

张世芳 杨小林 著

SHENHOU BIAOTU

深厚表土

矿井建设技术

KUANGJING
JIAN SHE JISHU

煤炭工业出版社

深厚表土矿井建设技术

张世芳 杨小林 著

煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

深厚表土矿井建设技术/张世芳, 杨小林著. —北京:
煤炭工业出版社, 2001

ISBN 7 5020-2109 4

I. 深… I. ①张…②杨… II. 井巷工程—特殊
凿井法 N. TD265

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 087731 号

深厚表土矿井建设技术

张世芳 杨小林 著

责任编辑: 黄朝阳

*

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

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 $850 \times 1168 \text{mm}^{1/32}$ 印张 11

字数 286 千字 印数 1—1,000

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月第 1 次印刷

社内编号 4880 定价 26.00 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

本书按深厚表土矿井特殊施工技术和岩巷掘进爆破技术两大部分编写。第1章至第4章为矿井特殊施工技术,内容包括冻结法施工、钻井法施工和注浆技术,重点介绍了深厚表土特殊施工的基本理论、工艺参数、施工技术和工程实例。第5章至第8章为岩巷掘进爆破技术,内容包括掏槽爆破、光面爆破和定向断裂爆破的基本原理、参数计算和工程实例,并对岩石爆破损伤理论及其在岩巷掘进爆破中的应用问题进行了阐述,还介绍了掘进爆破对围岩的损伤和控制,以及掘进爆破中的块度控制等内容。本书尽可能吸取国内外在该领域的最新成果和最新进展,结合作者在永定矿区建设中的实践,使理论、方法和技术并举,并例举较多的工程实例。

本书可供矿山建设、岩土工程、隧道与地下工程及爆破工程等专业的科技人员及高等院校师生参考。

前 言

随着我国浅部煤层的日益枯竭,20世纪80年代以来,新建矿井逐步向深部发展,特别是90年代以来,建井深度有加速增长的趋势。根据不同时期,对深度排在前五位矿井的平均深度统计,70年代为583.6m,80年代为615.4m,1991年至1995年为679.9m,而1995年以后,深井的平均深度为815.3m。建井深度的增加,主要体现在上部覆盖着深厚表土,如淮南潘三矿井上覆表土为440m,永城陈四楼矿井为453m,而目前计划建设的巨野煤田初测平均达620m。

在深厚表土矿井建设中,井筒施工必须采用特殊施工方法通过不稳定地层,目前比较成熟的方法是冻结法和钻井法施工技术,目前最深的冻结法施工是陈四楼矿井,冻结深度达453m;钻井法施工深度最大的是潘三西风井,钻井深度达508.2m,而在永夏矿区的两个风井的钻井深度也超过了400m,其中陈四楼风井的钻井深度为417m,城郊矿达到了436.2m。无论是采用哪种特殊施工技术,深厚表土井筒的井壁结构设计施工是解决井壁发生破损的关键技术之一,目前大部分都采用了考虑竖向附加力作用的新型井壁支护结构,如高强高效井壁结构和可缩性井壁结构等。而且随着建井深度的增加,地下涌水量增大,对水的治理也十分突出,目前常用的有效方法是注浆堵水,我国在这方面有大量成功的经验和工程实例。

在深井建设的巷道施工中,突出的问题是高地应力和软弱岩层的掘进和支护问题。目前我国矿山岩巷掘进中,普遍采用钻爆法开挖,加快掘进速度、保证围岩的稳定性和巷道成型规则是钻爆施工和围岩支护中首先需要考虑的问题。控制爆破理论和技术的发展是解决该问题的重要措施和手段,岩石爆破损伤理论、光

