

含锌冶金尘泥分选 理论及应用

HANXIN YEJIN CHENNI FENXUAN LILUN JI YINGYONG

张晋霞 牛福生 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

含锌冶金尘泥分选 理论及应用

张晋霞 牛福生 著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2017

内 容 提 要

本书以含锌冶金尘泥为研究对象,主要介绍了含锌冶金尘泥基础特性,分散行为,水力旋流器数值模拟及提锌,铁、碳分选技术,硫酸浸锌试验及浸出动力学和热力学理论基础,最后对典型的含锌冶金尘泥铁、碳分选工业应用进行了系统分析和介绍。

本书可供矿物加工、环境、化工、冶金等相关专业的高校师生,科研院所的科研人员以及广大工程技术人员阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

含锌冶金尘泥分选理论及应用/张晋霞,牛福生著. —北京:
冶金工业出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-5024-7539-0

I. ①含… II. ①张… ②牛… III. ①金属粉尘—研究
IV. ①X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 118437 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7539-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017 年 6 月第 1 版, 2017 年 6 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 14.25 印张; 278 千字; 218 页

46.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

随着工业化发展和资源需求的扩大,从废弃物中回收资源无论从技术、装备,还是规模上都得到了较大的发展。我国作为一个资源消耗大国,在目前天然原生矿产资源日渐枯竭的局面下,更应该提高再生资源的重视程度。在《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》中专门提到,预计到2020年工业固体废物综合利用率将达到72%以上,形成一批具有核心竞争力的资源循环利用技术装备,建成技术先进循环利用产业体系,废弃资源循环利用已经上升为国家战略。

含锌冶金尘泥是钢铁企业生产过程中排出的具有锌化学成分的工业固体废弃物,由于含有丰富的铁、碳、锌,经常作为一种资源,多采用简单加工后返回烧结。近年来,我国钢铁企业粗钢产量连年位居世界第一,冶金尘泥的产量也相应大幅增加,大量的尘泥靠简单处理不仅无法解决,而且有害元素循环富集,也势必会严重影响生产的顺利进行。弃之可惜,用之太难,含锌冶金尘泥有效资源化安全利用已经成为企业迫切破解的技术难题,也是未来一段时期钢铁行业发展循环经济、提高行业资源综合利用水平的重要领域和主攻方向,对推动资源节约和可持续发展、提高企业经济效益和竞争力具有重大的现实意义和经济意义。

国内外冶金尘泥在利用技术和途径方面取得一定的突破,但其中的一些技术瓶颈目前还没有得到有效解决。例如,冶金尘泥以湿法方式收集时,需在过滤过程中加入大量的聚丙烯酰胺作为絮凝剂,由于静电力、药剂絮凝作用和颗粒相互凝聚等原因,导致待分选颗粒絮团现象严重,使得这部分资源目前无法实现有效分选,因此本书主要以这部分含锌絮结冶金尘泥为研究对象,进行其基础特性、分散行为、

水力旋流提锌、浮选选碳、重力提铁、酸浸出锌、浸出动力学及热力学等方面的系统研究，探索了冶金尘泥高效利用的实验室工艺规律和参数，有望提供一种冶金尘泥再资源化处理的新方法，以期为含锌冶金尘泥有价元素梯级提取的大规模推广及工程应用奠定技术基础。

本书可供矿物加工、环境、化工、冶金等相关专业的高校师生、科研院所的科研人员以及广大工程技术人员阅读参考。

在成书过程中，作者得到了多位老师和同行的鼓励与支持。华北理工大学研究生邹玄、戴奇卉、路晓龙、李卓林、刘亚、于浩同学参与完成了大量的试验研究工作以及书稿的整理与排版工作。本书的出版得到华北理工大学学术著作出版基金资助，在此一并表示诚挚的谢意！

