

水及动力荷载作用下 浅伏采空区围岩变形破坏研究

李建新 王来贵 何峰 著

STUDY ON DEFORMATION AND FAILURE OF ROCK
SURROUNDING SHALLOW GOAF UNDER WATER AND DYNAMIC LOADS

地质出版社

国家自然科学基金项目 (51274110)

国家自然科学基金项目 (51474121) 联合资助

国家自然科学基金项目 (104473)

水及动力荷载作用下浅伏采空区 围岩变形破坏研究

李建新 王来贵 何 峰 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书针对浅伏采空区易受大气降水和地表动力荷载的影响,以穿越内蒙古鄂尔多斯市东胜矿区某铁路为背景,通过理论分析、室内的实验研究及相似材料模拟试验、数值模拟等方法,对水及列车荷载作用下浅伏采空区变形破坏进行深入系统的探讨。通过相似材料模拟实验,分析了浅埋煤层开采后采空区上覆岩层变形破坏演化过程和最终处于相对稳定的状态特征,提出半充填注浆处理采空区的方法,并通过浆液配比实验测定其强度,结合浆体胶结后的结构特征,建立了混凝土桩柱体和冒落矸石胶结体的力学模型,分析了其破坏方式,并推导出其破坏失稳的力学条件;通过岩体试件力学特性的试验研究,推导出岩体物理力学参数与含水量之间的关系,并利用尖点突变理论导出系统突变失稳的充要力学条件,分析了水作用下浅伏采空区破坏失稳机理;建立了水作用下列车-轨道-路基系统耦合动力学模型,通过数值计算分析了不同跨度和不同含水量条件下列车通过采空区地表各点的最大竖向位移、采空区中部垂直剖面岩层各点竖向位移、采空区围岩应力及应变的影响。

本书可供工程力学、采矿工程、工程地质、环境地质和灾害防治等专业的科研人员及工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

水及动力荷载作用下浅伏采空区围岩变形破坏研究 /
李建新等著. —北京:地质出版社, 2015. 7
ISBN 978-7-116-09330-0

I. ①水… II. ①李… III. ①荷载应力-作用-煤矿
开采-采空区-围岩变形-研究 IV. ①TD326

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 163780 号

Shui ji Dongli Hezai Zuoyongxia Qianfu Caikongqu Weiyan Bianxing Pohuai Yanjiu

责任编辑:田野 陈磊

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010)66554528 (邮购部); (010)66554631 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010)66554686

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 9.75

字 数: 238 千字

版 次: 2015 年 7 月北京第 1 版

印 次: 2015 年 7 月北京第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-09330-0

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

煤炭是中国的基础能源和重要原料，在一次性能源生产和消费构成中占 70% 左右，在国民经济发展中具有重要的战略地位。煤炭采出后留有大量采空区，采空区上覆岩层变形破坏受覆岩地质环境条件的影响，如地下水的软化、风化及外部荷载影响等，使煤岩体强度降低，导致结构失稳，引起地表产生连续或非连续变形，甚至垮落，形成塌陷坑，由此带来一系列环境地质灾害问题。采空区的存在对工程建设及地表建（构）筑物能产生潜在的安全威胁，铁路沿线采空区在火车动荷载的作用下更易引起地表变形和采空区塌陷，影响铁路路基的稳定性，是铁路运营必须解决的一大严重问题。

随着国民经济快速发展，交通基础设施建设越来越多，许多地方修建铁路、高速公路等都不可避免地要穿过采空区，而采空区所处地基不可避免，或采取避让方案占用良田或增加线路长度，导致工程投资大幅度增加，并且还可能影响整个铁路的优化布置，则采空区稳定性问题作为铁路建设的不良地质问题就越来越突出，并越来越受到工程界的重视。由于采空区上覆岩层内部构造的复杂性和多变性，以及铁路下伏采空区本身的隐蔽性，给采空区地基稳定性评价带来很大困难，因此研究水及动力荷载对采空区上覆岩层变形破坏的影响，为采空区稳定性评估和工程治理设计提供可靠的依据，对保证铁路在设计使用年限内安全营运有着重要的意义。

本项研究得到国家自然科学基金项目（51274110）“废弃煤矿结构演化与水系调整规律研究”、国家自然科学基金项目（51474121）“受载岩体变形、滑动过程中反馈特性研究”和国家自然科学基金项目（104473）的资助。本书由李建新和王来贵共同编著，在编写过程中，得到刘向峰、何峰、于永江和李喜林的大力支持和帮助，他们参与了部分书稿的编写工作，在此表示诚挚的感谢。由于本书撰写时间仓促，作者水平有限，缺点和错误在所难免，敬请有关专家和读者批评指正。

