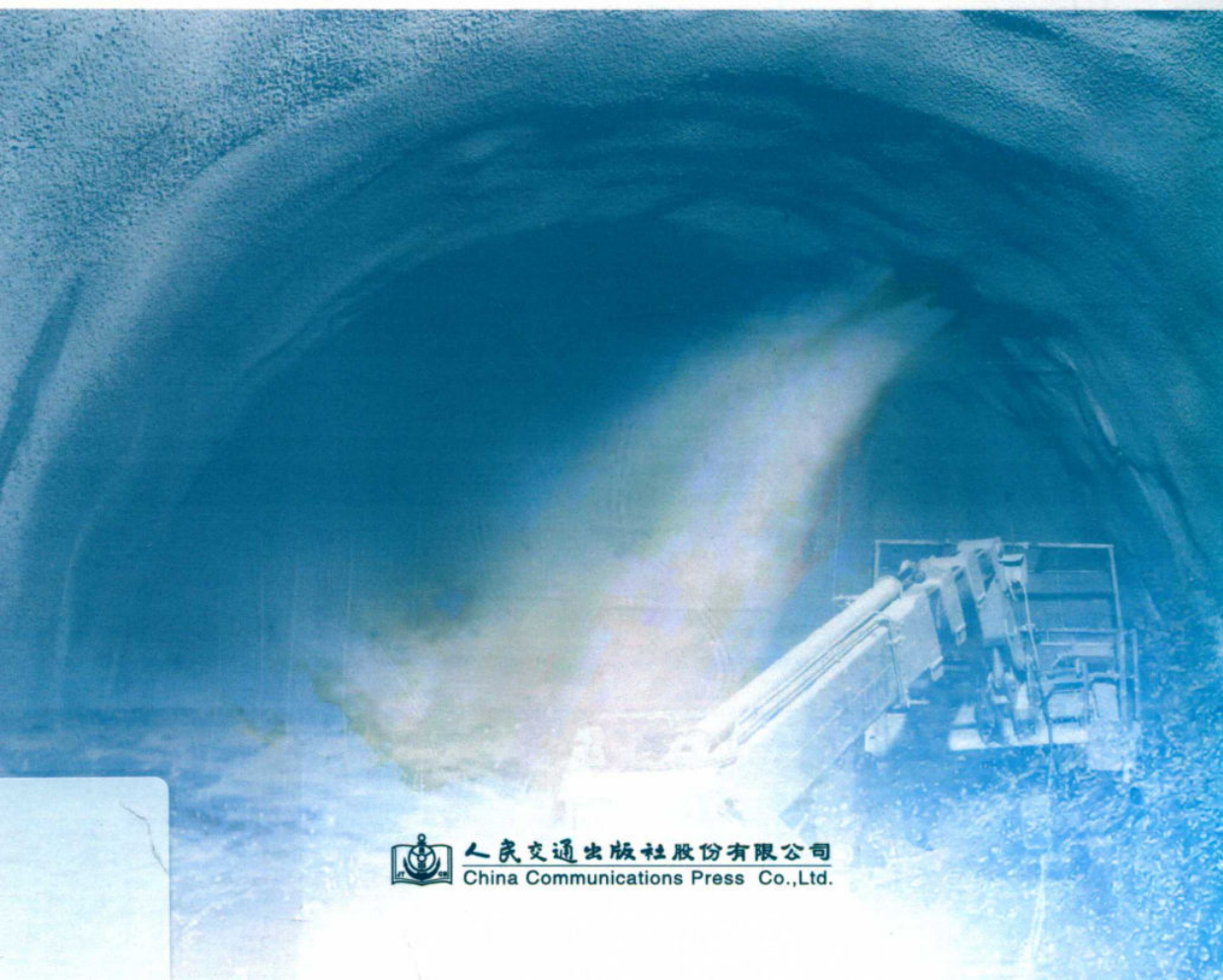


路 为 张孝伦 周宗青 张表志 贾 伟 / 著

隧道岩溶突涌水机理 与治理方法及工程应用



Mechanism and Treatment Method
of Water Inrush in Karst Tunnels
and Engineering Application



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

隧道岩溶突涌水机理 与治理方法及工程应用

/Mechanism and Treatment Method of Water Inrush in Karst
Tunnels and Engineering Application

路 为 张孝伦 周宗青 著
张表志 贾 伟



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书系统介绍了作者多年来在隧道岩溶突涌水机理与治理方法方面所取得的研究成果。主要包括:隧道岩溶重大突涌水灾害源类型及其赋存特征,强渗透弱胶结介质的渗透破坏演化规律与弱渗透强胶结介质的防突结构破坏判据及最小安全厚度,隧道岩溶突涌水灾变机理与前兆信息演化规律,基于防突结构多物理场信息实时监测的融合预警方法,岩溶涌水灾害注浆扩散机制和基于涌水通道精细化探查与分类注浆处治的治理方法等。

本书可作为高等院校与科研院所土木、交通、水利水电等专业教师与研究生的参考用书,也可供相关工程领域的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

隧道岩溶突涌水机理与治理方法及工程应用 / 路为等著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2019.3

