

老采空区建筑地基稳定性 评价理论与方法

张永波 孙雅洁 卢正伟 著
崔海英 刘迎全

中国建筑工业出版社

老采空区建筑地基稳定性 评价理论与方法

张永波 孙雅洁 卢正伟 著
崔海英 刘迎全

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

老采空区建筑地基稳定性评价理论与方法 / 张永波等著 . — 北京 : 中国建筑工业出版社 , 2006

ISBN 7 - 112 - 08425 - 3

I . 老... II . 张... III . ①采空区 - 地基变形 - 研究②采空区 - 地基稳定性 - 评价 - 研究 IV . ①TU475②TU433

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 069899 号

老采空区建筑地基稳定性
评价理论与方法
张永波 孙雅洁 卢正伟 著
崔海英 刘迎全

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京密云红光制版公司制版

印刷厂印刷

*

开本 : 850 × 1168 毫米 1/32 印张 : 6 $\frac{3}{8}$ 字数 : 174 千字

2006 年 7 月第一版 2006 年 7 月第一次印刷

印数 : 1—000, 000 册 定价 : 15.00 元

ISBN 7-112-08425-3

(15089)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址 : <http://www.cabp.com.cn>

网上书店 : <http://www.china-building.com.cn>

本书是对老采空区建筑地基变形破坏理论研究的总结。内容包括：采动覆岩移动和地表变形规律；采动覆岩岩体分形裂隙网络的演化规律；采动岩体裂隙发育和岩体的损伤破坏规律；老采空区覆岩“活化”的机理；老采空区单岩块铰接力学模型及块裂结构岩体的失稳形式；老采空区建筑地基的稳定性及其变形破坏理论；老采空区建筑地基稳定性判别方法和指标。本书可供从事岩土工程、采矿工程及岩石力学与工程等专业的科技工作者、研究生和本科生参考使用。

* * *

责任编辑：刘瑞霞

责任设计：赵明霞

责任校对：张树梅 孙 爽

前 言

在过去的几十年中，我国中西部煤炭资源的开发对国民经济的发展做出了巨大贡献。但是，由于煤炭资源的开采，在中西部地区的一些老能源基地造成了大规模、大范围的采空塌陷区，导致上覆岩体冒落、断裂和弯曲，使岩体力学强度降低，造成老采空区上方建筑地基的承载能力下降。随着西部大开发战略和基础建设的加速实施，随着小城镇建设的不断发展，造成可供建筑的地面严重不足，一些地区工业厂房和住宅楼不得不建在老采空区上方。在建筑物荷载作用下，有可能使原本处于相对平衡状态的冒裂带岩体重新“活化”，使冒裂带岩体再压密、地下残留空洞再冒落，导致地表产生附加移动和变形，进而使新建建筑物沉降、局部开裂、倾斜直至倒塌。老采空区问题已成为我国高速公路、现代化铁路、机场、大型水利工程、西气东输工程等重大基础工程建设及小城镇建设规划的制约因素。

老采空区建筑地基的变形和破坏规律及其稳定性评价在国内都属于一个较新的课题，尚没有形成完善的基础理论体系，许多理论方面的关键问题，例如老采空区在建筑物荷载作用下地基发生沉降变形的机理及其受力状态、采空区上覆岩体的不连续性和可变性、岩体破碎后力学强度的损伤、老采空区建筑地基的稳定特性及其变形破坏规律等问题，至今未能很好地解决。这些理论问题如不解决，必将限制采空区地基处理技术的广泛应用。本书介绍老采空区建筑地基的稳定性评价理论和研究方法，对我国矿区环境的治理、矿区土地的利用及重大基础设施的建设和小城镇建设规划都具有十分重要的现实意义。

