铜冶炼炉渣回收选铁的实践和探索

谢钿生，李帅伟

（赤峰金通铜业有限公司，内蒙古 赤峰 0240000）

摘 要：金通公司采用炉渣缓冷、浮选回收铜，再磁选回收选铁工艺。经过生产组织及关键工艺控制指标优化，并加以技术攻关，在保障炉渣有效回收选铜各项指标后，产出了 50% 以上的铁精矿，熔炼渣与吹炼渣混合磁选铁精矿较原矿产率达到 35%，大幅度实现了尾矿减量化，更为公司增创了大额效益。

关键词：铜冶炼炉渣；回收选铁；磁选；尾矿减量化；增创效益

中图分类号：TF811；X75　　**文献标识码**：A

文章编号：1009-3842（2022）02-0050-06　　**开放科学（资源服务）标识码（OSID）**：

Production Practice of Copper Smelting Slag Recovery and Iron Separation

XIE Dian-sheng LI Shuai-wei

（Chifeng Jintong Copper Co., Ltd., Chifeng 024000, Neimenggu, China）

Abstract: Jintong Company adopts the process of slow cooling slag, flotation to recover copper, and magnetic separation to recover iron. After the optimization of production organization and key process control indicators and technical research, and after ensuring the effective recovery of slag and copper selection indicators, more than 50% of iron concentrates is produced, and the smelting slag and blowing slag are mixed with magnetic separation of iron concentrate. Compared with the production rate of raw ore reaching more than 35%, the tailings reduction has been greatly achieved, and the large amount of benefits have been created for the company.

Keywords: copper smelting slag; recycling iron; magnetic separation; tailings reduction; create benefit

1 引言

铜冶炼生产过程，会产生大量的炉渣，炉渣产量一般是铜产能的 2~3 倍，而且炉渣含有各类金属元素，尤其是含铜仍较高，一般含铜 0.5%~6%，甚至更高。如果直接弃渣，将造成大量铜金属的损失，通常需要配套建设渣选矿回收铜金属，使尾砂矿含铜控制在 0.3% 以下才进行弃渣[1-6]。尾矿属于一般固废，由于产量巨大，堆存困难。在我国南方地区，水泥厂等建材企业诸多，可以作为水泥厂等建材企业的辅料使用；在我国北方，水泥厂等建材企业分布较少，且因气候影响，相关企业开工率低，造成铜冶炼炉渣市场需求非常有限，只能堆存，甚至额外增加成本进行处理。综上所述，迫切需要开展炉渣综合利用工艺研究开发。通过对炉渣的特性进行分析，结合各类回收利用资料及有关研究进展，发现炉渣除回收铜金属外，最有可能的综合利用方式是回收炉渣的铁金属。炉渣一般含铁 38%~47%，由于炉渣属于人造矿石，且铁金属多以化合物的连生体特性存在，不同于矿山的原生铁矿，炉渣极难选矿回收，这也导致当前炉渣回收选铁技术仍停留在实验研究阶段。

铜冶炼炉渣因其特性，难以产出矿山原生铁精矿品质，故选出的铁精矿价格及市场仍有限。根据市场调研，炉渣生产的铁精矿，产品品质的主要关键指标是含 Fe 品位、Zn 元素含量，其中铁精矿含量分为 50%、55%、60% 各点区间的不同品质，锌为 1%、2% 各点区间的不同品质。

收稿日期：2021-11-26

作者简介：谢钿生（1988—），男，江西赣州人，工程师，本科，主要从事铜冶炼及选矿生产管理与技术研究工作。E-mail: xiediansheng2008@163.com

2　渣选矿工艺

金通铜业公司地处中国北部内蒙古赤峰，金通公司渣选厂设计处理能力为 2000t/d，年处理炉渣约 62 万 t，其中熔炼渣 53 万 t，转炉渣 9 万 t。铜冶炼火法是采用富氧侧吹炉熔炼—智能数控吹炼炉吹炼—回转式阳极炉火法精炼的生产工艺，侧吹熔炼炉炉渣和智能数控吹炼炉炉渣经缓冷后渣选矿。采用 SAB 碎磨 + 中矿单独再磨，磨矿产品经过两次粗选、三次扫选、三次精选 + 中矿单独再磨返回粗选选别工艺产出铜精矿，选铜尾矿进行磁选回收炉渣中的磁铁矿。详细工艺流程见图 1。

