

邵景柱 宋雷 王伟 著

复杂条件下的 冻结井筒施工成套技术

FUZA TIAOJIANXIA DE DONGJIE JINGTONG SHIGONG CHENGTAO JISHU

“十一五”科技支撑计划 (2006BAB16B01)
国家自然科学基金 (40604015)
冻土工程国家重点实验室开放基金 (SKLFSE200704)

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

“十一五”科技支撑计划(2006BAB16B01)

国家自然科学基金(40604015)

冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE200704)

复杂条件下的冻结井筒施工成套技术

邵景柱 宋 雷 王 伟 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了复杂条件下冻结井筒施工的成套技术,主要包括:复杂条件下的矿井总体设计、深厚表土冻结壁设计理论、多井共站冻结优化设计、“三井共站”模式下大厚度低平均温度冻结壁的形成与维护技术、冻结井筒高强度混凝土施工技术与工艺、复杂地层条件下冻结井筒机械化施工、深厚表土冻结法凿井安全监测、冻结壁发育状况的地质雷达探测、复杂条件下井筒基岩段防治水技术、复杂条件下硐室工程设计和施工等。

本书可供岩土工程、矿山建设工程、采矿工程等领域的教学、科研、施工及设计人员参考,也可作为高等学校相关专业高年级本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂条件下的冻结井筒施工成套技术/邵景柱,宋雷,
王伟著. —徐州:中国矿业大学出版社,2010.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0597 - 1

I. 复… II. ①邵…②宋…③王… III. 井筒—冻结法施
工 IV. TD265.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 017591 号

书 名 复杂条件下的冻结井筒施工成套技术
著 者 邵景柱 宋 雷 王 伟
责任编辑 刘红岗
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
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 13.5 字数 337 千字
版次印次 2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

我国的煤炭资源主要是通过地下开采获得的,在长期大规模的开发中,浅部资源逐渐减少和枯竭,地下开采的深度越来越大。20 世纪末我国的煤矿开采深度已近 500 m,目前以每年 8~12 m 的速度增加,可以预计在未来 20 年我国很多煤矿将进入到 1 000~1 500 m 的深度。我国西部地区浅部资源虽然储量很大,但该区水资源缺乏,生态环境脆弱,难以承受大规模高强度开发。同时,西部资源开发还受交通运输等外部条件制约。因此加强东部地区深部复杂条件下煤炭资源的开发和利用,是保障我国能源安全必须关注的重大课题。

在我国中东部地区的山东、江苏、安徽等省,有上千亿吨煤埋藏在地下深部。这些矿区的地层条件复杂,其冲积层厚度大于 400 m,预计有些地区可达 700 m;基岩为强含水岩层,建井难度大。2000 年以前,因煤炭需求和技术水平的限制,一直未能开采这些资源。随着国民经济的发展,深部煤炭资源开发已经列入国家开发计划,急需解决深部复杂条件下的井筒建设难题。目前,国外用冻结法凿井通过的冲积层最深达 571 m(前苏联雅可夫列夫铁矿井筒),最大冻结深度达 930 m(英国博尔比钾盐矿)。因国外复杂地层中的井筒少,在冻结井壁和冻结壁设计的理论与施工技术方面未能形成系统的理论和成熟的技术,在施工中也曾遇到重重困难,如:雅可夫列夫铁矿井筒就发生了大量冻结管断裂和井壁挤裂事故,几乎造成工程失败。截至 2002 年,我国共施工了约 500 个冻结井筒,通过的最大冲积层厚度为 376 m,冻结基岩深度为 435 m。近年来,随着我国深部煤炭资源的开发利用,巨野、淮南、永城等矿区相继投入建设,目前,我国采用冻结法凿井通过的冲积层最深已经达 587.5 m(巨野矿区郭屯煤矿副井),最大冻结深度为 702 m。可以说,我国的冻结法凿井技术已经达到了国际先进水平,已经掌握了复杂条件下的井筒施工成套技术,本书内容正是在上述工作部分内容的基础上撰写的。

本书内容主要基于国家“十一五”科技支撑计划“深厚冲积层冻结法凿井技术”(2006BAB16B01)、国家自然科学基金项目“人工冻结壁的电磁特性及地质雷达检测理论研究”(40604015)以及冻土工程国家重点实验室开放课题“深部人工冻土的电磁特性及其与土工参数的相关性研究”(SKLFSE200704)的研究

成果,并与工程实践相结合,试图比较系统地介绍复杂地层条件下井筒建设的成套技术。本书的完成得到了课题组成员和现场技术人员的大力支持,尤其是得到了中国矿业大学杨维好教授、黄家会教授和兖煤菏泽能化有限公司王用杰(教授级)高工、林启国高工等的指导和帮助,本书成稿过程中还得到了中国矿业大学王衍森教授、陈先德实验师、杨志江讲师、张涛讲师以及王新强、杨成立、张小俊等研究生的帮助,在此作者对他们表示衷心的感谢和崇高的敬意。

