

# 隧道突水突泥灾害源 超前地质预报理论与方法

李术才 著



科学出版社

# 隧道突水突泥灾害源 超前地质预报理论与方法

李术才 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书共 9 章,介绍作者十余年来在隧道超前地质预报方面取得的研究与应用成果。总结分析超前地质预报的发展历程、现状和发展方向;归纳了突水突泥灾害源的地质特征;介绍常用超前预报技术的原理、特点和适用范围;介绍中远距离(80m)范围内预报前方含水构造的瞬变电磁研究进展;针对自主研发的激发极化超前预报方法,介绍水量估算技术、三维成像方法、专用仪器及用于 TBM 隧道的前景;基于精细探测需求,介绍跨孔电阻率 CT、三维钻孔电阻率成像的成果;阐述综合超前地质预报与联合解译的成果,介绍“四阶段全过程”综合预报体系、多元预报信息联合反演和施工许可机制的最新成果;最后精选多个代表性案例,展望了未来发展方向和远景目标。

本书可作为高等院校土木、交通、水利水电、矿山、地质、应用地球物理等专业教师和高年级学生、研究生的参考书,也可对相关工程领域的技术人员提供参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

隧道突水突泥灾害源超前地质预报理论与方法/李术才著. —北京:科学出版社,2015. 3

ISBN 978-7-03-043750-1

I. ①隧… II. ①李… III. ①隧道-地质灾害-预报 IV. ①U456. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 051483 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:张凤琴

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张:19 3/4 彩插:8

字数:400 000

定价:145.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

随着铁路公路交通工程、水利水电工程等重大基础工程建设的快速发展,我国目前已成为世界上隧道建设规模与难度最大的国家。然而,在大部分隧道建设过程中都会面临不同类型的不良地质及其诱发的地质灾害,其中突水突泥灾害是隧道施工遭遇的严重地质灾害之一,往往导致人员伤亡、经济损失、工期延误,甚至被迫停建或改线等严重后果,其发生次数和死亡人数均居前列。突水突泥灾害还往往引起塌方、冒顶等次生灾害,也往往使得地表及隧址区水资源和生态环境受到不同程度的破坏,影响当地居民的正常生活。因此,提前掌握隧道沿线不良地质分布情况已成为隧道安全建设的关键。然而,由于地质条件的复杂性和勘察技术的局限性,很难在施工前将隧道沿线不良地质情况完全搞清楚。这就需要隧道一边施工,一边进行洞内超前预报工作。施工期突水突泥灾害源预报和灾害预警已成为隧道工程安全高效施工所需解决的重要科学和技术问题。隧道不良地质超前预报已成为了隧道建设不可缺少的工序。

隧道突水突泥重大灾害的发生往往是由于掌子面前方赋存有断层、破碎带、溶洞等不良地质体,这些不良地质体中充填大量的地下水或泥体,时常与地表水或暗河存在水力联系,如何提前判断隧道前方是否存在不良地质体、查明其含水情况尤其是水量大小至关重要。由于物探的多解性以及地质条件的复杂性,隧道不良地质超前预报需要突破不少关键理论和技术问题,如突水突泥灾害源空间赋存状态的超前预报、充填水量的定量预报、三维瞬变电磁探测与成像方法、多元地球物理信息联合反演与综合探测、超前预报多解性问题的解决、TBM 施工隧道有效超前地质预报技术等等。自 2002 年开始,作者带领研究小组开展隧道施工超前地质预报理论、方法、仪器以及应用方面的研究。隧道超前地质预报是一项责任重大的工作,如何提高不良地质预报的准确率、不遗漏重大灾害源是隧道安全施工的前提。作者始终贯彻“理论与实践相结合”和“服务工程”的指导思想。2003 年开始,在沪蓉西高速公路多条高风险岩溶隧道中从事了超前地质预报工作,沪蓉西高速公路隧道建设中的预报成为研发超前预报技术、培养专门人才的现场试验基地。随着超前预报实践和技术水平的不断提升,超前地质预报技术在多个隧道工程中相继得到推广和应用,其他代表性的应用工程如青岛胶州湾海底隧道、湖北三峡翻坝高速公路隧道群、湖北宜巴高速公路隧道群、江西吉莲高速公路钟家山隧道、云桂铁路(那达隧道、高祥隧道)、成兰铁路跃龙门隧道、四川锦屏二级电站辅助洞、四川江边水电站引水隧洞、乌东德水电站交通洞、重庆轨道交通

中梁山隧道、大连地铁、广州地铁、黄岛国家战略石油储备库等等。以工程现场为依托、以理论和方法研究为核心,从工程中发现問題、提炼科學問題和發展方向,不斷解決關鍵理論和技術難題,再回到工程中驗證、應用和推廣。歷經十余年的研究和積累,隧道超前地質預報的理論、技術和儀器研究得到了較為長足的進步和發展。本書是作者及帶領團隊十余年理論研究與大量現場應用實踐的總結,以“突水突泥災害源有效超前地質預報”為目標,採用理論分析、室內大規模模型試驗、數值模擬和現場反復驗證等手段,自主研發了隧道三維激發極化超前地質預報技術,建立了獨具特色的“四階段全過程”的隧道綜合超前地質預報技術體系及綜合解譯方法,提出了隧道綜合超前地質預報多元數據空間結構約束聯合反演方法,並初步提出了 TBM 施工隧道的超前地質預報解決方案。然而,由於隧道工程突水突泥災害源超前預報理論與技術是涉及地質學、地球物理學、岩石力學、隧道及地下工程、計算機科學以及電子信息科學等多學科交叉的重要研究課題,涉及面廣,研究难度大,仍有許多研究工作需要進一步開展。

