

SUIDONG YANRONG YONGSHUI GUANJIANG
FENGDU JISHU

隧洞岩溶涌水灌浆 封堵技术

余波 曾创 王波 郑克勋 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

隧洞岩溶涌水灌浆 封堵技术

余波 曾创 王波 郑克勋 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是对国内外隧洞岩溶涌水灌浆封堵技术的最新研究与实践成果的总结专著。全书共 9 章,包括:绪论,隧洞岩溶涌水水文地质勘察与分析,隧洞岩溶涌水预报,隧洞岩溶涌水灌浆机理,隧洞岩溶涌水灌浆封堵材料及设备,隧洞岩溶涌水预灌浆封堵技术,揭露型隧洞岩溶涌水灌浆封堵技术,隧洞岩溶涌水灌浆封堵质量检测方法,隧洞岩溶涌水灌浆封堵施工安全监测和隧洞岩溶涌水灌浆封堵工程实例等。

本书主要可供在岩溶地区从事隧洞工程勘察、设计和施工的技术人员阅读,也可供大专院校相关专业的师生教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧洞岩溶涌水灌浆封堵技术 / 余波等编著. -- 北京:
中国水利水电出版社, 2018.2
ISBN 978-7-5170-6346-9

I. ①隧… II. ①余… III. ①水工隧洞—涌水—灌浆
工程—封堵 IV. ①TV543

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第040799号

书 名	隧洞岩溶涌水灌浆封堵技术
作 者	SUIDONG YANRONG YONGSHUI GUANJIANG FENGDU JISHU
出版发行	余波 曾创 王波 郑克勋 等 编著 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 00038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 19 印张 451 千字
版 次	2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	105.00 元

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

在我国水电开发主要战场之一的西部岩溶高山峡谷区，岩溶水文地质条件复杂。随着工程建设的实施，引水隧洞所遇到的岩溶化岩体及充填物稳定、岩溶涌水等问题也越来越具有挑战性，岩溶涌水等地质灾害屡有发生，且岩溶地区的深埋长大水工隧洞，多具有大埋深、高地应力、高压大流量涌水等特点，对施工安全和进度影响极大，地下深埋水工隧洞施工处在各种突发性灾害的巨大威胁之中，岩溶涌水等隧洞水害逐渐成为制约我国水工隧洞建设发展的瓶颈问题之一。

从多年工程实践看，除排水引流外，灌浆封堵是隧洞大流量高压岩溶涌水治理的主要技术手段之一，如贵州天生桥二级水电站长引水隧洞岩溶涌水封堵、四川锦屏二级水电站辅助洞和长引水隧洞高压大流量涌水封堵、西溪河联补水电站隧洞涌水封堵、贵阳市城市轻轨隧洞堵水，以及公路隧洞、矿山巷道等工程，均采用灌浆封堵方法治理隧洞岩溶涌水，并取得了良好效果。

为解决隧洞岩溶涌水的治理问题，国内外学者从灌浆材料、设备和施工技术方面进行了大量的研究，但针对灌浆材料在不同类型岩溶涌水、不同涌水压力及水量条件下动水抗分散性及可泵性方面的研究尚不系统，指导性不强；与此同时，在岩溶涌水条件下对不同灌浆浆液的选用思路、灌浆施工工艺选用尚不明确，缺乏行之有效的系统应对不同涌水型式的灌浆封堵方案，亦未形成适用于岩溶涌水灌浆封堵后的合理的质量检测方法与评价标准，因此难以对隧洞岩溶涌水灾害治理提供科学合理指导，使得隧洞岩溶涌水评价、设计与治理均存在较大的经验性和盲目性。

为解决上述问题，提高隧洞岩溶涌水封堵的系统性，本书从水文地质条件分析入手，将隧洞岩溶涌水划分为不同类型，提高了岩溶涌水封堵的针对性和有效性；以此为起点，总结了合作单位山东大学、中国水电基础局有限公司等对隧洞岩溶涌水材料和设备进行的研究，以及模型试验和数值模拟分析成果，进行了系统的探讨和验证，初步形成了不同类型、不同压力、不同流量条件下隧洞岩溶涌水封堵灌浆的系统方案。根据工程实际情况，将隧洞岩溶涌水封堵分为地质预测预报基础上的预灌浆和揭露后灌浆两大类别，在前期地质条件分析、封堵材料和设备研究及模拟试验的基础上，将不同类型、不同压力、不同流量条件下的隧洞岩溶涌水封堵方案付诸实施并根据实际情况进行调整。鉴于隧洞岩溶涌水封堵质量检测尚无规范的现状，本书初步提

出了隧洞岩溶涌水灌浆封堵的质量检测方法,以供参考。鉴于隧洞岩溶涌水施工安全监测现状,提出了较为系统的措施,初步实现了隧洞岩溶涌水封堵实施和后期运行安全监测的系统化。

本书共分为9章。第1章为隧洞岩溶涌水水文地质勘察与分析,介绍了隧洞岩溶水文地质条件勘察及水文地质条件分析方法,并对隧洞岩溶涌水类型进行分类和特征描述;第2章为隧洞岩溶涌水预报,介绍了隧洞岩溶涌水地质、钻探和物探预测预报方法;第3章为隧洞岩溶涌水灌浆机理,介绍了动水灌浆模型试验,分析了浆液在管道中的运移扩散规律;第4章为隧洞岩溶涌水灌浆封堵材料及设备,重点介绍了适用于隧洞岩溶涌水灌浆封堵材料和适用设备;第5章为隧洞岩溶涌水预灌浆封堵技术,主要针对可能对施工造成影响的未揭露的地下水体,介绍对之进行灌浆预处理的思路、原则与方案设计、施工工艺,以及遇到大型溶洞或管道时的特殊处理办法;第6章为揭露型隧洞岩溶涌水灌浆封堵技术,针对不同类型涌水,提出了相应的处理思路、原则和灌浆封堵技术、工艺;第7章为隧洞岩溶涌水灌浆封堵质量检测方法,介绍针对灌浆涌水的效果检测及阻水岩体质量检测;第8章为隧洞岩溶涌水灌浆封堵施工安全监测,介绍灌浆施工过程中针对涌水量监测及围岩变形监测的方法;第9章为隧洞岩溶涌水灌浆封堵工程实例。

