

北京工业大学

---

硕士学位论文

---

水中颗粒物的检测技术研究

---

姓名：张磊

---

申请学位级别：硕士

---

专业：市政工程

---

指导教师：杨艳玲

---

20090501

## 摘 要

本文介绍和叙述了在饮用水领域中常用的几种主要的颗粒检测技术及其在水处理中的应用。论述了水中颗粒物的替代指标——浊度检测技术存在的适用于较大悬浮颗粒、低浊度水的检测灵敏度不高等方面的缺陷,不能满足高精度水质监测和工艺控制要求。介绍了基于高灵敏度的颗粒检测技术的颗粒计数仪和脉动颗粒检测仪,可以弥补浊度仪的不足。通过实验室试验研究,对这几种技术进行全面地分析和对比,以便可以有针对性地选择和应用。

实验中分别采用硅藻土、高岭土和两者混合溶液中的颗粒对浊度仪、脉动颗粒检测仪和颗粒计数仪的相关性进行了对比。对相同粒径分布的实验结果表明,浊度和颗粒浓度之间有良好的相关性,浊度可以作为水中颗粒物质的替代参数,随着颗粒浓度的增加,水中各个粒径颗粒数都相应地成比例增多;颗粒浓度、颗粒指数和浊度之间有很好的相关性。采用不同粒径分布的水样测试结果表明,颗粒浓度、颗粒指数和浊度之间不存在相关性,浊度很大的水样中颗粒浓度和颗粒指数反而相对较小,颗粒浓度和颗粒指数很大的水样中浊度相对较低。

在对微絮凝—直接过滤工艺的滤后水水质连续监测结果表明,这几种仪器都能比较有效地监测滤后水中颗粒物质的变化情况,但是由于检测原理、检测范围和灵敏度的差异,反映出的滤后水颗粒物含量变化曲线有一定差异。颗粒计数仪和脉动颗粒检测仪比浊度仪更早、更灵敏地反应出水中颗粒物的变化情况。过滤参数变化对过滤影响的监测结果表明,浊度仪无法灵敏反映出水中颗粒物细微的变化,而颗粒计数仪和脉动颗粒检测仪能够及时检测出水中颗粒物的微小波动,可以及时了解和掌握水处理工艺的处理效率和水质的变化情况,为工艺参数优化和水质改善提供很好的依据和帮助。

**关键词:** 浊度, 颗粒物, 颗粒检测; 颗粒计数; 脉动颗粒检测

## ABSTRACT

Several particle monitoring techniques used commonly in drinking water and main application conditions of the particle monitoring techniques in water treatment process are introduced in this paper. It discusses the replaceable parameter of particles in water—turbidity which have problem in detecting bigger particles in water and detecting low turbidity water, turbidity also can't meet the requirement of high accuracy monitoring water and process control. This paper introduces technique of transmitted light fluctuation what eked out turbidity. We discuss and draw a comparison of these technique through research, so as to choose and apply.

Online turbidimeter, transmitted light fluctuation instrument and particle counting instrument are used to monitor the particles in Diatomite solution, Kaolin solution and mixed solution in experiments, we discuss the correlation of them. In the experimentation of homology particle distribution, there are good correlations between turbidimeter and particle counting instrument, turbidity can double for particle in water. Each distribution particle increases are proportionate to the increases in the particle concentration. In the experimentation of different particle distribution, there are no correlations among turbidimeter, particle counting instrument and transmitted light fluctuation instrument. The water which turbidity is higher, particle count and particle index are low. The water which particle and particle index are lower, turbidity is high.

Monitoring results of filtered water by micro-flocculation and direct-filtration process indicate that these instrument can effectual detect change of particle in water, but different detect elements, different effective particle size monitoring ranges and different sensitivity result in different curve of filtration. Transmitted light fluctuation instrument and particle counting instrument can more early and sensitive show particle changed than turbidimeter. Monitoring filtration process results of different filtrable parameter indicate that turbidimeter can't effective show small changed of particle in water. But transmitted light fluctuation instrument and particle counting instrument can do it, they can help us to know and control treatment efficiency and water quality changed in water treatment process, and they also can help us to optimize technical parameter and improve water quality.

**Keywords** turbidity; particulate matter ;particle monitoring; particle counting; transmitted light fluctuation instrument

## 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名： 张磊 日期： 2009.05

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名： 张磊 导师签名： 杨艳玲 日期： 2009.05

# 第一章绪论

## 1.1 我国水质标准发展

由于饮用水水质与人类的健康生活直接相关,世界各国对饮用水水质标准都极为关注。随着水源污染日益严重,水质检测技术的不断发展,以及与饮用水水质相关的新问题,如致病原性动物、消毒副产物等<sup>[1,2]</sup>,使饮用水水质标准日趋严格,在世界范围内水质标准的修订也更加频繁。

新中国成立以来,我国政府对饮用水卫生安全十分重视,组织有关部门研究制定有关生活饮用水水质卫生标准,并逐步发展与完善。第一部全国性管理生活饮用水的技术规范是我国12个城市试行的《自来水水质暂行标准》,于1955年5月由卫生部发布,此后曾多次发布修改饮用水卫生标准。如《生活饮用水卫生标准》(GB5749-85)于1985年由卫生部颁布实施,此标准在颁布实施后的20年中未进行过修订,使我国的饮用水水质标准不论从项目的数量上,还是项目的指标上都与国际标准存在较大差距。为了适应发展的需要,尽快与国际接轨,2005年国家多部委联合启动了修订工作,2006年12月29日卫生部与国家标准化委员会联合发布了新的《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006),并于2007年7月1日起实施。新的标准不仅增加了水质指标的检测项目,同时对生活饮用水水质提出了更高的标准。

浊度是一项非常重要的感官指标,反映水中颗粒物含量,是颗粒物含量的替代参数,同时还可反映出水中病原微生物的情况,也可作为生物学指标。新的水质标准中,浊度由最初的3.0NTU提高到1.0NTU,也是对浊度指标的成分重视的表现。

颗粒物是水体中的主要污染物之一。悬浮物质主要是泥砂、粘土、有机和矿物质颗粒,大部分来源于土壤和城镇街道径流,表层土壤以泥沙形式进入水体,造成了水体中含沙量增加,从而增加了水的浊度,直接影响到水体的外观质量和生物稳定性;因此水中颗粒物是水处理的主要去除对象。水中颗粒物会降低自来水的卫生程度,因为它们是各种污染物的载体。经过净水设施后,安全、卫生的出水应不含任何威胁健康的颗粒物,至少将颗粒物的致病风险控制在可接受的水平。大量研究表明,颗粒物去除率越高,自来水越安全、卫生。因此颗粒物的检测已经成为水处理中一个重要的问题。

## 1.2 水中的颗粒物

在自然界的天然水体和水处理流程的工艺水体内,含有形形色色的颗粒物。

作为研究对象, 颗粒物并无统一的严格定义。一般说来, 它是指比溶解的低分子更大的各种多分子或高分子的实体, 不同学科根据其研究目的赋予不同的含义内容。在现代环境水质科学范畴内, 颗粒物的概念相当广泛, 并不仅限于原来以 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜截留以上的悬浮物范围, 它把矿物微粒, 无机和有机的胶体、高分子, 有生命的细菌、藻类等都归类为广义颗粒物, 实际上包括了粒度大于 $1\text{nm}$ 的所有微粒实体, 其上限可达数十至上百微米。这种考虑是从对环境水质的影响作用出发的。颗粒物群体具有十分广阔的微界面, 它们本身既可作为污染物, 而更重要的是与微污染物相互作用成为其载体, 在很大程度上决定着微污染物在环境中的迁移转化和循环归宿。

水中颗粒物质是水处理的主要去除对象。水中的颗粒物质会降低自来水的卫生程度, 因为它们是各种污染物的载体。经过净水设施后, 安全、卫生的出水应不含任何威胁健康的颗粒物, 至少应将颗粒物的致病风险控制可在可接受的水平。大量研究表明, 颗粒物去除率越高, 自来水越安全、卫生<sup>[3]</sup>。

### 1.2.1 水中颗粒物的危害

颗粒物是天然水环境, 特别是河流、湖泊和浅海水体中普遍存在的物质, 它多由有机和矿物颗粒所组成, 是形成水中固体悬浮物的主要物质来源。在环境水质学范畴内, 水体颗粒物的现代广义范围可扩展至粒度大于 $1\text{nm}$ 的所有微粒, 包括胶体、高分子物质和细菌、藻类等有生命的物质在内<sup>[4,5]</sup>。这主要是发现在此粒度范围内的物质对水质产生环境生态效应有着共同的特征和综合的影响。

现行传统水处理工艺具有混凝沉淀、过滤、氯消毒三级屏障, 对水中致病细菌的灭活和控制是有很有效的, 防止了许多水介传染的细菌性疾病的流行。但是, 世界上也曾发生过多起城市饮用水浊度和细菌学指标符合卫生标准的情况下, 由贾滴虫和隐孢子虫引起疾病爆发的事例<sup>[6-8]</sup>。美国对水中“两虫”与颗粒物数量的相关关系进行了深入研究, 经过大量的水样调查, 发现当水中大于 $2\mu\text{m}$ 的颗粒数超过 $100\ \text{个}/\text{mL}$ 时, 水中存在两虫的几率很大<sup>[9]</sup>。为进一步确保水质, 美国很多水厂对滤池出水中都控制大于 $2\mu\text{m}$ 的颗粒物数量在 $50\ \text{个}/\text{mL}$ 以下。有研究表明, 水体中微粒数量与隐孢子虫卵囊存在的可能性有着相似的趋势。结果表明, 这些物理参数可作为适宜的指示物用来预测水样中是否存在隐孢子虫卵囊<sup>[10]</sup>。

在河流、湖泊和浅海水环境中, 细小的固体颗粒物是某些组成食物链生物的食物来源, 从而导致了化学污染物在诸如鱼类这样的生物体内的生物放大作用, 以致最后进入人体之内, 造成对人体的危害。在相对静止的水体中, 颗粒物会沉积到水体底层, 把污染物蓄积起来成为它们的暂时归宿, 当环境条件有所变化或污染物发生化学转化时, 它们还可能重新释放出来, 再次造成环境污染<sup>[5,11]</sup>。因此, 环境质量标准对颗粒物的限定日趋严格。

### 1.2.2 检测水中颗粒物的重要性

近年来,通过测量水中微粒的大小及其分布来评价水质的方法越来越受到重视。众所周知,水中存在着一定数量的颗粒状杂质,如细菌、病毒、孢囊等。其中最具代表性的是体长约为2-8  $\mu\text{m}$ 的兰伯氏鞭毛虫和隐孢子虫的病原性孢囊,它们能够引发贾第虫症<sup>[12-14]</sup>。水厂在水处理的各个单元上都进行浊度检测,在滤池正常运行时,滤后水和净水中的颗粒个数一般在10个/mL之内,并且颗粒大小也大多在10 $\mu\text{m}$ 下<sup>[15]</sup>。这种情况下,浊度仪只能检测出水中颗粒体积的总量,而无法测出颗粒的大小和数量,因而就无法判别出水中颗粒是否是有害物质。因此测量水中微小颗粒的直径大小以及数量就显得格外重要了,现在大多采用颗粒测量的方法,通过定量描述水中微生物的含量来判断水的纯净度是否符合要求,从而保证饮用水用户的身体健康。

### 1.2.3 水中颗粒物检测方法的研究进展

1899年,美国的杰克逊首次提出适合实验室的浑浊度的目视测量法。他用烛光作光源,将水逐渐注入刻度玻璃管中,从玻璃管顶部观察,直至看不见烛光。根据水深查表求得浑浊度,单位以JTU表示<sup>[16]</sup>。他在蒸馏水中加入硅藻土,以后又添加了用漂白土、高岭土和取之于河床的沉积物配制出1000ppm标准的悬浮液体,然后用杰克逊烛光浊度仪进行标定(杰克逊烛光浊度仪用烛光作光源,由一根带有浊度刻度的玻璃管,一个测定支架,一支标准腊烛组成。测定时,支架上部放入玻璃管,支架下部点燃腊烛,在玻璃管中调节倒入的水样量,直到恰好看不到火焰为止,从玻璃管水面处的刻度即读出刻度)。这样,杰克逊烛光浊度仪上标有的刻度即杰克逊浊度(JTU)的读数就和二氧化硅标准悬浮液浊度的实际ppm相当。但是用来配制标准悬浮液的高岭土种高岭土组成的物质成分并不是恒定的,所以会导致标准值的误差。另外,此种标准浊度液配制手续比较麻烦,往往由于操作不慎而带来误差。

1926年,金斯贝雷和克拉克为了克服用高岭土作浑浊物质配制成的二氧化硅标准悬浮液所存在的一些弊病,他们选用了福尔马胂(formain)。这种材料不仅容易配制,而且其溶液散射性比过去用的高岭土或浑浊天然水标准的重现性好得多。由于福尔马胂不存在高岭土那样的弊病,所以可靠性高。无论谁做,何时做,在什么地方做,都能够得到稳定的标准液并可放置一个月而不发生变化。美国环保局《标准检查法》(第十三版)就已将福尔马胂作为标准浑浊物质而采用,并以福尔马胂浊度液作为浊度的标准,单位简称为FTU<sup>[17]</sup>。

在光电浊度仪研制成功以后,浊度的概念才更加的明确下来,出现了NTU和FTU作为浊度的单位(这些浊度单位相互间不存在量的换算关系,只能通过实测比较)。我国生活饮用水标准检验法(GB575-85)中规定用烘干的硅藻土(日本标准用高岭土)配制悬浮液。以1 mg/L硅藻土浓度的悬浊液具有的光学性质称为1

“度”。光电浊度仪根据检测方法不同可以分为以下三种：透射检测方法、散射检测方法和综合检测方法。目前实验室用的浊度仪多为散射式浊度仪。

随着研究的不断深入和先进检测技术的开发,发现浊度仪存在不可避免的缺陷,浊度测定值不仅与水中悬浮微粒的浓度、微粒的大小、形状、颜色和表面特性等因素有关(还包括水本身的折射指数),同时也受到浊度仪的具体设计参数的影响。

于是人们开始寻找新的水中颗粒的检测方法,透光脉动检测技术是一种光电检测方法。利用悬浮液中颗粒组成的随机脉动变化特性,来分析和检测悬浮液中颗粒聚集状态及其变化情况,对透射光线强度的脉动特性进行分析和计算,得到反映颗粒相对粒径的有效输出值和比值R(透光脉动值)。此比值R不受电子元件的漂移和透光管管壁的脏污的影响。透光率脉动检测技术是由gregory等人在1984年提出的一种新型的颗粒检测方法,该项技术在20世纪80年代后期进入我国后,得到了广泛深入的研究,在许多领域中得到了应用。

近些年来又出现了一种新的颗粒检测仪器,颗粒计数器。用于水处理领域的颗粒检测技术主要有两类,光电式和电感应检测方法。其中光学颗粒计数测量根据其工作原理,可分为光散射式和光阻式两大类。颗粒计数器对介质中的颗粒逐个地自动采样和测量。通过所测的粒径大小及数量来判断被测介质的纯净度是否符合要求。

## 1.3 课题的提出和研究内容

### 1.3.1 课题的目的及意义

浊度是由水中所存在的颗粒物如粘土、淤泥,胶体颗粒,浮游生物及其他微生物而形成的,它是水对光的散射和吸收能力的量度,与水中颗粒的数目,大小,折光率及入射光的波长有关<sup>[18]</sup>。

水中的浑浊现象主要是由胶体状态的杂质颗粒产生的,而粒径较大的颗粒物对浑浊现象的影响相对较小。通常,浊度是饮用水中最重要、最直接、影响最大的指标之一。现行常规给水处理工艺流程也是主要以去除原水中的浊度为主要目的进行的设计、施工和运行的,大多数水厂都采用浊度作为指标来监控滤后水质。

在实际中,浊度作为水中颗粒物质和微生物的替代参数,能够以较低的数值概括地表示出颗粒物质以及微生物的总体去除情况。但是,水的浊度主要反映尺寸小于 $1\mu\text{m}$ 的胶体颗粒含量,而尺寸达数 $\mu\text{m}$ 的原生动物对浊度的贡献很小,因此对于含有一定胶体物质的水体,非常低的浊度也许并不意味着处理后的水中不存在原生动物。

滤池作为水厂常规处理水质达标的重要关口,其作用是显而易见的。在给水



处理中,传统用浊度来评价滤池出水水质及滤池过滤性能。但是随着研究的不断深入和先进检测技术的开发,发现浊度仪存在不可避免的缺陷,浊度测定值不仅与水中悬浮微粒的浓度、微粒的大小、形状、颜色和表面特性等因素有关(还包括水本身的折射指数),同时也受到浊度仪的具体设计参数的影响。因此浊度值只是通过某一具体型号的浊度仪所获得的一个综合性的光学性质度。

透光率脉动控制技术是一种光学检测方法,它以透过流动悬浮液的光强度的脉动值反映悬浮液中颗粒的聚集状态和颗粒尺寸的生长情况,其检测值  $R$  是一个比值,不受器壁沾污、光电管漂移等影响。颗粒计数检测技术能够实时的检测水中各个粒径范围的颗粒数量。

浊度作为水中颗粒物质和病原微生物的替代参数,能概括地表示出水中颗粒物以及微生物的含量,但是浊度值主要反映粒径小于 $1\mu\text{m}$ 的胶体颗粒含量,而粒径达数微米的颗粒物对浊度的贡献很小,因此对于含有一定胶体物质的水,低浊度有时并不表明水中病原微生物数量也很低由于贾第虫、隐孢子虫等致病原生动物的粒径通常在一拌,它们在水中浊度的贡献不大,历史上曾发生过出水浊度低至 $0.1-0.2\text{NTU}$ 的情况下仍然爆发致病原生动物疾病的事件<sup>[18-20]</sup>。脉动颗粒检测仪器是专门为检测超低浊度水而设计的,灵敏检测范围是 $1\mu\text{m}$ 以上的颗粒。颗粒检测技术能有效地测试出粒径大于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒,可以弥补浊度检测的不足。如果将颗粒检测与浊度检测相结合,则能更快速、更可靠地检测和控制颗粒物质和可能的病原微生物的总体数量

### 1.3.2 课题研究内容

#### 1. 研究不同颗粒检测方法的相关性

分别采用硅藻土、高岭土和两者混合溶液中的颗粒对浊度仪、脉动颗粒检测仪和颗粒计数仪的相关性进行了分析。使用浊度仪、脉动颗粒检测器和颗粒计数检测仪器检测不同溶液,研究悬浊液体积和浊度的相关性、悬浊液体积和各个粒径颗粒的相关性,相同颗粒分布条件下浊度、颗粒指数和颗粒浓度之间的相关性,不同颗粒分布条件下浊度、颗粒指数和颗粒浓度之间的相关性。

#### 2. 采用过滤系统对不同颗粒检测仪器的性能和特性进行评价

实验过程中,模拟微絮凝—直接过滤过程,在监测整个过滤过程中使用浊度仪、脉动颗粒检测器和颗粒计数检测仪器,研究三种仪器在过滤过程应用的效用和三种仪器之间的相关性。在不同条件因素影响下,使用实验室用高灵敏度浊度仪、脉动颗粒检测仪器、颗粒计数检测仪器对微絮凝—直接过滤的出水进行连续在线监测,通过滤后水中浊度、颗粒指数和颗粒浓度的变化,研究过滤参数变化对过滤影响。

## 第2章 水处理中颗粒物主要检测方法

### 2.1 浊度检测技术及其应用

水的浊度是与光紧密关联的一个概念，只有在光照的情况下，才能看清水的“清”和“浊”。浊度是水中不同大小、形状、比重的悬浮物、胶体物质和微生物等杂质对光所产生效应的表达语<sup>[21]</sup>。美国公共卫生协会(APHA)等组织把浊度定义为：“水样使光散射和吸收的光学性质的表达语”<sup>[22]</sup>。可以理解，总重量相同，但颗粒大小不同的杂质，对光的效应是不同的，即浊度是不同的。显然，浊度虽然不能直接表示水中杂质的含量，但与它的含量是相关的。浊度的检测方式主要有以下三种：透射检测方法、散射检测方法和综合检测方法。

#### 2.1.1 透射检测方法

从光源发出的平行光束射入水样，水样中的浊度物质会使光的强度衰减，另一束光周期性被切换成比较光束，两束光交替被光电池接收转换并比较两光束强度之差，得出水中浊度的大小。光强的衰减程度与水样的浊度之间的关系可用下式表示： $I = I_0 e^{-Kd}$ 。式中， $K$ 为比例常数， $d$ 为浊度， $l$ 为水样透过深度。透射光测定法测定浊度，方法十分简便，其原理见图(2.1)所示

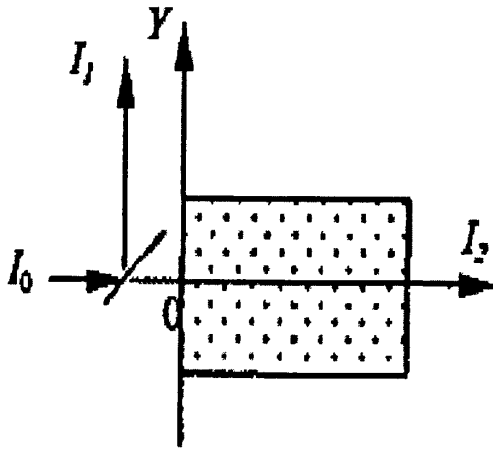


图 2.1 透射浊度检测方式示意图

Fig 2.1 Monitoring methods of diffusion nephelometer

入射光通过半透膜分为两束光强相同的光，一束光通过水样透射入射在测量光电池上( $I_2$ )，另一束光直接照射在参比光电池上( $I_1$ )，测量光电池与参比光电池将两光束的强度进行接收比较，从而测出水样的浊度。

显然，透射光浊度仪的原理相当简单，计算不复杂，仪器的设计方面也比较

简单,但是在测量较低浊度时,由于大部分的光都直接透射了,微小的浊度变化所引起的透射光的变化是相当小的。或者说,变化率是很小的,这样对光电接收元件和放大器的分辨率和稳定性要求就非常高,低浊度时不易满足。所以,透射光方法不适合测量低浊度。