本書共 9 章,詳細介紹隧道突水突泥災害源超前地質預報的技術現狀及自主研究成果。第 1 章主要闡述超前地質預報技術的應用背景、發展歷程、技術現狀、存在問題和發展趨勢;第 2 章分析、歸納和揭示突水突泥災害源的賦存規律和地質特征,梳理典型的突水突泥災害案例,形成了超前預報的地質基礎;第 3 章重點介紹目前常用的多種超前預報技術的原理、特點、適用範圍和存在問題;第 4 章介紹在中遠距離(80m)範圍內隧道瞬變電磁技術預報含水構造方面的自主研究成果和進展;第 5 章介紹自主研發的隧道激發極化超前地質預報方法的技術原理、水量估算技術、三維反演成像方法、專用儀器以及搭載於 TBM 的方法;第 6 章針對隧道施工中精細化探測需求,介紹了在跨孔電阻率 CT、三維孔中電阻率成像等方面的研究進展和成果;第 7 章闡述了在隧道綜合超前地質預報與聯合解譯方面的研究成果,包括綜合超前地質預報原則、內容以及“四階段全過程”漸進式的突水突泥災害源綜合超前地質預報技術體系,重點闡述了在多元預報信息聯合反演方面的最新成果;第 8 章介紹相關研究成果的代表性工程應用案例;第 9 章展望了超前地質預報的發展方向與遠景目標。本書是作者和團隊人員多年來在該領域研究成果的總結,希望能夠為隧道施工超前地質預報研究和實踐提供較為有益的參考。

感謝國家 973 項目(2013CB036000,2014CB046901,2015CB058101)、國家重大科研儀器設備研製專項(51327802)、國家自然科學基金重點項目(51139004)、國家十二五科技支撐計劃項目(2013BAK06B01)、國家自然科學基金其他項目(51479104,51379112,51422904,41272385)對相關研究給予的資助,感謝多年來張慶松、李樹忱、薛翊國、劉斌、蘇茂鑫、李利平、孫懷鳳、許振浩、聶利超、林春金、石少帥等課題組成員和多位博士生、碩士生在理論研究、室內及現場試驗中所做

的贡献,感谢对本书相关技术研究给予帮助的钟世航教授、张之淦研究员、李貅教授、何发亮研究员等。对于为本研究提供现场试验条件和配合的多个合作单位和工程技术人员,在此一并表示衷心的感谢。

由于著者水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,恳请广大专家和读者批评指正。

作 者

2014 年 12 月于济南

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 前言                         |    |
| 第 1 章 绪论                   | 1  |
| 1.1 引言                     | 1  |
| 1.2 隧道超前地质预报的作用和意义         | 6  |
| 1.3 超前地质预报发展与现状            | 8  |
| 1.3.1 钻爆法施工隧道超前地质预报的发展与现状  | 11 |
| 1.3.2 TBM 施工隧道超前地质预报的发展与现状 | 16 |
| 1.3.3 隧道施工综合超前地质预报的发展与现状   | 18 |
| 1.4 隧道超前地质预报存在的问题          | 19 |
| 1.5 本书的主要内容                | 20 |
| 第 2 章 隧道突水突泥灾害源的地质特征       | 22 |
| 2.1 引言                     | 22 |
| 2.2 突水突泥灾害源赋存特征            | 22 |
| 2.2.1 突水突泥灾害类型             | 22 |
| 2.2.2 岩溶突水突泥灾害源发育的基本规律     | 23 |
| 2.2.3 岩溶突水突泥灾害源发育的主控因素     | 26 |
| 2.2.4 典型突水突泥灾害源赋存特征        | 35 |
| 2.2.5 隧道突水突泥灾害的灾变特征        | 39 |
| 2.3 典型突水突泥案例与地质分析          | 40 |
| 2.3.1 裂隙型突水突泥典型案例          | 40 |
| 2.3.2 断层型突水突泥典型案例          | 48 |
| 2.3.3 溶洞溶腔型突水突泥典型案例        | 51 |
| 2.3.4 暗河型突水突泥典型案例          | 54 |
| 2.4 本章小结                   | 55 |
| 第 3 章 隧道不良地质超前地质预报方法       | 57 |
| 3.1 引言                     | 57 |
| 3.2 超前地质预报方法的物性基础和物性差异     | 57 |
| 3.2.1 地震波超前预报方法的物性基础       | 58 |
| 3.2.2 地质雷达超前预报方法的物性基础      | 58 |
| 3.2.3 电阻率超前预报方法的物性基础       | 59 |

