

中国造船工程学会船舶力学学术委员会
中国水利学会水力学专业委员会

論 文 集

(空泡机理学术讨论会)

浙 江

1984

中国造船编辑部

U561-73-1

目 录

1. 两种测量水中气核方法的对比试验	夏维洪 孙景琴 贾春英 潘森森 石国祥 徐 洁	(1)
2. 金属材料抗空蚀性能的指标研究	李志民 黄继汤	(14)
3. 混流可逆式水泵水轮机的空化声学特征(泵工况)	陆 力 关仁卿 梅祖彦	(26)
4. 升坎空蚀麻点特性的初步探讨	岳元璋 刘孝梅	(37)
5. 掺气流体中的空泡运动特性	黄建波 李士豪 倪汉根	(47)
6. 紊流场的频谱特性对空化初生的影响	郑国华	(62)
7. 水中悬浮含沙量对空蚀特性影响的探讨	郑大琼	(71)
8. 局部通水抑制门缘空化	潘森森 郑楚珉	(86)
9. 水流掺气对水流空化和空蚀的影响	王俊杰 尹洪昌 汪永真	(99)
10. 门槽主轨空化的缩尺影响	刘长庚	(109)
11. 翼型空化数和侵蚀强度的研究	程则久	(121)
12. 气核含量对空化影响的理论探讨	郑国华	(128)
13. 气核、抗拉强度与初生空化	杨志明	(134)
14. 空化现象的数学模型	刘一心	(146)
15. 粘性流体中气泡的稳定性	王继海	(158)
16. 含气空泡的非线性振荡	张有敬 郭值学	(174)
17. 用转盘研究空化和空蚀	计志也 林晓英	(187)
18. 气泡的静平衡条件	夏维洪 孙景琴 贾春英	(199)
19. 溶洞水空蚀初探	茅春浦 韩企平 朱世权	(207)
20. 泡状与片状空泡成因及其相互转换对空蚀的影响	华汉金	(211)
21. 用充气法防止螺旋桨导管空泡剥蚀的试验研究	孙南馨	(222)
22. 螺旋桨叶梢减载对导管内壁空泡剥蚀的效果	顾其昌 王根祿 孙南馨	(237)
23. 导边形状对叶切面空泡性能影响的试验研究	林国祥 朱 鸣	(249)
24. 圆截面空泡水洞的二元与三元隔板	徐伯垠	(259)
25. 展弦比对有限厚度局部空泡水翼的影响	徐伯垠 潘森森 杨占明	(267)

两种测量水中气核方法的 对比试验

夏维洪 孙景琴 贾春英
(华东水利学院)

潘森森 石国祥 徐 洁
(中国船舶科学研究中心)

空化核的数量及其大小对于液体的空化有十分重要的影响,为了研究和掌握这种影响的规律,首先必须对空化核谱有可靠定量的测量。近十多年来在国际上相继出现了各种测核谱的方法。如超声波法、全息法、激光散射法、显微照相法以及动水力学法等。由于试验条件和方法不同,测得水中气核谱的差别较大。为此,在国际上曾对各种方法进行了联合对比试验。例如国际水池会议空化委员会曾组织了被认为较有前途的三种光学测核法(全息法,激光散射法和显微照相法)的比较测量^[1];此后美国加州理工学院和宾州大学对全息法和激光散射法又进行了仔细的比较^[2];最近在西欧的荷兰、西德、法国等组织了一次联合试验,对全息法、激光散射法、声多普勒法以及 Delft 和 Neyrtec 实验室所推用的动水力学法进行了比较测量^[3]。

在国内,正在学习使用二种测核的方法,一是华东水利学院的动水力学法;另一是中国船舶科学研究中心的全息法。这二种方法都已摸索了一个时期,对于这些方法的性能及掌握程度,可靠性以及优缺点等,都需迫切了解,于是,1983年8月双方在华东水利学院减压实验室进行了联合实验。

(一) 两种测量气核方法简介

1. 动水力学法

动水力学法测核装置由两部份组成:一是小型文杜里管单空泡发生器,用测量得文杜里管的流动参数,通过计算求得文杜里管上游的气核半径 R_0 ;二是光电检测系统,用光电空穴检测仪来记录文杜里管喉部的空化事件数,也即上游气核的个数。

