

# 深厚表土不稳定地层中 井壁受力研究

● 刘希亮 著

不外借

煤炭工业出版社

# 深厚表土不稳定地层中 井壁受力研究

刘希亮 著

煤炭工业出版社

·北京·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

深厚表土不稳定地层中井壁受力研究/刘希亮著.

—北京: 煤炭工业出版社, 2004

ISBN 7-5020-2415-8

I. 深… II. 刘… III. 井壁—压力—研究

N. TD26

中国版本图书馆CIP数据核字 (2004) 第 029355 号



煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
网址: www.cciph.com.cn  
煤炭工业出版社印刷厂 印刷  
新华书店北京发行所 发行

开本 850mm×1168mm<sup>1/32</sup> 印张 9<sup>1/8</sup>

字数 245 千字 印数 1—1,000

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

社内编号 5186 定价 28.00 元

**版权所有 违者必究**

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

## 内 容 提 要

本书介绍了深厚表土不稳定地层中井壁受力的主要影响因素和底部含水层的疏排水沉降规律及井壁的界面剪切特性；并根据弹性理论对井壁在各种载荷作用下的内力计算公式进行了推导。在内容上，本书试图建立起深厚表土内立井井壁受力的时空模型框架，为井壁动态受力计算、变形计算、破裂预测以及井壁结构形式设计提供理论计算基础。

本书可供从事矿井建设、岩土工程和地下工程学习和研究的院校师生及其他科技工作者参考。

# 序 言

自20世纪80年代至今,华东地区深厚表土不稳定地层中的立井井壁发生了大面积的破裂事故,井壁治理困难,并由此造成减产损失就达几十亿元,使该地区的煤矿企业陷入困境,而且井壁的破裂目前仍在继续发生,因此对深厚表土不稳定地层中井壁的受力问题还需要进一步的研究和探索。当前,国民经济快速发展,国家的能源需求,要求东部地区的煤炭开发穿越深厚表土的不稳定地层向深部挖潜。由此深厚表土不稳定地层中的井壁受力研究就成为井壁治理和破裂预防的重大理论问题,该研究将为井壁动态受力计算、变形计算、破裂预测以及井壁结构形式设计提供理论计算基础,使井壁设计理论更趋完善,这对于该地区的井壁治理、井田开发和新建矿井的安全高效生产具有重要的理论价值和现实意义。

按照我国现行的井壁设计方法,井壁承受着水平水压和土压,井壁自重的 $3/4$ 由地层承担;对于带夹层的井壁,内壁承受静水压力,外壁承受冻结压力;将井壁受力视为平面应变问题,可按第四强度理论进行强度验算。大量的试验研究和现场测试表明,深厚表土不稳定地层的煤矿在生产时由于底部含水层疏排水,地层不但不能承担部分井壁自重,反而对井壁产生一个向下的竖直附加力。深厚表土不稳定地层中井壁受力的研究,对于该力的产生因素、产生过程以及力学效应进行了一系列的探索。

深厚表土不稳定地层中的井壁受力问题不是静态的平面应变问题,而是空间的动态受力问题,井壁的竖直附加力随沉降地层的疏排水过程而变化。井壁的受力状态主要取决于底部含水层的疏排水沉降和井壁与周围土体的界面作用。目前围绕这些问题所开展的工作远远不能满足井壁空间受力计算、井壁破裂预测及其

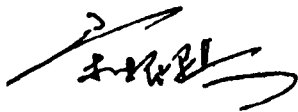
治理的要求。

本书在目前已有研究成果的基础上,介绍了深厚表土内井壁破裂的主要影响因素、底部含水层的疏排水沉降规律和井壁的界面剪切特性进行的试验研究,并结合试验成果和工程的应用实际,对井壁在各种载荷作用下的弹性理论内力计算公式进行了推导,为设计人员提供了一套井壁受力计算的公式。

