



有色金属选矿用高压辊磨机结构及其工艺

瞿 铁^{1,2}, 杨剑波^{2,3}, 辛亚淘^{1,2}, 车文芳³

- (1. 中信重工机械股份有限公司, 洛阳 471000;
2. 矿山重型装备国家重点实验室, 洛阳 471000;
3. 洛阳栾川钼业集团股份有限公司, 洛阳 471000)

摘要: 通过对高压辊磨机结构及工艺研究, 论证了高压辊磨机在有色金属矿物加工方面行业的应用前景。高压辊磨机超细碎及磨矿试验结果表明: 有色矿石经新型高压辊磨机超细碎后有助于大幅度提升球磨机处理能力, 有效降低 Bond 球磨功指数。后经工业生产实践验证, 两个选厂通过高压辊磨机进行碎磨系统提产改造后, 球磨机入料粒度 F_{95} 由 $F_{95} \leq 12$ mm 降低至 $F_{95} \leq 5$ mm, 球磨机入料 Bond 球磨功指数分别由 13.78 和 11.64 kW·h/t 降低为 11.84 和 9.94 kW·h/t, 选厂整体处理能力提升 67% 左右。

关键词: 矿物加工; 高压辊磨机结构; 高压辊磨机工艺; 有色金属选矿; 节能增效

文章编号: 1004-0609(2022)-08-2405-16

中图分类号: TD954

文献标志码: A

引文格式: 瞿 铁, 杨剑波, 辛亚淘, 等. 有色金属选矿用高压辊磨机结构及其工艺[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(8): 2405-2420. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43220

QU Tie, YANG Jian-bo, XIN Ya-tao, et al. Structure and process of HPGR for non-ferrous metal beneficiation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(8): 2405-2420. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43220

在自然界的原石中, 目的矿物是与脉石矿物紧密连生在一起的, 而且一般目的矿物的嵌布粒度都很细。在选矿厂的作业流程中, 碎矿工段和磨矿工段都承担着为后续分选作业提供合格分选物料的任务。要将目的矿物与脉石矿物分离, 必然要将矿石破碎和粉磨至目的矿物嵌布的粒级, 使其与脉石矿物实现单体解离并进行选别回收。如果没有目的矿物的充分解离, 就不可能有高的回收率和精矿品位。

“多碎少磨”是矿业行业内一直倡导的节能降耗、低碳环保的原则^[1], 矿石破碎主要是依靠破碎机械对物料的挤压、折弯、切削和冲击, 这属于一种约束性破碎。各类破碎机的破碎概率多在 50%~100% 之间, 破碎概率越高, 破碎效率越高。同时,

在常规破碎过程中, 能量消耗随着破碎比的提高而增加。磨碎主要是利用球磨机和介质对矿石颗粒的研磨和磨剥作用^[2], 但矿物颗粒受到的是随机性破碎^[3], 部分矿石颗粒能完好无损地从球磨机内穿越而过而不受到磨碎^[4], 因此, 磨矿作业对矿石颗粒的破碎概率很低。另外, 在全粒级给料的磨碎作业中, 最大给料粒度越大, 则粒度范围越宽; 要保证各个粒级均能被破碎, 钢球配比需要的球径就越多, 而钢球对矿石的打击次数就越少, 但钢球配比球径的增多并未明显提升磨矿效率。在给料粒度一定的情况下, 随着目的矿物解离需要粒度的不断减小, 钢耗和能耗会显著增加^[5-8]; 当球磨机给入的物料粒径 F_{95} (F_{95} 表示入料中 95% 过筛的筛孔尺寸) 大于 4 mm 时, 磨矿效率出现较为明显的降低^[9]。

收稿日期: 2021-07-17; 修订日期: 2021-11-09

通信作者: 瞿 铁, 教授级高级工程师; 电话: 0379-64088005; E-mail: qutie@citic-hic.com.cn

研究表明,在常规破碎过程中,能量消耗随着破碎比的增大而增加,但无法直接将矿石粉碎至分选所需要的粒度;而在磨碎过程中,在给料粒度一定的情况下,随着目的矿物解离需要的粒度不断减小,磨矿能耗急剧上升^[5-7],矿物回收率受粉料方式的影响也比较严重^[9]。

对于有色金属选矿而言,矿石坚硬难磨,传统破碎设备的能耗高、钢耗大、矿物回收率低^[10],相比较而言,高压辊磨机具有破碎比大、作业效率高、单机处理量大、能耗低、占地面积小、设备适应能力强及工作环境好等优点^[11-12],其破碎工艺比传统破碎工艺节省10%~50%的能耗^[13],是理想的节能、高效粉碎设备。刘建远^[7]对国内外高压辊磨机的使用情况进行了梳理和分析,认为高压辊磨机在金属矿山上的应用前景十分广阔。陈俊涛等^[14]采用边料闭路工艺,改变边料循环量,利用高压辊磨机对铝土矿进行了粉碎试验,发现边料循环量越大,高压辊磨机处理能力越小。王建中等^[15]开展了高压辊磨-湿式预选工艺研究,工艺改造可显著降低选厂加工成本。张斌等^[16]优化了高压辊磨闭路流程,得到了适合现阶段选厂生产和管理的闭路筛分流程。丁临冬^[17]对高压辊磨机辊面磨损进行了研究,提出了延长辊面寿命的建议与措施。目前关于高压辊磨机的研究多集中在工艺研究、应用研究及发展方向等方面,一般是将矿石颗粒“变细”的作业尽可能地前移至破碎工段,使得进入磨矿工段的粒度尽量降低,减少整体矿石准备作业的能耗,因此,有必要对高压辊磨机的结构进行创新型研究,并针对不同工况开展工艺研究,降低磨机设备的入磨细度,才能有效地指导选矿中的产能设计。

本文作者根据有色金属矿石的破碎特征,对现有高压辊磨机的结构进行了创新设计,并开展工艺研究和试验探索,研究更有效的矿石破碎方式;探讨了高压辊磨机在有色金属选矿中的应用,以提高破碎效率,降低能源消耗;然后再通过生产实践,以采用高压辊磨机做核心设备的两个有色金属选矿改扩建项目为基础,开展了高压辊磨机的工艺研究,论证了高压辊磨机在矿物加工行业中的应用。

1 高压辊磨机结构及工作原理

高压辊磨机(HPGR),又名辊压机,是一种高效节能的细碎设备,具有能耗低、占地面积小、钢耗低^[18]、细粒级产率高、易实现单体解离^[19]等优点。相对于传统破碎设备,高压辊磨机破碎岩石的粒度分布均匀^[20],并且对目的矿物具有一定的选择性破碎作用^[21]。自20世纪80年代出现以来,高压辊磨机一直被视为践行“多碎少磨”理念的核心装备,最初因其辊面材质和结构等问题而导致辊面磨损较快,只应用于水泥、石灰和化工等行业,在矿物加工行业的应用进展较为缓慢^[22],仅在金刚石矿破碎中有一些应用。近年来通过在辊面上镶嵌硬质合金,使得辊面磨损速率显著降低,开始逐步应用于矿物加工行业^[23]。高压辊磨机的典型结构如图1所示。

高压辊磨机采用“层压粉碎”的工作原理,改变了物料在传统破碎机中单颗粒随机破碎的工作方式,实现了高效的颗粒层间相互破碎。层压粉碎是指大量物料在重压下聚集于高压辊磨机的破碎腔内,通过高压辊磨机辊子的相向转动,使得矿石颗粒在有限的空间和强大的外力作用下进入越来越小的辊间空隙,直至矿石颗粒相互传递应力。当辊间压强超过矿石颗粒的抗压强度极限时,矿石开始被粉碎。由于高压辊磨机的强大压力直接作用于物料颗粒,导致出料矿石内部产生数量较多的微裂纹,可以降低后续粉磨作业的工作压力,实现节能和增效。已有研究表明^[24],在高压辊磨机辊压后的矿石中,粗颗粒矿石含有微裂纹较多,细颗粒矿石中的微裂纹较少^[24],因此,粗粒矿石的粉碎速度较快,而细粒矿石粉碎速度相对较慢而避免出现过磨现象,实现了矿石粒度的合理分布,改善了分选环境,提高了分选效率^[18]。

