

国家自然科学基金资助项目(40772191)

“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAC09B01)

建筑物下采煤 理论与实践

谭志祥 邓喀中 著

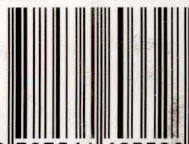
中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

Jianzhuwuxia Caimei Lilun Yu Shijian

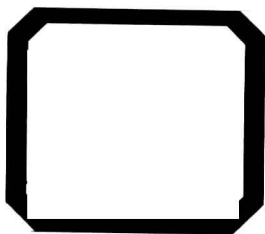
责任编辑 潘俊成 封面设计 肖新生

ISBN 978-7-5646-0332-8



9 787564 603328 >

定价: 40.00 元



基金资助项目(40772191)

“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAC09B01)

建筑物下采煤理论与实践

谭志祥 邓喀中 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书对煤矿生产中常见的建筑物下采煤问题进行了系统研究。首先介绍了国内外建筑物下采煤的研究现状、开采沉陷的一般规律,结合科研成果分析总结了综放开采、条带开采、房式开采等引起的地表移动变形规律;在实测资料、相似材料模拟、数值模拟等的基础上,对采动区建筑物移动变形特性和破坏规律进行了全面研究,给出了采动区建筑物损害评定方法,创建了采动区建筑物地基、基础和结构协同作用的力学模型,分析了采动区建筑物附加地基反力、弯矩、剪力、水平应力等的变化规律,在此基础上提出了基于采动区建筑物地基、基础和结构协同作用的建筑物保护措施,并将非线性学科中的人工神经网络理论应用到建筑物下采煤学科。此外,本书还对煤矿开采损害技术鉴定方法进行了研究。最后,给出了一些建(构)筑物下采煤的工程实例。

本书可作为测绘、采矿、建筑等专业研究生的教学参考书,也可供从事开采损害和防护研究的科研人员及矿山企业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑物下采煤理论与实践/谭志祥,邓喀中著. —徐州:
中国矿业大学出版社,2009.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0332 - 8

I. 建… II. ①谭…②邓… III. 建筑物下采煤 IV.
TD823.83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 214950 号

书 名 建筑物下采煤理论与实践

著 者 谭志祥 邓喀中

责任编辑 潘俊成

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516) 83885307 83884995

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 12.75 字数 318 千字

版次印次 2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

定 价 40.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

有资料显示,煤炭在我国一次能源消耗中占 70% 左右,到 21 世纪 20 年代仍将占 50% 以上;同时我国是一个以井工采煤为主的国家,煤炭产量中井工开采的煤量占 90% 以上。随着大量煤炭从地下采出,开采所引起的地表沉陷及其环境灾害问题日益突出。矿山开采沉陷不仅破坏人们赖以生存的矿区生态环境,而且对地表建(构)筑物造成严重损害。我国煤炭资源分布广泛,建筑物下压煤量巨大,特别是东部地区煤炭资源正在逐步枯竭,矿井储量逐年减少,剩余储量中相当一部分为建筑物下压煤,其中以村庄下压煤量最大。因此,研究因地下开采引起的岩层和地表移动规律以及建(构)筑物下压煤安全开采方法,已成为我国广大煤炭科技工作者面临的重要课题。

正确掌握地下开采引起的岩层和地表移动规律是进行建筑物下安全采煤的基础。从 20 世纪 50 年代初开始,我国开始进行煤矿开采引起地表移动变形的监测工作,至今已积累了近 2 000 条观测线监测资料,基本掌握了煤矿地表移动变形的一般规律,许多成果已比较成熟,为建筑物下安全采煤提供了有力的技术支撑。近年来,我国许多矿区采用综放开采技术进行开采,极大地提高了开采效率和经济效益,综放开采引起的地表移动变形规律已成为开采沉陷学科研究的主要课题之一。本书对此问题进行了深入研究,并总结了部分矿区条带开采、房式开采的地表沉陷规律。

煤矿地下开采引起地表产生移动和变形,从而使采动区建筑物产生变形和破坏。研究建筑物与地表移动变形之间的关系对于建筑物下采煤具有重要的意义。目前我国部分矿区通过建立建筑物观测站研究两者之间的关系,获得了一些研究成果。本书在现有资料基础上,结合现场实测、相似材料模拟试验、数值模拟等手段,系统研究了采动区建筑物与地表移动变形之间的关系。

