

空泡现象和气蚀机理研究现状

金 哲 学

(中国科学院力学研究所)

水流绕过物体,当物体表面附近压力下降到水的饱和蒸汽压时,那里的水开始汽化,生成许多小气泡。这些小气泡随水流运动到下游速度较低、压力较高的区域时,又凝结破灭(闭合)。同时,溶解在水中的空气也可能以空泡形式逸出,形成充满空气的气泡。这种由汽泡(或气泡)产生和凝结(或破裂)过程中引起的一系列现象称谓空泡现象(空化)。

高速运转的水泵、水轮机和水利泵等各种水力机械常常遇到空泡现象。水中高速运动的物体如鱼雷、高速舰艇的船体及附体(如水翼、舵等)上也可能出现空泡现象。一旦产生空泡现象,不仅运动物体的阻力显著增加,效率明显下降,而且带来振动和噪音,甚至引起物体表面材料的损坏(称为气蚀)。在水力发电设施中的各种混凝土构筑物也普遍受到气蚀的危害。现在有关气蚀机理的研究(包括空泡现象的研究)所涉及的面很广,除了研究水中的气蚀问题外,还研究高分子聚合物溶液中的空泡现象、高温液态金属和超低温液体中的空泡现象等^[1]。

空泡现象有两种:一种是局部空泡,即空泡现象只局限在物体表面的某一部位,汽泡只在这范围内产生和破灭。这类空泡对物体的水动力性能不产生明显的影响,但空泡在物体表面破灭时产生材料表面的严重损坏(气蚀)。另一种是完全空泡或称超空泡,即物体表面从某处起整个地被汽泡(或气泡)所包围,还拖曳至尾流中,整个物体(例如翼切面)背面等于在蒸汽和空气的混合气体中运动。超空泡对物体运动的水动力性能有很大影响,但基本上不产生对物体表面的气蚀(空蚀)。

对空泡现象有空泡机理(包括气蚀机理)、空泡绕流等各种问题需要研究。上述的超空泡现象属于空泡绕流问题,是水动力学研究课题之一。本文围绕局部空泡,就空泡的发生和气蚀机理有关的问题谈一谈。

一、空泡现象的发生机理

目前研究得最多的是对各种形状的轴对称物体表面产生的空泡现象。为了便于比较,国际上采用 ITTC 标准圆柱体*做空泡试验,在世界范围内收集实验数据。结果表明:即使用同样形状的模型,如果在不同的实验装置上做试验时,其起始空泡系数或空穴形状大不相同。因此研究了边界层状态(特别是有无层流分离)、主流湍流度和空泡核对空泡起始的影响^[2]。在 ITTC 标准圆柱体或者二维翼型等光滑物体上,空泡开始产生时,有各种不同型式:静态空泡和动态空泡或者两者混杂。所发生的空泡型式不同,起始空泡系数也不同;而产生哪种空泡,主要由流速、湍流度、物体表面压力分布、边界层状态等流场条件和液体物理特性、掺气量等因素决定。

对动态空泡的研究方面,把卷入流场低压区的单一空泡核的成长与物体表面的压力分布结合起来进行理论分析,描述了空泡起始^[3]和对空泡起始的尺度效应^[4]。此外,静态空泡极易受边界层的影响,因而空泡的尺度效应非常显著。

* 所谓 ITTC 标准圆柱体是由国际船模试验水池会议推荐的标准圆柱体。

粘性对空泡起始的影响

Casey 利用二维翼型进行实验,得到这样的结论^[5]:当层流边界层分离后,在形成分离泡时,分离泡内被回流带进来的空泡核,即在那里成长起来,成为可见的空泡。在多数情况下,压力最低点和分离泡位置(也就是空泡起始位置)很近,用肉眼无法辨别。但由于分离泡内压力稍高些,因而根据最小压力系数 $C_{p\min}$ 估计的起始空泡系数,与测量所得的起始空泡系数 σ_i 不同,且 $|C_{p\min}|$ 大于 σ_i 。如果压力最低点和分离泡位置离得越远, $|C_{p\min}|$ 和 σ_i 的差值越大。一旦分离泡成长,即使升力变化很小,但有时压力分布的差别很大,因而由压力分布估计的起始空泡系数与实验值差别更大。这种流动状态的变化依赖于雷诺数。可以认为这是模型试验与实物试验之间尺度效应显著的原因之一^[5]。