面爆破、定向断裂控制爆破等在岩巷掘进中的应用保证了巷道成型规则和最大限度降低对围岩的损伤和破坏，同时也加快了掘进速度、降低了支护成本、提高了围岩的稳定性。

作者根据自己多年来在永夏矿区建设中，在解决深厚表土矿井的设计和施工方面所取得的成果，针对深厚表土矿井建设中的特殊施工技术和岩巷钻爆法快速施工技术，撰写了《深厚表土矿井建设技术》一书。本书分为深厚表土矿井特殊施工与岩巷快速施工两大部分，前者介绍了冻结法、钻井法和注浆堵水的基本理论和方法，并介绍了在永夏矿区建设中的应用实例；后者介绍了岩巷钻爆法快速施工技术及其对围岩稳定性的影响，主要包括掘进爆破技术、光面爆破、定向断裂控制爆破技术，以及爆破对围岩的损伤和控制等问题，对岩石爆破损伤断裂机理及其在巷道掘进中对围岩的影响和分形几何在爆破块度预测和控制中的应用进行了较深入的阐述，并介绍了在永夏矿区岩巷掘进中的应用。

本书由张世芳和杨小林共同撰写，其中张世芳撰写了本书的第1章至第4章，杨小林撰写了第5章至第8章。在本书的撰写过程中得到了焦作工学院黄小广、负小有、王有凯副教授和刘希亮博士的审阅和大力支持，作者在此表示衷心感谢。

深厚表土矿井建设是近年来呈现在矿山建设工作者面前的新课题，该课题的研究十分复杂和困难。本书仅结合作者十余年来的实践，对深厚表土矿井建设中的一些问题做了一个初浅的总结，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 我国深厚表土层的分布概况	1
1.2 永夏矿区深厚表土层的特征	3
1.3 深厚表土层中地下结构物的外载荷	4
1.4 厚表土层中地下工程的主要施工 方法和特点	8
第 2 章 深厚表土冻结技术及井壁结构	9
2.1 立井冻结方案	9
2.2 冻土的物理力学特征	12
2.3 冻结壁的厚度	31
2.4 冻结凿井井壁结构	56
2.5 永夏矿区冻结法施工实例	70
第 3 章 钻井法	84
3.1 立井钻井法施工工艺	84
3.2 立井井筒钻进	85
3.3 洗井与泥浆净化	91
3.4 钻井井壁与固井技术	97
3.5 钻井法施工实例	101
第 4 章 注浆技术及工程应用	113
4.1 注浆理论与技术	113
4.2 立井注浆技术	142

4.3	注浆设备与机具	160
4.4	注浆材料	165
4.5	注浆新技术、新工艺应用实例	189
第5章	掘进爆破技术	210
5.1	掘进爆破的现状与进展	210
5.2	掏槽爆破	216
5.3	光面爆破	224
5.4	巷道掘进爆破	236
5.5	立井冻结段掘进爆破	248
第6章	定向断裂控制爆破	253
6.1	概 述	253
6.2	断裂控制爆破的基本方法	256
6.3	定向断裂爆破原理	258
6.4	岩石定向断裂控制爆破技术	265
6.5	切缝药包在井巷掘进中的应用	270
第7章	掘进爆破对围岩的损伤和控制	276
7.1	岩石爆破损伤理论的研究概述	277
7.2	岩石爆破损伤断裂过程和准则	280
7.3	岩石爆破损伤断裂机理	282
7.4	岩体内的爆破损伤场	287
7.5	围岩爆破损伤的研究方法与控制标准	287
7.6	爆破对岩体基本质量和围岩稳定性的影响	295
7.7	爆破对岩体损伤的试验研究	299
7.8	爆破对围岩稳定性的影响规律	305
第8章	爆破块度的预测与控制	306
8.1	前 言	306