### 2.1.2 散射检测方法

一定波长的光束射入水样时,由于水样中浊度物质使光产生折射,散射光强度与水样浊度成正比,通过测定与入射垂直方向的散射光强度,即可测出水样中的浊度。按照测定散射光和入射光的角度不同,分为垂直(90°)散射式,前散射式、后散射式三种方式。

根据光学理论,水中颗粒半径小于入射光波长的 1/10 时,主要发生侧向散射,水中颗粒半径为入射光波长 1/4 左右时<sup>[23]</sup>,向前方的散射强烈,水中颗粒大于等于入射光波长时,向前方散射的同时,向侧面发出强度起伏变化的散射光。颗粒越大,产生的散射光量越大。当颗粒半径为入射光波长的 1/10 和 1/4 时,单位体积产生的 90° 光强服从瑞利定律:

$$I_r = KN I_0 \quad (2-1)$$

式中K为比例系数。当水中悬浮颗粒的半径大于等于光波长时,由粒子表面的反射及粒子内部的折射都会使光线改变方向,此时90°方向上测得的光强度服从米氏(Mie)定理。与入射光的强度、微粒子的截光面积A和粒子的个数浓度N成正比,可以简化为(2-2)式:

$$I_r = K_1 N A I_0 \quad (2-2)$$

式中 $K_1$ 为比例系数。实际上,浊度仪90°方向上测得的是不同大小的颗粒对入射光的散射、折射、反射和吸收等综合作用的结果,入射光的波长、粒子色和水色会影响读数,使仪器对高浊度的水不适用。但在0-100NTU范围内可以得到理想的线性结果。

散射式检测,是测量入射光被待测溶液中的悬浮颗粒散射所产生的散射光的强度来确定待测溶液浊度的。散射式浊度仪的检测值遵循雷采公式,仪器的读数随浊度值的增大而增大,低浊度范围内呈线性响应。按其测量方法的不同,又分为向前散射式、垂直散射式和向后散射式三种。

### 2.1.3 综合检测方法

同时测量投射于水样光束的透射光和散射光强度,再按这两者光强度之比测定其浊度大小。可按下式求得:

$$I_r / I_t = K D$$

式中,  $I_r$  散射光强度,  $I_t$  透射光强度

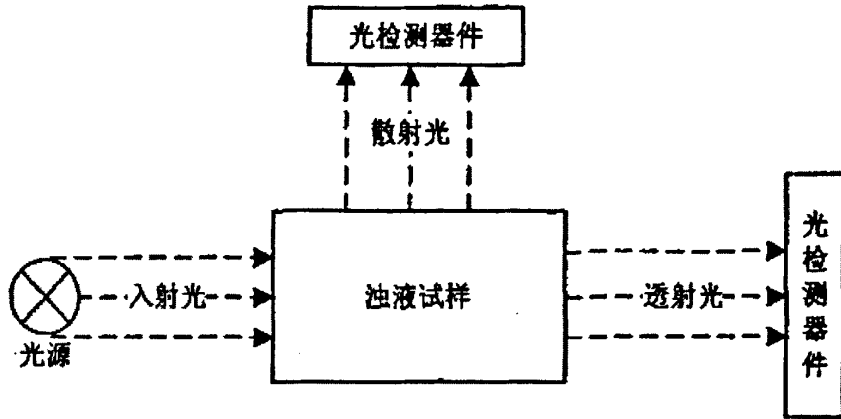


图 2.2 综合检测方法

Fig 2.2 Monitoring methods of Synthesize chart

图 2.2 给出了透射—散射比较式的示意框图。透射—散射比较测量法是透射式和散射式这两种测量方法的结合，由于透射光和散射光测定时光程相同，水样色度和光源变化对浊度测量的影响相同，这种方法可以消除部分干扰，提高灵敏度<sup>[24]</sup>，由于对散射光，透射光同时测量，能够大大提高一起的稳定性，也可以减少水中色度的影响<sup>[25]</sup>。

#### 2.1.4 浊度在水处理中的应用

浊度是水中颗粒物的替代参数，是表明水中颗粒物的水质指标，是水处理中一项重要的指标，几乎所有应用到所有的水处理工艺当中。采用浊度仪对水质的浊度进行检测，是对各类水中非溶性物质测量达到控制水质的重要手段。

生活饮用水的浊度是自来水厂出水水质要求的一个主要参数。一般自来水厂对水处理各个环节都需要进行浊度检测，特别是出水部分更需要进行在线浊度测量仪表。我国国家标准《生活饮用水卫生标准》(GB5750-1985)中规定生活饮用水(自来水)的浊度 $\leq 3$  NTU。在新颁布的《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006)中规定生活饮用水(自来水)的浊度 $\leq 1$  NTU。

浊度是污水处理厂处理各种污水净化后，对出水水质要求的重要参数之一。在污水处理厂，一般是在出水部分才需进行在线浊度测量，要求出水浊度 $\leq 5$  FNU。

浊度又是工业水处理(除盐水)检验水质要求的一个重要参数，由于对除盐的水质要求较高，除对出水部分要求进行在线测量外，对入口水也需要进行在线浊度测量，只不过有低浊度和高浊度测量之分别。

在进行水环境监测时，浊度是必需测量的重要参数之一。因为浊度的大小往往即可直接判断出水环境污染的程度。因为pH值、浊度、氨氮、溶氧四大参数是监测水环境的指标。所以浊度测量的重要性是不言而喻的。

## 2.2 透光脉动检测技术及其应用

透光脉动检测技术是一种光电检测方法<sup>[26]</sup>,利用悬浮液中颗粒组成的随机脉动变化特性,来分析和检测悬浮液中颗粒状态及其变化情况,对透射光线强度的脉动特性进行分析和计算,得到反映颗粒相对粒径的有效输出值和比值R(透光脉动值)。此比值R不受电子元件的漂移和透光管管壁的脏污的影响。此外,该方法具有流过式的特点,使得检测过程能以连续在线的方式进行。

### 2.2.1 透光脉动检测技术

在有悬浮液流动的管状器皿两侧分别设置光源和检测器,如图2.3所示。当一束光线透射过含有颗粒物质的悬浮液时,光束照射到(或检测到)的悬浮液体积中颗粒物质的数量是随机变化的<sup>[26,27]</sup>,因此透射光强度也会随着颗粒数的变化而发生变化,就会观察到图2.3所示的透射光强度的波动(脉动),变化规律遵循泊松分布。一般光束照射到的悬浮液体积较大,颗粒数的脉动程度不明显;当光照体积减小时,该体积内平均颗粒数越少,颗粒数脉动越明显。从检测器输出的带有脉动现象的透射光强度信号可以看成由两部分组成:一部分为直流(DC)成分,相当于平均透射光强度 $I_0$ ;另一部分是非常小的脉动(AC)成分,相当于悬浮液中颗粒数随机变化(脉动)。对于遵循泊松分布的随机脉动,可以用实际电压V相对于平均电压 $V_0$ 的标准偏差 $V_R$ ,反映实际颗粒数相对于平均颗粒数的脉动情况(其中 $V_0$ 是平均透射光强度 $I_0$ 所对应的电压值),经过一定的假设和数学运算就可以得到反映脉动程度的表达式。如果假定光束在悬浮液中的长度为L,光束的有效截面积为A,对于有粒径分布的非均相分散系统(悬浮液)第i种颗粒的数量浓度和光散射截面积分别为 $N_i$ 和 $C_i$ ,经过推导可得到如下表达式:

$$V_R = V_0 (L / A)^{1/2} \cdot (\sum N_i \cdot C_i^2)^{1/2} \quad (2-3)$$

式中求和 $\sum N_i \cdot C_i^2$ 是考虑各种粒径

颗粒物质的综合影响。一般式(2-3)可表达成比值R的形式,则:

$$R = V_R / V_0 = (L / A)^{1/2} \cdot (\sum N_i \cdot C_i^2)^{1/2} \quad (2-4)$$

对于某一特定的检测仪器,L/A值是常数,因此R值仅与颗粒物质的数量浓度和光散射特性有关。因 $V_R$ 和 $V_0$ 值是从实测电压值V中分离得到的,由于检测仪器的电子元器件老化漂移,以及器皿表面粘污对V值造成的影响,对分子 $V_R$ 和分母 $V_0$ 值是相同的,所以它们的比值R则完全消除了这些影响,这一点从式(2-4)中也可明显地看出。这是该检测技术不同于一般光电检测仪器的一个突出的特点,使得检测仪器在运行或操作中免除了经常的清洗和标定过程,这对于低颗粒浓度的测定特别重要,并为实现长时间连续在线检测提供了理论依据和基础。

从式(2-4)中可看到, $\sum N_i \cdot C_i^2$ 项是悬浮液中所有颗粒的综合结果。对于较小粒径的颗粒,其散射截面积较小,相应的 $\sum N_i \cdot C_i^2$ 也较小(尽管有时其颗粒浓度

相对较大)；较大颗粒的散射截面积相对较大，即使颗粒浓度较低仍能得到较大的 $\sum N_i \cdot C_i^2$

值。如用 $R$  值作为该检测技术的有效表达值，则检测值 $R$ 对较小颗粒的检测不灵敏，而对较大颗粒的检测很灵敏，这是该技术的另一个非常重要的特性。

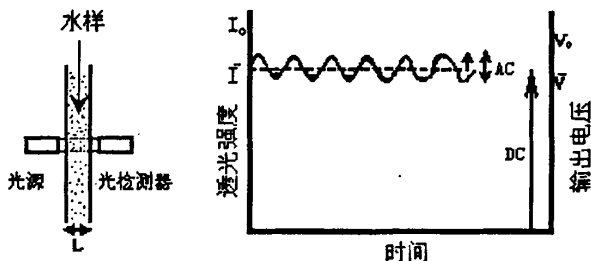


图 2.3 透光脉动检测原理示意图

Fig 2.3 Monitoring method with transmitted light fluctuation chart

### 2.2.2 透光脉动技术在水处理中的应用

1984 年 Gregory 等首次将透光率脉动检测技术应用于水的混凝研究中<sup>[27]</sup>，随后又有许多学者将其应用于污泥脱水、絮凝体尺寸检测、混凝动力学、混凝剂投加自动控制等方面的研究中<sup>[28-30]</sup>。该项技术在 20 世纪 80 年代后期进入我国后，得到了广泛深入的研究，在许多领域中得到了应用，尤其在水处理混凝剂投加自动控制系统中更是取得了较大的成功。李圭白等人将其成功地应用到高浊度水的混凝剂投加系统中，并取得了较好的效果，可以说透光率脉动检测技术在高浊度水处理中的应用是该项技术最为成功的生产应用<sup>[31-33]</sup>。我国水处理厂的原水水质多数在几十 NTU 至几百 NTU 之间，属于常规浊度水范围，在 20 世纪 90 年代后期，许多学者尝试将透光率脉动检测技术应用于常规浊度水处理中，并已经在武汉钢铁公司一水厂和四川泸州某水厂获得了一定的成功<sup>[34-35]</sup>。

杨艳玲和李星等将透光脉动用于检测过滤过程颗粒物的实验中发现，在过滤过程的监测中，脉动检测值  $R$  可灵敏地反映出过滤中颗粒粒径的变化情况，与浊度检测法相比，具有更高的灵敏度和更好的预测性<sup>[33]</sup>。

## 2.3 颗粒计数检测技术及其应用

用于水处理领域的颗粒计数技术主要有两类，光电式和电感应检测方法。其中光学颗粒计数测量简称 OPC (Optical Particle Counting)。根据其工作原理，可分为光散射式 (Optical Scattering) 和光阻式 (Optical Blockage) 两大类。二者工作原理虽有不同，但都是对介质中的颗粒逐个地自动采样和测量。测量目的为，通过所测的粒径大小及数量来判断被测介质的纯净度是否符合要求<sup>[36-38]</sup>。光散射式和光阻式 OPC 各有其特点和应用范围。一般情况下，光散射式 OPC 用于对小颗粒 (粒

径 $\leq 115\mu\text{m}$ )的测量,而光阻式OPC用于对较大颗粒的测量。也可将两种原理结合在一套测量装置中,用光散射原理测量小颗粒,用光阻原理测量大颗粒,以使二者都能在较优化的条件下工作并实现较宽的测量范围<sup>[39-41]</sup>。电感应法是利用电学原理测定颗粒大小和数目的一种方法。使悬浮在电解质中的颗粒通过一小孔,在小孔的两边各浸有一个电极,颗粒通过小孔时电阻变化而产生电压脉冲,其振幅与颗粒的体积成正比。电感应法测量下限能达到亚微米量级,但由于颗粒通过小孔的位置不同时表现的电抗不同将会测量带来偏差。而且由于被测溶液必须导电,所以,如果被测液体不导电的话,就必须加入导电溶液,因此影响了测量速度以及测量成本。

### 2.3.1 电感应法

电感应法又称为Coulter法,它是测定颗粒大小和数目的一种方法。使悬浮在电解质中的颗粒通过一小孔,在小孔的两边各浸有一个电极,颗粒通过小孔时电阻变化而产生电压脉冲,其振幅与颗粒的体积成正比。这些脉冲经过放大,辨别和计数,从演算的数据可测得悬浮的颗粒大小分布。这种方法最初应用于血球计数。Kubitschek加以修改后用于细胞计数,并指出这一原理可用来测定细胞体积的分布及其计数。其后很快发展了各种改良的仪器,用于测定颗粒大小和计数。

### 2.3.2 光电感应法

**2.3.2.1 光散射式颗粒检测技术** 光散射法是一种基于光散射原理的颗粒检测方法,也就是当纯净介质中存在颗粒时无论是固体颗粒、液滴或气泡),光束穿过该介质时就会向空间四周散射,而光的各个散射参数则与颗粒的粒径密切相关,这样就为颗粒测量提供了一个尺度。按照仪器所接收散射信号的不同,又可将光散射分为:米(Mie)氏散射和夫琅和费(Fraunhofer)衍射。

**2.3.2.1 光阻式颗粒检测技术** 光阻法原理:被测液体流过横断面很小的通道,通道两侧装有光学玻璃窗口,来自恒定光源的细小光束穿过该窗口并被另一侧的光电元件所接收,细小光束与通道界面构成了测量区或敏感区。若流过测量区的液体中没有颗粒,则光电元件给出的光信号保持为恒定不变;反之,若有一颗颗粒流过测量区,将会对光束产生一个“遮挡”作用,使光电元件所接收到的信号减小并给出一个负脉冲信号。脉冲信号的幅值显然与颗粒的粒径相关,从而为粒径的测量提供了一个方法。

### 2.3.4 颗粒检测技术在水处理中的应用

目前颗粒计数方法已越来越多地应用于油田废水处理、膜工艺、水产养殖、材料等行业。作为颗粒物计数法的一个重要的应用领域,给水处理行业正逐步将这种新型的水质监测手段用于水厂生产的各个环节。在美国有500多家水处理厂采用颗粒物计数仪器用于监控净水过程和饮用水的水质;欧洲、日本、韩国和印度等也开始将颗粒计数仪应用于水处理中,在我国北京、广州等地的水厂也已开

始应用。综合来说,颗粒物计数法在给水处理行业的应用主要有以下几个方面:

### 1. 优化絮凝剂投加量

在对絮凝剂加入量进行微量调节时,因过滤器出水中颗粒物浓度较低,而使浊度仪和混凝烧杯试验法精度不够,颗粒计数仪则可准确测量此时的颗粒物浓度,为优化絮凝剂投量提供了必不可少的技术保证。

美国南内华达州水厂早在上世纪八十年代,就运用当时先进的在线颗粒物计数仪优化混凝剂的加入量<sup>[42]</sup>。加拿大Bears paw水厂利用颗粒计数仪在1997年7月至9月间对该厂絮凝剂的加入量进行了优化,颗粒计数仪的高灵敏度是测量成功的关键(出水中粒径 $>2\mu\text{m}$ 的颗粒物总量可低至10个/mL)。试验结果表明,当加入量为10mg/L时出水中颗粒物的总量高达300个/mL,而当加入量为6 mg/L时出水中颗粒物的总量为40个/mL,而且滤池出水的颗粒物总量最稳定。若将絮凝剂加入量由10 mg/L减至6 mg/L则该厂每月可节省药剂费为2.4万美元<sup>[43]</sup>。

### 2. 改进絮凝装置的设计和操作

传统絮凝过程的设计、操作以及评估是以停留时间和搅拌强度或 $G \times t$  值为依据,但是由于该值的选择范围很宽,难以找出符合个别水处理厂特定条件的最佳值,而且难以指导找出设计中的失误。例如在絮凝器的设计中,虽然存在一些选择旋转方向和搅拌速度的经验方法,但这些方法的可重现性和量化程度尚有疑问。沉淀池的浊度虽可作参考,但浊度的测量原理决定其本身并不能很好地表征颗粒物数量和动力学特性,特别是不能表征絮凝中颗粒物是否从小变大的过程,另外浊度测量的滞后性也使其不能及时反映絮凝效果。而颗粒计数仪可用来实时监测絮凝过程中颗粒物的动力学变化结果,为优化絮凝过程的设计和操作提供可靠的依据。

### 3. 监控滤池出水水质

颗粒计数仪可以检测到滤后水中颗粒的细微变化,当滤池发生“穿透”时,颗粒计数仪可以比浊度仪更快更灵敏的检测到滤后水中颗粒物含量的升高。颗粒计数仪提供的颗粒信息可以优化反冲洗时间和反冲洗强度。

何元春等<sup>[44]</sup>运用颗粒计数仪在线监测砂滤池和生物活性炭滤池出水情况,结果表明,其敏感度高,较浊度仪更能及时、准确地反映活性炭滤池运行过程中的出水水质变化,对优化滤池运行以及确保出水水质有着重要作用。在水厂的实际生产应用中,欧美发达国家的大多数水厂一般以 $2\mu\text{m}$ 以上颗粒浓度为控制参数。

宾夕法尼亚州Hershey水厂原来采用72h反洗一次或当过滤器压差 $>18\text{kPa}$ 时开始反洗,后改用颗粒计数仪来确定反洗时间:当出水颗粒物浓度有明显变化时即开始反洗,其三次反洗时的水头损失分别为18 kPa、13 kPa和18kPa,可见水头损失不能准确地反映过滤器运行状态的变化。

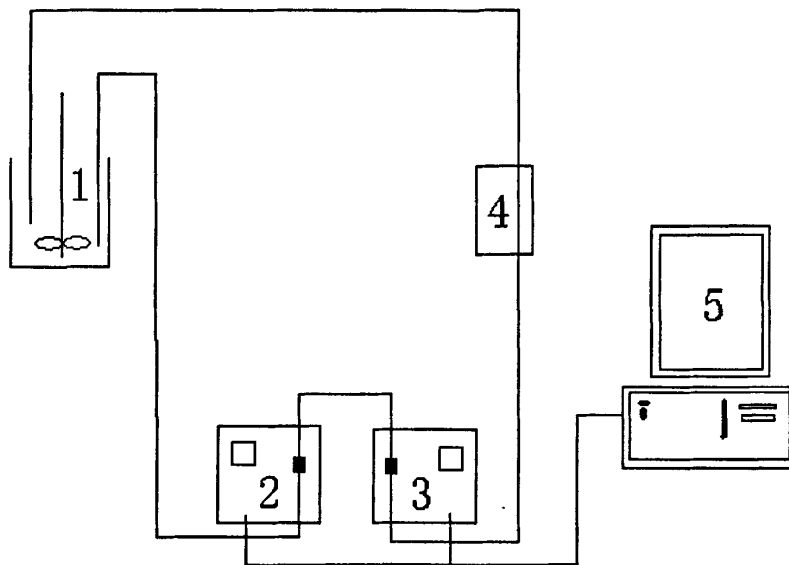


## 第3章 颗粒检测试验方法

### 3.1 试验设计

本论文实验分为两部分，第一部分为研究颗粒浓度、颗粒指数和浊度之间的相关性，第二部分研究为颗粒检测技术在过滤中的应用。

第一部分：称取一定质量的高岭土、硅藻土和两者混合，配制成一定浓度的母液，将不同体积的母液加入水中配制成不同浓度的溶液。使用颗粒计数仪、透光脉动检测仪和高灵敏度浊度仪对悬浮溶液中的颗粒物含量进行检测，研究悬浊液体积与浊度和各个粒径颗粒的相关性，以及相同颗粒分布和不同颗粒分布条件下颗粒指数、颗粒浓度和浊度之间的相关性，试验流程如图 3.1。

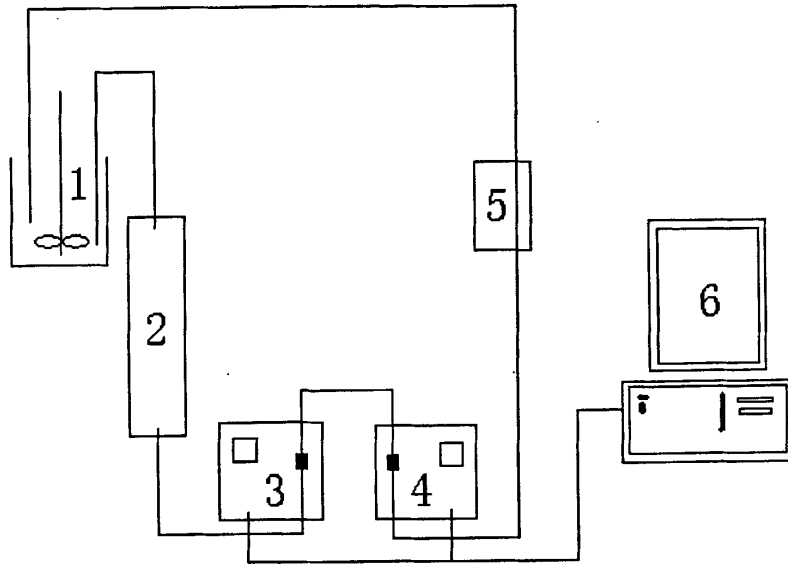


1. 反应器 2. PCX 2200颗粒计数仪 3. PM 2500脉动颗粒检测仪 4. 浊度仪 5. 计算机

图 3.1 实验流程示意图

Fig 3.1 Experiment flowing chart

第二部分：模拟微絮凝—直接过滤过程，使用三种仪器在线检测整个过滤过程，研究过滤过程中颗粒指数、颗粒浓度和浊度的变化，滤后水颗粒指数、颗粒浓度和浊度的相关性。改变过滤条件，观察过滤过程中颗粒指数、颗粒浓度和浊度的变化，研究过滤参数变化对过滤影响，实验流程见图 3.2。



