学

五、小 结

由于地形作用,甲乙丙三厂的扩散参数 平均比平坦地区要大二倍左右; P-G 稳定度 分类基本适用于该三厂;通过对浓度的验算, 表明高斯模式只要对其扩散参数作适当的修 正仍然可以采用;有关排放标准的扩散参数 C_x/C_y 及最大一次浓度的估算,为今后制定有害气体的排放标准和防护距离提供依据;初步摸索了计算无组织排放源强的一些方法.

(参考文献略)

高梯度磁分离处理热轧钢废水*

韦敬祥 陈志诚 吴林娣 (上海市环境保护科学研究所)

一、前 言

高梯度磁分离是近几年发展起来的一项 新分离技术.它可以在高流速下捕集微米粒 级的顺磁性颗粒,设备占地面积小,不受处理 对象的温度、浓度、酸碱度等限制,因而在水 处理应用上具有很大的吸引力.国外在处理 钢铁废水方面已工业化应用,在其他废水中 涂油、除重金属、除磷及除细菌、病毒、悬浮 物等方面都有实验室或中间工厂试验的报 道.国内对高梯度磁分离技术,在水处理中 的应用研究最近几年才开始.

二、原 理

置于均匀磁场的铁磁性钢毛,其边棱产 生的磁力,其大小与颗粒磁化率X、颗粒体积 V及场强H、磁场梯度 $\frac{dH}{dX}$ 成正比.要使磁 性颗粒从液体中分离出来,必须使它获得足 够的磁力 F_m ,并大于相抗衡的流体曳力 F_d 和颗粒重力 F_g 的物理合力,即 $F_m > F_g + F_d$.

$$F_m = XVH \frac{dH}{dX} \tag{1}$$

$$F_g = \rho g V \tag{2}$$

$$F_d = 6\pi\eta b\nu. \tag{3}$$

三、试验装置[1]

结构示意图见图 1、2,特性曲线见图 3、 4. 分离器的通道内,装入一定填充率和厚度 的铁磁性晶态不锈钢毛,截面尺寸为 0.02× 0.08 毫米及 0.03×0.1 毫米⁴.



^{*}本文中的设备及试验部分摘自由我所与上海第二钢 铁厂、上海冶金设计研究院、上海市自来水公司组成 协作组的试验报告。

峑



四、高梯度磁分离器处理 热轧钢废水试验^[1]

(一) 试料

试验中所采用的试料是市售的顺磁性体 Fe₂O₃ 和强性的热轧钢氧化铁皮粉末. Fe₂O₃ 比重 2.6,比磁化系数 40 × 10⁻⁶CGSM 厘 米³/克,粒径小于 20 μ 占 80%;氧化铁皮粉 末比重 4.86,比磁化系数 23846×10⁻⁻⁶CGSM 厘米³/克,粒径为 15μ−45μ 粒级占 84%, 全铁占 72%,见表 1 及图 5、6.

表 1 热轧氧化铁皮粉末化学成分

成分	FeO	Fe ₂ O ₃	С	S	Si	Р	其它
%	52.8	44.3	1.31	0.016	0.14	0.02	1.4



图 5 磁性颗粒的粒径分布图





(二)试验流程 试验流程见图 7.



图 7 试验流程图

1→ 水泵 2→ 高磁分离器 3→ 励磁线图 4→ 转
子流量计 5→ 反冲水箱 16→ 污泥缓冲罐 7→ 取
样器 8→ 真空抽滤盘 9→ 水喷泵

(三)试验结果

1. 场强、流速对 SS 去除率的影响见图 8 及表 2.

