

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书

材料的冲蚀磨损与 微动磨损

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书编委会 主编

李诗卓 董祥林 编著



机械工业出版社

前 言

在国民经济和国防建设中，各种机械产品的零件由于磨损与腐蚀引起的早期失效与报废，从而造成能源与材料的消耗是十分惊人的。各主要工业国家都有这方面的调查统计。如美国每年由于摩擦磨损和腐蚀造成的损失各约1,000多亿美元，各占国民经济总产值的4%。我国据有关部门的不完全统计，每年磨损达400亿元，腐蚀方面的损失也将近200亿元。同时，材料的磨损与腐蚀也是影响近代机械产品的性能质量和寿命，从而影响其竞争能力的重要问题。作为机械产品的设计原则，目前已从单纯的强度设计发展到针对材料强度、磨损与腐蚀三大失效原因的综合设计。因此，解决材料的耐磨与抗蚀问题，已受到国内外机械设计与制造部门、材料研究与生产部门的普遍重视。

材料的磨损与腐蚀是个相当复杂的边缘学科，它受到一系列因素的影响。解决的途径应从分析失效的原因出发，从调整或改变工况条件，改善构件设计，合理选择材料，改进工艺措施和进行表面防护等各个方面，由整个系统角度去确定解决方案。原则是从实际出发且经济有效。为此需要通过近代研究方法，弄清系统中各因素的相关关系，即弄清楚磨损与腐蚀的基本规律和失效机理，以便正确指导这方面的工程实践。因此，中国机械工程学会材料学会于1982年决定成立“材料耐磨抗蚀及其表面技术委员会”，其任务就是要推动综合研究解决材料耐磨抗蚀问题的学术交流活动，为节约能源与材料消耗，提高机械产品质量发挥积极作用。为了尽快地，广泛地把这方面的基本理论知识和研究成果介绍给广大

的有关工程技术人员，使其能在生产及科研实践中应用并收到实效，为此，学会决定编写一套“材料耐磨抗蚀及其表面技术”丛书，由机械工业出版社出版，并成立了丛书编委会及顾问组。第一批丛书包括丛书概论等十个分册（分册名称附后），每册大约15~25万字左右。本套丛书共分四大部分，第一部分材料的摩擦与磨损；第二部分材料的腐蚀与防护；第三部分材料表面强化；第四部分材料的表面分析。

材料的腐蚀与防护只在第一分册概论中作一般的介绍，详细的论述将待再版时继续补充。

本丛书选材力求先进、全面，尽量作到在内容上具有一定理论深度，概念准确。为避免与其它专业丛书重复，本书力求突出材料的耐磨与抗蚀，重点放在应用上，同时内容通俗易懂，便于自学掌握。

由于作者知识水平有限，经验阅历不多，书中缺点错误在所难免，恳请广大读者和专家提出批评指教。

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书编委会

1984.11.

第四分册材料的冲蚀磨损与微动磨损共分九章，第一至四章由李诗卓同志编写，第五至九章由董祥林同志编写，全书由李诗卓同志统稿。

目 录

第一篇 材料的冲蚀磨损	1
第一章 概 述	1
一、冲蚀的定义	1
二、工程中常见的冲蚀现象	1
三、材料冲蚀研究发展简史	4
四、冲蚀分类及其在摩擦学中的地位	8
第二章 固体粒子对材料的冲蚀	13
一、现象的描述	13
二、冲击	17
(一) 冲击过程中的能量平衡	17
(二) 冲击中的损毁数	20
(三) 不同形状入射体的压痕	22
(四) 冲击破坏的观察	23
三、影响冲蚀的因素	33
(一) 环境参数对冲蚀的影响	34
(二) 磨粒性能对冲蚀的影响	42
四、冲蚀理论	48
(一) 单颗粒冲蚀及冲蚀的单元过程	48
(二) 冲蚀的微切削理论	53
(三) 变形磨损理论	61
(四) 冲蚀的脱层理论——亚表面破坏的力学	68
(五) 第二次冲蚀	71
(六) 挤压作用及冲蚀的锻造挤压理论	73
(七) 带氧化膜层合金的冲蚀机理	80
(八) 脆性材料的冲蚀机理	85
五、泥浆冲蚀及其影响因素	93

