

固体颗粒物运动对磨蚀的影响研究

苏昆鹏, 吴建华, 夏定康, 丁志屿

(河海大学水利水电学院, 南京, 210098, Email: kunpengsu@yahoo.com)

摘要: 在国内外高坝水电工程面临的高速含沙水流问题中, 泥沙磨损联合空化空蚀产生的磨蚀问题颇为突出。关于泥沙颗粒特性对磨蚀的影响, 前人大多研究粒径和含量, 鲜有对颗粒运动特性影响的研究。本研究通过振动空蚀试验, 探究粗细两种粒径的玻璃微珠其浓度和运动速度对磨蚀的影响规律。研究发现, 细颗粒浓度越大, 磨蚀越减轻, 粗颗粒反之; 粗颗粒运动速度对磨蚀的影响较细颗粒更显著, 可用磨粒磨损机制解释。

关键词: 磨蚀; 固体颗粒物; 粒径; 浓度; 运动速度

1 引言

在“一带一路”沿线国家已建成和在建的高水头水工泄水建筑物面临的高速水流问题中, 空化空蚀无疑是影响“超级工程”安全的重要问题^[1-3], 再加上众多内陆河流特殊的多泥沙特点, 含沙水流中的磨蚀问题更为复杂。

影响磨蚀的因素包括材料特性、水流特性和泥沙特性, 多年来在泥沙特性方面主要研究集中在含沙量^[4-9]、泥沙颗粒的尺寸^[10-13]和级配^[13-14]等。2013年, Wu 和 Gou^[15]基于磨蚀试验成果提出泥沙粒径存在临界情况, 大于临界粒径时磨蚀加剧, 小于临界粒径时磨蚀减轻, 且随着含沙量增加影响更明显。然而, 认识泥沙运动特性对磨蚀的影响也很必要。

前人对泥沙运动特性的影响研究^[16]多直接针对水力空化联合磨粒磨损产生的材料剥蚀破坏, 即高速含沙水流对过流壁面的磨蚀。由于空蚀机制十分复杂, 既涉及空化机理, 又涉及材料破坏机制, 因此, 含沙水流的速度主要从两方面对磨蚀产生影响, 一是通过改变水流初生空化数 σ_i 影响空化, 即流速越大越容易发生空化; 二是通过改变泥沙颗粒运动影响磨损, 即颗粒运动速度越大磨损越严重。但是, 不论是水洞磨蚀试验^[4-6]还是旋转喷射磨蚀试验^[12, 14]均无法单独研究颗粒运动速度对磨蚀的影响。

本研究以振动空蚀装置和固体颗粒物悬浮装置为试验设备, 以粗细两种粒径的颗粒物

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479057); 中央高校基本科研业务费专项资金(2019B70914); 江苏省研究生科研创新计划项目(SJKY19_0482)

对试件的磨蚀为研究对象，通过控制搅拌条件改变颗粒运动速度，进行磨蚀试验和清水空蚀试验，研究固体颗粒物运动对金属材料磨蚀特性的影响。

2 试验条件与方案

本试验是使用上海研永超声设备有限公司的 VCY-1500 型压电陶瓷式超声波振动空蚀设备进行的，试验系统如图 1 所示。为了规避吸气漩涡的影响，通过电动搅拌器偏心搅拌使固体颗粒物充分悬浮，超声波变幅杆带动嵌在端部的试件在颗粒物悬浮液中高频振动，发生振荡型空化，致使试件表面产生磨蚀破坏。

