

# 第一章 绪论

## 1.1 问题的提出

目前世界人口总数已突破 60 亿，比三个世纪以前增加了 8 倍，所消耗的水资源总量增加了 35 倍。为了满足水资源需求的这种大幅度增长，迄今为止在全世界范围内已修建 4 万多座大坝（坝高大于 15 m），并在世界各国防洪、灌溉、供水、发电、航运、水产养殖及旅游等许多方面发挥了巨大的效益。展望未来，水资源问题将成为全球环境与经济发展的“瓶颈”，而大坝作为重要的水利工程仍将扮演着有效及合理利用全球有限水资源的关键角色<sup>[1]</sup>。进入 21 世纪，随着世界范围内对环境问题的日益重视，兴建新坝的步伐开始放缓，大坝工程的重点从大规模建设转到已建大坝的维护、维修及安全性方面。相应地，作为影响大坝寿命和健康运行的重要因素之一，坝基帷幕体的防渗性能衰减问题将得到各国大坝工程界越来越多的关注。

我国地处欧亚大陆东南部，地域辽阔，河流众多，流域面积 100 km<sup>2</sup> 以上的河流有 5000 多条，流域面积 1000 km<sup>2</sup> 以上的河流有 1500 多条，总长度达 42 万 km。全国多年平均年降雨量 630 mm，多年平均年径流量大约为 30000 亿 m<sup>3</sup>，水资源量居世界第六位；全国水力资源蕴藏量为 6.9 亿 kW，其中可开发量为 3.78 亿 kW，水力资源得天独厚，居世界首位<sup>[2]</sup>。为了充分利用丰富的水资源，1949 年新中国建立后，在全国范围内进行了大规模的大坝工程建设。经过六十多年的发展，我国的大坝建设在规模、质量、技术等各方面都取得了举世瞩目的成就，并在防洪、灌溉、供水、发电、航运、水产养殖及旅游等方面发挥了巨大效益，为促进我国国民经济发展、提高人民生活水平、保障社会稳定、改善生态环境做出了巨大贡献。但是，由于所处的恶劣自然和运行环境对工程的不良影响，加上工程本身设计标准偏低、施工缺陷以及长期以来未形成良性的运行管理机制、管理不善、维修与更新资金投入不足等客观和主观原因，我国许多大坝随着运行年龄的增加出现了各类衰减问题，直接影响了大坝的寿命和健康安全运行。

据 2000 年年底的统计，我国现有各类大坝约 8.6 万余座，其中在国际大坝委员会登记的坝高大于 15m 的大坝总数达 24119 座，坝高大于 30m 的达 4421

座，在数量上居世界首位<sup>[3]</sup>。根据我国在国际大坝委员会（International Committee on Dam Ageing）登记注册的坝高大于 30m 的 4421 座大坝运行年龄的统计分析，坝龄小于 20 年的大坝在数量上仅占已建大坝总数的 34%，坝龄 20~30 年的占 44%（与 70 年代大坝建设高峰期相符），坝龄 30 年以上的占 21%，平均坝龄为 22.87 年，相当多数大坝从运行年龄上看已经进入老龄阶段，存在不同程度的老化问题。根据 2000 年年底统计，在水利系统管理的 83725 座大坝中，共有三类坝（病险大坝）30381 座，约占已建大坝总数的 36%。其中大型水库大坝 143 座，约占大型水库大坝的 42%；中型 1092 座，约占中型水库大坝的 41%；小型 29146 座，约占小型水库大坝的 36%。另外，全国共有防洪标准仍未达到国家标准的二类坝 27285 座，约占已建大坝总数的 33%。其中大型水库大坝 79 座，约占大型水库大坝的 23%；中型 782 座，约占中型水库大坝的 29%；小型 26424 座，约占小型水库大坝的 33%。据 2001 年的统计，建国以来我国垮坝总数达 3242 座，垮坝率高达 3.9%。其中大型水库垮坝数为 2 座，占垮坝总数的 0.06%；中型水库 121 座，占垮坝总数的 3.73%；小型水库 3119 座，占垮坝总数的 96.21%，其中由于坝基等原因出现异常而发生垮坝的水库约为 362 座，占 11.17%<sup>[4]</sup>。由此可见，正确分析评价防渗帷幕的完好程度，有望为大坝是否正常运行的判定提供重要的依据。

## 1.2 研究意义

修建大坝，拦水造库，这是人类征服自然和改造自然，使其为人类造福的一个重大措施。建坝后，大坝周边自然环境及地质环境发生剧烈变化，在库水压力作用下可导致坝基渗漏，危及大坝安全。坝基帷幕体的修建正是为了对大坝基础进行加固和防渗。但是，由于长期遭受高压渗流、溶蚀等，造成水与岩石、水与帷幕体相互作用长期存在，可造成坝基扬压力升高、渗流量增加，这是造成坝基帷幕防渗作用衰减以致失效的重要标志<sup>[5]</sup>。

世界上的许多大坝，如吉诺特、马尔巴塞、罗德埃尔斯伯、泽乌齐尔、洛根马丁、内佩昂、森特希尔、圣佛朗西斯、拉科瓦、默尔斯巴、瓦伊昂、卡里巴、欧特法热、蓬特塞以及我国的新安江等大坝都无一例外地出现了不同程度的坝基帷幕防渗性能衰减问题，轻者影响到大坝功能的正常发挥，重则直接威胁上部结构的安全。根据国际大坝委员会大坝与水库恶化专业委员会对 33 个国家 1975 年以前建成的 1.47 万座大坝与水库工程的恶化与失事情况的统计资料，1105 座大坝工程中各类老化问题 2103 个，发生的大坝事故 107 起，其中坝基有问题的个

数为 487, 占总数的 23.2%; 而与坝基帷幕防渗失效有关的大坝事故 26 起, 占总数的 24%。根据国际大坝委员会于 1993 年发布的《大坝以及附属建筑物的老化——回顾与建议》(Ageing of Dams and Appurtenant Works——Review and Recommendations) 一书, 798 个各类大坝老化问题中共有 183 个坝基出现防渗问题, 约占老化总数的 23%。根据美国大坝委员会 (USCOLD) 1988 年发布的《从大坝事故中吸取教训——第二版》(Lessons from Dam Incidents, 2nd Edition) 一书, 1986 年前在美国共发生了 516 起大坝事故, 其中 52 起与坝基防渗性能衰减问题有关, 占总数的 10%<sup>[6]</sup>。

