

流体机械 的 磨损与减摩技术

庞佑霞 朱宗铭 梁亮 张昊 著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



流体机械 的 磨损与减摩技术

庞佑霞 朱宗铭 梁亮 张昊 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

流体机械的磨蚀问题广泛存在于水利水电、能源动力、冶金化工、交通运输以及航空航天等行业,是造成流体机械失效的重要原因之一。本书从摩擦学、微流边界层理论出发,分析了沙粒在边界层的动力学特性,推导了冲蚀磨损磨痕尺寸的预估模型;在空蚀磨损研究中,以空泡动力学方程为基础,分析了空泡溃灭过程中的力学冲击,并论述了在空泡溃灭冲击下疲劳微裂纹产生和扩展过程;在冲蚀与空蚀交互磨损研究中,分析了空泡和沙粒的相互作用以及动力学特性,根据磨损试验数据对交互磨损过程进行了解析计算,得到了交互磨损的预估模型;在流体机械磨蚀的抗磨与减摩对策研究中,详述了一种微/纳米抗磨复合涂层以及一种石墨自润滑减摩材料。全书共6章,包括绪论、流体机械的磨损试验装置、冲蚀磨损、空蚀磨损、冲蚀与空蚀交互磨损、流体机械减摩抗磨技术。

本书可为机械、水利、材料等专业的科研及工程技术人员提供流体机械抗磨设计和工程修复方面的理论和实践的参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体机械的磨损与减摩技术 / 庞佑霞著. —北京:
机械工业出版社, 2016.6
ISBN 978-7-111-54093-9

I. ①流… II. ①庞… III. ①液体机械—磨损—研究
②液体机械—减摩—研究 IV. ①TH117

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 140652 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 梁福军 责任编辑: 梁福军 加工编辑: 岑伟

版式设计: 杨林 封面设计: 傅瑞学

北京科信印刷有限公司印刷

2016 年 7 月第 1 版 · 第 1 次印刷

175mm×245mm·12.75 印张·250 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-54093-9

定价: 60.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

流体机械的磨蚀问题广泛存在于水利水电、能源动力、冶金化工、交通运输以及航空航天等行业，是造成流体机械失效的重要原因之一。研究流体机械的磨蚀以及抗磨与减摩对策，对流体机械的优化设计、抗磨修复，提高其运行效率，改善其综合性能，延长使用寿命等有着重要的理论意义。

流体机械的磨蚀是一个多学科交叉课题，涉及机械学、流体动力学、摩擦学、材料学、腐蚀与防护等理论。流体机械的磨蚀受到一系列因素的影响，过程非常复杂。从流体机械发展之初，其磨蚀机理就一直是学者研究的热点。冲蚀磨损研究从流体机械出现就已经开始，历史最为悠久。冲蚀磨损，一般是指流体或沙粒以一定的速度和角度冲击叶片表面，造成叶片表面材料损耗的一种磨损形式。空蚀磨损现象是 20 世纪初才开始被人们所了解，对其的研究在 20 世纪 30 年代得到飞速发展。空蚀磨损是当液体流过物体表面时，由液体内部压力的起伏引起液体蒸气以及溶于液体中的气体空穴（空泡）的形成、生长及溃灭的空化过程，而使材料表面发生破坏的一种磨损形式。在实际工况中，一般是冲蚀与空蚀磨损并存，其产生的危害比单一冲蚀或空蚀磨损更大。冲蚀和空蚀的联合损伤将更易导致流体机械金属表面发生破坏，产生振动和噪声，造成设备效率降低，频繁大修，甚至短期报废。

近年来，各国学者对流体机械的摩擦学与抗磨理论和技术的发展非常重视，研究热点主要集中在流体机械过流部件内部流场分析、转轮（或叶轮）材料的冲蚀或者空蚀磨损机理、防磨措施、磨损修复的理论与实践等领域。冲蚀研究主要集中在固体颗粒的运动轨迹和数值模拟、不同材料和叶片表面对冲蚀磨损性能影响等方面；空蚀磨损主要集中在磨粒和孔洞的关系研究、磨损坑的大小测量、磨损表现出的形状特征以及特定材料对空蚀性能的影响等方面。