流速	场强 (KGs)	SS 土 (mg	除率 g/l)	+ 14 -	备注
(m/hr)		进水	出水	Z, 197 - F1	
500	2.8	185	5.3	97.1	钢毛填充率
800	2.8	193	3.9	98.0	5%,填充厚度
1000	2.8	183	9.2	95.0	15 厘米





图 8 场强与去除率的关系曲线图
(1) ——热轧氧化铁皮粉末
(2) ——Fe₂O₃

2. 进水 SS 浓度的影响 进水 SS 浓度从 77 毫克/升增大到 400 毫克/升时,出水 SS 浓度基本上不变,均在 10 毫克/升以下.

3. 填充层厚度的影响见表 3.

填充层	场强 (KGs)	SS 浓度	(mg/l)	去除率	通水时间 (min)
厚皮 (cm)		进水	出水	(%)	
4	4	229	5	97.8	10
15	4	320	7	97.8	10
20	4	264	5	98.1	10
4	4	298	55	81.5	20
15	4	291	7	97.0	20

表 3 填充层厚度对去除率的影响

4. 钢毛填充率对去除率的影响, 以 5% 填充率为佳.

5. 阻损及流速的变化见图 9、10.

6. SS 捕集量 在本试验中聚磁基质的 单位体积最大捕集量定为: 出水水质在 SS





浓度 <10 毫克/升以下时,聚磁基质 SS 的总 量与基质的体积之比.用晶态不锈钢毛捕集 热轧钢废水中氧化铁皮粉末时,其单位体积 的 SS 最大捕集量为 12.2 克/厘米³,即 1.2 × 10⁴公斤/米³.对分离器来说,在填充**率为** 5% 时,单位容积的最大捕集量为 600 公斤/ 米³.

7. 反冲洗 反冲时压缩空气的压力为 1-1.5公斤/厘米²,反冲水量150升,仅为处 理水量的1%.反冲出水的SS浓度为1.7×10⁴ 毫克/升,浓缩倍数为85倍左右.反冲时间 60秒.钢毛上的SS 残留量为捕集量1.5%.

8. 连续运行试验 将本装置在场强 2.8 千高斯,流速 500 米/小时下进行周期为40分 钟的运行试验,共连续运行 213 周期. 进水 SS 含量平均为 243 毫克/升,出水 SS 含量平 均为 7.9 毫克/升. 连续运行结果见图 11.



五、 讨 论

(一)捕集磁性颗粒的模型

为深入了解试验中发生的现象和问题, 对钢毛捕集磁性颗粒的过程进行了探讨.我 们采用了以圆柱细丝的横截面为基础的颗粒 轨道模型^[2],计算了本试验中捕集磁性颗粒 的模型.将所用钢毛尺寸 0.02×0.08 毫米²变 为等效的细丝的平均直径*D* = 45μ.在通道 中填充细丝时,使其径向与磁场方向相垂直, 细丝形成空间截面近似地视作正方形.铁磁 细丝及磁力线分布图如图 12. 这样就可把



图 12 磁力线分布图

表 4

填充率 (%)	D(µ)	n(µ)	Rn(%)	m(µ)
5	45	180	75.0	250
4	45	200	67.5	280
3	45	230	58.7	330

铁磁细丝的填充率看作为细丝截面与 所形成的空间截面之比.由此计算出 各细丝间的平均距离 *n* 及 *m*.计算结 果如表 4.

举

在背景场强为 H_0 的磁场中,若 H_0 足够大时,铁磁细丝的磁化达到饱 和.设 M_s 为细丝的饱和磁化强度,在 其表面一点的场强为 $H_0 + 2\pi M_s$,若 距表面 l 处的场强为 H_0 ,则两点的场

强的变化率即磁场梯度近似地

 $\frac{dH}{dl} \approx \frac{H_0 + 2\pi M_s - H_0}{D} = \frac{2\pi M_s}{D}$

来求出^[3]. *R*ⁿ 是在两铁磁细丝距离为 *n* 内, 颗粒受磁力作用的范围,用百分率来表示.从 表 4 可看出,填充率由 5% 降至 3% 后,细丝 间距离 *n* 从 180μ 增至 230μ,而磁力作用范 围 *R*ⁿ 大大降低,由 75% 降至 58.7%. 因而 处理效率显著降低.

