

含沙掺气高速水流对壁面磨蚀的分析

黄细彬, 袁银忠, 王世夏

(河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098)

摘要 探讨了沙粒磨损机理, 分析了影响磨蚀的因素, 研究了掺气抗磨的可能性, 根据试验数据导出了混凝土材料壁面磨损率的计算公式. 研究表明, 含沙水流对固壁材料的磨蚀率随掺气浓度、材料强度的增大而减小, 随水流流速、含沙量的提高而增大.

关键词 含沙水流 掺气 磨损 气蚀

中图分类号 TV131.3⁺2

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2000)02-0027-05

我国河流的特点之一是含沙量比较大, 年平均输沙量超过 1 000 万 t 的河流有 42 条, 其中黄河三门峡、长江葛洲坝年平均输沙量分别达 16 亿 t 和 5.1 亿 t. 三门峡多年平均含沙量为 37.9 kg/m^3 , 排沙底孔汛期泄流一般平均含沙量为 $80 \sim 100 \text{ kg/m}^3$. 已建的不少大中型水利水电工程泄水建筑物在高水头大流量挟沙水流的作用下遭受到不同程度的磨蚀^[1]. 随着水利水电事业的发展, 高水头大流量的水工建筑物愈来愈多, 建筑物受磨蚀的问题将愈来愈突出, 并成为设计、兴建、运行和管理的棘手问题. 如何预测和减轻乃至解决含沙高速水流的磨蚀问题, 是水电建设亟待解决的重要课题之一. 为抵抗磨蚀, 前人的研究较集中于各种材料的抗磨性能方面^[2~5]. 提高建筑物材料的抗磨强度, 加设新的护面等措施固然可解决问题, 但较为被动, 往往以提高工程建设成本为代价. 为此, 本文拟从含沙水流的运动特性出发, 通过探讨壁面的磨蚀机理, 分析影响壁面磨蚀的水力因素, 提出减轻磨蚀的措施, 并根据试验数据进行因次及回归分析, 从而得到预测和控制磨损率的计算公式.

1 含沙水流的磨蚀分析

1.1 气蚀与磨损

要正确掌握抗磨蚀的措施, 必须了解磨蚀产生的原因, 分析其破坏的机理, 理解气蚀与磨损两个不同的概念.

1.1.1 气蚀的特征

气蚀破坏的范围一般是局部的, 仅在特定的条件下发生. 气蚀的痕迹随破坏的不同程度而略有差异, 且与材料的性质有关. 一般认为, 气蚀的痕迹特征为材料表面出现杂乱的针状小孔、小麻点, 呈蜂窝状或海绵状.

关于气蚀的破坏机理, 主要有两种观点^[6]: 一种是冲击波压力说, 认为破坏是由于空泡溃灭中心辐射出来的冲击波压力造成的; 另一种是微射流冲击说, 认为破坏是由于空泡溃灭时的微射流造成的.

1.1.2 磨损的特征

磨损在含沙高速水流的过流表面处处存在, 范围较广, 往往会形成一片, 有明显的方向性. 磨损的痕迹除部分粗糙表面越磨越光外, 大部分损坏表面都出现波纹状或顺水流方向的沟槽及鱼鳞坑状的外观. 一般, 致密性材质和非金属的尼龙涂层等在浑水紊流边界层的作用下易形成鱼鳞坑、波纹状的破坏外观, 而环氧砂浆层破坏外观比较平整^[7]. 笔者在试验时亦发现, 有机玻璃破坏外观波纹状较为明显, 而沙浆试块破坏外观沟槽状较为明显.

收稿日期: 1999-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59279381).

作者简介: 黄细彬(1962—), 男, 福建惠安人, 高级工程师, 主要从事水力学及河流动力学研究.

