

磁分离水处理技术

原理和应用



主 编 倪明亮

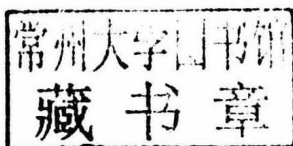
副主编 张 统 王吉白 钟晓红

中国建筑工业出版社

本书受国家重大科技专项《水体污染控制与治理科技重大专项》课题《高品质再生水与水体净化成套装备研发及产业化》(课题编号 2014ZX07216-001) 资助出版。

磁分离水处理技术原理和应用

主 编：倪明亮
副 主 编：张 统 王吉白 钟晓红
编著人员：陈 立 张鹤清 肖 波
易 洋 吉青青 王哲晓
黄 开 黄光华 董春宏



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

磁分离水处理技术原理和应用/倪明亮主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 7
ISBN 978-7-112-23588-9

I. ①磁… II. ①倪… III. ①分离器-应用-城市污水处理-研究
IV. ①X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 068160 号

磁分离是一种通过磁体提供的磁场吸力来实现物质分离的技术,属于物理分离法,是 20 世纪 70 年代初在美国发展起来的,它能快速地分离混合物中的磁性杂质。磁分离利用废水中杂质颗粒的磁性进行分离,对于水中非磁性或弱磁性的颗粒,利用磁性接种技术可使它们具有磁性。借助外力磁场的作用,将废水中有磁性的悬浮固体分离出来,从而达到净化水的目的。与沉降、过滤等常规方法相比较,磁力分离法具有处理能力大、效率高、能量消耗少、设备简单紧凑等一系列优点,它不但已成为应用于高炉煤气洗涤水、炼钢烟尘净化废水,轧钢废水和烧结废水的净化,而且在其他工业废水、城市污水和地表水的净化方面也很有发展前途。当前在城市黑臭水体治理、海绵城市建设、污水处理厂提标改造之中,磁分离技术都有较好的应用。

全书共 7 章,分别介绍了各类磁分离水处理技术的原理、设备和发展,供从事水处理技术研究应用的专业人员参考使用。

责任编辑:刘爱灵

责任设计:李志立

责任校对:王 瑞

磁分离水处理技术原理和应用

主 编:倪明亮

副 主 编:张 统 王吉白 钟晓红

编著人员:陈 立 张鹤清 肖 波

易 洋 吉青青 王哲晓

黄 开 黄光华 董春宏

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:15 字数:368 千字

2019 年 9 月第一版 2019 年 9 月第一次印刷

定价:60.00 元

ISBN 978-7-112-23588-9

(33863)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

一

自古以来，时势造英雄。对于一项流行的技术，甚是类同。磁分离技术应用于水处理，近年来迅猛发展，正是水环境治理进入快速、高效的时势所要求的。

磁分离技术是借助磁场力的作用，对磁性不同的物质进行分离的一种物理分离方法。其最早应用于选矿业，1845年美国发明了工业磁选机，磁分离开始以机械设备的形态陆续在煤脱硫、玻璃及水泥等原料除铁、高岭土提纯等选矿以外的领域得到规模化应用。20世纪60年代，苏联利用磁聚凝法处理钢厂除尘废水，磁分离技术开始应用于水处理领域。而在中国发展到当前的比较普遍应用态势，是跟中国任务艰巨而形势紧迫的水环境治理紧密相关的。更具体地说，是中国城市黑臭水体治理的强劲需求推动了这个技术的广泛应用。

关于水污染防治，本来是有不少法律法规作出了规定、提出了要求。但是过去屈从于追求经济的高速增长，有法不依、执法不严却成为常态，终至全国水环境尤其是城市水环境污染态势十分严峻，以至于又调集多个部委力量编制、以国务院发文的形式专门出台一个《水污染防治行动计划》。这个计划按照解决水环境问题的十个方面给出了十大条内容，简称“水十条”。经过多轮修改的“水十条”在污水处理、工业废水、全面控制污染物排放等多方面进行强力监管并启动严格问责制，铁腕治污将进入“新常态”。2015年2月，中央政治局常务委员会会议审议通过《水十条》，4月2日成文，4月16日发布。据测算，“水十条”投资将达两万亿元。

其中对于城市黑臭水体治理有专门的篇章，提出了两道时间红线。一道是2017年，一道是2020年——“加大城市黑臭水体治理力度，每半年向社会公布治理情况。地级及以上城市建成区应于2015年底前完成水体排查，公布黑臭水体名称、责任人及达标期限；于2017年底前实现河面无大面积漂浮物，河岸无垃圾，无违法排污口；于2020年底前完成黑臭水体治理目标。”在实际工作中要求2017年底省会城市率先完成黑臭水体治理工作，在2020年底前实现“地级及以上城市建成区黑臭水体均控制在10%以内”。

磁分离水处理技术的两个主要工艺技术路线，即超磁分离技术和磁加载沉淀技术，都具有停留时间短，占地面积小，对悬浮物（SS）、磷、COD具有高效去除的技术特点。这正迎合了这个时代水环境治理的需求。形势如此迫切，任务如此艰巨，鉴于其独特的技术优势，磁分离水处理技术得到了快速的推广应用！

二

磁分离水处理技术主要有两个技术细分方向。

一个是超磁分离（磁盘吸附分离）技术。在来水中加入絮凝剂和磁种，发生磁混凝。通过这一步骤，水流中不带磁性的悬浮物与磁种裹挟在一起而形成磁性絮团。随后流经持续旋转的永磁磁盘，悬浮物被吸附在磁盘上并被隔磁刮条刮下，实现清浊分离。清水作为处理出水，可继续进一步处理（如生态处理、消毒等），或排放进入水体。污泥则首先经磁性絮团解絮分离和回收磁种的循环利用，剩余污泥经脱水外运处置。该项技术水力停留时间仅约 4~6 分钟。快速有效是其突出特点。