所以，目前对流体机械的磨损研究都是只分别考虑冲蚀与空蚀磨损对设备失效的影响，孤立地分析磨粒或者空泡的运动，以求得过流部件的磨损规律；很少有将固-液-气多相流边界层的流动特性和冲蚀与空蚀交互作用磨损机理相结合的研究成果，无法真正揭示流体机械叶片微流边界层中的磨损机理。冲蚀与空蚀交互磨损是近年来的研究热点。工程中，由于冲蚀和空蚀交互作用对水轮机磨损的影响因素众多，加之试验和数值模拟条件的限制，所以到目前为止，研究人员对其冲蚀与空蚀交互作用的磨损机理研究不多，也没有取得突破性的进展。

结合现有条件，在前期研究基础上，对流体机械过流部件冲蚀与空蚀交互作

用的磨损机理开拓新的研究思路,寻找新的研究方法就显得非常重要。由于影响冲蚀、空蚀磨损及两者交互作用的因素既有速度、压力、温度等流场参数,又有沙粒和材料特性等,流体机械转轮(叶轮)冲蚀磨损或者空蚀磨损以及它们的交互作用引起的磨损常发生在叶片表面,所以只有在考虑冲蚀与空蚀交互作用的基础上,研究磨粒和空泡的流动规律以及它们的相互干扰及破坏机理,建立其数理模型,才能深入地揭示叶片微流边界层中的磨损机理,为进一步开展流体机械抗磨设计提供一定的理论依据。

本书是作者总结多年的研究成果编写而成。基于已有和自行研制的冲蚀、空蚀仪器设备,转盘式冲蚀与空蚀交互磨损试验装置、冲击式冲蚀与腐蚀磨损试验系统,从通过数值分析和试验验证研究了冲蚀磨损、空蚀磨损以及冲蚀与空蚀交互磨损对流体机械磨蚀的作用机理;分析了流场动力学参数以及物理学参数对冲蚀、空蚀以及交互磨损的影响;最后在研究的基础上提出了流体机械的抗磨与减摩措施。在冲蚀磨损研究过程中,从微流边界层理论出发,阐述了涡的猝发过程,分析了沙粒在边界层的动力学特性,并推导了冲蚀磨损磨痕尺寸预估模型。在空蚀磨损研究中,以空泡动力学方程为基础,分析了空泡溃灭过程中的力学冲击,并论述了在空泡溃灭冲击下疲劳微裂纹产生和扩展过程。在冲蚀与空蚀交互磨损研究中,分析了空泡和沙粒的相互作用以及动力学特性,根据磨损试验数据对交互磨损过程进行了解析计算,并得到了交互磨损的预估模型。在流体机械磨蚀的抗磨与减摩对策研究中,详述了一种微/纳米抗磨复合涂层以及一种石墨自润滑减摩材料。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目:“叶片微流边界层冲蚀与空蚀交互磨损机理研究”(编号:5097532)、“两相流场中舰船冲蚀和腐蚀耦合效应的摩擦学行为研究”(编号:51475049)和“多相流作用下铜合金表层组织演变及腐蚀磨损耦合行为研究”(编号:51171216)支持。在项目的科研过程中,长沙学院唐勇教授、许焰教授、刘辉教授近十年来与作者通力合作为流体机械磨损理论的研究做了很多的工作,并得到了重庆理工大学黄伟九教授、湘潭大学谭援强教授、湖南科技大学郭源君教授的帮助与指导,同时引用了一些国内外学者的研究成果,特此向支持和关心作者研究工作的所有单位及个人表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,尽管在本书的撰写以及编排过程中竭尽了全力,但还是不能修正所有错误,书中有不妥之处,恳请读者不吝批评和指正。

庞佑霞 朱宗铭 梁亮 张昊

2016年5月 于长沙

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流体机械简介	1
1.2 流体机械的磨损形式	2
1.2.1 流体机械冲蚀磨损	3
1.2.2 流体机械空蚀磨损	3
1.2.3 流体机械空蚀与冲蚀交互作用磨损	4
1.3 流体机械磨损研究现状	5
1.3.1 冲蚀磨损研究简介	5
1.3.2 空蚀磨损研究简介	7
1.3.3 空蚀与冲蚀交互磨损研究简介	10
参考文献	11
第 2 章 流体机械的磨损试验装置	15
2.1 流体机械磨损的常用试验设备	15
2.1.1 旋转喷射式冲蚀试验仪	15
2.1.2 磁致伸缩仪	15
2.1.3 转动空蚀仪	17
2.1.4 水洞试验装置	17
2.1.5 现场磨损试验装置	18
2.2 转盘式磨损试验装置	19
2.2.1 转盘式磨损试验装置的结构	19
2.2.2 转盘式磨损试验装置参数的设计	21
2.2.3 流体机械磨蚀试验方案	23
2.3 喷射式冲蚀与腐蚀试验装置	25
2.3.1 喷射式冲蚀与腐蚀试验装置的结构	25
2.3.2 喷射式冲蚀与腐蚀试验装置的电化学测试系统	26
2.3.3 喷射式冲蚀与腐蚀试验装置的数据采集及处理系统	27
2.4 试验数据采集及处理系统	27
2.4.1 材料磨损量测量	28

