

前 言

有色金属矿石，特别是重金属矿石的基本特征是主要金属含量低，組成十分复杂，往往伴生着各种重金属、贵金属、稀有金属以及相当大量的鉄和硫。因此，矿石原料的綜合利用乃是现代有色冶金所面临的最重要的問題之一。通过复杂矿石的綜合利用和生产废料的合理处理，不仅可以更充分地利用矿产資源、更經濟地处理貧矿石，而且还是提取鈷、鎳、金、銀及鉑族金属特别是稀散金属的主要来源。随着现代科学技术的发展，以及选矿、冶金工业中某些新技术，如水冶选矿联合流程、固体流态化技术、高压水法冶金、氯化过程、高温优先熔炼法、离子交换、液-液萃取和汞齐冶金等的出现和推广，近年来在提高矿石原料的綜合利用程度上已获得了很大的进展。

本专輯着重收集了鎳、鈷冶金中矿石的綜合处理、阳极泥处理以及炉渣的貧化和进一步利用等方面的文献，并介紹綜合提取鋳、鋁、錫、鉛、鋅等金属的某些工艺流程。

本专輯供有色冶金科研人員、技術人員及高等学校师生参考之用。

本专輯由上海冶炼厂刘耀中和上海工学院陈世瑄主編。为使譯文的內容更切合我国的生产实际，热望讀者对选题、翻譯等方面多多提出批評和建議。

1964年12月

目 录

鷹桥鉄矿处理过程	1
从紅土鉄矿中回收鎳和鈷	21
同时生产鎳銻和鈣鎂磷酸盐	30
鈷和鎳的回收	42
提高銅电解厂的鎳回收率	44
交换萃取法分离金属	51
浸出 Pozoblanco 矿床的复杂矿石以提取鉍、銅、鎳和鈷	54
用硫化鈣从液态废渣中回收鎳和鈷	66
在有色金属及硫酸生产过程中附带回收稀有及稀散元素	70
在工业焙烧炉中由粒化銅阳极泥提取鉍	81
处理鎳电解阳极泥的浮选压煮流程	84
处理銅鎳电解泥渣的工艺改进	90
从銅电解阳极泥焙烧渣中提取铈的工艺改进	94
从硫酸厂的废料中提取鉍和铈	99
对砷、鉛含量高的含鉍产物的处理	104
从处理褐煤的副产品中制取二氧化鋇	112
离子交换剂在选择性提取鋇方面的工业应用	1
应用改良的吸附剂选择性地提取鋇	134
处理复杂硫化矿石的硫酸盐化过程	137
鉍的回收	157
粗鉛精炼时选择性回收錫	170
有色冶金炉渣綜合处理的基本途径	173

鷹桥鉄矿处理过程

P. G. Thornhill

引 言

早在 1951 年鷹桥矿业公司就开始了一项研究计划,其目的在于发展一种硫酸化焙烧过程,来从鷹桥矿石的含镍磁黄鉄矿部份中回收有色金属,以便减少送入熔炼炉中的鉄的吨数。期望这样一种方法,能从一个在另一种情况下加入熔炼炉給料內的磁黄鉄矿中获得高的镍提取率;这样不仅可提高熔炼炉給料的品位,和降低其鉄含量,而且还提供可用作产鉄矿来源的氧化鉄残渣。

在早期的探索性实验室試驗工作中曾发现,用硫酸化焙烧处理使镍轉变为可溶性的程度,系受矿粒大小和从磁黄鉄矿精矿中除去镍黄鉄矿的程度所限制;后者在精矿中可以机械分离,并且是一种相当难于焙烧的矿物^[1]。这样,研究计划将是双重的,要求解决选矿和水冶两个問題,采用选矿技术例如磁选和表层浮选 (Scalp flotation) 解决了前一問題,但对后一問題則要求发展一种新的焙烧-浸出法,本文的主题就是論述这个方法。

初 步 研 究

如最初被 Hybinette^[2] 和后来被 Kichline^[3] 及 Sproule^[4] 等所发现的那样,在硫酸化焙烧反应中砷金属盐类对促进硫酸镍的生成看来具有独特的效果。早在为本法打下基础的研究中就已发现的这一现象,同样适用于鷹桥磁黄鉄矿精矿中所含的镍,并且一开始就被认为是进一步发展焙烧-浸出法的重要因素。因此显然可见,在工业上可实现的焙烧-浸出流