高压辊磨机的破碎工艺主要分为全开路、边料返回半闭路、筛分全闭路三种^[25]。全开路工艺破碎效果较差,产品粒度分布较宽,但对含水、含泥高的矿石适应性强、配置简单、投资低。边料返回工艺的出现是因为高压辊磨机破碎具有一定的边缘效应,即平行于辊轴方向,两端物料的破碎效果比中间差,且粗颗粒较多,此工艺是在高压辊磨机出料中截取两端的物料,通过皮带或斗提直接返回高压

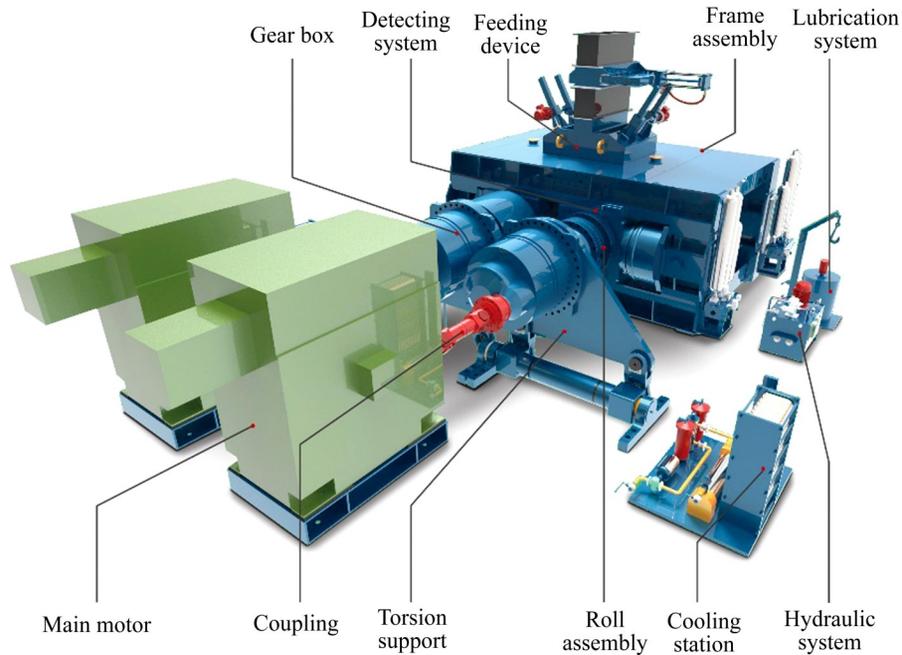


图 1 高压辊磨机的典型结构示意图

Fig. 1 Typical structure diagram of HPGR

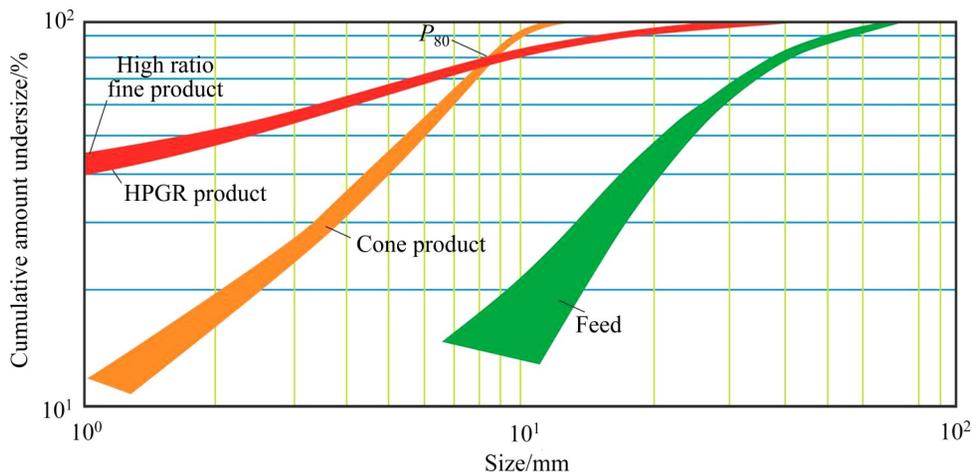


图 2 高压辊磨机与圆锥破碎机出料粒度分布

Fig. 2 Distribution of discharge particle size between HPGR and cone crusher

辊磨机給料仓, 该工艺占地面积较小, 投资适中, 但产品粒度与全闭路工艺仍有差距。全闭路工艺由高压辊磨机与筛分分级组成, 筛分有湿式筛分和干式筛分两种, 湿式筛分对环境相对友好, 但因筛下物含水而不宜设粉矿仓, 若后续有连续作业工艺, 则需高压辊磨机 24 h/d 运转; 干式筛分则比较灵活, 在干旱缺水地区也可以进行干式风力分级, 因此, 该工艺的适应性更强, 高压辊磨机可以与上游圆锥破碎机等保持 16 h/d 左右的工作制度, 也可以

与球磨机一样采用 24 h/d 的工作制度^[26-27]。

为了更大限度地提高高压辊磨机的效能, 本文作者及项目团队对现有高压辊磨机的结构^[28]、辊面结构^[29-30]及换辊装置^[31]等进行了优化设计。在高压辊磨机结构上进行了创新, 采用四列圆柱滚子轴承+推力轴承的独特设计; 优化了高压液压系统, 实现了行星减速器与落地式驱动电机联动; 采用 PLC 可编程控制器及自动检测装置, 显著地提高了整机的工作效率, 提高处理量的同时节约了电能。新型高压辊磨机结构如图 3 所示。创新设计了新型

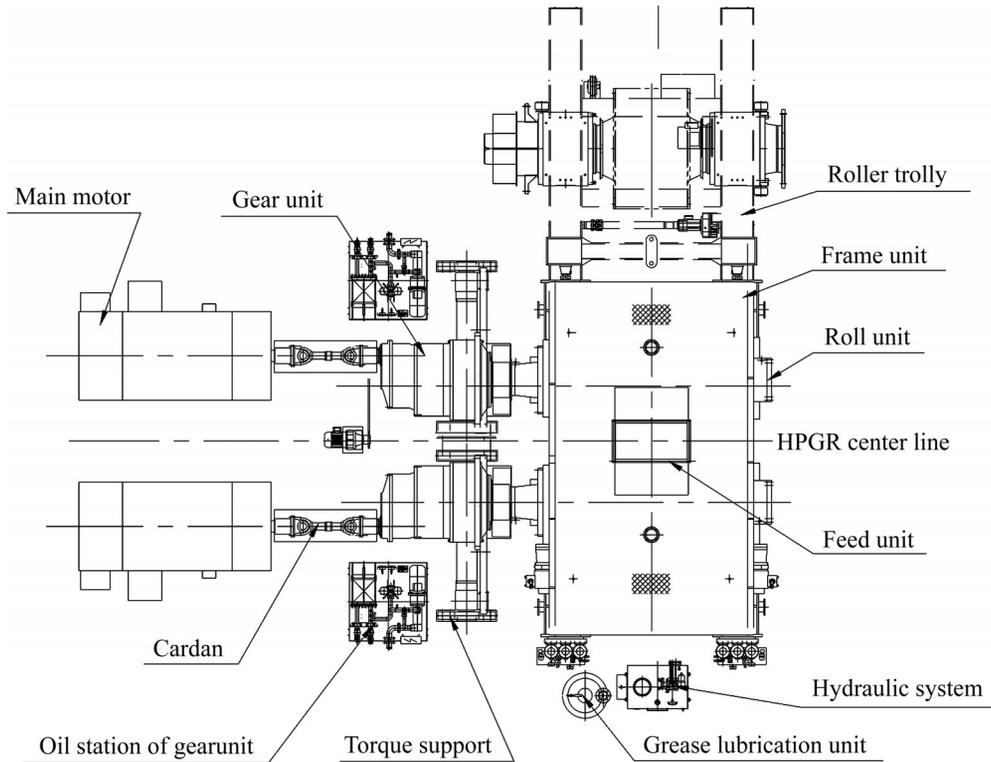


图3 新型高压辊磨机结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structure of new HPGR