多年的工程实践及经验总结,隧洞岩溶涌水封堵由传统的纯经验、纯技艺模式向精益化方向迈出了第一步,其成果对涌水灾害工程治理的指导更加科学化、精细化、系统化,这是本书的主要出发点和落脚点。本书对工程实践有着更强的指导意义,对于保障隧洞岩溶建设的安全施工,经济投入,生态保护等具有重大的理论意义和工程应用价值。

本书前言、绪论、第1章主要由余波编写;第3章、第4章主要由山东大学编写;第2章由王波、余波和张伟编写;第5章、第6章由曾创、余波编写;第7章、第8章由余波、曾创编写;第9章由曾创、郑克勋编写。全书由余波统稿,雷友栋等审核。本书在编写过程中,得到了中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司、山东大学、中国水电基础局有限公司等单位多位领导及同仁的指导和大力支持,并引用了其部分资料;中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司朱代强、黄勇和朱建耘等同志对该书的出版提供了大力帮助,在此一并表示衷心感谢!

由于编者水平所限,书中疏漏和不当之处在所难免,敬请读者批评斧正。

编者

2017年11月

目 录

前言	
绪论	1
0.1 隧洞岩溶涌水问题与处理研究现状	1
0.2 本书主要研究内容	3
1 隧洞岩溶涌水水文地质勘察与分析	9
1.1 隧洞区岩溶水文地质勘察	9
1.2 隧洞岩溶涌水水文地质分析	13
1.3 隧洞涌水类型与特征	25
1.4 天生桥二级水电站隧洞区岩溶水文地质勘察与评价	44
2 隧洞岩溶涌水预报	67
2.1 施工期岩溶涌水地质预报	67
2.2 超前钻探预报	69
2.3 物探超前预报	72
3 隧洞岩溶涌水灌浆机理	95
3.1 水泥浆液动水条件下扩散及封堵机理	95
3.2 浆液在动水条件下的运移扩散数值模拟分析	105
4 隧洞岩溶涌水灌浆封堵材料及设备	112
4.1 灌浆材料	112
4.2 灌浆设备	137
5 隧洞岩溶涌水预灌浆封堵技术	141
5.1 预灌浆处理思路与原则	141
5.2 预灌浆封堵技术方案	142
5.3 预灌浆封堵施工工艺	153
5.4 预灌浆封堵特殊工艺	159
5.5 预灌浆封堵工程实例	162
6 揭露型隧洞岩溶涌水灌浆封堵技术	188
6.1 处理思路 and 原则	188
6.2 施工工艺	192
6.3 特殊工艺	195
6.4 锦屏二级水电站辅助洞岩溶涌水灌浆封堵工程实例	198
6.5 锦屏二级水电站引水隧洞岩溶涌水灌浆封堵工程实例	215

6.6 齐岳山隧道岩溶涌水灌浆治理工程实例	231
7 隧洞岩溶涌水灌浆封堵质量检测方法	237
7.1 含水构造突水封堵前雷达检测	237
7.2 堵水效果检测	239
7.3 阻水防渗岩体质量检测	241
8 隧洞岩溶涌水灌浆封堵施工安全监测	246
8.1 灌浆施工过程中的涌水量监测	246
8.2 灌浆压力作用下围岩变形监测	247
9 隧洞岩溶涌水灌浆封堵工程实例	262
9.1 工程概况	262
9.2 引水隧洞充、排水试验	262
9.3 补充岩溶水文地质勘察	269
9.4 补充勘察对引水隧洞渗漏分析与处理建议	281
9.5 引水隧洞岩溶涌水设计处理方案与工程施工	284
参考文献	295

绪 论

岩溶涌水是广泛存在于岩溶地区隧洞施工过程中沿岩溶管道或溶蚀结构面发生的一种地质灾害现象。涌水灾害一旦发生，轻则冲毁机具，中断正常施工；重则造成重大人员伤亡，产生巨大的经济损失，甚至会导致隧洞被迫停建或改线。隧洞产生的大量岩溶涌水，同时也会使地下水渗流场和补排关系发生变化，继而造成地下水资源的减少和枯竭，引起地表产生岩溶塌陷或沉降，导致本就敏感脆弱的岩溶地下水水质的污染和破坏，从而使地表水文地质环境不断恶化，给隧洞施工及影响区域居民正常的生产和生活带来严重的不利影响或重大损失。