1反应器 2滤柱 3颗粒计数检测仪器 4脉动颗粒检测仪器 5油度仪 6计算机

图 3.2 在线连续检测实验装置示意图

Fig 3.2 Continuous monitoring experiment flowing chart

## 3.2 试验材料及溶液配制方法

### 3.2.1 试验材料

高岭土 北京旭东化工厂生产的高岭土 (CP) (粒径范围 $\leq 90\mu\text{m}$ )  
 硅藻土 北京化学试剂公司生产的硅藻土 (CP) (粒径范围 $\leq 45\mu\text{m}$ )

### 3.2.2 溶液配制方法

高岭土溶液: 称取 66.5g 高岭土, 放入 1L 纯水中, 混匀后作为母液, 用量筒量取不同体积的母液, 分别用纯水稀释到 10L 作为待测溶液。

硅藻土溶液: 称取 66.5g 硅藻土, 放入 1L 纯水中, 混匀后作为母液, 用量筒量取不同体积的母液, 分别用纯水稀释到 10L 作为待测溶液。

混合溶液: 高岭土和硅藻土各称去 33.25g, 放入 1L 纯水中, 混匀后作为母液, 用量筒量取不同体积的母液, 分别用纯水稀释到 10L 作为待测溶液。

## 3.3 试验仪器

颗粒计数仪: 颗粒计数仪为美国 HACH 公司生产的 PCX 2200 在线颗粒计数器, 最小测量颗粒为  $2\mu\text{m}$ , 最大测量颗粒为  $750\mu\text{m}$ , 可根据实际需要在  $2-750\mu\text{m}$  的粒径范围内同时测定 8 个粒度范围的颗粒分布, 标准流速为  $100\text{mL}/\text{min}$ , 最大

工作压力为 65Pa，工作温度范围为 0-50℃，颗粒浓度检测极限为 17 000 个/ml。由于实验需要，颗粒计数仪的 8 个颗粒检测范围分别设定为 2-3 $\mu\text{m}$ 、3-5 $\mu\text{m}$ 、5-8 $\mu\text{m}$ 、8-10 $\mu\text{m}$ 、10-15 $\mu\text{m}$ 、15-20 $\mu\text{m}$ 、20-25 $\mu\text{m}$  和 25 $\mu\text{m}$ -750 $\mu\text{m}$ ，用户通过软件可以得到各个粒径范围的颗粒数。

脉动颗粒检测仪：型号为美国 CHEMTRAC 公司生产的 MODEL PM 2500 脉动颗粒检测仪，检测范围为粒径 1 $\mu\text{m}$  以上的颗粒，颗粒粒度指标：0-9999，工作温度 0-82℃，标准流速为 100mL/min，取样管内径为 1/8 英寸，取样管外径 3/16 英寸，传感器反应时间小于 2s。

浊度仪：型号为德国 WTW 公司生产的 Turb555 实验室浊度仪，检测范围为 0.0001-10000NTU，仪器有四个传感器，不仅可测试 90 度散射光和 180 度散射光，还可实现比率测试，提高抵抗杂散光和色度的干扰。工作温度为 0-50℃，可根据需要，选择连续式检测或者间隔式离线检测。

过滤装置：滤柱采用透明有机玻璃制作，尺寸为 70×3000mm，承托层采用粗砾石，厚度为 120 mm，滤料采用石英砂滤料和无烟煤滤料，石英砂滤料规格为： $d_{10}=0.2224\text{mm}$ ， $K_{80}=2.75$ ，滤层厚 700mm，无烟煤滤料规格为： $d_{10}=0.3215$ ，不均匀系数  $K_{80}=2.52$ 。

恒温磁力搅拌器：型号为海司乐仪器有限公司生产的 B23-2 型搅拌器。转速：100-2000 转/min，本次实验采用 1200 转/min。控温范围：室温-120℃；搅拌容量：10000mL。

## 第4章 颗粒检测技术相关性研究

已经有研究表明<sup>[45]</sup>, 直径大于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒产生的浊度读数偏高, 直径再大的颗粒对光的反应又下降。杨艳玲<sup>[46, 47]</sup>等人的试验发现, 浊度对小于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒比较灵敏, 对大于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒灵敏度较低, 也就是说浊度主要能反映小于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒含量, 但对大于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒, 检测精度就会显著下降。用浊度对滤后水进行检测是不够可靠的。脉动颗粒检测仪可以检测超低浊度水, 灵敏的检测范围是 $1\mu\text{m}$ 以上的颗粒。颗粒检测技术能有效地测试出粒径大于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒, 可以弥补浊度检测的不足。因而在实际应用过程中, 经常同时使用多种检测仪器进行监测, 以提高检测的准确性。因而颗粒检测技术之间的相关性已经成为检测技术应用研究中的重要方向<sup>[48]</sup>。

### 4.1 悬浊液体积与浊度的相关性

本实验为新配置的高岭土悬浊液直接用三种仪器检测。具体实验方法为: 称取66.5g高岭土, 放入1L纯水中, 混匀后作为母液, 然后取不同的母液体积的悬浊液分别用纯水稀释到10L作为待测水样。硅藻土悬浊液配置方法同高岭土, 两者混合的悬浊液是高岭土和硅藻土各称去33.25g, 其他配置方法同高岭土。混合悬浊液的体积为高岭土和硅藻土各加的相同的体积。取不同体积的稀释到10L的悬浊液用浊度、透光脉动和颗粒计数器检测。

由图4.1、图4.2和图4.3可以看出, 加入的悬浊液体积和浊度成正比, 也就是说悬浮物的含量与浊度成正比, 并且有很好的线性关系。硅藻土、高岭土和两者混合液体积与浊度的相关系数分别为0.9856、0.9909和0.9990。两者混合溶液体积与浊度的相关性最好, 其次是高岭土, 最差的是硅藻土。虽然悬浮物含量和浊度都是反映水中粗分散颗粒的指标, 但二者表示方法不同。悬浮物含量按GB/T14415-93中规定, 水的悬浮物是指水样通过 $3-4\mu\text{m}$ 孔径的玻璃过滤器时截留物干燥重量, 再换算成每升水中滤出物的重量, 为悬浮物含量, 其单位为 $\text{mg/L}$ 。浊度是表征水中悬浮物对光线透过时所产生的阻碍程度的参数, 主要有粒径约 $1\mu\text{m}$ 的胶体颗粒产生。由此可以得出浊度可以很好的表示水中悬浮物的含量。

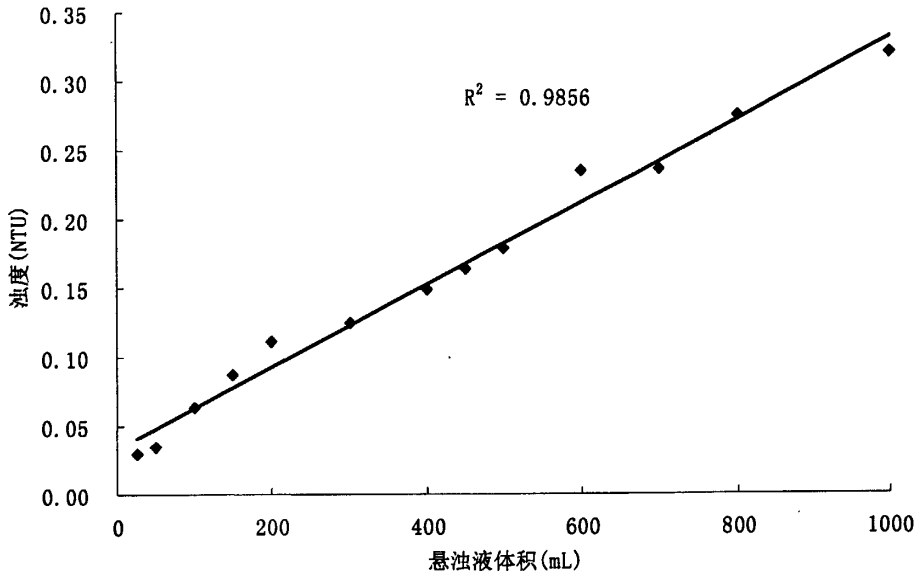


图 4.1 硅藻土溶液体积与浊度相关性

Fig 4.1 Relativity between turbidity and solution volume in Diatomite solution

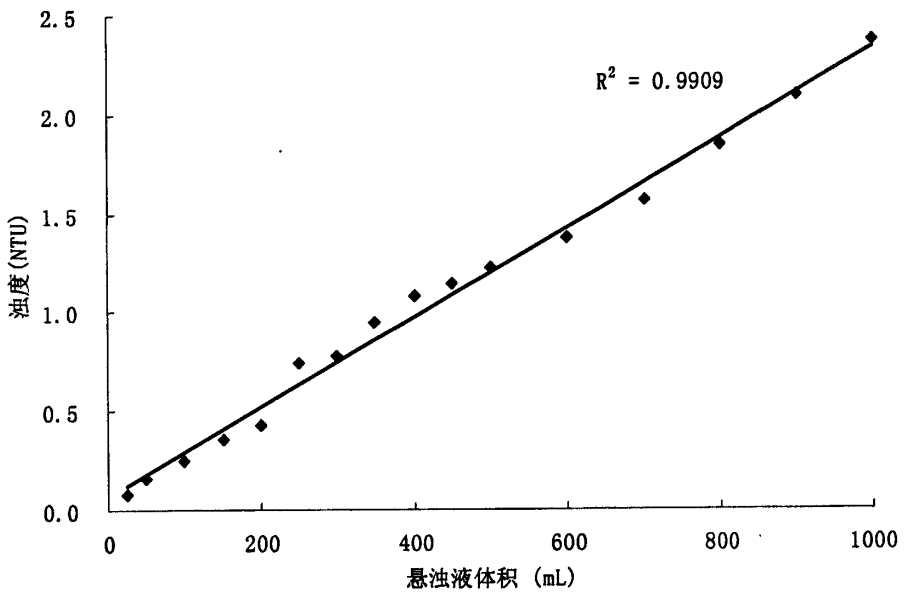


图 4.2 高岭土溶液体积与浊度相关性

Fig 5.2 Relativity between turbidity and solution volume in Kaolin solution

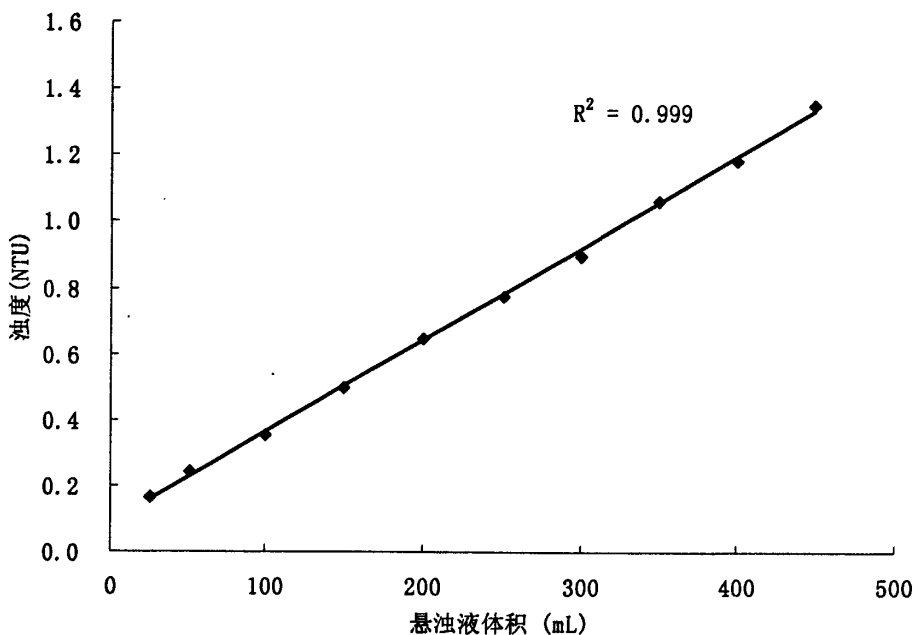


图 4.3 混合溶液体积和浊度相关性

Fig 4.3 Relativity between turbidity and solution volume in mixed solution

## 4.2 悬浊液体积与各个粒径颗粒的相关性

由于颗粒计数仪可以检测出溶液中各个粒径范围内的颗粒的数量,当加入不同的体积悬浊液时各个粒径颗粒分布状况见图 4.4、图 4.5 和图 4.6。颗粒计数仪分为八个通道,这在第三章已经说明,由于大于  $20\mu\text{m}$  的通道显示的颗粒数基本都为 0。所以在此我们只分析  $2\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$  颗粒与悬浊液体积的相关性。

从图 4.4 中可以看出,随着硅藻土悬浊液体积的增加,各个粒径范围的颗粒都在相应的增加,硅藻土中  $3\text{-}5\mu\text{m}$  的颗粒最多,以悬浊液体积  $1000\text{mL}$  时为例, $3\text{-}5\mu\text{m}$  颗粒所占比例为  $37.72\%$ ,其次为  $2\text{-}3\mu\text{m}$  的颗粒,并且随着颗粒粒径的增大,水中颗粒数呈现下降的趋势,其中粒径范围  $8\text{-}10\mu\text{m}$  和  $10\text{-}15\mu\text{m}$  颗粒数很相近。随着悬浊液体积的增加,各个粒径颗粒都呈现出相同的生长趋势,并且从图 4.4 中可以看出各个粒径颗粒随着悬浊液体积增加,数量增加的趋势也都相同,这说明高岭土溶液在水中有很好的稳定性,颗粒计数仪可以很好检测出水中  $2\text{-}20\mu\text{m}$  粒径范围的颗粒。

图 4.5 是高岭土溶液随着悬浊液体积的增加各个粒径颗粒的变化的趋势图,从图中我们可以看出:与硅藻土实验一样,各个粒径颗粒与悬浊液体积有很好的相关性,各个粒径范围颗粒都有相同的生长趋势。高岭土中  $3\text{-}5\mu\text{m}$  范围颗粒也是最多的,  $1000\text{mL}$  悬浊液中  $3\text{-}5\mu\text{m}$  粒径颗粒占总颗粒数的  $46.42\%$ ,比硅藻土中所占的比例高近 10 个百分点。其次是  $2\text{-}3\mu\text{m}$  粒径颗粒,与硅藻土一样,随着

颗粒粒径的增大,水中颗粒数呈现下降的趋势。高岭土溶液中颗粒数要多于硅藻土,1000mL 溶液中,硅藻土溶液中颗粒总数为 128 个/mL,高岭土溶液中颗粒总数为 1260 个/mL,从图 4-4 和图 4-5 中可以看出,相同体积硅藻土的颗粒数要少于高岭土。由于在配制悬浊液时,添加的硅藻土和高岭土的质量是相同的,因此相同重量的硅藻土和高岭土,加入水中,水中硅藻土的颗粒要少于高岭土。

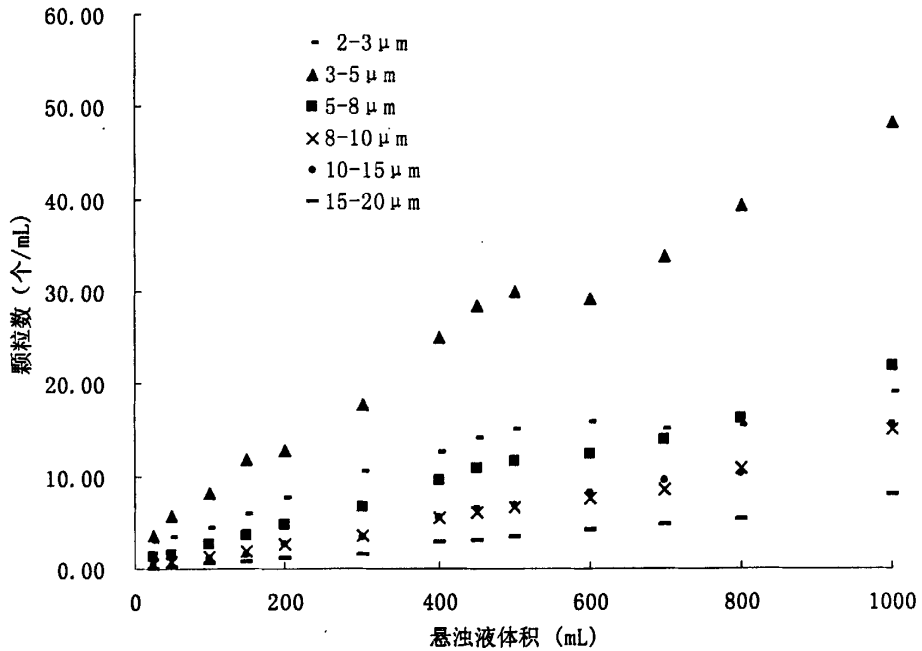


图 4.4 硅藻土溶液体积与各个粒径颗粒浓度相关性

Fig 4.4 Relativity between solution volume and particle concentration in Diatomite solution

图 4.6 是两者溶液随着悬浊液体积的增加各个粒径颗粒的变化的趋势图,其中溶液的体积为加入硅藻土或高岭土溶液的体积,混合溶液中加入的硅藻土和高岭土溶液体积相同。这说明硅藻土颗粒和高岭土颗粒各自的物理化学性质相对稳定,而在混合溶液中这种稳定性是可持续的。混合溶液中 3-5 $\mu\text{m}$  范围颗粒也是最多的,硅藻土溶液和高岭土溶液各加入 450mL 时的混合悬浊液,3-5 $\mu\text{m}$  粒径颗粒占的比例为 45.41%,介于硅藻土和高岭土之间,其次为 2-3 $\mu\text{m}$  粒径颗粒,并且随着粒径范围增大,水中颗粒数呈现下降的趋势。

从图 4.4、图 4.5 和图 4.6 中可以看出,溶液中各个粒径范围颗粒数都随着悬浊液体积的增加而相应的增加,各个粒径颗粒增加的趋势相同,溶液中 3-5 $\mu\text{m}$  粒径颗粒所占比例最大,随着颗粒粒径的增大,颗粒数越少。硅藻土、高岭土和混合溶液的颗粒分布不相同。同一悬浊液体积,高岭土 3-5 $\mu\text{m}$  粒径颗粒所占比例要大于硅藻土 3-5 $\mu\text{m}$  粒径颗粒所占比例。

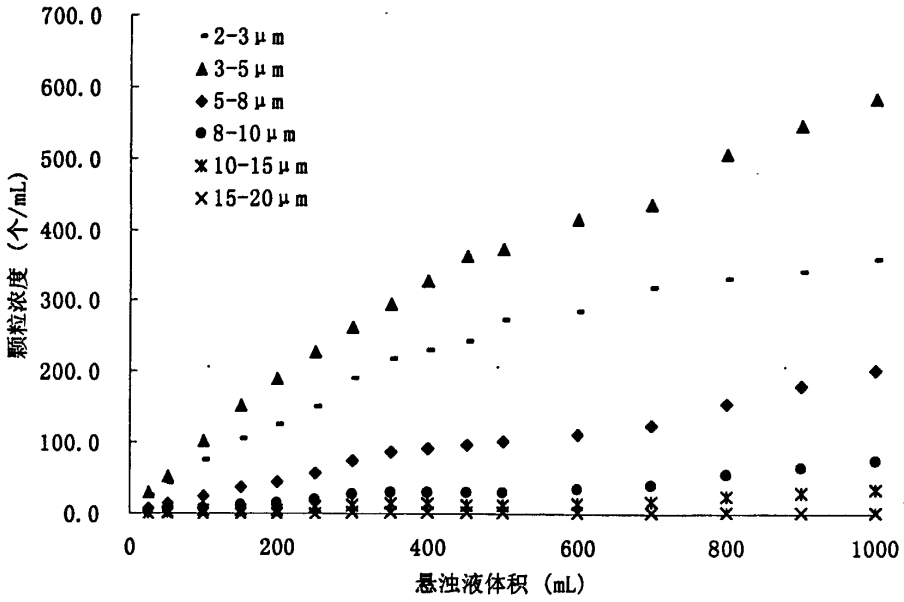


图 4.5 高岭土溶液体积与各个粒径颗粒浓度相关性

Fig 4.5 Relativity between solution volume and particle concentration in Kaolin solution