2.4.2	三维磨损形貌观察	28
2.4.3	微观形貌观察	29
2.5	磨蚀程度的表征方法	29
参考文献		31
第3章 冲蚀磨损		32
3.1	冲蚀磨损基础理论	32
3.1.1	沙粒的动力学模型	32
3.1.2	沙粒的运动方程	34
3.1.3	冲蚀磨损微切削理论	35
3.1.4	变形磨损理论	36
3.1.5	磨损预估计模型	36
3.2	冲蚀磨损数值分析	36
3.2.1	数值计算几何模型及网格	37
3.2.2	控制方程	38
3.2.3	数值计算方法和边界条件	39
3.2.4	数值计算结果分析	39
3.3	冲蚀磨损的试验研究	41
3.3.1	试验方案与试件规格	41
3.3.2	试验过程	42
3.3.3	试验结果	43
3.4	冲蚀磨损的主要影响因素	44
3.4.1	材料性质	44
3.4.2	含沙量 C_p	45
3.4.3	冲蚀速度 v	49
3.4.4	冲蚀角 α	52
3.4.5	环境温度的影响	54
3.5	冲蚀磨损机理研究	56
3.5.1	冲蚀磨损微观形貌观察	56
3.5.2	冲蚀磨痕的形成	58
3.5.3	磨痕尺寸的估算	62
参考文献		63
第4章 空蚀磨损		64
4.1	空蚀研究理论基础	64
4.1.1	空泡静力平衡核子理论	64
4.1.2	空泡动力学方程	66

4.1.3	空化数	67
4.1.4	空蚀磨损理论	67
4.1.5	材料的抗空蚀指标	69
4.2	空蚀磨损的数值分析	71
4.2.1	计算模型和网格划分	71
4.2.2	数值分析控制方程	72
4.2.3	数值计算方法和边界条件	72
4.2.4	数值计算内容及结果分析	73
4.3	空蚀磨损的试验研究	74
4.3.1	试验设计与试件规格	74
4.3.2	空蚀磨损试验过程	75
4.3.3	空蚀磨损试验结果	76
4.3.4	空蚀磨损试验结果正交分析	77
4.4	影响空蚀磨损的主要因素	80
4.4.1	材质影响	80
4.4.2	时间的影响	82
4.4.3	转速影响	82
4.4.4	压力影响	88
4.4.5	空化孔参数影响	94
4.4.6	温度影响	98
4.5	流体机械空蚀磨损机理	98
4.5.1	空蚀的表面形貌分析	99
4.5.2	空泡溃灭冲击	101
4.5.3	材料表面受力分析	101
4.5.4	裂缝的萌生、扩展及材料的剥落	102
参考文献		104
第 5 章 冲蚀与空蚀交互磨损		105
5.1	交互磨损理论研究基础	105
5.1.1	空泡和沙粒的相互作用	105
5.1.2	空泡、沙粒的运动分析	108
5.2	交互磨损的数值分析	111
5.2.1	数值分析的控制方程	111
5.2.2	数值分析几何模型与网格划分	114
5.2.3	数值分析参数设置	115
5.2.4	数值分析结果	119

5.3 交互磨损试验	122
5.3.1 试验设计与试件规格	122
5.3.2 交互磨损试验设计	122
5.3.3 交互磨损试验结果	125
5.4 交互磨损的主要影响因素分析	129
5.4.1 材料的影响	129
5.4.2 时间的影响	132
5.4.3 沙粒浓度的影响	133
5.4.4 流场压力的影响	135
5.4.5 冲蚀角的影响	144
5.4.6 冲蚀速度的影响	152
5.4.7 空化孔参数的影响	158
5.5 交互磨损机理分析	161
5.5.1 磨损现象及磨损形貌	161
5.5.2 交互磨损预估模型	162
参考文献	163
第6章 流体机械减摩抗磨技术	165
6.1 流体机械磨蚀现有的修复技术	165
6.1.1 耐磨材料的应用	165
6.1.2 表面保护技术的应用	166
6.2 微/纳米抗磨涂层研制	167
6.2.1 涂层概述	167
6.2.2 涂层的制备	168
6.2.3 涂层耐冲蚀磨损性能	170
6.2.4 涂层耐空蚀磨损性能	174
6.3 自润滑减摩复合材料研制	178
6.3.1 自润滑复合材料概述	178
6.3.2 聚对羟基苯甲酸酯-聚四氟乙烯-石墨（简称 Ekonol-PTFE-石墨） 自润滑复合材料	181
6.3.3 Ekonol-PTFE-石墨自润滑复合材料的制备	182
6.3.4 Ekonol-PTFE-石墨自润滑复合材料的物化性能	184
6.3.5 Ekonol-PTFE-石墨自润滑复合材料的耐磨蚀性能	186
参考文献	195

