

毛坪铅锌矿选矿厂的设计与生产实践

敖顺福, 刘志成, 高连启, 惠世和

(驰宏科技工程股份有限公司, 云南 曲靖 655000)

摘要: 毛坪铅锌矿矿石矿物组成复杂, 有用矿物嵌布粒度极不均匀、交代结构突出, 且含有易泥化粘土矿物, 为复杂难选矿。针对矿石的工艺矿物学特性及选矿试验, 从选矿工艺流程的确定、各工序的主要设计内容及关键设备的选型等方面, 全面介绍了毛坪铅锌矿 2000 t/d 选矿厂的多碎少磨、阶段磨矿阶段选别、选矿废水处理回用等的设计要点。针对选矿厂生产调试和生产实践中发现的问题, 在不改变选矿主体工艺流程及更换关键设备的前提下, 通过选矿药剂制度、浮选机及附属设施、选矿废水处理与回用、石灰乳制备与输送等的改进完善, 使选矿工艺流程变得更加合理及高效, 并适应了矿石性质改变后的选矿需要及取得了关键选矿指标的提升及稳定, 为其它选矿厂的设计及生产实践提供了借鉴经验。

关键词: 毛坪铅锌矿; 流程确定; 设备选型; 废水处理与回用; 生产实践; 改造优化; 浮选

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.01.027

中图分类号: TD952 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6532 (2018) 01-0123-05

毛坪铅锌矿第一座 150 t/d 的铅锌选矿厂, 后经多次改造升级后, 处理能力达到了 300 t/d; 伴随着矿山资源增储的突破及采矿能力的扩大, 于 2009 年 8 月一座 2000 t/d 的铅锌选矿厂建成投入试生产。2000 t/d 选矿厂在设计过程中充分借鉴了原 300 t/d 老选矿厂的技术革新成果及生产实践经验, 并吸取当时的铅锌选矿先进技术^[1]; 经过多年

的生产实践, 尤其是矿石品位升高后的技术攻关, 证明 2000 t/d 选矿厂的主体工艺设计合理、关键设备配置正确。

1 矿石性质

1.1 矿石的化学成分

原矿多元素分析结果见表 1, 原矿中的铅、锌化学物相分析结果见表 2。

表 1 原矿多元素分析结果 /%
Table 1 The Chemical analysis result of raw ore

Pb	Zn	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Cu	As	Sb	Cd	Au*	Ag*
4.41	12.33	22.32	32.04	3.64	0.20	10.39	3.01	0.01	0.037	0.11	0.030	0.30	61.48

* 单位为 g/t

表 2 原矿铅、锌化学物相分析结果
Table 2 The analysis result of lead and zinc phase

相别	氧化铅	硫化铅	铅铁矾	合计	氧化锌	硫化锌	锌铁尖晶石	合计
含量/%	0.471	4.094	0.0831	4.65	0.564	11.682	0.0739	12.32
占有率/%	10.13	88.08	1.79	100.00	4.58	94.82	0.60	100.00

1.2 原矿矿物组成

原矿的矿物种类繁多, 金属硫化物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿, 其次为白铁矿、黄铜矿、毒砂等; 金属氧化物为褐铁矿、赤铁矿; 脉石矿

物主要为方解石、白云石、含铁白云石、石英、绢云母, 其次为萤石、磷灰石、煤、碳质物、粘土矿物等。主要矿物相对含量见表 3。

收稿日期: 2016-09-13; **改回日期:** 2016-11-21

作者简介: 敖顺福 (1982—), 男, 工程师, 主要从事选矿技术研究及管理工作。

表 3 主要矿物相对含量
Table 3 The analysis result of main mineral

矿物	方铅矿、铅矾	闪锌矿	黄铁矿	萤石	石英/长石	方解石 白云石	赤铁矿 褐铁矿	绢云母及其 他粘土矿物	合计
含量/%	5.01	20.56	46.27	0.02	1.93	21.93	0.05	4.23	100.00

