

IKONGQU DAOLU XIUZHU
JISHU YANJIU YU YINGYONG

下伏采空区 道路修筑技术研究与应用

毋存粮 叶雨山 杨利民 郭进军 郭成超 著



科学出版社

下伏采空区 道路修筑技术研究与应用

毋存粮 叶雨山 杨利民 郭进军 郭成超 著

国家重点研发计划子课题(2016YFC0802203)

中国建筑第七工程局有限公司科技研发课题(CSCEC7b-2015-Z-10)

资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结作者近年来对采空区地质条件下道路修筑技术领域的研究成果,结合国内外相关文献,依托实际道路工程,围绕下伏采空区的综合探测技术、采空区与道路相互作用的路基稳定性分析、采空区综合处治技术、交通荷载影响下的采空区道路修筑技术及采空区修筑监控技术等进行系统的论述,以期为此类工程建设提供详尽的数据和工程经验,规范此类施工项目的施工工艺,保障采空区地质条件下道路工程的施工质量。

本书可供道路工程设计单位、施工单位、监理单位、检测与质量管理机构、建设管理部门的科研、技术与管理人员,以及高等学校相关专业的教师、研究生、本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

下伏采空区道路修筑技术研究与应用/毋存粮等著. —北京:科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-055513-7

I. ①下… II. ①毋… III. ①煤矿开采-采空区-道路施工-研究
IV. ①TD325 ②U415.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 281473 号

责任编辑:杨光华 何 念 郑佩佩 / 责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

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>

武汉精一佳印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2018 年 3 月第 一 版 印张:11 1/4

2018 年 3 月第一次印刷 字数:265 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国地大物博,矿产储量丰富,自 1950 年以来,矿产资源的大规模开采推动了国民经济的快速发展。煤矿资源的不断开采,兴起了许多以此为主导产业的工业城市。矿产资源被开采出以后,地下形成的大规模空洞区域,称为采空区。由于矿产开采方式的无序、粗放,且开采后留下的大部分采空区并未得到有效充填、治理,极易引起采空区地表过量下沉甚至塌陷,这无疑为其上构筑物的正常建设与使用埋下安全隐患。近十年来,我国城镇化建设日新月异,基础设施投资逐年递增,尤其是“一带一路”倡议的实施,道路交通运输事业呈现日益繁盛的景象,路网密度越来越大。受到线路设计、投资和现有土地面积等因素的制约,一些公路无法避免地修建在采空区上方,这样便打破了原来相对稳定的采空区岩体状态,重新激发岩体的不稳定性,加大公路的沉降变形和修建难度,同时也对公路后期运营和来往交通构成一定的威胁。

国内穿越采空区公路逐渐增多,采空区引起的待建或已建成的公路或铁路塌陷破坏事故日益高发。公路建设和运营期中,由于采空区稳定性及车辆荷载作用会加剧路基的沉降,如不及时处理很可能发生公路路基塌陷,这样不仅需要消耗大量资源进行修复,而且影响交通的正常运行,同时在社会上造成恶劣的影响。统计数据显示:至 2015 年,约有 $2.1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的土地损失是由开采矿体资源造成的,导致的经济损失总量已超 1000 亿元,同时每年土地塌陷损失面积保持 $(2.7 \sim 4.1) \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的增长速度。塌陷面积随煤炭产量的增加在不断地增长,采空区的存在始终是采区居民生活的重大隐患,更有甚者,部分采空区结构物未曾使用便已发生塌陷破坏,且不易维修,工作量大,造成资源的浪费和国民经济的损失。由于矿产资源开采过程中的采空区失稳、地质环境恶化等一系列问题,不仅阻碍矿区周边区域的城市化进程,而且严重威胁区域内基础设施的建设进度与建设质量,人类亟待找到解决这一全球性下伏采空区地质条件下道路修筑技术共性难题的方法。

