

深厚冲积层 冻结法凿井理论与技术

程桦 著



科学出版社

深厚冲积层冻结法凿井 理论与技术

程 桦 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对黄淮地区(特别是两淮地区)深厚冲积层冻结法凿井存在的理论与关键技术问题,系统总结了作者及其学术团队二十多年在该方面研究成果。全书共十二章,主要内容包括:通过大量的试样室内试验,分析深厚冲积层土质物理特性、冻土力学与变形性质;采用理论分析、模型试验和数值模拟相结合的方法,揭示深井多排孔冻结温度场形成规律、冻结壁的力学特性和变形特征、冻结壁与井壁共同作用机理、冻结压力形成机制和分布规律;提出满足不同水文与工程地质条件的新型冻结井壁结构形式,建立新型井壁结构设计计算方法;介绍研究成果在深井冻结法凿井成功应用的典型案例。

本书可供矿井建设工程领域科研、设计、施工人员以及高等院校相关专业教师和研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

深厚冲积层冻结法凿井理论与技术/程桦著. —北京:科学出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-03-046063-9

I. ①深… II. ①程… III. ①冲积层-冻结法(凿井)-研究 IV. ①TD265.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 249612 号

责任编辑:李 雪 / 责任校对:李 影

责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张:31 1/2

字数:723 000

定价:218.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国河北、河南、山东、安徽中北部、江苏北部等中东部大型煤田煤系地层均被新生界松散冲积层所覆盖,其中华北地区的开滦煤田、邢台煤田从 20~545m 不等;华东地区的淮南、淮北、兖州、徐州、大屯、巨野等矿区从 20~776m 不等,且以淮南和巨野矿区最为深厚。该新生界松散冲积层主要由黏土、砂土、砂质黏土层组成,其下部有厚度不等若干富含水层。在上述地区进行煤炭开发,立井井筒必须穿越该富水松散冲积层。

冻结法凿井是采用人工制冷的方法,在井筒周围含水岩土层形成封闭的冻结壁,以抵抗水土压力,隔绝地下水和井筒的联系,确保井筒掘砌安全的一种特殊工法。1880 年德国工程师 Poetsch 提出了人工地层冻结原理,并于 1883 年成功应用于德国阿尔巴里德煤矿井筒施工。其后,随着人工制冷技术的发展和冻结施工工艺日趋完善,该工法已成为矿山井筒穿越不稳定含水地层最有效的施工方法之一。

我国自 1955 年从波兰成功引进冻结法凿井技术与装备以来,经过 60 年来的发展,走过了从无到有,规模从小到大,冻结深度从浅到深几个阶段。至 20 世纪 80 年代末,采用冻结法凿井的矿区已扩展到邢台、淮北、淮南、大屯、兖州、徐州、平顶山、永夏等,冻结法通过的冲积层厚达 374.5m(永夏矿区陈四楼煤矿副井),掘进直径达 11.5m(淮南矿区潘二煤矿副井)。1998 年以后,随着我国经济的快速发展,迎来了有史以来最大规模的煤矿新井建设高潮,期间,冻结井穿越的冲积层厚度不断加深,如山东济西矿(458m,2003 年)、安徽丁集矿(530m,2005 年)、山东龙固矿(567.7m,2005 年)、山东郭屯矿(587m,2007 年)、安徽口孜东矿(573m,2008 年)等。

冻结法凿井穿越的地层水文地质与工程地质条件复杂、多变,具有强烈的不确定性,因设计与施工失当引发的诸如冻结壁失稳、井壁破损、淹井等重大事故时有发生。特别是 20 世纪 90 年代末以来,随着井筒穿越的冲积层厚度不断加深、井型加大,由此产生的深厚冲积层(350m 以深)人工冻土物性参数与力学特性、冻结温度场形成规律、冻结壁稳定性、外荷载、井壁结构设计等基础理论严重滞后工程实践;冻结孔成孔、冻结壁形成与控制、井筒掘砌等关键技术有待解决;凿井施工装备无法满足安全、快速施工要求。