本书以山西省霍州矿务局辛置煤矿老采空区地质采矿条件为

背景,运用现场试验、相似材料模拟实验及数值模拟计算等方法,系统地探讨了老采空区建筑地基的稳定性及其变形破坏规律。主要包括:探讨了不同地质采矿条件下的覆岩移动和地表变形规律;运用分形几何和损伤力学理论研究了采动岩体分形裂隙网络的演化规律及岩体裂隙发育和损伤破坏规律;阐述了采动破坏后采空区及其上覆地层的岩体结构类型,分析了老采空区覆岩“活化”的机理,应用 R-S 理论,建立了老采空区单岩块铰接力学模型,分析了块裂结构岩体的失稳形式,并确立了其力平衡条件;系统地研究了建筑物荷载大小、相对位置及老采空区采深、采深采厚比、上覆松散层厚度等对建筑物地基稳定性的影响,确立了各影响因素的主次关系,探讨了老采空区建筑地基稳定及其变形破坏的一般规律;提出了老采空区建筑地基稳定与否的判别方法及其判别指标,即临界采深采厚比,可作为初步判别老采空区建筑地基稳定性的依据。本书提出的研究理论和方法可广泛运用于老采空区建筑地基稳定性评价工作中,对于老采空区建筑地基的处理、采空区建筑物的布置及其抗变形结构设计等技术的推广应用都具有极其重要的理论和实际运用价值。

本书研究成果是作者对山西省自然科学基金课题“老采空区建筑地基变形破坏理论及其应用研究”的总结。在本书编写过程中,得到了靳钟铭教授的热情帮助和指导,还得到了魏锦平博士、郗进海博士、靳京学高级工程师以及焦俊虎、刘秀英、张观瑞、孙占法、张敏等同志的大力支持和配合,在此一并表示感谢!

由于本书编写时间仓促,错误在所难免,恳切希望有关专家与读者批评指正。

作者

2006 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究意义	1
1.2 研究现状与存在问题	2
1.3 研究内容	6
1.4 研究方法与技术路线	7
1.5 研究成果特色	8
第 2 章 开采沉陷地表移动和变形现场观测研究	10
2.1 研究区地质采矿条件.....	10
2.2 试采区地表的移动和变形规律.....	12
2.2.1 地表移动与变形的实测结果	13
2.2.2 地表移动与变形的特征	14
2.3 地下采煤后的地表裂缝发育情况.....	17
2.3.1 开采上分层后地表裂缝的发育情况	17
2.3.2 重复采动后地表裂缝的发育情况	19
2.4 本章小节.....	20
第 3 章 采动岩体损伤的相似模拟实验研究	22
3.1 实验模型和实验方法.....	22
3.1.1 实验模型的设计	22
3.1.2 监测点的布置	23
3.1.3 模型观测与记录	26
3.2 采动覆岩移动及地表沉陷的相似模拟研究.....	28
3.2.1 采动覆岩的垮落过程及其变形特征	28
3.2.2 采动覆岩移动破坏规律	35
3.2.3 采动地表移动变形规律	41

3.2.4	模型实验结果与现场试验结果的对比分析.....	52
3.3	岩体采动沉陷的损伤统计分析.....	52
3.3.1	岩层裂隙动态发育规律	52
3.3.2	岩层裂隙的分形几何分析	56
3.3.3	采动岩体损伤统计分析	67
3.4	本章小节	72
第 4 章	老采空区建筑地基变形破坏的机理研究	75
4.1	老采空区覆岩失稳“活化”的机理分析.....	75
4.1.1	老采空区覆岩结构类型	75
4.1.2	老采空区覆岩失稳“活化”机理	76
4.2	老采空区砌体梁结构岩体的失稳形式 及其稳定条件.....	77
4.2.1	老采空区砌体梁结构中关键块 的受力分析	78
4.2.2	老采空区砌体梁结构中关键块 的稳定性分析	80
4.3	建筑物荷载对覆岩移动和地表变形 的影响分析.....	83
4.3.1	实验方法	83
4.3.2	建筑物荷载对覆岩移动的影响分析	83
4.3.3	建筑物荷载对地表变形的影响分析	88
4.4	本章小节	94
第 5 章	老采空区建筑地基稳定性分析的 数值模拟研究	97
5.1	老采空区地基稳定性分析的非线性 有限元理论.....	97
5.1.1	非线性力学理论	97
5.1.2	非线性有限元理论	102
5.2	模型的设计与求解	111
5.2.1	模型的设计	111