另一个是磁加载沉淀分离技术。即向来水中加入混凝剂和磁种之后，进入沉淀池让悬浮物完成沉淀澄清过程，上清液就是处理后出水，底层是含有磁种的混合污泥，也需要进行磁种回收循环利用，剩余污泥需进一步脱水处理处置。该工艺技术水力停留时间在 15—20 分钟，比超磁分离的要长，但是运行更稳定，处理出水 SS 可低至 5mg/L 以下，具有高效、稳定运行的突出特点。

由于磁分离水处理技术所具有的良好沉降性能、高效快速地实现清浊分离、有效除磷、降低 COD 等特点，在钢铁冶金浊循环废水处理、煤矿地下采矿仓水处理及地表煤场压尘废水处理、采石场废水处理得到广泛应用。当前在城市黑臭水体治理、污水处理厂提标改造等方面得到比较普遍的应用，并且已有相应的设计规范，近些年来市场需求快速增长。

三

真正促成本书得以完成编著付诸出版的动因是环能科技作为国家重大科技专项《水体污染控制与治理科技重大专项》（水专项）的课题参与方，参加了课题《高品质再生水与水体净化成套装备研发及产业化》（课题编号 2014ZX07216-001）研究工作，承担了其中子课题《劣 V 类水预处理成套技术研发和产业化》（任务编号 2014ZX07216-001-1）。其中对于其科技成果的凝练总结就有出版科技著作的要求。

作为国内少数几家专门以磁分离水处理技术和设备研发、生产、工程和运营技术服务为主要业务的环保公司，环能科技专注于磁分离水处理技术的研发，至今已有二十余年，技术设备研发已迭代至第五代，第六代正在研发之中，核心技术获得过国家科技进步二等奖，技术应用时间长、案例多。我们早就有设想和计划，总结本公司以及社会上其他单位在磁分离水处理技术研发成果及产业化应用经验，编辑出版以此为主要内容的图书。但是由于公司忙于生存发展诸事，难以汇集成稿，直到此次借助水专项任务的压力和动力，终于得以克服重重困难，玉成此书的出版。

本书主编倪明亮先生是环能科技股份有限公司创始人。他是环能科技所拥有的绝大部分超磁技术专利的主要专利发明人，从头牵引着超磁技术的研发创新、迭代发展。全书的框架结构由倪明亮先生牵头，跨经数年，经多次磋商初定。当时其主要内容是超磁（磁盘吸附）技术原理及应用。及至各章编著进入各位作者操刀之际，机缘巧合，经本书作者之一王哲晓副总裁的引荐，编者有幸结交了最初引进磁加载（磁沉淀）技术进入中国、并开展了大量应用研究的黄开高级工程师，终于能将磁加载这一重要方面内容纳入此书。从而避免了此书可能存在的重大缺陷。每每回想此事，甚感世事际遇机缘之珍贵。本书副主编张统研究员是军队环保界的资深权威人士，在磁分离水处理机理方面的研究相当深入，据此与倪明亮先生、北京师范大学杨志峰院士联袂获得了 2014 年度的国家科技进步二等奖，

他还在废水高级氧化处理技术研究方面造诣深厚，成果卓著。他参与了此书的组织、审稿工作，提出了宝贵建议和意见。本书副主编王吉白高级工程师自从2010年入职环能科技以来，一直参与公司技术研发的组织管理工作以及具体的磁分离技术迭代研发工作，曾任CNAS磁分离检测中心主任、技术总监、公司副总裁，促进了公司磁分离技术的系列化改进和推广应用。另一副主编钟晓红高级工程师是环能科技所承担的上述国家水专项课题的主要参与者之一，对本书的组织编著出版做了重要工作。

本书第1章是磁分离技术原理，由环能科技的高级工程师陈立执笔。陈立长期从事资源综合利用、固废处理和磁介质混凝沉淀技术和设备开发与应用方面的工作。先后主持洗煤重介质二次回收、污泥脱水和磁介质混凝沉淀等多项技术和设备研发及产业化工作，曾获得中国煤炭工业协会授予的“科学技术二等奖（2015年度）”。他是环能科技很早参与超磁分离技术迭代研究的核心技术人员之一。本章由黄光华高级工程师参与审稿。

第2章是絮凝分离水处理技术概述，执笔者张鹤清博士，教授级高级工程师，毕业于日本京都大学环境工程系，现任环能科技股份有限公司技术发展研究院院长，兼任中国环境科学学会水处理与回用专业委员会委员。长期从事水处理、污泥处理处置、流域水环境综合治理、污染场地调查与修复等领域的研究与开发工作。为完成本章编写工作，张博士又根据本书编著的计划要求系统查找有关资料，总结凝练，完成了这一归纳综述性水处理技术章节。本章由张统研究员、董春宏高级工程师参与审稿。

第3章内容是磁分离水处理技术原理，作者是环能科技装备技术研究院副院长肖波高级工程师。他是环能科技磁分离水处理检测中心（CNAS认证）技术负责人，长期从事工业废水、市政污水处理、磁分离水处理技术应用及流域水环境综合治理、水资源循环利用、村镇水环境整治等相关领域技术产品研发与应用工作。先后主持或参与完成MagCS磁介质混凝沉淀技术、MagBR磁介质生物反应器技术等项技术产品研发及产业化工作，先后参与或主持国家水专项、重大科技支撑、省/市重大科技成果转化等多项技术攻关科研。他也是环能科技磁分离技术迭代研究的核心人员之一。本章由黄开高级工程师参与审稿。

