

地下工程地质灾害防控技术丛书

# 水砂突涌灾害机理、 特征及防治

李忠 计然 等著

SHUI SHA TUYONG  
ZAIHAI JILI  
TEZHENG JI FANGZHI



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

地下工程地质灾害防控技术丛书

# 水砂突涌灾害机理、 特征及防治

李忠 计然 等著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

水砂混合物突涌灾害是贯穿整个地下工程发展史的一种最常见也是危害最大的地质灾害。本书在研究了大量铁路隧道围岩中水砂混合物突涌灾害事故的基础上,分析了灾害发生的主要控制因素,建立了相关的工程地质模式,进一步明确了水砂混合物突涌灾害事故的发生、发展、变化规律,并基于常见的工程技术手段,提出了行之有效的超前预报和防治治理措施。

本书以实用为目的,以总结和推广新理论、新技术、新方法,介绍成功的工程实践经验为宗旨,既注重理论的阐述和分析,更强调理论结合实践的应用。

本书可供从事地下工程、水文地质、工程地质、矿山安全等方面的科研和工程技术人员阅读,同时也可供高等院校相关专业师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

水砂突涌灾害机理、特征及防治 / 李忠等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 4  
(地下工程地质灾害防控技术丛书)  
ISBN 978-7-5084-7442-7

I. ①水… II. ①李… III. ①地下工程—地质灾害—防治 IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第072656号

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 地下工程地质灾害防控技术丛书<br><b>水砂突涌灾害机理、特征及防治</b>                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 作 者  | 李忠 计然 等著                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (营销中心)<br>北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点 |
| 经 售  |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 印 刷  | 北京市兴怀印刷厂                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 13.75印张 326千字 1插页                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 版 次  | 2010年4月第1版 2010年4月第1次印刷                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 印 数  | 0001—1500册                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 定 价  | <b>48.00元</b>                                                                                                                                                                                                                                                                             |



凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

# 前言



水砂混合物突涌灾害是贯穿整个地下工程发展史的一种地质灾害。仅从全世界近 200 年和我国近 100 年的铁路修建过程看，水砂混合物突涌灾害是最常见也是危害最大的地质灾害之一，造成了巨大的人员和物质的损失。特别是近年来随着我国铁路、高速公路建设投资规模的不断扩大，地下工程施工的难度迅速增加，尤其是在工程地质情况十分复杂的西南部地区，隧道施工的难度和风险明显增大。由于当前对水砂混合物突涌灾害的防治预测系统不甚完善，对于各种地质信息的处理处于散乱和不系统状态，尚不能快速准确地对水砂混合物突涌灾害的防治和预测做出科学的分析和处理。因此，加强“地下工程大规模水砂混合物突涌灾害综合防控施工技术”方面的研究工作，为有效地防治和预测水砂混合物突涌灾害提供必要的理论依据已成为现在岩土工程界亟待解决的问题。

多年以来，现在国内外对于水砂混合物突涌灾害的研究主要集中在两个方面：隧道水砂混合物突涌灾害成灾机理及灾害特征研究和隧道水砂混合物突涌灾害探测预报技术的研究，其中都存在着诸如针对性不强、地质分析不够深入等方面的不足，因此本书就是为了解决这方面的问题，精心选取了 6 个最新发生的重大水砂混合物突涌灾害的工程实例，以水岩耦合理论为基础，综合工程地质学、水文地质学、岩石力学和岩土工程的研究方法，通过现场观测分析、室内工程地质模型理论研究等手段，建立水砂混合物突涌的工程地质模式，对于水、通道和围岩压力等控制水砂混合物突涌的主要地质因素，进行系统细致地分析，以探求水砂混合物突涌发生时地下岩体与水砂混合物间的水岩耦合关系，然后借助地学探测和现代信息处理技术，综合分析现场及测试中得到的各种关于水砂混合物突涌的地质信息，建立水砂混合物突涌的预测体系，为快速有效地预报和防治水砂混合物突涌灾害提供理论上的支持。

本书以实用为目的，以总结和推广新理论、新技术、新方法，介绍成功的工程实践经验为宗旨，既注重理论的阐述和分析，更强调理论结合实践的应用，本书的创新点有以下五方面：

本书研究了大量铁路隧道围岩中水砂混合物突涌灾害事故，分析了控制水砂混合物突涌灾害发生的主要控制因素，重点探讨了岩石组合、地质构造、地表水以及地下水与水砂混合物突涌灾害的内在联系，并在此基础上，详细解析了主要的六种常见重大铁路隧道围岩中水砂混合物突涌灾害事故，建立了相关的工程地质模式，进一步明确了铁路隧道围岩中水砂混合物突涌灾害事故的发生、发展、变化规律。并根据现在常见的工程技术手段，提出了行之有效的超前预报和防治治理措施。

(1) 通过详细解析分析研究常见重大铁路隧道围岩中水砂混合物突涌灾害事故实例，加深了对于水砂混合物突涌灾害机制的认识，提出了水砂混合物突涌灾害本身的规模、突涌物成分、形成地区是铁路隧道围岩中水砂混合物突涌灾害的分类原则，建立了包括：岩溶地区泥砂混合物突发型特大突涌灾害、富水区隐伏含水构造引发的特大型突水灾害、强风化岩溶地区稳定型特大突涌灾害、富水区非可溶岩石接触界限引发的中型突水灾害、断层破碎带引发的泥砾石型特大突涌灾害、岩溶陷落处引发的泥砾石型特大突涌灾害在内的六种常见的重大铁路隧道围岩中水砂混合物突涌灾害的工程地质模式。