如图1,文杜里管喉部直径很细,只有2毫米左右,可认为在来流中的气核在形成空泡时是一个一个排队通过的。当喉部的压力 P_t 低到临界压力 P_t^* 时,初始半径为 R_{01} 的气核运动到喉部并长大到临界尺寸 R_j^* ,该气核“爆发性”生长而发生空化。临界半径 R^* 与临界压力 P_t^* 有以下关系:

$$R_j^* = \frac{4}{3} \frac{S}{P_{tj}^* - P_v} \quad (1)$$

* 本文由夏维洪、潘森森二人执笔

式中 S 是液体的表面张力系数, 脚标 “ j ” 表示第 j 种尺度的气核参量, p_v 为水的饱和蒸气压。假定每一瞬时气泡都处于静平衡状态 (即 Rayleigh 方程中 $\dot{R}=0$, $\ddot{R}=0$), 则有

$$\text{上游剖面} \quad p_o + \frac{2S}{R_o} = p_v + p_{go} \quad (2)$$

$$\text{喉部剖面} \quad p_t^* + \frac{2S}{R^*} = p_v + p_g \quad (3)$$

如果气泡的生长是等温的则

$$p_g = p_{go} (R/R_o)^3 \quad (4)$$

式中 p_g 代表气泡内气体的压力; p_{go} 代表气泡半径为 R_o 时的气体压力。根据 (2) (3), (4) 式可得

$$R_j^* = \sqrt{3} R_{oj} \sqrt{\frac{R_{o1}}{S} (p_{oj} - p_v + \frac{2S}{R_{oj}})} \quad (5)$$

(1) 式中 p_t 是喉部压力不易直接测量, 可由测得上游剖面压力 p_o 及过文杜里管流量通过下式换算:

$$p_{tj} = p_{oj} - \frac{8\rho C Q_j^2}{\pi^2 d_s^4} \quad (6)$$

其中 Q 为流量, C 为流量系数, d_s 为喉部直径。于是只要测得 p_o 和 Q , 由 (6), (1) 及 (5) 式就可以确定气核的初始半径 R_o 。保持上游压力 p_{oj} 和流量 Q_j 不变, 光点检测系统记录得单位时间间隔中有 n_j 个脉冲, 那末半径为 R_{oj} 的气核就是 $(n_j - n_{j-1})$ 个。动水力学法测核的原理和过程详见文献〔4〕。

2. 全息摄影法

全息照片与普通照片不同, 它不仅能记录光的振幅, 而且还能记录光的相位, 也即能够把原始物光的全部信息记录下来。当再有一束激光照射到全息底片上时, 就能在原先放置物体的位置上再现出该物体的空间图像。全息摄影实际上包括这样二次成象过程: 首先用带 Q 开关的巨脉冲激光器作为拍摄光源, 拍摄流动水中的空化核 (包括气核、固体微粒或其它) 的费朗霍夫同轴全息照片, 然后用连续光激光器作为照明光源, 将水流中空化核的大小, 个数及空间分布都再现出来, 逐个判读。

图 2 是本次试验所用的全息摄影和全息再现装置, 其中 $Qx-1$ 红宝石激光器的光输出能量为 5~10 毫焦耳, 脉冲宽度不大于 100 毫微秒。记录底片用 Agfa-75 全息干板, 其分辨率大于 3000 线/毫米。详见文献〔5〕。

(二) 联合试验

1. 试验装置

试验装置列于图3，水泵自水源取水，经过稳水箱稳定地供给水箱所需的流量和造成所需的压力。所需的流量和压力用阀门调节，水流自水箱经过净水器流入文杜里管。目的是过滤水中的杂质。然后由文杜里管流至全息拍摄段。最后水流进入流量计而弃水。水流不再进入原来水源进行循环，以免与原有水源混杂，可保持水中均一的气核条件。

全息拍摄段可以布置在文杜里管上游或者并联，但这样的布置使全息试验段承受较大的压力，原设计的玻璃片恐怕难以承受，故将其串联在文杜里管下游。但在拍摄时要注意二个问题：（1）在文杜里管内不发生空化现象，因为空泡的演变比较复杂，影响原空化核的拍摄；（2）沿试验段不存在巨大的压力坡度，这样，要求沿试验段的管道直径与文杜里管上下游直径相当或稍大于它。各部件的联接处做到平顺，不产生局部的阻力。这样沿试验段流场的变化可符合气泡变化的静平衡条件。在全息段拍摄的气核图象基本上可以代表水箱内的气核图象。

水流经过文杜里管会产生较大的压降，这压降如不能很好控制就不能符合气泡生长的静平衡条件，所以文杜里管的形式必须经过详细设计。我们应用的文杜里管是荷兰

Delft 实验室提出的双曲余弦的形式。即沿水流方向文杜里管直径的变化符合下列方程：

$$d_x = d_s \operatorname{ch}(Kx) \quad (7)$$

式中 d_x 和 d_t 是文杜里管某断面 x (x 的原点设在喉部) 和喉部的直径。 K 为一系数。根据试验和估算，在任何情况下，在此文杜里管内的气泡运动都可符合静平衡条件。符合静平衡条件的式子是：

$$\left[\frac{dp}{dt} \right] = \left[(1 - 3\gamma) \frac{2S}{R^2} + \frac{3\gamma}{R} (P_V - P) \right] \dot{R} \quad (8)$$

