



岩溶区盾构隧道溶洞形态 精细表征与稳定性评判方法

孙尚渠 渠述锋 宋曙光 孙洪斌 贺 鹏

著



上海科学技术出版社

岩溶区盾构隧道溶洞形态 精细表征与稳定性评判方法

孙尚渠 渠述锋 宋曙光 孙洪斌 贺鹏 著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书紧密围绕“精细化”这一主旨,重点解释了复杂形态干溶洞及充水溶洞的“精细化重构”问题,实现了不规则溶洞的可视化重构和数值模拟计算;提出了溶洞复杂形态多层次表征参数与傅里叶普适性表征因子,实现了溶洞高度不规则几何形态的“精细化表征”;建立了复杂形态溶洞与盾构隧道之间的临界安全距离预测模型;研制了富水岩溶地层盾构施工围岩稳定性模型试验系统;揭示了盾构开挖扰动与承压岩溶渗透双重作用下围岩多物理场演化规律;实现了赋存不规则形态溶洞下盾构隧道施工稳定性的“精细化评判”。综合上述研究成果,开发了复杂形态溶洞多参数表征及稳定评判软件,为溶洞灾害源的“精细化处治”提供指导。

全书以理论技术分析为基础,结合相关工程案例,深入浅出地介绍了富水岩溶地层盾构隧道复杂岩溶构造的精细探测、定量表征和稳定评判,可为科研人员、高等院校相关专业的师生、工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩溶区盾构隧道溶洞形态精细表征与稳定性评判方法/
孙尚渠等著. — 上海:上海科学技术出版社, 2021.3
ISBN 978-7-5478-5242-2

I. ①岩… II. ①孙… III. ①岩溶区—隧道工程—盾
构(隧道)—研究 IV. ①U455.43

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第031084号

岩溶区盾构隧道溶洞形态精细表征与稳定性评判方法

孙尚渠 渠述锋 宋曙光 孙洪斌 贺 鹏 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码200235 www.sstp.cn)

上海展强印刷有限公司 印刷

开本 787×1092 1/16 印张 13.25

字数: 220千字

2021年3月第1版 2021年3月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-5242-2/TV·12

定价: 80.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换 电话: 021-66366565

前 言

近年来,随着经济的快速发展和城市建设的大力推进,我国城市交通流量大幅上升,交通拥堵、城市环境日益恶化已成为各大城市普遍存在和亟待解决的重要问题。为有效缓解地面交通压力、改善城市交通环境,我国城市建设开始逐步转向地下空间开发利用。作为一种安全、快捷、高效、环保的交通形式,城市地铁可充分利用城市地下空间,提高城市空间资源利用率。截至2020年11月21日,我国城市地铁运营线路里程超过6 905 km,有61个城市的城轨交通线网建设规划正在实施,未来3年我国城市地铁运营里程还将新增1 000 km,因此地铁已成为我国城市公共交通的重要方式,并逐渐成为城市现代化建设的重要符号。

盾构法作为机械化施工法的典范,可兼顾施工安全、掘进速度、复杂地层适应性和地表沉降控制等要求,已成为修建我国城市地铁隧道的主流工法。与此同时,我国岩溶面积高达363万 km^2 ,大量的城市地铁隧道将不可避免地穿越岩溶发育区,如济南地铁穿越泉域富水溶洞群、武汉地铁掘进“蜂巢溶洞”、长沙地铁穿越复杂水下溶洞区等。溶洞等典型岩溶产物多具有高隐蔽性,盾构隧道穿越城市岩溶区时会导致岩体结构渗透性增大、岩体力学参数降低,尤其在施工扰动作用下,隧道突涌水、岩溶地基承载力不足、渗漏水、地表岩溶塌陷、盾构机栽头等工程灾害频发,导致了严重的人员伤亡和经济损失。虽然近几年岩溶区盾构隧道围岩失稳理论模型、数值计算及稳定性分析方法等方面的研究日渐完善,但是由于钻探、物探等探查方式的局限性,仍无法准确获取溶洞等典型岩溶产物的精细参数(不仅指溶洞赋存位置,更是指规模、形态、体积等),故目前研究成果多无据可依,无法直接为实际工程提供针对性指导。因此,过于简化的岩溶构造与工程实际严重