本书围绕采空区地质条件下道路修筑技术难题,在整理国内外相关文献的基础上,依托河南省 S323 线改建工程,开展较为系统的若干关键技术研究。综合开展高密度电和瑞利波两种物探方法探测地下采空区的技术研究,实现瑞利波传播的数值模拟,为实际工程中瑞利波法探测所得地震记录的解译提供理论依据,并为采空区结构参数的反演解译提供合理的理论基础;详细研究下伏采空区路基稳定性,分析采空区活跃状态、采空区与道路相对位置及交通荷载因素下路基沉降的规律,建立下伏采空区路基沉降预测模型,明确采空区道路修筑临界安全区域;形成以注浆充填及强夯路基为主的路基下伏采空区处治方法,包含采空区形状和倾斜角、采空区深度、采面采高和是否连续分布四个主要因素;开展基于采空区道路沉降的过渡路面合理结构研究,对其在适应土体固结沉降及交通荷载作用下的响应进行计算对比,推荐最优的过渡路面形式;基于实时监测方案,对下伏采空区路基沉降进行预测和稳定性评价。

本书是在以下项目的资助下完成的：

(1) 国家重点研发计划子课题(2016YFC0802203)：高陡边坡、高填及特殊路基的健康监测、全生命期安全评价和预警平台。

(2) 中国建筑第七工程局有限公司科技研发课题(CSCEC7b-2015-Z-10)：采空区地质条件下道路修筑与监控关键技术研究。

感谢中国建筑第七工程局有限公司焦安亮教授级高工、黄延铮教授级高工、冯大阔博士、张建新高工、张中善高工等在研究过程中给予了指导，正是有了专家的教诲和帮助，得以引用大量的数据资料，才使本书更臻完善。感谢研究团队的王江伟高工、王及逢高工、张为民工程师、赵正伟工程师、甄宗永工程师、马红梅工程师、张铁钢工程师等工程技术人员及郝莹莹、王荻、李千惠、周涛、申兆汀、韩易辰、陈坤鹏、李雪野等同学在本书的写作中给予的帮助。

由于作者学术水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 8 月于郑州

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 采空区的概念	2
1.2 采空区的形成	2
1.3 采空区的三带划分	3
1.3.1 冒落带	4
1.3.2 裂隙带	4
1.3.3 弯曲带	4
1.4 采空区的危害	5
1.4.1 采空区的危害的表现形式	5
1.4.2 采空区对公路的危害	7
1.4.3 采空区对公路危害程度的评价	8
1.5 工程概况	9
1.5.1 交通概况	9
1.5.2 地形地貌	9
1.5.3 气象条件	9
1.5.4 水文条件	10
1.5.5 地质构造及地层岩性	10
1.5.6 煤矿开采情况	12
参考文献	13
第 2 章 基于综合无损探测的采空区探测技术	15
2.1 采空区探测技术研究进展	16
2.2 采空区勘探原则	17
2.3 物探方法简介	18
2.3.1 电法勘探	18
2.3.2 地震法勘探	19
2.3.3 电磁法勘探	19
2.3.4 地球物理测井	20
2.3.5 放射性法勘探	21
2.3.6 微重力法勘探	21
2.3.7 各种物探方法的使用条件及特点	21
2.4 高密度电阻率法探测采空区	22
2.4.1 高密度电阻率法基本原理	22