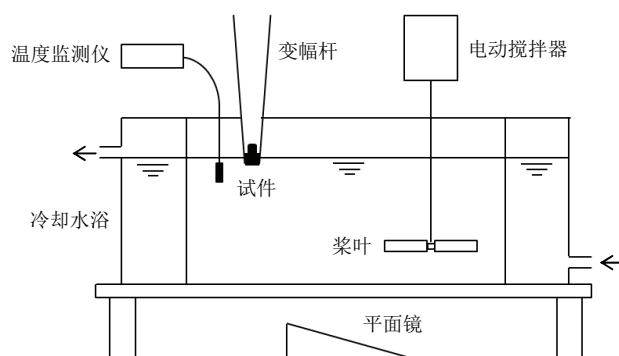


图 1 试验系统整体布置

电动搅拌器的浆叶转速可在 100 ~ 1500 r/min 范围内连续调节，浆叶直径为 7.5 cm，浆叶偏心距为 6.0 cm，浆叶离底高度为 2.5 cm，即偏心率 55%、相对离底高度 30%。考虑到避免使表面水流运动过于复杂，容器壁不粘贴挡水条。

试验溶液为含有固体颗粒物的蒸馏水，通过冷却水浴和温度监测仪使试液温度保持在 25℃。固体颗粒物采用窄分布玻璃微珠，有中值粒径 d_{50} 为 45 μm 和 90 μm 两种，密度为 2.55 g/cm³，莫氏硬度 6~7 级，成圆率大于 85%。试件材料为同一批次 45 号钢，密度为 7.85 g/cm³，试件轴心距离容器壁 5.0 cm，试件表面浸没在液面下 2 mm 处。

试件设计和试验操作依照国家标准《GB/T 6383-2009 振动空蚀试验方法》^[17]进行。每个试件的试验时间为 5 h，每隔 15 min 或 30 min 称量一次失重情况。超声波发生器输出功率为 1 kW，工作频率为 20 kHz，经电涡流式位移振幅测量仪测定，试件振幅为 50 μm （峰到峰），各种参数误差均控制在 5% 范围内。

本试验设计的主要难点在于如何保证固体颗粒物完全悬浮以及如何确定和控制固体颗粒物速度。首先，为确保固体颗粒物处于完全悬浮状态，不妨通过观察容器底部固体颗粒物沉积情况来确定临界悬浮工况，即研究持续 1~2 s 没有颗粒沉积时的浆叶转速，通常称

为完全离底临界搅拌转速 N_{js} ，只要桨叶转速高于该值，颗粒即完全悬浮。Zwietering^[18]通过大量研究发现，临界搅拌转速 N_{js} 既与固相的粒径和密度、液相的黏度和密度等物理特性有关，又和搅拌器、搅拌槽的几何特性有关。

表1 不同固体颗粒物浓度 ϕ 下的临界搅拌转速 N_{js}

	r/min									
ϕ (v/v)	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
$d_{50}=45\ \mu\text{m}$	518	584	602	619	647	658	674	699	710	730
$d_{50}=90\ \mu\text{m}$	562	609	648	668	680	685	692	708	724	748

表1为不同颗粒浓度 ϕ 下的临界搅拌转速 N_{js} ，颗粒浓度在 $\phi = 0.01 \sim 0.10$ 范围内变动。不难看出，随着固体颗粒物体积分数的增大，达到完全离底悬浮状态所需要的最低搅拌速度也越大；与两种粒径的固体颗粒物相比，大颗粒悬浮液比小颗粒悬浮液需要更高的桨叶转速来遏止颗粒物沉降。当颗粒含量较少 ($\phi < 0.02$) 时，临界搅拌转速 N_{js} 随颗粒浓度增大的幅度较明显，且临界悬浮工况下水面较平稳；当颗粒浓度较高 ($\phi > 0.06$) 时，临界搅拌转速 N_{js} 随颗粒浓度增大的趋势放缓，且水流表面紊动剧烈，甚至引起往复冲动的浪涛。在设计试验工况时，颗粒浓度不能过低，以免悬浮液的宏观物理特性（如黏滞性）较清水相差无几，颗粒浓度也不能过高，否则液体剧烈打旋，且能够改变的转速范围十分有限，颗粒速度不易控制和测量，因此，本试验不妨选择 $\phi = 0.02 \sim 0.06$ 范围的颗粒浓度。