1.3 主要矿物特征

方铅矿：方铅矿沿闪锌矿裂隙充填交代，呈脉状、不规则状产出，其形状和大小随闪锌矿裂隙而变化，部分粗粒方铅矿中包含有闪锌矿，或包含黄铁矿晶体；方铅矿的嵌布粒度极不均匀，主要嵌布粒度范围在 0.01 ~ 2 mm。

闪锌矿：闪锌矿呈块状、不规则粒状产出；闪锌矿在应力作用下，产生大量的张性裂隙，沿闪锌矿裂隙有方铅矿和方解石充填交代；闪锌矿中常包含有早期结晶的自形~半自形粒状黄铁矿。闪锌矿呈粗~细粒不等粒嵌布，嵌布粒度极不均匀，主要粒度范围在 0.04 ~ 2 mm。

黄铁矿：主要呈粒状集合体分布，黄铁矿晶粒间和碎裂隙中，常有方铅矿、闪锌矿等充填交代；在粗粒方铅矿或闪锌矿中，常包含有黄铁矿残晶。黄铁矿的嵌布粒度相对较细，主要嵌布粒度在 0.01 ~ 0.16 mm。

从选矿的角度来看，该矿石的选别存在一定困难。（1）有用矿物的嵌布粒度极不均匀、交代结构突出，粗磨难以实现有用矿物的充分单体解离，细磨可提高矿物单体解离度，但易造成有用矿物过粉碎；（2）褐铁矿、绢云母及其他粘土矿物在碎磨过程中易泥化，会因其夹带、罩盖等干扰有用矿物的浮选分离。

2 工艺设计

2.1 工艺流程的确定

在毛坪铅锌矿多年的选矿生产实践中，选矿工艺流程经改造优化完善为“铅硫混合浮选 - 铅硫混浮精矿抑硫浮铅分离 - 铅硫混合浮选尾矿浮选锌”的一段磨矿选别工艺流程，其流程对矿石性质适应性强、调整控制灵活简便，并取得了较好的技术经济指标。但为了新选厂更可靠的选矿工艺及更优异的选矿指标，企业委托了北京矿冶研

究总院、广州有色金属研究院等单位开展了大量的选矿试验研究工作；最终在继承老选厂部分混合浮选原则流程的基础上，采用了试验中的铅硫混浮精矿再磨脱锌的创新工艺，将试验推荐的“铅硫混合浮选 - 铅硫混浮精矿再磨脱锌 - 脱锌铅硫混浮精矿抑硫浮铅分离 - 铅硫混合浮选尾矿浮选锌”阶段磨矿阶段选别工艺流程确定为新选厂的工艺流程。浮选流程中所使用的浮选药剂均为常规高效药剂，铅硫混合浮选用硫酸锌抑制闪锌矿后采用乙基黄药捕收方铅矿与黄铁矿，得到的铅硫混浮粗精矿经再磨后继续用硫酸锌抑制闪锌矿后采用乙基黄药捕收方铅矿与黄铁矿，脱锌得到的铅硫混合精矿用石灰调节矿浆 pH 值及抑制黄铁矿后用乙硫氮捕收方铅矿，而铅硫混合浮选尾矿中被硫酸锌抑制的闪锌矿用硫酸铜活化后用丁基黄药进行捕收；流程中除铅硫分离使用石灰调节矿浆 pH 值 ≥ 11.5 外，其余均在矿浆自然 pH 值下进行。选矿工艺原则流程见图 1、设计工艺指标见表 4。