2.4.2	电极排列方式	23
2.4.3	三种装置的适应条件与联系	23
2.4.4	高密度电阻率法的特点	23
2.4.5	高密度电阻率法探测的应用	24
2.5	瞬态瑞利波法探测采空区	25
2.5.1	瞬态瑞利波法探测采空区的研究进展	25
2.5.2	瑞利波的传播特性	26
2.5.3	瞬态瑞利波法的探测结果	27
2.6	公路下伏采空区瞬态瑞利波传播数值模拟	30
2.6.1	瞬态瑞利波传播正演模拟研究进展	30
2.6.2	瑞利波在不同类型采空区中的传播正演数值模拟	31
2.6.3	工程应用	45
	参考文献	46
第3章	下伏采空区路基稳定性	49
3.1	采空区稳定性评价研究进展	50
3.1.1	预测法	50
3.1.2	解析法	51
3.1.3	数值模拟法	51
3.2	基于采空区活跃期的路基沉降变形数值分析	52
3.2.1	有限元模型建立	53
3.2.2	本构模型	54
3.2.3	材料参数	56
3.2.4	边界条件	58
3.2.5	计算工况	58
3.2.6	计算结果分析	59
3.3	下伏采空区道路路基沉降预测模型	66
3.3.1	沉降预测模型优选	66
3.3.2	建立预测模型	68
3.3.3	修正后的预测模型验证	70
3.4	交通荷载作用下采空区道路路基沉降分析	73
3.4.1	采空区路基沉降有限元模型	74
3.4.2	计算工况	78
3.4.3	计算结果分析	78
	参考文献	87
第4章	基于相互作用的采空区综合处治技术	89
4.1	采空区的探测与分类	90
4.1.1	采空区的探测	90

4.1.2 下伏采空区的分类	92
4.2 强夯法	94
4.2.1 强夯法原理	94
4.2.2 强夯法施工流程	95
4.2.3 采空区位置确定	95
4.2.4 强夯方案设计	96
4.2.5 施工要点	96
4.3 注浆法	97
4.3.1 注浆处理方法	97
4.3.2 注浆材料的选择	98
4.3.3 注浆充填工艺流程	98
4.3.4 注浆方案设计	98
4.3.5 钻孔	100
4.3.6 注浆技术条件要求	100
4.3.7 注浆操作	101
4.3.8 注浆充填参数的确定	101
4.4 综合治理	102
参考文献	104
第5章 基于协同作用的采空区道路修筑技术	107
5.1 国内外研究进展	108
5.1.1 开采沉陷预测理论	108
5.1.2 采空区与公路相互作用机理	108
5.1.3 采空区地基治理与公路抗变形结构	109
5.1.4 级配碎石过渡路面结构	109
5.2 基于下伏采空区沉降的过渡性路面结构	112
5.2.1 影响采空区路基稳定的因素	112
5.2.2 沉降理论	113
5.2.3 过渡路面结构	115
5.2.4 地层划分与几何模型的建立	116
5.2.5 本构模型与材料参数的选取	117
5.2.6 四种不同路面结构的不均匀沉降分析	120
5.3 交通荷载对路面结构的影响分析	121
5.3.1 采空区上方公路结构在标准轴载作用下的响应分析	121
5.3.2 计算结果与分析	122
5.3.3 四种路面结构在交通荷载作用下的弯沉和应力的对比分析	125
5.4 采空区位置对路基沉降的影响分析	126
5.4.1 采空区临界安全区域的确定	126

5.4.2	采空区处于不同深度时的路基沉降分析	127
5.4.3	采空区处于不同横向位置时的路基沉降分析	132
	参考文献	135
第6章	采空区黄土边坡处治技术	137
6.1	国内外研究进展	138
6.1.1	黄土的非线性本构模型	138
6.1.2	黄土土性参数的不确定性与黄土边坡系统的非线性特征	139
6.1.3	黄土边坡的破坏机理	139
6.1.4	黄土边坡稳定性分析理论和方法	139
6.2	工程概况	141
6.2.1	边坡地质条件	141
6.2.2	高边坡特征	142
6.3	高边坡稳定性分析计算	144
6.3.1	地质分析法	145
6.3.2	边坡稳定的通用算法分析	145
6.3.3	边坡稳定的数值计算分析	148
6.4	高边坡主动防护技术	150
6.4.1	黄土状粉质黏土边坡主动防护	151
6.4.2	卵石及强风化泥岩边坡主动防护	152
	参考文献	154
第7章	下伏采空区路基沉降监测技术	157
7.1	国内外研究进展	158
7.1.1	下伏采空区路基变形监测	158
7.1.2	路基沉降监测与预测	159
7.2	工程实例	160
7.2.1	工程概况	160
7.2.2	公路路基处理	160
7.3	采空区公路变形特征与监测	162
7.3.1	路基变形机理与特征	162
7.3.2	采空区公路变形监测方案	163
7.3.3	应用实例	166
7.4	采空区路基沉降监测结果分析	167
7.4.1	沉降曲线	167
7.4.2	基于实测数据的采空区稳定性评价	168
7.5	采空区路基沉降预测与评估	168
7.5.1	灰色预测模型	168
7.5.2	预测结果与评估	170
	参考文献	170