柱钉辊面结构，在辊套外表面设有交错分布的柱钉和凹孔，在设备负荷运转时会在辊套表面形成一层自生式物料垫层，抵抗硬性物质冲击的同时能有效地保护辊面，且便于柱钉更换和维修，具有高硬度、耐腐蚀和使用寿命长等优点，缩短了维修时间，降低了设备的维护成本，显著地提高了设备运转率^[32]。高压辊磨机结构的优化设计为后续工艺研究提供了必要的基础条件。



图4 镶嵌硬质合金的新型辊面照片

Fig. 4 Photo of new type cemented carbide inserted roller surface

2 高压辊磨工艺研究

钨钼是重要的稀有金属资源和战略储备资源，在自然界中已发现的钨钼矿有30余种，因具有高熔点和优良的热硬性而广泛应用于航空航天及国防等领域。我国是钨钼资源储量第一大国，随着经济的快速发展，钨钼资源的重要性逐渐凸显，钨钼矿开采的重要程度越来越高，开发规模也在逐渐增大^[33]。因此，本文作者利用新型高压辊磨机进行钨钼矿开采工艺研究，通过定性和定量分析来提高分选效率，降低能耗，有助于合理选定矿厂厂址，综合考量规划、供电、供暖、供水及环境保护等多个因素^[34]，最终确定最优方案，切实满足国家和企业的需求。

2.1 实验室及钨钼三选厂现场工艺研究

本研究在矿山重型装备国家重点实验室开展了不同压力条件下的高压辊磨机破碎试验，包括开路试验(试验1[#])和2组闭路循环试验(试验1[#]-B1、试验

1[#]-B2), 试验条件为: 系统压力 2.0~4.0 MPa(相当于工业机 10 MPa), 入料粒度 ≤26 mm, 水分 0.7% (质量分数), 在闭路试验过程中, 对每一组辊压试验的高压辊磨机排料进行粒度分析, 考察闭路试验中的辊压破碎效果。

所取的排料为中间料和边缘料, 中间料是指在高压辊磨机两个辊子中间破碎后排出的物料; 边缘料是指在高压辊磨机两个辊子两侧破碎后排出的物料。试验过程中, 中间料与边缘料的质量比为 6:4。闭路试验产品的粒度检测数据如表 1 所示, 粒度曲线如图 5 所示, 其中, P_{80} 表示产品中 80% 过筛的筛孔尺寸。

根据表 1 和图 5 的粒度数据可知, 高压辊磨机边料返回工艺中的中间料 P_{95} 值约为 7.5 mm, P_{80} 值约为 4.5mm。采用高压辊磨机闭路工艺, P_{80} 值数

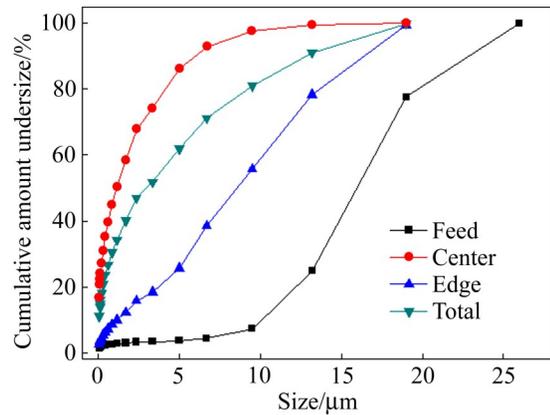


图 5 高压辊磨机原料及辊压产品的粒度分布曲线

Fig. 5 Particle size distribution curves of raw materials and rolled products of HPGR

据进一步降低。

在上述试验的基础上, 实验室进行了闭路试验, 通过 8 组 6 mm 分级闭路高压辊磨试验进行了

表 1 高压辊磨机原料及辊压产品的粒度分析

Table 1 Particle size analysis of raw materials and rolled products of HPGR

Particle size		Cumulative amount undersize (mass fraction)/%						
		Raw material	Test 1 [#]		Test 1 [#] -B1		Test 1 [#] -B2	
Mesh	Size/μm		Center products	Edge products	Center products	Edge products	Center products	Edge products
	26000	100	100	100	100	100	100	100
	19000	77.59	100	99.52	100	98.95	100	99.56
	13200	24.77	99.19	70.59	99.4	81.31	99.55	78.38
	9500	7.3	97.25	52.63	98.2	60.58	97.74	55.84
	6700	4.3	92.93	38.38	94.3	42.29	92.98	38.55
	5000	3.64	84.22	30.82	87.48	27.31	86.14	25.66
6	3350	3.33	76.03	23.96	76.92	18.99	74.22	18.36
8	2360	3.22	69.87	21.38	70.66	16.02	67.87	15.78
12	1700	2.95	60.79	17.2	60.14	12.29	58.65	12.32
16	1180	2.73	52.69	14.37	51.62	9.77	50.32	9.95
20	850	2.58	46.92	12.74	45.89	8.29	45.05	8.56
30	600	2.43	41.77	11.08	40.33	7.01	39.56	7.24
40	425	2.28	37.36	9.79	35.67	6	35.12	6.25
50	300	2.14	32.77	8.55	31.15	5.11	30.96	5.36
65	212	1.94	28.6	7.42	26.93	4.34	27.07	4.58
100	150	1.78	25.38	6.55	23.8	3.77	24.03	4
120	125	1.68	23.48	6.02	21.93	3.45	22.22	3.66
140	106	1.58	21.88	5.58	20.27	3.18	20.7	3.39
200	75	1.3	17.86	4.47	15.71	2.39	16.66	2.67
Bottom	0	0	0	0	0	0	0	0
	$P_{80}/\mu\text{m}$	19741	4084	15099	3783	12966	4095	13621

表2 高压辊磨闭路试验结果

Table 2 Test results of closed-circuit experiment of HPGR

Test No.	Cycle number	Specific pressure of roll/(N·mm ⁻²)	Roll linear speed/(m·s ⁻¹)	Aperture size/mm	Specific energy/(kW·h·t ⁻¹)	Specific passing amount/(t·hm ⁻³)	Circulating load/%
B1	1				1.26	319	16.96
B2	2				1.31	308	21.36
B3	3				1.34	304	21.45
B4	4	4.05	0.5	6	1.30	300	19.95
B5	5				1.47	304	20.54
B6	6				1.51	295	21.65
B7	7				1.44	312	22.41
B8	8				1.44	311	21.15

表3 高压辊磨闭路产品粒度分析表

Table 3 Particle size analysis of closed-circuit products of HPGR

Mass fraction/%			Particle size	
Partial amount oversize	Cumulative amount oversize	Partial amount undersize	Mesh	Size/ μm
0	0	100		6000
6.61	6.61	93.39		5000
17.74	24.35	75.65		3000
4.32	28.67	71.33	8	2360
7.41	36.08	63.92	12	1700
8.09	44.17	55.83	16	1180
5.88	50.06	49.94	20	850
5.63	55.69	44.31	30	600
5.19	60.88	39.12	40	425
5.29	66.17	33.83	50	300
4.90	71.07	28.93	65	200
3.63	74.70	25.30	100	150
4.47	79.16	20.84	140	106
4.28	83.45	16.55	200	75
16.55	100	0	Bottom	0

矿石细碎，并对所制备的矿石样品进行了粒度分析，结果如表2和3所示。

根据试验结果，通过差值计算可以得出，高压辊磨机闭路试验产品的 P_{80} 约为3.5 mm。

Bond球磨功指数是表征磨碎能力的一个重要参数。郭小飞等^[20]的研究表明，高压辊磨机超细碎

后的矿石颗粒内部产生一定数量的微裂纹，在后续磨矿作业中，裂纹在压力作用下逐步扩展并导致颗粒解离破碎，可以在一定程度上降低后续磨矿作业的能耗。实验室对高压辊磨机辊压前后的产品进行了Bond球磨功指数等参数测定，其结果如表4所示。其中， F_{80} 表示入料中80%过筛的筛孔尺寸。

表4 高压辊磨机辊压前后的矿石Bond球磨功指数对比
Table 4 Comparison of ore Bond work indexes before and after rolling of HPGR