ISBN 978-7-114-15370-9

I. ①隧… II. ①路… III. ①隧道工程—岩溶水—研究 IV. ①U459.2②P641.134

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 042472 号

书 名:隧道岩溶突涌水机理与治理方法及工程应用

著 者:路 为 张孝伦 周宗青 张表志 贾 伟

责任编辑:潘艳霞 尤 伟

责任校对:张 贺

责任印制:张 凯

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:7.75

字 数:186千

版 次:2019年3月 第1版

印 次:2019年3月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-15370-9

定 价:60.00元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

前 言

随着国家基础设施建设尤其是交通基础设施建设的飞速发展,数万公里的交通隧道工程正在或即将在我国西部地形和地质条件极端复杂的高山峡谷地区兴建,由于隧道在施工前期难以全部查清沿线不良地质情况,加上突发灾害成因与灾变过程极为复杂,导致隧道在施工过程中存在突涌水等地质灾害的重大风险。岩溶突涌水已成为岩溶地区隧道与地下工程建设中常见的地质灾害,受工程地质条件影响,岩溶涌水往往具有水压高、流量大、水源补给充足、水力联系极端复杂等特点,造成涌水灾害的治理困难重重。小型的裂隙及管道涌水不仅影响工程的正常施工,更会威胁工程的长期运营安全;而大型的突涌水灾害甚至会造成重大的人员伤亡、经济损失和严重的生态环境破坏。隧道岩溶突涌水灾害难以遏制的根本原因在于,突水灾害源赋存规律和灾变演化机制极为复杂,尚未形成系统清晰的认识,灾后注浆封堵机理与治理技术未成体系,难以对灾害的预防和控制进行有效的指导。因此,开展隧道岩溶突涌水机理与治理方法研究,成为复杂地形地质条件下及岩溶地区隧道工程建设中亟待解决的关键科学技术难题。

本书以岩溶突水机理研究为基础,依托湖北省鄂西高速公路齐岳山隧道、湖南省龙永高速公路大坝隧道等工程,采用理论分析、大比尺模型试验、数值仿真和现场试验等综合研究方法,系统研究岩溶突涌水机理与治理方法。通过揭示重大突涌水灾害源赋存规律、通过理论分析深入研究岩溶构造渗透失稳突涌水机理,开展施工扰动诱发突涌水的大比尺三维模型试验和数值仿真。基于突水前兆信息演化规律,建立突水多物理场信息实时监测与预警方法,构建远程监控系统平台,并成功用于齐岳山隧道。从治理角度划分突涌水类型,系统揭示浆液扩散机制与注浆封堵机理,建立基于涌水通道精细化探查与分类注浆处治的治理方法,并成功应用于大坝隧道岩溶突涌水灾害治理。具体包括:

(1)系统整理了我国近年来隧道重大突涌水案例,通过统计分析与归类划分,

提出了隧道岩溶重大突涌水灾害源类型及其赋存特征,揭示了断层内部结构水位地质和岩体岩性特征,并进一步提出了岩溶型突涌水灾害源的分布特征和充填介质特性,结合齐岳山等隧道进行了详细分析,揭示了依托工程重大突涌水灾害源的分布规律与发育特征。

(2) 针对岩溶充填性致灾构造,以强渗透弱胶结介质为研究对象,建立了充填介质渗流控制方程,系统分析了充填介质的渗透失稳演化机理。针对弱渗透强胶结充填介质,建立了充填体整体突出的力学模型及失稳判据,揭示了弱渗透强胶结介质整体突出的最小安全厚度。

(3) 针对岩溶不同位置发育情况,研究施工扰动和地下水渗透作用下溶洞突水的灾变演化机制和前兆信息规律。开发了大型三维组合式固液耦合试验平台和水压加载控制系统,具有水体和溶洞自溶生成与内封闭隔水等优势功能。开展了隧道施工扰动诱发岩溶突涌水的物理模型试验,揭示了掌子面逐步推进诱发不同位置溶洞突水的灾变演化机理,结合数值仿真结果,提出了溶洞突水前兆多元信息的演化规律及临突特征,为突涌水监测设计与临灾预警提供了理论依据。

(4) 以隧道防突结构为监测对象,针对隔水岩体渐进性破坏与充填渗透失稳两种典型突涌水模式,建立了基于防突结构多物理场信息实时监测的融合预警方法,开发隧道突涌水灾害远程监控预警分析系统。根据工程在勘察设计、施工、监测等方面工作的前期数据和特点,并综合考虑突水强度、报警位置及防控时间,提出了不同级别预警的对策措施和应急预案。

(5) 根据不同突涌水类型的灾害特征,从治理角度划分为节理裂隙型涌水、集中管道型涌水及大型岩溶结构突涌水等三种类型,通过现场监测试验揭示了注浆封堵过程中各个阶段注浆压力、注浆量与注浆速率的演变规律。结合岩溶涌水类型的不同特点,形成了基于涌水通道精细化探查与分类注浆处治的治理技术,在大坝隧道突涌水灾害治理中取得了良好效果。

作者

2019年1月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 本书的主要内容	9
第2章 重大突涌水灾害源类型及其赋存规律	11
2.1 隧道突涌水与灾害源类型划分	11
2.2 裂隙型突涌水灾害源赋存特征	12
2.3 断层型突涌水灾害源赋存特征	14
2.4 岩溶型突涌水灾害源赋存特征	15
2.5 典型突涌水灾害案例与地质分析	20
2.6 本章小结	36
第3章 充填介质渗透演化规律与防突结构破坏判据	37
3.1 充填介质渗透失稳破坏演化机理	37
3.2 充填介质整体失稳破坏演化过程	42
3.3 防突岩体破坏判据与最小安全厚度	43
3.4 本章小结	45
第4章 隧道岩溶突涌水机理与前兆信息演化规律	46
4.1 工程概况	46
4.2 新型流固耦合相似材料研制	48
4.3 三维可视化组合式突涌水模型试验系统	51
4.4 流固耦合模型试验设计与实施方案	56
4.5 隧道开挖过程三维数值模拟	63
4.6 本章小结	67
第5章 隧道突涌水灾害实时监测与预警方法	69
5.1 突涌水灾害前兆信息监测方法	69
5.2 多元前兆信息实时监测技术与方法	74
5.3 多元信息远程监测及工程应用	82
5.4 隧道突涌水灾害预警方法	86
5.5 本章小结	90

第6章 岩溶涌水灾害注浆封堵机理与治理方法	91
6.1 岩溶涌水灾害治理中存在的难题	91
6.2 岩溶涌水灾害注浆扩散机制	92
6.3 岩溶涌水灾害注浆治理方法	98
6.4 大坝隧道岩溶突涌水灾害注浆治理工程应用	100
6.5 本章小结	106
参考文献	108
索引	116