第 1 章

绪 论

我国疆域辽阔,矿产资源种类丰富,目前已发现矿产逾 170 种,已探明有储量的矿产达到 159 种,其广泛分布在国家的各个区域,为国民经济发展提供了重要支撑。但不容忽视的是,矿产开采在服务于国计民生的同时,也留下了相当数量的采空区,尤其是近几十年来,我国现代化、城镇化发展日新月异,道路、桥梁、建筑等基础设施投资巨大,不可避免地要在采空区位置未探明的区域进行修建。然而,基于国内矿产开采的现状,小型企业无序粗放的开采方式,且采后留下的大部分采空区并未得到有效充填、治理,可能引起采空区地表过量下沉甚至塌陷,这无疑为其上构筑物的正常使用埋下安全隐患。围绕地下采空区造成的地面坍塌等事故已成为城镇化进程中的拦路虎,开展相关的工程安全科学研究和关键技术攻关势在必行。

本章简要介绍采空区的概念及地质特性划分,对地下采空区造成的危害,尤其是对道路建设和运行的不利影响进行阐述,最后介绍研究项目所依托工程的情况。

1.1 采空区的概念

采空区是指地下矿产开采后留下的空洞区,如图 1.1 所示。根据矿产开采时间,可分为老采空区、现采空区和未来采空区。矿体被采出后,自顶板岩层向上形成“三带”——冒落带、裂隙带和弯曲带。采空区易导致地表沉陷,产生连续或非连续变形,由此带来一系列的环境问题,如房屋倒塌、道路开裂、平地积水、农田减产和耕地减少等,给矿区建设留下了很大隐患。



(a) 采空区地面标志



(b) 采矿巷道

图 1.1 采空区

有关采空区问题的研究,国内外主要集中在煤炭、冶金、军事和交通等部门,如苏联、波兰、英国和中国等主要产煤国家从 20 世纪 50 年代起就对“三下”采煤技术进行了详细研究^[1];同时,对采空区地表构筑物保护和防治技术^[1-4]也进行了大量试验研究,积累了宝贵的经验。但到目前为止,针对公路下伏采空区问题的研究报道较少,而且通常只是工程经验介绍,尚未形成成熟的理论及工程设计体系,无规范、规程可循,国际上也鲜有此类研究。

高等级公路是国民经济发展的基础,近年来中国经济高速发展,基础设施投资力度不断加大,新型城镇化建设进一步推进,路网密度也越来越大,不可避免地要穿过一些矿产采空区域及待采区,如山西太旧高速公路、华东的徐连线、华北的晋焦线、西北的乌奎线等高等级公路均要跨越较大范围的采空区。在老采空区修路要同时考虑路基稳定性和地表剩余变形的影响。公路通过未来采空区时,应在保护道路的前提下,安全、经济、最大限度地回收矿产资源。因此,研究下伏采空区地质条件下的道路修筑技术具有重要的经济和社会意义。

