

汽 蚀

〔英〕 I.S. 珀萨耳 著

唐 厚 荔 译

吴 达 人 校

机 械 工 业 出 版 社

本书系英国著名汽蚀专家英国工学士、哲学博士 I. S. 珀萨耳的著作之一。作者对汽蚀现象的研究具有独到的见解。

全书对汽蚀的初生、汽蚀的侵蚀、水翼的汽蚀、各种泵的汽蚀、水轮机的汽蚀、螺旋桨的汽蚀以及超音汽蚀和生物性汽蚀等均作了精辟的叙述。特别是对生物和医学领域中的汽蚀问题也作了探讨。

全书内容丰富，附有必要的插图和表格，可供读者分析时参考。

本书可供水泵、水轮机、船舶、水电站专业设计人员参考，也可作为医学界参考文献之用。

Cavitation

I. S. Pearsall

Mills & Boon Limited

1972

* * *

汽 蚀

〔英〕 I. S. 珀萨耳 著

唐厚荔 译

吴达人 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $2 \frac{1}{2}$ · 字数 48 千字

1984 年 3 月北京第一版 · 1984 年 3 月北京第一次印刷

印数 0,001-6,100 · 定价 0.40 元

*

统一书号：15033 · 5622

序

在液流和液力机械中，经常会发生汽蚀现象，从血液的流动直到水轮机和船舶螺旋桨，都会发生汽蚀。实质上汽蚀是由液体在低压时的沸腾汽化所造成的，它的形成取决于液体中存在的汽蚀核子，也取决于液流的温度、压力和速度。汽蚀对液力机械的影响表现在效率的损失，或侵蚀、破坏液力机械的叶片。它在血液流动中则会损坏动脉或心脏，也会造成动脉的“弯曲现象”，它也能发射出称为“声致冷光”的微弱光线。

汽蚀会造成水翼的升力损失，它对液力机械、水泵、水轮机以及螺旋桨的性能也有类似的影响。所以，每种液力机械都要进行汽蚀试验，研究它们的汽蚀特性，从而改进设计，以取得最优的设计方案。汽蚀侵蚀会使许多水力机械和静态装置^①受到损坏。在大多数情况下，可采用强度较高的材料以克服汽蚀，也可进行大量的对比试验以作为设计的依据。

某些新的设备，企图利用液体的汽蚀原理，例如在水力机械领域中的超汽蚀螺旋桨和超汽蚀泵，或者也可将汽蚀原理用于化学搅拌或化学反应中。

① 例如泵阀等水工建筑物——译注。

目 录

译者的话

序

符号

一、前言	1
二、汽蚀的初生	3
1. 汽蚀的初生和汽蚀核子	3
2. 流动系统中的汽蚀	5
3. 液体内空气含量对汽蚀的影响	8
4. 比例效应	9
5. 汽蚀引起的噪声	11
三、汽蚀的侵蚀	13
1. 材料的选择	14
2. 几种试验方法	17
3. 抗侵蚀能力与材料寿命的关系	20
四、水翼的汽蚀	22
1. 普通的水翼	22
2. 水翼叶栅	24
3. 超汽蚀水翼	25
五、各种水泵的汽蚀	26
1. 定义与参数	26
2. 汽蚀对水泵的影响	28
3. 最优化设计	32
4. 热力学效应	36
5. 超汽蚀泵与诱导轮	39
6. 泵的侵蚀	41

六、水轮机的汽蚀.....	42
1. 定义与参数	42
2. 最优的叶片设计	45
3. 尾水管	46
4. 侵蚀	47
七、螺旋桨.....	49
1. 效应与参数	49
2. 性能与设计	51
3. 超汽蚀螺旋桨	54
4. 侵蚀	55
5. 船舶上的其他装置	56
八、汽蚀试验.....	57
九、超音汽蚀与生物性汽蚀.....	61
1. 化学过程	61
2. 生物和医学方面的问题	62
十、将来的发展趋势.....	63
参考文献.....	65