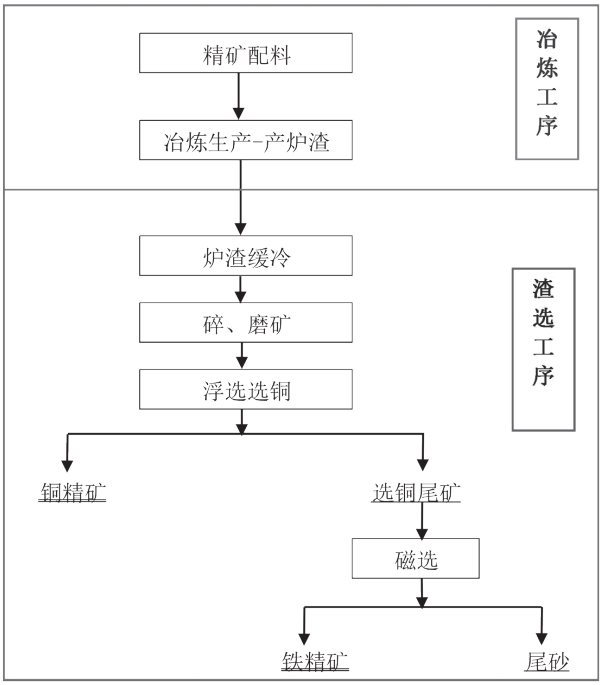


图 1　炉渣选矿工艺流程

3　炉渣特性

从元素组成看，炉渣主要由铁、硅、氧组成，三种元素占总质量的 80%以上，另外还含有铜、锌等有色金属元素及硫、磷、铅、砷等有害杂质元素。从矿物组成看，铜渣的主要矿物组成是铁橄榄石 (Fe_2SiO_4)、磁铁矿 (Fe_3O_4) 及一些脉石组成的无定形玻璃体。铜渣中铁主要存在于铁橄榄石、磁铁矿、锌铁尖晶石 ($ZnFe_2O_4$) 中，另有极少量以赤铁矿、金属铁等形式存在[2-6]。选取 2021 年 6 月份的一批次的生产样进行检测分析，熔炼渣与吹炼渣按照 5∶1 混合选矿。