另外，通过研究控制水砂混合物突涌灾害发生的工程地质因素，发现水砂混合物突涌灾害多发地区除了传统意义上的地表水、地下水丰沛的岩溶地区外，在许多非可溶性岩地区以及大气降水、地下水并不发育地区也可以发生，而且规模较大，如西北地区的关角隧道等。

(2) 通过研究水砂混合物突涌灾害的发展过程，提出了铁路隧道围岩中水砂混合物突涌灾害发生的基本条件是：物质—空间—动力“三要素”，缺一不可，这与工程地质学一直强调的岩石、地质构造、地下水三要素相互印证，即在自然的条件下，只要具备足够储量、足够压力的地下水，丰富的沉积物，通畅的各种成因（构造、风化、岩溶成因）的通道三个基本条件，再加上一定的触发因素（施工、地震等）就可发生水砂混合物突涌灾害。

(3) 通过研究发现水在水砂混合物突涌灾害发生过程中主要有两个方面五个重要作用：一方面水是水砂混合物突涌灾害中的重要组成部分，是水砂混合物突涌灾害中碎屑物的主要搬运载体，是水砂混合物突涌灾害主要动力的提供者；另一方面水也是水砂混合物突涌灾害形成空间和突涌通道的主要形成营力：水可以通过地下水对可溶性岩的溶蚀作用，形成一系列大规模的、

相互连通的、用以储存水砂突涌混合物和水砂混合物突涌灾害突涌通道的岩溶构造；在岩溶不发育地区或者非可溶性岩地区，地下水通过自身的压力，逐步渗入岩石中的构造裂隙中，对原有的构造裂隙进行改造和扩展，进而形成一系列的隐伏含水构造。由于是在这些构造在岩溶不发育地区或者非可溶性岩地区，使得水砂混合物突涌灾害具有隐蔽性、突发性和巨大的破坏性。

(4) 在书中还提到了含煤地层和岩溶构造的联系，分析了地下水、含煤地层、可溶性岩之间的关系，通过解剖典型的水砂混合物突涌灾害的案例（主要是云雾山隧道水砂混合物突涌灾害事故）发现：如果可溶性岩（石灰岩、白云岩的）和含煤地层相互组合出现时，在含煤地层的下部可溶性岩中会发育大规模的岩溶构造，这种构造受到区域地质构造、可溶性岩产状以及当地地下水分布情况的控制，这说明当地下水渗透流过含煤地层进入可溶性岩时，会带走含煤地层中的  $\text{HS}^-$ 、 $\text{HSO}_3^-$  等离子，形成比含有  $\text{HCO}_3^-$  离子更强腐蚀性的地下水，因此在含煤地层下伏的可溶性岩中形成发育的岩溶构造，其岩溶发育速度和强度均远远大于周围没有含煤地层的普通地下水活动区域。

(5) 通过总结施工现场治理水砂混合物突涌灾害的成功经验，提出了综合治理“三原则”即：①超前预报与地质工作相结合，探明成因、建立模型；②隧道排水与注浆加固相结合，因地制宜、排堵结合；③施工监测与质量控制相结合，控制灾害、保证安全。进行铁路隧道施工中的水砂混合物突涌灾害的超前预报工作，建立铁路隧道施工中的水砂混合物突涌灾害的工程地质模型、归纳出常见的铁路隧道施工中的水砂混合物突涌灾害的控制因素。

通过超前地质预报和施工地质工作，摸清铁路隧道施工中的水砂混合物突涌灾害的主要控制因素，建立工程地质模型，为下一步的施工治理工作提供理论依据。然后根据现场实际情况，采取适当的治理措施，是现在铁路隧道施工中遇到水砂混合物突涌灾害时最合适的方案。

本书共6章，分别为绪论、地下工程水砂混合物突涌灾害形成的控制条件、地下工程水砂混合物突涌灾害的工程地质特征、对水砂混合物突涌灾害的超前地质预报、隧道突水灾害的水文地质特征分析、地下工程水砂混合物突涌灾害的防治措施，各章的撰稿人如下：

第1章 李忠、王伟、计然、程树青、霍倩；

第2章 李忠、计然、程树青、王伟、王扬；

第3章 李忠、陈祥军、王伟、王扬、程树青；

第4章 计然、王伟、程树青、陈祥军、霍倩；

第5章 霍倩、王扬、王伟、陈祥军、程树青；

第6章 王扬、霍倩、陈祥军、程树青、王伟。

全书由李忠、计然统稿。

在本书的编著过程中得到了中国铁路工程总公司何振宁教授级高工的大力支持和帮助，何振宁教授级高工不但提供了大量宝贵的第一手资料，而且在本书的选题、整体思路设计、资料分析整理、整体结构调整、最终结论的形成各个环节都给予了十分中肯的指导和建议，在此向何振宁教授级高工表示衷心的感谢。

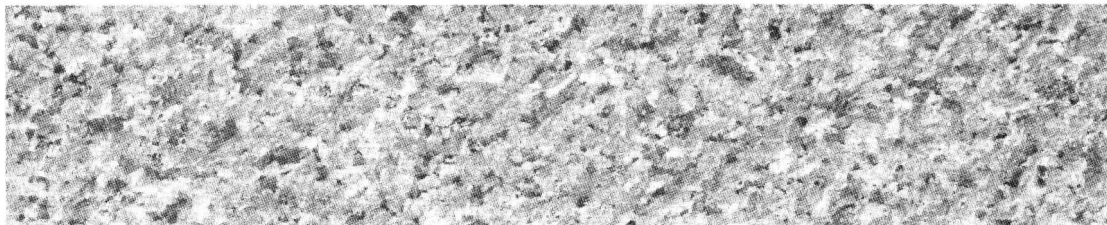
本书同时参考和借鉴了诸多专家的研究成果，所引参考文献都一一列出，在此向中国铁道建筑总公司以及这些文献的作者及对他们为此而付出的心血和劳动致以崇高的敬意。