在螺管式高梯度磁分离器中,废水由下 端送入,水流方向与磁场方向平行.磁性颗 粒被捕集的区域是在铁磁细丝中轴线±45° 夹角的扇形面内^[4].进入扇形面的磁性颗粒 会被铁磁细丝所捕集,而未落入扇形面的颗 粒被水流拖曳流走.按照细丝捕集磁性颗粒



坣

的典型轨迹¹⁰¹来看, 细丝上下都有捕集区域, 这样也就会有在铁磁细丝的上端捕集磁性颗 粒的可能.在捕集区域以外的场强与背景场 强 H₀相同,因此磁场梯度为零,磁力 F_m=0. 故未落入捕集区域的磁性颗粒只受水流曳力 的拖曳, 流过这一层的细丝至下一层细丝.捕 集过程是一层一层地进行的. 图 13 是我们 采用的细丝捕集磁性颗粒的模型图. 在试验 中, 捕集磁性颗粒过程发生的现象基本上是 和这模型相符合的.

(二) 磁力、曳力、重力的计算

根据 (1)(2)(3) 式计算了 试验 中所用 两种试料各个粒度的磁力 F_m 、水流曳力 F_a 和颗粒重力 F_g . 试验中采用钢毛线径平均 为 45 μ ,场强 H=2.8 千高斯. 通水流速 $v_0=$ 500 米/小时,此时磁力范围内的 磁场 梯度 $\frac{dH}{dX} = \text{grad.} H \approx \frac{2\pi M_s}{D} = 1.44 \times 10^6$ 高斯/ 厘米;磁场力 H grad. $H = 4.1 \times 10^9$ 高斯²/ 厘米;比磁力 $f_m = X$ Hgrad. $H = 87.70 \times 10^6$ 达因/克.

图 14 是热轧钢废水氧化铁皮粉 末的 磁 力 F_m 、曳力 F_d 、重力 F_g 与粒度关系图. 经 计算,对粒径 15 μ 的颗粒,磁力 $F_m = 0.075$ 达因, 电力 $F_{d} = 3.9 \times 10^{-3}$ 达因, 若流速增 大至 1000 米/小时, 曳力 F_d = 7.8 × 10-3 达因,可见磁力远远大于曳力,说明 完全可以捕集粒径为 15µ 的颗粒. 若 使磁力与曳力 (流速 va = 1000 米/小 时, $F_d = 7.8 \times 10^{-3}$ 达因)相当,计算 出钢毛直径为 0.43 厘米, 即相当粗的铁 (dyn) 磁细丝也可以捕集 15μ 的颗粒. 由(1) 式可知,要提高磁力,应尽量提高磁场强 Ŧ 度,亦即采用较细的钢毛. 但钢毛太细 时,在强磁场的作用下,它们互相吸引, 从而在填充层内形成槽沟,造成"短路", 使捕集效率降低,并使聚磁基质再生不 能充分进行.因而希望在可能的范围内 选择线径较粗的钢毛作为聚磁基质,使

Ц

其强度及弹性有所改善.这对于反冲、**聚磁** 基质的耐磨损以及降低成本都是有利的.

对于顺磁性体的 Fe_2O_3 ,由于其磁化率较 小,所获得的磁力也很小.图 15 是 4.0 千高斯 场强下不同钢毛线径,不同直径的颗粒所获 得的磁力 F_m 和不同流速下的曳力 F_d 的关 系图.从图中可知,要捕集 1 μ 的 Fe_2O_3 颗粒 是有困难的.要捕集 6 μ 的颗粒,则要采用线 径为 45 μ 的钢毛,流速在 75 米/小时左右.试 验中采用的钢毛尺寸为 0.02 × 0.08 毫米², 75 米/小时流速时的去除率可达 90%.这与计 算基本相符.因而我们可以利用 (1)(2)式, 根据处理对象的粒度及磁化率来选择合适的



举

钢毛线径及通水流速.

