

尼尔森选矿机在国内外选矿中的应用与研究进展^{*}

赵敏捷^{1,2}, 方建军^{1,2}, 李国栋^{1,2}, 张琳^{1,2}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093)

摘要:介绍了尼尔森选矿机的结构、分选原理、设备分类和优缺点,回顾了该设备在工业试验和工业生产应用中的概况,总结了该设备的研究进展情况,指出该设备正朝着大型化、多样化的方向发展,未来将更广泛地应用于我国的选矿行业。

关键词:尼尔森选矿机;重选;金矿

中图分类号:TD455⁺.5 文献标志码:A 文章编号:1001-0076(2016)04-0073-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2016.04.015

The Application and Research Progress of Knelson Concentrators in Mineral Beneficiation

ZHAO Minjie^{1,2}, FANG Jianjun^{1,2}, LI Guodong^{1,2}, ZHANG Lin^{1,2}

(1. Faculty of Land Resource Engineering of Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China)

Abstract: The structure, beneficiation principles, types, relative merits of Knelson Concentrator were introduced in details, and industrial tests, industrial applications and research progress were also reviewed in this paper. It was pointed out that this device would be developed towards large-scale and diversified directions, and be more widely used in mineral beneficiation in China.

Key words: knelson concentrator; gravity separation; gold mine

伴随着国内有色金属富矿和易开采矿的不断减少,部分矿山的矿石品位逐年下降,有的已降低至工业边界品位甚至更低,有些矿物嵌布粒度极细,普通的跳汰、摇床、溜槽等传统重选设备已无法满足生产要求^[1]。以尼尔森选矿机为代表的离心选矿设备,有效地降低了重选粒度的下限,促进了微细矿物的回收和尾矿的综合利用。尼尔森选矿机具有无污染、高效率、使用方便等优点,近年来已经广泛应用于金、钨、锡、铬等矿物的分选。本文重点介绍该设

备在金矿选矿中的应用和研究进展。

1 尼尔森选矿机

1.1 结构

尼尔森选矿机由加拿大 LeeMar 工业公司开发,是 Byron V. Knelson 以其姓氏命名的,于 1978 年开始投入商业化使用,属高效型离心选矿机^[2]。目前,世界上经营尼尔森选矿机研发、生产及技术供应

* 收稿日期:2015-12-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51364017)

作者简介:赵敏捷(1991-),男,陕西旬阳人,在读硕士研究生,主要从事浮选理论与工艺等方面的研究。

通讯作者:方建军(1968-),男,四川岳池人,副教授,主要从事资源综合利用及浮选理论与工艺等研究。

的主要是丹麦的 FL Smidth 公司。如图 1 所示,设备主体呈柱形,分选单元主要是一个由内锥和外锥构成的密封的离心锥^[3]。内锥称为富集锥,锥内侧有数圈沟槽,并按一定顺序设计流态化水孔。其余部分由给矿口、排矿口、供水及驱动、自动控制系统等构成。锥体由电机驱动,可产生 60~120 G 的强化重力场。矿浆由上部给矿槽给入获得动能,由锥体带动做高速离心运动^[4-6]。

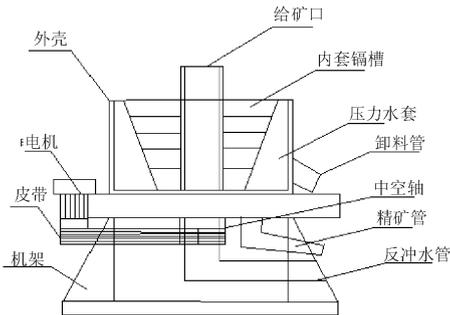


图 1 尼尔森选矿机结构图

1.2 分选原理

尼尔森选矿机分选矿物主要利用离心力场中的干涉沉降原理,是基于矿粒的离心力作用差异和反冲水的流态化松散作用^[7-9]。在重力场中,微细矿粒与粗颗粒、轻矿物与重矿物速度差小,分选过程不易进行,因此增加沉降速度差会促进微细矿粒的分选分离。矿物颗粒在与流体接触时呈现出与流体相类似的状态并在离心锥中运动,形成流态化的床层,在离心力场作用下,轻重矿粒间的比重差被成倍放大,有效地促进了矿物与脉石的分离,强化了分选过程^[10]。但离心力作用易导致分选层紧密堆积,阻碍分选的有效进行。为了解决这一问题,尼尔森选矿机在离心分选的时间向分选床层通入作用力与离心力方向相反的反冲水,经流态化水孔切向射入床层,利用这种流态化松散作用来保持轻重矿物床层分散^[6]。