不符已然成为盾构隧道安全穿越富水岩溶地层的“瓶颈”问题。

本书共7章,详细介绍了岩溶区盾构隧道溶洞形态精细表征与稳定性评判方法。第1章主要阐述溶洞对隧道稳定性的影响和最小安全厚度预测的研究现状;第2章分析了复杂泉域地层岩溶发育条件及作用反馈机制,并总结了直接型岩溶、间接型岩溶及承压型岩溶三种岩溶发育模式;第3章研究了复杂溶洞水环境下溶洞形态三维点云获取方法;第4章研究了复杂形态溶洞三维几何形态表征方法;第5章针对不同位置溶洞,研究了考虑溶洞边界形态影响效应的临界安全距离预测模型;第6章研究了盾构掘进过程岩体结构的多物理场演化规律;第7章通过软件系统开发实现了溶洞多参数表征与稳定性评判,并在济南地铁工程中成功应用。

本书在撰写成稿过程得到了各方面的支持,孙尚渠主要负责全书的统筹工作,并完成了第1、4、6章的撰写;孙洪斌完成了第3、7章的撰写;宋曙光主要完成了第5章的撰写;贺鹏完成了第2章的撰写;渠述锋主要对全书进行统稿,并参与了部分章节的撰写。同时感谢陈迪杨、张延欢在本书编著中给予的相关素材支持。

由于作者水平、经验及文字表述方面的局限与不足,书中内容不尽完善、挂一漏万,敬请读者批评指正。

作者

2021年1月

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	国内外研究现状	3
1.1.1	溶洞精细化探测及形态表征方面	3
1.1.2	溶洞对隧道围岩稳定性影响方面	6
1.1.3	溶洞与隧道安全距离研究方面	10
1.2	技术内容、研究现状与发展趋势	11
1.2.1	技术内容	11
1.2.2	研究现状	13
1.2.3	发展趋势	14
第 2 章	泉域地层岩溶发育机制与特征研究	15
2.1	区域地质水文特征研究	16
2.1.1	区域地质特征	16
2.1.2	区域水文特征	18
2.1.3	典型泉水成因	20
2.2	岩溶发育机制及模式	21
2.2.1	岩溶发育机制	21
2.2.2	岩溶发育模式	22
2.3	岩溶发育特征研究	27
2.3.1	溶洞规模大小	27

2.3.2	溶洞充填类型	28
2.3.3	溶洞发育高程统计	28
2.3.4	溶洞与地铁隧道空间位置关系	29

第3章 复杂形态溶洞激光测量与重构方法 31

3.1	复杂形态溶洞激光定量化探测现状	31
3.1.1	干溶洞三维激光定量探测	31
3.1.2	充水溶洞三维激光探测	32
3.2	充水溶洞多波长激光衰减特性试验系统	33
3.2.1	多波长激光发射模组	33
3.2.2	溶洞水环境模拟模块	35
3.2.3	水质浑浊度及激光衰减性测量模块	35
3.3	试验结果与优化选型方案	37
3.3.1	激光衰减系数	37
3.3.2	同一波长、不同溶解介质下激光衰减规律	38
3.3.3	同一介质、不同激光波长下激光衰减规律	40
3.3.4	不同功率激光衰减规律	46
3.3.5	激光最大探测距优化方案	48
3.4	复杂形态溶洞精细化重构方法	50
3.4.1	溶洞激光自动扫描系统	50
3.4.2	复杂形态溶洞点云坐标求解	52

第4章 复杂形态溶洞模型数值计算与定量化表征方法 56

4.1	基于 Geomagic-Comsol 耦合的复杂形态溶洞稳定性分析	57
4.1.1	不规则溶洞几何模型构建思路	57
4.1.2	复杂形态溶洞 Geomagic 点云降噪与模型重构	58
4.1.3	复杂形态溶洞 Geomagic-Comsol 耦合数值模型接口	63
4.2	简化模型与复杂形态溶洞力学性能分析	65
4.2.1	溶洞模型几何形态分类	65

