

半自磨流程的发展及应用

马帅^{1,2}, 肖庆飞^{1,2,3*}, 赵福刚³, 张谦^{1,2}

1. 省部共建国家复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验, 云南 昆明 650093;
2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
3. 中钢集团马鞍山研究院有限公司, 安徽 马鞍山 243000

中图分类号: TD921⁺.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)04-0167-05
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.04.020

摘要 从20世纪70年代至今半自磨流程呈多样化,从最初单段半自磨流程发展到半自磨+球磨(SAB)流程再到半自磨+球磨+顽石破碎(SABC)流程。半自磨流程比传统的碎磨流程能耗低、占地面积小和流程简单等优点,并使半自磨机效率提高,增加半自磨机的处理量。本文通过总结近年来半自磨技术在国内外应用,对今后的半自磨工艺发展方向提出了几点建议。
关键词 半自磨机;半自磨流程;磨矿工艺

前言

20世纪30年代,由于工业需求美国制造了世界上第一台湿式自磨机,发展到20世纪50年代选矿厂开始使用自磨机来进行磨矿作业,20世纪60年代开始国外的选矿厂发现使用自磨机处理量无法达标,选矿厂就在自磨机中添加一定量的钢球形成了半自磨^[1]。自磨机是将矿块达150~250 mm的矿石直接放入自磨机中,当磨机运转时物料相互碰撞、研磨达到矿石粉碎。半自磨机的工作原理在自磨机工作原理中加入少量钢球介质在筒体内增加相互连续的冲击、滚落磨削作用从而使物料加速粉碎,进而达到节能的效果^[2-4]。半自磨流程相对于传统磨矿流程较短,筒体比传统的磨机要短,磨到合格粒级的矿石不会在磨机里长时间的滞留,及时排出防止了过磨和能源的浪费。

半自磨工艺与传统的磨矿工艺相比优点有:(1)半自磨机处理能力大;(2)半自磨机单位矿石生产成本低;(3)半自磨流程比较短,便于管理所以需要的人力成本低;(4)半自磨操作简单;(5)半自磨工艺可以有效减少磨矿介质对矿物表面电化学性质的影响。为了解决实际生产带来的问题半自磨流程的发展呈多样化,目前,最常见的有单段半自磨流程、半自磨+球磨

(SAB)、半自磨+球磨+顽石破碎(SABC)^[5]。本文通过总结近年来传统半自磨流程在国内外应用,对今后的半自磨工艺发展方向提出了几点建议。

1 单段半自磨流程

单段半自磨流程是半自磨机与分级设备(振动筛或者水力旋流器)直接构成闭合回路^[6]。单段半自磨流程中给矿的力学性质变化会使得半自磨机运行不稳定,当矿石力学性质中的韧性和硬度变大,对于高韧性矿石可磨度越小越需要强化破碎磨剥和足够的冲击力。当冲击破碎效果越差使得磨机的处理能力下降,半自磨机顽石破碎的速率降低最终导致半自磨机胀肚,所以单段半自磨流程在运行一段时间就要停止给料。使用单段半自磨流程时一定要考虑矿石性质的变化,及时掌握原矿矿石力学性质做到合理配矿才能使流程更加稳定。单段半自磨流程不能高效的处理顽石(顽石不能被钢球介质和矿石自身磨碎,直径通常在2~100 mm之间),通常认为单段半自磨流程仅适用于易磨较软矿石的矿山^[7]。单段半自磨除去矿石力学性质的客观缺点,最主要的缺点为顽石破碎速率和磨矿产品质量两个方面,是单段半自磨流程改进的方向。

亨德森钼矿是北美最大的钼选厂,选矿厂破碎工

收稿日期:2020-03-25
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51774157);矿冶过程自动控制技术国家重点实验室(北京市)开放基金(201905);安徽省重点研发计划(201904a07020044)
作者简介:马帅(1996-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为碎磨理论与工艺,mashuai0929@163.com。
通信作者:肖庆飞(1980-),男,博士,教授,主要研究方向为碎磨理论与工艺,13515877@qq.com。