一、前 言

远在 1893 年英国皇家海军舰艇“勇敢号”上首次观察到汽蚀现象以前，雷诺 (Reynolds)^[56] 就已在理论上对汽蚀作出了预言。“勇敢号”舰艇所达到的实际速度远比预期的速度为低，这是由于螺旋桨的叶片上形成了蒸汽泡，使螺旋桨性能恶化所致。几年以后，第一艘由汽轮机驱动的轮船“透平号”也遇到了类同的难题。它曾经先后安装过七种不同设计的螺旋桨，但没有一种能达到预期的速度。后来，采用三联传动轴分别装上三个螺旋桨，以代替单轴传动，才使“透平号”达到 32 海里/时的航速。这种螺旋桨传动方式是在英国柏生斯蒸汽轮机有限公司所建造的第一台小型水洞中研制成功的^[57]。

汽蚀是在常温、低压下由液体的沸腾所造成的。液体中存在有溶解的空气，当压力下降时，这些空气就析出，从而使汽蚀现象更为严重。液体中形成的压力下降导致溶解空气的析出和液体的汽化，这种复合现象就称为“汽蚀”。

自从“勇敢号”和“透平号”时代以来，对汽蚀从化学、物理和工程方面都作了深入细致的研究。对水泵、水轮机、螺旋桨、水坝及其类似的结构作了下列的试验研究工作：气泡的形成和破灭过程、溶解在液体中的各种气体的作用、气泡的形成和破灭对机件的影响。例如，现已发现，气泡的形成会干扰液体在机器中的流动，正如“勇敢号”所遇到的情况那样，它会造成压力、效率和推力的下降。此外还发现

气泡的破灭会产生冲击波，使水轮机叶轮或螺旋桨的金属材料受到侵蚀。

为了研究这些现象，制造了高级的试验设备，从用于试验螺旋桨或水轮机的具有几千马力的大型水洞，直到用于研究侵蚀破坏的小型高速振动仪[⊖]。

大部分有关汽蚀的各方面性质已先后进行了研究，但是这些主要问题的解决方法还尚未研究成功。然而，对汽蚀已有了充分了解，这对工程师们来说已够用了。

⊖ 指磁致伸缩振动仪——校注。

二、汽蚀的初生

1. 汽蚀的初生和汽蚀核子

从理论上讲，当液体的压力降低到其汽化压力时，液体才会汽化。但在实际上开始形成汽蚀时的压力，很大程度上决定于液体的物理状态。如果液体中含有较多的溶解空气，则在压力降低时，空气就会从溶液中析出，并形成汽穴。汽穴中的压力将大大的高于汽化压力。即使没有肉眼看得见的空气泡，但还存在着普通显微镜下看不见的气体泡，这种气泡作为汽蚀核子，使形成汽蚀时的压力高于汽化压力。每个汽蚀气泡都会从一个核子长大成一定的尺寸，然后破灭。整个循环所需的时间也许只有几毫秒。这些气泡会迅速地一个接着一个地成长起来，所以用肉眼看起来好象是一个连续的气泡。

如果液体中没有核子，液体就能够承受负压或张力，而不会形成汽蚀。从理论上讲，液体可能承受几千大气压的张力，例如水就估计能承受 500~10000 大气压的张力^[1]。实际上，水即使经过严格的过滤和几百大气压的预压处理，但在受到 300 大气压的张力时仍会破裂。根据泼莱斯脱 (Plessset)^[3]的研究，当水中不存在核子时，理论上水可以承受 15000 大气压的张力，但是这种可能性是很小的，除非这些气泡只有分子那么大小。然而，当水中存在非湿润性的固体核子，其尺寸为 10^{-6} 厘米时，那么只要有几十个大气压的张

力，多半就能使水泡破裂。这就是水在真空时所能升高的高度比一个大气压力时升高的高度还要高的原因。实际上，这个现象已由液体的预压处理得到证实〔2〕。

即使在局部压力能正确地已知的情况下，还是很难预测何时会发生汽蚀，这是因为核子的分布情况和尺寸大小还未了解的缘故。只有测出了液体中的总气体含量，才能近似地得到答案，因为气体含量是与汽蚀发生时的压力有关的。尽管如此，在对这些核子的作用有了充分研究和了解以前，人们还是不能准确地预测到汽蚀何时才会发生。