坝基的防渗性能衰减是坝基材料 (包括天然岩土体及注入或放入其内的由水泥浆液组成的防渗帷幕等人工材料) 物理化学特性随着大坝运行年龄而变化的一种缓慢过程。它不仅通过改变成分、结构和性状来逐渐减弱坝基岩土体的强度, 而且通过改变岩土体的渗透特性、渗流形态和应力状态来最终影响坝基的稳定性, 从而影响到大坝功能的正常发挥, 缩短大坝的服役寿命, 甚至会直接威胁到整个大坝的安全。据统计世界上大约有 40% 的大坝失事是由基础引起的, 而大量工程实践表明, 引起坝基病态问题和事故的主要原因可以归纳为设计、勘测和施工等方面的各种不足因素, 超标准的洪水、地震和管理不当等意外因素以及老化三个方面, 其中水化学侵蚀是坝基破坏尤其是晚期破坏最重要的原因之一。

20 世纪 80 年代以前, 由于大坝工程安全要求较低, 坝基地下水问题主要表现为渗漏问题, 研究处理的重点在于减少坝基渗漏量。80 年代以来, 随着大坝工程规模的不断扩大, 工程技术要求也愈来愈高, 坝基地下水问题除了渗漏问题外, 主要表现为地下水作为一种荷载对坝基的作用问题, 研究的重点转移到了坝基渗流场与变形场的力学耦合分析上, 并已经取得了可喜的进展。最近几年来, 随着现代先进科学技术成果在坝基研究中的综合应用, 人们认识到水对坝基岩体的作用不仅仅是从有效应力原理简单考虑的力学效应, 而且是一种长期复杂的水—岩化学作用老化效应, 而这种效应对坝基岩体的影响, 考虑到时间因素, 往往比力学因素造成的损伤更为严重。

问题的严重性在于, 根据国际大坝委员会高坝注册统计资料, 目前全世界运行年龄超过 50 年的大坝占大坝总数的 30%, 运行 30 年左右的占 50%; 我国现有大坝 21% 以上的坝龄超过 30 年, 平均坝龄为 22.87 年。加之随着全世界范围内修建新坝步伐的减缓, 老坝总数及百分比还将日益增加。但是, 从国内外对大坝不同部位的老化研究情况来看, 由于水泥、金属等人工材料相对易于老化, 系统性和深度等方面的研究主要集中在上部混凝土及金属结构的衰减研究上, 而由于坝基材料本身组成与结构以及所处环境的复杂性, 缺少坝基防渗性能衰减过程及

其机理方面的系统研究，尤其是定量研究相当薄弱，还不足以满足坝基及其附属物长期稳定性评价的需要。因此坝基帷幕体防渗性能衰减及其定量模拟对于充分了解坝基衰减过程的实质和机理、分析长期运行条件下坝基所表现出的衰减迹象及其原因、正确评价衰减过程的发展趋势和强度，以及对坝基稳定性和安全性可能产生的后果、为限制衰减发展的各种综合性预防措施和相应的检修方法提供科学依据，以确保大坝正常运行、发挥最大效益，并对防灾减灾具有十分重大的意义。

### 1.3 研究现状与趋势

作为一种重要的大型水利水电工程，大坝处于复杂的开放系统中，长期遭受高压渗流、溶蚀、冲刷等恶劣的自然和运行环境的影响，还可能遇超标准洪水和大地震的破坏，大坝（坝体、坝基、附属建筑物等）的综合特性随着时间的推移向大坝功能和安全性不利的方向变化，即随着运行年龄的增加大坝逐渐会发生老化。大坝基础（包括帷幕）防渗性能的衰减问题一直是世界各国大坝工程界普遍关注的焦点问题之一。

早在 1928 年国际大坝委员会（International Committee On Large Dams, ICOLD）成立后，1933 年在瑞典斯德哥尔摩举行的第一届国际大坝会议上，就专门讨论了大坝坝基防渗性能衰减引起的重力坝恶化（Deterioration by ageing of the concrete of weight dams）问题，拉开了大坝防渗性能衰减研究的序幕。1964 年，国际大坝委员会在英国爱丁堡召开第八届国际大坝会议，会议内容包括了大坝防渗性能衰减对大坝特性的影响（Influence of age on concrete properties）专题。之后，于 1967 年在土耳其伊斯坦布尔召开的第九届国际大坝会议上，把大坝行为与恶化（The behavior and deterioration of dams）作为会议的主题之一，重点介绍了渗流引起的众多坝基恶化现象及其对大坝行为的影响<sup>[7]</sup>。1979 年在印度新德里举行的第十三届国际大坝会议上，大坝恶化与破坏（Deterioration or failures of dams）又成为了会议焦点，较全面系统地总结了包括坝基防渗性能衰减在内的各种大坝恶化现象及其检测方法、大坝损坏修复和预防措施、大坝在不同阶段的运行期间内由于防渗性能衰减引起的破坏及教训等一系列问题。1972 年国际大坝委员会在澳大利亚首都堪培拉召开第 40 次年会，宣告成立大坝与水库恶化专业委员会（Committee on Deterioration of Dams and Reservoirs）。该委员会负责对全世界各国已建大坝存在的包括防渗性能衰减在内的各种大坝恶化问题、检测方法和修补措施等资料进行收集和分类，提出设计、建设和运行过程中避免坝基恶化问题的

合理建议,每十年对所收集的资料进行一次更新,并提交给国际大坝委员会公布。该委员会从 1973 年开始,对全世界 33 个国家 1975 年以前建成的 1.47 万座大坝的恶化和失事情况进行了统计<sup>[8]</sup>。其中 1105 件恶化工程中的 2103 项恶化现象和 107 个失事事故按照坝型、坝高和建成时间对库区、坝体、坝基、附属建筑物以及坝下游区等部位进行了全面详细的分类研究,并把结果汇总,于 1983 年以《大坝和水库的恶化——实例与分析》(Deterioration of Dams and Reservoirs—Examples and Their Analyses)一书出版<sup>[9]</sup>。1986 年国际大坝委员会大坝老化专业委员会(Committee on Dam Ageing)正式成立,并在以前收集的大坝恶化有关的资料基础上进行筛选、分类和分析,总结出了混凝土坝、砌石坝、土石坝以及附属建筑物经常出现的各种防渗性能衰减问题及其原因、修复和预防措施,其结果于 1993 年以《大坝以及附属建筑物的老化——回顾与建议》(Ageing of Dams and Appurtenant Works—Review and Recommendations)一书出版<sup>[10]</sup>。2001 年美国大坝委员会出版了《Ageing of Dam Foundations(坝基衰减)》一书,以大量工程实践为基础,以坝基为重点,对坝基防渗性能衰减过程、防渗性能衰减问题进行详细的分类和叙述,提出了坝基防渗性能衰减监测、评价和防治技术方法<sup>[11]</sup>。