艺采用一段开路破碎使用 1 370 mm × 2 130 mm 旋回破碎机一台,排矿粒度为 230 mm 进入四台Φ8.5 mm × 4.3 m 半自磨机,每台磨机配俩部功率为 2 625 kW 的电机,与八台 Φ660 mm 的旋流器组成闭路,分级溢流浓度为 50 ~ 55%, -0.15 mm 细度为 65%^[8]。

Yanacocha 金矿 2008 年开始生产,采用的是单段半自磨流程,磨机的给矿粒度小于 150 mm,该流程为水力旋器分级直接返单段闭路磨矿。半自磨机型号为 Φ9.75 m × 9.75 m 的方形磨机,功率为 16.5 MW。磨机排矿圆筒筛筛孔为 12.7 mm × 31.8 mm 和十台为 Φ650 mm 旋流器。投产几个月后,由于选厂过于追求半自磨机的处理量,就只能增大磨矿产品粒度,最终磨矿产品粒度^[9]。现厂半自磨流程见图 1 所示。

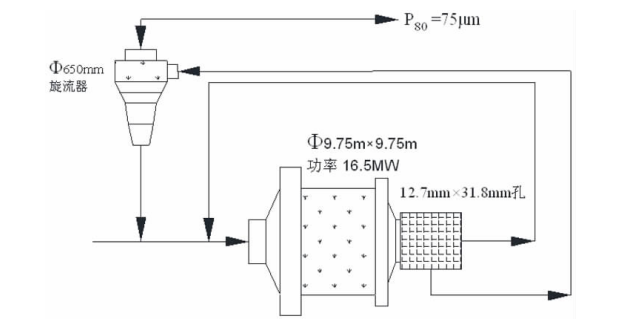


图 1 Yanacocha 金矿磨矿流程
Fig. 1 Yanacocha gold mine grinding flow chart

表 1 单段半自磨国外应用

Table 1 Foreign application of single - stage semi - automatic grinding

国家	名称	处理量	半自磨机规格
加纳共和国	Tarkwa 金矿	420 万 t/a	Φ8.2 m × 12.8 m
菲律宾	Lepanto 铜金矿	2 000 t/d	Φ5.03 m × 6.1 m
澳大利亚	Lefroy 金矿	480 万 t/a	Φ10.72 m × 5.48 m
美国	亨德森铝矿	/	Φ8.53 m × 4.62 m
秘鲁	Yanacocha 金矿	500 万 t/a	Φ9.75 m × 9.75 m
澳大利亚	Olympic Dam 铜钼矿	20 000 t/d	Φ11.60 m × 7.78 m
澳大利亚	leinster 镍矿	/	/
爱尔兰	Tara 锌矿	/	/

20 世纪八九十年代,国内矿产行业不发达。先进的半自磨工艺在国内基本没有应用,国内的半自磨技术和设备严重落后于国外^[10-11],所以国内应用案例特别少且没有代表性,主要列举了国外应用实例,国内外详细实例见表 1。半自磨机给矿不稳定影响半自磨机产品质量和粒度的波动,会对浮选工序承受产品粒度造成影响。当半自磨机中发生胀肚,可以提高半自磨机转速来加快矿石的碎磨速度,就要减少处理量。解决胀肚问题,可以把单段半自磨流程设计为开

路流程,增加顽石破碎环节稳定半自磨机的运转。单段半自磨流程非常简单方便管理,但在单一设备中完成碎磨流程被认为时浪费能耗,且该流程细磨能力较弱,需要准确掌握矿石性质,选择合适的工艺参数才能有效发挥单段半自磨流程的优势。

2 半自磨 + 球磨流程(SAB)

随着原矿的开采很多选矿厂的矿石性质发生很大的变化,原矿品位变低杂质变多,所以需要磨矿产品细度更细。因为单段半自磨流程细磨效果不好的局限性,所以不能适合所有的选矿厂使用。科研人员就提出了半自磨 + 球磨流程(SAB)流程,SAB 流程和单段半自磨流程的区别在于半自磨机产品进入分级设备(一般为振动筛)筛上顽石返回半自磨机进行再磨;筛下进入水力旋流器进行高效分级,溢流进入浮选作业,沉砂进入球磨机进行再磨处理,这样就解决单段半自磨流程不能细磨的问题。SAB 半自磨流程可以有效地解决了细磨的问题,优化了半自磨产品质量,使更多的可选粒级进入浮选作业。同时提高了半自磨机的处理量,相对于单段半自磨流程更加的节能。除去矿石力学性质变化的客观因素,SAB 流程最大的缺点是顽石破碎速率的影响,也是 SAB 流程优化的方向。