为了直接研究边界层的影响,对两种轴对称物体(ITTC 标准圆柱体和半球头圆柱体),利用纹影仪观察了物体边界层(把物体稍微加热后,观察它的温度边界层)和空泡的发生。由此发现,空泡的起始点在于分离区再附点附近^[6]。在分离区中,由于空泡系数下降,它的很多部分被空泡所充满,如果空泡系数再下降,分离区几乎全部被贴在物体表面的空泡所占。这种空泡是在层流分离点下游离开物体,其位置随空泡系数和流速而变。村井^[7]、Blake^[8] 等人通过照相方法研究了上述静态空泡发生在再附点上,并随着空泡系数的下降,其位置往上游移,充满分离泡,使空穴与层流分离泡形状几乎一样等现象。

为了研究静态空泡最初不是发生在压力最低点,而发生在静压更高的再附点附近的原因,在雷诺数为 $3--12 \times 10^5$ 的范围内,利用纹影仪观察了轴对称物体上边界层转捩,同时用压电传感器测出转捩点和再附点附近的压力变化^[9]。实验表明,压力变化的频率在数千赫量级,在层流边界层再附点附近的峰值与均方值竟达动压的 26% 和 10%,这么大的压力变化对空泡起始起促进作用。Arakeri 和 Acosta 的实验也证实了这种现象^[10],即在上述轴对称物体上设置一个扰动线,促使向湍流的过渡,以此控制层流分离,就可以大大推迟起始空泡的发生。存在层流分离的二维翼型的实验,也证明了利用这种方法控制空泡的效果^[8]。

Huang 和 Peterson 就粘性对空泡起始的影响做了这样的结论^[11]:液体对空泡的抑制能力不同,(1)当存在层流分离时,在再附点、层流分离点或压力最低点中的任意一点上发生空泡;(2)当层流边界层向湍流边界层圆滑过渡时,空泡发生在压力最低点或过渡区内。无论哪一种情况,起始空泡系数是由该点的静压和压力脉动决定的压力系数来确定^[11]。van der Meulen 利用激光全息方法观察了边界层状态和空泡起始状态,得到同样的结论^[9]。

主流湍流度对空泡起始的影响

为了研究主流湍流度对空泡起始的影响,利用二维翼型所做的实验表明^[12]:(1)在翼型或流线型物体上空泡起始和破灭的部位,随湍流度而异,湍流度越大,该部位往上游移。(2)起始空泡系数随主流湍流度而异,湍流度越大,起始空泡系数也越大,也就是说湍流度越大,越容易发生空泡。

另外,考虑了湍流度与空泡核成长的关系,研究了湍流度对起始空泡系数和起始位置的影响。结果表明:设置扰动网格时,只在压力系数最小的位置附近才产生空泡,而湍流主要起使气泡核成长的作用^[13]。

Gates 和 Acosta^[14]利用前面所述的纹影法观察了湍流度对边界层状态的影响,证实了转捩位置或分离泡大小随湍流度而变,但由于在实验模型上发生空泡之前,扰动网格上先发生空泡,因而实验范围受限,没有得到明确的结论。另外,为了比较不同实验装置上所得的实验结果,他们提出要研究各实验装置的湍流度及其能谱等有关湍流结构的问题。

空泡核对空泡起始的影响

空泡核对空泡的发生是不可缺少的,为此已提出了各种假设,但目前还没有一种假设能对所有空泡问题都能解释。然而,存在着空泡核,这是没有什么可怀疑的了。这种空泡核对空泡起始起很大作用,因此对空泡核的测量做了大量工作。空泡核可分两种:(1)存在于自由流中的流动核(freestream nuclei)和(2)贴在物体表面或裂缝中的表面核(Surface nuclei)。对空泡核的测量工作主要是针对前者进行。测出核大小及其数量的分布(空泡核频谱)。测量方法中有光散射法^[15,16]、超声波法^[17]等。Keller 所做的光散射法,由于它测量数据的分析比其他方法容易些,得到普遍采用。Keller 和 Weitendorf 利用这种方法在海洋中进行了海水空泡核的实地测量。他们跟着一艘集装箱船在欧洲和澳大利亚航线上航行时,利用激光散射法进行空泡核测量,发现海水中有许多直径为 20 微米左右的空泡核,有时还遇到直径超过 100 微米的空泡核。但是利用这种激光散射法测量空泡核,不能分辨出空泡核和微小固体颗粒。最近 Gates 和 Acosta^[14]、Voyevodin^[18]利用激光全息方法进行测量获得成功。利用这种方法时,只要知道光学系统的测量比例,可测出空泡核的绝对值,又可分辨出空泡核与其他颗粒。如果利用大功率脉冲激光器,就可以测出空泡水洞试验段中高速运动的空泡核。

