

- (1974).
- [6] Witt, H. T., *Bioenergetics*, **505**, 355 (1979).
- [7] Dieter, W., *ibid.*, **505**, 279 (1979).
- [8] 箸本英吉ら, 生物物理化学(日), **23**(1), 9(1979).
- [9] Gilbert, B., *Chemistry*, **52**, 12 (1979).
- [10] Semenza, G. *et al.*, *Biochem. of Membrane Transport*, Springer-Verlag, p. 116—122, 1977.
- [11] Fenton, D. E., *Chem. Soc. Rev.*, **3**, 325 (1977).
- [12] 早津彦哉, 生物浓缩, 講談社, p. 4—26, 1975.
- [13] Edwards, C. A., *Environment Pollution by Pesticide*, Plenum Press, London, p. 134—180, 1973.
- [14] Davis, A. G., In *Radioactive Contamination of the Marine Environment*, International Atomic Energy Agency, Vienna, p. 403—420, 1973.
- [15] Lockwood, A. P. M., *Effects of Pollutants on Aquatic Organisms*, Cambridge University Press, p. 7—28, 1976.
- [16] Nelson Smith, *Oil Pollution and Marine Ecology*, Eler-Science, London, p. 100—102, 1972.
- [17] Mansfield, T. A., *Effects of Air Pollutants on Plants*, Cambridge University Press, 1976.
- [18] Porter, K. R. *et al.*, *J. Cell Biol.* **59**, 633 (1973).
- [19] Douglas, H. K. Lee, *Handbook of Physiology*, Sec. 9, American Physiological Society, p. 563, 1977.
- [20] Strathman, H., *Pure and Appl. Chem.*, **46**, 213 (1976).
- [21] 北川利夫, 膜(日), **4**(4), 239(1979).
- [22] Blaisdell, C. J. *et al.*, *A. I. Ch. E. J.*, **18**, 1015 (1972).
- [23] Koushanpour, E., *Renal Physiology*, W. B. Sanders Company, p. 66—67, 1976.
- [24] 富田豊, 电气化学および工业物理化学(日), **46**, 318(1978).
- [25] Webber, L. M., *Anal. Chim. Acta*, **93**, 145 (1977).
- [26] Zemel, N., *R/D*, **28**(4), 38(1977).

高梯度磁分离在污水处理方面的应用

陈国华 杨宗毓

(西南应用磁学研究所)

一、高梯度磁分离物理现象

我们可以把自然界存在的物质, 根据不同的磁性, 分为三种类型:

铁磁性(强磁性)物质. 这种物质具有很大的磁化率, 所以, 在外磁场的作用下极易磁化, 并随着磁场增加很快出现磁饱和现象. 此后, 其磁化强度不因外磁场强度增加而变化.

顺磁性(弱磁性)物质. 它的磁化率很小, 在较低的外磁场作用下不易磁化. 然而, 它的磁化强度随磁场增加而不断上升, 在一个非常强的磁场下甚至可能超过不纯的铁磁性物质的磁化强度.

抗磁性物质. 它是由非磁性离子组成的, 其磁化率很小而且为负值.

在外加磁场作用下, 磁力与分离对象的

作用方式可作以下说明. 把每一颗被磁化的粒子看成两端各自为南北极的一个小磁体, 当向被磁化的粒子上施加均匀磁场时, 作用在它两端的力大小相等而方向相反, 因此合力为零. 只有外加磁场在粒子两端的强度不一样, 才会有磁力作用在粒子上, 就是说, 磁场必须有一个梯度. 在磁场中, 粒子上受到的磁力与粒子的磁化强度(M)、粒子的体积(V)、磁场的梯度 dH/dx 成正比. 我们列出简单的表达式, 即:

$$F_{\text{磁力}} = VM \cdot dH/dx \quad (1)$$

式中粒子的磁化强度 M 可以看成为物质的磁化率 χ 与磁场 H 的乘积 χH , 那么公式(1)就变成下式:

$$F_{\text{磁力}} = V\chi H \cdot dH/dx \quad (2)$$

从式(2)可以看到: 在铁磁性物质场合, 因为它的磁化率 χ 很大, 即使外加磁场 H 不很高,

粒子的磁力也很大。这就是铁磁性物质容易被磁铁吸引的道理。但是，在顺磁性物质场合，因为它的磁化率很小，要增加磁力必须提高外加磁场或磁场梯度。增大磁场有一定限度，另外也要考虑到经济上的利益，所以，只有极力提高磁场梯度。

