

空 工 化 与 空 工 蚀

〔美国〕

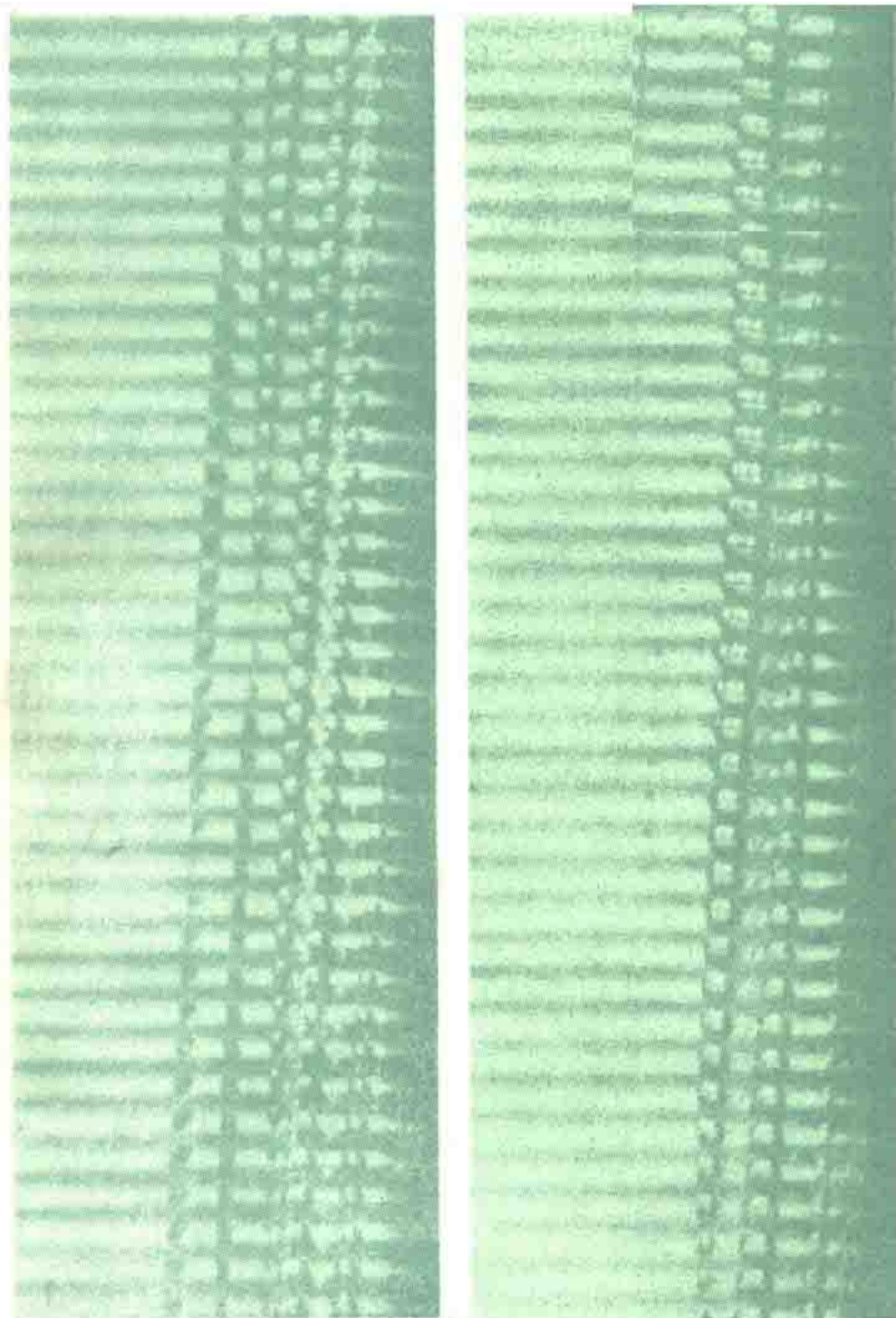
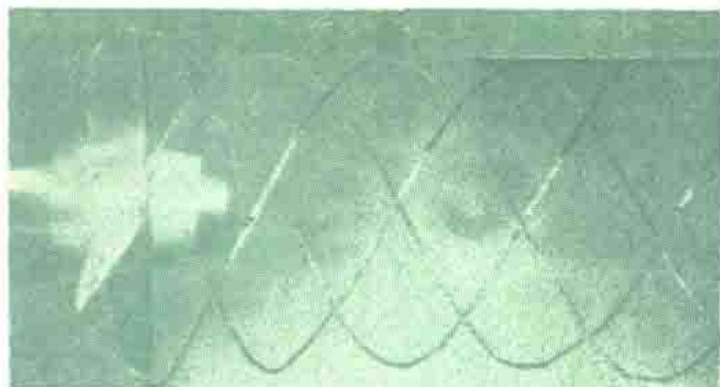
R. T. 柯乃普

J. W. 戴 利

F. G. 哈密脱

水利水电

科学研究院译



水利出版社

内 容 提 要

本书论述了水动力学空化现象的成因、发展及后果，并从空泡力学入手研究了空化现象的机理以及空化与空蚀的关系。书中应用高速摄影照片阐明了空化的瞬态微观现象，包括对游移空化、固定空化、漩涡空化及振荡空化等类空化现象的基本特性，及其对水工建筑物、水力机械、船舶螺旋桨、水下发射体与出入水等问题的各种影响。本书既有丰富的试验成果又有理论分析，并介绍了研究方法、试验设备与测试仪器，以及引伸方法和超空化现象等有关问题。可供水利水电、水力机械、造船、国防等部门的科技人员以及有关高等院校师生参考。

本书系根据美国 R.T.柯乃普 J.W.戴利和 F.G.哈密脱 所著《Cavitation》1970年英文版译出，并参考该书1974年俄译本对部分图表中的英制座标进行了换算。

本书由水利水电科学研究院译校，参加人员见各章的页下注。全书最后由金泰来、陶芳轩复校整理，覃修典和陈睿庭进行了审阅。郭可谔、陈炳新也对第一至第四章及第十二等章进行了润饰。

