

专论与综述

凹凸棒石粘土及在水处理中的应用

张国宇, 王鹏

(哈尔滨工业大学环境科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

[摘要] 凹凸棒石粘土是一种以凹凸棒石为主要成分的天然非金属粘土矿物, 它是一种具有独特层链状结构的晶质水合镁铝硅酸盐矿物, 具有比表面积大、化学稳定性好、吸附能力强等特征。作者对国内外有关凹凸棒石粘土的文章进行了综述, 详细叙述了凹凸棒石粘土的组成和结构以及相应的改性方法, 分类讨论了凹凸棒石粘土在水处理中的应用, 分析了我国在研究开发过程中存在的问题, 并提出了相应的意见和建议。

[关键词] 凹凸棒石粘土; 自然资源; 吸附剂; 水处理

[中图分类号] TQ424.21 [文献标识码] A [文章编号] 1005-829X(2003)04-0001-05

Attapulgite clay and its applications to water treatment

Zhang Guoyu, Wang Peng

(Department of Environmental Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Attapulgite clay is a kind of natural nonmetal mineral, which is mainly composed of attapulgite. Attapulgite is crystal hydrated magnesium aluminum silicate with a unique layer-chain structure, which gives attapulgite's virtues of high surface area, inert chemical property and excellent adsorptive property. A review of attapulgite clay is presented. The composition, structure and methods of modification are described in detail. Its application to the water treatment is invested. Several problems of research and application of it in China are discussed. Also suggestions and prospects are proposed.

Key words: attapulgite clay; natural resources; adsorbent; water treatment

凹凸棒石粘土是指以凹凸棒石为主要组分的一种天然非金属粘土矿物, 它是一种晶质水合镁铝硅酸盐矿物, 在矿物学分类上隶属于海泡石族, 为含水的层链状镁质硅酸盐, 具有独特的层链状结构特征。1862 年俄国学者隆夫钦科夫最早于乌拉尔矿区的热液蚀变产物中发现这一矿物并将其命名为坡缕石(Palygorskite), 法国学者拉巴朗特于 1935 年又在美国佐治亚州凹凸堡和法国莫摩隆沉积岩中发现了此种矿物, 并命名为凹凸棒石(attapulgite)。1982 年世界矿物命名委员会认为坡缕石和凹凸棒石两者的晶体结构和晶体化学成分相同, 属同一种矿物, 并规定为统一的坡缕石。1976 年, 中国学者许冀泉根据凹凸堡之音同时兼顾该矿的晶体结构特征, 译成“凹凸棒石”, 近年来在国内广泛使用。我国于 1976 年首次在江苏六合小盘山和白土山发现凹凸棒石粘土矿之后^[1], 相继在苏皖地区发现了大型凹凸棒石矿。据估计, 我国的储存量占全世界凹凸棒石粘土储存量的一半以上。但是, 由于我国开发利用水平较低, 致使这种经济意义重大的矿藏得不到合理的

应用, 甚至以原土的形式廉价地出口到德国等国家, 造成资源的浪费^[2]。由于凹凸棒石粘土具有较好的吸附能力, 在水处理中有着极为广阔的应用前景, 笔者在大量文献调研的基础上, 综述了国内外有关凹凸棒石粘土在水处理中的应用, 以期对凹凸棒石粘土在水处理中的应用起到参考作用。

1 凹凸棒石粘土的组成及结构

凹凸棒石呈土状、致密块状产于沉积岩和风化壳中, 呈白色、灰白色、青灰色、灰绿色或弱丝绢光泽, 土质细腻, 有油脂滑感, 质轻、性脆, 断口呈贝壳状或参差状, 吸水性强, 湿时有粘性和可塑性, 干燥后收缩小, 不大显裂纹, 水浸泡崩散, 悬浮液遇电介质不絮凝沉淀。因产地不同, 凹凸棒石粘土的组成略有不同, 一般而言, 凹凸棒石原土中含有 70%~80% 的凹凸棒石, 10%~15% 的蒙脱石和海泡石以及其他的粘土, 4%~8% 的石英, 1%~5% 的方解石或者白云石, 在加工的过程中非粘土成分被去除^[3]。因此, 最终的产品中含有 85%~90% 的凹凸棒石^[4]。1940 年 W. F. Bradley 首次提出了凹凸棒

