

过滤器技术及应用

——自清洗网式

GUOLUQI JISHU
JI YINGYONG
ZIQINGXI WANGSHI

宗全利 刘焕芳 郑铁刚 等编著



化学工业出版社

过滤器技术及应用

——自清洗网式

GUOLÜQI JISHU
JI YINGYONG
ZIQINGXI WANGSHI

宗全利 刘焕芳 郑铁刚 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

过滤器技术及应用: 自清洗网式/宗全利, 刘焕芳,
郑铁刚等编著. —北京: 化学工业出版社, 2015. 4

ISBN 978-7-122-23243-4

I. ①过… II. ①宗…②刘…③郑… III. ①过滤机-
灌溉机械 IV. ①S277.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 045347 号

责任编辑: 贾娜
责任校对: 宋玮

文字编辑: 吴开亮
装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 12¼ 字数 241 千字 2015 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

水是生命之源、生产之要、生态之基，我国是一个水资源严重短缺的国家，水资源供需矛盾突出仍然是可持续发展面临的主要问题。农业是用水大户，近年来农业用水量约占经济社会用水总量的 62%，部分地区高达 90% 以上，农业用水效率不高，节水潜力很大。大力发展农业节水技术，在农业用水量基本稳定的同时扩大灌溉面积、提高灌溉保证率，是促进水资源可持续利用、保障国家粮食安全、加快转变经济发展方式的重要举措。国务院已把节水灌溉作为经济社会可持续发展的一项重大战略任务，要求有关部门全面做好农业节水工作。

对于面积占全国 35% 而水资源只占全国 7% 的西北地区来说，发展节水灌溉技术有着极其重要的意义，但这些地区的地表水源大都以高浊度含沙水为主，如新疆灌区，甘肃、宁夏引黄灌区等，如要满足节水灌溉系统用水要求，就必须对这些含沙水源进行沉淀和过滤处理。过滤器作为对微灌水源进行净化处理的最后一道屏障，是整个微灌水源净化处理程序的重中之重。

过滤器作为一种特殊的水净化设备，有其独特的水力性能。如随着过滤过程的进行，过滤元件逐渐被过滤下的泥沙堵塞，过滤面积减少造成局部水头损失增加，从而使上下游管路的压差随之增加。当压差达到某一允许值时，过滤过程需停止，并对过滤元件进行反冲洗，以去除过滤元件上的悬浮颗粒，使其恢复到原有的清洁状态。由于过滤器内部高浊度含沙水流运动复杂，受浮力、惯性力等因素的影响，泥沙颗粒使过滤元件不同部位、不同程度引起堵塞，给反冲洗带来了极大的困难。因此，对过滤器水力性能进行系统研究，在理论和工程应用上都具有十分重要的意义。

自清洗网式过滤器具有自动化程度高、清洗过程不间断供水、排污时间短、能耗低等优点，近几年在国内尤其在新疆等大田滴灌中发展迅速、应用广泛。但应用之初由于国内缺乏自清洗网式过滤器的相关专利产品，多从以色列、美国等进口，不但价格昂贵且应用效果较差，主要表现为频繁反冲洗等现象，这与国内地表水源含沙量大（沉沙池）且前期预处理效果不好等原因有关，这都对过滤器应用于快速发展的国内微灌技术提出了更高的要求。如何满足国内当前微灌技术的发展要求，研究一种适应性强、自动化程度高的自清洗网式过滤器一直是国内学者努力的方向。但自动清洗过滤器很多关键技术和设备还需要深入研究，特别是在清洗动力和清洗方式上急需新的研究成果，自动清洗过滤器研究所要解决的不仅是如何自动完成污物杂质的清洗，更重要的是采用何种清洗方式才能提高清洗效果。因此研制一种可靠性高，既能经济运行，又能自动清洗的过滤器是迫切需要的。为此“国家当前鼓励发展的节水设备（产品）目录（第二批）”中早就将自清洗过滤器作为鼓励

开发的过滤及清洗设备。

从2000年开始我们对节水灌溉配套水沙处理综合技术（微灌用沉沙池和过滤器）进行研究，先后获得了“教育部优秀青年教师资助计划项目”“国家自然科学基金”和“石河子大学”等相关项目的资助。在上述科研课题支持下，结合对过滤器的研究成果，我们对自清洗网式过滤器的理论和应用有了比较全面的认识，取得了一系列研究成果。2012年完成了国家自然科学基金项目——微灌用水力旋喷自动吸附过滤器运行机理及结构优化研究，取得了一系列研究成果，获批4项专利。2013年经新疆生产建设兵团科技局鉴定为“国内领先水平”，所获成果已经全面用于过滤器实际工程应用的指导。

