

水处理 滤料与填料

岳秀萍 员 建 主编



化学工业出版社

水处理 滤料与填料

岳秀萍 员 建 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

元 00.00 价



用于防止、治理或修复环境污染的材料可称为环境工程材料，其中水污染治理及水质净化工程中用于过滤工艺、沉淀工艺、吸附工艺及微生物固定化作用的滤料和填料均属环境净化材料，在水处理领域有独特的性能。

用于澄清水过滤的有颗粒滤料、粗滤、微滤及膜滤等，其中颗粒材料过滤是使水流经颗粒滤料构成的滤层，以截留水中悬浮物为主要目的。从 20 世纪 70 年代水源水被有机物污染的问题出现后，人们发现慢滤池过滤过程中存在着生物净水作用，能使水中的有机物或氨氮得到一定程度的去除，因此在类似曝气生物滤池中颗粒滤料则兼具了截留杂质及固定微生物两项功能。颗粒滤料广泛用于给水处理、工业废水处理及城市污水深度处理中，本书滤料部分以颗粒滤料为主；生物接触氧化法是一种高效的水处理工艺，由于填料为微生物提供了生长基地，生物膜数量增加的同时其活性也得以提高，填料在生活污水、工业废水及给水微污染原水的生物预处理工艺中亦发挥着重要作用；另外，在气浮工艺的溶气过程中加置填料可提高溶气效率、在冷却水工艺中填料更起着举足轻重的作用……近年来国内外水处理研究工作者针对不同的水处理技术，研发并应用了不同用途的环境净化材料，比如用于过滤、吸附等分离工艺的滤料、用于生物膜法工艺中固定微生物的生物载体（填料）等。在这些水处理技术中滤料和填料是工艺的核心部分，其性能决定了工艺的处理效果、运行成本和工程投资等。

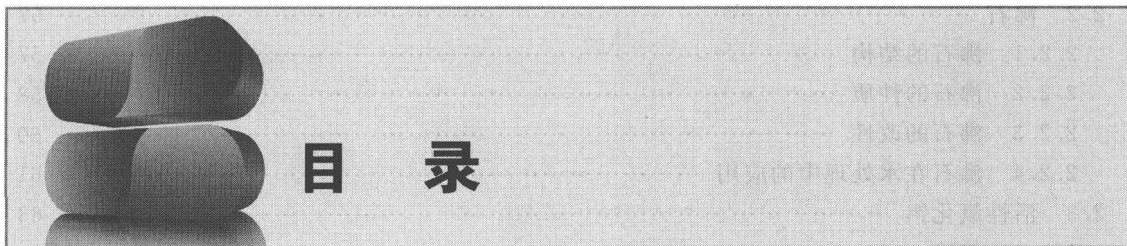
本书以水处理工艺中常用的滤料和填料为主体，参考近年来的中外学术文献，对滤料及填料的基本性能、对污染物质去除的影响及去除机制、使用特点及工程应用等进行了较为详尽的介绍，呈现了水处理工程材料领域取得的一部分研究进展。适于环境工程、给水排水工程、市政工程、材料工程、环境科学等相关专业的学生和工程技术人员阅读和参考。

本书由岳秀萍、员建主编。全书共分为 6 章，第 1 章、第 3 章的 3.4 节和第 5 章由太原理工大学岳秀萍编写；第 2 章的 2.3 节、2.4 节，第 3 章的 3.1 节、3.2 节及第 6 章的 6.1 节由太原理工大学李红艳编写；第 4 章及第 2 章的 2.1 节、2.2 节由天津城市建设学院员建编写；第 3 章的 3.3 节和第 6 章的 6.2 节、6.3 节由天津城市建设学院穆荣编写。

在本书编写过程中参考和引用了相关学术文献，在此对诸文献作者表示感谢。由于作者水平和时间有限，不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2011 年 3 月



第1章 滤料与填料在水处理中的应用

1

1.1 滤料与填料的类型与种类	1
1.1.1 滤料的分类	1
1.1.2 填料的分类	3
1.2 滤料与填料的主要性能指标	4
1.2.1 滤料	4
1.2.2 填料	5
1.3 滤料与填料在水处理领域中的应用	6
1.3.1 滤料在过滤工艺中的应用	6
1.3.2 反渗透预处理系统中填料的应用	8
1.3.3 沉淀工艺中填料的应用	8
1.3.4 吸附工艺中滤料与填料的应用	9
1.3.5 气浮溶气、冷却塔中填料的应用	14
1.3.6 在微污染原水生物预处理中填料的应用	18
1.3.7 人工湿地系统中填料的应用	21
1.3.8 生物膜法中填料的作用	21
1.4 水处理滤料与填料的研究发展	24
1.4.1 水处理滤料的研究发展	24
1.4.2 水处理填料的研究发展	27
参考文献	32

第2章 吸附工艺中的填料

35

2.1 活性炭	35
2.1.1 活性炭的种类	35
2.1.2 活性炭的制造	36
2.1.3 活性炭的物理化学特性	37
2.1.4 活性炭的吸附性能	38
2.1.5 活性炭的性能检验	43
2.1.6 活性炭的再生	44
2.1.7 活性炭吸附装置	48
2.1.8 生物活性炭	49
2.1.9 活性炭在水处理方面的应用	55

2.2 沸石	57
2.2.1 沸石的结构	57
2.2.2 沸石的性质	58
2.2.3 沸石的改性	60
2.2.4 沸石在水处理中的应用	61
2.3 活性氧化铝	63
2.3.1 概述	63
2.3.2 活性氧化铝的表面处理	64
2.3.3 活性氧化铝的除污机理	64
2.3.4 活性氧化铝的特点	66
2.3.5 活性氧化铝在水处理方面的应用研究	67
2.3.6 活性氧化铝的应用前景及存在问题	69
2.3.7 改性活性氧化铝	70
2.3.8 活性氧化镁	71
2.4 吸附树脂	72
2.4.1 概述	72
2.4.2 吸附树脂的类型	74
2.4.3 吸附树脂的制备	74
2.4.4 吸附树脂的吸附机理	80
2.4.5 吸附树脂的特点	81
2.4.6 吸附树脂在水处理方面的应用研究	83
2.4.7 吸附树脂的应用前景及存在问题	85
参考文献	86