2.2 破碎筛分系统

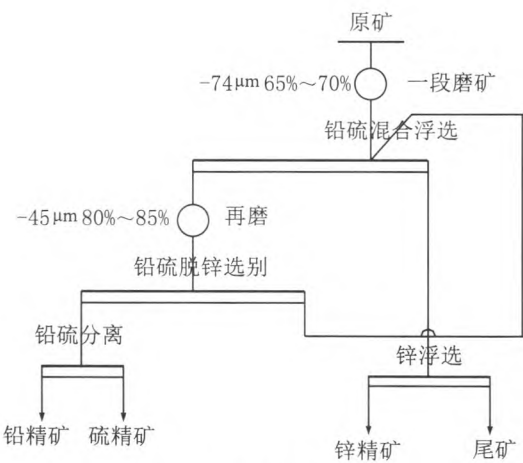


图 1 选矿原则工艺流程
Fig. 1 The principle flowsheet

表 4 选矿设计指标
Table 4 The design specifications

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Pb	Zn	S	Pb	Zn	S
铅精矿	6.18	58.04	3.90	22.78	85.00	1.85	4.50
锌精矿	21.57	0.49	55.01	32.63	2.50	91.00	22.50
硫精矿	47.27	0.58	1.65	45.0	6.50	5.98	68.00
尾矿	24.98	1.01	0.61	6.26	6.00	1.17	5.00
原矿	100.00	4.22	13.04	31.28	100.00	100.00	100.00

毛坪铅锌矿为井下开采的高硫铁破碎矿体，采出矿石粉矿较多，故设计中采用了强化筛分、多筛少破为原则的两段一闭路破碎流程。一段颚式破碎机选用平板带棒条筛（筛孔 600 mm×80 mm）的变频振动给料机，筛上产品给入颚式破碎机，筛下产品与颚式破碎机排矿合并给至圆振动筛（上层筛 40 mm×40 mm、下层筛 18 mm×12 mm）预先筛分，圆振动筛筛上产品给入二段圆锥破碎机，圆锥破碎机排矿再返回圆振动筛检查筛分，即构成了带预先筛分的粗碎及预先检查筛分的细碎节能工艺^[2]；筛下产品分别给入 2 个粉矿仓，再供给磨矿使用。为了更好地实现多碎少磨及改善碎矿产品粒度，一段颚式破碎机及二段圆锥破碎机分别采用了美卓矿机（坦佩雷）公司的 C80 颚式破碎机、GP11f 圆锥破碎机；给料机及振动筛分别为鞍山重型矿山机器有限公司的 GZT 0725 棒条振动给料机及 2YAHGF2148 圆振动筛，均为当时先进适用的高效破碎、筛分设备。

2.3 磨矿分级系统

矿石中目的矿物嵌布粒度粗细极不均匀，在细磨使目的矿物充分单体解离的过程中易造成过磨泥化，故采用两段磨矿选别代替老选厂的一段磨矿选别显然是一大进步。入选原矿一段磨矿放粗磨矿（-74 μm 65% ~ 70%），使大部分粗粒嵌布的闪锌矿得到了充分的单体解离，亦减少了性脆、易过粉碎的方铅矿过磨，并伴随着铅硫混合粗选抛弃大量的尾矿，提高了磨矿的处理能力、节约了磨矿能耗；铅硫混浮粗精矿再磨（-45 μm 80% ~ 85%），选择性地提高了连生体矿物的单体解离度，并暴露出矿物新鲜的表面，同时兼具清洁矿物表面脱药之效，有利于改善矿物的可浮性^[3]。一段磨矿作业选择 Φ3.2 m×4.0 m 的格子型球磨机与 Φ2.4 m 的沉没式双螺旋分级机组成闭路磨矿，混合粗精矿再磨作业选择 Φ2.7 m×3.6 m 的格子型球磨机与 6×Φ200 mm 水力旋流器机组组成闭路磨矿；设计采用的螺旋分级机，虽然占地面积大、分级效率低，但工作可靠、操作方便，

且兼顾了原老选厂工人已积累的操作经验；而一段磨矿及粗精矿再磨均采用格子型球磨机，相对溢流型球磨机具有及时强制排出合格产品的优势，可降低过粉碎。球磨机、螺旋分级机、水力旋流器机组分别为中国有色（沈阳）冶金机械有限公司、昆明茨坝矿山机械有限公司、昆明基元科技有限公司制造的技术先进且经生产实践证明成熟稳定的设备，对降低设备投资及保障后续维修维护非常有利。

