

空气射流动力学特征与冲沙作用试验研究

沈南北^{1,2}, 缴健², 龚政¹, 罗小峰²

(1. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 南京水利科学研究院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:针对空气射流冲沙方法目前相关理论研究还不够深入现状,利用水下排气冲击细颗粒床沙,对空气射流的动力学特征与冲沙作用进行水槽试验。在空气射流清水试验中,总结归纳了羽流发展的4个阶段,通过正交试验信噪比分析发现气压是羽流下切长度的主要影响因素,局部紊动强度随空气射流压强的增大而增大,且沿横向迅速衰减。在气动冲沙浑水试验中,总结归纳了冲沙坑的3个发展阶段,通过正交试验信噪比分析确定了影响冲沙效果的显著因素,并利用方差分析建立冲沙效果回归方程,预测值与实测值对比结果表明该方程预测效果较好。

关键词:空气射流;气动冲沙;羽流;紊动;局部清淤

中图分类号:TV149.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)01-0056-07

Experimental study on dynamic characteristics and sand flushing of aerated jet//SHEN Nanbei^{1,2}, JIAO Jian², GONG Zheng¹, LUO Xiaofeng² (1. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of MOT, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Aiming at the status that the relevant theoretical research of aerated jet flushing to solve the problem of local sediment deposition is not deep enough, the dynamic characteristics and sand flushing effect of aerated jet were studied by flume experiment. In the gas water clear water test, four stages of plume development are proposed. Through the signal-to-noise ratio analysis of orthogonal test, it is found that the air pressure is the main factor affecting the undercut length of the plume, and the local turbulence intensity increases with the increase of air jet pressure, and decays rapidly along the transverse direction. In the pneumatic sand flushing muddy water test, three development stages of sand flushing pit are proposed. Through the signal-to-noise ratio analysis of orthogonal test, the main effect affecting the sand flushing effect is determined. The regression equation of sand flushing effect is established by variance analysis, and the comparison between predicted and measured values shows good prediction results of the regression equation.

Key words: aerated jet; pneumatic sand flushing; plume; turbulence; local dredging

河口、水库、水闸、湖泊、河道主槽泥沙局部淤积问题普遍存在^[1-5],给生产生活带来了巨大的不利影响。针对泥沙局部淤积问题,国内外学者做过广泛研究,但传统机械清淤措施的成本较高,挡潮闸下^[6]与水库回水末端^[7]等局部位置的淤积采用常规疏浚技术难以实施,且常规的泄水冲沙措施效率较低。

水流的挟沙力依靠水流紊动,其强度取决于主流流速分布的不均匀程度。因此,传统的天然水流挟沙输沙的能效不高,国内外学者提出可以通过水射流增强水流局部紊动来缓解局部淤积问题^[8-10],通过大规模的室内试验,以最大冲深、冲坑半径为特征参数,建立了水下湍流射流运动冲刷剖面的预测

方程^[11]。相比水射流,空气射流同样可以起动机挟带底沙,然而,由于气泡上升速度大于粗沙沉降速度^[12],水体能够挟带的沙量更多,因此,罗勇等^[12]提出了气动冲沙方法。基于气动辅助装置的黄河原型沙起动与输运水槽试验研究,证明了气动冲沙减淤效果明显^[13]。此外,通过射流冲淤的数值模拟研究发现,在相同条件下气动冲沙的效率优于水射流冲沙^[14]。总体而言,目前在气体射流冲沙的研究中,对羽流发展规律及其形状特征、紊动水流结构,以及其对冲沙规律、挟沙能力等方面的认识还不够深入。因此,本文分别开展气体射流清水试验与气动冲沙浑水试验,利用水下排气冲击细颗粒床沙,对

气体射流的动力学特征与冲沙作用进行水槽试验研究,为气动冲沙技术的工程应用提供参考。

1 试验设计

1.1 试验装置

图1(a)所示为试验水槽,总长15.0 m,宽0.7 m,深1.5 m。空气射流发生装置由空气压缩机、排气设备组成,空气压缩机出口处依次连接有控制阀、调压阀、气压计和流量计,可调节空气压缩机排气压力。槽内喷嘴水平向和垂向均位于冲沙区域正中,垂向通过调节螺栓上下移动管身,以改变喷嘴至槽底高度。如图1(b)所示,排气设备由连接结构、压重、滑槽、管身和喷嘴组成,喷嘴处可拆卸,以调整排气角度与更换喷嘴孔径。空气压缩机排气压力为0.8 MPa,容积流量为1.1 m³/min。