可以认为,沙粒对过流表面的磨损过程是复合磨损,即同时存在微切削磨损与变形磨损。

1.1.3 磨蚀的特征

磨蚀是磨损与气蚀共同作用造成的材料损失。磨蚀破坏的特征既有气蚀痕迹又有磨损的痕迹。材料在泥沙磨损和气蚀的联合作用下,遭受破坏的程度要比单纯磨损或单纯气蚀严重得多。其破坏机理更为复杂,影响因素更多,一般认为^[8]含沙水流改变了清水的物化及流动特性,使水的空化压力发生变化,气蚀提前发生。含沙水流中,由于沙粒质量不同,在惯性力的作用下,可能会滞后或超前于水流,不合理的体型促使水中游离的沙粒产生旋涡气泡,并在某一临界压力值下溃灭,使材料遭气蚀破坏。空泡溃灭时,为泥沙磨损创造了条件。在含沙高速水流的冲击和摩擦切削下,材料表面出现凹凸不平的状况,形成气蚀源。局部水流的紊动促使沙粒动能的提高,加剧了材料的破坏。

1.2 磨损特征初探

材料遭磨损,与泥沙的冲角、材料的特性有很大关系,冲角的大小决定着冲磨破坏机理^[9]。在含沙高速平顺水流中,泥沙跟随性较好,其运动轨迹与水流流线较为一致,冲角小,材料的破坏以微切削为主。而流速较低或粒径较大的沙石,对材料的破坏主要以滚动、跳跃冲击为主。对于前者,可选用硬度较高的材料;对于后者,可选用整体性较好的柔性材料。为了取得确实有效的抗磨措施,有必要对磨损的破坏特征作进一步的分析。在含沙高速水流的作用下,为什么某些材料表面会出现波纹状或鱼鳞坑的破坏特征呢?大家知道,在壁面附近,水流流速沿边界法向梯度较大,水流流动呈层流或紊流边界层型流动,流动区域存在着大量旋涡。由于层流边界层中各层间无质量交换,颗粒沿流线运动,不能触击壁面,所以波纹状或鱼鳞坑的破坏一定发生在紊流边界层中。笔者通过量测边界剪切力及压力证实了这一点^[10,11]。研究表明,紊流边界层存在着复杂的流动现象。当流体中含有固体颗粒时,由于两相的耦合作用,流动更为复杂。虽然紊流在时间及空间上许多因素表现为随机性,但最近几年的研究结果显示,紊流流动中具有某种非严格的周期性,即紊流的拟序结构。尽管各家对壁面附近旋涡运动的拟序结构的描述有很大差别,但某些基本观点还是较为一致的。由于壁面的存在,水流紊动的法向分量被抑制,并在平均剪应力的作用下产生拟序结构,出现纵向和横向涡旋的条纹结构;在条纹结构上面附近壁层是经常发生猝发的紊流层,猝发结果是壁面附近低动量的流体随机地突然喷向主流区域,接着高动量的水体掠向壁面。猝发层的最大特点是紊动发生率最大,在某些量测资料中,曾出现过瞬时雷诺应力为时均值60倍的情况。我们曾对边界剪应力进行过量测,也发现紊动值是一较大的量。正是由于猝发所引起的高速含沙涡体对壁面的反复扫掠和压力波的推挤作用,使壁面受到水流的不断冲击和切削,造成壁面的磨损,并在一定的条件下形成鱼鳞坑或波纹状的典型破坏轮廓。实验观测结果表明,除了猝发磨损外,还有滑切磨损形成的沟槽。

1.3 影响过流表面磨蚀的主要水力因素

影响含沙高速水流对壁面磨蚀的因素很多,涉及到多相介质的运动特性和相互作用,但主要影响因素可归纳为三类:水力特性、泥沙特性和材料特性。泥沙特性主要涉及到泥沙颗粒的粗细、形状、矿物成分和密度,材料特性则涉及到不同材料的抗磨抗冲性能。本文仅讨论水力因素的影响。