3.1　入选原矿的主要化学成分分析（表 1 和表 2）

3.2　主要的矿物（相）组成及相对含量研究

原矿的 X- 射线衍射分析结果见图 2。由图可

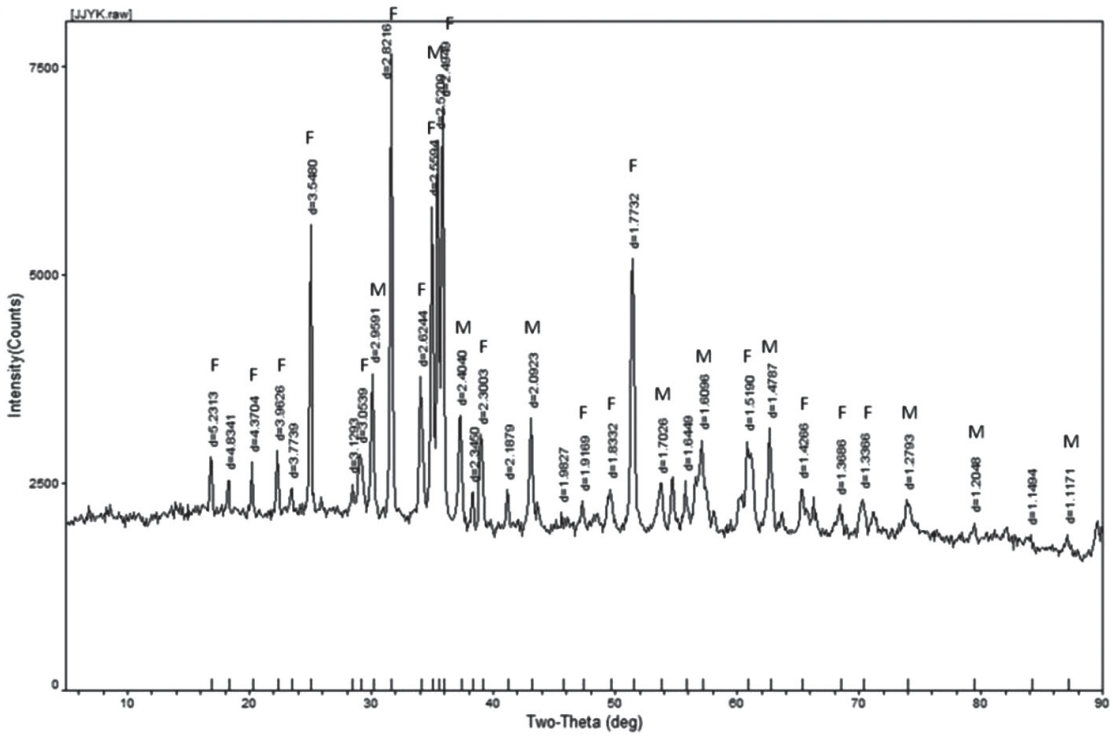


图 2　X- 射线衍射分析结果（F- 铁橄榄石；M- 磁铁矿）

知，产品中的物质主要为铁橄榄石和磁铁矿。

表 1　炉渣的多组分分析结果

化学成分	Cu	Pb	Zn	TFe	As	Co
含量 /%	1.83	0.86	2.74	45.38	0.056	0.027
化学成分	Mn	S	P	SiO_2	Al_2O_3	CaO
含量 /%	0.03	1.2	0.045	25.22	3.27	0.92
化学成分	MgO	K_2O	Na_2O	Au*	Ag*	
含量 /%	1.26	0.72	0.42	0.12	7.41	

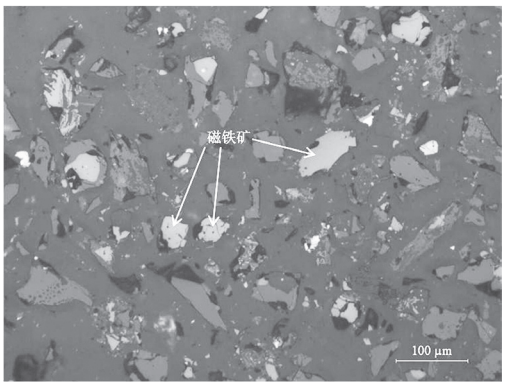
注：* 单位为 g/t

表 2　铁的化学物相分析结果　　%

相别	磁性氧化铁	磁性硫化铁	非磁性硫化铁	赤褐铁矿	硅酸铁	总铁
铁含量	22.17	0.2	0.67	0.03	22.3	45.37
占有率	48.86	0.44	1.48	0.07	49.15	100

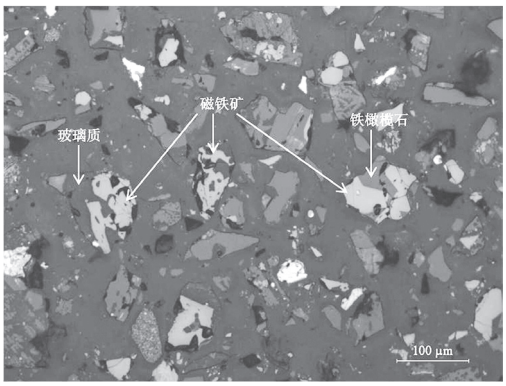
3.3　磁铁矿嵌布分析

磁铁矿是产品中主要的铁矿物，磁铁矿含杂较多，普遍含铝、硅、钛和锌，少量含钠、镁、硫和铬。磁铁矿一般呈粒状、不规则状产出，部分呈鱼骨状及树枝状。磁铁矿一般以单体形式产出（图 3）；此外，也有较多磁铁矿与铁橄榄石、玻璃质等连生（图 4 和图 5），少量细粒磁铁矿被包裹在其中；有时磁铁矿与冰铜、硫化铅和锌铁硫化物等硫化物连生（图 6）；有时磁铁矿与铅铁硅酸盐连生（图 7）。