第3章 过滤工艺中的滤料 90

3.1 传统硬质滤料	90
3.1.1 石英砂	90
3.1.2 无烟煤	93
3.1.3 磁铁矿	95
3.1.4 锰砂	96
3.1.5 改性滤料	98
3.1.6 陶粒滤料	112
3.1.7 单层滤料截污规律	116
3.1.8 双层及多层滤料	129
3.2 软质滤料	134
3.2.1 纤维滤料	134
3.2.2 DA863 自适应滤料	146
3.2.3 HV 旋翼式滤料	150
3.3 其他滤料	152
3.3.1 合金滤料	152

3.3.2 新型 AF 滤料	158
3.4 滤布	159
参考文献	161

第4章 沉淀工艺中的填料 165

4.1 斜板沉淀池填料	165
4.1.1 同向流斜板沉淀池	166
4.1.2 侧向流斜板沉淀池	167
4.1.3 迷宫式斜板沉淀池	168
4.2 斜管沉淀池填料	168
4.2.1 斜管的材料	168
4.2.2 斜管的长度	169
4.2.3 斜管的断面形状	169
参考文献	171

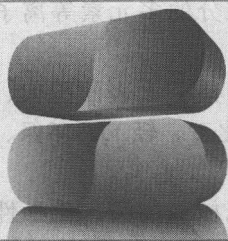
第5章 传统生物膜法及其填料 172

5.1 生物接触氧化工艺	172
5.1.1 工艺特点	172
5.1.2 生物接触氧化池的构造	172
5.1.3 生物接触氧化池中的滤料	173
5.1.4 生物接触氧化法的应用	173
5.2 生物滤池	175
5.2.1 构造与特点	175
5.2.2 塔式生物滤池	176
5.2.3 曝气生物滤池	178
5.2.4 厌氧生物滤池	179
5.3 生物流化床	182
5.3.1 工艺特点与构造	182
5.3.2 生物流化床中的填料	183
5.3.3 生物流化床处理生活污水的试验研究	183
5.4 生物转盘	185
5.4.1 工艺特点与构造	185
5.4.2 生物转盘中的填料	186
5.4.3 生物转盘的应用	186
参考文献	188

第6章 填料的分类及其应用 190

6.1 分散填料	190
6.1.1 陶粒	190

6.1.2	粉煤灰陶粒	191
6.1.3	煤矸石陶粒	193
6.1.4	铝厂赤泥陶粒	195
6.1.5	污泥陶粒	197
6.1.6	页岩陶粒	199
6.1.7	纳米改性陶粒	200
6.2	弹性填料	202
6.2.1	YDT 型弹性立体填料	202
6.2.2	TB/TA 型弹性波形填料	206
6.2.3	PWT 型立体网状填料	208
6.2.4	自变形弹性立体填料	209
6.3	新型生物填料	210
6.3.1	LINPOR 填料	211
6.3.2	酶促生物填料	213
6.3.3	纳米 TiO_2 光催化剂多面球填料	216
6.3.4	橡胶填料	217
6.3.5	植物中空纤维填料	218
6.3.6	水力旋转填料	222
参考文献		223



第 1 章

滤料与填料在水处理中的应用

水作为生命之源，与人类的生存发展息息相关。水资源的不可替代性以及有限性使其变得尤为珍贵。近些年来，随着社会的快速发展，水的用途增多，需求量增大，同时对水资源造成的污染以及浪费也越来越严重，目前我国面临着水资源短缺、水污染严重的环境问题。对污水、废水进行处理，使其再生水成为水源，充分利用水资源，是缓解水资源短缺的重要途径。水处理是利用物理、化学和生物的方法去除水中的杂质，以达到处理污水、净化水源的目的。物理处理法可分为调节、离心分离、沉淀、除油、过滤等。化学处理法可分为中和、化学沉淀、氧化还原等。物理化学处理法可分为混凝、气浮、吸附、离子交换、膜分离等方法。生物处理法可分为好氧生物处理法和厌氧生物处理法。其中过滤工艺、沉淀工艺、吸附工艺、吹脱工艺等都需要滤料或填料。

滤料的作用是去除水中大多数氯、重金属、二价铁、硫化氢等，抑制细菌繁殖，减少悬浮物等物质。当废水通过滤料床层时，其中的悬浮颗粒和胶体就被截留在滤料的表面和内部空隙中。

填料在吸附工艺、沉淀工艺和生物膜法等中的应用也十分广泛。在生物膜法中，使微生物在载体（填料）表面附着生长，有利于充分发挥微生物的生物代谢与絮凝作用，同时也促进了填料的发展。填料为微生物提供了生长基地，在增加生物膜数量的同时也提高了其活性，所以填料的特性及表面特性直接影响着生物膜的形成与附着性。填料的形式也从最初的卵石、焦炭等纯天然材料逐步向合成树脂等新形式发展，通过填充在不同的生物反应器中，广泛应用于处理生活污水以及各种工业废水。

1.1 滤料与填料的类型与种类

1.1.1 滤料的分类

根据材质可以分为无机滤料和有机滤料。

1.1.1.1 无机滤料

① 砾石（卵石）垫层滤料。是净水过程中必备的垫层滤料。天然砾石机械强度高，化学性能稳定，密度适中，外观光滑呈球状，是各种滤料下面必需的承托层，有纯白色和杂色两种。