作 者

2014 年 12 月

目 录

前 言

1 绪 论	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 研究现状与存在问题	(3)
2 浅伏采空区围岩变形破坏特征研究	(6)
2.1 浅部煤层的界定	(6)
2.2 不同采煤方法采场上覆岩层破坏特征	(6)
2.2.1 全部垮落法开采顶板岩层破坏特征	(6)
2.2.2 留煤柱开采顶板岩层破坏特征	(7)
2.3 煤柱破坏失稳特征分析	(8)
2.3.1 煤柱的流变特性	(8)
2.3.2 煤柱的流变模型	(8)
2.3.3 煤柱破坏失稳方式分析	(11)
2.3.4 煤柱破坏演化过程分析	(15)
2.4 采空区上覆顶板岩层变形破坏分析	(17)
2.4.1 顶板覆岩产生离层的条件	(17)
2.4.2 顶板岩层力学模型的受力分析	(17)
2.4.3 顶板冒落后失稳分析	(21)
2.5 浅伏采空区变形破坏相似材料模拟实验研究	(24)
2.5.1 相似材料模拟理论	(24)
2.5.2 相似材料模拟实验方案	(24)
2.5.3 相似系数的确定	(25)
2.5.4 相似材料用量计算	(26)
2.5.5 实验结果与分析	(28)
2.6 小结	(35)
3 采空区半充填注浆实验研究	(36)
3.1 注浆扩散理论	(36)
3.1.1 牛顿流体在裂隙岩体中的渗流规律	(36)
3.1.2 宾汉流体在裂隙岩体中的渗流规律	(38)
3.2 注浆方法	(42)
3.3 注浆桩柱体强度测定	(42)
3.3.1 水泥 + 粉煤灰 + 沙 + 细石浆液强度测定	(43)

3.3.2	水泥-粉煤灰浆液强度测定	(43)
3.4	注浆后桩柱体受力分析	(44)
3.5	采空区注浆治理设计	(46)
3.5.1	采空区注浆治理流程	(46)
3.5.2	采空区注浆参数的确定	(48)
3.5.3	采空区注浆效果检测	(51)
3.6	小结	(51)
4	水对采空区上覆岩体力学特性影响实验研究	(52)
4.1	浅伏采空区地下水的运移规律	(52)
4.1.1	矿区水文地质特征	(52)
4.1.2	导水裂隙带的形成过程	(54)
4.1.3	降水漏斗的形成机理	(54)
4.1.4	降水漏斗的变化规律	(55)
4.1.5	开采对地下水运移规律的影响	(58)
4.2	水对裂隙岩体的影响作用	(66)
4.2.1	水对岩体的物理作用	(66)
4.2.2	水对岩体的化学作用	(67)
4.2.3	水对岩体的力学作用	(67)
4.3	水对岩体力学特性影响实验研究	(68)
4.3.1	水对岩体抗压强度影响实验研究	(68)
4.3.2	水对岩体抗剪强度影响实验研究	(73)
4.4	水对岩体物理参数影响实验研究	(77)
4.4.1	密度与含水量的关系	(77)
4.4.2	阻尼比与含水量的关系	(77)
4.4.3	弹性模量与含水量的关系	(82)
4.4.4	内聚力和内摩擦角与含水量的关系	(83)
4.5	小结	(85)
5	水作用下浅伏采空区围岩变形破坏研究	(86)
5.1	水对采空区上覆土体强度准则的影响分析	(86)
5.1.1	非饱和土中应力状态变量分析	(86)
5.1.2	非饱和土的强度理论	(87)
5.2	水对岩体强度准则的影响分析	(88)
5.3	水对桩柱体稳定性的影响	(89)
5.4	力学模型的建立	(90)
5.5	桩柱体的本构关系	(90)
5.6	顶板岩梁的弯矩方程	(90)
5.7	力学模型的总势能函数	(91)
5.7.1	突变理论在采矿工程中的应用	(91)
5.7.2	力学模型总势能函数的建立	(95)

5.8	系统破坏失稳的力学条件	(97)
5.9	系统破坏失稳机理与稳定性分析	(99)
5.10	小结	(101)
6	水及动力荷载作用下浅伏采空区围岩变形破坏研究	(102)
6.1	列车系统振动方程及共振分析	(103)
6.1.1	列车系统振动方程及其变换	(103)
6.1.2	列车系统共振分析	(105)
6.2	列车-轨道-路基系统耦合动力学模型的建立	(107)
6.2.1	轨道结构动力学刚度矩阵	(107)
6.2.2	路基结构动力学刚度矩阵	(109)
6.2.3	轨道-路基系统整体结构动力学刚度矩阵	(113)
6.2.4	列车-轨道-路基系统耦合动力学模型	(115)
6.3	数值模拟模型的建立	(117)
6.4	动响应计算参数确定	(118)
6.5	加载及求解	(119)
6.6	计算结果与分析	(119)
6.6.1	不同跨度列车对采空区顶板竖向位移的影响	(119)
6.6.2	列车运行期间地表各点竖向位移分析	(121)
6.6.3	列车运行期间采空区上覆各岩层竖向位移分析	(122)
6.6.4	不同含水量采空区顶板岩层竖向位移分析	(125)
6.6.5	不同跨度采空区围岩应力分析	(128)
6.6.6	不同含水量采空区围岩应力分析	(129)
6.6.7	不同含水量采空区围岩应变分析	(130)
6.7	疲劳损伤累积评估	(138)
6.7.1	应力的统计评估	(138)
6.7.2	应力谱的计算	(138)
6.7.3	疲劳损伤累积评估	(140)
6.8	小结	(142)
7	结论	(143)
	参考文献	(145)