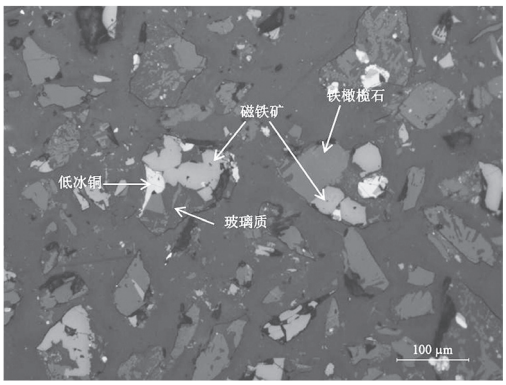
显微镜　反光

图 3　磁铁矿呈半自形粒状单体产出



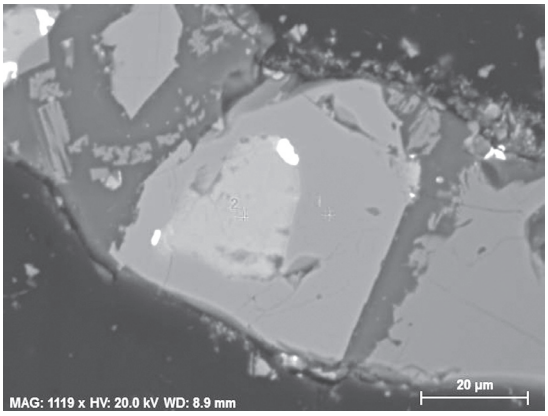
显微镜　反光

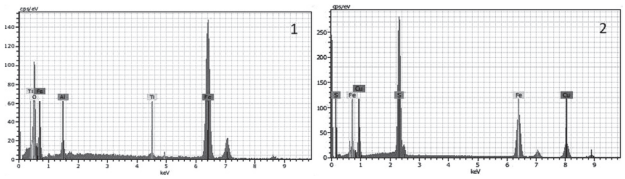
图 4　磁铁矿与玻璃质、铁橄榄石连生



显微镜　反光

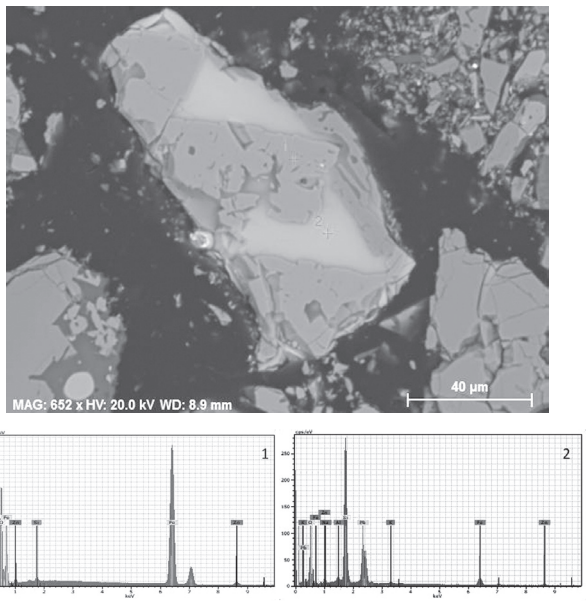
图 5　磁铁矿与铁橄榄石、玻璃质和低冰铜连生





背散射电子图

图 6　磁铁矿（1）中包裹低冰铜（2）



背散射电子图

图 7　磁铁矿（1）与铅铁硅酸盐（2）连生

3.4　炉渣中铁的赋存状态

铁的元素平衡计算结果见表 3。由表可知，铁主要以铁橄榄石和磁铁矿的形式存在，分别占 47.80% 和 47.73%，另有少量分布在玻璃质、硫化铁、锌铁硫化物、冰铜等物质中。其中，硅酸铁（铁橄榄石、玻璃质和铅铁硅酸盐）中的铁占 50.06%。