全书共分十二章,第一、二、十一、十二章由邵景柱主写;第三、四、八、九、十章由宋雷撰写;第五、六、七章由王伟主写。

由于水平和时间有限,书中难免有不当甚至错误之处,恳请读者不吝指正。

著 者

2010年10月于徐州

目 录

前言	1
0 序论	1
0.1 复杂条件下的井筒施工	1
0.2 国内外冻结法凿井技术状况	3
0.3 主要研究内容	6
0.4 本章结论	9
1 工程概况	10
1.1 矿井交通位置及自然条件	10
1.2 井田地质及工程地质条件	11
1.3 井筒特征与地质条件	18
1.4 本章结论	24
2 复杂条件下的矿井总体设计	25
2.1 总体设计思路	25
2.2 井口及工业场地位置	25
2.3 井筒数量与井筒装备	28
2.4 建设工期安排	34
2.5 井筒开工顺序和主井、副井、风井交替安排	36
2.6 井筒施工方法	38
2.7 本章结论	44
3 深厚表土冻结壁设计理论	46
3.1 对深部原位冻结人工冻土力学性质的认识	46
3.2 现有冻结壁厚度计算理论的分析评价	49
3.3 特厚冲积层冻结壁厚度计算	52
4 多井共站冻结优化设计	57
4.1 问题的提出	57
4.2 赵楼煤矿三井筒冻结温度场分析	59
4.3 三井共站异步冻结技术研究	65

5 “三井共站”模式下大厚度低平均温度冻结壁的形成与维护技术	68
5.1 “三井共站”对冻结运行的新要求	68
5.2 冻结设计	68
5.3 制冷系统设计	71
5.4 冻结工程施工	73
5.5 测量与监测工作	77
5.6 冻结效果分析	79
5.7 本章结论	80
6 冻结井筒高强混凝土施工技术与工艺	81
6.1 研究背景	81
6.2 混凝土配比要求	82
6.3 高性能混凝土配比试验	83
6.4 冻结井壁高强混凝土施工技术与工艺控制标准	90
6.5 本章结论	93
7 复杂地层条件下冻结井筒机械化施工	95
7.1 概述	95
7.2 井筒概况	95
7.3 冻结井筒快速施工机械化配套研究	97
7.4 冻结表土段施工方案与工艺	99
7.5 基岩段施工方案与工艺	110
7.6 井筒施工整体情况	112
7.7 主要技术成果	114
8 深厚表土冻结法凿井安全监测	117
8.1 本章前言	117
8.2 井筒安全施工监测监控的工作组织	117
8.3 井筒安全施工监测技术研究	119
8.4 井筒安全施工监测研究小结	135
9 复杂条件下冻结壁温度与变形的超前预测	136
9.1 冻结温度场的反演分析与超前预测	136
9.2 冻结壁受力与变形的反演与安全监控研究	141
9.3 主要研究成果	147
10 冻结壁发育状况的地质雷达探测	148
10.1 地质雷达系统及其基本原理	148

10.2	地质雷达的探测方法.....	153
10.3	数据处理和资料解释.....	159
10.4	人工冻结壁的地质雷达探测研究.....	160
10.5	本章主要结论.....	166
11	复杂条件下井筒基岩段防治水技术.....	167
11.1	井筒的水文地质条件.....	167
11.2	井筒基岩段防治水方案的确定.....	168
11.3	工作面预注浆.....	171
11.4	壁后注浆.....	179
12	复杂地层条件下硐室工程设计和施工.....	184
12.1	概述.....	184
12.2	主井箕斗装载硐室的设计和施工.....	185
12.3	井底煤仓的设计和施工.....	191
12.4	副井井底车场连接处的设计和施工.....	196
结语.....		200
参考文献.....		201

0 序 论

0.1 复杂条件下的井筒施工

我国中东部地区的山东、江苏、安徽等省,有上千亿吨煤埋藏在地下深部。这些矿区的地层条件复杂;其冲积层厚度大于 400 m,预计最深可达 700 m^[1-2];基岩为强含水岩层,建井难度大。煤炭作为我国现阶段的主要能源,随着国民经济的发展,国家对煤炭的需求日益增加,急需开发这些深部煤炭资源,以缓解能源紧张状况。此前,因凿井技术水平的限制,一直未能开采这些资源。

冻结法是复杂地层条件下建设井筒的最主要方法,对大直径井筒来说,有时甚至是唯一的方法。所通过地层地质条件的复杂程度标志着冻结法凿井技术的水平,冲积层厚度和基岩冻结深度是其主要技术参数。目前,国外用冻结法凿井通过的冲积层最深达 571 m(前苏联雅可夫列夫铁矿井筒),最大冻结深度达 930 m(英国博尔比钾盐矿)^[3-4]。因国外复杂地层中的井筒少,未能形成系统的冻结井壁和冻结壁设计理论及成熟的施工技术,在施工中曾遇到重重困难,如:雅可夫列夫铁矿井筒就发生了大量冻结管断裂和井壁挤裂事故,几乎造成工程施工失败。截至 2002 年,我国共施工了约 500 个冻结井筒,通过的最大冲积层厚度为 376 m,冻结基岩深度为 435 m。近年来,随着我国对深部煤炭资源的开发利用,巨野、淮南、永城等矿区相继投入建设。目前,我国采用冻结法凿井通过的冲积层最深已达 587.5 m(巨野矿区郭屯煤矿副井),最大冻结深度 702 m。可以说,我国的冻结法凿井技术已经初步达到了国际先进水平,我国已经掌握了复杂条件下的井筒施工成套技术,本书正是在上述工作部分内容的基础上撰写的。

