

综合技术

半自磨系统顽石性质及其对系统产能的影响研究

Study on Properties of Pebble in Semi-autogenous Mill System
and its Effect on System Productivity

尤腾胜, 李兆峰, 何荣权(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:顽石是影响半自磨机处理能力的关键因素之一。为打通云南某多金属选矿厂影响产能提升的瓶颈, 本文对半自磨机产出的顽石进行了针对性研究, 依次开展了顽石性质研究、顽石开路-闭路工艺流程工业试验研究及 JKSimMet 软件流程模拟研究, 分析了顽石在开路不返回、直接闭路返回和破碎闭路返回三种不同处理方式下对系统产能的影响。研究表明顽石在直接闭路返回条件下半自磨系统处理能力可达到 400 t/h, 顽石破碎闭路返回条件下半自磨系统处理能力预计可达到 425 t/h, 研究结果为选矿厂产能提升规模及技术改造方案提供了科学依据。

关键词:SAB 流程; 顽石; 流程模拟; 产能提升

中图分类号: TD952 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)01-0072-06

Abstract: Pebble is one of the key factors affecting the processing capacity of SAG mill. In order to break through the bottleneck of a multi-metal concentrator in Yunnan Province, this paper carried out a targeted study on the SAG mill pebble, carried out the property study of pebble, the open-closed circuit test study of pebble and the simulation analysis study of JKSimMet software, and analyzed the influence of different treatment methods on the system productivity of pebble. The research shows that the processing capacity of the SAG system can reach 400 t/h under the condition of direct closed return of pebble, and the processing capacity of the SAG system is expected to reach 425 t/h under the condition of closed return of pebble crushing, It provides scientific basis for the capacity upgrading scale and technical transformation scheme of concentrator.

Key words: SAB mill circuit; Pebble; Process simulation; Capacity increase

1 前言

半自磨工艺是非常简单而又有效的磨矿工艺^[1]。和常规碎磨工艺相比, 其工艺流程短, 环节少, 配置方便, 易于生产管理, 且以矿石本身作为磨矿介质, 大幅降低了钢材消耗, 尤其对于水分大、黏性大、含泥量高的矿石, 而且衬板的消耗量相对较低; 采用半自磨工艺, 可以使碎磨流程大大简化, 省去两段破碎和干式筛分作业, 减少多个物料转运过程, 节省占地面积、降低单位矿石投资及处理成本。

半自磨+球磨(SAB)流程是矿石经过半自磨机磨矿后进入筛分设备, 筛下产品经过球磨回路进行磨矿分级, 筛上产品通过带式输送机直接返回至半自磨机。该流程处理的矿石性质中等或偏软, 对矿石性质变化的适应性, 特别是对矿石硬度变化的适应性较强, 且更容易实现有效控制, 在很多大中型金属矿山获得了广泛应用; 我国采用该碎磨流程的金属矿山有: 铜陵冬瓜山铜矿、都龙锌锡矿、昆钢大红山铁矿、太钢袁家村铁矿等。

半自磨机在磨矿过程中主要是通过大块矿石和钢球介质的抛落作用对矿石进行破碎, 该过程中磨削作用较弱, 冲击破碎必然会产生一些主要集中于 20~80 mm 之间粒级的矿石, 这些矿石形状类似于鹅卵石, 呈椭圆形, 表面光滑, 在磨机筒体内不易被砸碎; 同时其粒径范围不具备作为半

[作者简介] 尤腾胜(1982—), 男, 高级工程师, 从事选矿工程咨询设计及项目管理工作。

[引用格式] 尤腾胜, 李兆峰, 何荣权. 半自磨系统顽石性质及其对系统产能的影响研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(1): 72-77.

