

掺气设施与 强迫掺气水流

Aeration Devices and Forced Aerated Flow

苏沛兰 著

掺气设施与强迫掺气水流

苏沛兰 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

掺气设施与强迫掺气水流 / 苏沛兰著. —杭州:
浙江大学出版社, 2012. 5
ISBN 978-7-308-10009-0

I. ①掺… II. ①苏… III. ①掺气水流—研究
IV. ①TV131.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 101928 号

掺气设施与强迫掺气水流

苏沛兰 著

责任编辑 许佳颖
文字编辑 陈静毅
封面设计 黄晓意
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州中大图文设计有限公司
印 刷 浙江省邮电印刷股份有限公司
开 本 710mm×1000mm 1/16
印 张 17.5
字 数 314 千
版 印 次 2012 年 5 月第 1 版 2012 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-10009-0
定 价 52.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

前 言

目前,国内有一大批高水头、大流量和大单宽泄洪功率的工程相继兴建,随着高坝建设的兴起,水工建筑物的空化与空蚀问题以及掺气设施的设计选型问题被提到了研究日程。

本书对强迫掺气水流、空化与空蚀、掺气设施的基本概念及原理进行了详尽的阐述,并通过理论分析、模型试验及数值模拟,系统地研究了强迫掺气水流的水力特性、小底坡低 Fr 数条件下掺气设施空腔的回水问题,并用正交设计法对小底坡低 Fr 数泄洪洞的掺气坎体型进行优化设计。全书共分为 8 章。第 1 章与第 2 章分别介绍了研究掺气减蚀的意义及空化空蚀的概念与原理,第 3 章与第 4 章分别介绍了掺气水流的基本概念与特点,以及掺气减蚀设施的原理与方法。第 5 章至第 7 章分别介绍了低 Fr 数小底坡泄洪洞空腔回水的原理,利用模型实验与数值方法相结合对掺气坎体型进行选型优化研究。第 8 章阐述了利用正交设计原理对小底坡低 Fr 数泄洪洞的掺气坎体型进行优化设计的方法。

本书除借鉴已有掺气设施与强迫掺气水流的一些研究成果外,还加入了作者部分博士学位论文的研究成果,具有如下特点:①力求清晰,并尽可能严谨地阐述强迫掺气水流的基本概念、基本特点、主要的水力学特性及分析研究问题的基本方法;②力求在结合理论分析、实验研究与数值方法的基础上,较深入地探讨掺气设施体型设计的优化问题,使读者对影响掺气坎空腔特性的机理有比较深刻的认识。③对于影响掺气坎空腔特性的体型参数,试图引入正交设计方法,对其进行空腔特性的敏感性分析,为小底坡低 Fr 数泄洪洞的掺气坎体型的优化设计选型提供一定的理论依据。

设计小底坡低 Fr 数泄洪洞的掺气坎时,空腔回水是制约有效空腔长度的一个主要因素,有时甚至是决定性因素。因此,如何优化低 Fr 数小底坡泄洪洞上的掺气设施体型,从而很好地抑制空腔回水,是一个非常值得研究的问题。从总体上看,由于影响掺气空腔形成因素的复杂性,以及二相流理论的不成熟性,量

测技术也不尽如人意,关于掺气坎体型参数对掺气空腔特性影响的资料数据尚需要更多的积累,现有的研究成果还明显落后于技术进步和工程建设的实际需求。因此,低 Fr 数小底坡泄洪洞上的掺气设施体型设计还需要更为深入的研究。

本书可作为水利、土建类相关学科研究生的参考教材,也可作为与高速水流有关的掺气坎体型设计与科研工作者的参考书。限于作者水平和现阶段对掺气设施与强迫掺气水流的认识,书中在资料引用上难免挂一漏万,衷心希望读者批评指正。

浙江工业大学董志勇教授在百忙之中审阅了书稿并提出了许多宝贵的修改意见。在此,特向董志勇教授表示衷心的感谢!