除了国际大坝委员会之外,国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)、国际土力学与基础工程学会(International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE)、国际工程地质协会(International Association of Engineering Geology, IAEG)、美国混凝土协会(American Concrete Institute, ACI)和美国垦务局等组织在各自研究领域内多次召开国际学术会议,重点讨论了与坝基防渗性能衰减有关的许多专题,出版了不少专著。尤其是在坝基及帷幕体防渗性能衰减方面的研究取得了长足的进展,获得了许多突破性成果。20 世纪 70 代以来,欧洲各国及美、日等国对混凝土和混凝土建筑物的防渗性能衰减问题,从材料科学、化学、力学等不同学科的角度出发进行了系统的调查、实验和理论研究,提出了炭化理论、碱—集料反应理论、冻融破坏理论以及其他盐类腐蚀理论等一系列与混凝土衰变和防渗性能衰减过程有关的理论、防渗性能衰减检测和评价方法,以及以高强度和良好耐久性为目的的大体积高性能混凝土的先进制作工艺。

国内坝基防渗性能衰减方面的研究始于 20 世纪 80 年代后期。我国在 20 世纪 50 年代末至 70 年代修建的大坝占已建大坝总数的 60% 以上,而这些大坝普遍都存在设计标准、施工规范及管理制度等时间意义上的老化问题<sup>[12]</sup>。进入 90 年代以后,随着我国大坝总数和平均运行年龄的继续增加,坝基防渗性能衰减问

题日益突出,坝基防渗性能衰减研究工作也越来越广泛深入。

1988年5月中华人民共和国水利部成立了大坝安全管理中心,并开始对全国大坝存在的包括老化病害在内的所有安全隐患问题进行全面普查。1992—1995年期间“水工混凝土建筑物老化病害的防治及评估的研究”<sup>[12]</sup>被列为国家自然科学基金重点项目,在国内外混凝土建筑物防渗性能衰减、病害及修补技术调查的基础上,对包括大坝在内的混凝土建筑物防渗性能衰减机理、防渗性能衰减病害评估准则与修补技术进行系统的研究和论述。

在1995年举行的第四届水工建筑物修补技术交流会上,重点讨论了坝基防渗性能衰减病害现状调查与分析,防渗性能衰减病害危害性评估及检测方法,防渗性能衰减病害的破坏机理,修补材料的研究与应用,防渗性能衰减病害修复技术与工程实例等一系列问题,并于当年9月会议将内容以《水工混凝土建筑物老化病害及防治》一书出版<sup>[13]</sup>。1996年,在全国第三届大坝安全学术讨论会上,大坝防渗性能衰减及其对大坝安全的影响被作为会议重要内容进行讨论<sup>[14]</sup>。1994年,国家基础性研究重大项目“重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”<sup>[15-16]</sup>正式申请立项,并从1994—2000年以与国民经济息息相关的包括大坝在内的大跨桥梁和高层建筑等几种典型的重大结构为依托,以结构“生命周期”施工、使用和老化三个阶段为主线,系统进行了有关结构安全性与耐久性的基础研究,在大坝防渗性能衰减研究方面也取得了重要的成果。其中坝基防渗性能衰减及耐久性问题日益引起重视,耐久性开始作为坝基设计中除了强度和稳定以外的控制标准之一。在研究方法上,由于坝基老化过程的复杂性和涉及面的广泛性,由各个学科单独分析老化过程的不同方面逐渐向各学科之间的相互交叉、相互渗透和综合应用,定性与定量相结合的方向发展,不再仅依靠压水试验这一种手段<sup>[17-18]</sup>,在坝基防渗性能衰减探测方法和防治技术上,开始注重现代先进探测方法及防止衰减措施的综合应用<sup>[19-20]</sup>。

弹性波层析成像(Computer Tomography,简称CT)是利用不同介质中弹性波传播速度的差异,通过孔间弹性波传播的数据采集和计算机数学处理(迭代反演)重建介质速度的二维图像,从而推断孔间介质的岩性和精细结构变化的地球物理层析成像技术<sup>[20]</sup>。20世纪80年代,意大利结构与模型研究所开始研究用声波层析技术对坝基进行安全检测,于1990年提出了系统的检测方法,并在第17届国际大坝会议上作了介绍;该方法经意大利100多座大坝的应用,被认为是无损检测的方法后,在美国多处大坝中应用。1991年在我国丰满大坝进行了声波层析检测,得到坝基纵波速的分布。雷宛等(2006年)<sup>[21]</sup>指出坝基灌浆声波CT检测法通常是对比灌浆前后的声波速度变化来对灌浆质量进行评价;刘红贵等(2003

年)<sup>[22]</sup>、刘红军等(2003年)<sup>[23]</sup>认为层析成像反映的是两个钻孔之间截面上的地质特征,实现了面积测量,具有单一钻孔测量方法无可比拟的优势,对重点部位的剖面利用层析技术反演该剖面的波速场可以准确评价帷幕灌浆效果。程久龙(2000年)<sup>[24]</sup>认为声波层析成像的反演实质上就是求解利用大量的声波传播时间与其相应射线在成像单元内所经过的路径以及待求速度的关系建立线性方程组。该方程组具有以下特点:方程组为一大型非负稀疏矩阵;射线投影值一般少于或多于像元数,故方程为欠定或超定方程组;射线测值不可避免的误差决定了方程组的不相容性,即方程为一矛盾方程组。上述特点决定了求解方程过程的不稳定性,需要采用特殊的反演方法,反演结果将得到每个成像单元的声波速度值,采用适当的平滑技术即可绘制波速等值线图。可见声波层析成像的应用效果在很大程度上取决于观测系统及反演算法的正确选择,采用不同的反演算法,对最终结果影响很大。

不少学者在对1959年法国Malpasset拱坝溃坝和1963年意大利Vajont拱坝失事进行成因分析后均指出,地下水活动对大坝坝基的破坏过程具有重要作用<sup>[25-27]</sup>,因此正确分析坝基地下水的动态,是检测大坝帷幕体防渗效果及其时效的一个重要手段。