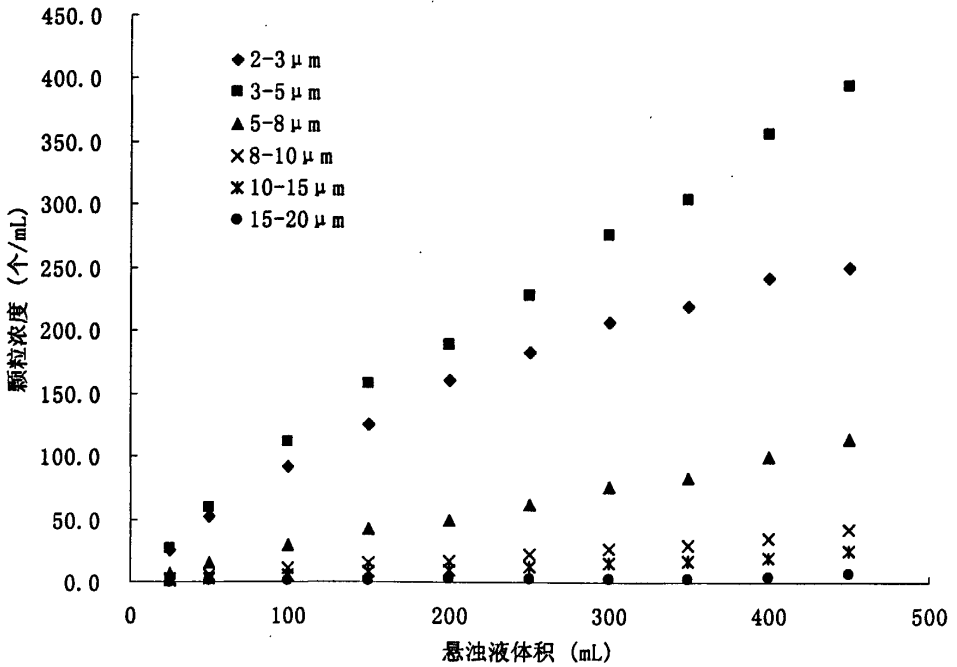


图 4.6 混合溶液体积和各个粒径颗粒浓度相关性

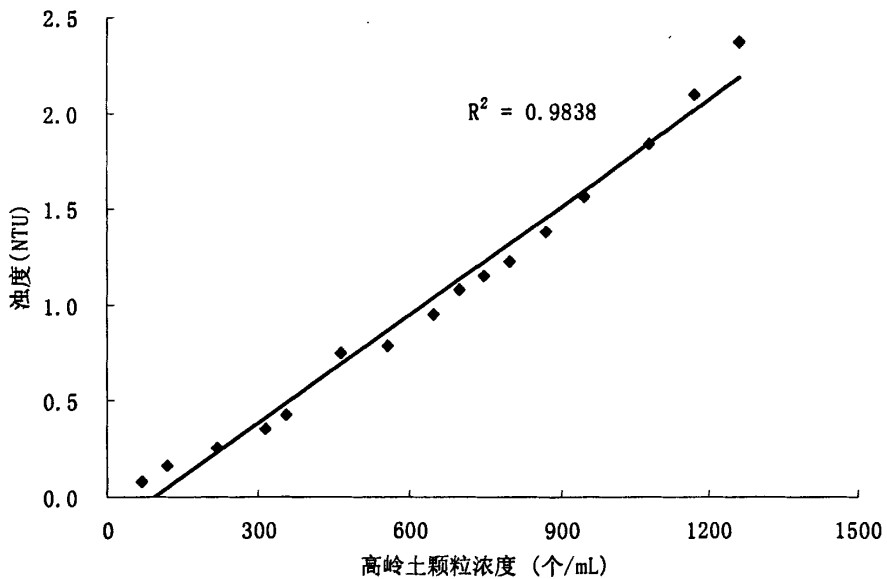
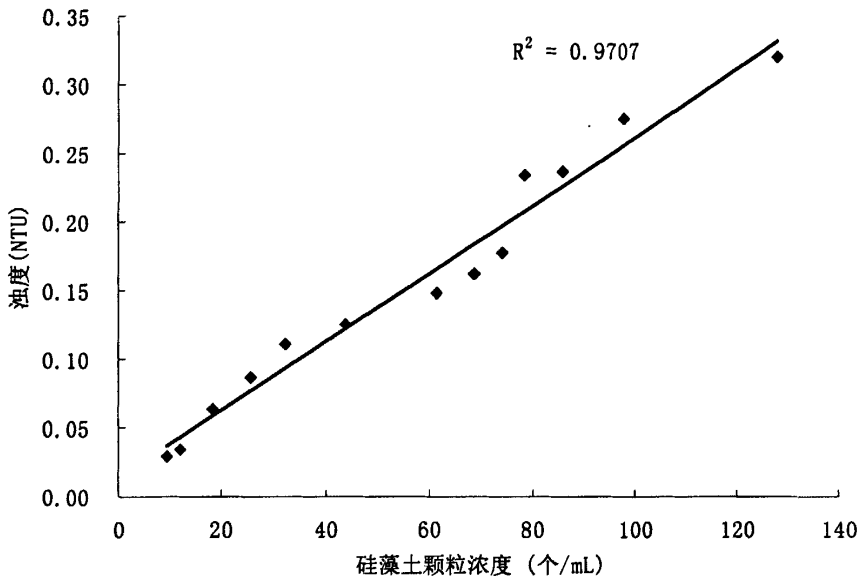
Fig4.6 Relativity between solution volume and particle concentration in mixed solution



### 4.3 颗粒指数、颗粒浓度和浊度相关性

#### 4.3.1 相同颗粒分布溶液颗粒指数、颗粒浓度和浊度的相关性

图 4.7 为硅藻土溶液、高岭土溶液和混合溶液浊度与颗粒浓度的相关性分析图。



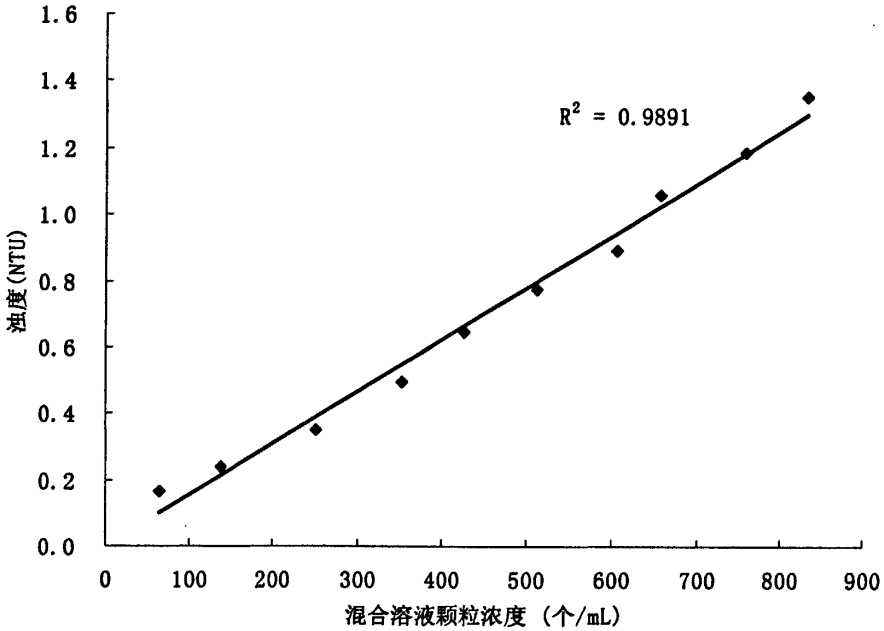


图 4.7 浊度和颗粒浓度相关性

Fig 4.7 Relativity between turbidity and particle concentration in solution

从图 4.7 中可以看出, 硅藻土、高岭土和混合溶液的浊度与颗粒浓度的相关性很高, 其中混合溶液的相关性最高, 相关系数为 0.9891, 其次为高岭土溶液, 相关系数为 0.9838, 相关系数最小的为硅藻土, 相关系数为 0.9707, 随着悬浊液体积的增加, 各个粒径的颗粒个数也相应的按比例增加, 如图 4.4、图 4.5 和图 4.6 所示。各个粒径的颗粒数随着悬浊液的投加量增加而增多, 并且各个粒径的颗粒数与所投加的悬浊液的体积之间有很好的线性关系。浊度仪和颗粒计数仪虽然对不同的粒径的颗粒的灵敏度不同, 但是在这种颗粒形状和表面性质、波长、粒径分布等不变的情况下, 随着悬浊液的体积的增加, 三种仪器的响应值也会随着悬浊液的体积增加按比例的增加。

图 4.8 为硅藻土溶液、高岭土溶液和混合溶液颗粒指数与颗粒浓度平方根的相关性分析图。三种溶液颗粒指数与颗粒浓度平方根都有很高的相关性, 硅藻土溶液颗粒指数与颗粒浓度平方根的相关性为 0.9815, 高岭土溶液为 0.9605, 混合溶液为 0.9695。

图 4.7 和图 4.8 所示的实验都在溶液中的颗粒浓度保证颗粒指数 R 有效输出的条件下进行的。由此可以看出, 在保证颗粒指数 R 有效输出的条件下, 颗粒浓度与浊度、颗粒指数和颗粒浓度的平方根都存在很好的相关性, 相关系数都在 0.96 以上。

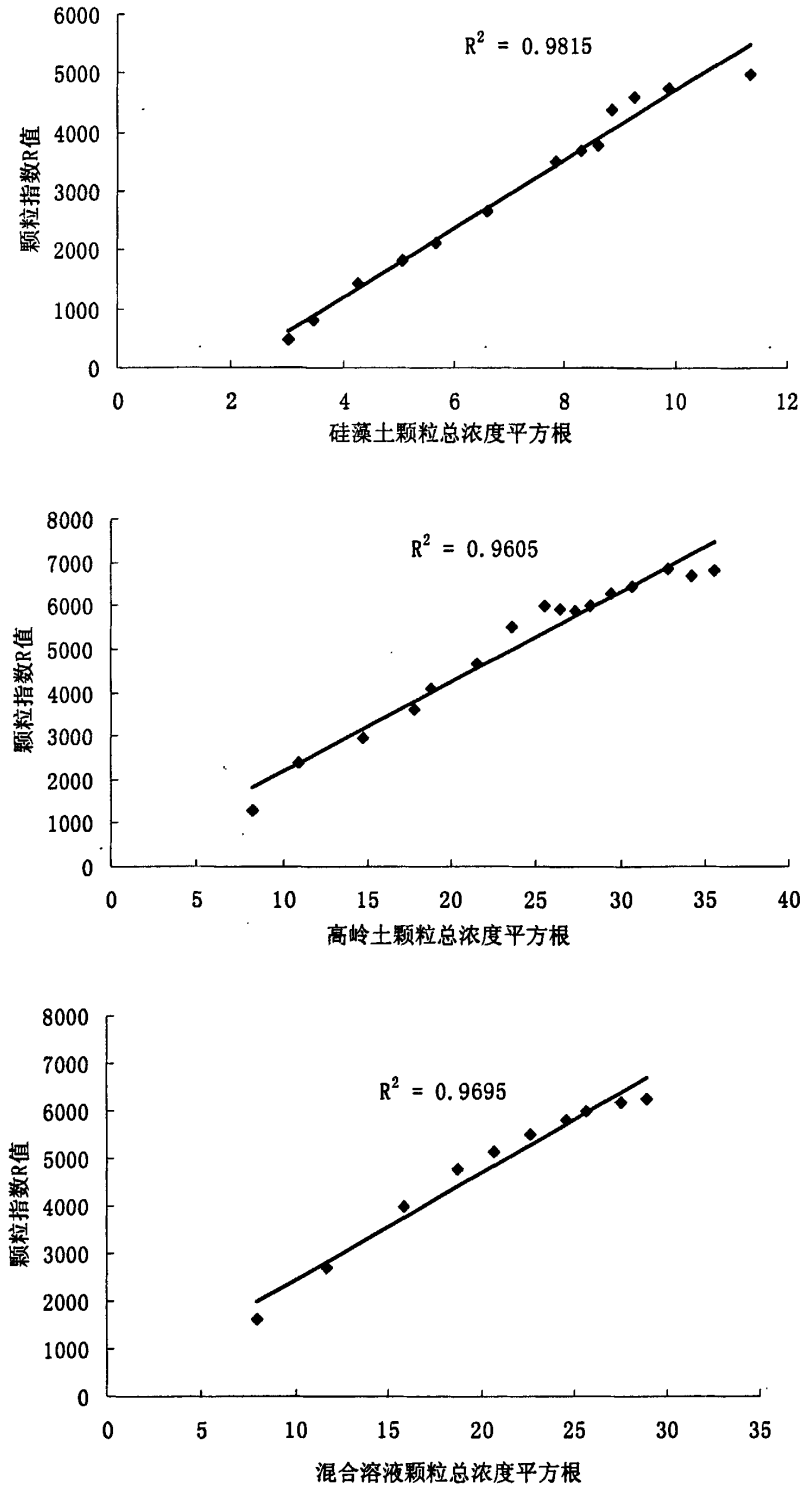


图 4.8 各溶液颗粒指数与颗粒浓度平方根的相关性

Fig 4.8 Relativity between particle index and square root of particle concentration in each solution

### 4.3.2 不同颗粒分布溶液颗粒指数、颗粒浓度和浊度的相关性

图 4.7 和图 4.8 所示的实验为高岭土溶液、硅藻土溶液和混合溶液颗粒指数、颗粒浓度和浊度的相关性实验，在同一相关性实验分析中，水中的颗粒物质是相同的，从图 4.4—图 4.6 中可以看出，实验中各个水样的颗粒分布也几乎是相同的。下面我们来分析不同颗粒物质，不同颗粒分布颗粒指数、颗粒浓度和浊度的相关性。

选择几组水样，他们的颗粒分布不相同，如下面表 4-1，1 号样品为自来水的实验结果。2 号样品为母液体积为 25ml 高岭土的实验结果，3 号样品为加入 5mg/L 混凝剂的高岭土石英砂过滤后水，4 号实验为 100ml 高岭土的过 2 $\mu\text{m}$  膜后水。图 4.4—4.6 中可以看出，他们的颗粒分布各不相同，各个水样中的颗粒物质也不同。以浊度为横坐标，以透光脉动和颗粒总数为纵坐标做图 4.9。

表 4-1 样品信息

Table4-1 sample information

样品号	浊度 (NTU)	颗粒总数 (个/mL)	脉动平方值 (万)
1	0.0101	169.835	11.97
2	0.0884	1143.0252	211.7
3	0.1484	1142.036	126.56
4	0.1592	681.928	95.25

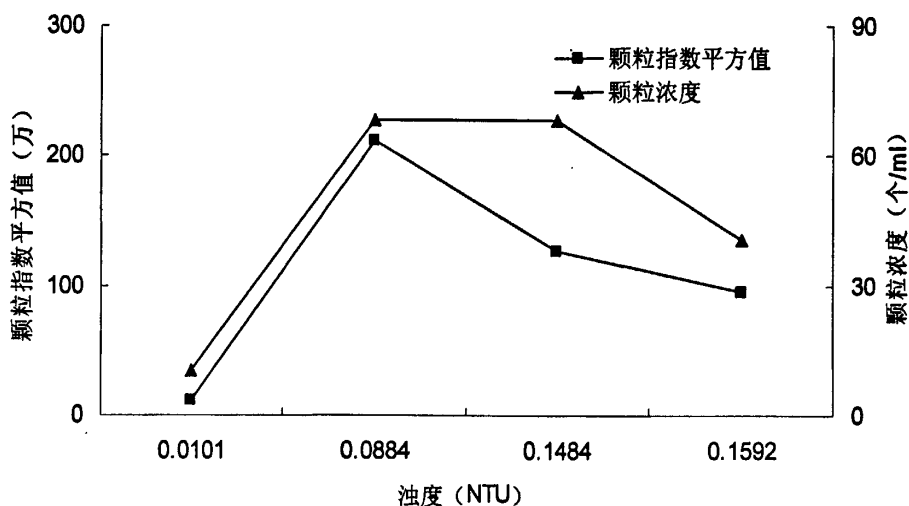


图 4.9 溶液中颗粒指数平方值、颗粒浓度与浊度的相关性

Fig 4.9 Relativity among particle index, square root of particle concentration and turbidity in solution

从图 4.9 中可以看出，在颗粒分布不同的悬浊液中：随着浊度的增加，颗粒指数平方值和颗粒浓度先增加后降低。如 4#水样的浊度几乎是 2#水样的两倍，

但是 4#水样的颗粒指数平方值和颗粒浓度都小于 2#水样。颗粒浓度和颗粒指数平方值有相同的变化趋势，但是两者的相关性也不是很好。出现这种现象的原因是：形成三种仪器响应的颗粒不同。浊度是表征水中悬浮物对光线透过时所产生的阻碍程度的参数，水的浊度主要反映尺寸约  $1\mu\text{m}$  的颗粒，但是形成浊度的颗粒粒径在  $1\text{nm}$  到  $1\text{mm}$  之间。透光脉动技术可以反映出絮凝粒子颗粒尺寸大小及数量，透光脉动对于在粒径大于  $1\mu\text{m}$  以上的微粒是特别适当的。颗粒计数可以对单个颗粒进行检测，检测范围在  $2\mu\text{m}$  以上，可以显示悬浊液中各个粒径范围内的颗粒数目。也就是说粒径约  $1\mu\text{m}$  的胶体是浊度的产生浊度的主要原因，而大颗粒对透光脉动产生较大的影响。4#水样为 100ml 高岭土水样过  $2\mu\text{m}$  的膜虑水，水中较小的颗粒较多，大于  $2\mu\text{m}$  的颗粒大部分都被膜所去除，所以其浊度较大，透光脉动值比较小。2#水样为 25ml 高岭土的实验结果，其小颗粒数 4#水样较少，大于  $2\mu\text{m}$  的颗粒较 4#水样较多。所以其浊度要小于 4#水样，脉动值大于 4#水样。

#### 4.4 本章小结

1. 在所配制的高岭土、硅藻土和两者混合溶液中，浊度能够很好的反映水中颗粒物浓度，浊度与悬浊液体积有很高的相关性，相关系数都在 0.95 以上。

2. 随着悬浊液体积的增加，溶液中各个粒径颗粒也随之增加，悬浊液体积与各个粒径颗粒有很好的相关性。各个粒径颗粒增加的趋势相同，虽然随着悬浊液体积的增加，但是溶液中颗粒的分布是基本不变的。硅藻土溶液、高岭土溶液和混合溶液中  $3\text{-}5\mu\text{m}$  粒径颗粒最多，分别为 37.72%、46.42%和 45.41%。相同质量的高岭土和硅藻土分别溶入水中，水中高岭土的颗粒要多于硅藻土。

3. 在相同颗粒分布系列的悬浊液中，颗粒指数、浊度与颗粒浓度有很好的相关性。硅藻土溶液、高岭土溶液和混合溶液颗粒浓度与浊度的相关性在 0.97 以上，颗粒浓度平方根与颗粒指数的相关性在 0.96 以上。

4. 在不同颗粒分布悬浊液中，颗粒浓度、颗粒指数和浊度的相关性很差，浊度高的悬浊液颗粒指数和颗粒浓度可能反而很少。这是由于三种仪器检测原理和检测方法存在差异。

## 第5章 颗粒检测方法在过滤中应用

透光脉动检测技术和颗粒计数检测技术已经在许多水处理领域得到了研究和应用,在多种水质的处理过程中都可以反映出颗粒的粒径及数量的变化,是很有效的检测和控制技术。本试验串联使用透光脉动检测仪器和常用的颗粒计数检测仪器对微絮凝—直接过滤的滤后水进行检测,在低浊度水条件下,对颗粒检测方法进行比较,同时研究不同过滤影响因素对过滤过程的影响。

在试验研究中,微絮凝—直接过滤工艺生产的滤后水,采用在线颗粒计数检测仪器对滤后水中的颗粒物含量进行在线连续监测,采用浊度仪和脉动检测仪进行间断监测,并记录测定结果。

### 5.1 颗粒检测方法在过滤中的应用

#### 5.1.1 过滤过程中浊度、颗粒指数和颗粒数的变化

下面是在过滤条件为原水高岭土水样,浊度 24NTU,滤速 5.3m/h,混凝剂聚合铝,投药量 22mg/L,滤料为石英砂,厚度为 700mm 的条件下的不同过滤阶段浊度、颗粒指数 R 和颗粒浓度的变化情况。

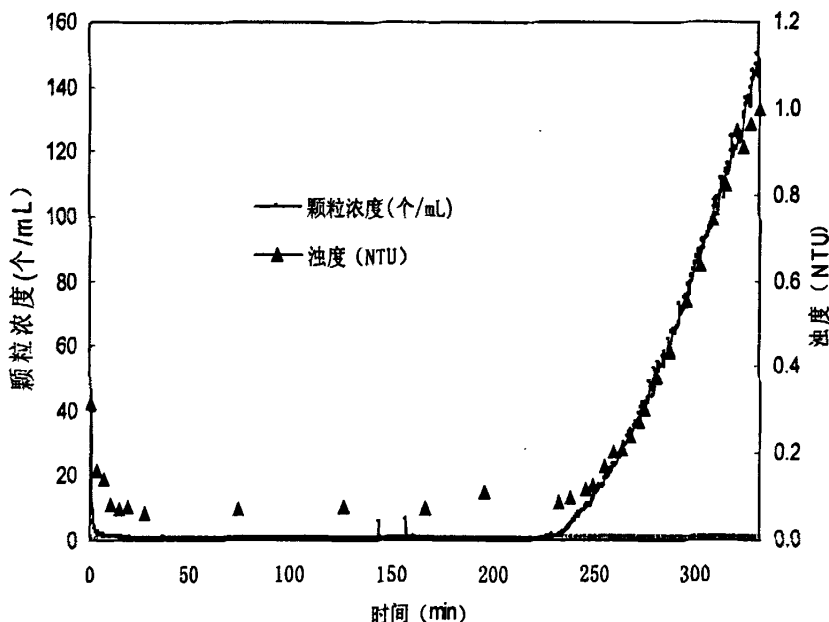


图 5.1 滤后水浊度与颗粒浓度对比

Fig 5.1 Contrast between turbidity and particle concentration in filtered water

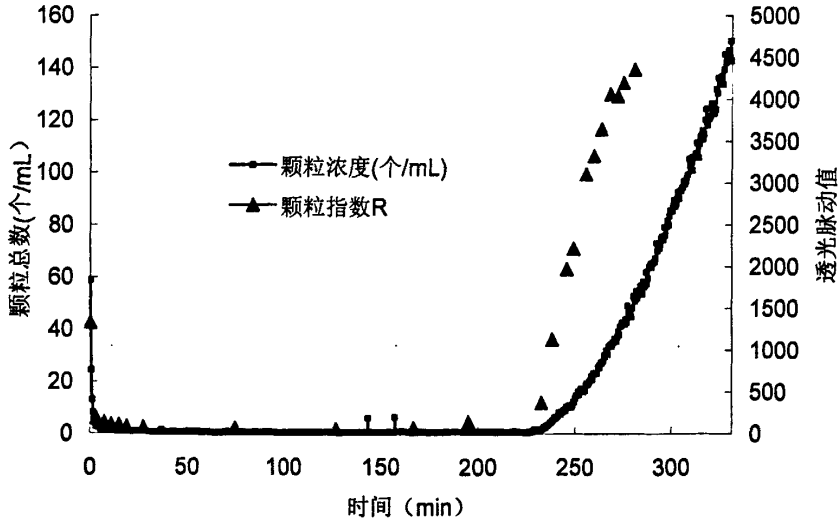


图 5.2 滤后水颗粒指数 R 值和颗粒浓度对比

Fig 5.2 Contrast between particle concentration and particle index R in filtered water

可以从图 5.1 和图 5.2 看出, 过滤开始阶段有一个颗粒数的峰值, 这是由于过滤的初滤水造成的; 随后一段是稳定的过滤阶段, 此时滤后水颗粒数极少, 出水水质很稳定。在过滤的后期, 滤后水颗粒开始出现泄漏现象, 并且颗粒数快速上升, 之后就停止过滤开始反冲洗。可见, 采用颗粒计数检测技术可以非常灵敏地反映出滤后水的水质变化情况。

