



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



iCourse·教材

水力学 (第5版)

下 册

四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 编

高等教育出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



iCourse · 教材

水力学 (第5版)

SHUILIXUE 下册

四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 编

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,系由原吴持恭主编的《水力学》(第4版)修订而成。本书论述水力学的主要理论及其应用,在第4版的基础上,保持了原书“循序渐进、加强基础、理论联系实际、利于教学”的特点,在整体安排上采用由浅入深的方式。上册以基础性和系统性为原则,在水静力学之后,从液体运动的流束理论出发,渐进式地介绍水动力学内容,经过水流形态、管流、明渠流、堰流与闸孔出流、水流衔接与消能、渗流,然后上升到流场理论、水力学模型试验基础。下册以实用性和前沿性为原则,按照由基础理论至工程应用的模式展开,结合高速水力学、河流动力学、环境水力学及计算水力学内容分别阐述。

全书上、下两册共19章。上册11章,包括:绪论、水静力学、液体运动的流束理论、流动阻力与水头损失、有压管道流动、明渠流动、堰流及闸孔出流、水流衔接与消能、液体运动的流场理论、渗流、水力学模型试验基础;下册8章,包括:高速水力学基础、高坝工程泄洪消能技术、河流动力学基础、水库泥沙淤积与引水防沙、环境水力学基础、水利水电工程水环境影响、计算水力学基础、数值计算在水利水电工程中的应用等。

本书可作为高等学校水利类、土木类等专业的教材,也可供独立学院、高职高专和成人高校师生及有关工程技术人员参考。

四川大学“水力学”课程于2013年入选国家级精品资源共享课立项项目,已在“爱课程”网上线,相关电子教案、教学视频、习题答案等教学资源,请登录网站查看。

图书在版编目(CIP)数据

水力学.下册/四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室编.--5版.--北京:高等教育出版社,2016.8

ISBN 978-7-04-045707-0

I. ①水… II. ①四… III. ①水力学-高等学校-教材 IV. ①TV13

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第139601号

策划编辑 周冉 责任编辑 赵向东 封面设计 李小璐 版式设计 杜微言
插图绘制 杜晓丹 责任校对 杨凤玲 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 高教社(天津)印务有限公司
开本 787mm×960mm 1/16
印张 23.25
字数 420千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 1979年3月第1版
2016年8月第5版
印 次 2016年8月第1次印刷
定 价 35.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 45707-00

第5版序

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，系对原吴持恭主编的《水力学》（第4版）的再次修订，以使本教材更好地反映当前水力学的发展和更为适应教学改革的要求。

本次修订在认真分析水力学发展过程和广泛汲取教材使用单位和有关专家意见的基础上，对原教材内容进行适当增删和局部调整。本着基础性和系统性的原则，将基础水力学内容统一集中到上册；本着实用性和前沿性的原则，在下册中分专题介绍应用水力学的内容。主要修订内容包括：

一、按照基础水力学和应用水力学进行分类，重新调整上下两册章节内容。

二、针对高速水力学与河流动力学的突出问题，在下册中增加高坝工程泄洪消能、水库泥沙淤积与引水防沙内容，分别作为高速水力学与河流动力学的应用简介。

三、基于当前环境水力学的突出问题及其进展，在下册中增加环境水力学基础和水利水电工程水环境影响内容。

四、基于数值模拟技术的快速发展及广泛应用，在下册中增加计算水力学基础与水利工程的数值模拟内容。

五、为充分考虑水力学基础理论与工程应用案例，对全书例题与习题进行增删。

六、对全书进行全面的校核和修订。

本次修订工作是在许唯临教授主持下完成的。参加上册修订的有许唯临、李克锋、王协康、张法星、王波、安瑞冬。参加下册高速水力学内容修订的有许唯临、王伟、刘善均、张法星、田忠、张建民、邓军，参加河流动力学内容修订的有刘兴年、黄尔、王协康、杨克君、郭志学、聂锐华、杨奉广，参加环境水力学内容修订的有李嘉、李克锋、梁瑞峰、安瑞冬、李永、冯镜洁，参加计算水力学内容修订的有林鹏智、王波、肖鸿、李连侠、彭勇、陈日东等。许多兄弟院校的同志根据丰富的长期教学经验，对修订工作提出了宝贵的意见和建议；清华大学李玉柱教授认真、详细地审阅了本书上册，武汉大学槐文信教授周密、细致地审阅了本书下册，提出了许多宝贵的修改意见，在此一并表示衷心的感谢！