在寻找诸如渗流量(包括扬压力)一类效应量与其环境量之间的关系时,在定性分析的基础上可借助多元回归统计模型及其求解来确定,并依据求解结果,对帷幕体的防渗效果及其时效进行评价。20世纪30年代,Tonini和Rocha首次将影响大坝渗流的因素分为水位、温度和时效,以函数式表达各个分量,然后用回归分析法建立回归模型。Bonaldi等于1977年用最小二乘法建立确定型和混合型模型,用时效分量的变化规律分析了坝基渗流的变化趋势<sup>[28]</sup>。Gomezlaa等(1985年)<sup>[29]</sup>首先提出了大坝坝基渗流量和扬压力的确定性模型,Kalkani等(1989年)<sup>[30]</sup>采用多项回归式的回归模型来分析Kremasta拱坝渗压计的观测数据。吴中如等<sup>[31]</sup>根据渗流基本理论,用确定性函数和物理推理来选择模型因子及表达式,分别建立了大坝坝体渗流及坝基扬压力、土石坝坝基坝体测压管水位及渗漏量、绕坝渗流等观测量的统计模型。通过分析,可对坝基扬压力及渗流量与环境量的相关性进行量化,并对之间的变化趋势进行预报,从而对坝基渗流性态及帷幕体防渗时效作出评价。依据监测资料,可求得分析时段内影响效应量变化的水位分量、温度分量、降雨分量和时效分量,以及各分量所占百分比。若分析不同时段间,幕后同一部位效应量中库水位所占百分比有增大的趋势,说明帷幕体的防渗效果在衰减,即存在不稳定性;若上游库水位的变化对幕后效应量影响的滞后时间缩短,亦说明帷幕体的防渗效果在衰减。齐仁贵(1998年)<sup>[32]</sup>研究表明,此类模型

在分析具有线性特征的渗流的监测资料时很有效，而在分析具有非线性特征的渗流的监测资料时，效果不是很好，精度不高。

软计算是由模糊集合论的创立者 Zadeh (1994 年) 提出的。所谓软计算是指对研究对象只求近似而非精确解释的计算方法。传统计算的主要特征是严格、确定和精确，但是并不适合处理现实工程中的许多问题；“软计算”的指导原则是开发利用不确定、不精确和部分真实问题的容忍技术，以获得处理容易、鲁棒性高、求解成本低和实际融合性好的方法。Wu Zhongru 等 (1992 年)<sup>[33]</sup>、顾冲时等 (1996 年)<sup>[34]</sup>、马能武 (1997 年)<sup>[35]</sup>、徐洪钟等 (2001 年)<sup>[36]</sup> 将这些算法与渗流统计模型相结合，形成“软计算”模型，以解决渗流非线性问题并提高其拟合度和精确度；郭张军 (2006 年)<sup>[37]</sup> 将神经网络和小波分析结合，得到优化后的渗流统计模型，当小波网络的输入变量为  $h$ 、 $T$ 、 $p$ 、 $\theta$ ，就可以逼近水头、温度、降雨、时间等因素的影响，这样形成的网络结构比较简单，且便于分析和计算。结果表明，将此模型用于非线性渗流监控和预报，仍有较高的精度。研究表明，将上述软计算方法用于大坝渗流效应量监测的建模与预报，不必事先建立模型，可对符合 Darcy 流及不符合 Darcy 流的渗流场进行预测预报。但是，Szu H 等 (1992 年)<sup>[38]</sup>、Zheng Jun 等 (1995 年)<sup>[39]</sup> 学者认为小波网络存在初始化参数问题，参数初始化不合适，将导致整个网络学习过程的不收敛；还存在小波函数或尺度函数的最优选择问题；另外徐晓霞 (1998 年)<sup>[40]</sup> 指出的离散正交小波网络的复杂性和多维输入出现的“维数灾”问题，也期待进一步的研究。

地下水渗流分析多以线性的达西定律为基础，这是因为在大多数情况下，地下水渗流是满足或近似满足达西定律的，而且达西定律所表达的线性关系也使理论分析与数值分析较为简洁，然而修建在岩溶地区的堆石坝的大坝基础中可能存在强透水地质构造，渗流的雷诺数很大，渗流速度与水力坡度不再遵从达西定律，此时必须考虑惯性力的影响。柴军瑞 (2001 年)<sup>[41]</sup>、代群力 (2000 年)<sup>[42]</sup> 认为有必要进行坝基地下水非线性渗流分析。由于非线性渗流的复杂性，至今仍没有一个统一的公式来更好地描述这种流动，其中两个常用的经验公式模型为 Forchheimer 公式<sup>[43]</sup>，将其代入一般情况下三维空间渗流的连续性方程，即可得到非线性渗流公式。目前渗流数值分析常用方法主要包括：有限差分法、有限单元法、边界元法等，这些方法都建立于连续介质渗流理论之上。

有限单元法是一种较为常用的数值方法，它是古典变分法与分块多项式插值结合的产物，它的核心是对区域的离散化。1965 年，津克维茨 (Zienkiewicz) 和张 (Cheung) 提出有限单元法适用于所有可按变分形式进行计算的场问题，为该方法在渗流分析中的应用提供了理论基础。Leiws R W 等 (1987 年)<sup>[44]</sup> 将这一方



法用于模拟多孔介质中的地下水。国内不少研究<sup>[45-46]</sup>认为有限单元法是一种先进有效的数值模拟法,用于渗流分析计算时可部分替代模型试验,当结构物和地基形状不太复杂时精度相对较高,可方便地模拟多种外部条件的特点,通过不同时刻渗流场的刻画及其比较,可反映帷幕体的防渗性能及其潜在的变化。侯俊平等(2005年)<sup>[47]</sup>认为采用有限单元法必须查明坝基地质条件和帷幕体的形状、材料种类、性质和物理力学参数,关键是计算模型的建立、计算参数的选用和边界条件的确定,以及工程对于流场的干扰等。否则将因边界条件无法收敛而导致计算不能进行,或因计算结果与实际情况有很大的偏离而不可信。

地下水微观动态指水质特征,根据水质分析资料所隐含的信息(如随时间和空间的分布,及其差异性等),可以有效地揭示区内地下水水质演变所具有的示踪意义。杨光中等(2000年)<sup>[48]</sup>、宋汉周等(2002年)<sup>[49]</sup>指出通过分析坝基幕后地下水水化学特征及其与补给源之间的差异性,可揭示水-岩(包括帷幕体)系列间的相互作用,从一个侧面反映坝址渗流的宏观动态以及坝踵帷幕体的防渗效果及其时效。显然,建立一个合适的模型来解决这类问题是必须的。