二、高梯度磁分离器结构和分离原理

目前，最常用的高梯度磁分离装置是美国麻省理工学院设计的科尔墨型结构（见图1）。它是由绕在软铁芯上的线圈和外层铁壳组成的罐盒，其内部填满了直径为微米级的铁磁性不锈钢毛。在磁场中，这些不锈钢毛周围有很大的磁场梯度，能达到千高斯/微米量级，所以，能有效地捕捉顺磁性物质；而当磁场消除时，捕捉物非常容易地就被清洗掉。计算得出：当不锈钢毛的直径大于被分离粒子的直径3倍时，粒子上受到的磁力最大，也就是磁场梯度与粒子尺寸的匹配值。在表1中，我们列出了普通磁铁型分离器和高梯度磁分离器的特性。

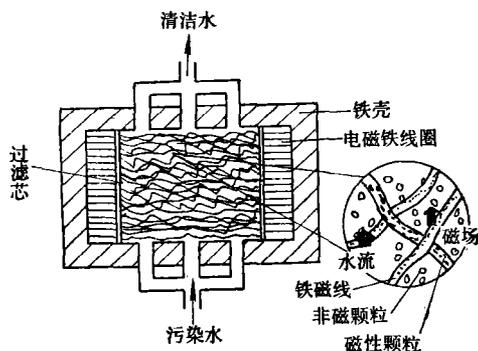


图1 科尔墨型高梯度磁分离器的结构

磁分离器的工作原理是基于磁力与各种力(重力、摩擦力、惯性力、液体曳力和粒子间力)相互竞争。根据不同的磁分离装置，这些力有些是主要的，有些是次要的。在废水处理方面，重力和流体曳力与粒子间力是主要参数。但是，重力只对大颗粒有效，液体曳力对小颗粒有效。要起到磁分离作用，磁力就

表1 普通的和高梯度的磁分离器的特性

| 器件 | 磁力范围 (厘米) | 磁场(奥) | 磁场梯度 (奥/厘米) | 力(达因/厘米) | |
|---------|--------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|
| | | | | Fe ₂ O ₃ | CuO |
| 普通永久磁铁型 | 5 | 500 | 500 | 3×10 ³ | 5 |
| 高梯度科尔墨型 | 0.01 | 5×10 ⁴ | 2×10 ⁶ | 10 ³ | 8×10 ³ |

必须大于重力和液体曳力。首先我们简单地写出磁性物质提取效率R的关系式：

$$R_{\text{磁性}} = K \frac{F_{\text{磁力}}}{F_{\text{竞争力}}} \quad (3)$$

式中K是比常数。从式(3)中我们能明显地看出：磁力越大，磁性物质的提取效率就越高；反之，竞争力越大，提取效率就越低。竞争力在湿法分离时主要取决于液流的速率。在自然水质中存在着许多非磁性污染物，这就需要施加磁性粒子材料来排除这些污染物。这时，我们要考虑磁性粒子和非磁性粒子间的作用力，当粒子间力小于竞争力时，非磁性粒子就不能捕捉；而当粒子间力大于竞争力时，非磁性粒子才能吸附在磁性粒子上。非磁性粒子提取率可用下式表示：

$$R_{\text{非磁性}} = K' R_{\text{磁性}} \frac{F_{\text{粒子间力}}}{F_{\text{竞争力}}} \quad (4)$$

为了增加粒子间力，我们可以采用絮凝剂。这种方法在两个方面有很大的效果。第一，从水流中快速排除悬浮体，以及生存的细菌和降低颜色、浊度。第二，能有效地快速排除水中溶解的磷含量，取代大面积沉淀水池。

三、在废水处理方面的应用

在一般的工业废水中含有许多重金属悬浮体及油类等污染物。对于颗粒尺寸为微米级的磁性和顺磁性物质污染物，我们可直接采用高梯度磁分离技术。对于其它非磁性和颗粒尺寸在微米以下的污染物，我们先施播磁性捕捉粒子和絮凝剂，使污染物共沉和粘结起来，随后通过高梯度磁分离器有效地排除。下面，我们绘出了工业废水处理装置的