石的晶体结构模型^[5]。凹凸棒石的基本构造单元是由平行于碳轴的硅氧四面体双链组成, 各个链间通过氧原子连接, 每个双链的上下层间通过一层镁原子的六价配位连接。硅氧四面体活性氧原子的指向(即硅氧四面体的角顶)每四个一组上下交替排列^[6], 这样排列的结果, 四面体片在链间被连续地连结, 构成连层状硅酸盐, 然而, 八面体片是不连续的, 形成很多矩形孔道, 每个孔道的截面大小是相等的, 大约为 $0.38\text{ nm} \times 0.63\text{ nm}$ 。凹凸棒石的理想化学式为 $(\text{OH})_4(\text{OH})_2\text{Mg}_5\text{Si}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 其中的 Si^{4+} 可以少量被 Fe^{3+} 及 Al^{3+} 离子替代, Mg^{2+} 可以少量被 Fe^{2+} , Fe^{3+} 和 Al^{3+} 离子替代^[5]。各种离子替代的综合结果是凹凸棒石常常带少量的负电荷, 此种电荷属于结构电荷^[7]。凹凸棒石表面电荷是由表面的 $\text{Si}-\text{O}$ 键和 $\text{Al}-\text{O}$ 键发生水解破裂产生的。破键水解产生的 $\text{R}-\text{OH}$ 上的羟基($-\text{OH}$)具有两性, 既能作为酸, 也能作为碱。表面电荷可以是正电荷, 也可以是负电荷, 主要取决于矿物结构、电解质溶液、浓度、pH 值。改性作用能够使凹凸棒石在水溶液中的结构电荷和表面电荷发生改变, 从而改变凹凸棒石胶体的带电性和吸附活性, 不同的改性方法对其带电性和吸附活性有着不同的影响。到目前为止, 主要的改性方法有: 酸洗、热处理、酸洗与热处理两者结合和盐浸泡等方法。酸洗可以去除其中的非粘土成分, 热处理可以去除其中的水分。H. Hayashi 等人指出, 凹凸棒石含有四种水: 吸附水、孔道里的沸石水、结构水和连在八面体中的 $-\text{OH}$ ^[8]。一般而言, 不同的热处理方法, 可以去除不同的水分, $300\text{ }^\circ\text{C}$ 前分两步失去吸附水和沸石水, $400 \sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 失去大部分结构水, 从而能够改善其比表面积甚至改变其结构, $700\text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 凹凸棒石的整个晶型被破坏, 形成顽辉石晶型^[5]。

凹凸棒石粘土的这种特殊的结构和较大的比表面积, 决定了其具有良好的吸附性能。凹凸棒石粘土的比表面积为 $125 \sim 210\text{ m}^2/\text{g}$, 改性之后其比表面积高达 $300\text{ m}^2/\text{g}$ 以上甚至更高。然而在吸附过程中, 究竟是晶体内部的孔道还是表面的孔隙起主要作用, 是化学吸附还是物理吸附起主要作用, 到目前为止还没有一个统一的说法。一般认为, 诸如水、甲醇和乙醇之类的极性分子, 可以进入晶体的内部孔道, 而像氮气、氧气之类的非极性分子则不能进入其内部孔道。凹凸棒石粘土在吸附时具有较强的选择性, 在不同介质中其吸附力有明显的差异, 依次为: 水 > 醇 > 酸 > 醛 > 酮 > 正烯烃 > 中性酯 > 芳香

烃 > 环烷烃 > 烷烃, 直链的烃比支链的烃更易被吸附, 当凹凸棒石粘土被煅烧超过 $880\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 这种选择性消失^[3]。凹凸棒石粘土较大的比表面积和良好的吸附性能, 为其在水处理中的广泛应用提供了可能性。