赵楼矿井由兖矿集团投资兴建,位于山东省巨野煤田中部,设计生产能力 300 万 t/a。矿井采用主井、副井、风井三立井开拓,主、副、风井筒均布置在同一工业广场内,采用中央并列式通风方式。井口标高+45 m,井底车场水平-860 m,三井筒所选位置处于一地质穹窿构造顶部,主井、副井、风井的井筒深度分别为 921 m、936 m 和 921 m。井筒所处位置上覆深厚表土层,主井、副井、风井冲积层厚度分别为 475.0 m、473.8 m 和 471.0 m。赵楼煤矿具有以下典型复杂地质条件:

① 冲积层深厚,冻土强度低,井筒施工过表土难度大。深厚冲积层和富水岩层施工中冻结法凿井技术是国际建井领域具有挑战性的难题,时常发生的冻结管断裂、井壁压裂和透水淹井事故严重威胁着工程及人员安全^[5-9]。

② 基岩含水层涌水量大、水压高,且多为高角度裂隙水和孔隙水,井筒施工防治水难度大。赵楼煤矿基岩段含水层层数多,涌水量大,单层岩层涌水量最大约 110 m³/h,合计涌水量达 687.8 m³/h;高角度垂向裂隙发育,煤层顶板砂岩层局部充填泥质充填物,局部垂向、横向含水层相互连通,防治水难度大。

③ 地温高,冻结需冷量大,井巷施工条件恶劣。赵楼煤矿初期采区大部分地段原岩温度为 $37\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$,地层涌水温度在 $37\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;预测井底及其水平采掘工作面温度将达到 $32\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。研究表明,在气温高于 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度大于 90% 的高温高湿环境中,作业人员的心情易烦躁不安,注意力不集中,反应能力差,事故发生率增加约 20% ,不降温无法工作。

在如此复杂的地层条件下,采用冻结法凿井所面临的难度在国内外是空前的。具体表现为:冲积层厚度增大,水土压力随之增大,水平地压可达 8 MPa ;含水量小的第三系黏土层厚,冻土强度低,具有强蠕变性;此外,地温达到 $25\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,显著增加了冻结壁形成和维护的难度。同时,由于井筒的掘进直径大,井壁结构复杂,为了控制冻结壁的变形,必须加快掘砌速度,实现冻土钻掘、混凝土砌筑的机械化施工。

然而,在 2000 年前,我国冻结法凿井的理论和技术水平远远落后于世界水平,对于超过 400 m 深的冲积层既无工程实践,又无理论研究;对于复杂地层条件可能引发的在冻结法凿井设计和施工中面临的困难准备不足,基本上是照搬浅部简单条件时的经验技术和设计方法。于是就导致了工程中事故频发,常发生井壁压裂、冻结管断裂、冻结壁开窗淹井、基岩段涌水淹井等事故,且建成的井筒易出现井壁破裂灾害。其主要原因是:

① 关键技术不成熟。随着深度的增加,在复杂地层条件下,面临着全新的关键技术问题,如:冻结井筒高强混凝土施工技术、复杂条件下的冻结工程优化设计、困难条件下的基岩段井筒防治水技术、基岩段井筒降温技术等,可以概括为“过表土、防治水、井下降温”,这些技术问题是浅部简单地层条件下未曾遇到的。只有攻克了上述关键技术,才能确保井壁强度达到设计要求,实现安全、高效冻结,确保基岩段井筒安全、快速施工,为井下提供良好的工作条件。可以说,上述关键技术问题不解决,深部复杂条件下的冻结法凿井就无从谈起。

② 传统的施工技术无法适应复杂困难环境的要求。复杂条件下,需采用多圈管冻结,这是一个崭新的课题,如施工不当,将导致内、外圈冻土间出现封闭水体,产生较大的冻胀力,危及冻结管、冻结壁和井壁的安全,因此需研究复杂条件下冻结壁的形成与维护技术;随着冻结深度的增加,井帮温度降低,甚至井心冻实,冻土强度急剧升高,在此情况下传统的人海战术效率低下,需研发复杂条件下冻结井筒的机械化快速施工技术;复杂条件下,为了切实掌控冻结壁和井壁的安全状况,需监测冻结壁和井壁的受力和变形数据,并实现超前预报;此外,深部地压大、变形大、支护困难,也对井筒相关工程和相邻硐室施工技术提出了更高的要求。

③ 冻结法凿井建设风险巨大。鉴于目前的管理和施工技术,在深厚表土层中建设井筒将涉及一系列技术难题,在技术层面上面临诸多的复杂性和不确定性因素。对于在深厚表土层中进行的井筒建设项目而言,其建设周期长、投资规模大、涉及范围广、风险因素数量多且种类繁多。因而,需要系统地借助项目管理和风险管理的理论与方法,充分结合矿井建设的工程实际情况,科学系统的建立复杂条件下井筒建设的风险管理体系。