0.1 隧洞岩溶涌水问题与处理研究现状

针对隧洞涌突水的防治，美国学者最早提出了疏排降压法，该方法为主动防护的方式，采用地面垂直钻孔，用潜水泵专门疏干含水层，同时为了配合疏干法，国外配套生产了高扬程、大排水量、大功率的潜水泵。日本提出了在软土地层中采用气压法控制地下水后采用新奥法开挖隧洞的方法，并在英吉利海峡隧洞修建中得到了应用。德国学者波茨舒(F. H. Poetsch)在1883年首次将人工地层冻结技术应用于煤矿立井的地下水防治，通过冻结地层控制地下水的侵害；此后该技术逐渐在矿山、隧洞得到广泛的应用。随着灌浆技术的蓬勃发展，又出现了堵水截流法，即在隧洞涌水治理中，通过灌浆建立堵水帷幕，封堵导水通道，截断地下水源头，该方法已在隧洞突涌水治理中得到了广泛应用。中国《隧道工程防水技术规范》(CECS 370: 2014)，对隧洞的防水提出了总的治理原则，即“防、排、截、堵相结合，因地制宜、综合治理”。在《隧道工程防水技术规范》修订过程中又明确提出了“刚柔结合”的防水技术原则，从材料的角度考虑防水工程的需要，隧洞涌水防治除了遵循总的防水治理原则外，还根据功能及行业的具体特点，建立了相应的防水要求及防水等级。

0.1.1 水工隧洞岩溶涌水处理研究现状

水工隧洞以其埋深大、水压高、地下水补给丰富的特点，深受岩溶突涌水灾害的影响，高压大流量岩溶涌水若不及时采取措施治理，不仅严重影响施工安全和进度，而且对今后水电工程的运营和周边环境造成极为不利的影响。国内外水工隧洞突涌水防治主要根据涌水类型、涌水量和水压大小，制定出针对性的防治策略。对于低压小流量涌水，采用灌浆方法一次性封堵；对于高压大流量涌水，采用分流泄压，灌浆封堵的方法治理。在国外，哥伦比亚GUAVIO水电站泄水渠穿越溶槽地段，采用了导坑超前帷幕灌浆扩挖法，取得了较好的效果。在国内，天生桥二级水电站采用灌浆封堵与平行设一条排水洞的堵排

结合方式,达到了岩溶地下水封堵、降低隧洞外水压力的治理效果。锦屏二级水电站辅助洞存在高压大流量岩溶涌水,裂隙水压力达 10MPa,突水后瞬间流量达 $7\text{m}^3/\text{s}$ 以上,在隧洞地下水防治过程中采用了“以堵为主、堵排结合”的治理原则,通过排水降压,减少高压水对隧洞衬砌结构的压力,同时通过灌浆封堵岩溶管道及导水构造,形成隔水帷幕,达到堵水效果。

0.1.2 交通工程隧洞岩溶涌水处理研究现状

在国内外公路、铁路及市政隧道特重大事故中,岩溶涌水事故在死亡人数和发生次数上均居前列,由此带来的人身伤亡和经济损失极为惨重,因此,岩溶涌水防治成为市政及公路、铁路隧道建设和运营期不可或缺的重要环节。在国内外交通隧道工程中,对岩溶地下水的处理主要分为排导方式、堵排结合和全封堵方式。排导方式主要用于深埋隧道,可以使作用在衬砌上的外水压力折减,从而使衬砌结构设计更加经济,但需处理好地下水排放量的控制问题,以降低施工期和运营期排水费用,同时尽量减少对岩溶环境水文地质环境的影响。全封堵方式由于衬砌要承受同地下水水头基本相当的外水压力,一般适用于埋深较浅、地下水位较低的隧道;如对于城市地铁等浅埋隧道,由于埋深浅、水位低,有条件通过加强衬砌结构、灌浆封堵防治地下水。根据国内外经验,通常情况下,当地下水水头小于 60m 时,宜采用全封堵方式;当地下水水头大于 60m 时,宜采用排导方式,并通过灌浆固结圈进行堵水,“堵”是为了控制地下水的排放量,“排”则是为了降低作用在隧洞衬砌上的外水压力。这种依靠灌浆固结圈控制渗水量,并将渗水通过排导衬砌排入隧洞的防排水方式,称为“堵排结合、限量排放”,在日本青函海底隧道(水头高度 240m)以及挪威 OSLOFJORD 海峡隧道(水压 1.2MPa)等工程中得到了广泛应用。

长期以来,为了避免或减弱岩溶地下水对隧道结构的作用,保证隧道主体结构安全,我国交通隧道工程大多按照“以排为主”的原则建造,而忽视了隧道建设对环境产生的负面影响,造成工程地区含水层被疏干,生态环境恶化,严重影响隧道周围人民的生产和生活,例如京广线大瑶山隧道、南岭隧道,京通线桃山隧道、襄渝线中梁山隧道等。随着地下水环境脆弱的岩溶地区隧洞修建日益增多,上述问题愈发突出,“以排为主”的无限制排水原则对岩溶地区水文地质环境带来的恶劣影响,已不能适应我国经济和社会发展中“绿色生态工程”的需要。进入 21 世纪,生态环境保护和隧道长期运营的稳定受到越来越多的重视,随着隧道衬砌结构强度的提高和灌浆技术的发展,国内学者又提出了“以堵为主,堵排结合”的治理原则,通过采用预灌浆和揭露后灌浆的方法,封堵主要导水通道,在隧道轮廓线外形成隔水帷幕,尽可能恢复原地下水环境,同时提高隧道的衬砌结构强度,通过预留管道将地下水集中排入原岩溶管道,或设引排管将壁后少量渗水引入隧洞的排水系统,减少灌浆后水头升高对隧道衬砌结构的影响。“以堵为主,堵排结合”的防治水方法已在贵阳市城市轨道交通工程地下隧道、龙潭隧道、厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道等得到了广泛应用,并取得了很好的效果。