与此同时, 也对滤后水的浊度值和颗粒指数 R 进行了测定, 相对来说, 正常过滤阶段的浊度值都在 0.1NTU 以下, 颗粒指数也都在 500 以下, 但出现颗粒泄漏后。滤后水浊度也会出现明显的变化, 直至达到 1.0NTU 以上, 颗粒指数也有非常明显的变化, 达到 4500。

从三种数据的总体变化趋势看, 三者变化有很大的相似性, 但是颗粒数和颗粒指数 R 变化的响应时间和幅度都比浊度值的更早更灵敏。因此利用颗粒计数检测技术和颗粒指数来弥补和替代浊度, 做为滤后水的关键性监控指标是完全可行的。

图 5.3 过滤过程中不同时间段的滤后水的颗粒组成, 图中表示的颗粒粒径范围从左到右依次是 2-3 $\mu\text{m}$ 、3-5 $\mu\text{m}$ 、5-8 $\mu\text{m}$ 、8-10 $\mu\text{m}$  和 10-15 $\mu\text{m}$ 。对粒径分布的检测时间分别为开始过滤后的 1min、5 min、112 min 和 258 min, 1 min 和 5 min 在过滤刚开始的成熟期, 112 min 在出水水质最好的有效过滤期, 在过滤 258 min 后, 滤后水开始出现颗粒泄漏。

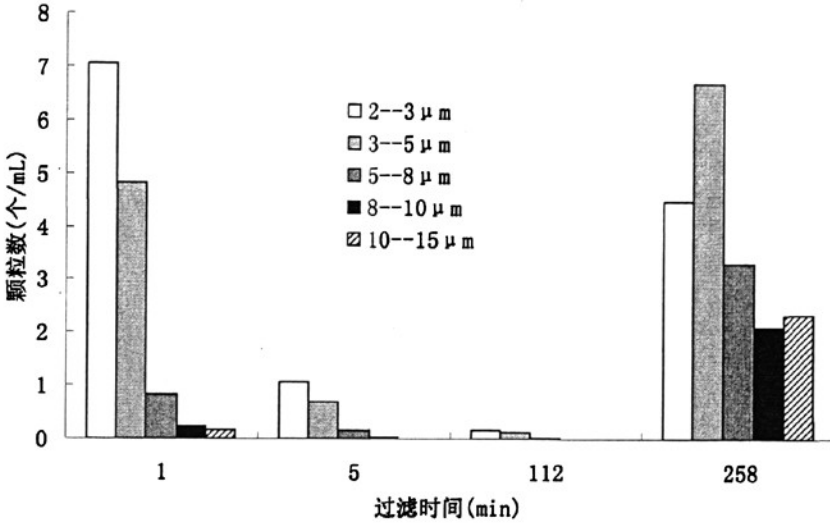


图 5.3 滤后水各粒径范围颗粒浓度

Fig 5.3 Particle concentration of each size scale in filtered water

从图 5.3 中可以看出, 在过滤刚开始的成熟期, 滤后水中颗粒比较多, 主要为 2-3 $\mu\text{m}$  的小粒径颗粒, 占到颗粒总数的 50%。随着过滤过程的继续, 过滤效能逐步体现出来, 各个粒径的颗粒数逐渐减小, 在过滤 5min 后, 滤后水中颗粒物含量迅速降低, 2-3 $\mu\text{m}$  的小粒径颗粒占有的比例也大幅度减小。进入正常过滤运行状态后, 滤后水中的颗粒数量以及各种粒径的颗粒都很少, 从图 5.3 可以看出在过滤 112min 时, 2-3 $\mu\text{m}$  的小粒径颗粒也仅 0.17 个/mL, 而大于 5 $\mu\text{m}$  的颗粒已经得到完全截留。可见, 过滤效果非常好, 滤后水水质极佳。

随着过滤过程的延续, 滤柱在 240min 左右开始出现穿透现象, 滤后水中的颗粒数明显增加, 并呈现大幅度递增的趋势。在第 258min 时的检测结果表明, 滤后水中颗粒数量和各种粒径颗粒的情况都有极大变化, 不但 2-3 $\mu\text{m}$  的小粒径颗粒数量迅速增加, 8-15 $\mu\text{m}$  的大粒径颗粒数也明显增加。

从图 5.3 中还能看到, 正常过滤运行期间, 滤后水中的颗粒主要是小颗粒, 大的颗粒极少; 小粒径颗粒的泄漏可能与混凝状态、滤速、混凝剂投加量等有关, 是评价和表达滤后水水质和过滤效能的关键指标。而在过滤穿透期, 滤后水中各种粒径的颗粒数量和比例都有明显变化, 表明此时的滤后水水质已经严重变差, 尤其是大粒径颗粒数量的迅速增加, 可能会造成隐孢子虫和贾滴虫穿透的可能, 会对滤后水的生物安全性产生严重威胁。



### 5.1.2 过滤过程中浊度、颗粒指数和颗粒数之间的相关性

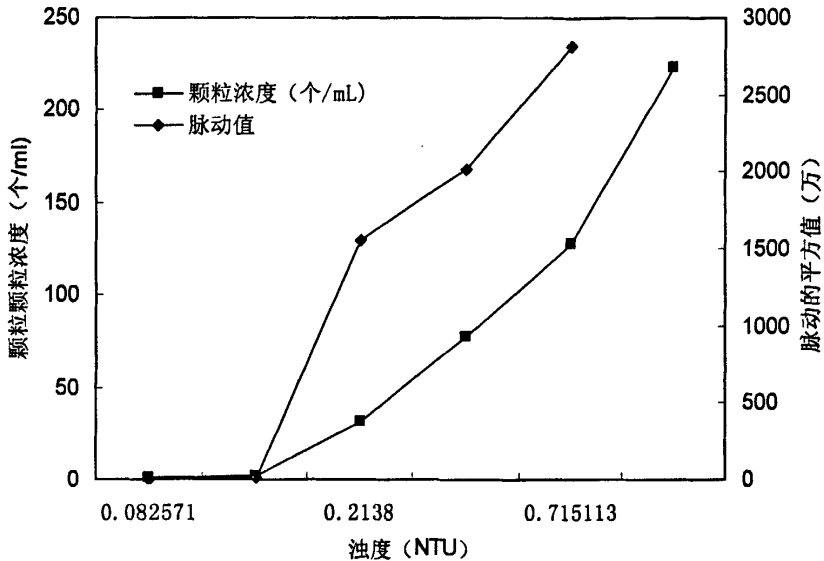


图 5.4 滤后水浊度、颗粒指数和颗粒浓度之间的相关性

Fig5.4 Relativity among curve of turbidity 、particle index and particle concentration in filtered water

图 5.4 为图 5.1 实验滤后水中浊度、颗粒指数和颗粒浓度之间的相关性，选择浊度 0.082、0.15、0.21、0.43、0.71 和 1.04NTU 及其相对应的脉动值和颗粒数。为了研究滤后水的浊度、颗粒指数和颗粒浓度的相关性，以浊度为横坐标，以颗粒指数平方值和颗粒浓度为纵坐标做图。随着过滤的进行，出水的浊度、颗粒指数和颗粒浓度都在增长，三者有共同的增长趋势。从图中可以看出浊度与颗粒指数的平方值和颗粒浓度的相关性也很高，浊度与颗粒指数平方的相关系数为 0.9368，浊度与颗粒浓度的相关系数为 0.8991。在滤后水中，颗粒指数和颗粒浓度与浊度都有很好的相关性，颗粒指数和颗粒计数技术在检测滤后水中颗粒物方面比浊度更早更灵敏。因此可以用透光脉动和颗粒计数来替代浊度作为滤后水质替代参数。

## 5.2 过滤过程的影响因素

1. 滤料，是滤池的核心，明显地影响过滤效果。

### (1) 滤料的材质

滤池依靠滤料表面的吸附特性来吸附水体中的污染物，特别是胶体颗粒。不同材质的滤料，表面电化学性质不同，所以滤料材质对过滤效果有一定影响。但是，被过滤的水体经过混凝处理后，胶体颗粒基本脱稳，表面电位(毛电位)已经

减弱,与滤料表面之间的电荷排斥力较小,所以滤料材质对过滤效果的影响不明显。在过滤过程的中、后期,滤池依靠吸附在滤料表面的浊质来吸附、去除浊质,滤料的作用是骨架支撑作用,滤料材质对过滤效果的影响很微小。

### (2)滤料的粒径

滤池的孔隙率、滤料的表面积都与滤料的粒径有密切关系。滤料粒径大小,直接影响滤池过滤效果。(1)滤料粒径越小,过滤效果越好,同时水头损失的增长速度越大。(2)滤料粒径越大,水体中浊质更容易进入滤池深处,同时浊质容易穿透滤池,滤池出水恶化<sup>[49]</sup>。

### (3)滤料的形状

相同粒径时,形状越不规则,滤池孔隙率和滤料表面积越大。大的孔隙率能容纳更多的浊度物质,大的表面积能吸附更多的悬浮物。所以,不规则滤料的滤池出水水质优于规则滤料的滤池出水,但是水头损失也更大。

### (4)滤池深度

滤池过滤过程是深层过滤,水体中浊质进入滤池深处,并被滤料截留。滤池深度越大,滤池出水水质越好,同时滤池的水头损失越大,所以适当的滤池厚度是保证滤池出水合格的前提,也是滤池维持足够工作时间的保证。

滤池厚度不是越大越好:(1)水体中存在一些悬浮颗粒,它们很难被滤池吸附、去除,增大滤池深度对它们的去除效果不明显;(2)滤池上层截留的悬浮物量很大,使滤池孔隙堵塞时,滤池过滤水头损失增长迅速,这时维持正常过滤的水头损失很大,滤池深处的滤料的吸附、截留作用基本没有被使用。粒径小的滤料组成的滤池的孔隙尺寸比较小,滤料的比表面积较大,需要的滤池深度比较小;粒径大的滤料组成的滤池,需要的滤池深度比较大,才能保证合格的出水水质、足够的工作周期。

## 2.过滤速度

一般认为,滤速越大,穿透深度也越大,因而需要的滤层厚度也越大。Stanley提出在其它条件相同时,穿透浓度与滤速 $v$ 的1.56次方成正比,而Hudson认为穿透深度与滤速 $V$ 的一次方成正比例关系。1978年Tate等人报导在其他过滤条件相同的情况下增加滤速导致滤后水中杂质颗粒的增加。1992年Clark等人发现随着滤速的增加,水中杂质颗粒的去除率下降。1993年Moran等人的研究也得到了同样的结果,但如果采用其它辅助措施,将会减弱上述因滤速加大而带来的负面影响。1968年,Tuepker等人研究发现,滤速的增加要避免突然,应从开始增加到达到预定滤速经过10min逐渐增加,滤速的提高可通过一个滤速控制器或慢开阀。如果水经过了适当的预处理,或者通过滤层的速率适当,滤速不发生突然变化、不控制滤速的情况下,从滤层底部直接过滤可能对水质没有决定性的影响<sup>[50-52]</sup>。

## 3.混凝性能

### (1) 混凝剂的混凝性能

投加混凝剂后, 水体中胶体颗粒的脱稳, 絮凝性能直接影响过滤的出水水质。不同混凝剂的混凝效果可能有很大差别, 由于投加入水体后, 它们的水解产物不同, 混凝机理不同, 去除水体中浊质的能力也不同。Al 核磁共振法(NMR)测定显示, 硫酸铝中没有  $Al_{13}$ , 而 PAC 中  $Al_{13}$  为主要成分<sup>[53]</sup>。 $Al_{13}$  聚合态是混凝过程中的最有效成分,  $Al_{13}$  形态具有高电荷、高聚合度, 与硫酸铝相比, 有更强的电中和能力, 强烈的吸附能力, 去除浊度物质的能力更强<sup>[54]</sup>。对于低浊源水, 采用 PAC 代替硫酸铝, 投药量可大大降低<sup>[55]</sup>。

### (2) 混凝剂的投加量 M

混凝剂的投加量 M 对直接过滤的最佳过滤周期有显著影响。试验表明, PAC 的稍低或者稍高的投加量将显著影响出水水质和过滤周期<sup>[56]</sup>。投药量过多, 形成过多过大的絮凝体, 易造成滤料表层过滤, 不能充分发挥整个滤料层的截污能力, 使水头损失增长过快; 药量不足, 则形成的絮凝体过小, 易穿透滤层, 影响滤后水质。最佳投药量应通过试验确定, 一般投药量低于 10mg/L, 约是常规处理工艺的 1/2-2/3。

## 4. 原水水质

对于湖泊、水库, 浊度较低、细菌含量较少, 但是营养物较多, 特别是某些受到生活污水或工业废水影响的水体, 在春夏交接和夏季, 藻类等水生生物会大量繁殖, 水质受到严重影响。对于这种浊度主要由藻类引起的源水, 水体的乙电位较高, 且具有较高稳定性, 因此凝聚剂对悬浮颗粒脱稳效果较差, 微絮体强度较弱, 易穿透滤层; 高藻期源水耗氧量可达 10-12mg/L, 水中有机质增多, 特别是形成腐殖质, 会严重干扰混凝处理; 藻类的繁殖, 使源水 pH 值增高(8.5-9.5), 在 pH>9 时, 氢氧化铝的溶解度达到若干 mg/L<sup>[57]</sup>, 而溶解态的氢氧化铝是没有絮凝作用的。

## 5.3 不同原水浊度对过滤的影响

### 5.3.1 不同原水浊度过滤过程中浊度、颗粒指数和颗粒数的变化

原水为高岭土水样, 混凝剂为 PAC, 加药量为 22mg/L, 滤速为 5.3m/h, 滤料为石英砂, 厚度为 700mm。图 5.1、图 5.2、图 5.4 和图 5.5 分别为原水浊度为 24、15 和 34NTU 时的过滤过程中浊度、颗粒指数和颗粒数的变化曲线。

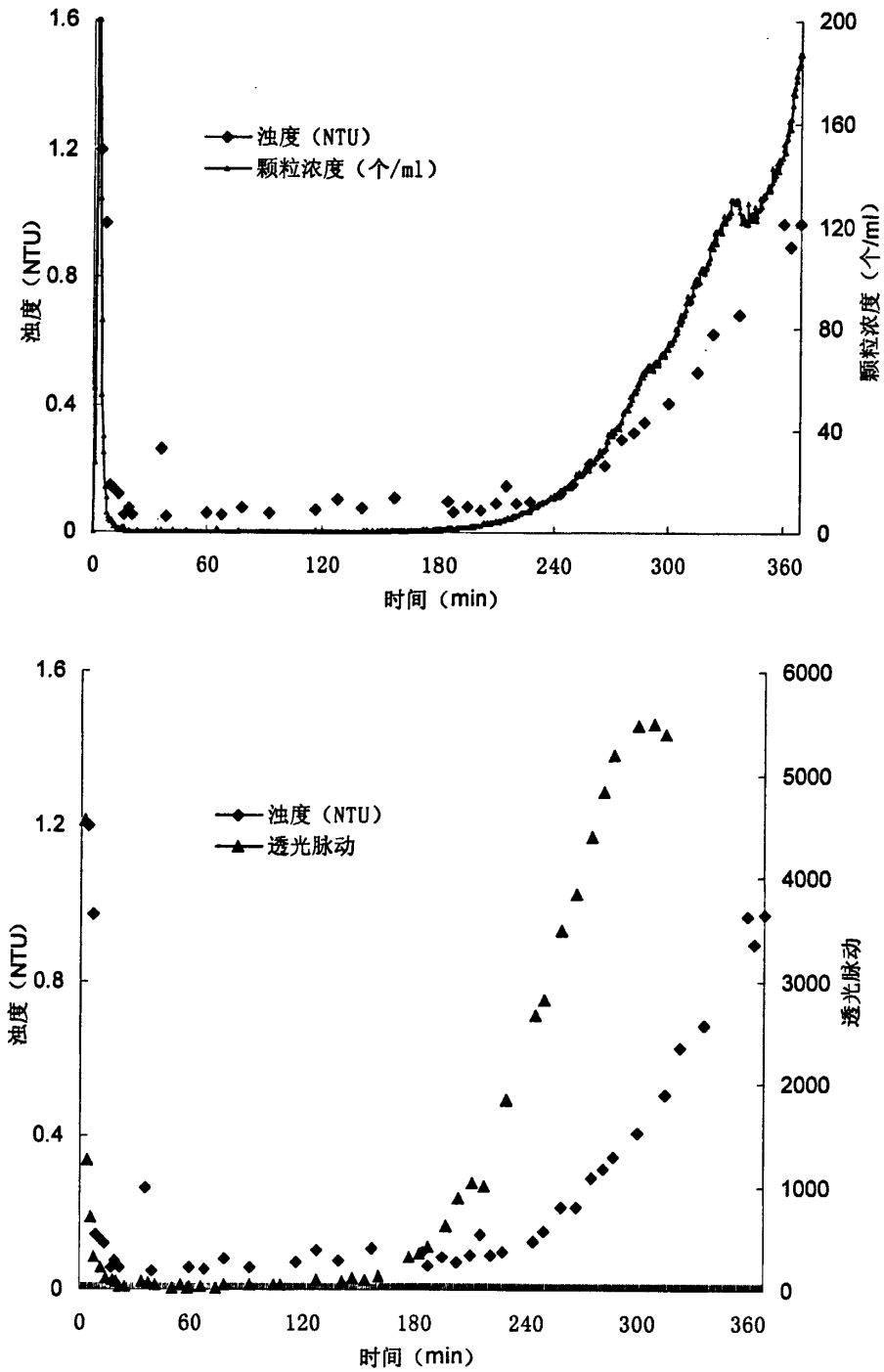


图 5.5 原水浊度为 15NTU 时滤后水浊度、颗粒指数和颗粒浓度

Fig5.5 Curve of turbidity 、 particle index and particle concentration in filtered water when influent turbidity remaining 15 NTU

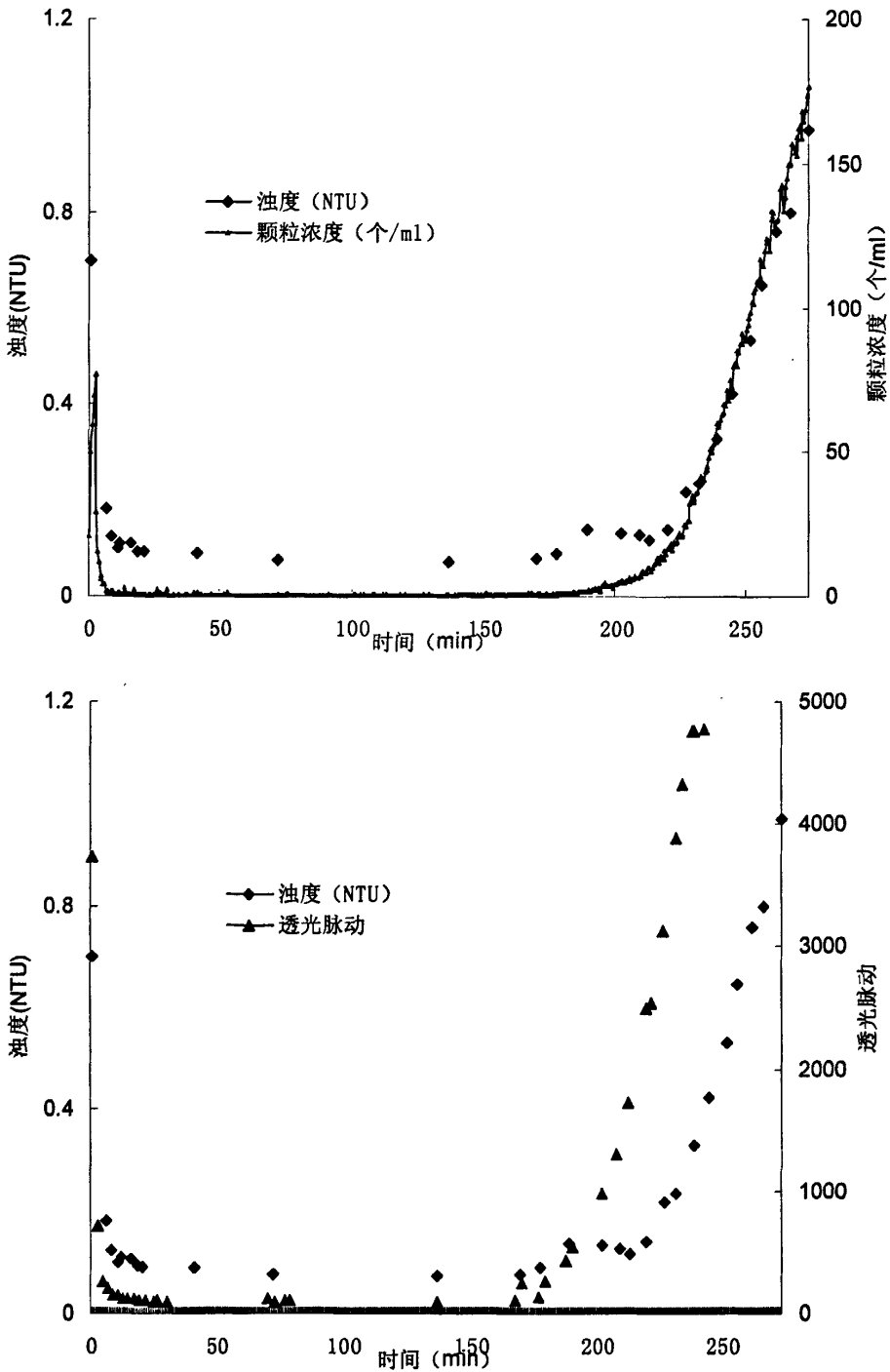


图 5.6 原水浊度为 34NTU 时滤后水浊度、颗粒指数和颗粒浓度

Fig5.6 Curve of turbidity 、particle index and particle concentration in filtered water when influent turbidity remaining 34 NTU

