

国家自然科学基金资助项目
中国矿业大学学术著作出版基金资助出版

深厚表土层中的 冻结壁和井壁

崔广心 杨维好 吕恒林 著

中国矿业大学出版社

深厚表土层中的冻结壁和井壁

责任编辑: 张乃新
刘社育
封面设计: 安德馨
白海新

ISBN 7-81040-915-8



9 787810 409155 >

ISBN 7-81040-915-8/TD · 101

定价: 24.00 元

国家自然科学基金资助项目
中国矿业大学学术著作出版基金资助出版

深厚表土层中的冻结壁和井壁

崔广心 杨维好 吕恒林 著

中国矿业大学出版社

883324

内 容 提 要

本书以在深厚表土层中采用人工冻结法凿井的冻结壁和采用钻井法凿井的井壁为研究对象,介绍了深厚表土层的分布概况、土的特性和冻土特性。在实验研究、工程实践和实测研究的基础上,综合介绍了在冻结壁和井壁的工况、外载、结构的力学及热学特性方面的研究成果,提出了深土力学、深土冻土力学的概念和初步框架。

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

深厚表土层中的冻结壁和井壁

崔广心 杨维好 吕恒林 著

责任编辑 张乃新 刘社育

中国矿业大学出版社 出版发行

新华书店经销 北京地质印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 7.625 字数 212 千字

1998 年 10 月第 1 版 1998 年 10 月第 1 次印刷

印数 1~1 000

ISBN 7-81040-915-8/TD·101

定价: 24.00 元

前 言

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,有些矿区被复杂的厚表土层(第四系和第三系冲积层)所覆盖。当地质条件较好的煤田已大量开发,但煤炭产量仍不能满足经济发展的需要时,就不得不在地质条件复杂的矿区建设矿井、开采煤炭。地处华东的兖州矿区、淮北矿区、淮南矿区、徐州矿区、大屯矿区,地处华中的平顶山矿区、永夏矿区等,均被厚表土层所覆盖。在这些地区建设矿井,只能用特殊的凿井法——主要是冻结法和钻井法凿井。至1997年年底,我国已用人工冻结法建设了400多个井筒,用钻井法建设了约50个井筒。这些井筒的建设成功,使我们获得了丰富的建井工程经验,提高和完善了凿井技术,提出了深土中特殊凿井的一些课题,并在研究中取得显著成果,提高了工程技术水平和经济效益。

在冻结法凿井中,突出地提出了以下课题:冻结壁强度、稳定性和结构尺寸的确定;掘进段高值及其暴露时间与冻结壁蠕变的关系,冻结壁蠕变对井壁的作用;冻结管断裂的原因及防治;井壁开裂漏水的防治;井壁破裂的防治和井壁工况及外荷载的研究;井壁材料和井壁结构;在深厚表土层中钻冻结孔的定向钻进等。上述冻结壁、井壁和定向钻孔问题被建井工程界简称为“两壁一钻”问题。在钻井法凿井中,除钻井设备和工艺外,对钻井井壁亦同样存在荷载和工况的确定;井壁材料和井壁结构问题。因此,可以说“两壁”是决定冻结法和钻井法凿井成功与否的主要技术关键。

中国矿业大学建筑工程学院岩土工程研究所冻结壁、井壁研究室就是研究“两壁”的科技队伍中的一支力量。70年代末,我

们已认识到仅靠对一般的数学、力学模型作若干假设去求解解析的方法，已不能解决深厚表土层中的“两壁”问题。要解决深厚表土层中的“两壁”问题，可供选择的技术路线有三条：一是用计算机进行数值模拟（即数值计算），该法方便，但它与解析法有共同的问题，即深厚表土层的数学、力学模型尚待建立，深部土的物理力学参数尚待求得并确定；二是以相似理论为基础的物理模拟试验研究，它的工作量大于数值模拟方法，但比工程实测研究省时间、省经费，且可多次重复研究；三是工程实测研究，它在特定意义上可以说是1:1的模拟试验，对于验证物理模拟成果的正确性、准确性和确定修正系数，以及揭示深厚表土层中土体的本构关系是不可缺少、不可替代的。当时，考虑到我们的力量和条件，决定采用以物理模拟研究为主、工程实测研究为辅的技术路线，而把数值模拟后延至有条件时再开展。在这个总体战略指导下，在原煤炭工业部基本建设司领导和专家的关怀与支持下，在校院领导的关心和帮助下，在特殊凿井公司和大屯煤电公司等单位领导和专家的支持与帮助下，全室同志首先研制了大型多功能立井模拟试验台，为实验研究提供了先进可靠的手段。在此基础上，先后开展了：冻结壁整体结构与外载、温度、几何尺寸、掘进段高、冻结壁的变形等参数间关系的研究，冻结管在冻结法凿井各阶段应力应变关系、变化规律及冻结管断裂原因的研究，井壁破裂机理及其竖直附加力沿深度分布规律及数值的研究，冻结法凿井井壁结构及其力学特性的研究，钻井法凿井井壁可缩装置的力学特性研究等，并取得了一些受同行关注的成果。由本研究室完成的“立井模拟试验台”项目于1992年获能源部科技进步三等奖；由本研究室与兄弟单位合作完成的“硬岩大直径深井钻机研制和钻井”项目于1987年获国防科工委科技进步一等奖，1988年获国家科技进步二等奖；“大屯矿区冻结井壁受力试验研究”项目于1991年获江苏省科技进步三等奖；“淮北祁南矿井井壁受力模拟试验研究”项目于1994年获煤炭工业部科技进步三等奖；“特殊地层条件下井壁破裂机理与防治技术”项目于1995年获煤