空泡起始与空泡核频谱(核大小及其数量的分布)有很大关系。对各种形状、尺寸的轴对称物体所做的实验表明,其程度随来流的压力梯度而变,用试验方法测得的空泡核频谱与从稳定理论确定的核大小的临界值一般还是一致的。空泡起始位置与水中所含空泡核有很大关系,但与掺气量没有关系^[19]。

实验之前水洞中水的履历——静放时间、减压程度、水的过滤、装置的运转时间等,都会改变空泡核频谱,因而空泡发生的情况也就不同^[20]。还要考虑,光滑物体上起始空泡系数随雷诺数的变化^[20],或者从静态空泡转移到动态空泡的过程与空泡核的联系。由于空泡核不同,实验的重复性差,为此 Takagawa 等人^[21]利用特殊的过滤器控制核的上限,而 Albrecht 等人把微喷嘴群喷出高速射流时产生的气泡当作空泡核^[22]。另外为了便于比较相似物体之间的空泡试验结果,有人提出各实验装置之间核频谱的差异缩小到最小程度,如:有可能在每次做实验时用适当方法测量和控制空泡核频谱^[20]。Henry 认为在空泡实验中模型和实物之间不仅空泡系数要一样,而且空泡核也要相似^[23]。这就是说缩小的模型所用的核数,与缩小倍数的三次方成比例,因而模型试验时的核浓度比实物试验时的核浓度要大得多。例如,模型是实物的 1/10,模型周围核浓度为 n 个/厘米³,那么这种条件对实物来说核浓度为 $[n/10^3]$ 个/厘米³。这意味着做模型试验时,核浓度要等于实物运转时核浓度的 1000 倍。为此,做模型试验时还往水中通气^[23]。

添加聚合物对空泡的影响

清水中加入一些高分子聚合物,不仅摩擦阻力显著减少,而且起始空泡也被抑制,发展的空穴形状也有变化^[24]。很多实验表明,添加聚合物的溶液中空泡现象能被抑制的效应,不能从流体的静特性参数(例如粘度、掺气量、表面张力、液体抗张力等)的变化来说明,而要与聚合物溶液的流体力学特性(拉伸粘性率、一次和二次法向应力系数等)联系起来进行研究。

观察半球头圆柱体周围发生的发展了的空穴发现,清水中空穴的前缘很清楚,分离点的流动为层流;但添加聚合物后空穴前缘不清晰,分离点的流动状态有显著变化。前面讲到层流边界层中分离泡的存在对空泡的发生起很大作用,但添加聚合物时影响分离泡,抑制空泡的发生。Gates 和 Acosta^[14]、van der Meulen^[25]用实验方法证实了这一点。Gates 和 Acosta 的实验表明,从轴对称物体前缘加入的聚合物引起边界层的不稳定,使边界层更快地向湍流过渡,因而阻止层流的分离,结果能抑制分离引起的空泡。总之,添加聚合物,不容易产生空泡。没有层流分离时,空泡起始不

受聚合物的影响。

水中射流的空泡实验中, 聚合物对空泡起始起明显的抑制作用, 与空泡的发生有关的射流边界的样子也比清水中的情况有很大变化^[25]。由此可见流体的力学特性比静特性参数更为重要。

另外, 聚合物浓度增加时, 气泡半径的振幅更快地衰减, 气泡破灭时产生的最大冲击压也减少^[26](理论结果), 日本大场^[27]等人用实验方法证实了添加聚合物时空泡的冲击压下降的现象。

