

水平淹没射流流态变化规律的研究

冯彦彰, 郝亚丰, 袁浩

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都, 610065, Email: 943380021@qq.com)

摘要: 针对水平淹没射流中的射流上浮与下潜问题, 设计了二维水平淹没射流的物理模型实验装置, 研究了在二维情况下, 矩形出口水平淹没射流流态随出口流速、跌坎高度和尾坎高度的变化情况, 并分析了流场特征。研究表明, 二维水平淹没射流在不同的出口流速、跌坎和尾坎高度条件下, 会出现面流、淹没射流上浮和淹没射流下潜的流态, 但在本文的实验条件下, 未出现射流主流在消力池中始终居于水体中部的流态, 反映出射流出口分隔立体布置对于保证射流主流始终居于水体中部, 从而实现高消能率、低临底流速的水平淹没射流消能是非常必要的。

关键词: 水平淹没射流; 流态; 流速; 消能

1 引言

随着我国水利工程开发的不断进行, 高坝建设也迅速发展, 其中高水头、大单宽流量的泄洪消能问题一直是水利工程界尤为关注的问题。以前在高山峡谷地区, 最常用的消能方式是挑流消能, 其结构形式简单, 消能效果显著, 但是造成的雾化影响较为严重; 传统的面流消能方式, 由于其水流衔接情况较难控制, 而且消力池表面流速高、波浪大, 不利于下游的防冲保护, 目前我国已经很少采用; 传统的底流消能虽然雾化较小, 但是水垫塘临底流速较大, 对底板抗冲保护要求较高。针对向家坝工程的泄洪消能问题, 国内学者提出了多股多层水平淹没射流的新型消能形式, 并进行了相关研究^[1-3], 发现该新型消能工具有雾化较低, 消能率较高等特点, 较好解决了向家坝工程的问题。但是在中孔淹没射流实验中, 张建民, 邓军等人^[4-6]发现水平方向窄而垂直方向厚的水舌适应水位变化的稳定性较好, 能始终保持淹没射流状态; 宽而扁的水舌适应水位变化的稳定性较差, 容易随下游水位的升高或降低而潜底或上浮。因此, 针对这一特殊的水力现象, 本文对水平淹没射流流态的变化规律进行了相关探究。

2 物理模型设计

本实验为二维有压水平淹没射流实验研究，如图 1 所示，供水设备为一水箱，可通过阀门控制进水量，使上游水头保持稳定，其中水头最大可达 3 米；射流管嘴部分为矩形出口，用光滑不锈钢制作，为了减小进口处对水流流态的影响，同时使水流出流更加平顺，管嘴部分长 L_1 为 2m，高 D 为 0.1m，且管嘴部分可以上下移动，用于调节射流出口跌坎高度 S ；下游用一玻璃水槽模拟消力池，长 L_2 为 5m，深 H 为 0.8m，可以清晰的观察水流流态；水槽末端可安装不同高度的尾坎，用于模拟真实消力池的尾坎；射流管嘴部分与消力池等宽 B 为 50cm；模型下游装有矩形量堰，可较为准确的测量流量。

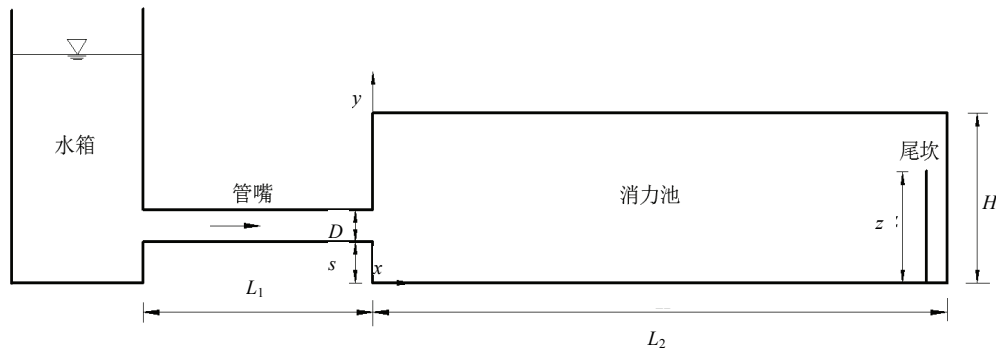


图 1 实验模型布置图

本次实验中，在每次固定好一组跌坎与尾坎后，逐渐由低到高调节水箱中水头，即控制出流流量使其逐渐增加，待流速稳定后，观察其出流流态，重点观察其出口水流的上浮或下潜状态。并选取中间流速，测量消力池内中轴线上的流速分布。测量断面为距出口 3cm，20cm，50cm，95cm，200cm 这五个断面，测量仪器为南京水科院生产的 LGY-II 型智能流速仪，精度为 1cm/s。其工况表如表 1 所示：