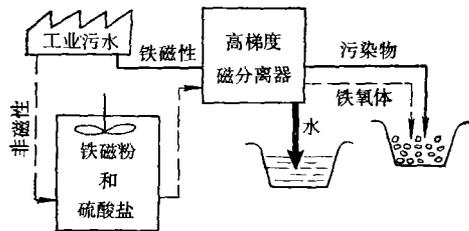


图2 工业废水处理装置示意图

示意图。

1. 钢铁工业废水处理

钢铁工业排出的废水中含有大量的微米级的铁氧化物粒子。这种废水最好的利用是除去污染物后循环使用。我们把钢铁工业废水中污染物的含量和尺寸大小列于表2。

表2 钢铁工业废水特征

| 废水来源 | 主要化学成分 (%) | | 粒子直径 (%) | | |
|------|--------------------------------|---------------------------|----------|---------|--------|
| | Fe ₂ O ₃ | C, SiO ₂ , CaO | 100μm 以上 | 100—5μm | 5μm 以下 |
| 高炉 | 52.3 | 24.1 | 5.0 | 65.3 | 29.7 |
| 转炉 | 95.9 | 3.5 | 8.25 | 91.5 | 0.25 |
| 热压 | 90.5 | 0.22 | 35.2 | 65.8 | — |
| 铸造 | 89.1 | 0.96 | 95.7 | 4 | 0.15 |

高梯度磁分离器处理钢铁厂的废水时，过滤速度达200—1,000米/小时。这种过滤速度是一般水处理用的高速过滤机的10—30倍，相当于沉淀池的100倍。采用的外磁场强度一般在3千奥左右，而处理铸铁废水时，也能用1千奥磁场。对于含有大约30%以上非磁性粒子的高炉洗涤水，直接用高梯度磁分离器处理不能达到标准值，但是，若在水中施加絮凝剂就能有效地排除非磁性粒子。最近，日本的日立工厂设备建设公司为川崎钢铁厂建造了处理能力为900立方米/小时的大型高梯度磁分离器。图3描绘出了高梯度磁分离器排除顺磁性粒子Fe₂O₃、Cr₂O₃的实验结果。图4描绘出了钢铁工业废水处理的实验结果。从图中可以看出，3千奥的磁场就能充分地分离顺磁性粒子。在作小容量处理时，可以用永久磁铁产生磁场。

2. 城市废水处理

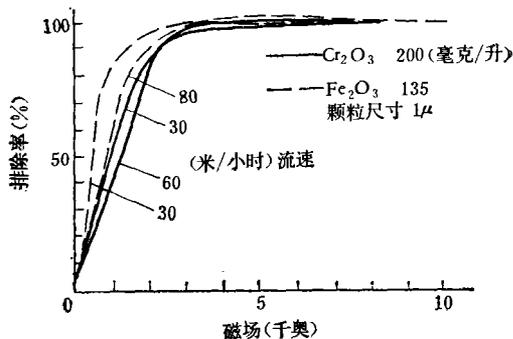


图3 处理Fe₂O₃、Cr₂O₃时，磁场与提取效率的关系

一般的城市废水中含有大量的非磁性污染物，假如采用磁性施加粒子和适当的化学处理，就能排除水中苛利芳菌、颜色粒子和各种重金属悬浮体。

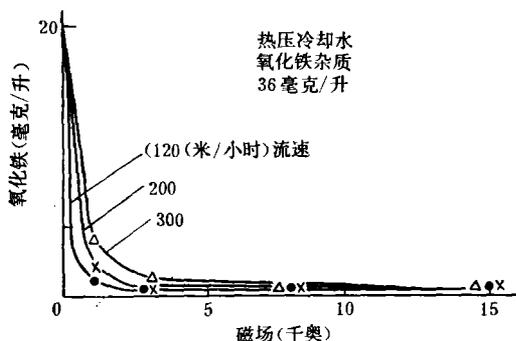
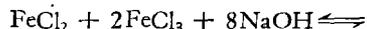


图4 处理热压废水时，磁场、流速与提取效率的关系

施播磁性粒子的方法一般称为铁氧体共沉淀法。例如：在被处理溶液中加入适量的氯化铁，并在其中添上氢氧化钠进行中和的话，就会产生氢氧化铁[Fe(OH)₃]红褐色胶状体。其化学反应式如下：