Parameter	Feed	Product
Closing screen, $P_1/\mu\text{m}$	125	125
Bulk density, $\rho_B/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.9	2.029
Initial load/N	13.30	14.203
Expected value/N	380	405.8
Cumulative amount undersize/%	14.71	28.2
$F_{80}/\mu\text{m}$	1978	1580
$P_{80}/\mu\text{m}$	99	96
Net grams per revolution, $G_{bp}/(\text{g}\cdot\text{r}^{-1})$	1.502	1.798
Bond work index/(kW·h·t ⁻¹)	13.78	11.84

由表4可以看出，Bond球磨功指数由辊压前的13.78 kW·h/t降低至辊压后的11.84 kW·h/t，降幅为1.94 kW·h/t，降低了14.08%。

三选矿厂原来采用单段磨矿工艺，由2台4800 mm×7000 mm($D\times L$ ，下同)的A型溢流型球磨机和1台3600 mm×6000 mm的B型溢流型球磨机组成。A型溢流型球磨机装机功率为2500 kW，当入料粒度 F_{95} 为12 mm、 F_{80} 为8 mm时，单台设备处理能力约

为5700 t/d, 粒度 ≤ 0.074 mm的含量为62%左右。B型溢流型球磨机装机功率为1250 kW, 当入料粒度 F_{95} 为12 mm、 F_{80} 为8 mm时, 单台设备处理能力为3000 t/d左右, 粒度 ≤ 0.074 mm的含量为63%左右。

若能将球磨机新给料的 F_{80} 控制到4 mm以内, 将可以提升球磨机产能。增加的高压辊磨机采用闭路筛分工艺, 球磨机进料粒度 F_{80} 变小, 同时物料的Bond球磨功指数降低, 可以大幅增加磨矿系统处理量。球磨机在运行功率不变时, A型球磨机处理量计算见表5, B型球磨机处理量计算见表6。

表5 4800 mm×7000 mm球磨机单台处理量

Table 5 Processing capacity of one set ball mill of 4800 mm×7000 mm

Parameter	Value
Motor working power/kW	2460
Pinion power/kW	2300.10
Feed size, $F_{80}/\mu\text{m}$	3800
Fraction of product with size less than 74 $\mu\text{m}/\%$	62
New feed of unit set of mill/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	387

表6 3600 mm×6000 mm球磨机处理量计算

Table 6 Processing capacity of one set ball mill of 3600 mm×6000 mm

Parameter	Value
Motor working power/kW	1190
Pinion power/kW	1112.65
Feed size, $F_{80}/\mu\text{m}$	3800
Fraction of product size less than 74 $\mu\text{m}/\%$	63
New feed of unit set of mill/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	194

由表5和6可知, 增加高压辊磨机闭路筛分工艺后, 球磨机进料粒度变小, 物料的Bond球磨功指数降低, 磨矿系统处理量提升。

在增加高压辊磨机干式筛分流程后, 通过实验室选型计算, 并对比工业数据库, 磨矿系统的计算处理量如下。1) 当4800 mm×7000 mm球磨机的平均运行功率为2460 kW时, 增加高压辊磨机后球磨

机的处理量为387 t/h。2) 当3600 mm×6000 mm球磨机的平均运行功率为1190 kW时, 增加高压辊磨机后球磨机的处理量为194 t/h。

在球磨机运行功率不变时, 2台4800 mm×7000 mm球磨机和1台3600 mm×6000 mm球磨机的单位处理量为968 t/h, 日处理量可以达到23232 t。与改造前相比, 增加高压辊磨机闭路筛分工艺后, 碎、磨系统处理量将在原有基础上提高64%左右。

作为该项目改造用的核心设备, 高压辊磨机根据下列计算方法进行选择。

根据辊压试验, 当高压辊磨机入料 F_{80} 为20 mm时, 产品中粒度 ≤ 6 mm的含量为74.7%, 由高压辊磨机入料粒度与产品中细粒级含量的关系 $y_{6\text{mm}}=99.18-1.224\times F_{80}$ 可得, 当高压辊磨机入料粒度 F_{80} 为25 mm时, 产品中粒度 ≤ 6 mm的含量为68.6%。根据试验机与工业机的缩比关系, 当工业机入料粒度 F_{80} 为25 mm时, 产品中粒度 ≤ 6 mm的含量为65%。筛分效率按80%计算, 则高压辊磨机循环负荷为 $(100-65\times 80\%)/(65\times 80\%)=92.3\%$, 高压辊磨机选型计算中取100%。

工艺要求高压辊磨机通过量为 $24000/[21\times(1+100\%)]=2286$ (t/h), 采用双系列设计, 则单台通过量为1143 t/h, 选定高压辊磨机为GM160-140, 选型计算过程如下。

1) 试验法

$$Q=kMLDv$$

式中: Q 为高压辊磨机通过量, t/h; k 为放大系数, 1.13; M 为试验比通过量, 283 t/hm³; L 为辊子宽度, 1.6 m; D 为辊子直径, 1.4 m; v 为辊速, 1.76 m/s (21 r/min)。

$$Q=kMLDv=1.13\times 283\times 1.6\times 1.4\times 1.76=1260$$
 (t/h)

试验法是采用辊压试验确定该矿物的比通过量值, 按辊面直径、宽度、线速度进行放大计算; 还可以通过辊缝算法来验证高压辊磨机选型, 辊缝法是每小时两个工作辊之间缝隙实际通过的物料量, 按料饼厚度、辊面宽度、线速度、物料密度进行计算。

2) 辊缝计算法

$$Q=3600LSv\rho$$

式中： S 为辊缝宽度， $0.048\text{ m}(0.03D)$ ； ρ 为料饼密度， $2.8\text{ t/m}^3(0.88\rho_r, \rho_r=3.2\text{ t/m}^3)$ 。

$$Q=3600LSv\rho=3600\times 1.4\times 0.048\times 1.76\times 2.8=1197\text{ (t/h)}$$

通过上述两种方法选型验证，2台GM160-140高压辊磨机选型合适。

因此，将高压辊磨机运用于生产后，钨钼三选厂工艺流程如图6所示。

改造前后碎磨工艺的设备配置对比如表7所示。

改造前后的球磨机入料粒度对比如表8所示。

改造后高压辊磨机进出料的宏观形貌如图7所示。

作为改造项目的核心设备，GM160-140高压

辊磨机的主要参数如表9所示。

得益于高压辊磨机稳定的性能以及可更换的矩阵式柱钉辊面技术，该项目中高压辊磨机辊面寿命达到20000 h以上，单台套设备辊套可使用2.5年以上，设备运转率在97%左右。高压辊磨机矩阵式柱钉辊面使用情况如图8所示。

三选厂在高压辊磨机投产后的处理量提升至24000 t/d以上，相比于原有的处理量14400 t/d提升了67%，在未新增碎磨系列、未改变原则流程的情况下，产能提升效果明显。改造完成后，球磨机的入料由 $\leq 12\text{ mm}$ 降低为 $\leq 5\text{ mm}$ ，产能大幅提升，衬板使用寿命由之前的12个月左右提升至15个月左右，钢球单耗量从之前的 0.9 kg/t 下降至 0.35 kg/t 。