表 3　铁在各物质中的平衡配分　　%

物质名称	物质含量	物质中铁含量	铁金属量	铁占有率
磁铁矿	32.64	66.43	21.68	47.8
铁橄榄石	46.45	46.6	21.65	47.73
玻璃质	13.69	6.15	0.84	1.86
低冰铜	0.75	41.78	0.31	0.69
锌铁硫化物	1.1	27.94	0.31	0.68
铅铁硅酸盐	2.6	8.31	0.22	0.48
硫化铁	0.33	61.39	0.2	0.44
高冰铜	0.46	17.04	0.08	0.17
赤铁矿	0.04	70	0.03	0.07
白冰铜	0.73	2.35	0.02	0.04
金属铜	0.81	2.39	0.02	0.04
氧化铜	0.05	4.74	0.002	0.01

3.5　铁相的解离特征研究

当浮选选铜给料细度为 –0.045mm 占 84% 时，开展铁相的解离特征研究，测定磁铁矿的单体解离度为 50.79%，单体解离均不充分。磁铁矿单体及与非金属相富连生（>1/2）部分占有率为 75.33%，这部分磁铁矿回收相对较好，测定结果见表 4。同时对磁铁矿嵌布粒度进行检测，粒度分布均较细，集中分布在 0.043mm 以下，详见表 5。

考虑到连生体部分是影响铁选矿指标的重要因素，特对磁铁矿的连生体部分的粒度进行了统计。统计结果显示，磁铁矿连生体集中分布在 0.02~0.043mm 之间，其中在 – 0.010mm 粒级，磁铁矿连生体的占有率高达 10.53%（占总磁铁矿 5.18%）。这部分细粒铜、铁主要与铁橄榄石、玻璃质连生，较难单体解离。结果见表 6。

表 4　磁铁矿的解离特征

类别	单体 /%	连生体 /%							
		与磁铁矿	与铜相	与硫化相	与非金属相				
					>3/4	3/4 ~1/2	1/2 ~1/4	<1/4	包裹
磁铁矿	50.79	–	2.09	0.36	13	11.54	10.99	8.1	3.12

表 5　磁铁矿的嵌布粒度

粒级 /mm	磁铁矿	
	含量 /%	累计 /%
0.147	0.69	0.69
–0.043	0.51	1.2
–0.03	1.8	3
–0.031	17.5	20.5
–0.023	44.77	65.27
–0.005	10.59	75.86
–0.005	10.78	86.63
–0.01	13.37	100

表 6　磁铁矿连生体的嵌布粒度

粒级 /mm	磁铁矿连生体	
	含量 /%	累计 /%
–0.043	1.39	1.39
–0.03	1.05	2.44
–0.031	10.89	13.33
–0.023	55.26	68.59
–0.005	9.92	78.51
–0.005	10.97	89.47
–0.01	10.53	100

表 7 2021 年 1~10 月份主要生产工艺及指标

项目	月份	入选原矿各元素含量 /%			选铜尾矿 /%		铁精矿各元素含量 /%			选铁尾矿 /%		铁精矿产率 / 较磁选给矿	磁选机
		Cu	Fe	SiO_2	Cu	Fe	Cu	Fe	SiO_2	Cu	Fe		
试生产阶段	1 月	2.32	44.24	30.50	/	/	0.3	47.94	/	0.26	45.42	/	1500GS
	2 月	2.47	42.31	30.50	/	/	0.31	45.32	/	0.26	42.54	/	1500GS
	3 月	2.16	41.76	31.85	/	/	0.29	46.94	/	0.25	43.37	/	1500GS
	4 月	2.05	41.14	31.6	/	/	0.28	47.58	/	0.24	42.67	/	1500GS
	5 月	2.33	42.95	32.00	/	/	0.28	48.25	/	0.22	43.85	/	1500GS
转正常生产阶段	6 月	2.10	44.14	29.02	0.21	46.35	0.26	50.8	22.71	0.17	43.10	23.43	1500GS
	7 月	2.18	43.44	29.77	0.22	44.58	0.28	50.27	23.01	0.20	41.37	27.65	1500GS
	8 月	2.11	44.39	29.17	0.20	45.81	0.25	51.05	22.78	0.18	42.39	25.76	1500GS
	9 月	2.26	44.86	29.41	0.22	46.46	0.27	51.12	23.52	0.19	42.31	39.55	2400GS
	10 月	2.22	44.65	29.71	0.21	46.46	0.25	50.69	24.36	0.17	42.60	42.70	2400GS