本书是在笔者及所指导研究生十多年研究成果的基础上，对一种在新疆大田滴灌技术中广泛应用的自清洗网式过滤器进行系统研究的成果，并增加了过滤器水头损失的量纲分析等最新成果。内容分为四大部分，第一部分为自清洗网式过滤器过滤机理研究，首先对砂石、离心、叠片、筛网等各种过滤器的过滤机理进行分析，在此基础上，结合自清洗网式过滤器的工作原理研究，对自清洗网式过滤器过滤机理进行理论分析；第二部分为过滤器性能研究，包括过滤性能和排污性能，主要结合室内试验，对自清洗过滤器的水头损失、排污压差和排污时间等性能参数进行全面测试，并在此基础上分别给出了三种性能参数的变化规律和理论计算公式；第三部分为过滤器的整体结构设计和优化，首先给出了过滤器各元件的设计方法，然后结合过滤过程和排污过程的数值模拟计算，对过滤器的结构进行了优化，提出了各种结构优化的组合方式；第四部分为过滤器在大田滴灌中的应用及性能比较，结合过滤器在新疆大田滴灌中的应用，对应用中存在的问题进行了分析，并在此基础上，与其他各种类型过滤器应用中的性能进行了比较分析。

本书由石河子大学宗全利、刘焕芳、刘贞姬，中国水利水电科学研究院郑铁刚，长江水利委员会长江科学院王军，新疆农业职业技术学院杨晓军编著。具体分工是，第1章由宗全利、郑铁刚编写；第2章由郑铁刚、刘焕芳、王军编写；第3章由刘焕芳和王军编写；第4章由宗全利、刘贞姬编写；第5章由郑铁刚、宗全利和刘贞姬编写；第6章由宗全利、郑铁刚编写；第7章由刘焕芳、杨晓军编写。

本书部分内容系国家自然科学基金项目（项目编号：50909062）的成果。

本书在编写过程中，刘飞、骆秀萍和于旭永提供了相关试验资料，新疆石河子市金土地节水设备有限公司和石河子市天露节水设备有限公司等提供了相关过滤器产品的技术资料，在此表示衷心的感谢。

由于已有成果和笔者水平限制，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 过滤器主要类型及发展趋势	1
1.1 常用过滤器的工作原理与特点介绍	3
1.2 过滤器研究现状	4
1.2.1 过滤介质	5
1.2.2 常用过滤器类型及现状	5
1.2.3 自清洗过滤器类型及现状	12
1.2.4 自清洗网式过滤器	17
1.3 过滤器发展趋势	21
1.3.1 国内外过滤设备发展趋势	21
1.3.2 国内外过滤技术差距	23
1.4 过滤器主要研究方法	23
1.4.1 过滤理论分析及试验研究方法	23
1.4.2 数值模拟方法	24
1.4.3 存在的问题及展望	25
参考文献	26
第 2 章 过滤及反冲洗机理	30
2.1 沙石过滤器过滤机理	30
2.1.1 过滤与堵塞机理	30
2.1.2 反冲洗机理	31
2.2 叠片式过滤器过滤机理	32
2.2.1 过滤与堵塞机理	32
2.2.2 叠片式过滤器反冲洗机理	33
2.3 水力旋流(离心式)过滤器过滤机理	34
2.3.1 水力旋流过滤器的基本理论	34
2.3.2 水力旋流过滤器内液体的流动分析	37
2.3.3 水力旋流过滤器内固体颗粒的运动速度分析	39
2.4 筛网式过滤器过滤机理	41
2.4.1 过滤与堵塞机理	41
2.4.2 反冲洗机理	42
2.5 过滤机理小结	42
参考文献	44

第3章 旋流网式过滤器技术及性能	46
3.1 传统网式过滤器内部流速分布对堵塞的影响	47
3.2 试验概况	50
3.2.1 试验装置	50
3.2.2 试验数据观测和整理	50
3.3 网式过滤器水力性能	52
3.3.1 局部水头损失的讨论	52
3.3.2 清水条件下过滤元件清洁度与局部水头损失的规律	54
3.3.3 含沙水条件下过滤器局部水头损失变化规律	57
3.4 新型旋流网式过滤器水力性能	60
3.4.1 旋转流在实际工程中的应用	60
3.4.2 旋流网式过滤器的工作原理	61
3.4.3 旋流网式过滤器水力特性分析	63
3.4.4 旋流网式过滤器水力性能对比	65
参考文献	68
第4章 过滤性能	69
4.1 自清洗网式过滤器的结构特点与工作原理	69
4.1.1 过滤器结构	69
4.1.2 工作原理	70
4.2 测试系统	71
4.2.1 试验平台搭建	71
4.2.2 试验方法与步骤	74
4.2.3 清水试验概况	75
4.2.4 浑水试验概况	75
4.3 自清洗网式过滤器过滤能力计算	77
4.3.1 试验过滤器设计流量计算	77
4.3.2 不同过滤器滤网尺寸与设计流量关系计算	78
4.4 水头损失计算	79
4.5 清水条件下自清洗网式过滤器水头损失变化规律	81
4.6 浑水条件下自清洗网式过滤器水头损失变化规律	83
4.6.1 流量一定条件下浑水水头损失变化规律	83
4.6.2 含沙量一定条件下浑水水头损失变化规律	85
4.6.3 浑水水头损失理论计算	85
4.7 基于量纲分析的水头损失计算	90
4.7.1 量纲分析基本理论	91
4.7.2 水头损失的量纲分析	95