式中 p 为压力， $\left[\frac{dp}{dt} \right]$ 是允许的压力变化率。即作用在气泡上的压力变化不能太快，有一允许值。 R 为气泡半径， R_0 为在压力 P_0 作用下的气泡初始半径， γ 为多方气体常数。 $\dot{R} = \frac{dR}{dt}$ 为气泡的变化速度，它可由下式求得：

$$\begin{aligned} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{2}{3} \frac{P_0 + \frac{2S}{R_0}}{1 - \gamma} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + \left[\frac{2S}{R_0} \left(\frac{2}{3} P_0 + \Delta P \right) - \frac{2}{3} \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{P_0 + \frac{2S}{R_0}}{1 - \gamma} \right] \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2S}{R} - \frac{2}{3} (P_0 + \Delta P) \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

式中 $\Delta P = P - P_0$ 为压力增量。

按(8)式计算出的 $\frac{dp}{dt}$ 可以与实际作用在气泡上的 $\frac{dp}{dt}$ 相比较，如果 $\frac{dp}{dt} < \left[\frac{dp}{dt} \right]$ ，说明周界作用气泡上力的变化速度小于允许值，气泡运动可作静平衡过程来考虑，则文杜里管中任一断面位置气泡的半径可由下式决定：

$$R = \left(\frac{p_0 - p_v + \frac{2S}{R_0}}{p - p_v + \frac{2S}{R}} \right)^{\frac{1}{3\gamma}} R_0 \quad (10)$$

由上式可知, 当 p 与 p_0 相差不大时 $R \approx R_0$, 这样根据以上所述, 在进行全息摄影时, 控制上游的压力稍稍大于下游的压力, 使水能够流动, 在文杜里管喉部不会出现空化, 此时在全息摄影的试验段, 压力稍差于水箱内的压力。此处拍摄的空化核图象基本上能代表水箱内空化核图象。全息摄影完成后, 再进行文杜里管的空化核测量。

关于文杜里管从上游至喉部一段内气泡运动的静平衡条件, 我们结合试验作了一些估算, 其结果列于表 1。

表 1 气泡静平衡检验表

试验 组次	流 量 (厘米 ³ /秒)	气核 半径 (微米)	上游压力 (巴/米 ²)	断面压力 (巴/米 ²)	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ (巴/米 ² 秒)	$\left(\frac{dp}{dt}\right)$ (巴/米 ² 秒)	
						$\gamma = 1$	$\gamma = 4/3$
1	48.26	9.98	116737.6	34371.3	5.9×10^7	6.46×10^9	7.96×10^{10}
2	57.11	4.16	158638.5	43304.7	9.78×10^7	1.108×10^{11}	3.59×10^{11}
3	61.50	2.47	178685.4	44938.8	1221×10^7	3.72×10^{11}	1.36×10^{12}
4	69.79	2.32	232348.2	60114.3	1785×10^7	5.39×10^{11}	7.55×10^{11}
5	67.88	3.71	224655.5	61719.6	1642×10^7	1.42×10^{11}	6.13×10^{11}
6	60.34	5.10	178951.9	50203.9	11.54×10^7	7.63×10^{11}	2.99×10^{11}
7	53.17	3.91	136414.0	36444.9	7.89×10^7	1.21×10^{11}	2.83×10^{11}
8	49.94	7.03	123689.7	35497.7	6.54×10^7	3.51×10^{10}	5.97×10^{11}
9	47.32	11.32	112629.4	33448.3	5.56×10^7	3.15×10^{10}	6.98×10^{11}

表 1 中断面压力指离喉部上游 $x = 0.9025$ 厘米处, 该处周界压力变化速度最大即 $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ 。

根据表 1 估算说明在该文杜里管中全部 $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} < \left(\frac{dp}{dt}\right)$, 气泡运动的静平衡条件得到满足。这样按图 3 试验装置进行了两种测量气核谱的对比试验。

2. 试验组次

全息摄影拍摄的时间很短, 而文杜里管在取一组 p_0 , Q_0 值需要较长的时间。测

量气核谱约需1~2小时。因此用全息测量的数据是瞬时的数据,而动水力学法是一平均值,如果我们保持在来流中的气核基本上是均匀和稳定的。那末可以认为瞬时值等于平均值。另外在试验过程中可以在各阶段分次多照几张全息照片,取其值进行平均,这样两种方法测的结果是可以比较的。试验的组次列于表2。

表2 试验组次表

序号	日期	水温 °C	动水力学法数据	全息干板号	备注
1	8月8日上午	31	4组数据	1 [#] 2 [#]	①序号“1”以外均为同一只文杜里管。
2	8月8日晚	32	—	3 [#] 4 [#]	
3	8月9日上午	—	—	5 [#] 6 [#]	
	8月9日下午	—	(有一场暴雨)		②序号“6”是二种方法分别对自来水测量的。
4	8月10日下午	30	12组数据	7 [#] 8 [#] 9 [#] 10 [#]	
5	8月11日上午	30	5组数据	11 [#] 12 [#]	
6	8月11日下午	30	8组数据	13 [#] 14 [#]	