试验选用原型沙,铺设厚度约为30 cm,其中值粒径为0.041 mm,泥沙级配曲线见图2。为确保每次试验铺沙密实程度相同,每次试验测量结束后将冲淤区域内的剩余泥沙重新搅动,并铺上提前浸泡过的原型沙,再进行相同的压实工作。

1.2 量测方法

使用声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocity, ADV)测定水体紊动强度,试验中ADV采样频率设置为25 Hz,单点测量时间约为45 s。为分析断面测点单点流速,对所采集时间序列数据做计算处理,分别得到水平向时均流速 $\bar{u}_x$ 、垂向时均流速 $\bar{u}_y$,以及相应的脉动流速 $\bar{u}'_x$ 、 $\bar{u}'_y$ 。用脉动流速的均方根 $\sqrt{\bar{u}'^2_x}$ 来表示紊动强度,用水体密度与脉动流速二阶相关矩乘积的负值 $-\rho\bar{u}'_x\bar{u}'_y$ 表示紊动切应力。模型设计中动力相似考虑为重力相似,考虑到模型与原型水流所受的重力加速度差异很小,且认为压强比尺等于长度比尺,得到时间比尺为压强比尺的平方根的结论。气动冲沙现场试验采用的气压往往比水槽试验更大,为保证现场冲沙效率,现场试验中冲沙时间可结合水槽试验中冲沙坑尺寸稳定时间与上述

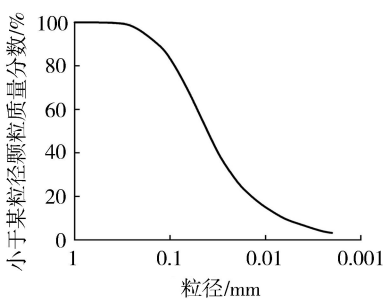


图2 泥沙级配曲线

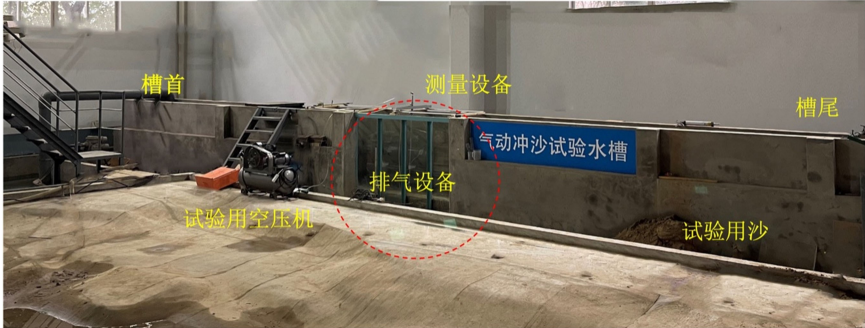
比尺公式换算。

利用测量装置量测冲刷后的地形,测量设备主要由连接结构、滑槽、调节结构和测针四部分组成。连接结构架立于水槽之上,布置时注意保证装置整体与地面垂直;滑槽由上下两部分组成,下滑槽安装在连接结构之上,上滑槽安装在下滑槽之上,可沿上下游方向滑动,安装有滑块及手旋拧紧结构;调节结构安装于上滑槽之上,可垂直上下游滑动;连接读数尺和测针,可手动调节测针高度;测针连接在调节结构上,长约1.0 m,可测量冲刷坑地形,精确度在±3.0 mm以内。利用测针测量冲刷坑最大深度,并逐断面测量冲刷深度,利用Surfer软件生成冲刷地形图,计算冲刷坑体积,对气动冲沙效果进行评估。

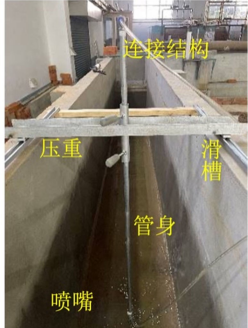
1.3 试验方案

采用正交试验法,根据正交性挑选出部分有代表性的因素和水平进行组合试验,具备“均匀分散,齐整可比”的特点^[15]。在空气射流清水试验中,重点考察喷嘴至槽底距离(即喷嘴高程与床沙表面高程之差,当喷嘴伸入床沙中,喷嘴至槽底距离为负值。以下简称为距离)、排气气压、水深、喷嘴孔径及排气角度等5个因素对羽流下切长度的影响,前4个因素包含4个水平,排气角度因素包含2个水平。混合正交试验设计及试验结果如表1所示。

