

铜熔池熔炼渣钽沉降分离变化过程的分析

李江涛 周叶刚

(谦比希铜冶炼有限公司, 北京 100029)

摘要 艾萨炉造钽熔炼产生的铜渣钽在沉降电炉中进行沉降分离,其铜渣分离效果的好坏,直接影响铜的直收率,对铜产品产量和经济效益都有很大的影响。本文通过对铜渣钽沉降分离过程中艾萨炉渣、沉降电炉渣、沉降铜钽三者进行全面微观检测,鉴定查明三者的主要铜矿物及脉石矿物的组成、产出形式、结构分布、粒度大小、粒度分布等微观结构,分析铜渣钽在沉降分离过程中矿物结构的微观变化过程及元素分布,为沉降分离措施的深入及细化研究摸索提供参考和指导。

关键词 艾萨炉渣; 电炉渣; 沉降冰铜; 铜矿物; 物相

中图分类号 TF811 **文献标志码** A **文章编号** 1008-5122(2023)04-0010-08

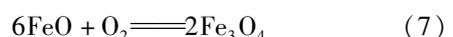
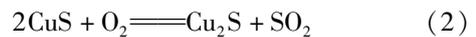
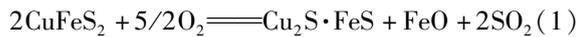
DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2023.04.003

0 前言

几千年来铜在人们的生活和工业发展中发挥着不可替代的重要应用^[1],随着现代社会和科技日新月异的发展,铜的作用更加凸显,铜的消费在较大程度上反映一个国家的工业和基建水平^[2]。我国是铜冶炼和消费大国,但我国的铜资源却很匮乏^[1],且铜的价格相对其他大宗金属商品而言比较高,每年我国要花费大额外汇购进大量铜精矿、粗铜、电解铜等初级铜产品。因此,对铜冶炼厂而言,提高铜的综合回收率具有重要的现实意义。

艾萨熔炼法是20世纪70年代由澳大利亚联邦科学工业研究组织矿业工程部J. M. FLOYD博士领导的研究小组发明的,具有结构简单、熔炼速度快、产能大、生产率高等特点^[1,3],广泛地应用于当今世界铜冶炼的生产中,是一种比较有代表性和发展前景的熔池熔炼技术^[4-7]。艾萨富氧熔池熔炼主要是通过炉顶部的喷枪将富氧空气和燃油鼓入熔池中,在强烈的气体搅动下,经配比混合的入炉矿料

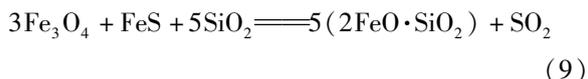
(铜精矿加各种辅料,其主要的元素成分是Cu、Fe、S、SiO₂)中的铜精矿迅速分解,铁和硫剧烈氧化放出大量的热进行熔炼造钽反应,其中大部分Cu与部分Fe、S在熔炼过程中生成高品位冰铜钽,部分S燃烧生成SO₂随烟气排出进行制酸,所有SiO₂与部分Fe反应形成炉渣并将剩余的Cu溶解和夹带其中^[1-3,5,7]。所产生的冰铜钽送入转炉吹炼生产粗铜,艾萨炉渣则需要沉降电炉中沉降分离。沉降电炉中自焙电极制造电阻热,使熔体温度保持在一定的范围内,根据实际生产情况加入一定量的炭、硅石、含硫物料等,将艾萨炉渣中的Fe₃O₄还原为FeO,再和SiO₂、CaO、Al₂O₃等氧化物一起造渣,使炉渣的黏度和密度降低,改善渣的分离性质,使钽粒较易沉降到钽层中^[1,3,8-10];并在炉渣的对流运动中,Cu₂O硫化生成的钽粒与原来所夹带的钽粒相遇,在界面张力作用下聚集成尺寸较大的钽粒,从而沉降分离成低含铜电炉渣和高品位冰铜^[1,3,8]。主要的反应如下^[1,3,8]:



收稿日期 2022-12-20

作者简介 李江涛(1986—),男,云南昆明人,硕士,高级工程师,主要从事冶金及选矿工作。

引用格式 李江涛,周叶刚.铜熔池熔炼渣钽沉降分离变化过程的分析[J].绿色矿冶,2023,39(4):10-17.