4.7.3 水头损失量纲分析结果及讨论	96
参考文献	109
第5章 自清洗网式过滤器排污性能	110
5.1 排污流量	110
5.1.1 排污流量计算公式	110
5.1.2 排污流量系数的确定	112
5.2 排污系统参数计算分析	113
5.2.1 吸沙组件参数计算	113
5.2.2 排污系统参数计算	115
5.3 排污压差	118
5.3.1 过滤基本理论	118
5.3.2 网式过滤器排污压差理论分析	118
5.3.3 排污压差约束条件	120
5.3.4 最佳排污压差	124
5.4 排污时间	124
5.4.1 排污时间理论计算	125
5.4.2 最佳排污时间	126
5.4.3 卧式自清洗网式过滤器排污时间	128
参考文献	133
第6章 过滤器整体结构设计及优化	135
6.1 整体结构设计	135
6.1.1 过滤元件设计	135
6.1.2 筒体设计	136
6.1.3 排污装置设计	136
6.2 整体结构数值模拟	136
6.2.1 数学模型	137
6.2.2 计算区域及网格	140
6.2.3 方程的离散及边界条件的设定	140
6.2.4 模拟结果与试验结果对比分析	141
6.2.5 过滤过程数值模拟结果分析	142
6.2.6 排污过程数值计算结果分析	144
6.3 内部机构的有限元模拟	145
6.3.1 筒体的有限元分析	146
6.3.2 排污系统有限元分析	148
6.3.3 下隔板有限元分析	151
6.3.4 过滤网承载力有限元分析	152

6.4 过滤器结构的组合优化	155
6.4.1 过滤装置的结构优化	155
6.4.2 排污装置的结构优化	156
6.4.3 吸污嘴优化设计	160
6.4.4 新型吸刷一体式过滤器	161
参考文献	163
第7章 过滤器在大田滴灌中的应用及性能比较	165
7.1 过滤器在新疆大田滴灌中的应用情况	165
7.2 自清洗网式过滤器应用情况	166
7.3 其他类型过滤器应用情况	170
7.4 过滤器性能比较	178
7.4.1 沙石过滤器过滤性能分析	178
7.4.2 水力旋流过滤器过滤性能分析	180
7.4.3 筛网式过滤器过滤性能分析	182
7.4.4 叠片式过滤器过滤性能分析	183
7.4.5 自清洗网式过滤器过滤性能分析	184
参考文献	185

第 1 章 过滤器主要类型及发展趋势

我国水资源严重缺乏，水资源短缺问题日益严重，未来 20 年内，全球约 40% 的用水需求不能得到满足。目前，饮用清洁的水的人口全世界大概只有十几亿，而饮用不符合饮用水标准的水的人口有二十多亿^[1]。我国的国土面积中干旱和半干旱地区占绝大多数，我国已成为世界上最缺水的国家之一，人均水资源占有量还不到世界人均水资源占有量的 1/4，仅为 1980.70m³。预计到 2030 年，中国人均水资源占有量将降至 1760m³。因此，我国未来水资源的形势是严峻的^[2]。受季风气候和地形条件影响，水资源时空分布极不均衡，南方水多耕地少，北方水少耕地多，干旱缺水已成为我国北方地区面临的主要问题。另外，我国农业是用水大户，其用水量约占全国用水总量的 62%，在西北地区则占到 90%。在全国年均总用水量当中，农业用水所占比例较高，为 3917 亿立方米，但是农业用水的效率却不高，仅为 0.5 左右，这就意味着有很大一部分农业用水被浪费了。因此，为实现水资源的可持续利用，促进经济社会的可持续发展，大力发展节水灌溉技术，实现高效节水现代农业将成为我国农业灌溉用水的基本战略和发展方向^[3]。

新疆是我国干旱绿洲灌溉农业区，地广人稀，人均土地资源占有量为全国第一，耕地面积所占比重较大，并且还有很大一部分宜农荒地，再加上该地区处于北温带干旱性气候区，光热资源相当丰富，这就有利于提高农产品品质^[4]。然而，新疆气候干旱，年均降雨量少，但年均蒸发量却远远大于降雨量^[5]，此外，新疆降水量分布不论是在时间上还是空间上都分布极不均匀，夏季由于积雪融化和山区降水，导致河川径流量分配也很不均匀^[6]。新疆土地资源的开发和利用以及农业经济的可持续发展直接受到水资源严重紧缺的状况的制约。大力推广节水灌溉技术是解决这些突出矛盾的一个重大举措，特别是对新疆乃至西北干旱地区，其意义更为重大。微灌是一种新型的高效灌溉技术，同时新疆具有发展微灌的极其优越的自然、气候、作物条件，为此国内微灌界专家们预言，中国微灌未来的希望在新疆^[7]。新疆生产建设兵团也将发展节水灌溉作为兵团实施西部大开发战略的重点，力争用 5 年左右的时间建成全国最大的节水示范样板区。