对于书中的不足之处，敬请批评指正，以便今后不断完善。

编者

2015年12月

第4版序

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，在第3版的基础上对全书再次进行修订，以使本书更好地适应21世纪水力学的学科发展与创新性人才的培养。

本次修订在广泛汲取教材使用单位和有关专家意见的基础上，本着保持特色、自主创新、与时俱进的原则，主要在以下几个方面进行了修订：

一、增加水力学发展简史的内容，以便更好地了解水力学研究与应用的发展历程。

二、基于当前高坝工程建设形势及高坝水力学进展，增加了“水流衔接与消能的若干新技术”内容。

三、鉴于工程泥沙问题日益突出，增加了工程防沙措施的相关内容。

四、基于计算机技术的快速发展，删除了原书中现已基本弃用的内容，如图解法内容，同时增加了计算机数值模拟的相关内容。

五、对全书进行全面的校核和修正。

本次修订工作是在许唯临教授主持下完成的。参加修订的有许唯临、刘兴年、李克锋、刘善均、王黎、王协康、王玉蓉、张建民、张新华、李冰冻、陈明千、易文敏等。许多兄弟院校的同志根据丰富的长期教学经验，对修订工作提出了宝贵的意见和建议；清华大学李玉柱教授认真、详细地审阅了本书，提出了许多宝贵的修改意见，在此一并表示衷心的感谢！

对于书中的缺点和不足之处，敬请批评指正，以便今后不断完善。

编者

2007年5月

第3版序

根据2002年全国“水力学及流体力学课程教学指导小组扩大会议”的精神，在第2版的基础上，对全书再次进行修订，以使本教材能够更好地适应当前水力学的发展和教学需要。

本次修订吸收了教学指导小组扩大会议上教材使用单位和有关专家的意见，并在会后以通信方式进一步征询了有关院校教师的意见。在此基础上，确定了保持特色、完善提高的原则，主要从以下几个方面进行了修订：

一、删除原书中现已弃用的内容，如“水力指数法”。同时，对原书中个别不适应水力学最新认识的描述加以适当修改，如对紊流时均运动微分方程组求解问题的描述。

二、在部分水力计算的图解法后，简要地增加相应的迭代法内容。

三、适当增加习题数量，以更好地反映各章主要教学内容。同时，增加思考题，以作为例题和习题的有效补充。

四、再次对全书进行全面校核和修正。

本次修订工作是在主编吴持恭教授总体安排下完成的。参加修订的有：许唯临、李克锋、王黎、王玉蓉、杨凌真、周茂林等同志。许多兄弟院校的同志根据其长期、丰富的教学经验，对修订工作提出了宝贵的意见和建议，在此深表谢意！

限于水平，书中缺点和错误在所难免，敬请批评指正。

编者

2003年1月

第2版序

1979年3月第1版的《水力学》是根据全国15所院校代表讨论制定的编写大纲编写的，当时要求编成既是教科书又是参考书。这次是根据1980年5月审定的《水力学教学大纲》（草案）对原书进行了一次较大的修订，以便更好地符合教学要求。在修订时力求贯彻教育部工科基础课程教材编委会工作会议关于大力提高教材质量的精神，以及“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则。

修订本除保持原书力求贯彻循序渐进、加强基础、理论联系实际、利于教学等原则外，我们主要作了以下一些修订：

一、原书属于基本理论的内容原则上不减。对一些非基本的以及属于专业课范围的内容，而大纲中又没有要求的，如无压圆管的共轭水深计算、顺坡明渠中水跃、实用堰中的渥奇及克-奥剖面、隧洞水力计算、连接建筑物的水力计算、明渠恒定变量流、用直线比例法计算闸坝底板上的渗透压力等作了删减。