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着我国西部大开发政策和“一带一路”倡议的先后实施与推进,国家土木、水利、交通等基础设施建设蓬勃发展。《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030年)》将“复杂系统、地质灾害灾变形成及预测控制”作为优先主题之一。在隧道修建领域,高速铁路隧道技术体系日渐形成,隧道穿越复杂地质条件下安全快速施工技术不断取得进步。同时,大断面隧道、跨江隧道等特殊隧道的建设技术也达到了一个崭新的水平,呈现出了向地下空间开发利用领域快速发展的趋势^[1-2]。

铁路隧道领域的相关统计^[3-4]表明,截至2015年底,我国在建铁路隧道3784座,总里程达8693km;规划中的隧道里程达9345km;运营隧道总里程达13038km。其中,里程超过10km的长大隧道共计18座,总长245km。公路隧道领域方面,截至2015年底,我国运营隧道14000余座,长达12684km。地铁隧道领域中,共计43个城市开通了地铁,总长12000km。我国的青藏铁路关角隧道、兰渝铁路西秦岭隧道等重难点工程相继贯通,同时港珠澳大桥沉管隧道、引汉济渭供水工程、大瑞铁路高黎贡山隧道、四川米仓山隧道等包含隧道行业中诸多前沿科技的项目也在如期建设。我国铁路隧道情况汇总见表1.1。

我国铁路隧道情况汇总(截至2015年底)^[3]

表 1.1

设计单位	阶段	正线隧道 (座)	正线隧道 长度 (km)	长及特长隧道				枢纽及连接线隧道		数量 (座)	里程 (km)
				3~10km		10km以上		数量 (座)	里程 (km)		
				数量 (座)	里程 (km)	数量 (座)	里程 (km)				
铁一院	在建	468	1490	127	686	35	492	13	32	481	1522
	规划	316	1013	82	461	23	320	21	26	337	1039
铁二院	在建	1909	4577	351	1990	96	1368	83	109	1992	4686
	规划	1446	3600	325	1617	70	970	84	99	1530	3699
铁三院	在建	203	593	41	242	15	195	10	8	213	601
	规划	308	543	61	217	7	77	6	7	314	549
铁四院	在建	867	1470	107	550	28	408	21	28	888	1497
	规划	934	1612	119	608	24	348	77	60	1011	1672

续上表

设计单位	阶段	正线隧道 (座)	正线隧道 长度 (km)	长及特长隧道				枢纽及连接线隧道		数量 (座)	里程 (km)
				3~10km		10km以上		数量 (座)	里程 (km)		
				数量 (座)	里程 (km)	数量 (座)	里程 (km)				
铁五院	在建	95	183	16	72	2	25	4	12	99	195
	规划	598	1341	115	568	25	342	2	1	600	1342
中铁咨询	在建	111	190	12	49	3	71	0	0	111	190
	规划	599	1002	80	418	13	174	33	42	592	1004
共计	在建	3653	8503	654	3589	179	2559	131	189	3784	8692
	规划	4161	9110	772	3889	162	2232	223	235	4384	9345

我国大规模的隧道建设项目逐渐向地形地质极端复杂的西部山区与岩溶地区转移。在云贵川等西部山区分布着约占国土总面积 1/3 的可溶性岩层,随着国家大力发展基础设施建设,交通路网逐渐覆盖地形陡峭、峡谷深切、岩溶发育、地质条件复杂的西部山区,因而涌现出一大批具有“大埋深、长洞线、高应力、强岩溶、高水压、构造复杂、灾害频发”等显著特点的隧道工程^[5],强富水、强岩溶和高地应力所造成的突涌水灾害成为影响这些隧道工程建设的主要威胁之一。

近年来,由于隧道突涌水灾害所造成的人员伤亡、设备损毁、工期延误案例众多^[6-7],深长隧道重大突涌水灾害防控堪称世界级工程难题,如武隆隧道共发生突水事故 10 余次,造成经济损失超过 2000 万元;台湾雪山隧道遭遇 36 次突涌水灾害,诱发设备事故达 26 次,工程耗时 15 年。可见,随着隧道建设向“长、大、深”方向发展,岩溶突水已成为制约我国隧道工程建设的主要问题之一。

本书从工程地质学、岩溶发育学和工程力学等角度来揭示深长隧道重大突涌水灾害演化机理。在统计大量工程案例的基础上,针对不同突涌水灾害的成灾特点与孕灾模式归类划分,运用理论分析、模型试验等手段刻画灾害演变过程,分析突涌水灾害的动态演化规律。以隧道工程现场为依托,搭载远程实时监控采集灾害前兆多元信息,基于多元信息分析方法实现突涌水灾害的预测预警,最大限度规避突涌水灾害风险。同时,针对岩溶突涌水灾害特点提出相应的注浆治理技术,保障隧道工程安全施工。因此,开展隧道岩溶突涌水机理与治理方法的研究,可加深人们对隧道施工与运营中突涌水灾害的认识,研究成果可以为类似的工程项目提供借鉴和指导,对减少施工中的人员伤亡、降低经济损失、减轻环境破坏等具有重要意义。

一般来说,隧道建设涉及交通、水电、矿山,以及长距离调水等工程领域,特别是具有长洞线、大埋深、强岩溶及高水压等特点的隧道均是关键控制性节点工程。特别是随着国家“一带一路”倡议和“交通强国”战略的逐步实施,交通路网逐渐覆盖西部山区并延伸到国外,埋深 500m 以上、长度超过 10km 的深长隧道成为必然选择。如引水隧洞出现最大埋深超过 2500m,最长单洞 73km 的项目,均为世界之最。这对重大突涌水灾害演化全过程机理研究以及探索协同治理方法是一个严峻的挑战。

我国地下工程建设中仅 2001—2010 年间就发生了 97 起重大安全事故,其中突涌水灾害引发的地质灾害高达 77.3%。为了克服隧道突涌水灾害防控难题,科技部于 2013 年 1 月首