第4章是磁分离水处理技术应用，本章篇幅较大。作者是环能科技磁分离水处理检测中心检测室主任易洋、研发工程师吉青青和高级工程师王哲晓。易洋长期从事磁分离水处理技术的应用研究，包括煤矿矿井水处理、钢铁浊环水处理、市政废水一级强化和深度处理、流域水环境综合治理、事故废水应急净化处理等。主持环能科技磁分离水处理检测中心通过中国合格评定委员会（CNAS）国际认证，参与国家“十二五”“十三五”《水体污染控制与治理科技重大专项》3个子课题的执行，并先后参与超磁分离水体净化成套设备、磁介质生物反应器、车载式应急污水处理站等多项装备的研发及产业化工作。吉青青也长期从事工业废水、市政污水、磁分离水处理技术、污泥干化等相关技术产品研发与应用工作，参与了国家重大科技专项水专项有关科研工作。王哲晓高级工程师还是国际水协青年委员会委员，长期从事水污染控制工程、智慧水务等领域的技术体系和产品技术应用工作。先后牵头或参与完成多个国家、省部级课题，参编过环保部局长教材，对于超磁的应用有丰富的第一线经验。本章由张鹤清博士参与审稿。

第5章是磁加载沉淀水处理技术应用，本章作者是上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司城交地下院事业部副总工兼第七设计院总工程师黄开高级工程师。他的研究

与设计方向为水处理、水环境综合整治与水生态修复、海绵城市等给排水相关专业领域。参与两项国家重大科技专项水专项科研工作，主持上海市政总院院级科研多项，主持或参与了数项地方标准的编写，多次获得上海市和山东省规划设计成果奖。他是国内最先引进、消化、吸收并研发创新磁加载沉淀与磁过滤工艺者之一，主持国际首套万吨级磁加载沉淀示范移动平台的研发与设计，主持国际首项十万吨级磁加载沉淀应用市政污水深度处理项目设计，并长期致力于磁加载沉淀与磁过滤在多个水处理领域的应用研究与推广。本章由肖波高级工程师参与审稿。

第6章是磁分离水处理设备分类。本章作者黄光华高级工程师是环能科技装备技术研究院主任工程师，环能科技磁分离水处理检测中心（CNAS认证）质量负责人。他长期从事环保领域的技术设备和工艺的研究开发和工程应用，主要涉及市政污水的生化处理和深度回用处理技术工艺、河湖景观水环境生态治理、工业废水的磁分离处理技术和深度处理、村镇分散式污水治理等领域。参与了“十二五”昆明滇池国家重大水专项课题和多项环保装备产业化课题和数项国家、行业标准的编制。作为“超磁分离水体净化技术”科技成果的主要完成人，先后获得环保部、四川省、山西省、成都市多项科技成果奖项，是多项科技专利的发明人。他也是环能科技磁分离技术迭代研究的核心人员之一。本章由陈立高级工程师参与审稿。

第7章是磁分离净水技术在特种水处理领域的研究与应用展望，作者是全军环保工程中心（现63926部队）董春宏先生，他博士毕业于清华大学环境学院，主要从事特种环境影响的前瞻性技术研究、工程技术论证以及环境评估，先后完成国家及部委级科技支撑计划3项，在超磁净水技术研究方面成效显著，获得国家科技进步二等奖2项及多项省部级科研奖项。参与本章审稿的有张鹤清博士、肖波高级工程师。

四

作为水处理领域细分技术方向的应用性著述，本书除了讲述技术原理之外，重点选编了工艺技术的应用案例，以期给读者以技术应用的参考。超磁技术应用的案例在第4章，涉及了钢铁、煤炭、石油、市政、采石加工等10个专业领域，磁加载技术应用的案例在第5章，也涉及了有关的5个专业领域。磁分离水处理技术的应用面不可谓不宽。尽管如此，编者期待磁分离水处理技术在过往领域里的深入研发和应用，也期待在新的水处理领域得到探索、研发、推广应用。

单就磁混凝沉淀、磁吸附分离的突出技术特点，对于本书所列的种种工业废水之外的其他废水，完全可以探索、研发磁分离水处理工艺技术的新应用。

在当前水生态环境保护中，生态湿地建设得到越来越多的重视。其中，要对生态湿地的来水做出预处理已成专业学界的共识。磁分离技术是否可以胜任这个预处理的任务？

我国海绵城市建设事业方兴未艾，前景广阔。其中调蓄池初雨积水的净化处理技术，可否采用磁分离技术？

更进一步，磁分离技术本身的原理是不是可以得到进一步的深入拓展性研究？技术的研发和应用永无止境，让我们心怀对未来的期待。

限于编者水平，本书难免有不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

五

本书各章作者都是磁分离水处理技术的研发者、应用者，在技术工艺的研究和设计、技术设备的生产制造和运营服务中积累了丰富的经验，在运营实践中不断发现问题、解决问题，使磁分离水处理技术得到迭代更新、不断完善。谨以此书的出版，向这些磁分离水处理技术和应用的开拓者致敬！