4 渣选矿生产实践

熔炼渣含铜为 1%，转炉吹炼渣含铜为 4%，基于熔炼渣含铜低，设计了熔炼渣与转炉渣按照 4∶1 进行混合选矿，采用渣缓冷和选矿工艺回收渣中的有价金属铜。熔炼渣含铁 41%~45%，转炉吹炼渣含铁 47%~51%，实际生产会根据两种炉渣中主要的铜、铁含量不同变化，采用不同配比后混选。通过对 2021 年 1~10 月的生产主要指标结合生产实际进行综合分析，其中 1~5 月份为试生产阶段，6 月份以后转正常生产。尾矿含铜初期设置在选铁尾矿，指标的有效性及铜损节点不科学。6 月份将尾矿含铜指标前置到选铜尾矿，经过近 1 年的实践生产及优化，选铜尾矿含铜基本可控制在 0.23% 以下，较好保证了炉渣铜的回收率；铁精矿品位也由最低 45% 提升到 50% 以上，且通过工艺控制优化及设备改造创新，磁选给矿铁精矿产率达到 40% 以上，折算入选原矿铁精矿产率可稳定在 35% 以上，主要指标详见表 7。

4.1 原料炉渣

通过对各班次生产数据统计发现，如果想要产出 50% 品位的铁精矿：一是熔炼炉渣含铁不应低于 42%，否则混选配料下，也难以产出 50% 铁精矿，且熔炼渣 Fe/Si 比不应低于 1.5，炉渣 SiO_2 不应高于 30%；二是如果熔炼渣单选，炉渣含铁不低于 44%，否则难以产出 50% 品位铁精矿。在实际生产中，熔炼渣与吹炼渣的配比，关键是要控制入选原矿含铜品位，不应高于 3%，这样既可以保证选铜各项指标稳定且良好；又可在此基础上，进一步测算入选原矿含铁品位，更加科学配料。通常入选原矿含铁不低于 43.5%，可产出 50% 以上品位铁精矿，实现炉渣选矿回收铜、铁经济效益最大化。

4.2 浓度控制

根据磁选机设备设计要求，给矿浓度为 25%~45%。在试生产阶段，入磁选浓度偏高，最高达到 50%，导致磁铁矿跑尾高。虽然磁选机设计在分料箱上方有补水管，但因该位置距离入磁选滚筒距离过近，造成补水稀释浓度不够均匀。通过将调浆补水管改造前置到选铜尾矿溢流箱出口，提高了入磁选矿浆浓度均匀性，实际生产入磁选浓度控制为 35%~45%，效果更佳。

4.3 细度控制

在试生产阶段，各工艺控制条件不够稳定，波动较大，入浮选浓度 0.045mm 仅占 80%。6 月份依据工艺矿物学研究基础，进一步优化工艺控制，根据铜、铁及化合物分布粒度范围，强化磨矿浓度、适合的球比、细度指标控制，将入浮选细度提升了 0.045mm 占比达到 84% 以上，有效提高矿物解离效果。通过生产实践，在保持成本可控条件下，制定了各磨矿环节细度控制要求：半自磨出口细度 0.074mm 占比 50% 以上，球磨机出口细度 0.045mm 占比 75% 以上，立磨机出口细度 0.030mm 占比 90% 以上，入浮选细度 0.045mm 占比 83% 以上，入磁选细度 0.045 占比 80% 以上。