假使核子是以很小的气泡形成，存在于液体中，那么液体中必然有某些使气泡起稳定作用的影响。因为当气泡尺寸很小时，表面张力效应就会使气泡破灭；而当气泡尺寸大到可见的程度时，它就会上升到液体表面而逸出。提出了各种不同的假设用来说明这种矛盾；例如假设核子陷没在液体的边界面上微小的缝隙中，这种假设在某种程度上为下述事实所证实：汽蚀常常发生在这种边界面上或者发生在其附近。有时，汽蚀也会在远离容器壁面处发生，例如在旋涡的中心处或者在超声脉动压力场的中心处形成汽蚀。假使液体中悬浮有固体颗粒，则这种“边界缝隙”的假设还是能够成立的，此时，固体颗粒取代壁面作为核子的中心。这种假设是相当贴切的，正如泼莱斯脱（Plesset）在文献〔3〕中所示。另一种假设是：所有的气泡表面都有一层由杂质所形成的有机物表皮，这些有机物起到了稳定剂的作用。但现有的实验结果并不支持这种假设。在特殊情况下，成核现象可能是由带电荷的颗粒（如宇宙线）所形成的。

汽蚀也会引起其他的物理现象，当核子成为气泡而最后破灭时，会从气泡发出一种微弱的光。这种“声致冷光”的

产生原因现在尚不清楚。有一种假设认为：这种闪光是气泡表面上由分子的热力离解作用或机械离解作用所产生的自由离子在重新组合时所发出的。另一方面，杰曼 (Jarmen) 和他的合作者〔53〕在 1960 年提出了有力的证据，指出“声致冷光”是由于气泡在破灭时产生高压和高温，使气泡中的气体白热化的缘故。这种闪光的持续时间在 $1/20$ 秒至 $1/1000$ 秒之间。这种光的亮度决定于气泡中气体的含量，如果气泡中没有气体，就不会发光。由于“声致冷光”的亮度很弱，只有经过放大以后或在暗室中才可观察到。通常在油类的汽蚀过程中也曾经观察到火花，这种现象被认为是静放电的缘故。

当汽穴破灭时，气泡会产生高压和高温。气泡周围液体的温度可高达 10000°K 。魏勒 (Wheeler)〔4〕的结论是：破裂气泡附近的物质温升可达 $500\sim 800^{\circ}\text{C}$ 。气泡的破灭可以在以毫秒计，甚至以微秒计的短时间内完成。哈里逊 (Harrison)〔54〕表明，气泡附近经过液体而辐射出的合成冲击波，其压力差可高达 4000 大气压。

于是，汽蚀气泡的寿命包括膨胀和破灭两个相变，这样就形成了一个完整的热力学循环。在大多数情况下，全部温度降和相应的损失是可以忽略不计的，但也不是绝对如此。例如，在临界点附近工作时，或当比较各种热力学性质很不相同的液体时，温度的效应就将是重要的。

2. 流动系统中的汽蚀

迄今，汽蚀被认为是单个气泡的生长和破灭的现象。然而，液体在流动系统中还会遇到局部加速现象，而在速度最高的位置处会造成低压，从而形成汽穴；这些汽穴进一步扩

大，在抵达低速、高压区时就立即破灭。汽穴一个接一个地形成和破灭，这样就使气泡胀大和得到外观上的稳定。当然，只要液体的压力保持为汽化压力或接近于汽化压力，就仍会形成汽穴。

这种汽蚀现象可以由图 1 来表达，该图还表明了液体流动系统中相应的压力值。正如图 1 所示，汽穴的破灭是不稳定的；气泡的末端趋向于裂开而破灭，使汽穴的末端产生脉动。当汽穴在上下两个表面上是对称的情况下，就会使汽穴在上下两个表面上交替地破灭，并且在物体的后部形成涡流。

上述流动系统中，压力和速度的关系遵从伯努利方程，即

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 + \text{各种损失}$$

对于水平的流动系统，可把上式重新排列，以得到该系统的汽蚀系数。

$$\sigma = \frac{P_1 - P_c}{\frac{\rho}{2} V_1^2}$$

式中 P_c 是 P_2 点处的临界压力，即汽蚀发生时的压力；通常就把汽化压力作为临界压力。实际上，如上面所说明那样，汽蚀发生时的压力既可高于也可低于汽化压力。

通常把汽蚀开始时的 σ 值称为 σ_{crit} ，可以称之为“初生点”。随着压力增加而停止汽蚀时的 σ 值，则称为“消失点”。

在物体周围的压力场是不均匀的，由于边界层的存在、核子的效应和物体几何形状的影响， σ_{crit} 值是不固定的。因此它将随着物体的不同而变化，从而导致空气含量、比例效