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

中国矿产资源丰富,开采历史悠久,地下矿产资源采出后留下大量的采空区,特别是自 20 世纪 80 年代以来,中国矿业开采秩序较为混乱,非法、无规划的乱采滥挖现象严重,在一些国有矿山周边留下大量的不明采空区,致使矿山开采条件恶化,给矿山生产和安全带来严重影响。采空区按矿产被开采的时间,可分为老采空区、现采空区和未来采空区。矿体被采出后,自顶板开始由下向上依次垮落、断裂、离层、弯曲变形并在地表一定范围内形成下沉盆地。采空区上覆岩层按其破坏程度不同,从下到上大致可划分为“三带”:垮落带、导水裂隙带和弯曲带。采空区上方地表存在下沉和水平两种移动,倾斜变形、曲率变形与水平变形 3 种变形。地下开采地表移动分开始期、活跃期、衰退期 3 个阶段^[1]。老采空区的移动主要应考虑衰退期结束后的地表移动,主要包括两个部分:①是已采块段对地表影响尚未结束的部分;②是采动碎裂岩体及上覆岩层在覆岩重力作用下逐步压实变形过程,此变形受上覆岩层地质环境条件的影响,如地下水的软化、风化及外部荷载影响等,使煤岩体强度降低,导致结构失稳,引起地表产生连续或非连续变形,这一时间过程往往比较漫长,由此带来一系列环境地质灾害问题,如山体边坡发生蠕滑而变形,甚至产生采空区大面积塌陷等,而塌陷区会导致地下水位下降以至枯竭、耕地破坏、生态环境恶化、道路变形破坏、房屋倒塌等,给矿区或穿越矿区的铁路、公路等工程建设留下很大隐患。

煤炭是中国的基础能源和重要原料,在一次性能源生产和消费构成中历来占 70% 左右,在国民经济发展中具有重要的战略地位。“煤为基础、多元发展”,是解决中国能源问题的基本方略,但在今后相当长的时间里,以煤炭为主体的一次能源结构不会改变。中国的煤炭消费量已由 2005 年的 18.43×10^8 t 增长至 2011 年的 37.27×10^8 t,年均增幅达到 12.45%,煤炭产量由 2005 年的 21.13×10^8 t 增长到 2011 年的 35.20×10^8 t,年复合增长率为 8.88%,预测“十二五”期间,全国煤炭需求总量仍将保持增长态势,到 2015 年中国煤炭需求总量将达到 40×10^8 t^[2]。煤炭采出后导致上覆岩层移动和变形,岩体强度也会降低,在建筑荷载或列车动荷载作用下,甚至无建筑荷载或列车动荷载而由于其他地质原因作用下,有可能使老采空区重新“活化”,使冒落岩体再压密而导致地表产生新的移动和变形,甚至垮落,形成塌陷坑。采空区的存在对工程建设及地表建(构)筑物能产生潜在的安全威胁并具有以下特点:采空区特征难以弄清,其“活化”过程受多种自然因素和人为因素的影响并难以直接观察,采空区活化失稳破坏具有突发性,塌陷时间难以准确预计。

随着煤炭资源的大规模开发和利用,在给社会带来巨大的经济效益和社会效益的同时,也给矿山周围生态环境带来严重的伤害和破坏。采空区突然塌陷引发突发性地质灾害给人民群众财产和生命安全带来了巨大的经济损失和威胁,2011年7月28日,因连日强降雨,河北迁西县金信铁选厂红石崖嘴矿区职工宿舍发生地表塌陷,造成6人遇难。2007年8月29日凌晨3时许,陕西省神木县孙家岔镇边不拉煤矿矿井采空区发生塌陷引发地震,附近村民在睡梦中被惊醒。2005年12月26日13时05分,位于河南省安阳县都里乡林州市三鑫工贸公司都里铁矿,突然发生大面积塌陷,形成一个长约100 m、宽约50 m、平均深度6 m的大坑。经勘验,这一地表塌陷区地下空洞是1992年铁矿采空后留下的,塌陷与铁矿现采掘活动没有直接关系,在这起突发的地质灾害中,共有8人坠落、3人失踪。在晋城矿区,铁路从运营开始就受到了采空区的危害和影响,由于采空区本身还未稳定以及机车车辆动载的影响,线路经常处于不稳定状态,给行车安全带来了极大的隐患,1999年4月1日清晨,成庄线路巡道工发现DK2+600、DK2+800路段又突然下陷长约12 m,线路两侧田地出现多处最宽约10 cm的裂缝,轨道几何尺寸发生严重变形,偏差极大,由于发现及时,进行了迅速处理,防止了列车脱轨、颠覆重大事故的发生(图1.1)。位于四川省甘洛县境内的成昆铁路K309—K312段线路两侧存在大量铅锌矿,形成多处采空区,危及铁路安全要求,当地政府提前采取有效的预防治理措施后,确保成昆铁路的运营安全。随着矿产资源不断被开采,类似由于采空区的变形破坏给铁路安全运行带来隐患的报道还在增多。