5.2.2	数值模型的求解	113
5.3	采动覆岩移动及地表沉陷数值模拟研究	117
5.3.1	采动覆岩离层发育规律	117
5.3.2	采动覆岩移动破坏规律	127
5.3.3	采动地表移动变形规律	129
5.4	老采空区建筑地基变形破坏的数值模拟研究	137
5.4.1	加载后上覆岩层的破坏规律	137
5.4.2	加载后地表的变形规律	146
5.5	本章小节	159
第 6 章	老采空区建筑地基稳定性的判别	162
6.1	老采空区建筑地基稳定性评价	162
6.1.1	评价标准	162
6.1.2	评价结果及分析	163
6.2	老采空区建筑地基稳定性判别指标	170
6.2.1	临界采深采厚比的确定	170
6.2.2	工程实例的验证	171
6.3	本章小节	175
第 7 章	主要研究成果及推广运用前景	177
7.1	主要研究成果综述	177
7.2	研究水平及效益分析	181
7.3	推广运用前景	182
7.4	存在问题及建议	183
附件	：老采空区上方建筑物	185
主要参考文献		187

第 1 章 绪 论

1.1 研究意义

在过去的几十年中，我国中西部煤炭资源的开发对国民经济的发展做出了巨大贡献。但是，由于煤炭资源的开采，在中西部地区的一些老能源基地造成了大规模、大范围的采空塌陷区，导致上覆岩体冒落、断裂和弯曲，使岩体力学强度降低，造成老采空区上方建筑地基的承载能力下降。随着西部大开发战略和基础建设的加速实施，随着小城镇建设的不断发展，造成可供建筑的地面严重不足，一些地区工业厂房和住宅楼不得不建在老采空区上方。在建筑物荷载作用下，有可能使原本处于相对平衡状态的冒裂带岩体重新“活化”，使冒裂带岩体再压密、地下残留空洞再冒落，导致地表产生附加移动和变形，进而使新建建筑物沉降、局部开裂、倾斜直至倒塌。老采空区问题已成为我国高速公路、现代化铁路、机场、引黄水利工程、西气东输工程等重大基础工程建设及小城镇建设规划的制约因素。本书介绍老采空区建筑地基的稳定性评价理论和研究方法，对我国矿区环境的治理、矿区土地的利用及重大基础设施的建设和小城镇建设规划都具有十分重要的现实意义。

目前，采空区建筑地基的处理一般采用灌浆技术，针对该项技术的研究和工程实践已有十多年的时间，取得了一定的成效。但是，由于对老采空区建筑物移动变形规律研究不够，一方面在采空区建筑地基处理设计中忽视了采空区的影响，留下了安全隐患；另一方面，使得采空区建筑地基处理设计的安全性偏高，增大了建设费用。本书开展对老采空区建筑地基稳定性评价及其变

形破坏规律的研究工作，对老采空区建筑地基处理技术的推广应用具有一定的指导作用。

1.2 研究现状与存在问题

老采空区建筑地基的变形和破坏规律及其稳定性评价在国内都属于一个较新的课题。目前国内外对在建筑物下、铁路下和河流下采煤引起的岩层移动、地表沉陷及其对建筑物的破坏方面已经做了大量的研究工作，然而对于老采空区在建筑物荷载作用下的地基稳定性评价、采空区地基处理范围的界定等方面的研究成果甚少。20 世纪 70 年代，Jones 等人^[1]研究了采矿塌落对公路的影响；20 世纪 80 年代以来，Jones^[2]、Sergeant^[3]、M. C. Wang 等人^[4]又分别研究了采矿及下伏空洞对建筑物地基的危害。这些研究都是建立在经验和调查的基础上，没有系统的普遍规律。此外，欧美国家一些专家学者也不同程度地研究了洞穴的塌陷对地面基础工程的影响。

老采空区上方修建建筑物的关键问题是对老采空区建筑地基的稳定性评价问题。目前，国内外文献中有关老采空区建筑地基稳定性定量评价的方法主要有以下几种。

1. 力平衡分析法

《工程地质手册（第三版）》^[6]中提供了临界深度的计算公式，用以评价采空区场地建筑的适宜性。

如图 1.2-1 所示，矿层采空后其顶板岩块 $ABCD$ 因重力 W 的作用而下沉，两边的楔体 ABM 和 CDN 也对其施以水平压力 P 。因此，在 AB 和 CD 两个面上又受到因 P 的作用而产生的摩阻力 f