炉渣含铜量是冶金过程中铜损失的主要方式,主要分为溶解损失和机械损失^[11]。溶解损失主要是铜的氧化物或铜硫粒子溶解在炉渣中从而损失;机械损失主要为细小颗粒的铜硫粒子机械地夹杂在炉渣中进而损失^[11]。虽然电炉渣含铜量通常约为1%,但是对于产能动辄数万吨的火法炼铜厂而言,炉渣造成的损失很大,因此炉渣中铜硫沉降分离的效果,直接影响铜的直收率和回收率,进而影响企业经济效益^[9-10,12-13]。

在实际生产中,不同的企业均总结了较多降低电炉渣含铜量的措施和经验^[9,10,12,13],但是对铜渣硫在电炉中沉降分离过程中微观变化的研究却

很少。本文利用X射线衍射仪(XRD)、X射线能谱(EDS)、光学显微镜、扫描电镜背散射电子成像(SEM)等设备手段,对铜渣硫沉降分离过程中的艾萨炉渣、沉降电炉渣、沉降冰铜进行全面微观的检测,鉴定查明三者的主要铜矿物及脉石矿物的组成、产出形式、结构分布、粒度大小、粒度分布等微观结构变化情况,并结合检测结果和生产实践,详细地分析沉降分离过程中铜渣硫矿物结构的微观变化过程及元素分布,为沉降分离的深入研究提供参考指导。

1 艾萨炉渣的工艺矿物学分析

1.1 艾萨炉渣元素含量分析

肉眼观察艾萨炉渣样品,它显示为灰黑色伴有部分褐色,其XRF分析结果见表1。

表1 艾萨炉渣成分分析

成分	Cu	Fe	S	O	SiO ₂	Al	K	Mg	Co
含量	22.57	36.93	5.44	14.93	11.60	2.08	1.36	0.68	0.44
成分	Ca	Ti	Na	Zn	Ni	Mo	P	Cr	Zr
含量	2.88	0.26	0.14	0.05	0.11	0.07	0.03	0.29	0.03

1.2 艾萨炉渣主要矿物的组成与含量

艾萨炉渣的X射线衍射分析图谱如图1所示,其主要矿物含量见表2。图1和表2表明,艾萨炉渣中的铜矿物主要为斑铜矿,其次为黄铜矿、辉铜矿和金属铜;其他金属矿物有磁铁矿和少量的金属铁;脉石矿物以橄榄石和硅质玻璃体为主,偶见石英和钾长石。因艾萨炉渣中大部分矿物结晶程度较低,X射线衍射分析图谱的背景值较高,矿物的衍射峰十分弥散。