次提出了针对隧道突水突泥立项的“973”项目——“深长隧道突水突泥重大灾害致灾机理及预测预警与控制理论”,该项目的预期成果将在深长隧道突水突泥灾害的成灾机理、前兆信息监测预警和灾害控制方面取得理论、装备和技术上的突破,形成一套集灾害机理分析、灾害监测、灾害预警与灾害控制的体系,减少或规避重大突水突泥灾害事故发生,实现隧道岩溶突涌水灾害有效预警和治理。因此,针对突涌水灾害开展深入的致灾演化机理、监测预警与注浆治理研究,具有重要的科学意义与工程意义。

岩溶发育地质区段岩体强度较低,为突涌水灾害突水通道萌生贯通提供了便利。加之灾害源内部的含水体重力势能作用会在周边岩体形成塑性区,化学搬运侵蚀作用也会加剧裂隙发育,为突涌水灾害提供了先决条件。爆破施工开挖的强烈干扰会在隧道掌子面后方形成岩石松动圈,当岩体间的裂隙贯通灾害源与隧道临空面时,高压大体量水体会快速涌入隧道内。因此,隧道的人工扰动成为诱发突涌水灾害的直接因素。高地应力、高水压力及人工扰动的多场耦合作用复杂,揭示突涌水灾害发生机理是实现灾害防控的首要任务。

水压力、爆破扰动对岩体的共同作用诱发突涌水灾害的机理复杂,采用工程地质学理论对孕灾区域进行宏观判识,圈定突涌水灾害易发区段对隧道施工意义重大。运用理论分析及模型试验的多种方法还原灾变过程,为工程现场监测方案提供设计依据。通过前者的手段探寻地下水流动机制和防突结构岩体损伤破坏信息,量化的信息为隧道工程现场监测提供支撑。采用先进的信息监测技术,捕获隧道围岩体力场、位移场及声场的多元信息,搭载无线传输平台实现灾害远程监测与预警。针对灾害预警等级制定相应的调控机制,如对较大突涌水灾害险情提出了注浆封堵技术,以最大限度地保障隧道安全施工。

随着隧道埋深的增加与线路的延长,强富水、高承压和高地应力的深部环境造成的突水突泥威胁日趋严重,成为隧道安全建设的巨大挑战。因此,开展隧道岩溶突涌水致灾机理及预警与控制基础理论研究已成为国家基础工程建设的重大需求,对于减少和控制重大灾害发生、保障人民生命财产安全与保护生态环境,具有十分重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 突涌水灾害源赋存规律的研究现状

地下水的赋存规律对隧道突涌水灾害起到控制作用,因此,隧道突涌水灾害源赋存规律的研究可追溯到早期的找水实践。刘光亚^[8]、钱学溥等^[9]基于找水目的在蓄水构造方面开展研究,分别将蓄水构造类型进行了划分,并深入地研究了蓄水构造地下水的赋存规律,取得了丰硕成果,对隧道突涌水灾害源赋存规律的研究具有重要的参考和借鉴意义。

岩溶作为主要灾害源之一,其赋存规律对隧道突涌水灾害的研究至关重要。岩溶是地下水和地表水对可溶性岩石的物理破坏和化学侵蚀作用的总称^[10-11],岩溶作用和岩溶发育需要岩石的可溶性、透水性以及地下水的溶蚀性、流动性四项基本条件^[12-15],此外,气候环境、地形结构、生物和土壤环境等自然条件也对岩溶发育有影响。在地质构造特别发育的部位容易发生涌水,如断层及其影响带附近、向斜、背斜核部、岩层急性变化部位等,同时顺岩层及节理裂



隙延伸方向,具有良好导水和富水特性,极易发育大型溶洞溶腔和岩溶管道。

Chris Grove^[16]等认为岩溶地貌发育形成是地质构造和强烈溶蚀共同作用的结果,Pascal Fenart^[17]指出溶蚀地区岩溶含水层演化是流动机制耦合作用的结果。采用数值试验方法,Gabrovsk^[18]模拟岩溶发育的全过程,Randall C. Omdorff^[19]提出了岩溶发育的各个时期的形态特征。张之淦^[10]将岩溶含水构造定义为固结密实的岩溶含水层的组成部分,由于次生构造裂隙和溶蚀形态发育强烈,它们的透水性高于围岩,因而具备在含水层内汇聚和集中传输地下水的功能,并以广西来宾小平阳为例,归纳整理了断裂带、埋藏漏斗(竖井)、山前排泄带、碳质灰岩、白云砂囊、白云砂层、红层底砾、负基底型等8种岩溶含水构造,这是岩溶含水构造较为系统的研究成果。

隧道导水夹泥构造控制下的隧道突水突泥孕灾模式比较复杂,目前的国内外研究^[20]将其分为断裂控制型、向斜构造控制型、岩溶系统控制型以及多种模式复合型等。李利平等^[21]对隧道突涌水灾害的空间分布结构进行划分,其包括防突结构、灾害源和水源补给通道等。白明洲^[22-23]等统计分析深埋隧道岩溶突水灾害发育的地质条件,从突水灾害宏观地质孕灾性上进行了阐述。从工程地质学来讲,突涌水灾害中的含水致灾构造的孕灾模式,可以概括为断层破碎带与岩溶裂隙之间的多种组合方式,为溶隙、地下河、岩溶管道、结构面和裂隙等相互组合。李术才等^[24]根据地质结构类型不同划分了突涌水灾害赋存的地质体,研究表明裂隙、断层、地下河及管道、膏溶角砾岩等发育区段易诱发隧道施工过程中出现重大的突涌水灾害。