第 1 章 绪论

1.1 流体机械简介

流体机械是使流体内能与机械能之间转换，或在机械内部流体之间实现能量转换的一种机械，包括水轮机、泵和马达等。由于流体机械的用途不同，其工作原理、结构以及工作介质的温度、流量和压力的差别很大。从工作原理上，流体机械可分为容积式和动力式，其中，容积式是通过运动元件处于不同位置时，工作容积发生变化来实现能量转化的；而动力式是由旋转的叶片使流体之间的作用力发生变化来转换能量的。以水轮机为例，可以从其结构和工作原理来说明。

(1) 水轮机的结构

水轮机可分为反击式和冲击式两大类。反击式水轮机由蜗壳、导水机构、转轮、尾水管等组成。根据转轮区域液流方向，可分为混流式、轴流式、斜流式和贯流式；冲击式水轮机由喷嘴、转轮、机壳等组成，根据射流冲击水斗的方式，可分为水斗式、斜击式和双击式。目前反击式水轮机最为普遍，图 1-1 是一种常见反击式水轮机的结构示意图。

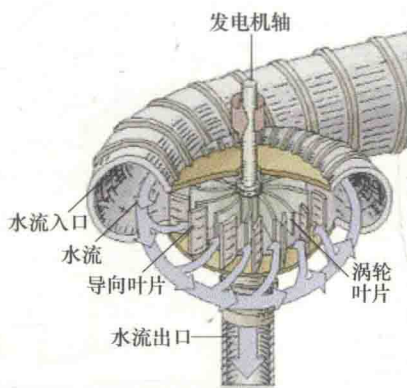


图 1-1 反击式水轮机结构图

(2) 水轮机的工作原理

如图 1-1 所示，当水流经过转轮叶片时，由于叶片的存在使水流的压力、流速的大小和方向发生改变，而流体的反作用力则是推动转轮叶片，从而使转轮的轴获得扭矩。换言之，冲击式水轮机是利用水流的动能，通过喷嘴把高压水流冲

向转轮叶片，使转轮旋转的机械设备。

1.2 流体机械的磨损形式

我国主要河流代表水文站总输沙量为 2.67 亿 t，黄河和长江代表站的输沙量均占代表站总输沙量的 42%；黄河和塔里木河代表站平均含沙量较大，分别为 5.42 kg/m^3 和 1.32 kg/m^3 ，其他河流均小于 0.4 kg/m^3 ^[1]。我国主要河流的含沙量如表 1-1 所示。

表 1-1 我国河流代表水文站实测水沙特征值

特征	黄河 (龙门)	长江 (宜昌)	淮河 (鲁台子)	海河 (漕河)	珠江 (柳州)	钱塘江 (兰溪)	塔里 木河
年输沙量 (万 t)	5 680	3 510	111	0.28	873	115	280
年平均含量/ (kg/m^3)	5.42	0.092	0.085	0.025	0.259	0.088	1.32

流体机械的磨损形式与其工作的环境密切相关。我国河流多泥沙，尤其是汛期更甚，在浑水中工作的机械设备不可避免地存在着严重的泥沙冲蚀与空蚀磨损。这导致流体机械过流部件破坏加剧，机组效率下降、使用率和可靠性降低，危及安全运行或是引起频繁检修，从而造成了重大的经济损失。