《CAVITATION》

R.T.KNAPP J.W.DAILY F.G.HAMMITT
MCGRAW-HILL BOOK COMPANY (1970)

空化与空蚀

[美国] R.T.柯乃普 J.W.戴利 F.G.哈密脱
水利水电科学研究院译

*

水利出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 24 $\frac{1}{4}$ 印张 550千字

1981年9月第一版 1981年9月北京第一次印刷

印数 0001—1900册 定价 3.00元

书号 15047·4134

前 言*

本书源出美国加州理工学院(CIT)已故水利工程教授柯乃普(Robert Talbot Knapp)博士的工作。1957年柯乃普教授突然逝世以前,就已在撰写空化方面的文稿,他不仅汇集了他本人毕生的经验和论文,而且也介绍了有关这一专题的大量论述。柯乃普教授着手实施这项计划的意愿,在他遗下的前言中已有阐明:

“空化是最令人讨厌的水动力学现象,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。然而,空化的基本性质却被长期笼罩在神秘之中,仅在近期才开始有所了解。半个世纪以来,发表了空化方面丰富的文献。实际上,所有内容都是些孤立的空化现象的论述。很少有全面论述这一课题的专著,而且尚无近代的英文专书。本书的宗旨就是想填补这一空白,提供一部综述空化现象的专著。”

这一段话仍然是本书的任务。

柯乃普教授是一位机械工程师,他对物理现象具有独特的洞察力,并且对富有想象力的试验工作具有特殊的才能。三十五年以来,他在加州理工学院从事教育和研究工作,对流体流动和水动力学的设备和装置特别感兴趣。他于1929至1930年作为美国机械工程师学会费礼门(Jhon R. Freeman)考察团的成员考察了欧洲一些试验室和工厂以后,把兴趣集中到这些方面。

在第二次世界大战以前的十年内,他的研究工作着重在水力机械、水工建筑物和水下运动体等领域内,这些工作涉及空化现象的各个方面及其水动力学和空蚀后果。在1941和1942年,由于水下弹道问题的重要性,柯乃普教授在加州理工学院获得资助,建造了专门适合于进行空化试验的高速水洞。第二次世界大战期间和随后的几年中,在这座水洞及其他专门设备中进行的空化研究主导了他的研究志趣、讲学内容和写作题材。他已成为国际上公认的空化和空蚀方面的学术权威。在1952年,他曾任英国伦敦机械工程师组织在空化方面的克莱登(James Clayton)讲座,并于1953至1955年期间任美国机械工程师学会在空化方面的国家级讲座。1955年,柯乃普教授所著空化方面许多论文中的一篇,获美国机械工程师学会梅尔维尔(Melville)奖章。

柯乃普教授逝世后,在他遗孀的要求下,由戴利(James W. Daily)教授负责继续完成遗稿的整编工作。作为柯乃普教授生前的学生,戴利教授曾与柯乃普教授密切交往,详细了解他的工作并志同道合。后来,由于哈密脱(F. G. Hammitt)教授在空化各方面的渊博研究,亦应邀参加了此项工作。本书就是作者们的最终成果。本书专门记载了柯乃普教授本人从事或赋予较大影响的一些领域内的空化研究成就。从某些方面来看,本书是他早年手稿材料的扩充,包括他规划并已开始进行的一些课题的成果,有关这些课题的进展,以及他曾授意而尚未开展的一些课题。后来一些年的研究工作使之有必要在这些方面作些增补。

本书包括四个范畴:

1. 水动力学空化现象的基本特性和物理力学;

* 金泰来译,陈楷庭校。

2. 空蚀破坏, 包括水动力学过程和特定材料的抗空蚀反应两个方面;
3. 空化的研究方法、试验和运行观测的设备;
4. 过流通道和水力设备以及固定与自由物体上的空化影响。

每一范畴主要是几章合在一起的总题目, 看来不再将范畴分成本书中指定的章目是有益的。所以, 基本的水动力学主要见第一、三、四、五和六章等; 空蚀破坏和材料抗空蚀性能主要见第八、九两章及第十一章的一部分; 研究方法和试验设备仪器见第二、十两章; 水力设备中的空化和固定与自由物体上的空化在第七、十一和十二章中论述。此外, 各范畴之间是有很多相互关联的。例如, 第二章介绍了空化的参数, 在以后几章的讨论中都被应用; 第五章论述超空化, 是自由物体空化问题的一个重要的方面; 第六章直接与设备和物体上的空化问题有关, 并涉及基本课题。其实, 第六章的比尺影响问题在不同章节中都已合乎逻辑地论述了。为了克服未将专题范畴进一步划分为章目的缺陷, 本书备有全书目录和大量文献索引, 以便读者查阅。

在编写这样一部通用专业书的过程中, 不久就理解到不可能包罗无遗。我们曾试图同权威人士研讨选定章目的内容, 但深知在多数情况下, 一项专题可能就是一篇独立专著的主题。本书附有广泛的文献目录, 既是本书所介绍内容的论据, 又有助于有兴趣钻研的读者进一步深入研究。虽然所引文献主要来源于美国和英国, 较少部分来自西欧, 但也适当地反映了东欧、苏联和日本的文献。

作者们对所有提供有益意见和建议的专业同行们表示感谢。特别是加州理工学院阿柯斯塔 (A. J. Acosta) 教授, 密西西比州维克思堡水道实验站的布朗 (F. R. Brown) 先生, 圣地亚哥加州州立大学埃利斯 (A. T. Ellis) 教授和宾州州立大学霍尔 (J. W. Holl) 教授等, 曾对本书原稿进行过建设性的审阅鉴定。很多人对书稿的编写工作曾给予帮助。首先要感谢柯乃普教授多年的秘书贝拉米 (Grace Newberg Bellamy) 夫人; 她除了负责复制早期手稿外, 并在收集笔记和未成手稿将其整理成合用档案的工作中, 做出了特殊的贡献。这就成为第二和第三作者继续工作的基础。在此项工作的后一阶段, 雷贝尔 (Alyse Rebel) 夫人和格雷夫斯 (Lisbeth Graves), 斯坦利 (Carolyn Stanley) 及沃尔顿 (Shirley Walton) 女士等, 进行了十分有益的工作。对她们的帮助应致以衷心的感谢。作者们对戴利和哈密脱两位夫人在整个工作中的同情和耐心表示感谢。此外, 戴利夫人自觉地负责参考文献的收集, 外文资料的翻译, 原稿文笔的润饰和其他一些另星杂事以及充当“家庭打字员”等。她仅有的报酬是这些经验已使她成为合格的专门人才。