由于作者水平有限，书中难免疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2010年3月

# 目 录



## 前言

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| <b>1 绪论</b>                   | 1  |
| 1.1 研究的意义                     | 1  |
| 1.2 国内外研究现状                   | 2  |
| 1.3 研究目标                      | 11 |
| 1.4 研究内容                      | 12 |
| 1.5 研究方法和研究路线                 | 13 |
| <b>2 地下工程水砂混合物突涌灾害形成的控制条件</b> | 15 |
| 2.1 地下工程水砂混合物突涌灾害的物质条件        | 15 |
| 2.2 地下工程水砂混合物突涌灾害的构造条件        | 18 |
| 2.3 地下工程围岩中水砂混合物突涌灾害的水的条件     | 20 |
| <b>3 地下工程水砂混合物突涌灾害的工程地质特征</b> | 24 |
| 3.1 灾害的分类                     | 24 |
| 3.2 岩溶地区水砂混合物突发型特大突涌灾害        | 25 |
| 3.3 富水区隐伏含水构造引发的特大型突水灾害       | 31 |
| 3.4 强风化岩溶地区稳定型特大突涌灾害          | 42 |
| 3.5 富水区非可溶岩石接触界限引发的中型突水灾害     | 48 |
| 3.6 断层破碎带引发的泥砾石型特大突涌灾害        | 51 |
| 3.7 岩溶陷落柱引发的泥砾石型特大突涌灾害        | 63 |
| <b>4 对水砂混合物突涌灾害的超前地质预报</b>    | 70 |
| 4.1 超前地质预报的工作流程及方法            | 70 |
| 4.2 超前地质预报的方法和步骤              | 71 |
| 4.3 长期超前地质预报                  | 72 |
| 4.4 短期超前地质预报                  | 83 |
| 4.5 超前水平钻                     | 86 |
| 4.6 施工地质灾害临近警报                | 89 |

|     |                          |     |
|-----|--------------------------|-----|
| 4.7 | 现场地质调查 .....             | 91  |
| 5   | 隧道突水灾害的水文地质特征分析 .....    | 95  |
| 5.1 | 隧道突水的主要地下水来源及特征 .....    | 95  |
| 5.2 | 地下水的补给、径流和排泄规律 .....     | 105 |
| 5.3 | 突水模式分析 .....             | 110 |
| 5.4 | 水对岩土体的作用机理 .....         | 111 |
| 5.5 | 典型突水模式的突水机理分析 .....      | 112 |
| 6   | 地下工程水砂混合物突涌灾害的防治措施 ..... | 130 |
| 6.1 | 地下水的防治原则 .....           | 130 |
| 6.2 | 隧道施工中水砂突涌的防治原则 .....     | 133 |
| 6.3 | 水砂混合物突涌灾害的防治措施 .....     | 133 |
| 6.4 | 水砂突涌灾害的应急响应 .....        | 161 |
| 6.5 | 水砂混合物突涌灾害的治理工程实例 .....   | 167 |
|     | 参考文献 .....               | 205 |

# 1 绪 论

当前中国的铁路建设随着国民经济的发展进入到了一个新的阶段,铁路隧道的建设规模达到了前所未有的高度,在建的铁路隧道长度约 5000km,到下一个五年计划,设计的隧道长度也达到 5000km,其中超过 10km 的特长隧道就有近 160 座,绝大多数隧道的施工地质条件都是极其复杂的,如宜万铁路(湖北宜昌—重庆万州)、西格铁路(青海西宁—格尔木)等线路的修建遇到了前所未有的困难,断层破碎带、软岩大变形等多种地质灾害层出不穷,特别是水砂混合物突涌灾害对铁路隧道的施工造成了极大的危害和影响,因此“地下工程大规模水砂混合物突涌灾害综合防控施工技术”的研究既可以保证铁路隧道的施工安全,又可以加快隧道的施工进度,减少地质灾害的发生,获取最大的社会和经济效益;同时也可以在地质灾害的理论研究方面作出有益的探索,填补理论研究的空白。

## 1.1 研究的意义

水砂混合物突涌灾害是一种贯穿整个地下工程发展史的地质灾害,仅从全世界近 200 年和我国近 100 年的铁路修建过程中看,水砂混合物突涌灾害是最常见也是危害最大的地质灾害之一,造成了巨大的人员和物质的损失。如日本的东海道干线旧但那隧道(全长 7.8km),自 1918 年开工后曾遭遇 6 次规模大小不同的水砂混合物突涌灾害,突涌总量达  $150000\text{m}^3/\text{d}$ ,造成了巨大的损失,致使施工周期延长了 16 年左右;前苏联贝阿铁路北穆隧道(全长 15.4km),开工后也曾遭遇 4 次规模大小不同的水砂混合物突涌灾害,突涌总量达  $25000\text{m}^3/\text{d}$ ,同样造成了巨大的损失。