节水灌溉技术当中，微灌技术越来越受到世界各国的关注和重视，在这方面的研究也越来越多。尤其是近几年，微灌技术发展得非常迅速，在全世界范围内应用越来越广泛，特别是作为农业大国的中国，由于微灌具有节省水资源、节省劳动力、占地面积少的优点，并且能够实现增产增收，灌溉均匀性好，能够提高农产品品质，还可与田间其他设备组成系统进行自动化管理，适应了我国水资源短缺的要

求，所以，近年来微灌技术在我国迅猛发展，推广应用面积也在逐年增加，全国农田滴灌使用面积约为 66.7 万公顷 ($1\text{hm}^2 = 10^4\text{m}^2$)，而新疆的微灌推广应用面积占全国首位，为 36.7 万公顷 ($1\text{hm}^2 = 10^4\text{m}^2$)^[8~9]。节水灌溉技术的发展，不仅影响着灌水的质量和农产品的产量，同时也有效地降低了农业用水量，不仅实现了水资源的有效利用，而且也实现了农产品的增产增收，使中国农业迈向了现代化的道路。

微灌包括滴灌、微喷灌、涌泉灌和地下渗灌。由于它是根据作物的需水要求，通过管道系统与安装在末级管道上的灌水器，将作物生长中所需要的水分和养分以较小的流量均匀、准确地直接送到植物根部附近的土壤表面或土层中的，达到了水肥高效利用和增产的目的，因而微灌是一种新型的高效用水灌溉技术。但是由于微灌系统中灌水器的水流孔径一般都很小，要求灌溉水中不含有造成灌水器堵塞的污物和杂质，因而它对水质要求比较高。实际上任何水源如井水、河渠水、雨水、库塘水都不同程度地含有各种污物和杂质。特别对于新疆地区来说，由于灌区渠系配套完善，因而灌溉水源 80% 以上为地面水源，而这些地面水源含有大量的泥沙，仅悬移质固体颗粒就容易造成灌水器严重堵塞。因此，对灌溉水源进行泥沙处理以及其他净化处理是必不可少的，也是保证微灌系统正常运行、延长灌水器使用寿命和保证灌水质量的关键措施。

微灌系统中对杂质的处理设备与设施主要有：拦污栅（筛、网）、沉沙池、过滤器（水沙分离器、沙石介质过滤器、网式过滤器等）。选择净化设备和设施时，要考虑灌溉水源的水质、水中污物种类、杂质含量，同时还要考虑系统所选用灌水器种类规格、抗堵塞性能等。目前用含沙水进行大田微灌产生的堵塞问题还未取得突破，含沙水净化技术一直是人们普遍关心的问题。而过滤器作为微灌系统中的关键设备，其过滤效果的好坏、清洗是否频繁及水头损失的大小直接关系到微灌系统能否正常运行及水资源的有效利用率和运行费用的高低，所以微灌技术的发展也需要先进的过滤器。而我国过滤设备与国外相比较，起步较晚，差距还很大，缺乏对过滤设备的研究和投入，特别是缺乏对其水力性能的试验研究。在实际操作中许多运行参数都是依靠经验估计值而定的，缺乏合理可靠的理论依据，所以工作可靠性差，造成过滤器和微灌系统提前报废。同样由于缺乏试验和理论基础，在制作方面不能按技术要求进行设计制造，仅按原型放大来设计过滤器，没有科学统一的标准，所以国产过滤器制造粗糙，内密封性能不过关，防腐防锈性能差。

目前，滴灌系统中滤网过滤器应用最普遍^[10]。但滤网过滤器易被大量沉淀或污物堵塞，需要清洗。当水流水头损失达到一定值时需要定期对过滤器进行冲洗，两次清洗之间的时间间隔是过滤器的运行时间。清洗过滤器的方法之一是采用人工清洗。当过滤罐滤网上积附一定厚度的污物时，首先关泵停水，然后打开顶部盖板，取出滤网进行人工清洗或更换滤网，目前也采用反冲洗清洗滤网上的污物，不过进行反冲洗的压力水必须预先处理干净，否则滤网内壁存在反冲压力水的污物，开机