对于所有给予鼓舞和支持的人士应一律致以最为诚挚的谢意。柯乃普夫人从原稿最早开始阶段就怂恿并鼓励其丈夫致力于撰写本书, 在其丈夫逝世后仍使这项工作坚持不懈。由于她的努力才使柯乃普教授的笔记、手稿和素材图书得以汇集并保持完整无缺地提供第二和第三作者参阅。对她长年累月的努力、鼓励和耐心致以衷心的感谢与表彰。理所当然, 应将此书献给柯乃普夫人。

J. W. 戴利
F. G. 哈密脱

目 录

前 言

第一章 空化现象、空化类型及其影响	1
1-1 基本过程	1
1-2 空化区的一般外观	2
1-3 空化的阶段和类型	3
1-4 水流中的空化——游移空化	4
1-5 水流中的空化——固定空化	4
1-6 水流中的空化——漩涡空化	6
1-7 运动物体上的空化	7
1-8 无主流的空化——振荡空化	7
1-9 空化的作用和重要性	8
1-10 水动力学影响	9
1-11 空蚀破坏	10
1-12 其他影响	10
参考文献	12
第二章 空化的研究方法	13
2-1 存在的问题	13
2-2 可控空化的产生	13
2-3 空化的探测和定位方法	21
2-4 抓住运动和放大时间	23
2-5 高速摄影——早期的一些主要进展	23
2-6 空化数	26
2-7 空化数的物理意义和应用	28
参考文献	30
第三章 液体性质和杂质对空穴初生的影响	33
3-1 蒸汽压力与抗拉强度	33
3-2 抗拉强度的测量	33
3-3 液体中“孔洞”的假定	38
3-4 液态和固态杂质的影响	38
3-5 气体和蒸汽核子及其稳定	39
3-6 稳定核子机理的验证	44
3-7 自由气核的稳定力学	49
3-8 可变压力场的核子	54
3-9 湿润性	55

3-10	表面张力	56
3-11	密度	56
3-12	液体的可压缩性	56
附录	自由能量、表面张力和湿润	57
	参考文献	59
第四章	瞬态空穴机理	63
4-1	引言	63
4-2	空穴的生命周期	64
4-3	雷利对无穷域静止状态无粘性、不可压缩液体中球形空穴的分析	65
4-4	不可压缩液体具有表面张力和可变压力场的含汽型空穴	70
4-5	粘滞性及其在分析中的出现	71
4-6	具有含气型空穴的液体压缩性	75
4-7	热力特性的影响	88
4-8	溶解气体	88
4-9	非球形空泡——边界干扰、压力梯度和空泡不稳定性	90
4-10	论空泡的回弹再生	94
4-11	溃灭时的压力强度	96
4-12	闪光	97
	参考文献	100
第五章	固定空穴、尾流及超空穴	104
I.	固定空穴机理	104
5-1	水流中的空化现象——固定空化	104
5-2	固定空穴形成的条件	105
5-3	空穴末端的扰动	107
5-4	固定空穴的周期	109
5-5	游移空穴在固定空穴机理中的作用	114
5-6	周期性与稳定部分空穴	115
II.	尾流及超空穴	115
5-7	尾流中的空化现象	115
5-8	超空穴	121
5-9	超空穴分析的模式与方法	121
5-10	对称超空穴	124
5-11	二维超空穴的水翼	133
5-12	通气超空穴的不稳定性	136
5-13	结语	138
	参考文献	139
第六章	空化引伸的某些特性	147
6-1	引言	147
6-2	空化初生的一些普遍问题	147

6-3	剪切流中的空化初生	152
6-4	光滑表面初生空化的引伸关系	161
6-5	糙率的影响	165
6-6	模拟水力设备	170
6-7	机械中空化的热力学影响	173
6-8	结语	177
	参考文献	178
第七章	空化对水流的影响	183
7-1	引言	183
7-2	空化初生和发展的影响	183
7-3	空化对表面阻力损失的影响	184
7-4	空化对形状阻力损失的影响	185
7-5	空化对流向的影响	188
7-6	无空化导流面的确定方法	190
7-7	弯道中的水流	191
7-8	水翼或导叶有空化时的绕流	195
7-9	水翼栅的空化特性	206
	参考文献	220
第八章	空化冲击材料的机理	222
8-1	空化水动力冲击与材料反应的区别	222
8-2	冲击在力学方面的重要性	222
8-3	空蚀区和空化面的关系	223
8-4	加州理工学院研究空蚀区的试验	224
8-5	用软铝料记录下的空蚀特性	225
8-6	空蚀率观测值的意义	231
8-7	控制游移空穴平均尺寸的因素	232
8-8	流速对空化强度的影响	232
8-9	流速对软铝上空蚀麻点尺寸的影响	234
8-10	空化强度定量量测的必要性	234
8-11	破坏性冲击的机理	235
8-12	“导波”作用加速空蚀率	236
8-13	腐蚀作为在空化冲击中的一项因素	241
8-14	电化学作用	242
8-15	热作用	242
8-16	影响空穴溃灭压力的其他因素	243
	参考文献	245
第九章	材料抗空蚀能力的测定	249
9-1	引言	249
9-2	材料对冲击反应的一些情况	249