在环能科技股份有限公司还有不少参与磁分离水处理技术研发和应用服务的同仁和顾问，如李周先生、阳本灿先生、李惠兰女士、周勉先生、葛加坤老师、张冬珍女士、李成柏先生、谭国安先生、周生巧先生、汤志钢先生、傅秉清先生、胡尚英女士、倪鸿女士、刘显明先生、徐波先生、何林先生、邓成华先生、李成先生、黄世全先生、欧阳云先生、王钢仁先生、张国良先生、张科先生、李世富先生、任兴林先生、罗勇先生、张鸣凤女士、吴作成先生、周有先生、周易先生、吕志国先生、李海琼女士、文世平先生、王熔先生、邓勇先生、朱克成先生、陈维强先生等等，对他们的支持和历史性贡献，谨表深深谢意！

第5章作者黄开高级工程师专门表示，特别感谢上海市政总院党委书记、总工程师、勘察设计大师张辰同志对磁加载沉淀与磁过滤工艺应用研究的支持和帮助。同样，在环能科技公司之外尚有不少技术合作参与者，例如全军环境工程中心的李志颖博士，北京师范大学杨志峰院士，清华大学环境学院的杜鹏飞教授、王凯军教授，碧水源公司的戴日成总经理、俞开昌院长，国家建设部聂梅生教授、张悦教授，北京市市政设计研究总院李艺先生、李振川先生、杭世珺女士等，谨向他们表示深深谢意！

一项技术的产业化推广应用离不开设计研究院的鼎力支持，难忘各大钢铁设计研究院、煤炭设计院、市政设计研究院在此项技术推广应用当中所做出的诸多努力，在此向他们表示诚挚谢意！

在此还要特别致谢中国建筑工业出版社编审刘爱灵女士，是她的倡议和坚持促进了本书的出版，并且在审读稿件中发挥了关键的作用。记得2016年秋天在《中国给水排水》杂志组织的城市黑臭水体治理南京论坛上，她对编者说，你们有这么突出的技术，赶上这么好的时代，这项技术可以大有作为。你们应该编一本书来讲一讲这个技术的故事啊！

这本书，正是讲述了在这个伟大时代的磁分离水处理技术故事。

编者

2018年11月6日

目 录

前言

第1章 磁分离技术原理	1
1.1 磁分离基础和原理	1
1.2 永磁分离技术	20
1.3 电磁分离技术	26
1.4 超导磁分离技术	31
本章参考文献	38
第2章 絮凝分离水处理技术概述	41
2.1 水处理技术概述	41
2.2 絮凝分离水处理技术简介	61
本章参考文献	68
第3章 磁分离水处理技术原理	69
3.1 磁分离水处理药剂与材料	69
3.2 永磁分离水处理技术	74
3.3 电磁分离水处理技术	81
3.4 超导磁分离技术	83
本章参考文献	83
第4章 磁分离水处理技术应用	86
4.1 工业废水	86
4.2 城市污水	114
本章参考文献	137
第5章 磁加载沉淀水处理技术应用	139
5.1 磁加载沉淀的技术原理	139
5.2 磁加载沉淀在市政污水深度处理中的应用	150
5.3 磁加载沉淀在市政污水一级强化处理中的应用	159
5.4 磁加载沉淀在黑臭水体处理中的应用	168
5.5 磁加载沉淀在采油废水处理中的研究与应用	178
5.6 磁加载沉淀在高磷水处理中的研究与应用	189
5.7 磁加载沉淀在除藻领域中的应用研究	203
5.8 磁加载沉淀(过滤)技术还需探讨的问题	207
本章参考文献	207
第6章 磁分离水处理设备分类	209
6.1 永磁分离水处理净化设备	209

6.2 稀土磁盘分离废水净化设备	211
6.3 高梯度电磁过滤器	212
6.4 超导高梯度电磁过滤器	213
6.5 超磁分离净化成套设备	214
6.6 磁种加载沉淀分离成套设备	217
6.7 磁性树脂分离净化系统	218
6.8 流动床磁性生物载体一体化设备	219
本章参考文献	221
第7章 磁分离净水技术在特种水处理领域的研究与应用展望	222
7.1 高悬浮物污废水的磁分离快速去除技术	222
7.2 低温环境下水中悬浮物的超磁分离净化技术	223
7.3 超导磁分离技术在污水处理中的应用研究	225
7.4 磁性微粒材料的改进及其应用	226
7.5 磁分离技术在应急水处理方面的应用展望	226
本章参考文献	227

第 1 章 磁分离技术原理

1.1 磁分离基础和原理

1.1.1 物质磁性

1. 物质磁性分类

磁性是物质最基本的属性之一。磁现象范围是广泛的，它从微观世界中元粒子的磁性扩展到宇宙物体的磁性。自然界中各种物质都具有不同程度的磁性，但绝大多数物质的磁性都很弱，只有少数物质才有显著的磁性。

物质的磁性理论在近代物理学和固体物理中根据物质结构的量子力学的概念有论述。就磁性来说，物质可分为三类：铁磁性物质、顺磁性物质和逆磁性物质。可以把物质的磁性看成是具有电能（带电电核和电子）的粒子运动的结果。顺磁性物质在磁化场中呈现微弱的磁性。顺磁性主要决定于单个电子的旋转磁矩。铁磁性物质在磁化场中呈现强磁性。铁磁性是分布在物质结晶格子结点上的大量顺磁性原子交换作用的结果。逆磁性物质在磁化场中呈现微弱的磁性，逆磁性是由于磁场中电子轨道的进动过程的结果。但是，只有在磁化场不存在原子本身磁矩等于零才显示出逆磁性。在其余条件下，逆磁性则被顺磁性和铁磁性效应所掩盖。