图1.1 铁路附近采空区塌陷

铁路沿线采空区在火车动荷载的作用下更易引起地表变形和采空区塌陷,影响铁路路基的稳定性,是铁路运营必须解决的一个严重问题。首先威胁着铁路运输的安全,由于采空区本身未稳定以及机车车辆动载的影响,采空区沉陷不断发生,线路处于不稳定状态,给行车安全带来极大隐患;其次影响铁路运输效率,采空区的沉陷造成线路的不稳定,使行车不能按照规定的时间和速度要求行驶,运输生产效率受到严重的影响;再者增加铁路线路的维护保养难度和工作量,采空区地段线路极不稳定,且沉陷发生在时间和空间上都不能确定,因而线路的几何状态变化也变得复杂,很难控制和掌握,需要经常性地监测和维护。因此采空区顶板的稳定性问题作为铁路建设的不良地质问题已越来越突出。铁路线路是延伸性的建筑物,如果某一区段出了故障,全线通车将受到影响,如果不对地下采空区进行稳定性评估及加固处理,就可能引起地表沉陷并降低路基的稳定性,给行车带来不安全因素。在地表的拉伸区,线路也发生拉伸变形;在地表的压缩区,线路亦发生压缩变

形,将在钢轨内部产生拉应力或压应力,当钢轨内部的应力大于许用应力时,将在列车运行荷载作用下,导致钢轨线路失稳造成列车脱轨事故^[3,4]。

采空区是一种特殊的岩土工程对象,实际上是矿山开采沉陷学的延伸、拓广与发展,是开采沉陷学与岩土力学、土木工程、矿山地质、采矿工程、地下工程控制相结合的产物。因此,对老采空区顶板稳定性影响因素分析研究,进而更合理的对采空区稳定性做出评价,不仅是对采空区进行安全管理的前提和制定治理措施的依据,而且对保证铁路在设计使用年限内安全营运有着重要的理论和现实意义。

1.2 研究现状与存在问题

目前国内外学者对“三下”采煤(建筑物下、铁路下、水体下采煤)引起的岩层移动、地表沉陷以及对其引起的上方地表建(构)筑物的破坏方面已经做了大量的研究工作,取得了丰硕的研究成果,但对老采空区的稳定性及活化规律的研究较少。采空区的活化与稳定性与各种地质因素及非地质因素有关,其稳定性研究是一个十分复杂的系统工程问题。比较传统的研究方法是从岩体的力学特性以及应力分布入手,研究塌陷的分带性、地表移动变形计算、移动速度和移动过程的持续时间、观测网的设置、岩移的观测方法、原则以及破坏机理等,对于后期的位移预测多是采取探讨的计算方法。以前对于采空区的移动变形预计,较常用的是定性分析的方法,主要分为采空区顶板稳定性分析和采空区上方地基稳定性分析。对于煤矿采空区的治理,可分为采煤过程中的治理和采煤后的治理。目前针对采空区的治理研究,一般指的是对采煤后的老采空区。因为在有建筑物存在的煤炭储层区域,开采过程中一般都要求有相应的防护措施,直接进行处理的不多;而在煤层采出之后,由于地面沉降或者人类活动,并需要在其上部修建必要的建筑物或构筑物时,比如高速公路、铁路等,采空区所处地基不可避免,或者采取避让法时不够经济,因此,不符合工程稳定性要求的采空区就需要进行处理。

采空区进行地基处理,是为了预防和控制地表残余沉降变形,保证上部建筑物的安全。根据采空区治理规模及实用情况,目前国内外的研究处理手段可总结为4种^[5~27]:全部注浆充填采空区支撑覆岩,以彻底消除地基沉陷隐患,采用注浆充填、水力充填和风力充填等。如孙忠弟等^[5]对采空区进行了系统性的研究,并编写一部有关采空区治理的专著。张志沛^[7]对山西省很多采空区进行了治理试验,取得了关于采空区勘察设计、施工等诸方面的宝贵经验,随后进行了山西省平定县寿阳—西郊段冶西联营煤矿采空区的注浆充填治理工程,为今后类似工程起着积极的借鉴作用;局部支撑覆岩或地面构筑物,减小采空区空间跨度,防止顶板的垮落。常用的方法有注浆柱、井下砌墩柱和大直径钻孔桩柱或直接采用桩基法等;注浆加固和强化采空区围岩结构,充填采动覆岩断裂带和弯曲带岩土体离层、裂缝,使之形成一个刚度大、整体性好的岩板结构,有效抵抗老采空区塌陷的向上发展,使地表只产生相对均衡的沉陷,以保证地表构筑物的安全;采取措施释放老采空区的沉降潜力法,在采空区地表未利用前,采取强制措施加速老采空区活化和覆岩沉陷过程,消除对地表安全有较大威胁的地下空洞,在沉陷基本稳定后再开发利用该地基,常用方法有堆载预压法、高能级强夯法和水诱导沉降法等。