本书力求在原 350m 以浅冻结凿井法理论与技术基础上,构建深厚冲积层冻结法凿井理论与技术体系框架。但是,由于冻结法凿井面临的工程对象——富水深埋岩土的各种性质具有强烈的不确定性,影响深埋人工冻土物理与力学性质、冻结温度场形成与分布、冻结壁与井壁共同作用、冻结压力等因素众多,相关的理论和技术问题还有待进一步研究揭示。对此,长期以来国内中国矿业大学、中煤科工集团天地科技建井研究院等高校、科研、设计及施工单位的同仁与专家,也开展了大量研究和工程实践工作,取得了丰硕成果,为推动我国冻结法凿井技术进步做出了重要贡献。由于本书作者知识和认识的局限,书中内容肯定还有不妥和商榷之处,恳请同行专家不吝赐教与指正,以期共同丰富和完善深厚冲积层冻结法凿井理论与技术体系,推动我国建井科技的不断进步。

书中内容凝聚了研究团队成员近 20 年来的心血与付出。借此机会,首先感谢恩师孙文若教授给予的培养与指导;感谢姚直书教授、荣传新教授在科研项目技术负责和研究团队引领方面做出的贡献;感谢蔡海兵教授、王晓健副教授、宋海清讲师、黎明镜讲师和郑腾龙讲师在科研项目参与中所做的相关研究工作;感谢邓昕工程师、李文生同志在现场实测和实验室试验方面付出的智慧和辛勤劳动;感谢淮南矿业(集团)有限责任公司、淮北矿业(集团)有限责任公司、皖北煤电集团有限责任公司、国投新集能源股份有限公司、煤炭工业合肥设计研究院、中煤矿山建设集团有限公司等相关单位,长期以来对我们研究团队的大力支持和厚爱;最后,还要感谢马茂艳博士、姚亚锋博士等为本书所付出的努力。

本书的出版得到国家自然科学基金项目(No. 51474004、No. 51374010)的资助,作者在此深表谢意。



2016 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 总论	1
1.1 冻结法凿井应用概况	1
1.1.1 国外	1
1.1.2 国内	2
1.2 人工冻结温度场	5
1.3 冻土力学性质	6
1.4 水分迁移与冻胀	9
1.5 冻结壁力学特性	11
1.6 冻结法凿井井壁结构	13
1.6.1 钢筋混凝土井壁	14
1.6.2 塑料夹层双层钢筋混凝土复合井壁	15
1.6.3 竖向可缩性复合井壁	15
1.7 我国深厚冲积层冻结法凿井技术现状	16
1.7.1 冻结方案与施工技术	17
1.7.2 冻结立井掘砌技术	23
参考文献	25
第 2 章 深厚冲积层土质物理特性	31
2.1 我国第四系松散层分布概况	31
2.1.1 青藏高原地区	31
2.1.2 西北地区	31
2.1.3 南方地区	31
2.1.4 东北地区	31
2.1.5 北方地区	32
2.1.6 华北地区	32
2.2 华北平原煤田深厚冲积层分布与特征	36
2.3 黄淮地区冲积层物理性质	37
2.3.1 松散土的颗粒成分及分类	37
2.3.2 松散土的黏土矿物成分	38
2.3.3 密度与孔隙比	38
2.3.4 松散土层的含水量	39
2.3.5 膨胀性与崩解性	42
2.4 冻土的基本成分与形成	43

2.4.1	冻土的基本成分	43
2.4.2	冻土的形成	46
2.5	冻土的热物理特性	49
2.5.1	土的冻结温度	49
2.5.2	质量比热容和容积热容量	54
2.6	人工冻土冻胀特性及主要影响因素	59
2.6.1	土分散性	60
2.6.2	土颗粒矿物成分	60
2.6.3	土含水量	60
2.6.4	温度、干密度	62
2.6.5	冻结过程中的冻胀力	64
	参考文献	65
第3章	人工冻土力学特性	66
3.1	概述	66
3.1.1	冻土力学性质特点	66
3.1.2	冻土的流变特性	67
3.1.3	冻土流变机理	69
3.2	人工冻土单轴抗压强度	69
3.2.1	冻土抗压强度与温度	70
3.2.2	冻土抗压强度与加载方式	72
3.2.3	冻土抗压强度与土性	74
3.2.4	冻土抗压强度与含水量	77
3.2.5	冻土抗压强度与干密度	77
3.3	人工冻土的弹性模量与泊松比	79
3.3.1	冻土的弹性模量	79
3.3.2	冻土泊松比	80
3.4	人工冻土三轴抗剪力学特性	81
3.4.1	人工冻土三轴抗剪强度	81
3.4.2	人工冻土三轴抗剪力学特性影响因素	83
3.5	人工冻土的蠕变特性	88
3.5.1	人工冻土蠕变试验	88
3.5.2	人工冻土蠕变物理意义	91
3.6	人工冻土蠕变本构关系	92
3.6.1	维亚洛夫本构模型	92
3.6.2	西原本构模型	92
3.6.3	改进的西原模型	93
3.6.4	冻土的有限变形本构关系模型	100
3.6.5	人工冻土蠕变模型的识别与参数反演	105