8.2 爆破块度分布的计算	307
8.3 分形几何在岩石爆破块度预测中的应用	312
8.4 岩石爆破块度分布与控制的试验研究	320
参考文献	336

第1章 绪 论

厚表土层指的是第四系和第三系的含水岩土层,一般来说,厚度超过 50m 的表土层可泛称为厚表土层。

1.1 我国深厚表土层的分布概况

在我国能源结构中,煤炭占 70%以上,国民经济的发展要求煤炭工业必须有一个大的发展。我国煤田赋存的地质条件差别较大,地处华东、华中、华北、东北地区有许多矿区被不稳定的深厚表土层(第四系和第三系冲积层)所覆盖。西北地区厚表土层多为含不饱和水的粘土层,均较稳定。在地下工程施工中,较难对付的是深度超过 100m 的含水表土层。这些表土层下有的蕴藏着丰富的矿物资源;在地质条件较好的矿田已被开发,但产量仍不能满足国民经济需要时,人们就不得不在有不稳定的深厚表土层覆盖的矿区进行矿山开发;不稳定的深厚表土层给建井带来了巨大困难,以至用常规凿井技术已不能完成建井任务,而不得不采用特殊凿井方法进行工程建设。

深厚表土层在我国分布很广,东北、华北、华东、华中等地区均有分布。

东北地区的沈北煤田、苏家屯煤田、鹤岗煤田、双鸭山煤田,内蒙古自治区与吉林省交界的金宝屯煤田都覆盖有厚表土层。沈北煤田、双鸭山煤田也有部分薄表土层,这些煤田上的表土层厚度从几米至 200m 不等;其中金宝屯煤田表土层厚百米左右,但其下部有数百米厚的泥质胶结的软岩,其施工难度不低于厚表土层。

华北地区的开滦煤田、邢台煤田均被表土层覆盖。开滦煤田表土层厚从 20m 至 545m 不等,一般厚在 50m 以上,自东北向西南逐步加深。表土层组成以砂、卵石、砾石为主,占总厚度 50%

以上,砂质粘土和粘土的隔水性能较好;邢台矿区表土层厚由 80m 至 290m 不等,西南方向薄、东北方向厚,其特点与开滦矿区相似,但粘土层所占比例较高。

华东地区的淮南矿区、淮北矿区、兖州矿区(含济宁矿区)、徐州矿区、大屯矿区等均处于厚表土层覆盖之中。

淮南矿区由东向西表土层逐渐加厚。在 30~50 年代,多在露头开拓开采,60 年代末就不得不到深表土层覆盖的潘集、谢桥等地区开采,其表土层厚为 100~300m 不等;主要由粘土、砂、砂质粘土组成,其中砂层约占 40%;在表土层底部有一层厚度约 15~80m 的含不饱和水的粘土层,给施工造成新的困难,但它隔水性能好,给开采带来便利。

淮北矿区从北向南表土层厚 30~350m 不等,由粘土、砂、砂质粘土组成,其中粘土约占 50%。这个矿区的砂多为粉砂或垆姆,易流动、易液化。在中部和南部的厚表土层底部有 1~10m 厚的砂砾石含水层直接覆盖在煤系地层上,该含水层水量虽丰,但补给不足,开采过程中水位下降,对井筒井壁造成影响。

兖州矿区(含济宁矿区)从东南向西及西北,表土层深度由 16~338m 变化;由砂质粘土、粘土、砂及砂砾组成,其中砂质粘土和粘土约占总厚的 60%,底部隔水层隔水性能不明显,含水层补给水源不足。

徐州矿区表土层厚由东部的几米变化至西部的 200 多米,由粘土、砂质粘土、砂组成;砂多为细砂和粉砂,易流动,易液化,部分地区砂层直接覆盖在煤系地层上。

大屯矿区与枣庄西矿区相近,与柴里矿区为一个煤田;其中枣庄西及其北部的柴里矿区表土层厚由 20~100m 不等;而大屯矿区表土层厚为 100~280m,表土层底部的含水砂砾石层直接覆盖在煤系地层上,其上有一厚几米至十几米的粘土隔水层,隔水性能好,在微山湖下采煤,该隔水层起了很好的隔水作用。