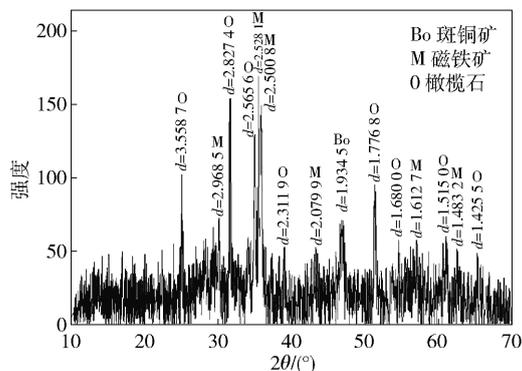


图1 艾萨炉渣的X射线衍射分析图谱

1.3 艾萨炉渣主要矿物的产出形式

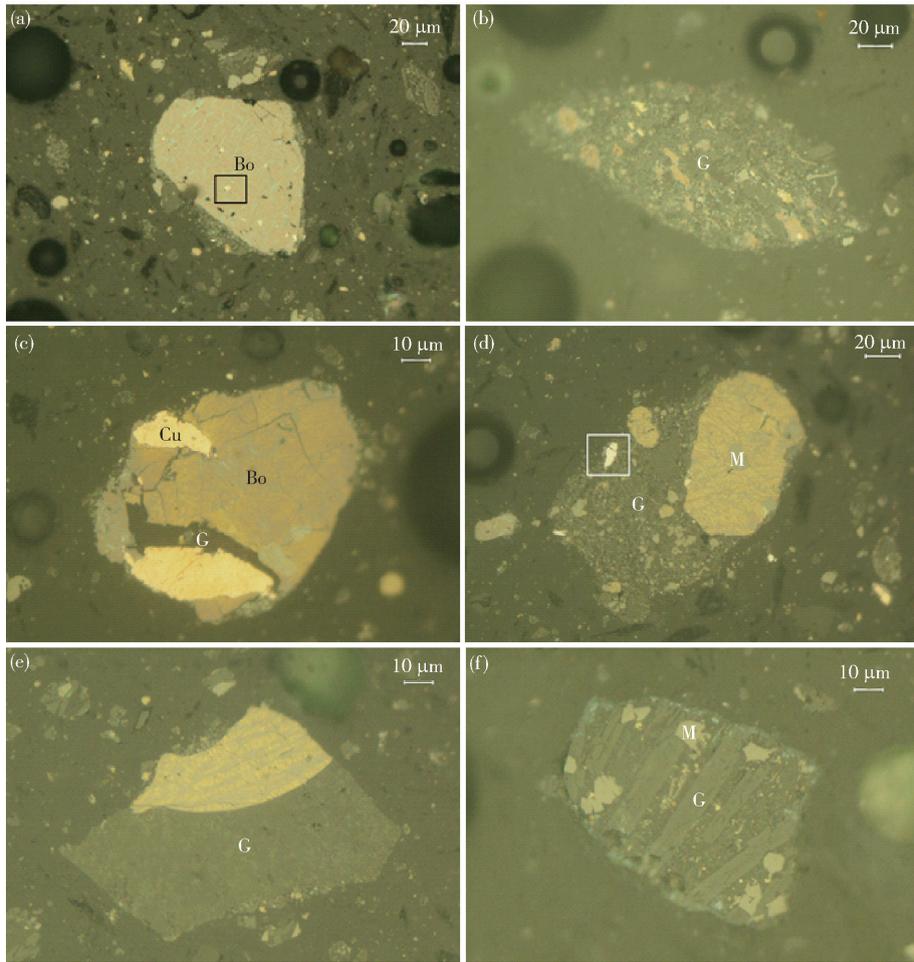
艾萨炉渣主要产出矿物的物相如图2所示。

表2 艾萨炉渣中主要矿物的含量

矿物	黄铜矿	斑铜矿	辉铜矿	金属铜	金属铁	磁铁矿
含量	1.6	20.3	3.1	2.5	0.2	5.9
矿物	橄榄石	硅质玻璃体	石英	钾长石	其他	
含量	39.4	24.2	0.5	1.3	1.0	

图2(a)中,辉铜矿呈微网脉状沿斑铜矿的解理缝、裂隙分布,方框内为金属铁;图2(b)中,微细的斑铜矿、黄铜矿呈稀疏浸染状嵌布在脉石(G)中;图2(c)中,脉石(G)沿斑铜矿(Bo)、自然铜(Cu)的边缘或裂隙充填;图2(d)中,磁铁矿(M)部分包裹于黄铜矿中,部分嵌布于脉石(G)中,方框内为金属铁;图2(e)中,由黄铜矿、辉铜矿组成的条纹状铜矿物连晶沿脉石(G)边缘嵌布;图2(f)中,磁铁矿(M)零星散布在脉石(G)中。

1) 铜矿物:样品中的铜矿物主要是斑铜矿,其次为黄铜矿、辉铜矿和金属铜。各种铜矿物常相互紧密镶嵌构成集合体,其中大部分辉铜矿主要呈微细的网脉状,与斑铜矿交生组成网格状或条纹状连晶,少数呈皮壳状或不规则状沿其他铜矿物或金属铜的边缘及裂隙充填,铜矿物集合体的粒度一般为0.01~0.15 mm(图2(a))。据镜下统计,样品中呈



B₀ - 斑铜矿; M - 磁铁矿; G - 脉石

图2 艾萨炉渣主要矿物物相

单体产出的铜矿物占比仅为 77.5%，其余部分主要与橄榄石、硅质玻璃体等脉石矿物紧密交生而构成不同比例的铜矿物连生体(表 3)。铜矿物与其他矿物之间的嵌连方式主要是包裹型连生体,其次为毗连型连生体,其中包裹型连生体的表现形式是铜矿物呈稀疏浸染状嵌布在脉石中,少数内部包裹少量微细粒磁铁矿、黄铁矿或脉石(图 2(a) ~ 图 2(d));毗连型连生体的特征是铜矿物沿脉石边缘分布,相互之间的接触界线多较为规则平直(图 2(e))。上述两种类型的铜矿物连生体数量上以第一种居多,二者的比例大致为 85: 15。

2) 金属铁:呈不规则状,零星分布,部分呈单体状态产出,部分则呈零星浸染状包裹在铜矿物内部或散布在脉石中,粒度一般为 0.005 ~ 0.05 mm(图 2(a)、2(d))。

3) 磁铁矿:呈自形、半自形等轴粒状,主要呈稀疏零星散浸染状分布在脉石中,少数呈单体产出,偶见与

表 3 艾萨渣中铜矿物的解离度 %

产出形式	单体	连生体			
		>3/4	3/4 ~ 1/2	1/2 ~ 1/4	<1/4
占比	77.5	3.3	4.6	6.7	7.9

铜矿物交生镶嵌,粒度多小于 0.015 mm,部分甚至在 0.002 mm 以下(图 2(d)、2(f))。

4) 脉石矿物:在艾萨炉渣中,脉石矿物含量较高的是橄榄石和硅质玻璃体,橄榄石所占比例相对较高,特征是多呈微细的针柱状雏晶与硅质玻璃体交生。总体来看,橄榄石和硅质玻璃体主要作为磁铁矿的嵌布基底产出,少数与铜矿物紧密镶嵌,特别是常见微细的圆粒状金属铜零星分布在橄榄石和硅质玻璃体组成的基底中,粒度一般为 0.001 ~ 0.1 mm(图 2(c) ~ 2(f))。