在气动冲沙浑水试验中,研究了以上5个因素对冲刷坑最大深度与体积的影响,前4个因素包含4个水平,排气角度因素包含2个水平,混合正交试验设计及试验结果如表2所示。



(a) 试验水槽



(b) 排气设备

图1 试验装置

表 1 清水排气正交试验组合和试验结果						
方案 编号	距离/m	排气气压/ kPa	水深/m	喷嘴孔径/ mm	排气 角度/ (°)	羽流下切 长度/cm
1	0.30	100	0.7	1	45	6
2	0.30	200	0.8	2	45	12
3	0.30	300	0.9	3	90	20
4	0.30	400	1.0	5	90	25
5	0.35	100	0.8	3	90	15
6	0.35	200	0.7	5	90	18
7	0.35	300	1.0	1	45	15
8	0.35	400	0.9	2	45	19
9	0.40	100	0.9	5	45	10
10	0.40	200	1.0	3	45	15
11	0.40	300	0.7	2	90	20
12	0.40	400	0.8	1	90	23
13	0.45	100	1.0	2	90	11
14	0.45	200	0.9	1	90	14
15	0.45	300	0.8	5	45	16
16	0.45	400	0.7	3	45	20

表 2 气动冲沙正交试验组合和试验结果							
方案 编号	距离/ cm	排气 气压/ kPa	水深/m	喷嘴 孔径/ mm	排气 角度/ (°)	冲刷坑 最大 深度/cm	冲刷坑 体积/ cm ³
1	-0.5	100	0.4	1	45	9.67	3489
2	-0.5	200	0.5	2	45	11.55	4363
3	-0.5	300	0.6	3	90	15.60	6590
4	-0.5	400	0.7	5	90	17.88	7850
5	0.5	100	0.5	3	90	8.98	4298
6	0.5	200	0.4	5	90	10.87	4703
7	0.5	300	0.7	1	45	15.00	4085
8	0.5	400	0.6	2	45	17.01	4580
9	3.5	100	0.6	5	45	7.05	3943
10	3.5	200	0.7	3	45	9.90	4102
11	3.5	300	0.4	2	90	10.33	5607
12	3.5	400	0.5	1	90	13.76	3901
13	5.0	100	0.7	2	90	6.31	3274
14	5.0	200	0.6	1	90	8.11	3821
15	5.0	300	0.5	5	45	9.56	6089
16	5.0	400	0.4	3	45	12.23	5532

2 空气射流清水试验结果与分析

为探究空气射流喷嘴处局部水体紊动特性,开展了无泥沙条件下的静水水槽试验,研究水下排气过程中气泡运动过程、羽流形态特征及局部紊动水体水流结构。

2.1 羽流发展阶段

喷嘴垂直向下排气时,羽流在水体中的运动过程见图 3,包括如下 4 个阶段:①形成阶段。气体排出,羽流开始下切,气泡密集且细小。②发展阶段。在初始动量的作用下,羽流不断向下延伸,下切长度和径向尺寸逐渐增大,将周围的水体不断卷吸进来,此时附近水体的紊动加强。③上浮阶段。当离开喷

口的气体动量消耗完后,羽流下切长度达到最大,轴向上不再下切,气体在浮力的作用下开始向上运动,环境压力随羽流上升而逐渐降低,羽流体积逐渐增大。④扩散阶段。当气泡羽流上升至水面附近时,羽流转向水平方向流动,形成具有垂向速度梯度的表面流区;气体上浮至水面时,气体与表层水相互作用,气泡疏散且以溢出口为中心向四周拓展,形成倒立的锥形羽流结构。

喷嘴 45°斜向下排气时,气体在水体中的运动过程也同样经历了形成、发展、上浮和扩散阶段。与 90°排气不同的是,45°排气时气体的上升在羽流发展阶段已经出现,并且在羽流充分发展后,45°排气的羽流体积远大于 90°排气,见图 4。