后污物会被带入滴灌系统的各级管路，反而堵塞过水通道，破坏滴头正常工作。

微灌用过滤器是一种能够清除水流中各种杂质，保证滴灌系统正常工作的关键设备。过滤器质量不达标，或者设计不规范，都会提高整个滴灌系统的运行成本，影响灌水质量，甚至造成整个微灌系统瘫痪报废。针对新疆河（渠）水等地表水的高含沙特点，以解决滴灌高含沙水质过滤问题为研究目标，充分研究滴灌系统中的各种过滤设备的性能，从而提高过滤效率，进一步解决滴灌系统堵塞问题，充分发挥滴灌技术的节水增产效应，这对新疆的农业发展以及生产建设具有很大的推动作用。因此，研究过滤器的各项性能，优化过滤系统，处理高含沙水用于滴灌，是符合新疆农业用水实际情况的，也是加速发展和推广滴灌技术的趋势所在。

本书结合笔者国家自然科学基金项目“微灌用水力旋喷自动吸附过滤器运行机理及结构优化研究”，与企业开展合作，首先对微灌用网式过滤器过滤性能和排污性能进行试验研究，其次研究过滤器的整体结构设计和优化，提出各种结构优化的组合方式，最后结合过滤器在新疆大田滴灌中的应用情况，对应用中存在的问题进行了分析，掌握自清洗网式过滤器的原理、性能参数和在大田滴灌中的应用情况，旨在为今后自清洗网式过滤器的计算和设计提供一定的技术参考。

1.1 常用过滤器的工作原理与特点介绍

在微灌系统中一般用来处理水源中各种污物和杂质的设备与装置有拦污栅、沉沙池、过滤器。而常用的过滤器有水力旋流过滤器、沙石过滤器、网式过滤器和叠片式过滤器。

水力旋流过滤器是利用水流环流的离心力来加速重相颗粒沉降和强化分离的设备。其内部流体的流动是一种特殊的三维强旋转剪切湍流运动。这种涡旋运动由两种基本的旋转液流构成，即沿螺旋线向下运动的外旋流和沿螺旋线向上运动的内旋流，它们的旋转方向相同，但轴向运动方向相反。外旋流携带泥沙颗粒或比水重的污物杂质向下进入储沙罐，内旋流则把清水提出溢流口，从而达到过滤分离的效果。正常运行条件下的水头损失应在3.5~5m的范围内，若水头损失小于3m，则说明没有形成足够的离心力，将不能有效分离出水中的杂质。而且只要流量恒定，其水头损失也保持恒定。水力旋流过滤器的优点是保养维护很方便，工作时可以连续自动排沙。缺点是当水泵启动和停机片刻，过滤效果下降，因而杂质会进入下游系统。因此，水力旋流过滤器只可作初级过滤，需配合其他过滤器使用来减轻次级过滤器的负担。

沙石过滤器是用沙砾石作为过滤介质来拦截水中各种污物的，因此过滤介质必须有适当的透水性，自身又不发生渗透变形，较小的颗粒可以在较大颗粒之间的孔隙中移动，但不能下渗至下游水体中。因而它的优点是三维过滤，处理水中有机杂质和无机杂质最为有效，具有较强的拦截污物能力，经常用作水源的初级过滤。

而且只要水中有机物含量超过 10mg/L 时, 均应选用沙石过滤器。其缺点是需要定期进行反冲洗, 在反冲洗时如操作不当, 会使整个沙床移动而使过滤器失效, 反冲洗时需要有压水源; 在长期使用后, 沙石介质由于磨损, 颗粒表面变得圆滑, 这时拦污能力下降, 需要重新配置沙石介质。

网式过滤器是依靠筛网过滤对灌溉水进行物理净化的装置。过滤元件为尼龙筛网或不锈钢筛网。当水流穿过筛网时, 大于筛网目数的杂质将被截留下来, 因而过滤效果的好坏主要取决于所使用的滤网的目数。其优点是结构简单, 体积小, 价格低廉。但是当有机物含量稍高时, 大量的有机污物会挤过滤网而进入下游管道, 造成灌水器的堵塞。而用作灌溉水源的地表水源中总是会含有各类有机物或线类污物, 因而筛网过滤器一般用于过滤灌溉水中的粉粒、沙和水垢等污物, 用作末级过滤装置。另外, 随着筛网逐渐被泥沙堵塞而造成压差增大, 会引起筛网破裂, 此外筛网的清洗也很麻烦。

叠片式过滤器利用数量众多的带有凹槽的塑料环形盘锁紧叠在一起形成圆柱形滤芯, 当水流经过这些盘时利用盘壁和凹槽来聚集及截取杂物, 盘槽的复合内截面提供了类似于在沙石过滤器中产生的三维过滤, 因而它的过滤效率很高。与网式过滤器一样, 它的过滤能力也以目数表示, 而且通常将不同目数的叠片做成不同的颜色以便区分。在正常工作时叠片是紧锁的, 当冲洗时可将滤芯拆下并松开压紧螺母, 用水冲洗。也可自动冲洗, 自动冲洗时叠片必须能自行松散。因此冲洗很方便, 冲洗的次数和耗水量也比较少^[60]。