程的基本要求，是在与硫酸鈉这样一种盐类相接触的条件下进行硫酸盐焙烧反应。当然，附加的要求是可以控制的温度和气氛条件，和提供适当的气-固相接触。因为流化床焙烧看来能满足这些要求，所以和 Battelle Memorial 研究所一起安排了一项目的在于发展这一技术的研究计划(該所在流化床硫酸化焙烧領域中的早期活动后来被 Stephens^[5] 描述过)，并且初步的尝试包括，在添加和不添加粒状硫酸鈉这两种条件下干燥磁黄铁矿精矿的实验室规模的流化床焙烧。虽然不加硫酸鈉时鎳溶解度很小，但是却发现磁黄铁矿在流化床设备中焙烧良好。另一方面，当往装料中加入粒状硫酸鈉时，由于結块而使炉床不能流化。利用向 200 篩目的干燥磁黄铁矿精矿中添加饱和硫酸鈉溶液，其加入量足以使混合物含有 4% 干基硫酸鈉就能解决这个问题。在制粒和干燥之后，混合物的由含有少量細料的 10 篩目的团块所組成；并且发现这种状态的混合物是理想的适合于用作实验室规模的流化炉的給料，可用水从制得的焙砂中浸出其中含鎳量的 85% 以上。在这些結果的基础上决定将研究工作移回鷹桥，在这里試驗工作可以在足够大的规模上繼續进行，以便能发展一种矿浆給料法。

焙烧中間試驗工厂

第一座中間試驗焙烧炉为矩形結構，它由內衬火砖和絕热砖的焊接鋼质炉室、装置着空气分布噴咀的鋼制炉底、和位于炉底下面的四室式风箱所組成。焙烧炉室的内部尺寸为 2 呎 × 5 呎 9 吋 × 16 呎(高)，并且分别在空气分布噴咀之上 6 呎、3 呎和 3 呎 6 吋的炉壁上，备有供油燃燒器、焙砂溢流、和返回旋风收尘器烟尘用的孔洞。在 4 呎水平处备有給料进口，以便在流化床表面附近加入矿浆；而炉气出口則位于炉室的頂上。烟道导往两个串联的 2 呎 Buell No. 19 型旋风收尘器，排出的气体送入烟囱，捕集到的烟尘則由 6 呎螺旋給料器返回焙烧炉。这一设备还包括鼓风机、和空气計量装置、温度記錄装置、給料制备槽和貯槽，以及用于处理磁黄铁矿精矿和将制备好的矿浆加入炉中的泵。

矿浆給料法的发展

在建立了預热过的起始焙砂炉床之后，将大約由 70% 磁黄铁矿精矿

(被磨細到至少有95%通过200篩目)和30%水份所构成的矿漿直接加入流化床中,首次获得了稳定的炉子作业。但是当用硫酸鈉溶液代替水来制备矿漿时,发现炉床振蕩迅速减弱(rapid degeneration of the bed),最終导致流化状态的完全消失。当直接加料到炉床表面时,含盐矿漿不能碎裂的原因,看来是由于硫酸鈉在精矿顆粒上的粘附作用;并且只要还是将湿矿漿加到炉床上,則采用包括用压缩空气噴散矿漿在内的几种类型的給料枪,来防止上述现象的尝试并无任何效用。通过位于炉頂上的用1/8吋管制成的給料管,将矿漿与压缩空气流一道送入炉中,克服了上述困难。这一方法首先保证了,矿漿給料流被分散成許多小滴;其次还保证了,在小滴下降经过从流化床表面升起的热焙烧炉气时,小滴即失去其水份。矿漿小滴一經干燥,就沒有結块或熔合的傾向,但精矿顆粒被硫酸鈉結合,保持为相互分离的小团块;并进入流化床焙烧,除了包含于焙烧反应本身的变化之外,沒有其他的物理变化。当在1250°F左右,并采用大約100%的过剩空气进行焙烧时,則产出的焙砂中所含鎳、銅和鋅有90%以上成为水溶性的硫酸盐,焙砂具有从10~100篩目的粒度分布范围。列出于表1中的篩分析,是用水浸出前、后的产品的典型分析。

表 1. 中間試驗焙烧炉焙砂的篩分析

篩 目	重 量 百 分 数	
	浸 出 前	浸 出 后
+ 10	5.2	0.4
+ 14	7.8	0.4
+ 20	15.3	1.2
+ 28	19.7	5.0
+ 35	17.7	11.1
+ 48	10.8	15.2
+ 65	6.0	14.8
+ 100	5.0	11.1
- 100	12.5	40.8
	100.0	100.0