1962年, Garrels 和 Thompson<sup>[50]</sup>首次提出一个海水中水溶相组分分布的模型(aqueous speciation model),定量地计算了水溶液中的主要离子和离子对的分布以及水溶液对不同矿物的饱和状态,为水文地球化学模拟建立了最初的轮廓;1967年 Garrels 和 Mackenzi<sup>[51]</sup>用观测到的水化学资料建立了旨在解释花岗岩风化作用的多个水-岩反应,这是反向地球化学模拟(inverse geochemical modeling)的基础;1968年, Helgeson<sup>[52]</sup>提出了正向地球化学模拟(forward geochemical modeling)的理论框架。之后 Plummer<sup>[53]</sup>等把反向模拟进一步发展和完善,使其研究内容更加丰富,其中又增加了同位素平衡(isotope balance)和水量平衡(water balance)方程,使其不仅能够分析水溶液矿物和气体之间的溶解与沉淀、离子交换、气体交换等各类作用,同时还能够分析各种水溶液的混合、蒸发和淡化以及同位素分析等多种内容。1991年, Plummer 等<sup>[54]</sup>又将计算天然水化学组分分布的计算机程序——WATQF 和早期的反向模拟软件 BALANCE (PARKHURST 等, 1982)结合起来,推出了有史以来功能最强大、研究内容最全面的反向地球化学模拟软件——NETPATH,能用来调查在某一系统的水文地球化学演化过程中所发生的化学反应;确定这些反应进行的程度;模拟系统中同位素演化;计算地下水的年龄;计算初始水与终结水中化学组分的存在形式和矿物饱和指数。在模拟过程中可以考虑矿物溶解与沉淀、离子交换、有机质的热降解、非全等反应、气体交换、同位素分馏与交换以及各种水溶液的混合、蒸发和淡化等多种作用。在国内,不少研究者对反向水-岩相互作用的机理及其水文地球化学模拟方法进行了有益的探

讨。郑西来等<sup>[55]</sup>最初将水—岩作用线性规划模型应用于含水层系统；随后陈芸<sup>[56]</sup>等对水—岩作用线性规划模型进行了较深入的研究和运用。曾溅辉<sup>[57]</sup>于1993年比较系统地论述了地下水系统地球化学模拟的基本理论、方法应用，存在的问题及发展的方向；李雨新<sup>[58]</sup>、王东胜等<sup>[59]</sup>采用化学热力学平衡法对地下水系统化学组分存在形式进行了计算，对水—岩化学作用热力学模拟作了基础性研究；郭永海<sup>[60]</sup>、艾瑶<sup>[61]</sup>、王广才等<sup>[62]</sup>先后采用质量平衡模拟方法对地下水演化中的水—岩化学作用进行了应用研究。周祖权等（2000年、2001年）<sup>[63-64]</sup>建立了饱和指数法模型，隶属于水文地球化学反向模型，并用确定性方法求解；童海涛等（2004年）<sup>[65-66]</sup>采用随机分析方法，即蒙特卡罗分析法（Monte-Carle）来对该模型进行求解。

含有化学场的多场耦合，又称为“水文—地球化学”耦合模型，吸引了学者广泛的研究兴趣，目前在各方面已有不少研究成果问世。水文—地球化学耦合模型主要由描述溶质迁移过程的对流—弥散偏微分方程、描述化学反应动力学过程的反应速率常微分方程，以及描述化学反应平衡过程质量作用和质量守恒关系的代数方程三个部分组成，因此在空间和时间上能够比较真实地刻画各种环境条件下地下水水溶组分的迁移过程以及迁移过程中不同组分及其含水介质之间地球化学反应引起的物质交换规律。1952年，Lapidus 和 Amundson<sup>[67]</sup>提出了一个类似于对流弥散方程的模型，揭开了地下水溶质运移研究的序幕。1954年，Scheidegger<sup>[68]</sup>将Lapidus的方程扩张到三维的情况，并在均匀空隙介质中、稳态流的条件下推导出了反映溶质运移的概率密度函数，同时考虑了溶质运移的水动力弥散作用，使溶质运移理论向前推进了一步。1956年，Rifai<sup>[69]</sup>在Scheidegger的研究成果的基础上又考虑了溶质运移时的分子扩散作用，并引入了弥散度的概念来表征空隙介质结构特性对溶质运移的影响，使溶质运移理论的研究更加深入。1960年，Nielson 和 Biggar<sup>[70]</sup>从理论上推导建立了对流弥散方程，系统地论述了对流弥散方程的科学性和合理性。

随着计算机的普及，数值求解方法和开发的软件也越来越多，Cederberg<sup>[71]</sup>研究了一维条件下Cd、Cl、Br的多组分溶质迁移问题，考虑了络合和吸附作用，其吸附利用表面络合作用中的恒定容量模式描述，采用了化学平衡模型MICROQL，建立了一维质量迁移模型TRANQL，给出了有限元解。Liu 和 Narasimhan<sup>[72]</sup>总结了地下水系统中模拟氧化—还原过程的几种方法，如电子守恒方法、假设电子活度方法、氧逸度方法等，开发了以氧化—还原作用为主的多物种平衡化学迁移模型DYNAMIX，该模型使用了局部平衡条件以解释液相和固相之间的热力学平衡和动力学反应，并采用氧化—还原对方法（Redox couples approach）描述氧化—还原过程。Rubin<sup>[73]</sup>提出一种新的解模拟平衡化学反应溶质

迁移方程的方法，称之为 FF 方法（The Feed Forward method），该方法可以提高计算效率，利用有限的计算机资源处理二维或三维野外实际问题。Yeh<sup>[74]</sup>对溶质对流—弥散方程与化学平衡方程间耦合的数学特征进行了精辟的分析，提出了以水相中的总分析浓度为初始因变量并在微分方程和非线性方程组间进行连续迭代的方法，使用了化学平衡模型 EQMOD。Kalatzis<sup>[75]</sup>成功地开发出一个用于 PC 机的二维模型 METLI，他把多组分系统概化为某种金属的三种主要物种，主要考虑了它们间的竞争吸附作用并利用了局部平衡假设；Rafela<sup>[76]</sup>认为模拟液相与固相间的化学反应对于溶质迁移的预报是非常重要的，在他所建立的二维模型中考虑了水相和吸附相，该模型在模拟计算中处理 100 个节点、1000 个时间步长只用了约 2 min 的 CPU 时间；Wilfried<sup>[77]</sup>提出的一维耦合模型 MCOTAC 考虑了络合反应、氧化还原反应、溶解沉淀反应这几种化学机制，有 C 和 FORTRAN 两种语言版本，并且正在试图把一维模型扩展为二维以应用于更复杂的系统—位于 Wellenberg 场址的瑞士中、低放射性废物库中地下水对反应池水泥侵蚀；Huiyings Shen 和 Nikolaos<sup>[78]</sup>开发的一维耦合模型中使用了改进的 DSA（直接代入法）耦合方法，这种方法不仅弥补了早期的一些缺陷，而且成功模拟了水相络合、表面络合以及沉淀溶解过程。Andreas<sup>[79]</sup>将模型耦合的方法归纳为一步方法和两步方法，重点论述了两步方法的高效性，并从数学理论上进行了详细的推导，证实该方法可用于包含动力学和平衡物种的复杂系统。Smith<sup>[80]</sup>等建立了一个饱和多孔介质的耦合模型，该模型除考虑了稀有金属的平衡物种、动力学反应和迁移外，还考虑了有机质的生物降解作用。Kenneth<sup>[81]</sup>曾以 Mo 元素为示踪剂，在砂、砾石潜水层中进行了迁移实验，他发现 Mo 元素的吸附量随水中的化学变化而变化，建立了一个反应溶质迁移的模型 PHAST，其中分别采用单位（one-site）扩散层表面络合模型和双位（two-site）扩散层表面络合模型来描述吸附反应，模拟结果表明，两者都能准确地模拟 Mo 元素的浓度分布。