书中介绍的研究取得了以下突破性的成果:①通过底部含水层疏排水沉降试验,发现疏排水沉降量符合指数型的变化规律,确定了排水条件下的压缩模量与水压降的关系式,建立了疏排水地层固结应变与水压降的计算公式;②通过有荷作用下的渗透系数试验,建立了渗透系数与有效应力变化的计算公式;③通过高压直残剪试验系统,研究了高应力下界面的剪切特性,获取了高应力条件下接触面的强度准则、剪切位移与剪切应力的表达式,发现高应力作用下不同结构界面剪切过程中土体的剪缩性;④高应力作用下界面剪切破坏的模式与基底、法向应力的大小有关,剪切破坏并不总是发生在土体内部;⑤推导了井壁在地压、温度、附加力等载荷作用下的理论计算公式,实用性较强。

该书介绍的内容对深厚表土不稳定地层中井壁破裂问题的最终解决提供了极有价值的理论和计算途径,作者亲自参与大量的研究工作,并总结著书,故做序鼓励。

中国科学院院士



# 前 言

煤炭在我国一次能源生产和消费构成中均占2/3以上份额，我国“缺油、少气、富煤”的资源条件决定了我国在走向可持续发展的道路中只能选择以煤为主的一次能源结构；我国煤炭资源东少西多，南贫北丰，存在着富煤区远离需煤区的状况，为了满足国民经济发展对煤炭产量的需求，国家制定了“稳定东部、战略西移”的煤炭发展战略。

东部地区煤炭的挖潜只能向深部发展，井筒必将穿越深厚表土的不稳定地层。自20世纪80年代至今，已有70多个井筒在该地层内发生了破裂事故。据预测在今后几年内井壁的破裂可能达到150个之多。井壁破裂这一突发性灾害来势之猛、坏井之多、范围之广、危害之大在国际采矿史上未有先例。

井壁的破裂严重影响了矿井的安全生产。十几年来，建井工程界及相关领域的专家学者进行了大量的研究探索。前期工作主要集中在对井壁破裂机理的认识和附加力大小与穿越土层的关系方面，后期工作主要集中在对破裂井壁结构的治理措施方面。其中最重要的成果为中国矿业大学崔广心教授领导的课题组所提出的竖直附加力理论。目前井壁的研究和治理是该成果的深化。

深厚表土底部含水层由于疏排水产生的固结沉降，使井壁与围土产生相对位移，由于界面的相互作用导致了井壁外表面上产生向下的摩擦力。该力在井壁内逐步增加，垂直方向的应力变为第一主应力。当井壁在多向受力条件下的强度准则遭到破坏时，便发生了井壁的破裂事故。深厚表土不稳定地层中的井壁受力模型与普通地层中的井壁受力模型不同，井壁的受力是与疏排水沉降

和井壁界面相互作用密切相关的动态过程。

在目前已有的研究成果的基础上，本书主要介绍了以下三方面的研究工作：①通过底部含水层疏排水沉降试验，确定了沉降参数（变形模量、渗透系数）与疏排水压降的关系，建立了疏排水地层固结应变与水压降的计算公式；②通过高压直剪试验系统，研究了高应力下界面的剪切特性，获取了高应力条件下剪切位移与剪切应力的表达式；③推导了井壁在地压、温度、附加力等载荷单独作用下的理论计算公式，为设计人员提供了一套井壁受力计算的模型，工程科研人员可以根据井壁的实际受力特点进行组合，简单而适用。

本书内容是在作者博士论文“深厚表土底部含水层疏排水沉降规律研究”、河南省自然科学基金项目“深厚表土层内土与混凝土接触面的本构关系研究”、焦作工学院博士基金“深厚表土内井壁的动态受力模型研究”的基础上，结合在山东大学博士后流动站内的深化研究工作写成的。

本书共分9个部分：

1. 绪论：分析了目前我国煤炭生产形势、井壁破裂的研究现状与存在的问题，提出了本书的研究内容和研究意义。

2. 地层沉降研究：通过地层沉降理论的综述，概述了土的固结理论及其求解方法，阐述了目前地层沉降的机理与深厚表土底部含水层固结变形求解方法的不同。

3. 底部含水层疏排水沉降试验：通过自行设计的高应力、高水压试验装置，进行恒定上覆总应力下各类砂土的疏排水沉降试验，获取了高应力疏排水条件下的变形模量与水压降的表达式，建立了疏排水地层固结应变与水压降的计算公式，并对变形模量与颗粒级配参数和水压降的关系进行了研究，得出了之间的正相关表达式。