作 者

2012 年 2 月

目 录

第 1 章 概 述	1
参考文献	3
第 2 章 空化与空蚀	5
2.1 空化与空蚀的概念	5
2.1.1 空化的概念	5
2.1.2 空蚀的概念	6
2.1.3 空蚀与空化研究中的重要物理量	6
2.2 影响空蚀的因素	7
2.3 空化与空蚀的机理	9
2.3.1 空化机理	9
2.3.2 空蚀机理	10
2.4 空蚀破坏实例	12
2.5 减免空化和空蚀的方法与措施	15
2.6 空化与空蚀的研究现状	16
参考文献	18
第 3 章 掺气水流	21
3.1 掺气的定义及分类	23
3.1.1 自掺气水流	23
3.1.2 强迫掺气水流	24
3.2 水流掺气的原因	27

3.3	水流掺气程度的描述	28
3.4	掺气水流的运动规律	28
3.5	水流掺气的工程意义	29
3.6	国内外对掺气水流的研究现状	29
	参考文献	30
第4章	掺气减蚀	33
4.1	掺气减蚀原理	33
4.2	掺气减蚀发展现状	36
4.3	掺气减蚀的水力设计原则及应用条件	38
4.4	掺气减蚀设施	39
4.4.1	掺气减蚀设施体型及布置	39
4.4.2	掺气减蚀设施的水力学参数	42
4.5	掺气减蚀的研究方法	51
4.5.1	试验研究	52
4.5.2	数值模拟	55
4.5.3	正交设计方法在掺气坎体型设计中的应用	61
4.6	掺气减蚀设施研究中存在的问题	62
	参考文献	63
第5章	低 F_r 数小底坡泄洪洞空腔回水问题研究	68
5.1	掺气设施空腔回水现象及其运行状态的描述	69
5.2	空腔回水的理论分析	71
5.2.1	空腔回水的形成机理	71
5.2.2	影响空腔回水的因素	72
5.3	空腔回水问题的研究现状	73
5.4	掺气坎体型研究	73
	参考文献	76
第6章	低 F_r 数小底坡泄洪洞掺气坎选型试验研究	77
6.1	低 F_r 数大单宽缓底坡掺气坎的特点	77
6.2	大岗山水电站泄洪洞“局部陡坡+槽式挑坎”试验研究	78

6.2.1	工程概况	78
6.2.2	试验目的与内容	79
6.2.3	试验模型设计	79
6.2.4	试验设备	81
6.2.5	掺气坎体型优化	82
6.2.6	掺气坎的选型优化——新型的“局部陡坡+槽式挑坎”	98
6.2.7	小结	112
6.3	“局部陡坡+槽式挑坎”在瀑布沟泄洪洞应用试验研究	114
6.3.1	工程概况	114
6.3.2	试验模型设计	118
6.3.3	掺气坎体型优化	119
6.3.4	“局部陡坡+缓坡平台+梯形槽挑坎掺气”设施水力特性分析	126
6.3.5	小结	147
第7章	低 F_r 数小底坡泄洪洞掺气坎选型数值模拟研究	148
7.1	低 F_r 数小底坡泄洪洞水力特性数值模拟方法	148
7.1.1	数学模型的选择	149
7.1.2	自由水面处理方法	154
7.1.3	边界条件及稳定性准则	157
7.1.4	网格及网格生成技术	159
7.1.5	数值求解算法	160
7.1.6	小结	165
7.2	“局部陡坡+槽式挑坎”水力特性数值模拟研究	165
7.2.1	大岗山掺气设施水力学数值模拟	166
7.2.2	瀑布沟掺气设施水力学数值模拟计算	174
7.2.3	小结	206
	参考文献	207
第8章	“局部陡坡+槽式挑坎”体型优化设计	210
8.1	参数敏感性分析	211
8.1.1	敏感性分析	211
8.1.2	正交设计方法	211