表 1 实验工况表

| | | | | | |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 出口平均流速 U (m/s) | 2.6 | 3.0 | 3.4 | 3.8 | 4.1 |
| 跌坎高度 S (cm) | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 |
| 尾坎高度 Z (cm) | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 |

3 射流流态分析

实验结果如表 2 所示。

表 2 实验结果统计表

| 序号 | 跌坎 S(cm) | 尾坎 Z (cm) | 出口平均流速 U (m/s) | | | | |
|----|----------|-----------|----------------|-----|-----|-----|-----|
| | | | 2.6 | 3.0 | 3.4 | 3.8 | 4.1 |
| 1 | 8 | 23 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 2 | | 25 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 3 | | 27 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 4 | | 29 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 5 | | 31 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 6 | 10 | 23 | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 7 | | 25 | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 8 | | 27 | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ |
| 9 | | 29 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 10 | | 31 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 11 | 12 | 23 | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 12 | | 25 | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 13 | | 27 | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ |
| 14 | | 29 | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ |
| 15 | | 31 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ |
| 16 | 16 | 23 | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 17 | | 25 | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 18 | | 27 | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 19 | | 29 | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ |
| 20 | | 31 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ |
| 21 | 20 | 23 | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 22 | | 25 | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 23 | | 27 | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 24 | | 29 | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 25 | | 31 | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ |

注：表中↓表示射流主流为下潜状态，↑表示射流主流为上浮状态

图 2 是跌坎 S 为 16cm，尾坎 Z 为 31cm 时，在不同射流出口流速下消力池内水流流态图。

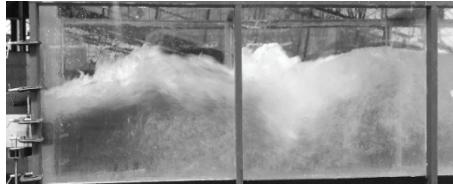


图 2-1 $U=2.6\text{m/s}$

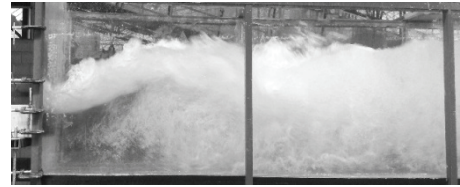


图 2-2 $U=3.0\text{m/s}$



图 2-3 $U=3.4\text{m/s}$



图 2-4 $U=3.8\text{m/s}$

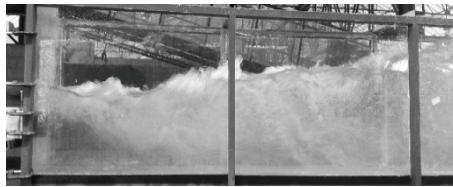


图 2-5 $U=4.1\text{m/s}$

图 2 $S=16\text{cm}$, $Z=31\text{cm}$ 时不同出口流速下流态

由图 2 可观察矩形有压水平淹没射流出流的流态变化。在出口流速较小如图 2-1 时，水流容易发生上浮现象，此时出流状态处于淹没状态，主射流下部有较大的回旋旋滚区，水流形成向上的弯曲曲线，升高后由于重力作用以及后部水体的压迫，又略微降低之后冲入下游水体中；随着流速逐渐升高如图 2-2 所示，出流状态仍为淹没出流，射流下部的回旋旋滚更加明显，并主射流更加上浮，即主射流水体逐渐抬高，升高后由于重力作用及下游水体的挤压，降低后潜入消力池下游的水体中；流速继续升高如图 2-3 时，此时，由于射流流速较大，水体的惯性力较大，主射流出流后弯曲程度变小，主射流上部的水体逐渐被冲入下游，直至达到面流状态，射流下部回旋漩涡也更加靠前，射流主流与消力池下游水体发生激烈碰撞，水流紊动剧烈；流速继续增大如图 2-4，主射流的惯性力也逐渐增大，使得射流主体几乎呈直线并且上浮的角度逐渐减小，下侧的漩涡也被射流水体挤压的较扁；伴随流速的继续增大，水体上浮程度逐渐降低，导致射流后部的水体可逐渐向前涌动，当后部水体大量涌向射流出口处时，会压迫主射流下潜，此时水体呈淹没状态，主流潜底，下部与上部均出现回旋区，此后若流速继续增大，射流主体将仍然处于下潜状态，如图 2-5 所示。