因此,已有的冻结法凿井设计理论和施工技术已不能满足复杂地层条件下的建井要求,井壁和冻结设计理论严重滞后于工程实践,施工中面临恶劣条件下的高强混凝土井壁施工和多圈管冻结壁形成与维护技术难题,对复杂条件下的冻结壁稳定性缺乏深入认识,所以在井筒设计和施工中必然会面临重重困难。可以说,在复杂地层条件下开凿井筒是一个具有挑战性的世界性难题,必须在井壁设计理论和施工关键技术上有所突破,才能实现复杂条件下深部资源的开采。

在深部资源开发的迫切需求下,“复杂地层条件下冻结法凿井的设计理论和施工关键技术”是矿山企业、科研院所和施工单位共同关注的科研课题。这一课题的解决,将使我国的建井技术达到世界领先水平,获得适合我国特殊复杂条件下井筒施工的成套技术,占领未来资源开发的制高点。

0.2 国内外冻结法凿井技术状况

冻结法凿井的技术问题可归纳为“两壁一钻一机”问题。“两壁”是指冻结壁和井壁,“一钻”是指高垂直度冻结孔钻进技术,“一机”是指大容量、低温制冷机组。经过多年研究,随着我国总体科技水平的提高,“一机”问题可以说已得到解决,400 m 深度以内的冻结壁问题和井壁问题也获得突破,但冲积层厚度超过 400 m 的冻结壁和井壁问题尚有待攻关解决,冻结制冷高效运行急待突破。“两壁”问题涉及深部土的力学特性、人工冻土力学特性和介质与结构相互作用等基础理论问题,也涉及材料、荷载、结构、设计、施工等问题,其现状分述如下:

0.2.1 复杂条件下的矿井设计

矿井设计是矿井施工组织设计编制和实施的基础依据,是对矿井建设全过程进行质量、工期和投资三大控制的关键。对于设计中的重大技术方案和主要设备选型等,都必须按照精益求精的原则,进行多方案技术经济比较,确定最优方案,为矿井建设和生产奠定可靠的基础。

随着大规模的开发和利用,浅部煤炭资源逐步枯竭,煤矿开采不断向深部转移,煤矿开采条件越来越复杂。一方面,所面临的地压、水、地温、火、瓦斯等灾害愈加严重;另一方面,劳动保护、环境、节能、资源利用率、生产效率、工作环境、文化需求等要求日益提高,矿井设计面临越来越多的技术和社会问题。

科学技术的不断进步,要求设计方案能够适应矿井建设所面临的各种复杂条件,与时俱进、及时采用成熟可靠、先进实用的新技术、新工艺、新设备,以改进矿井技术面貌、确保安全生产。

0.2.2 冻结壁设计理论与形成维护技术

崔广心等(1990,1992)采用大型立井模拟试验台,对冻结壁的径向变形、外荷载、掘进段高、冻土温度和时间等参数间的关系,冻结管变形、应力与冻结壁厚度的关系进行了模拟试验研究,获得了冻结壁厚度与各参数间关系的回归方程,证实了冻结壁整体强度弱是冻结管断裂的主要原因^[10-17]。吴紫汪等(1993,1994)用物理模型试验研究了冻结壁径向变形规律和工程底鼓问题^[18-19]。郁楚侯等(1991)也对冻结壁的整体性能进行了模拟研究^[20-25]。

冻结壁设计涉及土的物理力学性质、冻土的物理力学性质、冻结壁与周围土体的相互作用、冻结壁与井壁的相互作用等方面。

冻结壁的外载是冻土与未冻土层相互作用的结果。研究冻结壁与土层的相互作用、井壁与土层的相互作用,均须涉及深部土体的力学性质,而此方面的研究在国内外开展的均极少,特别是对埋深超过 300 m 的土层。我国在 K_0 固结条件下的深土力学特性的研究刚刚

起步^[26-27]。

冻土是冻结壁的组成材料。计算冻结壁的厚度,必须要知道冻土的力学性质(弹黏塑性本构关系和参数等)。早期均采用研究天然冻土的方法和理论来研究人工冻土(土样在无压情况下冻结,形成冻土试件,然后进行单轴加载试验或常规的三轴加载试验获得冻土的强度和本构关系)。然而,实际的人工冻土是深部土层在原位(有压和有一定约束情况下)冻结而成的,在掘进过程中冻土相当于在径向处于卸载状态,在环向处于加载状态。近年来发现,冻土的强度除了与温度、土性、含水量、时间有关外,还与冻结时所受的荷载以及应力路径有关。目前关于有载情况下冻结的人工冻土的强度和本构关系的研究尚处于起步阶段^[28-37],初步研究结果表明:冻结时的荷载和应力路径对冻土的强度和本构关系有重要影响。

冻结壁的设计,一方面取决于对冻土力学性质的认识,一方面取决于对施工工艺和施工条件的认识,还取决于外层井壁的情况。井壁设计理论从最初的无限长弹性厚壁筒理论、无限长弹塑性厚壁筒理论、无限长理想塑性厚壁筒理论等逐步发展为有限长厚壁筒理论和冻结壁有限变形理论等,相应地有拉麦公式、多姆克公式、里别尔曼公式、维亚洛夫公式等计算公式^[38-40]。但这些公式均不适用于特厚冲积层冻结壁的设计与计算。对于特厚冲积层来说,按照我国目前的冻结设备水平,如采用多姆克公式计算,则冻结壁厚度要超过 20 m;如采用里别尔曼公式计算,冻结壁厚度约为 10 m;如根据德国的经验公式计算,则冻结壁的厚度为 15 m 左右。而我国曾经设计的冻结壁最厚为 7 m。由于冻结土体的体积随冻结壁厚度的增大而成平方关系增长,因此冻结壁的设计牵涉到巨额的冻结费用和工程的安全。采用何种理论?如何设计出经济、安全的冻结壁?这些是目前急需回答的问题。