空蚀试验中试件表面附近的固体颗粒物速度无法直接测量，故其确定与控制也是本试验设计的主要难点之一。由于桨叶的搅拌作用，液体产生径向、轴向和切线3个分速度，其中，切线速度促使液体绕轴转动，可见试件表面附近水流速度与桨叶转速之间可能具有一定的相关性；当水流强度达到一定程度后，原来在静止液体中会沉降的颗粒由静止转入运动，由前人研究可知，颗粒相对水流具有一定的跟随性^[19-21]，即固体颗粒物运动速度与水流速度之间也存在明显相关性。因此，只要厘清桨叶转速与水流速度之间、水流速度与颗粒速度之间的相关关系，即可直接通过桨叶转速控制颗粒运动速度。

在紊流力学中，通常用颗粒速度 v_p 和流体速度 v 的比值来表征颗粒跟随流体的程度，其取决于颗粒粒径 d_p 、颗粒密度 ρ_p 、液体黏度 μ 、液体密度 ρ 和紊流脉动频率 f 等。 $v_p/v = 1$ 表示颗粒完全跟随流体， $v_p/v < 1$ 表示颗粒滞后于流体。根据描述紊流场中单个颗粒运动的 Basset-Boussinesq-Ossen 方程（简称 BBO 方程）并进一步推导^[20]，可以得到关于固体颗粒物运动速度 v_p 与水流速度 v 之间的相关关系：

$$\frac{v_p}{v} = \sqrt{1 - \frac{(a + 2b\sqrt{\pi f})^2 - (a + 2\sqrt{\pi f})^2}{(a + 2\sqrt{\pi f})^2 - (a + c/\sqrt{\pi f})^2}} \quad (1)$$

$$\text{式中, } a = \frac{18\sqrt{\rho_f \mu}}{(2\rho_p + \rho_f)d_p}, \quad b = \frac{3\rho_f}{2\rho_p + \rho_f}, \quad c = \frac{36\mu}{(2\rho_p + \rho_f)d_p^3}.$$

充分发展的紊流通常包含从低频到高频的各种脉动频率，水流脉动频率越高，颗粒越不易跟随，由于本试验中水体表面紊动不甚剧烈，参考文献[21]的成果，不妨取 $f=20\text{ Hz}$ 。将本文颗粒特性和 25°C 时液体特性代入上式，可得不同粒径颗粒在水流中的跟随特性，对于中值粒径为 $45\ \mu\text{m}$ 和 $90\ \mu\text{m}$ 的玻璃微珠，算得 v_p/v 分别为 0.993 和 0.960 ，可见两种粒径的固体颗粒物均基本上能跟随水流质点运动。

不同桨叶转速下试件位置处的颗粒运动速度 v_p 如图 2 所示，该颗粒速度值由实测的水流速度乘以 v_p/v 得到，试件附近的水流流速 v 则采用浮标法，即释放泡沫塑料颗粒并通过摄影捕捉其运动轨迹和速度。图中桨叶转速均大于临界搅拌转速 N_{js} ，可以看出，颗粒速度与桨叶转速正相关，在相同的搅拌转速下，细颗粒获得的速度比粗颗粒大。为了研究固体颗粒物运动对磨蚀的影响，不妨选择 $v_p = 25 \sim 35\ \text{cm/s}$ 范围的颗粒速度，从图 2 中即可读出各颗粒速度值对应的桨叶转速。