为了保持炉床中的流化状态和实现焙烧反应，每一平方呎炉底面积所需空气量为 20~25 标准立方呎/分钟 (S.C.F.M.)，相应的給料速率为每小时 200~300 磅磁黄铁矿精矿。

浸出及溶液处理方法的发展

根据焙烧半工业试验工厂中产出的焙砂的颗粒性质，提出了渗滤浸出；但是探索性试验的结果表明，浸出过程正好伴随着焙砂颗粒的充分减小，从而引起渗滤柱的堵塞。

因此，采用实验室规模的逆流倾析法来制备浸出液和不溶残渣。给出的结果包括在表 2 的典型数据中。

表 2. 含镍磁黄铁矿的焙烧-浸出

产 物	重量, 克 或 体积, 毫升	分 析, % 或 克/升				镍的分 布率, %
		Cu	Ni	Fe	S	
磁黄铁矿精矿	1000	0.15	1.40	51.5	33.2	100.0
磁黄铁矿焙砂	950	0.16	1.47	54.3		100.0
浸 出 残 渣	780	0.03	0.17	63.5	0.20	9.3
浸 出 液	847	1.50	15.00	25.0		90.7

当溶液的 pH 处于 1.0 和 1.2 之间时，发现浸出液中铁含量的 20% 左右以亚铁状态存在，而其余的则为高价铁。用石灰石进行中和以净化溶液的尝试大部份没有成功，这是由于产生大量的沉淀，并且亚铁对这些沉淀的过滤特性有不利的影晌。因此，看来更希望设计一种从事先没有除去铁的溶液分离出镍的方法；并且用硫化钠进一步试验的结果表明，从首先已将全部铁基本上还原为亚铁状态的溶液中，可以使有色金属呈硫化物形态选择性沉淀。使溶液与新鲜的磁黄铁矿精矿相接触，以方便地实现溶液的还原。用工业硫化钠薄片处理已还原了的浸出液，其用量为溶液中每磅 Cu + Ni + Co 加入 1.60 磅 Na₂S，这些硫化物沉淀试验的典型结果列于表 3 中。

表 3. 銅、鎳和鈷的硫化鈉沉淀

产 物	重量, 克 或 体积, 毫升	分 析, % 或 克/升				pH
		Cu	Ni + Co	Fe ⁺⁺	Fe ⁺⁺⁺	
已还原了的溶液	1000	1.58	16.50	29.6	1.5	1.4
沉 淀	47.3	3.53	36.94	3.6		
废 液	950	痕迹	痕迹	30.0		3.1

鉄矿中間試驗工厂的設計

因为焙烧中間試驗工厂的产量比較小, 不足以使用实际的連續法进行浸出和溶液处理設備的作业, 所以决定在迟至 1953 年末完成半工业試驗焙烧計劃, 建造一座新的中間試驗工厂, 采用工业规模的单元設備, 并包括有完整的浸出和溶液处理系統。

此工厂是以两座流化床焙烧炉为基础布置的。焙烧炉由 Foster Wheeler 有限公司按照馬橋的詳細規定进行設計, 提供每日 200 吨磁黃鉄矿的总額定焙烧生产能力。給料制备和炉子工段的設計, 要便于通过炉頂加入磁黃鉄矿矿浆, 而浸出系統則建在砂-泥洗滌系統的周围, 以适应所期望的比較粗大的焙砂。虽則最初是在溶液还原、随后用硫化鈉优先沉淀鎳的基础上布置鎳回收工段, 但仍有空地供安置溶液淨化設備之用, 假若証明这些装置是需要的話。自从 1955 年春 1 号炉首次开工以来, 經過了很多改进的现有工艺流程表示于图 1 中, 其設備号碼与图 2 中工厂布置所采用的相同。为了方便起见, 以下的叙述是按照上述的工厂职能工段进行划分, 并依工厂流程的順序来叙述。

給料制备工段

如工厂布置图 (图 2) 所示, 中間試驗工厂建筑被隔墙分隔为炉子工段与水法工段, 給料制备槽則位于水法工段內的靠近隔墙处。将約含 35% 固体磁黃鉄矿精矿矿浆, 从磨碎机經過木制鉚接綫路抽送到給料增稠器, 由此产出大約含有 65% 的固体的底流。增稠过的精矿被輸送到貯槽, 从那里供給直接安裝在給料制备槽之上的盘滤机。磁黃鉄矿滤餅帶有 11~12% 水