我国由于水砂混合物突涌灾害造成的地下工程的损失也十分惊人。据不完全统计,仅铁路系统 2004 年以前建成的隧道中,80%的隧道在施工中遇到过不同形式、规模的水砂混合物突涌灾害,总突涌量在  $10000\text{m}^3/\text{d}$  以上者达到 71 座,占竣工隧道总数的 30%左右。其中成昆铁路沙木拉达长隧道(全长 6.44km),总突涌量达  $20000\text{m}^3/\text{d}$ ,瞬时突涌量最大达到  $36\text{m}^3/\text{min}$ ,曾造成隧道施工停工 32d 之久。京广线南岭隧道(全长 6.04km),曾发生 3 次规模大小不同的水砂混合物突涌灾害,突涌总量达  $12000\text{m}^3/\text{d}$ ,瞬时突涌量最大达到  $46\text{m}^3/\text{min}$ ,直接损失 48 万元。2002 年株六复线大竹林隧道发生大规模水砂混合物突涌灾害,突涌总量达  $16000\text{m}^3/\text{d}$ ,瞬时突涌量最大达到  $66\text{m}^3/\text{min}$ ,造成隧道施工停工 132d 之久,直接经济损失 455 万元。渝怀线关键性控制工程圆梁山深埋特长隧道,全长 11.068km,2002 年 9 月发生了大规模水砂混合物突涌灾害,当时,伴随着从掌子面传来的剧烈爆炸声,泥石流状物质瞬间充满了整个超前导坑,影响长度达 244m。之后又发生多次间歇式突涌,在清理过程中发现坑道内用于出砬的钢轨已经严重扭曲,本次地质灾害的发生给施工带来了巨大的影响和损失,造成隧道施工停工 33d,直接经济损失 201

万元。

总之随着我国铁路、高速公路建设投资规模的不断扩大,地下工程设计施工的难度迅速增加,特别是在工程地质情况十分复杂的西南部地区进行隧道施工的难度和风险明显增大。但由于当前对水砂混合物突涌灾害的防治预测系统不甚完善,对于各种地质信息的处理处于散乱和不系统状态,尚不能快速准确地对水砂混合物突涌灾害的防治和预测做出科学地分析和处理,因此,加强“地下工程大规模水砂混合物突涌灾害综合防控施工技术”方面的研究工作,为有效地防治和预测水砂混合物突涌灾害提供必要的理论依据,已成为现在岩土工程界亟待解决的问题。

## 1.2 国内外研究现状

现在国内外对于水砂混合物突涌灾害的研究主要集中在以下三个方面。

### 1.2.1 隧道水砂混合物突涌灾害成灾机理及灾害特征的研究

突涌灾害的形成与隧道所处的地质环境(包括构造及水文地质特征等)密切相关。为此,分析突涌灾害形成的地质条件是深入研究其成灾机理和规律特征的基础。王齐仁<sup>[1]</sup>将引起隧道突涌灾害的主要地质条件概括为以下两种:①含水、储水构造,主要包括向斜构造、断裂构造(尤其是活动性断层、逆掩断层、张性和扭性断层)、不整合面和侵入岩接触带等含水构造;②岩溶及地下暗河,岩溶地区因受其特殊的地质构造影响,往往具有高水压、富水、溶洞及断层的特征。因而在岩溶地区修建地下隧道工程,极易诱导突发大规模的突涌等工程灾害。钱学薄<sup>[2]</sup>从供水角度论述岩溶蓄水构造,将岩溶蓄水构造分为裂隙岩溶蓄水构造、断层岩溶蓄水构造、地下河及管道蓄水构造、层间岩溶蓄水构造、侵入体岩溶蓄水构造、膏溶角砾岩蓄水构造、覆盖岩溶蓄水构造和隐伏岩溶蓄水构造。

由于在岩溶地区修建地下隧道工程,极易诱导突发大规模的突涌等工程灾害,这已经成为隧道工程中突涌灾害的重要部分和主要原因。因此,相比在向斜构造、断裂构造、不整合面和侵入岩接触带等含水、储水构造等地质环境下隧道突涌灾害机理及规律、特征的研究而言,广大学者对岩溶地区隧道突涌灾害发生的机理及灾害特征进行了大量的更加深入的研究。

隧道涌水量的预测计算是水文地质学科中的一个重要的理论问题,同时也是隧道防排水设计和施工中一个亟待解决的实际问题,迄今为止尚无成熟的理论和公认的准确计算方法。而要预测岩溶涌水量,首先应该研究岩溶水的运动规律。

一般而言,岩溶化岩体是由裂隙发育的岩体演化而来,故其结构或多或少残留有隙岩体的特征。一般来说,岩溶化岩体为广义上的多重介质,其中既有岩块中的孔隙,分割岩块的裂隙,还有孔隙受岩溶化改造形成的溶孔、溶穴,裂隙溶蚀而成的溶隙,甚至还有宏观巨大的岩溶管道网络、溶潭、地下暗河、大厅等。由于岩溶化岩体中不同层次和不同规模的空隙和空间控水能力不同,地下水流态各异,王建秀等<sup>[3]</sup>按地下水在其中流态的不同,将岩溶化岩体分为快速紊流系统和慢流渗流系统。快速紊流系统在岩体中控水能力强,动态变化快,其运动多呈紊流状,其运动和传输类似于管道流体或地表水体,在岩溶

管道网络中运移的地下水可以采用混联管道网络系统中管道水力学理论进行模拟,而在地下暗河及转入地下的伏流中,地下水运动则具有地表水系统的特征。相对于快速紊流控水系统而言,缓慢渗流系统也在岩溶化岩体中广泛存在,由于其中地下水具有层流的特征,符合达西定律,只是渗透性和储水性优于一般裂隙岩体,可以采用一般的地下水渗流理论来描述和解释。