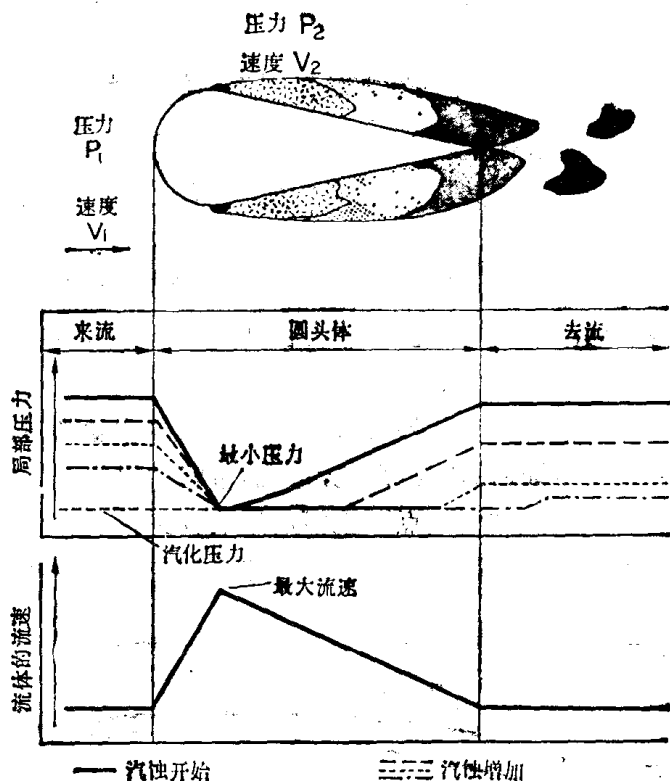


图1 在液体中绕物体（如水翼）形成汽蚀的情形。液体从左方流向右方，当流经物体造成的收缩处就得到加速，并在喉部处达到最大速度和最小压力。如果来流的压力足够高，则喉部处的压力仍将高于汽化压力，但当来流的压力降低时，汽蚀就会在该处发生，并向后方扩展。

应等问题的变化。可是，作为第一次近似， σ 的临界值仍不失为一个非常用的相关系数。

3. 液体内空气含量对汽蚀的影响

当流动的液体中存在有核子时，首先就意味着液体不可能承受各种张力，其次，如果液体中含有足够多的气体泡，则汽蚀就会因气体在略高于汽化压力的某个压力下析出而开始发生（同样，在高于汽化压力的某个压力下，汽穴可能部分地充满气体）。这就是说，汽蚀会在高于与汽化压力相应的某个汽蚀系数 σ 值上开始发生。这样就会有空气含量对汽蚀的影响，如图 2 所示。此外常可发现，当空气含量高时，对汽蚀的初生含有滞后影响，因此，人们常将“消失点”作为比较的准则，因为“消失点”受滞后影响较少。