考虑到水源情况、污物的种类、净化标准以及灌水方式和灌水器的类型的不同, 上述过滤器可以单独使用, 也可以根据不同需要进行组合使用。

1.2 过滤器研究现状

近百年的科学技术发展历程, 使过滤技术在原来简单的手工操作基础上, 实现了大型化、机械化和自动化生产。过滤技术的发展已影响到工农业和人们的日常生活。近些年来, 由于世界范围内资源趋于衰竭, 环境日益恶化, 因此人类的生存正面对新的挑战。有效地利用现有资源, 节省能源, 保护生态平衡, 实现可持续发展, 已在世界各国达成共识。人们在迎接新的挑战过程中, 过滤技术的应用领域在迅速扩大^[11]。

过滤就是将固液混合物分离的传统操作之一, 它是利用压强差的作用, 使固液混合物流过过滤介质, 固体颗粒被截留, 液体则穿过过滤介质孔隙, 从而达到过滤分离的目的^[12]。

过滤的基本原则主要是确保过滤介质的合理设计、过滤介质的最佳选择和为每一种过滤应用设计过滤器。可以考虑两种主要的过滤方式, 如深层过滤和表层过滤。深层过滤时粒子是在介质中被捕获的, 而表层过滤时粒子被截留在表面上, 最

后形成滤饼。

1.2.1 过滤介质

允许非均相物系中的液体或气体通过，而固体被截留的可渗透性的材料通称为过滤介质。它是过滤设备的关键部分，无论何种过滤设备，都必须选配与其相适应的过滤介质，否则结构先进的过滤设备也无法发挥其应有的作用^[13]。

过滤介质作为过滤器的心脏应具备表 1-1 所示性能^[14]。

表 1-1 过滤介质应具备的性能

力学性能	使用性能	过滤性能
刚度	化学稳定性	截留的最小颗粒
强度	热稳定性	截留效率
蠕变或拉伸抗力	生物学稳定性	清洁介质的流动阻力
移动的稳定性的	动态稳定性	纳污容量
抗磨性	吸附性	阻塞倾向
振动稳定性	可湿性	
可制造工艺性	卫生和安全性	
密封性		
可供应尺寸		

1.2.2 常用过滤器类型及现状

国内过滤器发展较迅速，主要厂家有北京通捷、北京绿源、山东莱芜、北京燕山、新疆石河子天露、新疆石河子金土地等。过滤器结构类型由先前单一的较复杂的旋流式水沙分离器、沙石过滤器、网式过滤器和叠片式过滤器等已发展为操作简单、运行高效的自动化过滤器。

国外微灌技术的发展最有代表性的国家首推以色列。以色列有许多专业生产过滤器的厂家，如 Lego 公司，根据用户需要可提供由几个到几十个过滤器组成的过滤站，专门用于处理微灌水源，且自动化程度高，采用了电磁阀控制开关和反冲洗技术^[15]。此外还有以色列的耐特菲姆、普拉斯托、纳安，西班牙的阿速德，美国的雨鸟，其产品主要为先进的叠片过滤器、塑料过滤器。

过滤器作为微灌系统中的关键性设备之一，也是保证微灌系统正常运行、延长工程使用寿命、提高灌水质量的重要设备，它常置于沉沙池后分离固体颗粒和水。过滤器可以单独使用，也可以组装成过滤站。应用较多的过滤器有沙石过滤器、水力旋流过滤器、叠片式过滤器、滤网过滤器、组合式过滤器等，此外还有一些其他类型的过滤器^[16]。

(1) 沙石过滤器 沙石过滤器是介质过滤器之一，其沙床是三维过滤，具有较强的截获污物的能力，是农业微灌等系统中用来清除水中污物的理想设备^[17]。它适用于水源为地表水（如水库、塘坝、渠道和河流等）的初级过滤。沙石过滤器采用一层或数层不同粒径的沙石作为过滤介质，对水中各种粒径的固体悬浮颗粒具有

较好的过滤能力，但在冲洗时易破坏沙罐内沙层结构，当水源中固体颗粒含量较高时，应尽量采用沙石过滤器。

在所有过滤器中，用沙石过滤器处理水中有机杂质和无机杂质最为有效，这种过滤器滤出和存留杂质的能力很强，并可不间断供水。只要水中有机物含量超过 10mg/L，无论无机物含量有多少，均应选用沙石过滤器^[18]。

沙石过滤器的缺点是使用不方便，操作复杂，价格较贵，并需要有良好的管理。单罐反冲洗沙石过滤器在反冲洗时需停止向系统供水，而且在反冲洗时如果操作不当，会使整个沙床移动而使过滤器失效。20 世纪 70 年代开始研制微灌专用沙石过滤器——双罐反冲洗沙石过滤器，并很快形成一种工业制产品，这种过滤器并联了两个过滤罐，反冲洗时仍可向系统供水。