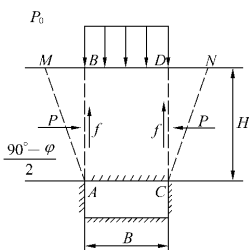


图 1.2-1 采空区顶板
稳定性示意图

的抵抗。现取采空段（巷道）单位长度为计算单元，则作用在巷道顶板的压力为：

$$Q = W - 2f \quad (1.2-1)$$

其中：

$$W = BH\gamma \quad (1.2-2)$$

$$f = P \tan \varphi = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan \varphi \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1.2-3)$$

$$P = \frac{\gamma H}{2} \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1.2-4)$$

式中 Q ——巷道单位长度顶板上所受的壓力（ kN/m ）；
 W ——巷道单位长度顶板上岩层所受的总重力（ kN/m ）；
 P ——楔体 ABM 和 CDN 作用在 AB 和 CD 面上的主压应力的最大值（ kN/m ）；
 f ——巷道单位长度侧壁的摩阻力（ kN/m ）；
 H ——巷道顶板的埋藏深度（ m ）；
 B ——巷道宽度（ m ）；
 γ ——土的重度（ kN/m^3 ）；
 φ ——岩层的内摩擦角（ $^\circ$ ）。

当建筑物建在采空区上时（设建筑物基底单位压力为 p_0 ），根据力平衡分析，

则：

$$Q = W + Bp_0 - 2f \quad (1.2-5)$$

即

$$Q = W + Bp_0 - 2f$$

$$= \gamma H \left[B - H \tan \varphi \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] + Bp_0 \quad (1.2-6)$$

当 H 增大到某一深度，使顶板岩层恰好保持自然平衡状态（即 $Q = 0$ ），此时的 H 称为临界深度 H_0 ，则得临界深度计算公式为：

$$H_0 = \frac{B\gamma + \sqrt{B^2\gamma^2 + 4B\gamma p_0 \tan \varphi \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}}{2\gamma \tan \varphi \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (1.2-7)$$

当 $H < H_0$ 时，地基不稳定；当 $H_0 \leq H \leq 1.5H_0$ 时，地基

稳定性差；当 $H > 1.5H_0$ 时，地基稳定。

该方法仅适用于埋深较浅、地质条件简单的小煤窑采空区场地。

2. 附加应力分析法

腾永海等^[9]提出了以建筑物荷载影响深度与采空区冒落裂隙带发育高度是否重叠来判断采空区地基的稳定性、确定建筑物层数的方法。

如图 1.2-2 所示，冒落裂隙带发育高度与建筑物荷载影响深度之间存在 3 种情况。其中建筑物荷载影响深度是由地基产生的附加应力决定，即当地基中附加应力 $\sigma_z = 0.1\sigma_c$ (σ_c 为自重应力) 时，把此时的深度 z 作为建筑物荷载影响深度。

(1) 当建筑物荷载影响深度与冒落裂隙带顶界面之间有一定的距离时 (图 1.2-2a)，这种情况不会影响冒落裂隙带的稳定性。

(2) 当建筑物荷载影响深度与冒落裂隙带顶界面正好接触时 (图 1.2-2b)，这种情况建筑物荷载为临界荷载。

(3) 当建筑物荷载影响深度进入冒落裂隙带内时 (图 1.2-2c)，这种情况建筑物荷载会影响冒落裂隙带的稳定性，建筑物会受到较大不均匀沉降的影响。

该方法难以考虑上覆岩层复杂的地质构造条件及冒落裂缝带的后期变化，而且也只能算作一种定性分析方法。

3. 数值分析法

老采空区建筑地基稳定性的力学分析是一个极其复杂的问题，它不仅和开采煤层的厚度、倾角、埋深、上覆岩层的岩性、物理力学性质、厚度、赋存状态、场地地形地貌、地质构造、水文地质条件以及煤矿开采方法、开采面积、开采次数、顶板管理方法等地质采矿条件有关，而且也和新建建筑物荷载的大小、位置、基础的类型等密切相关。由于地质采矿条件的多样性，对于这样一个多因素影响的复杂系统，采用数值方法进行计算成为首选的方法。20 世纪 80 年代后期，Sirivardane 和 Amanda^[10]、X.

