含钒钛金属化物料细磨的探讨

邱　允　武

（四川省冶金研究所）

以攀枝花钒钛磁铁矿的金属化球团为对象，对金属化物料的细磨进行了试验研究。金属化物料在碎磨过程中必然形成的并夹杂有钒钛的铁鳞片是影响铁与钒钛难于充分解离的主要因素。根据铁鳞片的受力分析，探讨了有效地消除其影响的途径，即较低的磨机转速率、大的球荷比表面积和多段磨矿流程。对“棒磨＋球磨”流程进行了试验，效果良好。

一、前　言

采用“还原磁选”流程处理攀枝花钒钛磁铁矿或钛铁矿时，能使物料中的铁、钒、钛得到有效分离。磁性产品为价值很高的粉末冶金原料—铁粉（TFe＞97%）或优质炼钢原料（TFe＞90%）；非磁性产品经处理后可得到两种高品位产品，即五氧化二钒（V_2O_5≥99%）和人造金红石（TiO_2 85～96%）[1][2]。

然而，采用“还原磁选”新流程时，磁选前的细磨问题很大。因为还原出来的含有钒、钛的铁金属粒具有延展性，难于把铁与钒、钛磨至充分解离。作为粉末冶金原料的磁性产品，经处理后的压制性试验表明：改善其工艺性能的主要问题在于把氧化钛夹杂物控制在2.5%以下，这是“还原磁选”工艺必须攻克的难点之一[2]。而且试验还表明，金属化物料磁选分离的工艺和技术经济效果主要取决于细磨指标[1]。所以，金属化物料的细磨对于磁选分离不能只视为简单的准备作业，它实际上成为整个“还原磁选”新工艺流程中的关键作业。

鉴于目前国内外对直接还原后的金属化物料的磨矿尚无成熟的先例[3]，因此对它的细磨问题进行研究，并寻求解决的途径，是有重要现实意义的。本文以攀枝花钒钛磁铁矿经竖炉还原后的产品—金属化球团为对象，进行金属化物料的细磨试验研究，对有关问题进行探讨。

二、物　料　特　性

钒钛磁铁矿的物质组成研究结果表明，矿石中的二氧化钛主要呈0.4微米甚至更细的钛铁晶石（Fe_2TiO_4），沿磁铁矿晶格〈100〉方向生长；而矿石中的金属钒，绝大部分与铁矿物呈类质同相。因此，用普通的机械选矿方法不能使铁与钒钛得到分离。

当钒钛磁铁矿精矿与芒硝、皂土按重量比100：6：1造球，经回转窑磁化焙烧，在竖炉中H_2+CO含量为92—99%、温度为1050～1100℃、时间为2.5～3.3小

时的条件下还原时，还原出的金属铁晶粒由于表面能的自动降低而相互聚合，从其它氧化物中析出，并充填或粘附于氧化物裂隙之中，这就给磁选分离创造了基本条件。但是，正如镜检表明，这种铁晶粒较细，并仍夹杂有钒钛（见图1和表1）。为此，要使铁与钒钛充分解离，还需对呈连结体形式的金属铁粒进行细磨。

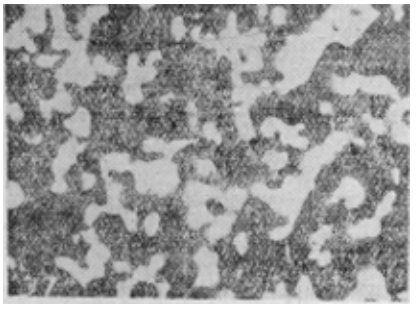

图 1 铁晶粒形态 ×300

铁晶粒镜检测定结果 表 1

粒级，毫米	相对含量，%	备注
+0.1	2	13微米以上虽然占85%，但晶粒中或多或少嵌布和包裹有钒、钛等杂质。
−0.1+0.074	3	
−0.074+0.043	5	
−0.043+0.013	75	
−0.013+0.0067	10	
−0.0067	5	

还原后的球团含TFe 70.52%，TiO_2 14.31%，V_2O_5 0.76%。金属化率为95～98%。球团中铁晶粒含碳小于0.07%，磷小于0.011%，且固溶有微量的钛、钴、镍、钒和锰等元素。把5～8毫米球团经对辊机破碎至−2毫米，其粒度特性和Fe、TiO_2、V_2O_5的分布如图2所示。