在微灌系统中最早使用的一种沙石过滤器叫易斯过滤器，即单罐反冲洗沙石过滤器，它对填沙有较高的要求。我国辽宁省大连市甘井子区曾根据一定的尺寸，用大直径塑料管作筒壳，试制过类似的过滤器，对城市生活污水进行过滤后用于苹果滴灌，获得良好效果^[19]。江西也曾仿制过这样的过滤器，但未按技术要求制造，填沙不符合要求，通过设计流量时，水头损失达 8m 之多^[20]。新疆生产建设兵团设计院设计了一种同时自上和自下两个方向向中间过滤的双向沙砾过滤器，其优点是耗钢材少，滤水能力大^[21]。另外，石河子天露节水设备有限公司研制了卧式反冲洗沙石过滤器，其特点是过滤器为卧式结构，从而增加了有效过滤面积；罐体中间用隔板隔开，可实现不停机左右罐分别进行反冲洗，特别适用于河渠水过滤。

我国武汉大学的董文楚自 20 世纪 90 年代起对沙石过滤器作了较多研究^[18,22,23]。从过滤机理开始，分析了过滤与堵塞规律，介绍了过滤层拦截污物的规律以及水头损失变化和影响水头损失的因素。继而提出了新的过滤阻力系数与雷诺数的关系式：

$$Re = \frac{\psi \rho v d_e}{6\mu(1-\epsilon)}, Re < 0.5, C_D = 24/Re$$

$$Re = 1 \sim 10^4, C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34, Re > 10^4, C_D \approx 0.4$$

给出了计算初始水头的计算公式以及最佳反冲洗强度和膨胀率，以及碎石英沙作滤层的水力学计算公式：

$$H = \frac{34.74\mu^{0.48}v^{1.52}(1-\epsilon)^{1.48}}{\rho^{0.48}g\psi^{1.48}d_e^{1.48}\epsilon^3}L$$

董文楚^[18]在 1995 年对沙石过滤器沙料的选择进行了研究，指出沙石过滤器的沙滤料的选择主要取决于微灌系统类型及灌水器对水质的要求。如果沙太粗，过滤不充分会引起灌水器的堵塞；沙过细又会引起过滤器冲洗次数过多，给管理带来不便。并于 1996 年对沙石过滤器的过滤与反冲洗的性能进行了研究，并提出了新的过滤阻力系数与雷诺数的关系式，给出了计算初始水头的计算公式以及最佳反冲洗

强度和膨胀率。他认为沙石过滤器能够去除水中污物，主要靠机械筛滤、沉淀和接触絮凝三种作用，从而清除灌溉水中的沙粒、黏粒、藻类、微生物、细菌团和各种化学絮凝物等悬浮固体污物。而且沙滤层的截污量随滤层深度而变，表层截污量大，底层截污量小。一方面，随着过滤时间持续，污物由表面逐渐向深层移动；另一方面，沙滤层截污能力随过滤时间的持续而下降。运行连续一定时间后，应停止过滤进行反冲洗，清除滤层所截留的污物，才能恢复过滤工作。滤层的过滤水头损失随着过滤时间的持续而增大，并且上层水头损失大，下层水头损失小。翟国亮等对双罐全自动反冲洗沙石过滤器的工作模式和控制原理等进行了研究，测定了过滤器在过滤、反冲洗状态下的压力流量关系，反冲洗时间和冲洗周期等主要参数，首次提出了反冲洗时压降比率的概念和计算方法，为双罐全自动过滤器的研制和应用提供了技术资料 and 范例。邓忠等^[26]将采用石英沙滤料作为过滤介质的微灌用过滤器作为研究对象，进行了过滤与反冲洗试验，采用4个过滤与冲洗速度，分析了在相同进水含沙量条件下，出口含沙量和粒径级配与过滤时间之间的关系。杨树新对立式和卧式两种形式的沙石过滤器的工作原理进行了对比分析，得出卧式优于立式，且经济性较好。

美国 G. M. 菲尔, J. C. 格业^[27]也对沙石过滤器的过滤与堵塞进行过研究，指出沙粒即是接触吸附介质，水在孔隙中流动时，污物与滤料颗粒的接触机会更多，在滤料表层双电层动力、范德华引力和化学键的共同作用下，水中的部分污物被滤料表面层吸附住。以色列的 Ravina I 等^[28,29]和意大利的 Capra A 等^[30]认为在污水滴灌条件下，沙石过滤器的过滤和防堵塞效果最好，叠片式过滤器和网式过滤器次之。