六、固体粒子冲蚀试验设备及方法	104
(一) 气流冲蚀设备	105
(二) 泥浆冲蚀设备及试验方法	121
第三章 液滴冲蚀及气蚀	130
一、单相流动及多相流动	132
二、液滴对固体表面的冲蚀	134
三、气蚀——空泡的萌生和溃灭过程	138
四、影响气蚀及液滴冲蚀的因素	143
(一) 冲击速度的影响	145
(二) 攻角影响	147
(三) 环境温度影响	147
(四) 液滴大小及表面形貌影响	148
五、气蚀及液滴冲蚀的模型	150
六、气蚀和液滴冲蚀设备及测试方法	151
(一) 单液滴冲击装置	152
(二) 气蚀试验方法	154
(三) 液滴冲蚀设备及试验方法	158
第四章 材料耐冲蚀性能及冲蚀的防护	164
一、概述	164
二、材料的抗冲蚀性能	165
(一) 气流喷砂冲蚀时材料的抗冲蚀性能	165
(二) 泥浆冲蚀中材料的耐冲蚀性能	188
(三) 液滴冲蚀及气蚀中材料的抗冲蚀性能	190
三、涂层的耐冲蚀性能及其应用	212
四、抗冲蚀材料选用的准则和判据	218
五、控制冲蚀的其它措施	225
冲蚀磨损 附录一 固体粒子在气流中冲蚀的标准方法	229
ASTM-G76-83	229
冲蚀磨损 附录二 振动气蚀性冲蚀试验的标准方法	240
ASTM-G32-77	240

第二篇 材料的微动磨损	251
第五章 概 述	251
一、引言	251
二、术语和定义	252
三、历史	255
四、微动磨损的特点及诊断	256
(一) 微动磨损的特点	256
(二) 微动磨损的表面特征	258
(三) 微动磨损的诊断	260
(四) 微动磨损诊断实例	261
五、工程中常见的微动磨损	263
(一) 轴承	265
(二) 压配合	266
(三) 榫槽配合	266
(四) 铆接	268
(五) 钢丝绳(绳)	269
(六) 核工业	269
(七) 电触点	271
(八) 人体植入物	271
第六章 微动磨损的原理	275
一、微动磨损理论概述	276
二、微动磨损的初始阶段	284
(一) 金属的粘着理论	284
(二) 粘着在微动磨损中的作用	289
三、微动磨屑	296
(一) 磨屑的形成	296
(二) 磨屑的特征	300
(三) 磨屑的作用	303
四、稳态阶段	305
(一) 稳态阶段的特点	305

(二) 磨损的脱层理论	306
(三) 微动磨损中的脱层特征	307
五、氧化的作用	314
第七章 微动磨损的实验研究	325
一、试验设备和试样	325
(一) 试验设备	325
(二) 试样	333
二、试验过程中的测量	336
(一) 滑动振幅的测量	336
(二) 垂直压力的测量	340
(三) 频率和循环数的测量	340
(四) 磨损量测定	340
(五) 磨痕分析	342
(六) 磨屑分析	345
(七) 接触面温升测量	347
(八) 摩擦系数测量	349
(九) 接触电阻测量	352
(十) 实验程序	357
三、各参数对微动磨损的影响	358
(一) 振幅的影响	358
(二) 垂直压力的影响	363
(三) 频率的影响	364
(四) 循环数的影响	364
(五) 接触形状的影响	367
(六) 环境温度的影响	368
(七) 环境湿度的影响	371
(八) 气体成分的影响	374
四、电解质溶液中的微动磨损	376
(一) 试验装置	376
(二) 试验方法	377