在流体流经某种静止物体——如圆柱体、卵形体和水翼

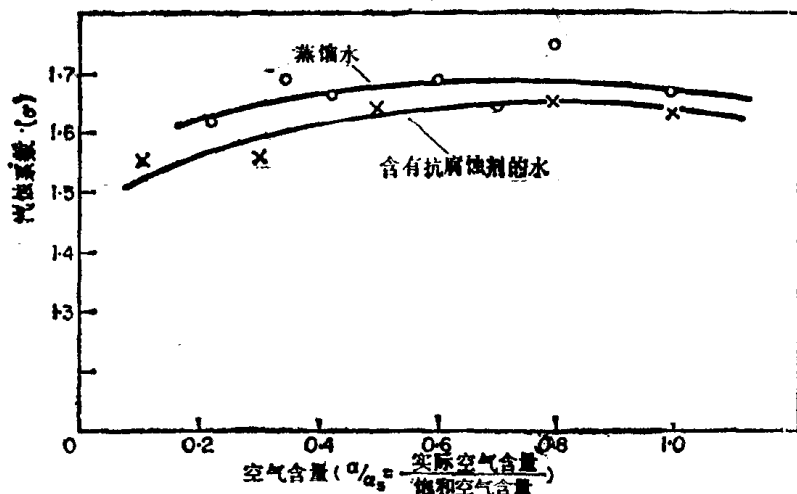


图2 在图1所示的物体上，空气含量对汽蚀初生的影响

等的情况下，由实验〔5、6〕可知，空气含量的影响如图2所示，但对整台水力机械来说，这种影响就不如静止物体那样明显。对机械而言，性能的断裂通常要比汽蚀的初生重要得多。

对各种水力机械（不论是水轮机、水泵还是螺旋桨）的试验表明，随着空气含量的增加，汽蚀系数略有增加，它们之间只有增加量多少的差别（图3）〔7~9〕。

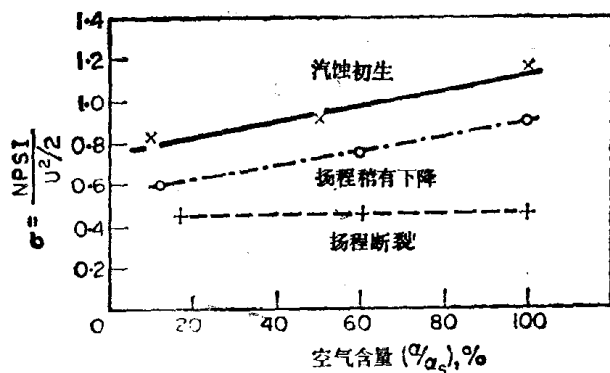


图3 离心泵中空气含量对汽蚀的影响^{〔8〕}⊖

4. 比例效应

流体在低压区逗留时间的长短，决定于液体的速度，因此，流体在低速情况下流经低压区的时间较高速情况下的时间为长，由此可以预期汽蚀将更易于发生（因为气泡有更多的时间来增长）。实验指出，在低速情况下的汽蚀系数较低，这就是众所周知的“速度比例效应”〔11~12〕。图4所示是流经一个卵形体时的速度比例效应。

⊖ 图中 $\sigma = \frac{NPSI}{U^2/2}$ ，NPSI有误，应为NPSH——译注。

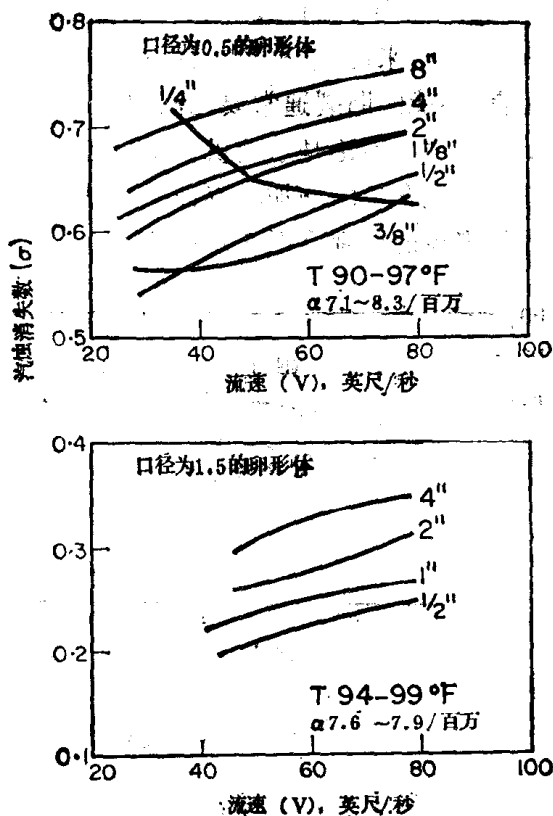


图4 水流经卵形体时, σ 随流速与模型直径的变化^[10]

不同尺寸的比例效应并不是很好地线性相关。虽然大多数对静止物体的试验表明, σ 值随着尺寸的增大而增大^[11~13], 但在液力机械中却往往表明 σ 值随着尺寸的增大而减小。同样可以作出以雷诺数为基础的类似关系图(图5), 就象所有在水中进行的试验那样。此处的雷诺数即为流速(V) $\times$ 直径(C)。