1.4 结果分析

1) 艾萨炉渣中铜含量极高(22.57%),由于艾

萨炉生产性质和原理,炉渣中的铜没有充足的时间进行沉降分离,因此艾萨炉渣需在沉降电炉中充分沉降,尽可能将铜从渣中剥离。

2) 艾萨炉渣中呈单体产出的铜矿物为 77.5%, 其余部分主要与橄榄石、硅质玻璃体等脉石矿物紧密交生而构成不同比例的铜矿物连生体,单体产出的这部分铜在沉降时较容易从渣中分离出来,而铜矿物的连生体则因熔渣组分、黏度、硅铁比和沉降温度等因素的不同,分离程度不同。

3) 磁性铁的含量对熔渣黏度影响很大,理论上当磁性铁含量超过 10% 后,随着磁性铁含量的增加,熔渣黏度将显著上升,会造成更多的铜因机械夹杂而损失,而磁性铁的含量主要受到精矿组分、硅铁比、熔炼氧势的影响。

4) 脉石矿物的粒度越细,对于沉降分离越有利,但在实际冶炼过程中不会专门针对脉石矿物粒度进行工艺操作。

2 沉降电炉渣的工艺矿物学分析

2.1 沉降电炉渣中元素的含量分析

沉降电炉渣在肉眼下观察为灰黑色,其 XRF 分析结果见表 4,铜的化学物相分析结果见表 5。从表 5 中可以看出,沉降电炉渣主要成分是脉石杂质,铜的含量很少,铜矿物的组成中硫化铜和金属铜的

表 4 沉降电炉渣的成分分析 %

成分	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Sb	Pb
含量	43.998	0.035	1.203	0.495	0.083	0.016	0.122
成分	Bi	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Co	Fe ₃ O ₄
含量	0.009	4.002	3.844	0.539	25.962	0.422	5.8

表 6 沉降电炉渣中主要矿物的含量 %

矿物	黄铜矿	斑铜矿	辉铜矿	金属铜	磁性铁	金属铁	橄榄石玻璃体	白云石	其他
含量	0.1	0.6	0.2	0.2	5.5	0.3	81.3	10.8	1.0

2.3 沉降电炉渣主要矿物的产出形式

沉降电炉渣主要产出矿物的物相如图 4 所示。图 4(a) 中,斑铜矿(Bo)与金属铜(Cu)、黄铜矿(Ch)混杂交生而构成铜矿物集合体;图 4(b)中,辉铜矿(Cha)内部可见残余状黄铜矿(Ch);图 4(c)中,不规则长条状金属铜(Cu)呈单体产出;图 4(d)中,微粒金属铜和磁性铁(M)呈星散浸染状散布在脉石(G)中;图 4(e)中,铜矿物沿磁性铁(M)粒间充填分布;图 4(f)中,斑铜矿(Bo)、金属铜(椭圆

含量为 87%,而氧化铜的比例仅为 13%,可见在沉降电炉渣中,铜主要以物理夹杂的形式损失,如果能够将大部分金属铜和硫化铜分离进入铜硫相,那么对提高铜的回收率十分有利。

表 5 沉降电炉渣中铜的化学物相分析结果 %

铜相	金属铜	硫化铜	自由氧化铜	结合氧化铜	合计
含量	0.16	0.71	0.10	0.03	1.00
分布率	16.00	71.00	10.00	3.00	100.00

2.2 沉降电炉渣主要矿物的组成与含量

电炉渣的 X 射线衍射分析图谱如图 3 所示,其主要矿物的质量百分数见表 6。图 3 和表 6 表明,电炉渣中铜矿物主要是斑铜矿和辉铜矿(铜硫),其次为黄铜矿和金属铜;铁矿物以磁性铁为主,其次为金属铁;脉石矿物含量较高的是橄榄石和硅质玻璃体,其次为白云石。总体来看,电炉渣中部分矿物的结晶程度较低,主要表现在 X 射线衍射分析图谱的背景值较高、矿物的衍射峰较为弥散(图 3)。