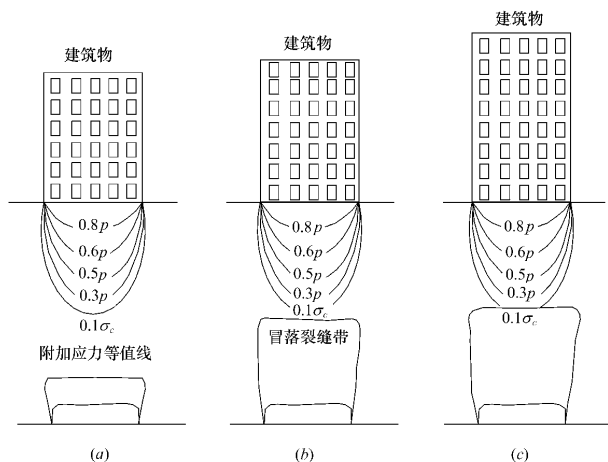


图 1.2-2 冒落裂隙带与建筑物荷载影响深度的关系

L. Yao^[11]、Wood^[12]等学者相继运用有限元和边界元法研究了采动覆岩产生垮落的开采条件和垮落高度、覆岩产生离层裂缝的力学条件及离层裂缝的位置和高度等；康建荣^[13]运用相似材料模拟和离散元法研究了采动覆岩离层形成的过程、机理及基本规律，并开发了适用于任意形状、多工作面、多开采线段的开采沉降预计系统。这些研究成果为进一步研究老采空区在建筑物荷载作用下的地基稳定性问题奠定了基础。

常江^[14]以弹塑性理论为依据，将老采空区地层概化为一个连续介质和碎裂介质的耦合体，运用有限元法分析了不同覆岩组合对采空区建筑地基稳定性的影响；孙忠弟等^[15]在研究高等级公路下伏空洞对路基地稳定性的影响时，开发了二维弹塑性理论有限单元法计算软件。

综上所述，目前国内外对老采空区建筑地基稳定性的研究仍

然十分薄弱，还存在以下关键问题亟待解决：

(1) 老采空区在建筑物荷载作用下地基发生沉降、变形的机理；

(2) 采空区上覆岩体的不连续性和可变性，如层面、节理、夹层、离层、断层、冒落带、裂隙带、弯曲带以及其他构造特征；

(3) 岩体本构方程的模拟，如各向异性、弹性、塑性、黏性、非线性、大变形以及由于水理、风化等对岩体性质的影响；

(4) 岩体破碎后在不同地质采矿条件下的力学性质；

(5) 老采空区建筑地基的稳定特性及其变形破坏规律。

1.3 研究内容

本书以山西省霍州矿务局辛置煤矿老采空区为试验研究基地，运用现场试验、相似材料模拟实验及数值模拟计算方法，系统地探讨建筑物荷载大小、相对位置及老采空区采深、采深采厚比、上覆松散层厚度等对建筑物地基稳定性的影响，探讨老采空区建筑地基的稳定性及其变形破坏规律。研究内容包括以下几方面：

(1) 研究不同地质采矿条件下的覆岩移动和地表变形规律，分析采空区埋深、上覆松散层厚度等对覆岩移动和地表变形规律的影响。

(2) 研究采动岩体分形裂隙网络的演化规律以及采动覆岩的损伤破坏规律。

(3) 研究老采空区覆岩“活化”的机理，分析块裂结构岩体的失稳形式及力平衡条件。

(4) 运用岩土力学、开采沉陷学、弹塑性力学、损伤力学、分形几何学等理论与方法，建立适用于不同地质采矿条件下老采空区建筑地基稳定性分析的地质力学模型及其变形预测模式。