炭工业部科技进步特等奖, 1997 年获国家科技进步二等奖。全室人员在实验研究与工程实践中认识到: 常规的室内实验用的扰动土与深部原状土之间的工程力学参数及本构关系有重大区别, 这种区别随表土层深度增加而加大, 直至有质的不同。同时, 认识到局部实验研究与系统实验研究间的关系, 以及与同学科及不同学科交流、交叉渗透的必要性。在中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室的资助与支持下, 在国家自然科学基金的资助下, 我们开展了“深部湿土结冰温度变化规律的研究”及“深表土层土体与井壁结构耦合作用机理和参数的研究”项目, 取得了初步成果, 并萌发了“深土力学”和“深土冻土力学”的学术思想。即将开展的深部土力学特性的研究很可能产生并发展为土力学的分支——深土力学。对冻结壁、井壁受力和井壁结构的深入研究和成果的工程应用, 以及相应的监测手段和传感器的研究开发和应用将是本研究室的主攻方向。为了与同行交流, 获得同行学者、专家及相邻学科专家专家的指教, 特将本研究室十余年来关于冻结壁和井壁的研究成果和应用技术集于本书之中, 奉献给读者。本书从一个方面反映了“两壁”研究的最新成果和水平, 书中所介绍的成果有些已应用于工程设计和工程实践, 为经济建设发挥了一定作用。技术是发展的, 科学是不断进步的, 学术水平是逐步提高的, 目前的认识和研究水平有待进一步深化、提高和发展。作者愿与同行共同努力, 作出新的贡献。

本书由崔广心教授、杨维好副教授、吕恒林副教授著, 并由崔广心教授完成主编工作。具体编写分工如下:

崔广心教授撰写: 前言、1 总论、2 厚表土层概述、3 冻土的物理力学性质、4 人工冻结工程中的冻结壁 (4.3、4.7 节)、7 厚表土层中冻结壁、井壁的研究展望;

杨维好副教授撰写: 4 人工冻结工程中的冻结壁 (4.1、4.2、4.4、4.5、4.6 节)、5 冻结法凿井中的井壁 (5.2 节);

吕恒林副教授撰写: 5 冻结法凿井中的井壁 (5.1、5.3 节)、6 钻井法凿井中的井壁。

作者衷心感谢原中国统配煤矿总公司基建局、特殊凿井公司、大屯煤电公司的领导和专家长期以来所给予的支持。衷心感谢中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室、国家自然科学基金委员会给予的资助。

本书成果是集体智慧和劳动的结晶。参加研究工作并作出贡献的研究者有：孟以猛、刘正修、祝嘉镛、虞咸祥、曹祖民、李本连、陈希东、李松盛、王以全、熊声誉、陈明亮、王贵淳高级工程师，程锡禄教授，卢清国、周国庆副教授，胡向东博士，陈先德实验师等。研究工作还得到冻土工程国家重点实验室吴紫汪、徐学祖、朱元林研究员，马巍、张立新副研究员等的帮助和支持，作者在此一并致以最诚挚的感谢！