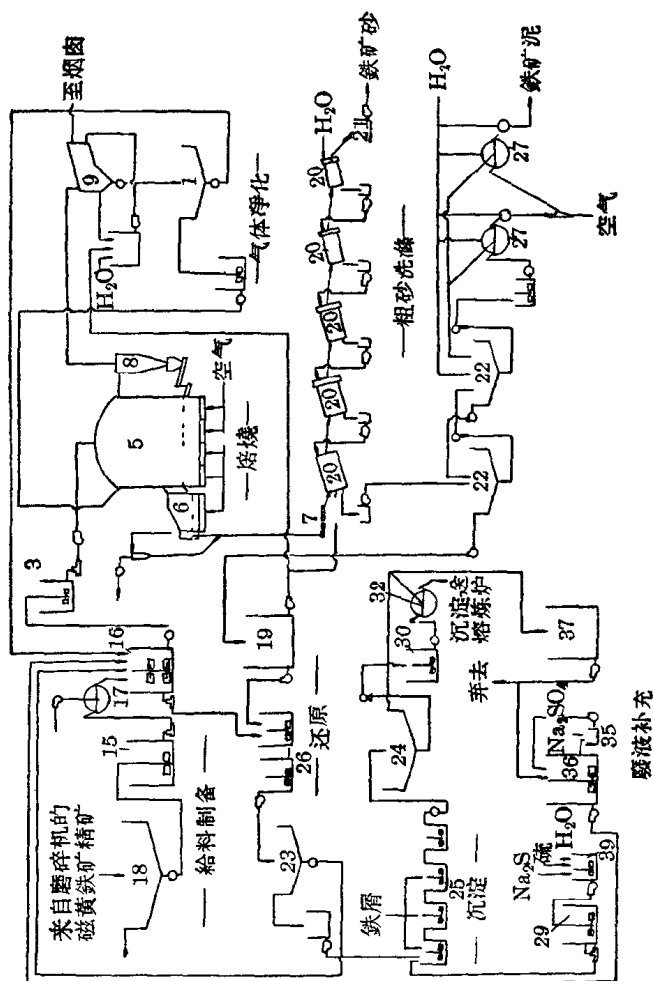


图 1. 矿泥洗选(雁桥铁矿中试工厂的流程)

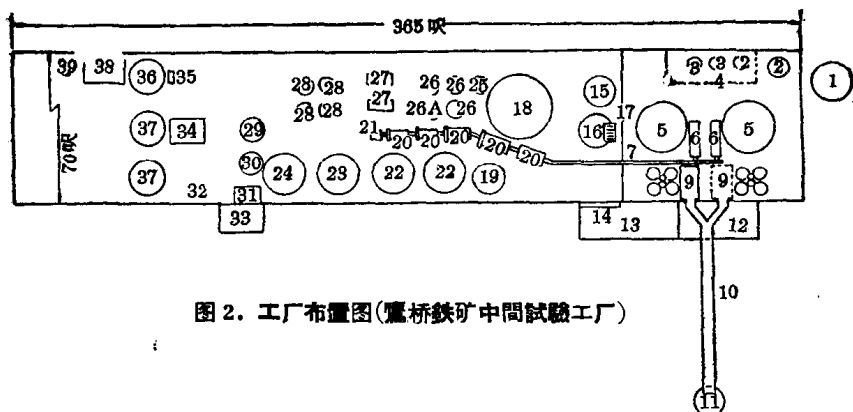


图 2. 工厂布置图(厦桥铁矿中间试验工厂)

图		注	
№	說 明	№	說 明
1	洗滌器泥增稠器	21	砂泵箱
2	洗滌器溶液貯槽	22	浸出增稠器
3	炉子給料槽	23	还原增稠器
4	炉子控制室	24	沉淀增稠器
5	焙烧炉	25	处理槽
6	冷却器	26	还原槽
7	Redler 輸送机	26 A	泥过滤器貯槽
8	旋风收尘器	27	細泥过滤器
9	Doyle 洗滌器	28	沉淀槽
10	內衬橡膠的烟道	29	硫磺浆槽
11	300 呎高的烟囱	30	沉淀过滤器貯槽
12	备用仓	31	控制实验室
13	空气压缩机室	32	沉淀过滤器
14	电气控制盘	33	电气控制室
15	磁黄铁矿精矿貯槽	34	試样制备室
16	給料制备槽	35	硫酸鈉溶解槽
17	磁黄铁矿过滤器	36	废液槽
18	磁黄铁矿增稠器	37	貯槽
19	浸出液槽	38	硫酸鈉貯仓
20	Hardinge 分級机	39	补充硫磺槽