参考文献	111
第 4 章 深厚冲积层人工冻结壁温度场	113
4.1 冻结壁温度场分析理论基础	114
4.1.1 单管冻结的温度场理论解	114
4.1.2 直线单排管冻结壁温度场理论解	114
4.1.3 环形多排孔冻结温度场的数学模型	115
4.2 人工冻结壁温度场形成规律试验研究	118
4.2.1 冻结温度场模型试验相似准则	118
4.2.2 双排管冻结温度场物理模型试验	119
4.2.3 多排管冻结温度场物理模型试验	124
4.3 多圈孔冻结壁温度场数值分析	138
4.3.1 冻结温度场数值模拟概述	138
4.3.2 深厚冲积层冻结壁温度场数值模拟研究	141
4.3.3 朱集西矿副井冻结工程实例分析	151
4.4 多圈孔冻结壁温度场分布规律实测研究	160
参考文献	164
第 5 章 深厚冲积层冻结壁强度与稳定性研究	166
5.1 现有人工冻结壁设计理论	168
5.1.1 轴对称平面力学模型计算方法	168
5.1.2 轴对称空间问题力学模型计算方法	169
5.1.3 数理统计法	170
5.1.4 根据测温孔资料推算	170
5.1.5 现有冻结壁设计理论工程应用的对比计算	171
5.1.6 计算结果分析	173
5.2 非均质冻结壁的弹塑性稳定性分析	176
5.2.1 计算模型及基本假设	176
5.2.2 冻结壁应力求解	177
5.2.3 工程算例	179
5.3 冻结壁的黏弹塑性稳定性分析	181
5.3.1 冻结壁的力学模型	182
5.3.2 冻结壁的黏弹塑性分析	183
5.3.3 冻结壁稳定性计算	186
5.4 冻结壁有限变形有限元分析	187
5.4.1 冻土黏弹性有限变形有限元格式	187
5.4.2 冻结壁变形特性数值分析	190
参考文献	202
第 6 章 冻结壁与外层井壁共同作用机理	204
6.1 基于维亚洛夫公式的冻结壁和井壁共同作用理论解	205

6.1.1	力学模型	205
6.1.2	外围土体的弹性分析	205
6.1.3	冻结壁的黏弹性分析	206
6.1.4	外层井壁的弹性分析	209
6.1.5	冻结压力的理论计算公式的评价	211
6.2	基于广义开尔文模型的冻结壁和井壁共同作用解析解	213
6.2.1	力学模型	213
6.2.2	计算假设	213
6.2.3	外层土体位移场计算	213
6.2.4	冻结壁位移场的黏弹性求解	214
6.2.5	外层井壁位移场的弹性求解	217
6.2.6	冻结压力求解	217
6.2.7	工程实例分析	218
6.3	冻结壁与外层井壁共同作用有限元分析	219
6.3.1	冻土流变本构模型及其在 ABAQUS 中的实现	219
6.3.2	计算模型及参数	231
6.3.3	冻结温度场模拟	233
6.3.4	井筒开挖模拟	235
6.3.5	井壁砌筑模拟	237
	参考文献	241
第 7 章	冻结井壁外荷载	243
7.1	冻结井壁外荷载分类	244
7.2	井壁自重	244
7.3	水平地压	244
7.3.1	普氏地压公式	244
7.3.2	秦氏地压公式	245
7.3.3	索氏地压公式(悬浮体地压公式)	246
7.3.4	重液地压公式	246
7.3.5	圆筒形挡土墙地压公式	246
7.3.6	夹心墙地压公式	247
7.4	水压力	247
7.5	竖向附加力	248
7.5.1	疏水沉降地层中井壁附加力的理论分析	248
7.5.2	冻结壁解冻期井壁附加力的理论分析	254
7.5.3	井筒保护煤柱开采下井壁附加力的理论分析	264
7.6	温度应力	265
7.6.1	井壁内外温差引起的自生温度应力	265
7.6.2	井壁降温引起的约束温度应力	266