(三) 捕集过程中阻损变化

将连续运转 213 周期的试验结果,按其 周期结束时流速分组,求出其阻损 Δp、进 水浓度 SS_{#*}、出水浓度 SS_{#*} 及磁性颗粒的 捕集量ΣSS 的平均结果,来探讨各变量之间 的关系.根据流体力学的概念,阻损可分为沿 程阻损与局部阻损.高梯度磁分离器可看作 产生局部阻损的一个组合元件,其局部阻损 包括由分离器、钢毛所产生的阻损和由于捕 集磁性颗粒而产生的阻损

$$\Delta p = \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g}$$
$$= (\Sigma \zeta_f + \Sigma \zeta_m + \Sigma \zeta_{ss}) \frac{v^2}{2g} (4)$$

式中: $\Sigma \zeta_{f}$ ——与分离器结构有关的总阻力 系数; $\Sigma \zeta_{m}$ ——与采用的钢毛直径、形状及 填充率有关的总阻力系数; $\Sigma \zeta_{ss}$ ——与被捕 集的磁性颗粒量有关的总阻力系数,可写成 $\Sigma \zeta_{ss} = C \times \Sigma SS$, C = 常数; v——通水流 速.

$$\therefore \quad \Delta p = (\Sigma \zeta_f + \Sigma \zeta_m + C \times \Sigma SS) \frac{v^2}{2g}$$
$$= \Sigma \zeta_f \frac{v^2}{2g} + \Sigma \zeta_m \frac{v^2}{2g}$$
$$+ C \times \Sigma SS \frac{v^2}{2g} \qquad (5)$$

在开始通水时,阻损是由钢毛及分离器 阻力所产生的.此时 ΣSS = 0,由(5)式可求 出 $\Sigma \zeta_{f} + \Sigma \zeta_{m}$,在通水过程中它是一个常数. 随着磁性颗粒的捕集量增加,总的阻损增大. 根据试验周期结束时的阻损及流速,可以计 算出 $\Sigma \zeta_{ss}$.图 16 为 $SS_{B4x}, \Sigma \zeta_{ss}, \Sigma SS 及 \Sigma SS/t$ 与 Δp 的关系图. 从图中可看出 ΣSS 与 Δp 基本上呈直线关系. 对不同的起始流速,两 直线的斜率相同,截距不同,即起始阻损不同. 从图中也可看出 $\Sigma \zeta_{ss}$ 与 Δp 亦呈直线 关系,且平行于 ΣSS 与 Δp 的关系直线. 说 明 $\Sigma \zeta_{ss} = C \times \Sigma SS, C$ 为常数. 不同钢毛 尺寸及形状时,起始阻损也不同. 表5是500 米/小时流速时,不同尺寸钢毛的起始阻损. 可见,试验结果与式(4)是相符的.

表 5

钢毛尺寸(mm)	阻损 (Kg/cm²)		
φ0.2	0.24		
0.03×0.12	0.33		
0.001×0.3	1.0		

为了增加高梯度磁分离器的处理能力, 希望尽量在较大捕集量时仍有较小的阻损。 从式(4)可知,只要选择合适的钢毛尺寸、形 状及填充率,可以获得较小的阻损,从而有利 于泵的选择及增加每周期的 SS 的捕集量.