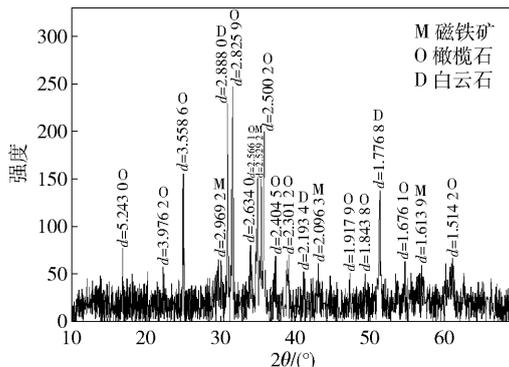
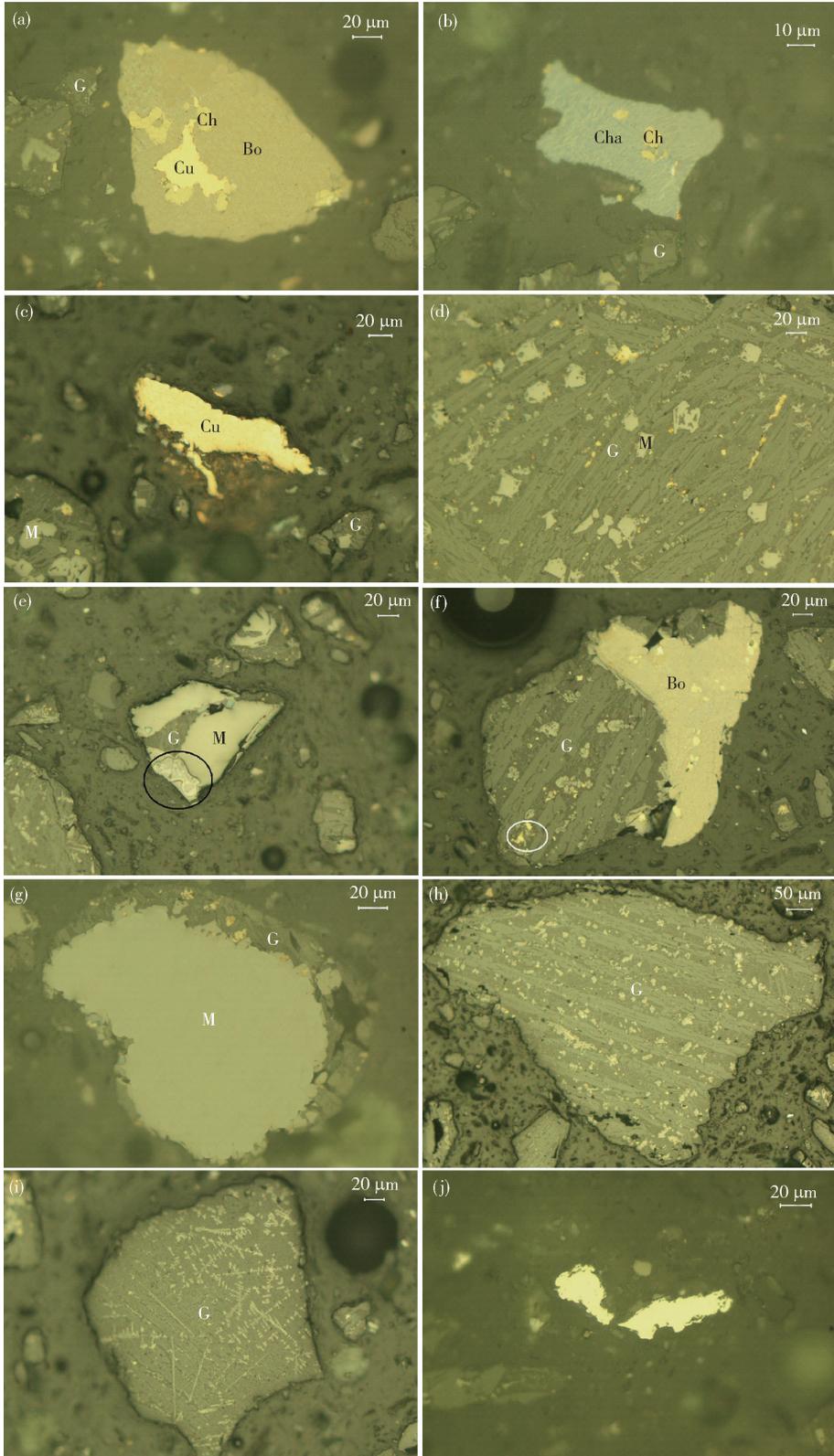


图 3 电炉渣的 X 射线衍射分析图谱

内)与脉石(G)镶嵌而构成铜矿物的贫连生体(磁性铁);图 4(g)中,磁性铁(M)呈致密团块状沿边缘分布脉石(G)中(金属铜);图 4(h)中,磁性铁呈稀疏浸染状嵌布在脉石(G)中;图 4(i)中,磁性铁呈微细锥晶嵌布于脉石(G)中;图 4(j)显示不规则粒状单体金属铁。

1) 铜矿物:沉降电炉渣中黄铜矿多为不规则粒状,呈单体产出者少,多以微细包裹体的形式零星分布在部分斑铜矿或辉铜矿中,从而构成铜矿



Ch - 残余状黄铜矿; Bo - 斑铜矿; Cha - 辉铜矿; M - 磁铁矿; G - 脉石

图4 沉降电炉渣主要矿物物相

物集合体, 粒度不甚均匀, 个别粗者可达 0.1 mm 左右, 一般为 0.005 ~ 0.06 mm (图 4(a)、4(b))。

金属铜形态除少数为细小的圆粒状以外, 绝大部分为不规则状, 有些为单体粒状, 有些则与斑铜

矿、辉铜矿紧密镶嵌,常呈星散浸染状嵌布在主要由橄榄石组成的脉石基底中(图4(a)、4(c)、4(d))。沉降电炉渣中铜矿物的粒度分布见表7。据镜下粗略估计,电炉渣中呈单体产出的铜矿物约占70%,其余部分主要与磁铁矿、脉石等交生而