我国有关这一领域研究的文献并不多见，比较有代表性的是钱云平<sup>[82]</sup>等所作的《沈阳市地下水  $\text{Pb}^{2+}$  的水文地球化学迁移模型》，其偏微分方程的推导类似于 Cederberg（1985 年）等的工作，耦合方法采用了 SIA 方法，主要考虑了水相络合及吸附作用，但对于吸附的考虑进行了简化，使用了线性吸附（Kd）方法，由于采用了水相组分的总溶解浓度作为初始因变量，因此，所采用的化学平衡模型无法处理溶解—沉淀反应。

坝基帷幕体中主要易流失的物质是钙，在软水或侵蚀性化学溶液长期作用下，帷幕体孔隙溶液中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  类水化产物会不断浸析出来，导致帷幕体孔隙率增大，材料性能下降，帷幕体内部微裂纹和微孔隙的产生、发展，增大帷幕体材料

的扩散性，又促进化学损伤的发展；从而使帷幕体材料和结构的性能劣化，帷幕失去防渗功能，因此研究帷幕体化学损伤机理，对于研究帷幕体在该环境条件下的工作性能和使用寿命具有理论意义。关于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  类水化产物侵蚀研究，主要是由 Gérard<sup>[83-84]</sup>，Pijaudier-Cabot<sup>[85-86]</sup>等早期发表的论文所推动。他们发展了很多模型，分别应用于固结钙和分解钙之间的化学平衡特征、作为钙浓度函数的材料扩散率、化学劣化在应力领域的影响、力学损伤对材料扩散性能的影响，并将钙的分解、扩散和力学损伤耦合在一起。阿里木·吐尔逊（2005年）建立了水-岩耦合作用模型，并将其应用于坝基含钙的矿物的交换及运移。

## 1.4 研究内容及关键问题

通过对坝基地下水宏观动态及微观动态的分析以及多场耦合作用模拟，实现计算数学、地球化学动力学、地球化学热力学、地下水动力学、计算机科学、地质学、岩土力学等多学科交叉，形成较完整的评价坝基帷幕体防渗效果的理论和方法体系，为充分了解坝基防渗性能衰减过程的实质和机理、定量分析长期运行条件下坝基帷幕体所表现出的衰减迹象及其原因、正确评价其衰减程度和发展趋势，以及对坝基稳定性和安全性可能产生的后果等方面提供科学依据。

### 1.4.1 研究内容

广义来讲，坝基及帷幕体的防渗性能衰减是坝基材料对大坝修建后坝基应力环境、水环境和化学环境变化的一种回应，而大坝运行环境条件下坝基中所发生的机械荷载作用以及水-岩化学作用过程正是导致坝基老化的根本原因所在。其中机械荷载作用是控制因素，但是它对坝基岩土体物理化学特性的影响主要表现在大坝运行的早期阶段，并且是短期的；而相比较之下，水-岩化学作用对坝基及帷幕体的物理化学特性的影响则是长期的，考虑到时间因素，它是坝基防渗性能衰减的主导作用。本书从这一点出发，首先，根据坝基地下水宏观动态的监测资料序列，采用军事上较为先进的多传感器数据融合理论和方法，修正坝基地下水宏观动态中的“异常”数据，以综合判断坝基帷幕体防渗性能的衰减程度；其次，根据坝基地下水微观动态，在前人研究的基础上，通过计算机高级语言 FORTRAN 的编程，改进基于化学热力学的饱和指数模型及其求解方法，以解释坝基帷幕体防渗性能的衰减机理；最后，依据多场耦合的基本理论，建立水-岩-帷幕体的多场耦合作用模型，使用 Comsol 软件，依靠其强大的模块开放性，对化学反应模块进行了二次开发，并结合渗流场、

溶质迁移场等,以揭示坝基帷幕体防渗性能的衰减过程。而机械荷载作用(损伤、断裂、蠕变、固结等)对坝基物理化学特性变化的影响,则不在本文研究范围之内。

坝基地下水宏观动态研究是检测大坝是否安全运行的重要手段之一,但对于不同的物理量(如扬压力、渗流量),采取不同类型的传感器进行采集,分别进行单方面的宏观动态特征分析,有时难以将各个评价指标协同起来,以致出现结果不一致,而难以准确地判断坝基及帷幕体的工作状态。因此如何将各传感器采集的数据进行有效融合,对地下水宏观动态做出客观评价,进而评价帷幕体的防渗性能,以判断其衰减程度,是本书研究的一个方面。

坝基地下水微观动态—水化学变量分析,能反映出地下水溶液与某种可溶性矿物之间的反应状态,而根据此类反应状态的动态特征可以揭示帷幕体防渗性能的变化。基于化学热力学基本原理而建立的饱和指数模型是定量解析水溶液饱和状态的重要模型。应该说,对传统饱和指数模型的研究还不完善,存在以下问题:

(1) 没有对计算活度系数的公式进行细化,因此往往计算出的活度系数与实际活度系数有一定的偏差,而活度系数计算的正确与否直接关系到饱和指数的计算是否正确。

(2) 没有对控制饱和指数模型循环迭代的阈值进行研究,以致可能引起模型的提前或滞后退运算,造成饱和指数计算值与实际可能存在偏差。

(3) 由于热力学数据的不完整,以往的研究并没有考虑  $\text{OH}^-$  及含有  $\text{OH}^-$  的络合物,然而在实际情况中,有时其含量能占有相当的比例,特别是在水流相对滞缓的情况下(如坝基幕后地下水),会形成强碱性溶液,  $\text{OH}^-$  及含有  $\text{OH}^-$  的络合物含量较多,显然,在这种情况下,若不考虑含有  $\text{OH}^-$  的络合物,计算出的饱和指数值与实际可能有一定的偏差。因此,如何改进模型及其算法,也是本书研究的另一个方面。