|       |                                 |     |
|-------|---------------------------------|-----|
| 3.2.4 | 激发极化超前预报方法的物性基础 .....           | 59  |
| 3.2.5 | 其他超前预报方法的物性基础 .....             | 60  |
| 3.3   | 地质分析法 .....                     | 61  |
| 3.3.1 | 工程地质调查法 .....                   | 62  |
| 3.3.2 | 超前导洞(坑)法 .....                  | 64  |
| 3.3.3 | 超前水平钻孔法 .....                   | 64  |
| 3.4   | 地震波超前预报方法 .....                 | 65  |
| 3.4.1 | 基于直线类观测方式的地震超前预报方法 .....        | 66  |
| 3.4.2 | 基于三维空间观测方式的地震超前预报方法 .....       | 68  |
| 3.4.3 | 基于极小偏移距观测方式的地震超前预报方法 .....      | 70  |
| 3.4.4 | TBM 施工隧道专用的地震超前预报方法 .....       | 71  |
| 3.5   | 电法类超前预报方法 .....                 | 74  |
| 3.5.1 | 地质雷达超前地质预报方法 .....              | 74  |
| 3.5.2 | 瞬变电磁超前地质预报方法 .....              | 79  |
| 3.5.3 | 激发极化/电阻率法超前地质预报方法 .....         | 82  |
| 3.6   | 其他超前地质预报方法 .....                | 87  |
| 3.6.1 | 岩体温度法 .....                     | 87  |
| 3.6.2 | 红外探水法 .....                     | 88  |
| 3.7   | 本章小结 .....                      | 89  |
| 第 4 章 | 中远距离含水构造瞬变电磁预报理论与方法 .....       | 90  |
| 4.1   | 引言 .....                        | 90  |
| 4.2   | 隧道瞬变电磁超前探测基本方法和原理 .....         | 91  |
| 4.2.1 | 瞬变电磁法基本理论与超前探测方法 .....          | 91  |
| 4.2.2 | 瞬变电磁隧道探测改进 .....                | 92  |
| 4.3   | 隧道多点阵列式瞬变电磁探测方法与不良地质体响应规律 ..... | 96  |
| 4.3.1 | 隧道多点阵列式瞬变电磁探测方法原理 .....         | 96  |
| 4.3.2 | 隧道多点阵列式瞬变电磁探测三维响应规律 .....       | 97  |
| 4.3.3 | 隧道多点阵列式瞬变电磁探测工作方法 .....         | 107 |
| 4.4   | 隧道多点阵列式瞬变电磁探测数据解释技术 .....       | 108 |
| 4.4.1 | 均匀半空间中回线源瞬变电磁中心点视电阻率公式 .....    | 109 |
| 4.4.2 | 含偏移距观测点瞬变电磁水平和垂直磁场频率域响应 .....   | 110 |
| 4.4.3 | 含偏移距观测点瞬变电磁时间域响应及晚期视电阻率公式 ..... | 116 |
| 4.4.4 | 方法验证与模型算例 .....                 | 116 |
| 4.4.5 | 矢量合成电阻率 .....                   | 119 |
| 4.5   | 钟家山隧道左洞瞬变电磁超前地质预报应用案例 .....     | 120 |

|                                                  |            |
|--------------------------------------------------|------------|
| 4.6 本章小结 .....                                   | 121        |
| <b>第5章 近距离含水构造激发极化超前预报理论与方法 .....</b>            | <b>123</b> |
| 5.1 引言 .....                                     | 123        |
| 5.2 激发极化基本原理 .....                               | 124        |
| 5.3 隧道激发极化超前探测的多同性源阵列式观测方式与正演模拟 .....            | 125        |
| 5.3.1 多同性源阵列激发极化法观测模式 .....                      | 125        |
| 5.3.2 多同性源阵列式激发极化超前探测的正演模拟及其对含水构造的<br>响应特征 ..... | 126        |
| 5.4 多同性源阵列激发极化超前探测的三维反演成像方法 .....                | 131        |
| 5.4.1 基于加权函数的三维电阻率反演成像理论与方法 .....                | 131        |
| 5.4.2 多同性源阵列激发极化法超前探测的反演数值算例 .....               | 136        |
| 5.5 激发极化超前探测水量定量估算技术 .....                       | 145        |
| 5.5.1 二电流半衰时之差参数区分自由水和束缚水的微观机理 .....             | 146        |
| 5.5.2 二电流半衰时之差与水量关系的物理模型试验 .....                 | 150        |
| 5.6 隧道含水构造三维定位与水量估算技术 .....                      | 160        |
| 5.7 隧道超前地质预报专用的激发极化仪 .....                       | 161        |
| 5.7.1 时域激发极化仪 .....                              | 161        |
| 5.7.2 多同性源阵列式激发极化仪 .....                         | 162        |
| 5.8 多同性源阵列式激发极化超前探测方法的应用案例 .....                 | 163        |
| 5.8.1 地质分析与测线布置 .....                            | 163        |
| 5.8.2 激发极化超前探测数据处理与解释 .....                      | 164        |
| 5.8.3 预报结果与开挖情况对比 .....                          | 165        |
| 5.9 多同性源阵列式激发极化技术用于 TBM 施工隧道的展望 .....            | 165        |
| 5.10 本章小结 .....                                  | 167        |
| <b>第6章 钻孔精细三维探测理论与方法 .....</b>                   | <b>169</b> |
| 6.1 引言 .....                                     | 169        |
| 6.2 电阻率跨孔 CT 约束反演成像方法 .....                      | 170        |
| 6.2.1 含不等式先验信息约束的电阻率 CT 反演方程 .....               | 170        |
| 6.2.2 偏导数矩阵的并行解析快速求解方法 .....                     | 171        |
| 6.3 跨孔电阻率 CT 超前地质预报方法 .....                      | 172        |
| 6.3.1 跨孔电阻率 CT 探测的基本原理 .....                     | 172        |
| 6.3.2 二维跨孔电阻率 CT 组合观测模式及影响因素分析 .....             | 173        |
| 6.3.3 三维跨孔电阻率 CT 探测影响因素分析 .....                  | 179        |
| 6.3.4 跨孔电阻率 CT 探测物理模型试验 .....                    | 183        |