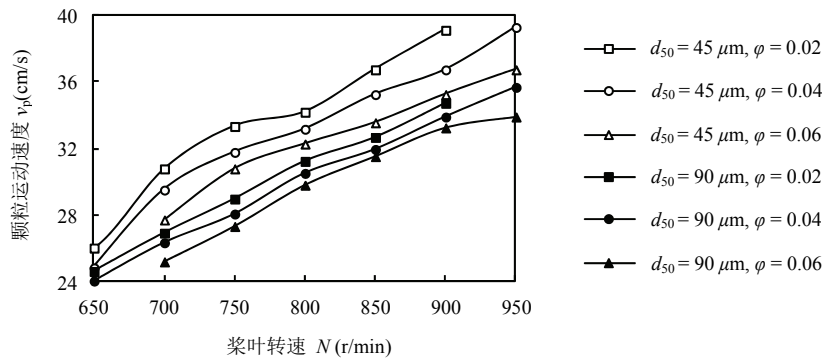


图 2 不同桨叶转速 N 下试件位置处的固体颗粒物运动速度 v_p

综上，试验工况设置如表 2 所示。工况 0 为不含有固体颗粒物的工况，即清水工况，工况 1~工况 6 研究固体颗粒物浓度的影响，工况 5~工况 10 研究固体颗粒物运动速度的影响，固体颗粒物均采用 $d_{50} = 45\ \mu\text{m}$ 和 $90\ \mu\text{m}$ 的玻璃微珠。

表 2 试验工况

工况	颗粒浓度 ϕ (v/v)	颗粒尺寸 d_{50} (μm)	颗粒速度 v_p (cm/s)	桨叶转速 N (r/min)
0	/	/	/	/
1, 2	0.02	45, 90	30	688, 771
3, 4	0.06	45, 90	30	734, 803
5, 6	0.04	45, 90	30	708, 788
7, 8	0.04	45, 90	25	652, 687
9, 10	0.04	45, 90	35	818, 901

3 试验结果与分析

固体颗粒物浓度和运动速度对磨蚀的影响是依据试件累积质量损失 WL 进行研究的, 试验结果如图 3 和图 4 所示, 即各组工况的累积质量损失随试验时间 t 的变化。

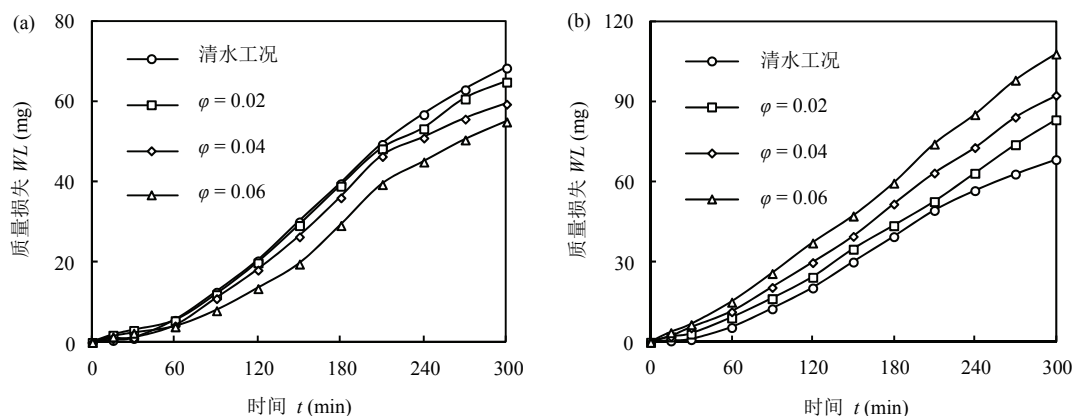


图 3 不同浓度下(a) $d_{50} = 45\mu\text{m}$ 和(b) $d_{50} = 90\mu\text{m}$ 颗粒工况的空蚀量随时间变化情况

图 3(a)和 3(b)分别为两种中值粒径颗粒在不同浓度情况下的 $WL-t$ 曲线。显然对两种粒径而言, 规律截然相反: 对于 $d_{50} = 45\mu\text{m}$ 的颗粒, 试件质量损失均比清水工况低, 且颗粒浓度越大, 减蚀效果越明显, 而对于 $d_{50} = 90\mu\text{m}$ 的颗粒, 试件的磨蚀破坏情况比清水工况要剧烈, 且颗粒浓度越大, 增蚀程度越显著。