自磨机磨矿介质的作用,需要相应尺寸的磨矿介质冲击才能使其破碎,因此该粒级矿石在筒体内研磨和磨削效率低,破碎速率低,从而在半自磨机内大量的聚集成为半自磨机“难磨粒子”,即所谓的顽石^[2-3]。

顽石不具备磨矿介质的作用,其在半自磨机筒体内的不断积累占用了磨机的有效容积,造成磨机生产率降低能耗上升,是影响半自磨机处理能力的关键因素之一。

云南某多金属选矿厂采用 SAB 碎磨流程,半自磨机产生的顽石通过皮带输送机直接返回半自磨机,经过多年的生产实践和流程考察发现,半自磨-球磨系统是影响选矿厂产能提升的瓶颈,严重制约了选矿厂整体能力的发挥。在此情况下,本文对顽石性质及顽石处理工艺进行了针对性研究工作,通过开展顽石性质研究、顽石开路-闭路试验研究以及 JKSimMet 软件流程模拟分析研究,为半自磨系统

产能提升规模及技术改造方案提供参考依据,助力选矿厂实现全系统的产能提升。

2 碎磨工艺流程介绍

云南某多金属选矿厂磨矿回路采用半自磨-球磨-顽石返回的“SAB”碎磨工艺流程,按单系列进行配置;采场采出的矿石最大粒度达到 800 mm,在矿山破碎至 250 mm,再通过 2 km 长距离胶带输送机送至位于选矿厂的粗矿堆;粗矿堆排料采用 No. 1 带式输送机向半自磨机供矿,半自磨采用 1 台 $\phi 7.5 \text{ m} \times 3.2 \text{ m}$ 的半自磨机,其排矿端带有圆筒筛,筛上顽石采用 No. 2 和 No. 3 带式输送机转运返回至半自磨机,筛下产物为球磨分级回路的给矿,球磨采用 1 台 $\phi 5.03 \text{ m} \times 8.5 \text{ m}$ 溢流型球磨机与 2 组 $\phi 500-8$ 水力旋流器构成闭路磨矿,磨矿产品细度为 -0.074 mm 占 68% ~ 72%,磨矿产品浓度为 35%,磨矿分级流程具体如图 1 所示。