7.7 冻结压力	268
7.7.1 冻结压力的形成及影响因素	268
7.7.2 冻结压力的经验公式	268
7.8 其他荷载	270
7.8.1 不均匀压力	270
7.8.2 外层井壁吊挂力	271
7.8.3 注浆压力	271
参考文献	271
第8章 深厚冲积层冻结压力实测研究	273
8.1 概述	273
8.2 冻结压力监测	273
8.2.1 监测水平	273
8.2.2 元件布置	275
8.2.3 冻结压力监测结果及其分析	275
8.2.4 冻结压力影响因素的灰色关联分析	286
8.2.5 冻结压力数学计算模型研究	288
8.2.6 计算结果比较分析	292
参考文献	293
第9章 冻结井筒高强高性能钢筋混凝土井壁研究与应用	295
9.1 高强高性能钢筋混凝土井壁试验研究	296
9.1.1 井壁模型设计	296
9.1.2 试验加载装置	298
9.1.3 试验数据量测	299
9.1.4 试验结果及其分析	300
9.2 井壁极限承载力的理论分析	307
9.2.1 本构关系	308
9.2.2 强度准则	308
9.2.3 理论分析	309
9.3 井壁承载力理论分析与实验结果比较	312
9.4 井壁混凝土强度准则研究	312
9.4.1 典型混凝土强度准则	313
9.4.2 井壁结构混凝土强度准则	313
9.5 冻结井筒高强高性能钢筋混凝土井壁工程应用研究	316
9.5.1 工程概况	316
9.5.2 井筒工程地质及水文地质特征	316
9.5.3 井壁结构形式选择	318
9.5.4 控制层位井壁厚度估算	319
9.5.5 高强高性能钢筋混凝土井壁设计优化	320

9.5.6 冻结井筒高强高性能混凝土的配制与工程应用	325
参考文献	333
第 10 章 冻结井筒高强钢筋混凝土预制弧板井壁研究	335
10.1 高强钢筋混凝土预制弧板井壁接头形式及垫层材料研究	335
10.1.1 高强钢筋混凝土预制弧板井壁接头形式	335
10.1.2 高强钢筋混凝土预制弧板井壁接头垫层材料	336
10.2 高强钢筋混凝土预制弧板外壁试验研究	337
10.2.1 高强钢筋混凝土预制弧板外壁单体构件试验	337
10.2.2 高强钢筋混凝土预制弧板井壁整体结构试验	341
10.3 预制弧板井壁接头力学特性研究	346
10.3.1 预制弧板井壁接头力学特性试验研究	346
10.3.2 预制弧板井壁接头力学特性理论分析	364
10.3.3 预制弧板井壁力学特性数值分析	368
参考文献	379
第 11 章 冻结井竖向可缩性井壁结构的研究与应用	380
11.1 可缩性井壁结构工作原理和结构形式	383
11.1.1 可缩性井壁结构工作原理	383
11.1.2 可缩性井壁接头结构形式	384
11.2 可缩性井壁设计原则及方法	386
11.2.1 可缩性井壁设计原则	386
11.2.2 可缩性井壁接头简化设计方法	386
11.3 疏水沉降地层条件下可缩性井壁的作用机理研究	387
11.3.1 有限元计算模型	387
11.3.2 地层疏水固结的等效处理	388
11.3.3 工况模拟	389
11.3.4 竖向刚性井壁与地层共同作用分析	389
11.3.5 竖向可缩性井壁与地层共同作用分析	390
11.4 可缩性井壁接头力学特性模型试验研究	392
11.4.1 模型试验方案	392
11.4.2 模型试验相似准则	393
11.4.3 井壁接头模型尺寸	394
11.4.4 模型试验测试方法	394
11.4.5 竖向加载试验结果与分析	394
11.4.6 侧向加载试验结果与分析	396
11.4.7 三轴加载试验结果与分析	398
11.5 可缩性井壁接头力学特性数值模拟研究	400
11.5.1 数值计算模型	400
11.5.2 荷载及边界条件	401