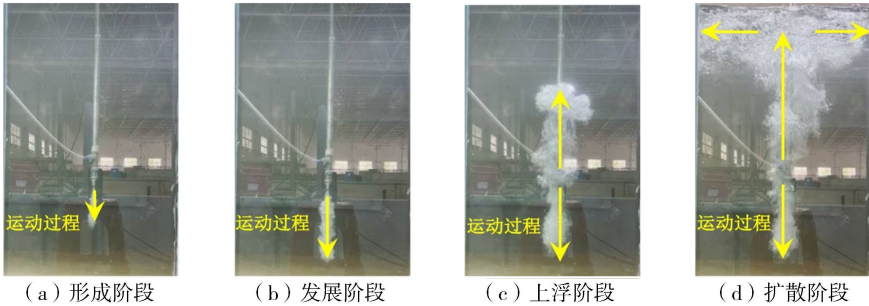


图 3 喷嘴垂直向下排气时羽流运动过程



图 4 不同角度排气时羽流运动过程对比

2.2 羽流下切长度影响因素

采用信噪比分析法判定下切长度的主要影响因素。信噪比分析是处理正交试验结果的常用方法,采用信噪比度量试验过程的稳健性,通过优化无法控制的因素(如噪声)降低试验误差^[16]。计算得出下切长度信噪比响应如表 3 所示。Delta 值等于该因素水平的最高平均响应值减去最低响应值,按照 Delta 值从高到低排序,将 Delta 值最高的因素分配排秩为 1,依此类推。

表 3 各因素下切长度信噪比响应

序号	信噪比响应				
	距离	排气气压	水深	喷嘴孔径	排气角度
1	22.78	19.98	23.18	22.31	22.48
2	23.13	23.28	24.11	22.50	24.95
3	23.19	24.91	23.63	22.77	
4	23.43	26.70	23.96	22.39	

通过信噪比分析可以得到影响下切长度 5 个因素(距离、排气气压、水深、喷嘴孔径、排气角度)的 Delta 值分别为 0.65、6.72、0.93、0.46 和 2.47,可以看到,排气气压信噪比的 Delta 值最大,排秩为 1,是影响下切长度最显著的因素;排气角度信噪比的 Delta 值次之,排秩为 2,是影响下切长度次显著的因素;距离、水深和喷嘴孔径这 3 个因素对下切长度的影响不显著。

利用多项式回归,拟合出下切长度 L 的回归方程:

$$L = -0.83214 - 2.5A + 0.03675B + 0.75C + 0.70714D + 0.09167E \quad (1)$$

式中: A 为距离; B 为排气气压; C 为水深; D 为喷嘴孔径; E 为排气角度。该方程的相关系数 R^2 为 0.95,表明回归效果较好。可以看到,距离因素的系数为负,表明随着距离的增大,下切长度降低;其他因素的系数为正。

2.3 喷嘴处局部水体的紊动强度特征

静水中射入垂直向下的空气射流,会对静水水体产生强烈的局部扰动。 x 为自喷嘴轴线的水平向距离,取 20~60 cm; y 为自喷嘴的垂向距离,向下为正,取 3~5 cm; h 为喷嘴至槽底距离,取 3~5 cm。根据量纲统一原理构建无量纲数 x/h 与 y/h 。喷嘴垂直向下时 3 种不同排气气压下的空气射流卷吸、裹挟周围水体产生的局部紊动强度(水平向和垂向计算合成值)见图 5。结果表明,断面局部紊动强度随空气射流压强 p 的增大而增大,致紊效果较为显著,但在远离喷嘴处水体紊动强度较弱,即射流引起的水流紊动沿横向迅速衰减,表现出空气射流对提高水流输沙能力仅具有局部效应;另一方面,射流冲

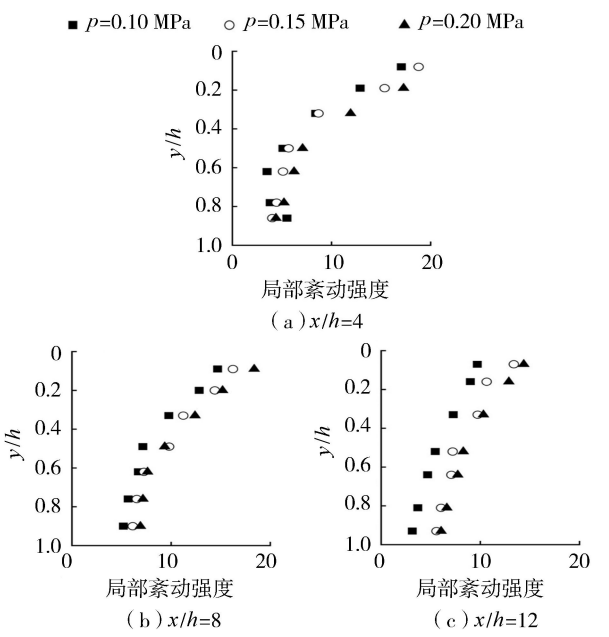


图 5 射流局部紊动强度变化

击槽底形成近底部较强的水流紊动,若槽底为床沙,可以卷吸起动大量底沙。

图 6 为相同试验条件排气过程中射流底部水体紊动切应力。紊动切应力反映了剪切流场中紊动引起的动量交换,在紊流核心区内,紊动剪应力 τ_{xy} 起主导作用,故仅对此进行分析。由图 6 可见,底部紊动切应力在自喷嘴轴线的水平向距离约为 10 cm 时达到最大,随后迅速衰减,这是下切羽流冲击槽底的反射作用造成的。