份,并落入給料制备槽中,在此用給料溶液和少量来自二次烟尘捕集的洗滌器泥浆进行再調浆。再調浆是在半連續的基础上进行的,并且用周期的密度测量来实现作业的控制,調整溶液輸入速率以保持矿浆含有60%左右的固体。每班用火焰光度計分析两次給料溶液中的鈉,并添加硫酸鈉以調节这一离子的浓度,使硫酸鈉的数量約为給料矿浆中磁黄鉄矿的5%。随后将制备好的給料矿浆抽到机械搅拌的恒定压力槽,此槽系位于炉子工段中接近焙烧炉頂的高处。

炉子工段

炉子工段包含两座設計如图3的流化床焙烧炉。每一炉子的炉底具有400呎²的面积,并且配备着840个空气分布噴咀(图4),噴咀間的中心距

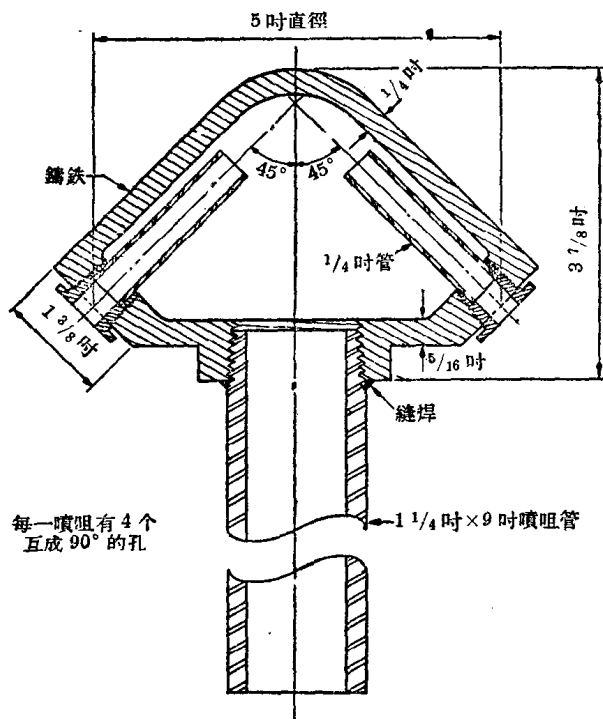


图4. 露桥型焙烧炉空气噴咀。

离为 8 吋,并且每一噴咀的 4 个孔洞之方向互成直角,以給出相当于 4 吋間隔的孔洞分布,或者每平方呎炉底面积約 8.4 个孔洞。用管道从装在熔炼炉动力車間的二台 3 号 Elliot 鼓风机供給空气,在 5 磅/吋² 压力下經過 4 个尺寸相等的风箱室进入噴咀,并維持焙砂床中的流化状态具有离空气分布噴咀頂部之上 5 呎的有效深度 (live depth)。为了焙烧磁黄鉄矿精矿或 Fe_2O_3 和 NiSO_4 , 炉子的理論空气需要量对于每天焙烧 1 吨磁黄鉄矿时为 50 标准立方呎/分钟;但是为了获得滿意的提取率,需要大約 55% 的过剩空气。已发现最适当的焙烧温度为 1250°F ,并在操作中維持这一温度数值。

焙砂溢流管使炉子与流化床冷却器相联接 (见图 3)。焙砂冷却器的尺寸为 17 呎 $\times$ 4 呎 $\times$ 10 呎,并且配置着相似于焙烧炉中采用的空气分布噴咀。每一冷却器装备着三盘由 6 圈 3/4 吋軟鋼管組成的冷却蛇管。約为 1250°F 的热焙砂进入冷却器流化床,在它們向卸料端运动的过程中,逐漸失去热量;在卸料端焙砂从与冷却蛇管頂部大致相同的高度溢流出去,并在 450°F 左右溢流到 Redler 型輸送机中。