② 石榴石滤料。石榴石又名“玉砂”或“天然金刚砂”，具有较强的硬度和很好的耐酸耐碱性，是一种岛状结构的铝（钙）硅酸盐，它色泽优美，目前，经高纯磁选出的有灰、红、绿、白等多种染色体，是国外当前新开发的立体喷墙涂料。由于它具有内部化学分子多、化学稳定性好等特点，被当作新型耐磨净水滤料。

③ 麦饭石滤料。由于它具有较高的机械强度，大的比表面积，充分的多元素等离子交换，是目前纯净水、医药、化工、食品等多行业的理想环保滤料。

④ 沸石滤料。沸石是一种架状结构的碱土金属铝硅酸盐矿物质，具有比表面积大、吸附性能好、离子交换能力强、化学性能稳定等特点，广泛应用于石油化工、轻工、环保、建材、畜牧业等领域。

⑤ 无烟煤滤料。是目前普遍采用的双层、三层快速过滤材料，机械强度高，化学性质稳定，不含有毒有害物质，在一般酸性、碱性、中性水中均不溶解，粒径级配合理，比表面积大，在过滤过程中起重要作用。

⑥ 焦炭滤料。由于其机械强度高、多孔结构合理、吸附性能好、截污能力强、过滤速度快、使用周期长等特点，适用于生活用水和工业水处理装置中。

⑦ 陶粒滤料。有轻质陶粒滤料、页岩陶粒生物滤料等。轻质陶粒滤料既适用于城镇和工业给水处理，也适用于冶金、石油、化工、纺织工业废水的生化（除油、除铁、除锰等）处理。它不仅对各种类型的普通滤池、快速滤池、无阀滤池、虹吸滤池、移动冲洗罩滤池和压力滤池普遍适用，也是各种高效净化器、乡镇小型净水器水质处理的最好填料。其优点是质轻、松散容重（是指自然堆积状态下的容重）小、比表面积大、吸附能力强、孔隙率高、化学性能稳定、不含对人体健康和工业生产有害的成分。页岩陶粒生物滤料采用天然岩石——页岩为原料，经 1200℃ 高温、焙烧、破碎、筛分、精制而成，是一种外壳封闭、内部有无数互不连通细孔的陶质颗粒状粉料，它无毒、无味、耐腐蚀性好，并具有极好的吸附性和很好的强度，对微生物的附着生长十分有利。目前清华大学环境工程系在接触氧化法滤池、曝气生物滤池等污水处理新技术中推广使用该种滤料。

⑧ 石英砂滤料。是我国目前使用极其广泛的一种滤料。常用的石英砂滤料有比较严格的标准：要有足够的强度，有很好的化学稳定性，含泥量要低，最好是海砂。

⑨ 瓷砂滤料。外观为球形颗粒，有优良的吸附性能，相互间以点接触，有均匀而恰当的间隙，在工作状态时通常弯曲，流通距离长，为杂质造成了理想的沉积条件。

⑩ 锰砂滤料。主要用于地下水除铁除锰过滤，其锰的形态以氧化锰为主。

⑪ 磁铁矿滤料。又叫除铁填料，适用于管式大阻力配水系统，在三层滤池中通常与无烟煤滤料、石英砂滤料配合使用，反冲洗时不易混层，是多层滤池中必不可少的滤料。具有滤速快、运行周期长等优点。另外，它的除铁、除锰、除氟效果也很明显。

⑫ 果壳滤料。孔隙结构好，比表面积大，吸附性能强，化学性能稳定，易再生，适用于生活饮用水、高纯水、工业用水和废水处理的深度净化、脱氯、脱色、除臭、黄金提炼以及大、中、小型净水器中。

⑬ 活性氧化铝。用高纯度氧化铝经科学调配、催化精加工而成。它能吸附去除水中对人体有害的氟，可用于饮用水及工业装置的除氧、除氟、脱砷、污水脱色、除臭等。

⑭ 纤维球滤料。由纤维丝扎结而成，它与传统的刚性颗粒滤料相比，具有弹性效果好、不上浮水面、孔隙大、水头损失少、耐酸碱等优点。在过滤过程中，滤层空隙沿水流方向逐渐变小，比较符合理想滤料上大下小的空隙分布，效率高、滤速快、截污能力强，可再生，适用于各种水质的过滤。

1.1.1.2 有机滤料

主要有腐殖树皮、植物根须、枝杈、锯末、泥炭等及其混合物。由于有机滤料廉价易得，因此获得了广泛的应用。EPS 发泡塑料滤珠是在悬浮聚苯乙烯树脂中加入石油液化气

而发泡制成的珠状颗粒白色小球，属轻质滤料。

1.1.2 填料的分类

按填料的材料分类，有塑料、陶瓷、金属等；按填料的弹性可分为硬性、半软性、软性等；按填料应用时的安装方式可分为固定和悬浮等；按填料的装配情况可分为整装和乱堆等；按填料的形状分类，有拉西环、鲍尔环、阶梯环、矩鞍环、弧鞍环、网环等，而网环又可分为鞍形网、波纹网等。

我国目前使用的填料大致可以分为以下三大类：第一类为定型固定式填料，主要是斜管填料；第二类为悬挂式填料，如软性填料、半软性填料、弹性立体填料、组合型填料等；第三类为堆积式、悬浮式填料，即分散式填料，如鲍尔环、阶梯环、空心球、悬浮粒子等。

① 斜管填料。又称六角蜂窝填料，主要用于各种沉淀和除砂排泥，近十年来在给排水工程中应用最广泛而且成为一项水处理装置。它具有适用范围广、处理效果好、占地面积小等优点，用于进水口除砂、一般工业和生活给水沉淀、污水沉淀、隔油等处理，既适用于新建工程，又适用于现有旧池的改造，均能取得良好的经济效益。