对大纲中有要求，原书未编入的内容，如液体的相对平衡、有能量输入输出的能量方程、窄深堰流水力计算、紊动扩散等作了补充。

二、原书体系基本上没有变动，但为了便于取舍，将液体运动的解析理论—三元分析法这章分为液体运动的流场理论、边界层理论基础、恒定平面势流等三章。

三、教科书字数有一定控制，凡属不同计算方法，只保留一种常用典型方法，其他方法删减或改为简介。例如关于天然河道水面曲线图解法，保留艾斯考夫图解法，删去控制曲线法；关于明渠恒定渐变流水面曲线的计算方法，保留逐段试算法，水力指数法改为简介。某些段落的文字叙述也作了修改，避免不必要的重复。为了减少篇幅，原书附录全部删去。

四、对例题、习题和图表进行了校核和修正。名词、符号全书力求做到统一。

本修订版由吴持恭、赵文谦、汝树勋分工执笔，由吴持恭主编。修订稿由

华东水利学院张长高教授、清华大学余常昭教授主审。审稿会由教育部水力学教材编审小组主持，除有关编委及主审人外，参加的还有清华大学、武汉水利电力学院、陕西机械学院、郑州工学院、广西大学等院校代表。与会同志提出了许多宝贵意见和建议，谨此表示感谢。

因限于水平，书中缺点和错误在所难免，恳切希望同志们指正。

编 者

1982年7月10日

第1版序

本书是根据一九七八年一月教育部委托我校召开的高等学校工科基础课水力学教材编写会议讨论的编写大纲编写的，可作为高等学校工科水工建筑专业、农田水利专业等水力学课程的试用教材，也可作为其他有关专业的教学参考书。

本书分上、下两册出版。上册包括绪论，水静力学，液体运动的一元分析法，层流、紊流及其水头损失，有压管中恒定流，明渠恒定均匀流，明渠恒定非均匀流，水跃，堰流及闸孔出流的水力计算，泄水建筑物下游的水流衔接与消能。下册包括渠道连接建筑物的水力计算，隧洞的水力计算，明渠恒定变量流，有压管中的非恒定流，明渠非恒定流，液体运动的三元分析法，渗流，水工模型试验基础，高速水流，河渠泥沙运动的基本规律。各章均有例题及习题。书末有附录，内容包括引水系统的水力计算分析实例，实验数据的表示方法，有限单元法在水力学（平面势流）计算中的应用。

上册各章为各专业必学部分。下册各章，各学校可根据不同专业，不同地区及不同讲课学时酌情取舍。

本书由吴持恭同志主编，参加编写的有赵文谦、汝树勋、吴至维、华国祥、梁曾相、杨凌真、张道成、冉洪兴等同志。

一九七九年一月召开了本教材的审稿会，参加审稿会的有：主审单位武汉水利电力学院（徐正凡、黄克中、郑邦民），合肥工业大学（张长高、陈瑞、孙其萁）以及其他审稿单位清华大学，华东水利学院，大连工学院，华北水利水电学院，西北农学院，郑州工学院，太原工学院，新疆八一农学院，青海工农学院，云南农业大学等十三所院校的代表。参加审稿会的同志对本教材提出了不少宝贵的修改意见，谨此表示感谢。