三门峡水电站运行初年，多年平均输沙量达到 16 亿 t，平均含沙量为 37.6 kg/m^3 ^[2]。水轮机长期饱受高含沙水流磨损，过流部件遭受严重破坏，机组效率降低 10% 以上，叶片磨蚀接近报废。刘家峡电厂水轮机过流部件长期承受泥沙磨蚀所带来的严重磨损，尤其从 1978 年汛期后，坝前 1.5 km 死库容被泥沙填满，大量泥沙推移到坝前，过机泥沙大增，磨蚀严重^[3]。龙羊峡水电站自发电以来，一直受到空蚀破坏的困扰，检修中发现水轮机的转轮叶片出水边以及流道出口都有不同程度的磨蚀区，其中出口磨蚀区的范围达到了 $250\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ，深度进 10 mm ^[4]。小浪底水电站位于黄河中游最后一段峡谷出口，黄河中游流经黄土高原后，河水携带了大量的泥沙，水力磨蚀是造成水轮机设备失效的最主要因素之一^[5]。

流体机械磨蚀不是孤立的泥沙冲蚀或是空蚀磨损，而是二者的联合作用的结果。目前的研究还缺乏对沙水气三相流场的科学认识，往往单独的从冲蚀或空蚀角度分析磨蚀破坏机理，认为磨蚀破坏结果偏重哪方面便认为是这类磨损。而实际中冲蚀与空蚀的联合作用往往比单独的冲蚀或空蚀更加严重，两种磨损相互耦合，相互促进，加速了流体机械工况条件的恶化。所以，运用科学技术来避免或减弱流体机械过流部件磨蚀问题，对减少检修费用以及停机带来的损失，提高设备运行效率，具有重大的经济意义和社会意义。

1.2.1 流体机械冲蚀磨损

冲蚀磨损（erosion wear）是指材料受到小而松散的流动粒子冲击时表面出现破坏的一类磨损现象。根据流动介质的不同，可将冲蚀磨损分为两大类：气流喷砂型冲蚀及液流或水滴型冲蚀。流动介质中携带的第二相可以是固体粒子、液滴或气泡，它们有的直接冲击材料表面，有的则在表面上泯灭从而对材料表面施加机械力。如果按流动介质及第二相排列组合，则可把冲蚀分为如下四种类型。

表 1-2 冲蚀按介质分类

冲蚀类型	主要介质	第二相	实例
喷砂型喷嘴冲蚀	气体	固体粒子	输运管道
水滴冲蚀	气体	液滴	飞行器、导弹
泥浆喷嘴冲蚀	液体	固体粒子	泥浆泵杂质泵
气蚀喷嘴冲蚀	液体	空泡	螺旋桨、水轮机

流体机械中的冲蚀磨损是指水流中的固体颗粒对材料表面的冲刷磨损现象。冲蚀磨损广泛存在于各种流体机械中，是现代工业生产中常见的一种磨损形式，是造成机器设备及其零部件损坏报废的重要原因之一。图 1-2 是材料表面的冲蚀磨损磨痕，从图可以看出，冲蚀磨损在材料的表面沿着水流方向形成了明显的冲蚀痕迹，这种破坏在有缺陷的材料表面更加明显。



图 1-2 水轮机叶片冲蚀磨损

1.2.2 流体机械空蚀磨损

空蚀磨损是空化引起的结果。当液体内部局部压力降低时，液体内部或液固交

界面上空穴的形成、发展和溃灭的过程就是空化。

空蚀磨损主要是指湍流中压力梯度的变化造成气泡破裂,冲击金属表面、产生大的局部应力,破坏材料表面结构的现象。在慢速流体机械中这种现象并非严重问题,但在高速旋转类机械中这种现象会导致机械磨损破坏,产生振动、噪声,从而大幅度降低了机械的工作效率。图 1-3 为水轮机叶片的空蚀磨损,图中可以看出,水轮机的叶片遭到了严重的破坏,在叶片沿水流方向的边缘破坏最严重,有的叶片甚至已经被蚀穿。



图 1-3 水轮机叶片的空蚀磨损

影响空蚀磨损的原因很多,就材料本身而言,材料的种类、金相结构、材料的热处理以及表面处理工艺等在抗空蚀性能上都大不相同。对于金属材料,表面硬度较高时,抗空蚀能力强;结晶粒度愈细,抗空蚀性能愈好。表面有致密而坚固的表面膜层时,可大大延缓空蚀破坏的发展过程。材料表面上任何凹痕、凸起、划痕或者锋利的锐角等都可以促进空蚀的加剧,即使涂上保护层,材料对抵抗空蚀现象也不会改善。流体机械的工作环境也对空蚀作用有重大影响,包括工作压力、水流流速、环境温度以及流体杂质等。