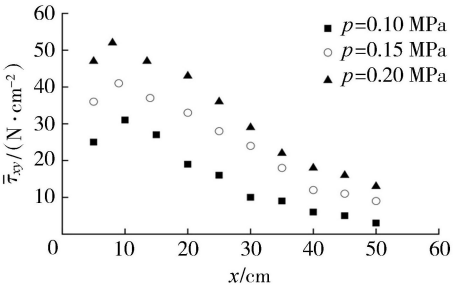


图 6 射流底部紊动切应力

图 7 为相同试验条件下射流局部紊动能随压强和水平距离的变化,图中 k_m 为水平断面平均紊动能, k_{max} 为断面最大紊动能。平均紊动能 k 为表征某

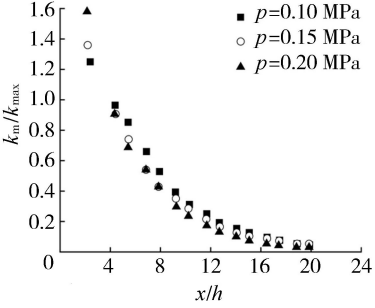


图 7 水平断面平均紊动能的衰减

点紊动强弱的物理量,定义如下:

$$k = \frac{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}{2} \tag{2}$$

式中 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$ 分别为纵向、横向和垂向的时均流速。

动能测量结果同样表明,空气射流引起的紊动随距离迅速衰减,但当自喷嘴轴线的水平向距离与喷嘴至槽底距离之比较大时 ($x/h>4$),超出了下切羽流冲击槽底反射作用范围,并没有表现出如图 6 所示的先上升后下降的趋势,因此空气射流只能对水体造成局部紊动。

3 气动冲沙浑水试验结果与分析

为探究空气射流的冲沙能力,开展了有床沙条件下的静水水槽试验,研究各水-气参数对冲沙效果的影响,得出冲刷坑最大冲刷深度和冲刷坑体积与各因素之间的预测方程,并通过对方程进行优化,得出了最大冲沙效果时各因素的水平。

3.1 冲刷坑发展过程

在水深为 75 cm、喷嘴孔径为 2 mm、排气气压为 0.3 MPa、距离为 1 cm、排气角度为 90°的水气参数条件下,分别进行排气 0.5 min、2 min、4 min、8 min 和 12 min 这 5 组试验。不同排气时间下的冲刷坑最大深度与体积见图 8。

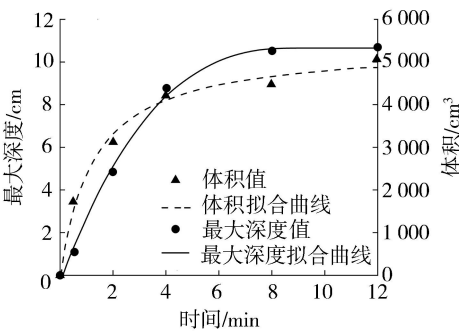


图 8 冲刷坑最大深度与体积随排气时间变化曲线

冲刷试验结果表明,冲刷坑的最大深度在 2 min 之前大幅增加,冲刷坑纵向拓展迅速,在 2 ~ 4 min 时增幅减缓,4 ~ 8 min 后最大深度变化开始趋于稳定,在 8 min 后基本稳定在 10 cm 左右,达到了该工况下冲刷的最大深度。同时可以看出冲刷坑的体积在 4 min 之前有大幅增加,结合冲刷坑深度随时间变化曲线可以看出在 2 ~ 4 min 时冲刷坑主要是横向拓展。根据清水排气试验时所得的结论,此时接近喷嘴处的气体压力较大,气泡小且密集,可能是气体掺混水体对泥沙产生了直接作用;当气泡发展后,气体的压力减小,羽流的径向和轴向开始发展,将周围的水体卷吸进来,加强了附近水体的紊动,水体挟沙的能力得到了大幅提高,冲刷能力相对前一阶段也得到了增强,因此体积增大的幅度在不断加大。