这种胶状体能把各种悬浮体重金属离子捕捉，并一起共沉淀。溶液中通过空气，就会使这些共沉淀物变成较大颗粒的铁氧体。这些是人们熟悉的氢氧化物共沉淀。在下面列出能与氢氧化铁共沉的金属离子。然而，对于提取这些铁磁性沉淀物，最原始的方法是用磁铁块来吸引捕捉，现在采用高梯度磁分

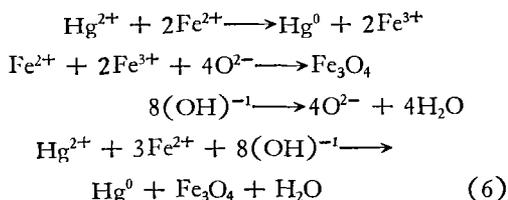
表 3 美国麻省理工学院处理污水的实验结果

| 污 染 物 | 查尔思河流水样 | | | | 城市废水取样 | |
|----------------|---------|-------|--------|-------|-------------------|--------|
| | 表 面 | | 底 部 | | 未 处 理 | 处 理 后 |
| | 未 处 理 | 处 理 后 | 未 处 理 | 处 理 后 | | |
| 苛利芳菌(条/100 毫升) | 16,000 | 0 | 16,000 | 300 | 2.8×10^6 | 18,000 |
| 混浊度 (NTU) | 20 | 2 | 1,700 | 1 | 50 | 3 |
| 颜 色 | 105 | 3 | 3,700 | 1 | 150 | 20 |
| 悬浮体(毫克/升) | 7 | 5 | 680 | 5 | 45 | 9 |

离器,就能高流速和高效地捕捉它们。

与氢氧化铁共沉的金属离子有: B^{3+} 、 Be^{2+} 、 $P(PO_4^{3-})$ 、 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 As^{3+} 、 As^{5+} 、 Bi^{3+} 、 Y^{3+} 、 Zr^{4+} 、 Nb^{5+} 、 In^{3+} 、 Sn^{4+} 、 Ba^{2+} 、 Pb^{2+} , 除此之外,还有 Se、Mo、U、Pt 等。

处理水银时,我们可以采用亚铁盐。例如在含有水银的废水中加入硫酸亚铁就会产生灰黑色的 Fe_3O_4 , 水银离子还原为金属水银贴在 Fe_3O_4 上, 这时再采用高梯度磁分离器就能非常方便地除去水银。其化学反应式简单表示如下:



美国麻省理工学院的学者们采用高梯度磁分离器处理施加了 Fe_3O_4 和硫酸铝的污水, 获得良好的效果。其实验结果列于表 3。

这是铝金属离子在磁性施加剂和污染物之间产生强的粘合作用。因为铝离子添加进溶液中形成铝氢氧化物, 它能把各种物质捕捉凝聚起来。通常处理正磷酸盐污水是比较困难的, 需要很大面积的澄清水池和很长的沉淀时间。相比之下, 高梯度磁分离只需要在添加铝离子后几分钟就可以进行处理。絮凝物的排除速率一般为 50 加仑/分·呎², 最高可达 150 加仑/分·呎²。

在这些水处理过程中, 假如污水是含有大量悬浮体金属盐类的碱性溶液, 一般没有

必要加絮凝剂硫酸铝, 因为 Fe_3O_4 施播粒子本身也能和金属盐凝结起来。美国格弗尔研究发展公司采用不同的方法作了一些实验, 结果列于表 4。

表 4 采用不同方法的分离实验结果

| 处理方法 | 油 (ppm) | 悬浮固体 (ppm) | 苯酚 (ppb) |
|-------------------|---------|------------|-------------|
| 美国石油研究所分离器 | 190—240 | 142—204 | 1,500—4,200 |
| 空气浮动装置 | 53—121 | 42—44 | 970—3,780 |
| 高梯度磁分离器 | 23 | 57 | 1,600 |
| 高梯度(加磁性粒子) | 19—23 | 3—5 | 1,883 |
| 高梯度 (磁性粒子+絮凝剂) | 5—20 | <1—18 | 260 |