岩溶管道水运动与非岩溶地下水运动,无论是在流场地质结构方面,还是在地下水运动的水力学性质方面,都存在着极大的差别。樗木武<sup>[4]</sup>利用渗流理论对隧道二维稳定涌水的涌水量、涌水点进行了计算和预测。邹成杰<sup>[5]</sup>根据在岩溶地区多年的实践经验和理论研究,依据岩溶地下水赋存的形式和运动特征,将其划分为溶隙型、脉管型、管道型等三种类型,并提出了岩溶管道水汇流理论。Shuster等<sup>[6]</sup>依据渗透的类型,将含水层划分为管道流(包括发育完善的溶管系统)和弥散流(没有发育完整的溶管系统)两大类。以后的学者对这种二分法进行了改进。Smart等<sup>[7]</sup>将补给源和含水层存储特征作为附加的二维“坐标”和渗透性共同构成了一个三参数分类法。William B. White提出了一个概念模型,该模型的特征参数包括:地下水流域面积、补给区域面积、溶管容水量、基岩水力渗透性、裂隙水力渗透性、溶管系统响应时间、溶管—裂隙耦合系数、作为边界条件的地质环境。作者并对各个参数进行了深入研究。Jonathan B. Martin和Elizabeth J. Screaton<sup>[8]</sup>认为:高空隙率和渗透性岩溶地区,管道流和弥散流之间有大的水力交换,量化该量值对于建立概念模型和计算模型是至关重要的。作者对此进行了研究,并提出管道流和弥散流之间水力交换的控制因素主要有:弥散流与管道流之间的水头梯度、基岩渗透性、区域地下水位和管流梯度、管流与区域地下水位的相对高程。钟辉亚等<sup>[9]</sup>对金沙江下游峡谷段拟建电站坝基的岩溶问题进行了研究,对遇到的承压水特性及其形成条件进行了探讨,通过承压水系统的水文地质环境、介质环境和赋水空间的研究,认为该处承压水是在以白云岩为主的地层中以溶孔、裂隙为主要赋存空间的承压水,是相对孤立封闭的,与河水无直接的水力联系。William B. White<sup>[10]</sup>对岩溶含水层模型进行了评述,提出在建立地球化学、数学或计算机模型之前,首先要有概念模型。一个构成完善的概念模型可转换为一个数学模型,这个转换是岩溶含水层模型建立的核心问题。

基于岩溶水运动规律的特点,各国学者提出了大量岩溶涌水量的预测计算方法。何发亮等<sup>[11]</sup>总结出隧道涌水量预测计算主要有水文地质比拟法、水均衡法、井泉补给法等,但岩溶地下水运动的特点显然决定了隧道涌水量的计算不宜采用建立在层流理论基础上的水文地质计算方法。实践表明,水均衡法计算结果较符合实际。蒙彦等<sup>[12]</sup>较系统地总结归纳了目前涌水量的预测计算方法,将其分为以下几种:①近似方法,主要包括涌水量曲线方程外推法和水文地质比拟法两种;②专业理论方法,主要包括地下水动力学法、水均衡法、地下径流模数法、降水入渗法、地下径流深度法和地球物理化学法;③数值法;④随机数学方法;⑤非线性理论方法等。同时,作者结合各种方法在实际工程中的应用,对每种方法的特点和适用性进行了分析探讨,指出隧道涌水量的预测计算方法很多,目前较为常用的主要是专业理论方法,但其预测精度远远不够,究其原因主要是岩溶系统是一个复杂的开放的系统,是非线性的,目前人们对岩溶系统的认识还不是很完善。因此涌水量的预测应采用多种方法结合,多学科交叉的手段,以提高预测精度。

岩溶含水介质类型、岩溶蓄水构造与地下工程岩溶涌(突)水形式密切相关,王建秀等<sup>[3]</sup>将岩溶地区突涌水的模式分为渗(漏)水型、施工揭露充水岩溶管道网络型、施工穿越阻水断层型、水力劈裂型、底膨破坏型等5种模式。

张民庆等<sup>[13]</sup>通过对圆梁山隧道施工中揭示的5个溶洞突水的综合分析,总结出圆梁山隧道岩溶突水具有突发性、高压性、富水(泥砂)三大特征。根据开挖揭示的圆梁山隧道溶洞填充介质将突泥类型分为泥砂型、粉细砂型和黏土型。

何发亮等<sup>[11]</sup>将岩溶地区铁路长隧道岩溶地下水动力剖面分成垂直渗流带、混流带和深部缓流带。并总结了岩溶涌水的主要规律如下:①隧道施工期岩溶涌水主要是揭穿型和突破型,运营期主要是常年型和雨季突破型;②岩溶涌水补给来源为老水(1951年前的大气降雨)、新水(当年大气降雨)和现代水(近年大气降雨),故涌水主要以混合水的形式出现;③时间特性:突发性、滞后性、阵发性;④空间特性:长隧道所处岩溶地下水动力剖面分带位置决定了隧道岩溶涌水在空上的分布。此外,作者同时也分析了岩溶涌水的水量特征:隧道施工期,在开放型岩溶地区,涌水一般经历由大到小而后趋于稳定的水量变过程;在封闭型岩溶地区,涌水量由大到小直至枯竭。在运营隧道中,常年型岩溶涌水因雨季大气降雨造成的涌水量变化经历增大—稳定—减小并随着降雨的结束最终趋于常恒定的过程;突破型岩溶涌水量变化经历大—稳定—小并在降雨结束一段时间后涌水枯竭的过程。作者据26座岩溶地区长大隧道岩溶涌水调查结果,分析了岩溶涌水的含泥砂特性:岩溶涌水中多含泥砂,泥砂随着涌速度的下降沉积,严重者掩埋施工隧道、坑道、运输轨道、施工机具等设备。岩溶地区长隧道涌泥砂在时间上和涌水一样,具有突发和阵发特性,在空间分布上主要与隧道水岩溶管道、充填饱和泥砂物质的封闭岩溶洞穴相关。