8.2	正交试验设计分析方法	213
8.2.1	正交试验设计的基本原理	213
8.2.2	安排试验的原则	215
8.2.3	正交设计的特点	218
8.2.4	正交试验设计的基本步骤	220
8.3	“局部陡坡+槽式挑坎”的正交设计	222
8.3.1	影响因素和考核指标的选择	222
8.3.2	数值试验安排	225
8.3.3	“局部陡坡+槽式挑坎”各数值试验方案的水力特性分析	226
8.3.4	空腔特性的敏感度分析	239
8.4	正交优化的最优方案结果与试验建议方案比较	262
8.4.1	体型参数比较	264
8.4.2	水力特性比较	265
8.5	小 结	270
	参考文献	272



概 述

在泄水建筑物中,当水流流速达到一定程度时,水流压强低于相应的饱和蒸汽压强,常常会产生空化现象,空穴流由低压区向高压区流动的过程中会发生空蚀破坏^[1]。国内外高水头泄水建筑物常遭受空蚀破坏,许多试验研究表明,当水流流速超过 12m/s 时就有可能出现空蚀破坏,其破坏强度与水头、流速密切相关:当溢流坝的高度从 50m 增至 100m 时,空蚀破坏强度增加 6~8 倍;当高度增至 150m 时,空蚀破坏强度增加 40 倍以上;当过流面流速从 20m/s 增至 30m/s 时,空蚀破坏强度增加 17 倍^[2]。

空蚀涉及许多领域,如宇航、国防、航海、化工、原子能甚至生物和医学等。空蚀现象不仅出现在螺旋桨、水力机械及水工建筑物上,而且出现在闸门、管道、油泵和蒸汽透平等设备,以及在国防工业的鱼雷、潜艇等深水中运动的设备上。空蚀可以破坏任何材料,包括各种金属和非金属材料。目前,空蚀是众多研究领域的学者都在努力探索与研究的一个重点问题^[3]。

长期以来,空蚀严重影响泄水建筑物^[4~9]、水力机械(水泵^[10]、水轮机^[11]、闸门^[12])、船舶螺旋桨的性能和使用寿命。国内外大量的水利工程实例说明,在中高水头泄水建筑物中的某些部位,如设计不周或施工不慎,建筑物表面常常出现空蚀破坏,轻则造成斑点麻面,重则形成蜂窝状甚至大洞。空蚀的发生,直接影响建筑物的寿命,甚至造成整个建筑物的失事,已成为水利工作者十分重视的问题。随着水电事业的发展、坝工技术水平的提高和水力资源的开发及利用,高坝建设发展迅速,目前世界上已建、在建和拟建的 200m 以上的高坝约 60 座,坝高已进入 300m 级,这一趋势在中国更为显著。这些高坝的特点是泄量大、流速高,空化空蚀问题突出^[13,14]。因此,对空化与空蚀的研究,具有重要的意义。

大中型水利水电工程泄水建筑物的流速一般在 40m/s 以上,高速水流产生空化空蚀而造成建筑物的空蚀破坏已屡见不鲜。随着筑坝技术的发展和高坝的不断兴建,高速水流问题更加突出,如何防止泄水建筑物的空蚀破坏是亟待解决的关键问题之一。

结合我国水电开发和工程运行的实际情况,高坝枢纽的水力学问题比较突出,高速水流极易产生空化,致使泄水建筑物的某些过流部位常常发生严重的空蚀破坏^[15]。空蚀不仅破坏泄流建筑物的过流表面,影响泄流能力,严重时影响泄流建筑物的正常运行,甚至引起振动,导致工程破坏等。基于空化空蚀的机理复杂性,迄今为止国内外尚未寻找到成熟有效的防范手段,泄水建筑物发生空蚀破坏事件时有发生,因此高流速条件下泄水建筑物掺气减蚀措施是我国当前水电工程建设中亟待解决的关键性技术难题,针对当前水电开发中出现的关键技术问题开展探索和研究具有重要的现实意义。