坝基水—岩—帷幕体间相互作用的多场耦合模型研究,根据渗水在坝基地质体中的渗流过程、水溶组分的迁移过程以及帷幕体与水化学作用过程之间的相互作用模式,在一定的假定条件下,将渗流模型、溶质迁移模型和地球化学模型加以耦合,通过数值求解比较真实地描述坝基帷幕体的物理—化学特性随时间的变化过程,以反映坝基不同部位、不同时刻水—岩—帷幕体间地球化学反应引起的质量交换量,判断坝基及帷幕体的孔隙性变化的程度、防渗帷幕体的钙溶蚀量,进而判断帷幕体的弱化趋势。

### 1.4.2 关键问题

(1) 正确分析坝基地下水宏观动态,是反映坝基帷幕体防渗性能是否发生衰减的重要手段之一。在实际情况中,坝基地下水宏观动态数据的采集,往往都是互相独立的,因此依据不同已知条件,如何通过多传感器及其观测信息的合理支配和使用,把多传感器在空间或时间上可冗余或互补的信息,依据某种准则来进行组合,即如何对相同类型传感器、同一时间内采集到的数据和不同类型传感器、同一时间内采集到的数据进行有效融合,以获得被测对象的一致性解释、描述和评价,需要进一步的研究。

(2) 饱和指数  $SI$  是反映坝址渗流水溶液中与某种矿物之间反应状态的最主要参数,而水溶液中络合物的存在对  $SI$  值有很大的影响,正确计算络合物的含量,可提高水-岩作用  $SI$  模型的计算精度。传统饱和指数模型的研究还不完善,还存在以下需解决的问题:如何对计算活度系数的公式进行细化,以提高计算结果的精度;如何选择控制饱和指数模型循环迭代的阈值;如何考虑含有  $OH^-$  的络合物;如何改进具体的算法等,是本书研究的另一个重要方面。

(3) 建立坝基水-岩-帷幕体相互作用多场耦合模型。如何以数学语言刻画渗水在坝基固相中的渗流过程、水溶组分的迁移过程以及帷幕体与渗流之间的相互作用过程,采用合适的数值求解方法,以反映坝基帷幕体不同部位、不同时刻液-固体间地球化学反应引起的质量交换量,定量判断坝基帷幕体孔隙性变化的程度、揭示帷幕体防渗衰减的过程等,也是本书研究的一项重要内容。

## 1.5 研究的技术路线

根据坝基防渗性能衰减过程,以数据融合、水文地球化学动力学和水文地球化学热力学基本理论以及多场耦合作用理论为理论基础,以坝基在整个大坝服役期限内防渗性能衰减过程为研究对象,把工程应用作为最终目的。

(1) 在坝基地下水宏观动态研究方面,采用军事上的多传感器数据融合方法,分别按照具体的条件,进行分类融合评判。对于同类同步多传感器数据,依据估值理论的最小误差均方差准则多传感器融合方法,首先从理论上证明采用误差均方差最小意义下多传感器数据融合的效果优于利用任意单个传感器进行估计的效果,进而分析坝基帷幕体的防渗性能。对于异类同步多传感器数据,采用基于 Bayes

理论的融合技术,对各个传感器所得数据的真实性进行判别,找出不同传感器数据之间的相互关系,建立一种新的传感器间的关系矩阵,从而决定对哪些传感器采集的扬压力和渗流量等监测数据进行融合,以揭示坝基帷幕体的防渗效果。可望融合后的数据能够消除融合前数据的矛盾性和不准确性,从而获得被测对象的一致性描述和解释。

(2)在坝基地下水微观动态研究方面,依据化学热力学的基本理论,编写计算SI值的FORTRAN程序,首先,扩展活度系数计算方程,将公式进一步的细化,分别依据离子强度的不同,采用Debye-Hückel方程、改进型Debye-Hückel方程、Güntelberg方程、Davies方程、WATEQ方程计算活度系数,使结果更为精确。其次,优化迭代过程阈值的选取,通过分析水化学数据误差的传递及其对饱和指数SI值的影响,选取较为灵敏的因子作为控制循环的阈值,计算方解石的饱和指数时选取 $\text{Ca}^{2+}$ 作为控制阈值,而计算白云石的饱和指数时,则选取 $\text{Mg}^{2+}$ 作为控制阈值。改进输出结果,根据热力学数据,在模型中添加了5个与含有 $\text{OH}^-$ 络合物相关的变量及方程式,在模型输出方面,与传统模型仅输出10种络合物相比,在改进型模型中实现20多种相关自由离子及络合物含量的输出。模型拟采用改进的牛顿公式进行迭代计算,以不放宽对初始值的要求,修正初始由于水化学分析造成的误差,而且提高运算速度和精度,将迭代速度由原来的二次改进为三次。因此,可以在空间上,建立沿坝轴线各监测点的饱和指数分布值,找出异常点;再针对饱和指数异常点,建立监测期内以时间为序列的饱和指数变化值,进而评价该异常点所在坝段的坝基帷幕体防渗效果及其时效。

(3)建立的坝基水-岩-帷幕体相互作用多场耦合模型,以数学语言刻画渗水在坝基固相中的渗流过程、水溶组分的迁移过程以及帷幕体与渗流之间的相互作用过程,采用有限元求解方法,比较真实地描述了坝基帷幕体的物理-化学特性随时间的变化过程,模拟结果反映坝基和帷幕体不同部位、不同时刻水-岩间地球化学反应引起的质量交换量,由此可以定量判断坝基及帷幕体的孔隙性变化程度、防渗帷幕体的钙溶蚀量,进而揭示帷幕体的弱化趋势和衰减过程。