影响磨蚀的水力参数主要有水流速度、水流流态、过流历时和水中含沙量。

a. 水流速度是影响过流面材料磨蚀的决定因素。实际上,材料被磨损状况很大程度取决于泥沙颗粒的动能,即磨损量应大体与泥沙速度的平方成正比。在高速挟沙水流中,泥沙颗粒(粒径在0.5 mm以下)基本随水流运动,其运动速度和方向与水流的速度和方向基本一致,材料的磨损率与水流速度的关系大致为幂函数关系,其指数约为2。而单纯的气蚀破坏程度与水流流速成6~14次方的关系,磨损与气蚀联合作用时,其方次约在2~6之间。

b. 水流流态也是影响壁面材料磨蚀的另一个重要因素。若过流面体型设计不当、水流流态恶劣,在水流局部扰动区域,较大颗粒的泥沙将偏离水流流线。应当指出,若过流面粗糙,扰动水流将产生大量的旋涡,旋涡的形成和破灭增加了泥沙对壁面的作用力。尤其在局部阻力的扰动区域,在一定压力条件下,会产生旋涡空化,对壁面造成气蚀破坏,在沙粒磨损与气蚀的联合作用下,壁面的磨蚀破坏将更为严重。

c. 过水历时与壁面磨蚀量基本成线性关系,材料的磨蚀率不随时间的变化而变化,在含沙量和流速一定时,磨蚀率大致为一常数。这给磨蚀量的预测带来很大方便。

d. 浑水含沙量对壁面材料的磨损的影响程度主要表现在泥沙颗粒与壁面碰撞几率的大小。一般说来,

含沙量越大,参与冲击壁面的泥沙颗粒越多,此时磨蚀率与含沙量成线性正比关系.但随着含沙量的进一步加大,沙粒之间的碰撞机会增加,有效地冲击材料壁面的沙粒百分比降低.因此材料的磨损率与含沙量之间的幂指数应小于 1.0.

2 掺气抗磨的可能性

众所周知,人工掺气对防止气蚀是有效的.那么掺气是否也能起抗磨的作用呢?我们在黄河小浪底明流洞浑水模型试验中得到了初步肯定的回答.该试验模型比尺为 1:40,模型内流速约为 6 m/s,模型含沙量高达 200 kg/m³.放水前过流壁面涂上印刷胶,放水一定时间后发现,在高掺气区,印刷胶保持完整,而水中掺气量越低,印刷胶被磨掉越多.为了进一步探索和论证,我们又在专门建造的高速浑水循环系统中进行一系列研究,证实了掺气可起到帮助壁面抗磨蚀的作用(图 1).由图 1 可见,过流面的磨损率与掺气浓度成反比关系.

对边界剪切力的量测结果表明,掺气可降低水流对壁面的摩擦作用力,摩阻系数随着掺气浓度的提高而降低^[11].掺气的抗磨机理可理解为,浑水掺气后降低了泥沙与壁面的碰撞几率,改变了流体的弹模和不可压缩性,缓解了壁面材料受磨程度.掺气抗磨蚀效果在工程上具有现实意义,用提高掺气浓度的方法来降低材料壁面的磨蚀量较为简单易行,而单靠提高材料的抗磨蚀性能费用较高且难度较大.

3 含沙掺气水流的磨蚀试验

3.1 试验概况

试验在专门建造的高速浑水循环系统中进行.本项研究的试验用沙取自黄河花园口,其颗粒的级配曲线见图 2.水中含沙量用比重瓶直接从水中取样经分析天平称重测定,掺气浓度由布置于底板上的探头量测.试验中各参变量的变化范围:流速 $V = 15 \sim 30$ m/s;材料抗压强度 $R = 2.2 \sim 26$ MPa;含沙量 $S = 17 \sim 100$ kg/m³;掺气浓度 $C = 0.01 \sim 0.65$;磨损率 $w = 0.000\,46 \sim 0.007\,01$ μm/s.

3.2 试验结果与分析

试验结果见表 1.根据前面影响磨蚀因素的分析及本试验的特点,磨蚀量与其它变量的关系可用以下函数形式表示:

$$W = F(V, R, S, C, \rho_s, \rho, t)$$
 (1)

式中:W——磨蚀量,m;V——浑水流速,m/s;R——材料抗压强度,Pa;S——含沙量,kg/m³;C——掺气浓度; ρ_s ——泥沙密度,kg/m³; ρ ——水体密度,kg/m³;t——磨损时间,s.