由于作者学识所限，书中难免有疏漏、错误之处，敬请读者赐教和斧正。

作 者

2017年3月

目 录

1 绪论	1
1.1 冶金尘泥概述	1
1.1.1 来源及种类	1
1.1.2 危害	2
1.2 冶金尘泥资源化现状	3
1.2.1 直接内循环利用	4
1.2.2 物理分选技术	5
1.2.3 湿法处理技术	6
1.2.4 火法处理技术	9
1.2.5 联合处理技术	11
1.2.6 其他利用技术	12
1.3 冶金尘泥浸出机理研究现状	13
1.3.1 热力学理论研究	13
1.3.2 动力学理论研究	15
1.4 冶金尘泥利用发展方向	16
2 含锌冶金尘泥分选技术研究	18
2.1 研究目标	18
2.2 研究技术路线	18
2.3 研究内容	18
2.4 研究方法	20
2.4.1 机理研究方法	20
2.4.2 冶金尘泥原料研究方法	20
2.4.3 试验药剂与设备	21
2.4.4 分析与检测方法	23
3 含锌冶金尘泥基础特性研究	25
3.1 密度	25

3.2	XRF 荧光分析	26
3.3	化学成分分析	29
3.4	XRD 分析	29
3.5	锌物相分析	30
3.6	粒度组成分析	31
3.7	扫描电镜分析	32
3.8	工艺矿物学分析	39
3.9	本章小结	41
4	微细含锌冶金尘泥分散行为研究	43
4.1	化学分散行为研究	43
4.1.1	水玻璃条件试验	44
4.1.2	焦磷酸钠条件试验	45
4.1.3	六偏磷酸钠条件试验	46
4.2	物理分散行为研究	48
4.2.1	超声波分散试验	48
4.2.2	机械搅拌分散试验	48
4.3	复合分散技术	51
4.4	本章小结	52
5	水力旋流器数值模拟及提锌试验研究	53
5.1	旋流器中流场基本理论	54
5.1.1	基本方程	54
5.1.2	两相流中的受力分析	56
5.1.3	水力旋流器内的流速分布	58
5.2	水力旋流器数值模拟研究	59
5.2.1	物理模型的建立及边界条件的设置	59
5.2.2	水力旋流器内流场特征	64
5.2.3	结构参数对数值模拟的影响	69
5.2.4	工艺条件因素对数值模拟的影响	78
5.3	水力旋流器提锌性能试验验证	80
5.3.1	水力旋流器验证实验的目的和意义	80
5.3.2	水力旋流器的分级过程	80
5.3.3	水力旋流器提锌验证试验	81
5.4	本章小结	84

6 含锌冶金尘泥铁、碳分选技术研究	86
6.1 旋流-静态微泡浮选柱 (FCSMC)	86
6.1.1 旋流-静态微泡浮选柱结构、原理、特点及应用	86
6.1.2 旋流-静态微泡浮选柱分选过程分析	91
6.1.3 柱浮选工艺参数	94
6.2 含锌冶金尘泥选碳条件试验研究	99
6.2.1 浮选柱粗选条件试验	99
6.2.2 浮选柱精选条件试验	105
6.2.3 浮选柱开路流程试验	106
6.2.4 浮选柱闭路流程试验	107
6.3 含锌冶金尘泥选铁试验研究	108
6.3.1 弱磁选试验研究	108
6.3.2 强磁选试验研究	109
6.3.3 重选试验研究	112
6.3.4 联合流程试验研究	122
6.4 含锌冶金尘泥铁、碳分选联合工艺流程	123
6.5 本章小结	125
7 含锌冶金尘泥硫酸浸锌试验研究	126
7.1 硫酸浸锌原料性质分析	126
7.1.1 浸锌原料化学多元素分析	126
7.1.2 浸锌原料 XRD 分析	126
7.1.3 SEM-EDS 分析	126
7.2 硫酸浸锌单因素条件试验研究	129
7.2.1 硫酸浓度对含锌冶金尘泥浸出的影响	129
7.2.2 浸出温度对含锌冶金尘泥浸出的影响	131
7.2.3 液固比对含锌冶金尘泥浸出的影响	131
7.2.4 反应时间对含锌冶金尘泥浸出的影响	133
7.2.5 搅拌速度对含锌冶金尘泥浸出的影响	134
7.3 响应曲面法优化含锌冶金尘泥酸浸工艺	135
7.3.1 响应曲面法理论	135
7.3.2 Design-Expert 软件的应用	138
7.3.3 响应曲面模型建立	151
7.3.4 模型方差分析	154