9-3	关于材料特性的一些共性	250
9-4	抗空蚀参数和研究动向的综述	255
9-5	测定相对抗蚀能力的试验室方法	257
9-6	试验室方法的比较	274
9-7	若干试验方法所提供的不同材料的抗空蚀性能	275
	参考文献	302
第十章	空化特性的量测设备	308
10-1	原型观测	308
10-2	空化特性的室内试验	309
10-3	关于空化引伸的评论	310
10-4	研究水工建筑物的试验室要求	311
10-5	研究水力机械的试验室要求	312
10-6	通用水洞	318
10-7	加州理工学院高速水洞	318
10-8	水洞的工作段	322
10-9	重溶器	325
10-10	自由面水洞	328
10-11	不恒定流水洞	329
10-12	螺旋桨试验水洞	331
10-13	自由运动物体的试验室设备	332
10-14	高速摄影记录	336
10-15	关于量测空化声音的意见	339
	参考文献	341
第十一章	水力设备中的空化现象—临界区域、空蚀破坏与对工作性能的影响	344
	I. 临界空化区域	344
11-1	临界流分析	344
11-2	设备中的临界区	347
	II. 水力机械的空蚀	351
11-3	空化和空蚀	351
11-4	运行问题	354
	III. 空化对水力机械性能的影响	357
11-5	空化对机器性能影响的基本特性	357
11-6	托马系数 σ 和空化试验	357
11-7	吸入比转速	363
11-8	偏离设计工况的空化特性	366
11-9	热力学特性及其对空化的影响	366
	参考文献	368
第十二章	物体界面上的空化现象	370
12-1	界面和相对于固定物体的流动	370

12-2	界面问题	370
12-3	入水问题	372
12-4	入水动态的引伸	376
12-5	一项有关的应用	378
	参考文献	379

1
+
8

第一章 空化现象、空化类型及其影响*

1-1 基本过程

对于空化现象，难以提供一简明的定义，同时又能充分表达空化现象的清晰概念；不如用以下的简要描述来阐明空化基本过程的主要特征。

当液体在恒压下加热，或在恒温下用静力或动力方法减压，最后到达一种状态，那时蒸汽空泡或充满气体与蒸汽的空泡（或空穴）开始出现并发育。如果由于溶解气体的扩散或单纯因加温或减压而使所含气体膨胀，空泡将在缓慢的速率下发育。如果主要是汽化形成的空穴，空泡的发育就将是“爆发性”的。若由温度升高所引起，这一状态称为“沸腾”；若温度基本不变而由动压下降所引起，这一状态则称为“空化”（*Cavitation*）。由于气体扩散而使空泡发育，称为“逸气”（*degassing*），不过有时由动压下降导致含气空泡发育，也称为含气型空化（*gaseous cavitation*）[与含汽型空化（*Vaporous cavitation*）对比而言]。

本书主要论述与动压变化同时发生的一些问题，例如水动力学和声学的压力场中出现的那些问题。并且涉及升压与降压两种情况，因为，若发育中的空泡承受增压，则其发育将中止并还原。空泡将因气体的溶解和蒸汽的凝结而溃灭并可能消失。当含汽型空化的含气量极小时，将发生“内爆性”溃灭；而且当含气量较高时，溃灭的力量就将轻些。因而空化现象包括从空泡形成开始直至空穴溃灭的事态全过程。反之，在通常沸腾过程中，汽泡不断发育；汽泡发育与聚合会产生蒸汽团。这些蒸汽团缓慢地凝结，而不是猛烈地溃灭。

仔细研究，这一描述看来还包含不少有关的真相和概念，例如：

1. 空化是一种液体现象，在任何正常环境下，固体或气体都不会发生空化。

2. 空化是液体中减压的结果，因而大体上可由控制减压程度来控制空化现象，或严格说来控制最小绝对压力。如果压力降低并且保持在由液体物理性质与状态所确定的临界压力以下持续足够的时间，就将产生空化现象。否则就不发生空化。

3. 空化现象涉及液体内空穴的出现和消失。注意“空穴”（*Cavity*）一词。对“空洞”（*Hole*）与“空穴”两词含义的比较，韦伯斯特（*Webster*）词典阐明了一部分：

“‘空穴’是一个更为学术性的词汇……；专指空洞或空隙”。就多方面而论，选用空化一词来表达这一现象是合适的，因为它强调空字这一概念。从而简单推论，若空穴确是空洞无物，在物理现象中，其内部含物就不起积极作用。所以，全部观察到的空化影响应追溯到液体的性能。如前所述，并且后面还将讨论到，当研究空化的细节时，空穴作为空无一

* 金秦来译、陈椿庭校。

物的空隙并非严格确切。然而，在空化的大部分过程中，其内部含物仅起次要作用。这一说法的重要例外为空穴发展过程中的最初与最终阶段，即当空穴的尺寸极微小或较微小之时。

4. 空化是一种动力学现象，它涉及空穴的发育与溃灭。

检查以上描述中未能包括的一些内容时，还可得出一些有关的情况。例如：

1. 并未指明液体是在运动中还是在静止状态。因而这可能意味着在任一情况下，空化都能发生。

2. 并未指明空化的发生仅限于固体边界上或边界外；所以，看来空化既可发生在液体内，也可发生在固体边界上。

3. 以上描述和空穴特性的动力学有关；这意味着空穴特性的水动力学现象与空穴影响（例如空蚀破坏）之间有区别。

上述“汽化——溃灭”循环是空化的基本特性，在很多情况下这一现象完全可用小空泡的单一循环的动力学予以阐明。如下文所述，在初生后的进一步发展阶段，由水动力学原因产生的空化可能更为复杂。然而，所有上述普遍性的结论仍可适用。

上述现象阐明：沸腾、空化（含汽型）与含气型空化虽非在各方面等同，但却是互有联系的现象。另一种有关的情况是通气（*Ventilation*）所维持的大型准恒定空穴。这一重要的现象是在水动力作用造成物体后面的低压区中自然地吸进或人为地补给连续的气流时形成的。除了空穴尾端的气体由掺气作用带走而并无凝结现象以外，大型通气的空穴具有同样由汽化引起的发展阶段空穴的共性。