根据本书的研究内容及研究思路,拟定具体的技术路线如图1.1所示。

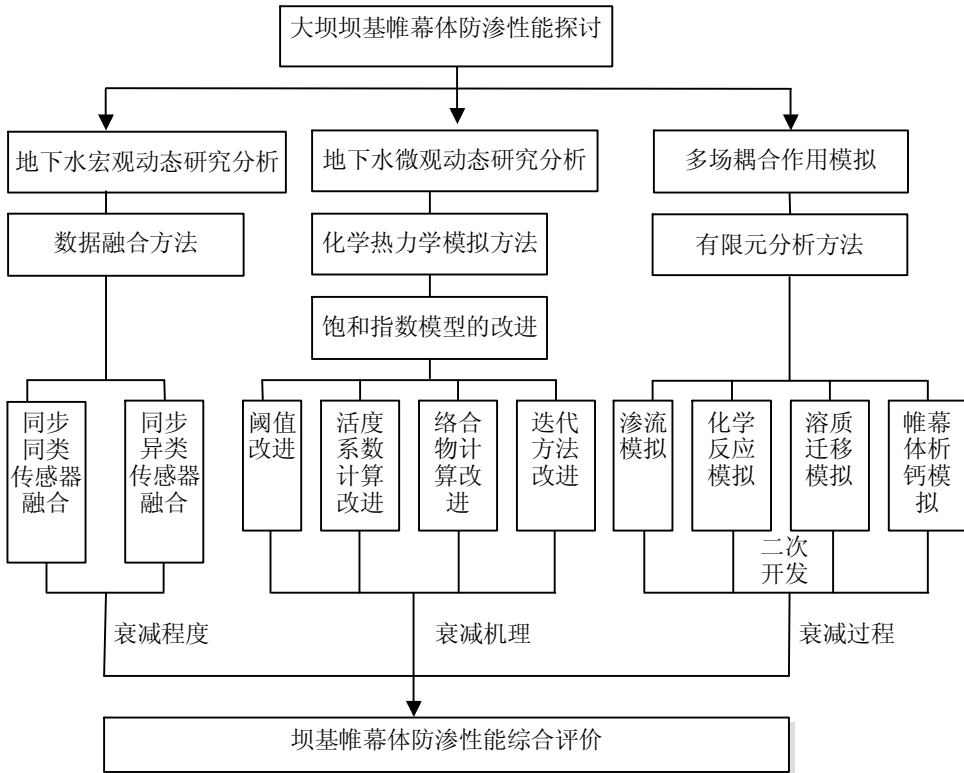


图 1.1 技术路线图



## 第二章 大坝帷幕体的基本特征以及 防渗性能的影响因素

针对本书研究的主要对象，本章首先论述了帷幕体结构类型及其材料的基本特点；其次对帷幕体的基本类型进行划分，将帷幕区分为封闭式帷幕和悬挂式帷幕；并依据帷幕灌浆排数的不同，将其分为单排孔直线式、双排孔形式、三排孔形式和其他布孔形式。最后从几个方面论述了影响帷幕体防渗效果的若干因素，包括地质因素、帷幕体自身的施工因素、环境水对其造成的水化学溶蚀作用因素等，旨在为后续章节（第3章～第5章）从多个方面研究坝基帷幕体的防渗性能提供有关背景方面的信息。

### 2.1 帷幕体的材料特征

形成帷幕体的灌浆材料主要可分为两类：一类是固粒材料，即固体颗粒的灌浆材料，如水泥、粘土、砂以及其他添加剂等；另一类是呈真溶液的化学浆材。

固粒灌浆材料有许多种，应根据灌浆的目的和坝基地质条件选择适用的灌浆材料。一般来讲，选用固粒材料，应具有下述特性：

（1）颗粒细。作为灌浆材料的首要条件是要求颗粒细，即具有一定的细度，以便能灌入到岩层的裂隙、孔洞中去，这是实现灌浆防渗的前提。如果材料的颗粒粗，不能进入受灌的裂隙或孔洞，则灌浆效果大为降低。一般来讲，浆材的粒径需小于裂隙宽度的 $1/3\sim 1/5$ ，灌浆才易奏效。

（2）稳定性好。固粒材料与水混合后，所制成的浆液，其颗粒在一定的时间内和一定的条件下（如搅拌、流动）在浆液中应能保持呈均匀分散的悬浮状态，使其成为均质的浆液，并具有稳定性好、流动性强的性能。这样，既有利于灌注工作，并保证获得良好的灌浆质量。

（3）黏结性强。用固粒材料制成的浆液，灌入到岩层的裂隙或空洞中，经过一定时间，应能逐渐凝结而成为坚硬的结石，起到填充、固结或防渗的作用。

（4）结石的强度高，并具有良好的耐久性。由浆液凝结而形成的结石，须具

有一定的强度、黏结力和抵抗地下水侵蚀的能力，以保证灌浆的效果及耐久性。

本书主要的研究对象为以水泥或由水泥、粘土、砂以及其他添加剂等灌浆材料形成的帷幕体，化学灌浆材料不在研究对象之内。

帷幕体结构的含义是一个广泛的综合概念，其中包括从帷幕体组成成分的原子、分子结构到帷幕体宏观结构在内的不同层次的材料结构。其中，按结构的复杂性划分为以下几个级别：①微观结构。微观结构是水泥石结构，由水泥凝胶体、晶体骨架、未水化的水泥颗粒和凝胶体孔组成。它是组成帷幕体各组分的最基本、最主要的结构。其化学性能主要取决于矿物成分以及水灰比，即水泥石结构中氢氧化钙、水合硅酸钙、水合铝酸钙、水合铁铝酸钙等的数量及比例。②亚微观结构。亚微观结构即帷幕体中的水泥砂浆结构，水泥砂浆结构除上述决定水泥石结构化学性质的因素外，孔隙率是反映此类结构特征的一个重要指标。它决定着帷幕体抗多种腐蚀的作用能力。

水泥是固粒灌浆材料中最主要和应用最广泛的灌浆材料。目前大坝基岩灌浆仍多以常规的硅酸盐水泥为主。此类水泥的化学成分及其含量见表 2-1。

表 2-1 水泥的化学成分统计

化学成分	最高 (%)	最低 (%)
氧化钙 (CaO)	66.93	66.01
氧化硅 (SiO <sub>2</sub> )	23.06	19.32
氧化铝 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.59	4.05
氧化铁 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.77	1.45
氧化镁 (MgO)	4.91	0.68

水泥加水拌和后，最初形成具有可塑性的浆体，然后逐渐粘稠失去塑性，但尚无强度，这一过程称为凝结。此后，强度逐渐增大，变成坚固的石状物体——水泥石，这一过程称为硬化。水泥的凝结与硬化是一系列复杂的物理化学过程。硅酸盐水泥遇水后，其矿物成分与水发生化学反应，生成新的化合物，主要为硅酸三钙 (3CaO·SiO<sub>2</sub>，简写为 C<sub>3</sub>S)，硅酸二钙 (2CaO·SiO<sub>2</sub>，简写为 C<sub>2</sub>S)，铝酸三钙 (3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，简写为 C<sub>3</sub>A)，铁铝酸四钙 (4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，简写为 C<sub>4</sub>AF) 等<sup>[87]</sup>。

在进行灌浆时，有时会碰到地层中有较大的裂隙或者溶洞，为避免浆液过大的扩散流失和节省水泥，在浆液中常加入砂，制成水泥砂浆或水泥粘土砂浆。砂应为质地坚硬的天然砂或人工砂。砂的粒度，也就是砂的粗细程度，对制成的浆液的性能有很大关系。一般情况是：砂粒粗一些，浆液结石强度较高，但浆液的