根据国外的经验和我们初步的研究结果,在我国特厚冲积层冻结井筒施工中,将大量应用弧板井壁^[41-45]、钢板井壁^[46-50]、钢筋混凝土井壁^[51-56]等。这是我国以前井筒施工未经历过的,因此应对井壁施工工艺进行研究。

在深部,冻结壁的井帮温度将在 -18°C 以下(井内的环境温度也很低),而现浇混凝土的强度却要求达到 C60 以上。这样,低温环境和强度增长的要求之间就产生了矛盾,必须对此进行研究。以前我国曾在此方面做过大量工作,但是那时的条件是:混凝土的强度等级为 C30 左右,井帮温度在 -8°C 左右。因此有必要开展井筒施工条件下高强度、低渗透性混凝土施工工艺的研究。

冻结壁的形成与维护技术是建立在对冻结温度场发展规律的认识基础上的。冻结温度场除与土层性质、初始地温、地下水流向和流速等先天条件有关外,还与冻结方案、冻结工艺有关。对于特厚土层,由于冻结壁的厚度较厚,势必采用两圈管甚至三圈管冻结。在这种情况下,冻结温度场的变化较复杂且影响因素更多。国内外对用单圈冻结管形成冻结壁的冻结温度场已有较深入的研究;但对 2 圈以上冻结管形成冻结壁的冻结温度场的变化规律研究得很少。我国仅于 20 世纪 80 年代初在安徽省淮南矿区进行过一次双圈管冻结试验研究,也有文献报道过德国雅可巴矿井采用了双圈管冻结方案^[57]。

在赵楼煤矿冻结工程中尝试采用“三井共站”冻结,国内外未见相关研究报告。深井冻结可供选择的方案很多,如局部冻结、差异冻结、分段冻结、一次冻全深等,相应的工艺参数变化范围也很大。可以肯定,深井冻结施工中必然要综合采用上述各冻结方案进行多圈管冻结。不同的方案和工艺参数都可达到对冻结壁温度场的要求,但花费的代价会相差很大。因此必须在综合考虑冻结施工工艺水平、井筒掘砌施工水平、施工安全的条件下,对冻结工

艺和冻结方案进行优化,以期用较小的时间和费用达到安全、快速施工的目的。对于复合多圈管冻结方案与冻结工艺优化研究在国内外均尚未进行过。

为了保证冻结壁的安全,必须掌握冻结壁的工作状态,除正常监测冻结温度场外,还应对象冻结壁的位移场和应力场进行监测,并利用这些数据进行冻结信息化施工。冻结壁内部应力与位移的测试在国内外均未见文献报导。冻结信息化施工在我国刚开始得到重视,研究工作尚处于起步阶段。

0.2.3 冻结井壁掘砌施工技术

目前我国冻结井壁材料主要是 C60 以下的混凝土,而深井冻结壁中要用到 C60 以上高强混凝土、(铸)钢弧板、铸铁弧板、铅垫、木楔块和沥青等材料。这些材料在冻结井壁中的应用在我国尚未处于起步阶段或是空白。在冻结井筒恶劣施工环境下,这些材料的性能变化规律、相互间的匹配关系等均有待深入地研究。例如:对于混凝土(特别是高强、高性能混凝土)和沥青,由于其性能与施工时的配方和施工环境有关,故必须结合井壁施工工艺,研究测试其性能,这样得到的性能参数用于井壁设计计算才能得到正确的结果。

对于深井冻结井壁,其结构和材料应随深度而变化。相同的材料、不同的结构,或相同的结构、不同的材料所取得的效果可能不同,造价更不相同。因此合理的井壁结构意味着巨大的经济效益。

在冻结凿井期间,外层井壁主要承受冻结压力的作用,经常出现被压坏的情况(如井壁压裂成碎块,钢筋弯成麻花形,井壁变形严重)。这一方面会造成较大的经济损失,延误工期;另一方面如处理不当或处理不及时,还会导致冻结管断裂,进而可能造成淹井事故。对于表土深度 400 m 以内的冻结井外层井壁,国内外均趋向于采用“现浇混凝土+泡沫塑料板”井壁,或“现浇混凝土+砌块+泡沫塑料板”井壁。当深度超过 400 m 后,由于现浇混凝土强度等级受工艺条件限制难以提高到 C80 以上,为减小井壁厚度和提高井壁的早期强度,国外均用预制块(高强混凝土预制弧板、铸铁弧板、铸钢弧板)单独或与现浇混凝土结合砌筑井壁。我国在此方面尚无经验和先例。