2 凹凸棒石粘土在水处理中的应用

由于凹凸棒石具有独特的层链状晶体结构和十分细小(约 $0.01\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$)的棒状、纤维状晶体形态, 所以这种矿物能够在许多方面表现出优异的性能, 用途十分广泛, 不少研究者对凹凸棒石粘土作为天然廉价吸附剂在水处理中的应用进行了有益的探索, 其应用范围已经涉及到各种工业废水。工业废水种类繁多、成分复杂多变, 处理方法各异, 其中吸附法是一种应用较多、较为成熟、行之有效的方法。国内外目前最常用的吸附剂是活性炭, 活性炭具有比表面积大、吸附能力强等优点, 但是活性炭存在着价格较高、再生方法较为复杂等缺点。相反, 凹凸棒石粘土处理工业废水具有成本低(其价格仅为活性炭的 $1/5 \sim 1/10$)、效率高、效果好、再生简单等优点。所以, 很多情况下凹凸棒石粘土是活性炭的较好的替代品, 故凹凸棒石粘土在水处理中具有较为广阔的应用前景。

2.1 有机废水处理

文献^[9~12]研究结果表明, 经活化的凹凸棒石净水剂对印染废水具有较好的处理效果, 在最佳处理条件下, COD 去除率 > 70% , 色度去除率 > 90% , 优于常见的无机混凝剂。裘祖楠等人的研究结果表明, 经双活化的凹凸棒石对阳离子染料生产废水具有较好的处理效果, 脱色率和 COD 去除率分别达到 $87.5\% \sim 99.8\%$ 和 $45.4\% \sim 72.3\%$, 且符合 Freundlich 吸附等温式, 吸附过程呈现一级反应动力学的特性, 其处理成本仅为粉末活性炭相应费用的 5% 以下^[13]。魏凤玉等人研究表明, 以凹凸棒石粘土为主要原料制成的吸附剂对癸二酸单钠盐溶液具有较好的脱色效果, 并对萃取后的癸二酸生产废水有较好的吸附处理效果^[14]。在选定的条件下, 其脱色率达 85.3% , 癸二酸单钠盐产率达 92.0% , 比活性炭脱色时产率提高约 12% , 该吸附剂经过脱色、再生可反复使用 12 次, 其脱色率无明显下降, 总损失率仅为 3.3% , 且再生操作方便简单、劳动强度低, 可望代替活性炭脱色。对萃取后的癸二酸生产废水进行吸附时, COD 和酚类的去除率分别达到 99.3% 和 99.2% , 吸附等温线符合 Freundlich 吸附等温式。惠天凯等人发现, 改性后的凹凸棒石粘土

对苯的容量和去除率比原土均提高 2 倍多,且吸附具有化学吸附的本质,吸附等温线可以用改进后的 BET 公式描述^[15]。彭书传等人研究表明,经溴化十六烷基三甲胺(CTMAB)改性后的凹凸棒石粘土对水中酚的去除率达 88.5%,且有机土可以反复再生使用,吸附平衡浓度与吸附量的关系也符合 Freundlich 吸附等温式^[16]。李万山等人认为,经十六烷基三甲基铵离子(HDTMA)改性后的凹凸棒石粘土可以有效地吸附模拟地下水中的苯系物,吸附量比原土高出几十甚至几百倍,吸附机理较为复杂,吸附等温线主要为中凹形或双“S”型,可用其对有机污染的地下水进行修复^[17]。周平等人利用天然凹凸棒石粘土处理造纸黑液,其 COD 去除率 $> 50\%$,以处理废液后的凹凸棒石沉渣为主要原料,通过不同配方和不同工艺条件可烧制出性能合格的建筑陶瓷^[18 19]。H. Presnall 等人发现,凹凸棒石粘土具有较好的脱色效果,吸附过程不仅有物理、化学吸附作用,而且也有化学作用,使油品脂肪酸的含量和结构发生变化,凹凸棒石粘土吸附剂对植物油的脱色净化,不仅可提高油品的质量,而且对其储运十分有益^[20 21]。K. Boki 等人利用凹凸棒石粘土漂白菜籽油和大豆油,漂白率分别为 $13\% \sim 53\%$ 和 $93\% \sim 97\%$, Freundlich 吸附等温式更适合于表述此类吸附,并且凹凸棒石粘土的漂白效果优于其他吸附剂^[22]。研究还发现,凹凸棒石粘土对植物油^[23]、工业粗油酸^[24]和食用油^[25]等油类都具有较好的脱色效果。范文元等人认为,凹凸棒石吸附剂对水吸附选择性比乙醇要强,而且经典的吸附理论已不能对该吸附过程进行完整的描述^[26]。

