

# 滴灌用黄河水泥沙分离试验研究

孙步功<sup>1</sup>, 龚俊<sup>2\*</sup>, 辛舟<sup>2</sup>, 赵武云<sup>1</sup>, 吴建民<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学工学院, 兰州 730070; 2. 兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050)

**摘要:** 针对农业滴灌中黄河水泥沙含量高的问题, 将碟式分离机与 FXJ-150-I 型水力旋流器串联用于黄河水泥沙分离。采用正交试验、极差和方差分析研究了串联分离设备参数对溢流量和溢流颗粒  $D_{50}$  的影响。试验结果表明: 影响溢流量的参数主次排列为旋流入口压力、旋流器底流口直径和转鼓转速, 而影响溢流  $D_{50}$  的参数主次排列为旋流入口压力、转鼓转速和底流口直径。考虑试验因素对溢流量和溢流中粒径  $D_{50}$  影响程度的大小以及它们在分离中所起作用的大小, 优化了串联分离设备参数: 旋流入口压力为 0.06 MPa、底流口直径为 12 mm、转鼓转速为 3500 r/min。

**关键词:** 黄河泥沙分离; 中粒径  $D_{50}$ ; 溢流量; 碟式分离机; 水力旋流器

中图分类号: TQ051.8

文献标识码: B

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0051-03

孙步功, 龚俊, 辛舟, 等. 滴灌用黄河水泥沙分离试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 51-53.

Sun Bugong, Gong Jun, Xin Zhou, et al. Experimental study on Yellow River's silt separation for drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 51-53. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

在黄河流域干旱少雨的西北地区, 农业采用滴灌、喷灌等节水灌溉措施势在必行<sup>[1,2]</sup>。黄河水中泥沙容易造成滴灌孔、喷灌喷头、甚至管道的堵塞<sup>[3,4]</sup>。目前的解决方法, 一种采用是“大坑工程”<sup>[5]</sup>, 另一种是改进灌水器或滴头的结构<sup>[6,7]</sup>。“大坑工程”周期长, 投资大, 费工费时。灌水器或滴头结构的改进成本较高。黄河泥沙分离的目的是用于节水灌溉, 因此, 最好采用物理分离方法。适于黄河泥沙分离的设备有水力旋流器和碟式分离机等, 单独采用水力旋流器或碟式分离机分离黄河泥沙的研究已见报道<sup>[8,9]</sup>; 将碟式分离机与水力旋流器串联分离黄河泥沙的研究也有报道, 但其试验设计简单、指标单一<sup>[10]</sup>。在黄河水泥沙分离时, 为了保证分离效率, 除考虑溢流颗粒  $D_{50}$  外, 还应考虑溢流量。本研究将碟式分离机和水力旋流器串联进行黄河泥沙分离, 将溢流颗粒  $D_{50}$  和溢流量作为试验指标, 综合考虑串联设备参数对试验指标的影响, 优化参数组合, 为滴灌用黄河水泥沙分离提供科学依据。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

黄河泥沙来自流域不同的地层, 泥沙的矿物质特性为长石、云母、石英、黏土矿物高岭石等, 因而泥沙的粒级是不均匀的, 试验用 2006 年夏季兰州段黄河水泥沙粒配如表 1<sup>[11]</sup>。

表 1 2006 年夏季兰州段黄河泥沙粒配特性  
Table 1 Sediment composition in Yellow River in the Lanzhou in the summer of 2006

| 粒级/mm          | <0.025 | 0.05 | 0.1  | 0.25 | 0.5  | 1.0 |
|----------------|--------|------|------|------|------|-----|
| 小于某粒级泥沙的百分含量/% | 49.2   | 71.0 | 91.9 | 98.7 | 99.9 | 100 |

收稿日期: 2007-10-18 修订日期: 2008-06-29

基金项目: 北方干旱内陆灌区节水农业综合技术体系集成与示范 (2002 AA2Z4191); 国家教育部研究基金资助项目 (008k-003)

作者简介: 孙步功 (1971-), 男, 甘肃通渭人, 博士研究生, 副教授, 主要从事节水农业的教学与研究。兰州 甘肃农业大学工学院, 730070。

Email: sunbg@gsau.edu.cn

\*通讯作者: 龚俊 (1963-), 男, 四川中江人, 教授, 博士生导师, 主要从事固液分离理论及设备研究。兰州 兰州理工大学机电工程学院, 730050。Email: gongj@lut.cn