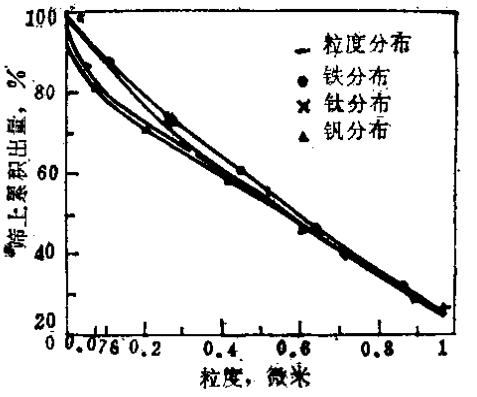

图 2 粒度特性和铁、钛、钒分布曲线

从以上分析得知，此种金属化物料有如下特性：

1. 金属化率高。铁晶粒含碳、磷低，且固溶有能增强延展性的合金元素，故有一定的延展性。进一步磨细呈连结体的金属铁粒较为困难。

2. 铁晶粒较细，呈连结体状态存在，且多数嵌有或包裹有钒钛等氧化物。这就要求对难磨的金属铁粒进行细磨，才能使铁与钒钛充分解离。

3. 有价金属铁、钒、钛较均匀地分布于各粒级中，但铁在+0.074毫米级别中偏高，而钒钛则在−0.074毫米级别中偏高。

三、金属化物料细磨中值得注意的几个问题

由物料特性分析可见，因金属化物料与一般矿石的性质差异较大，故碎磨时也应采用相适应的磨机工作条件。本试验研究表明，以下几个问题是值得注意的：

（一）金属铁粒在磨矿过程中产生难于进一步磨细的铁鳞片

用−2毫米的金属化球团物料与同样粒度的攀枝花矿石在$\phi \times L$为200×240毫

米的磨机中进行碎磨行为的对比考察。试验条件是：磨机转速率为116%，球荷比表面积为321.3厘米²/公斤，磨矿浓度为68%。试验结果如图3所示。从图3可见，在30分钟以前的磨矿初期，金属化球团和攀枝花矿石新生成－200目的增加量几乎相等；30分钟以后的磨矿后期，攀枝花矿石－200目增加量仍很大，但金属化球团－200目增加量明显减少。从球团的粒度特性曲线（图2）来看，因曲线呈凹形，故它的破碎难易程度属中下等，并不算难磨。但是，试验结果却并非如此，磨矿时间为120分钟时，金属化球团新生成－200目量为59.5%，再延长30分钟，仅增加0.5%。把金属化球团磨矿30分钟以后的产品进行磁选，磁性产品经显微镜观

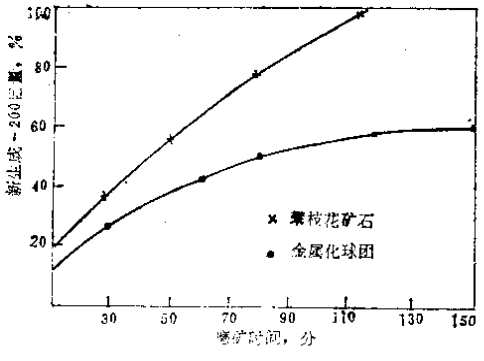

图3　磨矿时间与新生成－200目量的关系

察和化学分析，发现它部分或全部呈大小不一的鳞片，而这些铁鳞片中又嵌有数量不等的微细钒钛等物质。磨矿120分钟的磁性产品含TFe 90.81%，TiO_2 3.86%，V_2O_5 0.20%。图4为磨矿细度对非磁性产品中铁、钒、钛品位的影响。由图4可见，磨矿细度不论粗或细，非磁性产品中的铁、钒和钛的品位几乎不变，且在所列的磨矿细度下，非磁性产品的粒度均为－200目。因此，提高磁性产品含铁品位的关键是将铁与钒钛还未充分解离的铁鳞片进行细磨。