11.5.3 竖向承载力分析结果	401
11.5.4 水平承载力分析结果	402
11.5.5 数值模拟和模型试验结果对比	403
11.6 可缩性井壁接头竖向稳定性数值模拟研究	404
11.6.1 稳定性分析的概念	404
11.6.2 稳定性分析的类型	404
11.6.3 可缩性井壁接头的特征值屈曲分析	405
11.6.4 竖向可缩性井壁接头的非线性屈曲分析	406
11.7 可缩性井壁接头的现场施工技术	408
11.7.1 井壁接头地面焊接	408
11.7.2 井壁接头井下施工	410
11.7.3 施工安全技术措施	412
11.7.4 井壁接头施工效果	413
11.8 可缩性井壁的推广应用	413
参考文献	414
第 12 章 深厚冲积层冻结法凿井典型工程应用	415
12.1 丁集矿冻结法凿井工程	415
12.1.1 工程概况	415
12.1.2 工程地质与水文地质	415
12.1.3 冻结方案	416
12.1.4 冻结孔施工	418
12.1.5 冻结制冷控制	419
12.1.6 井壁结构方案	427
12.1.7 冻结段掘砌施工	428
12.1.8 井壁内外力监测	430
12.2 口孜东矿冻结法凿井工程	441
12.2.1 工程概况	441
12.2.2 工程地质与水文地质	441
12.2.3 冻结方案	442
12.2.4 冻结孔施工	445
12.2.5 冻结制冷控制	445
12.2.6 井壁结构方案	450
12.2.7 冻结段掘砌施工	451
12.2.8 井壁内外力监测	456
参考文献	471
附表	472

第 1 章 总 论

冻结法凿井是在井筒开挖前,用人工制冷的方法,暂时将井筒周围的含水岩土层冻结成封闭的冻结壁,以抵抗水土压力,隔绝地下水和井筒的联系,然后在冻结壁的保护下,进行井筒掘砌施工的一种特殊方法。

自 1883 年德国工程师 Poetsch 提出人工地层冻结原理并成功应用于阿尔巴里德煤矿 9 号井凿井工程之后,随着人工制冷技术的发展以及冻土热力学、力学研究的不断深入,冻结施工工艺日趋完善,冻结法施工技术已成为一种可行的和极具竞争力的软土及不稳定含水地层中土层加固、隔水的有效施工方法。人工冻结壁具有隔水性好、适应性强、对环境影响小、支护结构灵活、易于控制等优越性,越来越受到国内外土木工程界的关注,其应用也逐步推广。1955 年我国首次和波兰合作,在开滦林西矿风井采用冻结法。此后,在双鸭山、铁法、开滦、兖州、邯郸、大屯、徐沛、淮北、淮南、平顶山、永夏等主要煤炭基地建设中,冻结凿井法得到了广泛的应用。进入 21 世纪以来,随着我国西部大开发战略的实施,陕西、甘肃、山西、宁夏、内蒙古等地区展开了史上最大规模的煤矿新井建设,冻结凿井法又在该地区含水基岩竖、斜井井筒施工中得到广泛应用。

冻结凿井法在煤矿建设实践中显示了明显的优势,它既能用于不稳定的冲积层,又可用于基岩含水层;既可以应用于立井,又可以应用于斜井及风道口工程,具有防水性好、适应性强、技术可靠、人工冻土自承能力高、工期易于保证等优点,已成为我国在冲积地层和西部地区富(含)水基岩中开凿立井井筒使用最为广泛的特殊施工方法。

由于冻结法凿井穿越的地层水文地质与工程地质层复杂、多变,具有强烈的不确定性,其施工难度不但与水文与工程地质条件、冻结深度以及井筒几何尺寸等客观条件有关,而且取决于设计理论、施工关键技术与工艺以及凿井施工装备等。在理论研究方面,主要包括人工冻土物性参数与力学特性、冻结温度场形成规律、冻结壁稳定性、井壁结构设计理论等;在施工关键技术与工艺方面,主要涉及冻结孔成孔、冻结壁形成与控制、井筒掘砌以及施工装备等。纵观冻结法凿井 130 多年的发展历史,虽然其源于欧洲,先于我国 70 余年,但 20 世纪 70 年代以后,随着欧洲发达国家能源结构的调整,煤炭行业发展停滞,相关的理论与技术研究几近停顿。而我国是富煤贫油的国家,煤炭占一次能源的比例长期维持在 70% 左右,尤其是“十一五”以来,随着我国经济快速发展,对煤炭需求大幅增长,新建煤矿多为深埋大型矿井,冻结法凿井设计理论与技术又有了较大进步。

1.1 冻结法凿井应用概况

1.1.1 国外

德国于 1883 年首先采用冻结法凿井获得成功。1958 年前,鲁尔矿区施工的 250 个

井筒多数采用冻结法施工。1981年施工的瓦尔朱姆矿维尔德矿风井,井深1060m,净直径6.0m,冻深581.0m。据1983年报道,伏尔德矿的冻结深度600m,是当时德国冻结最深的井筒。波兰于1885年开始采用冻结法凿井,至20世纪70年代末已建成立井井筒250个,其中卢布林矿区最大冻结深度为760m。