关于采空区变形破坏及治理,杜甫志^[28]、邓绪云^[29]等介绍了采空区稳定性治理在工程上的应用。罗一忠^[30]等从安全角度对采空区围岩失稳的事故致因机理进行了探讨,将人工智能中的神经网络技术用于大面积采空区失稳辨识研究;来兴平等^[31]研究了采空区稳定性非线性监测监控技术问题,将非线性稳定性理论应用在采空区围岩失稳的预测,并进行了采空区非线性动力失稳的计算机数值模拟研究;马金荣等^[32]提出了煤矿采空区场地建筑适宜性工程地质研究方法;郭广礼^[33]等研究了老采空区上方建筑地基变形的预测方法、介绍了地基处理注浆技术等;金太平^[34]、杨双安^[35]、刘著华^[36]等研究了采空区及塌陷区的探测方法;隋旺华^[37]对岩体移动变形破坏规律、浅部采空区上岩体内应力分布及它们与工程地质的条件关系进行了研究;颜荣贵^[38]完成了概率积分法完整封闭的体系,把变形预计从地表二维问题推广到三维问题,从地表到岩体内部,从地下开采到地表露天开采,并提出了解决采矿地表大型工业建筑这一课题的研究思路、方法、方案及措施,并应用到具体的工程实例中;姜德义^[39]从岩盐溶腔稳定性动力分析中用突变理论研究岩盐单井溶腔顶板、连通井顶板稳定性及井组间矿柱失稳的临界条件及突变时的突跳和能量释放,以深入了解顶板岩体运动过程和矿柱失稳的发展过程;潘岳^[40,41]、李江腾^[42]等应用尖点突变理论对矿柱非稳定系统进行了探讨,导出矿柱变形突跳量和能量释放表达式、失稳的充要条件;郭文兵、邓喀中^[43,44]等应用突变理论建立了条带煤柱破坏失稳的尖点突变模型,导出了条带煤柱破坏失稳的充要条件表达式,并考虑了地下水对条带煤柱稳定性的影响,认为地下水的作用会降低条带煤柱的稳定性。

近年来,随着计算机运算速度的提高,数值模拟方法有了很大的进步,应用越来越广泛,已经成为岩石力学研究和工程计算的一种重要手段。然而,尽管数值计算的方法及理论越来越完善,但也并不能完全适应复杂的工程地质条件,从而使计算机模拟定量结果只能作为定性或定量评价的参考。现在的数值模拟方法主要有离散元法、有限差分法、有限单元法、半解析法、边界元法以及上述各种方法的耦合。国内外已经有许多比较成熟的可用于岩土工程分析的有限元计算软件,如 SAP、ADINA、NCAP、FLAC、ANSYS、UDEC 等。有限单元法与边界元法类似,目前用于地表沉陷分析的有 S. L. Crouch 等提供的 TWODD、TWODI、TWOFS 程序及 E. Hoek 等研究的二维线弹性程序,而且已经有应用边界元法进行三维非线性分析裂隙及断层、蠕变岩体等研究的报道。离散单元法适用于节理岩体的分析,并能够模拟采动破碎的岩体,其在采矿工程中得到了一定的应用。目前,二维离散单元程序已很成熟,三维问题的研究也进展很快,FLAC^{3D}是由美国 ITASCA 公司开发的显式有限差分数值计算程序,近年来应用比较广泛,适用于模拟大变形。封云聪等^[45]利用有限元进行采空区应力分布的计算;成枢^[46]对岩层与地表移动数值进行了分析;郭仓^[47]等利用 FLAC^{3D}对不同采留宽条带煤柱的竖直应力分布和地表最大下沉值进行研究;谢和平^[48]、李治国^[49]等利用 FLAC^{3D}对采空区稳定性进行数值模拟计算与分析,并探讨了在采空区上方进行建筑的方法以及在工程上应用的实例。

滕永海^[50]以建筑物荷载的影响深度、采空区裂隙带发育高度不互相重合来判断采空区地基的稳定性;余学义^[51]、童立元^[52]、李凤玲^[53]、宋金栋^[54]、何志攀^[55]等着重对采空区剩余变形对高速公路的影响进行了预计分析,并对高速公路与下伏采空区相互作用分析理论及其采空区处理技术进行了系统的研究;高文龙^[56]对采空区特高压输电杆塔的稳定进行了研究;马超^[57]等在煤矿开采沉陷理论的基础上,对影响塌陷面积的主要因素

进行了深入分析，导出了塌陷面积和万吨塌陷亩数的计算公式；陈海波等^[58]研究了电力勘测中采空区架空送电线路塔基稳定性问题。

美国各主要采煤州都成立了处理采空区沉陷问题的专门机构，并有专门处理采空区地基的岩土公司，主要为对采空区进行处理并建设建（构）筑物。根据文献 [59, 60] 的分析可知，美国宾夕法尼亚州西部城市园林学院用大容量注浆法处理了几座建筑物下的采空区并控制了其沉降，怀俄明州、西弗吉尼亚州为了控制大面积采空区上方地表沉降，采用了注浆处理的措施；前苏联地质注浆专业公司也曾用过注浆法，处理了瓦赫鲁舍夫矿的下伏采空区。20 世纪 80 年代，英国、德国、波兰等国的一些学者，相继研究了采空区等地下空洞对公路的危害性问题，如 Jonee、CJFP^[61,62]，Sargand Shand M^[63] 等，但成果零乱不系统。国外采空区稳定性问题大多数是针对局部开采的废弃矿区，研究方法缺乏较深入系统的理论研究，主要采用调查统计方法。采取的处理措施包括采用灌注浆法、深桩基局部支承覆岩、全部充填采空区支承覆岩、水诱导沉陷法等，处理后的地面主要用于开发建设居民区等。

无论国内外，上述研究均基于“三下”（建筑物下、水体下、铁路下）采煤或煤炭采出后采空区围岩仅受岩移作用前提下进行的，而地下煤炭采出后经过一段时间采空区上覆岩层形成相对稳定的结构，并处于相对平衡状态，但采空区常常会充满大量积水，这些水对上覆岩层及附近煤柱的力学特性均产生不同程度的影响，并诱发已经处于相对稳定的上覆岩层及地表再次发生不同程度的冒落与塌陷，而对于浅埋煤层的老采空区，在大气降水或地下水影响条件下及地表列车荷载共同作用下浅伏采空区变形破坏问题的系统性研究较少。