从岩体含水角度出发,何发亮等^[25]将隧道施工过程中可能遇到的含水体划分为四类并分析了其赋存特征:即岩溶充填水体、密集节理发育破碎岩体和构造破碎岩体含水体、地下向斜构造单元含水体、与含水构造单元相连的具有良好导储水特性构造破碎带含水体。含水体类别的划分和赋存规律的研究对隧道突涌水灾害源的研究提供了重要的借鉴意义。针对岩溶隧道,林传年等^[26]将蓄水构造形式划分为断层岩溶蓄水形式、地下河与岩溶管道蓄水形式、裂隙岩溶蓄水形式、溶腔溶潭蓄水形式、层间岩溶蓄水形式、组合型蓄水形式六种,蒙彦^[27]将涌水地质条件(即灾害源)分为断层破碎带、向斜盆地储水构造、岩溶含水体、不整合面和侵入接触面以及其他含水构造、含水体五种。左乾坤等^[28]根据突涌水水源、地下水的储水构造和隧道突涌水类型不同,分为非构造控制型和构造控制型两种。王树仁等^[29]根据圆梁山隧道岩溶管道(洞穴)与隧道在空间分布的主要位置关系,研究了突水的地质模式,并将其划分为两种六类模式,对岩溶隧道突涌水灾害源赋存规律的研究也有一定的参考意义。巴特尔等以贵州卡罗背斜为例,研究了裸露型岩溶石山地区典型储水构造地下水的开发利用,对于背斜汇流型储水构造内地下水开发具有指导意义。王建秀等^[30]基于钱学溥研究成果分析了裂隙岩溶蓄水构造、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、其他蓄水构造五种水文介质类型,并对其突水模式进行了水文地质分析。

深长隧道突水突泥的孕灾环境中各因素相互叠加、相互影响,其孕灾模式尚未系统建立。在隧道导水夹泥构造的结构模式方面,国内外相关学者已开展了相关研究工作,如我国湘西黔东地区岩溶富水构造曾被划分为褶皱富水构造、断裂富水构造、阻水富水构造和结构面富水构造四类^[31]。岩溶学家采用岩溶发生学、水文地质学等理论对广西、贵州及湖北清江流域等地区的岩溶发育规律进行了研究,提出了区域性含水构造类型及其赋存规律,对相应区域的隧道工程建设起到了较好的指导作用。但上述研究均以地区性成果为主,不能很好地判别深长隧

道导水夹泥构造的孕灾模式。

在隧道突水突泥致灾地质成因方面,大部分是对揭露型突水进行水文地质、工程扰动因素方面的分析^[32-34]。缺乏对深长隧道突水突泥致灾地质成因的理论研究,现有理论不能较好地解释其孕灾条件,对深长隧道工程突水突泥灾害的过程控制缺乏有效指导。在隧道突水突泥致灾判别原理研究方面,构造控水夹泥判别原理的识别在工程地质学、水文地质学研究领域仍未取得突破性进展。断层导水性和胶结充填状况的直接探测十分困难,研究成果多为定性的认识,原因在于内在裂隙结构模式与空间变异特征的复杂性和探测方法的局限性。现有的致灾构造判别理论主要有“新构造控水理论”、控制地下水运移的“优势面理论”等。这些理论未能很好地预测和解译大型突水突泥致灾构造的赋存属性,仍须针对典型不良地质构造的发育规律与地质成因、含水状态及其对突水突泥模式的影响等开展较为深入系统的基础理论研究。

1.2.2 突涌水灾变演化机理的发展与现状

对于地下工程特别是岩溶隧道的突水突泥灾害,其灾害源是致灾构造,其屏障是防突岩体结构。早在二十世纪初,国际上已开始隧道(巷道)底板隔水层研究,二十世纪四五十年代,匈牙利的韦格弗伦斯^[35]第一次提出隔水层厚度同水压之比的底板相对隔水层的概念和定义。苏联的B.斯列萨列夫^[36]第一次提出“安全水头”概念以及预测突涌水的简支梁公式。

在很长一段时间内,人们对突涌水灾害的研究更加关注工程底板突水灾害,而对围岩上覆盖松散承压含水层、溶洞水甚至大型地质暗河的认识不够,上覆大体量水体、充填体突出的灾变机理研究较少。直到二十世纪七十年代,隧道工程突涌水机理的研究才取得了较大进展,大型溶腔储水诱发的灾害逐步引起重视。Vietthuc^[37]分析了隧道中充填型岩溶管道突水的形成机理,并应用数值分析的方法对灾害过程进行了还原分析。李利平等^[38]开展了应力场渗流场共同耦合作用下断层活化损伤演化的研究,揭示了突水演化的力学机制。李连崇等^[39]通过对富水岩体的破坏模式进行深入分析,揭示了含隐伏断层煤层底板滞后突水机理。王德明等^[40]针对断层破碎带隧道突水突泥类型,利用大型模型试验还原了隧道地下水赋存环境,重现了灾变过程。突涌水机理的研究逐渐开始从灾变的发生条件和影响因素延伸到防突岩体结构。而后,针对不同类型的防突岩体结构,将神经网络、能量法^[41]、系统论^[42],以及突变论^[43]等非线性观点引入突涌水的灾变演化过程,研究其力学机理,但仍处于静力学研究范畴。

在岩体与水的相互作用方面,需探明岩体中地下流体的渗流规律。描述流体运动的流场方程有三种,以线性层流为主,忽略流体惯性力的Darcy方程;基于牛顿第二定律研究水流在巷道内的流动状态的Navier-Stokes方程;而对于非线性渗流性态的方程,可在基于Darcy方程上考虑流体黏性剪切应力项的Brinkman方程。邹成杰(1994)^[44]提出了岩溶管道水汇流理论。随着计算机计算能力的提高,越来越多的学者开始尝试通过建立理论模型来研究裂隙渗流问题,包括等效连续介质模型(王媛等人^[45];田开铭^[46];Oda^[47];周创兵和熊文林^[48];王媛等人^[49];段小宁^[50])、裂隙网络模型(王科锋等人^[51];宋晓晨和徐卫亚^[52];王恩志^[53];王洪涛等人^[54];杜广林等^[55];张有天^[56];王恩志和杨成田^[57])和双重介质模型(王洪涛^[58];周创兵和熊文林^[59];杨天鸿^[60];吉小明等人^[61])三类,其中,连续介质模型适合总体力学和渗流行为(田开铭^[62-63]),相对简单易算,裂隙网络和双重介质模型对实际流态刻画更接近实际,但计算复杂。