7.3.5	模型可信度分析	156
7.3.6	单一参数影响分析	158
7.3.7	因素间交互作用	160
7.3.8	最佳浸出工艺条件及模型验证	163
7.4	浸出渣微观结构分析	164
7.4.1	浸出渣化学多元素分析	164
7.4.2	浸出渣 XRD 分析	164
7.4.3	浸出渣 SEM-EDS 分析	165
7.5	本章小结	169
8	含锌冶金尘泥硫酸浸锌动力学研究	171
8.1	硫酸浸锌动力学基础	171
8.1.1	未反应核收缩模型	171
8.1.2	Avrami 模型	174
8.2	硫酸浸锌动力学研究	175
8.2.1	晶粒参数的确定	176
8.2.2	表观活化能和指前因子的确定	178
8.2.3	反应级数的确定	179
8.2.4	浸出动力学方程及其意义	179
8.3	本章小结	180
9	含锌冶金尘泥硫酸浸锌浸出热力学理论基础	181
9.1	硫酸浸锌热力学可行性分析	181
9.1.1	反应级数及模型方程的确立	182
9.1.2	Zn-H ₂ O 系离子分布图	185
9.1.3	不同金属离子在水溶液中的平衡浓度与 pH 值关系	186
9.2	硫酸浸锌体系中的 φ -pH 图	187
9.2.1	Zn-H ₂ O 系 φ -pH 图	188
9.2.2	Fe-H ₂ O 系 φ -pH 图	189
9.2.3	Zn-Fe-H ₂ O 系 φ -pH 图	191
9.2.4	Zn-S-H ₂ O 系 φ -pH 图	192
9.3	硫酸浸锌体系中的 lgc-pH 图	193
9.3.1	ZnO 的 lgc-pH 图	193
9.3.2	Fe ₂ O ₃ 的 lgc-pH 图	194
9.3.3	Fe(OH) ₂ 、Fe(OH) ₃ 的 lgc-pH 图	194

9.3.4 ZnS、FeS 的 $\lg c$ -pH 图	196
9.4 本章小结	198
10 含锌冶金尘泥铁、碳分选工业应用	199
10.1 原料性质分析	199
10.1.1 化学多元素分析	199
10.1.2 粒度分析	200
10.1.3 密度分析	200
10.1.4 原料特征	201
10.2 分选工艺及设备	201
10.2.1 工艺流程及配置	201
10.2.2 冶金尘泥分选各系统简述	202
10.2.3 设备选型	203
10.3 工业调试	205
10.3.1 开车前准备及清水试车	205
10.3.2 浮选药剂	205
10.3.3 带料运转调试	206
10.3.4 设备及流程改造	206
10.4 选矿工艺流程考查	207
10.4.1 取样及检测制度	207
10.4.2 生产工艺流程及考查结果	208
10.5 本章小结	209
参考文献	210

1 绪 论

1.1 冶金尘泥概述

冶金尘泥是所有通过钢铁企业主要生产工序除尘系统收集到的粉尘和泥浆的总称。与其他工业固体废弃物不同,受原料成分、产出工序和收集设备、方法的影响,冶金尘泥物料具有化学成分多变、物理性能稳定性差、组成复杂、波动性大等特点。通常冶金尘泥的化学成分以 Fe、C 为主,伴有 Zn、Pb、K、Na 等高炉有害元素和 Si、Al、Ca、Mg 等,少量有 In、Bi、Sb、Cd、Sn 等稀有金属元素;粒度较细且不均匀,主要为 $0.39\sim 200\mu\text{m}$,表面粗糙,有孔隙,质量轻。

冶金尘泥的排放影响着人们生活健康和周围生态环境,早在 1976 年,美国环保机构就制定了相关的法律,将含 Zn、Pb 和 Cr 的钢铁粉尘划归 K061 类物质(有毒固体废物),要求钢铁企业对其中有害物质必须回收或钝化处理。从另一个角度看,冶金尘泥也是一种含有大量具有潜在利用价值并且不断增长的资源,经过物理化学处理后,有价成分转化成可利用的资源,残渣作为烧结砖厂原料或替代部分原料返回利用,成为企业节能增效的新的经济增长点和再生金属资源的重要原料。