0.1.3 矿井岩溶涌水处理研究现状

矿井岩溶水害是与瓦斯、粉尘等并列的矿山建设与生产过程中的主要安全灾害之一。



随着矿山开采深度和强度不断增大, 矿井岩溶水文地质条件日趋复杂, 岩溶突涌水灾害对矿井的生产和建设构成了严重威胁。国内外学者根据矿井岩溶水文地质条件的多样性、复杂性等特点, 以及采矿技术和设备条件, 总结出一套从简单到复杂、从被动到主动的矿井水防治方法。这些方法归纳为抽排法、疏干降压法和堵水截流法三种。长期以来, 抽排法及疏干降压法作为矿区水害的防治措施之一, 对改善矿井作业环境、保证生产安全起着十分重要的作用。但地下水也是一种数量有限、与其他环境要素关系密切的资源, 单从保证安全生产角度出发, 对矿井水长期无节制地疏干排放, 会破坏地下水环境的原始状态, 导致一系列严重的环境问题。由于矿井水的长期抽排, 往往会造成区域地下水位的持续下降, 岩溶含水层逐渐被疏干, 水资源日趋枯竭, 地表沉陷显著。如山东淄博矿区由于长期矿井排水, 地下水下降了 60~90m, 造成周围城区水源井枯干; 在河北峰峰矿区, 由于矿井水的长期疏排降压, 已将鼓山两侧潜水层大面积疏干, 造成居民饮水困难; 湖南涟邵矿区的恩口煤矿, 在不到 10km² 的井田内已有大小塌陷坑上万个; 淮南的潘集矿区的地面沉降已对部分工业和民用建筑产生了不同程度的变形破坏。因此, 随着设计理念、勘察手段及施工技术的发展, 堵水截流已成为矿井防治水害的重要方法。

堵水截流法主要利用自然或人造的相对隔水层, 来分隔开矿体(层)和含水体之间水力联系, 达到矿井少排水及安全作业的目的。它分为地面防治(堵洞防漏)和井下防治(灌浆截流)。地面施工方便, 但费用较高; 井下施工难度大, 但成本低。有些矿井岩溶水文地质条件相当复杂、动水量大, 常采用灌浆截源、帷幕充填的方法进行治理, 即在地面或井下布置灌浆钻孔, 利用灌浆泵将充填材料和水一起注入钻孔, 并通过钻孔扩散到溶孔或溶蚀裂隙中去, 堵塞导水通道, 形成隔水帷幕墙。灌浆堵水技术在国内防治矿井水害方面的发展是从 20 世纪 50 年代初期煤矿井筒井壁灌浆堵水开始的, 进入 60 年代后期, 灌浆技术广泛应用于矿井水害治理中, 并逐渐形成一套行之有效的矿井水害治理技术体系。综上所述, 在矿山水害防治过程中, 采用灌浆堵水截流的治理方法, 在保障矿井建设的施工安全, 降低经济投入, 保护生态环境方面具有重大优势。

随着我国水电、铁路、公路、城市轨道等工程开发的重点向西部地区转移, 隧洞工程所遇到的岩溶水文地质条件日趋复杂, 岩溶涌水等地质灾害屡有发生, 尤其是处于岩溶地区的深埋长大隧洞, 多具有大埋深、高地应力、岩溶发育、高压大流量涌水等特点, 对施工安全和进度影响极大, 隧洞施工处在各种突发性灾害的巨大威胁之中, 岩溶涌水等隧洞水害逐渐成为制约我国水工、公路隧洞等工程建设发展的瓶颈问题之一。

0.2 本书主要研究内容

从工程实践看, 灌浆封堵是深埋长隧洞的大流量岩溶涌水治理的主要技术手段, 如贵州天生桥二级(坝索)水电站长引水隧洞岩溶涌水封堵、四川锦屏二级水电站辅助洞和长引水隧洞高压大流量涌水封堵、西溪河联补水电站隧洞涌水封堵、贵阳市城市轻轨隧洞堵水, 以及公路隧洞、矿山巷道等工程, 均采用灌浆封堵方法治理隧洞岩溶涌水, 并取得了良好效果。此过程中, 为解决隧洞岩溶涌水的治理问题, 国内外学者从灌浆材料、设备和施工技术方面进行了大量的研究, 但针对灌浆材料在不同涌水压力及水量条件下动水抗分

散性方面的研究尚不系统, 指导性不强; 与此同时, 在受限于前期勘察过程中岩溶发育特征及涌水的预测难度、不同灌浆浆液的选用思路、灌浆施工工艺选用尚不明确, 缺乏行之有效、系统的应对不同涌水型式的灌浆封堵技术, 亦未形成适用于岩溶涌水灌浆封堵后合理的质量检测方法与评价标准, 因此难以对隧洞岩溶涌水灾害治理提供科学合理指导, 使得隧洞岩溶涌水评价、设计与治理均存在较大的经验性和盲目性。

为此, 贵阳院与山东大学、基础局等参与高压涌水勘察经验及灌浆封堵方面的施工经验的单位联合, 在系统调研、总结、分析国内外高压涌水灌浆封堵工程实践的基础上, 开展必要的试验与研究工作, 对隧洞高压涌水灌浆封堵技术进行系统总结, 形成完整的灌浆封堵施工技术, 为深埋隧洞高压涌水灌浆封堵施工提供技术指导, 为推进西部地区复杂岩溶、构造地质条件下的水电工程开发提供技术支撑。

0.2.1 隧洞岩溶涌水水文地质勘察与分析

为详细地查明隧洞区岩溶水文地质条件, 分析可能的岩溶涌水洞段及涌水量、涌水压力, 提出合理的灌浆封堵处理建议, 按地质宏观调查与分析得出规律→物探查找异常区→钻孔及水文地质试验验证→涌水预测→灌浆封堵处理设计的技术思路可进行有效勘察。