改造项目投产后，每吨原矿碎矿系统电耗增加了 $2.3\text{ kW}\cdot\text{h}$ ，同时每吨原矿磨浮系统电耗降低

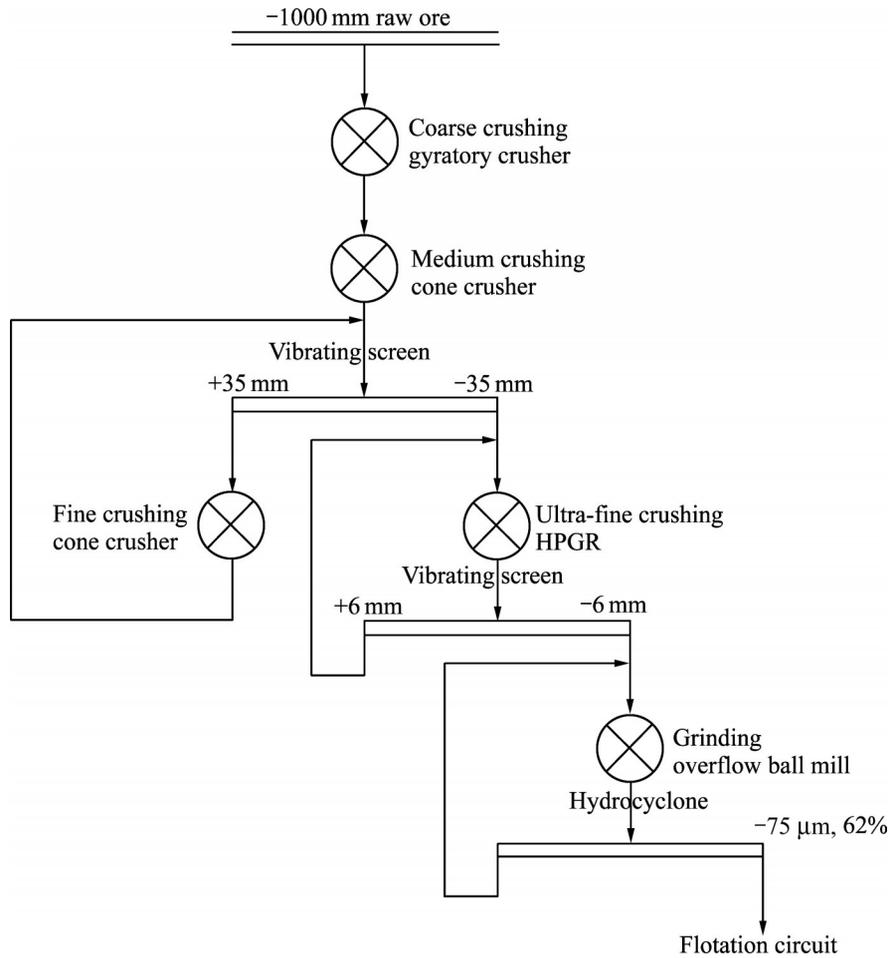


图6 提能增效改造完成后的三选厂碎磨流程图

Fig. 6 Crushing and grinding flow chart of No.3 concentration plant after completion of energy and efficiency improvement transformation

表 7 三选厂改造前后的碎磨工艺设备对比

Table 7 Comparison on of crushing and grinding process equipment before and after transformation of t No.3 concentration plant

Procedure	Parameter	Original	Improved
	Process	Three-stage crushing single closed circuit	Four-stage crushing two-closed circuit
Circuits	Throughput of crushing circuit/(t·d ⁻¹)	14400	24000
	Operating system of crushing circuit/(h·d ⁻¹)	23	23
	Operating system of grinding circuit/(h·d ⁻¹)	24	24
	Crusher type	PXZ1200/160, 1 set, 500 kW	
Coarse crushing	Operating system of crusher/(h·d ⁻¹)	15	15
	Production/(t·h ⁻¹)	960	960
	Size of discharge opening/mm	160-190	160-190
	Crusher type	CH870, 1 set, 600 kW	CH890, 1 set, 750 kW
Medium crushing	Operating system of crusher/(h·d ⁻¹)	23	23
	Production/(t·h ⁻¹)	626	1043.5
	Size of discharge opening/mm	38	57
	Crusher specification	CH895, 1 set, 750 kW	
Fine crushing	Expected operating system of crusher/(h·d ⁻¹)	23	23
	Production/(t·h ⁻¹)	626	1043.5
	Size of discharge opening, mm	22	38
Vibrating screen	Screen size/mm		38
	P_{80} /mm	~12	~30
HPGR	HPGR type	-	GM 160-140, 2 sets, 2×1250kW/set
	Process of HPGR	-	Dry screening
	Operating system of HPGR/(h·d ⁻¹)	-	~23.5
	Production/(t·h ⁻¹)	-	1030
	F_{80} /mm	-	30
Vibrating screen	Screen size/mm	-	5
	P_{80} /mm	-	~3.5
	Type	d 4800 mm×7000 mm, 2 sets, 2500 kW/set	
	Expected throughput of per ball mill/(t·h ⁻¹)	240	400
	Fraction of closed circuit product with size less than 74 μ m/%	62	62
	Working power/kW	2460	2490
	Type	d 3600 mm×6000 mm, 1 set, 1250 kW	
Overflow ball mill	Expected throughput of per ball mill/(t·h ⁻¹)	120	200
	Fraction of closed circuit product with size less than 74 μ m/%	63	63
	Working power/kW	1190	1210
	Daily handling capacity of grinding circuit/(t·d ⁻¹)	14400	24000
	Increased production capacity of grinding circuit/%		67

表8 改造前后的球磨机入料粒度分布对比

Table 8 Comparison on feed size distribution of ball mill before and after transformation

Size/mm	Original			Size/mm	Improved		
	Productivity/%		Cumulative amount undersize/%		Productivity/%		Cumulative amount undersize/%
	Partial	Cumulative			Partial	Cumulative	
-12.00+9.00	11.07	11.07	100.00	-	-	-	-
-9.00+5.00	34.70	45.77	88.93	-6.00+5.00	11.10	11.10	100.00
-5.00+2.00	21.33	67.10	54.23	-5.00+2.00	22.86	33.96	88.90
-2.00+0.18	20.65	87.75	32.90	-2.00+0.18	35.30	69.26	66.04
-0.18+0.075	6.61	94.35	12.25	-0.18+0.075	16.58	85.84	30.74
-0.075	5.65	100.00	5.65	-0.075	14.16	100.00	14.16



图7 高压辊磨机进出料的宏观形貌

Fig. 7 Macroscopic morphology of feed and discharge of HPGR: (a) New feed of HPGR; (b) Total feed of HPGR; (c) Discharge of HPGR; (d) Closed circuit product of HPGR

了 $5.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，每吨原矿电耗累计降低 $3.2 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ；随着产能提升，其余选矿成本也均有不同程度的降低。

2.2 钨钼一选厂现场工艺研究

实验室对一选厂的原矿和辊压产品进行了 Bond 球磨功指数对比试验。试验样品是利用混合

样品 5 mm 闭路试验稳定产品中心料制得的。经试验测定，一选厂未经辊压的原矿一段 Bond 球磨功指数为 $11.64 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ ，经辊压的原矿一段 Bond 球磨功指数为 $9.94 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ ；辊压后 Bond 球磨功指数降低了 $1.7 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ ，降低 14.60% ，二段磨矿的 Bond 球磨功指数也略有降低。试验结果如表 10 所列。

改造之前, 一选厂碎矿流程为三段一闭路破碎, 磨矿流程分两段。第一段磨矿采用4台直径2700 mm×3600 mm格子型球磨机, 第二段磨矿采用2台直径2700 mm×3600 mm溢流型球磨机, 日处理能力为3500 t/d左右, 其碎磨流程如图9所示。

根据三选厂改造经验, 经充分论证, 一选厂于2019年三季度启动改造, 2020年9月份竣工投产。

一选厂改造项目除增加1台GM160-140高压辊磨机闭路破碎外, 还增加了一个系列的磨矿设

备。一段磨矿为1台4800 mm×7000 mm溢流型球磨机, 二段磨矿为1台4000 mm×6870 mm溢流型球磨机, 改造后的工艺流程如图10所示。

改造完成后, 高压辊磨机闭路产品的粒度分布如表11所示。

经过一年多的生产实践, 一选厂运行稳定, 选厂的处理能力达13000 t/d左右, 目前工艺流程还在优化中, 后期仍有一定的提升空间。

表9 GM160-140高压辊磨机主要参数表

Table 9 Main parameters of GM160-140 HPGR

Parameter	Value	Parameter	Value
Diameter of roll/mm	1600	Installed power/kW	2×1250
Width of roll/mm	1400	Maximum acting force/kN	12000
Material	Skarn type molybdenum & tungsten ore	Specific pressure/MPa	3.5
Production/(t·h ⁻¹)	1280	Linear speed/(m·s ⁻¹)	1.76 (maximum)
Feed size/mm	≤35	Set	2
P ₈₀ /mm	≤4		