从空蚀潜伏期的角度来看, 清水中空蚀存在潜伏期, 而加入 $90\mu\text{m}$ 固体颗粒物后几乎看不出明显的潜伏期, 加入 $45\mu\text{m}$ 固体颗粒物则在起初 30min 空蚀速度快于清水, 随后 30min 慢于清水, 并从 60min 左右起比清水中的空蚀量要小。另外, 由曲线的斜率可以看出, 粒径 $90\mu\text{m}$ 时蚀损速度比清水快 $15\% \sim 25\%$, 而粒径 $45\mu\text{m}$ 时则慢 $5\% \sim 15\%$, 尤其在浓度 $\varphi = 0.02$ 时与清水的空蚀变化过程仅差 5% 。若以持续 300min 的试件质量损失为例分析, 中值粒径为 $90\mu\text{m}$ 时体积浓度分别为 0.02 、 0.04 和 0.06 工况下相比清水中的质量损失率达到了 21.8% 、 35.1% 和 57.8% , 而 $45\mu\text{m}$ 时则为 -5.1% 、 -13.2% 和 -19.6% 。不难看出, 固体颗粒物的粒径和浓度对空蚀破坏存在重要的影响, 一方面细颗粒对空蚀存在抑制作用; 另一方面粗颗粒对磨蚀破坏存在促进作用, 两种作用都随着浓度的增大而愈发明显。

对于细颗粒而言, 随着浓度的增加, 颗粒之间的相互作用增大, 在液体宏观物理性质上体现为固体颗粒物悬浮液的黏滞性增大^[22-25], 根据黄继汤等^[26-27]的高速摄影研究, 增大液体黏度可使空泡的膨胀和压缩过程变缓, 进而降低微射流速度和减弱冲击波压强, 减轻空蚀破坏程度; 对于粗颗粒而言, 除非颗粒浓度足够大, 否则悬浮液黏滞性几乎不受颗粒浓度的影响^[28], 此时可能是颗粒的磨损作用在起着主要作用。

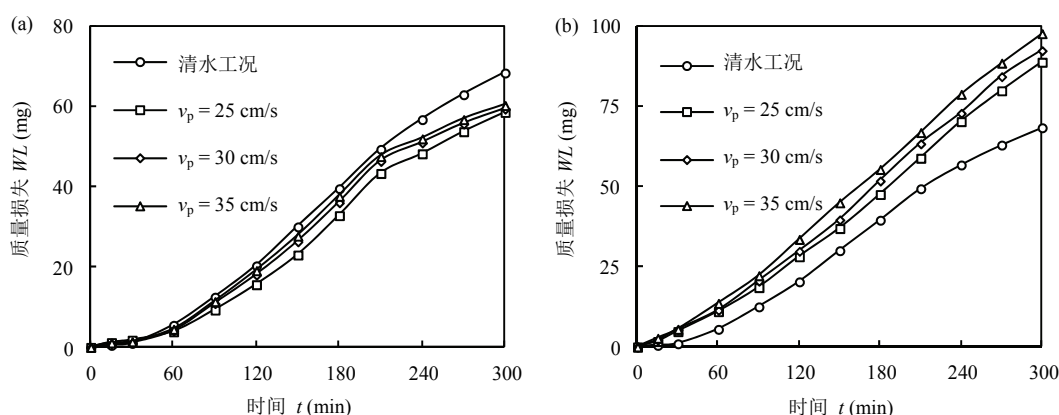


图 4 (a) $d_{50} = 45\mu\text{m}$ 和(b) $d_{50} = 90\mu\text{m}$ 颗粒在不同速度工况下的空蚀量随时间变化情况