华中地区的平顶山矿区、永夏矿区、焦作矿区也被不同厚度的表土层所覆盖。

平顶山矿区表土层厚自西向东为 30~350m 不等；由含钙质结核的粘土、砂、砾石组成，砾石厚达 20m 以上，粘土层累计厚度占总厚度的 50% 以上。

永夏矿区表土层厚度由 100m 左右到 300m，其土性与淮北矿区相似，具体特征见下节。

焦作矿区表土层自西北向东南厚度从 0~400m，由黄土、砂、泥、砾石组成，主要含水层为砂和砾石层，总厚度可达 60m。

另外，河南鹤壁矿区，山西古交矿区，山东新汶矿区，肥城矿区等也被 20~100m 或更厚的表土层覆盖。

除矿山工程外，城市市政工程、地下建筑工程也常遇到厚表土层，如北京、上海的地下铁道工程等。在东北、华北、华东、华中的许多大城市，如天津、郑州、苏州、南京等城市都覆盖有厚表土层。

1.2 永夏矿区深厚表土层的特征

永夏矿区位于黄淮冲积平原的东部、地势低平开阔，西北高东南低，微向东南倾斜。表土层厚度由 100m 左右到 380m 左右，地层自上而下主要有第四系、第三系构成。

(1) 第四系地层：第四系地层主要由粘土及砂质粘土、中夹粉细、细、中砂组成，层位不稳定，局部富含钙质及钙质结核、与下伏地层呈平行不整合接触。

第四系粘性土强度低，可塑性强，塑性系数 14~20，具备亲水性，遇水膨胀及失水收缩的特点。第四系砂层所占比例为 30% 以上，无胶结、呈松散状态，抗压强度小于 1MPa，坚固系数极小，由于砂层普遍含水，在采动条件下受水压及地压联合作用，易产生流动，形成“流砂层”，故第四系松散沉积岩土段属极不稳定型。

(2) 第三系地层：第三系地层主要由粘土、砂质粘土、粉砂、细砂及中砂、少有粗砂组成，粘土及砂质粘土含少量结核，局部含大量钙质及铁锰质结核，砂层较多而集中，与下伏地层呈平行不整合接触。

第三系松散沉积岩土段呈微胶结状态，仍具备第四系的工程地质特征，砂层普遍含承压水，该岩土段工程地质为不稳定型。

1.3 深厚表土层中地下结构物的外载荷

深厚表土层中竖直的地下结构物（如立井）多采用圆筒形结构，水平的多采用拱形、马蹄形或圆形结构（如地下铁道、矿山巷道、隧道等）。

立井所受外载包括水平地压、自重、竖直附加力及施工荷载。自重、竖直附加力及施工荷载将在第 2.4 节中详述，本节仅综述水平土压力（以下简称为“地压”）。表土层地压是指岩土层作用在地下结构物（如冻结壁、井壁）的外载荷或压力。

计算表土层地压大都基于松散体极限平衡理论，按选定力学模型不同，计算方法也有区别。

1) 平面挡土墙地压理论

基于 1773 年库伦提出的挡土墙主动土压力的理论，普罗托吉雅克诺夫（М. ПротоДьяконов）在 1908 年导出的水平地压为：

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

式中 γ ——土的重力密度， kN/m^3 ；

φ ——土体的内摩擦角， $(^\circ)$ ；

H ——计算点的深度， m 。

式（1-1）的基本假设是：墙是垂直的；墙面光滑无摩擦力；墙是无限长的在纵向无位移（即平面问题）；土体沿一个平面滑动。

考虑到表土层由不同土性的土层组成，各层 φ 值不同，前苏联学者秦巴列维奇（П. М. Цимбаревич）在 1948 年将上式修改为：

$$p = \sum_{i=1}^n (\gamma_i h_i) \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_i}{2} \right) \quad (1-2)$$

$$\text{或} \quad p = \sum_{i=1}^n (\gamma_i h_i) A_i \quad (1-3)$$

式中 A_i ——侧压力系数， $A_i = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_i}{2} \right)$ ，