4.2.2	球状与类球状形态溶洞模型	67
4.2.3	方体与类方体形态溶洞模型	69
4.2.4	复杂形态溶洞围岩受力性能	72
4.3	不规则溶洞几何形态多层次表征方法	73
4.3.1	多层次参数表征思路	73
4.3.2	第一层次参数表征参数	75
4.3.3	第二层次参数表征参数	76
4.3.4	第三层次参数表征参数	77
4.4	复杂形态溶洞几何边界二维傅里叶变换	78
4.4.1	溶洞剖面形心坐标计算方法	78
4.4.2	溶洞几何边界傅里叶离散变换方法	80
4.5	基于傅里叶离散变换的溶洞形态普适性表征方法	82
4.5.1	傅里叶形态表征因子	82
4.5.2	既定形态溶洞傅里叶表征因子变化规律	85
4.5.3	傅里叶表征因子与多层次表征参数响应关系	89
4.5.4	溶洞三维形态表征方法	95

第5章 复杂形态充水溶洞与盾构隧道临界安全距离确定方法 97

5.1	隧道与前方溶洞临界安全距离确定方法	98
5.1.1	极限分析法上限定理	98
5.1.2	三维破坏模型	99
5.1.3	临界安全距离确定方法	100
5.1.4	参数敏感度分析	103
5.2	隧道环向充水溶洞临界安全距离确定方法	105
5.2.1	溶洞位于隧道环向上方三维破坏模型(Model I)	105
5.2.2	环向上方临界安全距离计算(Model I)	106
5.2.3	环向上方参数敏感度分析(Model I)	109
5.2.4	溶洞位于隧道环向下方三维破坏模型(Model II)	110
5.2.5	环向下方临界安全距离计算(Model II)	111
5.2.6	环向下方参数敏感度分析(Model II)	114

5.3	溶洞形态表征因子在数值模拟中的考量	116
5.3.1	溶洞正直方位定义	116
5.3.2	正直方位溶洞边界形态表征	117
5.4	复杂形态溶洞临界安全距离数值试验分析	118
5.4.1	围岩稳定性判据	119
5.4.2	数值试验设计	120
5.4.3	数值计算模型	123
5.5	隧道前方复杂形态溶洞临界安全距离预测模型	124
5.5.1	规则形态溶洞临界安全距离数值验证	124
5.5.2	复杂形态溶洞临界安全距离数值结果	125
5.5.3	复杂形态溶洞临界安全距离预测模型	127
5.6	隧道环向复杂形态溶洞临界安全距离预测模型	128
5.6.1	规则形态环向上方溶洞临界安全距离数值验证 (Model I)	128
5.6.2	复杂形态环向上方溶洞临界安全距离数值结果 (Model I)	129
5.6.3	复杂形态环向上方溶洞临界安全距离预测模型 (Model I)	131
5.6.4	规则形态环向下方溶洞临界安全距离数值验证 (Model II)	132
5.6.5	复杂形态环向下方溶洞临界安全距离数值结果 (Model II)	132
5.6.6	复杂形态溶洞环向下方临界安全距离预测模型 (Model II)	135

第6章 复杂形态承压溶洞对盾构隧道围岩稳定性影响模型试验..... 137

6.1	试验方案设计	138
6.1.1	试验目的	138
6.1.2	试验方案	138
6.2	模型试验相似理论与相似材料研制	140

6.2.1	岩石物理力学参数测试	140
6.2.2	流固耦合相似理论	142
6.2.3	流固耦合相似材料研制	145
6.3	富水岩溶地层盾构掘进模型试验系统研发	147
6.3.1	三维可视化模型箱体	147
6.3.2	复合式 EPB 盾构掘进模拟系统	149
6.3.3	复杂形态溶洞 3D 打印模拟系统	158
6.3.4	溶洞水压多参数智能调控系统	158
6.3.5	地表沉降激光扫描测量系统	159
6.3.6	多元数据监测与采集系统	159
6.4	模型试验设计与实施	161
6.4.1	监测方案设计	161
6.4.2	模型体填筑与元件埋设	162
6.4.3	复杂形态溶洞 3D 打印制备	164
6.4.4	盾构施工过程模拟	165
6.5	模型试验数据处理及结果分析	165
6.5.1	安全距离验证及突涌水过程分析	165
6.5.2	岩体结构多元信息演化规律	167
6.5.3	地表沉降模型构建与分析	172
6.5.4	地层损失参数	175