1.1.1 来源及种类

冶金尘泥主要来源于烧结、炼铁、炼钢等钢铁企业的几个主要工序,根据收集方式和来源不同,冶金尘泥主要包括以下几类:

(1) 烧结灰。烧结灰按产生位置又分为机头灰和机尾灰,主要是在烧结原料(铁矿粉、生石灰、石灰石、焦炭或煤粉)在配料、转运、烧结与成品处理过程中由于干式除尘装置收集得到的粉尘,常采布袋、电除尘和多管除尘器等,颗粒尺寸多在 $5\sim 40\mu\text{m}$ 之间。铁含量相对较高,一般为 $45\%\sim 55\%$ 。

(2) 高炉瓦斯泥。高炉瓦斯泥是高炉炼铁过程随高炉煤气排出的炉料(烧结矿、焦炭、辅助料)粉尘,主要含细粒铁粉、炭粉、熔剂粉尘,经湿式除尘(文丘里)洗涤沉淀浓缩后而得到的废渣。瓦斯泥铁品位一般为 $25\%\sim 45\%$,铁矿物以 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 为主,粒径在 $75\mu\text{m}$ 以下含量一般为 $50\%\sim 85\%$,Zn、Pb、Bi 等元素因高温气化作用也多富集烟气中。黑色泥浆状,粒度较细且表面粗糙,有孔隙,呈不规则形状。

(3) 高炉瓦斯灰。高炉瓦斯灰是采用电除尘和多管除尘器等干式收集的高炉炼铁粉尘, 又称布袋灰, 呈灰色粉末状, 粒度较高炉瓦斯泥略粗。由于高炉炼铁过程中使用的铁矿石、焦炭、石灰石、白云石以及萤石等原料经过高炉内部炉膛中同温度区域十分复杂的氧化-还原等物理化学变化, 其排放出来的烟尘中含有多种元素的自由态和结合态的复合物。其主要化学成分同高炉瓦斯泥, 但铁矿物以 FeO 为主。

(4) 转炉灰。转炉灰是转炉炼钢过程中经干式静电除尘收集的粉尘, 粗颗粒多为灰黑色, 细颗粒颜色为红-褐色。铁、锌成分含量较高。

(5) OG 泥。OG 泥是由转炉煤气经湿法除尘产生, 颗粒较细, 小于 $30\mu\text{m}$ 的约为 80%, 呈胶体状, 很难浓缩脱水, 使用压滤机脱水的滤饼含水也很高, 且很黏, 其氧化亚铁成分很高。

(6) 电炉灰。电炉灰是电炉炼钢过程中经干式静电除尘收集的粉尘, 粒度很细, 小于 $2\mu\text{m}$ 颗粒占到 90% 以上。除含铁外, 还含有锌、铅、铬等金属, 具体化学成分及含量与冶炼钢种有关, 通常冶炼碳钢和低合金钢含较多的锌和铅, 冶炼不锈钢和特种钢的粉尘含铬、镍、钼等。

(7) 平炉尘。平炉尘为平炉吹氧炼钢生产过程中烟气净化电除尘收集下来的粉末, 其中 90% 以上的粒度小于 $10\mu\text{m}$, 呈棕红色或黄棕色粉末状, 其主要成分是 Fe_2O_3 , 含量在 90% 以上, 具有黏度大、粒度细、极干燥、含铁量高、杂质少等特点。

干法收集的粉尘多数采用喷水加湿后用普通卡车输送, 或少数用真空槽罐车输送到原料场。湿法回收的粉尘随排污水自流回水处理车间, 经过浓缩、压滤成含水 20%~30% 的污泥送至原料场。为了加快处理效率, 通常会在泥浆中添加一定数量具有絮凝作用的药剂 (聚丙烯酰胺) 以提高尘泥沉降速度。

1.1.2 危害

冶金尘泥的产量因原料条件、设备状态、工艺流程和管理水平的差异而不同, 每年产生冶金尘泥超过千万吨, 这些巨量的固体废弃物如果不加以合理的处置与利用, 将直接对生态环境造成极大的污染和破坏, 引发灾难性的后果。其危害主要有以下几方面:

(1) 土壤。若将冶金尘泥直接堆放, 则占用了大量土地, 毁坏农田和森林, 且尘泥中 Zn 、 Cu 、 Pb 等有害元素会随着雨水渗入土壤, 土壤中此类元素过高, 致使土壤变质, 严重污染土壤。法国某冶金工厂附近的土壤中含 Zn 、 Cu 、 Pb 的量分别为正常土壤的 6~48 倍、3~232 倍、5~42 倍, 其植物中含量为正常植物含量的 26~800 倍、80~260 倍、30~50 倍, 这些严重威胁当地人的身体健康。

(2) 水体。冶金尘泥中含有 CN^- 、 S^{2-} 、 As^{3+} 、 Pb^{2+} 、 Gd^{2-} 、 Cr^{6+} 等有害元素,

具有很强的化学毒性,如对韶钢瓦斯泥的综合毒性系数评价表明,其综合毒性系数达到 12.16,超过鉴别有害有毒物质规定的 11.16 倍。这些堆积物在雨水的作用下,有害成分浸入地下,对地下水造成污染,此类水体将因污染而不能被用作生活水源。

(3) 大气。冶金尘泥一般粒度很细、流动性好,尤其是小于 $5\mu\text{m}$ 的粉尘能长期悬浮于空气中,影响工人身体健康,风干后飘散于大气中,严重影响空气质量,污染周边环境;另外,含铁粉尘中含有较多粒径小的低沸点碱金属,与空气接触时易与空气中的氧发生氧化反应而自燃,产生有害气体,对大气造成污染。

(4) 对生产工序的影响。烧结生产的原料制备过程中,混合制粒是一种处理尘泥比较有效的方法,但由于除尘灰较轻,且配加比例较小,不易下灰,影响配比稳定,同时由于电厂除尘灰的亲水性较差,堆密度与其他物料相差较多,对混合制粒也产生较大影响。烧结过程中,烧结机在电除尘过程中,大量尘泥会使烧结烟道负压上升、温度下降,为保证参数稳定,需降低料层厚度、增加燃料、提高风量,从而减小尘泥对烧结机的损害。同时由于钾、钠、锌等元素在烧结过程中与氧元素富集,影响料层透气性,进而影响烧结矿的品位和质量。

高炉炼铁生产过程中,冶金尘泥中的有害元素进入高炉中,在高炉内富集,会造成锌循环,由于闭路循环的生产方式,这些高含钾、钠、锌等富集在高炉上会结瘤,堵塞管路,破坏高炉炉衬,既影响高炉顺行又影响生产。

1.2 冶金尘泥资源化现状

冶金尘泥中含有多种可回收利用的有价值成分(如 Fe、C、Zn、Pb、In 等)。据统计,通过回收可使铜、铅和锌等有色金属产量增加 20%~30%,也是部分稀贵金属如铋、铟的主要来源。冶金尘泥作为可利用的资源,对于减少污染排放、企业节能降耗也是被行业共识的,如果直接配入烧结工序或球团工序中,利用率可以达到 70%~90%,但是有害元素循环富集、二次粉尘控制和影响工艺稳定性等是尘泥资源利用过程中难以解决的关键问题;另外,铁矿石、废钢价格大幅降低,在一定程度上降低了企业的参与程度和热情,冶金尘泥的资源利用一度处于停滞状态。

近年来,随着国家相关鼓励性政策出台及二次资源价值提高,特别是锌、铅、铋、铟等稀贵金属资源和冶金尘泥资源综合利用技术的进步,冶金尘泥中资源巨大的潜在价值得到重视,产业化前景正在逐步显现。部分规模较大的钢铁企业专门成立了用于处理冶金尘泥的非钢部门,一些具有前瞻性的高科技企业如红河锌联公司、神雾热能等,自主开发了从冶金尘泥中综合回收多种资源的处理技

术,推动了冶金尘泥资源利用产业化的快速发展。

1.2.1 直接内循环利用

周明顺等针对鞍钢股份有限公司带式机球团生产存在的焙烧温度高的问题,通过在球团中配加瓦斯泥代替固定碳,获得还原性好、软熔开始温度高、熔融温度区间窄的良好效果;同时大幅度降低了能耗:球团电耗从 $48\text{kW} \cdot \text{h/t}$ 降至 $45.6\text{kW} \cdot \text{h/t}$;煤气消耗降低 10%;焦粉降低 1%,焦比降低 0.2%。