进行建筑物下采煤的程序通常为——首先根据地质采矿资料进行地表移动变形预计,然后根据预计的地表变形值大小判定建筑物的损害程度,在此基础上确定经济合理的建筑物保护措施或井下开采措施。由此可见,建立建筑物损害程度与地表变形之间的关系对于建筑物下安全采煤极为重要。中华人民共和国煤炭工业局 2000 年 5 月颁布的《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中给出了长度或变形缝区段内长度小于 20 m 的砖混结构建筑物按不同地表变形值划分破坏等级的标准,标准中给出了建筑物损害程度与地表变形之间的关系。该标准对于指导我国建筑物下安全采煤及处理各类开采损害引起的工农纠纷起了巨大作用。由于国家标准尚存在一定缺陷,我国部分矿区通过设立建筑物变形观测站,建立了适合本矿区的建筑物损害评定标准。建筑物的损害形式主要以裂缝为主,本书基于现场实测资料,建立了建筑物裂缝宽度与地表变形值之间关系的系列公式,给出了采动区建筑物损害评定方法,并提出了“房屋裂缝角”新概念。

正确认识和掌握采动区建筑物地基、基础与结构协同作用机理和规律是进行采动区建筑物保护措施设计和计算采动引起的建筑物附加内力的前提,由于长期以来对此认识不足,

在进行采动区建筑物设计时过大地估计了建筑物附加内力,从而增大了建筑物保护费用。本书综合运用矿山开采沉陷学、矿山岩体力学、数理科学等多学科的知识,创建了采动区建筑物地基、基础和结构协同作用力学模型,该模型可以计算采动区不同位置建筑物的移动变形和各种附加应力;同时分析了采动区建筑物附加地基反力、弯矩、剪力、水平应力等的变化规律,提出了基于采动区建筑物地基、基础和结构协同作用的建筑物保护措施,并进行了应用实例研究。

由于煤矿岩层移动的特殊性,许多问题无法用传统的线性科学进行研究,近年来随着对非线性科学的深入研究,非线性科学理论在岩土工程学科中应用逐渐增多,其中应用较广泛的非线性科学理论是人工神经网络理论。本书在现有成果基础上,对神经网络理论在建筑物下采煤学科中的应用问题进行了研究。

随着我国社会经济的发展,对煤炭资源的需求越来越大,煤炭开采不可避免地会造成地面沉陷,导致地面各种建(构)筑物产生不同程度损害,从而产生大量工农纠纷。如何准确地进行开采损害技术鉴定,已成为目前矿区社会经济发展中亟待解决的问题。本书在大量开采损害技术鉴定工作的基础上,对开采损害技术鉴定方法进行了系统研究,提出了煤矿开采损害技术鉴定的系列方法和鉴定程序。

此外,本书还结合科研课题对一些特殊建(构)筑物下采煤问题进行了研究,主要包括铁路桥下采煤、堤坝下采煤、公路下采煤、老采空区上方建筑物地基稳定性评价等。最后本书介绍了一些建筑物下采煤的实例。

本书是作者十几年来理论研究和现场实践的成果总结。在作者研究和写作过程中得到了中国矿业大学高井祥教授、汪云甲教授、张雁秋教授、吴侃教授、郭广礼教授和煤炭科学研究总院张华兴研究员、徐乃忠研究员等的热情指导和建议,得到了中国矿业大学邱慎耕高工、彭世模高工、周鸣工程师、马昌忠高工和张宏贞助教及河南理工大学郭文兵教授等的热心帮助,在此作者一并表示诚挚感谢。同时衷心地感谢兖州矿业集团孟祥军高工、刘光庆高工、王宗胜高工、张连贵高工、岳尊彩工程师,皖北煤电公司刘卫华高工、郭中华高工、钱晓虎高工、张运海高工,淮北矿业集团喻怀君高工、杨怀勇工程师,徐州矿业集团吴玉执高工、袁力高工等同志对作者现场科研工作的长期支持,他们为本书提供了大量素材。此外书中还引用了许多矿山工程技术人员和学者发表的文献资料,在此对所引文献的作者表示由衷谢意。

由于作者水平所限,书中难免存在缺点和错误,恳请读者批评指正。

作 者

2009年春于徐州

目 录

1	建筑物下采煤技术研究现状	1
1.1	建筑物下采煤的保护措施	1
1.2	采动区建筑物损坏等级评定标准	5
1.3	采动区建筑物地基、基础和结构协同作用问题	8
2	地表移动变形规律研究	11
2.1	岩体移动和破坏的基本概念	11
2.2	地表移动变形的一般规律	14
2.3	综放开采地表移动变形规律研究	28
2.4	条带开采地表沉陷规律研究	43
2.5	房式开采地表沉陷规律试验研究	52
3	采动区建筑物移动变形特性研究	56
3.1	采动区建筑物与地表移动变形之间关系分析	56
3.2	建筑物移动变形与地表移动变形关系实测研究	60
3.3	开采对建筑物动态影响的相似材料模拟试验	68
3.4	开采引起的建筑物附加应力数值模拟研究	76
4	采动区建筑物破坏规律实测研究	84
4.1	地表移动变形对建筑物的影响	84
4.2	采动区建筑物破坏规律实测研究	86
4.3	采动区建筑物破坏评定标准	93
4.4	房屋裂缝角	94
5	采动区建筑物地基、基础和结构协同作用力学模型	96
5.1	采动区建筑物地基、基础和结构协同作用力学模型	96
5.2	应用程序开发	101
5.3	计算示例研究	101
5.4	采动区建筑物附加应力变化规律研究	103
6	基于地基、基础和结构协同作用的建筑物保护措施	119
6.1	目前采动区建筑物保护措施合理性分析	119
6.2	采动区建筑物保护措施改进	121