根据隧洞区水文地质条件, 在详细分析隧洞区岩性、构造、岩溶发育特征及气象水文条件的基础上, 对可能发生高压涌水的洞段进行合理的预测。隧洞开挖揭露后可能发生的涌水量, 可根据含水介质类型及可能的地下水渗流型式, 按带状(带状含水透水地层及断层带)含水带、大范围降落漏斗式补给、岩溶管道或暗河涌水等几种方式, 采用降雨入渗系数法、地下径流量法、地下径流模数法进行涌水量的估算。隧洞涌水压力可根据涌水点以上地下水位高程, 考虑岩体透水性特征进行适当的折减后进行估算。施工开挖后可采用渗压计或压力表进行量测。当不能安装仪器进行量测时, 可根据其初始喷射距离及稳定喷射距离, 按本书推导得到的公式, 估算相应的涌水压力。

隧洞涌水压力的大小主要与岩体透水性及地下水补给条件相关, 岩溶地区地下水位线实为地下水位趋势面, 即“趋势水位”, 所绘制的地下水位线亦仅在各级岩溶管道及地下水渗流的缝隙网络内适用, 在岩溶、构造相对不发育的较完整岩体洞段则适用性差, 地下水位以下并非处处有水; 作用在隧洞上的外水压力的主要与相应洞段的地下水位高度及与岩溶发育程度相关的外水压力折减系数有关。

对持续稳定的隧洞涌水, 根据涌水通道类型, 将其划分为岩溶管道型突涌水、断层破碎带突涌水、节理裂隙型突涌水及微孔隙与微裂隙型突涌水四类。岩溶管道型涌水是隧洞高压涌水中最常见亦最难处理的涌水类型, 岩溶管道涌水具有突发性、大流量、高压力的特征, 且常伴随涌泥、坍塌等现象, 最易形成危害严重的特大涌水事故。断层破碎带涌水多发生在隧洞穿越胶结较差、导水性好、溶蚀破碎的断层破碎带或影响带上, 由于断层延伸远、深, 切割地层较多, 串通的岩溶含水体亦较多, 多具涌水量大、较稳定、流量大、延时的特征。岩溶裂隙型涌水特征与节理裂隙的类型及发育程度相关, 导水系统多呈树枝状或脉状结构, 涌水量大小、动态取决于隧洞开挖揭露的是主控导水裂隙还是次一级裂隙系统, 前者流量大且稳定, 后者流量较小但亦较稳定或后期略有增加。岩溶孔隙型涌水多具有孔隙率高、孔径微小、结构复杂及储水能力强的特点, 涌水具有流量大、周期长、



大面积散状分布、易转移和反复的特点，灌浆封堵治理难度大。

0.2.2 隧洞岩溶涌水预报

施工期针对隧洞高压涌水的预测预报主要有施工地质预报及物探超前预报、超前钻探等。隧洞涌水预测预报应是在对基本地质条件及水文地质详细分析的基础上，根据开挖揭露的地质条件，采用物探、钻孔等方法进行验证后，提出合理的地质预报建议。目前，国内外隧洞物探超前预报方法主要有 TSP 超前预报技术、地震负视速度法、水平声波剖面法（HSP）、TRT 真地震反射成像技术、陆地声呐法、面波法、地质雷达（也称探地雷达）技术、瞬变电磁法、红外探水法、BEAM 法等。从锦屏二级水电站、贵广高速等隧洞工程超前预报成果看，以激发极化法、瞬变电磁法、地质雷达等方法对导水带或含水体的探测效果较为理想。超前钻探法可控，准确率很高，在超前地质预报中占有极其重要的位置，特别是在岩溶发育地段，对地质物探预报成果作验证，效果较好。

0.2.3 隧洞岩溶涌水灌浆机理

平面裂隙动水条件下，不同类型和不同参数的水泥单液浆进入稳定扩散状态后，在不受外力干扰或灌浆参数保持不变的条件下，浆液扩散区域是稳定不变的，扩散迹线呈现标准 U 形规律，且可以分为充填扩散区、过渡扩散区和分层扩散区。充填扩散区边界在恒定灌浆压力和流场条件下，呈现稳定态势，且以浆液的扩散为主，浆液没有被水稀释，随着灌浆进行，充填扩散范围到一定程度不再增大，并形成稳定的沉积区。过渡扩散区范围较小，上层为浆液与水的混合区，下层为析水后的浆液扩散层，浆液在过渡区实现了快速析水分层，是浆液由充填扩散向层流扩散转变的一个必然状态。最外层的分层扩散区流场较为稳定，浆液和水均呈现层流状态，分层扩散现象较为独特，水流呈现上下分层的现象，且各层之间的流态稳定，互不干扰。

研究表明，在一定流速范围内，浆液扩散速度与灌浆率呈线性正比关系，流速太大后，浆液不能呈现有效的扩散状态，水泥浆液也不能在裂隙中沉积留存。浆液的扩散范围随浆水流量比的增大而增大，在灌浆压力和灌浆设备允许的条件下，尽量增大灌浆速率或减小裂隙水流速度、增大水泥浆的黏度，可以获得更好的浆液扩散效果。

对发育规模较大的岩溶管道或溶蚀裂隙，钻孔的设计可以遵循横密纵稀的原则，即钻孔在流场流速方向（扩散轴向）浆液的有效扩散距离长，钻孔的设计间距可以较大，在于垂直轴向的方向（横向扩散）钻孔设计间距要尽量密集。提高灌浆封堵效果的有效方法是降低渗水流速，可通过采用设计、施工深部引流钻孔，分流泄压，调解流场，降低裂隙水流速度；如果引流条件困难，可以采取骨料灌浆技术，用膨胀性轻骨料阻塞裂隙等，从而达到降低水流速度的目的。