因此，本研究以穿越内蒙古鄂尔多斯市东胜矿区某铁路为背景，通过理论分析、室内的实验研究及相似材料模拟试验、数值模拟等方法，对水及列车荷载作用下浅伏采空区变形破坏进行深入系统的探讨。

2 浅伏采空区围岩变形破坏特征研究

2.1 浅部煤层的界定

浅部煤层地下开采类型，其界定指标主要包括3个^[64]，根据重要性依次为：

(1) 煤层上覆岩层组成：煤层上覆岩层由薄基岩及松散荷载层组成，基岩厚度一般为30~50 m。

(2) 采用长壁采煤法回采工作面顶板覆岩破坏规律：基岩为单一关键层，松散荷载层随基岩层移动、垮落至地表，顶板来压剧烈，来压时间短，动压现象明显，地表出现明显的张开裂缝。

(3) 煤层埋藏深度：煤层埋藏深度为80~100 m。

在浅部煤层中布置回采工作面进行开采，遗留下的采空区称为浅伏采空区。

2.2 不同采煤方法采场上覆岩层破坏特征

煤层在未开采以前，煤系岩体内应力处于平衡状态，采动后使岩体平衡状态被破坏，为达到新的应力平衡，围岩发生变形、移动和破坏。采用不同的采煤方法，采场上覆岩层破坏规律具有明显的不同。

2.2.1 全部垮落法开采顶板岩层破坏特征

煤炭开采过程中采用全部垮落法管理顶板时，从煤层直接顶开始，由下向上依次垮落、断裂、离层及弯曲，经过若干时间后终止移动。采空区上覆岩层按其破坏程度不同，自下而上大致可划分为“三带”，即垮落带、断裂带和弯曲带，并在地表一定范围内形成下沉盆地。

2.2.1.1 垮落带

垮落带是由直接顶垮落后形成的，其主要特征有：

(1) 根据冒落岩块的破坏和堆积状态，可分为不规则垮落带和规则垮落带两部分。在不规则垮落带内岩层完全失去原有的层位，在靠近煤层附近的岩石破碎、杂乱无章堆积；而不规则垮落带上部是规则垮落带，其内岩块堆积比较整齐。

(2) 垮落带内破碎岩石空隙较大，体积膨胀，随着垮落带高度的增加，未垮落顶板岩层下方的自由空间变得愈来愈小，最终垮落过程将停止。

(3) 垮落带把层状结构的隔水层、含水层统统变为散体块状结构的透水体, 岩块间空隙多而大, 连通性强, 能导水, 也能导砂。

2.2.1.2 断裂带

断裂带为垮落带上方一定范围内的岩层在保持其原有层状的前提下发生了断裂, 且具有导水性, 能使其上覆岩层中的地下水流向采空区, 其主要特征有:

(1) 垮落带之上的各分层岩层在弯曲下沉过程中, 若承受的拉应力超过其抗拉强度, 则岩层层面上将出现垂直于层面的拉伸裂隙; 当裂隙深度较大时, 岩层发生整体断裂, 失去连续性, 但仍保持其原有的层状特征。

(2) 各岩层之间产生平行于层面的离层, 离层裂隙的宽度下部较大, 而上部较小, 产生离层的主要原因是岩层间力学性质差异较大, 岩层向下弯曲移动不同步所致。

(3) 断裂带随开采空间的扩大而向上发展, 当达到充分采动时, 断裂带高度达到最大, 随开采范围的继续扩大, 断裂带在竖直方向上高度不再发展, 只是在水平方向上继续扩展。

(4) 裂隙带把多层结构的隔水层、含水层变为统一的层体块状结构的透水层, 原隔水层被破坏, 产生一系列垂直于层面的断开裂隙以及层与层之间的离层裂隙, 这些断开裂隙与离层裂隙纵横交错, 相互贯通, 降低了岩层的隔水性能, 一般只导水, 不导砂透泥。

垮落带与断裂带统称为导水裂隙带, 其岩层强度降低, 阻隔水能力下降, 在水及外部荷载作用下容易失稳而产生破坏。

2.2.1.3 弯曲带

断裂带上界至地表统称为弯曲带, 其主要特征有:

(1) 带内岩层在自重作用下产生沿层面法向方向的弯曲, 在水平方向处于双向受压状态, 一般具有隔水性, 当岩性较软时, 隔水性能更好。

(2) 带内岩层移动变形过程是连续和有规律的, 并保持整体性和层状结构。

(3) 弯曲带上方地表一般形成下沉盆地, 盆地边缘往往出现张拉裂缝, 通常裂隙宽度向下逐渐变窄, 到一定深度后闭合。

根据顶板管理方法、采空区大小、采高、岩石性质及开采深度不同, 上述三带不一定同时存在。当开采的煤层埋深较浅时, 则没有弯曲带, 而采用充填法处理采空区时, 则没有垮落带, 只有断裂带和弯曲带。