6.3	工程实例应用研究·····	123
7	神经网络在建筑物下采煤中的应用·····	127
7.1	神经网络理论概述·····	127
7.2	概率积分法预计参数求取的神经网络模型·····	135
7.3	神经网络在采动区建筑物损害判别中的应用·····	147
7.4	神经网络在条带开采中的应用·····	151
8	矿区开采损害技术鉴定方法·····	155
8.1	开采损害房屋定级和赔偿标准·····	155
8.2	开采损害技术鉴定方法·····	156
8.3	房屋损害的非采矿原因分析·····	160
8.4	土地塌陷鉴定方法·····	161
9	特殊建(构)筑物下采煤研究·····	162
9.1	铁路桥下全柱开采研究·····	162
9.2	堤坝下采煤研究·····	167
9.3	公路下采煤技术简介·····	170
9.4	老采空区上方建筑物地基稳定性分析实例·····	173
10	部分矿区建筑物下采煤实例·····	182
10.1	建筑物下条带开采研究实例·····	182
10.2	村庄附近工作面开采方案优化研究实例·····	189
	参考文献·····	194

1 建筑物下采煤技术研究现状

据国有重点煤矿的不完全统计资料,目前我国“三下”压煤约 137.9 亿 t,其中建筑物下压煤为 87.6 亿 t,而建筑物下压煤中的 60%为村庄下压煤^[1]。部分矿区建筑物下压煤量十分巨大,已经严重制约着矿区发展。据 2003 年年底统计,龙口矿区生产矿井总可采储量 2.34 亿 t,其中直接影响工农关系的村庄下压煤问题最为严重,村庄压煤的可采储量 1.54 亿 t,占总可采储量的 65.8%。兖州矿业集团 2003 年年底统计,生产矿井总可采储量 15.90 亿 t,其中村庄下压煤的可采储量 7.89 亿 t,占总可采储量的 49.6%。徐州矿业集团 1999 年统计的建筑物下压煤约 4.9 亿 t,占总可采储量的 50%以上。

此外,随着社会经济的发展,矿区地面建筑物逐渐增多,建筑物下压煤开采已成为许多矿区面临的主要问题,严重制约着矿区可持续发展。因此,进行建筑物下采煤研究有十分重要的理论和实际意义。迄今为止,世界各产煤国家进行了大量建筑物下采煤研究和实践工作,取得了丰硕研究成果^[2-16],为推动建筑物下采煤事业的发展做出了巨大贡献。

1.1 建筑物下采煤的保护措施

从 19 世纪末德国最早开始进行建筑物下采煤研究以来,世界许多国家如波兰、苏联、英国、美国等都进行了建筑物下采煤研究工作。我国建筑物下采煤试验研究工作开始于 20 世纪 60 年代,经过 40 多年研究和实践,建筑物下采煤技术有了很大发展,已经在县城、集镇、村庄、医院、工厂、高压输电线铁塔、烟囱、桥梁、管线等各类建(构)筑物下进行过采煤试验和研究工作,基本上都获得了成功。我国建筑物下压煤以影响工农关系的村庄下压煤量为最大、问题最突出,其次为工业广场压煤,再次为其他工业、民用建筑物下压煤。

目前世界各国进行建筑物下采煤的保护措施主要体现在以下几个方面:一是在井下采取采矿措施,如采用部分开采、充填开采或协调开采等,其目的是尽量减小建筑物所受地表移动变形;二是对地面建筑物采取结构保护措施,如对建筑物进行加固、修复或建造抗变形建筑物,其目的是提高建筑物抵抗或适应变形的能力;三是对覆岩采取离层注浆措施,以减小地表移动和变形。有时也根据实际情况将以上方法组合使用。建筑物下采煤的原则是:在保证建筑物安全前提下技术上可行、经济上合理。

1.1.1 井下采矿保护措施

减小地表变形的井下采矿措施很多,合理的井下开采措施应综合考虑地质采矿条件、建筑物的实际情况和社会经济等多种因素,目前采用的井下开采措施主要有以下几种^[2,17-21]。

(一) 部分开采

主要有条带开采、房柱式开采、巷道穿采、限厚开采、留不规则煤柱等。我国大中型煤矿主要采用条带开采方法。条带开采,是将开采煤层划分为条带形状,按一定的采留比采一条、留一条,使留下的条带煤柱支撑上覆岩层,以减小地表变形的开采方法。目前该技术在