3. 饮用水净化

现在城市饮用水的主要净化方法是氯化杀菌。但是, 人们发现氯化会带来毒性或致癌等副作用。哈佛大学研究人员发现某些病毒会吸附在氧化铁或其它磁性粒子上, 如最常见的大肠杆菌病毒就非常喜欢吸附在磁性粒子表面上, 利用高梯度磁分离技术就能有效地清除掉它们。最近, 美国格弗尔研究发展公司采用高梯度磁分离器处理了含有苛利芳菌的污水。仅施播 Fe_3O_4 粒子就能消除苛利芳菌 91%, 从 700 条/毫升降低到 60 条/毫升; 如再施加 $Al_2(SO_4)_3$ 絮凝剂就能消除到 99% 以上, 从 900 条/毫升降到 2.5 条/毫升。据报导, 目前用高梯度磁分离方法处理城市饮用水的费用与常用的方法相等, 但占地面积小。还应该指出, 水通过强磁场后会发生质变, 能防止锅炉和热水管道结成水垢。另外, 磁化后的水对人、畜和植物等, 都能带来一些益处, 对预防和治疗结石病具有积极的意义。

四、结 论

高梯度磁分离技术是七十年代发展起来的一门新兴的磁应用科学,开始用于分离磁性和非磁性混合物。例如,从高岭土中提取磁性杂质;精选弱磁性的赤铁矿;提高矿石的品位等。随着各国对环境保护提出的要求以及高梯度磁分离技术能分离弱磁性细颗粒的优越性,这就发展到环境保护的应用方面。在这方面,首先用于脱硫,因为硫大多数是以弱磁性黄铁矿的形式蕴藏在煤中,把粉化了的煤通过高梯度磁分离器处理后,就能简便有效地脱硫;另外,高梯度磁分离技术还为高炉的烟尘和炉渣的处理开辟了良好的应用前景,它可以从中提取、回收有用的金属元素。

目前,国内外广泛使用铁氧体法处理含重金属元素的废水,但是,提取铁氧体沉淀物也是非常麻烦的事。高梯度磁分离器能高流速、大容量、高效率地处理废水,所以,这种技术引起了世界各国环境保护工作者的高度重视。概括地说,采用高梯度磁分离技术具有以下优点:

(1) 处理污水的速度快、容量大、效率

高;

(2) 不需要很大的沉淀池,占地面积小;

(3) 降低了成本,因为不需要昂贵的化学试剂和复杂的设备;

(4) 装置简单,容易推广到每一个工厂企业;

(5) 采用磁性施加粒子和絮凝剂能处理各种城市废水。

随着科学技术的飞跃发展,超导磁铁的出现将进一步扩大高梯度磁分离技术的应用范围,同时,磁分离技术也能成为超导磁铁的主要应用领域。采用超导技术能进一步提高磁场梯度和降低耗电量,扩大分离范围和降低成本。这一发展可使水循环更加完善化和消除江河湖泊的污染。

参 考 文 献

- [1] Oberteuffer, J. A., *IEEE Trans. MAG-9*, 3, 303 (1973).
- [2] Latout, C. De., *IEEE Trans. MAG-9*, 3, 314 (1973).
- [3] 冈本祥一, *应用物理*, **43**, 2, 183(1974).
- [4] Petrakis, L., *IEEE Trans. MAG-12*, 5, 486 (1976).
- [5] Petrakis, L., *IEEE Trans. MAG-14*, 5, 419 (1978).
- [6] 日立评论, **61**, 3, 23(1979).

全国污水灌溉和环境学术讨论会在沈阳召开

中国环境科学学会、中国农学会委托中国科学院林业土壤研究所、农业部环境保护科研监测所、沈阳市环境保护局和沈阳市科协共同筹备的全国污水灌溉与环境学术讨论会于一九八〇年七月二十一日至二十五日在沈阳举行。参加会议的有来自全国有关环保、监测、科研、卫生、城建和高等学校以及主要污灌区等 68 个单位 86 名代表。这次会议主要内容是介绍国外污灌概况,交流国内污灌与环境方面的科研成果。与会代表充分肯定了污水灌溉的积极作用和现实意义,同时指出当前污水灌溉中存在的严重问题。会议提出

对我国今后灌溉和环境工作的看法和建议,并拟定了开展污水资源农业利用与消除污染、保护环境的研究课题,建议列为国家重点研究项目。

又讯:七月廿六日至廿七日沈阳市污灌区环境质量评价技术鉴定会接着召开,48 个单位 70 名代表参加。会议认为,通过多年调查试验,基本上查明污灌区的污染状况、污染程度,在局部地区污染物对农田生态系统和人体健康产生的严重影响,为沈阳地区环境质量评价及综合治理提供科学依据。

(陈涛供稿)