从图 5.1、图 5.2、图 5.5 和图 5.6 中可以看出,透光脉动仪和颗粒检测仪更早更灵敏反映出过滤后期水中颗粒物的含量,三种仪器都监测到了过滤的整个过程:过滤刚开始的成熟期、出水水质最好的有效过滤期和颗粒泄漏期。在颗粒泄漏期颗粒数和颗粒指数  $R$  变化的响应时间和幅度都比浊度值更早更灵敏。在正常过滤期,浊度都小于 0.1NTU,颗粒指数都小于 500,而颗粒数都在 1 个/ml 以下,表明滤后水水质很好。随着原水浊度的增大,滤池的运行时间是不不断减小的,当原水浊度为 15NTU 时,滤池运行到 234min 时开始出现颗粒泄漏,同时浊度、颗粒指数和颗粒数也相应的增加,在滤池运行到 368min 时浊度达到 1NTU 即停止过滤进行反冲洗。原水浊度为 25NTU 时,在 331min 时浊度达到 1NTU。而原水浊度为 34NTU 是,在 274min 时浊度达到 1NTU。由于原水浊度的增加,随着过滤的进行,进入滤池的悬浮固体量也在增加,滤层表面和滤层中的空隙堵塞的速度也随着加快,造成水头损失不断增大,滤层中水流的剪切力增大,当被滤料截留的颗粒不能承受增大的剪切力时,颗粒就从滤料上脱落下来,就会出现颗粒从滤层中泄漏的现象,原水浊度越大,出现颗粒泄漏的时间也就越早。

### 5.3.2 原水浊度对滤后水中颗粒粒径分布影响

从前面的实验已经知道原水浊度对滤后水的影响很大,图 5.7 是三种原水浊度在过滤 10-60min 滤后水的颗粒总数变化情况。

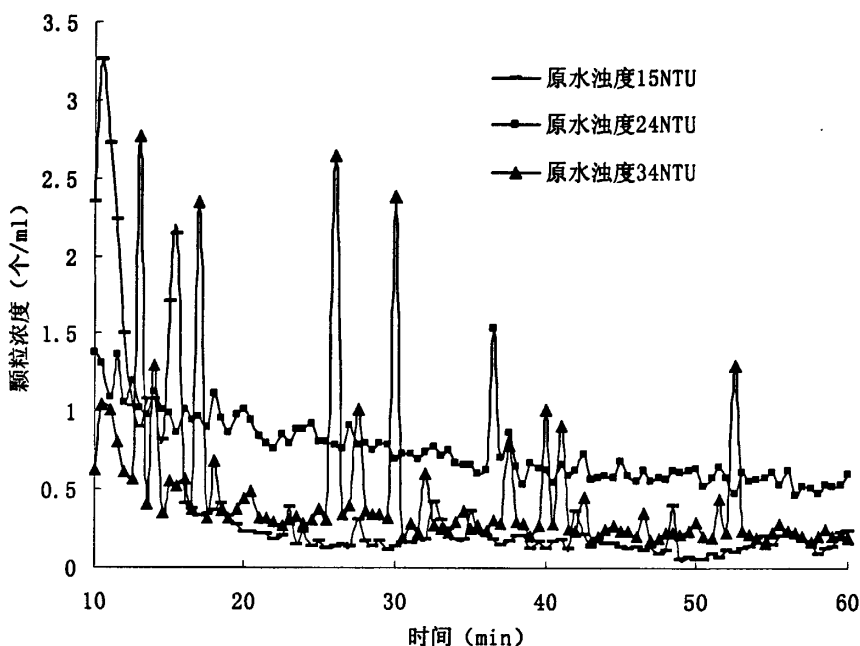


图 5.7 三种原水浊度滤后水的颗粒浓度变化曲线

Fig5.7 Curve of particle concentration in filtered water for three influent turbidity

尽管在三种原水浊度下滤后水的浊度基本相同,但是从图 5.7 中可以看出滤

后的出水颗粒还是存在差别的,在原水浊度为 15NTU 和 34NTU 的情况下,滤后水的颗粒数要少于原水浊度为 24NTU 时,但是当原水浊度为 34NTU 时出水颗粒存在很大的波动。当原水为 34NTU 时,滤料上泥膜形成的时间要比前边两种情况要早,而且水头损失增长也比较快,根据过滤理论,颗粒不断的被滤料截留,被截留的颗粒不断的堵塞滤料,使滤料的空隙率变小,所以借筛除作用能截留很小的固体颗粒,因此出水的颗粒数也减小,这就是为什么原水浊度为 34NTU 时,滤后水的水质要好于原水浊度为 24NTU 时的原因。从图 5.7 中还可以看出,尽管在出水稳定的有效过滤期,出水的颗粒数还是出现很大的波动,特别是原水浊度为 34NTU 时,出水的颗粒数波动最大。

图 5.8 为不同原水浊度颗粒泄漏期时出水不同粒径的颗粒分布,为了便于分析,分别对滤出水颗粒达到 50 个/mL 数据进行分析。因为美国很多给水厂对滤池出水中大于  $2\mu\text{m}$  颗粒物的数量都控制在 50 个/mL 以下。

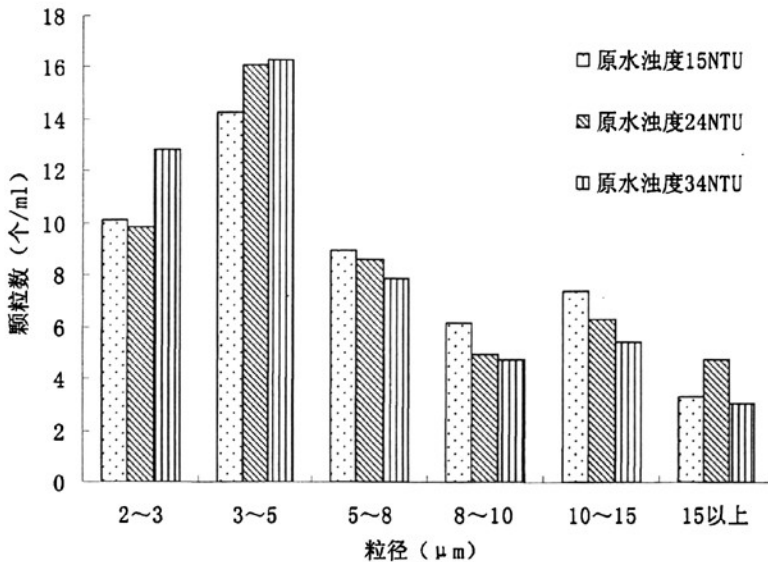


图 5.8 三种原水浊度滤后水各粒径范围颗粒浓度

Fig 5.8 Particle concentration of each size scale in filtered water for three influent turbidity

从图 5.8 中可以看出,三种原水浊度情况下,在颗粒泄漏期颗粒的泄漏以小粒径颗粒为主,2-5 $\mu\text{m}$  粒径颗粒所占的比例都在 65% 以上。而且随着原水浊度的增加,小颗粒所占比例也随之增加,但是增加的幅度并不大。原水浊度为 15NTU、24NTU 和 34NTU 时,2-5 $\mu\text{m}$  粒径颗粒所占的比例分别为 66%、69% 和 73%。而且可以从图中清楚的看出来,当颗粒粒径小于 5 $\mu\text{m}$  时,滤出水的颗粒数随着原水浊度的增大而增大,当颗粒粒径大于 5 $\mu\text{m}$  时,则相反。

## 5.4 加药量对过滤效能影响

### 5.4.1 加药量对滤后水中颗粒数影响

混凝剂的投加量对直接过滤有显著影响。原水为高岭土水样，浊度为24NTU，混凝剂为PAC，滤速为5.3m/h，滤料为石英砂，厚度为700mm。图5.1、图5.9和图5.10分别为PAC投加量为3.67mg/L、14.67mg/L和22mg/L的滤后颗粒出水曲线。

从图5.1、图5.9和图5.10可以看出，加药量为3.67mg/L时，到过滤448min还没有出现颗粒泄漏，而水头损失到达出水口，停止过滤进行反冲洗。当加药量增加到14.67mg/L，过滤周期减小到了440min，终止过滤的原因也是由于水头损失达到了出水口。继续增加投药量到22mg/L时，过滤周期减小到了331min，出现颗粒泄漏，当浊度到达1NTU时停止过滤进行反冲洗。本次实验采用直接过滤的方式，原水投加混凝剂混凝一段时间立即送入滤池进行过滤，中间没有沉淀环节。在实验中可以观察到当加药量为3.67和14.67mg/L时，进入滤柱的水中的颗粒粒径很小，只观察到很细小的矾花。而加药量为22mg/L时，可以明显观察到滤柱中有大块的絮凝体。大而松散的絮体会随着水流剪切力的增大而破碎，易造成颗粒泄漏。

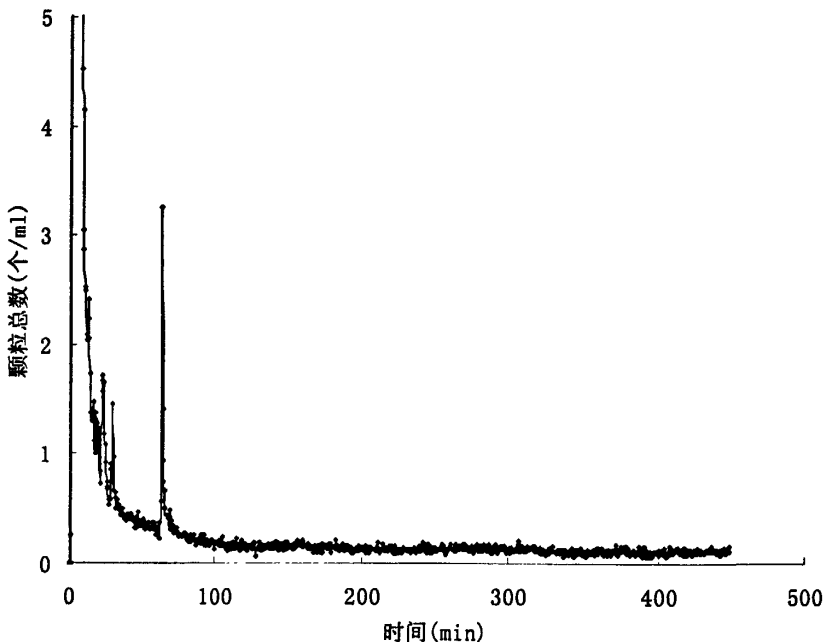


图 5.9 加药量为 3.67mg/L 时过滤滤后水颗粒浓度曲线

Fig5.9 Curve of particle concentration in filtered water when injected dose of PAC remaining 3.67mg/L



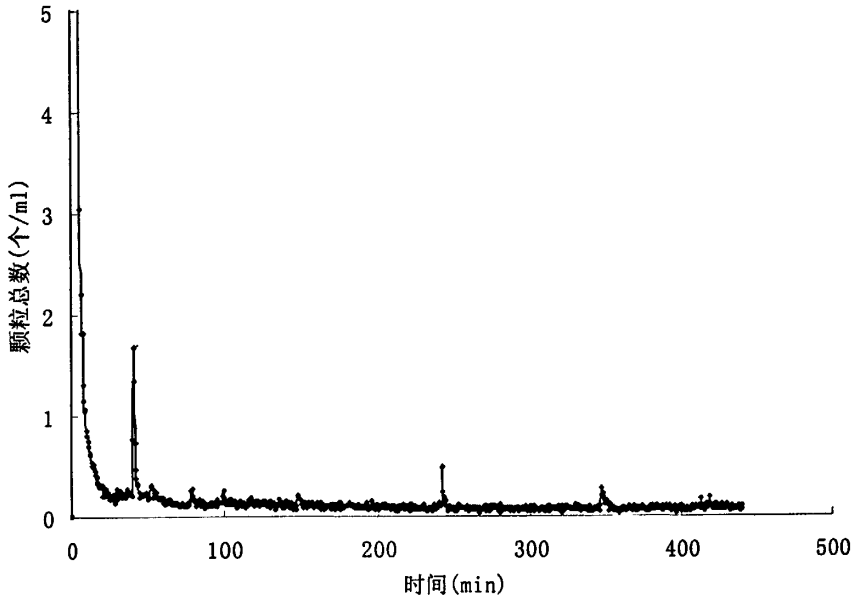


图 5.10 加药量为 14.67mg/L 时过滤后水颗粒浓度曲线  
Fig5.10 Curve of particle concentration in filtered water when injected dose of PAC remaining 14.67mg/L

#### 5. 4. 2 加药量对滤后水中颗粒的粒径分布影响

图 5.10 是三种加药量过滤 10-60min 滤后水的颗粒总数变化情况。

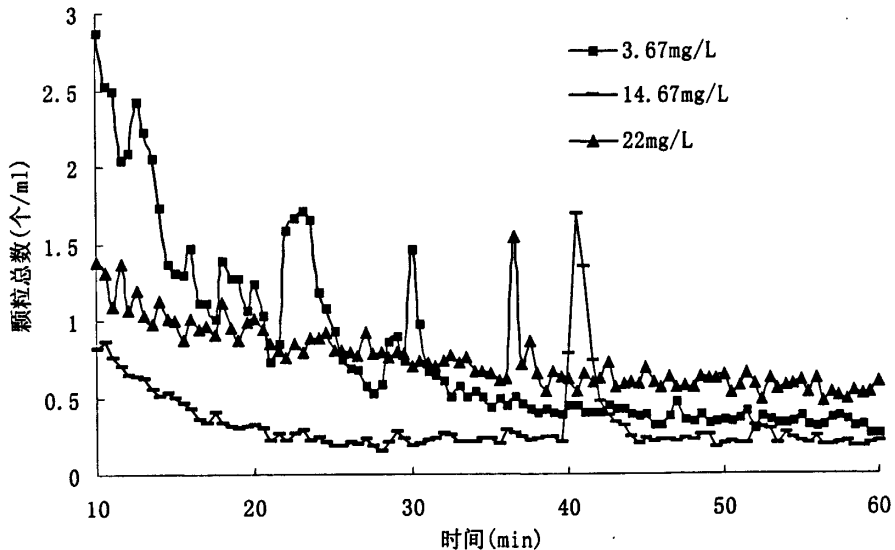


图 5.11 三种加药量滤后水的颗粒浓度变化曲线  
Fig5.11 Curve of particle concentration in filtered water for three PAC dose  
从图 5.11 中可以看出，当加药量为 14.67mg/L 时，滤后出水的颗粒数最少，

当加药量为 22mg/L 时出水颗粒最多,但是三者相差不大,都小于 1 个/ml。但是 22mg/L 加药量的实验颗粒数下降最快,在过滤 10min 时已经稳定在 1 个/ml 左右,而 3.67mg/L 加药量的实验颗粒下降的最慢,在 10-20min 从 3 个/ml 逐渐降到 1 个/ml, 14.67mg/L 加药量的实验颗粒下降速度介于两者之间。当加药量为 14.67mg/L 时,形成的絮体颗粒不仅结构密实,而且吸附活性强,以至于当水头损失达到最大的时候也没有发生“崩塌”而产生泄漏。当加药量为 3.67mg/L 时,形成的絮体颗粒虽然可能比较密实,但是可能由于吸附性不强,所以随着过滤的进行,颗粒数较 14.67mg/L 的加药量偏大。而加药量为 22mg/L 时成的絮体颗粒不仅结构松散,而且吸附活性弱,以至于随着剪切力的增大,最后出现了颗粒的泄漏情况。加药量与进水水质、温度、PH 值和进水浊度等因素有关。必须通过实验获得最佳的投加量。

## 5.5 滤料种类对过滤效能影响

滤池依靠滤料表面的吸附特性来吸附水体中的污染物,特别是胶体颗粒。不同材质的滤料,表面电学性质不同,所以滤料材质对过滤效果有一定影响。

### 5.5.1 不同种类滤料过滤过程中浊度和颗粒数的变化

原水为高岭土水样,浊度为 24NTU,混凝剂为 PAC,加药量为 22mg/L,滤速为 5.3m/h,厚度为 700mm。图 5.1、图 5.2、图 5.12 和图 5.13 分别为滤料种类为石英砂、无烟煤和双层滤料的滤后浊度、颗粒指数和颗粒浓度曲线。双层滤料为上层石英砂,厚度 300mm,下层无烟煤,厚度 400mm。

所用石英砂  $d_{10} = 0.2224$ ,  $d_{80} = 0.6126\text{mm}$ ,不均匀系数  $K_{80} = 2.75$ ,无烟煤  $d_{10} = 0.3215$ ,  $d_{80} = 0.8124\text{mm}$ ,不均匀系数  $K_{80} = 2.52$ ,双层滤料分别采用与上述滤料相同的粒径级配。从图 5.1、图 5.2、图 5.12 和图 5.13 可以看出在原水浊度为 24NTU,加药量为 22mg/L 等条件相同的条件下,石英砂滤料过滤在 331min 时滤后水的浊度达到 1NTU,无烟煤和双层滤料分别在 297 和 291min 时滤后水的浊度达到 1NTU。过滤理论认为粗滤料由于空隙率大,所能容纳的悬浮固体量比细滤料要大。但是由于当加药量为 22mg/L 时,形成的絮体比较大而松散,吸附力不强。并且无烟煤滤料粒径较大,滤层中的空隙也比较大,随着过滤的进行,絮体不断在滤料表面和滤层中沉积,滤层表面和滤层中的空隙率不断变小,水头损失不断增大,由于在沉积的絮体颗粒比较松散,随着水头损失的不断增大,已截留浊质会发生“崩塌”而出现颗粒泄漏现象。

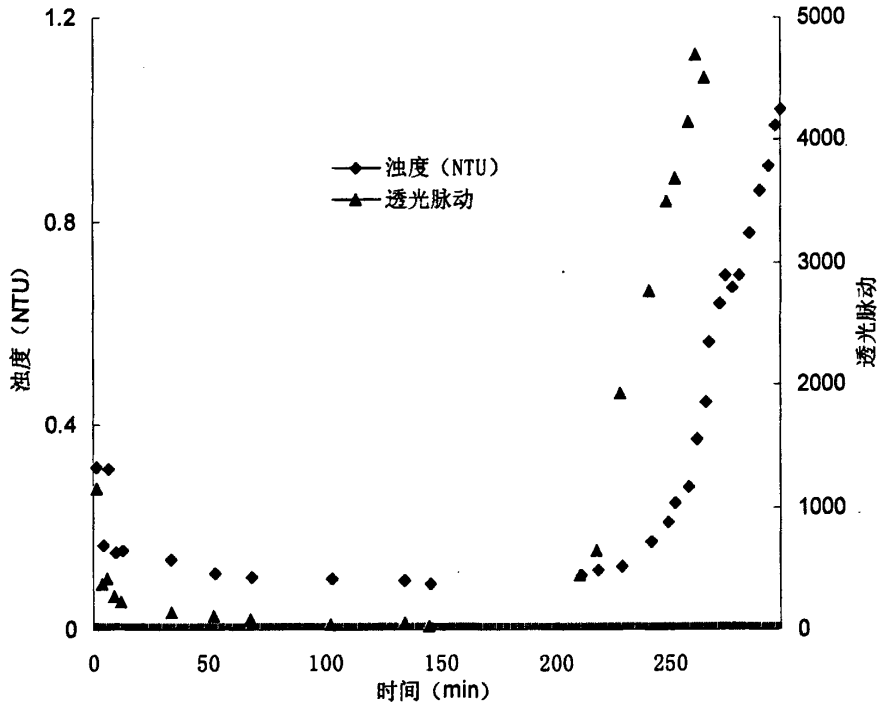
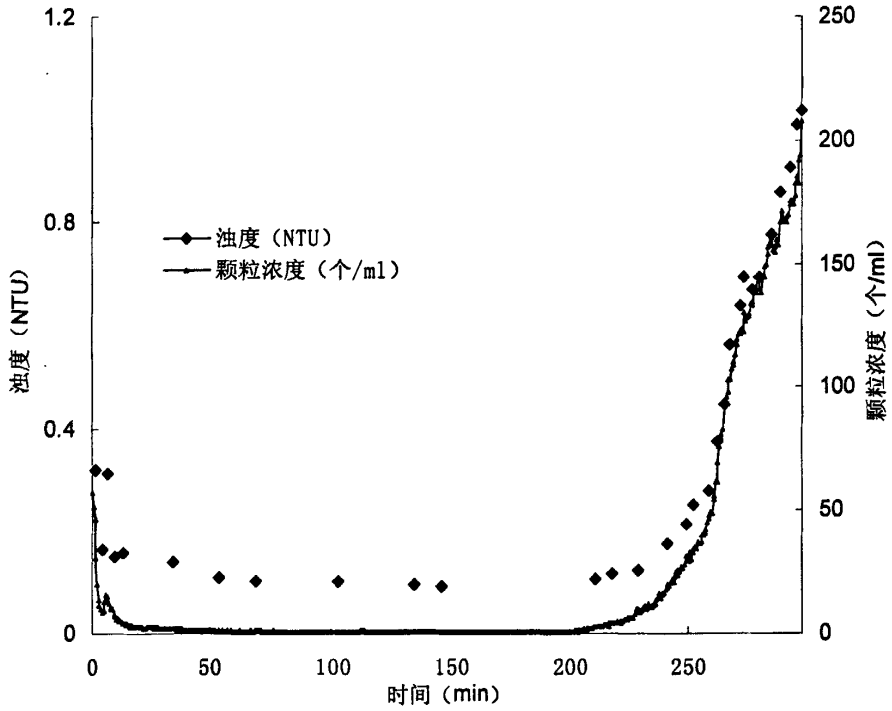
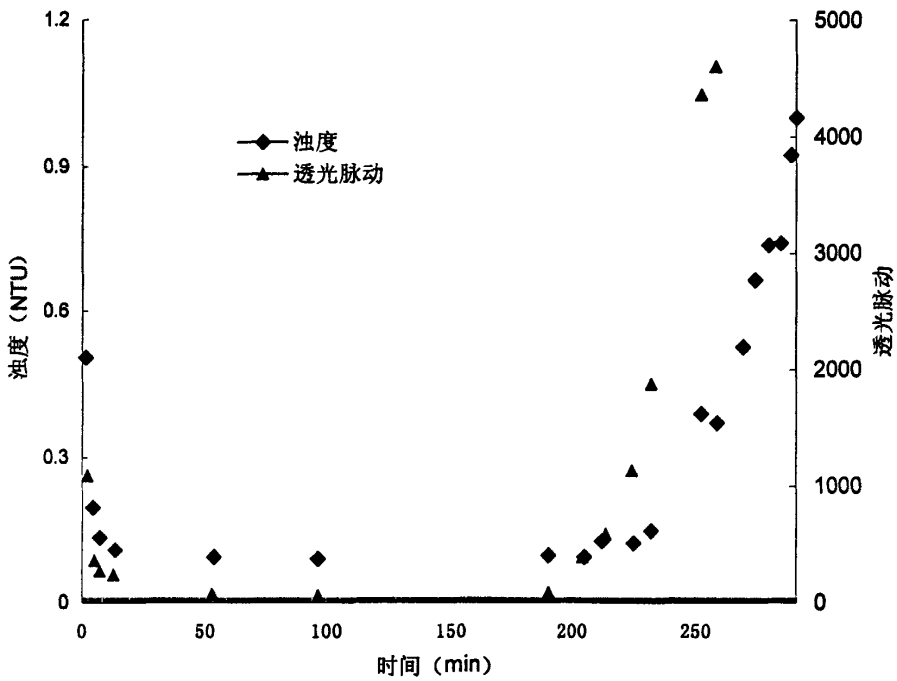
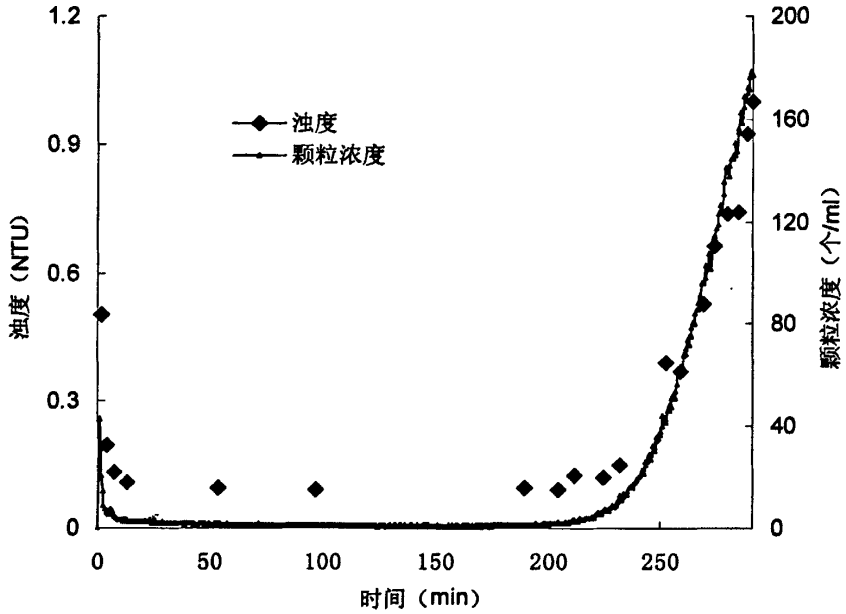