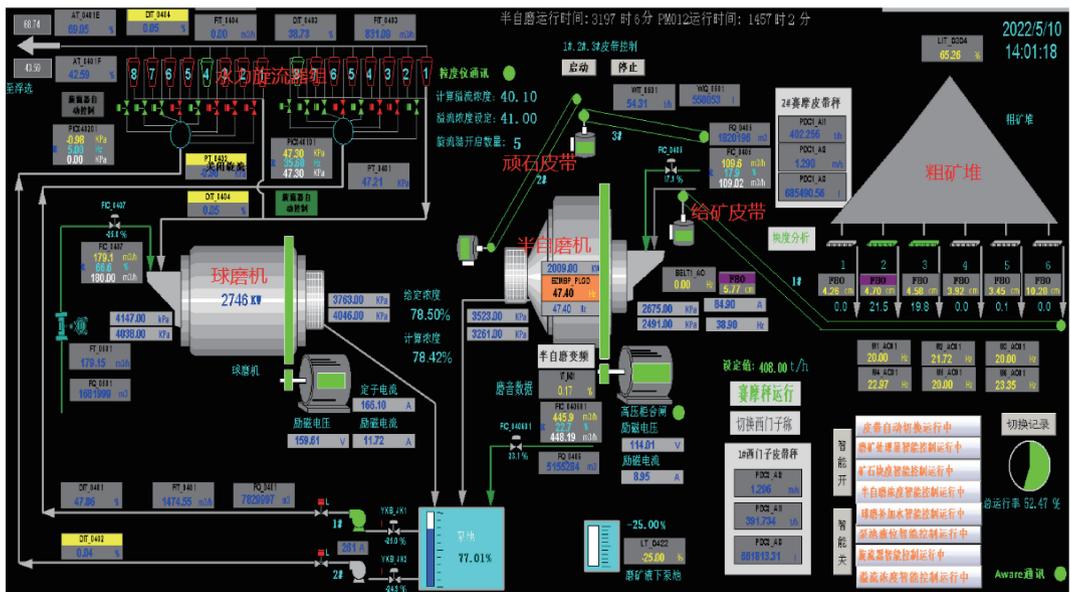


图 1 磨矿分级流程图

3 顽石性质分析研究

根据项目研究需要,经与选矿厂沟通协调,从现场生产过程中 No. 1 半自磨机给矿皮带和 No. 3 顽石返回皮带分别采取了比较有代表性的矿石样品,对这两种矿石样品进行分析研究有助于了解生产中原矿石和顽石的相关性质,考察顽石对磨矿系统的影响规律。研究内容主要包括矿石化学成分分析、邦德球磨功指数试验、JK 落重冲击粉碎试验和研磨

试验等。其中落重冲击粉碎试验是通过分析单一物料受不同比破碎能冲击所得产物的粒度分布规律,试验获得的参数 A 、 b 和 $A \times b$ 表征了矿石的抗冲击粉碎能力,研磨试验是在研磨试验机中低速运转的条件下使固定质量的窄粒级物料自磨,分析产品粒度分布规律,试验中获得的参数 t_a 表征矿石的抗研磨能力,参数 A 、 b 、 $A \times b$ 及 t_a 均是 JKSimMet 软件中半自磨机模型的矿石碎磨特性需要选择的参数。

该选矿厂处理的矿石中主要金属矿物有铁闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿、磁铁矿、锡石和黄铜矿等,主要脉石矿物有辉石、角闪石、石英、绿泥石和方解石等;本次研究中所取矿样化学成分分析结果见表1,矿样碎磨性质试验结果见表2。

表1 主要元素化学成分分析结果

样品	Zn/%	Sn/%	Fe/%	Cu/%	S/%
半自磨给矿样	2.94	0.13	10.0	0.16	5.20
	CaO/%	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	MgO/%	MnO/%
	16.4	6.34	33.84	5.42	0.79
顽石矿样	Zn/%	Sn/%	Fe/%	Cu/%	S/%
	2.36	0.10	8.78	0.12	5.05
	CaO/%	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	MgO/%	MnO/%
	21.84	4.45	38.49	5.57	1.20

表2 矿样碎磨性质试验结果

矿样	邦德功指数 W_{ib} kWh·t ⁻¹	抗磨碎能 力	抗冲击破碎参数 $A \times b$ 能力	抗冲击破碎能力 t_a	抗研磨破碎参数 t_a	抗研磨破碎能力
半自磨给矿样	14.81	中硬	65.76	中	0.60	中软
顽石矿样	17.69	硬	37.35	极硬	0.09	极硬

通过两种矿样主要元素化学成分分析结果可知,矿石中有价元素主要为Zn、Sn、Cu、Fe等;与半自磨给矿样相比,顽石矿样中Zn、Sn、Cu与Fe含量稍微偏低一些,Ca含量较高,其他元素含量差异较小,其主要金属含量仍能满足选矿厂供矿要求,具有较高的经济价值,从元素含量分析结果来看顽石不存在直接抛废的可能性。

由表2试验结果可知,两种矿样分别经不同碎磨性质测定方法所获得结果差异较大,半自磨给矿样抗磨碎能力属于“中硬矿石”,抗冲击破碎能力属于“中”级别,抗研磨能力属于“中软”级别;顽石矿样抗磨碎能力属于“硬矿石”,抗冲击破碎能力属于“极硬”级别,抗研磨能力属于“极硬”级别。

与半自磨给矿样相比,顽石矿样可磨性仍比原矿样差,为更加难磨矿石;研究表明顽石抗冲击破碎能力与抗研磨能力均更强,在落重冲击粉碎试验中,低输入能量条件不能使顽石发生破碎,其抗冲击粉碎能力随粒度减小而提高,在低比破碎能条件下破碎效果不佳,表明顽石抗冲击破碎能力较强,需要在较高比破碎能下才能有效粉碎,如果在半自磨机中磨矿介质的冲击作用难以将顽石有效破碎,顽石将会不断累积,占用半自磨机的有效容积,影响半自磨