第 7 章 溶洞多参数表征与稳定性评判软件及工程应用 178

7.1	溶洞多参数表征及稳定性评判软件开发	178
7.1.1	软件系统设计目标	178
7.1.2	软件系统架构设计	179
7.1.3	软件系统特点	179
7.2	溶洞多参数表征及稳定性评判软件功能模块	180
7.2.1	工程信息及岩溶数据库模块	181
7.2.2	多参数输入与初始评价模块	181
7.2.3	溶洞形态表征与可视化模块	183

7.2.4	安全处治距离修正计算模块	184
7.2.5	安全处治方案及智慧决策模块	185
7.3	工程应用	185
7.3.1	工程概况	185
7.3.2	复杂形态溶洞精细重构	186
7.3.3	溶洞精细化参数表征	188
7.3.4	溶洞稳定性评判及安全处治	189
参考文献		193

近年来,随着我国城市建设进程的不断加快,城市人口的迅速增长,城市交通流量大幅上涨,地面交通拥堵、城市环境日益恶化等各种“城市病”日益突出,已成为各大城市亟待解决的难题^[1]。地铁工程能够充分利用地下空间、减少城市地面拥堵,已经成为解决交通拥堵等问题和运输供需矛盾的有效途径^[2]。截至2020年11月21日,我国轨道交通运营线路达到219条,运营总里程超过6905 km,如图1.1所示。由于我国幅员辽阔,城市地质条件极为复杂,轨道交通工程的大量修建面临着各种难题,尤以富水岩溶地层最为突出^[4]。我国岩溶面积高达363万 km²,约占我国陆地面积的三分之一,因此,大量的轨道交通建设将难以避免穿越岩溶发育区^[5],如济南地铁需要穿越硬岩富水溶洞群、武汉地铁需穿越“蜂巢溶洞”、长沙地铁需穿越复杂水下溶洞区等。

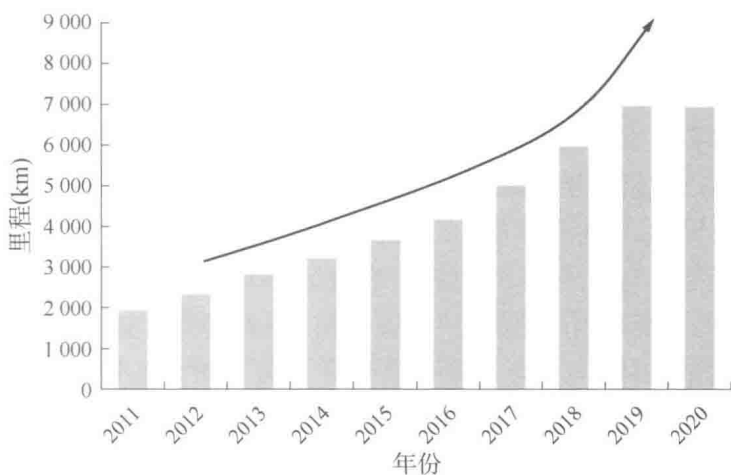


图 1.1 我国轨道交通运营里程

目前,城市地铁的修建多采用盾构法施工,由于盾构法施工具有安全、高效、机械化程度高、对城市地面交通干扰小等优势,是大部分城市轨道交通的首选施工方法^[6-8]。溶洞等典型岩溶产物多具有高隐蔽性,故盾构隧道穿越城市岩溶区时,会导致岩体结构渗透性增大、岩体力学参数降低,尤其在施工扰动作用下,隧道突涌水、岩溶地基承载力不足、渗漏水、地表岩溶塌陷、盾构机栽头等工程灾害频发^[9]。如何保障盾构隧道安全穿越富水岩溶地层是目前面临的重大难题和挑战,若处治不当极易引发突涌水等灾害,这不仅严重影响盾构隧道的安全施工,更会破坏城市的地下水环境和运移系统^[10]。