美国犹他州科帕顿(Copperton)铜选矿厂使用 SAB 半自磨流程,使用了一台 Φ10.97 m × 5.18 m 和三台 Φ10.36 m × 4.57 m 共四台半自磨机,半自磨机排矿端设有 16 mm 的振动筛,筛下产物进入 Φ508 mm 旋流器分级,旋流器返砂进入三台 Φ5.48 m × 8.53 m 球磨机和一台 Φ6.09 m × 9.14 m 球磨机进行再磨处理^[12]。

2004 年安徽铜陵冬瓜山铜矿采用 SAB 半自磨流程,使用了一台 Φ8.53 m × 3.96 m 半自磨机,电机功率 4 850 kW。半自磨机排矿进入圆筒筛,筛下进入 Φ660 mm 旋流器分级,旋流器沉砂进入两台 Φ5.03 m × 8.23 m 溢流型球磨机进行再磨,电机功率为 3 300 kW^[13-14]。现厂半自磨流程见图 2 所示。

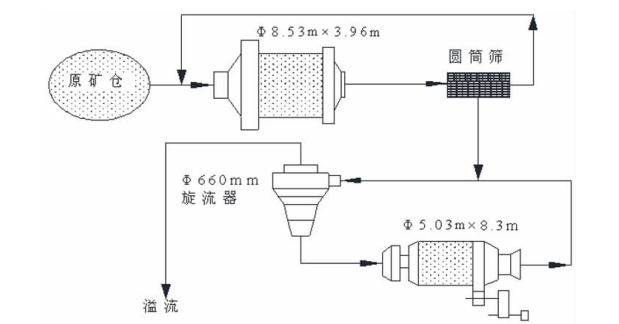


图 2 铜陵冬瓜山铜矿 SAB 磨矿流程图
Fig. 2 SAB grinding flow chart of Tongling Dongguashan Copper Mine

表 2 半自磨 + 球磨 (SAB) 流程国内外应用

Table 2 Semi - automatic grinding + ball milling (SAB) process domestic and foreign applications

国家	名称	处理量	半自磨机规格	球磨机规格
美国	皮马四期铜矿	15 000 t/d	Φ 8.53 m×3.65 m	Φ 5.02 m×5.79 m
加拿大	洛耐克斯	34 500 t/d	Φ 9.75 m×4.72 m	Φ 5.02 m×7.01 m
中国	贵州锦丰金矿	4 000 t/d	Φ 5.2 m×5.79 m	Φ 5.02 m×6.7 m
中国	铜陵冬瓜山铜矿	13 000 t/d	Φ 8.53 m×3.96 m	Φ 5.03 m×8.32 m
中国	贵冶渣选厂	2 000 t/d	Φ 5.2 m×5.2 m	Φ 5.03 m×8.3 m
中国	大红山铁矿	400 万 t/a	Φ 8.8 m×4.8 m	Φ 6.0 m×9.5 m
中国	东升庙铜铅锌矿	5 000 t/d	Φ 11 m×5.4 m	Φ 7.9 m×13.6 m
中国	华刚刚果 (金) 铜矿	15 000 t/d	Φ 10.97 m×6.1 m	Φ 7.6 m×12.3 m
中国	太钢袁家村铁矿	2 200 万 t/a	Φ 10.97 m×6.25 m	Φ 7.92 m×15.24 m

国内外半自磨 + 球磨 (SAB) 流程使用实例见表 2, 半自磨 SAB 流程是在单段半自磨流程的基础上进行了改造,使其适用性更加广泛,也同时具有单段半自磨流程的优点比如流程简单、易于操作并且解决了单段半自磨流程细磨不足的问题,但是同时也受到原矿矿石性质的影响和半自磨机内顽石破碎问题。顽石没法破碎在半自磨机中越来越多或者顽石破碎的速度降低,就会使得半自磨机处理量下降影响选矿厂的生产。所以使用半自磨 SAB 流程的选矿厂矿石性质应该为中等或较软矿石,才会使得顽石无法破碎的影响降低。