3. 文杜里管喉部直径的决定

文杜里管喉部的直径很小只有2毫米。要精确地加工这种尺寸存在一定的困难,但从(6)式可知喉部的压力与直径成4次方关系,微小的直径误差会引起喉部压力的巨大变化。只有对加工好的管子,进行精确的测量,过去我们用水力学方法予以测量^[10],这次我们可以用全息法予以校核,才可以更好地决定文杜里管直径。其数值列于表3。

表3 空化起始时水中最大气核尺寸和其数量

试验组次	流量 (厘米 ³ /秒)	上游压力 (厘米水柱)	动水力学法			全息法	
			喉部直径 0.2025厘米 气核直径 (微米)	喉部直径 0.205厘米 气核直径 (微米)	气核数目 (1/厘米 ³)	气核直径 (微米)	气核数目 (1/厘米 ³)
1	47.32	1149.28	7.88	22.64	0.9	25.6	1.7
2	63.69	2080.39	5.36	17.78	0.9	18.6	0.9

由表3可知,若取文杜里管的喉部直径 $d = 0.2025$ 厘米,则计算得的气核直径与全息法测得的相差甚远;若取喉部直径 $d = 0.205$ 厘米,两种方法获得的最大的气核尺寸就比较接近。由表3给出的数据,若 $\Delta d / d = 0.0025 / 0.205 = 1.22\%$,它引起对气核直径估计的误差 $\Delta \phi / \phi_{\max} \approx 65.2\% - 69.9\%$,因此精确地确定文杜里管喉部尺寸是动水力学法测核精度关键之一。反之,由表3给出

表 4 动水力学法测量数据表

日期	喉部直径 (厘米)	序号	气核半径 (微米)	气核数目 ($\frac{1}{\text{厘米}^3}$)	空化数	日期	喉部直径 (厘米)	序号	气核半径 (微米)	气核数目 ($\frac{1}{\text{厘米}^3}$)	空化数
8月8日	0.200	1	1.3	未记录	-0.105	8月11日上午	0.205	1	0.21	/	-0.66
		2	2.3		-0.0452			2	0.14	/	-0.737
		3	2.2		-0.0524			3	0.55	7.9	-0.328
		4	1.05		-0.133			4	0.26	/	-0.621
8月10日	0.205	1	9.98	14.92	-0.0177			5	4.30	7.6	-0.0343
		2	4.16	19.61	-0.0384	8月11日下午	0.205	1	1.08	1.81	-0.277
		3	2.47	21.95	-0.0653			2	1.66	8.78	-0.187
		4	2.32	26.22	-0.0498			3	1.69	2.18	-0.192
		5	/	22.37	-0.00327			4	/	0.09	-0.00436
		6	3.71	23.72	-0.0276			5	5.15	11.39	-0.0221
		7	5.10	11.76	-0.0245			6	8.89	0.94	-0.00945
		8	3.91	1.88	-0.0515			7	5.10	12.75	-0.0276
		9	7.03	8.81	-0.0266			8	2.80	11.31	-0.0745
		10	4.87	10.25	-0.0456						
		11	18.32	/	-0.00733						
		12	11.32	0.85	-0.0156						

的全息法的最大气核直径，可以校核文杜里管的喷嘴直径。

(三) 测量结果比较

兹将动水力学法测得的各种数据，以及全息法测得的各数据，列于表4。

表5 全息摄影测量数据表

气核直径 (微米)	每立方厘米中的气核数				
	1# 干板 (8月8日)	5# 干板 (8月9日)	7# 干板 (8月10日)	11# 干板 (8月11日)	13# 干板 (8月11日)
9.0	303.9	338.4	178.7	335.8	178.7
11.6	41.4	53.5	40.6	65.6	24.2
14.0	28.5	13.8	31.9	41.4	16.4
16.3	4.3	5.2	7.8	9.5	0.9
18.6	/	/	4.3	2.6	0.9
20.9	/	0.9	0.9	4.3	/
23.3	/	/	5.2	0.9	/
25.6	/	/	1.7	1.7	/
27.9	/	/	/	0.9	/
30.3	/	/	/	/	/

1. 核谱比较

从表4和表5中可选择8月10日和8月11日二天量测的数据进行两种方法的核谱比较，因为它们的数据较完整。整理的数据列于表6。

从表6可见

(1) 对于较大尺度的气核(直径大于14微米)，可以认为动水力学法测得的数目与全息法相当。

(2) 对于较小尺度的气核(直径小于10微米)，全息法测得的气核个数比动水力

表6 核谱比较表

动水力学法			全息法		
日 期	直 径 (微米)	数 目 (1/厘米 ³)	干板号	直 径 (微米)	数 目 (1/厘米 ³)
8 月	20.0 ~ 22.7	16.8	7 [†]	18.6 ~ 25.6	12.1
10 日	9.0 ~ 14.1	35.5		14.0 ~ 16.3	39.7
	4.8 ~ 7.6	37.9		9.0 ~ 11.6	219.3
8 月	10.2 ~ 17.8	13.0	13 [†]	14.0 ~ 18.6	18.2
11 日	2.2 ~ 5.6	15.6		9.0 ~ 11.6	202.9