1.2.3 流体机械空蚀与冲蚀交互磨损

空蚀与冲蚀交互磨损是冲蚀磨损与空蚀磨损的复合作用,它比空蚀和冲蚀单一作用更加复杂,对机械的损害更大。在流体机械中空蚀与冲蚀交互作用普遍存在,但将他们一起共同研究的人还不是很多。现在业界对其具体的作用机理还没有定论,对于这方面的研究在国内外都处于上升期。图 1-4 是湖南省郴州市芙蓉水电站水轮机转轮叶片冲蚀与空蚀交互磨损情况,由于冲蚀和空蚀的联合作用在叶片末端沿水流流向形成了清晰磨痕,沿着叶片的方向磨痕由浅到深,最终将叶片磨穿,磨损主要发生在叶片的外缘处。



图 1-4 交互作用对水轮机的破坏

1.3 流体机械磨损研究现状

流体机械从发展之初,其磨损一直是人们研究的热点。根据上面的磨损分类,分别介绍冲蚀磨损、空蚀磨损以及冲蚀与空蚀交互磨损的研究现状。其中冲蚀磨损机理研究从流体机械出现就已经开始,历史最为悠久;空蚀磨损现象是 20 世纪初才开始被人们所了解,在二战期间得到飞速发展;空蚀与冲蚀交互磨损是近年来的研究热点,对于它的作用机理还没有具体的理论和模型可以给出合理解释。

1.3.1 冲蚀磨损研究简介

冲蚀磨损研究的发展,经历了最初的试验与理论分析、计算机数值模拟以及抗冲蚀材料的研究等阶段,已经取得了很多的研究成果。

(1) 冲蚀磨损理论方面研究

最早的冲蚀磨损计算模型是由 FINNIE^[6]于 1958 年提出:他认为塑性材料的冲蚀磨损是固体粒子扫掠过材料表面,对材料形成切削作用而导致材料的迁移的结果,即冲蚀磨损的微切削理论。但是当时他没有将冲蚀磨蚀过程中颗粒对材料表面的冲击以及材料表面的弹性考虑进来。BITTER^[7]在 FINNIE 的研究基础上,将沙粒的冲蚀磨损分为两类:切削磨损和变形磨损。当沙粒以较小的冲角冲击材料表面时,沙粒切向划过材料表面,这过程主要是切削磨损。当材料表面受到沙粒较大的冲蚀角冲击时,将会引起材料的疲劳破坏,在大量的沙粒撞击下,材料的结构将会受到破坏,形成变形磨损。LEVY 等^[8]发现沙粒对材料表面的冲蚀磨损是靶材表面材料不断受到挤压产生高度变形的唇片。在唇下面形成的加工硬化区又起促进了表面唇片的形成。在沙粒不断的冲击下材料表面形成的唇片将会剥落下来。这个理论较好地解释了显微切削模型难以解释的现象,是当前塑性材料冲击磨损中比较有新意的理论。

(2) 计算机数值模拟

到了 20 世纪 90 年代之后,计算机已经普遍用到冲蚀磨损的数值模拟研究中。QIAN 和 ARAKAWA 等^[9]开发了三维数值计算程序用来模拟通过水轮机水流的流态。在回流现象中考虑流体黏性,并利用雷诺应力模型来计算靠近水泵进出口处的涡流强度。CHEN 等^[10]通过有限元建模分析,数值模拟了复合材料在颗粒冲蚀磨损下的磨蚀特性。ASCHEBRENNER 等^[11]提出了欧拉法结合纳维尔-斯托克斯方法,数值模拟混流式水轮机的内部流态。BOZZINI 等^[12]建立了冲蚀-腐蚀磨损的数值仿真模型,研究了多个参数对冲蚀磨损模型和腐蚀磨损模型的影响。

易卫国等^[13]运用 Fluent 里面的 DPM 模型分析了沙粒粒径以及沙粒速度对冲蚀磨损的影响。吴波等^[14]应用雷诺涡粘模型结合离散相流动模型和压力耦合流场计算法,对渣浆泵全流道内固液两相湍流场的固相颗粒的冲蚀行为进行数值模拟。研究了泵转速、固相粒径和叶片参数对泵冲蚀磨损的影响。谢文伟等^[15]总结了几种经典的冲蚀磨损理论模型,分析了各个模型的优缺点,并且认为影响冲蚀磨损模拟的准确性的关键技术包括材料本构模型、失效准则、数值计算算法,接触计算算法等。张燕梁等^[16]利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,对光滑试件和凸包形、凹槽形表面形态的 45 钢试件的耐冲蚀性能,进行了三维数值模拟,计算冲蚀磨损过程中等效应力的变化情况。石晓飞^[17]数值模拟了风沙流的冲蚀磨损,发现稳态风沙流造成的冲蚀磨损发生在近地表处,一般发生于 0.2 m 以下高度。风速和沙粒特性对风沙流的冲蚀磨损有重大影响。