构成不同比例的铜矿物连生体,其中尤以铜矿物的贫连生体居多,嵌连方式主要是包裹型连生体,其特征是铜矿物常呈微细的粒状嵌布在磁铁矿或脉石中(图4(e)~4(g))。

表7 沉降电炉渣中铜矿物的粒度

粒径/mm	分布率	累计分布率	粒径/mm	分布率	累计分布率
-0.074+0.052	11.87	11.77	-0.019+0.013	9.35	91.03
-0.052+0.037	25.01	36.28	-0.013+0.010	5.22	96.17
-0.037+0.026	29.82	66.1	-0.010	3.67	100.00
-0.026+0.019	15.06	81.76			

2) 磁铁矿:分布极为广泛。除少数为单体产出外,绝大多数呈极微细的蠕虫状、乳滴状或蕨叶状锥晶嵌布在橄榄石、硅质玻璃体等脉石矿物中,还有少数与微细铜矿物紧密镶嵌,粒度个别粗者可达0.25 mm左右,一般为0.002~0.05 mm(图4(g)~4(i))。

3) 金属铁:分布零星,不规则状,单体为主,与铜矿物和脉石直接镶嵌者较为少见,粒度多为0.02~0.2 mm(图4(j))。

4) 脉石矿物:主要为橄榄石和硅质玻璃体,其次为白云石。其中橄榄石常为细小的针柱状、树枝状微晶,多与硅质玻璃体混杂交生构成铜矿物和磁铁矿的嵌布基底,粒度一般0.01~0.05 mm(图4(d)、4(f)、4(h)、4(i))。白云石为自形、半自形粒状,主要呈单体产出,粒度个别粗者可达0.6 mm左右。根据其形态和不与其他矿物嵌连的特征,推断电炉渣中白云石可能为外来混入物。

2.4 结果分析

1) 从检测鉴定结果可以看出,艾萨熔渣经沉降分离后,大部分的铜已经与渣剥离,而最后残留在电炉渣中的铜主要是以微细的粒状嵌布夹杂在磁铁矿和脉石中,溶解的较少。

2) 残留在电炉渣中的铜矿物粒度非常细小,如要尽可能将铜从渣中剥离,则需要足够长的沉降时间,且要提高渣温和降低渣的黏度。在实际生产中,增加沉降时间比较困难,而渣温也一般保持能做到的范围内,降低渣的黏度则相对可控。

3) 磁性铁的熔点很高,若沉降温度低于其熔点,则磁性铁无法完全熔化,其中嵌布夹杂的铜无法解离出来。生产中大多使用调节硅铁比的方法从而最大程度地减少沉降电炉渣中磁性铁的含量。

3 电炉沉降铜硫的工艺矿物学分析

3.1 沉降铜硫中元素的含量

沉降铜硫肉眼观察为灰黑色,其化学成分分析结果见表8。由表8可知,沉降铜硫的主要元素组成为Cu、Fe、S,三者占比合计为95.461%,除此之外还有少量的Co、Ni、As、Sb、Bi、Pb和SiO₂等。

3.2 沉降铜硫主要矿物的组成与含量

沉降铜硫的X-射线衍射分析如图5所示,其物相组成及相对含量见表9。图5和表9表明,电炉沉降铜硫的物相主要为斑铜矿(Cu₅FeS₄),其次为辉铜矿(Cu₂S)、金属铜,其余少量为硫化亚铁相、磁铁矿、氧化亚铁、钴铁合金相、钴铁硫化相、铅铋合金相及硅质杂质相等。

3.3 沉降铜硫主要矿物的产出形式

电炉沉降铜硫中物相的产出状态见显微镜及扫描电镜图(图6)。图6(a)、6(b)为沉降冰铜中金属铜、氧化铁、硫化亚铁及钴铁合金相的产出状态;图6(c)为金属铜、磁铁矿呈不同形态分布于斑铜矿中,点1是金属铜,点2是磁铁矿,点3是斑铜矿;图6(d)为硫化亚铁、钴铁合金相及金属铋集合体分布于斑铜矿中,点1是钴铁合金,点2是金属铋,点3是硫化亚铁,点4是斑铜矿,点5是氧化铁。