刘招伟等<sup>[14]</sup>将各类岩溶对隧道工程的安全威胁抽象为岩溶水压力荷载,根据水压力作用在隧道工程的不同部位情况进行了突水类型的力学分析:板柱型突水、拱梁型突水、岩梁型突水,并对此进行了详细分析。通过岩溶突水类型力学分析可知,不论岩溶发育在隧道工程的任何部位,也不管岩溶突水的力学模型属于哪类,岩溶突水的机理在于岩溶水压力造成溶腔破坏的塑性范围与隧道工程开挖形成的塑性范围是否连通。因此,岩溶突水存在两个根本要素:一是岩溶突水存在薄弱处突发的关键部位;二是岩溶突水存在塑性范围连通的临界距离。并依据工程实例,根据岩溶溶管(溶洞)与圆形隧道在空间分布的主要关系,概化隧道岩溶突水的6种地质模式,构建相应的力学模型进行数值计算分析,分析研究了横断面交错模式及纵向断面交叉模式的岩溶突水规律。王鹰等<sup>[15]</sup>岩溶区深埋隧道高压突水的机理是高水头压力作用下,水力劈裂作用造成导水裂隙进一步扩展。岩体在开挖过程中的损伤更是造成突发性大规模严重涌水突泥的重要诱因。刘宝臣等<sup>[16]</sup>通过对辅助洞涌水点的分析,其岩溶涌突水机理主要类型有直涌型、冲溃型和劈裂型,其中冲溃型涌水的可预见性小而破坏性最大。张伟等<sup>[17]</sup>根据有关理论、工程类比和岩溶涌突水现象的观察和分析,将隧道岩溶突水主要分为溶隙型、脉管型、管道型、溶洞型、暗河型等5种类型,并对其特征和运动规律、涌突水几率及危害性进行了分析。并提出岩溶涌水与气温、降雨量和降雨强度、施工引起的应力分布等因素有关,通过数值模拟和理论分析阐述了岩溶突水的止水岩柱受拉破坏、裂隙剪切破坏、裂隙水力扩张、块体失稳破坏等突水机理。

与隧道岩溶突水灾害中岩溶水运动规律不同,孔隙—裂隙性水文地质条件下地下水运动的水力学性质及流场地质结构等方面都存在极大的差别,而与向斜构造、断裂构造、不整合面和侵入岩接触带等含水构造相关的隧道突水灾害中的地质条件大部分则属于孔隙—裂隙性水文地质条件。在这种条件下岩体介质中的地下水赋存并运移在裂隙结构面网络与岩基孔隙中,此时,隧道涌水是地下水在岩体介质中裂隙和孔隙中流动的结果,因此,对这类隧道裂隙孔隙围岩介质渗透性能的研究,成为预测计算隧道涌水量及其分析突水灾害发生机理及其规律的基础性工作。

研究地下水流动起源于19世纪下半叶的渗流力学。1856年法国工程师达西(Henry Darcy)通过大量的实验提出了线性渗流定律,为渗流理论的发展奠定了基础,从而揭开了渗流力学研究的序幕。与达西同时代的裘布依(J. Dupuit)以达西定律为基础,推导出地下水单向及平面径向稳定流公式,描述了特定条件下地下水的运动状态,裘布依公式对地下水力学的发展起到了重要的作用。1889年H. E. 茹可夫斯基首先推导出渗流的微分方程。此后许多地下水动力学与岩体力学工作者对渗流模型及其解析方法进行了广泛而深入的研究。

参考文献[18]根据国内外有关裂隙岩体介质渗流特性的研究,大致将该问题分为不考虑变形条件下裂隙介质渗流特性研究和变形条件下裂隙岩体介质渗流特性研究两个方面。

(1) 不考虑变形条件下裂隙介质渗流特性研究是从岩体单裂隙渗流特征研究起步的。早在20世纪40年代,前苏联学者在实验室用一对平行板模拟了单个裂隙中的水流,验证了单裂隙介质中地下水运动的立方定律,此后,Witherspoon(1981)、Moren(1988)等先后提出了粗糙面单裂隙中地下水渗流公式。在此基础上,裂隙系统渗流问题研究也日趋深入,主要涉及岩体裂隙渗流模型研究和岩体裂隙水力学参数确定等方面。

(2) 外界条件如应力的改变对裂隙介质及其网络有一定的影响,从而影响到其中的流体,引出裂隙场与应力场之间的耦合作用研究。由此引出工程岩体赋存地质环境各因素与渗流场耦合作用的研究。

20世纪80年代中期Barton对工程岩体地下水渗流场、应力场与温度场之间的耦合作用进行了初步的探讨性研究,针对工程岩体的稳定性和冻土地区隧道涌水问题进行了个别应用性研究。进入90年代中期,结合放射性废物处理问题的研究,Jing给出了相对较系统的岩体地下水渗流场、应力场和温度场的耦合作用的研究模型,但从模型的简化实用角度还研究不够。

我国对该领域的研究始于20世纪80年代末期,仵彦卿等<sup>[19]</sup>、王媛等<sup>[20]</sup>等学者进行了有意义的探索和研究,与国外研究情况相似,主要是侧重了渗流场与应力场之间、温度场与应力场之间的耦合作用研究。黄涛<sup>[21]</sup>对地下水渗流场、应力场、温度场之间的耦合作用体系作了较为整体系统的研究,发展了三场耦合环境下裂隙围岩型隧道涌水量预测研究,比较客观反映地下复杂的地质环境。毕焕军<sup>[22]</sup>通过对数值法预测计算裂隙岩体隧道涌水量原理的分析研究,把一个复杂的水文地质问题转化为几类较典型的水文地质问题进行分步求解,编制计算机计算流程框图。同时针对西康线秦岭特长隧道仙人岔断层涌水分析及数学模型的建立,预测计算了其涌水量,并与实际发生的涌水量对比,效果较为