(3) 冲蚀磨损试验

冲蚀磨损过程复杂,工况条件、试验材料对磨损结果有重大影响。到目前为止还没有完善的模型来解释所有的冲蚀磨损现象。众多学者也一直致力于这方面的试验研究与分析。

庞佑霞等^[18-21]对稳流场中的冲蚀磨损过程进行了理论分析,研究了冲蚀磨损磨痕形成过程并估算了磨痕的尺寸。并且发现涡的猝发过程对冲蚀磨损有重大影响。在研究过程中还得出了冲蚀速度、沙粒浓度以及沙粒粒径这三个因素对冲蚀磨损的具体影响规律。

刘柄等^[22]采用旋转冲蚀磨损试验对比研究了冲蚀角度对共晶成分铝锰合金和 Al_2O_3 颗粒增强铝锰基复合材料抗冲蚀磨损性能的影响规律。廉晓庆等^[23]研究了耐火材料常温耐压强度和抗折强度与冲蚀磨损率的关系,利用线性回归得到了耐火材料强度与冲蚀磨损率的数值关系。张继信等^[24]分析冲蚀磨损机制以及冲蚀角度和冲蚀速度对 30CrMo 合金钢冲蚀性能的影响。姜心等^[25]研究了不同冲蚀角度下 40CrNi2Mo 合金钢材料的冲蚀磨损机制。李庆堂等^[26]比较分析了温度、冲蚀角度和试样表面氧化膜等因素对 304 和 316s 耐热钢冲蚀磨损率的影响规律。方辰等^[27]304 不锈钢为试材研究了温度对冲蚀磨损的影响,发现 800℃ 条件下冲蚀磨

损量最大。杨可等^[28]分析了氮合金化堆焊硬面合金的冲蚀磨损机理,发现其磨损机制主要为微切削磨损。此外,许多学者对液固两相流中众因素对材料冲蚀磨损的性能影响方面也做了深入研究^[29-30]。

(4) 抗冲蚀涂层的发展

研究中发现在冲蚀磨损下过流部件的失效并非整体断裂,而是磨损造成接触表面或表层损坏。随着高分子材料以及材料表面处理技术的发展,越来越多的研究者趋向于研究抗冲蚀磨损材料的表面处理。表面处理的意义在于提高表面硬度、改变摩擦学特性、降低黏着倾向,提高抗蚀抗氧化能力,形成表层残余压应力等。

郭源君^[31-32]对水轮机弹性涂层的抗冲蚀性能进行了深入研究;得到了流体中粒子运动微分方程;分析了弹性涂层的波动应力、固化内应力、湿热特性与湿热应力以及涂层表面与粒子冲击接触过程的动应力;并阐述了水机涡轮流道弹性涂层的结构设计及制备工艺。张俊等^[33]对电弧喷涂 Ni-Ti 涂层冲蚀磨损性能进行了研究,发现涂层的相结构、显微组织、层间结合力、NiTi (B2) 相具有的超弹性以及环境温度对涂层耐冲蚀磨损性能有重要作用,而显微硬度与涂层的冲蚀磨损性能无明显的联系。富伟等^[34]研究了陶瓷涂层的冲蚀磨损性能。他们认为随着冲蚀次数的增加以及冲蚀角度的增大涂层的累积质量损失呈现线性增加趋势。代廷海等^[35]研究发现三氧化二铝颗粒增强铝锰基复合材料较铝锰合金具有较好的抗冲蚀磨损性能。

此外,冲蚀磨损的研究开始运用到仿生方面。吉林大学韩志武教授研究小组^[36]深入研究了黄肥尾沙漠蝎子的抗沙漠冲蚀特性。从沙漠蝎子利用体表背板抵御沙漠风沙侵蚀获得灵感,提出了抗冲蚀功能表面多元仿生综合设计原理,这些发现有助于采用仿生功能表面解决直升机旋翼、火箭发动机喷嘴、涡轮叶片、管道和其他机械零件表面损伤的难题,还给材料科学领域带来了许多新的发展机会。同时他们研究发现红柳体表的特殊形态能有效降低风沙冲蚀对机体的损伤,提高抗冲蚀性能,并将研究成果运用到了离心风机的优化设计中^[37]。