我国比较成熟,运用效果比较好^[22-29],我国已在煤层平均倾角达 32° 情况下采用走向条带开采城市下压煤取得成功^[30]。房柱式开采在我国应用较少,兖州南屯煤矿已开展此项研究工作^[31];巷道穿采、留不规则煤柱开采方法在我国小煤窑中普遍使用;限厚开采在我国一些矿区(如皖北局)得到了应用^[32]。

波兰和前苏联的部分开采主要采用条带开采。波兰回采率一般为 $50\%\sim 60\%$,下沉系数为 $0.05\sim 0.1$;有时水砂充填与条带开采配合使用,下沉系数为 $0.015\sim 0.02$ 。英国主要采用条带开采和房柱式开采,英国近年来在浅部大量采用房柱式开采地面建筑物下压煤,效果较好。日本也曾用房柱式开采建筑物下压煤。

部分开采方法可以在保护地面建筑物的前提下采出一部分煤炭资源,具有较好的经济效益,其最大缺点是回采率低,资源浪费很大。

(二) 充填法开采

充填法开采,就是对开采形成的采空区用其他廉价材料进行充填以减小地表移动变形,主要有水砂充填、风力充填、水力充填和矸石自溜充填等。我国曾在多个矿区进行过充填法开采的研究工作,近年来由于充填材料缺少和充填费用较高(吨煤成本约增加 $20\%\sim 30\%$)、居高不下且工艺复杂,已经很少采用。最近周华强、侯朝炯等提出固体废物膏体充填不迁村采煤新方法^[33]。郭广礼、王悦汉等根据荷载置换原理,提出了“条带开采——注浆充填固结采空区——剩余条带开采”的三步法进行开采沉陷控制以保护地面建筑物的新思路^[34]。

波兰充填法开采主要采用密实水砂充填,砂的含泥率低于 $10\%\sim 20\%$,压缩率为 $5\%\sim 6\%$,地表下沉系数为 $0.1\sim 0.15$ 。波兰还采用分期开采方法,第一次采用条带开采和水砂充填,第二次开采剩余条带煤柱并采用水砂充填处理采空区,两次开采后的下沉系数为 $0.12\sim 0.15$ 。英国曾采用风力充填开采缓倾斜煤层但效果不理想,下沉系数为 0.5 左右。德国在一般建筑物下采用人工充填、在重要建筑物下采用水力充填,充填材料为炉渣或经破碎的矸石。保加利亚和日本曾采用风力充填开采,法国曾采用水砂充填开采解决建筑物下采煤问题。

充填法开采效果与充填方法、材料等有关,一般水砂充填效果最好。如果充填效果好,可以起到保护建筑物的目的,但充填开采使回采工艺复杂化且增加了开采成本。

(三) 协调开采

协调开采,就是利用两个煤层(或分层)或同一煤层不同工作面同时开采所产生的地表变形互相抵消的原理进行开采,以达到减小地表变形的目的。我国峰峰等矿区采用协调开采方法开采建筑物下压煤,应用效果较好。

波兰曾采用 $2\sim 3$ 个矿联合开采城市煤柱,进行矿与矿之间的协调开采,以减小地表移动变形和减轻对采动区建筑物的损害。英国和德国也曾采用协调开采。前苏联协调开采注重于合理布置工作面,使建筑物位于盆底区域。他们认为,在开采深度较大时,应用长短工作面混合开采方法最为有效,即先采一个短工作面、再采一个长工作面,使建筑物位于地表移动盆地的平底部位,从而减少建筑物的受力变形。

协调开采方法虽然可以减小地表变形但减小量有限,通常要与地表建筑物保护措施配合使用。

(四) 全柱开采

主要有长工作面开采、多工作面联合开采等。采用长工作面或多工作面大面积联合开采,可使受保护建筑物下面不出现固定边界,而只出现动态移动边界,从而有效减缓地表变形。多工作面联合开采的实施,必须具有良好的地质条件和较高的技术管理经验和组织能力。兖州北宿煤矿在吴官庄村正下方采用双对拉工作面联合开采,村庄只受到动态移动变形影响,最终变形值很小,开采后村庄房屋损害轻微,取得了良好经济效益和社会效益^[35]。

波兰采用过干净回采、在采空区不残留煤柱的方法以减小采空区上方的地表变形。前苏联全柱开采主要考虑深厚比,认为在一定倍数深厚比情况下,开采引起的地表变形将不会引起建筑物破坏,并将此深度称为安全开采深度。