二、气蚀问题

过去研究气蚀问题有两种方法: 一是从流体力学的观点出发, 研究空泡程度和它对物体表面的冲击强度之间的关系; 二是从材料强度学的观点出发, 研究材料耐气蚀的强度。目前的趋势是企图把这两者统一起来进行研究。在此主要介绍从流体力学观点出发的研究动态。

气蚀机理

关于气蚀机理有两种说法: 一是气泡破灭时产生的击波造成气蚀; 二是气泡破灭时产生的微小射流(Micro Jet)的冲击造成气蚀。这就是说, 前者是气泡达到最小半径之后再膨胀时产生的击波引起的, 后者是固体壁面附近的非球状气泡破裂时产生液体微小射流引起的^[28]。从已发表的理论和实验研究结果看, 这两种可能性大致各占一半。最近, 认为微小射流的冲击是形成气蚀原因的观点似乎更有道理, 而藤川等人^[29]的实验结果正好相反, 因此还不能肯定产生气蚀的原因。有人认为上述两种现象同时存在, 只不过由于它们起作用的阶段不同而异^[29]。

关于气蚀机理的研究难以进展的原因是由于这种现象具有两个明显的特征: 其一, 空泡的发生是随机性的, 因而准确地知道气泡破灭的位置和时刻是很困难的; 其二, 空泡破灭的现象是在十分之一毫米的空间、百万分之一秒的时间内才能捕获, 因此给测量带来很大困难。最近藤川等人^[29]成功地拍摄了固体壁附近的气泡产生的击波。

空泡系数对气蚀的影响

研究表明: 空泡系数越大, 气蚀程度轻些或基本上没有气蚀损坏。另外, 如上所述, 在超空泡状态中, 空泡越过物体表面, 不在物体表面上破裂, 结果气蚀现象甚微。空泡系数与气蚀量的关系呈山形。从圆柱背面的气蚀实验中发现: 损坏程度最大时的空泡系数与空泡发出超声波(40K HZ)的音压值最大时的空泡系数基本上一致。

流速对气蚀的影响

当流体速度不超过某一值时, 根本不出现气蚀损坏。当流体速度增加时, 流体的能量也增加, 因此即使空泡系数一定、空穴长度一样, 气蚀量会增加。很多实验结果表明, 气蚀量与流速的5—8次方成比例, 而在多数情况下, 与流速的6次方(即水头的3次方)成比例。有人认为每个气泡破灭时的能量大约与流速的5次方成比例, 而气蚀凹坑数与流速的6次方成比例。这样被物体吸收的、与气蚀有关的全部能量大约与流速的11次方成比例^[30]。但有人指出有关气蚀的数据不能用这种指数关系来表示^[31]。也有人认为流速增加到30米/秒以上, 则气泡破灭时的平均冲击压与流速关系不大, 基本不变^[32]。

物体尺度效应

目前有关尺度效应的研究比上述流速对气蚀的影响开展得少。一般认为物体的尺度大, 气泡能充分地发展, 其尺寸也增大, 因此它破灭时释放的能量也大。有的实验表明, 气蚀量与尺度的2—5次方成比例^[33], 有的实验结果认为气蚀量与尺度的3次方成比例。

表面粗糙度和凸起的影响

实验表明, 如果把物体表面研磨得很光滑, 能推迟空泡起始和气蚀的产生。另外, 耐腐蚀材料

不容易受表面粗糙度的影响。

如果物体表面有凸起,由于表面不平,压力会上升或下降,因而容易产生空泡。所以有些试验模型规范中规定出这种凸起的允许值。

运转时间的影响

气蚀速度随时间而变化,这个过程大致可分为四个阶段^[37]: (1)潜伏期: 虽然重量不减,但表面粗糙度增加。(2)加速期: 气蚀速度增加。(3)减速期: 气蚀速度达到最大值后又减少。(4)稳定期: 气蚀速度达到一定的稳定值。如此,气蚀速度随时间而变,所以根据短时间内得到的气蚀量来估计长时间运转后的气蚀量时,需加注意。另外,表面越光滑,潜伏期越长。

掺气量的影响

掺气量大时由于空穴破裂时分离出来的气体起缓冲作用,对物体表面的冲击减轻,因而减轻气蚀。另外,液体中有很多细小的气泡,对击波的衰减很大,因而减轻气蚀^[34]。Hanmitt 引用了Mousson 所做的实验结果^[35]: 用类似于文特利管的实验装置吸入空气所做的实验中,喉部流速为80米/秒,试件为铜棒,试验4小时,这时掺气量为3%的气蚀量是掺气量为1%时的一半。