内层井壁主要起抵抗水压和密封的作用。对于表土深度 400 m 以内的冻结井内层井壁,国内外多采用现浇混凝土井壁。当深度超过 400 m 后,为减小井壁厚度和提高抗渗性能,可采用钢筋混凝土井壁、钢板混凝土井壁等,国外均用预制块(高强混凝土预制弧板、铸铁弧板、铸钢弧板、钢板)与现浇混凝土结合砌筑井壁。我国在此方面进行的研究极少。

在深厚冲积层中,为保证冻结壁的安全,往往要求将井心冻实。这时冻土的掘进速度将影响工程进度。冻土掘进主要采用钻眼爆破方法。这时合适的炮眼钻凿工具及其防冻措施、冻土爆破的参数等均是要解决的问题,否则不但会影响施工速度,还可能出现爆破震坏冻结管、砸坏井壁等重大安全事故。我国在浅冻结井中,对冻土中炮眼的钻进方法与机具、爆破参数等均进行过探索,但在温度低、地压大、冻结管多的深井冻土中尚未进行过钻眼爆破技术的研究。

对于复杂的岩土工程,信息化施工技术是必备手段。信息化施工可为加强设计单位、掘砌施工单位和冻结施工单位间的配合提供定量依据;能达到既保证掘进工作面处的冻结壁和井壁的强度与稳定性又不浪费冷量的目的,从而可提高工程施工的经济性和安全性,提高施工的速度。信息化施工技术已在隧道、地铁、化工等施工领域得到越来越广泛的应用,并

为提高工程的安全性和经济效益发挥了重要作用。然而,在冻结施工方面,国内还未能实现真正的信息化施工。

矿井建设中,地下水是影响建井工程安全、质量和速度的重要因素之一。井筒淋水量大时,如果不采取措施而顶水作业,常导致建成井壁的质量较差,且易引发涌水淹井事故。而在井下狭小空间内,频繁的探水、注浆,又必然增加工序的转换,导致工期延宕。

0.2.4 井筒施工的相关工程

随着矿产资源日渐枯竭,矿井开采逐渐向深部发展,导致矿井高温问题不可避免,甚至建井期间的高温热害问题已经一度影响了正常施工,矿井热害将成为继顶板、瓦斯、火、粉尘、水五大灾害之后的又一灾害。井下高温对工人劳动生产效率和人身健康有极大影响,随着环境温度的升高,工人劳动生产效率会明显下降。我国新汶矿业集团孙村矿,在一800 m水平的开拓掘进中,因工作面气温高达34℃,曾被迫停产3个多月;徐州矿务集团三河尖矿,因采掘工作面高温,致使采掘生产效率下降20%~23%,最高达40%~45%。根据联邦德国矿井开采经验:“当矿井原岩温度超过35~40℃,仅通过采取增风降温的方法已经不再是经济上可行的方法,而应减少风量,并对风流进行冷却降温处理”。我国武汉煤炭设计院的梅甫定教授通过对已有的高温矿井进行分析得出:“当生产水平原岩温度超过35℃时,工作面气温将超过28℃,应考虑采取其他降温措施。”

先期动工的龙固煤矿,与赵楼煤矿同属巨野矿区,其地温条件与赵楼煤矿相似。在其井筒凿进过程中,工作面温度已经接近30℃,并出现工人中暑现象;2005年8月两主井掘至778 m深度位置,实测主井1[#]工作面迎头水温为44~45.2℃;2005年8月17日实测工作面迎头风温达29℃(地面气温20℃,工作面迎头水温44℃),严重影响井下正常作业,后被迫实施了人工制冰降温措施;其高温问题严重影响了工程进度。因此,研究高温矿井建设期间井下降温技术意义重大。

硐室施工大多具有大、高、难的特点,也是矿井建设中的关键工程。根据硐室的断面大小和围岩的稳定情况,煤矿井下硐室常用的施工方法可概括为3类:即导硐施工法、分层施工法和全断面施工法。硐室施工方法的选择,主要取决于硐室的断面大小和围岩的稳定性。而围岩的稳定性不仅与硐室围岩的工程地质和水文地质条件等自然因素有关,而且与硐室的断面形状、施工方法以及支护形式等人为因素有关。近十年来,硐室施工中采用了光爆锚喷技术,光面爆破使硐室断面成形规整,减轻了对围岩的震动破坏,有利于提高围岩的稳定性;支护多采用锚、喷、网、砌复合支护形式和二次支护技术。此外,还采用了反钻机、液压滑升模板等先进的设备和工艺,硐室施工的机械化水平大大提高。

0.3 主要研究内容

1955年我国引进冻结法凿井技术以来,由于该法在冲积层中凿井安全可靠因而迅速推广,逐步成为主要的建井方法。随地层复杂程度的增加,在冲积层中进行冻结法凿井的工程实践中出现一些新问题,这些问题集中在作为临时支护的冻结壁和作为永久支护的井壁(常被简称为“两壁”问题)上,亟待在井壁和冻结壁的设计理论和施工关键技术取得突破。