第八章 微动疲劳	385
一、微动疲劳的特征	385
(一) 断口诊断	385
(二) 微动和缺口比较	387
(三) 微动疲劳和腐蚀疲劳比较	388
(四) 微动疲劳曲线 ($S-N$ 曲线)	390
(五) 微动疲劳门坎值	391
(六) 应力类型	392
二、微动疲劳试验	394
(一) 微动疲劳的类型	394
(二) 微动疲劳试验机	396
(三) 裂纹起源及扩展测定方法	398
(四) 试验方法	402
三、裂纹的起源和扩展	403
(一) 裂纹的起源	404
(二) 裂纹的扩展	410
四、影响微动疲劳的因素	413
(一) 滑动振幅	413
(二) 垂直压力	414
(三) 频率	416
(四) 气氛	418
(五) 温度	420
(六) 腐蚀溶液	424
第九章 微动磨损的控制	432
一、设计的改进	433
(一) 改进设计的原则	433
(二) 改变接触参数	433
(三) 压配合	436
(四) 销孔联结	440
(五) 铆接和螺栓联结	441

(六) 榫槽联结	442
二、材料的选择	443
(一) 金相组织的影响	443
(二) 材料副的选择	446
(三) 材料的机械性能	447
(四) 合金元素的影响	449
(五) 预氧化处理	449
(六) 金属氧化物的性能	450
(七) 非金属材料 and 复合材料	450
(八) 环境条件的考虑	452
(九) 人体植入材料	454
(十) 材料的缺口敏感性	455
三、表面强化工艺的采用	458
(一) 表面机械处理	459
(二) 表面化学热处理	461
(三) 磷化与阳极氧化	462
(四) 电镀和化学镀	464
(五) 离子溅射、离子镀、离子注入	469
(六) 热喷涂	473
四、加润滑剂或夹入物	480
(一) 润滑油和润滑脂	480
(二) 固体润滑剂和夹入物	486

第一篇 材料的冲蚀磨损

第一章 概述

一、冲蚀的定义

冲蚀、浸蚀或磨蚀 (Erosion) 指的是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。粒子一般小于 $1000\mu\text{m}$ ，冲击速度在 550m/s 内，超过这个范围出现的破坏通常称为外来物损伤，不属于冲蚀磨损讨论之列。造成冲蚀的粒子通常都比被冲蚀的材料硬度大，但流动速度高时，软粒子甚至水滴也会造成冲蚀。冲蚀磨损已经成为许多工业部门中材料破坏的原因之一，英国科学家 T. S. Eyre 认为冲蚀磨损占工业生产中经常出现的磨损破坏总数的 8%^[1]。广义上讲，大自然的风雨对建筑物造成的破坏及地形地貌随时间的演变都包括有冲蚀作用。因此，这种现象在工程上称为冲蚀，而在自然界则称为水土流失 (Soil Erosion)。

二、工程中常见的冲蚀现象

工程中存在的冲蚀破坏现象随处可见。最引人注意的是那些造成严重破坏并与生产实际有密切联系的冲蚀现象。例如，空气中的尘埃和砂粒如果入浸到直升飞机发动机内，可降低其寿命 90%^[2]；一个轴功率为 $1000 \times 735.5\text{W}$ 的发动机会因

吸入6kg砂土粒而发生严重破坏；压缩机叶片的导缘只要有极少量材料冲蚀出现，0.05mm的缝隙便能引起局部失速；气流输运物料管路中弯头的冲蚀可能大于直管段的五十倍，即使输送木屑一类软质物料，钢制弯头的寿命也只有3~4月^[3]。石油化工厂烟气发电设备中，烟气携带的破碎催化剂粉粒对回收过热气流能量的涡轮叶片也会造成冲蚀。火力发电厂粉煤锅炉燃烧尾气对换热器管路的冲蚀而造成破坏大致占管路破坏的1/3，其最低寿命只有16000h^[4]。属于高温高速气流对材料的冲蚀还有火箭喷管喉衬、用粉煤作燃料的燃气涡轮发动机等。上面涉及的是气流携带固体粒子冲击固体表面产生冲蚀的例子，即所谓的喷砂型冲蚀。

另一类冲蚀系由液体介质携带固体粒子冲击到材料表面而产生的，称为泥浆冲蚀。其典型例子是水轮机叶片在我国多泥砂河流中受到的冲蚀。建筑行业、石油钻探、煤矿开采、冶金矿山选矿场中及火力发电站中使用的泥浆泵、杂质泵的过流部件也受到严重的冲蚀。近年来人们致力于煤炭资源的综合开发和利用研究，在煤的气化、液化（煤油浆、煤水浆的制备）、输送及燃烧中均碰见大量材料的冲蚀问题。一些先进的流程和设计能否成为现实，甚至以能否完满地解决材料或部件的冲蚀为基础。此外，这类冲蚀问题还和农田水利建设有关，水轮机叶片的破坏也包括这类冲蚀作用，因而其涉及面之广并不亚于喷砂型冲蚀磨损。