在跌坎 $S=12\text{cm}$, 16cm , 20cm 其他工况下，随着流速的增大，均出现主射流由上浮转变为下潜的情况，其基本的转变形式与上述情况类似。

值得注意的是，在 $S=10\text{cm}$ ，尾坎 $Z=29\text{cm}$ 与 31cm ，以及 $S=8\text{cm}$ 对应的所有工况时，

并未出现射流主流上浮的情况，水流在出流后即下潜入水底。为此，在 $S=8\text{cm}$ 时，我们降低尾坎，使 $Z=19\text{cm}$ 及以下，发现在流速由低到高的过程中，仍然能够出现射流主流由上浮转变为下潜的情况（图 3）所示。说明过低的跌坎或者过高的尾坎造成淹没射流在初始状态下消力池内水深较深，流速较低时由于主射流上部的水体较大重力的压迫，水流在出流后即被下压从而下潜，此后随着流速的增大，淹没射流主流一直呈下潜状态。这也是在体型 1,2,3,4,5,9,10 对应的各工况下，淹没射流主流在出流后即产生下潜的主要原因。

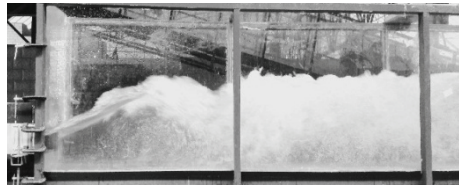


图 3-1 $U=2.6\text{m/s}$



图 3-2 $U=3.0\text{m/s}$

图 3 $S=8\text{cm}$, $Z=19\text{cm}$ 时不同出口流速下流态图

4 流速分布

下图 4 为在不同流速下，跌坎 16cm，尾坎 31cm 下实测的流场图

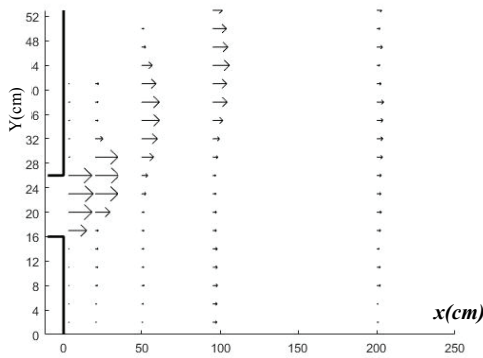


图 4-1 $U=2.6\text{m/s}$

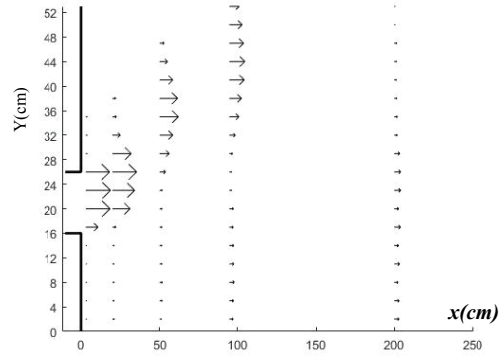


图 4-2 $U=3.0\text{m/s}$

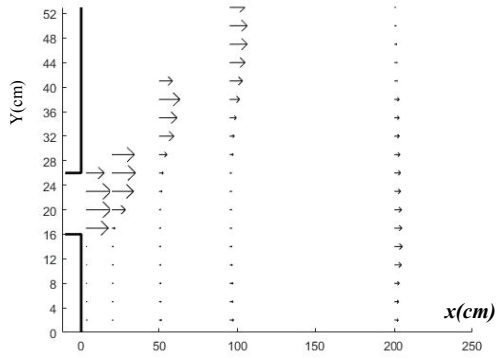


图 4-3 $U=3.4\text{m/s}$

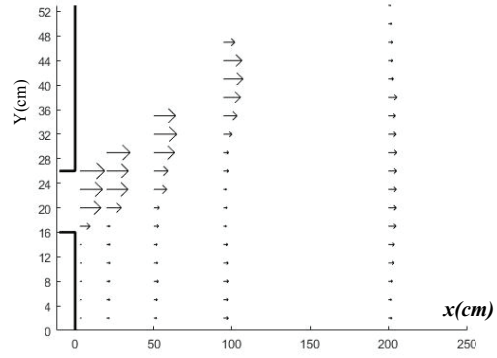


图 4-4 $U=3.8\text{m/s}$

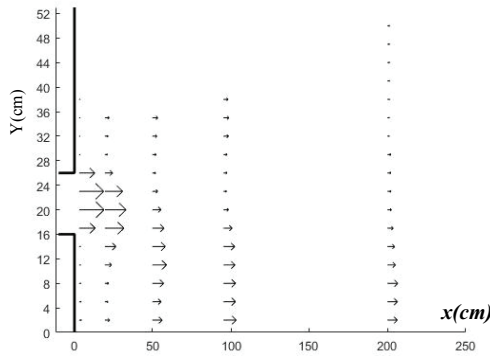


图 4-5 $U=4.1\text{m/s}$

图 4 $S=16\text{cm}$, $Z=31\text{cm}$ 时不同出口流速下流场

由上图可较为清晰的观察出随着水流流速的增大,水平淹没射流历经淹没上浮,面流,淹没下潜的过程。在水流上浮过程中,由于水流惯性力的逐渐增大,其流线的弯曲程度逐渐变小,直到被后部水体下压成为下潜状态。在 $x=200\text{cm}$ 断面处可看出,其射流主流在水体中部,而下潜水流的主流在靠近底板处。

5 水平淹没射流流态影响因素分析

在体型 $S=12\text{cm}$, $S=16\text{cm}$, $S=20\text{cm}$ 时,对应各工况下的上浮与下潜情况如下图 5 所示:

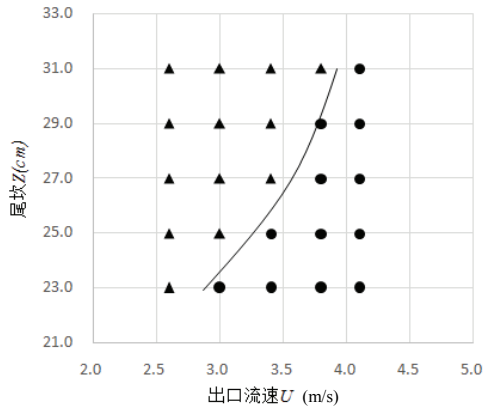


图 5-1 $S=12\text{cm}$

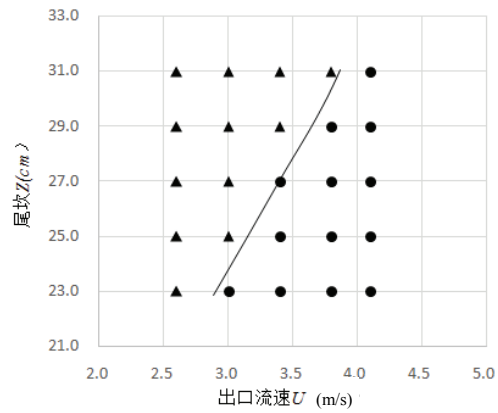


图 5-2 $S=16\text{cm}$

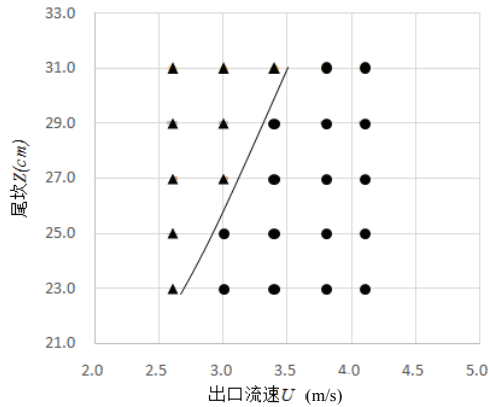


图 5-3 $S=20\text{cm}$

图 5 不同跌坎条件下水平淹没射流流态分区图

注：曲线上方▲区域代表淹没射流出流后水流上浮的情况，曲线下方●的区域则代表主射流下潜的情况。

由图 5 中可以看出，在射流可以出现上浮的情况下，当出口流速与跌坎一定条件下，尾坎高度越高，水流越容易上浮；当出口流速与尾坎高度一定时，跌坎高度越低，水流越容易发生上浮；当尾坎高度与跌坎高度一定时，流速越小，水流越容易发生上浮的情况。在实验中可观察到，尾坎的加高，会导致消力池内水深的加深，水流由上浮转变为下潜时，需要更大的惯性力才能将下游水体冲开并使得出流水体上浮角度逐渐减小，从而使下游水体涌向射流出流的表面直至将射流由上浮状态挤压至下潜状态；同理，跌坎高度的降低，射流出流上方的水深相对增高，则水流由上浮转变为下潜的过程中，射流水流需要降低更多角度，则其他条件一定时，跌坎越低，越容易发生上浮现象；而射流出口流速越小，其惯性力也越小，射流水流不足冲开下游水流，则更容易发生上浮现象。

6 结论

矩形出口的水平淹没射流在一定的实验条件下, ①随着射流出口流速的逐渐增大, 射流经历水舌淹没上浮, 面流, 淹没下潜的流态。②出口流速越高, 尾坎越低, 跌坎越高, 水流越容易产生下潜的流态。③若尾坎过高或跌坎过低的情况下, 矩形出口的水平淹没射流由于初始的水深较深, 不会出现上浮状态, 将一直呈现下潜的流态。④在本实验中未发现水流射出后主流线仍呈水平射出的流态, 其流态为上浮或者下潜。反映出射流出口分隔立体布置对于保证射流主流始终居于水体中部, 从而实现高消能率、低临底流速的水平淹没射流消能是非常必要的。

参 考 文 献

- 1 张建民, 杨永全, 许唯临, 等. 水平多股淹没射流理论及试验研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(1):97-102.
- 2 张建民, 王玉蓉, 杨永全. 水平多股淹没射流水力特性及消能分析 [J]. 水科学进展, 2005, 16(1) : 18 - 22.
- 3 黄秋君, 冯树荣, 李延农, 等. 多股多层水平淹没射流消能工水力特性试验研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2008, 11(6) : 694 - 701.
- 4 邓军, 许唯临, 张建民, 等. 向家坝水垫塘的试验研究与数值模拟[J]. 水力发电, 2004, 30(11):12-15.
- 5 邓军, 许唯临, 张建民, 等. 一种新型消力池布置型式-多股水平淹没射流 [J]. 中国科学, 2009, 39(1): 29-385.
- 6 李艳玲, 华国春, 张建民, 等. 多股水平淹没射流水力特性的影响因素研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17(11): 761-766.

Variation of flow pattern of horizontal submerged jet

FENG Yan-zhang, HAO Ya-feng, YUAN Hao

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu,

610065.Email: 943380021@qq.com)

Abstract : In order to solve the problem of floating and diving of the horizontal submerged jet, a physical model experiment device of two-dimensional horizontal submerged jet was designed. In the two-dimensional case, the flow pattern of horizontal submerged jet flow at the rectangular

outlet varies with the outlet velocity, the depth of the step-down floor and the end sill, and the flow field characteristics are analyzed. The research shows that under the conditions of different outlet velocity, the depth of the step-down floor and the end sill, surface flow, submerged jet upward flow and submerged jet downward flow will occur in the two-dimensional horizontal submerged jet. However, under the experimental conditions of this paper, there is no flow state in which the mainstream of the jet always resides in the middle of the water body in the stilling pool. It reflects that the separated stereoscopic arrangement of the jet outlet is very necessary to ensure that the main stream of the jet always resides in the middle of the water body, so as to realize the horizontal submerged jet energy dissipation with high energy dissipation rate and low bottom velocity.

Key words : Horizontal submerged jet; Flow pattern; Flow velocity; Energy dissipation