1) 沉降铜硫中,主要的物相斑铜矿与辉铜矿以固溶体分离结构形成复杂细密的格状共晶集合体(图中统一标注为斑铜矿)。

2) 金属铜多呈粗细不等的圆粒状、脉状、不规则状分布于斑铜矿集合体中,金属铜的产出粒度为0.02~0.2 mm(所观察样品为磨碎样,部分金属铜粒度并非原始结晶粒度)。

3) 磁铁矿多呈自形-半自形晶细粒均匀分布于

表 8 沉降铜钼的化学成分分析

%

组分	Cu	Fe	S	Co	Ni	As	Sb	Bi	Pb	Zn	SiO ₂
含量	59.572	13.178	22.711	0.141	0.122	0.068	0.031	0.104	0.068	0.382	0.695

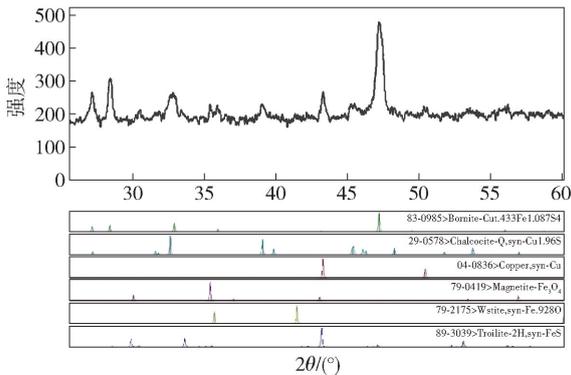


图 5 沉降铜钼的 X-射线衍射图

表 9 铜钼物相组成及相对含量

%

矿相	相对含量	矿相	相对含量
斑铜矿、辉铜矿	83.80	磁铁矿、氧化亚铁	3.30
金属铜	7.40	钴铁合金相	0.33
硫化亚铁相	4.20	铅铋合金相	0.18
钴铁硫化相	4.20	其他杂质相	0.79

斑铜矿相中,产出粒度一般小于 0.01 mm。沉降铜钼中的磁铁矿与氧化亚铁存在完全或部分相互转化关系,在显微镜下仍保留部分氧化亚铁的光学特征,但衍射分析表明以磁铁矿为主。

4) 硫化亚铁相、钴铁硫化相及钴铁合金相多呈

紧密共生的集合体分布于斑铜矿相中,集合体粒度一般小于 0.04 mm。硫化亚铁相、钴铁硫化相及钴铁合金相间存在着紧密的固溶体分离结构,即高温时钴铁合金与硫化亚铁形成固溶体,当温度下降时,钴铁合金从硫化亚铁相及钴铁硫化相中结晶分离出来。有时可见钴铁合金相呈独立的圆粒状分布于斑铜矿相中。铅铋合金相呈微粒分布于斑铜矿相中。硅质渣相较为少见,以机械夹杂形式分布于斑铜矿相中。

3.4 结果分析

经沉降后,艾萨电炉渣中的铜均大部分分离富集到铜钼相中,铜钼相中 Cu、Fe、S 占了绝大部分,仅混入少量杂质元素,说明经沉降分离后脉石杂质和铜基本上全部分离,仅有小部分的铜残留损失在电炉渣中。