|              |                                      |            |
|--------------|--------------------------------------|------------|
| 6.3.5        | 跨孔电阻率 CT 探测应用案例 .....                | 187        |
| 6.3.6        | 跨孔电阻率 CT 超前探测技术小结 .....              | 189        |
| 6.4          | 钻孔(单孔)电阻率成像超前探测技术 .....              | 190        |
| 6.4.1        | 钻孔(单孔)电阻率成像超前探测的观测模式 .....           | 190        |
| 6.4.2        | 钻孔(单孔)电阻率成像超前探测正演响应特征 .....          | 191        |
| 6.4.3        | 钻孔(单孔)电阻率成像超前探测反演成像 .....            | 194        |
| 6.4.4        | 钻孔(单孔)电阻率成像超前探测物理模型试验 .....          | 198        |
| 6.5          | 本章小结 .....                           | 200        |
| <b>第 7 章</b> | <b>隧道综合超前地质预报与联合解译方法 .....</b>       | <b>201</b> |
| 7.1          | 引言 .....                             | 201        |
| 7.2          | 综合超前地质预报基本原则 .....                   | 202        |
| 7.3          | 隧道施工综合超前地质预报方法 .....                 | 204        |
| 7.3.1        | 常用超前地质预报方法的特点分析 .....                | 205        |
| 7.3.2        | 隧道不良地质综合超前预报方案与流程 .....              | 206        |
| 7.3.3        | “四阶段全过程”的突水突泥灾害源综合超前预报方法与体系 .....    | 209        |
| 7.4          | 基于空间结构约束联合反演的隧道综合超前地质预报 .....        | 214        |
| 7.4.1        | 多元超前预报数据的联合反演思想 .....                | 215        |
| 7.4.2        | 空间结构约束联合反演方法 .....                   | 217        |
| 7.4.3        | 以空间结构约束联合反演为基础的综合地球物理探测的典型实例 ...     | 223        |
| 7.5          | 隧道施工许可机制与突涌水灾害综合预警 .....             | 229        |
| 7.5.1        | 施工许可机制 .....                         | 229        |
| 7.5.2        | 施工许可流程 .....                         | 229        |
| 7.5.3        | 施工许可原则 .....                         | 231        |
| 7.5.4        | 突涌水灾害综合预测预警 .....                    | 232        |
| 7.6          | 本章小结 .....                           | 236        |
| <b>第 8 章</b> | <b>代表性工程应用案例 .....</b>               | <b>237</b> |
| 8.1          | 引言 .....                             | 237        |
| 8.2          | 山岭隧道超前地质预报实践 .....                   | 237        |
| 8.2.1        | 湖北沪蓉西高速公路齐岳山隧道综合超前地质预报应用案例 .....     | 237        |
| 8.2.2        | 湖北沪蓉西高速公路龙潭隧道综合超前预报与塌方灾害预警案例 .....   | 243        |
| 8.2.3        | 湖北宜巴高速公路马家坡隧道综合超前地质预报与联合反演应用案例 ..... | 248        |
| 8.2.4        | 锦屏二级电站辅助洞综合超前地质预报应用案例 .....          | 252        |
| 8.2.5        | 成兰铁路跃龙门隧道综合超前地质预报应用案例 .....          | 256        |
| 8.3          | 海底隧道超前地质预报实践 .....                   | 260        |