此外，自然界还存在着反磁性物质和亚铁磁性物质。铁磁性物质由于原子交换作用结果使原子磁矩平行排列，而反磁性物质和铁磁性物质相反，原子磁矩反平行排列，正好相互抵消。亚铁磁性物质是离子磁矩反平行排列，但由于离子磁矩不相等，所以只抵消一部分，还留下一部分。

铁磁性物质、亚铁磁性物质和反铁磁性物质，在一定温度以上表现为顺磁性。由于反铁磁性物质的涅尔温度很低，所以在通常室温情况下，也可把反铁磁性物质列入顺磁性物质一类。亚铁磁性物质的宏观磁性大体上与铁磁性物质相类似，从应用观点看，也可把它列入铁磁性物质一类。

典型的顺磁性，逆磁性和铁磁性物质的磁化强度和磁化场强度之间的关系如图 1-1 所示。顺磁性和逆磁性物质保持着简单的直线关系，而铁磁性物质的情况比较复杂，磁化强度开始变化很快，然后趋于平缓，最后达到磁饱和。值得注意的是，当磁化场强度相当小时，磁化强度就趋于饱和值了。

根据磁性，按比磁化率大小把所有物质分成强磁性物质、弱磁性物质和非磁性物质。

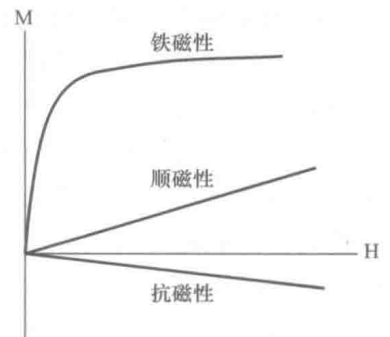


图 1-1 物质的磁化强度和磁场强度之间的关系

1) 强磁性物质 这类物质比磁化率 $\chi > 3.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ (或 CGSM 制中 $\chi > 3 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$), 在磁场强度 H_0 达 120 kA/m (~ 1500 奥) 的弱磁场磁分离设备中可以回收。这类物质大都属于亚铁磁性物质。

2) 弱磁性物质 这类物质比磁化率 $\chi = 7.5 \times 10^{-6} \sim 1.26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ (或 CGSM 制中 $\chi = 6 \times 10^{-4} \sim 10 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$), 在磁场强度 H_0 $800 \sim 1600 \text{ kA/m}$ ($10000 \sim 20000$ 奥) 的强磁场磁分离设备中可以回收。这类物质大都属于顺磁性物质, 也有属于反铁磁性物质。

3) 非磁性物质 这类物质比磁化率 $\chi < 1.26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ (或 CGSM 制中 $\chi < 10 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$), 在目前的技术条件下, 不能用磁分离法回收。这类物质有些属于顺磁性物质, 也有些属于逆磁性物质。

2. 强磁性物质的磁性特点

强磁性物质内部存在磁畴结构, 其磁性特点有:

1) 强磁性物质的磁化强度和磁化率很大, 存在磁饱和现象, 且在较低的磁场强度下就可以达到饱和。

2) 强磁性物质的磁化强度、磁化率和磁场强度间具有曲线关系。比磁化率随磁场强度变化而变化。强磁性物质的磁化强度除与物料性质有关外, 还与磁场强度变化历程有关。

3) 强磁性物质存在磁滞现象, 当它离开磁化场后, 仍保留一定的剩磁; 要想去掉剩磁, 就需要给它施加一个反向磁场。使剩磁完全去掉所加的反向磁场的磁场强度叫矫顽磁力。

4) 强磁性物质的磁性与该物质的形状、粒度、含量和氧化程度有关。

5) 磁性变化与温度有关, 温度高于临界值时, 内部磁畴消失, 呈现顺磁性。

3. 弱磁性物质的磁性特点

弱磁性物质属顺磁性, 磁性特点与强磁性物质有明显的不同:

1) 比磁化率小。

2) 比磁化率为一常数, 比磁化率大小只与物质本身组成有关。

3) 弱磁性物质没有磁饱和现象和磁滞现象, 它的磁化强度与磁场强度间为直线关系。

4) 弱磁性物质中混入强磁性物质, 即使量少也会对磁性产生较大的影响 (磁种)。

5) 由磁性物质和非磁性物质构成的连生体, 其比磁化率大致与弱磁性物质含量成正比, 连生体的比磁化率等于各物质比磁化率的加权平均值。

对于弱磁性铁物质, 可以通过磁化焙烧的方法认为的提高它们的磁性。

4. 物质磁性对磁分离过程的影响

物质磁性对磁分离过程有一定的影响。应回收到磁性产品中物质的磁化率决定磁分离设备磁场强度的选择。

细粒或微细粒的强磁性物质进入磁分离设备的磁场时, 沿着磁力线取向形成磁链或磁束。细的磁链的退磁因子比单个物质的小得多, 而它的磁化率或者磁感应强度却比单个物质高得多。在磁分离设备磁场中形成的磁链对提高微细的磁性物质的回收率, 特别是湿选时, 有好的影响。这是因为磁链的磁化率高于单个磁性物质的磁化率, 而且在磁场比较强的区域方向上, 水介质对磁链的运动阻力却于单独物质的阻力。但是, 形成的磁链对磁性产品的质量却有坏的影响, 这是因为非磁性特别是微细的非磁性物质混入到磁链中而使磁性产品的质量下降。

磁分离强磁性物质时，除了物质的磁化率外，起重要作用的还有物质的剩磁和矫顽力。正是因为它们的存在，使得经过磁分离设备或磁化设备磁场的强磁性物质，从磁场中出来后还保存自己的磁化强度，结果细粒和微细粒物质形成磁团。磁团聚的坏作用除了表现在影响磁性物质的质量外，还表现在增大微细磁性产品的水分和降低过滤设备的处理能力。