英国于1909年开始采用冻结法凿井,冻结砂岩含水层。20世纪70年代初建成的博尔比钾盐矿进风井,净直径5.0m,冻结深度930m,采用双层钢板混凝土复合井壁。20世纪70年代末建设的赛尔比煤矿,年产商品煤1000万t,5对立井10个井筒和2个提煤斜井均采用了冻结法施工。

苏联于1928年开始采用冻结法凿井,是世界上采用冻结法施工规模最大的国家之一,施工约500个,雅可夫列铁矿2号罐笼井冻结深度620m,是最深的冻结井筒。加拿大萨尔修切温钾盐1号矿,最大的冻结深度915.0m(表1-1和表1-2)。

表 1-1 国外井筒最大冻深一览表

项目	英国	加拿大	波兰	苏联	比利时	德国
最大冻深/m	930	915	860	800	638	628

表 1-2 世界各国深冻结井一览表

国名	矿名	冻结深度/净直径 /m	冻结方案	施工时间
英国	博尔比钾盐矿	930/5.5	局部冻结岩石(590~930m)	1969~1974年
加拿大	萨尔修切温钾盐1号矿	915/4.88	差异冻结(610m,915m)	1954~1958年
波兰	苏瓦乌克铁矿	860	一次冻全深	1970年
比利时	候泰灵矿2号井	638/4.9	一次冻全深	1927~1933年
苏联	雅可夫列铁矿2号罐笼井	620/7.5	全段冻结(0~390m,390~620m)	1976~1980年
德国	维尔德矿风井	582/6.0	一次冻全深	1986年
中国	甘肃核桃峪矿副井	950/9.0	一次冻全深	2011年

国外冻结法凿井按其地质条件可分为两类:一类是地质条件较好,但深部地层含水性或岩层不完整,采用深部局部冻结或差异冻结。另一类是第三、第四系地层特厚,条件复杂,要对其全深冻结。需要指出的是,表1-2所列的各井筒所穿越的地层均以基岩为主,属基岩冻结范畴。

1.1.2 国内

纵观我国冻结凿井法半个多世纪以来从无到有,规模从小到大,冻结深度从浅到深的发展,经历了探索、推广应用、巩固提高、创新发展四个阶段。

新中国成立初期,煤矿建设施工只能采用板桩法、料石沉井法穿过井筒上部近10m深的不稳定表土层,以至于当时不少井筒施工因遇到表土流沙层而陷入困境。例如,汾西河溪沟矿井井筒采用短段吊挂井壁施工失败,且发生了人身伤亡和淹井事故;有些井筒开凿后遇到流沙层面被迫淹井停工等。1955年,我国引进波兰冻结法凿井技术与装备,由

开滦煤矿与波兰凿井队协作,在林西风井首次采用冻结法凿井获得成功。随后又在开滦唐家庄风井,当时在苏联专家的指导下,采用国产设备,这是我国自主成功设计施工的第一个冻结井筒,为我国冻结法凿井技术的应用培养技术力量打下了基础。

在 20 世纪 70 年代以前,我国对冻结法凿井技术进行完善和推广。在使用地区上,由原先的开滦矿区扩展到邢台矿区、淮北矿区、淮南矿区等,在冻结深度上,由 100m 左右发展到 260m,不少矿区的立井井筒全部采用该法。但是随着冻结深度的增加,带来了诸如冻结孔造孔技术,冻结壁厚度设计与变形,掘进段高的合理确定,井壁破裂及漏水等新问题。由于当时国内对冻结法凿井理论与技术缺乏深入、系统的研究,工程经验少,尽管试图从国外(苏联、联邦德国、波兰等)的资料与经验中找到解决问题的办法,但因水文与工程地质的差异,收效甚微,亟待研究解决。

社会需求是推动科学技术发展的动力。从 20 世纪 70 年代中期开始,淮南矿区和淮北矿区(以下简称两淮地区)、大屯矿区、兖州矿区、徐州矿区和平顶山矿区(东部)等开展了大规模的矿井建设。这些矿区均被深厚冲积层所覆盖,除少数采用沉井法施工以外,均采用了冻结法施工。如河南省永夏矿区陈四楼煤矿副井(冲积层厚达 374m);安徽淮南矿区潘二煤矿副井(成井直径达 8m,掘进直径达 11.5m)。期间,冻结管断裂、冻结壁变形大、井壁裂漏等问题一直困扰着国内建井界。直至 20 世纪 70 年代末期,在原两淮煤炭指挥部组织领导下,经国内科研单位、高校以及相关单位有关专家共同攻关,揭示了井壁裂漏机理后,通过采用塑料夹层钢筋混凝土双层井壁结构,有效制止了井壁的裂漏,解决了当时突出的井壁漏水问题。