岩溶区隧道施工过程中常见的岩溶塌陷及突涌水灾害,多是由于盾构隧道与溶洞等灾害源之间安全岩体结构厚度过小所致,盾构施工扰动及岩溶水对岩体的渗透弱化作用造成岩体结构失稳,进而诱发突涌水灾害,因此,岩溶区溶洞等灾害源与隧道间的安全距离判定至关重要。如何合理判定溶洞等灾害源的安全处治距离决定着盾构隧道施工的安全程度,同时影响隧道工程建设经济成本。若安全距离判定过于保守,工程中自稳性良好的溶洞均得到处治,工程建设成本将大大增加,且溶洞充填注浆治理过程往往影响泉域地层地下水的正常运移,改变泉水的运移通道,与保泉宗旨相违背;反之,若安全距离判定过小,高风险溶洞并未得到有效处治,将影响盾构隧道安全施工,引发突涌水、岩溶塌陷等工程灾害。因此,研究泉域地层盾构隧道与溶洞临界安全距离对于工程建设具有重要意义。

目前,无论是在岩溶区勘测阶段,还是隧道施工阶段,探测出的溶洞是否需要处治的判定多依靠工程经验,表 1.1 统计了多处城市地铁溶洞处治距离的建议取值范围,可看出处治范围通常为一定数值,缺乏对隧道岩体力学特性及溶洞自身发育规模、水压、与隧道空间位置关系、发育形态等因素的考虑。作者通过对济南地铁沿线岩溶区大量溶洞的精细化探测发现,溶洞形态多呈现各向异性、高不规则度、高突变性等特点,少有溶洞形态符合球体或方体等规则模型。与此同时,目前针对岩溶区地基稳定性、安全岩体厚度等问题的研究,无论是采用理论分析、数值模拟,亦或模型试验手段,通常是将溶洞视为球体或方体,与实际工程中溶洞几何形态相差甚远。由于工程问题的复杂性,在保证研究结果具备一定可靠度的前提下,允许研究人员对研究问题做一定简化处理,但如果能更进一步地精确获取溶洞的几何形态和内部参数,将有利于深入研究复杂形态溶洞对盾构隧道围岩稳定性的影响规律。

表 1.1 部分地铁溶洞处治距离

工程名称	处理范围			运营时期
	洞顶	两侧	隧底	
广州地铁 2 号线	≤ 3 m	≤ 3 m	≤ 5 m	2003 年运营
	尺寸为 5~10 m 未填充、部分填充溶洞			
广州地铁 5 号线	≤ 3 m	≤ 3 m	≤ 5 m	2009 年运营
广州地铁二八线	≤ 5 m	≤ 5 m	≤ 10 m	2010 年运营
广州地铁机场线	≤ 5 m	≤ 5 m	≤ 10 m	2010 年运营
广州地铁广佛线	≤ 5 m	≤ 5 m	≤ 10 m	2010 年运营
广州地铁 9 号线	≤ 3 m	≤ 3 m	≤ 5 m	2017 年运营
大连地铁 1 号线	≤ 3 m	≤ 3 m	≤ 6 m	2015 年运营
武汉地铁 2 号线、27 号线	≤ 3 m	≤ 3 m	≤ 6 m	2016 年运营/2018 年运营
徐州地铁 3 号线	≤ 5 m	≤ 5 m	≤ 5 m	在建

1.1 国内外研究现状

1.1.1 溶洞精细化探测及形态表征方面

随着计算机技术、摄影测量技术及智能化控制技术的迅速发展,隧道及地下工程不良地质体的探测趋于数字化、定量化和精细化^[1]。“知己知彼,百战不殆”,将隧道复杂地质结构探查精细,是其灾害源治理和指导安全施工的基础。针对浅表岩溶区发育的溶洞等空腔类灾害源,现存探测方法主要是钻探法和物探法。钻探法是最常规和直观的地质情况调查方法,尤其针对高风险工程区域,钻探法可以较好地用于地下溶洞的探测,单钻孔能够确定钻孔测点处溶洞的大致位置、发育高度及顶板厚度,多钻孔布设可确定溶洞的水平边界范围。但钻探法探测盲目性较大,实质为单点探测,多孔之间联系只能依据经验和相关推算,难免存在探测盲区,很多时候作为已有资料和物探获取数据的验证,且其成本较高、耗时耗力。