机的磨矿效率,降低半自磨机的处理能力。顽石抗研磨能力属于“极硬”级别,在研磨试验中只能发生表面磨削或表面破裂作用,矿石本身未被破碎,不能发生有效的破碎效果,只有表面被研磨掉少量细粒级的矿石,说明研磨作用对顽石处理基本无效,与其落重冲击粉碎试验结果相符;总之,半自磨磨矿过程中由于顽石的研磨会使输入能大部分作为热能损失,从而降低磨矿效率,因此应当尽量避免顽石受到过多研磨作用。通常情况下,通过提高半自磨机的钢球充填率和钢球直径来增加顽石受冲击的能量和概率,或者增加圆锥破碎机、高压辊磨机等高能粉碎设备来破碎顽石使顽石粒度大幅度降低,来减少顽石在磨机筒体内的累积,进而提高半自磨机的处理量。

通过对原矿样和顽石矿样进行多种碎磨特性参数试验研究分析,考察了矿石在碎磨流程中的磨矿特性,为碎磨流程优化和系统产能提升提供了理论依据。抗冲击粉碎特性参数与抗研磨特性参数为本文JKSimMet流程模拟研究提供了数据基础。

4 顽石开路-闭路对系统产能影响的工业试验研究

某多金属选矿厂半自磨机产出的顽石通过带式输送机转运直接返回半自磨机是一种常用的工艺流程,从该工艺流程的生产实践数据来看,顽石产率基本在15%左右,最高达到20%,这些难磨粒子在半自磨机的不断累积不可避免导致磨矿效率降低,并往往成为整个碎磨流程提高产量的瓶颈^[5]。

为此开展了半自磨机顽石开路不返回和直接闭路返回两种处理工艺条件下的工业试验,通过工业试验研究顽石在两种不同处理条件下对磨矿系统产能的影响。顽石开路不返回试验中将No.3顽石带式输送机矿石直接切出流程,顽石不再返回半自磨机。在上述两种顽石处理工艺的工业试验研究中,通过改变半自磨机给矿量,考察两种工艺条件下顽石产率情况和半自磨机运行状态,研究顽石不同的处理方式对系统处理能力的影响。

该选矿厂正常生产时,半自磨机新给矿量为365 t/h,为最大限度减小工业试验对选矿厂正常生产的影响,经与选矿厂沟通,确定了工业试验规模和试验时间,共计开展了以下5组试验。

顽石开路工艺流程条件下,依次开展了新给矿

量为 365 t/h、400 t/h、425 t/h 三组试验,每组试验持续时间为 2 天。

顽石直接返回闭路工艺流程条件下,依次开展

了 365 t/h、400 t/h 两组试验,每组试验持续时间为 2 天;试验过程中同时记录工艺设备运行参数,两种条件下的试验结果见表 3。

表 3 顽石开路-闭路试验结果汇总表

试验条件	半自磨机给矿量/ $t \cdot h^{-1}$	出料端油压/ kPa	进料端油压/ kPa	半自磨机功率/ kW	顽石产率/ $\%$	溢流浓度/ $\%$	溢流粒度/ $\%$
开路 1-正常生产	364.35	3 824.87	2 597.92	2 293.64	11.48	36.30	71.24
开路 2-增加处理量	402.77	3 815.96	2 641.35	2 320.14	10.93	36.07	70.50
开路 3-增加处理量	425.89	3 889.58	2 675.93	2 455.83	11.67	35.37	70.74
闭路 1-正常生产	365.01	3 960.38	2 718.09	2 372.87	19.25	35.80	70.35
闭路 2-增加处理量	400.43	3 990.86	2 790.07	2 489.62	18.71	35.45	70.28