2.4 浮选分离系统

相对于老选厂的铅硫混浮后直接进行铅硫分离，新选厂采用铅硫混浮粗精矿磨矿后进行脱锌选别是一重大改进。铅硫混浮粗精矿再磨，使部分细粒嵌布状态下的闪锌矿得到了有效的单体解离，经脱锌选别得到产率 6.55%、含锌 13.53% 的富锌中矿返回铅硫粗选作业，该中矿的合理返回使彼此相对独立的磨矿、选别作业构成了一个开路磨浮大循环，不断循序渐进地对富锌中矿进行磨矿浮选，直至闪锌矿连生体颗粒得到充分单体解离及经浮选脱除进入锌选别循环为止，有效降低了闪锌矿进入铅硫分离循环的铅精矿、硫精矿中，促进了锌金属选矿回收率的提高。浮选机选用了北京矿冶研究总院研制的 BF 系列浮选机，该系列浮选机具有自吸矿浆和空气的功能、能够水平和阶梯配置及自带液位自动控制等优点，避免了额外增加充气装置及泡沫泵，有效地节约浮选机布置占用的空间。给药亦采用了北京矿冶研究总院的研制的 BRFS-PLC 型浮选药剂自动化添加系统，其具有给药量准确、调整方便及可实时调整和显示瞬时加药量等的优点，对精确控制给药起到了非常好的作用。

2.5 浓缩过滤系统

由于阶段磨矿阶段选别工艺的采用，使得浮选精矿、尾矿粒度加粗及微细粒级减小，对降低过滤产品水分起到了很好的作用。新选厂的过滤工艺沿用了老选厂浓缩+过滤机的两段脱水流程，但相对于老选厂一直采用的圆盘式真空过滤机，在设计中选用了先进的陶瓷过滤机，其具有处理能力大、自动化程度高等优点，而且滤液较清澈有利于后续选矿废水处理循环利用。浓密机选用了淮北市中芬矿山机器有限责任公司制造的周边传统浓密机，陶瓷过滤机选用了安徽铜都特种环保设备股份有限公司的 TT 型陶瓷过滤机，均为国产成熟稳定的先进脱水设备。

2.6 废水回用系统

由于原老选厂无成熟的选矿废水处理回用零外

排的生产经验,故委托广东工业大学开展了选矿废水处理回用的试验研究工作,设计采用了试验推荐的“部分废水分质优先直接回用+剩余部分集中处理(pH 值调节-混凝沉淀-活性炭吸附)再回用”的方案。铅精矿浓缩、过滤回水直接返回用作铅硫分离选别循环泡沫溜槽冲洗用水,部分锌精矿浓缩、过滤回水直接返回用作锌选别循环泡沫溜槽冲洗用水,剩余部分锌精矿回水与硫精矿、尾矿的浓缩及过滤回水合并集中处理后用作全厂工艺补水。部分废水分质优先直接回用可降低选矿废水处理量,有利于节约选矿废水处理成本,pH 值调节-混凝沉淀-活性炭吸附的选矿废水处理工艺亦为成熟使用的选矿废水处理技术,在南京银茂铅锌矿^[4]、西藏甲玛铜多金属矿^[5]得到了成功应用。

3 生产实践

3.1 试生产情况

选矿厂投料试生产期间正处于矿山井下开采延伸及残采过渡时期,矿山出矿品位整体较低,且残采回收边角矿、挂帮矿等氧化率较高,使入选矿石变得复杂难选;但是一次试车即取得成功,并获得了合格的精矿产品,且在工艺的调整优化中选矿回收率呈现稳步提升的趋势,说明新选厂的工艺流程对毛坪铅锌矿矿石的适应性较好。而伴随着试生产工作的开展,选矿工艺流程中存在的问题也逐步暴露出来,并及时得到了有效解决。