2.2 重金属废水处理

凹凸棒石粘土可用于处理含有重金属离子的废水。赵彩荣等人研究表明,在 $\text{pH}=1$ 的含 Cr^{6+} 废水中加入质量分数为 8% 的经活化的凹凸棒石粘土, 20°C 下搅拌 60 min, Cr^{6+} 的净化率达 99.75% , 滤液中残留的 Cr^{6+} 质量浓度为 0.18 mg/L , 达到国家排放标准,其吸附等温线符合 Freundlich 吸附等温式^[27]。秦非等人利用凹凸棒石粘土(AT)和石英砂(SS)制成新型复合颗粒吸附剂,对含铅废水进行了静态和动态吸附实验,结果发现,AT-SS 颗粒具有良好的稳定性和除铅效果,静态实验中, Pb^{2+} 的吸附量可达 500 mg/g 以上,反应 15 min 内即可达到平衡,在动态实验中,吸附容量约为 60 mg/g , 穿透时间为 20 h,回收率为 48.3% ^[28]。张宇等人利用活化过的凹凸棒石粘土粉末处理含镍废水时发现,

当 $W(\text{凸})/W(\text{水})$ 为 $1/500$ 时,吸附率已达 100% ,处理同量的废水,凹凸棒石用量少于硫铁矿和改性的膨润土,由于凹凸棒石价格更低,所以更有实用价值,另外还发现,凹凸棒石粘土吸附含镍废水时,其适用 pH 范围很广^[29]。

2.3 特种介质的处理

凹凸棒石粘土对某些特种工业废水亦具有较好的处理效果。朱振海等人研究发现,当去毒吸附剂凹凸棒石用量为 1.6% 时,对含毒(黄曲霉毒素 B_1 , 即 AFTB_1)质量分数为 $50 \times 10^{-9} \sim 250 \times 10^{-9}$ 的菜籽油净化,净化油中残留 $\text{AFTB}_1 < 5 \times 10^{-9}$ (阴性),当凹凸棒石用量为 3.2% 时,对含毒质量分数高达 500×10^{-9} 级的油品,也可使其呈阴性^[30]。凹凸棒石对含毒在不同质量分数下油样的脱毒净化,阳性与阴性临界值上的统计分析,是两条直线回归线,相关系数为 1,呈正相关变化。凹凸棒石去毒吸附剂对含 AFTB_1 的油品选择吸附性强,在含毒浓度高的情况下,一次去毒净化,即可达到国家卫生标准,同时又可实现脱色、脱臭的效果^[30]。曾明果认为,将凹凸棒石加工成粉状,针对不同的废液,采用不同的活化方法,可获得一系列特效产品,可将放射性元素离子质量分数为 10×10^{-3} 的废液,处理到 $< 5 \times 10^{-6}$ 的低量环境允许值^[31]。吸附了核废料的粘土可经水泥等固化,再简单密封、埋藏,具有明显的经济和环境效益。唐方华发现,200 目的凹凸棒石粘土对 Cs^{137} 具有较好的吸附效果,其吸附规律符合 Freundlich 吸附等温式^[32]。宋金如等人研究凹凸棒石粘土吸附铀的性能,并采用交换柱,处理了实验室含铀废水,使铀的去除率达到 99.5% ,不仅排放液中铀的残余浓度小于国家规定的排放允许量 (0.05 mg/L),而且柱上的铀可用质量分数为 5% 的 HCl 解析,用化学法回收,交换柱液可反复使用,吸附等温线也符合 Freundlich 吸附等温式,该方法操作简单,成本低廉,有可能处理大量含铀废水^[33]。

2.4 其他废水的处理

袁祖楠等人利用凹凸棒石及其活化产品处理污染河水,结果发现,其对严重有机污染河水的色度、挥发酚、油、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 等均有明显的去除效果,对 COD 的吸附净化符合 Freundlich 吸附等温式,并呈现一级反应动力学的特征,当与某些混凝剂组合使用时,对 SS 和 COD 的净化呈明显的增强作用,从而使污染河水的整体水质大大改善,其中某些水质指标可达到我国地面 I 级、II 级的质量标准,并提出了几种应用方式,对用于不同场合的费用进行