全柱开采通常与协调开采一样,减小地表变形量有限,需配以建筑物结构保护措施。

此外,还有连续开采、择优开采、对称背向开采、间歇开采、适当安排工作面与建筑物长轴的关系等多种开采方法,均可起到减小地表变形目的,以上方法有时亦配合使用。

1.1.2 地面建筑物结构保护措施

地面建筑物结构保护措施很多,归纳起来主要分为两大类:刚性保护措施和柔性保护措施。刚性保护措施是为了增强建筑物抵抗变形的能力,柔性保护措施是为了提高建筑物适应变形的能力、减小地表变形引起的建筑物附加应力,其目的都是为了减轻建筑物损害。合理的建筑物保护措施应在保证建筑物正常使用前提下尽量减少保护费用。这些措施在实际应用中又分为两种情况:一是对已有建筑物采取结构保护措施,二是对新建建筑物采取抗变形设计保护措施。

(一) 刚性保护措施

刚性保护措施,是指通过增加建筑物整体或局部的强度和刚度从而提高建筑物抵抗变形能力的举措。对于现有建筑物主要有设钢拉杆、钢筋混凝土顶底圈梁、基础联系梁、钢筋混凝土锚固板、构造柱、堵砌门窗洞等措施;对于新建建筑物采取抗变形设计保护措施,主要有设置顶底圈梁、设窗下加强带、基础联系梁、构造柱等。以上方法在我国均有广泛应用。从1978年湖南资江煤矿建造抗变形俱乐部以来,就地重建抗变形结构房在我国徐州、峰峰、阳泉、兖州、平顶山等多个矿区得到推广应用,其中有农村平房、楼房、窑洞等,总建筑面积达数十万平方米。如徐州庞庄矿在拾西村采用煤矸石垫高地基就地重建抗变形农村住宅取得圆满成功,既避免了征地和搬迁带来的一系列社会经济问题、改善了农民居住条件,又解放了大量煤炭资源、延长了矿井服务年限,取得了显著社会效益和经济效益。

波兰对旧建筑物一般只采取锚固拉杆加固及修补和粉刷墙壁裂缝等措施,有时设置钢筋混凝土锚固板,以形成强度较高的整体基础,一般用于地表水平变形达12~15 mm/m时。钢拉杆、钢筋混凝土顶底圈梁和构造柱在前苏联有广泛应用,前苏联还用废钢丝绳代替钢拉杆进行建筑物加固但效果不佳,开采后建筑物仍然出现裂缝。德国二战后在矿区新建建筑物均采用抗变形结构措施。

刚性保护措施不能从根本上消除和减缓地表变形,是一种被动保护措施。如果地表移动变形预计或建筑物附加应力计算过大,抗变形设计过于保守,会导致经济上不必要的浪费;反之,抗变形结构设计不足以抵抗地表变形,仍会造成建筑物损害。

(二) 柔性保护措施

柔性保护措施是在建筑物基础和上部结构上设置弱面、或在建筑物周围设置变形补偿沟,用以吸收部分采动引起的地表变形或阻断地表变形向建筑物传递和扩展,从而提高建筑

物适应变形的能力、减小房屋结构中的附加应力。对于现有建筑物主要有设变形缝、变形补偿沟、水平滑动层、改变跨空结构的支座形式等措施;对于新建建筑物采取抗变形设计保护措施,主要有设置变形缝、变形补偿沟、水平滑动层、双板基础、楔形基础等。

变形缝,是指将较长的建筑物人为分成几个相互独立的单体,使各单体单独均匀沉降,从而提高建筑物适应地表变形的能力。变形缝技术在采动区建筑物和非采动区建筑物中都有广泛使用。变形补偿沟,是在建筑物基础外侧 1 m 左右挖一定深度沟槽,用以吸收地表压缩变形,英国是最早在建筑物周围挖变形补偿沟的国家,中国、波兰、前苏联等均采用变形补偿沟技术。水平滑动层,主要用于新建抗变形建筑物,在我国多个矿区均有应用,煤科总院唐山分院在铁法局现有建筑物上设置水平滑动层取得成功^[36]。英国对新建的抗变形建筑采用带滑缝的双板基础,以减小水平变形影响。前苏联进行过楔形基础试验。

柔性保护措施可以有效地减小水平变形对建筑物的影响,但仍不能从根本上解决不均匀沉降对建筑物造成的危害。

除了以上保护措施外,保护采动区建筑物的方法还有设置千斤顶调整基础、抽砂等方法。中国矿业学院在阳泉设计的“百团大战”纪念碑采用了千斤顶可调基础。煤科总院在鹤壁进行了抽砂调整房屋变形试验。德国还在地基上打释压钻孔以减小已有建筑物的最大压缩变形值。此外,兖州东滩矿与煤炭科学研究总院合作研制了可搬迁抗采动变形盒子房屋并通过现场试验。这种房屋由预制成一个房间或几个房间式的单元,在现场组装使用,具有很高的预制化程度。其最大优点是可以方便地进行搬迁组装而不必造成拆除浪费,盒子结构房屋整体强度和空间刚度好,具有很强的抗变形能力但初期投资较大。Syd S. Peng^[37]等建议新建建筑物设计采用对称结构。Begley 等(1986)提出采用膨胀接头(expansion joints)来对付水平和垂直变形并给出了墙壁和地板膨胀接头设计图。