多年来,国内外研究人员对冲蚀磨损进行了一些初步的研究,分析了冲蚀磨损的机理,在某些研究方面取得了较大突破,例如:冲蚀磨损机理及影响因素的研究、冲蚀磨损的数值模拟以及抗冲蚀材料的表面处理等。冲蚀磨损是一个物理、机械、化学和电化学作用的综合过程,实际工况错综复杂,这给研究带来了极大的困难。到目前为止,不论是试验还是数值模拟大都简化了实际工况条件,还没有一个完整的理论来解释所有的冲蚀磨损问题。

1.3.2 空蚀磨损研究简介

早在 1754 年欧拉就首先从理论上预言,流体可能发生空蚀。1839 年 BESANT 及 1873 年 REYNOLDS 开始在实验室对空化进行研究。1917 年 RAYLEIGH^[38]比

较系统地提出了空化理论,建立了描述自由空泡运动的方程.在此基础上,PLSEET等^[39-40]进一步研究得到了著名的 Rayleigh-Plesset 方程,形成了空泡动力学的基础.刘小兵等^[41]在总结前人工作的基础上,从理论上较全面地分析了空泡在任意流场中的受力和影响因素,建立了空泡在任意流场中运动的三维控制微分方程.随着对空蚀现象的观察和研究的不断深入,人们逐渐认识到空蚀破坏是一种复杂过程,先后提出了电化学作用论、热学作用论、力学作用论。

(1) 空蚀磨损理论模型

电化学作用论是 1949 年由 PETRACCHI^[42]提出,他认为空蚀中存在电化学反映。张秀丽等^[43]通过试验验证了金属空蚀破坏过程中电化学腐蚀对空蚀起重要作用,力学作用与腐蚀作用互相促进,二者的联合作用引起的材料破坏常常要比这两种作用单独产生的破坏总和大多得多。但是 PLESSET^[42]的研究指出,阴极保护的作用机制可能在于对腐蚀本身的抑制,或者是由于在金属表面产生的自由氢起了气垫的作用。因此电化学腐蚀作用并非空蚀的必要条件。

热学作用论认为空泡溃灭过程所产生的高温是形成空蚀的主要原因。空泡溃灭时,其中含有的气体温度很高,这些热气体与物体表面接触时,将使物体表面局部加热到熔点,使局部强度降低而破坏。空蚀过程中气泡溃灭只有微秒级的时间,根本来不及把热量传递出去,这样就会引起局部地区的瞬时高温,破坏材料的表面结构^[44]。但是,KNAPP 等^[42]指出:在空泡溃灭的最后阶段会产生很高温度,但是气体必须直接与表面接触才会有大量热量被传导到表面。但实际上在液流中,溃灭空泡与表面之间往往被一定体积的液体所隔开。所以热学作用在一些特定的情况下对表面破坏起到重要的作用,但并不是造成空蚀破坏的必要因素。

库斯、瑞利提出了“力学作用论”,他们认为汽蚀的破坏作用是由于球形或者半球形的空泡溃灭,产生强烈的水锤作用,引起金属表面局部塑性变形和局部硬化,从而使材料产生疲劳现象、发生微小裂缝,导致金属表面剥落。力学作用论认为力学作用是导致空蚀的主要原因,仅力学冲击一项,其强度就足以破坏任何一种材料^[45]。目前关于空蚀破坏的力学作用机制主要包括微射流和冲击波两种理论。

微射流理论在 1944 年由 KORNFIELD 等首先提出。该理论认为,当空泡在压力梯度作用下或在边界附近溃灭时,会形成一束微型射流,从分裂的气泡中通过,冲向边壁,造成空蚀破坏。RATTRAY 论证了射流形成的可能性;NAUDE 等给出了轴对称条件下,吸附于固体壁面上的半球形空泡溃灭时形成冲击固体壁面的微射流的数学分析。微射流冲击作用的大小取决于空泡的直径、溃灭点的位置等因素,强的冲击可以直接造成壁面的破坏;而较弱的冲击反复作用则可能使壁面材料疲劳破坏^[46]。近年来德国的 DULAR 在这方面的研究比较突出,他总结并阐述了空泡的微射流机理。

冲击波理论认为空泡溃灭产生巨大的溃灭压力,强烈压缩周围的介质而形成