### 1.2 试验设备

碟式分离机采用自行研制的喷嘴排渣碟式分离机, 其结构如图 1 所示。上下桶体收集从转鼓中分离出来的溢流液和底流液。分离机采用立轴皮带传动, 并具有张紧装置, 使立轴处的皮带轮刚性定位在机壳上, 让机壳承受皮带的张力, 解决了皮带张紧力对挠性轴定位的影响。上、下转鼓内壁设计成锥角是 45°的圆锥形, 以利于容渣和排渣。转鼓锥端部安装不同数量和直径的喷嘴。碟片及套管通过分水盘上的扭矩销由立轴带动旋转<sup>[12,13]</sup>。

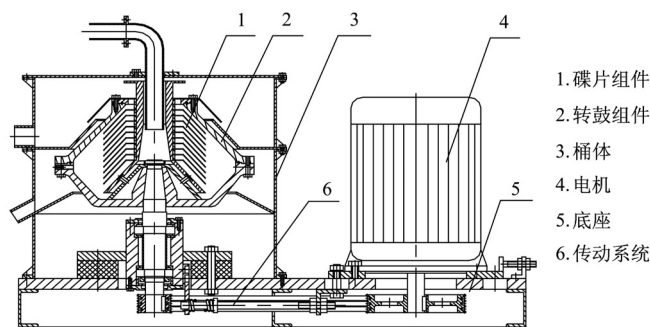


图 1 碟式分离机结构

Fig.1 Structure diagram of dish separator

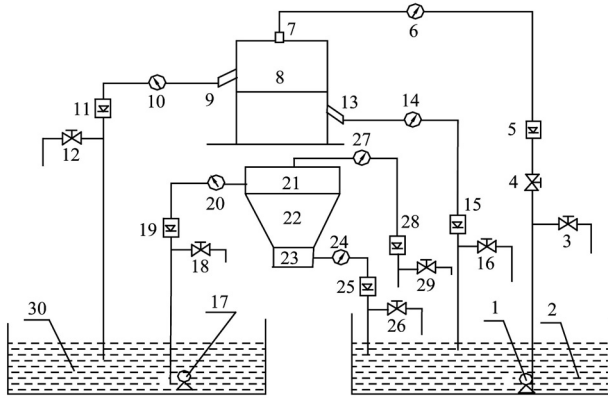
旋流器选用 FXJ-150-I 型水力旋流器, 其基本结构参数如表 2 所示<sup>[9]</sup>。

表 2 水力旋流器基本结构参数  
Table 2 Structure parameters of Hydrocyclone

| 内径 $D$<br>/mm | 柱体高 $h$<br>/mm | 进料口直径 $D_1$<br>/mm | 溢流管直径 $D_0$<br>/mm | 锥角 $\theta$<br>/(°) |
|---------------|----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 150           | 150            | 32                 | 40                 | 15                  |

### 1.3 试验流程

试验流程如图 2 所示。将试验用 2006 年夏季兰州段黄河水加入水箱 2, 经搅拌混合均匀后经 1-4-5-6-7 进入分离机 8。分离后清液经 9-10-11 进入水箱 30, 浑液经 13-14-15 进入水箱 2; 水箱 30 中的水经搅拌混合均匀后经 17-19-20 进入旋流器 22, 分离后溢流液经 21-27-28 进入水箱 2, 底液经 23-24-25 进入水箱 2。在每条进出料管路上均装有开关阀、流量计和压力表, 并开有取样口。



注：1、17.泵 2、30.水箱 3、12、16、18、26、29.取样口阀 5、11、15、28.流量计 6、10、14、20、27.压力表 8.分离机 22.旋流器