如何防止空化与空蚀问题已引起了人们的广泛关注。为了减免空蚀破坏,过去在选择合理体型、控制过流面的不平整度以及采用抗空蚀性能较好的材料等方面做了不少工作^[16,17]。60 年代以前,多集中在精心设计建筑物的体型上,特别是溢流坝曲线、反弧段、深水进水口、平板门门槽、鼻坎等部位。一般都通过水工模型试验选型,重要的工程还要进行不同比尺的模型试验。在工程施工中则力求提高表面光洁度使过水边界的不平整度控制在允许的范围之内,并尽量选用抗空蚀的材料,如不锈钢、高标号混凝土、环氧砂浆、辉绿岩柱石等。这些方法对防止空蚀破坏发挥了一定作用,但一些工程的运行实践证明空蚀破坏并未完全消除。

实践证明,即使采取上述措施,水头及相应流速仍不宜超过 75m 和 36m/s ^[18]。如超过这个界限,特别是当流速超过 40m/s 时,上述措施就难以达到减免空蚀破坏的目的。

国内外在近 30 多年来广泛开展了关于水流底部掺气减蚀的研究工作,并应用于实际工程中,获得了经济、可靠的效果。目前,通过设置掺气设施防止空蚀破坏是主要的工程措施,掺气减蚀能够大大降低对表面不平整度的控制标准。

掺气减蚀的研究和应用逐渐打破了以往泄水建筑物边界必须光滑平顺的传统观念,在溢流面上设置掺气挑坎、掺气槽、突扩突跌错台、闸墩末端不用流线型而用方型甚至加宽尾墩^[19],使水流经过这些边界突变处即脱离边界形成射流。射流水股下面形成空腔,射流水股通过空腔段紊动扩散掺气以后由清水水流变为水气二相混合流。这种近壁流能在沿程相当长的距离内保持其掺气浓度不小

于某个防蚀有效的最低浓度值,使这段距离内的边界免受空蚀破坏。

对于一般的泄洪隧洞,由于其 F_r 数大,水流的流速高,使用一般的挑坎、跌坎和通气槽相结合的掺气设施往往能形成足够的空腔,得到很好的掺气减蚀效果。但在缓底坡大单宽流量情况下,往往水深都较大,其断面 F_r 数较小,重力远远大于惯性力。如果用一般的掺气坎,水流经过挑坎或跌坎后,会很快落向隧洞底板,空腔很小;由于底板坡度较缓,落水会堆积在落点处,且具有一定的动能,水流将向上、下游流动,向上游水流动能若是大于缓坡形成的阻力,则空腔内要形成回溯水流,严重时会淹没空腔,达不到掺气减蚀的作用。为了得到较稳定的空腔需要对掺气坎体型进行特殊设计,并通过模型试验不断进行优化。

为了消除小底坡上掺气坎空腔回水,不少学者从空间三维出发,在原来一维掺气坎的基础上,提出了横向、纵向、竖向均变化的掺气坎^[20~24]。如:适合大单宽流量的 U 型掺气坎,缓坡条件下凹型掺气坎、V 型掺气坎、齿墩坎及二级坡型式掺气坎。其目的是利用中间 U 型槽射流的冲击作用,将空腔内回旋水流推向主流,从而减少空腔回水。这些研究表明,在小底坡上,与二维连续坎相比,三维掺气坎能在一定程度上减小空腔回水、改善掺气效果。

掺气坎体型的选择不仅与流速、单宽流量和过流面底坡有关,也受来流条件的影响。基于实际工程的需要,针对泄洪洞底坡缓、 F_r 数小的一些工程,为了在不同工况下均能保证形成通气顺畅的稳定空腔,需根据不同的实际工程和水力条件,探索合适的掺气设施。

参考文献

- [1] 黄委会设计院技术处. 掺气减蚀原理与应用. 黄河水利出版社, 1990.
- [2] 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用. 北京: 清华大学出版社, 1989: 113—120.
- [3] 水利水电科学研究院. 中译本空化与空蚀. 北京: 水利出版社, 1981: 1—100.
- [4] R. T. Knapp, J. W. Daily, F. G. Hammitt. Cavitation. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [5] 吴建华. 水利水电工程中的空化与空蚀问题及其研究//第十八届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2004: 1—18.
- [6] 肖兴斌. 三峡工程泄洪深孔掺气减蚀设施研究述评. 水利水电科技进展, 2003, 23(2): 51—54.