0.2.4 隧洞岩溶涌水灌浆封堵材料及设备

隧洞岩溶涌水具流量大、压力高、流速快、管道类型多样的特点，从材料试验成果分析，适用于隧洞高压涌水灌浆封堵的材料主要为水泥浆液（静水常规灌注）、水玻璃水泥浆液、抗水冲型灌浆材料、HSC 新型灌浆材料、GT-1 灌浆材料等。HSC 承压涌水型灌



浆材料既有速凝又抗分散、可操作时间长、早期强度高、耐久性好,又有抗大涌水冲刷、堵水效率高、堵水可靠性高的特点;但其需双液浆形式操作,施工相对复杂。抗水冲型灌浆材料价格较普通水泥浆液稍高,是一种很有推广价值的灌浆材料。

隧洞岩溶涌水灌浆封堵多面临涌水压力高、流量大的问题,一般应采用高压大流量灌浆泵、高压混合枪、高摩擦止浆塞等灌浆辅助设施。为防止钻孔时高压地下水涌出孔口后对施工人员造成伤害,宜采用钻进保护灌浆塞,并设置高压孔口封闭器。另外,在隧洞高压涌水灌浆封堵施工中,结合实际施工,进行孔口管失效段钻孔追接装置、孔口管涌脱控制装置、孔口管镶管装置、高压自动卸荷装置、高压单向逆止阀、双料混合装置、连续大流量骨料添加装置、可控性浆液灌注转换装置等研究,对隧洞高压涌水灌浆封堵的有效性 & 安全性具有重要意义。

0.2.5 隧洞岩溶涌水预灌浆封堵技术

在地下水被揭露之前将其堵住或引流排走是最经济、合理的方案。因此,隧洞岩溶涌水预灌浆封堵处理应始终贯彻“预报在前,开挖在后”的总体思路,在洞挖之前探明掌子面前方地质条件,对储水构造和突涌水点作提前预报。当预测到掌子面前方有大的储水构造或高压、大流量的岩溶地下水,且可能并判断会对施工安全造成较大威胁时,除设置排水洞等排水降压外,多采取预灌浆处理的方法对岩溶地下水进行封堵。

超前帷幕灌浆施工应先进行先导孔施工,钻孔布置遵循先均匀后加密的原则,遇见大漏量涌水随时进行灌浆封堵。灌浆方式可根据具体情况选择单液灌注和双液灌注。先施工无水孔,后施工有水孔;先施工顶拱孔,再施工边拱孔,最后施工底孔的顺序;先施工内环孔、再施工外环孔、最后施工中环孔。针对地质预报和超前勘探揭示的具体情况,在集中的渗漏通道再加密补打超前孔,加强对渗漏通道的灌浆。灌浆压力的选择应遵循分级升压法。漏水量小,且地层较完整时,一次钻到设计孔深,采用全孔一次灌浆法;当涌水量较大或岩石较破碎时,可采用分段下行式灌浆。如遇到高压、大流量涌水情况时,停止钻进,立即灌浆,完毕后,待凝时间不少于 24h 后,再原孔扫孔,按上述方法钻灌直至终孔。涌水严重地段直接灌注防冲膏状浆液,一般地段针对构造裂隙、岩溶通道及空腔使用纯水泥浆或水泥稳定性浆液灌注,对空腔、溶洞及管道应预先灌注水泥砂浆或高流态混凝土进行充填处理,特殊情况根据特点选用超细水泥和特殊浆材灌注。灌浆段注入量大而难以结束时,可依次选用下列措施处理:低压、浓浆、限流、限量、间歇灌浆;在浆液中加入速凝剂;灌注防冲膏状浆液;进行双液灌浆。

灌浆钻孔的布置应具有针对性,根据涌水特征,可采用全断面或局部超前灌浆方式进行堵水处理。根据高压涌水点水文地质条件,灌浆方法宜采用多种方法相结合,以达到高效、快速的效果。高压涌水灌浆封堵具体采用哪种或哪几种灌浆材料,以及浆液配合比等需结合工程具体情况及现场试验确定,原则是有效、经济、技术可行。受涌水通道规模的不可预见性、灌浆过程中浆液配比的调整过程、大流量高压涌水造成的大量损耗等因素影响,灌浆量的预估值仅供参考,实际发生的灌浆量应以达到涌水封堵的效果为原则;若耗浆过大,应采取相应控制措施,既满足灌浆堵水要求,同时也应最大限度控制耗浆量。

在岩溶富水地段,先导孔和灌浆孔钻进过程中都可能会出现高压、大流量涌水,这



是灌浆堵水工作的重点。遇有这种情况,需立即停止钻进,先进行灌浆封堵。封堵的方法有原孔灌浆封堵法和引水分流封堵法。当出现不可预见的涌水、突泥等问题时,应采取镶管引流后灌浆,甚至设混凝土阻水墙的方式进行必要处理。

0.2.6 揭露型隧洞岩溶涌水灌浆封堵技术

受限于前期勘察手段、超前预报精度、工期进度要求等因素,高压涌水在开挖揭露后发生已成为常态;对揭露型岩溶涌水,采取的封堵思路是通过疏、引、平、堵或设置阻水岩盘、混凝土塞、平压堵头等方式,尽量恢复至与未揭露状态类似条件下,变动水为静水或准静水后,再进行灌浆封堵处理以达到灌浆堵水的目的。处理的总原则是:先易后难、先引后堵、先拱顶后边墙再底板、局部集中处理;兼顾其他部位,系统处理,综合治理。