鞍钢焙烧球团时配加瓦斯泥,由于瓦斯泥粒度较细,所以无需细磨即可直接加入混合料中,加上其含有较高的 TFe 、 C 、 CaO 、 MgO 等有用成分,且固定碳性质稳定,因而是理想的含碳添加剂。这样做的好处是不但可以大大降低燃料费用,而且还可以使总的能耗降低,并且可以延长带式焙烧机炉膛耐火材料寿命。

王涛对宝钢高炉瓦斯泥进行了试验研究,主要对瓦斯泥压块循环应用于电炉泡沫渣进行了实验室试验,并在实验室研究的基础上进行了现场试验的研究,确定了冷压块工艺和现场应用工艺。这种处理方法对钢水和渣并没有产生明显的影响,而在此过程中,压块中的有价资源得到了很好的利用。

马钢炼铁厂将瓦斯泥、瓦斯灰、二次除尘灰等部分转炉污泥混合堆存,蒸发水分后经料场机械混料,与烧结原矿机械搅拌混合后直接用于生产,降低了烧结矿的成本,解决了尘泥堆积的问题。

邹方敏等直接将高炉瓦斯泥掺水用于烧结。在烧结过程中,泥浆中所含铁质参与了混合料间复杂的物理化学作用得以利用;泥浆中的水分替代了部分烧结过程中的新水用量;泥浆中的氧化钙和氧化硅作为溶剂参与了烧结过程;其中的碳在烧结过程中重新得到利用,降低了能耗。

陈少军在 $2 \times 28.5\text{m}^2$ 烧结机原燃料条件及生产设备条件下,用高炉瓦斯灰部分取代焦粉作为烧结燃料进行了工业性试验。研究结果表明:配加 1% 的高炉瓦斯灰,烧结矿固体燃料消耗下降 4.75kg/t ,而烧结机利用系数、烧结矿品位、烧结矿 FeO 含量、烧结矿转鼓指数和筛分指数没有明显变化。

罗文针对杭钢高炉瓦斯灰添加在烧结配料中引起的问题进行了研究。研究结果表明:烧结使用瓦斯灰可以一定程度降低烧结固体燃料消耗;大量使用含铁废料可以降低烧结生产成本;虽然烧结矿产质量指标有所波动,但通过加强工艺过程控制,改善烧结工艺条件,2007 年全年烧结矿碱度合格率 89.41%,平均转鼓指数 77.44%,能较好地满足高炉生产需求,从综合效益来看还是合算的。

孙宝银对西林钢铁集团公司使用瓦斯灰配入烧结工序做了研究,此公司 2005 年 11 月 3 日开始在烧结工序配用 10% 的磁选瓦斯灰代替未经磁选的瓦斯灰后,烧结工序和炼铁工序的指标都有不同程度的改善:烧结工序扬尘变小;成球率提高了 2%~3%;料层透气性得到改善;烧结机利用系数明显提高;提高了烧结矿

强度及成品率；同时 TFe 升高，减少了白灰配入量，烧结矿品位增加了 2.5% 以上；高炉利用系数提高 $0.20\text{t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 以上，焦比降低 $10\text{kg}/\text{t}$ 以上。

1.2.2 物理分选技术

国外对冶金尘泥有价金属分选技术报道较少，国内对冶金尘泥的物理法处理工艺主要有磁性分离和机械分离两种方法。机械分离按分离状态又可分为湿式分离和干式分离。该工艺的原理是利用锌富集粒度较小和磁性较弱粒子的特性，采用离心或磁选的方式富集锌元素。常用的机械分离方法有浮选-重选工艺、水力旋流脱锌工艺等；常用的磁性分离方法有弱磁-强磁联合工艺。

丁忠浩等利用微泡浮选柱，通过浮选脱碳—脱泥—反浮选脱硅的流程方案处理武汉钢铁公司微细粒高炉瓦斯泥。添加适量的碳酸钠和水玻璃为分散剂，少量煤油为捕收剂，经一次粗选、一次开路精选，即可获得含碳 65% 的碳精矿；脱碳尾矿采用石灰为 pH 调整剂和活化剂、氧化石蜡皂为捕收剂，经两段开路脱硅反浮选，获得 TFe 含量为 52% 的铁精矿。