在接近 4 min 时,冲刷坑体积已经显著扩大,水体作用到冲刷坑表面的紊动强度大幅削弱,冲刷效果开始减弱,体积增大的趋势开始减缓。在 8 min 后冲刷坑的体积趋于稳定,基本达到了紊动水体的最大影响范围。可以认为,当其他因素变幅不大时,排气的前 8 min 是冲刷的有效时段。

因此,气动冲沙的冲刷坑发展过程可概括为以下 3 个阶段:①形成阶段。在开始排气的瞬间,床沙表面变为不连续的水沙混合,随气泡向上输运,此阶段的冲刷坑体积与深度急剧增大。②发展阶段。随着冲刷坑深度与体积的增加,下切羽流的动量急剧衰减,此阶段起动底沙的主要驱动是空气射流卷吸附近水体产生局部的强烈紊动,多数扬起的泥沙冲至冲刷坑外,此阶段的冲刷坑深度与体积增长趋势仍较为显著。③稳定状态。随着排气时间的增加,冲刷坑的深度与体积基本稳定,坑内基本无泥沙扬起和下落。这是由于下切羽流引起的紊动随着自喷嘴距离的增大迅速衰减,当紊动水体边界处流速小于泥沙起动流速时,该处床沙不会起动。在实际的清淤工程中,当冲沙坑达到该工况下的稳定状态时,继续排气不会增强清淤效果。

3.2 冲刷坑影响因素

采用方差分析法^[17]对表 2 中试验数据进行分析。一般来说,由于不同组之间试验条件的差异,导致组间差异远大于组内差异,将两者比值与显著性检验水平 F 值进行判断比较,如果 F 值远大于 1,则说明试验条件的影响显著,同时,若再加以检验水平 P 值进行判断,若 P 值小于 0.05,则更能说明因素显著情况。冲刷坑最大深度和体积的方差分析结果分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 冲刷坑最大深度方差分析结果

因素	自由度	调整平方和	调整均方	F	P
距离	3	57.617	19.205 5	188.09	0.005
排气气压	3	117.078	39.025 9	382.21	0.003
水深	3	6.426	2.142 0	20.98	0.046
喷嘴孔径	3	0.459	0.153 0	1.50	0.424
排气角度	1	0.001	0.001 1	0.01	0.928

注:表中自由度为数据统计时可自由变化的变量个数;调整平方和是对模型的不同因素变异的度量;调整均方是描述模型中某项变异量大小的度量。

表 5 冲刷坑体积方差分析结果

因素	自由度	调整平方和	调整均方	F	P
距离	3	17 937 751	5 979 250	2.02	0.032
排气气压	3	29 516 366	9 838 789	5.40	0.020
水深	3	854 639	284 880	0.04	0.433
喷嘴孔径	3	348 355	116 118	4.13	0.078
排气角度	1	34 133	34 133	1.53	0.717

通过冲刷坑最大深度方差分析可以得出标准差

为 0.3195,相关系数为 99.89%,调整后的相关系数(用于比较不同数量预测变量的符合程度)为 99.16%,预测的相关系数(用于描述预测结果的符合程度)为 92.81%。从表 4 可知,排气气压和距离的 F 值分别为 382.21 和 188.09,均远大于 1,同时 P 值远小于 0.05,表明这 2 个因素为显著效应因素;而水深的 P 值接近 0.05,其影响程度要小得多,但喷嘴孔径和排气角度的 P 值均大于 0.05,属于影响不显著的因素。可以看出,在小水深条件下,影响冲刷坑最大深度的显著因素分别为排气气压与距离,而水深、喷嘴孔径、排气角度这 3 个因素对冲坑深度的影响较弱。

通过冲刷坑体积方差分析可以得出标准差为 443.356,相关系数为 99.20%,调整后的相关系数为 93.99%,预测的相关系数为 98.74%。从表 5 可知,在小水深条件下,气压和距离同样是影响冲刷坑体积的显著因素。

3.3 气动冲沙公式拟合与预测

方差分析法还可以得出冲刷坑最大深度和体积与各因素之间的预测方程。定义冲刷坑最大深度为 H_{max} 、冲刷坑体积为 V ,利用多项式回归,通过方差分析得到了冲刷坑最大深度和体积的回归方程:

$$H_{max} = 4.404 - 0.8549A + 0.024167B + 5.473C - 0.0459D - 0.00036E \tag{3}$$

$$V = 1395 - 117.8A + 6.49B + 56C + 452D + 10.72E \tag{4}$$

从上述方差分析可知,整个模型的相关系数、调整后的相关系数和预测的相关系数均高于 90%,表明模型分析结果可靠。利用式(3)(4)预测了冲刷坑最大深度和体积,并与冲沙正交设计不同水-气参数条件下的试验实测值作对比,如表 6 和表 7 所示。由此可知,通过方差分析得出的回归方程不仅可以