4. 底部含水层渗透性试验：通过高应力作用下的渗透系数试验，确定了渗透系数与有效应力之间的指数关系表达式，对其影响系数进行了研究。



5. 底部含水层固结沉降理论：从Terzaghi-Rendulic、Biot固结理论出发，建立了在不考虑固结系数随疏排水条件变化下的常规模型及求解公式。

6. 疏排水沉降数值模拟：推导了疏排水固结的Crank-Nicolson差分格式；从一维疏排水沉降的基本微分方程出发，用差分法来研究渗透系数、变形模量等参数随疏排水过程而变化情况下的沉降规律，并将数值模拟、理论公式的结果与试验数据进行对比分析。

7. 高应力作用下界面模型：采用正交试验设计理论，在高压直剪试验系统上进行了一系列的试验；研究了高压固结作用下，土与结构接触面的相对位移与剪应力的关系、剪应力与法向应力的关系，并对深厚表土内土与结构接触面的剪切特性及其影响因素进行了探讨。

8. 井壁受力分析：分析了目前井壁设计的受力荷载和计算理论，建立了井壁的空间轴对称模型，推导了井壁在水平地压、自重、温度应力、施工荷载以及附加力单独作用下的弹性理论应力计算公式。

9. 结论：对本书的整个内容进行了总结，并对今后从事该研究的相关人员提出了建议。

中国科学院宋振骥院士审阅了全书并作序，给作者极大的鼓励，对此万分感谢。

在编写过程中，中国矿业大学的杨维好教授提供了珍贵的井壁破裂资料，在此表示感谢。同时，向本书中所引用文献的作者表示感谢。如果对文献的含意有理解上的偏差，在此表示歉意。

本书的出版，得到了中国矿业大学华安增博士生导师，焦作工学院邹友峰博士生导师、杨小林博士生导师，山东大学朱维申博士生导师、李术才博士生导师，青岛建筑工程学院王在泉博士生导师，焦作工学院顾志林副教授等的大力支持和帮助，焦作工学院重点学科建设基金对本书出版给予了资助，在此一并表示由

衷的感谢。

由于作者水平所限，书中的谬误之处，敬请专家、读者指正。

作者于焦作工学院

2003年12月

# 目 录

<b>1 绪 论</b> .....	1
1.1 煤炭生产形势综述 .....	1
1.2 深厚表土的分布概况 .....	4
1.3 井壁破裂情况 .....	7
1.4 井壁破裂机理的研究 .....	14
1.5 竖直附加力的研究综述 .....	17
1.6 井壁破裂的国内外研究现状 .....	21
1.7 研究内容和研究意义 .....	22
1.8 小 结 .....	24
<b>2 地层沉降研究</b> .....	25
2.1 概述 .....	25
2.2 地面沉降的机理研究 .....	29
2.3 土固结理论及其求解的研究 .....	36
2.4 常见的几种地层模型 .....	44
2.5 深厚表土不稳定地层的沉降研究 .....	52
2.6 小 结 .....	59
<b>3 底部含水层疏排水沉降试验</b> .....	61
3.1 含水层疏排水沉降的研究概述 .....	61
3.2 试验原理与试样准备 .....	67
3.3 试验装置及试验 .....	71
3.4 底部含水层疏排水变形试验结果 .....	75
3.5 疏排水沉降回归系数分析 .....	81

3.6	小 结	86
<b>4</b>	<b>底部含水层渗透性试验</b>	<b>88</b>
4.1	无粘性土的渗透系数研究	88
4.2	底部含水层渗透性试验	98
4.3	渗透系数的影响因素分析	105
4.4	小 结	109
<b>5</b>	<b>底部含水层固结沉降理论</b>	<b>111</b>
5.1	固结理论的控制方程	111
5.2	Terzaghi-Rendulic 固结理论的常规模型 及求解	116
5.3	Biot 固结理论的沉降研究	134
5.4	小 结	142
<b>6</b>	<b>疏排水沉降的数值模拟</b>	<b>144</b>
6.1	疏排水固结的差分格式	144
6.2	数值模拟、理论公式与试验结果的对比	152
6.3	小 结	158
<b>7</b>	<b>高应力作用下界面模型</b>	<b>159</b>
7.1	界面模型的研究综述	159
7.2	高应力界面模型的研究方案	177
7.3	试验系统	179
7.4	高应力下界面剪切应力—位移关系	183
7.5	高应力下界面的破坏准则	196
7.6	高应力下界面抗剪强度的影响因素	200
7.7	高应力下界面的体积应变	204
7.8	小 结	209