3 半自磨 + 球磨 + 顽石破碎流程 (SABC)

半自磨 SABC 流程是在半自磨 SAB 流程的基础上发展来的,比半自磨 SAB 流程多了顽石破碎环节,半自磨机中难以破碎的顽石排出进入顽石破碎环节,一般使用圆锥破碎机破碎产品再返回半自磨进行再磨^[15-16]。由于使用破碎机单独破碎顽石使半自磨机中的顽石破碎速率提高,减少了顽石在半自磨机中的积累速度,使流程适应性大大提高,系统可调节空间更大,自动化智能化发展更好,SABC 流程比 SAB 流程处理量增加。

特恩尼特 (Teniente) 铜矿处理量为 130 000 t/d,采用半自磨 + 球磨 + 顽石破碎 (SABC) 流程:1#系列用了一台 Φ10.97 m×4.57 m 半自磨机,电机功率为 11 200

kW,介质充填率为 10%,磨矿介质尺寸 127 mm。2 台 Φ5.49 m×8.53 m 球磨机,电机功率 4 400 kW,介质充填率为 37%。顽石破碎机为 7 英尺短头型圆锥,电机功率为 260 kW^[17]。2#系列了一台 Φ11.58 m×6.1 m 半自磨机,电机功率为 19 388 kW,介质充填率为 10%~12%,磨矿介质尺寸 127 mm。2 台 Φ7.32 m×10.97 m 球磨机,电机功率 11 931 kW,介质充填率为 37%。顽石破碎机为 MP800,电机功率为 597 kW。

江铜德兴铜矿大山选矿厂使用 SABC 半自磨流程非常成功,使用了一台 Φ10.37 m×5.19 m 半自磨机,采用双同步电机功率为 2×5 586 kW。使用了一台 Φ7.32 m×10.68 m 溢流型球磨机,同样采用双同步电机功率为 2×5 586 kW。半自磨机排矿进入两台 3 600 mm×7 500 mm 直线振动筛 (一台备用) 进行筛分,筛下产物进入两组 Φ838-6 旋流器;筛上顽石进入一台 MP800 型圆锥破碎机,顽石经破碎后返回半自磨机^[18-19]。现厂半自磨流程见图 3。

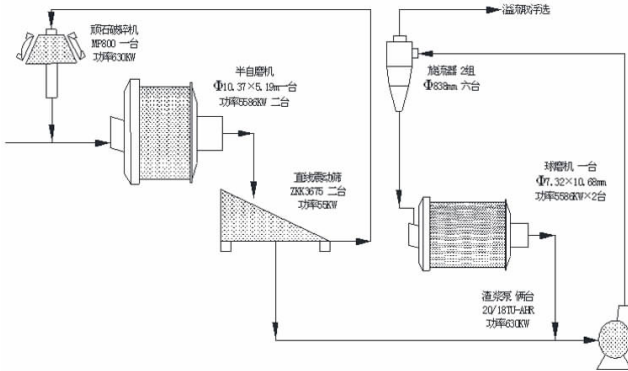


图 3 江铜德兴铜矿 SABC 磨矿流程图
Fig. 3 Flow chart of SABC grinding of Jiangtong Dexing Copper Mine

国内外半自磨 + 球磨 + 顽石破碎 (SABC) 流程使用实例见表 3, SABC 流程的优点就在于单独处理顽石,减少了在半自磨机中顽石的积累确保不会发生磨机胀肚现象。顽石的产生与原矿性质、排矿格子上开孔尺寸、开孔率等有关,而在实际生产中顽石产率波动较大^[20-21]。所以运用 SABC 半自磨流程时要考虑好现厂实际顽石产生的因素,确定合理的方案、配套的设备和设备的参数可以有效地解决顽石难破碎的问题。SABC 半自磨流程有单段半自磨和 SAB 半自磨流程的优点并有效解决了顽石破碎的问题,是目前半自磨流程中最常用的,所以在选择半自磨流程时优先考虑 SABC 半自磨流程。

表 3 半自磨 + 球磨 + 破碎流程 (SABC) 的国内外应用

Table 3 Domestic and foreign applications of semi – automatic grinding + ball milling + crushing process (SABC)