2.2.2 留煤柱开采顶板岩层破坏特征

采用留小煤柱开采(即宽巷道掘进出煤)引起的矿山压力较小, 有效地降低了采动引起上覆岩层的破坏, 且煤层埋藏较浅, 煤炭采出后由于小煤柱的支撑作用, 煤层顶板不易垮落, 在采出条带上方形成相对稳定的结构(托板结构、平衡拱结构或拱梁平衡结构), 上覆岩层直至地表仍将保持完整。

2.3 煤柱破坏失稳特征分析

根据 A. H. Wilson 理论^[65]，煤柱的受力主要来自于上覆岩层的荷载和采动的影响，煤炭采出后，导致顶板应力重新分配，出现了应力降低区、稳压区和应力增高区，在煤柱边缘由于采动的影响，使边缘部分煤柱的应力超过了其屈服应力，发生变形破坏，为屈服带（塑性区）如图 2.1 所示，该区域为应力降低区，相应煤柱强度较低，应力向煤柱中部集中，为应力增高区，该区域煤体被屈服带包围，处于三轴应力状态，强度较高，主要支撑上覆岩层，为煤柱核区，对煤柱的稳定性起决定性作用。

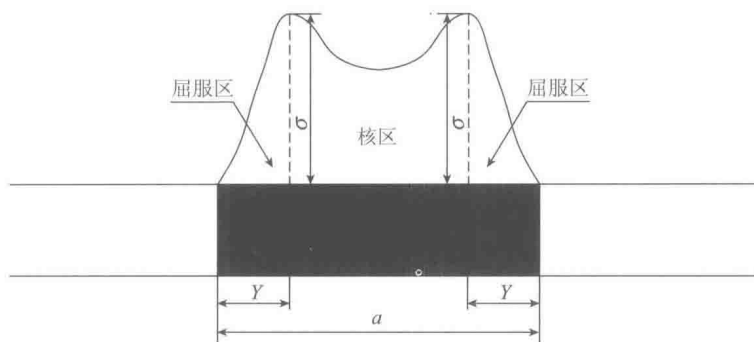


图 2.1 煤柱屈服带及弹性核区

a —煤柱宽度； Y —煤柱边界屈服带宽度； σ —应力

2.3.1 煤柱的流变特性

大量的工程实践和理论研究表明：煤炭被采出后，附近围岩中的应力重新分布而产生围岩变形，最初能够保持稳定的岩体，但由于变形随时间推移而不断发展，岩体可能最终发生失稳破坏，特别是中软弱岩体，在载荷的长期作用下，都具有其变形随时间延长而增大、岩体强度随时间延长而降低的流变性质。这一性质对于分析岩体工程长期稳定性具有十分重要的意义。因此在实际地下工程稳定性分析中，应当考虑煤岩体的流变特性。关于岩石流变特性的研究，许多学者做了大量研究，如王来贵、王泳嘉^[66]等研究了岩石试件的流变失稳理论及其判据。留小煤柱的目的是支撑上覆岩层，在上覆岩层载荷的长期作用下，条带煤柱具有明显的流变性质，其强度随时间的延长而逐渐降低，是时间的函数。若其承受的载荷小于它的长期强度时，仅产生过度蠕变阶段而不发生破坏；若其承受的载荷大于它的长期强度时，其变形值不趋于某一稳定值，不仅产生过度蠕变阶段，而且还产生稳态蠕变阶段、加速蠕变阶段直至破坏。煤岩体作为一种沉积岩，存在结构上的非均质性（如节理、裂隙等），其蠕变特性受载荷、湿度等影响较大。

2.3.2 煤柱的流变模型

2.3.2.1 西原模型

有关研究^[67]表明煤和岩石试件在长时间恒定载荷的作用下，其蠕变特性表现为：当

施加的应力小于某一数值时, 应变速率逐渐减小, 此时, 应变将趋于某一极限值, 与广义开尔文模型的应变时间曲线类似 (图 2.2a)。当应力水平大于某一数值时, 应变随时间增加不收敛于某一定值, 而是逐渐增大, 表现为稳态蠕变和加速蠕变, 即蠕变过程分为 3 个阶段: 初始蠕变阶段 (AB 段), 特征是应变速率逐渐减小; 稳定蠕变阶段 (BC 段), 即应变速率不变; 加速蠕变阶段 (CD 段), 加速蠕变直至破坏。这一现象符合柏格斯模型 (图 2.2b), 此模型就是西原模型, 其组合方式见图 2.3。