限于编者水平，同时编写时间也比较仓促，因而在教材中缺点和错误在所难免，希望广大读者提出批评和指正。

编者

1979年2月

12	高速水力学基础	1
12.1	高速水流消能与冲刷机理	3
12.2	高速水流自掺气	6
12.3	高速水流的压强脉动	22
12.4	空化与空蚀	32
12.5	掺气减蚀	42
12.6	泄洪雾化	54
12.7	急流冲击波	60
	思考题	63
	习题	64
13	高坝工程泄洪消能技术	65
13.1	泄流能力	66
13.2	挑流消能技术	73
13.3	底流消能技术	91
13.4	有压内流消能技术	104
13.5	其他消能方式	114
	思考题	125
14	河流动力学基础	126
14.1	河流泥沙来源及其运动形式	126
14.2	泥沙特性	129
14.3	泥沙的起动	139
14.4	床面形态与动床阻力	144
14.5	推移质输沙率	149
14.6	悬移质运动	153
14.7	悬移质含沙量沿垂线分布	154
14.8	水流挟沙能力	157

思考题	158
15 水库泥沙淤积与引水防沙	159
15.1 水库淤积的现象和规律	159
15.2 水库排沙方式与泥沙调度	165
15.3 水库泥沙淤积计算	167
15.4 枢纽引水防沙	173
思考题	189
16 环境水力学基础	190
16.1 概述	190
16.2 物质扩散	194
16.3 一维剪切流动的纵向离散	204
16.4 射流与羽流	210
思考题	221
习题	221
17 水利水电工程水环境影响	223
17.1 概述	223
17.2 河流生态需水	223
17.3 水库水温分层与富营养化	234
17.4 高坝泄水总溶解气体过饱和	250
17.5 鱼道	267
思考题	272
习题	272
18 计算水力学基础	274
18.1 水动力学基本方程与边界、初始条件	274
18.2 微分方程的离散方法	289
18.3 有限差分法	303
18.4 对流-扩散-源汇方程的差分格式	313
思考题	315
习题	315

19 数值计算在水利水电工程中的应用.....	317
19.1 库区水力学问题模拟	317
19.2 大坝水力学问题模拟	324
19.3 天然河道水力学问题模拟	337
19.4 其他计算水力学问题	348
19.5 计算水力学常用软件简介	348
思考题	353
参考文献	354

12 高速水力学基础

在上册第8章中，对泄水建筑物下游常用的消能方式——底流与挑流消能的水力计算方法进行了介绍。

伴随着高坝工程建设，泄水建筑物（如溢洪道、泄洪洞和放水底孔等）的水力学指标不断增高，主要表现为单宽流量增加，上下游水位差变大，流速增高。当泄水建筑物中水流流速高于 20 m/s 时，会产生一些特殊的水力学问题，如水流掺气导致水深增大，水流强烈脉动引起过流面荷载增加和结构振动，水流空化导致泄水建筑物固壁发生空蚀破坏，急流冲击波引发水面升高，泄洪雾化降雨危害枢纽工程安全运行、影响环境等，常称此时的水流为高速水流。同时，第8章介绍的相关水力计算方法已无法满足工程设计要求。基于流体力学理论，研究高速水流的特殊水力现象及其水力计算方法、危害消减措施的学科称为高速水力学。其主要研究内容如下：

（1）消能防冲

随着单宽流量、流速的增大，泄洪消能的难度加大，下游防冲面临更加严峻的考验。从工程措施上讲，如果仍采用第8章中介绍的消能方式，将无法解决消能问题。从水力计算方法上看，消力池体型复杂，或者与上游其他消能方式联合使用，形成复杂三维水跃，但基于水平底坡二维水跃理论的计算方法无法直接使用。此时，需要深入研究复杂水力和边界条件下高速水流消能的机理和计算方法、消能防冲的综合措施等。

（2）水流自掺气

当流速达到一定程度，水流自由表面会掺入空气，变成“乳白色”的掺气水流。掺入水流中的气泡既随流输运，又因水流湍动（也称紊动）和沿水深浓度分布不均而存在浓度扩散，导致水深增大。因此，必须解决什么条件下水流开始掺气，掺气对泄水建筑物有什么影响，掺气水深如何计算等问题。

（3）强烈压强脉动

由上册4.6节、9.7节和9.8节可知，水力学中所讲的动水压强指的是时间平均压强。高速水流的高度湍动导致动水压强产生强烈的脉动，因此设计高水头的泄水建筑物时必须考虑脉动压强荷载。强烈的压强脉动，有时还可能引起水工建筑物的振动。这就要求水力学必须探讨和解决压强脉动对水工建筑物的影响，脉动压强如何分析和计算等问题。