了评估,证明了应用的可行性^[34]。朱继存利用凹凸棒石粘土投料—活性污泥法处理城市废水,结果发现用活化过的凹凸棒石粘土做投料,采用完全混合活性污泥法处理城市废水具有较好的处理效果,并且可以通过增加投料量提高处理效果,和投加活性炭粉末相比,该法具有价格低廉、处理效果好等优点^[35]。崔龙鹏认为,由于凹凸棒石粘土具有较好的分散性、胶体性、催化性、离子交换性以及凹凸棒石粘土与有机物的复合性,凹凸棒石粘土在淮河水污染治理中必将有着广阔的应用前景^[36]。栾兆坤等人利用表面包裹了氧化铝层的凹凸棒石吸附剂,进行了除氟动态柱吸附效能实验,其氟去除率可达95%以上,累计氟吸附容量可达10.5 mg/g,对吸附饱和后的吸附剂,再生后仍具有较高的吸附性能^[37]。张国生以凹凸棒石粘土为主要原料,添加多种矿物质制成了净化效果好、矿化作用强、具有良好耐水性的人工矿化剂,这种矿化剂能对饮用水进行有效的净化矿化处理,其作用大小的影响因素是与净化矿化剂的类型、用量,水的流速、流量、静置时间及温度有关^[38]。经这种矿化剂处理的自来水含有十多种人体必需的常量元素和微量元素,其中锌、碘、锂、锶等均达到GB8537—1987“饮用天然矿泉水标准”,且有毒重金属和细菌学指标大大低于国家天然矿泉水标准。自来水经过凹凸棒石净化矿化剂处理后成为清澈、味甘,可直接冷饮的优质人工矿泉水,其水质可与天然矿泉水相媲美。

2.5 作为载体在水处理中的应用

凹凸棒石在晶体化学组成上广泛存在的异价类质同像置换及配位八面体边缘位镁离子占位特点以及凹凸棒石普遍存在晶格缺陷及晶体生长缺陷,这些缺陷可成为晶体表面能高聚集区中心和强吸附性,造成了凹凸棒石晶体有较强的金属离子可置换性^[39]。这些固有的结构特征使凹凸棒石与其他的无机载体相比,表现出更好的吸附性能,以及大的比表面积和分散性,使之作为载体具有更广阔的前景。胡春等人通过浸渍方法将氧化钛粘接在凹凸棒石粒径表面,在600℃下加热6h,对偶氮染料和废水光催化脱污,结果表明质量分数为2%的TiO₂/凹凸棒石具有较高的活性和稳定性^[40]。进行太阳光光降解时发现,脱色率高达100%,COD和TOC去除率分别为69%和63%,甲基橙降解符合Langmuir—Hinshelwood(L—H)方程。胡发社等人用硝酸银溶液和经过盐酸活化过的凹凸棒石粘土制成了热分解温度高、稳定性好、安全性好、抗菌能力强、性能持久

的新型无机抗菌剂——载银抗菌剂,这种抗菌剂在日常生活中有着极为广泛的应用^[41]。N. Koga等人将活化过的凹凸棒石粘土制成颗粒状,用以固定酶,结果发现这种载体具有较好的耐酸性,并且经凹凸棒石粘土固定的酶具有较好的活性^[42]。

3 结束语

凹凸棒石粘土因具有较大的比表面积而表现出良好的吸附性,可以用于多种领域。目前美国等国已经可以生产超过100余种凹凸棒石产品,而我国仅开发出10余种,且真正用于实际工程中的实例很少,所以应进一步强化开展高档次、高附加值的凹凸棒石产品的研发工作。充分利用我国凹凸棒石粘土资源丰富特点,对现有的生产厂家进行技术和工艺改造,促进其在各个领域特别是水处理方面的应用。同时,到目前为止关于凹凸棒石粘土的吸附机理和吸附动力学还没有统一的认识,理论研究深度不够,理论研究和应用技术研究脱节,这也是目前有关凹凸棒石粘土研究中存在的主要问题。