1.2 采空区的形成

地下开采特别是在建筑物、水体、铁路和公路等下方采矿引起的岩体移动变形问题越

来越引起广大科技工作者和工程技术人员的重视。矿体被采出后,采空区顶底板和两边形成了自由空间,呈现出一种架空结构。开采破坏了围岩的原始应力状态而引起围岩中应力应变重新分布,产生应力集中,瞬间以弹性变形形式完成,进而导致上覆岩体失去原有的稳定,引起上覆岩体的移动、变形,甚至破坏。这种移动、变形和破坏在空间上由采空区逐渐向周围扩展,最终到达地表。从时间上看,由静止到开始轻微移动,经过中间剧烈移动阶段,最后轻微移动至新的平衡后完全停止移动。采空区上方覆岩的移动形式极其复杂,大体可归结为以下几种^[5-6]。

(1) 矿体上方岩石的垮落。矿层采出后,其上方岩石在自重作用下内部应力超过岩石强度极限而发生破裂、垮落。

(2) 上覆岩层的裂隙。岩层不垮落,但发生裂缝和离层。

(3) 上覆岩层的弯曲。岩石不发生破裂,但在自重作用下产生法向弯曲,这部分岩层将保持其整体性,其移动过程连续而有规律。

上述三种岩石移动的形式是开采水平矿层时岩石移动的基本形式。当开采倾斜和急倾斜矿层时,还存在以下三种移动形式。

(1) 岩石沿层理方向滑移。当岩层倾斜时,由于自重方向与岩层层面不垂直,在自重作用下,岩体除发生垂直于层理面的弯曲外,还产生沿层理面的顺层滑移。随着岩层倾角的增加,垂直于岩层的自重力分量逐渐减小,而平行于岩层的自重力分量则增大。因此,岩层倾角越大,岩石沿层理方向的滑移也越显著。

(2) 垮落岩石下滑矿层采出后,被采空区岩石所充填。如果矿层倾角较大,上部垮落岩石下滑将充填下部采空区;垮落岩石下滑后,其上部岩石失去支撑而垮落,造成垮落和裂隙进一步向上发展。当矿层倾角较大且开采边界距地表又近时,垮落便可能继续发展并最终直达地表,形成“抽冒”现象。

(3) 底板岩石隆起。当地表岩石薄弱且倾角较大时,在矿体采出后,底板岩石将向采空区隆起;一些遇水膨胀的岩石,在水作用下隆起更加严重,甚至能导致底板破坏,底板岩石移动有时能波及地表。

由于具体条件存在差异,开采引起的地表破坏形式主要有地表塌陷、地表破裂和地表连续变形等。

1.3 采空区的三带划分

国内外大量观测资料的分析结果表明,当采空区范围较小而采深较大时,采空区上覆岩体的移动可能不会到达地表;当采空区范围较大而采深较小时,其上覆岩体的移动便会波及地表,并使得地表下沉,下沉所涉及的整个范围称为下沉盆地,在矿区称为塌陷区。

当开采空间跨度足够大时,即使完整坚硬的顶板,也会因受力超过强度极限而垮塌、冒落。实际上,大多数岩体都含有各类地质弱面,岩体被地质弱面切割成一系列弱连接的嵌合体或各式各样的组合体,这类岩块体一直处于围岩应力与自重的共同作用下。当矿