隧道开挖过程中,突涌水机理主要问题是应力和水压力作用下岩层渗透机制(李树忱等^[64])。海龙^[65]分析了岩体与流体的耦合机制。很多学者(Brace 等人^[66]; Patsouls 和 Gripps^[67]; Walsh^[68])认为渗透系数与应力成负指数关系。而流固耦合理论和模型更接近实际的结果(黎水泉和徐秉业^[69];杨栋等^[70];赵延林等^[71];赵延林^[72];任长吉和黄涛^[73];刘建军和薛强^[74])。

此外,李培超等人^[75]详细分析了流固耦合渗流的物理性质,得到了孔隙率与渗透率之间的关系,建立起了完备的饱和多孔介质流固耦合渗流数学模型。褚卫江等人^[76]推导并建立了变形多孔介质流固耦合模型。李璐等人^[77]基于有效应力原理,建立了黏性浆液在多孔介质中扩散的流固耦合模型,得到了孔隙率、应变率等的相互关系并实践验证。马田田等人^[78]提出了水力—力学耦合本构模型。

近年来,随着深长隧道数量的增多,强卸荷条件下的高渗透压和高地应力导致突水突泥灾变演化过程趋于复杂,高压水力劈裂型突水灾害逐渐增多。国内外学者应用损伤断裂力学理论^[79-80],研究了防突岩体结构内部萌生突水通道形成的启动条件、灾变演化路径及其控制参数,但未考虑施工扰动的影响。在突泥灾变演化机理研究方面,深部岩体突泥致灾构造仍未引起重视,特大体量充填体突出现象增多,研究者多从管涌、流土等角度建立充填介质的渗透失稳模型,但无法描述其灾变演化过程的流态转化。由于突泥灾变演化过程受控于致灾构造的充填体水力学特性、防突结构的力学特性以及施工扰动等众多因素,突水突泥通道的形成机理难以定性把握,突水突泥的发生时间和判据难以定量估算。因此,深部致灾构造与防突结构的稳定性及其破裂通道的动态形成机理是突水突泥灾变演化机理研究的关键理论难题。

1.2.3 突涌水实时监测预警的发展与现状

在地质灾害前兆信息演化规律及其临突特征研究方面,特大体量岩溶水体突出的前兆信息在地质、力场和地球物理场响应特征上均有明显反映,但大部学者侧重于从地质角度分析突水的宏观前兆信息,诸如隧道掌子面揭露的围岩信息、钻孔出水情况以及区段的水文地质特征等等^[81]。在岩体破裂渗流场方面,通过岩体水力学试验相继建立了岩体应力与渗流之间服从对数函数变化规律^[82]的基本关系。在岩体破裂温度场方面,国外利用温度天然示踪法建立地下水二维和三维热传导数学模型,分析了含水层中地形、渗透率和水文因素对地温的影响^[83],在水流沿倾斜含水层运动对围岩温度场的扰动影响方面也积累了一定的研究成果^[84]。国内外还通过利用电场、磁场和声场信息开展了大量的岩块室内试验研究,发现岩体电阻—应变曲线都存在一个岩石电阻最小值^[85],并且也获得了一些磁场和声场信息在岩石破裂过程中的变化特征,不过均未考虑渗流场的影响,但利用激发极化仪、瞬变电磁以及地质雷达等研究岩溶水体与不良地质体地球物理信息场响应特征,并开展现场试验,通过对相关仪器的改进明确了岩溶水体的识别准则及其前兆信息的解译方法^[86-87]。

突水涌泥通道中隔水阻泥结构承担着灾变体(水-泥-气)涌入隧道的最后屏障作用。其两端分别受压力 and 施工扰动破坏作用,属于动力学范畴。但研究过程中往往简化为静力学模型来推算失稳判据与最小安全厚度值,采用止水岩柱受拉破坏、裂隙水力扩张破坏、裂隙面受剪破坏以及关键岩块失稳等分析方法^[88]。隔水阻泥结构的稳定不但与自身性质、水压、地应力等岩体参数有关,还受爆破等动载的影响,尤其是滞后性突涌水灾害。但实际工程中动力失稳

准则参数的确定方法还未解决,尚不能在工程实际中真正预测和预警。

长期以来,突涌水预测预警问题是困扰我国隧道建设的难题。之前多采用水文地质学基本原理、环境同位素技术以及岩溶涌水专家评判系统相结合的方法定性评价,但不能作出定量分析,亦未能形成有效的预警理论与技术。但突涌水灾害的发生,受到孕险环境和致险因子的双重作用,两者随施工动态变化,唯有建立动态风险评价理论与方法^[89]才能实现突水突泥风险准确定量预测。

预测是预警的前提,其目的是通过对突水多元前兆信息的分析,得到涌水量、突水时间、破裂位置等关键信息,为准确及时预警提供判据。郭纯青^[90]等基于岩溶水文地质学的最新理论和国内外工程实践,提出岩溶隧道涌水量综合预测四步建模法;李楠^[91]等提出一种包含事件残差指标、敏感度指标和触发序列指标的震源定位可靠性综合评价方法对微震震源定位结果进行全面评价;巩思园^[92]等针对大规模台网布置组合优化问题,建立台网优化布置目标函数,提出微震台网布置方案求解模型。