国家	名称	处理量	半自磨机规格	球磨机规格	破碎机规格
美国	雷伊铜选厂	27 000 t/d	Φ10.36 m×5.18 m	Φ5.48 m×9.44 m	MP1000
印尼	福列博特铜选厂	55 000 t/d	Φ10.36 m×5.18 m	Φ6.09 m×9.29 m	HP800
中国	内蒙乌奴克吐山铜钼矿	40 000 t/d	Φ11 m×5.4 m	Φ7.9 m×13.6 m	HP800
中国	云南普朗铜矿	40 000 t/d	Φ9.75 m×4.27 m	Φ6.71 m×11.58 m	HP800
中国	西藏雄村铜矿	40 000 t/d	Φ10.97 m×6.71 m	Φ7.32 m×9.75 m	MP800
中国	德兴铜矿大山选矿厂	22 500 t/d	Φ10.37 m×5.19 m	Φ7.32 m×10.68 m	MP800
中国	金堆城汝阳钼矿	22 000 t/d	Φ10.37 m×5.19 m	Φ7.32 m×12 m	MP800
中国	鹿鸣钼矿	50 000 t/d	Φ10.97 m×7.16 m	Φ7.32 m×11.28 m	CH870M
中国	巴图·希甲铜矿选厂	120 000 t/d	Φ10.98 m×5.8 m	Φ6.1 m×10.2 m	MP1000
巴西	索谢果铜选厂	41 000 t/d	Φ11.59 m×7 m	Φ6.7 m×9.76 m	MP800

4 结论

半自磨不仅优点多而且工艺越来越成熟,但是在如何稳定半自磨给矿、半自磨流程的智能化控制、半自磨工艺的理论基础这三个方面还非常欠缺是未来半自磨工艺研究和发展方向。所以从这三方面给出发展建议:

(1)半自磨流程中最大的影响因素就是矿石本身的性质,矿石因不同的矿段、矿坑、开采深度会有很大的力学性质差异,矿石力学性质的不同使得半自磨机的给矿不稳定以至于半自磨机效率很不稳定。即使用半自磨流程就要及时检测不同采矿场原矿的性质变化,然后进行合理配矿使半自磨机的给矿稳定。

(2)随着科技的发展,在实际生产中半自磨机的规格越来越大,使用人工管理控制已经无法完全控制。所以要逐步向自动化智能化发展,完善现有的半自磨自动控制系统,研发更高智能的系统对现厂磨矿系统的运行参数进统计和检测,提供实时数据让选矿厂的工作人员更好的了解生产情况、制定计划、实施和做正确决策,提高生产效率、产品质量和整个碎磨流程的效率。对实时数据进行统计计算分析半自磨机运行是否正常,并设立合理的报警机制。

(3)现如今半自磨应用越来越广泛,但是半自磨的基础理论非常欠缺,无法准确选择半自磨机设备型号和半自磨机介质装补制度。在选择这上述问题单纯靠经验来确定,就难免会造成很多误差。所以需要 对半自磨机的选型和半自磨机装补球制度等问题确定一套完整的系统的基础的理论来支持实际生产,帮助选矿厂确定半自磨机尺寸、半自磨流程、半自磨机介质装补制度。

随着科技和经济高速的发展,能源日益短缺问题是当今人们首先考虑,所以节能降耗、提高资源的利用

能力是目前工业发展的头等大事。半自磨大型磨机的优势在于能够减少选矿厂的建筑面积和磨机操作维修费用,可以简化磨矿流程和提高磨矿流程自动化,较传统碎磨流程达到节能降耗。目前半自磨工艺在国内外得到广泛的运用,半自磨设备工艺技术也有极大的进步和发展,尤其是在设备大型化、驱动及传动方式改进、磨矿流程改进、磨矿自动控制等方面进步明显,是大型新建金属矿山和矿山改建碎磨流程的优先考虑的碎磨流程。

参考文献:

[1] 薛天利. 锡石多金属硫化矿选择性磨矿行为研究[D]. 广西:广西大学, 2015:1 – 50.

[2] 杨采文,毛莹博,邓久帅,等. 矿山磨矿设备的应用及研究进展[J]. 现代矿业,2015(7):190 – 192,195.