由于作者水平所限，书中谬误之处难免，敬请读者批评指正。

作 者

1997 年 10 月

目 录

1 总论	(1)
2 厚表土层概述	(12)
2.1 我国厚表土层的分布概况	(12)
2.2 表土层土性及主要工程地质、力学和热学参数	(14)
2.2.1 工程地质参数	(14)
2.2.1.1 颗粒组成	(14)
2.2.1.2 重力密度	(15)
2.2.1.3 渗透性	(15)
2.2.1.4 含水量	(15)
2.2.1.5 孔隙比	(15)
2.2.1.6 安息角	(15)
2.2.1.7 触变性	(16)
2.2.2 土的力学参数	(16)
2.2.2.1 塑性指数 I_p	(16)
2.2.2.2 压缩系数 a	(16)
2.2.2.3 压缩模量 E_s	(17)
2.2.2.4 变形模量 E	(17)
2.2.2.5 泊松比	(17)
2.2.2.6 土的抗剪强度	(17)
2.2.2.7 土的抗压强度	(18)
2.2.3 土的热学参数	(18)
2.2.3.1 比热容 C	(18)
2.2.3.2 导热系数 λ	(19)
2.3 厚表土层中地下结构物的外载	(19)
2.3.1 平面挡土墙地压理论	(20)

2.3.2	经验公式	(21)
2.3.3	轴对称挡土墙地压理论	(21)
2.3.4	夹心墙地压理论	(23)
2.3.5	对地压计算方法的评价	(23)
2.4	厚表土层中地下工程的主要施工方法简介	(24)
3	冻土的物理力学性质	(31)
3.1	冻土的形成	(31)
3.1.1	冻土的形成过程	(31)
3.1.2	水分迁移与冻胀	(32)
3.1.2.1	水分迁移	(32)
3.1.2.2	冻胀	(34)
3.2	冻土的强度和流变特性	(36)
3.2.1	冻土强度	(36)
3.2.1.1	冻土的抗压强度	(36)
3.2.1.2	冻土的抗剪强度	(40)
3.2.1.3	冻土强度的取值	(42)
3.2.2	冻土的本构关系	(42)
3.3	冻土的热学参数	(45)
3.3.1	比热容	(45)
3.3.1.1	质量比热容	(45)
3.3.1.2	容积比热容	(45)
3.3.2	导热系数	(45)
3.3.3	导温系数	(46)
3.3.4	结冰温度	(46)
3.3.5	热容量	(47)
3.4	厚表土层中冻土力学的特点及讨论	(48)
3.4.1	深土冻土力学的特点——与浅土冻土力学的区别	(49)
3.4.1.1	力学参数是深度的函数	(49)
3.4.1.2	荷载历史和性质不同	(49)
3.4.1.3	深土冻土力学性能的实验方法有待建立	(50)
3.4.1.4	要研究试件力学参数值与结构整体力学性能间的关系	(50)

3.4.2 深土冻土力学的基本内容	(51)
4 人工冻结工程中的冻结壁	(52)
4.1 冻结壁的形成方式和过程	(52)
4.1.1 冻结法凿井的原理	(52)
4.1.2 冻结壁的形成过程	(53)
4.1.3 冻结方案	(54)
4.2 立井冻结温度场	(55)
4.2.1 温度场的数学模型与相似准则	(55)
4.2.2 有关冻结温度场的若干研究成果	(58)
4.2.2.1 主面、界面和轴面温度场	(59)
4.2.2.2 冻结过程中冻结管外表面的温度	(61)
4.2.2.3 根据测温孔资料推算冻结壁的厚度	(62)
4.2.2.4 平均温度的确定	(63)
4.2.2.5 冻结管的吸热能力	(65)
4.3 厚表土层中湿土结冰温度研究	(66)
4.3.1 问题的提出	(66)
4.3.2 试验方法	(67)
4.3.3 试验安排与试样配制	(69)
4.3.4 试验结果及分析	(70)
4.3.4.1 冰点的确定方法	(70)
4.3.4.2 湿土结冰温度与外载的关系	(70)
4.3.4.3 结冰温度与含盐量的关系	(72)
4.3.5 小结	(74)
4.4 冻结壁的强度和稳定性研究	(74)
4.4.1 概述	(74)
4.4.1.1 工程实测研究	(75)
4.4.1.2 模拟试验与模型试验研究	(76)
4.4.1.3 数值模拟研究	(76)
4.4.2 常用冻结壁厚度和段高计算公式	(76)
4.4.2.1 无限长弹性厚壁圆筒公式	(76)
4.4.2.2 无限长弹塑性厚壁圆筒公式	(77)