(2) 水力旋流（离心式）过滤器 水力旋流过滤器也称离心式过滤器或旋流式水沙分离器或涡流式过滤器。它主要利用水力学中的离心原理，靠旋转的离心力来分离密度比水大的杂质。水流沿切线方向进入分离器，质量大的杂质被离心力推向过滤器的侧壁，滑至集沙腔中，然后定期排除。净水沿罐体中心向上排出，其有效分离率高达97%以上。水力旋流过滤器用于以井水、地表水为水源的灌溉系统中，适用于各种灌溉模式，一般作为初级过滤，安装在主过滤器之前，用于排除大体积并且密度比水大的杂质，以减少主过滤器的工作负担。当水中含沙量大于 3×10^{-6} 时，应选择离心过滤器为主过滤器。水力旋流过滤器常见的结构形式有圆柱形和圆锥形两种。

由于水力旋流过滤器当中的高速水流产生的离心力对分离水中质量比较大的杂质颗粒效果较好，当水中含有有机物或比水轻的杂质的时候，其过滤效果就很差，因此一般只在微灌系统水质的初级过滤阶段使用。水力旋流过滤器的优点是保养维护很方便，工作时可以连续自动排沙。缺点是它不能除去与水相对密度相近和比水轻的有机质等杂物，特别是水泵启动和停机时，过滤效果下降，会有较多的沙进入系统，且水头损失也较大^[31]。因此，水力旋流过滤器只可作初级过滤，需配合其

他过滤器使用来减轻次级过滤器的负担。

水力旋流器最早在荷兰出现^[32]。19世纪40年代始被用作固-液两相介质的分离装置，从水中分离固体介质，但仅限于在采矿工业中使用，后来被其他行业所应用。最近二三十年以来，在其用途不断扩大的同时，其理论研究、实验与设计、加工制造以及应用技术研究等方面都有了长足的发展^[33]。

在水力旋流过滤器技术的发展中，出现了具有许多器壁结构尺寸比例的旋流器，如长锥形、短锥形、长柱形、短柱形^[34]，我国水利部燕山滴灌技术开发中心新泰研究所和新泰市水利水产局成功研制了“旋流式管道防淤装置”^[35]。防淤装置采用圆锥结构，底部是锥状，中间低，周侧高，起集中排淤作用。装置进水口设置在中部并切向进水，进入装置后水体旋转，在轴心附近范围就出一个低速区，在此区域内，推移质污泥在旋转水流和重力的作用下沉落并积聚在锥状池底中心附近处，沿水体轴心设置一排淤管，在水泵扬程压力的作用下，将淤积物排出池外，达到沉淤、排淤的目的。该装置于1990年通过了技术鉴定。徐继润等^[36]认为水力旋流器内固体颗粒的离心沉降是一种复杂的两相流行为，并从分析固液体系的相互作用，分别讨论了颗粒的自由沉降、干涉沉降问题，提出了高浓度下水力旋流器内颗粒之间的几种碰撞模式，阐述了旋流器内颗粒沉降的特殊性及其与旋流器工作和旋流器结构间的可能联系，指出离心沉降本身有待深入研究的若干问题。而苏守坤^[37]研究和分析了水力旋流器的结构、各部件尺寸与净化泥沙性能的关系，提出了一些设计参数： $d_i/D=0.276$ ， $d_n/D=0.04$ ， $d_o/d_i=1\sim 1.25$ ；指明了水经过旋流器的压力降确定的经验公式： $H = \frac{V}{2ng} \left[\left(\frac{r_n}{r_0} \right)^{2n} - 1 \right]$ ，使之既要满足泥沙沉降

的要求，又要保证系统所需压力值。辛舟（2005）^[38]根据黄河水泥沙的基本特征，应用旋流分离技术对黄河水泥沙分离进行了研究，试验分析了黄河水泥沙含量、进口压力、底流口直径等要素对分离效果的影响。实验研究表明黄河水泥沙含量增加，溢流口浓度升高，澄清率降低，分离效果降低；进口压力增大，溢流口浓度降低，底流口浓度增加，澄清率提高，分离效果提高；底流口直径减小，溢流口浓度稍有增加，底流口浓度急剧增加，澄清率略有降低，但有效分离量急剧下降，分离效果降低。吴柏志等^[39]从微观角度对离心式过滤器在运行情况下内部泥沙颗粒的受力情况以及运动情况进行了分析，指出离心力、液体的浮力以及水流颗粒之间的黏滞阻力都会影响泥沙颗粒的运动状态。刘永平^[40]利用水力旋流器对黄河水进行了泥沙分离的模拟试验，根据试验数据分析了离心式过滤器的各个运行参数及结构参数对过滤器分离效率的影响。褚良银等^[41,42]着重从流体流动出发，对旋流分离器内的分离过程行为和能量损耗行为进行了重点研究，并阐述了改善旋流分离器分离过程和降低其能量损耗的原理和方法，为理论指导和结构设计提供指导。沙亿超等^[43]对微灌过滤设备旋流水沙分离器进行了研究，结果表明它可应用于高含沙水流的微灌系统中，提高微灌的质量，有利于农业的稳产和增产。孙新忠^[44]对离心