20 世纪 80 年代初,我国冻结法凿井技术、装备水平与 50 年代相比,有了飞跃的进步。据不完全统计,1953~1980 年,采用特殊凿井法施工的井筒共有 346 个,其中采用沉井法 114 个,采用钻井法 25 个,采用混凝土帷幕法 20 个,采用冻结法 187 个,占总数的 54%(图 1-1)。

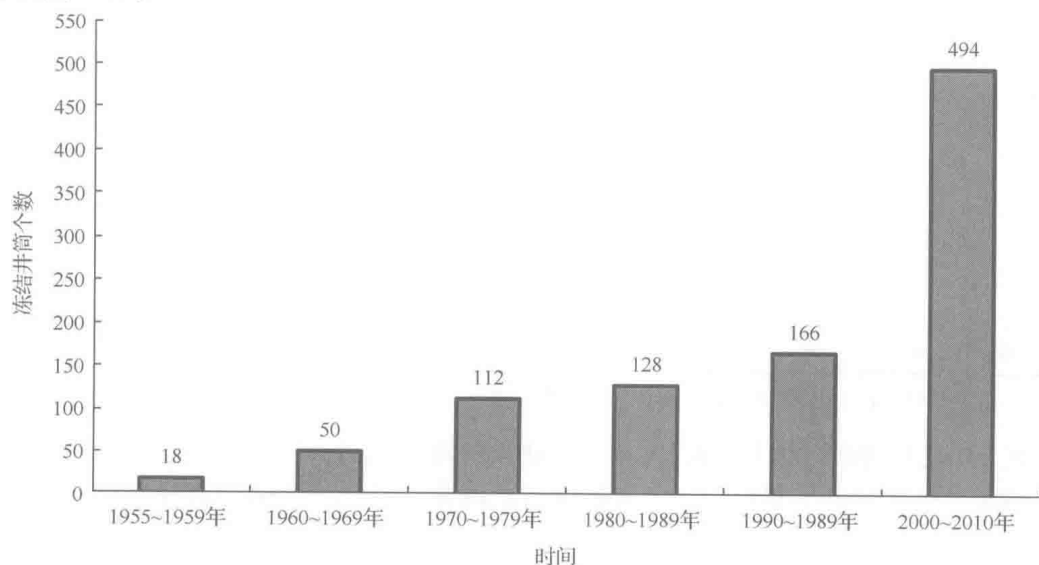


图 1-1 我国冻结法凿井施工规模增长状况^[1]

1998年以后,随着我国经济的快速发展,首先,在山东、安徽、河南、河北等地掀起了有史以来最大规模的煤矿新井建设高潮,期间,冻结井穿越的冲积层厚度不断加深。以黄淮地区为例,从山东济西矿(458m,2003年),安徽丁集矿(530m,2005年)、龙固矿(567.7m,2005年)、郭屯矿(587m,2007年)、口孜东矿(573m,2008年)可看出,在短短5年内,我国中东部地区冻结立井穿越冲积层最大厚度增加了近110m。

其后,随着我国西部大开发战略的实施,西部煤炭资源开发如火如荼,在陕西北部、宁夏、内蒙古鄂尔多斯、新疆等地区,已开工建设多个矿区。与中、东部地区新井建设相比,这些新建煤矿具有井型大、新生界地层薄(多为30m以浅)、矿井穿越地层以白垩系、侏罗系为主,开拓方式立井和斜井并重等特点。

图1-1、表1-3所示为我国1955~2010年以来冻结法凿井施工规模、冻结深度等。统计表明,1955~2010年,全国采用冻结法施工的立井井筒968个,累计井筒总长度约22.7万米。其中在21世纪头10年建成立井井筒494个,“十一五”时期施工了254个。20世纪冻结深度不超过500m,“十一五”时期冻结深度增加很快,东部地区冲积层中最大冻结深度800m(淮南国投新集杨村煤矿,2010年),西部地区基岩含水层中最大冻结深度850m(陕西高空堡矿副井,2010年)。21世纪头10年,500~800m深井冻结施工了100个井筒,其中约700m的11个,约800m的4个。