细粒或微细粒的弱磁性物质进入磁分离设备磁场时，不形成磁链或者磁束，由于弱磁性物质的磁化率或者磁感应强度较低，致使磁性物质的回收率较低。近年来出现了高梯度磁分离设备，才使得弱磁性物质的回收率有较大幅度的提高。

5. 物质磁性的测量

(1) 物质磁性的测定

物质磁性的测定方法可分为三种：有质动力法、感应法和间接法。常用的是有质动力法，它装置简单，有足够的灵敏度，对一般情况，采用磁力天平就可以满足要求。实际应用一般采用有质动力法中的古依（Gouy）法来测定物质磁性。

此法是直接测量比磁化率的方法，适用于强磁性物质和弱磁性物质的比磁化率的测定。

测量装置：测量装置和线路如图 1-2。

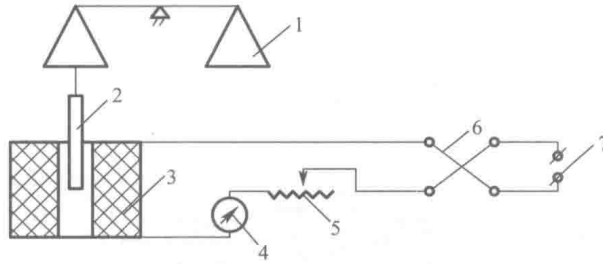


图 1-2 古依法测定物质比磁化系数装置图

1—分析天平；2—薄壁玻璃管；3—多层螺管线圈；4—直流电流表；5—变阻器；6—转移开关；7—直流电源

测量原理：将截面相等的长试样悬挂在天平的一端，使之处于磁场强度均匀且较高的区域，另一端处于磁场强度较低的一端，试样的磁场中便受到和它的长度方向一致的磁力作用。

$$F_{\text{磁}} = \int_V \mu_0 \kappa_0 H \text{grad} H dV = \frac{1}{2} \mu_0 \delta \chi_0 S (H_1^2 - H_2^2) \quad (1-1)$$

式中 μ_0 ——真空磁导率；

S ——样品截面积；

χ_0 ——样品的假密度；

dV ——样品的体积元；

H_1, H_2 ——样品两端最高和最低的磁场强度。

当样品足够长时，近似 $H_2 = 0$ ，即

$$F_{\text{磁}} = \frac{1}{2} \mu_0 \delta \chi_0 S H_1^2 \quad (1-2)$$

由于 $F_{\text{磁}} = \Delta mg$

$$\text{所以 } \Delta mg = \frac{1}{2} \mu_0 \delta \chi_0 S H_1^2 = \frac{\mu_0 \delta \chi_0 m H_1^2}{2l} \quad (1-3)$$

即
$$\chi_0 = \frac{2lg}{\mu_0 m} \times \frac{\Delta m}{H_1^2} = \alpha \frac{\Delta m}{H_1^2} \tag{1-4}$$

式中 Δm ——样品在磁场中的外观质量增加值；
 m ——样品的质量 ($m = Sl\delta$)；
 l ——样品的长度；
 g ——重力加速度。

试验时改变 H_1 的大小，测定 Δm ，就可以求出 χ_0 值。

测定步骤：先将空试管称重，后将磨细的粉状待测样装进试样管中拧紧，试样装至所要求的刻度为止。称重后把它挂在分析天平的左盘下，使其下端插入线圈轴线的中点，但不触及线圈壁。将线圈接通电流，在不同电流下测量样品所受磁力的大小，称出磁场中料管的重量。将空样管重量、样管加试样重量和样管加试样在磁场中的重量代入上式中，即可求出待测物质的比磁化率和比磁化强度。

(2) 磁性物质含量的测定

实际应用中一般采用磁分离管来测定磁性物质的含量。

测定装置：

磁分离管结构如图 1-3。

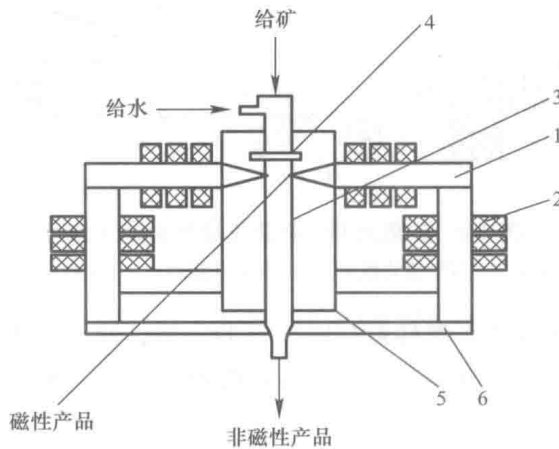


图 1-3 磁分离管示意图

1—C形铁芯；2—线圈；3—玻璃分选管；4—筒环；5—非磁性材料支架；6—支座

测定原理：磁分离管法的工作原理是在 C 形电磁铁的两极之间装有玻璃管，并作往复移动和旋摆运动。当磁分离管中的试样通过磁场区时，磁性物即附着于管壁，非磁性物在机械运动中被水冲刷而排出，使磁性物与非磁性物分离。以磁性物和试样的质量百分比来表示磁性物含量。

测定步骤：

1) 缩取 20g±20mg 试样，将试样装入一个容积为 1000mL 烧杯中，加入适量酒精和约 500mL 的水，搅匀并静置约 5min，搅拌时要确保物质被充分地润湿。