(1) 粗磨条件下的闪锌矿回收效果不理想。入选原矿粗磨可解离出大量粒度较粗的闪锌矿单体及富连生体矿物颗粒,生产上继续采用丁基黄药进行捕收,因其捕收能力弱导致选别不太充分损失在尾矿中。通过药剂的筛选优化,最终选择捕收性能更加优异的 DF-341 进行了生产使用^[6]。

(2) 选矿废水分质优先直接回用效果不理想。在选矿废水的循环利用过程中,由于石灰高碱工艺的使用,铅精矿回水直接返回用作铅硫分离选别循环泡沫溜槽冲洗用水,导致铅精矿回水系统中水泵、管道等结垢严重,其清垢、疏堵困难,影响了工艺流程的通畅、稳定;部分锌精矿回水直接用作锌选别循环泡沫溜槽冲洗用水,由于回水中的矿泥、悬浮物、残留药剂等的干扰,造成浮选泡沫发黏、夹带加重,导致锌精矿品位不理想。经技术改造后,所有选矿废水均合并集中处理后再返回利用,最终解决了选矿废水回用对选矿工艺的不利影响。

3.2 生产攻关情况

选矿厂生产期间流程一直通畅、设备运行良好,直至进入 2011 年中期后,随着井下深部资源开采接替,矿山采出矿石品位迅速攀升,且超过设计入选原矿品位,选矿工艺流程出现了异常波动及指标的下滑,通过实施优化配矿技术措施、改善磨矿分级产品质量、优化药剂制度等,逐步扭转了选矿指标下滑的局势^[7]。在不改变主体工艺及更换关键设备的条件下,为进一步提高原矿品位升高后的选矿生产技术指标,又对选矿工艺进行了优化完善。主要的工艺改进如下:

(1) 优化了锌选别循环。通过工艺流程考查发现原矿品位增加后,只需通过锌粗选即可达到锌精矿含锌 > 50% 的目标要求,故将锌选别循环的一次粗选、一次精选、二次扫选改造为了一次粗选、四次扫选,在满足锌精矿品位要求的条件下,促进了锌矿物的早收快收实现了锌回收率的提高。

(2) 对浮选机及附属设施进行了局部改进优化。通过浮选机的分选效率考查及工业对比实验,更换了浮选机主轴皮带轮,使浮选机主轴转速提高了近 25%,提高了矿浆紊流扩散及气泡弥散效果,显著改善了气泡矿化。对浮选机刮板进行了重新制作,由单刮板刮矿改为双刮板刮矿,使上浮的矿化泡沫及时刮出。对浮选机吸浆管进行了更换,将 DN150 的管道更换为 DN200 的管道,使矿浆返回更加通畅。对浮选机的泡沫溜槽进行了重新制作,扩大了泡沫溜槽的容积,并使泡沫溜槽的坡比由 3.5% 提升至 4.5%,泡沫溜槽更换使用可调高压水冲洗消泡及排矿,显著改善了泡沫溜槽内矿浆的流动性,降低了泡沫溜槽的沉槽、跑槽等现象;与此同时,降低了浮选系统补加水量,提高了浮选矿浆浓度、延长了浮选时间,使选别更充分。

(3) 改进了石灰乳制备工艺。选矿厂原使用块状石灰消化制备为石灰乳,在石灰消化过程中产生大量的粉尘及排出大量的石灰渣,其中石灰渣的安全处置困难;采用粉末状石灰替换了块状石灰,粉末状石灰直接给入搅拌槽造浆、熟化后,通过渣浆泵泵入压力循环管输送供给浮选使用,其降低了石灰粉尘及避免了石灰渣的产生。

自选矿厂投料试生产以来,尤其是原矿品位增加后,选矿获得的回收率一直呈现稳步提升的趋势,可靠地验证了新选厂的工艺流程及设备配置对毛坪铅锌矿矿石的适应性较好。选矿厂历年生产入选原矿品位及精矿金属回收率指标见表 5。