以上建筑物保护措施主要是在采前或采动过程中采取的方法,对于受采动影响产生破坏的建筑物,采后维修也是常用方法。采后维修的措施主要有支护墙壁和门窗洞、梁端加支柱、增设扶壁柱、给墙壁裂缝勾缝、抹灰和喷浆、局部拆除重砌等。这些维修措施在世界各国都有广泛应用。

1.1.3 覆岩离层注浆

煤层上覆岩层由多层岩层组合而成,其物理力学性质差异较大。当岩层组合为下软上硬时,煤层采后覆岩在垂直方向上的移动呈现时间和空间上的不连续性和不同步性,从而产生离层。离层形成后,实时地由地面向离层间隙注入粉煤灰等充填材料,可以达到减小地表移动变形的目的。

有关离层注浆减沉的最早研究始于前苏联,曾有高压注浆减缓地表沉降和变形的专利。波兰试验离层注浆减沉率为 20%~30%。近年来,我国对离层注浆减沉的理论和进行了理论和实际应用研究^[38-40]。在理论方面,研究了离层裂缝发育位置、大小、工作面最佳开采区间、浆液扩散半径、注浆孔间距等;在实践方面,开展了离层注浆减沉工艺、离层注浆减沉率等的现场研究,得到的离层注浆减沉率为 36%~65%。我国曾于 1967~1968 年在抚顺胜利矿进行离层注浆减沉试验,注入黄泥 304 m³,折合固状黄土量 87 m³,注浆压力 2~9 MPa。1985 年,抚顺矿务局、阜新矿业学院在抚顺老虎台矿进行了离层注浆减沉试验,获得减沉率为 63%~65%。随后,大屯徐庄矿(1991~1992 年,减沉率 51%)、开滦唐山矿(1992 年,减沉率 83%)、兖州东滩矿(1994~1998 年,减沉率 38.5%~52%)、兖州济二矿(减沉率

58.5%)、新汶华丰矿(1994~1996年,减沉率36%~51%)、南桐东林矿(减沉率91%)等相继开展了离层注浆减沉试验,取得了丰硕成果,但也存在一些问题,如离层形成的力学机理、上覆岩层离层发育的时空规律、注浆材料的强度、长期稳定性、流动性和凝固性、减沉效果如何评价、浆液扩散半径计算、离层注浆减沉后地表移动计算方法等,都有待进一步完善。

尤其是对于减沉效果的评价,目前多用减沉率表示,但对于减沉率这一具体指标如何确定则存在较大争议。杨伦^[41]在考虑极不充分开采条件的影响对下沉系数进行修正后再对部分矿区的离层注浆减沉效果进行了重新计算,得到的结论是我国煤矿已经开展的离层注浆减沉试验的真实效果是15%~20%。这与波兰的情况比较接近。

1.2 采动区建筑物损坏等级评定标准

进行建筑物下安全采煤的关键是保证建筑物安全,但建筑物本身亦具有一定的抵抗变形能力。建筑物不需要维修仍能保持正常使用所允许的地表最大变形值称为临界变形值。表1-1给出了部分国家的建筑物允许变形值。从表可见,不同国家乃至同一国家的不同地区建筑物的临界变形值是不同的。

表 1-1 一些国家的建筑物允许变形值

国 家	压缩/mm·m ⁻¹	拉伸/mm·m ⁻¹	倾斜/mm·m ⁻¹	曲率半径/km	备 注
英 国	1(30 m 长建筑物)				
法 国	1~2	0.5			管 线
德 国	0.6	0.6	1~2		
			0.5		机械基础
波 兰	1.5	1.5	2.5	20	
日 本	0.5	0.5			混凝土基础
	1	1			木板房
	5	5			废弃公房
苏 联	顿巴斯	2	2	4	20
	卡拉甘达	2	4	6	3
美 国	0.8	0.4	3.3		

地表变形值大于临界变形值后,建筑物会出现明显的不同程度破坏。在进行建筑下采煤时,一般首先是根据地质采矿条件预计地表移动变形,然后由预计的地表移动变形值大小依照有关建筑物损坏等级评定标准评定建筑物损害程度,在此基础上提出相应的建筑物加固措施或井下开采措施,最后确定经济合理的开采方案。由此可见,研究采动区建筑物的临界变形值和损坏等级评定标准对于建筑物下安全采煤具有关键性作用。

前苏联根据多年研究,提出用总变形指标 $\Delta L'$ 反映刚性结构系统房屋损坏程度的方法。其表达式如下:

$$\Delta L' = L \sqrt{(m_{\epsilon}\epsilon)^2 + \left(\frac{m_R H}{R}\right)^2} \quad (1-1)$$