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 8.3.1 | 青岛胶州湾海底隧道工程概况 .....            | 261 |
| 8.3.2 | 青岛胶州湾海底隧道综合超前地质预报的作用和内容 .....  | 262 |
| 8.3.3 | 青岛胶州湾海底隧道综合超前地质预报方法与体系 .....   | 262 |
| 8.3.4 | 青岛胶州湾海底隧道综合超前地质预报代表性案例 .....   | 265 |
| 8.4   | 城市地铁隧道超前地质预报实践 .....           | 271 |
| 8.4.1 | 城市地铁超前预报方法的选择 .....            | 271 |
| 8.4.2 | 城市地铁超前预报方法的实施 .....            | 271 |
| 8.4.3 | 大连地铁某区间超前地质预报代表性案例 .....       | 272 |
| 8.4.4 | 大连地铁某区间重点地段超前预报实践 .....        | 277 |
| 8.4.5 | 广州地铁某车站超前地质预报代表性案例 .....       | 279 |
| 8.5   | 隧道施工许可机制与综合超前地质预报的联合应用案例 ..... | 282 |
| 8.5.1 | 工程概况 .....                     | 282 |
| 8.5.2 | 初步评估 .....                     | 284 |
| 8.5.3 | 二次评估与动态评估 .....                | 285 |
| 8.5.4 | ZK19+240~ZK19+420 段风险控制 .....  | 286 |
| 8.5.5 | ZK19+420~ZK19+460 段风险控制 .....  | 286 |
| 8.5.6 | ZK19+460~ZK19+509 段风险控制 .....  | 287 |
| 8.5.7 | ZK19+509~ZK19+610 段风险控制 .....  | 288 |
| 8.5.8 | ZK19+610~ZK20+180 段风险控制 .....  | 292 |
| 8.6   | 本章小结 .....                     | 292 |
| 第9章   | 展望 .....                       | 293 |
| 参考文献  | .....                          | 297 |
| 彩图    |                                |     |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

随着铁路公路工程、水利水电工程、市政工程等重大基础工程的快速发展,目前我国已经成为世界上隧道建设规模与难度最大的国家。在交通工程领域,我国幅员辽阔,各地经济发展不平衡,相对落后的交通基础设施制约了经济发展。为了适应国民经济持续快速增长的需要,我国将交通运输列为国民经济发展的战略重点之一。根据《2013 年交通运输行业发展统计公报》,截至 2013 年底,全国公路总里程达 435.62 万 km,公路密度为 45.38km/百 km<sup>2</sup>,全国铁路营业里程达 10.31 万 km,路网密度 107.4km/万 km<sup>2</sup>。在未来 10 年到 20 年中,将新建近 100 万 km 公路,其中高速公路约 6 万 km,新建 3 万 km 铁路,其中高速铁路超过 1 万 km。随着我国东部地区交通网络日益完善,铁路公路交通路网将向西部纵深拓展,呈现“标准高、线路长、规模大、桥隧比高、深长隧道多”的鲜明特点。隧道是交通工程的咽喉和生命线工程,2013 年我国运营铁路隧道 11074 座,总长 8938.78km,在建铁路隧道 4206 座,长度 7795.15km,正规划 4600 余座铁路隧道,总长约 10600km(数据未统计港澳台的);2013 年底我国运营公路隧道 11359 座,总长 9605.6km,到 2020 年公路隧道总里程将突破 10000km(数据未统计港澳台的)。我国已经建成和在建的代表性的特长铁路隧道和公路隧道见表 1.1 和表 1.2。以贵广铁路为例,全长 857km,隧道 216 座,约占线路总长的 53.9%,其中高风险岩溶隧道 8 座,3 座超过 10km。正在修建的成兰铁路,隧道占线路总长度的 67.07%,穿越活动断裂带和可熔岩区域,隧道最大埋深达到 1900m,最长达 15km。同时,在我国东部沿海地区由于海峡江河阻隔,导致某些关键交通节点未打通,亟待建设一些跨海交通通道,跨海越江隧道成为必不可少的交通承载形式,许多水下隧道已经建成,如南京长江公路隧道(全长 3385m)、武汉长江公路隧道(全长 3270m)、上海崇明越江隧道(盾构区间段长度为 6975m)、厦门翔安海底隧道(全长约 5950m)、青岛胶州湾海底隧道(线路总长 7800m)等。在未来几十年内我国规划了穿越渤海湾、琼州海峡、台湾海峡的多条世界级跨海水下隧道工程和近百座跨越江河湖泊的水下隧道,水下隧道建设即将进入快速发展阶段。在城市轨道交通方面,到 2014 年底,全国有 24 个城市已经或正在修建地铁,共有 38 个城市获批建设地铁等轨道交通设施,地铁运营总里程将达 3000km。而 2020 年,将

表 1.1 我国代表性的特长铁路隧道

| 序号 | 名称         | 地点       | 长度/km | 开通年份 |
|----|------------|----------|-------|------|
| 1  | 高黎贡山特长铁路隧道 | 大瑞铁路     | 34.3  | 在建   |
| 2  | 关角特长铁路隧道   | 青藏铁路西格段  | 32.6  | 2012 |
| 3  | 太行山特长铁路隧道  | 石太高铁     | 27.8  | 2007 |
| 4  | 青云山特长铁路隧道  | 永莆铁路     | 22.2  | 2013 |
| 5  | 吕梁山特长铁路隧道  | 太中银铁路    | 20.8  | 2009 |
| 6  | 乌鞘岭特长铁路隧道  | 兰新铁路     | 20.0  | 2006 |
| 7  | 平安特长铁路隧道   | 成兰铁路     | 28.4  | 在建   |
| 8  | 西秦岭特长铁路隧道  | 兰渝铁路     | 28.2  | 在建   |
| 9  | 岷山特长铁路隧道   | 成兰铁路     | 25.0  | 在建   |
| 10 | 香山特长铁路隧道   | 包兰铁路银兰二线 | 24.0  | 在建   |