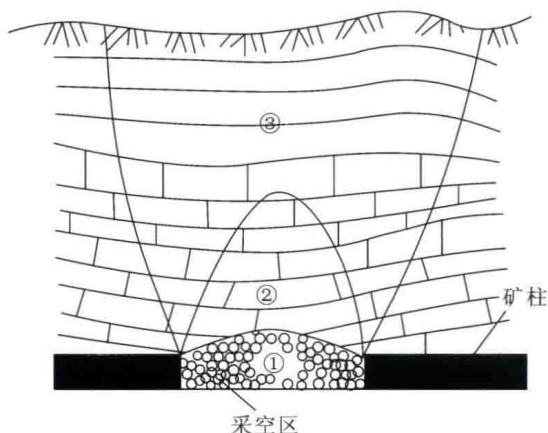


图 1.2 采空区三带划分示意图

①冒落带;②裂隙带;③弯曲带

体被采出后,紧临采空区的块体将会暴露出来,临空块体随之发生移动,达到力学和几何条件失稳的块体先行垮落,并将这个过程传递给相邻的岩块体,之后垮落继续进行,顶板岩块的移动逐渐发展,破裂区逐渐扩大;同时,垮落岩体发生一定程度的碎胀和剪胀,当碎胀与剪胀的体积之和等于采出空间时,垮落终止;垮落终止后,岩体的应力状态逐渐恢复平衡。在此过程中,上覆岩层因下方采动而产生的移动与变形从性质上可分为以下三个带,如图 1.2 所示^[4-6]。

1.3.1 冒落带

冒落带又称垮落带,是指由采空区上覆岩体在自重的作用下破碎、冒落、堆积而成的区段,其高度主要由顶板岩层碎胀性、采矿方法和矿层厚度决定。对于水平矿层,冒落带一般为采高的 2~4 倍。冒落带的形成往往是多次的,第一次冒落,充满采空区的松散岩块在其自重和上覆岩层垂直位移所产生的压力作用下,逐渐被压实,进而形成一定的自由空间,随着上覆岩层进一步变形又引起第二次冒落,如此反复多次后冒落终止。当开采深度不大时,冒落带可直达地表,此时地表移动变形是不连续的。

1.3.2 裂隙带

裂隙带又称裂缝带或破裂弯曲带,是指位于冒落带之上,具有与采空区连通的导水裂隙,但连续性未受破坏的那部分岩层。裂隙带的岩体由于受到较大的横向拉力,弯曲变形较大,故常常出现明显的裂隙,甚至断裂,这使岩体结构类型发生改变,降低了岩体的强度。其主要由岩层的相对滑移而形成,厚度与冒落带大体相当,且与冒落带无明显的分界线。裂隙带的裂隙主要有两种:一种是垂直或斜交于岩层的新生张裂隙,主要是因岩层向下弯曲受拉而产生,它可部分或全部穿过岩石分层,但其两侧岩体基本无相对位移而保持层状连续性;另一种是沿层面的离层裂隙,主要是因岩层间力学性质差异较大时,岩层向下弯曲移动不同步所致,离层裂隙要占据一定空间,致使上部覆岩和地表下沉量减少。一般而言,在采空区形成两个月左右,裂隙带发育最高。

1.3.3 弯曲带

弯曲带又称整体移动带,是指裂隙带顶部到地表的那部分岩层。随着距离矿体开采处高度的增加,上覆岩层的破坏程度减弱,且裂缝逐渐消失,岩体将发生大范围移动和变

形,但仍保持岩体原始结构而不破坏,其移动与变形连续、平稳而有规律;其变形主要是在自重应力作用下产生的弯曲变形,故称为弯曲带。弯曲带位于裂隙带上部,当开采深度较大时,其高度将远超裂隙带与冒落带高度之和,在这种情况下,裂隙带波及不到地表,故地表变形较轻微,此时只有用精密测量仪器才能观测到地表变形;当开采深度较小时,裂隙带甚至冒落带可直达地表,此时没有弯曲带,并且地表的移动变形是不连续的。

上述三带的划分,是建立在岩体连续移动变形的条件下,一般只适用于层状结构的岩体。此外,采空区的地表移动并不一定同时存在着三个带,且各带相互之间也没有明显的界线。对于有些浅部开采的矿山,可能不存在三个带而是仅有两个带甚至一个带,如有的矿山开采后直接冒落至地表,此时就只有冒落带。

1.4 采空区的危害

采空区的危害广义上是指采矿工作对地上与地下的建筑物、构筑物 and 自然对象的影响,又称开采损害。狭义的采空区的危害主要是指岩层和地表受到开采影响而发生移动、变形所导致的一系列有害后果^[4]。