矿浆的加入是借助于 Moyno 3L8 型泵及与其串联的 2 吋 $\times$ 2½ 吋的 Vacseal 型泵来完成,它們将矿浆卸到鷹桥設計的給料枪中^[7],如图 3 所示,給料枪位于炉頂的中心。給料枪較詳細地表示在图 5 中,它的目的是将矿浆流分散成为大量的矿浆小滴,这些小滴小得足以在它們落下經過由炉子自由空間上升的焙烧炉气中时能够被烘干,但是这些小滴又大得足以不被夹帶在离开排出烟道的炉气中。虽則給料速率和矿浆密度是影响矿浆滴大小的因素,但是控制浆滴大小是借助于調节送入給料枪中的壓縮空气量、或者調节出口錐的垂直位置,也即是調节环形卸出孔的大小来实现的。

給料枪的工作原理在于将壓縮空气和矿浆一道引入圓筒中,以便建立一个被矿浆物料所分隔的空气柱。矿浆物料到达环形卸料孔时,就增大了空气流动的阻力,結果导致圓筒中的压力在瞬間突然升高,随后将堵塞着卸料环的矿浆噴出。給料就是这样被一系列迅速交替的矿浆和空气噴出分散成为小滴,而不是被作为大多数气动操作“噴枪”的特征的切断作用所分散。由此引起的磨損是关系不大的事情;同时用 316 型不銹鋼制的給料枪和 Hastelloy 制圓筒,已經在接近每天 200 吨磁黄鉄矿精矿的給料速度条件下,連續地使用了 12 个月以上。

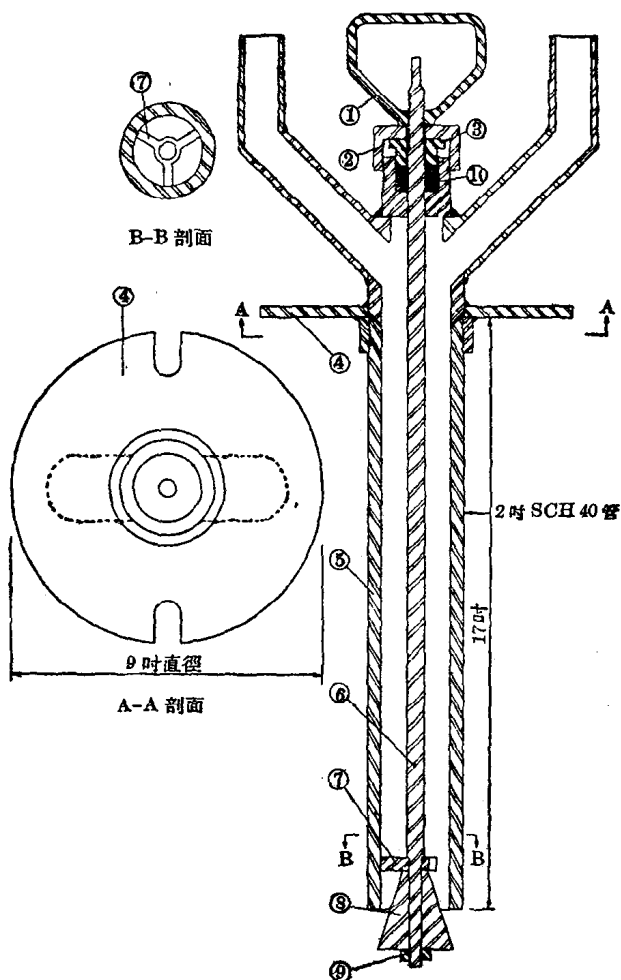


图 5. 炉子給料枪装配图

1—轴的螺母和手柄, 2—罩, 3—压盖, 4—凸缘, 5—圆筒, 6—轴,
7—多脚架, 8—圆锥体, 9—锥体螺母, 10—填料

炉气通过内衬耐火材料的短烟道离开焙烧炉，烟道将炉墙上部孔洞与四台并联排列的6呎旋风收尘器相联接。捕集到的烟尘经过集尘斗和串联的一对8吋螺旋输送机，在流化床表面下6吋处回到焙烧炉中。串联排列的好处在于第二个螺旋可以作成足够的短，以使只采用一个外部轴承进行工作，从而允许烟尘自由地卸入流化床中。如此返回的烟尘被小滴矿浆所接纳，并结合成力具有足够大小的焙砂颗粒，以使被保持在炉床中，直到通过焙砂溢流管卸入冷却器时为止。在炉子自由空间中所获得的烧结效果可以表4中列出的典型筛分析说明，这些分析表明，当炉子給料和返回的旋风收尘器烟尘分别有98.4%或96.2%小于200筛目时，焙砂溢流中只有0.8%小于200筛目。这样，在保持细小颗粒所给出的气-固、固-固相接触的好处之同时，此系统实际上还可消除通常伴随粉状产物这一缺点，并且同时使硫酸钠与包含于每一团块的矿物颗粒连续地接触。