对岩溶管道型高压涌水,主要处理思路应为平压、分流泄压、充填、灌浆防渗。多采用平压堵头、模袋或格栅模袋等方式进行封堵,变动水为静水后再灌浆封堵。由于涌水通道大,封堵材料多采用级配料或水下不分散浆液或混凝土,并配合常规灌浆进行处理。对管道型涌水的治理,前期应尽量探明管道的空间分布及规模,以进行针对性的钻灌设计,并坚持“管道涌水治理为主、裂隙涌水治理为辅”的原则,标本兼治,确保治理效果。对规模较大的岩溶管道,可采用模袋、格栅等方式进行相应处理,有时甚至直接灌注混凝土予以堵塞。灌浆材料选择时兼顾环保性及耐久性要求,岩溶管道涌水治理可采用普通水泥浆和双液配合使用;浅部灌浆加固宜选择速凝类灌浆材料。

富水断层破碎带涌水治理,当断层破碎带岩体溶蚀破碎、围岩稳定性差、导水性好且涌水量较大时,多退而在掌子面前方浇筑混凝土塞,预留泄压排水孔,并对混凝土塞前方一定段长围岩进行灌浆加固后,再对掌子面揭露的断层带进行灌浆处理。对沿断层破碎带发生的岩溶高压涌水,灌浆材料多采用常规的水泥浆液进行灌注,必要时掺速凝剂等外加剂。

节理裂隙型高压涌水多沿结构面(节理裂隙、层面)线性分布,主要处理思路是找到关键渗水通道,布设必要排水泄压孔,并对开挖面进行封闭(或灌浆封闭)处理后,针对裂隙发育特征,针对性布置灌浆孔的位置及方向,采用合适的灌浆材料(多为常规水泥浆材,少量为纳米灌浆材料)进行高压灌浆,以达到堵水的效果。

微孔隙及微裂隙型高压涌水多采取在涌水洞段直接进行均匀处理的方式进行灌浆处理。由于浆液的有效灌入与扩散为该类突涌水治理的瓶颈问题,须通过合理选择灌浆材料、灌浆压力及钻孔布置方式,才能达到理想的灌浆效果。主要选用的灌浆材料包括纳米材料、化学浆液等。

0.2.7 隧洞岩溶涌水灌浆封堵质量检测方法

对隧洞高压涌水,灌浆封堵的主要目的是通过灌浆方式,封堵地下水渗流通道,抑制地下水渗涌,确保安全施工及运行安全;对灌浆的第一要求是止水,围岩加固次之。因此,针对隧洞高压涌水灌浆封堵质量检测,一是是否达到止水目的,即封堵后是否涌水;二是一定范围内地下水的渗流通道是否被充填密实。根据灌浆封堵质量检测要求,采取的方法主要为:涌(渗)水观察、灌浆效果 PQ 评判、检测孔观察、钻孔取样及孔内电视,

以及开挖后直接观察等。采用渗水流量作为灌浆封堵评价标准时,一般以不出现集中涌水点、不出现大面积的集中渗水区为原则。对城市轨道交通等市政地下洞室,实际施工时按单位洞段总渗水量不大于设计抽排水能力为控制原则。

0.2.8 隧洞岩溶涌水灌浆封堵施工安全监测

隧洞高压涌水灌浆封堵施工中的安全风险主要集中在两个方面,一是施工期间的涌水量增大甚至不可控制,或封堵措施失效引发安全问题;二是灌浆压力作用下的围岩变形稳定问题。涌水量的监测数据反映了当前灌浆施工方案的有效性,并为下一步施工方案的调整提供依据,以确保灌浆的有效性及施工安全。采用平压堵头进行灌浆封堵处理时,主要关注附近洞段洞壁围岩中渗水问题以及总涌水量的动态变化情况。动水灌浆治理中,需及时关注泄压孔地下水流量及压力变化情况,并量测该洞段总涌水量的变化情况。

另外,隧洞高压涌水灌浆压力的合理控制,不仅能指导灌浆,而且能安全控制周边围岩变形。灌浆压力过低,导致浆液无法扩散到岩层中,影响灌浆效果;灌浆压力过高,灌浆压力作用在围岩中破坏了岩体已达到的相对平衡,使应力场发生改变,引起应力重分布,从而岩体可能产生变形甚至破坏,引起周边围岩大变形,甚至导致塌方、冒顶等事故。因此,应采取必要的变形监测措施,合理控制围岩安全稳定性,确保隧洞高压涌水灌浆封堵施工高效、安全地完成。

为有效指导隧洞岩溶涌水勘察、评价与材料选择、灌浆施工治理工作,在总结贵阳院、基础局等单位丰富的勘察设计与施工经验、山东大学等单位基础研究工作的基础上,本书在隧洞岩溶地下水勘察与涌水评价、动水灌浆特征与材料选择、隧洞岩溶涌水超前预报、不同岩溶涌水特征下的灌浆处理思路、施工工艺与技术、检测方法等方面进行系统的总结、研究,使隧洞岩溶涌水封堵由传统的纯经验、纯技艺模式向精细化、系统化方向迈出了第一步。文中每个章节都列举了相应的经典工程案例进行参照说明,最后详细叙述了四川联补水电站引水发电隧洞岩溶涌水勘察与灌浆封堵工程实例,使对隧洞岩溶涌水灾害工程治理的指导更加科学化、精细化和系统化,这是本书的主要出发点和落脚点,也是特色所在。也正是这个特点,本书的成果对于工程实践有着更强的指导意义,对于保障岩溶地区隧洞建设的施工安全,节约经济投入,保护生态环境具有重大的理论意义和工程应用价值。