式中 L ——房屋长度, m;
 ϵ ——地表水平变形预计值, mm/m;
 m_{ϵ}, m_R ——工作条件系数;
 H ——房屋高度, m;
 R ——地表曲率半径, m。

由预计的地表移动变形值和房屋尺寸可以求得总变形指标 $\Delta L'$, 根据 $\Delta L'$ 和房屋类型通过与有关指标进行比较就可得到房屋损坏等级。当计算出的总变形指标 $\Delta L'$ 小于或相当于 I 级损坏时, 可不采取任何措施即可进行建筑物下开采。当 $\Delta L'$ 值大于 I 级损坏但小于 IV 级损坏时, 可以采取开采措施或建筑结构措施对房屋进行保护。如果 $\Delta L'$ 值等于或大于 IV 级损坏时, 应首先采取开采工艺措施以减小地表变形值。如果采用开采措施后预计的地表变形值算出的 $\Delta L'$ 值小于 IV 级损坏, 那么就可配合一些建筑结构措施进行开采, 否则必须留设保护煤柱。这一方法存在一定问题, 尤其是工作条件系数的选取仅考虑建筑物长度(或宽度)因素, 这是不完善的。

英国国家煤炭局(NCB)认为, 造成建筑物损坏的主要因素是地表水平变形, 因此应将地表水平变形、建筑物长度和房屋的破坏程度联系在一起。根据实地观测资料和多年经验, 总结出建筑物破坏等级分类表并绘制出建筑长度、地表水平变形与建筑物损害之间关系的诺谟图, 据此结合预计的地表水平变形进行房屋损坏评定。英国方法仅考虑地表水平变形和房屋长度并未考虑地表曲率、房屋刚度等因素。

波兰于 1958 年至 1962 年期间对受采动影响的 11 个矿井的地面现有建筑物进行了详细调查, 将不同影响因素造成的不同破坏情况进行归纳分类并给出了不同影响因素的权值(“点数”)。将每一种影响因素的“点数”相加得到总“点数”, 再与有关保护措施进行对比, 就可得到保护建筑物的措施。波兰方法在使用上比较繁琐, 需要考虑的因素太多, 缺少其中任何一个因素都可能对结果产生重大影响。

我国矿区大多数为砖混结构和砖木结构建筑物, 少量为木(竹)排架结构房屋和土筑平房。这些房屋大多数为平房且长度小于 20 m。针对这一情况, 中华人民共和国煤炭工业局 2000 年 5 月颁布的《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》^[6](以下简称《规程》)给出了长度或变形缝区段内长度小于 20 m 的砖混结构建筑物按不同地表变形值划分破坏等级的标准, 如表 1-2 所示。

表 1-2 砖混结构建筑物损坏等级

损坏等级	建筑物损坏程度	地表变形值			损坏分类	结构处理
		倾斜 i /mm · m ⁻¹	曲率 k /mm · m ⁻²	水平变形 ϵ /mm · m ⁻¹		
I	自然间砖墙上出现宽度 1~2 mm 的裂缝; 自然间砖墙上出现宽度小于 4 mm 的裂缝, 多条裂缝总宽度小于 10 mm	≤3.0	≤0.2	≤2.0	极轻微损坏 轻微损坏	不修 简单维修

续表 1-2

损坏等级	建筑物损坏程度	地表变形值			损坏分类	结构处理
		倾斜 i /mm · m ⁻¹	曲率 k /mm · m ⁻²	水平变形 ϵ /mm · m ⁻¹		
II	自然间砖墙上出现宽度小于 15 mm 的裂缝,多条裂缝总宽度小于 30 mm;钢筋混凝土梁、柱上裂缝长度小于 1/3 截面高度;梁端抽出小于 20 mm;砖柱上出现水平裂缝,缝长大于 1/2 截面边长;门窗略有歪斜	≤6.0	≤0.4	≤4.0	轻度损坏	小修
III	自然间砖墙上出现宽度小于 30 mm 的裂缝,多条裂缝总宽度小于 50 mm;钢筋混凝土梁、柱上裂缝长度小于 1/2 截面高度;梁端抽出小于 50 mm;砖柱上出现小于 5 mm 的水平错动,门窗严重变形	≤10.0	≤0.6	≤6.0	中度损坏	中修
IV	自然间砖墙上出现宽度大于 30 mm 的裂缝,多条裂缝总宽度大于 50 mm;梁端抽出小于 60 mm;砖柱上出现小于 25 mm 的水平错动	>10.0	>0.6	>6.0	严重损坏	大修
	自然间砖墙上出现严重交叉裂缝、上下贯通裂缝及墙体严重外鼓、歪斜;钢筋混凝土梁、柱裂缝沿截面贯通;梁端抽出大于 60 mm;砖柱出现大于 25 mm 的水平错动;有倒塌危险				极度严重损坏	拆建