(4) 空化与空蚀

根据上册 1.3 节的相关内容可知,空化是在低压下连续液相介质的破坏,形成气相。空化与连续力场有关,在静止或运动的液体中都可能发生。从形成个别空泡到进一步发展为超空穴、空泡云等,直接取决于压强降低的程度(临界压强值),而该临界值又同液体中或声场中的动力效应有关。描述空化的基本参数是空化数 σ :

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (12.1)$$

式中, p 和 U_0 分别表示特征(参考)绝对压强和特征(参考)流速; ρ 是液流密度; p_v 是流体的饱和蒸汽压强。

空化数是发生空化现象的水流动力相似指数,量纲为一。其物理意义是抑制空化发生的水动力学参数与促使空化发生的水动力学参数之比。

高速水流空化可能导致泄水建筑物的某些部位发生空蚀破坏。工程实践表明,空蚀的规模小到运行多年仅出现少量坑穴,大到泄水建筑物在短期内发生灾难性的破坏。从水利水电工程的角度来看,空化空蚀的研究涉及两个主要问题:水流会不会发生空化;如果不能避免空化,所设计的泄水建筑物、水力机械是否安全。因此,必须解决空化为什么会发生,如何判断空化的发生,应采取什么措施来防止或减轻空蚀的破坏作用等问题。

(5) 掺气减蚀

如果时间足够长,空蚀对过流壁面的破坏力很强,是高水头泄水建筑物安全运行中面临的重要风险。必须采取措施,使过水建筑物免遭空蚀破坏。研究和实践均表明,水流掺气有助于制止空蚀的发生和发展过程,是一项经济有效的减蚀措施,在水利水电工程中得到了广泛的应用。由于自掺气发展到壁面需要一定的条件,当溢洪道、泄洪洞等泄水建筑物水流流速超过 30 m/s 或空化数小于某一临界值时,在过流壁面上设置挑坎、凹槽或者跌坎,使水流脱离壁面,用通(补)气孔把脱壁区与外部大气连通。脱壁区压强下降,将空气吸入水流中。在掺气减蚀设施下游一定距离内,近壁水流中的空气含量不小于某一临界值时,就能起到减免空蚀破坏的作用,这就是掺气减蚀。因此,需要对掺气减蚀设施的布设位置、形式、尺寸、掺气量、保护范围及通风补气系统的体型等问题开展研究。

(6) 泄洪雾化

泄洪雾化是泄洪过程中产生的降雨和水雾的现象,以及评估这些降雨和水雾对枢纽建筑、边坡和周围环境的不利影响。高速泄流时,由于水流与空气或

固壁边界的相互作用，一般都会产生雾化现象。雾化水流是一种很复杂的水-气和气-水两相流，它的流态既受泄流方式的影响，又受地形地貌的限制，同时还受气象条件的作用，是一种复杂的物理现象。

尤其是挑流消能时，水舌从空中下落，由于水体湍动强烈而激溅四射，生成大量的水团、水股，散落在河水中及其两岸山坡上，形成比天然降雨大得多的局部降水；水舌落入河水中时，高速水流的剧烈碰撞也激溅起大量水体，形成岸边降水；由于水流在空中和岸边的飞溅，形成大量水雾，弥漫于河谷中，随风飘向远方，形成典型的泄洪“雾化”现象。雾化降雨往往比气象中的大暴雨还要大很多倍。在实际工程中，由于泄洪雾化而影响枢纽安全运行和影响环境的情况时有发生。因此，人们迫切需要了解泄洪雾化的强度分区范围及其可能造成的危害，提出预报方法，以便妥善地进行建筑物的布置，或采取相应的防护措施保障枢纽安全运行。