通过因次分析,式(1)可转化为

$$\frac{W}{Vt} = f\left(\frac{\rho_s V^2}{R}, \frac{S}{\rho_s}, C, \frac{\rho}{\rho_s}\right)$$
 (2)

本试验中 ρ/ρ_s 为一常数,可以略去.为了求出函数的表达式,不妨假定

$$\frac{w}{V} = a \left(\frac{\rho_s V^2}{R}\right)^b \left(\frac{S}{\rho_s}\right)^c C^d$$
 (3)

式中:a,b,c,d——待定参数;w = W/t——磨损率,m/s.

对式(3)两边求对数并进行多元线性回归分析,得 $a = 5.31 \times 10^{-9}$, $b = 0.476$, $c = 0.754$, $d = -0.355$.

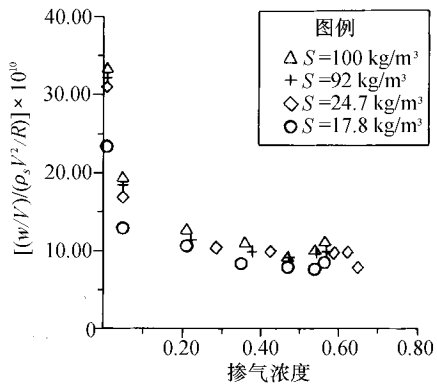


图 1 磨损率与掺气浓度的关系
Fig.1 Relation between wear rate and air concentration

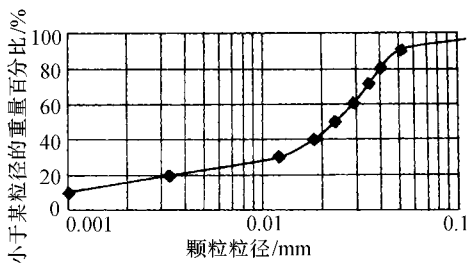


图 2 泥沙颗粒级配曲线
Fig.2 Grain size distribution

表 1 磨损率试验数据
Table 1 Test data of wear rate

材料抗压强度 R/MPa	浑水流速 $V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	含沙量 $S/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	掺气浓度 C	磨损率(w)实验值 $/(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	磨损率(w)计算值 $/(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
25.872	29.38	24.67	0.010	0.007 879	0.007 471
25.872	27.12	24.67	0.050	0.003 382	0.003 607
25.872	25.16	24.67	0.285	0.001 652	0.001 679
25.872	23.43	24.67	0.425	0.001 268	0.001 268
25.872	21.99	24.67	0.590	0.001 024	0.000 996
25.872	20.68	24.67	0.625	0.000 862	0.000 866
25.872	19.54	24.67	0.650	0.000 585	0.000 764
27.832	26.82	21.85	0.010	0.004 945	0.005 512
27.832	24.74	21.85	0.050	0.002 005	0.002 657
27.832	22.95	21.85	0.245	0.001 469	0.001 305
27.832	21.37	21.85	0.435	0.001 250	0.000 926
27.832	20.03	21.85	0.545	0.000 927	0.000 753
27.832	18.83	21.85	0.600	0.000 730	0.000 645
27.832	17.78	21.85	0.620	0.000 628	0.000 570
17.150	23.23	17.85	0.010	0.004 438	0.004 499
17.150	21.40	17.85	0.050	0.001 931	0.002 166
17.150	19.86	17.85	0.210	0.001 269	0.001 123
17.150	18.50	17.85	0.350	0.000 799	0.000 816
17.150	17.32	17.85	0.470	0.000 627	0.000 646
17.150	16.25	17.85	0.540	0.000 500	0.000 543
17.150	15.35	17.85	0.565	0.000 461	0.000 478
2.200	22.85	100.00	0.010	0.047 012	0.042 455
2.200	21.10	100.00	0.050	0.021 552	0.020 513
2.200	19.60	100.00	0.210	0.011 368	0.010 668
2.200	18.20	100.00	0.360	0.007 862	0.007 622
2.200	17.10	100.00	0.470	0.005 468	0.006 139
2.200	16.05	100.00	0.540	0.004 976	0.005 163
2.200	15.10	100.00	0.565	0.004 545	0.004 510
2.300	23.15	92.71	0.010	0.045 027	0.040 281
2.300	21.35	92.71	0.050	0.020 165	0.019 411
2.300	19.80	92.71	0.220	0.009 927	0.009 898
2.300	18.40	92.71	0.378	0.006 903	0.007 077
2.300	17.25	92.71	0.475	0.005 219	0.005 753
2.300	16.20	92.71	0.545	0.004 560	0.004 847
2.300	15.20	92.71	0.570	0.003 900	0.004 212