高速飞行器穿过雨区时，会受到水滴的冲击，这方面的问题大约在本世纪四十年代中期开始引起人们的注意。如在暴风雨中飞行的飞机迎风面上首先出现漆层剥落，同时材料表面也出现破坏痕迹。飞行速度达160m/s，降雨量为25mm/h时，塑料、玻璃及其制品如防风罩、红外窗等，甚至陶瓷制品

如雷达天线罩均不同程度地受到雨滴冲蚀。问题还在于飞机导航的雷达天线罩必须是低介电损失材料做成，不能应用金属材料，只能选用非金属、高分子聚合物及陶瓷等，它们的抗液滴冲蚀能力往往成为选材的一项重要指标。与这类情况相似的还有红外窗口用材，即一种透过电磁波的材料，如碱金属的卤化物，Ⅱ～Ⅶ及Ⅲ～Ⅴ族的化合物才能透过波长范围在 $8\sim 12\mu\text{m}$ 的红外辐射。但是，这类材料的抗冲蚀性能及强度往往也都不能满足要求，因此从事冲蚀研究的材料科学家正在寻求新的红外窗口用材，目前已取得明显的进展^[5]。

蒸汽轮机叶片在高温过热蒸汽中运行时，会出现水滴冲蚀，它主要发生在末级叶片上，这时蒸汽中可能含有 $10\sim 15\%$ 的水滴。高速转动叶片背面的导缘受到水滴冲击，其速度差不多和叶片运行的线速度相当。经过一段时间后，叶片上会出现小的冲蚀坑，从而降低汽轮机效率，这种破坏随蒸汽中水滴量的增加而加剧，最后只能更换所有的叶片^[6]。

近二十年来逐渐受到注意的另一类水滴冲蚀问题是导弹飞行穿过大气层及雨区发生的雨蚀现象，即 $1000\sim 8000\text{m/s}$ 速度范围内水滴对材料的冲击。在导弹的鼻锥、防热罩、再入飞行器的迎风面上，只要受到高速的单颗液滴冲击便会立刻出现蚀坑，多个蚀坑的交织就造成材料的流失。这类高速液滴冲击造成材料表面损坏的现象称为雨蚀或液滴冲蚀。

另一类出现在水力机械上的冲蚀现象是由因为低压流动液体中，溶解的气体或蒸发的气泡形成和溃灭时造成的，即所谓汽蚀性冲蚀。船用螺旋桨，水泵叶轮、输送液体的管线阀门，甚至柴油机汽缸套外壁与冷却水接触部位过窄的流道处经常可见到汽蚀破坏。人们对汽蚀的注意是在十九世纪末期，航海事业发展要求研制高速舰船以后，因为一艘新船的

4

推进螺旋桨使用两三个月后便出现深达50~70mm的气蚀坑。近年在原子核电站中，也发现液体金属工作介质对反应堆及换热器部件的气蚀性冲蚀。因此除了水力机械外，流动介质工作系统中也出现气蚀破坏。

具体工程项目中往往同时存在几种磨损形式，其中也包括冲蚀破坏，且难以严格区别开。目前材料摩擦磨损研究的传统试验方法和已有的理论均不能对冲蚀磨损作全面的描述和解释，因此无论从实际出发还是根据摩擦学对磨损的分类，冲蚀问题一般都以相对独立的地位出现在材料磨损领域中。