表 1.2 我国代表性的特长公路隧道

| 序号 | 名称      | 地点            | 长度/m  | 开通年份 |
|----|---------|---------------|-------|------|
| 1  | 秦岭终南山隧道 | 陕西            | 18020 | 2007 |
| 2  | 米仓山隧道   | 四川、陕西<br>巴陕高速 | 13833 | 在建   |
| 3  | 西山隧道    | 山西<br>太古高速    | 13654 | 2012 |
| 4  | 二郎山隧道   | 四川<br>名康高速    | 13433 | 在建   |
| 5  | 虹梯关隧道   | 山西<br>长平高速    | 13122 | 2013 |
| 6  | 大坪里隧道   | 甘肃<br>连霍高速    | 12290 | 2009 |
| 7  | 云山隧道    | 山西<br>和汾高速    | 11408 | 在建   |
| 8  | 包家山隧道   | 陕西<br>包茂高速    | 11200 | 2009 |
| 9  | 宝塔山隧道   | 山西<br>和汾高速    | 10480 | 2012 |
| 10 | 泥巴山隧道   | 四川<br>雅西高速    | 10007 | 2012 |

有超过 40 个城市建设地铁,总规划里程达 7000km。在水利水电工程领域,我国将水电和水资源开发作为重点发展领域,合理的水电水资源开发对于保障我国能源安全、改善能源结构、优化水资源配置具有重要意义。我国水能资源主要集中在西南、西北和中部地区,随着雅鲁藏布江、金沙江、澜沧江、雅砻江等多条江河流域的开发以及南水北调等跨流域调水工程的规划,20 多个世界级的大型水利水电工程和数十条跨流域调水工程正在建设。与之相配套,将建设数百条引水隧洞工程,如锦屏Ⅱ级水电站 4 条引水隧洞,单洞长约 17km,最大埋深达 2525m;规划中的南水北调西线第一期工程主要由深埋长隧洞组成,总长 264km,最长洞段为 73km,最大埋深 1150m;规划中的滇中引水工程输水线路总长超过 600km,由超过 60 座隧洞构成,其关键性控制工程香炉山隧洞全长约 60km,最大埋深超过 1000m;已经开工的引汉济渭工程秦岭引水隧洞全长 98.30km,最大埋深超过 2000m。

中西部山区一直是我国矿产资源、水能水资源开发的重点,同时为了加快中西部区域经济社会发展,今后我国交通等基础建设的重点将逐步向地形地质极为复杂的西部山区和岩溶地区转移。纵观我国交通、水利水电等领域隧道的建设发展历程,可看出隧道建设呈现出两大显著趋势:①复杂地质条件下山区隧道(洞)工程不断增多,工程区域地形艰险、地质复杂、环境恶劣、生态脆弱,面临的地质灾害和施工安全形势十分严峻,隧道建设呈现出“大埋深、长洞线、强岩溶、高水压、地质复杂、地质灾害频发”等显著特点;②江河水下隧道和海底水下隧道快速发展,一些由于海峡水道阻隔的关键交通节点亟须打通,给隧道建设及其安全控制、防灾减灾技术带来了重大技术挑战(郭陕云,2007)。隧道建设是一项典型的改造地质环境的人类工程活动,我国几乎所有的隧道建设都会遭遇不同类型的不良地质及其诱发的地质灾害。隧道施工经常遭遇的不良地质有断层破碎带、岩溶地质(溶洞、溶腔、暗河等)、软弱破碎岩体、岩性不整合接触带等。若不能提前探明不良地质的空间位置、赋存形态等重要属性并进行及时有效的处置,在施工扰动下极易发生突水突泥、塌方、软岩大变形、岩爆等地质灾害,严重危及建设安全和工程质量,因此隧道施工过程中的防灾减灾与工程安全问题日益受到人们的重视。据统计,突水突泥灾害是隧道施工面临的主要地质灾害之一,我国是隧道突水突泥灾害最严重的国家之一,在国内外隧道特大事故中,突水突泥灾害在发生次数和死亡人数方面均居于前列。据统计,1988 年以来修建的铁路隧道在施工中 70% 遇到水害,涌水量在  $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  以上有 31 座,造成停工的时间约占总工期的 30%。在渝怀铁路(圆梁山隧道、武隆隧道、歌乐山隧道等)、成昆铁路(沙马拉达隧道等)、京广铁路(大瑶山隧道、南岭隧道等)、宜万铁路(马鹿箐隧道、野三关隧道等)、大秦铁路(军都山隧道、秦岭隧道等)等铁路工程建设中均发生过重大突水突泥灾害(见表 1.3)。