图 4(a)和 4(b)分别为两种中值粒径颗粒在不同速度情况下的 $WL-t$ 曲线。不论是中值粒径为 $45\mu\text{m}$ 还是 $90\mu\text{m}$ 的固体颗粒物，增大颗粒运动速度都会对空蚀起到加剧作用，但对于细颗粒和粗颗粒工况的影响程度不同。若以持续 300 min 的试件质量损失为例分析， $d_{50} = 45\mu\text{m}$ 时颗粒速度从 25 cm/s 提高到 30 cm/s 和 35 cm/s 后，试件失质量分别增大了 1.4% 和 2.9%，而粒径 $90\mu\text{m}$ 的固体颗粒物运动速度从 25 cm/s 上升到 30 cm/s 和 35 cm/s 时质量损失分别增大了 9.0% 和 19.1%，这足以说明颗粒速度的改变对粗颗粒而言影响更为重要，而固体颗粒物速度对于细颗粒悬浮液中的磨蚀量几乎没有影响。

前文提到对于粗颗粒而言，颗粒磨损可能起主要作用，利用图 4(b)的结论可不妨作进一步解释和印证。在单纯的冲蚀磨损研究中，磨粒运动速度是影响过流面材料磨损的重要因素^[29, 30]，实际上材料被磨蚀状况很大程度取决于固体颗粒物的动能，颗粒动能越大，磨损作用越强。另外，颗粒物对过流面的磨损同时存在着切削作用与冲击作用两类，主要体现在冲击角的差异，切削作用通常是水流携带和驱动颗粒以小冲击角撞击过流面，大冲击角则多因空泡溃灭冲击波和微射流推动颗粒物近乎垂直撞向固壁，后者破坏更显著。当然，细颗粒也存在冲击，只是可能受悬浮液黏滞性的影响相对更强而已。

4 结论

通过试验研究固体颗粒物的粒径、浓度和运动速度对磨蚀的影响，得到如下结论：基于颗粒的跟随性理论，可以通过桨叶转速控制固体颗粒物的运动速度；对于细颗粒 ($d_{50} = 45\mu\text{m}$) 其浓度越大，磨蚀越减轻，运动速度对磨蚀的影响不明显，悬浮液黏滞性可能是主要影响因素；对于粗颗粒 ($d_{50} = 90\mu\text{m}$) 其浓度和速度越大，磨蚀越加剧，运动速度影响也不可忽视，此时颗粒磨损或起控制性作用。

参 考 文 献

- 1 高昂, 吴时强, 王芳芳, 等. 掺气减蚀技术及掺气设施研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 86-94.
- 2 许唯临, 罗晶, 卫望如, 等. 高坝水力学细观成因分析方法研究进展[A]. 第二十九届全国水动力学研讨会论文集[C]. 北京: 海洋出版社, 2018, 12-21.
- 3 吴建华. 水利水电工程中的空化与空蚀问题及其研究[A]. 第十八届全国水动力学研讨会文集[C]. 北京: 海洋出版社, 2004: 1-18.
- 4 刘一心. 悬浮泥沙对水流空化状态的影响[J]. 水利学报, 1983 (3): 55-58.
- 5 黄继汤, 田立言, 李玉柱. 挟沙水流中脆性材料及金属材料抗空蚀性能的试验研究[J]. 清华大学学报, 1984, 24(4): 50-62.
- 6 程则久. 空化和磨蚀中临界含沙量的试验研究[J]. 水利水电技术, 1990, (2): 57-63.
- 7 韩东, 黄继汤. 振荡空化与泥沙磨损模拟试验研究[J]. 水利学报, 1990, (1): 34-37, 5.7
- 8 邢述彦. 应用磁致伸缩仪进行材料磨蚀试验研究[J]. 太原理工大学学报, 1999, 30(1): 75-78.
- 9 邓军, 杨永全, 沈焕荣, 等. 水流含沙量对磨蚀的影响[J]. 泥沙研究, 2000, (4): 65-68.
- 10 Wang Y, Wu J H, Ma F. Cavitation-silt erosion in sand suspensions[J]. J. Mech. Sci. Technol., 2018, 32(12): 5697-5702.
- 11 Lian J J, Gou W J, Li H P, et al. Effect of sediment size on damage caused by cavitation erosion and abrasive wear in sediment-water mixture[J]. Wear, 2018, 398-399: 201-208.
- 12 卢金玲, 张欣, 王维, 等. 沙粒粒径对水力机械材料磨蚀性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 53-60
- 13 缙文娟, 练继建, 王斌, 等. 泥沙粒径对45号钢的磨蚀影响研究[A]. 第二十七届全国水动力学研讨会论文集[C]. 北京: 海洋出版社, 2016:1334-1339.
- 14 姚启鹏. 泥砂粒径级配对材料磨损影响的试验研究[J]. 水力发电学报, 1997, (1): 87-93.
- 15 Wu J H, Gou W J. Critical size effect of sand particles on cavitation damage[J]. J.Hydrodyn., 2013, 25(1): 165-166.
- 16 黄细彬, 袁银忠, 王世夏. 含沙高速水流的磨蚀机理和掺气抗磨作用[J]. 水利与建筑工程学报, 2006, 4(1): 1-5
- 17 GB/T 6383-2009. 振动空蚀试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
- 18 Zwietering T N. Suspending of solid particles in liquid by agitators[J]. Chem. Eng. Sci., 1958, 8: 244-253
- 19 张羽, 王鸿翔. 紊流中泥沙颗粒的跟随性分析[J]. 太原理工大学学报, 2010, 41(4): 392-394
- 20 梁在潮. 紊流力学[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1987
- 21 黄细彬. 高速含沙掺气水流及磨蚀机理的研究[D]. 南京: 河海大学, 2001
- 22 王宇. 液体空蚀特性试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2018
- 23 Einstein A. Eine neuebestimmung der molekuldimensionen[J]. Ann. Phys., 1906, 19: 289-306