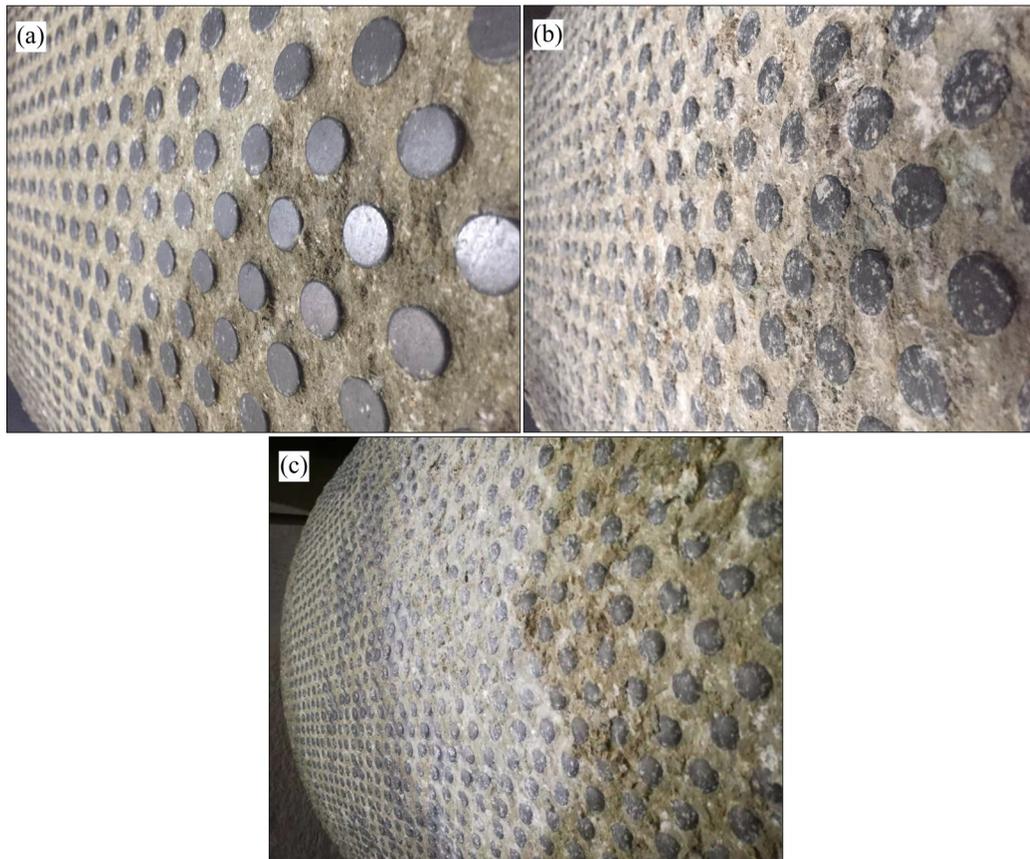


图8 形成料垫的高压辊磨机辊面情况

Fig. 8 Ore-padded roll surface of HPGR: (a) After one month of operation; (b) After six-month of operation; (c) After fifteen-month of operation

表 10 高压辊磨机辊压前后矿石 Bond 球磨功指数对比

Table 10 Comparison of ore Bond work indexes before and after rolling of HPGR

Index No.	Parameter	Product of three-stage crushing single closed circuit		Product of four-stage crushing two closed circuit	
		Primary grinding	Secondary grinding	Primary grinding	Secondary grinding
1	Closing screen/ μm	125	90	125	90
2	True density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.816	2.816	2.816	2.816
3	Initial load, q_0/N	12.268	12.268	12.383	12.383
4	Expected load, q_u/N	3.505	3.505	3.538	3.538
5	Cumulative amount undersize of feed/%	19.57	16.75	25.66	22.52
6	$F_{80}/\mu\text{m}$	1866	1866	1886	1886
7	$P_{80}/\mu\text{m}$	92	72	90	71
8	Net grams per revolution, $G_{bp}/(\text{g}\cdot\text{r}^{-3})$	1.990	1.737	2.315	1.702
9	Bond work index/ $(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1})$	11.64	11.95	9.94	11.78

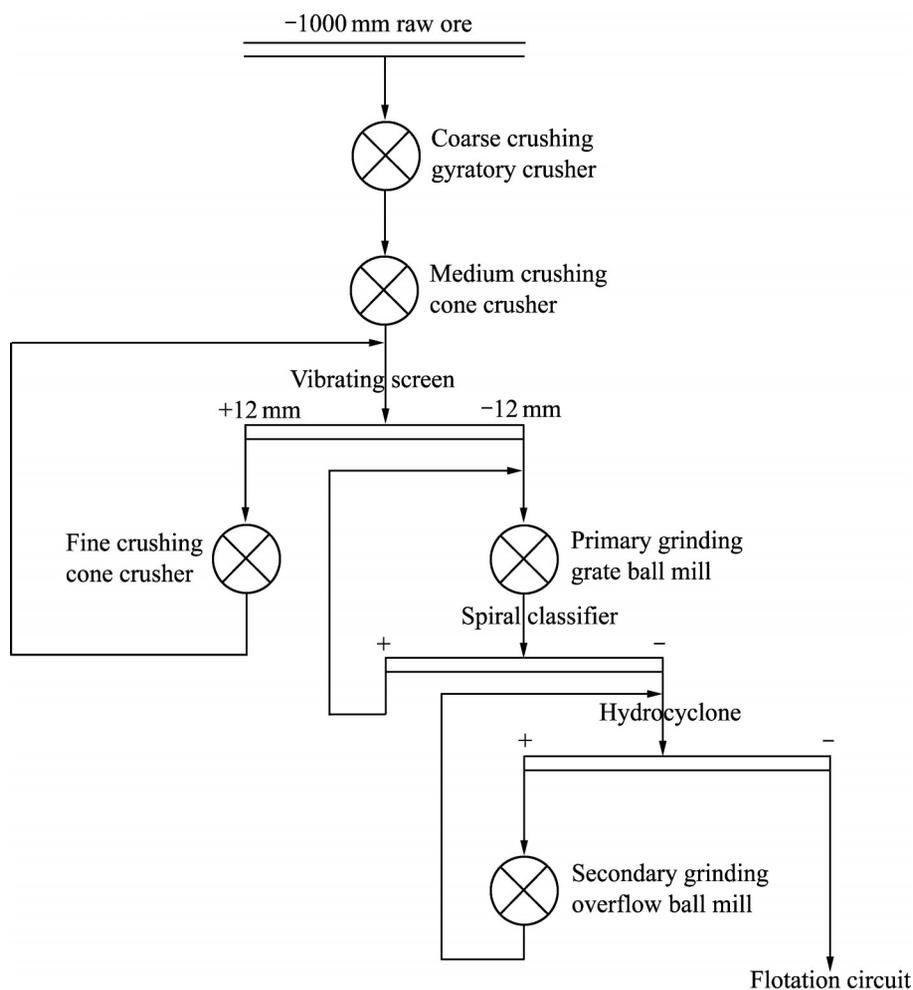


图 9 一选厂改造之前的碎磨工艺流程图

Fig. 9 Crushing and grinding flow chart of No.1 concentration plant before transformation