注: 建筑物的损坏等级按自然间为评判对象,根据各自然间的损坏情况分别进行。

我国规定的建筑物损坏评定标准存在以下一些缺陷:首先,随着社会经济发展,矿区建筑物类型不再是单一的平房,还有楼房、厂房和其他构筑物等,而不同类型建筑物的刚度不同、结构不同,长度、高度也不同,因此相同的地表变形对不同类型建筑物造成的破坏并不相同。其次,我国疆域广阔、煤矿分布很广,各地建筑物地基和建筑风格、质量各不相同,同样的地表变形造成相同类型建筑物的破坏是有差异的。由此可见,采用统一的一个破坏评定标准来判断建筑物破坏情况是不合理的,容易造成不必要的浪费。如预计地表变形值达到Ⅲ级破坏可建筑物却未达到Ⅲ级破坏,而按Ⅲ级破坏对建筑物进行加固则会增大建筑物保护费用;或者建筑物实际达到Ⅳ级破坏而按Ⅲ级破坏对建筑物进行加固,则达不到保护的目。

有鉴于此,我国部分矿区如峰峰矿区等根据本矿区的建筑物下采煤实践制定了适合于本矿区的采动区建筑物破坏等级评定标准(见表 1-3)。峰峰矿区还采用深厚比和建筑物与工作面的相对关系、总变形指标等方法来判别采动区建筑物的破坏程度。

从以上分析可以看出,不同矿区应根据本矿区建筑物下采煤实践经验制定适合于本矿区的建筑物损坏评定标准。开采沉陷对建筑物的影响是非常复杂的,它与建筑物所处的位置、所受的变形类型、建筑物类型、长度、高度、使用年限、地表移动变形值的大小、地基性质

等多种因素有关。这些影响因素最终表现为建筑物移动变形的大小和破坏程度的差异性。要充分认识建筑物破坏与地表移动变形之间的关系,必须首先研究地表移动变形与建筑物移动变形之间的关系和规律,为建立采动区建筑物破坏评定标准、进行采动区建筑物损坏评定和加固设计提供基础依据。因此,研究采动区建筑物移动变形与地表移动变形之间的关系具有理论和实践意义。

表 1-3 峰峰矿区地面建筑物破坏程度与地表变形关系

破坏程度	破坏特征	地表变形值		
		倾斜 i / $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	曲率 k / $\text{mm} \cdot \text{m}^{-2}$	水平变形 ϵ / $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$
轻度破坏	房屋墙壁出现微小裂缝,不修理不影响使用	3~5	0.15~0.25	1.5~3
中度破坏	房屋墙壁出现明显裂缝、门窗变形,房屋结构未遭破坏,需修理方可使用	5~10	0.25~0.6	3~6
严重破坏	房屋墙壁出现大裂缝,房屋结构(如承重墙)受到破坏,房梁抽出,有倒塌危险,需大修方可使用	>10	>0.6	>6

建筑物损坏评定标准涉及因素较多,是一项复杂的系统工程。制定采动区建筑物破坏评定标准的关键是对建筑物损坏评定指标的正确选择和认识,只有在此基础上才能合理地评定采动对建筑物的影响程度并采取经济可行的井下开采措施和地面建筑物结构措施,以最大限度地采出矿产资源。不同矿区建筑物破坏评定标准的研究,对发展现有的采动区建筑物破坏评定方法和建筑物保护理论以及提高建筑物下矿产资源的回收率,具有极其重要的意义。

1.3 采动区建筑物地基、基础和结构协同作用问题

目前,国内外建筑物下采煤保护措施设计中存在的主要不足是很少考虑采动引起的建筑物地基、基础和上部结构之间的协同作用关系问题。进行建筑物下采煤研究的关键是正确认识 and 掌握采动区建筑物地基、基础和结构协同作用机理和规律,在此基础上才能正确计算建筑物的移动变形和受到的附加应力,合理评价开采对建筑物的影响程度,从而提出经济上合理、技术上可行的建筑物下采煤保护措施。因此研究采动区建筑物地基、基础和结构协同作用理论,对发展现有的采动区建筑物保护理论、进行建筑物下安全采煤具有重要的理论意义、经济意义和社会意义。

关于非采动区建筑物地基、基础和上部结构的协同作用问题目前有一些研究成果,这些成果大多采用数值解法研究地基、基础和结构的协同作用问题。如张翼^[42]采用上部结构—基础的有限单元法和地基的无穷边界单元法联合求解和研究三者共同作用机理;张传树^[43]将有限元和边界元耦合起来对基础梁和半无限地基之间的相互作用进行了分析;姜沂良^[44]等用样条有限元和半解析无限元对地基—土系统上相邻结构的相互作用进行分析;李金光^[45]对地基和基础的共同作用进行三维有限元分析,但认为目前没有合适的考虑地基与基础共同作用的理论公式应用于工程实际等。