(5) 根据相似材料模拟实验和数值计算结果，研究建筑物荷载的大小、相对位置及采空区的采深、采深采厚比和上覆松散层

的厚度等对老采空区建筑地基稳定性的影响，探讨老采空区建筑地基稳定及其变形破坏的一般规律。

(6) 通过实验和理论分析，对老采空区建筑物地基的稳定性进行分析评价，确定不同地质采矿条件、不同建筑物荷载条件下的临界采深采厚比。

1.4 研究方法与技术路线

(1) 在现场调查和对试验基地已有资料的分析和整理基础上，查明研究区地形地貌、地层岩性、岩石力学性质、地质构造、水文地质条件、开采煤层的厚度、倾角、埋深，以及煤矿开采方法、开采面积、顶板管理方法等地质采矿条件。

(2) 选择辛置煤矿为试验点，在 2204 工作面上方建立地表移动观测站，对地表移动变形进行长期定期观测。观测站由一条走向观测线和一条倾斜观测线组成，其中走向观测线长 1100m，观测点数 55 个，观测 12 次；倾斜观测线长 700m，观测点数 25 个，观测 13 次。通过现场观测和试验，研究辛置煤矿 2204 工作面开采沉陷的地表移动和变形规律。

(3) 以辛置煤矿老采空区的地质采矿条件为原型条件，进行相似材料模拟实验。根据煤层埋深的不同，设计两组实验模型：模型Ⅰ设计总高度 222cm，模拟采深 198cm，采厚 4cm；模型Ⅱ设计总高度 83cm，模拟采深 63cm，采厚 4cm。实验分两个阶段：第一阶段模拟开采沉陷过程，研究覆岩破断的判断条件、应力及移动变形向上传递的变化规律；第二阶段在开采沉陷基本稳定之后，在沉陷盆地的不同位置施加大小不同的建筑物荷载，研究其地基的破坏机理。实验设计从岩层内部到地表的多层测点进行模拟观测，从而在模型的全剖面范围内观测位移，由观测到的位移变化规律来分析采空区地基的稳定性。

(4) 在相似材料模拟实验过程中，在实验模型的不同地段选择典型剖面，观测岩层裂隙的发展变化，运用分形几何理论和损

伤力学理论,研究采动岩体分形裂隙网络的演化规律,研究采动覆岩岩体的损伤破坏规律。

(5) 根据相似材料模拟实验结果,分析采动破坏后采空区及其上覆地层的岩体结构类型,研究老采空区覆岩“活化”的机理。应用 R-S 理论,分析块裂结构岩体的失稳形式及力平衡条件。

(6) 以辛置煤矿老采空区的地质采矿条件为原型条件,进行数值模拟计算。数值计算方法采用考虑岩石不抗拉特性、层理及冒落带、断裂带岩石力学损伤的弹塑性损伤模型。本次工作根据煤层埋深和上覆松散层厚度的差异,设计 12 个计算模型;根据所施加建筑物荷载相对采空区位置的不同,制定 3 组施加荷载方案,分四级施加荷载,最终共确定计算方案 144 个。通过改变建筑物位置、荷载大小及老采空区的采深、采深采厚比、上覆松散层的厚度等计算条件,进行多组合的正交试验,探讨这些因素对老采空区建筑地基稳定性的影响。

(7) 根据采空区“三带(冒落带、裂隙带和弯沉带)”的下沉量及地表移动和变形量的大小,对 144 个组合方案的建筑地基稳定性进行评价。总结以上计算成果,得出不同建筑物荷载和不同地质采矿条件下老采空区建筑地基稳定与否的判别指标,即临界采深采厚比,用于初步判断老采空区建筑地基的稳定性。

(8) 本项目专门进行了对老采空区上方建筑物运行情况的调查访问工作,获得了一些工程实例资料,用来验证临界采深采厚比值的可靠性,以利于这些数据在工程实践中的推广运用。

1.5 研究成果特色

(1) 根据相似材料模拟实验和数值计算结果,探讨了不同地质采矿条件下的覆岩移动和地表变形规律,分析了采空区埋深、上覆松散层厚度等对采空区“三带”下沉量及地表移动和变形量的影响。