4.4.2.3 有限长(有限段高)的塑性(或粘塑性)	
厚壁圆筒公式	(77)
4.4.3 物理模拟试验研究方法和成果	(79)
4.4.3.1 模拟试验原理	(79)
4.4.3.2 多功能立井模拟试验台简介	(81)
4.4.3.3 冻结壁、冻结管受力与变形模拟的相似准则	
方程	(83)
4.4.3.4 冻结壁变形规律模拟试验情况简介	(85)
4.4.3.5 冻结壁变形规律模拟试验结果	(86)
4.4.4 工程中采用的技术措施	(90)
4.4.4.1 强化冻结,提高冻结壁自身强度	(90)
4.4.4.2 适时进行合理支护	(92)
4.4.4.3 提高冻结管(接头)的变形能力	(92)
4.4.4.4 加强施工与冻结的配合	(93)
4.4.4.5 加强监测	(93)
4.4.5 存在的问题和展望	(93)
4.5 冻结壁的工程计算	(94)
4.5.1 冻结壁外载的确定	(95)
4.5.2 冻结壁厚度的计算	(96)
4.5.3 冻结孔的布置	(97)
4.5.4 冻结时间计算	(97)
4.5.5 冷冻站制冷能力计算	(98)
4.6 冻结管断裂问题的研究	(98)
4.6.1 概述	(98)
4.6.2 冻结管受力分析	(99)
4.6.2.1 安装阶段冻结管受力分析	(99)
4.6.2.2 积极冻结阶段冻结管受力分析	(102)
4.6.2.3 掘进施工阶段冻结管受力分析	(104)
4.6.3 冻结管受力的物理模拟结果	(106)
4.6.3.1 积极冻结阶段冻结管受力规律	(108)
4.6.3.2 掘进施工阶段冻结管应力变化规律	(111)
4.6.4 小结	(113)
4.7 冻结壁变形压力	(115)

5 冻结法凿井中的井壁	(117)
5.1 概述	(117)
5.2 井壁的外载	(125)
5.2.1 概述	(125)
5.2.1.1 自重	(125)
5.2.1.2 永久地压	(125)
5.2.1.3 温度应力	(126)
5.2.1.4 竖直附加力	(128)
5.2.1.5 水平附加力	(128)
5.2.1.6 地震荷载	(129)
5.2.1.7 冻结压力	(130)
5.2.2 冻结壁融沉引起的竖直附加力	(131)
5.2.3 表土含水层疏水引发的竖直附加力	(131)
5.2.3.1 简述	(131)
5.2.3.2 竖直附加力的弹性分析	(138)
5.2.3.3 竖直附加力的模拟试验研究	(141)
5.2.3.4 小结	(157)
5.3 井壁结构	(158)
5.3.1 沥青夹层滑动可缩复合井壁的研究	(158)
5.3.1.1 沥青夹层井壁受力的模化和试验设计	(159)
5.3.1.2 试验结果分析	(164)
5.3.2 滑动夹层材料的研究	(166)
5.3.3 井壁可压缩装置的研究	(169)
5.3.3.1 可缩装置的基本要求	(169)
5.3.3.2 可缩装置的材料和结构形式	(170)
5.3.3.3 可缩装置的理论计算	(170)
5.3.3.4 可缩装置的试验研究	(174)
5.3.4 以抗为主的井壁受力分析	(179)
5.3.4.1 全抗型井壁的特点	(179)
5.3.4.2 高强度混凝土材料的研究	(180)
5.3.4.3 全抗型井壁结构	(180)
5.3.5 对冻结井壁结构的评述	(181)
5.3.6 井壁设计	(183)

5.3.6.1	设计依据	(184)
5.3.6.2	井壁结构的选择	(184)
5.3.6.3	井壁荷载	(185)
5.3.6.4	井壁厚度的设计计算	(187)
5.3.6.5	内外壁的强度验算	(189)
5.3.6.6	可缩装置的设计计算	(191)
5.3.6.7	配筋计算	(193)
6	钻井法凿井中的井壁	(195)
6.1	井壁的外载	(195)
6.1.1	荷载内容	(195)
6.1.2	荷载组合及结构设计安全度	(196)
6.2	井壁结构	(196)
6.2.1	钢筋混凝土预制井壁	(196)
6.2.2	钢板筒混凝土复合井壁	(198)
6.2.3	钢筋混凝土整体可缩井壁	(199)
6.3	纂井井壁设计	(200)
6.3.1	全抗型单层井壁设计	(200)
6.3.1.1	原始数据和外荷载的确定	(200)
6.3.1.2	井壁厚度的估算	(200)
6.3.1.3	应力分析和强度校核	(201)
6.3.1.4	稳定性验算	(201)
6.3.1.5	竖向钢筋的确定	(203)
6.3.1.6	井壁下沉工艺应力验算	(204)
6.3.1.7	井壁径向钢筋的设计	(205)
6.3.2	实例计算	(206)
6.3.2.1	原始数据	(206)
6.3.2.2	井壁安全性验算	(206)
6.3.2.3	井壁厚度的确定	(206)
6.3.2.4	稳定性验算	(207)
6.3.2.5	竖向钢筋确定	(208)
6.3.2.6	井壁下沉工艺应力验算	(209)
6.3.2.7	径向钢筋的确定	(209)