4 结论与建议

1) 艾萨炉渣中含铜量很高,甚至可以看作是一种低品位冰铜,这说明艾萨造钼熔炼时,渣和铜没有充足的时间进行分离,因此,沉降电炉的分离是关键。

2) 在艾萨炉渣中,77.5% 的单体铜矿物容易从渣中分离出来,剩余 22.5% 铜矿物与脉石形成连生体,其分离情况与熔渣组分、黏度、硅铁比和沉降温

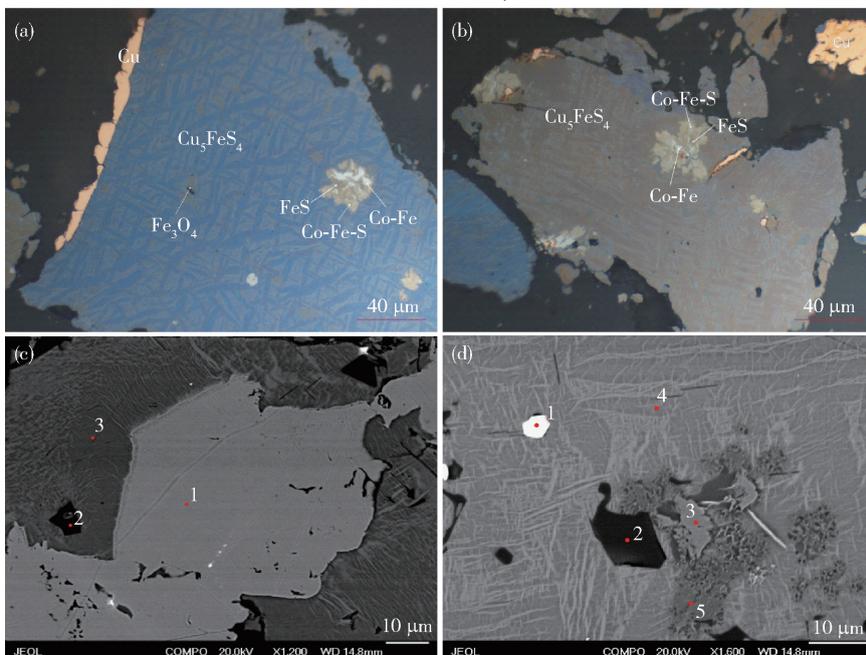


图 6 沉降铜钼主要矿物物相

度、时间等因素关系较大,因此如何减少艾萨炉渣中的铜矿物连生体和提高单体铜矿物的产出是铜渣沉降分离的重点。

3) 沉降电炉渣中因机械夹杂损失的铜为 87%, 而溶解损失的铜仅为 13%, 因此降低电炉渣含铜量的损失关键在于解决机械夹杂损失, 而溶解损失的铜情形较为复杂, 一般很难分离出来, 即使进行贫化处理也很难分离, 只有在生产操作中尽量减少溶解损失产生。

4) 磁性铁和其他脉石成分是造成铜夹杂损失的重大因素, 但因其熔点高, 生产温度很难使它们完全熔化从而使其中嵌布夹杂的铜颗粒解离出来, 目前生产中主要通过调节硅铁比、补加适量的 CaO 等辅料调整渣型、降低磁性铁的含量, 加入还原剂、硫化剂还原磁性铁。

5) 电炉渣中呈单体产出的铜矿物约占 70%, 粒径相对较大, 这部分铜采用一定的贫化手段可以相对容易分离出来, 而其余粒度较细且与脉石形成贫连生体的部分, 即使采取贫化手段也较难分离出来。

6) 炉渣中部分铜矿物粒度较细, 因此, 脉石矿物的粒度越细, 则对于沉降分离越有利, 如实际工艺操作允许可适当考虑调控。

7) 一部分钴在沉降分离后最终留在电炉渣中, 如果使用含钴量较高的铜精矿生产, 有回收钴的需求时, 则需考虑这部分操作控制。

8) 在沉降分离的过程中, 炉渣和铜硫相中的主要铜矿物均为斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿和金属铜。

[参考文献]

- [1] 朱祖泽, 贺家齐. 现代铜冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 刘平, 任凤章, 贾淑果, 等. 铜合金及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] 彭容秋. 铜冶金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004.
- [4] 赵明, 程利振. 顶吹浸没冶金技术应用现状及展望[J]. 有色冶金设计与研究, 2017, 38(1): 13-19.
- [5] 陈淑萍, 伍赠玲, 蓝碧波, 等. 火法炼铜技术综述[J]. 铜业工程, 2010(4): 44-49.
- [6] 衷水平, 陈杭, 林泓富, 等. 我国铜熔炼工艺简析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(11): 1-8.
- [7] 赵震宇. 顶吹浸没铜熔炼技术述评[J]. 有色矿冶, 2004(5): 33-36.
- [8] 刘纯鹏. 铜冶金物理化学[M]. 上海: 上海科学技术社, 1990.
- [9] 王森. 降低电炉渣含铜的生产实践[J]. 中国有色冶金, 2013, 42(3): 15-18.
- [10] 曹洪杨, 张力, 付念新, 等. 国内外铜渣的贫化[J]. 材料与冶金学报, 2009, 8(1): 33-39.
- [11] GORAI B, JANA R K, PREMCHAND. Characteristics and utilisation of copper slag—A review [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2003, 39(4): 299-313.
- [12] 李样人. 降低电炉渣含铜的措施[J]. 矿冶工程, 2003(3): 49-50.
- [13] 孙香, 张鑫, 祝星, 等. 降低贫化电炉渣含铜影响因素分析[J]. 中国有色冶金, 2014, 43(5): 44-47, 29.

Analysis of Sedimentation Separation Process of Slag and Sulfonium in Copper Molten Pool Smelting

LI Jiangtao, ZHOU Yegang

Abstract: The copper slag matte produced by ISA matte smelting is settled and separated in the settling electric furnace. The effect of copper slag separation directly affects the direct yield of copper, and has a great influence on the production and economic benefit of copper products. In this paper, through the comprehensive microscopic examination of ISA slag, matte and electric slag in the process of settling matte separation of copper slag, the composition, production form, structure distribution, particle size and particle size distribution of the main copper minerals and gangue minerals of the three were identified and analyzed in detail. The microstructural changes and element distribution of copper slag matte in the process of sedimentation separation were shown in detail, which provided reference and guidance for further research and refinement of sedimentation separation measures.

Key words: ISA slag; electric furnace slag; settled matte; copper ore; phase