- 24 Krieger I M, Dougherty T J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres[J]. Trans. Soc.Rheol., 1959, 3: 137–152
- 25 Mueller S, Llewellyn W E, Mader H M. The rheology of suspensions of solid particles[J]. Proc. Royal. Soc. A, 2010, 466(2116): 1201–1228
- 26 黄继汤. 液体粘性对空泡生存过程的影响[J]. 北京建筑工程学院学报, 1994, 10(2): 124–131
- 27 黄继汤, 陈嘉范, 丁彤. 含沙浓度对表面张力不同液体中单空泡膨胀及收缩过程的影响[J]. 水利学报, 1998, (2): 12–15, 41
- 28 Gou W J, Zhang H, Li H P, et al. Effects of silica sand on synergistic erosion caused by cavitation, abrasion, and corrosion[J]. Wear, 2018, 412-413: 120–126
- 29 Truscott G F. A literature survey on abrasive wear in hydraulic machinery[J]. Wear, 1972, 20(1): 29–50
- 30 Huang X B, Yuan Y Z. Mechanism and prediction of material abrasion in high-velocity sediment-laden flow[J]. J. Hydrodyn., 2006, 18(9): 760–764

Influence of solid particle motion on material removal caused by cavitation and abrasion

SU Kun-peng, WU Jian-hua, XIA Ding-kang, DING Zhi-yu

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098.

Email: kunpengsu@yahoo.com)

Abstract: Among those problems resulting from high-velocity silt-laden flows in chute spillways of high dams, the phenomena of cavitation erosion coupled with silt abrasion attract considerable attention. In terms of how silt particles affect cavitation erosion, much effort has focused on the influences of particle concentrations and sizes, while the impact of particle motion remains rarely reported. Based on accelerated erosion tests, the paper investigates the effects of the velocity, size and concentration of perfectly round glass beads narrowly distributed around the mean diameters on cavitation erosion. Test results indicate that higher concentrations of small particles contribute to lesser erosion while large ones aggravate pitting; and the velocity of large particles has greater influence on erosion than small ones, which may be explained by abrasive wear mechanisms.

Key words: Cavitation erosion, Abrasion, Concentration, Size, Particle velocity.