王玉香等采用三种联合流程分别对鞍钢股份有限公司小西门瓦斯泥进行了试验研究。试验研究表明：重选—反浮选—磁选联合选别流程效果较好，最终铁精矿品位为 56%、金属回收率为 55%、精矿产率为 40%。

于留春等以上海梅山钢铁股份有限公司高炉瓦斯泥为原料，采用弱磁-强磁选工艺回收其中的铁矿物，获得较好的技术指标：铁精矿品位从 35.07% 提高到 50.92%，尾矿品位降到 8.34%；锌从 7.74% 富集到 13.92%，提高 6.18%，脱锌率达 66.98%。

胡晓洪等根据新钢高炉瓦斯泥的矿物特性，考虑到磁选工艺具有运行费用低、操作简单、回收利用率高的特点，采用单一摇床或磁选—摇床联合流程，并加入细筛作业，以防粗颗粒脉石矿物混入精矿，影响精矿质量。通过采用磁选—摇床生产工艺流程进行分选，可获得产率 30.34%、全铁含量 62.10%、全铁回收率 62.04% 的铁精矿，可作为土法冶炼氧化锌的原料。

付刚华针对某钢铁公司粒度较粗、锌含量为 4.43%、碳含量为 18.45% 的高炉瓦斯灰，采用浮-磁联合工艺进行了回收试验，可获得碳品位为 85.17%、回收率达 86.29% 的焦炭精矿，锌含量降低到 1.29%，满足返回烧结配矿利用要求。

赵瑞超等针对包钢含 TFe31.00% 的瓦斯灰进行了回收铁工艺的研究。用圆盘破碎机、行星式球磨机以及磁选管等设备进行了弱磁选—高梯度强磁选和磁化焙烧-弱磁选工艺试验研究。试验结果表明，使用此工艺可有效分离铁、碳和锌等矿物，磁化焙烧-弱磁选工艺比弱磁选-强磁选工艺效果好。磁化焙烧-弱磁选可得到品位为 60.70%，回收率为 70% 以上的铁精矿。其中磨矿细度对磁选有很重

要的影响，应用此工艺时需严格控制磨矿细度。

潘国泰针对福建三钢高炉瓦斯灰的处理回收进行了研究，采用浮选和重选方法将其中的 C、Fe 分离，提选铁精粉和碳精粉返回烧结用作生产原料，剩余尾泥外卖制砖等。研究表明：采用一级浮选的工艺流程选取瓦斯灰中的碳，可获得固定碳含量为 76%、产率 48%、回收率 85.5% 的碳精粉；采用重选回收高炉瓦斯灰中的铁，可获得全铁含量 54%、产率 10%、回收率 24% 的铁精粉，尾矿的全铁含量为 40%~48%；采用重选选取瓦斯灰中的铁，回收率不是很高，建议采用重选及弱-强磁搭配的工艺来回收瓦斯灰中的铁，从而使资源得到最大化的回收利用。

攀枝花新钢钒股份有限公司对高炉瓦斯泥中的碳进行回收，原矿细磨后进行浮选，浮选后的尾矿进行螺旋溜槽一次粗选和两次精选，精矿进行再磨再浮选，可以在入选瓦斯泥含量为 16% 左右的基础上，综合提碳率达到 92% 以上。

鞍钢股份有限公司与高校合作研究了针对瓦斯泥的单一选别流程以及反浮选—磁选联合、重选—磁选联合和重选—反浮选—磁选联合的选别流程。结果表明采用单一的重选、磁选、浮选均难以充分回收瓦斯泥中的铁矿物；而各种联合工艺的分离效果均较好，可获得铁含量 61%、铁回收率 55%、产率为 40% 的铁精矿。

长沙矿冶研究院根据湘钢瓦斯泥工艺矿物学的特点，对多种选矿流程进行实验研究，结果选择浮选—重选—浮选的工艺流程回收铁，获得的铁精矿品位可达 61.40%、产率达到 33.37%、回收率达到 64.34%。