学法大一个数量级。这可能是全息测量的小容器串联在文杜里管下游，联接管道中掺进了某些固体微粒，亦可能用动水力学法测量的光电检测系统中光点示波器振子频率不够高，判别脉冲阈值过高等原因所引起的。

(3) 动水力学法测得气核尺寸比全息法的略小，这可能动水力学法在测量过程中，上游按梯级增加压力。箱体内的气核尺寸逐步变小的缘故。

此外由表(4)~表(5)可知

(4) 动水力学法可以分辨的气核最小尺度比全息法的小，前者为 10^{-1} 微米数量级，后者为 10^{-4} 微米量级。

(5) 动水力学法测得的气核尺度是由一组 $p_0 Q$ 决定的， $p_0 Q$ 稳定需要时间，因此气核尺度不能连续选取。

(6) 全息法是记录一瞬间的空间核谱，有随机性，动水力学法须长时间测量，数据有时也有随机性(见表4)，同一组测量中，先记录得 $d = 7.42$ 微米的气泡有 23.7 个，而后来记录得 $d = 7.82$ 微米的气泡只有 1.9 个。

2. 核谱对空化起始的影响

小型文杜里管我们可以认为它是一个空化器，在这次对比试验中，发现在文杜里管喉部发生起始空化需要较大的上下游压力差，比如在83年元月10日测得产生空化起始的上下游压差为241.99厘米水柱^[10]，而这次对比试验测得的空化起始8月10日在上下游压差360.31厘米水柱而8月8日在上下游压差为833.47厘米水柱，并且这次空化现象有时极不稳定，在上下游压力保持稳定的情况下，空化现象可以自动消失再隔一段时间又复可产生。说明气核在水中分布并不十分均匀。在这次对比试验时，气候炎热，在8月9日下了一场大雨，在雨日前后，发现空化起始条件并不一样。如果我们用文杜里管喉部的空化数

$$\sigma = \frac{p_t - p_v}{1/2 \rho v_t^2} \quad (6) \quad (11)$$

来描述文杜里管中水流的空化特性，式中 p_t 和 v_t 分别为文杜里管喉部压力和流速， p_v 为水的饱和蒸气压，因 p_t 低于 p_v 故 σ_1 均为负值，兹将雨前，雨后的两组全息核谱数据以及当天文杜里管的水流参数按 (11) 式换算得的起始空化数列于表 7。

表 7 起始空化数与气核谱的关系

气核直径 (微米)	雨 前 (8月8日)		雨后 (8月10日)	
	气核数 ($1^{\#}$ 干板 $1/\text{厘米}^3$)	起始空化数	气核数 ($7^{\#}$ 干板 $1/\text{厘米}^3$)	起始空化数
9.0	303.9		178.7	
11.6	41.4		40.6	
14.0	28.5	$(\sigma_1)_{\min} = -0.133$	31.9	$(\sigma_1)_{\min} = -0.0653$
16.3	4.3	$(\sigma_1)_{\max} = -0.0452$ $\bar{\sigma}_1 = -0.0891$	7.8	$(\sigma_1)_{\max} = -0.00327$ $\bar{\sigma}_1 = -0.0311$
18.6	0		4.3	
20.9	0		0.9	
23.3	0		5.2	
25.6	0		1.7	

由表中数据可以看出：在雨前和雨后，尺度较小的气核 (9.0~16.3 微米) 数目差不多；但尺度较大的气核 (18.6~25.6 微米) 在雨前一个也没有，而在雨后总计有 12.1 个之多。正是这些较大尺度的气核，对于液体的空化有着重要贡献，使起始空化数由雨前的 $\bar{\sigma}_1 = -0.0891$ 提高到雨后的 $\bar{\sigma}_1 = -0.0311$ 。由表 7 还可以看出，气候条件对自来水中的气核谱也是影响很大的。

3. 与国外资料的气核谱比较

核密度分布函数的定义是

$$n(R) = n\left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right) = \frac{\text{单位体积中半径在 } R_1 \text{ 和 } R_2 \text{ 之间核的个数}}{R_2 - R_1}$$

由图 4 可见本次测量的全息法气核数据其尺度分布规律与国外资料一致。符合

$$n(R) = kR^\alpha \quad (12)$$

规律⁽⁹⁾，在国外统计资料的数据中间。

4. 讨论

通过上一节的比较, 已经可以看出动水力学法和全息法各自的优点和缺点, 现再集中概述于表8中

表8 动水力学法及全息法的优缺点

动水力学法	
优 点	缺 点
1. 测得的是纯气核谱; 2. 可分辨的气核尺度下限为 10^{-1} 微米; 3. 设备简单, 价格低廉; 4. 作为液体空化敏感性的探测, 反应灵敏.	1. 水样经旁路引出, 核谱可能改变; 2. 间接计算得气核尺寸, 故需率定. 3. 对气核浓度较高的介质测量; 可能引起较大误差, 甚至不适用; 4. 测量时间长, 不能用于核谱随时间变化的场合.