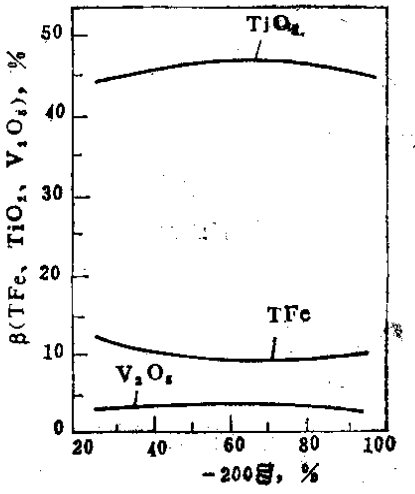

图4　磨矿细度对非磁性产品中的铁、钒、钛品位的影响

试验表明，铁与钒钛解离速度甚慢，其主要原因是：随着磨矿时间的增加，呈单体或连结体的铁晶粒增多，当其被球荷以打击力为主继续碎磨时，由于铁晶粒的延展性使生成的铁鳞片量也逐渐增加。然而，欲使粒状和鳞片状的同种物料发生碎裂，它们各自所需的最佳施力方式显然不同。磨机用碎磨粒状物料的工作条件来碎磨鳞片，其效率无疑会大为降低。可见，以一般矿石为标准样，用相对可磨度评定金属化物料细磨的难易程度，看来是不适宜的。

铁鳞片在磨机内运动轨迹十分复杂，球荷对它施力的作用点也各不相同，可是就几率而论，作用点主要是落在鳞片的两个平面上。众所周知，铁鳞片的机械强度的特性为：

抗压强度＞抗拉强度＞抗剪强度＞抗弯强度。所以，对于这种具有延展性的物料，采用打击力的方式进行细磨显然不合理，只有采用磨剥力（弯、剪和拉力）才适合于它的细磨。

（二）磨机必须采用较低的转速率才利于铁鳞片的细磨

磨机转速率的高低决定了球荷的施力方式。一般认为，在球荷充填率为35%的条件下，转速率大于73%时，球荷以打击力为主作功，反之以磨剥力为主。对适于一般矿石碎磨的转速率，曾有人做过试验研究，结果如图5所示[4]。由图可知，转速率 ψ 在70～120%期间，新生成－200量随着转速率的提高而增加，并以 ψ =110～120% 为佳。

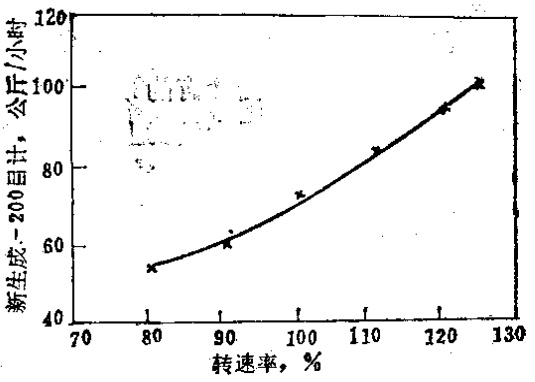

图 5 转速率与新生成 -200 目量关系

可是，金属化球团的细磨试验表明，当 ψ =67% 时，新生成 －300 目量和磁选分离指标明显地比 ψ =116% 为高，其试验结果见表2。

转速率与金属化球团磨矿细度及分离指标的关系* 表 2

衬板形状	磨矿时间 分	磨机 转速率 %	磨机 充填率 %	球荷 比表面积 厘米²/公斤	球荷 外层脱离角 度	磨矿产品 -300目含量 %	磁选产品名称	产率 %	品位，% TFe	品位，% TiO_2	品位，% V_2O_5	回收率，% TFe	回收率，% TiO_2	回收率，% V_2O_5
平滑	80	116	35	440.7	—	84	磁性产品	70.91	92·95	2.41	0.13	94.08	10.89	13.80
							非磁性产品	29.09	14.26	48·09	1.98	5.92	89.11	86.20
							合 计	100.00	70.06	15.70	0.67	100.00	100.00	100.00
平滑	80	57	35	440.7	62°54′	91.5	磁性产品	70.69	96.48	1.33	0.049	95.62	5.97	5.27
							非磁性产品	29.31	10.65	50·64	2.11	4.38	94.03	94.73
							合 计	100.00	71.33	15.78	0.65	100.00	100.00	100.00

* 操作条件：给矿量 500 克，给矿粒度 －120 目

球团品位：TFe 70.20%，TiO_2 16.22%，V_2O_5 0.65%

磨机以 ψ =67% 运转时，经计算外层球荷的理论脱离角 $\alpha = 66°54'$（衬板平滑，实际值还大于该值）。显而易见，球荷是以磨剥力作功，并且此时磨机内形成了一种较平稳的沉降区。在其下部，由于上升运动的球荷中被携带的待磨物料向下流动，使比重大（δ =7.1，接近球荷比重）、易下沉的铁鳞片受到某种搅动，造成待磨物料松散，从而增加了受磨剥的几率。