<b>8 井壁受力分析</b> .....	212
8.1 井壁的受力荷载 .....	212
8.2 井壁的受力分析 .....	224
8.3 井壁受力的理论计算研究 .....	231
8.4 井壁附加力的分布 .....	251
8.5 小 结 .....	252
<b>9 结 论</b> .....	256
<b>参考文献</b> .....	260

# 1 绪 论

随着人口的急剧增长和科学技术水平的不断发展,人类改造自然的规模、深度和广度越来越强,资源(特别是煤炭能源和地下水源)的开发逐渐由浅部向深部发展,因此引起了地下环境的极大改变,静水环境的极大破坏就是其中之一。土体内水压减小,有效应力增加,地层发生固结沉降,诱发许多地下、地面工程结构物的破坏以及岩土工程环境恶化等一系列的问题。近20年来,在我国华东地区的矿区(包括永夏矿区)所发生的深厚表土不稳定地层中立井井壁的破裂就是典型的例证。进行深厚表土不稳定地层中立井井壁的动态受力研究,对于治理和预防井壁的破裂,保证该地区煤矿的安全、高效生产,具有重要的理论价值和现实意义。

## 1.1 煤炭生产形势综述

世界上煤炭资源十分丰富,目前仍是人类的最主要能源之一。全球已探明的煤炭可采储量为10280亿t,按目前的开采水平,可维持全球稳定开采400年以上。中国是世界上少数几个一次能源以煤为主的国家,煤炭工业仍是我国重要的基础产业。到2000年,我国已探明的煤炭开采储量为2000亿t,约占世界探明煤炭储量的18.7%,居世界第三位。长期以来,煤炭在我国一次能源生产和消费构成中均占2/3以上;在1998年中国生产和消费的一次商品能源中煤炭约占72.9%,煤炭提供了78%的发电能源、70%的化工原料和60%的民用商品能源。在探明的化工能源中煤炭占94.3%,石油天然气仅占5.7%;在未来的30~50年内,尽管新能源和可再生能源、水电及核电的发展与推广,将使煤炭在一次能源中的消费比重逐年下降,但煤炭的主导地位不会改变。预计煤炭在一次能源消费中的比重,“十五”计划末期为65%,2010年

为60%，2050年仍占50%以上。中国“缺油、少气、富煤”的资源条件决定了我国在走可持续发展的历史时期，只能选择以煤为主的一次能源结构。

我国煤炭资源分布的特点是东少西多，南贫北丰。中国煤炭资源分布，存在着富煤区远离需煤区的状况；新疆、内蒙古、陕西、山西4省（区）占全国煤炭资源总量的80%，其中山西、陕西、内蒙古3省（区）就占全国探明保有储量的70%左右<sup>[1]</sup>。上述地区水资源贫乏，不足全国水资源的2%，生态环境脆弱，交通不便，远离东部和南部经济发达的需煤地区，而后者只能向深部挖潜。

据估计，我国煤炭资源埋深在1000m以下的约为29500亿t，占煤炭资源总量的53%。目前煤矿开采深度以每年8~12m的速度增加，东部矿井正以每10年100~250m的速度扩展，预计在未来20年许多煤矿将进入到1000~1500m的深度<sup>[2]</sup>。由于深井建设和开采环境的高地应力、高地温、高瓦斯、高水压、高冲击地压的影响，必会给深井的建设、生产和维护带来严重的困难。

我国目前有特大型煤炭生产基地（生产能力或产量>1000万t）有22处，大型煤矿产地（生产能力或产量500~1000万t）有19处；2003年我国煤炭总产量已突破13亿t，重点煤矿、国有地方煤矿、乡镇煤矿的比重由1998年的40：17：43变为53：20：27，产业结构趋于合理。按照目前的煤矿生产情况，中国煤炭工业协会的一份调查报告显示，未来几年我国将面临煤炭短缺；预计到2005年，我国煤炭产量供需缺口将达到2亿t。据分析，全国煤炭社会库存如果大于1.8亿t，市场出现供大于求；煤炭社会库存如果趋于1.3亿t，市场基本平衡；煤炭社会库存小于1亿t，市场出现供不应求。