表 6 冲刷坑最大深度预测值与试验值偏差分析

距离/ cm	气压/ kPa	水深/ m	喷嘴 孔径/ mm	排气角度/ (°)	最大深度		
					预测值/ cm ³	实测值/ cm ³	相对 偏差/%
-0.5	200	0.6	2	90	12.8	16.2	20.9
0.5	400	0.7	3	45	17.3	15.5	-11.6
3.5	100	0.4	5	90	5.8	4.3	-34.8
5.0	300	0.5	1	45	10.1	9.6	-5.2

表 7 冲刷坑体积预测值与试验值偏差分析

距离/ cm	气压/ kPa	水深/ m	喷嘴 孔径/ mm	排气 角度/ (°)	体积		
					预测值/ cm ³	实测值/ cm ³	相对 偏差/%
-0.5	200	0.6	2	90	4654.3	5896.2	21.1
0.5	400	0.7	3	45	5809.7	4722.4	-23.0
3.5	100	0.4	5	90	4878.9	4263.3	-14.4
5	300	0.5	1	45	3715.4	3928.1	5.4

较好地拟合正交设计中冲刷坑的最大深度与体积,并且可以用来预测不同水-气参数条件下冲刷坑的最大深度与体积,对比预测值与实测值,结果令人满意。

4 结 语

本文利用水槽试验分别进行了空气射流清水试验与气动冲沙浑水试验。在清水试验中,总结并归纳出羽流发展的 4 个阶段;通过正交试验信噪比分析发现气压是决定羽流下切长度的最显著因素,拟合出羽流下切长度的回归方程;在对排气喷嘴处局部水体的紊动特性研究中,得出了断面紊动强度随空气射流压强的增大而增大,射流冲击槽底形成近底部较强的水流紊动,底部紊动切应力随距离增加而迅速衰减的结论。在浑水试验中,总结出冲刷坑发展的 3 个阶段,并发现排气的前 8 min 是冲刷的高效时段;通过正交试验方差分析发现排气气压和喷嘴至床面距离是决定冲沙效果的显著因素;利用多项式回归,拟合出冲刷坑最大深度与体积的预测公式,预测值与实测值较为吻合。

参考文献:

[1] 罗优,简鸿福,罗琳,等. 多沙河流河口泥沙淤积自生性过程试验研究[J]. 水科学进展,2018,29(3):348-356. (LUO You, JIAN Hongfu, LUO Lin, et al. An experimental study of autogenic processes in river deltas with a high sediment load-water ratio[J]. Advances in Water Science,2018,29(3):348-356. (in Chinese))

[2] 孙东坡,吴默溪. 黄河小浪底水库运用以来的泥沙淤积特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018,39(2):74-79. (SUN Dongpo, WU Moxi. Analysis of characteristics of sediment in Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2018,39(2):74-79. (in Chinese))

[3] 吴腾,申孙平,李涛,等. 三盛公水库运用对下游河道输沙的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):401-405. (WU Teng, SHEN Sunping, LI Tao, et al. Influence of operation of Sanshenggong Reservoir on sediment transport in the downstream river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):401-405. (in Chinese))

[4] 常留红,覃瓶山,郑景琦,等. 水沙条件对大湖口河冲淤特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):15-20. (CHANG Liuhong, QIN Pingshan, ZHENG Jingqi, et al. Influence of water and sediment conditions on scouring and silting characteristics of Dahukou River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42