1.3 设备分类

尼尔森选矿机主要分为间断排矿(BKC)和连续可变排矿(CVD)两种类型^[11]。CVD型主要用于回收产率高于0.5%的矿物,如钨矿、锡矿、钽铁矿、铬铁矿等比重较高的金属矿,还广泛应用于微细粒煤及非金属矿分选。BKC型主要用于金矿,包括岩金、砂金、有色金属伴生金以及重选设备流失的粗粒金的回收^[12],还用于铂族贵金属的回收。

经过几十年的发展,尼尔森选矿机已有了多种型号、多种规格、多种用途,其中间断排矿 CVD 型主要包括 CVD6、CVD20、CVD32、CVD42、CVD64 五种型号。连续可变排矿 BKC 型分为 KC-MD、KC-XD、KC-CD 和 KC-QS 四个系列。其中,MD 系列主要用于选矿试验中;XD 系列设计紧凑、坚固耐用,是为在比较严苛条件下处理坚硬矿石所设计;CD 低碳钢系列分手工型和全自动型,通常主要用于处理普通硬度矿石;QS 系列为较新型设备,在 XD 系列基础上做了很多改进,其自动化程度更高,操作更加灵活。BKC 型尼尔森选矿机的分类如表 1。

表 1 间断排矿型尼尔森选矿机分类

设备分类	型号	规格
KC-MD(人工排矿系列)	MD3、MD4.5、MD7.5	试验型
KC-XD(扩展系列)	XD20、XD30、XD40、XD48、XD70	G5、G6、G7
KC-CD(中心排矿系列)	CD10、CD12、CD20、CD30	G4、G5、G6、G7
KC-QS(量子系列)	QS30、QS40、QS48	G4、G5、G6、G7

1.4 优缺点

尼尔森选矿机综合运用了离心选矿机、跳汰和摇床等重选设备的分选原理,成功解决了传统离心选矿机广泛存在的床层紧密堆积问题,金的富集比由常规重选设备的 20~100 提高到 1 000~5 000^[13]。尼尔森选矿机具有下列优点:(1)采用重选原理分选,不添加化学药剂,对环境没有危害,适用范围广;(2)分选效果好,选矿比可达 10 000~30 000;(3)产品金精矿品位高,金回收率较跳汰、摇床、溜槽等重选设备高;(4)分选过程自动化,运行过程稳定,设备运转率高,检修方便^[14];(5)处理量大,生产效率高;(6)占地面积很小,耗电少,生产成本低,操作方便。其不足之处主要在于水消耗非常大,对于干旱缺水的地区不适用,对于部分微细粒矿的分选效果不明显,同时尼尔森选矿机的价格比较贵,对于操作和控制的要求比较高。

2 工业应用

2.1 国外应用

尼尔森选矿机已在全世界范围内得到了广泛使用,国外选矿厂中,尼尔森选矿机主要用于分选金矿或含金多金属矿,也用于分选其它贵金属和煤,已累计安装超过 3 700 多台。设备的大型化对于提高生

产效益具有重要的意义,国外很多厂选用更大型的尼尔森选矿机,取得了较好的效果。生产实践证明,

尼尔森选矿机具有高效率、低能耗、低污染等优势,表2列举了尼尔森选矿机的部分国外应用情况。

表2 部分国外金矿尼尔森选矿机应用情况^[15]