1-2 空化区的一般外观

虽然已发现空化现象有几种不同的类型，但肉眼观察，其外观大致相同。这些都很像图1-1所示成团模糊泡沫的空化区。该图就是安装在水洞工作段的简单回转体首部的空化斑景象（空化在现场很少见到，因为它通常发生在不透明的封闭管内；所以通常是发觉其影响而非其外观）。空化区模糊不清或看起来好像是常规照相中焦距失调，其原因在于空化基本上是一种高速现象，其细部运动的速度太快，难以用肉眼分辨，或难以用一般照相机所具有的快门速度清晰地记录下来。图1-2是类似的空化区用电子闪光灯作为照明光源而摄制的相片。有效的曝光时间约为1微秒。图1-1及图1-2的外观差别竟如此之大，以致难以分辨出是相同现象的相片。

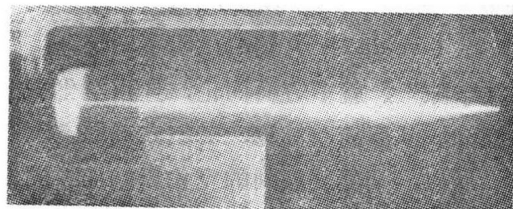


图 1-1 回转体上的空化 曝光
时间：1/25秒
流速： $V = 12$ 米/秒，空化数： $K = 0.55$
（加州理工学院照片）

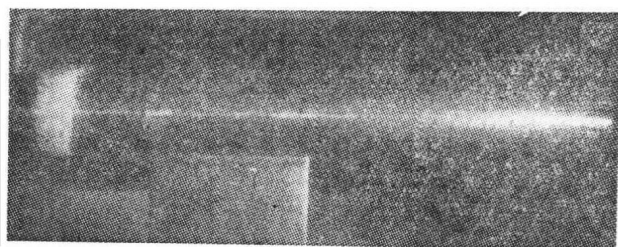


图 1-2 回转体上的空化 曝光
时间： 10^{-6} 秒
流速： $V = 12$ 米/秒，空化数： $K = 0.55$
（加州理工学院照片）

1-3 空化的阶段和类型

初生阶段一词一向用来描述刚可觉察的空化。足以辨别的初生空化的空泡是微小的，空化所出现的区域也是有限的。图 1-3 显示回转体表面一条初生阶段的空化泡。随着条件（压力、速度、温度）向促使汽化速率增长的方向变化，空化在发育；用发展一词来表示进一步阶段以区别于初生阶段。图 1-4 表示图 1-3 所示相同物体在发展阶段的空化。

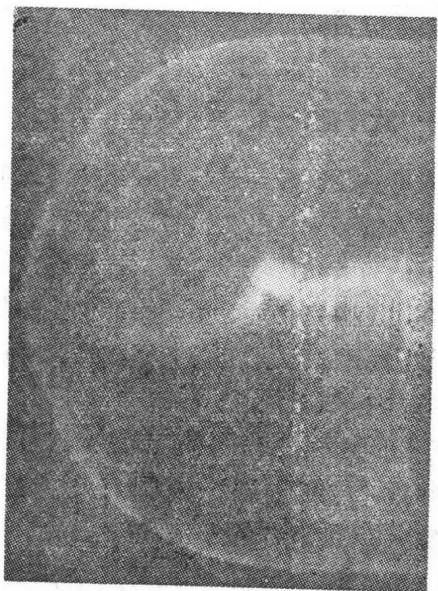


图 1-3 回转体半球形首部的空化初生阶段
靠近但不贴附物体的间断性空穴，空化数：
 $K = 0.69$ [柯敏^[5]]



图 1-4 回转体半球形首部发展阶段的空化
贴附的空穴环绕首部，空化数：
 $K = 0.62$ [柯敏^[5]]

由于后述章节中将进一步探讨的一些原因，如果一次观察到空化出现，而另一次又观察到空化消失，用来标志有、无空化之间的临界状态，则两者之间并不始终一致。“消失”（*desinent*）^[3]空化一词用来命名后一状态，“初生”（*incipient*）一词则在广义上用来说明接近临界状态时所发生的空化类型和阶段。当讨论初生空化的力学性质和试验成果时，初生空化和消失空化之间将有所区别。

空化初生和发展的真相与液体的条件有关，包括所含杂质，不论是固体还是气体杂质，而且与空化区的压力场也有关。同时，由水动力作用产生的空化现象，也假设与这些因素及固体边界的形状有关。将各种不同的空穴外观进行分类，可有多种方法。例如，有一种方法是按照空化发生的条件划分，亦即水流中的空化，运动潜体上的空化以及无主流的空化。另一种可行的方法是按照其主要物理特性分类。综合这两种方法可划分成下列几类：

1. 游移空化 (*Traveling Cavitation*)
2. 固定空化 (*Fixed Cavitation*)
3. 漩涡空化 (*Vortex Cavitation*)

4. 振荡空化 (Vibratory Cavitation)

我们还看到两种迥然不同的流态，即瞬态 (transient) 和准恒定 (quasisteady)。可在各种情况下应用于上述一种或几种类型的空化。

由于在空化研究的文献中迄今还没有公认的词汇表，所以上述名称是人为地选定的。其原因之一在于这一领域内的工作者还缺乏普遍性的经验。不同的工作者创造了不同的观测方法，并且在广泛的不同条件下进行观察。相同的基本类型被定为不同的名称。本书所用名称是作者们经验演进的结果，每一名称是用来描述某一类型空化的特点，并将在以后的定义和描述中予以阐明。

1-4 水流中的空化——游移空化

游移空化是一种由单个的瞬态空穴或空泡组成的空化现象，这些空穴或空泡在液体中形成，并随液体流动而膨胀、收缩、溃灭。这种游移的瞬态空泡可能沿着固定边界的低压点出现，或在液体内部的移动漩涡核心或紊动剪切场的高紊动区域内出现。这种空穴的“游移”是区别于其他瞬态空穴的标志。对于肉眼而言，游移空化可能呈现为准恒定的包围着的空化区。因而图1-1所示实例就具有这样的外观，而图1-2所示的闪光照相则表明这并不是连续的准恒定空穴，而类似于一些大致呈球形的单个瞬态空穴的密集。