图2 黄河泥沙分离试验流程图

Fig.2 Flow chart of silt separation from Yellow River's water

试验过程中随时取样，利用 BT-1500 型离心沉降式粒度分布仪测定溢流液粒度分布并通过粒度分布函数计算中位径。

1.4 试验因素及指标

根据串联分离设备基本原理可知，影响分离效率的因素主要有旋流器底流口直径、旋流入口压力和分离机转鼓转速，故选为本次试验的3因素。各因素水平见表3。

表3 试验因素及水平  
Table 3 Factors and levels of the experiment

| 水平 | 试验因素      |           |                           |
|----|-----------|-----------|---------------------------|
|    | 底流口直径A/mm | 入口压力B/MPa | 转鼓转速C/r·min <sup>-1</sup> |
| 1  | 12        | 0.02      | 3000                      |
| 2  | 14        | 0.04      | 3500                      |
| 3  | 16        | 0.06      | 4000                      |

悬浮液颗粒粒度分布是悬浮液中不同粒径的颗粒在全体颗粒总量中所占的百分数。将粒度分布函数等于50%所对应的粒径值作为平均粒径，称为中位径，用D<sub>50</sub>表示。在黄河水泥沙分离时，为保证分离效率，除了考虑溢流颗粒粒度分布的范围宽窄和平均粒径大小之外，还应考虑溢流量。为此在本试验中，选取溢流量和溢流颗粒D<sub>50</sub>作为试验指标进行分离参数的优化。

2 结果与分析

按L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)设计试验，结果见表4。为减少试验误差，保证试验数据的可靠性，每个试验号重复试验3次，试验结果取其均值<sup>[14,15]</sup>。

对表4的试验结果进行方差分析，见表5。

从表5 的方差分析可以看出：

对于溢流量而言，F<sub>A</sub>=8.44 < F<sub>0.1</sub>(2,2)=9，F<sub>B</sub>=10.92 > F<sub>0.1</sub>(2,2)，F<sub>C</sub>=4.54 < F<sub>0.1</sub>(2,2)。可知因素B作用显著，因素A、C作用不显著，但相比之下因素A 较因素C显著。由表3可知，K<sub>11</sub> > K<sub>12</sub> > K<sub>13</sub>，K<sub>23</sub> > K<sub>22</sub> > K<sub>21</sub>，K<sub>31</sub> > K<sub>32</sub> > K<sub>33</sub>，因此获得最大溢流量的因素水平搭配为A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>。

对于溢流颗粒 D<sub>50</sub> 而言，F<sub>A</sub>=4.82 < F<sub>0.1</sub>(2,2)，F<sub>B</sub>=40.692 > F<sub>0.1</sub>(2,2)，F<sub>C</sub>=2.178 < F<sub>0.1</sub>(2,2)。可知因素B 作用显著，因素A、C的作用不显著。由表3可知，K<sub>13</sub> > K<sub>12</sub> > K<sub>11</sub>，K<sub>21</sub> > K<sub>22</sub> > K<sub>23</sub>，K<sub>31</sub> > K<sub>32</sub> > K<sub>33</sub>，因此获得最小溢流 D<sub>50</sub> 的因素水平搭配为A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>。

表4 正交试验设计及试验结果

Table 4 Design and results of the orthogonal test

| 编号                             | 因素水平   |        |        | 溢流量<br>均值/m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> | 溢流D <sub>50</sub><br>均值/μm                        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|---|---|
|                                | A      | B      | C      |   |   |
| 1                              | 1      | 1      | 1      | 33.08                                     | 7.52  |
| 2                              | 1      | 2      | 2      | 36.29                                     | 6.54  |
| 3                              | 1      | 3      | 3      | 40.34                                     | 4.83  |
| 4                              | 2      | 1      | 2      | 18.20                                     | 7.20  |
| 5                              | 2      | 2      | 3      | 36.78                                     | 7.82  |
| 6                              | 2      | 3      | 1      | 43.04                                     | 5.29  |
| 7                              | 3      | 1      | 3      | 21.85                                     | 8.28  |
| 8                              | 3      | 2      | 1      | 19.36                                     | 6.93  |
| 9                              | 3      | 3      | 2      | 32.05                                     | 6.42  |
| 溢 K <sub>1</sub>               | 109.71 | 73.13  | 101.91 |   |   |
| 流 K <sub>2</sub>               | 98.02  | 92.43  | 101.18 |   |   |
| 液 K <sub>3</sub>               | 73.26  | 115.43 | 77.9   |   | 影响主次：B>A>C  |
| 流 R                            | 36.45  | 42.3   | 24.01  |   | 最佳水平：A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> |
| 量 S <sub>E</sub>               | 230.94 | 298.99 | 124.35 |   |   |
| 溢 K <sub>1</sub>               | 18.86  | 23     | 21.76  |   |   |
| 流 K <sub>2</sub>               | 20.31  | 20     | 20.11  |   |   |
| 颗 K <sub>3</sub>               | 21.63  | 16.54  | 18.96  |   | 影响主次：B>C>A  |
| 粒 R                            | 2.77   | 6.46   | 2.8    |   | 最佳水平：A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> |
| D <sub>50</sub> S <sub>E</sub> | 0.8775 | 7.4719 | 1.3237 |   |   |