开采损害可分为两类:直接开采损害与间接开采损害。位于开采引起岩层和地表移动、变形区域内的采动对象所受到的损害称为直接开采损害,而在距开采区域较远的地方,仍发现存在着开采影响,这种影响往往与开采活动间接有关,称为间接开采损害。间接开采损害通常与开采引起的地下水文地质条件的改变有关,这些损害并不是和每一个开采工作相联系,它们的发生往往与特定的地压条件有关。

1.4.1 采空区的危害的表现形式

采空区的危害的表现形式与地表变形的性质、大小及采动对象的本身特点有关,具有下列六种类型^[5]。

1. 地表沉陷损害

一般的地表均匀下沉对建筑并无太大影响,但是过量的地表下沉,即使是均匀的,在某些条件下也会带来严重的问题。例如,下沉区地下水位可能上升超过地表,形成大片的内涝区,如图 1.3(a)所示。

2. 地表倾斜损害

开采引起的不均匀下沉改变了地表原始坡度,造成地表倾斜。地表倾斜使建筑物丧失稳定性,使用条件恶化,如图 1.3(b)所示。

3. 地表弯曲损害

当采动引起地表弯曲时,建筑物地基弯曲,建筑物部分基础悬空,进而将载荷转移到

其余部分,造成建筑物开裂,如图 1.3(c)所示。

4. 地表水平变形损害

地表水平变形出现于开采边界上方的位置,采空区一侧出现压缩,另一侧出现拉伸。位于拉伸区的建筑物,其基础底面受到基础的外向摩擦力,基础侧面受到地基外向水平推力的作用,从而导致开裂。位于地表压缩区的建筑物则正好相反,容易引起挤碎性破坏,如图 1.3(d)所示。

5. 山区地表滑移与崩塌

开采引起的岩体内部移动与变形,使原来岩层面或构造弱面离层、开裂,甚至错动,导致原始弱面的强度大为降低,其内摩擦角、内聚力较采前也大大减小,岩体内变形超限部分产生采动裂隙与破坏,使岩体的相互牵引力有所减弱,从而引起地表滑移和崩塌,如图 1.3(e)所示。

6. 矿区地表水位下降

当破裂到达地下含水层或地表时,地下水可能大量下渗,使得地下水位大幅度下降,从而可能引起河流干涸。如果存在流砂层,则可能使流砂层水分疏干,造成大范围地表的缓慢下沉,如图 1.3(f)所示。



(a) 地面内涝



(b) 房屋倒塌



(c) 地表弯曲



(d) 建筑物开裂

图 1.3 采空区引起的危害类型



(c) 山体滑坡



(f) 河流干涸

图 1.3 采空区引起的危害类型(续)

1.4.2 采空区对公路的危害

在采空影响区修筑公路要考虑公路路基稳定性和地表剩余沉陷位移变形的影响^[7]。地下开采对地表和覆岩的破坏程度主要取决于地质与采矿等因素,如矿床的开采深度、采高、倾角、采矿方法、地质构造、覆岩岩性及顶板支撑方法等。不同的地质采矿条件对地表沉陷的破坏程度差异很大,反映到地表的形态可归结为连续位移变形和非连续位移变形两类。缓斜、倾斜矿床的开采对地表沉陷破坏类型判定的基本条件如下所述^[8]。

(1) 地表连续位移变形条件。开采深度较大,采深与采高比 H/m 大于 80 的长壁式全部垮落管理顶板开采;全部或部分采空区充填管理顶板开采,且矿柱具有足够的强度和长期稳定性,采留比适宜,采出率低于 65%。

(2) 地表非连续位移变形条件。开采深度较小,采深与采高比 H/m 小于 40 的长壁式全部垮落管理顶板开采;房柱式、巷柱式开采,采留比不合理,采宽过大或矿柱过窄,矿柱的稳定性差;浅部小矿残采;基岩厚度小,地表为较厚的湿陷性黄土层或遭遇较大的地质构造断层破坏。