- [7] 肖兴斌. 高坝泄水建筑物高速水流研究概况. 人民珠江, 1994(6): 23—26.
- [8] 张云莲. 泄水建筑物的空蚀破坏和处理方法. 腐蚀与防护, 2001, 22(8): 343—345.
- [9] 刘超, 张光科, 冯凌霄等. 泄洪洞反弧段上游掺气坎对反弧段下游侧墙的减蚀作用. 水利水电科技进展, 2007, 27(1): 46—49.
- [10] 赵建东, 王立义. 引滦泵站水泵气蚀破坏的修复方案比较. 海河水利, 2005(3): 51—52.
- [11] 段生孝. 我国水轮机空蚀磨损破坏状况与对策. 大电机技术, 2001(6): 56—59.
- [12] 黄金林. 水工闸门的空蚀与防蚀措施. 中国农村水利水电, 2004(8): 51—53.
- [13] 童显武. 中国水工水力学的发展综述. 水力发电, 2004, 30(1): 60—64.
- [14] 王海云, 戴光清, 张建民等. 高水头泄水建筑物掺气设施研究综述. 水利水电科技, 2004, 24(4): 46—48.
- [15] 张丽, 解伟, 黄晓玲. 高水头泄水建筑物的掺气减蚀试验. 华北水利水电学报, 1998(1).
- [16] 彭程. 21 世纪中国水电发展前景展望. 中国农村水电及电气化信息网, 2006(2).
- [17] 李菊根. 当前水电开发需要解决的技术问题. 中国三峡建设, 2004(4).
- [18] 邵嫫嫫. 泄水建筑物掺气减蚀研究的进展. 水利水电科学研究院, 1980.
- [19] 李隆瑞. 高速水流掺气减蚀措施及工程应用. 西北水资源与水工程, 1990, 1(2).
- [20] 刘超, 杨永全. 泄洪洞反弧末端掺气减蚀研究. 水动力学研究与进展: A 辑, 2004, 19(3): 375—382.
- [21] 刘超, 杨永全. V 型掺气坎体型研究. 水力学与水利信息学进展, 2003(9): 319—322.
- [22] 何勇. 构皮滩泄洪洞掺气设施试验研究. 人民长江, 2004, 35(11): 53—54.
- [23] 王海云, 戴光清. V 型掺气坎在龙抬头式泄洪洞中的应用. 水利学报, 2005, 36(11): 1371—1374.
- [24] 王海云, 戴光清. 明流泄洪洞掺气减蚀设施优化试验研究. 水力发电, 2003, 29(11): 54—56.



空化与空蚀

当高速水流通过泄水建筑物时,在过流的某些部位会发生空化现象,且常会造成固体表面的严重破坏和剥蚀。高水头泄水建筑物空蚀破坏的部位常常发生在:泄洪隧洞进口段的收缩部分及隧洞的转弯段;闸门槽后的边墙;溢流坝顶部或坝面不平整处;断面突然扩大但又通气不顺畅的地方;边界突体下游;局部不平整的表面,特别是连接不光滑段下游的粗糙段;消力墩侧面、背面以及附近底板;差动式挑坎的齿坎侧面;高水头底孔闸门下游附近;闸槽下游面;高水头底孔出流与坝面溢流的交汇处。

2.1 空化与空蚀的概念

2.1.1 空化的概念

在一定温度下,水流内部的微小气核由于压力降低而发育成气泡,当压力降低到某一临界数值(一般情况下为水的气化压强),气泡发生溃灭。由于气泡溃灭历时很短,可以产生很高的冲击压力和高温,并伴随有高频噪声。在产生空化的区域还可以观察到空穴、空洞、空腔和闪光等现象。