2) 接通磁性物测定仪电源，调节激磁电流使其达到预定的磁场强度（一般为 250mT）。向磁分离管中加水直至座漏斗处约 5cm，然后将烧杯中的混合物缓慢地倒入漏斗，打开磁分离管下面的螺旋夹，使液体以每分钟 50mL 的流量流入容积 2500mL 的烧杯中。

磁分离管在运动中，非磁性物随水流下沉直至排出管外。磁性颗粒将附着于两磁极处管壁内。为使被吸持的磁铁矿粉始终浸没在水中，必要时向漏斗中加水。

3) 将螺旋夹关闭，关闭激磁电源，使被吸持的磁性物脱开，打开螺旋夹，将磁性物冲入一个 500mL 的烧杯中。当磁性物完全沉淀后，慢慢倒出烧杯中的水，同时用一块强磁铁放在烧杯杯底，以防止杯中磁性物有任何损失。

4) 打开激磁电源，关闭螺旋夹，向磁分离管中加水。打开螺旋夹，使水流动，把第一个 2500mL 烧杯中的液体和固体慢慢地加入漏斗，并使混合液通过磁分离管进入第二个 2500mL 烧杯。并收集由磁铁吸持的磁铁矿粉。

5) 检查第二个 2500mL 烧杯中的液体中是否有残存的磁性物，方法是将其放在一块强磁铁上，使烧杯慢慢移动，观察其中是否有磁性物质，如果杯中没有磁性物，将杯中液体倒掉。如果发现还有磁性物，应将杯中液体倒回磁分离管，使其再通过一次检查。直至杯中不存在磁性物为止。

6) 将一个空着的 2500mL 烧杯放在磁分离管下，向磁分离管中加水冲洗被磁铁吸持的磁性物（在关闭激磁电源后），将磁分离管拆下并左右转动，直至排出的液体变清。按 3 所述方法回收磁铁矿粉，并将其收集至一个 500mL 的烧杯中。

7) 每次用步骤 6 收集的 2500mL 烧杯中的固液混合物，重复步骤 4, 5 和 6。直至步骤 4 中没有磁性物被磁极吸持住为止。注：为充分完成该过程，一般需做两个循环。

8) 把收集的全部磁性物干燥到质量恒定状态，在干燥器中取出后立即称量，精确到 ±10mg。试验结果表达用磁性物和试样质量百分比来表示磁性物含量，其公式如式：

$$\beta = \frac{m_8}{m_7} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中： β ——磁性物含量，%；

m_7 ——试样质量，g；

m_8 ——磁性物质量，g。

1.1.2 磁分离基础

1. 磁感应强度、磁化强度和磁导率

磁场是物质的特殊状态，并显示在载电导体和磁极的周围。描述磁场大小和方向的物理量有磁感应强度 B 和磁场强度 H 。在国际单位制中，磁感应强度 B 的单位为特斯拉 (Tesla)，记为 T，量纲为 $\text{T}^{-1}\text{MT}^{-2}$ 。有时用高斯这一单位， $1\text{T}=10000$ 高斯。磁场强度 H 的国际单位为安培每米 (A/m)，量纲为 IL^{-1} 。磁感应强度与磁场强度间存在如下关系：

$$B = \mu H \quad (1-6)$$

式中， μ 称为物质的磁导率。

当磁介质置于磁场中时，由于磁场的作用而磁化，从而在介质内产生磁矩。单位体积内的磁矩称为磁化强度，磁化强度是表征磁介质磁化程度的物理量。在一般情况下，磁介质中某点的磁化强度 M 与该点的磁感应强度成正比，在国际单位制中表示为：

$$M = \frac{\kappa B}{\mu} = \kappa H \quad (1-7)$$

式中， κ 称为物质的体积磁化率，无因次。

在磁介质中，磁场中任意点处的磁感应强度，除了原磁场外，还应包括磁介质磁化后产生的附加磁场。因此，在有磁介质的磁场中，任一点的磁感应强度 B 、磁场强度 H 、磁化强度 M 之间存在如下关系：

$$B = \mu_0(H + M) \tag{1-8}$$

比较式 (1-6)、式 (1-7) 和式 (1-8) 可知

$$\mu = \mu_0(1 + \kappa) \tag{1-9}$$

令 $\mu_r = 1 + \kappa$ ，称 μ_r 为磁介质的相对磁导率。

κ 只与磁介质的性质有关。它是表示物质被磁化难易程度的量， κ 值越大，表明物质越容易被磁化。对大多数物质， κ 是常数，而对于强磁性物质而言， κ 不是常数。

2. 物质的磁化和比磁化系数

物质的磁化，就是物质在外磁场作用下，从不显磁性转变成具有一定磁性的现象，其根本原因是物质内部的原子磁矩朝磁场方向排列的过程。

物质磁性来源于原子磁性，原子磁性来源于原子磁矩。因为任何物质的磁性都是由电子运动产生的，这是一个比较复杂的问题，这里只作简单的说明。物质是由原子、分子所组成的，原子是由带正电的原子核和核外带负电的电子组成。电子绕原子核旋转的同时还绕本身的轴线旋转，这种旋转叫做电子自转。无论电子环绕原子核旋转还是自转，都和传导电流（或运动电荷）一样，都要产生一个磁效应“原子磁矩”，明显看得出来，原子磁矩来源于原子核磁矩和电子磁矩，原子核的磁矩很小，可以忽略不计，电子磁矩又可分为绕核旋转的轨道磁矩和自旋磁矩。所以说原子的磁矩是电子轨道磁矩与电子自旋磁矩的矢量之和。分子是由多个原子组成，各个原子磁矩的矢量相称为分子磁效应，也可称其为“分子磁矩”，分子磁效应可用一个等效圆电流来表示，叫做分子电流。