② 软性纤维填料。是一种生物接触氧化法和厌氧发酵法处理废水的新型生物膜载体，具有比表面积大、利用率高、空隙可变不堵塞、适应性强、耐冲击负荷、效果稳定、污泥产生量少、易于管理、造价低、运转费用省、组装方便等优点。

③ 半软性填料。具有散热性能高、阻力小、布水布气性能好、易长膜等优点，又有切泡作用。它所用的材料为聚丙烯、聚乙烯，用于污水、废水处理工程，配套用于接触氧化塔、氧化沟、氧化槽等设备。软性填料主要用于印染、炼染、毛纺、地毯、棉纺、丝绸、制药、含氰、石化等工业废水和生活污水的好氧处理，还适用于麻纺、酒精、制糖、造纸、食品发酵等高浓度废水的厌氧处理。

④ 组合填料。是在软性填料和半软性填料的基础上发展而成的，它兼有两者的优点。其结构是将塑料圆片压扣改成双圈大塑料环，将醛化纤维或涤纶丝压在环圈上，使纤维束均匀分布；内圈是雪花状塑料枝条，既能挂膜，又能有效切割气泡，提高氧的转移速率和利用率，使水气生物膜得到充分交换，使水中的有机物得到高效处理。具有散热性能高、阻力小、布水布气性能好、易长膜等优点，又有切割气泡的作用。用于污水、废水处理工程，配套用于接触氧化塔、氧化沟、氧化槽等设备，是一种生物接触氧化法和厌氧发酵法处理废水的生物载体。

⑤ 多孔球形悬浮填料。是对国内生物膜法处理污水采用的填料开发的最新系列产品。该填料由聚乙烯材料制造而成，分内外双层球体，外部为中空鱼网状球体，内部为转型球体，在使用过程中，微生物易生长、易更换、耐酸碱、抗老化、不受水流影响、使用寿命长，剩余污泥极少，安装方便。广泛适用于生活污水以及石油化工、轻工、纺织、制药等工业废水的处理。

⑥ 内置式悬浮填料。由网格球形壳体与内置载体两部分组成。壳体由高分子聚合物注塑而成，球面呈网格状开孔。内置载体的材料有醛化维纶丝及聚乙烯扁丝等。前者是在壳体内设一轴杆，轴杆上有两个塑料扣，每个扣上固定有6束醛化维纶丝，纤维丝在水体中能随水流自由摆动；后者是以聚乙烯为原料拉成薄扁丝后呈刨花状成团填入壳体。网格孔大小适中，既保证了自身的机械强度，又考虑了不被脱落生物膜堵塞。另外又经特殊处理，增加了壳体的密度，使填料在反应器中能随曝气产生的水流运动而上下翻滚，生物膜与气、水广

泛接触，以达到良好的处理效果。内置式悬浮填料不需要固定框架，可直接投放于反应器中，具有投资少、适应性强、易挂膜、比表面积大、无需再生处理、运转管理方便等优点，可广泛应用于化工、纺织、印染、制药、造纸、食品加工等行业的废水及生活污水的处理。

⑦ 鲍尔环填料。具有低压降、通量大、效率高的特点。HYPAK 填料较同类尺寸的鲍尔环具有更低的压降及更高的传质效率，而且在填料层内液体分布好。

1.2 滤料与填料的主要性能指标

1.2.1 滤料

衡量滤料性能的指标主要包括：滤料的粒径和级配、滤料的纳污能力、滤料的孔隙率和比表面积、滤料的机械强度和化学稳定性。

1.2.1.1 滤料的粒径和级配

滤料的粒径和级配应适应悬浮颗粒的大小和去除效率的要求。粒径表示滤料颗粒的大小，通常指能把滤料颗粒包围在内的一个假想球体的直径。级配表示不同粒径的颗粒在滤料中占的比例。

粒径分平均粒径和有效粒径。平均粒径 d_{50} 指 50%（按质量计）滤料能通过筛孔孔径（以 mm 计）；有效粒径 d_{10} 表示有 10% 滤料能通过筛孔孔径。不同的过滤工况对滤料粒径有不同的要求，使用时应根据具体情况选取。滤料粒径过大时，细小的悬浮物会穿过滤层，而且在反洗时不能使滤层充分松动，造成反洗不彻底，使沉积物和滤料结成硬块，产生水流不均匀、出水水质降低和滤池很快失效的问题；粒径过小时，水流阻力大，过滤时滤层中水头损失增加得很快，从而缩短了过滤周期，反洗水的消耗量也就会相对增加。

不均匀系数 k_{80} 反映了滤料颗粒粗细的不均匀程度。不均匀系数的计算公式如下：

$$k_{80} = \frac{d_{80}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

k_{80} 越大，则粗细颗粒的尺寸相差越大，颗粒越不均匀，对过滤和反冲洗都会产生不利的影响。因为 k_{80} 较大时，滤层的孔隙率小、含污能力低，从而导致过滤时滤池工作周期短；反冲洗时，若满足细颗粒膨胀要求，粗颗粒将得不到很好的冲洗，反之，若为满足粗颗粒膨胀要求，细颗粒可能会被冲出滤池。 k_{80} 越接近 1，滤料越均匀，过滤和反冲洗效果愈好，但滤料价格很高。为了保证过滤和反冲洗效果，通常要求 k_{80} 小于 2.0。

生产中也有规定最大和最小两种粒径的较为简便的方法表示滤料的规格。

为满足过滤对滤料粒径级配的要求，应对采购的原始滤料进行筛选。

在过滤和反冲洗过程中，滤料由于碰撞、磨损会出现破碎和磨蚀而变细，从而造成滤料层孔隙率减小，对过滤产生不利影响。因此，应根据情况更换滤料。

1.2.1.2 纳污能力

滤料层承纳污染物的容量常用纳污能力来表示。其含义是在保证出水水质的前提下，在过滤周期内单位体积滤料中能截留的污染物量，以 kg/m^3 或 g/m^3 表示，其大小与滤料的粒径、形状、滤层厚度等因素有关，即取决于滤层厚度 L 和滤料粒径 d_e 的比值 L/d_e 。 L/d_e