表4. 炉子給料和产物的筛分析

筛 目	炉 子 给 料 %	返回的旋风收尘器 烟尘, %	焙砂产物, %
+ 14	—		26.2
+ 35	—	0.3	56.6
+ 65	—	0.4	13.3
+100	—	0.6	1.7
+200	1.6	2.5	1.4
-200	98.4	96.2	0.8
	100.0	100.0	100.0
-325	85.2		

借助用雾化空气喷射，在收到炉子自由空间中的方法，来控制流化床的温度。如图3所示，两个喷射口高高地位于炉墙上，并按有利于最大限度蒸发溶液的角度安置，以避免炉床被润湿和丧失流化状态。这样，焙烧反应中形成的过剩热量就被焙砂颗粒携带和释放于比较冷的自由空间，这些焙砂颗粒是反复地从炉床喷出和落回炉床中。这一方法不仅有比较大量的贫液和浓缩器液体被蒸发（15~20克/分钟），而且炉气被大大地冷却到焙烧温

度以下。

二 次 收 尘

因为二次收尘之必要还不清楚,因此决定,在通过操作实验以便对经过初次收尘器后的烟尘类型和数量能够具有一些概念之前,不将二次收尘这一步骤包括在中間試驗工厂的设计中。短期操作之后,就充分证明了二次收尘的需要;在经过进一步深入試驗工作时期之后,即决定在1号炉装置一台55000 呎³/分钟的 Doyle 洗滌器^[8]。选用洗滌器而不选择静电收尘器,这是基于一种过度的忧虑,即炉气和烟尘的硫酸化倾向将导致粘結,而使得后者不能工作;至于选用 Doyle 洗滌器而不用一般的洗滌器,则不仅因为前者的效率高,而且还因为它的液体需要量較低。在此情况下这是有一定好处的,因为所需的洗滌液数量是少得足以能借助于将洗滌液返回作为炉子冷却剂的办法,来回收它所捕集到的水溶部份。从流程可见,这方面包括洗滌器产物的增稠,使增稠器底流重新循环经过給料制备槽;从而将二次烟尘捕集所得的可溶和不可溶部份均返回到炉中;以焙砂溢流确定炉子的全部产量。在洗滌器溶液中,气体通过大約13吋水柱的压力降落的高速撞击,即时从1000° F 冷却到大約175° F,还同时回收所含烟尘量的95%以上,洗滌后的气体在通过与洗滌器組成一整体的喷雾部份之后,即經內衬橡胶的烟道和300呎高的烟囱排入大气中。

由于装置洗滌器而引起的收尘效率的提高,以及在磁黄铁矿精矿品級方面的改进,已經能够将1号炉的物料通过速度从每日120吨磁黄铁矿提高到200吨,或者說为設計生产能力的两倍。这样,因为工厂的浸出工段是按照每日处理200吨設計的,故在2号炉上装置二次收尘设备的工作就被拖延到能够着手扩大水法工段时为止(在写作本文时水法工段正在扩建),此时焙燒阶段还仅限于用1号炉进行操作。

焙 砂 的 浸 出

按原有形式,浸出流程包括把焙砂直接从流化床冷却器卸入机械搅拌驟冷槽的驟冷液中。这就必需将砂浆抽送一百多呎而进入浸出工段,因为焙砂质粗,所以妨碍了使用溢流泻出法使其从驟冷槽中放出,而这样的体系

就由于液面控制所必須的仪器装置以及一些閥門而复杂化了。曲绕閥門的高速磨損以及在管綫积砂方面所遭到的困难，都会使得驟冷矿浆在递送到浸出工段时經常发生間断；而为了保持矿浆流动，就必需有高的驟冷液与焙砂之間的比率，这样每当发生甚至是短期的泄漏时，也会造成过高的損失。