为了满足国民经济发展对煤炭产量的需求，国家制定了“稳定东部、战略西移”的煤炭发展战略。“十五”期间煤炭工业要加快建设25处年生产能力较高的矿井，并对现有大中型矿井进行技术改造，到2005年建成140处高产高效现代化矿井。同时，煤炭建设要按照西部地区煤电同步建设、“三西”（山西、陕西、内蒙

古西部)地区调节全国供需平衡、东部地区稳定生产规模的开发布局进行筹划。

在我国的东部和中部现已查明的特厚表土的煤田有10处(见表1-1),其实际的年生产能力可达1亿t;现已列入开发计划的深厚表土的矿井12处,年生产能力可达2930~4880万t(见表1-2)。进行深厚表土内井壁受力问题的研究,对于保证我国经济发达地区的工业煤炭需要和煤炭生产的高效、安全生产具有现实意义。

表1-1 目前已具有特厚(>400m)表土的煤田

序号	省别	煤田名称	表土厚度/m	井筒数/个	计年产量/(万t/a)	备注
1	山东	巨野	400~700	18	860	
2	山东	聊城	500~700	15	1200	勘探规划
3	山东	德州南部	450	≥9	≥600	勘探规划
4	河北	开滦新区	500~700	9	600	
5	河南	焦作新区	400	6	300	
6	河南	台前、范县	500	6	300	勘探规划
7	河南	永夏新区	>400	≥6	≥400	
8	河南	平顶山新区	>400	≥3	150	
9	安徽	淮南潘谢西区	500~700	≥12	1200	勘探规划
10	安徽	淮北涡阳	>400	≥6	240	
合 计				≥90	实际>1亿t/a	

注:杨维好教授提供的资料。

表1-2 目前已列入开发计划的矿井  
(表土厚度>400m)

序号	省别	煤矿名称	井位表土/m	前期井筒/个	设计年产量/(万t/a)
1	山东	新汶矿业集团龙固煤矿	543~567	4	600(>1000)
2	山东	兖州矿业集团赵楼煤矿	470~490	3	300(>500)



续表

序号	省别	煤矿名称	井位表土 /m	前期井筒 /个	设计年产量 /(万t/a)
3	山东	兖州矿业集团万福煤矿	>700	3	180 (>300)
4	山东	鲁能集团鄒城煤矿	520~530	3	240 (>400)
5	山东	鲁能集团鄒屯煤矿	583~587	3	240 (>400)
6	山东	滕州监狱济西煤矿	457~459	2	45 (>90)
7	安徽	淮南矿业集团丁集煤矿	520~535	3	500 (>800)
8	安徽	国投新集集团展沟煤矿	600~620	3	300 (>500)
9	安徽	淮北矿业集团渦北煤矿	410	3	180 (>300)
10	河北	开滦矿业集团宋家营矿	>500	3	180 (>300)
11	河南	辉县矿业公司程村煤矿	426~430	2	45 (>90)
12	河南	永夏煤电集团薛湖煤矿	>400	3	120 (>200)
合 计				35	2930 (>4880)

注：杨维好教授提供的资料。

## 1.2 深厚表土的分布概况

表土层是指第四系和第三系的含水表土层，通常将厚度超过50m的表土层泛称为厚表土层，厚度超过400m的表土层称为特厚表土层。以下在没有特别指明时，深厚表土即厚表土层和特厚表土的泛称，并且将由由于资源开发产生固结沉降的地层称为不稳定地层。另外，将表土层中的含水层、隔水层按从上到下的顺序简称为一含、一隔、二含、二隔、…等。

中国领土辽阔，成煤时代多，煤田分布范围广，各煤田成煤时的古地理条件、沉积环境及所处的大地构造背景不同，煤田的水文地质条件表现为多种多样，各有不同的特点。表土的厚度从西部的十几米到东部的800m左右不等，土层的含水情况由西部的不含水黄土层、含不饱水的粘土层到东部的含水粘土层、砾石层。如果煤系地层上覆土层中的含水层由于开采活动存在水压降低的情况，就会产生固结沉降，使上覆地层产生整体性的下沉。