值越大, 处理效果越好, 因为 L/d_e 值与单位过滤面积上滤料的总表面积和颗粒数目成正比。所需的 L/d_e 值因水质、滤速、去除率及要求的过滤持续时间而异。当进水含悬浮物量较大时, 宜用粒径大、厚度大的滤料层, 以增大滤层的含污能力; 如含悬浮物量较小, 宜用粒径小、厚度大的滤料层。

如果孔隙尺寸及纳污能力从上到下逐渐变大, 在下向流过滤中, 水流先经过粒径小的上部滤料层, 再到粒径大的下部滤料层, 大部分悬浮物截留在床层上部数厘米深度内, 水头损失迅速上升, 而下层的纳污能力未被充分利用。理想滤池滤料排列应是沿水流方向由粗到细。解决实际滤池与理想滤池矛盾的途径如下。

① 改变水流方向, 即原水自下向上穿过滤层。

② 改用双层或多层滤料, 即选择不同密度的滤料组合。在上部放置粒径较大、密度较小的轻质滤料, 在下部放置粒径较小、密度较大的重质滤料。

③ 采用新型的密实度或孔隙率可变的滤料, 这种滤料由柔性材料人工制成, 如纤维球、轻质泡沫塑料珠、橡胶粒等。

1.2.1.3 孔隙率和比表面积

滤料的孔隙率是指在一定体积的滤层中孔隙所占的体积与总体积的比值, 用 m 表示。

$$m = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, ρ 为滤料的密度, 表示单位体积的滤料在绝对密实条件下的质量, g/cm^3 ; ρ_0 为滤料的堆积密度, 表示单位堆积体积滤料的质量, g/cm^3 。石英砂滤料的孔隙率一般在 42% 左右, 无烟煤滤料的孔隙率为 50%~55%, 陶粒滤料的孔隙率为 65%~70%。

滤料的比表面积是指单位质量或单位体积滤料所具有的表面积, 单位为 cm^2/g 或 cm^2/cm^3 , 以 S 表示。 S 值越大, 则吸附杂质的能力越强。比表面积是评价滤料过滤性能的重要指标, 几种粒度 (用 d 表示) 一定的粒状滤料的 S 值为: 石英砂滤料, $d=0.15\sim1.2\text{mm}$, $S=25.5\sim174\text{cm}^2/\text{g}$; 无烟煤滤料, $d=0.15\sim1.2\text{mm}$, $S=2.8\sim30.4\text{cm}^2/\text{g}$; 石榴石滤料, $d=0.15\sim1.2\text{mm}$, $S=37.1\sim203\text{cm}^2/\text{g}$; 陶粒滤料, $d=0.5\sim2.0\text{mm}$, $S=5\times10^3\sim5\times10^4\text{cm}^2/\text{g}$ 。

1.2.1.4 滤料的机械强度

滤料应该有足够的机械强度, 以减轻运行中颗粒间互相摩擦造成的破碎现象。滤料的机械强度常用磨损率和破碎率来表示。

1.2.1.5 化学稳定性

在 1:1 的盐酸溶液中, 滤料溶出物的质量分数称为盐酸可溶率, 它是判断化学稳定性的重要指标。

此外, 滤料应不含对人体健康有害及有毒的物质, 不含对生产有害的物质, 滤料还应就地取材、价格便宜、货源充足。

1.2.2 填料

在废水的生物处理中, 对填料的性能要求主要有以下几个方面。

- a. 水力特性。要求比表面积大, 孔隙率高, 水力畅通, 阻力小, 流速均一。
- b. 生物膜附着性。有一定的生物膜吸附性能。

- c. 化学与生物稳定性。要求经久耐用，不溶于有害物质，不会导致二次污染。
d. 经济性。要求价格便宜，货源广，便于运输和安装。

评价填料的主要指标及其含义如下。

- ① 单位体积中的填料个数 (n)。常用每立方米填料层所含有的填料个数来表示 ($\text{个}/\text{m}^3$)。
② 比表面积 (a_T)。表示单位堆积体积的填料层所具有的表面积 (m^2/m^3)。

$$a_T = na_0 \quad (1-3)$$

式中, a_T 为比表面积, m^2/m^3 ; a_0 为一个填料的表面积, $\text{m}^2/\text{个}$ 。

- ③ 孔隙率 (ξ)。是指干塔状态时, 塔内填料层中空隙部分所占的体积与填料层体积之比。

$$\xi = \frac{V_0 - V}{V_0} = 1 - \frac{V}{V_0} \quad (1-4)$$

式中, ξ 为孔隙率, m^3/m^3 ; V 为填料层中空隙的体积, m^3 ; V_0 为一个填料层的总体积, m^3 。

④ 干填料因子和填料因子。干填料因子是填料未被液体润湿时比表面积 a_T 和孔隙率 ξ 三次方的比值, 即 a_T/ξ^3 , 表示气体通过干填料层的流动特性。当有液体喷淋时, 填料层部分空隙被液体占有, 同时填料的比表面积也发生变化, 所以用一个实测的填料因子 ϕ 表示。