理想。

黎良杰等<sup>[23]</sup>等根据煤层底板的层状结构特征,建立了分析底板突水的关键层(Ks)结构模型,根据断层性质,断层可以划分为张开型断层和闭合型断层。张开型断层的突水机理是断层两盘的关键层在水压作用下产生了过大的张开位移,并且在断层张开的同时,承压水对断层带进行渗透冲刷;闭合型断层的突水机理是断层两盘的关键层或关键层的接触部产生了强度破坏。施龙青<sup>[24]</sup>针对我国煤炭进入深部开采导致底板突水日益严重的现象,系统地介绍了国内外底板突水机理研究历史与现状,阐明了底板突水机理理论研究经过了相对隔水层、突水系数、“下三带”理论、原位张裂与零位破坏理论、板模型理论、强渗通道说、岩水应力关系说、关键层理论、“下四带”理论等发展历程并在其基础上,总结和评述了其实际应用价值和理论研究不足之处,指出我国在矿井底板水防治理论研究方面正经历着一个从实践到理论,再从理论到实践不断发展的过程,同时强调了底板突水机理是一个需要不断深入研究的难题,将非线性理论应用到该领域将是今后发展方向。

虽然煤矿开采过程中的突水问题与孔隙—裂隙性岩体中开挖隧道工程中的突水问题在工程背景、边界条件、灾害特征等方面有所不同,但其突水机理还有一定的相通性,因此,煤矿开采过程中突水的研究可以为隧道工程施工中的断裂、褶皱等含、储水构造引起的突水问题的进一步研究提供一定的参考和借鉴。

### 1.2.2 隧道水砂混合物突涌灾害探测预报技术的研究

隧道施工中不良地质体的预报技术最早应用于煤矿开采中,随着公路、铁路以及地下工程建设的飞速发展,地下地质灾害超前预报在隧道施工中的应用也越来越多。特别是近几年随着测试技术、测试仪器设备以及数字处理技术的发展,地质灾害超前预报为探测和预报不良地质体做出了重大贡献。隧道施工中不良地质体超前探测的发展已逐渐趋于探测方法的综合化、仪器设备轻便化、资料处理可视化和解译结果三维化,在不断提高超前探测精度和准确性的前提下,试图增大超前预报的距离,为地下工程防灾、减灾提供科学依据。

目前国内外采用的主要预报方法从探测的位置上可分为地面(洞外)预报与掌子面(洞内)预报,从预报的性质上可分为物探方法、地质方法、化探方法,从预报的距离上可将掌子面预报分为长距离预报( $\geq 100\text{m}$ )、短距离预报( $< 100\text{m}$ ,但小于30m范围精度高)<sup>[25]</sup>。由于掌子面超前地质预报相对地面超前预报有许多的优点,已知条件较多,精度相对较高,因此它是目前隧道超前地质预报的主要方法。以下在参考文献[26]~参考文献[34]的基础上分别介绍应用于掌子面预报的各方法及其研究现状。

TSP(Tunnel Seismic Prediction)隧道地震预报系统是20世纪90年代初瑞士Amberg测量技术有限公司开发研制的一套超前预报系统,该系统采用地震反射波原理,探测施工掌子面前方的地质结构及围岩地质状况。后来,Nishimastu在TSP基础上,开发了C-TSP(Continuous TSP),该系统利用隧道开挖时的每一次爆破,可对前方地质情况进行实时、连续的分析。TSP隧道地震预报法具有探测、解译距离远和分辨率高的优点,适合对施工隧道进行长距离的超前地质预报。该方法主要对掌子面前方不整合接触带、断层破碎带等界面性差异进行探测和判定,为隧道工程的快速掘进、支护材料的提前

准备以及灾害事故的有效预防提供可靠的地质资料与信息。

2002 年,李忠等从地质构造学理论、爆破地震学理论出发,就如何增加 TSP202 超前预报系统的探测距离进行了初步探讨。他们认为,若能根据现场具体地质情况来确定传感器最佳安装位置、选取合适的采样参数以及探测炸药种类和用量,则其探测距离可达到 200m 以上。他们还对如何利用 TSP202 超前预报系统探测搜索角问题进行了研究,指出当以一个较符合实际地质情况的搜索角去处理地震波信息时,不但会使信息量大大增加,而且对断裂构造的预测精度也会大大提高。并运用概率论等数学方法,结合自己的研究成果在新纳纳隧道超前地质预报中取得了一定的效果。

1994 年,曾昭璜在 TSP 系统基础上提出地震负视速度法。近年来何振起等也发表了类似的工作成果。该方法与 TSP 的不同之处是 TSP 法为多点激发、一点接收;负视速度法是一点激发、多点接收。曾昭璜认为:当反射面与测线直立正交时,所接收的反射波与直达波在记录图像上呈负视速度,其延长线与直达波延长线的交点即为反射面的空间位置。

水平地震剖面法(HSP)的观测方式与负视速度法略有不同,激发点和接收点布置在隧道两侧。在隧道的一个侧壁上规则设置检波点,另一侧壁上规则布置炮点,接收掌子面前方的反射信号,从而确定前方不良地质体的位置。资料处理过程与负视速度法基本相同,将反射记录按规律重排,读取反射波走时数据,计算反射界面位置。与负视速度法相比,水平剖面法的观测系统的横向展布较大,有利于提高速度分析和定位的精度,有一定的直观性,能确定主要反射界面,对于复杂地质条件的多反射界面处理较困难且缺乏商业化软件支撑。