安全生产对井壁的要求:应有足够的强度和不渗漏水(要求表土段井壁漏水量小于0.5

m^3/h)。浅表土层(一般深度在 200 m 以内)工程实践反映出井壁强度无大问题,主要是渗漏水不能达标。随表土深度增加,井壁渗漏更加严重。实测与实验研究发现:冻结井壁由于温度应力产生裂缝,在冻结壁解冻后漏水。冻结壁需在低温下才能保持强度,而井壁混凝土材料需在正温下才能保持强度增长,这个“冷和热”的矛盾说明:冻结井壁强度和稳定性不只是力学问题,还有热学问题和力学与热学耦合作用问题。不只有理论问题,还有在科学理论指导下实现工程要求的技术和工艺问题。这些问题随冻结深度的增加而变得复杂,其难度剧增。

冻结壁用做凿井期的临时支护。在浅表土中水平地压较小,冻土属于弹性材料。随着表土厚度加大,水平地压增加,冻土进入弹塑性或黏塑性阶段,塑性变形加大。为提高冻结壁的强度而需降低冻结壁温度,这加大了“冷和热”的矛盾。为保持冻结壁的强度和稳定性必须增大冻结壁厚度,因而带来厚冻结壁热学理论和技术的新问题。工程中冻结壁塑性变形给外层井壁施加了很大的冻结压力而造成井壁破坏、甚至工程失败等工程事故。冻结壁研究的是力学课题;也是有相变条件的不稳定导热并伴有水迁移的热学课题;又是有明显的力场、温度场、湿度场耦合作用的力学、热学及其耦合作用的复杂课题。

到目前为止,采用冻结法建成的矿井中,冲积层深度超过 400 m 者国内很少,世界范围内也为数不多,在国内外尚未见到关于复杂条件下井筒施工成套技术的完整、全面研究成果。本课题从技术与工程准备、关键技术攻关、施工技术、管理技术研究与施工组织等方面系统研究了复杂条件下井筒施工成套技术,所取得的技术成果有广泛的推广前景和重要的借鉴意义。为此,本课题主要研究内容如下:

0.3.1 复杂条件下的矿井设计

巨野矿区煤层开采条件复杂,冲积层厚度大,煤层开采深度大,地压、水、地温等灾害严重。在井筒建设中,必须要解决“过表土、防治水、井下降温”等关键技术问题。巨野矿区的建设,在煤炭行业具有典型代表特征。主要原因有:

(1) 在深井特厚表土层条件下凿井,井筒投资高、工期长,造成井田内井筒数目难以增加,井筒服务半径大,安全生产系统复杂,矿井通风线路长,通风阻力高,安全系统不可靠,矿井设计生产能力得不到充分发挥。

(2) 基岩含水层涌水量增大,水压升高,且多为高角度裂隙水和孔隙水,井筒施工中防治水难度大。临近的龙固、郭屯等煤矿均因为基岩涌水量大,防治水效果差而出现了工程延搁,甚至出现过淹井事故。

(3) 热害治理、综采综掘、巷道支护等技术的发展和应用,对安全高效矿井的建设和生产也会产生较大影响。

因此在矿井设计中,结合赵楼煤矿的工程特点和地质条件,就与井筒建设相关的矿井设计内容展开研究,主要包括井口位置确定,井筒数量确定,建设工期安排,井筒开工顺序与施工方法以及复杂条件下井筒建设成套技术的开发与应用等内容,对这些内容提前攻关研究,以确保安全生产。

0.3.2 复杂条件下冻结壁设计理论与形成维护技术

(1) 深厚表土冻结壁设计理论

随着冲积层深度的增加,冻结壁厚度随之增大。依据已有的几种冻结壁设计理论,其计算结果间的差异也越来越大。如前文所述,对于冲积层厚度为 567.7 m 的龙固煤矿副井^[14],采用多姆克公式、里别尔曼公式和德国的经验公式计算^[16],冻结壁厚度分别为 20 m、10 m 和 14 m。各公式计算结果间的巨大差异,使得冻结设计难以找到切实的计算依据。冻结壁厚度决定了冻结管的布置方式,我国曾经设计的冻结壁最厚为 7 m,两圈管即可实现土体冻结;若冻结壁厚度增大到 10 m 以上,则需考虑布置三圈或三圈以上的冻结管。此外,冻结费用与冻结壁厚度关系密切。因此,急需获得深厚冲积层冻结壁设计理论。

(2) 三井共站冻结的优化设计

地层冻结时,冻结的初期地层原始温度最高,盐水与地层温差最大(最大可超过 60℃),那么此时冻结管与土层热量交换最激烈,需冷量也是最大的;随着冻结的进行,地层温度降低,盐水与土层温差逐渐减小,热量交换也逐渐减弱,需冷量减小。由此可见冻结施工中最大冷负荷出现在冻结的初始阶段,采用三井共站冻结时可通过调节三井的开机时间,合理的避开最大冷负荷,使冻结站的容量既能达到最大需冷量的要求,又不需要过多的设备投入,故可以开展三井共站冻结的优化设计研究。

(3) 大厚度低平均温度冻结壁形成与维护技术

深井冻结可供选择的方案很多,如局部冻结、差异冻结、分段冻结、一次冻全深等,相应的工艺参数范围也变化很大。不同的方案和工艺参数都可达到对冻结壁温度场的要求,但花费的代价会相差很大。因此必须在综合考虑冻结施工工艺水平、井筒掘砌施工水平、施工安全的条件下,对冻结工艺和冻结方案进行优化,以期用较小的时间和费用达到安全、快速施工的目的。对于复合的多圈管冻结方案与冻结工艺的优化研究在国内外均尚未进行过。