- ⑤ 堆积重度 (γ_P)。计算公式如下:

$$\gamma_P = (1 - \xi)\gamma_M \quad (1-5)$$

式中, γ_M 为材料重度, kg/m^3 。

1.3 滤料与填料在水处理领域中的应用

1.3.1 滤料在过滤工艺中的应用

在常规水处理过程中, 过滤一般是利用粒状和非粒状滤料对流动水流中的悬浮颗粒施加一定的限制, 而流动的水流继续向前流动, 将悬浮物抛弃使水获得澄清的工艺过程。

水流自上而下通过滤料层时, 水中颗粒的运动过程可分为三个阶段: 第一阶段为颗粒迁移, 被水流携带的颗粒由于拦截、沉淀、惯性、扩散、水动力等物理力学作用, 脱离水流线向滤料颗粒表面靠近; 第二阶段为颗粒黏附, 由于物理化学作用, 水中悬浮颗粒被黏附在滤料颗粒表面上, 或黏附在滤料表面原来黏附的颗粒上; 第三阶段为颗粒脱落, 在黏附的同时, 已黏附在滤料上的悬浮颗粒在水流剪切力的作用下重新进入水中, 被下层滤料截留, 避免了污泥局部聚积, 使整个滤料的截污能力得以发挥。因此, 过滤主要是悬浮颗粒与滤料颗粒之间黏附作用的结果, 过滤机理可以归纳为以下三种作用。

一是阻力截留。当原水自上而下流过粒状滤料层时, 粒径较大的悬浮颗粒首先被截留在表层滤料的空隙中, 从而使此层滤料间的空隙越来越小, 截污能力变得越来越高, 结果逐渐形成一层主要由被截留的固体颗粒构成的滤膜, 并由它起主要的过滤作用。这种作用属于阻力截留或筛选作用。筛选作用的强度主要取决于表层滤料的最小粒径和水中悬浮物的粒径, 并与过滤速度有关。悬浮物粒径越大, 表层滤料粒径和滤速越小, 就越容易形成表层筛选膜, 滤膜的截污能力也越高。

二是重力沉降。原水通过滤料层时, 众多的滤料表面提供了巨大的沉降面积。水中颗粒由于自身的重力作用或惯性作用而脱离流线被抛向滤料表面。重力沉降强度主要与滤料直径

和过滤速度有关。滤料越小, 沉降面积越大, 滤速越小, 则水流越平稳, 这些都有利于悬浮物的沉降。

三是接触絮凝。由于滤料具有很大的表面积, 它与悬浮物之间有明显的物理吸附作用。此外, 砂粒在水中常带有表面负电荷, 能吸附带正电荷的铁、铝等胶体, 从而在滤料表面形成带正电荷的薄膜, 并进而吸附带负电荷的黏土和多种有机物等胶体, 在砂粒上发生接触絮凝。在大多数情况下, 滤料表面对尚未絮凝的胶体还能起到接触碰撞的媒介作用, 促使凝聚过程发生。

在实际过滤过程中, 上述三种机理往往同时起作用, 只是依条件不同而有主次之分。对粒径较大的悬浮颗粒, 以阻力截留为主, 由于这一过程主要发生在滤层表面, 通常称为表面过滤。对于细微悬浮物, 以发生在滤料深层的重力沉降和接触絮凝为主, 称为深层过滤。

均粒石英砂滤料有过滤周期长、滤后水质好、过滤水头损失增长小的优点, 能较好地克服表面堵塞, 从而充分提高过滤效率, 气水反冲洗效果好。目前, 一般污水处理厂的滤料大多采用普通石英砂滤料, 也有部分陶粒填料和无烟煤填料。但由于这些滤料本身具有局限性, 如其比表面积有限、中性条件下表面带负电荷或不经济性, 人们通过在石英砂表面附着不同功能的物质来改善石英砂滤料表面的性质。

石英砂改性滤料是在普通石英砂滤料表面通过化学反应涂上一层改性剂(通常为金属氧化物和氢氧化物), 从而改变原滤料颗粒表面的物理化学性质, 以提高滤料对某些特殊物质的吸附能力, 达到改善出水水质的目的。

改性石英砂在重金属离子、水中阴离子型有害物质及水中有机物和微生物的过滤去除方面都取得了一些试验研究成果。

① 去除细菌、浊度。William P. Johnson 和 Bruce E. Logon 研究了改性滤料对细菌的吸附效果, 认为由于细菌带负电, 表面涂以氧化铁的石英砂改性滤料优于未涂石英砂滤料和表面沉淀了有机物的石英砂滤料。

② 去除铁、锰。乌克兰基辅建筑工业大学的一个课题组研究发现, 在铁、锰的去除过程中, 使用改性滤料是改善滤料成熟前出水水质, 缩短成熟期的有效途径之一。

③ 去除铜、锌。中国台湾大学在石英砂上涂以硝酸铁溶液, 可以去除进水中含铜离子浓度 $0.64 \sim 3.2 \text{ mg/L}$ 。同济大学高乃云教授分别用氧化铝涂层砂和氧化铁涂层砂去除水中的金属锌, 发现 pH 值大于 9 时, 涂铝砂除锌率达 100%。

④ 去除砷、硒、氟。日本 Shigeru Maeda 等用氢氧化铁改性石英砂有效地去除了五价砷。中国台湾 Wen-hui Kuan 等在各种 pH 值条件下进行四价和六价硒的去除, 硒的去除率随 pH 值的减小而增加, 但对四价硒的去除效率明显比六价硒高。同济大学高乃云教授用氧化铁涂层去除水中的氟、砷, 发现低 pH 值时, 涂铁砂能非常有效地去除水中的氟和砷。

⑤ 去除镉、铬和氰化物。印度工业学院 Jiban K. Satpathy 将石英砂滤料涂以硝酸铁, 分别在不同的 pH 值条件下从镀镉、铬废水中去除镉、铬和氰化物。

⑥ 去除有机污染物。Yujung Chang 和 Chi Wang Li 用表面涂铁的石英砂和橄榄石去除天然有机物, 发现去除效率直接和涂在滤料表面的改性剂的量有关, 并随着溶液 pH 值的降低而增强。他们还指出这种滤料的比表面积是未涂层滤料的 40~50 倍。