[3] KANDA Y, GUNJI H, TAKEUCHI H, et al. Rate constants of wet and dry ball mill grindings[J]. Zairyo/Journal of the Society of Materials Science,1978(8): 663 – 666.

[4] JONES S M J. Autogenous and semiautogenous mills 2005 update[J]. Proceedings of International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, 2006(1): 398 – 425.

[5] 邓继业. 大型半自磨机回转体结构及强度研究[D]. 长春:吉林大学, 2012:1 – 25.

[6] 杨琳琳,文书明. 自磨机和半自磨机的发展和应用[J]. 国外金属矿选矿, 2005(7):13 – 16.

[7] 尤滕胜,谢昆. 单段半自磨工艺及应用[J]. 中国矿山工程,2015(5): 58 – 61,68.

[8] 邵空喻. 自磨/半自磨技术发展的历程和体会[J]. 现代矿业,2009(9):38 – 41.

[9] 黄国智,方启学,任翔,等. 全自磨半自磨磨矿技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2018:289 – 290.

[10] 张国斌. 半自磨工艺在国内的应用和发展[J]. 山东工业技术,2018(18):49.

[11] Marilyn Scales. Economics of scale [J]. Canadiam Minjng Joural,1989(6): 87.

[12] 甘经超. 美国科珀顿铜选厂及其铜钼分离工艺[J]. 国外金属矿选矿,2001(4):44 – 45,43.

[13] 汪太平,肖庆飞,李博. 冬瓜山铜矿一段磨矿产品粒度组成优化研究[J]. 矿产保护与利用,2014(4):22-26.

[14] 邓禾森,肖庆飞,李博. 铸铁段作为磨矿介质在冬瓜山铜矿的试验研究[J]. 矿冶,2014(4):5-8.

[15] 唐友华. 基于 EDEM 的半自磨机颗粒的碰撞分析[D]. 云南:昆明理工大学,2016:1-30.

[16] ROWE W B. Grinding process control [J]. Principles of Modern Grinding Technology: Second Edition, 2014, 21(6): 221-240.

[17] 贾仰武,王漪靖,税新峰. 半自磨工艺及环形电机在南美矿山的应用——赴智利技术考察纪实[J]. 矿业工程,2018(1):54-59.

[18] 王肖江. 基于离散元法的武山铜矿半自磨介质优化研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2012:1-40.

[19] 洪建华. 2.25 万 t/d SABC 工艺在德兴铜矿的应用[J]. 有色金属(选矿部分),2011(S1):124-126.

[20] GODWIN L K M. Crushing practice impact on SAG milling;addition of secondary crushing circuit at GEITA gold mine [C] // Vancouver: SAG 2006: 356-371.

[21] 井维和,刘伟,洪保磊等. 乌山铜钼矿一期碎磨流程设计及生产实践[J]. 黄金,2015(3):63-66.

Development and Application of Conventional Semi – self – grinding Process

MA Shuai^{1,2}, XIAO Qingfei^{1,2,3*}, ZHAO Fugang³, ZHANG Qian^{1,2}

1. Provincial and Ministry Joint Construction of National Key Experiments on Clean Utilization of Complex Nonferrous Metal Resources, Kunming 650093, Yunnan, China;
2. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;
3. Maanshan Research Institute Co., Ltd., China Steel Group, Maanshan 243000, Anhui, China

Abstract: Since the 1970s, the semi – automatic grinding process has been diversified, from the initial single – stage semi – automatic grinding process to the semi – automatic grinding + ball milling (SAB) process and then to the semi – automatic grinding + ball milling + stone crushing (SABC) process. Compared with the traditional crushing and grinding process, the semi – automatic grinding process has the advantages of low energy consumption, small footprint and simple process, and it improves the efficiency of the semi – automatic mill and increases the processing capacity of the semi – automatic mill. This article summarizes the application of semi – automatic grinding technology at home and abroad in recent years, and puts forward several suggestions for the future development of semi – automatic grinding technology.

Key words: semi – automatic grinding, machine; semi – self grinding process; grinding process

引用格式:马帅,肖庆飞,赵福刚,张谦. 半自磨流程的发展及应用[J]. 矿产保护与利用,2020,40(4):167-171.

Ma S, Xiao QF, Zhao FG and Zhang Q. Development and application of conventional semi – self – grinding process[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(4): 167-171.