国家	矿山名称	规模	选矿厂工艺	尼尔森规格	台数	重选回收率
美国	Fort Knox 金矿	40 000 t/d	重选、炭浸	KC - XD70	1	20%
阿根廷	Alumbraera 铜金矿 ^[16]	8 ~ 8.5 万 t/d	重选、浮选	BKC		30% (金)
秘鲁	Tintaya 铜金矿 ^[17]	1.75 万 t/d	重选、浮选	KC - XD48	1	金回收率提高 5%
加拿大	Westmin 铜锌矿	3 500 t/d	重选、浮选	KC - CD30	2	金回收率提高 4%
加拿大	贝尔金矿 ^[18]		重选	KC - CDΦ76 cm	2	金回收率提高 16%
澳大利亚	Paddington 金矿	120 万 t/a	重选、炭浸	KC - CD30	2	32.8%
俄罗斯	Norilsk 镍矿 ^[19]	4 ~ 5 t/d	重选、浮选	KC - XD48		铂回收率提高 8% ~ 10%
俄罗斯	Zapadnoye 金矿	2 500 t/d	重选	KC - XD48	4	80%
俄罗斯	Badran 金矿	360 t/d	重选	BKC		86%
南非	President Steyn 金矿 ⁺	2 700 t/d	重选、炭浸	KC - CD20	3	51% ~ 53%
西班牙	Rio Narcea 金铜矿	1 500 t/d	重选、浮选、炭浸	CD30、CD12	1 + 1	25% (金)
马来西亚	Penjom 金矿	1 500 t/d	重选、炭浸	KC - XD48	1	金回收率提高 10%

尼尔森选矿机也可用于同时回收多种金属。加拿大的克拉哈贝勒铜镍选矿厂,矿石中含有铜、钴、铂、金和银多种金属,原来只单一回收浮选铜镍精矿。麦吉尔大学 Andre Robert Laplante 教授等^[20]对该矿物采用了两段尼尔森重选,球磨机排矿离心机二段分选精矿铂、钯、金的回收率分别达到了 84.70%、56.39% 和 80.50%。旋流器底流离心机二段精矿铂、钯、金的回收率分别为 76.52%、49.93% 和 77.79%。

工业生产中通常选用 BKC 型尼尔森选矿机处理贵金属矿,鲜有利用 CVD 型处理的先例。B. Klein^[21]在选用 CVD 尼尔森选矿机重选—混合浮选联合流程来考察 Eskay Creek 金矿时,选用 CVD 尼尔森选矿机回收浮选尾矿中的粗粒金,试验结果表明,CVD 尼尔森选矿机能够有效回收含金硫化矿、减少磨矿能耗,该试验证实了连续型 CVD 选矿机也可用于贵金属选矿中的可能。

尼尔森选矿机也适合于分选微细粒煤。Rick Honaker、Avimanyu Das 等^[22]通过试验发现煤颗粒在 150 ~ 25 μm 范围内,尼尔森选矿机可以实现更有效的分选。通过向进料管中加入气泡形成气泡—煤颗粒团聚以降低煤颗粒的密度,精煤产率提高了 10 ~ 20 个百分点,同时灰分降低了 2 个百分点。

2.2 国内应用

尼尔森选矿机在我国已经得到了广泛的应用,主要用于破碎磨矿段和浮选尾矿中回收贵金属,也有用于分选钨、锡等金属以及处理选煤厂微细粒煤

泥。尼尔森选矿机在我国的应用以中小型为主,大型的还比较少。使用尼尔森选矿机进行生产的选矿厂规模有从 100 t/d 到规模为 35 000 t/d^[23]不等,其中主要有以中国黄金、紫金集团、金川集团为代表的大型公司以及山东、内蒙古、新疆、陕西等全国多个省的选矿企业^[24]。

2.2.1 工业试验

国内大都采用 KC - MD3 型尼尔森选矿机进行重选试验。影响尼尔森选矿机分选效果的因素主要有给矿浓度、重力值和冲水量等。武俊杰等^[25]用尼尔森重选—尾矿浮选工艺考察了给矿浓度、重力值、冲水量与金精矿品位和回收率的关系。试验发现回收率和品位随着冲洗水增大先升高后降低;随着重力值增加,品位先升高后降低,回收率先升高后基本保持不变;随给矿浓度增加,品位先升高后降低,回收率逐渐升高。该试验为研究尼尔森选矿机的参数变化影响规律提供了参考。