1.2.3 湿法处理技术

从锌在尘泥中的分布来看，单一的物理分离方法将尘泥有害元素含量降至很低较困难，因此常有钢厂采用物理-化学联合法脱除尘泥中的有害元素，化学湿法除锌是一个值得研究的方向，许多国家（如伊朗、芬兰等）采用湿法冶金技术，选用适当的浸出剂，将金属锌从尘泥中选择性地浸取出来，之后对浸出液提纯、分离从而回收。

根据浸出剂的种类不同可以分为强酸浸出（硫酸浸出、盐酸浸出）和弱酸浸出。几种湿法浸出的反应过程及工艺技术特点见表 1-1。

表 1-1 几种湿法浸出的反应过程及工艺技术特点

方法	浸出液	反 应	特 征
酸浸出	硫酸系	一段浸出：pH 值为 2.5~3.5，ZnO 溶解； 二段浸出：pH 值为 1~1.5，200℃ 高压浸出 ZnO·Fe ₂ O ₃ 分解	容易处理，传统的电解法回收 Zn

续表 1-1

方法	浸出液	反 应	特 征
酸浸出	盐酸系	$\text{ZnO} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 吹入 Cl_2 使溶解的少量 Fe^{2+} 转变成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$	一步浸出, 氯化锌的盐酸溶液电解回收 Zn 或者溶剂萃取
	盐酸硫酸混合系	混酸可一步浸出 ZnO 和 $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, 残渣用碱处理	一步浸出, 浸出环境不比盐酸系差
碱性溶液浸出	氯化铵	30% 的 NH_4Cl 100℃ 浸出, 最后回收 ZnO, $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 成为残渣	工艺简单, Zn 回收率难以提高, 回收 ZnO 后需要酸浸才能提取 Zn
	氨水	通 CO_2 气体, 氨水溶解 ZnO, 最后回收 ZnO	应考虑 ZnO 精制
	氢氧化钠	$\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ 经反应}$ $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{ZnO}_2^{2-} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 溶解, 原 NaOH 溶液中电解	最终残渣中 Pb 含量较低

王玉林等以高炉炼铁瓦斯泥为原料, 采用湿法浸取回收其中的有价金属锌、铋以制备氧化锌和氯化铋。利用高炉瓦斯泥中氧化锌的两性而氧化铋为碱性且不溶于碱的特点, 先用 $\text{NH}_3\text{--NH}_4\text{HCO}_3$ 溶液选择性浸取锌, 再利用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--NaCl}$ 使铋化合物能在强酸性环境中水解的性质将铋沉淀析出, 达到锌、铋的分步选择性分离提取, 从而制得高纯氧化锌和氯化铋的目标, 开发出了一种从钢铁冶金企业瓦斯泥中回收利用有价金属锌和铋的二次资源综合利用的方法。

黄平等用硫酸从高炉瓦斯泥中浸出锌、镉。在浸出时间 90min, 温度 90℃, 液固体积质量比 5 : 1, 硫酸浓度 4.5mol/L 条件下, 锌浸出率最高达 87.03%, 镉浸出率为 66.52%。

Julian M. Steer 等利用不同的有机羧酸作为浸出剂, 提取高炉瓦斯泥中的锌, 试验发现 Prop-2-enoic 酸效果显著, 能够提取 85.7% 的锌, 铁的浸取率仅为 8.5%, 成功地实现了锌的浸出, 同时抑制了铁的浸出。

刘淑芬针对攀钢高炉瓦斯泥含锌高、不能直接返回烧结配料的问题, 提出了以该厂自有的钛白废酸作浸出剂, 采用低酸浸出—中和除铁—萃取—电积工艺从瓦斯泥中回收金属锌, 研究了锌的浸出及浸出液除铁过程。结果表明: 在废酸用量 855L/t 瓦斯泥、常温、液固体积质量比 4 : 1、反应时间 2h 条件下, 锌平均浸出率为 97.94%、铁平均浸出率在 6.52% 以下。对此浸出液进行中和氧化沉铁, 在过氧化氢用量为理论用量的 1.3 倍、反应温度为 50℃ 条件下, 铁、砷、锑共沉淀而被除去, 锌损失率在 2.90% 左右。