6.3.2.8 可缩装置的设计	(210)
7 厚表土层中冻结壁、井壁的研究展望	(213)
7.1 关于两壁的工况和外载——深土力学	(213)
7.2 关于冻结壁的研究——深土冻土力学	(214)
7.3 关于井壁的研究	(216)
7.4 地下工程结构的材料问题	(216)
7.5 科学研究方法的展望	(217)
7.6 关于两壁监测问题	(219)
参 考 文 献	(221)

1 总 论

在不稳定的厚表土层中建设井筒或修筑其他地下工程,必须使用特殊施工法,如冻结法、钻井法、沉井法、帷幕法、掩护筒法(也称盾构法)等。在深厚表土层中,以采用冻结法和钻井法为主。因此,井壁(井筒的永久支护结构物)和冻结壁(冻结法凿井的临时支护结构物)就成为厚表土层中地下工程设计和施工保障的主要对象。

70年代,我国华东地区的淮南、淮北、徐州、大屯、兖州等矿区大量使用冻结法凿井,取得了很大成功。同时在工程设计和施工中 also 出现了一些尚未解决的技术问题和理论问题。例如:冻结壁厚度的确定、湿土的冻结温度、掘进段高与诸参数间的关系、冻结壁变形及对外层井壁的变形压力问题、冻结管断裂问题等;井壁厚度和结构设计中外载的确定、高强度材料研制与应用、井壁开裂和漏水问题、井壁破裂问题(建井界同行习称冻结壁问题和井壁问题为“两壁”问题)等都是矿井建设者乃至地下工程领域同行所共同关注的问题。

与冻结法凿井技术发展的同时,钻井法凿井技术在我国也取得了突破性进展,并在上述各矿区及辽宁省、河北省的几个矿区得到广泛应用。可以说我国华东地区和华北、华中地区的绝大部分煤矿井筒是用冻结法和钻井法建成的(见表1.1)。

完善和发展冻结法,首要的课题是开展对“两壁”问题的研究。应当说自有了冻结法以来,人们就一直对“两壁”进行研究并逐步深入。近百年来对“两壁”的研究可以分为以下几个阶段:

第一阶段(20世纪以前) 当时,地下工程,如地下铁道、隧道和基础工程等多建筑在浅表土层中,矿井建设遇到的表土层的厚度也多在100 m以内,仅有个别井巷工程建在更深的表土层中,

故在设计“两壁”时,多是直接引用松散体挡土墙理论求算其外载——水平地压,并认为井壁自重由地层承担(与岩层中井壁自重由岩层承担一样)。以后,为了安全,将少部分自重(占10%~40%)作为竖向力。这个时期的井筒井壁计算理论的特点是:外载为水平荷载,结构以圆筒形为主,力学基础为材料力学的弹性厚壁筒公式,应用第一(后期引入第三)强度理论进行强度检验。该理论适用于100 m左右深度的表土层。

表 1.1 70 年代以来中国部分矿区建井法统计资料表

序号	矿区名称	冻结法凿井/个	钻井法凿井/个	其他凿井法/个
1	淮南矿区	21	4	0
2	淮北矿区	46	7	0
3	徐州矿区	12	0	-
4	大屯矿区	15	5	1
5	兖州矿区	37	0	0
6	开滦矿区	29	0	0

第二阶段(20 世纪初至 20 世纪 50 年代) 这一阶段,经济的发展,特别是采矿工业的发展,要求在厚度大于 200 m 的表土层中建设矿井;用常规设计方法,即按弹性厚壁筒公式求算冻结壁厚度常常无解;弹塑性理论的发展给深厚表土层中冻结壁的设计提供了新途径。1915 年,德国学者多姆克(O. Domke)教授,首先把弹塑性力学引入到冻结壁厚度计算中。他假设:冻结壁是由理想的弹塑性材料组成的无限长厚壁圆筒(圆筒内半径为 a ,外半径为 b),受均匀的水平外载 p ;当 p 达到某一值后,在半径 $r=\zeta(a<\zeta<b)$ 处冻土进入塑性状态,弹性区的应力用弹性厚壁筒公式求算,塑性区的应力由塑性理论求算,并假设 $\zeta=\sqrt{ab}$ 。运用第三强度理论,经推导得出多姆克公式(O. Domke 1915):

$$\frac{p}{\sigma} = \ln \frac{\zeta}{a} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\zeta^2}{b^2}\right). \quad (1.1)$$

式(1.1)为超越方程。多姆克教授用数值计算方法求得拟合方程,