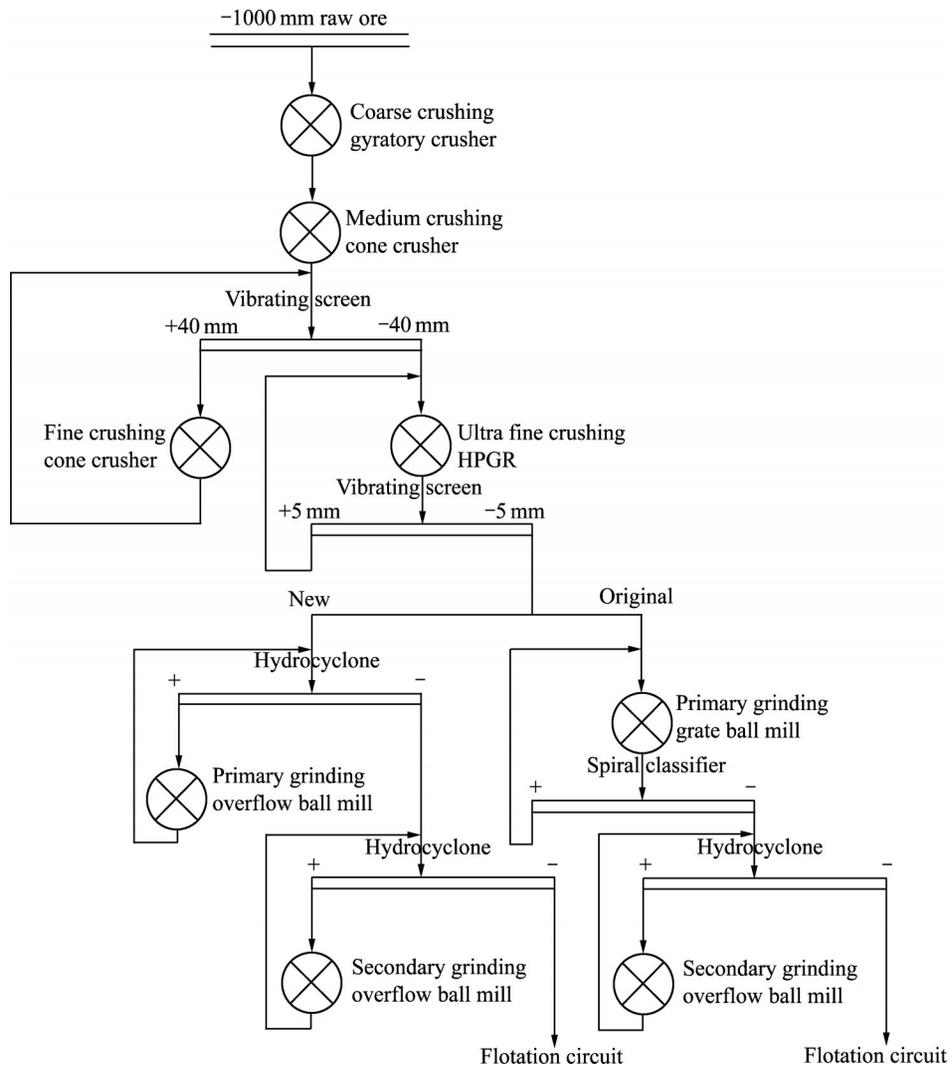


图 10 一选厂改造之后的碎磨工艺流程图

Fig. 10 Crushing and grinding flow chart of No.1 concentration plant after transformation

表 11 一选厂高压辊磨机闭路产品粒度分布

Table 11 Particle size distribution of closed-circuit products of HPGR in No.1 concentration plant

Size/mm	Mass/g	Mass fraction/%		
		Partial amount oversize	Cumulative amount oversize	Partial amount undersize
+5	30.9	3.37	3.37	96.63
-5+4	30.18	3.30	6.67	93.33
-4+3	41.09	4.49	11.16	88.84
-3+2	54.36	5.94	17.10	82.90
2-0.9	149.37	16.31	33.41	66.59
0.9-0.45	102.75	11.22	44.63	55.37
0.45-0.2	68.67	7.50	52.13	47.87
0.2-0.15	68.93	7.53	59.66	40.34
0.15-0.1	29.07	3.17	62.83	37.17
0.1-0.074	13.25	1.45	64.28	35.72
-0.074	327.06	35.72	100.00	
Total	915.63	100.00		

3 结论

1) 新型高压辊磨机结构及辊面设计, 显著地提高了设备使用寿命, 在有色金属选矿碎磨中的应用效果明显, 辊面使用寿命达到 2×10^4 h以上, 高压辊磨机设备运转率达到97%以上。

2) 通过对钨钼选矿三选厂及一选厂高压辊磨机工艺研究和扩能改造, 产能提高67%以上。

3) 根据实验室及现场工艺研究, 高压辊磨机产品的一段Bond球磨功指数相比于传统破碎产品的Bond球磨功指数降低14%~15%, 二段Bond球磨机的功指数也有一定程度的降低。

4) 高压辊磨机+球磨机工艺在干旱缺水地区的选矿厂具备更多的优势; 高压辊磨机+静态分级+动态分级的干式终粉磨系统已经有作为终粉磨工段的实践验证, 在严重缺水地区的选矿厂, 采用高压辊磨机终粉磨系统, 不仅能够满足极少水耗情况下的矿物加工过程, 还能获得显著的节能效果。

REFERENCES

- [1] 瞿 铁, 辛亚涛. 高压辊磨工艺在有色选矿厂的应用实践及前景分析[J]. 矿山机械, 2019, 47(4): 35-39.
QU Tie, XIN Ya-tao. Application of HPGR in mineral processing plant and prospect analysis[J]. Mining & Processing Equipment, 2019, 47(4): 35-39.
- [2] 段希祥. 碎矿与磨矿[M]. 3版. 北京: 冶金工业出版社, 2018: 1-4, 52-65.
DUAN Xi-xiang. Crushing and grinding[M]. 3rd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 1-4, 52-65.
- [3] TAVARES L M. Particle weakening in high-pressure roll grinding[J]. Minerals Engineering, 2005, 18(7): 651-657.
- [4] 陈 波, 王亚强, 王珂刚, 等. 高压辊磨机+搅拌磨碎磨工艺研究[J]. 矿山机械, 2020, 48(5): 50-54.
CHEN Bo, WANG Ya-qiang, WANG Ke-gang, et al. Research on comminution process involving high-pressure grinding roll and stirring mill[J]. Mining & Processing Equipment, 2020, 48(5): 50-54.
- [5] 侯 英, 丁亚卓, 印万忠, 等. 矿石高压辊磨产品球磨功指数计算程序的建立[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11): 4385-4391.
HOU Ying, DING Ya-zhuo, YIN Wan-zhong, et al. Establishment of computation program of bond work index of ball mill of ore crushed by high pressure grinding rolls[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(11): 4385-4391.
- [6] 刘建远, 黄瑛彩. 高压辊磨机在矿物加工领域的应用[J]. 金属矿山, 2010(6): 1-8.
LIU Jian-yuan, HUANG Ying-cai. Applications of high-pressure grinding rolls in mineral processing[J]. Metal Mine, 2010(6): 1-8.
- [7] 刘建远. 再谈高压辊磨机在矿物加工领域的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(5): 66-72.
LIU Jian-yuan. Application of high-pressure grinding rolls in mineral processing revisited[J]. Non-ferrous Metals (Mineral Processing Section), 2016(5): 66-72.
- [8] BURCHARDT E, PATZELT N, KNECHT J, et al. HPGR's in minerals: What do existing operations tell us for the future[C]//Proceedings of Autogenous and Semi-autogenous Grinding Technology Conference, Vancouver: [s.n.], 2011.
- [9] 张建国, 张国旺, 肖 骁. 高压辊磨机碎磨工艺及其在铁矿石粉碎中的应用[J]. 矿山机械, 2015, 43(9): 1-4.
ZHANG Jian-wen, ZHANG Guo-wang, XIAO Xiao. Pulverization technology of HPGR and its industrial application to comminution of iron ore[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(9): 1-4.
- [10] 郑 竞, 董节功, 张 敏. 高压辊磨机用于顽石破碎作业的工艺研究[J]. 矿山机械, 2018, 46(9): 37-42.
ZHENG Jing, DONG Jie-gong, ZHANG Min. Study on technical feasibility HPGR to pebble crushing[J]. Mining & Processing Equipment, 2018, 46(9): 37-42.
- [11] 刘 飞. 高压辊磨机的特点及其在金属矿山的应用[J]. 新世纪水泥导报, 2017, 23(2): 25-28.
LIU Fei. Characteristics of HPGR and its application in metal mines[J]. Cement Guide for New Epoch, 2017, 23(2): 25-28.
- [12] 李 博, 梁溢强, 张 晶, 等. 高压辊磨机的研究进展及未来的发展方向[J]. 云南冶金, 2019, 48(2): 27-30.
LI Bo, LIANG Yi-qiang, ZHANG Jing, et al. Research progress and the future development direction of high-pressure grinding roller[J]. Yunnan Metallurgy, 2019, 48(2): 27-30.
- [13] JANKOVIC A, SUTHERS S, WILLS T, et al. Evaluation of dry grinding using HPGR in closed circuit with an air classifier[J]. Minerals Engineering, 2015, 71: 133-138.
- [14] 陈俊涛, 韩跃新, 袁致涛. 边料闭路循环工艺对高压辊磨机