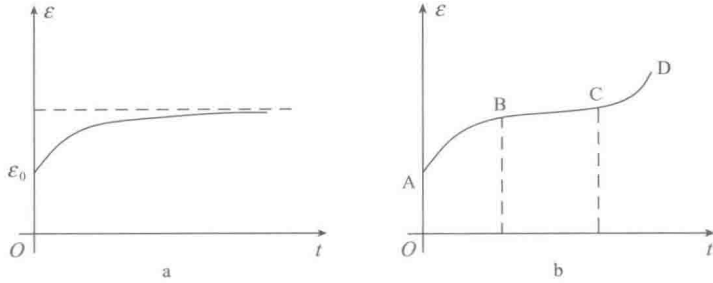


图 2.2 模型的蠕变曲线

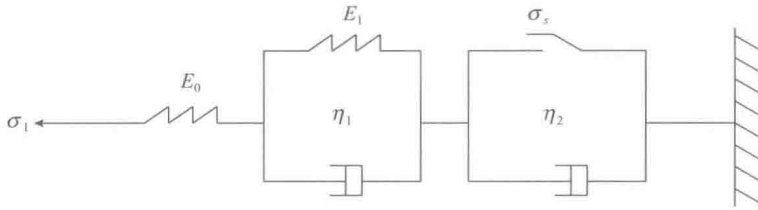


图 2.3 蠕变理论模型

常应力作用下西原模型的蠕变本构方程为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_1}{E_0} + \frac{\sigma_1}{E_1}(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1}t}), & \sigma_1 \leq \sigma_s \\ \frac{\sigma_1}{E_0} + \frac{\sigma_1}{E_1}(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1}t}) + \frac{\sigma_1 - \sigma_s}{\eta_2}, & \sigma_1 > \sigma_s \end{cases} \quad (2.1)$$

上述西原模型能较好地描述煤柱的蠕变特性, 但蠕变参数的计算必须建立在蠕变实验的基础上, 根据蠕变实验数据求得, 但实际煤柱含有大量的裂隙、节理等弱面, 而室内试件则相对完整, 两者是有区别的, 煤柱的强度相对低于试件的强度, 其蠕变性能应更加显著。另外蠕变参数还与加载条件有关, 随载荷的不同可能有所变化。因此准确地确定蠕变参数是煤柱蠕变特性研究的难点, 还有待进一步深入研究。

2.3.2.2 改进的西原模型

上述西原模型中使用的是理想线性元件, 对蠕变加速阶段的描述不够理想, 因此下面采用非线性黏滞元件代替线性牛顿体, 将西原模型进行改进, 使其适用于非线性阶段的分析, 并对其进行稳定性分析。

传统的流变模型理论中的基本元件胡克体、牛顿体、圣维南体都是理想的线性元件, 将这些元件进行串联、并联组成的流变模型不能很好地描述煤岩体加速蠕变阶段。为此采用非线性牛顿体代替理想牛顿体, 设该黏滞阻尼器所受应力与其加速度大小成正比, 即

$$\sigma = \eta \ddot{\varepsilon} \quad (2.2)$$

式中: σ ——应力, MPa;

η ——黏滞系数, MPa·s;

$\ddot{\varepsilon}$ ——应变对时间的二阶导数(蠕变加速度)。

对式(2.2)积分得:

$$\varepsilon = \int \left| \int \sigma(t) dt \right| dt \quad (2.3)$$

利用上述非线性黏滞元件对西原模型进行改进,改进的西原模型如图2.4所示,模型第一阶段和第二阶段的元件都采用传统的线性元件,而第三阶段的黏滞元件用非线性黏滞元件代替。

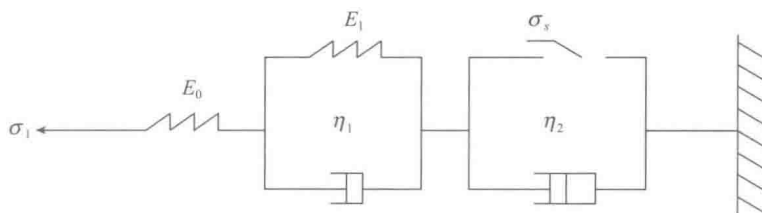


图 2.4 改进的西原模型

由复合模型的组合特征,其应力—应变关系为

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_0 = \sigma_2 = \sigma_3 \\ \varepsilon_1 &= \varepsilon_0 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ \varepsilon_0 &= \frac{\sigma_0}{E_0} = \frac{\sigma_1}{E_0} \\ \sigma_2 &= \sigma_1 = E_1 \varepsilon_2 + \eta_1 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 &= \sigma_1 = \sigma_s + \eta_2 \ddot{\varepsilon}_3 \end{aligned} \quad (2.4)$$

由式(2.4)可得改进的西原模型本构方程为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_1}{E_0} + \frac{\sigma_1}{E_1} (1 - e^{\frac{E_1}{\eta_1} t}), & \sigma_1 \leq \sigma_s \\ \frac{\sigma_1}{E_0} + \frac{\sigma_1}{E_1} (1 - e^{\frac{E_1}{\eta_1} t}) + \frac{\sigma_1 - \sigma_s}{2\eta_2} t^2, & \sigma_1 > \sigma_s \end{cases} \quad (2.5)$$

式中: E_0 、 E_1 ——模型的弹性模量和黏弹性模量, MPa;

η_1 、 η_2 ——模型的黏滞系数, MPa·s;

σ_s ——圣维南体的极限摩擦力, MPa, 其值由实验确定。

如果仅研究 $\sigma_1 = \sigma_0$ 时的蠕变变形,应用叠加原理,可得改进的西原模型的蠕变方程为

$$\begin{aligned} \frac{\eta_1}{E_1} \ddot{\varepsilon} + \dot{\varepsilon} &= 0, \quad \sigma_1 < \sigma_s \\ \frac{\eta_1}{E_1} \ddot{\varepsilon} + \dot{\varepsilon} - \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} \left(\frac{\eta_1}{E_1} + t \right) &= 0, \quad \sigma_1 \geq \sigma_s \end{aligned} \quad (2.6)$$

模型稳定性分析:在蠕变方程中认为 E_0 、 η_1 、 η_2 为常数, E_1 随应变的变化而发生非