表5 分离性能方差分析

Table 5 Variance analysis of separation properties

| 项目                     | 误差来源 | 离差平方和   | 自由度 | 平均离差平方和 | F值     | 最佳方案   |
|------------------------|------|---------|-----|---------|--------|--|
| 溢流<br>流量               | A    | 230.94  | 2   | 115.47  | 8.44   | A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> |
|                        | B    | 298.99  | 2   | 149.495 | 10.92  |  |
|                        | C    | 124.35  | 2   | 62.175  | 4.54   |  |
|                        | 误差   | 27.3698 | 2   | 13.68   |        |  |
| 溢流粒<br>D <sub>50</sub> | A    | 0.8775  | 2   | 1.4480  | 4.82   | A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> |
|                        | B    | 7.4719  | 2   | 12.3298 | 40.692 |  |
|                        | C    | 1.3237  | 2   | 0.66    | 2.178  |  |
|                        | 误差   | 0.606   | 2   | 0.303   |        |  |

由极差R可知，按溢流量和溢流D<sub>50</sub>确定各因数主次顺序分别为B>A>C和B>C>A。两种组合中，旋流入口压力占据了首要位置，而底流口直径和转鼓转速的主次排列顺序不同。按溢流量确定各因数最佳水平组合为A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>，按溢流粒D<sub>50</sub>确定各因数最佳水平组合为A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>。可见底流口直径和旋流入口压力根据溢流量和溢流D<sub>50</sub>两个性能指标的最佳水平均为A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>，而转鼓转速根据溢流量指标，其最佳水平为C<sub>1</sub>，而根据溢流D<sub>50</sub>指标，最佳水平为C<sub>3</sub>。综合考虑农业滴灌、喷灌中黄河泥沙分离的实际情况，又兼顾分离效率，试验因素按具有良好综合性能的6#试验选取C<sub>2</sub>水平<sup>[15]</sup>。

高速旋转的分离机转鼓内，悬浮液以薄层在碟片间沿径向向内流动。固体颗粒在分离力场的作用下，提高了沉降速度，颗粒能很快地从液相中分离出来。串联分离设备第一级转速越快，能被沉降的颗粒越小，进入第二级旋流器的固相颗粒越小，最后溢流D<sub>50</sub>越小。转鼓转速不影响进入第二级的流量，也就不影响溢流量。随着旋流入口压力增大，流体中固相所受离心力增大，更多的颗粒进入底流，导致溢流D<sub>50</sub>降低。同时随旋流入口压力增大，流速加快，流量增加。随底流口直径的增大，底流流量增加，溢流量减小，溢流D<sub>50</sub>降低<sup>[16]</sup>。

综上所述,在本试验条件下,使黄河泥沙分离中溢流量和溢流 $D_{50}$ 具有良好综合性能的结构和操作参数最佳水平组合为 $A_1B_3C_2$ ,即底流口直径为12 mm、旋流入口压力为0.06 MPa、转鼓转速为3500 r/min。

### 3 结 论

1) 影响溢流量的参数主次排列为旋流入口压力、旋流器底流口直径和转鼓转速。在该试验条件下,使溢流量最大的参数最佳水平组合为底流口直径12 mm、旋流入口压力0.06 MPa、转鼓转速3000 r/min。

2) 影响溢流 $D_{50}$ 的参数主次排列为旋流入口压力、转鼓转速和底流口直径。在该试验条件下,使溢流 $D_{50}$ 最小的参数最佳水平组合为底流口直径12 mm、旋流入口压力0.06 MPa、转鼓转速4000 r/min。