- (4):15-20. (in Chinese))
- [5] 申冠卿, 张晓华, 李勇, 等. 1986 年以来黄河下游水沙变化及河道演变分析[J]. 人民黄河, 2000, 52(9):10-11. (SHEN Guanqin, ZHAN Xiaohua, LI Yong, et al. Analysis of runoff and sediment variation and channel evolution in the lower Yellow River since 1986[J]. Yellow River, 2000, 52(9):10-11. (in Chinese))
- [6] 黄建维, 张金善. 我国河口挡潮闸闸下淤积综合治理技术[J]. 泥沙研究, 2004, 49(3):46-53. (HUANG Jianwei, ZHANG Jinshan. Regulation techniques of sediment siltation downstream tidal barriers in China[J]. Journal of Sediment Research, 2004, 49(3):46-53. (in Chinese))
- [7] 田海涛, 张振克, 李彦明, 等. 中国内地水库淤积的差异性分析[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(6):28-33. (TIAN Haitao, ZHANG Zhenke, LI Yanming, et al. Differences in reservoir sedimentation in Inland China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(6):28-33. (in Chinese))
- [8] 齐梅兰, 陈稚聪, 府仁寿. 射流冲沙研究[J]. 水利学报, 2003, 48(12):71-75. (QI Meilan, CHEN Zhicong, FU Renshou. Experimental study on sediment transportation by impinging jet[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 48(12):71-75. (in Chinese))
- [9] 陈稚聪, 府仁寿, 齐梅兰. 有压输水系统中用射流冲沙的系列模型试验研究[J]. 水利学报, 2002, 47(5):55-58. (CHEN Zhicong, FU Renshou, QI Meilan. Model study on forced erosion using impinging jet in pressured water transportation system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 47(5):55-58. (in Chinese))
- [10] 齐梅兰, 府仁寿, 陈稚聪. 射流冲刷平衡深度研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 22(3):368-372. (QI Meilan, FU Renshou, CHEN Zhicong. Study on equilibrium scour depth of impinging jet [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2005, 22(3):368-372. (in Chinese))
- [11] YEH Pohung, CHANG Kuangan, JOHN Henriksen, et al. Large-scale laboratory experiment on erosion of sand beds by moving circular vertical jets [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(3):248-255.
- [12] 罗勇, 窦希萍, 罗肇森. 气动冲淤法治理黄河泥沙的一点思考[J]. 水利学报, 2007, 52(增刊1):276-282. (LUO Yong, DOU Xiping, LUO Zhaosen. A few thinking for the Yellow River sediment regulation with "air-uplift" [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 52(Sup1):276-282. (in Chinese))
- [13] 丁磊, 罗勇, 窦希萍, 等. 气动冲沙法辅助小浪底水库调沙的设想[J]. 人民黄河, 2019, 41(7):66-71. (DING Lei, LUO Yong, DOU Xiping, et al. Assumption of assisting sediment regulation in Xiaolangdi Reservoir by pneumatic sluicing [J]. Yellow River, 2019, 41(7):66-71. (in Chinese))
- [14] 徐进超, 丁磊, 罗勇. 气动冲沙数值仿真模型研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(6):29-33. (XU Jinchao, DING Lei, LUO Yong. Numerical simulation of air uplift and control sediment [J]. Yellow River, 2019, 41(6):29-33. (in Chinese))
- [15] 沈邦兴. 实验设计及工程应用[M]. 北京:中国计量出版社, 2005.
- [16] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [17] 何为, 唐斌, 薛卫东. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2012.

(收稿日期:2022-03-06 编辑:骆超)

(上接第 55 页)

- [15] 李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9):2559-2563. (LI Yuanhui, LIU Jianpo, ZHAO Xingdong, et al. Study on b -value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9):2559-2563. (in Chinese))
- [16] 余乐兴. 不同粒径充填体单轴压缩条件下力学性能及声发射特性研究[D]. 赣州市:江西理工大学, 2015.
- [17] 周逸飞, 朱星, 刘文德. 基于声发射和高斯混合模型的灰岩破裂特征识别研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11):131-140. (ZHOU Yifei, ZHU Xing, LIU Wende. Identification of cracking characteristics of limestone under uniaxial compression condition using acoustic emission and GMM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(11):131-140. (in Chinese))
- [18] 李漾, 刘洋, 丁翠, 等. 不同层理煤破坏过程声发射 RA-AF 特征研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(1):37-43. (LI Yang, LIU Yang, DING Cui, et al. RA-AF characteristics of acoustic emission in uniaxial compression failure of different bedded coal [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(1):37-43. (in Chinese))
- [19] 陈忠购. 基于声发射技术的钢筋混凝土损伤识别与劣化评价[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- [20] 葛振龙, 孙强, 王苗苗, 等. 基于 RA/AF 的高温后砂岩破裂特征识别研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2):176-183. (GE Zhenlong, SUN Qiang, WANG Miaomiao, et al. Fracture feature recognition of sandstone after high temperature based on RA/AF [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2):176-183. (in Chinese))

(收稿日期:2022-02-23 编辑:刘晓艳)