图1-4是起源于物体表面最低压力处的游移空化的实例。如图1-5所示的高速电影记录显示一系列大致呈球形的空穴，稀疏远离或密集靠近，与空化的发展阶段有关。这些空穴随着水流的局部流速连续运动。在图1-5中，游移空穴开始出现在靠近边界表面的水流中，或者恰好在沿表面的最低压力区，或者可能在其下游。空穴经过低压区时尺寸增大，进入超过蒸汽压力的区域后不久就迅即开始溃灭。溃灭至微不可见的尺寸后常常随即发生一系列重新开始或再生溃灭的过程，这就暗示有压力脉动。

1-5 水流中的空化——固定空化

固定空化一词是指空化初生后有时发展的状态，那时水流从潜体或过流通道的固体边界脱离，形成附着在边界上的空腔或空穴。附着或固定空穴从准恒定的意义而言是稳定的。固定空穴有时呈现为具有强烈紊动的沸腾表面。在另外的情况下，液体和大空穴间的交面可能光滑到透明的程度。曾经观察到邻近大空穴表面的液体包含许多小型的游移瞬态空穴。这些游移空穴迅速发育，在大空穴的上端接近最大尺寸，并直到空穴的尾端保持基本不变，然后消失。

有时通过液体掺混并随后从空化区尾端回充等过程，固定空穴可能发育成长，然后溃灭，出现周期性循环。固定空穴的最大长度与压力场有关。这种现象可能由于主流返回迎水前缘或“分离”线下游的固体表面而终止，空穴也可能在主流汇合包围空腔之前延伸至物体之后相当距离。后一情况称为超空化 (Supercavitation)。图1-6及1-7显示固定空穴的实例，图1-7为超空穴。

如图1-7所示，如果空化发展到严重程度直至产生很长的超空穴，那就能清晰地用肉眼观察到固定空穴的基本特性。空穴周壁可宛如玻璃，清澈透明。就此而论，对于紧靠固

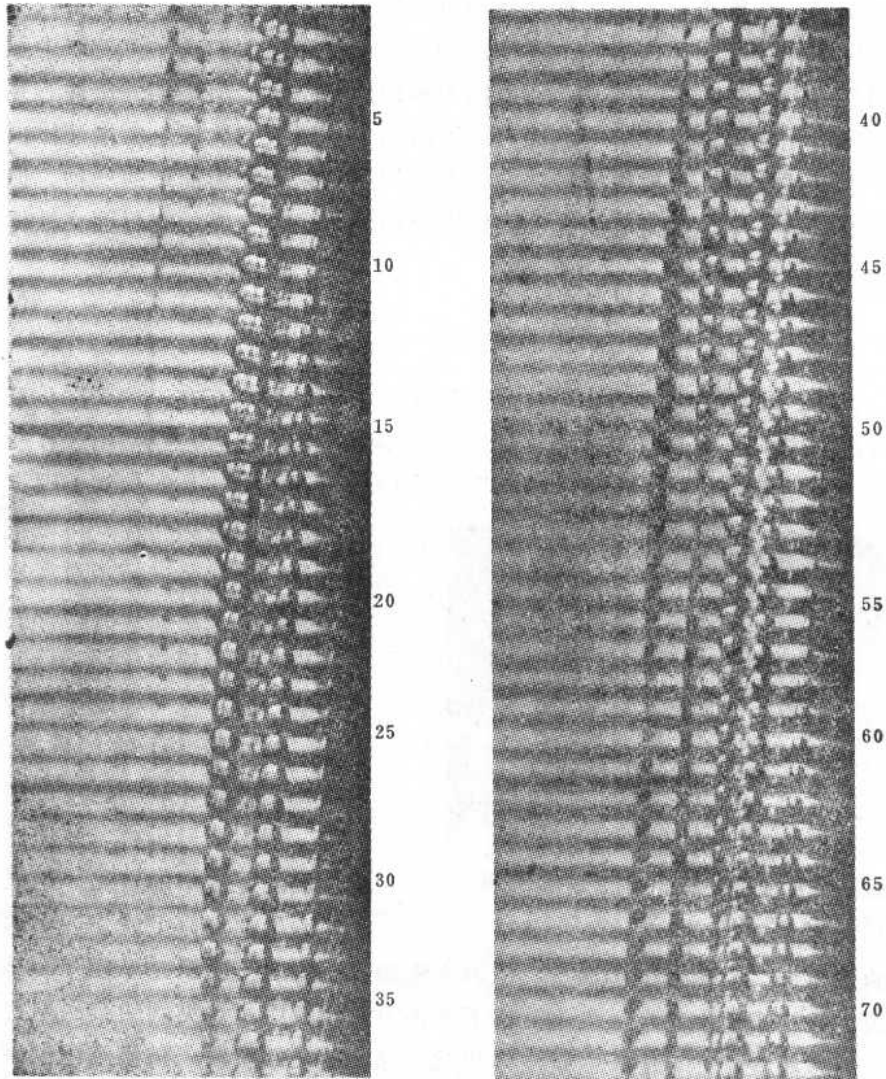


图 1-5 游移空化空泡的高速电影

水流从右至左，连续相片按次序排列，片间时段 $1/20000$ 秒(加州理工学院照片)

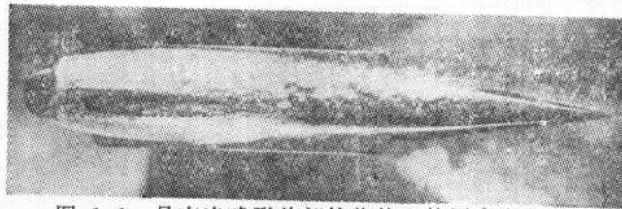


图 1-6 具有半球形首部的物体上的固定空化
(加州理工学院照片)