计算得到 $\frac{\rho_s V^2}{R}, \frac{S}{\rho_s}, C$ 三项的偏相关系数分别为 0.995,0.999,0.990,表明这三项对磨损率的作用均较显著,即这三个变量均不能忽略.式(3)的回归复相关系数为 0.996,说明回归效果较好.图 3 为实测值与计算值的对比.由图可见,式(3)能较好地预测壁面的磨损率.

从式中可以看出,磨损率与流速、含沙量、掺气浓度的指数变化关系与前面关于影响磨损因素的分析结果基本一致.

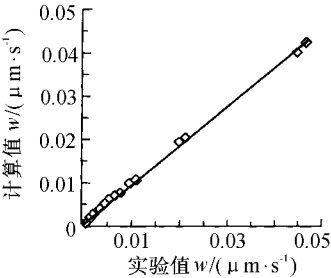


图 3 磨损率计算值与实验值的比较
Fig.3 Comparison between calculated and measured values

参考文献：

[1] 徐秉衡.泄水工程的磨损问题[A].见 东北勘测设计院科研所主编.泄水工程高速水流的研究进展[C].长春 水利水电泄水工程与高速水流情报网编辑部,1990.77 ~ 84.

[2] 中国水利学会施工专业委员会.我国水工建筑物抗冲耐磨研究及应用效果[J].水利水电技术,1985,(9) 1 ~ 7.

[3] 黄继汤,田立言,李玉柱.在清水和挟沙水流中混凝土等脆性材料抗磨蚀性能的试验研究[J].水利水电技术,1985,(9) 8 ~ 10.

[4] 陈万柱,张远曙,邵天祥.丹江口试验基地的混凝土的抗冲耐磨性能的试验研究[J].水利水电技术,1985,(9) 23 ~ 25.

[5] 何筱奎.不同含沙量不同流速时材料的磨蚀失效特性[J].水力发电学报,1996,(3) 79 ~ 85.

[6] 柯乃普 R T 等.空化与空蚀[M].水利水电科学研究院译.北京 水利出版社,1981.235 ~ 236.

[7] 刘家麟.水轮机泥沙磨损问题的探讨[J].水利学报,1980,(2) 30 ~ 86.

[8] 李学军.材料磨蚀装置的研制及试验结果分析[J].西北水资源与水工程,1995,(2) 66 ~ 69.

[9] Shook C A,Roco M C.Slurry flow principles and practice[M].Boston :Butterworth-Heinemann,1991.155 ~ 180.

[10] 黄细彬,袁银忠,王世夏.含沙掺气高速水流壁面脉动压力特性[J].河海大学学报,1997,25(5) 78 ~ 83.

[11] 黄细彬.掺气挟沙对高速水流边界剪切力特性影响的分析[J].水利学报,1998,(5) 24 ~ 27.

Analysis of Abrasion of Wall Material by High-Velocity
Sediment-laden and Aerated Flow

HUANG Xi-bin, YUAN Yin-zhong, WANG Shi-xia

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract The surface material is liable to abrasion by high-velocity sediment-laden flow. In this paper,the mechanism of sand abrasion is discussed and some effects of significant flow factors on material wear are analyzed ;the possibility of preventing abrasion with aeration is proposed. Based on test data,a formula for calculating the concrete material wall surface wear rate is derived. It is indicated that the wear rate is related to air concentration,strength of material,flow velocity and sediment concentration.

Key words sediment-laden flow ; aeration ; wear ; cavitation