在监测预警方面,刘传正^[93]将地质灾害预警工程分为空间预警工程和时间预警工程,提出了预警工程的技术工作体系和组织工作体系;马士伟和梅志荣^[94]根据隧道应力、围岩位移、涌水量、水压等因素,建立了相应的预警标准,并开发了隧道灾害预警系统;隋海波^[95]等构建了工作面底板突水安全预警系统,提出系统的逻辑结构和总体构架;侯冠慧^[96]等综合考虑工作面各种因素,并结合水文地质资料和监测数据,建立了基于BP神经网络和D-S证据理论两级融合的工作面突水预警评价模型;张雪英^[97]等运用组件式GIS开发模式,以ArcGIS Engine与Visual Studio 2010为开发环境,结合计算机Visual C#.net编程技术,开发了矿井突水预警系统,结合突水预测信息和实时监控,通过空间分析,为突水灾害预警工作提供了重要依据;高延法^[98]提出并运用典型突水案例加权类比的推理策略;白继文^[99]等结合隔水关键层理论及物探结果,确定了监测预警时间域与空间域,得到了突水多元前兆信息的临界点,建立了判断准则,实现了在线监测预警。靳德武^[100]等基于光纤光栅和无线传感技术建立了适用于煤矿突水的监测系统,实现了监测数据的实时性,并解决了无线传输难题,推动了隧道监测预警技术的进步;葛颜慧和李术才^[101]等通过建立隧道突涌水灾害预测预警体系,提出了四色预警理论,并利用FLUENT软件,探究隧道突涌水演化规律,以达到预警目的并指导灾害发生后人员和设备的撤离路线,保证施工过程中的生命、财产安全。

由于隧道施工过程中的复杂性,多元前兆信息获取困难,受环境因素干扰过大,这成为及时有效预测预警亟待解决的难题。而在预警机制方面,预警指标体系尚不完善,四色预警以及风险动态预警模型与现场实际无法完全吻合,预警方法的各个环节也无法达到一体化,导致预警工作的精确性和高效性得不到保证,致使灾害时常发生。另一方面,传统预警方法通常是针对某个物理量的变化趋势而进行预警,其结果往往会造成漏警和虚警,然而,突涌水灾害是各个因素相互耦合的结果,具有极强的不确定性和复杂性,在实时监控的基础上,必须对各个信息场进行融合分析,建立隧道突涌水远程监控预警平台,为以后突涌水的防控发展奠定基础。

近年来,一些新的预警技术革新了传统预警方式,如GIS、DDE、GPS以及卫星通信等技术,通过远程无线传输,极大地提高了监测预警的实时性和有效性。对于隧道突涌水灾害的预警,将岩溶突水的地质前兆信息、围岩力场信息和地球物理场信息有机结合起来,分析各场信息的内在联系及其突变特征对突水预测预报的有效性,建立可行的突水前兆信息监测理论与

方法;掌握隔水阻泥结构突涌水破裂通道形成过程中围岩应力、位移和渗流多场信息的演化规律,提出其动力失稳的启动条件、演化模式与破坏形态,最终建立隔水阻泥结构动力失稳启动、状态演化与破裂口形成的分析方法,有效确定突水动力判据与安全厚度,是实现突水突泥灾害实时监控和预测预警的关键所在。

1.2.4 突涌水灾害协同治理的发展与现状

在地下施工过程中,由于工程地段内部地质环境复杂多变,且具有一定的隐蔽性,以目前的施工勘查技术很难在施工前将其地质情况全部查清。因此,在建设过程中会遇到很大的挑战,其中突涌水是地下施工的主要灾害之一,严重威胁着地下工程建设的安全,弄清其灾害成因成为地下工程施工灾害防控措施决策的基础,其综合协同治理尤为重要。

在突水突泥灾害的综合控制理论方面,靳德武等^[102]总结了众多国内外研究学者在煤矿突水灾害的防治技术的新进展,李术才等^[103]针对地下工程中面临的重大突涌水灾害治理难题,结合工程现场突水治理实际验证理论分析了注浆封堵技术的可行性。徐颖等^[104]以碳酸盐岩隧道工程为背景提出了突水机制及风险规避方法,为灾害防控减灾提供了借鉴。张民庆等^[105]提出按“注浆加固、排水减压”原则,采取“注浆改良+加筋锚固+超前管棚”方式治理。耿萍等^[106]根据隧道穿越富水断层区段极易发生突涌水灾害的现象,通过采用离散元方法,模拟了富水断层在不同倾角下,隧道开挖所引起的突涌水的全过程,并在模拟过程中对隧道周围岩体的裂隙发育、突水量进行追踪和统计,得到了涌水通道的形成过程,揭示了断层倾角的影响,提出了富水断层倾角越小,隧道与断层的垂直距离越小的地质情况下,越容易发生突涌水破坏,且突涌水多集中在掌子面底部位置的结论。周军伟^[107]以白云山隧道为依托,提出了利用迂回导坑对隧道突涌水地段进行横向注浆及设置横向管棚,并结合正洞内全断面帷幕预注浆和大管棚,对该段进行了注浆加固的治理方法。其实突涌水灾害的治理技术最主要的手段是水源探测、疏水降压和注浆堵水,其中水源探测是决策依据,疏水降压和注浆堵水是控制方法^[108]。

世界各国的地下工程专家对治理突涌水灾害进行了大量的研究,提出了“防、排、截、堵相结合,因地制宜,综合治理”的治理原则,其中“堵”即通过注浆形成防渗结构,封闭外水水源;“截”即通过防渗帷幕来进行截水;“排”即设置排水孔、排水幕、排水廊道等来进行排水。要避免单纯“排水”,即在隧道附近打泄水孔,排掉施工区域附近的地下水,使施工区附近地下应力处于无水压力状态,破坏地下水平衡,造成地下水位的下降,周围地表沉降,带来干旱等严重的环境问题。目前,国内外学者多针对灾害发生前的“防”和灾害发生后的“治”两个方面开展了相关研究,并取得了一定的研究成果^[109-110],但鲜有学者开展突水突泥等灾变过程的“控制理论”研究,主要因为不同孕灾模式下的突水突泥灾变演化过程关键控制因素及其相应的控制方法尚不确定,难以建立相应的决策模型。在隧道突水突泥“堵、排”理念及控制理论方面,从传统的“封堵”和“疏排”到现阶段的“以堵为主、适量排放、堵排结合”,很少从环保方面考虑对水资源的保护,造成了地下水资源的浪费和生态环境的破坏。注重水资源和生态保护的突水突泥灾害协同治理理论和方法尚属空白。