依据探测原理对常用的城市岩溶物探方法进行划分,主要包括电法(高密

度电法等)、电磁波法(瞬变电磁法、探地雷达法等)、地震波法(陆地声呐法等),代表性的岩溶探测方法见表 1.2。各种物探方法在探测过程中,受多种因素的影响,其探测能力会受到一定限制,其影响因素主要包括:探测介质或对象的物理特性和空间形态、场地的地质结构和构造特征、场地的水文地质情况、工作面平整或起伏程度、电磁干扰源和干扰体的分布情况、仪器本身的性能参数、野外仪器操作人员和室内数据处理与解释人员水平情况等。各种物探方法均是根据测量数据或所观测的地球物理场求解场源体的反演问题,一定程度上必然存在模糊性、多解性及不确定性^[12-14]。

表 1.2 典型的岩溶探测方法

探测方法	电法	地震波法	电磁法
代表仪器	跨孔电阻率 CT	陆地声呐法、 三维地震波法	探地雷达、 瞬变电磁仪
应用条件	有明显电性差异	20 m 至几百米, 探测精度较高	富水性差异较大
干扰因素	地下管道干扰	覆盖土层较厚, 地层较破碎	覆盖土层较厚,电磁干扰

为了对探测目标有一个比较完整的物性参数描述,一般先采用综合物探方法对近地表溶洞进行探测,同时结合适量钻孔探测加以验证,从而大幅度提高溶洞的探测准确性,对于溶洞的综合描述也会更加客观和全面。目前地铁沿线的岩溶探测多是采用物探手段,如地质雷达法,在地铁线路两侧一定范围内进行快速性普查;其次,通过物探数据反演定性的初步确定异常岩溶发育点,进而通过“单点式”或“多点式”钻孔方法进行半定量的重点探测。钻孔探测仅能在竖直方向获取岩体内部信息,水平方向需要多钻孔间进行连通性推断,也只能大概圈定溶洞的发育范围和深度,无法完全获取溶洞的内部信息。因此,综合物探与钻探方法仍不能很好解决复杂地质环境下溶洞边界的精确探测问题,数据成果多为二维甚至一维的定性数据,且可视化效果较差,无法提供量化的溶洞参数,如准确位置和体积大小。

初步确定岩溶异常点后,溶洞的精细化探查显得尤为重要,若能精确获取溶洞内部的边界形态、深度、大小、体积及内部连通状况,一是能够彻底摸清溶洞本身发育特征;二是可对溶洞周围岩体稳定性进行更加客观的评价;三是能

够更科学地指导后期注浆充填治理,更好地解决溶洞注浆充填治理过程中由于地下水流动或联通管道裂隙导致的跑浆问题,降低注浆充填的盲目性。激光测量技术的快速发展和广泛应用,为岩溶区溶洞的精细化探查提供了解决思路。钻孔激光扫描技术是将集成激光扫描功能的探头伸入空腔内部,基于激光测距原理,实现空腔内壁表面三维点云数据获取,但其最大优势是激光探头的尺寸大幅度减小,微型化的探头可适应各种狭小通道和钻孔,深入岩体内部获取数据。目前,市场上较为成熟的钻孔扫描探测设备有加拿大技术研究中心 Noranda 系统公司和加拿大 Optech 联合生产的空区监测系统(cavity monitoring system, CMS)和英国 MDL(measurement devices ltd)生产的空区自动激光扫描系统(cavity auto-scanning laser system, C-ALS)。Li Chang-hong 等^[15]综合采用空区自动扫描激光系统与建模分析软件相结合方法,建立并分析了矿道损伤前后的三维模型。Cui 等^[16]提出了一种适用于地下工程的激光扫描点云均匀度增强方法,提高了复杂采空区的点云建模精度。Ingram 等^[17]论述了获取溶洞精确位置、尺度和形状的必要性,为定量性风险评价提供了准确数据。Xiang 等^[18]采用三维激光扫描技术获取了矿区的边界形态,并通过二维平面分析确定了需要回填的采空区边界和体积。