由表 3 试验结果可知,无论是顽石开路不返回或是闭路直接返回流程磨矿分级产品溢流浓度和粒度均在后续选别工艺要求范围内,工业试验未对选矿厂的正常生产产生较大影响。在相同试验条件下,顽石产率比较稳定,随着系统新给矿量的增加,半自磨机出料端油压、进料端油压及运行功率均有所升高;与顽石开路条件相比,闭路条件下的顽石产率有较大提高,增加了 8% 左右,该部分顽石由于未得到有效破碎将在半自磨机循环累积。

顽石开路工艺流程,当给矿量在 425.89 t/h 左右时,半自磨机功率为 2 455.83 kW,按半自磨机装机功率 2 600 kW,计算磨机负荷率达到了 94.45%。与选矿厂正常生产相比,若采用顽石开路工艺流程,且保证半自磨机运行功率稳定在 2 400 kW 左右时,系统处理能力可实现较大提升,能达到 400 t/h 以上。

顽石闭路工艺流程,当给矿量在 400.43 t/h 时,半自磨机功率为 2 489.62 kW,计算磨机负荷率达到了 95.75%。可以看出,在半自磨机功率达到 2 400 kW 以上时,系统处理能力仅能达到约 400 t/h,较开路工艺流程磨机处理能力提升空间有限。

通过对比分析,在相同给矿量时,闭路工艺流程比开路工艺流程的半自磨机轴压和功率均有较大幅度的提高,表明增加的 8% 左右顽石返回到半自磨机内导致循环累积占据了有效容积,降低了通过能力,对半自磨机的处理能力影响较大;若将顽石旁路导出或者采用高能粉碎设备大幅度降低顽石粒度将有助于提高半自磨系统产能。

5 顽石破碎对系统产能影响的模拟研究

当前生产实践中针对半自磨机产出的顽石采用

开路工艺流程应用案例较少,主要有两种通用处理方式:其一顽石排出后,通过带式输送机直接返回半自磨机;其二顽石通过带式输送机给至顽石破碎机进行破碎后返回半自磨机。其中顽石破碎是目前大型选矿厂最为普遍的处理方式,通常情况下采用圆锥破碎机或圆锥破碎机+高压辊磨机将这部分“难磨粒子”破碎处理,最大限度的减小顽石粒度后再返回半自磨机,以减轻对半自磨机作业的影响^[4]。

JKSimMet 软件在破碎磨矿回路模拟方面应用较为广泛,软件不仅可以对新建选矿厂破碎磨矿设备进行选型,对生产现场的流程考查数据处理及流程优化方面也非常有优势;该软件将工业数据库与数学模拟结合起来,对选矿厂工艺指标进行优化,比如磨矿处理量、能耗和产品粒度,并评估磨机给矿硬度、粒度、钢球介质及其它因素变化对半自磨机处理能力的影响。

根据顽石开路-闭路工艺流程工业试验结果可知,闭路工艺流程大约有 8% 的顽石在半自磨机内循环累积,导致磨机负荷增加,功率输出增加,影响半自磨机能力发挥。因此,本次研究利用 JKSimMet 软件的过程模拟和流程优化功能,将选矿厂矿石的 JK 落重试验获得的碎磨特性参数与磨矿回路流程考查数据相结合,进行物料平衡、模型建立及数据模拟;首先模拟还原至近似实际生产情况,在此基础上分别对半自磨回路正常生产和增加给矿量两种条件下顽石破碎对半自磨机处理能力的影响进行研究,通过模拟分析提出在现有设备配置条件下,提升磨矿系统生产能力合理可行的技术方案。

正常生产条件模拟试验结果见表 4,增加给矿量条件模拟试验见表 5。

表4 正常生产条件模拟试验结果

调整参数			模拟结果(最大钢球尺寸 $\phi 130\text{mm}$, 钢球充填率 12%)				
新给矿量 t/h	破碎机紧边 排矿口 %	转速率 %	半自磨机综合 充填率 %	顽石 产率 %	圆筒筛筛下 -0.074 mm %	半自磨机 功率 kW	溢流产品 -0.074 mm %
365	无	75	23.83	18.53	27.11	2 389.31	70.49
	12	75	22.72	15.84	26.82	2 338.86	71.16
	10	75	22.68	15.16	27.24	2 317.40	71.89
	8	75	22.65	14.55	27.75	2 306.05	70.75