(7) 急流冲击波

高水头泄水建筑物中的水流，由于流速快，惯性特别大，水流流态对固体边界的变化非常敏感，即使侧壁几何条件有微小的变化，也可使水面产生波浪，这种波浪称为冲击波。例如在槽宽水浅的陡槽中，侧壁几何形状虽不改变，在一定条件下也可产生波浪，这种波浪称为滚波。目前，对高水头泄水建筑物来讲，急流时产生的冲击波问题比滚波问题更为突出。这是因为，急流冲击波现象一方面使水流局部水深增加，要求增高陡槽边墙的设计高度，增加了工程造价；另一方面波浪传至下游出口，使消能造成困难。这就要求水力学必须解决波浪高度如何计算，采取什么措施来减弱或消除急流冲击波等问题。

高速水力学是随着高水头水工建筑物的大量兴建而发展起来的一门应用科学，是工程水力学的一个分支。受制于研究对象的复杂性和一些科学问题的高难度，某些方面的工程实践走在了科学研究的前面，理论研究欠完善，水工模型试验和三维湍流数值模拟是解决相关问题的主要手段。本章仅介绍一些基本原理及实践经验，供读者参考，主要目的是了解在高水头泄水建筑物的设计中，哪些特殊问题必须加以考虑，以便进行专门的试验研究，加以解决。

12.1 高速水流消能与冲刷机理

对泄水建筑物来讲，泄洪是任务，消能是手段，防冲是目的。高速水流的消能与防冲是联系在一起的。这里所说的消能，并非消灭能量，而是指转换能量或分散能量。根据能量不灭原理，能量是不能被消灭的，但能量的存在形式是可以转换的。当高速水流中的机械能（位能、压能和动能）由于液体的黏

性和相对运动转化为内能（如热能）时，在水力学上常称为消能。此外，通过一定的工程措施，将集中的水能在空间上分散开来，减小下游单位面积承接的水流动能，有助于提高消能效果。

水流能量的转换过程，一般是能量形式从位能 \rightarrow 动能 \rightarrow 湍动能 \rightarrow 热能的转换（图 12.1）。储存于水库中的水，表层水和底层水的势能（压能和位能之和）大小是相同的，表层水位能多一些，压能少一些；底层水情况恰恰相反，压能多一些，位能少一些。泄洪时水流从坝上落下，势能转化成动能。在下游消力池内，水流动能通过湍动混掺，转化为湍动能，再进一步转换为热能，完成了消能过程。水流势能经过湍动混掺转化为热能，往往需要一定的时间和必要的外部条件，实施起来并不容易。讨论水流消能，通常并不仔细考虑水流能量的存在形式及其转换过程，关注重点是机械能的削减程度。

泄水建筑物水力设计的主要任务之一就在于选择适当的消能方式，使水流在下游较短距离内消除余能，将来自上游的高速水流转变为下游的正常水流，从而保证建筑物的安全。

泄水建筑物末端的水流最后会落入下游的水垫塘、消力池或河道中。落入水垫塘的水流，会造成水垫塘底板冲击动压的明显升高，极端情况下会引起水垫塘底板的破坏；泄入消力池或下游河道的水流，会引起河床的冲刷（图 12.2），严重时会造成河床破坏，河岸崩塌，威胁行洪安全。

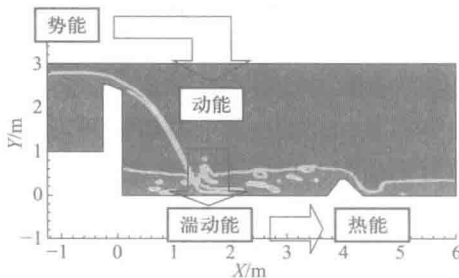


图 12.1

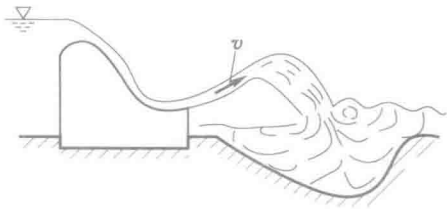


图 12.2

考虑到高水头的泄水建筑物往往修建在高山峡谷地区，所以仅对岩石河床破坏的机理进行介绍。基岩冲刷破坏机理方面存在两种基本观点：

（1）表面冲蚀理论

由于基岩自身强度低于水流的冲刷能力，水流从表面开始对基岩不断剥蚀，导致基岩破坏。或者高速水流冲过基岩凹凸不平的表面，在“凸体”下游形成空蚀坑，随着空蚀范围的扩大而引起基岩破坏。比如，苏联的米尔茨胡