内蒙古某金铜矿,金颗粒为宽粒级分布,主要以粒间金和包裹金分布于黄铁矿和石英等组成的矿石中,戴新宇等^[26]采用两段尼尔森重选方案进行了选别试验,回收率达到了 64.05%,取得了较好的效果。长春黄金研究院针对甘肃省早子沟金矿微细粒难选金矿石经过多方面的试验研究,采用尼尔森重选—浮选中矿再磨的重浮联合流程,金回收率达到了 86.03%,是尼尔森选矿机在难选金矿中的一次成功应用^[27]。

杜德望^[28]对某微细粒难选铜金矿,将矿石中的铜用浮选法回收,再将尾矿中的伴生金采用尼尔森选矿机分选。通过重浮联合工艺,将铜、金很好地综合回收,回收率分别达到78.73%和90.67%。柏亚林、李国栋等^[29]对某多金属矿进行了有无尼尔森全流程对比试验,结果表明,尼尔森方案回收率达到了28.19%,比无尼尔森选别总回收率高2.24%,尼尔森在工艺流程中具有显著作用。表3列举了国内部分选矿厂的尼尔森重选试验情况。

2.2.2 工业生产

河南金渠黄金矿业^[36]在2012年9月对选矿厂进行技术改造。原处理规模600 t/d,采用两段一闭路破碎、一段闭路磨矿后浮选的流程,尼尔森选矿机用于在一段闭路磨矿分级中回收颗粒金。改造后保留原磨矿流程,在原磨矿基础上增加一段分级,原KC-CD20尼尔森选矿机放置于二段磨矿后。改造后金回收率比原来增加了1%,处理量增加400 t/d,生产成本降低了12元/t,每年增加了200多万元的利润。辽宁二道沟黄金矿业公司^[37]原采用混汞+浮选的选矿工艺,由于考虑环境问题改为毛毡重选,

生产效率低下,金属流失严重。最终选用尼尔森选矿机回收粗粒金,金的回收率较毛毡重选提高了18~27个百分点,同时还极大方便了生产管理,更为环保。表4列举了部分金矿企业的尼尔森选矿机应用状况。

表3 部分国内企业尼尔森选矿机试验情况

矿山名称、规模	工艺流程	重选回收率
新疆哈图金矿(500 t/d) ^[30]	重选、浮选(半工业试验)	43.82%(重选)
金川集团二选厂(1 500 t/d)	重选、浮选(工业试验)	30%~40%(重选)
苏木那林桃勒盖氧化金矿(300 t/d) ^[31]	重选、全泥氰化	71.12%(重选)
福建上杭紫金山金矿	堆浸、重选、炭浆法	46.4%(重选)
广东信宜金矿	尼尔森重选、炭浸	34.85%(重选)
内蒙古铜金矿 ^[32]	重选、浮选、氰化	42.60%(重选)
陕西四方金矿 ^[33] (2 500 t/d)	重选、炭浆(仿尼尔森)	32.6%~44.2%(重选)
甘肃早子沟金矿	尼尔森重选、浮选、中矿再磨	86.03%(总流程)
云南个旧某含锡尾矿 ^[34]	重选、浮选	58.3%,优于摇床分选
河北某难选金矿 ^[35]	尼尔森重选、浮选	26.71%(重选)

表4 部分国内企业尼尔森选矿机应用情况^[18]

矿山名称	规模/(t·d ⁻¹)	选矿厂工艺	规格	台数	重选回收率
河南金源黄金矿业 ^[38]	3 000	重选、浮选	CD30、QS40	2+1	35%~40%
广东信宜东坑金矿	500	重选、炭浸	KC-CD20	1	30%~40%
珲春紫金矿业(金铜)	15 000	重选、浮选	XD40、XD30	4+1	21.43%
吉林省鑫源黄金矿业	800	重选、炭浸	KC-XD30	1	30%
辽宁红旗选矿厂	/	重选、浮选	KC-XD20	1	52.97%
金滩矿业公司 ^[39]	400	重选、浮选	KC-XD20	1组	28~30%
崇礼紫金矿业	3 000	重选、浮选、氰化	KC-XD40	1	15%
山西紫金矿业	1 500	重选、浮选	KC-CD20	2	20%~25%
珲春紫金曙光金铜矿	15 000	重选、浮选	KC-XD40	4	20%~25%
山东尹各庄金矿	2 000	重选、浮选	KC-XD20	1	15%~17%
新疆有色金铬矿业	800	重浮选、微生物/氰化	XD30、CD20	1+3	43%~48%
十堰金海通公司	2 000	重选(-2 mm砂金)	KC-XD40	1	85%