三、材料冲蚀研究发展简史

工程上冲蚀现象的研究以喷砂工艺的历史最长，著名科学家O. Reynold 1873年便著文讨论喷砂对硬材料的切削作用^[7]，并提出了雷诺(Re)数。但1913年Lord Reyleigh就同一题目发表论文指出Young(杨氏模量的提出者)曾于1807年在自然哲学杂志上讨论过喷砂问题，这几乎要比O. Reynold早七十年^[8]。1876年修建纽约Brooklyn大桥，因在施工中发生冲蚀而注意到选材问题，总工程师Roebing用压缩空气从桥墩部位吸出泥沙时，曾遇到金属反射板严重冲蚀因而寿命很低的困难，最后他用花岗石板代替金属板降低了冲蚀，保证了工程顺利进行^[9]。二十世纪中期冲蚀问题受到更多的关注，H. Wahl和F. Hartslein第一次系统地讨论了这个问题，他们合作出版了一本名为射流磨损(Strahlerschleiss)的小册子，汇总了1946年以前有关冲蚀磨损文献共233篇。书中就某些参数对冲蚀磨损影响及解决实际冲蚀问题的办法作了介绍。虽然他们提出了一些看法和建议，但对粒子冲击到材料

表面造成的破坏过程即冲蚀机理涉及不多^[10]。为了探索材料冲蚀的发生及发展过程,近二十年来科学家们开展了广泛的实验研究,在此基础上提出一些物理模型及数学表达式。首先取得成果的是美国加州大学 Berkeley分校的 I. Finnie,他在1958年发表了冲蚀微切削模型,主要讨论刚性粒子对塑性金属材料的冲蚀磨损^[11]。该理论在低入射角(攻角)下,为实验数据所证明,因而为人们普遍接受,其不足处是尚不能完满地解释有些重要的实验现象,如高攻角下即近于垂直入射时塑性材料产生的冲蚀。虽然Finnie也对脆性材料提出过一个简单的物理模型,但因为玻璃、陶瓷等组成十分复杂,简单理论模型难以对冲蚀现象作出完满解释。

1970年在冲蚀微切削理论基础上,考虑到粒子冲击固体表面时有可能发生碎裂,从而提出第二次冲蚀,即冲蚀微切削过程包括第一次冲蚀和第二次冲蚀两部分。后者对垂直入射的脆性粒子有更大的实际意义,第二次冲蚀理论较为成功地解释了Finnie理论难以说明的大攻角下出现的冲蚀现象^[12]。

为了弄清楚各种形状入射粒子冲击到材料表面发生的情况,随着实验技术的进步而设计出几种单颗粒冲蚀设备。I. M. Hutchings等借助高速摄影机,仔细观察高速球形或正立方块入射体冲击到材料表面的运动轨迹,提出了犁削型冲蚀和切削型冲蚀两种破坏形式,后者又以其前倾角的改变而分为切削I型和切削II型。虽然他的实验过于典型化,但却在用扫描电镜观察磨痕形貌时得到证实^[13]。不过实际工况的冲蚀现象十分复杂。入射粒子形状各异,且远小于Hutchings实验中使用粒子的尺寸,所以他的理论和实际情况还有一定差距。

1972年G. L. Sheldon等提出了另一个冲蚀破坏模型。他们认为垂直入射粒子入侵到材料表面与压痕硬度法类似，为解释实际测定冲蚀破坏粒子速度指数与从动能计算得到的二次方之间的差别，从能量平衡关系出发对冲蚀率与粒子速度关系重新进行数学处理，并取得一定结果^[14]。

七十年代中期出现了冲蚀绝热剪切理论^[15]。其有影响的代表人物是P. G. Shewmon^[16]，该模型系以冲蚀过程中流失的材料屑或变形部分形成交错剪切带为依据，这些剪切带只有在高于临界应变时才会出现，如90°攻角冲击高强度合金就容易形成剪切带。因此该模型能解释为什么淬火钢在近90°攻角下有最大的冲蚀失重，而硬度低于HRC55的钢或延性好的金属则在20°攻角附近出现最大冲蚀失重。

1978年后，A. V. Levy总结用SEM观察高攻角冲击塑性材料磨痕和磨屑的结果，测定冲蚀率随冲蚀时间的变化规律，从而提出了延性金属冲蚀的挤压-锻造理论，并命名为冲蚀成片理论(Platelet)^[17]。他认为冲蚀是粒子对固体表面的“锻造”过程，在锻造中，塑性金属表面及近表层的加工硬化区是导致磨屑成片脱离母体的根本原因。以上几种理论仅能用于解释固体粒子对材料，特别是塑性材料表面造成的冲蚀破坏现象。