国内对于钻孔激光扫描技术的相关研究起步较晚,国内第一台空区自动扫描设备 C-ALS 由中南大学引进,李夕兵等^[19]总结了采空区的主要探测方法,提出了相应的处理和监测方案,并结合金属矿实例对采空区稳定性进行了安全评判。刘希灵、刘科伟等^[20-21]采用 C-ALS 获取了复杂采空区的表面点云模型,并建立了 Surpac-FLAC^{3D} 耦合数值计算接口,分析了复杂形态的采空区稳定性。夏永华等^[22-24]对空区激光扫描过程中的内部和外部精度进行分析和评定,结果表明需加强误差分析理论和校正方法研究。王运敏等^[25]等获取了空区边界点云数据,采用 CMS PosProcess 和 3Dmine 软件建立空区计算模型,进一步导入 FLAC^{3D} 中计算和分析了采空区稳定性。冯盼学等^[26]采用激光精密探测系统获取了爆破后岩体的三维形态,基于量化精细模型对爆破效果进行了有效评估。闫腾飞等^[27]针对钻孔激光测量过程中坐标定位困难问题,提出了高适应性的三脚架坐标定位方法。肖厚藻等^[28]研究了三维点云坐标转换和拼接算法,建立了复杂边界溶洞的三维模型,并分析了溶洞与隧道间的空间位置关系,但只对溶洞稳定性进行了定性判识。刘晓明等^[29]分析了不同采空区温度、湿度、粉尘浓度等复杂环境因素对空区激光探测系统探测效果的影响规律,多方面论证了激光探测方法在我国矿山动态监测和预警的有效应用。

李鹏^[30]研发了贯通式潜孔锤全控反循环钻具,解决了岩芯卡堵问题,并与钻孔激光相结合,获取了采空区内部信息。张保^[31]采用 Surpac 软件开展了矿柱垮塌数值模拟研究,得到了精确的垮塌范围和垮塌量,据此提出了相应的预防措施。

综上所述,空腔激光扫描方法存在以下优势:①实现溶洞位置、体积、充填状态、连通性的定量化精细探测;②建立真实、准确的溶洞模型,可视化效果更好;③为其治理方案的合理性提供精确的数据基础,指导现场人员制定合理的处治方案。目前,钻孔激光探测方法在煤矿采空区的应用较多,主要用于采空区上覆岩体厚度及其体积、形状、充填状态确定,而在溶洞方面应用较少,主要是由于采空区探测环境相对比较单一,不存在充水环境或充填固体介质,而城市岩溶区溶洞赋存环境复杂多变,有干溶洞、充水溶洞、充填细砂、碎石等固体溶洞,常规的激光探测方法难以适应复杂环境,尤其是对于岩溶区充水溶洞,激光探测衰减较快,难以准确获取点云数据。

在溶洞形态定量化表征方面,目前可参考的文献较少,大多只是从发育特性角度定性描述了溶洞形状,或者采用简单的宽高比等指标进行评定。大尺寸溶洞边界形态的确定多依靠钻孔方法绘制平面边界图,小尺寸溶洞基本无法判定形状,此外,即使探测出溶洞具体形态,其形态也无明显规律可循,难以对溶洞复杂边界形态进行定量评价。

1.1.2 溶洞对隧道围岩稳定性影响方面

在溶洞对隧道围岩稳定性影响方面,诸多学者采用理论分析、数值模拟及模型试验等方法开展了相关研究。首先,在理论分析方面,多是将溶洞与隧道间岩体简化为梁、板、拱模型,然后采用结构力学或者突变理论等方法进行分析。2003年,中南大学刘之葵等^[32]从弹性理论出发,对含溶洞地基进行了理论计算分析,并对溶洞稳定性影响因素进行了讨论。宋战平等^[33]分析了大尺度溶洞对隧道稳定性的影响,并计算了隧道顶板和底板的岩体结构最小安全厚度。干昆蓉等^[34]从多方面定性分析了岩溶隧道突水原因,并在实际工程中确定了合理的安全范围。李利平^[35]揭示了裂隙突涌水机理,并提出了隔水岩体破裂的最小安全厚度半解析解。郭佳奇^[36]采用弹性梁板理论求解了岩墙安全厚度,但是未考虑溶洞内充填物影响。赖永标^[37]将不同位置溶洞与隧道之间岩体视为弹性梁板模型,基于结构力学抗拉和抗剪强度验算求解了岩体安全厚度,并在实际工程进行了验证。张永杰等^[38]采用结构力学与双向板分析