3 研究进展

计算机模拟和自动化新技术应用在尼尔森选矿机的设备研究中得到了较广泛应用。T. Coulter^[40]等以离心锥内颗粒为主要研究对象进行模拟研究,推测出粒子的运动行为主要取决于流体阻力、向心力和Bagnold力的动态平衡,它们是材料属性以及

一些关键的操作因素如流态化水流速和转速等的函数。该研究使得原已经制定的决定不同尺寸和适当密度的矿物回收率的标准得到了进一步完善,这种标准也决定着尼尔森选矿机内粒子间的运动竞争范围。

加拿大的Givemore Sakuhuni、Bern Klein^[41]通过整合人工神经网络模型和帕累托基因遗传算法发明

了一种称为 NNREGA 的程序,用于改进 CVD 尼尔森选矿机性能。样品选用多金属硫化矿金矿,通过利用该程序调整 CVD 尼尔森选矿机测试回收率和富集比的最大值,并以黄铁矿作为金矿回收率指标统计 17 个试点测试数据评估冶金性能,再进行模拟回归,得出反应变量和输出的关系生成一条曲线(回收率/富集比)。该程序为未来在该方向致力于建模和设备大型化提供了一个新的参考。

江西理工大学王纯等^[42]利用 SolidWorks 对尼尔森选矿机建立三维立体模型,对分选单元流场及颗粒的运动规律进行了系统化的研究,指出物料主要在锥体径向、轴向、切向三个自由度的径向实现分选,矿粒的运动形式主要为渗透和迁移。利用 Ansys 软件和 Pro/ENGINEER 软件对锥体建立有限元模型,对静力学和动力学特性进行了分析,分析结果证实了尼尔森选矿机在设计和成本上的合理性。同时用 Fluent 软件对矿浆的速度场和压力场进行流场模拟分析,得出影响选矿效果的主要影响因素有给矿口颗粒速度、离心锥转速和矿粒种类等。刘祚时^[43]也对尼尔森选矿机进行了有限元分析,发现设备的内锥比较容易变形,但结构满足生产要求。

由于尼尔森选矿机水资源消耗大,对尼尔森选矿机的应用带来了一定的制约。加拿大麦克吉尔大学的 Ozan Kokkılıc、Ray Langlois^[44]等在原尼尔森选矿机的基础上,设计了一种利用空气代替水的改进型尼尔森选矿机,该设备主要是将原尼尔森设备的反冲水入口改装成为流态化空气入口,在入口处加装一个空气调节器,利用空气压力反作用使矿物的床层分散,设计如图 2 所示。试验选用钨矿与石英混合来模拟金矿分选过程,进行了重选指标考察,得

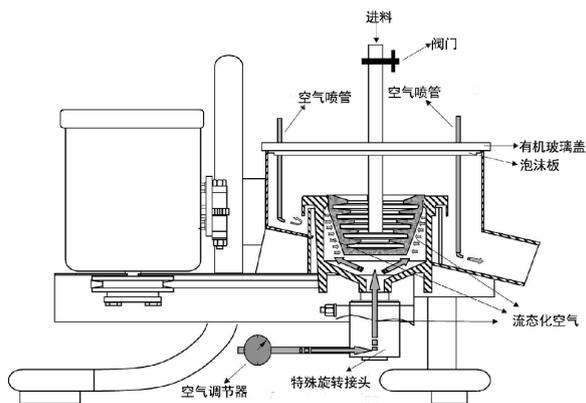


图2 改进型尼尔森选矿机装置^[44]

出该试验装置的最佳分选条件是重力倍数 40 G、空气进气压力 8 psi 和最佳入料量 200 g/min。通过利用空气作为分选介质代替水的研究,为该设备的节能降耗研究提供了新的方向。