刘云祯根据隧道超前地质预报和隧道质量检测两方面的需要开发出 TGP206 多功能隧道地质预报系统,该系统已在铁路和高速公路多个工程项目中试验和应用,并与 TSP203 在同工点、同测段、同震源激发条件下进行采集,经对比其成果资料、处理结果及地质判断和预报结果基本一致,开创了我国自主生产隧道地震超前预报系统的先河。

TRT(True Reflection Tomography)技术是由美国 NSA 工程公司近年来提出的一种新方法。该方法在结晶岩体中的探测距离可达 100~150m,在弱的土层和破碎的岩体中可预报 60~90m。TRT 技术的突出特点是在观测方式上实现了空间观测,资料处理方法上采用地震偏移成像。检波器和激发炮点布置在隧道两侧和掌子面上,最大限度地扩展横向展布,以充分获得空间波场信息。TRT 技术较 TSP 有明显的改进,在欧洲有成功的应用,如奥地利的 Blisadona 隧道和过阿尔卑斯山的铁路双线隧道等。

TST(Tunnel Seismic Tomography)技术是隧道地震 CT 成像技术的简称,是由中国科学院与云南航天工业总公司合作开发的,从 20 世纪末开始开发直到 2003 年完成的。其观测系统是采用空间布置,接收与激发系统布置在隧道两侧围岩中,也可布置在掌子面上,扩大横向展布。资料处理采用速度扫描、偏移成像、构造方向分析、走时反演成像等多种成像方法。该系统功能超过了 TSP 和 TRT,提高了速度分析和偏移顶位精度,图像直观,特别适合于地质构造复杂地区的隧道地质超前预报,代表了国内隧道超前地质预报研究的最新成果。

BEAM(Bore-Tunnel Electrical Ahead Monitoring)隧道电性预报法是德国 GEO-

HYDRAULIK DATA 公司推出的一种电法超前预报方法。该方法是一种聚焦电流频率域的激发极化方法,其最大特点是通过外围的环状电极发射一个屏蔽电流和在内部发射一个测量电流,以便使电流聚焦进入要探测的岩体中,通过得到一个与岩体中孔隙(空隙)有关的电能储存能力的参数 PEE 的变化,预报前方的岩体的完整性和含水性。其特点是所有的装置都安装在盾构挖掘机的刀头(测量电极)和外侧钢环(屏蔽电流)上,也可安装在钻爆法施工钻头的前方及两侧钢架上,随着隧道掘进,连续不断获得成果,适时处理得出掌子面前方的 PFE 的曲线,根据曲线推断预报前方岩体的性状及含水情况。

GPR (Ground Penetrating Radar) 地质雷达技术是利用无线电波检测地下介质分布和对不可见目标或地下界面进行扫描。地质雷达能发现掌子面前方地层的变化,对于断裂带特别是含水带、破碎带有较高的识别能力,在深埋隧道和富水地层以及溶洞发育地区,地质雷达是一个很好的预报手段。但是地质雷达目前探测的距离较短,大约在 20~30m 以内,对于长距离隧道的预报只能分段进行,同时雷达记录易受洞内机器干扰,探测分析中要特别注意波相识别,排除干扰。

“相控阵探地雷达”的设想是肖柏勋 1999 年提出的。2001 年,该雷达的大功率发射系统及其简易接收机研究成功。这种主频 300MHz,带宽 100MHz,发射功率 1.5kW 的新型雷达在黏土中穿透了 60m,现场测试还证明了其良好的聚束特性。目前,尚没有查到这种新型的相控阵探地雷达在隧道施工地质超前探测中取得应用的相关资料。

红外探水法是根据围岩红外辐射场强的变化值来确定掌子面前方或洞壁四周是否有隐伏的含水体。该方法在渝怀线圆梁山隧道中取得了较好的效果。充电法、自然电位法是在隧道涌水或小股渗流预报水源体的探测方法,在地下水埋藏不深、流速大、地形较为平缓的条件下,应用自然电场法可以确定地下水的流向。充电法是在水文地质调查中应用较多的一种人工直流电法,它可测定地下水的流速和流向。

掌子面地质编录预测法已拓展了其内涵,包括岩层岩性及层位预测、不良地质前兆预测、随机不连续面三维网络模拟、断层参数预测、条带状不良地质体影响隧道长度预测和不规则地质体影响隧道长度预测等,随着计算机图形图像技术的发展该方法已发展为掌子面地质信息数字图像编录识别技术。

虽然以上列举了很多方法,但在隧道掌子面超前地质预报的实用方法还比较少,大部分的方法仍处于试用和推广阶段,虽然已有许多成功文献报道实例,但仍有许多问题存在。由于能用的方法较少,使得隧道长距离超前地质预报目前主要采用 TSP 地震预报系统进行。由于隧道超前地质预报工作要求高、难度大、责任重、风险大,直接关系到工程的进度、成本、质量和安全。因此,目前广大科技工作者越来越倾向于采用地震方法与电磁方法相结合、物探方法与地质调查相结合的综合地质超前预报方法。地震方法运用地震波的运到学和动力学特性,能可靠地确定围岩的波速分布、反射面的位置、界面两侧围岩力学特性的差异,为分析确定岩性界面、构造位置、岩体的工程类别等工程地质问题提供可靠依据。电磁方法提供的电导率、电阻率剖面能很好地反映地下水地赋存状态。破碎含水带是超前预报最关心地问题,它是工程事故地诱因。物探方法要解决的是地质问题,只有通过地质分析的紧密结合,掌握地质现象的规律,物探结果的解释才能合理、可靠。上述即是综合预报方法的核心内容。