图 5.12 无烟煤滤料滤后水浊度、颗粒指数和颗粒浓度的变化曲线

Fig5.12 Curve of turbidity 、 particle index and particle concentration for anthracite filter



5.13 煤砂双层滤料滤后水浊度、颗粒指数和颗粒浓度的变化曲线

Fig5.13 Curve of turbidity 、particle index and particle concentration for coal-sand dual media filter

## 5.5.2 不同种类滤料滤后水中颗粒的粒径分布

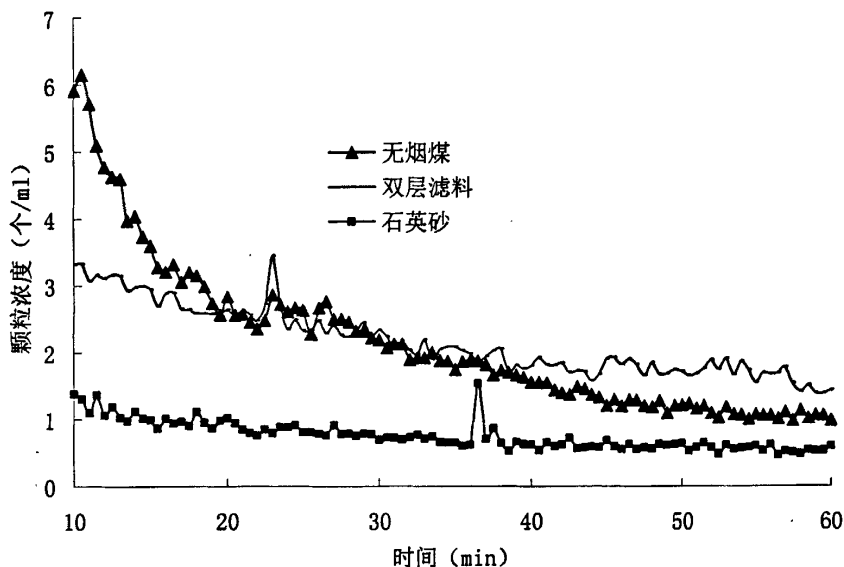


图 5.14 三种滤料滤后水的颗粒浓度变化曲线

Fig5.14 Curve of particle concentration in filtered water for three kind of media

图 5.14 为过滤开始 10-60min 滤后水颗粒数的变化曲线，从图中可以看出，以无烟煤为滤料的滤柱出水 10-60min 中颗粒数最多，而且在 10-60min 颗粒数的变化比较大，随着过滤的进行从 7 个/ml 减小到 1 个/ml。双层滤料滤柱出水颗粒数在 10-60min 时比无烟煤要少，介于无烟煤和石英砂滤料之间，而且出水颗粒的波动比较小，随着过滤的进行，颗粒数从 4 个/ml 减小到 1 个/ml，石英砂滤柱出水颗粒数最少，而且颗粒数的波动也最小，在 10-60min 基本维持在 1 个/ml 左右。无烟煤和双层滤料在 10-60min 还处于过滤的成熟期，随着过滤的进行，出水的颗粒数还在不断的减小，而石英砂滤料已经处在了正常过滤阶段，也就是说石英砂滤池成熟期最短。由于无烟煤滤料的粒径较大，滤层中的空隙也比较大，所以出水的颗粒数比较多。石英砂滤料则相反。

图 5.15 为不同滤料种类过滤实验颗粒泄漏期时出水不同粒径的颗粒分布，为了便于分析，分别对滤出水颗粒到达 50 个/ml 数据进行分析。因为美国很多水厂对滤池出水中大于  $2\mu\text{m}$  颗粒物的数量都控制在 50 个/ml 以下。

图 5.15 中可以看出，三种滤料滤柱在颗粒泄漏期，泄漏的颗粒以小颗粒为主， $2-8\mu\text{m}$  的颗粒，无烟煤滤柱出水的颗粒数最多，占泄漏总颗粒数的 78%，双层滤料次之为 76%，石英砂最少，占泄漏总颗粒的 69%。无烟煤和双层滤料出水颗粒粒径分布比较接近。

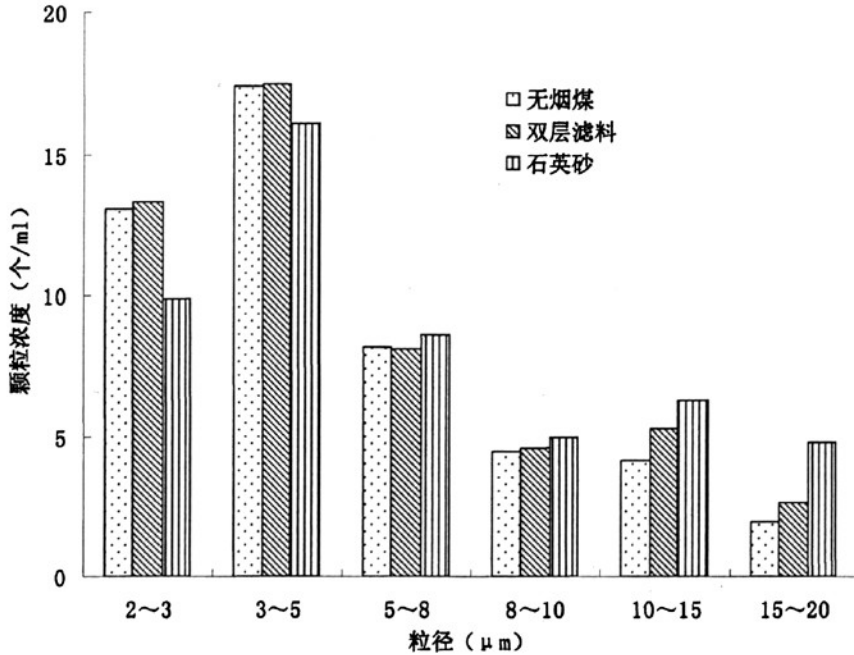


图 5.15 三种滤料滤后水各粒径范围颗粒浓度

Fig 5.15 Particle concentration of each size scale in filtered water for three kind of media

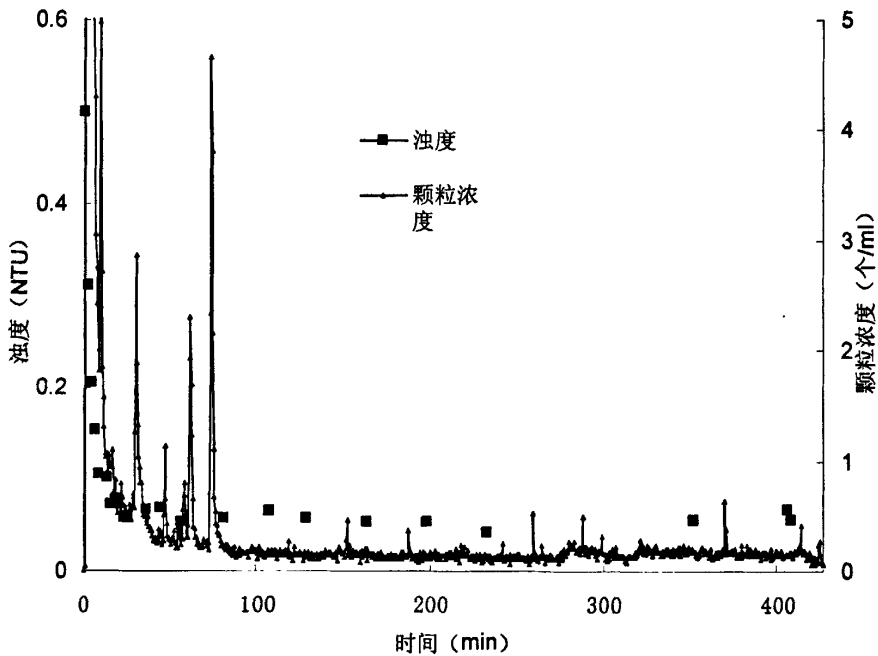
## 5.6 混凝剂种类对过滤效能影响

投加混凝剂后, 水体中胶体颗粒的脱稳, 絮凝性能直接影响过滤的出水水质。不同混凝剂的混凝效果可能有很大差别, 由于投加入水体后, 它们的水解产物不同, 混凝机理不同, 去除水体中浊质的能力也不同。

### 5.6.1 不同种类混凝剂过滤过程中浊度和颗粒数的变化

原水为高岭土水样, 浊度为 24NTU, 加药量为 22mg/L, 滤速为 5.3m/h, 滤料为石英砂, 厚度为 700mm。图 5.1、图 5.2 和图 5.16 分别为 PAC 和硫酸铝的滤后浊度、颗粒指数和颗粒浓度曲线。

从图 5.1、图 5.2 和图 5.16 中可以看出, 在加药量都为 22mg/L 的情况下, 以硫酸铝为混凝剂的过滤时间为 427min, 在过滤过程中, 滤后水的浊度和颗粒浓度均一稳定, 最后由于水头损失达到出水口而停止过滤进行反冲洗, 以聚合氯化铝为混凝剂的过滤时间为 274min, 最后由于滤后水的颗粒泄漏使浊度达到 1NTU 停止过滤进行反冲洗。本实验采用直接过滤方式, 在实验中可以观察到以硫酸铝为混凝剂时滤柱中形成的较为细小的矾花, 而以聚合氯化铝为混凝剂时可以在滤柱中看到大而松散的矾花, 这就是造成两组实验不同结果的原因。



5.16 硫酸铝为混凝剂滤后水浊度和颗粒浓度变化曲线

Fig5.16 Curve of turbidity and particle concentration for aluminum sulfate

## 5.6.2 不同种类混凝剂滤后水颗粒粒径分布

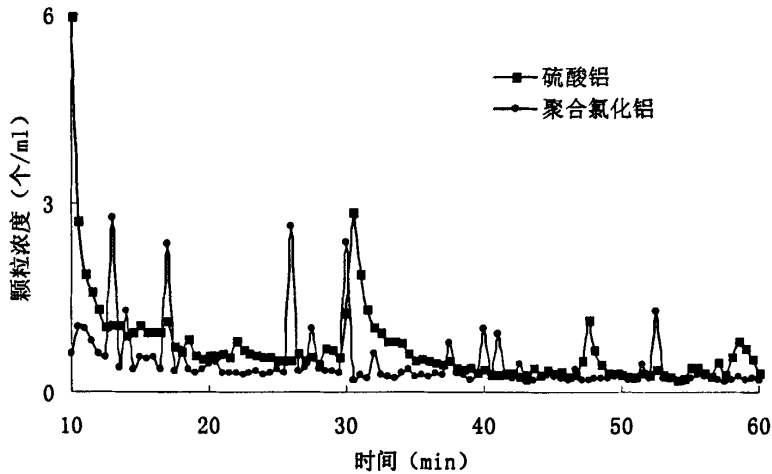


图 5.17 硫酸铝和 PAC 滤后水的颗粒浓度变化曲线

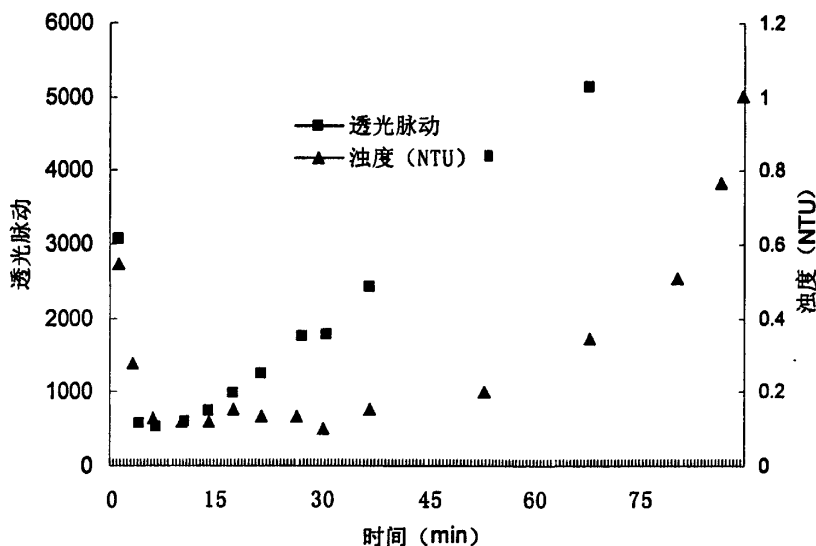
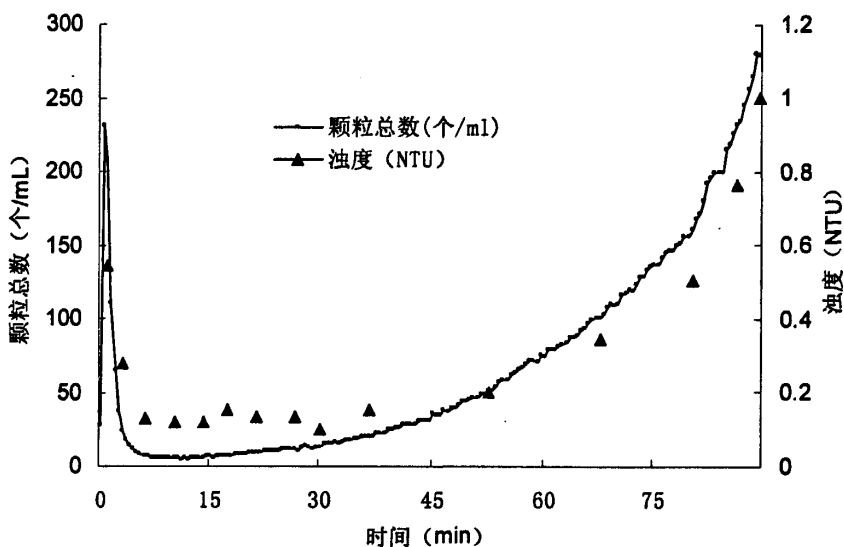
Fig5.16 Curve of particle concentration in filtered water for aluminum sulfate and PAC

图 5.17 为过滤开始 10-60min 时滤后水的颗粒浓度的变化曲线, 从图中可以看出, 两种混凝剂滤后水颗粒数几乎相同, 都在 0.5 个/ml, 但是 PAC 为混凝剂时滤料成熟期的时间比较短。

## 5.7 滤层厚度对过滤效能影响

滤池过滤过程是深层过滤，水体中浊质进入滤池深处，并被滤料截留。滤池深度越大，滤池出水水质越好，同时滤池的水头损失越大，所以适当的滤池厚度是保证滤池出水合格的前提，也是滤池维持足够工作时间的保证。

### 5.7.1 不同滤层厚度过滤过程中浊度和颗粒数的变化



5.18 滤层厚度为 500mm 滤后水浊度、颗粒指数和颗粒浓度变化曲线

Fig5.18 Curve of turbidity, particle index and particle concentration for 500mm filter

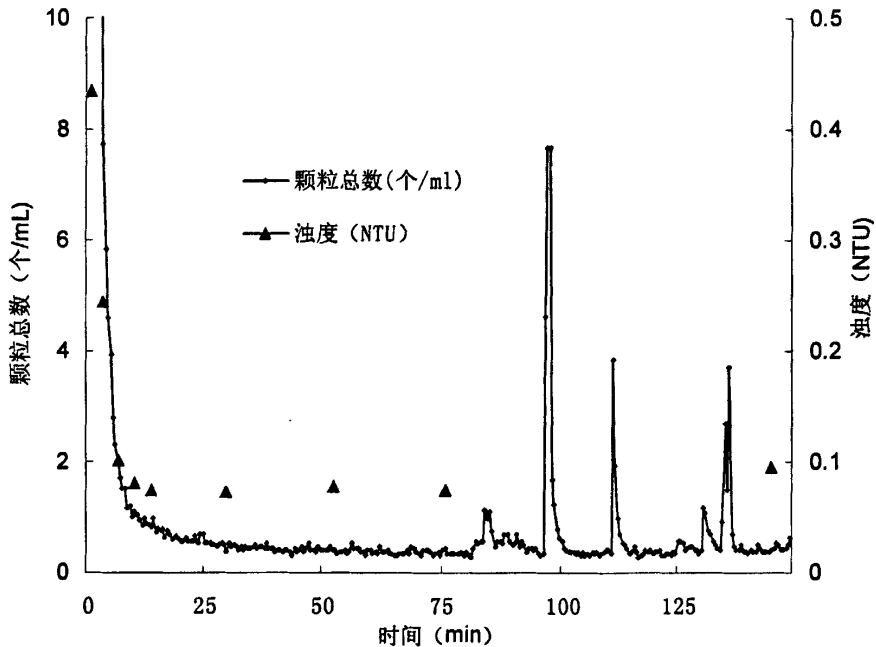
原水为高岭土水样，浊度为 24NTU，混凝剂为 PAC，加药量为 22mg/L，滤速为 5.3m/h，滤料为石英砂。图 5.1、图 5.2、图 5.18 和图 5.19 分别为滤层厚度



700、500 和 1000mm 的滤后颗粒出水曲线。

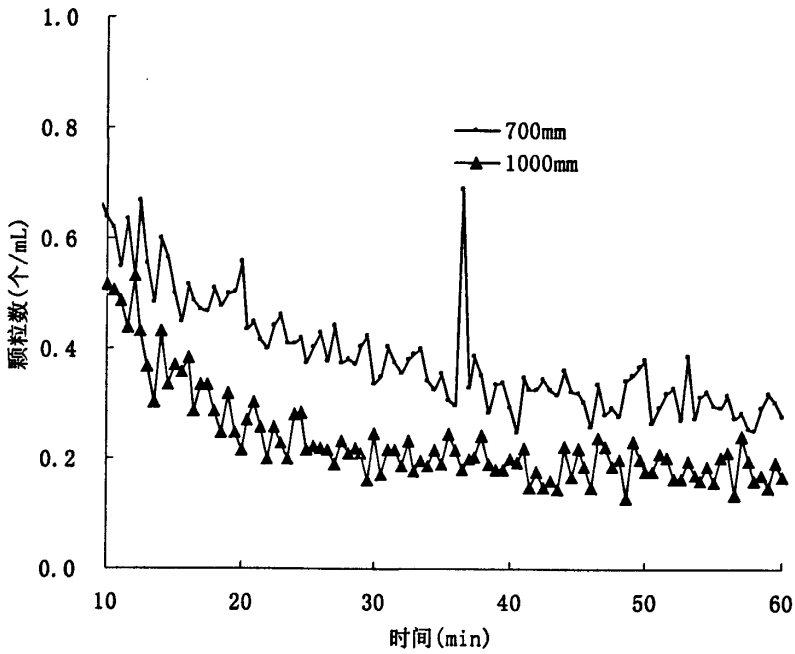
从图 5.1、图 5.2、图 5.18 和图 5.19 中可以看出滤层厚度为 500mm 和 700mm 的过滤完成了整个过滤过程。滤层为 1000mm 的过滤实验由于水头损失在开始过滤后 149min 的时候就到达了最大过滤水头，而且没有出现泄漏的情况，所以没有完成整个的过滤过程。

本过滤试验以浊度值作为滤层穿透的标准，即滤后水浊度达到 1NTU 就停止过滤过程。从试验结果可以看出，滤层厚度增加，过滤周期也会增大。如图 5.18 所示，滤层厚度为 500mm 时，过滤 20min 后滤后水后就开始出现颗粒泄露现象，颗粒数量呈现较快速增加的趋势；滤后水达到 1NTU 的时间仅为 89min，而且稳定期的时间非常的短；滤后水浊度的变化者要相对迟缓许多，在颗粒计数值产生响应的 15-20min 后才有微小的变化。滤层厚度为 700mm 时，过滤约 240min 滤后水才开始出现颗粒泄露现象，过滤时间达到 332min，过滤效能大幅度提高，如图 5.1 所示。图 5.19 为滤层厚度为 1000mm 的滤柱，在过滤水头达到最大值时没有出现颗粒泄漏迹象。可以看出，保证适当的滤层厚度是确保滤后水水质、提高过滤效能、延长过滤周期的重要条件；采用颗粒计数指标能更好地体现出过滤过程中颗粒物质的截留特性和影响因素。