拉娃 И. Г. 对黏性土壤抗冲能力进行了研究, 将基岩视为黏结的整体, 认为冲刷破坏的原因在于水流对岩石表面的冲蚀和剥蚀。而美国有些学者在分析怀尔桑坝下游冲刷破坏原因时认为, 岩石表面坎坷不平, 受高速水流冲刷时在凸体的背后出现空蚀造成岩石破坏。

(2) 裂隙中动水压力破坏理论

基岩被节理、裂隙分割成大小不同的软弱结构块, 在高速水流的冲击下裂隙不断发展, 强烈的脉动压力进入各种裂隙中, 导致岩块与周围岩体的胶结力和咬合力降低, 岩块振动、摇晃, 会引起缝隙棱角的磨损, 岩块间的缝隙不断扩大。当动水压强和脉动压强对岩块向上的作用力大于岩块自重和咬合力之和时, 岩块被拔出失稳。被拔出的多个岩块之间在水流的作用下相互碰撞、破碎, 并被冲至下游, 还有些则停留在冲刷坑内。这一过程可分为“解体”“拔出”“破碎”和“搬运”四个阶段。

随着研究的深入, 人们普遍接受的观点之一是高速水流冲击区内强大的脉动压力在基岩冲刷破坏过程中起着重要的作用。由于基岩中存在许多节理面、断层和裂隙, 脉动水流进入基岩的缝隙中产生强大的脉动压力以致造成缝隙扩大、延伸, 形成连通的缝隙, 最终基岩将沿这些软弱面发生破坏, 逐渐地在岩体内形成交错复杂的裂隙网, 从而引起基岩断裂、解体, 解体后形成许多大小不等、形状各异的岩块。由于岩块表面的流速较大, 时均动水压力小于缝隙内的时均动水压力, 表面和缝隙内的脉动压力的相位也不尽相同, 从而可能产生相当大的瞬时脉动上举力将岩块掀起, 继而被水流搬运至下游。上述观点被称为基岩冲刷的瞬变流理论。

应用瞬变流理论研究水垫塘衬砌和冲坑底部岩块的脉动上举力的特征, 已经取得了一系列成果, 但是, 应该承认, 该理论侧重于从入射水流特性这一方面来讨论基岩的冲刷, 而对基岩的抗冲特性考虑不够。在实际工程中, 不同工程的布置及基岩特性不尽相同。在水流冲刷能力与基岩抗冲能力这对矛盾的作用和发展过程中, 基岩特性对冲刷的影响也是非常大的。卡里巴拱坝是基岩特性影响冲坑发展的典型代表, 也是世界上高拱坝中基岩冲刷破坏严重的典型实例。该坝位于非洲赞比亚与津巴布韦两国之间的界河赞比西河上, 坝高128 m, 上、下游水位差85 m, 最大泄洪流量 $9\,400\text{ m}^3/\text{s}$, 冲刷区河床岩石为片麻岩。模型试验曾给出稳定冲坑深度约30 m, 但从1962年建成到1981年, 近20年间最大冲坑深度竟达70 m, 在冲坑深度最终发展到100 m左右时, 不得不采取人工衬护措施。卡里巴拱坝岩基冲刷如此严重, 其中一个重要原因是河床基岩抗冲强度不均匀。调查发现, 在冲坑周围有比较坚实、抗冲强度较高的岩石, 这些岩石限制了冲坑的发展, 阻碍了淹没射流的正常扩散和消能。当主射流遇