4 结论

离心选矿机的应用,对于保障我国矿业快速发展和促进矿产资源的清洁高效利用具有重要的意义。当前离心选矿技术发展的主流是高效连续型和复合力场微细粒离心选矿机的开发和运用。尼尔森选矿机是选矿设备发展历程上的一个重要里程碑,其采用的离心力与流态化反冲水复合力场分选的技术,在贵金属选矿物中有着独特的优势。

预计未来尼尔森选矿机的研发将会在以下方向展开:(1)开展节能降耗研究,由于尼尔森选矿机耗水量大,应用范围受限制,开发能够替代水的新型环保设备也是非常好的研究方向;(2)设备大型化、精细化、专业化,未来将会有更多的大型化设备逐步应用在国内选矿厂中;(3)计算机技术和新材料的应用,结合新材料和计算机及自动化新技术,对尼尔森选矿机的性能和功能进行改进,将会为企业带来更多的效益。尼尔森选矿机有非常大的应用和开发潜力,必将会在我国金矿选矿业得到更为广泛的应用。

参考文献:

- [1] 胡岳华,王毓华,王化军. 矿物加工工程设计[M]. 长沙:中南大学出版社,2012:1-5.
- [2] 刘惠中. 重选设备在我国金属矿选矿中的应用进展及展望[J]. 有色金属:选矿部分,2011(B10):18-23.
- [3] 张金钟,姜良友,吴振祥,等. 尼尔森选矿机及其应用[J]. 中国矿山工程,2003,32(3):28-31.
- [4] 武俊杰. 陕西省某金矿尼尔森选金试验研究[J]. 贵金属,2013,34(3):28-31.
- [5] 罗仙平,闵世珍,繆建成,等. 离心选矿装备技术研究进展[J]. 矿山机械,2013,41(9):1-8.
- [6] 王纯,刘祚时,李凡. 尼尔森选矿机反冲水压对精矿回收率的影响分析[J]. 现代矿业,2013(7):128-129.
- [7] 李家毓. 云南文山某金矿选矿试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2009.
- [8] 胡春融,杨凤,杨廻春. 黄金选冶技术现状及发展趋势[J]. 黄金,2006,27(7):29-36.
- [9] 魏镜弢,杨波. 微细粒重选技术研究[J]. 昆明理工大学学报,2001,26(1):46-47.
- [10] 袁领群. 用重选方法回收微细粒金[J]. 矿产保护与利用,