3) 参数的不同搭配水平对溢流量和溢流 $D_{50}$ 的影响不同,获得溢流量大、溢流 $D_{50}$ 小的分离性能,各因素水平的搭配也不相同。考虑试验因素对溢流量和溢流 $D_{50}$ 影响程度的大小以及它们在黄河泥沙分离中所起作用的重要程度,认为串联分离设备的参数为:底流口直径为12 mm、旋流入口压力为0.06 MPa、转鼓转速为3500 r/min。

#### [参 考 文 献]

- [1] 景可,陈永顺,李凤新.黄河泥沙与环境[M].北京:科学出版社,1993:31-55.  
[2] 吴建民,高焕文.甘肃河西走廊水资源供需分析及耕作节水研究[J].农

- 业工程学报,2006,22(3):36-38.  
[3] 朱连勇,崔春亮.浅谈地下滴灌的堵塞问题及处理方法[J].水土保持研究,2005,12(2):111-112.  
[4] 肖新棉,董文楚,杨金忠,等.微灌用叠片式砂过滤器性能试验研究[J].农业工程学报,2005,21(5):81-84.  
[5] 宗全利,刘焕芳,汤 骅,等.微灌用沉沙池泥沙沉降计算方法试验研究[J].节水灌溉,2004,4:23-27.  
[6] 仵 峰,范永申,李 辉,等.地下滴灌灌水器堵塞研究[J].农业工程学报,2004,20(1):80-83.  
[7] 穆乃君,张 昕,李光永,等.内镶片齿型迷宫滴头抗堵塞试验研究[J].农业工程学报,2007,23(8):34-39.  
[8] 孙步功,龚 俊,辛 舟.碟式离心机在黄河水农业灌溉中的应用[J].排灌机械,2007,25(4):46-48.  
[9] 刘永平,龚 俊,刘 晶.黄河水泥沙分离用水力旋流器分离效率的研究[J].排灌机械,2006,24(5):33-35.  
[10] 孙步功,龚 俊,辛 舟.离心机与旋流器串联分离泥沙对 $D_{50}$ 的影响[J].排灌机械,2008,26(1):53-55.  
[11] 孙步功.适于黄河泥沙分离的碟式离心机设计与试验研究[D].兰州理工大学,2004.  
[12] 孙步功,龚 俊,辛 舟.黄河泥沙分离机流量公式推导及试验流量确定[J].甘肃农业大学学报,2004,39(6):710-712.  
[13] 龚 俊,孙步功,辛 舟.碟式离心机整机动平衡方法及应用[J].兰州理工大学学报,2004,30(6):46-48.  
[14] Svarovsky L.王梦剑译.固液分离[M].北京:原子能出版社,1982:15-29.  
[15] 刘培坤,王书礼,王 静.水力旋流器用于污泥脱水的试验研究[J].过滤与分离,2001,11(2):14-15.  
[16] 赵立新,蒋明虎,刘文举.用于细颗粒分离的水力旋流器的压力特性研究[J].化工机械,2003,30(6):321-325.

## Experimental study on Yellow River's silt separation for drip irrigation

Sun Bugong<sup>1</sup>, Gong Jun<sup>2\*</sup>, Xin Zhou<sup>2</sup>, Zhao Wuyun<sup>1</sup>, Wu Jianmin<sup>1</sup>

(1. College of Engineerin, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Mechanical and Electrnical Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** To solve the problem of high content of bedload in Yellow River's water for agricultural drip irrigation, the dish separator and FXJ-150-I hydrocyclone was connected in series to sepearat silt from Yellow River's water. The influences of the series connection seperation equipment on the overflow flux and sediments half-content diameter  $D_{50}$  were studied by orthogonal test, range analysis and variance analysis. The results show that the important order of the parameters influencing the overflow flux is as follows:inlet pressure, underflow port diameter and drum rotation speed. As for the  $D_{50}$ , the order is inlet pressure, drum rotation speed and underflow port diameter. Considering the influence extent of tested factors on the overflow flux and sediments half-content diameter  $D_{50}$  and the separation efficiency, the parameters of the equipment are optimized as follows: inlet pressure 0.06 MPa, underflow port diameter12 mm, drum rotation speed 3500 r/min.

**Key words:** silt separation fromYellow River's water; half-content diameter  $D_{50}$ ; overflow flux; dish separator; hydrocyclone