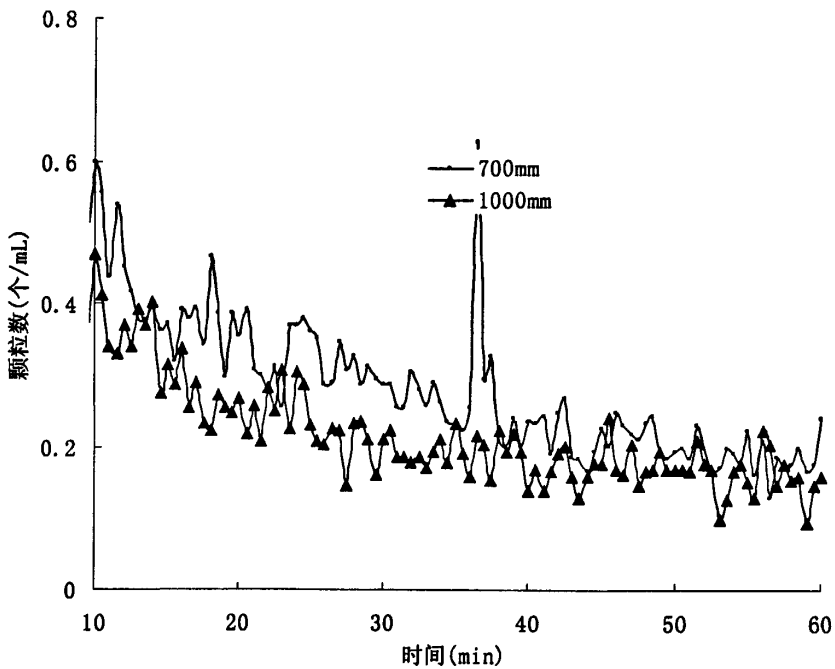


5.19 滤层厚度为 1000mm 滤后水浊度和颗粒浓度变化曲线  
Fig5.19 Curve of turbidity and particle concentration for 1000mm filter

### 5.7.2 不同滤层厚度滤后水颗粒粒径分布



2-3  $\mu\text{m}$  粒径颗粒的滤后水颗粒数



3-5  $\mu\text{m}$  粒径颗粒的滤后水颗粒数

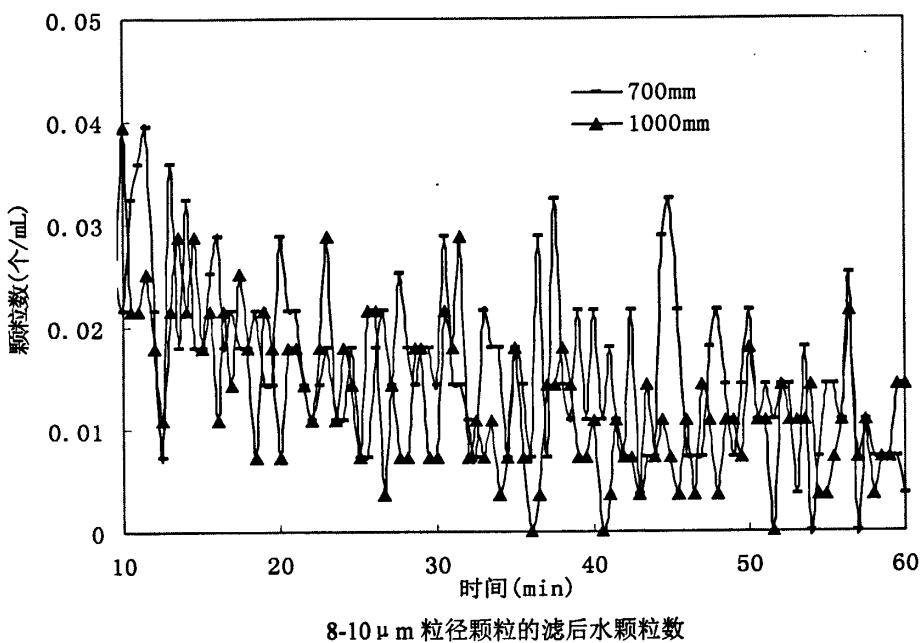
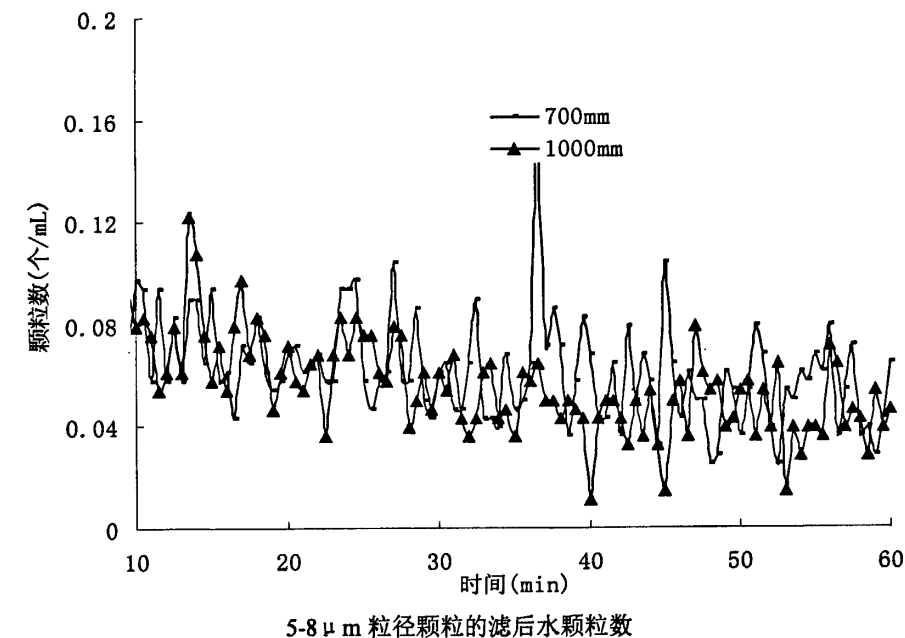


图 5.20 700 和 1000mm 滤层厚度滤后水的各个粒径颗粒浓度

Fig 5.20 Particle concentration of each size scale in filtered water for 700 and 1000mm depth of filter

不同滤层厚度对颗粒的截留效率也会有一定的差异,本试验采用颗粒计数对不同粒径分布的颗粒进行了分析,为过滤开始后 60min 时滤层厚度 700mm 和 1000mm 的滤后水中各个粒径颗粒分布情况,如图 5.20 所示。

可以看出,对于 700mm 和 1000mm 滤层,滤后水 2-3 $\mu\text{m}$  粒径范围的颗粒波

动很小, 3-5 $\mu\text{m}$  粒径的颗粒比 2-3 $\mu\text{m}$  粒径的波动要稍微明显, 5-8 $\mu\text{m}$  和 8-10 $\mu\text{m}$  粒径的颗粒出现了明显的波动。在所有的粒径范围内, 1000mm 滤柱的出水颗粒波动要小于 700mm 滤柱出水。这可能主要是由于大粒径的颗粒数量很少, 只是偶尔的泄漏。结果表明, 加大滤层厚度有助于各种颗粒物的截留, 但过厚的滤层对各种粒径颗粒物截留效率的提高已不显著, 对小粒径颗粒尚有一定效果, 而对大粒径颗粒则基本没有改善。这从另一方面表明, 采用颗粒计数检测技术, 可以从更深层次了解和表述过滤过程的特性。

## 5.8 本章小结

1. 本实验采用浊度、颗粒指数 R 和颗粒计数仪串联对过滤过程进行监测, 结果表明在浊度小于 0.1NTU 时, 浊度仪不能准确反映滤后水水质的变化, 而颗粒指数和颗粒计数仪能够灵敏的监测到水质的变化, 在颗粒发生泄漏时, 三种仪器都能够监测到颗粒的泄漏, 但是颗粒数和颗粒指数 R 变化的响应时间和幅度都比浊度值的更早更灵敏。颗粒指数 R 值可以灵敏地描述出颗粒的变化趋势, 颗粒计数检测仪器能够给出各粒径范围直观的详细的颗粒浓度变化, 在本实验中, 正常过滤运行期间, 滤后水中的颗粒主要是小颗粒, 而在过滤穿透期, 滤后水中各种粒径的颗粒数量和比例都有明显变化。三种仪器在整个过滤监测过程中数值的变化出现很大的相似性, 因此利用颗粒计数检测技术和颗粒指数来弥补和替代浊度, 做为滤后水的关键性监控指标是完全可行的。滤后水中浊度、颗粒指数和颗粒浓度之间也有很好的相关性。

2. 原水浊度对过滤有很大的影响, 随着原水浊度的增加, 过滤周期不断减小, 在过滤 10-60min 滤后水颗粒数并不随着原水浊度的增加而增加, 原水浊度为 15NTU 时, 出水颗粒最少, 当原水浊度为 24NTU 时出水颗粒最多。在颗粒泄漏期, 颗粒的泄漏以小颗粒为主, 小颗粒所占的比例随着原水浊度的增加而增加。

3. 混凝剂的投加量对直接过滤有显著影响。本实验的投加量分别为 3.67、14.67 和 22mg/L, 过滤周期随着投加量的增加而减小, 在过滤 10-60min 滤后水的颗粒当投加量为 14.67mg/L 时最少, 投加量 22mg/L 时最多。到达有效过滤期的时间随着投加量的增加而减少。

4. 滤池依靠滤料表面的吸附特性来吸附水体中的污染物, 特别是胶体颗粒。不同材质的滤料, 表面电化学性质不同, 所以滤料材质对过滤效果有一定影响。在本实验的条件下, 石英砂滤料过滤周期最短, 双层滤料和无烟煤滤料过滤周期相近。石英砂滤料的滤料成熟期最短, 双层滤料次之, 无烟煤最长。在 10-60min 石英砂滤料滤后水颗粒最少。

5. 投加混凝剂后，水体中胶体颗粒的脱稳，絮凝性能直接影响过滤的出水水质。不同混凝剂的混凝效果可能有很大差别，由于投加入水体后，它们的水解产物不同，混凝机理不同，去除水体中浊质的能力也不同。本实验条件下，用硫酸铝能延长过滤周期，在过滤 10-60min 滤后水的颗粒数两者基本相同。

6. 滤池过滤过程是深层过滤，水体中浊质进入滤池深处，并被滤料截留，所以适当的滤池厚度是保证滤池出水合格的前提，也是滤池维持足够工作时间的保证。滤层厚度为 700mm 的过滤周期最长，加大滤层厚度有助于各种颗粒物的截留，但过厚的滤层对各种粒径颗粒物截留效率的提高已不显著，对小粒径颗粒尚有一定效果，而对大粒径颗粒则基本没有改善。

## 结论

本文主要介绍和叙述了在饮用水领域中常用的几种颗粒检测技术,指出这些颗粒检测技术在应用条件、检测精度、适用颗粒粒径等方面的差异,利用实验室配制水样和过滤工艺对这几种颗粒检测仪器的相关性进行了对比和分析,提出了各种颗粒仪器的适用范围和条件,为今后的广泛应用提供了参考。

1. 采用硅藻土和高岭土配制低浊度水作为试验测试水样,结果表明,悬浊液体积与浊度有很好的相关性,相关系数在 0.95 以上,悬浊液体积与各个粒径颗粒浓度也有很好的相关性,且随着悬浊液体积的增加,各个粒径颗粒增长的趋势相同。

2. 相同颗粒分布溶液中,颗粒指数、颗粒浓度和浊度有很好的相关性,颗粒浓度与浊度的相关系数在 0.97 以上,颗粒浓度平方根和颗粒指数的相关系数在 0.96 以上。不同颗粒分布溶液中,颗粒指数、颗粒浓度和浊度不存在相关性。滤后水颗粒指数、颗粒浓度和浊度存在很好的相关性。

3. 在监测微絮凝—直接过滤的滤后水时,浊度仪可以描述过滤过程中颗粒总体的变化情况;脉动颗粒检测仪能够更迅速更灵敏地检测到颗粒的变化趋势;颗粒计数检测仪器不仅快速灵敏,而且能够获得更直观的颗粒特征信息,直接检测到不同粒径范围内颗粒浓度的变化和差异。他们之间有很好的相关性,浊度与颗粒指数相关系数为 0.9368,浊度与颗粒浓度的相关系数为 0.8991。几种颗粒检测技术的联用,不仅可以提高检测灵敏度,互相补充了灵敏检测范围的差异,在不同条件下所积累的数据也可以为混凝或者过滤的机理研究提供支持。

4.在不同的过滤条件下,当滤后水浊度小于 0.1NTU 时,浊度不能灵敏的反映出滤后水的水质变化,颗粒计数检测仪和透光脉动仪能够监测到这种微小的变化。颗粒计数检测仪器还能够给出各粒径范围直观的详细的颗粒浓度变化,这些都极大地提高处理过程的监控效率,为及时调整处理工艺的控制参数或评价处理单元的运行效果提供更细致的依据。

## 参考文献

1. S E Hrudey, E J Hrudey, S J T Pollard. Risk management for assuring safe drinking water[J]. *Environment International*, 2006, 32: 948-957
2. N J Ashbolt. Risk analysis of drinking water microbial contamination versus disinfection by-products (DBPs)[J]. *Toxicology*, 2004, 198: 255-262
3. 李圭白, 张杰. 水质工程学. 中国建筑工业出版社, 2005
4. 汤鸿霄, 钱易, 文湘华等. 水体颗粒物和难降解有机物的特性与控制技术原理. 中国环境科学出版社, 北京, 2000
5. 汤鸿霄. 环境水质学的进展—颗粒物与表面络合(上). 环境污染治理技术与设备, 1993, 1(1): 25-41
6. G F Graun. Waterborne outbreaks of cryptosporidiosis. *AWWA*, 1998, 90(9): 81-91
7. M B Hayes. Large community outbreak of cryptosporidiosis due to contamination of a filtered public water supply. *New England J Medicine*, 1989, 320: 1372-1376
8. D Leland. A cryptosporidiosis break in a filtered water supply. *AWWA*, 1992, 85(6): 34-42.
9. W Lechevallier, D N William. Examining Relationships Between Particle counts and Giardia, Cryptosporidium, and Turbidity. *AWWA*, 1992, 84(12): 54-601
10. H Tom, C Brian. Particle counters as tools for managing cryptosporidium risk in water treatment. *Water Science and Technology*, 1997, 36(4): 143-149.
11. 王占生, 刘文君. 微污染源饮用水处理. 中国建筑工业出版社, 北京, 1999
12. P D Hamilton, G Standen, S A Parsons. Using particle monitors to minimize Cryptosporidium risk. *I W A Publishing*, 2002
13. J Gregory. Turbidity and Beyond Filtration&Separation. Jan/Feb1998
14. E Erika, Hargesheimer, PhD & Carrie M. Particle Counting: How, Why, Where&What Equipment. Alberta Water& Wastewater Operators Association
15. 崔福义, 左金龙, 赵志伟等. 饮用水中贾第鞭毛虫和隐孢子虫研究进展. 哈尔滨工业大学学报, 2006 38(9): 1487-1491
16. A P Black, S A Hannah. Measurement of low turbidities. *AWWA*, 1965, 55(7): 901-916
17. 伍培. 水浊度的现代定义、表达和测定. 重庆石油高等专科学校学报, 1995年11月试刊: 51-53
18. 戴婕. 颗粒计数仪器在给水处理工艺中的应用探索. 给水排水, 2007, 33(9):

- 27-30
19. 李星, 杨艳玲, 李圭白. 透光率脉动检测技术. 中国给排水, 1997, 13 (6) : 26-28
  20. C H Tate, R R Trussell. The use of particle counting in developing plant design criteria. AWWA , 1978, 68 (12) : 691-698
  21. 宋心元. 水和废水标准检验法[M]. 中国建筑工业出版社, 1993
  22. 岳舜琳. 水的浊度测定中的几个问题[J]. 城市公用事业, 1992, 6 (5) : 18-17
  23. 吴星五, 唐秀华, 朱爱莲. 散射式浊度仪的改进和应用. 工业用水与废水, 2001, 32 (4) : 8-10
  24. IS07027. Water Quality-Determination of Turbidity[S]. International Organization for Standardization(ISO), 1984
  25. 鄂学礼, 张岚. 浊度的测定. 中国卫生检验杂志, 2000, 10(2): 244-246
  26. J Gregory, D W Nelson. A new optical method for flocculation monitoring. Solid-Liquid Separation, 1984: 172-182
  27. J.Gregory . Turbidity fluctuations in flowing suspensions. Colloid Int. Science, 1985, 105: 357—371
  28. P J.Jachson, E.J.Tomlinson. Automatic coagulation control evaluation of strategies and techniques. Water Supply, 1986(4): 55-67
  29. Y.Matsui , N.Tambo. Online floc size evaluation by photometric dispersion analyzer. Water Supply, 1991(9): 71-78
  30. O. Kayode , J.A Gregory. A new technique for monitoring alum sludge condition. Water Research, 1988, 22: 85-90
  31. 李圭白. 高浊度水透光率脉动单因子絮凝投药控制方法研究. 给水排水, 1992, 18 (6) : 4-7
  32. 于水利, 李圭白. 高浊度水絮凝投药自控系统模型试验研究. 给水排水, 1994, 20 (7) : 11-15
  33. 杨艳玲, 李星, 张佃敏等. 透光脉动技术监测过滤过程颗粒物试验研究. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2006 22 (3) : 19-22
  34. 李孟, 南军, 熊云. 透光率脉动检测技术在长江水中的应用. 哈尔滨建筑大学学报, 1999 , 32 (2) : 43-46
  35. 孙连鹏, 黄国忠, 常忠海等. 新型淹没式透光率脉动传感器的生产应用. 给水排水, 2001, 27 (4) : 28-31
  36. W Douglas. Cooper Monitoring Contaminant Particles in Gases and Liquids : A Review , Particles in Gases and Liquids . Plenum Press , New York, 1989 : 1 - 34
  37. 王建华, 王乃宁. 超净介质中颗粒污染物光学检测技术的进展. 华东工业大



- 学学报, 1995, 2 : 60-68
38. B Scarle. 25 years of Particle Size Conferences. Particle Size Analysis, 1991
  39. T Bzik. Statistical Management and Analysis of Particle Count Data in Ultraclean Environments : Part I , Micro contamination , 1986a , 5 : 58 - 63 , 98 - 99
  40. T Bzik. Statistical Management and Analysis of Particle Count Data in Ultraclean Environments : Part II , Micro contamination , 1986b , 6 : 34 - 41
  41. H G Barth. Modern Methods of Particle Size Analysis. John Wiley & Sons. New York. , 1984 ,21 - 25
  42. C W Hutchinson. On-line particle counting for filtration control [ J ]. ISA , Transactions, 1985, 24(3): 75-82
  43. 王东升, 陈勇生. 在线激光颗粒计数器在水处理中的应用. 中国给水排水, 2003, 19 (9) : 29-31
  44. 何元春, 许超伟. 颗粒物计数器在生物活性碳工艺中的应用[ J ]. 中国给水排水, 2004, 20(4): 71-73
  45. 罗岳平. 自来水中悬浮颗粒物的检测和控制. 给水排水, 2000, 26 (3) : 26 -311
  46. 杨艳玲. 优化检测与净水工艺提高致病原动物去除率[J]. 给水排水, 2003 , 29(6) :22 - 261
  47. 曹超. 散射光浊度与透射光浊度的关系. 西安建筑科技大学学报, 1997, 3 (29) : 338-340
  48. K Ebiea, D Yamaguchia , H Hoshikawab. New measurement principle and basic performance of high-sensitivity turbidimeter with two optical
  49. 景有海. 水的过滤理论基础. 西安建筑科技大学(研究生教材), 2001
  50. 汪光鑫. 城市供水行业2000年技术进步发展规划. 中国建筑工业出版社, 1993
  51. 王利平, 张世华, 王峰慧. 均质石英砂滤料过滤性能的试验研究. 西安建筑科技大学学报., 1996, 28 (1) : 65-69
  52. 杨福才. 当前国内外滤池的应用和初步看法. 给排水在线, 2001
  53. 李三中. 微絮凝直接过滤处理水库水的探讨. 中国给水排水, 1997, 13 (5): 17-19
  54. 郭维华, 费忠民. 水中砷混凝去除机理的研究. 苏州城建环保学院学报, 1995, 8 (1): 70-77
  55. 周北海, 王占生. 砂滤床直接过滤机理的研究. 中国给水排水, 1994, 10 (2): 15-17
  56. 奕兆坤, 李桂平, 王曙光. 微絮凝—深床直接过滤及工艺参数研究. 中国给水排水, 2002, 18 (4): 14-18

57. 李科、架兆坤. 微絮凝—直接过滤采用聚合铝处理低浊低色水研究. 中国给水排水, 1998年, 14(6): 1-4

## 攻读硕士学位期间发表的学术论文

- 1 杨艳玲, 张磊, 李星等. 采用颗粒计数技术监测过滤过程及颗粒物去除效能. 城市饮用水安全保障暨节能减排新技术新设备应用研讨会. 2008, 7: 117-119

## 致谢

本文是在我的导师杨艳玲研究员的悉心指导下完成的。在三年的研究生学习当中，导师渊博的知识、严谨的治学态度和平易近人的生活作风给我留下了深刻的印象，也为我们树立了求学和工作的榜样。值此论文完成之际，谨向李老师致以衷心的感谢！

在校学习期间，得到了李星老师无私的关怀和照顾，在此表示衷心的感谢！

在北京建筑工程学院期间，得到了北京建筑工程学院吴俊奇老师、王俊岭老师等的热心招待，齐鲁和王长玉师兄的悉心指导，在此表示衷心感谢并祝身体健康！

最后，感谢所有曾给予我关心和帮助的老师、同学和朋友！

# 水中颗粒物的检测技术研究

作者：[张磊](#)  
学位授予单位：[北京工业大学](#)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y1570812.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1570812.aspx)