表 1.3 2000 年以来典型隧道突水突泥灾害

| 隧道名称               | 发生时间            | 灾害损失                                                                                       |
|--------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 渝怀铁路<br>圆梁山隧道      | 2001~2004 年     | 先后发生大规模突水突泥 71 次,造成 9 人死亡,最高水压 4.6MPa,最大涌水量达 72000m <sup>3</sup> /h(2002 年 9 月 11 日)       |
| 渝怀铁路<br>武隆隧道       | 2001~2003 年     | 先后发生大型突水突泥灾害超过 10 次,造成大量设备报废,最大日涌水量达 718 万 m <sup>3</sup> (2003 年 6 月 25 日),经济损失超过 2000 万元 |
| 南广高铁<br>白云隧道       | 2010 年 1 月 16 日 | 瞬间突泥量达 2500m <sup>3</sup> ,造成 6 人死亡                                                        |
| 宜万铁路<br>马鹿箐隧道      | 2004~2008 年     | 先后发生特大突水突泥 19 次,2006 年 1 月 21 日与 2008 年 4 月 11 日的两次特大突水突泥灾害共导致 15 人死亡,导致工期延误超过 2 年         |
| 宜万铁路<br>野三关隧道      | 2007 年 8 月 5 日  | 90min 内突水量 15.1 万 m <sup>3</sup> ,突泥石量 5.35 万 m <sup>3</sup> ,造成 10 人死亡,导致工期延误半年           |
| 城黔公路<br>通渝隧道       | 2002~2003 年     | 大规模突水突泥 10 次,造成 5 人死亡                                                                      |
| 沪蓉西高速公路<br>龙潭隧道    | 2006~2007 年     | 大规模突泥 2 次,突泥量超过 9000m <sup>3</sup> ,大规模塌方 3 次,导致工期延误超过 1 年                                 |
| 锦屏Ⅱ级电站辅助<br>洞、输水隧洞 | 2005~2010 年     | 水压超过 10MPa,最大瞬时涌水量达 7m <sup>3</sup> /s,施工中多次发生涌水事故,严重影响了施工进度                               |

以宜万铁路为例,在建设过程中多条隧道发生重大突水突泥灾害,马鹿箐隧道施工中先后发生 19 次严重的突水突泥灾害,瞬间突涌水量创世界铁路建设之最,其中 2006 年 1 月 21 日与 2008 年 4 月 11 日的两次特大突水突泥灾害共导致 15 人死亡;野三关隧道于 2007 年 8 月 5 日突发大型突水突泥灾害,致 10 人死亡。在水利水电工程方面,锦屏Ⅱ级电站辅助洞、输水隧洞施工中遭遇多次高压大流量突涌水灾害,水压超过 10MPa,最大流量超过 7m<sup>3</sup>/s,严重影响了施工进度和建设安全。

目前除了钻爆施工方法,我国隧道建设逐步引入全断面隧道岩石掘进机(tunnel boring machine, TBM)施工方法。我国在建和拟建的绝大多数深长隧道的长径比达到或超过 600~1000,按照国际通行惯例应优先采用 TBM 施工方法,国际上公认隧道掘进机施工方法具有“掘进速度快、施工扰动小、成洞质量高、综合经济社会效益高”等优势。20 世纪 90 年代以来,我国 TBM 应用发展迅速,水电部门和铁路部门先后通过设备引进和合作生产的方式引入 TBM 施工技术,至今我国采用 TBM 掘进的典型隧道工程有:甘肃引大入秦工程、山西万家寨引黄入晋工程、西安至安康铁路秦岭Ⅰ线隧道、西安至南京铁路桃花铺 1 号隧道和磨沟

岭隧道、辽宁大伙房引水隧洞、昆明掌鸠河引水隧洞、引汉济渭工程引水隧洞等。据不完全统计,未来我国可用掘进机开挖的隧道超过 6000km, TBM 的需求量超过 200 台,我国将成为全球 TBM 应用大国。以论证中的渤海湾跨海隧道为例,规划全长约 120km,经过论证认为最佳方案是“以 TBM 为主,以钻爆法为辅”,共需约 15 台 TBM;再比如规划中的南水北调西线第一期工程深埋长隧洞总长 264km,拟主要采用 TBM 方法, TBM 需求数量近 20 台;规划中的滇中引水工程香炉山隧道全长约 60km,其中约二分之一的段落拟采用 TBM 方法;已经开工的引汉济渭工程秦岭引水隧洞全长 98.30km,其穿越秦岭主脊段 39.08km 采用了 2 台 TBM 相向掘进。TBM 施工方法比较适合地层变化小、岩体完整性好、岩石强度中等的情况,对地层变化幅度大、不良地质发育等地质条件适应能力差。TBM 施工中经常遭遇突水突泥、塌方、大变形等,导致掘进机卡机、损坏、报废甚至人员伤亡的重大事故。在我国辽宁大伙房水库输水隧洞工程、昆明掌鸠河引水工程上公山隧洞工程、广西天生桥二级水电站引水隧洞工程、锦屏 II 级水电站排水隧洞工程、台湾北宜高速公路雪山隧道工程、甘肃引洮工程、新疆伊犁河流域八十一大坂输水隧洞工程、青海引大济湟工程、陕西引红济石工程,以及埃塞俄比亚 GD-3 水电站引水隧洞工程、印度 Dul Hasti 水电站引水隧洞工程、意大利 Frasnadello 隧道工程和 Antea 隧道工程等在施工中均发生过事故(见表 1.4),导致 TBM 卡机或机械损毁甚至整机报废、弃用掘进机方案,造成了严重的工期延误和重大的经济损失。据统计,已发生的隧道掘进机重大工程事故中,突(涌)水、塌方和大变形是主要工程地质诱因(在隧道掘进施工各类工程灾害和事故中,坍塌和大变形占 37%,突水突泥占 35%),岩溶含水构造(溶洞、暗河等)、断层破碎带、裂隙发育带、软弱地层等是主要的灾害赋存源(尚彦军等,2007;钱七虎,2012)。