采动地表连续位移变形的特征为连续下沉的盆地。当地下开采范围达到一定程度时(大于 $1/4$ 采深),地表开始移动,出现下沉盆地;随着开采范围扩大,下沉盆地也不断增大,对应地表的每一点都要经历拉伸、倾斜、压缩及扭曲等复杂的动态位移变形破坏过程;地表沉陷一般能持续 2.5~5 年,剧烈沉陷期(下沉速度 $>1.8 \text{ mm/d}$)一般能持续 0.5~1 年。

采动地表非连续位移变形破坏的表现形式为:地表出现大的裂缝,台阶式沉陷,漏斗式塌陷坑及伴随沉陷地表滑动或滑坡破坏等。非连续破坏以突发性、隐藏性为特点,没有一定的规律,有时开采后几十年还会发生较大的沉陷破坏^[9],这种情况对地面建筑物危害极大。

采空区对新建公路的影响有其自身的特点。公路下伏采空区大部分在建路前形成,它对新建公路的影响是剩余沉陷引起的位移变形破坏;公路整体延伸范围大,不仅包括采

空区引起的地表剩余沉陷,而且建路时路基的开挖、爆炸等因素也会导致新的沉陷发生,采矿引起的地表沉陷破坏主要发生在下沉不均匀地带。如在这些地带修建公路而不进行处理,则在拉伸带范围,水平变形一旦超过路面的极限抗拉值,路面将出现裂缝,轻则导致路面渗水破坏,严重的使交通中断,如图 1.4(a)所示;在压缩带范围,会出现路面隆起,起伏不平,使来往车辆行驶困难,或使高速行驶的车辆腾空引发交通事故,如图 1.4(b)所示;路面的侧向倾斜或扭曲也对高速行驶的车辆不利,尤以弯道为甚,在有公路桥梁或高架桥的地段,危害更加严重。



(a) 路面开裂



(b) 路面隆起

图 1.4 采空区对公路的破坏

1.4.3 采空区对公路危害程度的评价

与普通建筑物不同,公路是大范围延伸的条形整体构筑物,不仅采空沉陷位移变形对它较大的影响,采空区剩余沉陷对它的影响也不容忽视。除此之外,由于路面材料的特殊性,它还受温度、湿度和路面局部隆起等因素的影响。地表沉陷对公路的危害程度可以用以下方法评价。

(1) 对地表非连续沉陷破坏的评价主要是判定矿柱及覆岩的强度和稳定性。应用数值分析和结构力学方法,计算采动覆岩破坏强度、覆岩中复合岩梁(板)的成拱宽度、大厚度坚硬岩层的成拱宽度及矿柱的支撑强度和长期稳定性,评价并判定是否需要采空区和地基进行治理,最终确定治理方案。

(2) 对地表连续位移变形破坏,可用理论预计方法(影响函数法、经验理论法)估计地表的位移变形值,通过地表的下沉量、倾斜值、水平变形和垂直曲率等指标进行评价^[10]。地表沉陷会造成路面低洼处长期积水破坏;倾斜会导致行驶车辆重心偏移,特别在弯道位置对高速行驶车辆危害更大;水平变形和曲率使路面受拉伸开裂,受压缩隆起,产生波浪状及路面与路基间的局部离层破坏。路面的波浪起伏能引起高速行车腾空,造成翻车事故。国外研究结果认为,高速公路和高架桥应列为 I~II 级建筑物,即路面的水平变形 $X_0 \leq 2 \text{ mm/m}$ 或 $X_0 \leq 4 \text{ mm/m}$,曲率 $K_0 \leq 0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 或 $K_0 \leq 0.4 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$,倾斜值 $T_0 \leq 3.0 \text{ mm/m}$ 或 $T_0 \leq 6.0 \text{ mm/m}$ 。普通公路应按 III 级建筑物对待, $X_0 \leq 6 \text{ mm/m}$, $K_0 \leq 0.6 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, $T_0 \leq 10 \text{ mm/m}$ 。