0.3.3 复杂条件下冻结井壁掘砌施工技术

(1) 冻结法凿井机械化施工技术

立井冻结法施工井筒的表土段多采用人工挖掘法施工,不但用人多、劳动强度大、压风及工器具消耗量大,而且工效低、速度慢、安全性差,严重制约了冻结表土段施工的速度。因而需要研究冻结表土段挖掘与装罐的机械化作业,降低工人的劳动强度和用工量,提高挖掘效率;从而改变我国在立井冻结表土段多采用人海战术施工的历史,完善立井机械化配套装备,填补我国在立井冻结表土段机械化施工的空白,提高冻结表土段的施工速度。

(2) 冻结法凿井信息化施工技术

监测技术是信息化施工技术的基石。在我国冻结施工领域,对温度场、冻结壁相对位移、井壁变形与受力等均进行过现场测试研究,但对冻结壁的绝对位移、冻结管变形与受力、冻结壁的超前变形、井壁在冻土融化及土体疏水沉降过程中的受力与变形等方面的测试或监测技术尚未开展过研究。因此,为保证特厚冲积层中冻结井筒施工的安全,以及为检验冻结壁与井壁的设计理论,应在井壁与冻结壁综合监测技术及系统方面开展研究工作。后面将对复杂条件下冻结壁温度和变形的超前预测以及冻结壁发育状况的地质雷达检测独立成章分别介绍。

(3) 冻结井筒高强混凝土施工技术与工艺

对于深井冻结井壁,其结构和材料应随深度不同而变化。相同的材料、不同的结构,或相同的结构、不同的材料所取得的效果可能不同,造价更不相同。因此合理的井壁结构意味

着巨大的经济效益。其中双层钢筋混凝土井壁技术最成熟,且价格低廉,建议优先采用。

我国冻结井壁材料主要是 C50 以下的混凝土,而深井冻结壁中要用到 C65 以上的高强混凝土。在冻结井筒的恶劣施工环境下,混凝土(特别是高强、高性能混凝土)的性能与施工时的配方和施工环境有关,故必须结合井壁施工工艺,研究测试其性能。将这样所得的性能参数用于井壁设计计算才能得到正确的结果。

在深部,冻结壁的井帮温度将在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下(井内的空气温度也很低),而对现浇混凝土的强度却要求达到 C65 以上。这样,低温环境与强度增长的要求之间就产生了矛盾。因此,必须研究该种工况条件下高强混凝土的配方与施工工艺。

(4) 复杂条件下井筒基岩段防治水

赵楼煤矿基岩段含水层层数多,涌水量大,单层岩层涌水量最大约 $110\text{ m}^3/\text{h}$,合计涌水量达 $687.8\text{ m}^3/\text{h}$,且多为高角度裂隙水,治理难度大。

科学合理地解决基岩段的透水问题,是立井井筒建设的关键技术。基岩含水层可分为风化基岩段和含水岩层段。对于风化基岩段设计采用冻结法止水,含水岩层则采用工作面注浆法通过。冻结与注浆相结合的基岩段止水的关键在于,风化基岩段的冻结壁设计和基岩含水层的注浆施工技术。

0.3.4 复杂条件下井筒施工的相关工程

硐室施工大多具有大、高、难的特点,大,即硐室规格尺寸大,断面积有几十甚至上百平方米;高,即工程质量要求高,硐室服务年限长,结构复杂,形态各异,规格不一。有的为了安装机电设备,需构筑设备基础、管缆沟槽,安设起重梁等,预留孔和预埋件不仅数量多、规格杂,位置也要准确。特别是安装机电设备的硐室,以及爆破材料库、消防材料库等还要求具有防潮、抗渗能力;难,即施工难度大,有些硐室如马头门、箕斗装载硐室等直接与井筒相连,有些硐室如井底煤仓、中央变电所、泵房等大多位于井筒附近,硐室密集,围岩受力状况比较复杂,地应力集中,在施工过程中要经受多次爆破震动,围岩易松动,稳定性降低等,增大了施工的难度。因此,硐室施工是矿井建设中的关键工程。

需根据硐室的断面大小和围岩的稳定情况,合理确定井下硐室的施工方法和支护工艺,并采用反钻机、液压滑升模板等先进的设备和工艺,提高硐室施工的机械化水平。

0.4 本章结论

煤炭是我国的主要能源,而具有特厚冲积层的煤田多地处或临近我国的经济发达地区。仅就目前已列入开发计划的 24 个矿井来说,矿井原煤实际生产能力将超过 7 000 万 t/a,建成后的年煤炭生产总产值约 140 亿元,利润约 50 亿~70 亿元。深厚表土层下煤田的开发,显然可大大缓解我国经济发达地区的能源紧张状况,为我国国民经济的稳定、快速发展做出很大的贡献。

我国有大量的矿物资源,如煤、盐、石膏、磷等被埋藏在深厚的冲积层下,并因建井技术水平的限制而无法开采。本书的研究成果能为井工开发我国特厚土层下的矿物资源扫除一个最大的障碍——建井技术难题。