表5 增加给矿量条件模拟试验结果

调整参数			模拟结果(最大钢球尺寸 $\phi 130\text{mm}$, 钢球充填率 12%)				
新给矿量/ t/h	破碎机紧边 排矿口 mm	转速率 %	半自磨机综合 充填率 %	顽石 产率 %	圆筒筛筛下 -0.074 mm %	半自磨机 功率 kW	溢流产品 -0.074 mm %
400	无	71	25.14	16.88	27.68	2 397.24	69.78
	12	70	24.88	14.71	27.51	2 369.95	70.00
	10	70	24.85	14.31	27.84	2 348.89	70.05
	8	70	24.82	13.87	28.25	2 327.87	69.72
425	无	72	25.23	16.67	26.92	2 446.33	69.79
	12	71	24.98	14.68	26.74	2 398.78	70.29
	10	71	24.94	14.28	27.07	2 377.61	70.34
	8	71	24.91	13.84	27.48	2 365.47	70.09

由表4 试验可知,正常生产且无顽石破碎条件下,模拟结果与上文顽石闭路试验1 试验结果基本一致,说明 JKSimMet 软件模拟与实际生产相符。在此基础上通过增加顽石破碎开展不同排矿口条件下的模拟研究工作,模拟结果表明,顽石经破碎后返回到半自磨机的粒度大幅度降低,顽石在筒体内累积现象减弱,顽石产率得到大幅度减少,另外顽石破碎粒度越细越有利于半自磨磨矿,在一定程度上可减轻磨机负荷,因此可以认为在当前生产现状的基础上增加顽石破碎后有利于系统产能的充分发挥,半自磨机处理能力可以进一步提升。

表5 为增加处理后模拟结果,与表3 中闭路2 -增加处理能力的试验结果对比分析后发现,通过增加顽石破碎,再配合半自磨机转速调整,顽石产率和半自磨机功率均有明显降低,转速率降低后加强了矿石和顽石的磨剥作用,可以有效提高磨机的处理能力。模拟结果可以看出,在没有顽石破碎条件下,通过调整磨机转速,功率控制 2 400 kW 以下,现有磨矿系统基本可以达到 400 t/h 处理能力;增加顽

石破碎后,功率控制 2400 kW 以下,磨矿系统处理能力预计可达到 425 t/h,例如圆锥破碎机在紧边排矿口 10 mm 情况下,半自磨机转速率 71%,半自磨机运行功率 2 377.62 kW,该条件下的模拟流程图如图 2 所示。

6 结论

本文对云南某多金属选矿厂半自磨-球磨系统产出顽石的性质和处理工艺进行了针对性研究,依次开展了顽石性质研究、顽石开路-闭路工艺流程工业试验研究及 JKSimMet 软件流程模拟分析研究,分析了顽石在开路不返回、直接闭路返回、破碎闭路返回三种处理方式下对系统产能的影响,研究结论及建议如下:

(1) 顽石化学成分分析结果表明,其有价金属元素含量与原矿样相当,同样具有较高经济价值,不能作为废石抛废,需要返回流程处理回收。

(2) 与原矿石样相比,顽石的抗磨碎能力属于“硬矿石”,抗冲击破碎能力属于“极硬”级别,抗研

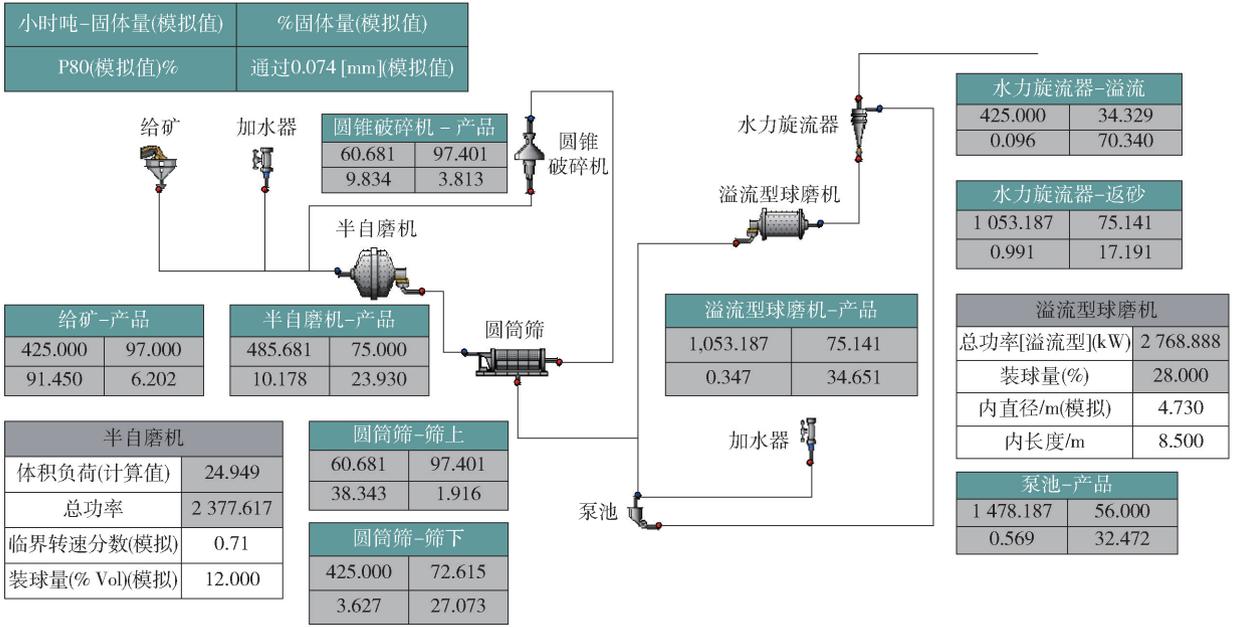


图 2 顽石破碎工艺试验模拟结果

磨能力属于“极硬”级别,为更加难磨矿石;试验结果表明顽石需要在较高比破碎能下才能有效粉碎,且研磨作用对顽石处理基本无效,因此顽石如果无法得到有效破碎,会不断累积占用半自磨机的有效容积,影响半自磨机的磨矿效率。

(3)通过顽石开路工艺流程及顽石闭路工艺流程的工业试验研究,闭路工艺流程的顽石产率较高,达到 19% 左右,大约有 8% 的顽石在半自磨机内循环累积,占据磨机有效容积,对半自磨机处理能力影响较大;闭路条件下半自磨系统处理能力基本可达到 400 t/h。

(4)JKSimMet 流程模拟试验结果表明,顽石经破碎后返回到半自磨机的粒度大幅度降低,提高了磨矿效率,磨矿系统产能预计可以达到 425 t/h。

(5)顽石破碎是降低顽石产率,提高半自磨系统产能的有效措施,上述研究相关成果为选矿厂产能提升规模及技术改造方案提供了科学依据。

[参考文献]

[1] 黄国智. 全自磨半自磨磨矿技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2018.

[2] 杨松荣. 自磨半自磨磨矿工艺及应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.

[3] 张旺,祖大磊. 顽石破碎机对单段自磨流程的影响[J]. 矿山机械,2016(6):44-47.

[4] 许鸿国,曾军龙,李杨,等. 顽石处理对半自磨机产能的影响[J]. 中国钨业,2021(3):32-34.

[5] 谭文才,夏林,刘俊,等. 影响半自磨机顽石产率的因素研究[J]. 矿山机械,2020(1):40-44.