表 1.4 国内外典型的隧道掘进机施工事故

| 序号 | 工程名称                 | 所在国家 | 灾害情况                                                                                                      |
|----|----------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 辽宁大伙房水库<br>输水隧洞工程    | 中国   | 掘进机被埋于断层破碎区 200 余天                                                                                        |
| 2  | 昆明掌鸠河引水工程<br>上公山隧洞工程 | 中国   | 在 2003 年 4 月至 2005 年 9 月底的 2 年多时间内发生 8 次在断层破碎带内重大卡机事故,停工超过 10 个月;TBM 掘进约 7km 后改由钻爆法施工,工期延误 1 年多,直接经济损失上亿元 |
| 3  | 广西天生桥二级水电站<br>引水隧洞工程 | 中国   | 遇大规模溶洞、暗河、断层、岩爆、泥石流等复杂地质情况,累计 10 年掘进仅 7.5km                                                               |
| 4  | 锦屏 II 级水电站<br>排水隧洞工程 | 中国   | 发生多次塌方和岩爆,顶拱及两侧边墙大范围坍塌,造成掘进机主梁断裂,掘进机刀盘向后约 30m 范围内被石碴掩埋,TBM 彻底瘫痪                                           |

续表

| 序号 | 工程名称                         | 所在国家  | 灾害情况                                                             |
|----|------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------|
| 5  | 台湾北宜高速公路雪山隧道工程               | 中国    | 遭遇 6 处断层、98 处剪裂带,出现 36 处涌水、63 次塌方,掘进机 26 次被卡,历时 15 年才建成          |
| 6  | 甘肃引洮工程                       | 中国    | 因软弱富水流沙,单护盾 TBM 被卡、沉陷,停机 1 年以上,直接经济损失估计在 8000 万元至 1 亿元           |
| 7  | 新疆伊犁河流域八十一大坂输水隧洞工程           | 中国    | 围岩软弱破碎、大变形,掘进机频繁被卡,卡机次数 48 次,累计停机时间 379 天,工期延误 2 年,造成重大经济损失      |
| 8  | 青海引大济湟工程                     | 中国    | 围岩软弱变形,穿越富水地层,TBM 频繁被卡,累计卡机停机时间 2 年以上,改造 TBM 后再掘进,更换施工单位,经济损失巨大  |
| 9  | 陕西引红济石工程                     | 中国    | 软弱富水、大变形,掘进机频繁被卡,改造 TBM 后再掘进,停机时间 2 年以上                          |
| 10 | GD-3 水电站引水隧洞工程               | 埃塞俄比亚 | 遭遇断层突泥,TBM 无法继续前行                                                |
| 11 | Dul Hasti 水电站引水隧洞工程          | 印度    | 历时 12 年建成,期间发生了数次突水、突泥,2000 年 2 月在断层破碎带与涌水段落中 TBM 被卡 8 个月,机器损毁报废 |
| 12 | Frasnadello 隧道工程和 Antea 隧道工程 | 意大利   | 由于坍塌、涌水,造成掘进机被困,造成工期延误和严重经济损失                                    |

总结钻爆法隧道和 TBM 施工隧道中已有的灾害案例,发现隧道施工期突水突泥灾害具有“强隐蔽性、强复杂性、强突发性、强破坏性”的四大基本特征,而且还往往引起塌方、冒顶、二次突涌水等次生灾害,使得灾害效应进一步放大甚至“倍增”,轻者造成不同程度的工期延误和经济损失,严重者导致机毁人亡,甚至工程停建、改线或报废。同时,隧道突水突泥也使得隧址区水资源和生态环境受到不同程度的破坏,影响当地居民的正常生产生活。除此之外,若突水突泥灾害源在施工期探查不准确或者处置不得当、不彻底,有可能造成隧道运营期重大安全隐患,容易出现运营期漏水、冰凌灾害、塌方、结构破坏等严重危及交通安全的问题。因此,突水突泥灾害已经成为隧道建设所面临的重大挑战之一,备受国内外隧道工程同行的关注。

1.2 隧道超前地质预报的作用和意义

隧道突水突泥灾害的防控是工程地质勘察分析、灾害源探测、灾变监测与预