热力学比例效应可参阅本书五、4.“热力学效应”一节。

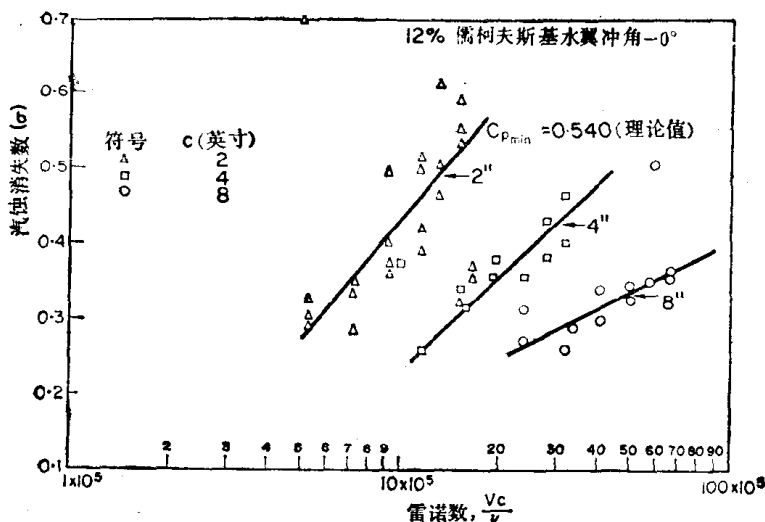


图5 儒柯夫斯基水翼的雷诺数与 σ 数的关系^[11]

5. 汽蚀引起的噪声

汽蚀气泡破灭时，会产生冲击波，从而也就产生了噪声。基本上这是一种“白噪声”，它具有较广的频谱；测得的最高频率可达1百万赫。有一些证据说明较小的气泡会产生高频率的噪声，而大气泡破灭时，则会产生低频率的噪声。

超声波可用来产生汽蚀。这种技术已被用于超声波清洗和汽蚀侵蚀的试验设备。

噪声也可用来探索汽蚀是否发生或消失，大体上说，用噪声法和用肉眼观察法可以探索到相同的“发生点”或“消失点”，噪声法比肉眼观察法有较小的估计误差。图6比较了用噪声法和肉眼观察法来探索卡波兰（Kaplan）水轮机的汽蚀发生^[14]。

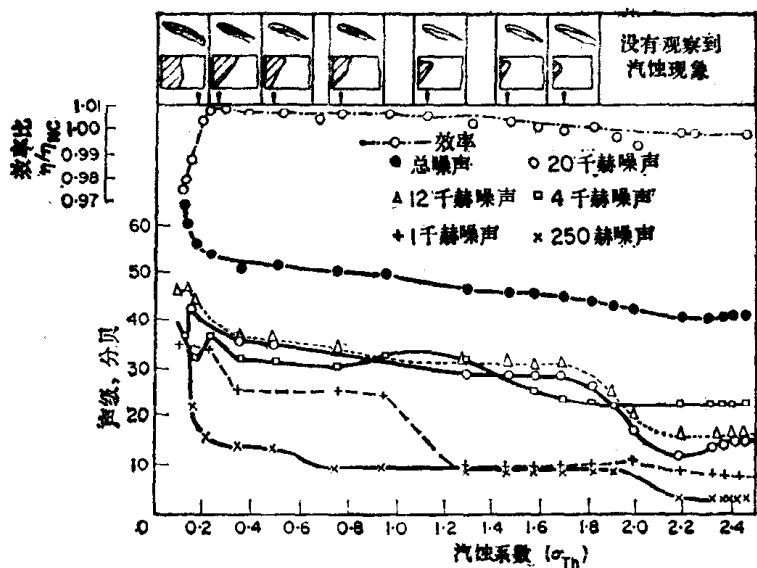


图6 卡泼兰水轮机 ($N_{st} = 400$) 的汽蚀噪声

实验表明, 汽蚀噪声和侵蚀损坏之间存在一定的关系。作用在圆柱体上的峰值噪声和峰值侵蚀是同时发生的^[15]。因此发展这方面的技术将大大有助于预测侵蚀发生的时间。