对液滴冲蚀和气蚀的观察也有近百年历史了，远在十九世纪末期随着人们对船舶速度提出的高要求，大约于1893年首先在英国皇家海军舰艇“勇敢号”上观察到气蚀现象。但在这以前O. Reynold就曾经从理论上对气蚀作过预言。后来又观察到螺旋桨叶上出现蜂窝状冲蚀坑使其性能显著恶化的现象。数年后，第一艘汽轮机驱动的船只“透平号”也遇到同样问题，最后不得不改变设计以三个螺旋桨代替单轴传动的叶片

才使其航行速度达到59.2km/h。改进设计取得成功的原因应归功于一种研究气蚀的典型设备及方法即水洞试验^[18]。为了发展更高性能的船舰,必须研究气蚀的发生及发展过程,故开始建设能模拟实际工况的,大规模水洞设备及研究机理的实验室。不过由于气蚀现象十分复杂,所以目前大量的工作仍然停留在各种参数对气蚀影响、材料显微组织对气蚀破坏影响的实验观察上,尚未发展出较为完整的物理模型和数学表达式。

液滴冲蚀在某些方面和气蚀相似,二者均有流体动力作用于固体材料表面,但在低冲击速度下,液滴对固体表面根本不造成破坏,故未引起人们的关注。高速液滴造成材料的冲蚀破坏从两方面显示出来:一个是发生在蒸汽轮机末级叶片上的水滴冲蚀,1920年就开始研究抗水蚀材料,1957年后Engel和Heymann分别对此做过评述^{[19][20]},1966年Christie及Hayward观察了汽轮机中水滴形成过程及大水滴从叶片尖端撕裂的冲蚀破坏作用^[21]。另一个是二十世纪四十年代中期出现飞行器的雨蚀,从R. M. Robertson等人对雨蚀研究到1974年第四届专业会议^[22],由于军方的促进而取得较大的进展。1976年G. S. Springer出版的“液滴冲蚀”一书收集了许多研究成果,美国材料试验协会也出版特刊讨论这个问题^[23]。近卅多年对雨蚀问题研究分两方面,即飞行速度不太高的飞机关键部件破坏规律及选材;超音速飞行器如导弹再入时水滴与固体表面碰撞过程中的动力学问题,特别是观察研究各向异性多维编织纤维复合材料的冲蚀破坏。雨蚀理论研究尚不成熟,仅1976年A. Thiruvengadam从冲蚀率与冲蚀时间曲线导出的表达式,但它并不是一个能普遍应用于水滴破坏的完整理论。此外,G. S. Springer等人根据

材料疲劳破坏规律提出雨蚀失重与冲击次数之间存在线性关系，用它解释孕育期、加速期及最大冲蚀率取得一定成效，但工作尚处于初始阶段。

四、冲蚀分类及其在摩擦学中的地位

由上述可知，冲蚀是由多相流动介质冲击材料表面而造成的一类磨损。根据介质可将冲蚀磨损分为两大类，即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，有的则在表面上溃灭（气泡）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，则可将冲蚀分为四种类型。表1是冲蚀分类及实例。

表1-1 冲蚀现象的分类及举例

冲蚀类型	介质	第二相	损坏实例
喷砂式冲蚀	气体	固体粒子	烟气轮机、锅炉管道
雨蚀、水滴冲蚀		液滴	高速飞行器、汽轮机叶片
泥浆冲蚀	液体	固体粒子	水轮机叶片、泥浆泵轮
气蚀（空泡腐蚀）		气泡	水轮机叶片、高压阀门密封面

我国机械工业部武汉材料保护研究所、上海内燃机研究所及中国科学院兰州化学物理研究所合编的“摩擦学名词术语”（报批稿）中，有关冲蚀或浸蚀的词目有：浸蚀磨损、流体浸蚀及气蚀浸蚀三条。它们的定义及内容如下：

浸蚀磨损（Erosion Wear）即冲蚀

含有硬颗粒的流体相对于固体运动，使固体表面产生的磨损。硬颗粒的流体几乎平行于固体表面相对运动而产生的