表 1-3 1955~2010 年我国冻结法凿井施工规模及冻结深度统计^[1]

项目		施工规划/个						小计
		1955~ 1959 年	1960~ 1969 年	1970~ 1979 年	1980~ 1989 年	1990~ 1999 年	2000~2010 年 （“十一五”）	
冻结 深度 /m	<100	11	25	26	34	32	43(22)	171
	>100	7	18	44	50	71	109(66)	299
	>200		6	32	26	28	120(61)	212
	>300		1	9	16	30	76(39)	132
	>400			1	2	5	46(19)	54
	>500						56(35)	56
	>600						29(24)	29
	>700						11(7)	11
	>800						4(4)	4
合计		18	50	112	128	166	494(277)	968
最大冻结深度/m		162	330	415	435	400	850	

注:()内数字为“十一五”(2006~2010年)时期的井筒个数。

表1-4表明,我国在“十一五”期间开工建设的许多井筒深度超过了波兰、俄罗斯、德国等国家。2011年开工建设的甘肃省核桃峪矿副井,井深1005m,净直径9.0m,冻结深度950m,超过英国930m的世界纪录。

表 1-4 2003 年以来部分深厚冲积层冻结法凿井项目统计数据

序号	井筒名称	净直径/m	冲积层厚/m	冻结深度/m	冻结壁厚度/m	冻结孔圈数	施工年份
1	山东张集矿主井	5.5	456.66	583	7.8	3	2009
2	山东张集矿副井	6.5	449.69	615	8.5	3	2009
3	河南赵固二矿主井	5.0	530.5	615/575	7.2	3	2006
4	河南赵固二矿副井	6.9	527.5	628	9.4	3	2006
5	河南赵固二矿风井	5.2	524.5	628/595	7.5	3	2006
6	安徽丁集矿副井	8.0	525.25	565	11.4	3	2004
7	山东郛城矿副井	7.2	536.63	590	11.0	4	2005
8	龙固矿副井	7.0	567.7	650	11.5	3	2003
9	郭屯矿主井	5.0	587.4	702	11.0	4	2004
10	安徽口孜东矿主井	7.5	568.45	737	11.5	4	2005
11	安徽口孜东矿副井	8.0	571.95	620	12.5	4	2005
12	安徽杨村矿主井	7.5	538.25	619/723	10.7	4	2012
13	安徽杨村矿副井	7.5	536.65	687/725	10.6	4	2012
14	安徽杨村矿风井	7.8	538.9	667/800	11.0	4	2012

1.2 人工冻结温度场

由人工冻结法基本原理可知,冻结法施工的成败在于作为支挡结构的冻结壁的可靠性,而冻结壁的力学性能则取决于冻土的力学性能和负温条件。由此可见,要确保冻结壁安全可靠,首先应研究冻结温度场的形成规律,掌握冻土的物理性能,从而为分析冻结壁稳定性提供基础。

人们对冻土温度场的研究已有 160 多年历史^[2],但早期由于相关学科的局限和研究手段的落后,对冻土温度场的认识一直停留在感性阶段。直至 20 世纪早期,苏联成立了冻土委员会以后,才开展了较为系统、广泛的研究。20 世纪中叶(1945~1960 年和 1961~1971 年)又经历了两个较快的发展期,先后开展了与温度场有关的热力学、热物理学、土壤水热改良、工程建筑地基稳定性以及地球表面和岩石圈层的形成等方面的试验研究和以解析解为主的理论计算研究。20 世纪 70 年代以后,计算机和数值方法在苏联冻土研究领域得到广泛应用,有力推动了该学科的发展,使以前许多难以解决的具有复杂几何形状和地质条件、考虑热质交换的非线性问题在深度和广度上都有了新的进展。但真正开始理论性研究并被公认这门学科理论奠基人的是苏联学者 Сумгин,在温度场等热物理研究方面 Куравцев 为杰出代表。

与苏联一样,北美、西北欧的一些国家和地区,由于自然资源开发的需要,也推动了冻土温度场及其相关学科的研究进展。20 世纪初阿拉斯加金矿的开采和 1942 年北美战备公路的严重冻害的出现,促进了对天然冻土温度场理论较全面研究。在加拿大,这方面研究主要起源于对极地多年冻土区石油、天然气等资源的开发。20 世纪 70 年代,这些国家