全 息 法

1. 能对水样作直接测量; 2. 能区分气核与固体微粒; 3. 能瞬时记录; 4. 能记录核的空间分布; 5. 能记录较大体积水样中的核谱; 6. 能记录的粒子尺度范围较大约 $10^0 \sim 10^3$ 微米量级; 7. 对粒子图象尺寸无需校正; 8. 数据可长时间保存在干板上.	1. 不能进行实时数据分析; 2. 判读的技术复杂, 时间冗长; 3. 图象分辨率是拍摄对象到干板间距离的函数; 4. 可分辨的最小粒子直径为 1×10^{-1} 微米 (本光学系统而言) 5. 可判别的最小气核直径为 2×10^{-1} 微米 (本光学系统而言) 6. 仪器价格昂贵.
--	--

从表8可见, 对于空化核谱或气核谱全息法比较合适, 而动水力学法则宜于用作水的空化敏感性探测.

参考文献

- (1) F.B.Peterson, F.Danel, A Keller and Y.Lecoffre, "Determination of Bubble and Particulate Spectra and Number Density in a Water Tunnel with Three Optical Techniques", 14th ITTC. 1975.

- [2] M.L.Billet and E.M.Gates, "A Comparison of Two Optical Techniques for Measuring Cavitation Nuclei" Symp. on Cavitation Inception, 1979.
- [3] H.W.H.E.Godefroy, R.H.J Jansen, A.P.Keller, Y.Lecoffre, D.M.Oldenziel and R.L.Van Renesse, "Comparison of Measuring and Control methods of the Waterquality with Respect to Cavitation Behaviour" Jan. 1981.
- [4] 夏维洪、沈懋如、贾春英, "用动水力学法量测水中气核尺寸和其分布", 华
华水利学院学报, 1981年.
- [5] 石国祥、潘森森, "激光全息照相法测量空化核", 中国船舶科学研究中心技
术报告, 1983.
- [6] Э. С. Арзумов, "Кавитация в Местных Гидравлических Сопрот
влениях", 1978.
- [7] E.M.Gates and A.J.Acosta, "Some Effects of Several Free -
Stream Factors on Cavitation Inception on Axisymmetric Bodies"
12th Symp. On Naval Hydrodynamics, 1978.
- [8] S.Gowing and S.C.Ling, "Measurement of Microbubbles in a Water
Tunnel" 19th ATTC. 1980.
- [9] 潘森森、张有敬, "泡状空化起始的核谱模拟", 中国船舶科学研究中心技术
报告, 1983.
- [10] 夏维洪、沈懋如、孙才良、孙景琴、贾春英, "水中气核谱的量测" 水利学报
1983.