图 1-7 具有方形尾端的柱体上的超空化现象
(加州理工学院照片)

体边界的固定空穴，在流态不甚稳定的下游端可观测到相当大的扰动。由于空穴尾端回充水流的不稳定性和作用不明显的后果，并空穴的长度相当迅速地变动，可能产生强烈振荡力。可以用通气的办法来造成与图 1-7 所摄图象相似的超空穴，但尾端的条件有些改变。

游移的瞬态空化和固定空化有一共同点，那就是为了释放空化区上游端液体内部积累的张力而形成了一些空腔。一般说来游移空化是这两种空化中较为简单的一种。但是，显而易见，通常难以区分单纯的游移空化和固定空化内沿着分离空腔的交界面在液体中掺混的游移空穴。

1-6 水流中的空化——漩涡空化

在漩涡空化中，可发现在高剪切区形成的漩涡核心中有空穴存在。这种空化可能出现在游移空穴或固定空穴。漩涡空化是最早观察到的空化之一，因为它经常出现在船舶螺旋桨的叶梢。其实，这种空化通常属于“尖端”（*tip*）空化。图 1-8 是螺旋桨上固定型漩涡空化的高速摄影相片。可以指明：当对转动的螺旋桨进行相对观察，这一空化实例比上述任一类型都趋近于恒定流状态。尖端空化并不局限于明流螺旋桨，而且也同样发生在管流螺旋桨中，例如轴流泵的水翼端部。此外，尖端空化并非漩涡空化中仅有的一种。图 1-9 显示由球体边界层分离所造成的尾流中的空化。这里，空化并非发生在物体上或邻近物体处，而是在分离区的表面上。空化属于漩涡型，但因为流动很不稳定，漩涡并不规则而是随机性和瞬息多变的。另一个适例是在溢洪道陡槽下游消力墩绕流中可以见到的漩涡型空化。钝头物体分离区的漩涡空化亦可能是固定空穴形成过程中的初始阶段。漩涡空化也会发生在淹没射流的界面上。当足够陡峭的剪切梯度出现在某一区域内形成漩涡时，其涡心的绝对压力降低至该液体情况下的临界压力，通常约为其蒸汽压力，那时就会形成这样的空化。与游移空穴相比，漩涡空穴的寿命可能很长，因为漩涡一旦形成，即使液体流动到压力较高的区域，液体内的角动量也会延长空穴的寿命。关于漩涡空穴的溃灭速率及其有关机理，以往很少研究，但其固有的特性则显示缓慢的溃灭速率，因而具有较小的溃灭压力。

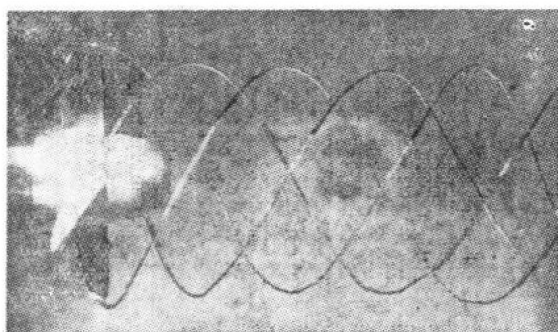


图 1-8 螺旋桨上的尖端空化（茄菲尔德·托玛斯水洞，宾州州立大学照片）

是在分离区的表面上。空化属于漩涡型，但因为流动很不稳定，漩涡并不规则而是随机性和瞬息多变的。另一个适例是在溢洪道陡槽下游消力墩绕流中可以见到的漩涡型空化。钝头物体分离区的漩涡空化亦可能是固定空穴形成过程中的初始阶段。漩涡空化也会发生在淹没射流的界面上。当足够陡峭的剪切梯度出现在某一区域内形成漩涡时，其涡心的绝对压力降低至该液体情况下的临界压力，通常约为其蒸汽压力，那时就会形成这样的空化。与游移空穴相比，漩涡空穴的寿命可能很长，因为漩涡一旦形成，即使液体流动到压力较高的区域，液体内的角动量也会延长空穴的寿命。关于漩涡空穴的溃灭速率及其有关机理，以往很少研究，但其固有的特性则显示缓慢的溃灭速率，因而具有较小的溃灭压力。

根据这一描述，显而易见，只有当空穴在物体表面或紧靠邻近的表面溃灭时，这类空

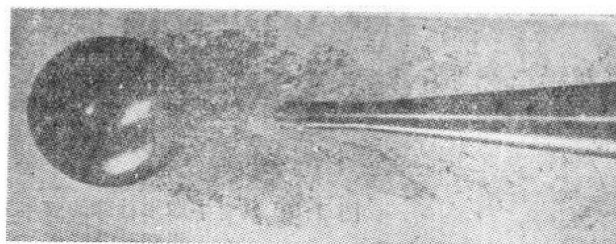


图 1-9 25.4 毫米直径的球体后面水流分离面上的漩涡空化
流速： $V = 7.16$ 米/秒，空化数： $K = 1.06$ （加州理工学院照片）

化方能引起空蚀。引用一个发生这种空蚀的重要实例是：许多现场的空蚀迹象系由于轴流式水轮机或轴流泵叶片端部的尖端——缝隙空化所引起。这些空穴肯定是属于漩涡型空穴。

1-7 运动物体上的空化

水流中的空化和在静水中运动的物体上的空化之间并无本质上的区别。在两种情况下，重要的因素都是相对速度和绝对压力。当这两个因素相似，就可出现相同形态的空化。显著的区别是静水中的紊动度较低。在水流中很多空化都发生在比较长的过流通道内，当液体到达空化区以前，紊动已充分发展。水力机械是综合上述两种情况的典型实例。在蜗壳中，水流流经固定的导叶片表面；在转轮上，则液体和叶片表面都在运动中。