这些地压公式对于浅表土层是适用的。例如，在使用沉井法、混凝土帷幕法施工时，选用式（1-2）计算地压均可满足工程需要。

当表土层较厚，且含水层为承压水时，要考虑静水压对土颗粒的浮力及对结构物的压力，则悬浮体地压公式为

$$p = \sum_{i=1}^n (\gamma'_i h_i) \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_i}{2} \right) + \gamma_w H_0 \quad (1-4)$$

式中 γ'_i ——各层土的悬浮重力密度，即： $\gamma'_i = (\Delta - 1)(1 - n)$ ；

n ——土层的孔隙度；

Δ ——土颗粒的相对密度；

γ_w ——水的重力密度；

H_0 ——计算点的静水位。

在深厚表土层，影响地压的因素较复杂，工程实践证明：用冻结法和钻井法施工，少有地面下沉滑动现象，挡土墙理论公式在深厚表土层中的适用性也各不相同。

2) 经验公式

通过工程实测研究得到的经验公式为

$$p = KH \quad (1-5)$$

式中 p ——地压，MPa；

K ——系数，取 $K = 0.01 \sim 0.02$ 之间。我国常取 $K = 0.01 \sim 0.013$ ，德国取 $K = 0.013 \sim 0.018$ ，美国取 $K = 0.014$ ，前苏联取 $K = 0.012 \sim 0.016$ ，荷兰、波兰取 $K = 0.013$ ，日本取 $K = 0.011 \sim 0.012$ ，法国取 $K = 0.02$ 。

马英明（1979）称式（1-5）为重液地压公式，称 K 为水土混合溶液比重。实际上， K 是经验系数，当然用前述各地压公式取 $\varphi = 10^\circ \sim 33^\circ$ ，亦可得到式（1-5）及相应的 K 值。

3) 轴对称挡土地压理论

1952年，别列赞采夫（В. Г. Березанцев）应用索克洛夫斯基轴对称理论研究圆筒形地坑护壁所受主动土压力，并假设：土体与

壁面无摩擦力；滑动曲面为轴对称的圆锥面，经推导得圆筒形挡土墙压力公式为

$$p = \gamma R_0 \frac{\tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{\lambda - 1} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R_b}\right)^{\lambda-1} \right] + q \left(\frac{R_0}{R_b}\right)^{\lambda} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) + C \cdot \cot\varphi \left[\left(\frac{R_0}{R_b}\right)^{\lambda} \cdot \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) - 1 \right] \quad (1-6)$$

式中 R_0 ——井筒掘进半径，m；

R_b ——土体滑动线与地面交点的横坐标值，其值为

$$R_b = R_0 + H_1 \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

q ——地面上（或上一层土）的均布荷载，MPa；

H_1 ——计算土层的厚度，m；

λ ——系数，其值为： $\lambda = 2 \tan\varphi \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$

如果地面（或计算层上方）无外荷载（ $q=0$ ），并忽略粘结力（ $C=0$ ），则式（1-6）变为

$$p = \gamma R_0 \frac{\tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{\lambda - 1} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R_b}\right)^{\lambda-1} \right] \quad (1-7)$$

式（1-7）表明：地压随深度增加而增加，但其增长率随深度增加而下降，当达到某一深度后，地压趋于常数值。

4) 夹心墙地压理论

马英明（1979）、朱松青（1981）认为，井筒周围有个被扰动的松散土圈，该圈土要向下滑移，它一侧与井壁产生摩擦，另一侧与未扰动土产生摩擦；这样，产生了松散体的成拱效应，造成上部松散土作用于下面计算土层上的竖向力小于 γH 。该滑动土圈对井壁所产生的侧压力即为水平地压。1951年，前苏联学者崔托维奇在其名著《土壤力学》中首先建立了这一概念，1961年卡萨乌洛夫（И. Н. Касауров）在《立井矿山压力》一书中引用这一理论计算岩石中立井地压；我国学者又引用来计算表土层中地压。

$$p = \frac{\gamma b - C}{\tan \varphi} \left[1 - \exp \left(-\frac{AH \cdot \tan \varphi}{b} \right) \right] \quad (1-8)$$