- 1996(6):34-36.
- [11] 姜毅,蔡敏,郭建斌,等. 尼尔森选矿机及其对甘肃某金矿的试验研究[J]. 甘肃科技,2014,30(10):25-29.
- [12] 温海滨,贾瑞强. 金矿选别的新进展[J]. 国外金属矿选矿,2005,41(12):22-27.
- [13] 刘汉钊,石仑雷. 尼尔森选矿机及其在我国应用的前景[J]. 国外金属矿选矿,2008(7):8-11.
- [14] 惠学德,邹蔚蔚. 尼尔森选矿机的应用与发展[J]. 国外金属矿选矿,1994,31(3):46-50.
- [15] 朱飞,吴振祥,唐彦臣. 尼尔森选矿机的应用和发展[J]. 中国矿山工程,2010,39(4):40-43.
- [16] 克伦,李霞. 阿根廷阿伦布雷拉矿物公司选厂流程的设计[J]. 国外金属矿选矿,1999(5):23-26.
- [17] V·C·波姆比拉,崔洪山,李长根. 秘鲁 BHP Tintaya 选矿厂铜回路中的金重选回收[J]. 国外金属矿选矿,2003,40(5):24-27.
- [18] Patchejieff B, Gaidarjiev S, Lazarov D. Technical note opportunities for fine gold recovery from a copper flotation circuit using a knelson concentrator[J]. Minerals Engineering,1994,7:405-409.
- [19] 李长根. 俄罗斯斯诺里尔斯克镍矿冶公司北极圈分公司镍-铜-铂族金属矿山[J]. 矿产综合利用,2013(6):69-75.
- [20] 黄利明,鲁尔勒,默吉阿,等. 用尼尔森离心选矿机从克拉哈贝勒选厂磨矿回路中回收铂族金属和黄金[J]. 有色金属,2006,58(3):99-105.
- [21] Klein B, Altun N E, Ghaffari H, et al. A hybrid flotation-gravity circuit for improved metal recovery[J]. International Journal of Mineral Processing, 2010,94:159-165.
- [22] Rick Honaker, Avimanyu Das, Mutombo Nombe. Improving the separation efficiency of the Knelson concentrator using air injection[J]. Coal Preparation, 2005,25(2):99-116.
- [23] 杜浩荣. 湘西金矿沃溪选厂尾矿回收金钨选矿试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2013.
- [24] 黄利明. 尼尔森离心选矿机的工业应用[J]. 有色金属,1999,51(1):35-39.
- [25] 武俊杰,缙明亮,陈文科,等. 陕西某金矿尼尔森重选-浮选工艺研究[J]. 矿业研究与开发,2013(4):15.
- [26] 戴新宇,王昌良,董小骥,等. 尼尔森选矿机回收金铜矿中的金[J]. 有色金属:选矿部分,2011(B10):143-145.
- [27] 刘春先,陈耀宇,柳生祥,等. 早子沟金矿矿石质量特征,选矿试验研究及选别效果[J]. 甘肃地质,2012,21(2):57-62.
- [28] 杜德旺. 某难选铜金矿综合回收选矿试验研究[J]. 新疆有色金属,2013(6):43-45.
- [29] 柏亚林,李国栋,彭贵熊. 某含金多金属硫化矿尼尔森选金试验研究[J]. 金属矿山,2012,41(1):88-91.
- [30] 臧法德,邢洪波,刘新艳,等. 新疆哈图金矿金精矿细菌氧化-氰化提金试验研究[J]. 黄金,2009(5):37-39.
- [31] 赖伟强,林鸿汉,张波,等. 蒙古苏木那林桃勒盖氧化金矿石选冶试验研究[J]. 黄金科学技术,2013,21(5):154-156.
- [32] 赵开乐,王昌良,李成秀,等. 内蒙古铜金矿综合回收技术研究[J]. 矿产综合利用,2011(3):18-21.
- [33] 杨思军,徐宏斌,曹锋. 尼尔森选矿机在四方金矿重选工艺中的应用[J]. 现代矿业,2015(5):187-189.
- [34] 杨波,张良林,马娟,等. Knelson 离心选矿机回收锡尾矿中锡石的可行性分析[J]. 昆明冶金高等专科学校学报,2014,30(5):1-4.
- [35] 唐平宇,郭秀平,王素,等. 河北某难选金矿选矿试验研究[J]. 黄金,2014(6):62-66.
- [36] 董兵,胡献立. 金渠选矿厂扩能增效的技术改造及生产实践[J]. 黄金,2014(3):59-62.
- [37] 赵立智,胡树伟,李红欣. 尼尔森选矿机在重选工艺流程中的应用与探讨[J]. 有色矿冶,2013(2):25-27.
- [38] 刘伟,井维和,张永贵,等. 尼尔森选矿机在磨矿分级回路中的配置及应用[J]. 黄金,2015(8):023.
- [39] 石凤野,王彦慧. 尼尔森重选设备在金滩矿业公司的应用[J]. 黄金,2013(3):58-60.
- [40] Coulter T, Subasinghe G. A mechanistic approach to modeling Knelson Concentrators[J]. Minerals Engineering, 2005,18(1):9-17.
- [41] Sakuhuni G, Klein B, Altun N E. A hybrid evolutionary performance improvement procedure for optimisation of continuous variable discharge concentrators[J]. Separation & Purification Technology,2015,145:130-138.
- [42] 王纯. 立式离心选矿机流场和离心锥动力学研究[D]. 赣州:江西理工大学,2014.
- [43] 刘祚时. 尼尔森选矿机离心锥的有限元分析研究[J]. 中国钨业,2015(1):75-80.
- [44] Kökkiliç O, Langlois R, Waters K E. A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator[J]. Minerals Engineering, 2015,72:73-86.