1-8 无主流的空化——振荡空化

前述空化类型有一主要的共同特点。那就是某一液体单元仅通过空化区一次。振荡空化则是另一种重要的空化类型，它并不具备这一特点。虽然有时也兼有连续的流动，但其流速竟如此之低以致给定的液体的单元经受了不止一次而是多次的空化循环（其时段约为毫秒）。在振荡空化中，造成空穴生长和溃灭的作用力是由于液体中有一系列连续的高幅、高频压力脉动。这些压力脉动是由于一潜没表面沿其法向振动，从而在液体中产生压力波。除非压力变化幅度大到足以引起压力降低到或低于液体的蒸汽压力，否则无空穴形成。因为振荡的压力场是这类空化的特征，所以命名为振荡空化。

振荡空化的两个重要方面可分别进行研究：（1）产生脉动压力场的振动物体表面的特性和由此产生的波谱，以及（2）脉动压力场对液体和所生空穴的影响。

引起振荡空化的主动物体表面可能是两种表面中的任一种：（1）引起偶然振动的物体表面，例如机器运转时的副作用，或（2）专为产生液体中压力波列而设计的仪器的表面，例如传感器。产生偶然振荡空化的主动表面的典型实例是柴油机的气缸衬圈，引擎运行时可能引起衬圈按引擎转速或按其本身的自振频率而振动。这类振动将在汽缸冷却套管的水中产生一系列的的压力波。如果振幅足够大，能引起振荡空化^[8,10]。磁激振动仪试件表面上的空化就是第二种情况的显著例子^[9]。其他的例子有：产生在声纳系统中声响传感器表面上，或产生在液体中几个传感器或声波发射器的声束聚焦后造成的驻波系统峰值时的超声波空化。

振动面的形状确定其所生波列的型态，亦即平面波、扩散波或集中波。如果波列是平面波或扩散波，则其最大幅度以及最小压力将在振动体的表面上产生。如果波列是集中或聚焦的，则在液体内焦点上的幅度将为最大。水下声响传感器通常产生稍带扩散的波列。众所周知，如果传感器的功率增大到某一点，超过此点则因传感器的面上发生了空化而无法传递更大的功率到液体中去；事实上，进一步增大传感器的功率反而会降低其所能传递的功率。这说明当传感器向离开液体的方向加速时，液体就不能跟随传感器表面运动；因此空穴形成了。振动式空蚀试验仪（详见第九章）也在振动试件的面上造成空穴。在试件上的空化云外观见图1-10。

1-9 空化的作用和重要性

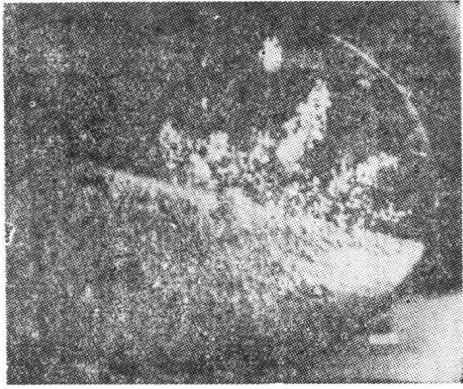


图 1-10 304型不锈钢试件(上半部抛光, 下半部轻度擦毛)上的空化云
试件直径: 1.389厘米(奥尔森和哈密脱^[9])

空化现象之所以重要就在于其作用的后果。这些作用可分为三大类: (1) 对于改变液体流动的水动力的作用; (2) 对于水流固体边界表面产生空蚀破坏的作用; (3) 其他可能伴随或不伴随着显著改变水动力学特性或固体边界空蚀的一些作用。

可惜, 在应用水动力学领域内, 除少数例外, 空化的作用总是不希望发生的。无法控制的空化会产生严重的甚至灾难性的后果。为了必需防止或控制空化, 使很多水力机械设备的设计受到严重的限制。简单的列举几种设备、

建筑物或水流系统的运行可能严重地受到空化的影响, 足以强调说明这一现象的广泛出现和相对重要性。

在水力机械领域内, 曾发现所有型式的水轮机, 从低比转速的混流式水轮机到高比转速的轴流式水轮机都易于遭受空化作用。离心式水泵和轴流式水泵亦经受空化作用, 甚至往复式水泵也可能遭受其害。虽然空化现象可能因设计不善而加剧恶化, 但即便是完善的设计, 在不利条件下运行时也可能发生空化。

在其他一些不涉及机械能的输入与输出的设备中也可能发生空化。各种型式的阀和配件在运行中, 遇到过流流速发生变化也可能受空化的影响。过流式流量计, 亦即文透里 (*venturi*) 计、孔口及管嘴, 构成这样一种水流系统, 其中一旦发生空化就能完全破坏其有效作用。在这一类流量计中, 流量由实测的水流从较大断面加速流至较小断面时所必须的压力降算出。任何改变其有效断面或能头损失的情况都会影响流量计的精确度。如果在较小断面处的高速区内发生空化, 就可能引进上述误差来源的一项或两项。在这些流量计上曾进行过一些空化作用的研究^[7,8]。

顺便提一下: 常规水洞的主要部分只不过是一座具有加长喉部以形成工作段的文透里计。因为这是最有效地获得高速低压水流而无需过多的能头损失的方法, 所以就采用了这一种造型。

在水工建筑物领域内不断遇到空化问题。溢流坝坝顶、闸门与闸门槽、消力墩、输水道的进口和弯道、隧洞以及管道等都是实例。

空化问题在船舶方面的重要性可用下列事实恰如其份地予以阐明: 空化这一名词是在研究英国驱逐舰未能达到其设计速度时初次命名的。桑尼克罗夫特 (*Thornycroft, J.*) 和巴纳比 (*Barnaby, S.W.*) 在研究中报导并假设环绕螺旋桨的空穴限制了推力^[15]。帕森斯 (*Parsons, C.A.*) 意识到这一点并进行过水洞试验^[1]。“空化”这一名称是由弗劳德 (*Froude*) 创造的^[15]。对船壳的表面和底面进行观察, 曾发现空化不仅发生在螺旋桨上, 而且也发生在舵、龙骨, 甚至船体本身。同样, 也曾发现空化现象常常会限制水下武