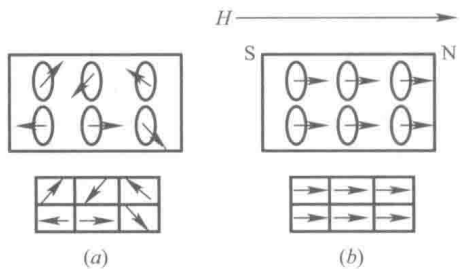


图 1-4 物质磁化示意图
(a) 磁化前；(b) 磁化后

物质的分子磁矩或原子磁矩，在没有外磁场作用时，由于分子的热运动，物质的分子磁矩在空间的取向是杂乱无章的，如图 1-4a 所示，各分子的磁矩取向是杂乱无规则的，它们之间的磁性相互抵消，所以从整体来看，物质对外不显示出磁性。如果把它放在磁场中，这时物质中的分子电流虽然仍受到热运动的影响，但在外磁场作用下会发生转动。使分子电流磁场方向趋向外磁场方向平行排列，因而形成一个附加磁场，如图 1-4b 所示，此时物质对外显示出磁性。这种在外磁场作用下，物体由不显示磁性到显示出磁性的物理现象，叫做物体磁化。

物质由于电子旋转产生磁效应，则必具有一定的磁矩，物体的磁矩 (J) 是描写物体磁性的一个物理量。从直观现象进行观察，当物体被磁化后，由于分子磁矩均与外磁场方向平行排列，对外显示出磁性，在物体的两端则必产生极性相反的磁性，如图 1-5 所示，这是由于物体内部相邻磁性极性相反，磁性相互抵消，只有两端侧面上显示出磁性，设两端的磁极强度为 $Q_{磁}$ 。两极间的距离为 L 时，则此物体磁化后的总磁矩为：

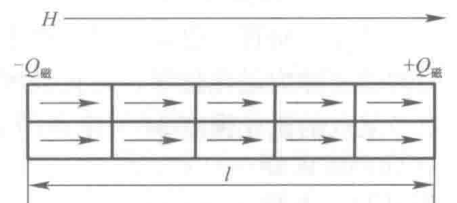


图 1-5 物质磁矩示意图

$$J = Q_{\text{磁}} L \quad (1-10)$$

式中 J ——物体的磁矩, $A \cdot m^2$;

$Q_{\text{磁}}$ ——物体磁极长度, $A \cdot m$;

L ——物体长轴长度, m 。

为了描述物质磁化状态 (即磁化方向和强弱), 根据磁化强度的概念, 磁化强度在数值上是以物体单位体积内的磁矩来量度, 则有:

$$M = \frac{J}{V} \quad (1-11)$$

式中 V 为物质体积, m^3 。

磁化强度的方向随物体性质而异, 对强磁性和顺磁性物体, 其磁化方向则与外磁场相同, 对于逆磁性物体, 其磁化强度与外磁场方向相反。物体磁化强度越大, 表明物体磁化的程度和物体本身的磁性也愈大。

研究表明, 磁化强度与磁化磁场强度的关系是

$$M = kH \quad (1-12)$$

式中 k ——物体的磁化系数, 无量纲;

H ——磁化物体使用的外加磁场强度, A/m 。

k 被磁化物体的体积磁化系数, 也就是物质的磁化强度与磁化它的外磁场强度的比值, k 值是物质的一个重要的磁化指标, 其物理意义是 1cm^3 大小的物质, 在 80A/m (10e) 的磁场中磁化所获得的磁矩。它的数值大小表明了该物质磁化的难易程度, k 值愈大, 表明愈容易磁化。对逆磁性物质, k 为负值, 顺磁性物质的 k 值大于 L , 对强磁性物质其 k 值远远大于 L 。

比较式 1-11 和 1-12, 可得

$$k = \frac{J}{H} = \frac{J}{VH} \quad (1-13)$$

物质的比磁化系数与本身密度之比值, 叫做质量磁化系数或称作物质比磁化系数, 即

$$\chi = \frac{k}{\delta} = \frac{J}{mH} \quad (1-14)$$

式中 δ ——物质密度, kg/m^3 或 g/cm^3 ;

m ——物质质量, kg 或 g 。

3. 均匀磁场、不均匀磁场和磁场梯度

物质在磁场中被磁化后, 受到磁力的作用。磁力大小的计算, 以及物料在不同磁场中的行为, 是设计磁分离设备结构的理论基础。

磁场有均匀磁场和不均匀磁场之分, 典型的均匀磁场和不均匀磁场如图 1-6 所示。

图 1-6 (a) 除边缘部分外, 两极之间各点磁场强度相等, 这种磁场是均匀磁场, 否则就是不均匀磁场, 如图 1-6 (b) 所示, 磁场的均匀程度可用磁场梯度来表示, 磁场梯度是沿磁极法线方向磁场强度的变化率, 可用 $\text{grad}B$ 或 $\text{grad}H$ 表示, 则 $\text{grad}B$ 是 dB/dx , $\text{grad}H$ 是 dH/dx 。在均匀磁场中 $\text{grad}H=0$, 在不均匀磁场中, 各点磁场强度大小和方向都是变化的, 所以 $\text{grad}H \neq 0$ 。

磁场梯度方向为磁场强度变大的方向, 是指向 H 增大的一方。综上所述, 得知在不均匀磁场内各点的磁场强度和磁场梯度均是不相等的, 单位距离磁场增量 ΔH 愈大者。则