由于液流系统中的局部低压(低于相应温度下该液体的饱和蒸汽压)使液体蒸发而引起的微气泡(或称为气核)爆发性生长现象,称之为空化。

空化有很多种类,为了研究方便,人为地为其分类^[1],例如:

(1)游移空化(Travelling Cavitation):当流动液体中某处的压强降到或低于液体的气化压强时,在该处即会产生许多微小空穴,这些空穴随着液体流动而游

移,并在游移过程中膨胀、收缩、溃灭、再生直至溃灭消失。这种空化过程称为游移空化。

(2)固定空化(Fixed Cavitation):当曲面固体边界处的液体流速高,空化范围大或边界形状易于导致液体分离时,常在液体和固体边界之间形成看来似乎固定的空腔,此种空腔称为固定空穴。固定空穴可以发育增大,如其尾部已发展到物体之后,则称为超空穴。这种空化过程称作固定空化。

(3)漩涡空化(Vortex Cavitation):当漩涡中心的压强降到或低于临界压强时,则会产生漩涡空穴从而导致空化。这种类型的空化称为漩涡空化。

(4)振荡空化(Vibratory Cavitation):低幅、高频的振荡在不流动的液体中可以促使某处液体产生一系列连续的,具有高幅、高频的脉动压强。如果脉动压强降低到该液体的饱和蒸汽压强,即会产生振荡空穴,这些空穴在压强增高时就会溃灭。这种由振荡引起的空化过程称为振荡空化。

空化常常伴随着令人不愉快的影响系统正常运转的次生现象,如诱发噪声、激励结构振动、引起固壁剥蚀(即空蚀)等。对空化和空蚀现象作出了杰出贡献的柯乃普教授曾说过^[2]：“空化是最令人讨厌的水动力现象,其危害既广泛又明显,并且严重地阻碍了科学与工程等多方面的发展”。

2.1.2 空蚀的概念

水流中的气核在随液体流动的过程中,遇到周围压力增大时,体积急剧缩小或溃灭,由于空泡在溃灭时产生很大的瞬时压强,当溃灭发生在固体表面附近时,水流中不断溃灭的空泡所产生的高压强的反复作用,可破坏固体表面,这种现象称为空蚀^[1]。空蚀是空化破坏能力和边壁材料抗空蚀强度的综合结果^[3]。

近50多年来,国内外大量的工程实例说明^[4],在高、中水头泄水建筑物中的某些部位常常会发生材料剥蚀的现象。空蚀的发生,直接影响建筑物的寿命,甚至造成整个建筑物的失事,因此空蚀问题已成为水利水电工作者值得十分重视的问题。水利工程中对空化空蚀现象的研究虽然已有相当长的历史,但到目前为止对空化空蚀进行较准确的定量预报还有一定的困难。

2.1.3 空蚀与空化研究中的重要物理量

为了研究空蚀与空化问题,常采用一个无量纲数作为衡量实际水流是否会发生空化的指标,叫做空化数,以 σ 表示如下:

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\rho U_0^2 / 2} = \frac{h - h_v}{U_0^2 / 2g} \quad (2-1)$$

式中: p 和 U_0 为水流未受到边界局部变化影响处的绝对压强及平均流速, p_v 为水的蒸汽压强, ρ 为水的密度, h 为水头。

由式(2-1)可知:绝对压强越低,空化数越小,发生空化的可能性就越大。当 σ 降低至某一数值 σ_i 时即开始发生空化,这个空化数 σ_i 叫做初生空化数。初生空化数的大小随边界条件而异。对于某种边界轮廓,初生空化数是一个固定的值,通常可用试验来确定。

初生空化数 σ_i 越大,空化越容易发生,越小越难发生。将实际水流的空化数 K 和初生空化数 σ_i 比较:当 $\sigma > \sigma_i$ 时,空化不发生;当 $\sigma \leq \sigma_i$ 时,水流中将发生空化。所以空化数可以作为是否出现空化的判别指标。