以上的试验结果和分析讨论表明，金属化球团的细磨应采用较低的转速率，即 ψ 为 60～70% 较为适宜。在转速率相同的条件下，衬板形状的不同，球荷被提升的高度也不一样，采用平滑衬板可使磨机转速率相对地提高，这样既能达到提高细磨效率的目的，又能有效地细磨鳞片。

（三）磨机必须采用大比表面积的球

荷磨矿

要保证足够大的磨剥力，就要有足够的球荷研磨表面积。国外有的研究者认为：球荷粒度组成在很大程度上影响磨矿效率，其原因之一是粒度组成决定了球荷的比表面积[5]。因此，球荷比表面积大小的确定乃是磨机以最优工作条件细磨铁鳞片的重要问题。

球荷比表面积的大小应随给矿粒度而定。给矿粒度粗，球荷比表面积应小；反之应大。这表明了一般矿石进行细磨的特性，而这一点对金属化物料更为显著。因为如前所述，对于铁鳞片只能采用磨剥力才能提高细磨效率，并且随着铁鳞片的磨细，磨剥力也应相应增大才能与之适应。球荷比表面积的增大，可增强磨剥力和提高细磨效率，所以磨机高效率地细磨铁鳞片，不但与转速率有关，而且还与球荷比表面积密切相关。

（四）采用多段磨矿才能取得良好的磨矿效果

在金属化物料的磨矿过程中，随着铁鳞片的出现，就需要大的磨剥力，因此需要的磨机工作条件也就与一般矿石不同。前面的分析指出，应采用较低的转速率及大的球荷比表面积，而且这种工作条件随着鳞片的进一步磨细应有所变更。这样，就决定了必须采用多段磨矿的流程，否则适应不了这些要求。

表3表明，在总磨矿时间基本不变的条件下，不同磨矿段数与磨矿细度及分离指标的关系。从表中可知，二段磨矿与一段磨矿相比，磨矿细度增加29.9%，分离指标也显著提高。该试验结果还表明，待磨物料在整个粒度变化过程中应分为若干级别，每一级别都应当配之相适应的磨机转速率和球荷比表面积，否则细磨效率将会大大降低。

磨矿段数与磨矿细度及分离指标的关系　　表3

磨矿段数	时间 分	转速率 %	球荷比表面积 厘米²/公斤	产品-200目含量，%	磁选产品名称	产率 %	TFe	TiO_2	V_2O_5	回收率，% TFe	回收率，% TiO_2	回收率，% V_2O_5
一段	150	116	321.3	60	磁性产品	74.75	91.62	3.42	0.19	96.35	18.10	19.36
					非磁性产品	25.25	10.28	45.82	2.35	3.65	81.90	80.64
					合计	100.00	71.08	14.13	0.73	100.00	100.00	100.00
二段	1段80 2段50	116 67	321.3 440.7	89.9	磁性产品	69.80	95.41	1.74	0.09	95.35	8.36	8.25
					非磁性产品	30.20	10.74	44.06	2.31	4.65	91.64	91.75
					合计	100.00	69.84	14.52	0.76	100.00	100.00	100.00

为了进一步验证以上分析和试验结果，在总磨矿时间不变的条件下，进行了二段与三段磨矿细度对比试验，所得结果列入表4。由表4可见，按-300目计，三段比二段磨矿细度提高7%。

综上所述，金属化物料在碎磨过程中，在金属铁粒还未呈鳞片前，碎磨特性与一般矿石相似。当铁鳞片出现后，必须针对金属化物料的特点，采用多段磨矿，并配之以相适应的磨机转速率和球荷比表面积，这样就可以明显地改善细磨效率和提高磁选分离指标。也就是说，金属化物

料的细磨难题还是有解决途径的。

二段与三段磨矿细度对比结果 表4

磨矿段数	磨矿总时间 分	各段磨矿 时间 分	球荷比表面积 厘米²/公斤	磨机转速率 %	磨矿产品-300目含量 %
二段	190	1段 80 2段 110	321·3 440.7	116 67	81.9
三段	190	1段 80 2段 50 3段 60	321.3 440.7 534.0	116 67 67	89.10

四、扩大试验

为了验证 $\phi200\times240$ 毫米球磨机的试验结果，用 $\phi420\times600$ 毫米棒磨机和 $\phi420\times450$ 毫米球磨机进行了开路连续扩大试验。在此以前，进行了单机对比试验。