温度的影响

Plesset 研究了液体温度对气蚀速度的影响^[36]。当流体温度低时,气体含有度高,浮动的气泡多,它起着缓冲作用,减轻气蚀程度;当流体温度上升时,浮动的气泡减少,气体含有度降低,其缓冲作用也减弱。因此 Hanmitt 认为气蚀最大的温度是冰点和沸点之间^[33]。如果温度继续上升,虽然气体含有度下降,但蒸汽压上升,气泡破灭时的冲击压减弱,气蚀又减轻^[36]。

液体特性对气蚀的影响

(1) 蒸汽压 用水、苯等四种液体,改变蒸汽压,对铝制模型所做的实验结果表明,只要蒸汽压相同,气蚀量几乎一样。

(2) 表面张力 当气泡破灭时,液体表面张力越大,过渡状态的气泡运动增强,破灭压力越高。如果水中加入聚合物等附加物,表面张力减小,气蚀量有时会减少。

(3) 粘性 如果液体的粘性小,气泡破灭时的压力大,气蚀量也大^[37]。利用粘性不同的各种矿物油以及甘油和水的混合物所做的实验结果也证明了这一点。

(4) 密度和压缩性 液体密度增加、压缩性减少时气蚀严重。实验结果表明,气蚀量是以液体中音速和密度乘积的指数函数形式增加。

需要指出的是加入高分子聚合物的影响问题,目前还没有肯定的结论。

综上所述,对水力机械来说,空泡现象和气蚀问题是个非常重要的问题,但由于影响因素很多,而且它们之间的关系又是错综复杂,因此从发现空泡现象至今,虽经八十多年的研究,但许多问题还没有弄清楚,而且完全弄清这些问题也是不容易的。但是为了实现水力机械的高速化,对流速与材料问题,运转条件、流动状态与空泡形态,模型试验与现场实验等问题,还要进行深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 村井等,渡部英夫,ターボ機械, 6,10(1978).
- [2] Acosta, A. J. and Parkin, B. R., *J. Ship Research*, 19—4 (1975), 193.
- [3] van der Meulen, J. H. J., A Holographic Study of the Influence of Boundary Layer and Surface Characteristics on Incipient and Developed Cavitation on Axisymmetric Bodies, 12th Symp. on Naval Hydrodynamics, Washington (1978).
- [4] 横山重吉,多田優,流体工学, 11—7(1975), 408.
- [5] Casey, M. V., Conf. Cavitation, Edinburgh, C 148/(1974), 1.
- [6] Arakeri, V. H., *J. Fluid Mech.*, 68—4 (1975), 779.
- [7] 村井等,庵原昭夫,機械学会講演論文集, No. 760—10(1976), 139.
- [8] Blake, W. K. et al., *J. Fluid Mech.*, 80—4 (1977), 617.