以天然陶土为主要原料, 掺加适量的化工原料, 可以生产出一种较理想的水处理滤料——球形轻质陶粒。用于曝气生物滤池处理城市污水的试验表明, 这种滤料具有很高的处理效率, 具有强度大、孔隙率大、比表面积大、化学稳定性好、生物附着力强、挂膜性能良

好、水流流态好、反冲洗容易进行的优点。

近年来多孔陶瓷滤料用于废水处理也已发展起来。由于多孔陶瓷特殊的结构,当滤液通过时,其中的悬浮物、胶体物和微生物等污染物质被截留在过滤介质的表面或内部,同时附着在污染物上的病毒等也一起被截留。该过程是吸附、表面过滤和深层过滤相结合的过程,且以深层过滤为主。表面过滤主要发生在过滤介质的表面,多孔陶瓷起一种筛滤的作用,大于微孔孔径的颗粒被截留,被截留的颗粒在过滤介质表面产生架桥现象,形成了一层滤膜。深层过滤发生在多孔陶瓷内部,由于多孔陶瓷孔道的迂回,加上流体介质在颗粒表面形成的拱桥作用、惯性冲撞的影响,过滤精度有所提高。

Cu-Zn 合金滤料是一种新型的、多功能的、可再生的合金水处理材料,商品名 KDF (Kinetic Degradation Fluxion),由 Don Heskett 教授于 1984 年发明,并通过了美国国家卫生基金 (NSF)、水质协会 (WQA) 等机构的认证。

KDF 由高纯度的铜、锌两种金属按一定的比例组合而成,有 KDF55 和 KDF85 两种型号。KDF55 由 50% 的铜和 50% 的锌组成,颜色金黄,颗粒直径 0.145~2.00mm,表观密度为 2.4~2.9g/cm³,在去除氯及可溶性重金属方面最为有效;KDF85 由 85% 的铜和 15% 的锌组成,红褐色,颗粒直径 0.149~2.00mm,表观密度 2.2~2.7g/cm³,在去除铁及 H₂S 方面最有效。

清华大学张凡等尝试将 KDF55 介质用于化工微污染废水的处理。结果表明:活性炭对苯酚的吸附存在一个最低浓度,当废水中苯酚浓度小于 0.2mg/L 时,其去除效果不明显。但 KDF 介质不存在这种效应,它对低质量浓度的苯酚废水去除效果十分明显,吸附去除率可达 99% 以上。不过苯酚质量浓度较高时,KDF 介质吸附量有限,过滤效果并不显著。

1.3.2 反渗透预处理系统中填料的应用

北京工业大学吕亚文等采用直径为 15mm 的玻璃管、滤床高度为 63.5cm 的处理装置,对 KDF55 在反渗透预处理系统中去除余氯、细菌、重金属离子及有毒离子和阻垢效果等方面进行了研究,试验结论如下。

① 去除余氯明显。在进水余氯 3~10μg/g、滤速 96m/h 条件下,出水余氯含量均小于 0.11μg/g,去除率大于 99%。余氯含量、流速越低,去除余氯的效率越高,这也说明余氯与 KDF 接触时间越长作用越明显。

② 除菌。在滤速为 50m/h 时,对大肠杆菌、霉菌和酵母菌的去除率平均在 90% 以上,对总细菌数的去除率平均在 60% 以上;滤速降为 9m/h 时,KDF 对大肠杆菌、杂菌的去除率平均在 90% 以上。

③ As³⁺、Cr⁶⁺ 的去除。在滤速为 9m/h 时,As³⁺ 的浓度从 0.75mg/L 提高到 5.0mg/L 时,出水的去除率由 60% 下降到 36%;水中 Cr⁶⁺ 的浓度由 0.306mg/L 提高到 2.431mg/L 时,去除率则由 35.9% 下降到 6.2%。说明 KDF 对 As³⁺、Cr⁶⁺ 的去除有一定的效果,As³⁺、Cr⁶⁺ 的浓度对其去除率有影响。

④ 阻垢效能。试验用高硬度的 MgCl₂ 水溶液经 KDF 处理后发现结垢,其垢呈疏松的片状,易清除。

1.3.3 沉淀工艺中填料的应用

沉淀设备是水处理工艺中泥水分离的重要环节,其运行状况直接影响出水水质。在沉淀



池有效容积一定的情况下,增加沉淀面积,可使颗粒物去除率提高。根据这一理论,浅池理论才得到实际应用,斜板和斜管沉淀池才发展起来。

斜板(管)沉淀池是把与水平面成一定角度(一般 60° 左右)的斜板(管状组件)放置于沉淀池中构成。水流可从下向上(也有从上向下、水平方向)流动,颗粒则沉淀于斜板(管)底部,当颗粒累积到一定程度时自动滑下。

斜管沉淀工艺中的蜂窝斜管填料经多年应用与发展,已能满足水质净化的需要。以浅池沉淀理论为基础,与平流沉淀池相比,大大提高了产水率,在日处理5万吨以下的水厂及挖潜改造中普遍采用斜管装置。

蜂窝斜管填料主要适用于各种进水口除砂、一般工业和生活给水沉淀、污水沉淀以及隔油和尾矿浓缩等处理工程中,是目前给排水工程中采用最广泛而且比较成熟的一项水处理装置。既适用于新建工程,也适用于旧池的改造。斜管具有适用范围广、处理效果好、占地面积小等优点。材质有聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)和乙丙共聚三种,特别是乙丙共聚因其韧性强、组装强度好、不变形、不脆裂、使用寿命长等优点,近年来得到了广大用户的好评。斜管规格有 $\phi 35\text{mm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ 、 $\phi 80\text{mm}$ 等。

斜管除用于给水净化和化工厂污水、生活污水厂、煤矿水处理、洗煤厂水处理、电厂浓缩池、尾矿水处理、制药厂、造纸厂废水处理的除砂和快速沉淀、隔油分离以及尾矿浓缩等外,尤其对水厂和废水处理工程的挖潜改造效益更佳。