- 粉碎效果的影响[J]. 矿山机械, 2012, 40(1): 64-66.
- CHEN Jun-tao, HAN Yue-xin, YUAN Zhi-tao. Influence of excessive material closed-cycle circulation process on crushing effect by high pressure grinding roll[J]. Mining & Processing Equipment, 2012, 40(1): 64-66.
- [15] 王建中, 郭 鹏. 某磁铁矿高压辊磨-湿式预选工艺试验研究[J]. 矿业工程, 2021, 19(2): 38-42.
- WANG Jian-zhong, GUO Peng. Experimental study on high pressure roller mill-wet preconcentration process of a magnetite ore[J]. Mining Engineering, 2021, 19(2): 38-42.
- [16] 张 斌, 冯 丹. 浅谈高压辊磨闭路流程的优化[J]. 矿业工程, 2018, 16(2): 32-33.
- ZHANG Bin, FENG Dan. Analysis and discussion regarding closed-circuit process flow[J]. Mining Engineering, 2018, 16(2): 32-33.
- [17] 丁临冬. 冶金矿山高压辊磨机辊面磨损研究[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(3): 95-98.
- DING Lin-dong. Study on roller surface wear of high-pressure roller mill in metallurgical mines[J]. Mining Research and Development, 2014, 34(3): 95-98.
- [18] 唐 远, 印万忠, 迟晓鹏. 破碎方式对低品位金矿石全泥氰化的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(2): 423-429.
- TANG Yuan, YIN Wan-zhong, CHI Xiao-peng. Influence of comminuting methods on full-slime cyaniding of low-grade gold ore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(2): 423-429.
- [19] 侯 英, 印万忠, 朱巨建, 等. 不同碎磨方式下紫金山金铜矿石的磨矿动力学行为[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1127-1133.
- HOU Ying, YIN Wan-zhong, ZHU Ju-jian, et al. Grinding kinetic behaviors of Au-Cu ore from Zijinshan by different comminuting processes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(5): 1127-1133.
- [20] 郭小飞, 代淑娟, 朱巨建, 等. 高压辊磨超细粉碎对钒钛磁铁矿分选的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(5): 1013-1020.
- GUO Xiao-fei, DAI Shu-juan, ZHU Ju-jian, et al. Influence of ultrafine comminution by high pressure grinding rolls on separation of vanadium titanium magnetite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(5): 1013-1020.
- [21] 侯 英, 徐亦元, 杨洪英, 等. 高压辊磨操作参数对磁铁矿石球磨指数影响的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(1): 1-14.
- HOU Ying, XU Yi-yuan, YANG Hong-ying, et al. Influence of operating parameters of high-pressure grinding rolls on bond work index of ball mill of magnetite ore[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 1-14.
- [22] 刘建远, 应 平. 颗粒床压载粉碎对某硫化铜矿石矿物解离的影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(5): 81-87.
- LIU Jian-yuan, YING Ping. Impact of comminution by particle-bed compressive stressing on mineral liberation of a copper sulfide ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(5): 81-87.
- [23] SHARMA R, NIMAJE D S. Effect of open-air and hot-air oven drying on interparticle bonding of iron ore agglomerates [J]. Drying Technology, 2020, 39(3): 348-357.
- [24] POWNELL J E, CICCARELLI S C. Comminution: Putting HPGR technology through its paces[J]. Mining Magazine, 2013(6): 74-76.
- [25] 刘 磊, 曹进成, 吕 良, 等. 不同破碎方式下磨矿技术效率[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(9): 2566-2574.
- LIU Lei, CAO Jin-cheng, LÜ Liang, et al. Grinding technical efficiencies in various comminution modes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9): 2566-2574.
- [26] 魏 波, 张宪伟, 李丽匣, 等. 高压辊磨机粉碎工艺国外应用进展与发展趋势[J]. 金属矿山, 2022, 548(2): 10-18.
- WEI Bo, ZHANG Xian-wei, LI Li-xia, et al. Progress and development trend of high-pressure grinding rollers comminution circuits abroad[J]. Metal Mine, 2022, 548(2): 10-18.
- [27] BURCHARDT E. Dry finish grinding with HPGRs: the next step ahead in mineral comminution[J]. Proceedings of the XXVII IMPC. Santiago, Chile: [s.n.], 2014, 17: 153.
- [28] 王继生, 郝 兵, 张光宇, 等. 一种新型的高压粉碎辊磨机: ZL200520000746.9[P]. 2006-05-24.
- WANG Ji-sheng, HAO Bing, ZHANG Guang-yu, et al. A new type of high pressure crushing roller mill: ZL200520000746.9[P]. 2006-05-24.
- [29] 王亚强, 祖大磊, 郝 兵, 等. 一种新型挤压辊类辊面结构: CN201110367506.2[P]. 2011-11-18.
- WANG Ya-qiang, ZU Da-lei, HAO Bing, et al. A new roll surface structure of extrusion roll: CN201110367506.2[P]. 2011-11-18.
- [30] 张光宇, 王亚强, 王素玲, 等. 一种辊压磨的柱钉式辊面结构及柱钉更换方法: CN201010136778.7[P]. 2010-03-23.
- ZHANG Guang-yu, WANG Ya-qiang, WANG Su-ling, et al. A column nail type roller surface structure of roller press mill and column nail replacement method:

- CN201010136778.7[P]. 2010-03-23.
- [31] 张光宇, 崔朗朗, 郝兵, 等. 一种换辊装置及方法: CN200810187840.8[P]. 2008-12-24.
- ZHANG Guang-yu, CUI Lang-lang, HAO Bing, et al. A roll changing device and method: CN200810187840.8[P]. 2008-12-24.
- [32] 张光宇, 王亚强, 王素玲, 等. 一种新型柱钉式辊面结构: CN201020146215.1[P]. 2010-10-27.
- ZHANG Guang-yu, WANG Ya-qiang, WANG Su-ling, et al. A new type of column nail roller surface structure: CN201020146215.1[P]. 2010-10-27.
- [33] 邹艳. 钼矿选矿技术进展[J]. 冶金与材料, 2021, 41(2): 129-130.
- ZOU Yan. Progress in molybdenum minerals dressing technology[J]. Metallurgy and Materials, 2021, 41(2): 129-130.
- [34] 何荣权, 秦华江, 杨少艳, 等. 某钼选矿厂技改工程的厂址选择[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(12): 138-142.
- HE Rong-quan, QIN Hua-jiang, YANG Shao-yan, et al. Site selection of the technical renovation project of a molybdenum concentrator[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(12): 138-142.

Structure and process of HPGR for non-ferrous metal beneficiation

QU Tie^{1,2}, YANG Jian-bo^{2,3}, XIN Ya-tao^{1,2}, CHE Wen-fang³

(1. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471000, China;

2. State Key Laboratory of Mining Heavy Equipment, Luoyang 471000, China;

3. China Molybdenum Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: Through the research of the structure and process of HPGR, this paper demonstrated the application prospect of HPGR in the non-ferrous mineral processing industry. The results of ultrafine crushing and grinding test of HPGR indicate that the non-ferrous ore is greatly improved by the new-type HPGR after ultra-fine crushing, which can greatly improve the processing capacity of the ball mill and effectively reduce the Bond work index. After the industrial production practice verified, the two concentration plants upgraded and transformed the grinding system through HPGR, the particle size (F_{95}) of the ball mill feed reduces from less than 12 mm to less than 5 mm, and the Bond work indexes of ball mill feed reduce from 13.78 and 11.64 kW·h/t to 11.84 and 9.94 kW·h/t, respectively. The overall processing capacity of the concentration plants increases by about 67%.

Key words: mineral processing; HPGR structure; HPGR process; non-ferrous processing; energy conservation and efficiency

Received date: 2021-07-17; **Accepted date:** 2021-11-09

Corresponding author: QU Tie; Tel: +86-379-6408005; E-mail: qutie@citic-hic.com.cn

(编辑 龙怀中)