1 隧洞岩溶涌水水文地质勘察与分析

1.1 隧洞区岩溶水文地质勘察

作为隧洞主要工程地质问题之一的岩溶涌水常常成为制约隧洞施工进度、增加工程造价和影响施工安全及运行的关键因素，因此，需对之进行必要的预防或处理。当采用灌浆封堵方式对隧洞岩溶涌水进行处理时，为加强处理的针对性，提高处理效果，需对隧洞区水文地质条件进行详细调查，分析涌水的可能性，可能的涌水洞段及涌水量和涌水压力。但受地形地质条件及工程布置限制，呈线状分布的隧洞前期勘察难度大，不能像水电站中的坝厂等点状建筑物一样易布置集中的勘探工作，受工期、经费、勘察条件等影响，前期勘察过程中想要对隧洞区水文地质条件和可能的涌水点、涌水量、涌水压力进行详细勘察几乎是难以完成的任务。因此，如何以最有效的勘探工作，详细查明隧洞区岩溶发育特征及水文地质条件，预判出可能的岩溶涌水洞段及涌水量、涌水压力，提出合理的灌浆封堵处理建议，一直是工程人员多年来探索的前沿课题。

在天生桥二级、大花水、立洲、两家人、锦屏二级水电站等深埋长大隧洞前期勘察过程中，在隧洞区水文地质条件的勘察及评价方法、手段等方面，从一开始的地质测绘及均匀布孔，到后来大量物探方法的使用，甚至包括较长的勘探试验平洞等，勘察思路日益系统，勘察精度不断提高，评价方法日趋先进，在水文地质评价方面也取得不错的效果。从现有经验看，总体上，前期阶段隧洞区的水文地质勘察与涌水评价多以地质调查与分析为主，并辅以必要的物探及验证性钻孔、水文地质试验等方法。

基于现有勘探手段与成功经验的总结，对隧洞区岩溶水文地质条件的勘察与涌水评价较为有效的思路如下：

(1) 地质测绘与调查先行，摸清隧洞区水文地质结构，分析可能存在的含水透水地层、隔水层，找出可能的富水带。加强勘探前的室内分析工作，根据基本地质条件及泉水出露情况、构造展布、岩溶发育特征等，以地下水流动系统为纲，划分水文地质单元，分析隧洞区地下水的补给、径流、排泄特征，找到可能存在的地下水渗流带及其与隧洞的关系，为物探、钻探及水文地质测试提供可靠的布置依据。

(2) 在可能的岩溶管道区及地下水富水带（包括槽谷、低垭口、导水构造带、岩溶异常区等）尤其是主通道径流区，布置必要的物探、钻探工作，进行异常区验证性勘探及地下水测试，了解地下水位及渗透特性；在岩溶异常区布置必要的地面物探及钻孔物探，进行加密勘探、验证，并进行精确探测。

(3) 水文地质测试主要开展压水、提水、渗流观测及连通试验，压水试验主要了解可能富水带的岩体渗透特性，提水试验主要是敏感性试验以了解地下水位的真实性，渗流观测是了解钻孔位置地下水的渗透特性及可能的渗透方式，而连通试验则主要验证地下水流



动系统的补、径、排关系。

(4) 根据查明的隧洞区地层岩性、构造、岩溶及水文地质等基本地质条件,划分隧洞沿线可能存在的涌水洞段,尤其是可能的涌水带,分析其涌水量及涌水压力的大小,提出隧洞岩溶涌水灌浆封堵处理建议。

1.1.1 隧洞区岩溶水文地质勘察内容

(1) 隧洞工程地质勘察应在分析区域水文地质条件的基础上进行。

(2) 调查洞室区的地形地貌特征,剥夷面和阶地的发育情况及分布高程,研究不同地形地貌条件对岩溶发育的影响。

(3) 查明隧洞区地层岩性的类别、分布、产状、厚度及可溶岩与非可溶岩层的组合情况。

(4) 查明隧洞区的褶皱形态、性质、特征等,研究不同构造部位对岩溶发育和形态的影响。

(5) 查明隧洞区主要断层结构面的产状、性质、规模、延伸情况、导水性及富水特征,及其位置与洞室的关系,研究断层对透水岩组的切割错位情况,断层与可能涌水通道的关系。

(6) 调查隧洞区的重要岩溶现象,特别是溶洞、溶隙、落水洞、管道、地下暗河等的分布、位置、形态、规模、填充情况,分析岩溶发育规律,以及可能发育的岩溶管道与洞室的关系。

(7) 查明隧洞区各含水透水地层中的地下水位、动态规律及最高、最低水位,划分含水相对隔水层,查明主要大泉的出露位置、泉水动态,查明含水层和相对隔水层遭受断层切割的情况,收集降雨强度资料。

(8) 根据地下水与河水的补排关系,确定隧洞区水动力条件;按地下水循环条件,划分地下水动力带,并判断隧洞所处的地下水循环带位置。

(9) 根据查明的地质条件,分析可能发育的涌水带及相应的涌水量及涌水压力,提出相应的处理建议。

1.1.2 隧洞区岩溶水文地质勘察工作重点

隧洞区岩溶水文地质勘察的方法及手段与勘察阶段及岩溶水文地质条件复杂程度密切相关。

(1) 规划阶段。以收集资料及现场岩溶水文地质调查、室内分析为主。根据岩溶水文地质调查情况,对隧洞区岩溶发育的总体规律及水文地质特征进行系统分析,划分地下水流系统,初步分析地下水的主要渗流带或岩溶管道、暗河的主要位置,以及地下水流量与动态特征。根据岩溶水文地质条件初步分析成果,对隧洞区可能存在的主要问题进行分析评价,为隧洞选线规划提供相关地质建议。

(2) 初步勘察阶段(水电预可或水利可研)。根据选点规划及隧洞初步布置情况,对可能布置隧洞的相关地段进行地质测绘及岩溶水文地质调查,调查的范围应包括可能的洞线比较范围及可能影响洞线比较的地区;重点调查相关地段可溶性地层分布与结构、构造