表 5 历年生产入选原矿品位及精矿金属回收率指标
Table 5 The ore grade and metal recovery of mineral processing over the years

项目		2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
原矿品位/%	Pb	3.12	3.47	5.53	6.81	6.50	6.51	6.17
	Zn	9.98	11.04	12.64	16.57	16.86	16.53	16.49
回收率/%	Pb	84.77	86.14	86.79	87.31	87.85	88.25	88.39
	Zn	89.02	90.43	90.86	91.05	92.73	93.01	93.59

4 结 论

(1) 毛坪铅锌矿矿石矿物组成复杂，有用矿物嵌布粒度极不均匀、交代结构突出，且含有易泥化的粘土矿物，为复杂难选矿。设计工艺流程选择合理，设备选型正确，满足了矿石的选矿性质需要，是确保选矿厂顺利达标达产的基础；生产实践中持续不断的工艺流程优化及设备改造，是实现选矿指标持续提升的关键。

(2) 含石灰高碱度或高矿泥、悬浮物、残留药剂等的选矿废水，长周期直接分质循环利用将可能对浮选生产造成不利影响，宜经过适当处理后再利用，在选矿厂设计及生产实践中应引起高度重视。

(3) 浮选机的主轴转速及刮板刮矿频率对入选原矿品位变化较大的矿石具有较大的影响，在选矿厂的设计及生产实践中，应尽可能地采用带变频控制调速的主轴电动机和刮板电动机的浮选机，对优化控制改善浮选效果及节约浮选机电耗有较好的作用。

参考文献：

[1] 刘志伟. 昭通铅锌选矿厂的优化设计 [J]. 中国矿山工程, 2010, 39 9(6): 15-17.

[2] 《选矿设计手册》编委会. 选矿设计手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 67-74.

[3] 敖顺福, 崔茂金, 石增龙, 等. 毛坪铅锌矿矿产资源综合利用的模式构建及技术创新 [J]. 现代矿业, 2015 (11): 102-104.

[4] 缪建成, 王方汉, 胡继华. 南京铅锌银矿废水零排放的研究与实践 [J]. 金属矿山, 2003 (08): 56-58.

[5] 陈典助. 西藏甲玛铜多金属矿选矿厂设计与生产实践 [J]. 有色金属选矿部分, 2011 (02): 30-34.

[6] 敖顺福, 吴清平, 吴富祥, 等. 某公司铅锌矿选矿技术及设备现状浅析 [J]. 矿产综合利用, 2015 (5): 23-27.

[7] 敖顺福, 吉学文, 胡彬, 等. 某高硫铅锌矿生产指标提升实践 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2016 (01): 19-22.

Design and Industrial Practices of the Concentrating Mill at Maoping Lead-zinc Mine

Ao Shunfu, Liu Zhicheng, Gao Lianqi, Hui Shihe

(Chihong Technology & Engineering Co.,Ltd., Qujing, Yunnan, China)

Abstract: The lead-zinc ore from Maoping mine is featured by the complicated minerals composition, uneven distribution of the grain size, metasomatic texture and the large amount of easily sliming gangue minerals, which make it hard to beneficiate. Base on the results of process mineralogy and beneficiability research, this paper comprehensively introduced design principles of the flow sheet and the beneficiation equipment of this 2000 t/d lead-zinc concentrating mill, specially, the more crushing and less grinding, stage grinding-stage dressing, wastewater treatment and reuse technologies were fully introduced. To solve the technical problems from industrial practices, the flotation reagent scheme, the parameters of flotation machine and the preparation and delivery of lime milk were changed and optimized; wastewater treatment and reuse also were carried out. Those technical innovations make the mineral processing flowsheet more reasonable and efficient, and more suitable to the ore properties, and it has achieved better separate performance. It provides precious experience for the design and industrial practice of other concentration plants.

Keywords: Maoping lead-zinc mine; Flowsheet design; Equipment selection; Wastewater treatment and reuse; Industrial practices; Retrofit optimization; Flotation