在注浆控制理论研究方面,目前国内外学者在渗透注浆、裂隙注浆、压密注浆、劈裂注浆等浆液扩散理论和机理研究方面均取得了一定进展^[111]。在渗透扩散理论方面,Karol、Raffle、

Maag 等^[112]通过研究,得到了浆液扩散范围受注浆量、压力及时间影响的函数关系;在压密扩散理论方面,Adel M. El-Kelesh^[113]利用圆孔扩张理论模拟浆泡与土体间的接触来描述压密注浆过程。在注浆加固机理方面,从加固体的细观角度研究注浆加固作用,如杨米加^[114]等建立了以损伤力学为基础的注浆加固本构模型。

在注浆应用于实际工程的二百年里,注浆技术和注浆材料的发展对其的推动作用不可忽视。按照不同的标准,注浆技术有很多分类方法,每一种方法都是应对特殊的施工要求而诞生的,作为最重要的注浆设备,注浆泵的各项参数指标对注浆的应用情况也有很关键的影响。虽然我国注浆技术起步较晚,但发展却突飞猛进,尤其进入二十一世纪以后,注浆工艺被广泛应用于地下工程之中,注浆材料作为另一项重要指标,其同样有很多区分标准,且不同材料可应对不同工程情况。

而注浆理论落后制约着注浆技术的发展,注浆理论大多建立在假设条件之上,没有理论基础作为支撑,而注浆技术的发展多是基于经验而不是先进的理论,在选择工艺、材料时,多是以经验为判断,技艺的改进也是因为工程的需要,而不是理论的指导。而且应对复杂的地质情况,也鲜有注浆理论作为支撑,这也是今后注浆技术发展所要面对的一大问题。

为应对这一情况,许多高校和学者已经开展了一系列的注浆仿真模型试验,通过更加直观的方法,初步建立了简化的注浆扩散理论模型,深入研究注浆的扩散与加固机理,以发展注浆理论。如煤炭科学研究院自主研制的圆管型等隙宽单裂隙注浆试验台;中国水利水电科学院设计的平板型注浆试验台;东北大学通过自主设计的槽形扁圆柱状试验台;中国矿业大学自主研发的大型多功能竖井模拟试验台和单裂隙注浆模拟试验系统^[115];山东大学研发的大型平板裂隙动水注浆模拟试验系统^[116]等。

但以上研究均针对静水条件下的超前预注浆和岩体、土体的防水及加固,并未考虑深长隧道的复杂动水环境。动水注浆方面,山东大学和中国矿业大学初步开展了单裂隙条件下的动水注浆扩散及封堵模型试验^[117],但未涉及三维条件下的动水环境和其他含导水构造。动水注浆理论总体发展不成熟,还无法对动水条件下的浆液扩散、运移和封堵过程进行合理分析,尚未建立针对不同孕灾模式和灾变演化阶段的注浆封堵、加固与效果评价理论模型。目前,在针对突水突泥灾变演化过程的注浆控制理论研究方面,国内外尚属空白。考虑水资源和环保生态效应,建立疏水泄压、注浆堵水和岩体结构加固于一体的协同控制机制和动态防控集成理论,是深长隧道突水突泥防控的基础和关键。

因此,迫切需要对隧道突涌水灾害多元信息综合预测预警理论和灾害控制理论与协同治理方法进行研究,建立演化过程控制的机理与方法。

综上,尽管国内外研究人员在隧道工程突水突泥等突发性地质灾害预警与防治基础理论研究方面取得了一定进展,但许多重大理论问题和关键技术问题尚未突破和解决。

1.3 本书的主要内容

(1)第2章结合大量岩溶隧道突涌水灾害案例,根据灾害源的地质结构形式、灾害规模和致灾特性的不同以及突涌水灾害发生的频率,将灾害源类型划分为裂隙型、断层型、岩溶型三

种,并选取典型案例对三种类型的突涌水进行了分析。裂隙型灾害源以涌水为主,涌水范围大,致灾性弱;断层型灾害源突涌水携带突泥,致灾性强;岩溶型灾害源在高压水作用下也极易发生大规模突涌水灾害。

(2)第3章针对充填介质渗透失稳破坏,分析了充填介质渗透率演化规律,推导了颗粒流失条线下的渗流控制方程,总结了强渗透弱胶结介质渗透失稳破坏及弱渗透强胶结充填介质整体失稳破坏两种典型突水类型的破坏过程,建立了充填型致灾构造整体失稳破坏的力学模型,提出了相应的破坏判据与最小安全厚度计算公式。

(3)第4章选用六种土工试验材料配制了试验所需的流固耦合相似材料,研发了大型三维组台式固液耦合试验平台和水压加载控制系统,开展了隧道施工扰动诱发岩溶突涌水的物理模型试验。通过对比三种不同工况下的模型试验结果,揭示了掌子面逐步推进诱发不同位置溶洞突水的灾变演化机理,结合数值仿真结果,提出了溶洞突水前兆多元信息的演化规律及临突特征,为突涌水监测设计与临灾预警提供了理论依据。

(4)第5章提出了远程监控预警平台搭建的设计原则,制定了重点区域监测布控方案,并以齐岳山隧道突涌水为例,建立了远程监控预测预警方法。根据地质信息、围岩信息和施工信息组成的多元信息进行分析,提出了隧道内突涌水灾害临灾征兆,划分了四色预警体系的风险灾害等级,切合隧道工程实际提出了应急响应机制。

(5)第6章分析了岩溶涌水灾害注浆封堵浆液扩散机制,研究了三种类型岩溶突涌水注浆封堵过程中注浆压力、注浆量与注浆速率的变化规律。依托大坝隧道涌水灾害处治工程,基于精细化探查结论,制定了系统的岩溶涌水治理方法,同时依据各类型岩溶条件钻孔注浆特征及浆液扩散规律,对不同类型岩溶涌水灾害治理技术提出了改进办法,取得了良好的岩溶涌水治理效果。