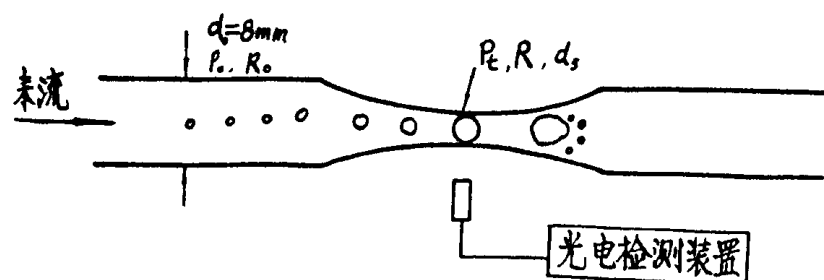


图 1 动水力学法测核示意图

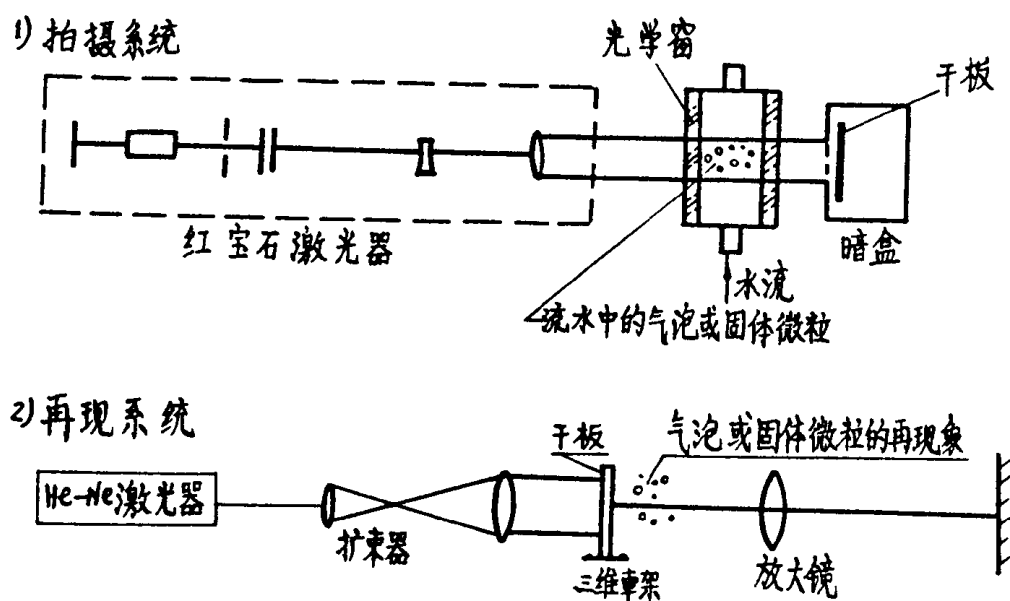


图 2 全息测核法示意图

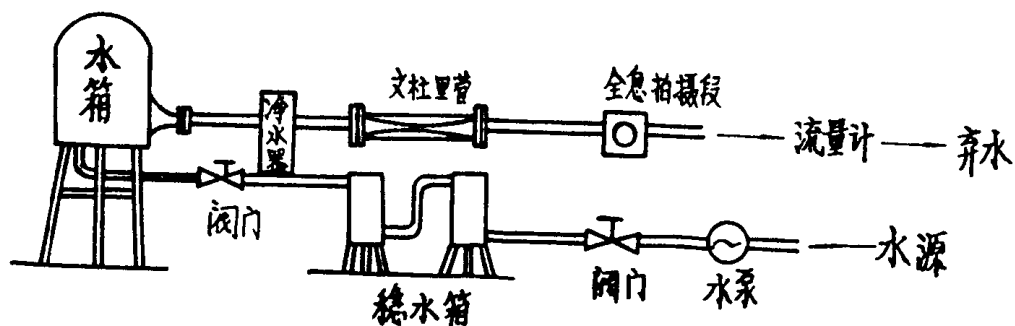


图 3 联合试验装置示意图

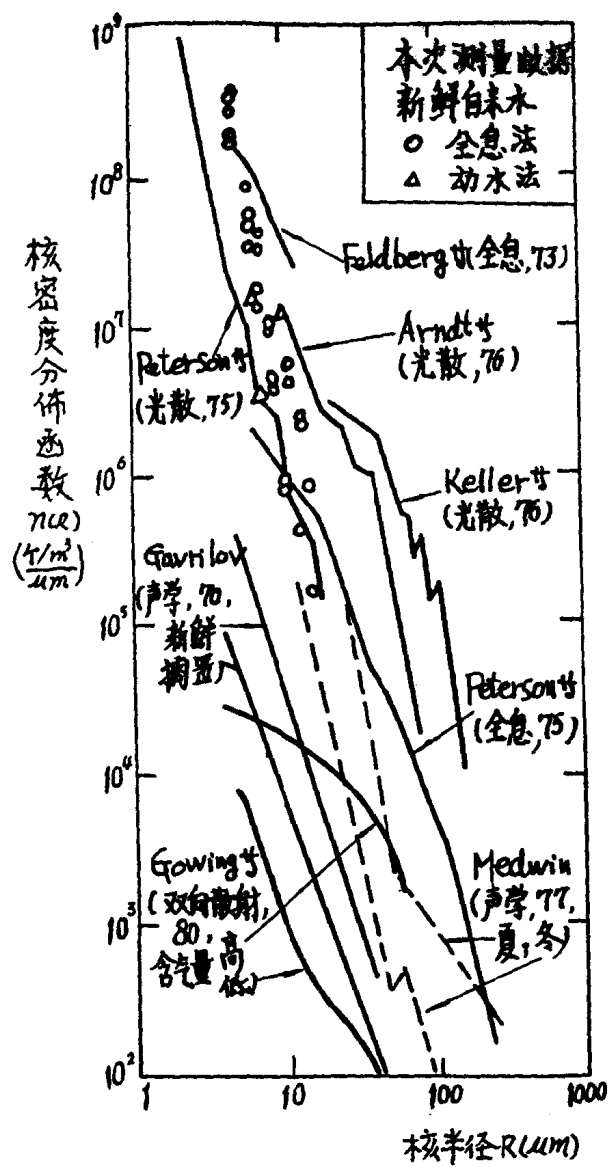


图 4 空化核尺度谱，其中国外的核谱数据引自文献〔7〕和〔8〕

金属材料抗空蚀性能的指标研究

李志民 黄继汤
(清华大学)

提要 本文以能量吸收的观点分析了材料空蚀破坏的机理,认为材料的抗空蚀性能的好坏应以材料到达破坏时的应变能为指标,并定义了空蚀强度:

$$I = \frac{P_a}{A_e} = \frac{1}{A_e} \left(\frac{\Delta V_f}{\Delta t} \cdot S_f + \frac{\Delta V_p}{\Delta t} \cdot S_p \right)$$

式中: I 为空蚀强度; Δt 为试验历时;

P_a 为材料破坏所吸收的总功率;

A_e 为试件被蚀面积;