式中 b ——扰动松散体滑动区宽度之半, m;

C ——土的粘结力, MPa;

$$A = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$

通过现场观测资料的研究和砂箱模型的试验, 确定 $b = (0.5 \sim 1.0) R_0$ 。取 $b = 1.0 R_0$ 代入式 (1-8) 得

$$p = \frac{\gamma R_0 - C}{\tan \varphi} \left[1 - \exp \left(-\frac{AH \cdot \tan \varphi}{R_0} \right) \right] \quad (1-9)$$

5) 对地压计算方法的评价

关于表土层地压理论, 大致可分为两大类: (1) 线性增加型。如挡土墙公式、悬浮体地压公式、重液地压公式等。这些公式的特点是不考虑井筒掘进半径的影响, 地压随深度呈线性增加; (2) 极限型。如别列赞采夫公式、太沙基公式、夹心墙公式等, 此类公式的特点是地压与井筒半径有关, 深度达到一定值时, 地压趋于一极限值。

地压除与土性、埋深等参数有关外, 还与施工方法和施工过程有关。例如, 在浅表土层中采用沉井法施工时, 若发生涌砂冒泥, 土体破坏范围大, 地压也大; 在淹水沉井、帷幕法施工工程的外围, 土体不被破坏时, 地压小; 钻井法施工时, 周围土体保护得好, 其地压值也小些。

根据工程经验及实测研究, 在浅表土中可应用式 (1-3) 或式 (1-4); 对于深厚表土层地压, 国内外学者多用式 (1-5), 只是 K 值取值不同而已。根据具体地层的土性、埋深、施工方法、工程寿命等因素选取 K 值即可。

实测冻结立井地压表明: 地压既不按深度呈无限线性增加, 也不是到一定深度趋于定值, 而是随不同地层条件而变化。

因此, 表土层中立井和各种地下工程结构外荷载的确定是随着工程地质条件和施工方法等不同而异。

1.4 厚表土层中地下工程的主要施工方法和特点

在表土层中建设矿井或建设其它地下工程，用普通施工法在浅部常常遇到塌帮、涌砂和水涌入工作面等问题。在深度大于 30m 的表土层中凿井或建设地下工程，不采用特殊施工法，工程建设是难以成功的。

特殊施工法是相对于普通施工法而言的，它是在工程施工之前先在表土层中进行超前于工作面的支护，或用某些科学技术手段对工程附近的地层进行加固，或者在泥浆护壁条件下进行钻井等，然后进行后续工序施工，这些施工方法，统称为特殊施工法。

在浅表土层中常用的特殊施工方法有板桩法（包括木板桩、金属板桩、旋喷桩等）、管棚法、降低水位法、沉井法、帷幕法和盾构法等。这些方法可对表土层工作面进行超前支护，保持井帮或工程的边坡稳定，但尚不能完全切断水向工作面的流动；混凝土帷幕法不仅对土层进行了超前支护，而且可以隔断地下水与工作面的联系，故可适用于 100m 以内的表土层中的地下工程施工。

当表土层深度超过 100m 时，技术上可靠的施工方法为冻结法、钻井法和注浆技术。按照目前的技术水平，钻井法适用于立井，且钻井直径在 9.3m 以内；冻结法则适用于表土层厚在 500m 以内的各种矿山工程，或深度在 100m 以内的各种地下工程。这两种施工方法能适用于深厚表土层施工的原因是：其一，是可以建立一个抵抗深土压力的结构（如冻结壁、泥浆液柱）；其二，能切断工作面与外界地下水的联系。

人工冻结法是用人工制冷的方法，在待建工程周围，将地层冻结成封闭的结构物——冻结壁，用以抵抗地压（土压和水压），切断地下水向工作面流入的通道，然后在冻结壁的保护下进行工程施工。

钻井法是用洗井液——泥浆充满井筒，利用泥浆液柱压力抵抗地压，利用泥浆护壁切断地下水的流入，而井壁则是工程的永久支护结构物。