4.4　磁选设备改进优化

初期使用的是 CTB-1200×3000 永磁筒式磁选机，其磁系由铁氧体磁块组成，适于分选强磁性矿物，根据各种矿物不同的比磁化系数，利用磁力进行分选。

经过近半年的生产，通过提高给矿含铁品位，该磁选机可以产出 50% 品位铁精矿，但通过试验及比较分析可知：一是经磁选机选铁后，尾矿含铁仍很高，且磁性铁含量高，表明磁铁矿跑尾高；二是该磁选机产率偏低，通常是 20%~27%，铁回收率低。为此，在 8 月份开展了磁选机磁系场强试验。研究表明该原料及工况条件下，磁系场强提升到 2400GS 更为适宜。8 月份将磁选机的磁系场强由 1500GS 改造提升至 2400GS，其磁系由稀土永磁磁块组成；三是对磁选机铁精矿卸料装置进行技术创新改造，使磁选机高效卸料，卸料率超过 99%。从 9 月、10 月生产结果看，效果显著，铁精矿品位保持在 50% 以上，产率提升至 35% 以上，磁选尾矿含铁品位也进一步降低。

4.5　优化建立完善生产管理体系

一是从生产管理着手，完善了生产管理标准、建立生产管理制度。厂部每天审批下发生产指令书，细化生产关键工艺控制参数的稳定性，选取合适的炉渣配比方案，保障选铁原矿含铁品位。二是强化生产工艺控制标准及参数设置，建立了《金通渣选厂选矿生产管理体系》手册，精确组织生产管理。自 6 月份以来，持续每周开展生产分析例会，精准和系统地管控生产过程。三是强化设备预防保全管理，细化管道、泵类、磨机大型设备的维保，保障生产持续稳定运行。四是强化技术革新和科技攻关，以《炉渣选铁提品增效综合技术研究》课题为平台，先后开展大量技术研究工作，强化技术方案的集智研讨，提升技改效能，目前已申报 2 项发明专利。

5　结语

项目于 2020 年 11 月份投料试生产，采用熔炼渣与转炉渣混选生产。经过近一年的生产实践与优化改进，通过持续的技术攻关与优化，渣选主要技术经济指标良好，尾矿含铜＜ 0.23%，炉渣混选回收选铁效益显著，铁精矿品位从最低的 45% 提升到 50% 以上，产率从最初的 10% 不到提升到 35% 以上，大幅度实现尾矿减量化。按照目前铁精矿产量及 50% 品位市价测算，仅铁精矿产品为企业年增效益千万元。

从当前的铁精矿生产情况看，只达到铁精矿第一阶段的品质要求，根据有关资料与技术方案，结合炉渣的工艺矿物学研究，铁精矿品质还有进一步的提升空间；另外针对转炉渣含铁已达到 50% 左右，如何在保障炉渣回收选铜各项指标下，更有效地回收选铁与创造更高效益，还有待进一步研究、探索与实践。

参考文献：

[1] 刘春，黄丽娟．铜冶炼炉渣浮选尾矿中选铁的试验研究 [J]. 福建冶金，2016（2）:1-6.

[2] 郭秀键，倪晓明，马丁，等．铜渣处理与综合利用 [J]. 有色冶金设计与研究，2017（2）:23-26.

[3] 杨丽平．铜冶炼转炉渣无尾矿选矿的研究与生产实践 [J]. 世界有色金属，2019(24) :7-9.

[4] 代献仁，张永．某炉渣选铜试验及生产实践 [J]. 现代矿业，2019, 35(10) :146-149.

[5] 汪永红．某公司炼铜炉渣浮选尾矿回收铁的试验研究 [J]. 有色冶金节能，2020(4):66-69.

[6] 刘长东，张晓丹，车贤，等．铜冶炼渣矿物学研究与资源化实践应用 [J]. 中国资源综合利用，2020(2):18-24.

[7] 邱廷省，周丽萍，李国栋．铜冶炼渣直接还原焙烧——磁选回收铜、铁试验研究 [J]. 金属矿山，2020,(9) :202-207.

[8] 杨野，杨超，高广磊．铜冶炼炉渣综合利用技术的研究 [J]. 世界有色金属，2021,(17)：1-2.