$\frac{\Delta V_f}{\Delta t}$ 为体积剥蚀率; $\frac{\Delta V_p}{\Delta t}$ 为体积变形率;

S_f 为材料断裂时的应变能;

S_p 为材料变形时的应变能。

本文选择了钢、铜、铝、镁等四类共八种材料分别作材料的机械性能试验和空蚀试验。空蚀试验主要是在磁致伸缩仪上进行的。

(一) 引言

空蚀是空化水流的破坏能力和材料的抗空蚀能力的综合结果。空蚀问题涉及流体力学、材料学和物理化学,三者互相关联。空蚀机理迄今为止尚未被充分阐明。造成空蚀的因素很多,不同的学说建立起不同的模式。有人认为是力学成因;有人认为是电化学和热效应成因。实际上可能是各种原因交织在一起构成的综合效应。

影响空蚀的因素主要有流动特征、液体性质和材料性能。迄今为止,人们通常用材料的硬度来衡量材料的抗空蚀性能。但是,人们从研究与实践中发现,一些非常软而有弹性的材料,在低强度的空化冲击下,其抗空蚀能力比具有较高力学性质的金属更高;同样硬度的延性材料和脆性材料相比,一般是延性材料的抗空蚀性能较好,因而用单一的硬度指标来衡量材料的抗空蚀性能是不全面的。

(二) 与空蚀相关的因素分析

空蚀机理复杂,影响的因素很多。但可以归纳为以下三个主要方面:流动的特征、

液体的性质、材料的性能。

流动的特征：包括速度、压强、空穴的相对长度、累积时间、流动系统的尺寸和形状。

液体的性质：液体在破坏机理方面的作用可分为两个方面，一是由液体的物理性质起控制作用的空泡动力学；二是由液体的化学性质造成的腐蚀性环境^[1]。液体的性质受温度影响很大，所以可以把温度对空蚀的影响，看作是液体性质改变的影响。

材料的机械性能：影响空蚀程度的机械性能包括硬度 H ，抗拉强度 σ_T ，屈服强度 σ_Y ，弹性模量 E ，伸缩率 1_5 ，断面收缩率 ψ ，极限回弹能 U_R ，到破坏时的工程应变能 $ESEF$ 。

我们的目的是寻求一个或一组相关性较好的机械性能指标来表示材料的抗空蚀性能。采取的方式是不同材料的试验比较，因而在试验中，力求保持流动特征和液体的性质不变，所以此处就不再讨论前两个方面对空蚀的影响。对于材料的机械性能，前六个参数（ H ， σ_T ， σ_Y ， E ， 1_5 ， ψ ）为一般材料都要给出的，其定义都十分明确，因此以下只需着重讨论后两个参数（ U_R 、 $ESEF$ ）。

由于材料不断地受到冲击波的重复作用（或一次性冲击），造成质点断裂，因而引起材料的蚀损。若我们考虑金属的塑性，则断裂发生在塑性流限之后，但是在断裂以前屈服强度不是材料塑性流动的一个有代表性的特征，那么在断裂之前控制塑性流限的因素究竟是什么呢？我们知道，断裂是由于克服分子间的力所作的功而造成的。金属的任何永久变形和移动都包括一些分子相互位置的改变和断开分子间的联结力（至少暂时），不管是塑性断裂或脆性断裂，一般来说都包括这些联结力，因而一种材料能够抵抗断裂的最大可能的阻力是全部联结力的总和。应力——应变图的面积是完全断裂所需能量总和的一种度量方法，也就是说材料“绝对内聚力”的一种度量方法。在空蚀破坏情况下，破坏的体积应与这些力的总和成反比，材料的应变能代表起作用的联结力的最大值，从而代表单位体积材料完全断裂所吸收的能量^[1]。

材料的拉伸试验所得应力应变曲线所包围的面积等于应变能，应变能具有单位体积能量的量纲，在空蚀破坏情况下，因是重复的压缩效应，最后发生断裂，所以应采用压缩过程的应力应变图。

现将极限回弹和到破坏时的工程应变能解释如下：

极限回弹能 U_R ：

作材料拉伸试验时，拉伸到弹性极限时，材料所吸收的能量，如图1所示，拉力消除后，材料恢复拉伸前原状，不发生塑性变形。

材料到破坏时的工程应变能：

即材料拉伸试验时，一直到试件断裂时所得的应力应变曲线下的面积。注意；此处的应力计算不考虑拉伸过程中试件断面的收缩，若考虑断面收缩，则为到破坏时的真实应变能。

根据 Hammitt、Hobbs、Rao、Heymann 等人的研究成果^[2, 3, 4]。他们得出结论，如果用单一参数来表示抗空蚀性能，则极限回弹能 U_R 是最佳的单一参数。此处需要说明的是：Hammitt 等所定义的极限回弹能为 $\sigma_u^2 / 2E$ ， σ_u 为极限抗拉强度（即 σ_T ）， E 为弹性模量。根据此定义，由应力应变曲线我们可以画出图3中阴