1.3.4 吸附工艺中滤料与填料的应用

1.3.4.1 吸附工艺的原理

当流体与固体颗粒特别是与某些多孔性颗粒接触时,流体中的某种组分或某些组分富集于固体颗粒上,这个过程称为“吸附”。吸附是在非均相系统中的两相界面上发生的传质与富集过程,它可以发生在气-液、气-固、液-固两相之间。在相界面上,某些物质自动发生累积或浓集。

在水处理中,主要利用固体物质表面对水中物质的吸附作用。污水处理中的吸附法就是利用多孔性的固体物质使水中一种或多种物质被吸附在固体表面而去除的方法。吸附法可有效完成对水的多种净化功能,例如脱色、脱嗅,去除重金属离子、各种溶解性有机物、放射性元素等,达到废水净化的目的。这种过程主要用于低浓度工业废水的处理。

具有一定选择性吸附功能的多孔性固体物质称为吸附剂,例如活性炭、吸附树脂、沸石、氧化铝、硅胶、活性白土等,其中以活性炭最为普遍。废水中被吸附的物质被称为吸附质。

吸附剂表面的吸附力可分为三种,即分子间引力(范德华力)、化学键力和静电引力。根据固体表面吸附力的不同,可将吸附分为三种类型。

(1) 物理吸附 物理吸附是靠吸附质与吸附剂之间的分子引力产生的吸附。物理吸附的特征表现为以下几个方面。

① 物理吸附是一种放热反应,当系统的温度升高时,被吸附的物质由于分子的热运动会脱离吸附剂表面而自由转移,该现象称为脱附或解吸。

② 物理吸附是由分子间力引起的,所以吸附力小,因而在较低温度下就能进行,不发生化学反应,不需要活化能。

③ 没有特定的选择性。由于物质间普遍存在分子引力,同一种吸附剂可以吸附多种吸

附质，只是因为吸附质间性质的差异而导致同一种吸附剂对不同种吸附质的吸附能力有所不同。物理吸附可以是单分子层吸附，也可以是多分子层吸附。

④ 影响物理吸附的主要因素是吸附剂的比表面积。

(2) 化学吸附 化学吸附指溶质与吸附剂发生化学反应，形成牢固的吸附化学键和表面络合物，溶质分子不能在表面自由移动。化学吸附的特征如下。

① 吸附热大，相当于化学反应热，约为 $84\sim 420\text{kJ/mol}$ 。

② 有选择性。一种吸附剂只能对一种或几种吸附质发生吸附作用，且只能形成单分子层吸附。

③ 化学吸附比较稳定，当吸附的化学键力较大时，吸附反应为不可逆。

④ 吸附剂表面的化学性能、吸附质的化学性质以及温度条件等对化学吸附有很大影响。

(3) 离子交换吸附 是指一种物质的离子由于静电引力集聚在吸附剂表面的带电点上，同时吸附剂表面原先固定在这些带电点上的其他离子被置换出来，相当于吸附剂表面放出一个等当量离子。

1.3.4.2 活性炭及其应用

活性炭吸附是去除水的臭味、天然和合成溶解有机物、微污染物质等的有效措施。自 19 世纪 30 年代活性炭开始应用于水处理中，至今已成为国内外最常用的吸附剂。

颗粒活性炭外观为暗黑色，具有良好的吸附性能，其化学性质稳定，耐强酸强碱，耐高温，密度比水小，是一种多孔的疏水性吸附剂。活性炭材料具有各种空隙，可以发挥不同的功能；微孔（直径 $< 2\text{nm}$ ），拥有很大的比表面积，呈现出很强的吸附作用；中孔（直径 $2\sim 50\text{nm}$ ），又叫中间孔，可添载催化剂或化学脱臭药剂；大孔（直径 $> 50\text{nm}$ ），通过微生物及菌类在其中繁殖，可以使无机的炭材料发挥生物物质的功能。

由于活性炭具有多孔、细孔结构和巨大的比表面积，因而对苯、酚类、石油产品等溶解性有机物和色、臭、味、合成洗涤剂等常规处理难以去除的杂质有极强的吸附作用，并且可以脱除水中微量的氯，防止加氯消毒后产生三氯甲烷等有害物质。活性炭处理装置占地少，易于自动控制，运行管理简单，对水量、水质、水温变化适应性强，饱和炭可再生使用，具有广阔的应用前景。

活性炭吸附技术一般用于去除水中的溶解性有机物，对相对分子质量在 $500\sim 3000$ 的有机物去除效果最好，大部分比较大的有机物分子、芳香族化合物、卤代烃等都能够牢固吸附在活性炭表面上或孔隙中，并且腐殖质、合成有机物也能被活性炭吸附去除。实践证明，活性炭可降低总有机碳（TOC）、总有机卤化物（TOX）和总三卤甲烷（TTHM）等指标。但活性炭对有机物的去除也受有机物特性的影响，同样大小的有机物，活性炭对溶解度小、亲水性差、极性弱的有机物具有较强的吸附能力。

在给水处理中活性炭能够除臭、除味、除色度、去除有机氯、去除 ABS（烷基苯磺酸钠、合成洗涤剂）等，是除臭除味的最有效方法之一。对于水中的铁、锰及植物分解产物或有机污染而产生的颜色也能十分有效地去除。

在城市污水处理中，活性炭的应用有两种方式：其一是城市污水的三级处理，即常规的化学混凝（一级处理）、生化处理（二级处理）、活性炭吸附（三级处理），亦称污水的高级处理；其二是用于城市污水的物理化学处理，即化学混凝沉淀处理后，再用活性炭吸附，也有在混凝沉淀、过滤、消毒后，再用活性炭吸附，但不采用生化处理步骤，因此称为物化处理。