2.2 影响空蚀的因素

水利工程中,对于混凝土过流表面,在高速水流的作用下引起的空蚀破坏,广大水利专家学者大体将其归纳为两方面的原因:①泄水建筑物体型不合理,致使某些局部区域的压强较低,当水流流速较大时,便会发生空化空蚀破坏。像美国的大古力坝,伊朗的卡伦坝的泄水建筑物体型。②由于混凝土表面局部不平整,引起水流发生局部分离,形成局部低压区,引起空蚀破坏。

目前的研究成果表明^[5,6],影响空蚀的因素包括:

1. 流速

实践证实,空蚀量与流速的 n 次方成正比。在多数情况下, $n=6$, 在文德里管内出现过 $n<1$, 在转盘试验中出现过 $n=10$ 。在众多影响空蚀的因素中,首推流速。但因 n 值变化范围较大,在估算时可应用 6 次方律(即与水头的 3 次方成比例),对重要工程还应进行相应的试验。

2. 压强

空蚀率 $MDPR$ 的峰值位于压强变化的中间值。即空化数 K 很大时, $MDPR=0$, 因为此时无空化。当 K 很小时, $MDPR$ 也为零,因为此时即使有很多空泡,但空泡的溃灭压强也不足以导致空蚀破坏。

3. 尺寸(直径)

一般认为过流物体的尺寸大时,空泡就能充分成长,因而溃灭时放出的能量

也大。通常认为空蚀量与尺寸(直径)的 $2\sim 5$ 次方成比例。有的试验证明空蚀与尺寸的3次方成比例。

4. 物体表面光洁度及平整度

表面经过很好的加工和处理,就可以延缓空蚀的初生并减轻空蚀的强度。

5. 时间

空蚀的速度随着时间发生变化。其过程大略可分为潜伏期、加速期、减速期和恒稳期。一般表面越光滑,潜伏期就越长。

6. 液体的温度(热动力效应)

在许多应用热水或温液体的工业中,空泡内的蒸汽含量至关重要。一般趋向于热力学效应抑止空化的发展和空蚀。当温度升高时,蒸汽压 p_v 升高,增大的 p_v 将对空泡溃灭起重要的抑制作用。对振动型装置的大量试验说明,在适中的温度(介于冰冻与沸腾之间)下空蚀程度最高。高温时由于腐蚀率随温度增加,材料机械性能变弱,有时MDPR又会再度增加。低温时由于黏性影响,空蚀率下降。

7. 含气量

含气量对初生空化数 K_i 及空蚀率MDPR都有影响。含气量很低时,由于液体存在抗拉强度,因而对 K_i 有影响;低含气量时含气量增大, K_i 增加,空化容易发生。当含气量接近饱和状态,液体抗拉强度消失,含气量对 K_i 影响极小。然而含气量很高时,成为含气型空化,这时泡内大部分气体是非凝结气体,约束空泡溃灭,因而会导致空泡溃灭时的“缓冲效应”,从而减轻了空蚀的程度。事实证明,给空泡溃灭区掺入空气将大大减免空蚀破坏。

8. 水中的含沙量

我国河流含泥沙严重,近年来人们开展了较多研究,根据三门峡磨损空蚀试验装置的测验成果,若以清水空蚀量为基数,当含沙量为 $40\text{kg}/\text{m}^3$ 时,磨损量是清水空蚀的3.4倍,磨损与空蚀联合作用时,为清水空蚀的16倍^[5]。美国密执安大学的实验室内进行了振动型空蚀试验,其结果表明,浑水的空蚀率比清水增加约50%,由于浑水空蚀的复杂性,不同研究者的成果,差别较大,有的结论甚至相反。这正说明这一问题有待进一步研究。

9. 液体的黏滞性、表面张力与密度的影响

液体的黏滞性:黏性小的液体,空泡溃灭压强大,空蚀量大。黏性高的液体