[参考文献]

- [1] 许冀泉,方勤森,李立文. 江苏六合小盘山凹凸棒石粘土的发现及其意义[J]. 科学通报, 1980, 25(11): 513—515
- [2] 仰榴青. 国产凹凸棒土的研究[J]. 江苏理工大学学报, 1995, 16(1): 55—60
- [3] Lynwood H W, Schwint I A. Attapulgite, Its Properties and Application[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1967, 59(9): 58—69
- [4] 杨利营,盛京. 凹凸棒粘土的研究开发与应用[J]. 江苏化工, 2001, 29(6): 33—37
- [5] Bradley W F. The structure scheme of attapulgite[J]. Am. Mineral, 1940, 25(6): 405—410
- [6] 陈天虎. 凹凸棒石粘土吸附废水中污染物机理探讨[J]. 高校地质学报, 2000, 6(2): 265—270
- [7] 陈天虎. 改性凹凸棒石粘土吸附性能对比实验研究[J]. 工业水处理, 2000, 20(4): 27—29
- [8] Hisato Hayashi, et al. Infrared study of sepiolite and palygorskite on heating[J]. Amer. Mineral, 1969, 53: 1 613
- [9] 张国生,范文元,梅万芳,等. 凹凸棒石型净水剂处理印染废水的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1992, 15(1): 86—91
- [10] 范文元,史小农. 凹凸棒石吸附剂处理印染污水[J]. 化学工程师, 1989, (4): 13—16
- [11] 王连军,黄中华,孙秀云,等. 改性凹凸棒土处理染化废水研究[J]. 南京理工大学学报, 1998, 22(3): 240—243
- [12] Rudenko V M, Tarasevich Y I. Kinetics and Dynamics of Adsorption of Anionic Dyes on a Coal-mineral Sorbent[J]. Khim Technol, 1993, 15(11—12): 715—718
- [13] 袁祖楠,翁性尚,李勇,等. 活化凹凸棒石对阳离子染料的脱色作用及其应用研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(4): 373—376

[14] 魏凤玉, 邓传芸, 虞文良. 癸二酸生产中单钠盐溶液的脱色及萃取—吸附法处理含酚废水[J]. 中国环境科学, 1998, 18(4): 371—373

[15] 惠天凯, 袁祖楠, 汪学才. 改性凹凸棒土对水溶液中苯的吸附研究[J]. 上海环境科学, 2000, 19(7): 317—318

[16] 彭书传, 魏凤玉, 周元祥, 等. 有机凹凸棒粘土吸附水中苯酚的试验[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(2): 14—16

[17] 李万山, 高斌, 冯建坊, 等. HDTMA 改性粘土对模拟地下水中苯系物的吸附[J]. 中国环境科学, 1999, 19(3): 211—214

[18] 周平, 王寻, 姚礼. 利用天然矿物处理造纸黑液[J]. 地质前缘, 2000, 7(2): 541—545

[19] 周平. 利用天然凹凸棒石处理造纸黑液[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2000, (2): 14—16

[20] Presnall H, Stewart H, Haynal R J, *et al.* Removal of Aromatic Color Bodies from Aromatic Hydrocarbon Streams[J]. PCJ Int. Appl., 1992, 30(4): 478—499

[21] 朱振海, 郑茂松, 孙新友, 等. 凹土脱色吸附剂对植物油脱色率及化学组分作用的探讨[J]. 非金属矿, 1998, (3): 18—20

[22] Boki K, Mori H, Kawasaki N. Bleaching Rapeseed and Soybean Oils with Synthetic Adsorbents and Attapulgites[J]. J. Am. Oil Chem. Sci., 1994, 71(6): 595—601

[23] 曹艳君, 王好平, 张巧萍. 植物油的脱色研究[J]. 沈阳化工, 1998, 27(1): 15—17

[24] 张茂林, 徐伟昌. 凹凸棒粘土对工业粗油酸脱色性能的研究[J]. 淮北煤师院学报, 1999, 20(4): 58—61

[25] 易发成, 冯启明, 李朝毅, 等. 坡缕石粘土对食用油脱色研究[J]. 矿物综合利用, 1996, (6): 32—33

[26] 范文元, 钱家盛. 凹凸棒石吸附剂对水和乙醇的吸附平衡计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1992, 15(1): 80—85