从图 16 可见,要使出水 SS 含量 <10 毫 克/升,必须控制阻损 $\Delta p \leq 1$ 公斤/厘米².在 这条件下,由捕集 SS 所产生的总阻力系数 $\Sigma \zeta_{ss} < 1 \times 10^4$,捕集 SS 总量 $\Sigma SS < 2.8$ 公斤,而钢毛捕集 SS 的每分钟速率为 ΣSS



图 16 $SS_{\pm k}$, $\Sigma \zeta_{SS}$, ΣSS , $\Sigma SS/t$ 与 ΔP 的关系图

举

t < 65 克/分.此时,可算出单位体积钢毛的 最大捕集量 $q_{max} = \frac{P_{SS}}{P_m} \cdot \delta_m = \frac{2.8}{1.8} \times 7.8 =$ 12 克/厘米³;通水时允许的进水平均浓度 $SS_{\#\pi} = \frac{6 \times 10^5 \cdot q_{max} \cdot hf}{t \times v} = 272$ 毫克/升; 捕集磁性颗粒的速率 $\Sigma SS/t = (SS_{\#\pi} - SS_{\#\pi}) \times q \approx 68$ 克/分.

式中:*Pss*——固体悬浮物 *SS* 重(公斤); *P_m*——钢毛重(公斤); *δ_m*——钢毛密度(克/ 厘米³); *h*——填充层厚度(厘米); *f*——填 充率(%); *t*——通水时间(分); *v*——通水 流速(米/小时); *q*——分离器每分钟处理水 量(升/分).

计算结果与试验结果基本相符.说明根 据单位体积钢毛最大捕集量和对出水固体悬 浮物 SS 含量的要求,可预估工艺流程各项参 数的范围,从而有利于高梯度磁分离工艺过 程的控制.

六、结 束 语

试验结果表明:利用高梯度磁分离处理

热轧钢废水是完全可行的.它具有处理速率 高、出水 SS 含量低、设备占地面积小等优 点.如何有效地使用高梯度磁分离器,关键在 予选择合适的聚磁基质及其填充方式.正如 本文讨论中所指出的那样,可以根据处理对 象的粒度及磁化率来确定处理流速、磁场强 度和钢毛的线径.通过测定钢毛的 SS 最大捕 集量及所要求的出水 SS 含量,来预估处理工 艺流程的效果及各个参数的值.以上这些计 算和预估方法是否适用于其他废水的处理, 还需要大量的试验结果来验证,从而作出定 量的分析.这些都有待于今后的深入研究.

主要参考文献

- [1] 韦敬祥、陈志诚、吴林娣,"环境科学丛刊"(6-7), 63 (1981).
- [2] Watson, J. H. P. J. Appl. Phys 44(9), 4209 (1973).
- [3] Oberteuffer, J. A. IEEE Trans. MAG-9(3) 303 (1973).
- [4] Watson, J. H. P. 1975 Dig. INTERMAG Conf. 24-2 (1975).
- [5] Powers, G. J. & Cummings, D. L. 1975 Dig. INTERMAG Conf. 24-1 (1975).

累积性库仑法测定二氧化硫

严辉宇 朱祥岩 (中国科学院环境化学研究所)

一、 概 述

测定大气中二氧化硫,目前的主要方法 是将其吸收在溶液中而后进行测定.早期测 SO₂ 是用碘量比色法¹¹¹,1956 年 West 报道 了盐酸副品比色¹²¹,随后对此法做了不少改 进¹³¹,基于库仑法如文献 [4-6].

本工作的目的是建立一种累积性,简易 快速的 SO₂ 测定方法. 用 0.1*M* Na₂HgCl₄- 1M KBr 缓冲溶液作吸收液,直接电生 Br, 滴 定.优点是二氧化硫在四氯汞钠溶液中形成 较稳定的络合物,可长时间采样,测定范围广.

本法测定 7 微克 SO₂ 平均误差 < ±1%, 1.8 微克 SO₂ 平均误差 < ±4%. 检测下限 为 0.02 毫克/立方米(采样 20 分钟). 1:1的 NO₂ 不影响测定, 7 倍于 SO₂ 的 NO₂ 量只 使 SO₂ 结果降低 3.3%.少量 H₂S 不干扰测定 (因与溶液中汞离子形成 HgS 沉淀),主要干