- [9] Arakeri, V. H., *Trans. ASME*, I, 97—1 (1975), 82.
- [10] Arakeri, V. H. and Acosta, A. J., *J. Ship Research*, 20—1 (1976), 40.
- [11] Huang, T. T. and Peterson, F. B., *J. Ship Research*, 20—4 (1976), 215.
- [12] 沼知福三郎等, 高速力学研究所报告, 37—353(1976), 1.
- [13] 村井等, 庵原昭夫, 機械学会講演论文集, No. 750—17(1975), 101.
- [14] Gates, E. M. and Acosta, A. J., Some Effects of Several Freestream Factors on Cavitation Inception on Axisymmetric Bodies, 12th Symp. on Naval Hydrodynamics, Washington (1978).
- [15] Keller, A., *Trans. ASME*, D, 94—4 (1972), 917.
- [16] Yilmaz, E. et al., *J. Acoust. Soc. Am.*, 59—2 (1976), 329.
- [17] Murai, H. et al., Cavitation on Hydrodynamics in Turbulent Shear Flow, 12th Symp. on Naval Hydrodynamics, Washington (1978).
- [18] Voevodin, S. I., *Fluid Mech.—Soviet Research*, 6—3 (1977), 112.
- [19] Keller, A. P., *Conf. Cavitation*, Edinburgh, C 159/74 (1974), 109.
- [20] Keller, A. P. and Prasad, R., ASME Cavitation and Polyphase Flow Forum, Fort Collins (1978), 50.
- [21] Takagawa, S. et al., 日本造船学会论文集, 138 (1975), 87.
- [22] Albrecht, K. and Bjorheden, O., *Trans. ASME*, I, 97—4 (1975), 523.
- [23] Henry, P., ASME Cavitation and Polyphase Flow Forum, Fort Collins (1978), 23.
- [24] Brennen, C., *J. Fluid Mech.*, 44—1 (1970), 51.
- [25] Hoyt, J. W., *Trans. ASME*, I, 98—1 (1976), 106.
- [26] Shima, A. and Tsujino, T., *Chem. Eng. Sci.*, 31—10 (1976), 863.
- [27] 大場利三郎等, 高速力学研究所报告, 37—353/360 (1976), 133.
- [28] 藤川重雄, 赤松映明, *ターボ機械*, 7—8 (1979), 8), 478.
- [29] 大場利三郎, *ターボ機械*, 6—10(1978), 587.
- [30] Stinebring, D. R. et al., *J. Hydraulics*, 11—3 (1977), 67.
- [31] Palanichamy, K. et al., *Conf. Fluid Mech.*, 5th, 2(1975), 773.
- [32] 大場利三郎等, 日本機械学会论文集第43卷, 第376号, 1977—12, pp. 4519—4528.
- [33] Hammitt, F. G., *J. Hydraulic Research*, 13, 1 (1975), 1—17.
- [34] Kato, H. et al., 12th Symp. on Naval Hydrodynamics, Washington (1978).
- [35] Hammitt, F. G., *J. Hydraulic Research*, 10, 3 (1972).
- [36] Plesset, M. S., *Trans. ASME, J. Basic Engr.* (1972), 559—566.
- [37] 宮代裕, *ターボ機械*, 6, 10 (1978).

(上接第 49 页)

合格率为 99% 时, $n_s \leq 0.01$ 个

合格率为 90% 时, $n_s \leq 0.1$ 个

这个 n_s 是对于整个芯片暴露时间 t 来说的。再由已知的图形面积 (沉积面积) 和 t 把 n_s 换算成单位沉积密度, 最后按前面讲过的方法, 反过来求出空气含尘浓度。例如 1 毫米² 的硅片, 当要求在暴露 8 小时的情况下 (即每班 8 小时) 合格率为 90%, 则由 $n_s = 0.1$ 个求出允许的单位沉积密度为 $0.1 \times 100/8 = 1.25$ 粒/厘米²·时, 相应的空气含尘浓度约为 45 粒/升。把计算结果绘成图 6 的曲线, 就可以很快求出需要的空气含尘浓度。可见, 当集成电路上每一图形面积达到 30 平方毫米以上时, 如果成品率要达到 95% (单就灰尘因素而言), 就需要 0.3 级洁净室; 如果要求的芯片成品率为 90%, 则当更大的面积即 40~50 平方毫米时才需要 0.3 级洁净室。这一结果和目前超大规模集成电路的生产提出需要 0.3 级洁净室的情况是吻合的。

当产品暴露时间是 1 小时, 则可以取图中查得的含尘浓度的 8 倍, 就是需要的含尘浓度。

由此可见, 如果硅片上每一个芯片面积越大, 则求出的允许单位沉积密度越小, 因而允许的含尘浓度越低, 也就是需要洁净度级别越高的洁净室。而硅片大小的变化 (只要直径达到毫米量级) 则并不重要。

本文着重分析了集成电路这种产品, 对于其它产品, 如果知道关键部位的暴露面积和时间, 则也可由图 5 估计需要的洁净度级别, 减少片面追求高洁净度的盲目性

参 考 文 献

- [1] 空气净化技术措施编制组, 空气净化技术措施, 建筑工程出版社 (1979).
- [2] Ranz, W. E., Wong, I. B., *Ind. Eng. Chem.*, 44 (1952), 1371.
- [3] Стечкина, И. Б., Кирш, А. А., Фукс, Н. А., *Коллоидн. Ж.*, 31 (1969), 227.
- [4] 顾震潮等译, 气溶胶力学, 科学出版社 (1960).