[27] 赵彩荣, 范文元. 利用凹凸棒石粘土吸附处理含铬废水[J]. 化工环保, 1989, 9(4): 248—249

[28] 秦非, 许鸥泳, 蒋挺大. AT—SS 复合颗粒吸附剂的制备和除铅性能研究[J]. 环境科学, 1996, 17(4): 47—50

[29] 张宇, 赵剑英. 凹凸棒土处理含镍废水的研究[J]. 江苏化工, 1997, 25(1): 48—49

[30] 朱振海, 郑茂松, 孙新友, 等. 凹凸棒石粘土净化含强致癌物质黄曲霉毒素 B₁ 油脂工艺技术研究[J]. 非金属矿, 1998, 21(6): 15—17

[31] 曾明果. 坡缕钨石对核废料的吸附特性及应用前景[J]. 贵州地质, 1996, 13(1): 90—92

[32] 唐方华. 两种粘土材料对¹³⁷Cs 吸附特性的研究[J]. 核技术, 1997, 20(3): 179—183

[33] 宋金如, 龚治湘, 罗明标, 等. 凹凸棒石粘土吸附铀的性能研究及应用[J]. 华东地质学院学报, 1998, 21(3): 265—272

[34] 袁祖楠, 姚振淮, 漆德瑶. 用凹凸棒石净化污染河水的研究[J]. 上海环境科学, 1993, 12(10): 14—18

[35] 朱继存. 凹凸棒石粘土处理城市废水的实验[J]. 江苏地质, 2000, 24(3): 157—160

[36] 崔龙鹏. 试论粘土矿物在淮河水污染治理中的应用前景[J]. 环境保护科学, 1998, 24(5): 16—18

[37] 栾兆坤, 马钢平, 赵春禄. 改性凹凸棒氧化膜吸附剂的除氟性能[J]. 大连铁道学院学报, 1998, 19(2): 27—31

[38] 张国生. 凹凸棒石净化矿化饮用水的研究[J]. 水处理技术, 1997, 23(1): 55—59

[39] 郑自立, 宋绵新, 易发成, 等. 中国坡缕石[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 47

[40] 胡春, 王怡中. 凹凸棒负载 TiO₂ 对偶氮染料和防止废水光催化脱污[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 123—125

[41] 胡发社, 程海丽, 杨飞华, 等. 坡缕石型载银抗菌剂的研制[J]. 现代化工, 2001, 21(6): 35—37

[42] Koga N, Yazaki Y. Preparation of Carrier for Enzyme Immobilization from Hydrophilic Clay Minerals[J]. JP0411913, 1992

[作者简介] 张国宇(1978—), 哈尔滨工业大学环境科学与工程系在读博士生。

[收稿日期] 2002—07—25

水处理动态

反渗透系统的预处理方法——SIMON GARE. IWC—2001—24

讨论了反渗透系统的预处理方法及其对各种原水如地表水、井水和废水的应用。根据原水、膜的类型、设备投资、运行成本、停运时间和对环境的影响等各种因素可选择不同的 RO 预处理方案。通过实例并结合膜制造商对给水的要求, 讨论了几种预处理方案及其限制因素。

为保护新一代联合循环燃气电厂使用离子色谱测定水中离子——BEVERLY NEWTON. IWC—2001—

用离子色谱监测水中的离子在美国的几座新的联合循环燃气电厂已经实施。为了防止透平组件的腐蚀和堵塞, 对水的要求非常严格, 该方法被预期在延长与水接触的部件的使用寿命方面发挥作用, 由于离子色谱能够鉴别个别的阴离子和阳离子种类, 可达到兆分之几的检测极限, 并可实行在线监测, 因此在这些水化学监测程序的效果中起着重要作用。离子色谱已提供识别腐蚀性和非腐蚀性离子间的干扰能力, 识别并消除腐蚀性的来源, 延长脱盐树脂的寿命, 测定质量平衡和保持阴、阳离子的随机平衡。采用离子色谱进行化学监测每年可节约成本估计为几百万美元。

(以上纪永亮供稿)