为了克服这些問題，在 1956 年装設了 Redler 型輸送机使焙砂冷却器与 Hardinge 型逆流分級机連接起来，这些分級机就組成了浸出系統的粗砂工段，同时为了提高洗滌效率，分級机的数目由 3 台增加到了 5 台。这样，在现在的系統中，是将干焙砂輸送到浸出回路，在那里焙砂由 6 吋的螺旋輸送机送入起驟冷桶作用的 1 号分級机。浸出溶液被用作驟冷介质，而分級机的溢流則被抽至細泥洗滌体系，这个体系是由两个串联着的 20 呎的增稠器与两个也是串联着的 316 型不銹鋼制的鼓式过滤器組成的。把洗滌水加入过滤器；滤液和洗滌水都送入 2 号增稠器同时洗滌水还加入 5 号分級机的粗砂洗滌回路中。控制这些水源及小量由泵的压盖泄流出的水 (pump gland water) 以便得到含鎳量在 16~18 克/升范围内的浸出溶液。这样就留下粗砂和細泥产物，它們分別夹帶着含鎳約 0.25 和 0.50 克/升的溶液。

还原及沉淀

浸出液貯于一个 316 型不銹鋼制的槽中，同时，由于在驟冷过程中焙砂放出的热使浸出液的温度保持在大約 170° F。对完成还原阶段而言这个温度是必需的。在还原阶段中，溶液中的硫酸鉄，在原始磁黄鉄矿精矿的作用下，被轉化为硫酸亞鉄。为了尽量减少溶液中的鈉浓度被稀释，用于此目的的磁黄鉄矿是从給料制备槽而不是从貯槽抽来的。同时，連續地把磁黄鉄矿与浸出液一起加入到三个串联的机械搅拌槽中进行还原。还原处理后接着进行增稠，将溢流送至还原了的溶液貯槽，并将含有废磁黄鉄矿的底流返回給料制备槽以便最后耗用于焙烧炉中。

从还原了的溶液中回收鎳、銅和鈷，原来是不断向四个串联的机械搅拌槽內添加 Na_2S 溶液，使这些金属成为它們的硫化物形式沉淀出来。虽然与溶液中的鉄相比較(參看表 3)，具有很好的選擇性。但当过滤时，产品具有

粘性和大的体积，总之是不便于处理的。这些不希望的性质使许多为了寻找满意的代用方法的尝试都遭到失败。这些方法包括在大气压及高压下用磁黄铁矿和各种硫化矿物进行试验，采用过硫化钠与硫化铁，金属铁和硫化铁的混合物以及金属铁与元素硫的混合物的多种结合。最后发现，当用硫化钠溶液进行预先处理后，在金属铁存在的条件下，很细的粉状元素硫能与溶解的镍和钴作用，正是这种现象构成了目前应用于工厂中的沉淀法的基础。

利用同样是串联着的四个沉淀槽，往第一个槽中添加含硫45%的硫磺浆连续进行沉淀，这种硫磺浆含有相当于5%硫磺的硫化钠。这种试剂是以相应于还原了的溶液中每磅镍加1磅硫的比率加入的。同时，往前三槽中加入铸铁屑，其总的比例相当于进入沉淀工段中的每1磅镍加入大约1.9磅铁屑；并且当混合物已经通过沉淀系统时，则溶解的镍、铜及钴有95%以硫化物沉淀形式沉降下来。反应后的泥浆经过增稠后在内衬橡胶的鼓式过滤器上过滤，大约含15%水份的泥浆从过滤器卸入卡车，然后，由卡车将其送往熔炼炉。在給料制备槽工段中可以被吸收的那部份贫液，借助于添加盐块来达到所要求的钠浓度，而其余的（大约三分之一的）贫液则抽出弃去。

关于沉淀反应机理的解释可能是值得注意的。由于在从含铁溶液中沉淀镍方面硫化钠所显示出的高度选择性，所以，当与还原了的浸出液混合时，用硫化钠溶液处理过的硫粒子立即会被硫化镍的薄膜所覆盖。这样，当金属铁加入混合物时，则硫化镍覆盖层就可防止铁与硫粒子直接反应，而覆盖层则起着两个元素间的隔栏作用。此时，即代之以铁直接与溶液作用而生成硫酸亚铁，这样就让镍与钴以生长在硫粒子表面上的薄膜进行反应。用这样的方法可使引入的两个元素的固有能量获得完全的利用，同时没有耗费热力学推动力于不希望的铁与硫间的中间反应上，而这种中间反应在其他情况下都是可能发生的。由此得到的沉淀主要由被坚实的硫化物壳包围着的硫核所组成，因而是容易过滤的，并给出在操作性能上类似于普通浮选精矿的滤饼。图6乃是典型沉淀粒子的抛光断面显微照象（放大100倍）。