得出钼精矿。钼精矿再经入炉焙烧等工艺,可得到工业三氧化钼、二氧化钼、钼铁、钼酸铵、钼粉、钼丝、钼条和钼箔等产品^[13]。辉钼矿焙烧过程中,与钼共生的铼同时被氧化成 Re_2O_7 , 升华到烟道气中,随着温度的降低,沉积在电除尘器内与大量钼精矿细粉混杂在一起。 Re_2O_7 在 SO_2 气氛中被部分还原成铼的低价氧化物和硫化物,所以,铼在烟尘中主要以 Re_2O_7 、 ReO_3 、 ReO 、 Re_2O 、 ReS_2 、 ReS_7 等形式存在,但以 ReO_3 、 ReO 、 Re_2O 、 ReS_2 、 ReS_7 形式存在的铼含量较少。从烟尘中浸出铼必须把难溶于水的低价铼氧化物和硫化物氧化成易溶于水的 Re_2O_7 或 HReO_4 , 国内常选择双氧水作为提取铼的氧化剂^[16]。该生产工艺过程简单、生产消耗少、成本低,但存在如下缺点:产品质量不高;二氧化硫污染;辉钼矿中的铼随烟尘一起进入收尘系统,造成其回收率很低(一般为 50 % 左右);如果处理的钼精矿中含有较高的铜、铋、铅等低熔点金属,冶炼过程中炉料易结块而造成氧化不好等。鉴于此,可以借用美国提出的石灰焙烧钼精矿—水浸铼—酸浸钼制钼酸铵—萃取或离子交换回收铼的工艺,该工艺采用石灰焙烧代替氧化焙烧,消除了二氧化硫的污染问题,采用两段浸出使钼、铼分离效果好^[17]。

4 结论

(1) 福建中生代钼矿类型主要有斑岩型、岩浆期后热液型、火山热液型、构造角砾岩型及少量矽卡岩型。

(2) 福建中生代钼矿中辉钼矿的多型主要为 $2H$, 少量 $2H+3R$ 型、 $3R$ 型。

(3) 相比其他地区的钼矿而言,福建中生代辉钼矿颗粒较大(粗~中细),结晶度高,多呈片状、鳞片状,局部板状,个别矿中辉钼矿颗粒较小。

(4) 福建中生代钼矿辉钼矿矿物化学成分微量杂质元素及 Re 含量较低,但矿石矿物成分、结构构造相对单一,选矿工艺简单,还是有一定的综合利用价值,建议进一步优化辉钼矿的选矿工艺,以提高 Re 的回收率。

(5) 中高温下形成的辉钼矿结晶度高,颗粒大,多呈片状、板状,多型主要为 $2H$ 型,多色性强,微量元素含量较低,Re 含量较低;中低温下的辉

钼矿结晶度差,颗粒小,多呈细小鳞片状,多型主要为 $2H+3R$ 型或 $3R$,多色性弱,微量元素含量较高,Re 含量较高。

参考文献:

- [1] 刘诗光. 福建松溪大林坑钼多金属矿床地质特征及成因初探[J]. 福建地质, 2003, 24(3): 134-140.
- [2] 陈跃升. 马坑铁矿区单钼矿成矿组可采性分析[J]. 现代矿业, 2009(2): 45-50.
- [3] 王登红, 陈郑辉, 陈毓川, 等. 我国重要矿产成岩成矿年代学研究新数据[J]. 地质学报, 2010, 84(7): 1031-1040.
- [4] 傅树超. 福建武夷山坪地钼矿床地质特征及成因探讨[J]. 福建地质, 2005, 24(3): 125-133.
- [5] 福建省地质调查研究院. 武夷山市东坑—上西坑矿区上西坑矿段钼矿详查报告[R]. 2005.
- [6] 王奖臻, 李泽琴, 刘家军, 等. 拉拉铁氧化物—铜—金—钼—钴—稀土矿床辉钼矿的多型及标型特征[J]. 地质找矿论丛, 2004, 19(2): 96-99.
- [7] 毛兴莉, 张载三, 郑南来. 福建沿海一些钼矿床中辉钼矿多型性的初步研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1988, 1(1): 111-116.
- [8] 杨宗锋, 罗照华, 卢欣祥, 等. 关于辉钼矿中 Re 含量示踪来源的讨论[J]. 矿床地质, 2011, 30(4): 654-674.
- [9] Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit on northern Qilian mountains and its geological significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 163(11/12): 1815-1818.
- [10] 黄典豪, 王义昌, 聂凤军, 等. 一种新的钼矿床类型——陕西黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质特征及成矿机制[J]. 地质学报, 1985, 59: 241-257.
- [11] 陈福根, 杜本臣, 武清周, 等. 陕西石家湾钼矿床中辉钼矿(多型)初步研究[J]. 陕西地质, 1984, 2(2): 1-19.
- [12] 邵洁涟. 辉钼矿多型研究的新进展[J]. 地质科技情报, 1984, 2: 37-44.
- [13] 马晶, 张文钰, 李枢本. 钼矿选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [14] 韩吟文. 辉钼矿的多型及其成因初探[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1988, 13(4): 385-394.
- [15] 地质矿产部. 矿产工业要求参考手册[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [16] 李卫昌. 钼精矿焙烧烟尘中铼浸出提取研究[J]. 中国钼业, 2007, 39(1): 23-26.
- [17] 邹振球, 周勤俭. 钼精矿石灰焙烧— N_{235} 萃取工艺提取钼铼[J]. 矿冶工程, 2002, 22(1): 79-84.