单机试验表明，当把球团（5～8毫米）直接入球磨机（球荷组成按设计标准配置），排料中有少许完整球团，并且相当一部分刚被碎裂，碎磨效率极低。其原因是：这种球状物料能承受的载荷最大，显而易见，球荷产生的打击力不够。若用棒磨机直接碎磨球团，效率却较高，没有发生以上现象。这是因为棒磨机作粗磨设备时碎磨效率高，它在磨矿比5～10、产品粒度1.5～0.5毫米时效果尤为显著[6]，并且球团在这一粒度范围内，碎磨特性与一般矿石相同。实际生产上球团粒度为 $\phi10$～20毫米，若用棒磨机直接碎磨球团，棒磨机的给料和所需的排料粒度也基本上与它的最佳工作范围相吻合。因此，用棒磨机对金属化球团进行一段碎磨是适宜的。

扩大试验连续运转结果列入表5。扩

扩大试验结果 表5

磨矿段数	段数	磨机类型	处理量 公斤/小时	衬板形状	转速率 %	球荷比表面积 厘米²/公斤	矿浆浓度 %	产品-200目含量, %	磁选产品名称	产率 %	品位, % TFe	TiO_2	V_2O_5	回收率, % TFe	TiO_2	V_2O_5
四段	1	$\phi420\times600$ 棒磨机	50	不平滑	—	—	70.18	38.82	磁性产品	70.74	91.18	1.74	0.099	94.12	90.99	90.44
	2	$\phi420\times450$ 球磨机	21	〃	85	420.3	63.56	63.96								
	3	$\phi420\times450$ 球磨机	21	〃	〃	510.9	62.27	87.47	非磁性产品	29.26	13.77	42.48	2.29	5.88	9.01	9.56
	4	$\phi420\times450$ 球磨机	21	〃	〃	566.6	60.18	92.43	合计	100.00	68.53	13.66	0.74	100.00	100.00	100.00

大试验表明，金属化物料的细磨采用多段磨矿，增大球荷比表面积等途径是有效的。基本上验证了小型试验的结果。

由于受条件限制，扩大试验未进行闭路磨矿试验。如采用闭路磨矿，再配之以相适应的转速率和采用平滑衬板，细磨效率和磁选分离指标当能进一步提高。

五、结　　语

磨机细磨金属化物料的效率无疑比细磨一般矿石为低。但是，如采用本文所叙述的途径，细磨效率及磁选分离指标可大为提高，且由此带来的最终经济效益—生产高品位铁粉、钒和钛的收率增加，完全有可能使细磨费用得到弥补。

由于细磨直接还原生产的金属化物料还是个新的课题，有不少问题尚待今后在实践中进一步探索。

参　考　文　献

[1] 四川省冶金研究所，攀枝花铁精矿钠化球团磁化焙烧—竖炉还原—金属化球团磁选分离试验，《四川冶金》 1980年7期。

[2] 长沙矿冶所、钛公司益阳试验厂，攀枝花含钛铁粉在粉末冶金中的应用，《钢铁钒钛》 1980年2—3期。

[3] 论难选和复合矿石的处理，《冶金》 1975年4期。

[4] 东北工学院，中南矿冶学院合编：《破碎筛分》 1961年9月出版

[5] Nobuhiro Takahashi, "Theoretical Approach to an operating ball mill"，《world mining and metals technology》, VOL.2, P. 777—792.

[6] 段希祥，论棒磨机在磨碎流程中的应用，《有色金属(选矿部分)》 79年4期。

(上接第49页)

[8] 重一电选流程选钛工业试验阶段报告，攀枝花钢铁研究院四一〇厂等。

[9] 重一电选流程选钛工业试验报告，攀枝花钢铁研究院四一〇厂等。

[10] 强磁一浮选攀枝花磁选尾矿钛铁矿工业试验报告，攀枝花钢铁研究院四一〇厂等。

[11] 原生钛铁矿选矿工艺流程的探讨，《稀有金属》 1979年第2期。

[12] 对我国原生钛铁矿精矿质量的看法，《稀有金属》1979年第5期。

[13] 美国稀有金属选矿，有色研究院广东分院。

[14] 国外螺旋选矿机，马鞍山钢铁设计院，《矿山设计简讯》1973年第2期。

[15] 国内螺旋选矿机考察报告，马鞍山钢铁设计院，《矿山设计简讯》 1973年第3期。

[16] 国内外螺旋选矿的新发展，马鞍山钢铁设计院，《矿山设计》 1975年第1期。