

李功洲 / 著

深厚冲积层冻结法 凿井理论与技术

Theory and Technology of Mine
Freezing Shaft Sinking in Deep
and Thick Alluvium



科学出版社

深厚冲积层冻结法凿井理论与技术

Theory and Technology of Mine Freezing Shaft
Sinking in Deep and Thick Alluvium

李功洲 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结分析了冻结法凿井在国外、国内应用与发展各阶段主要特点、技术成果、存在的技术问题;系统阐述了我国在冻结壁温度场、井筒地压、冻土物理力学性能试验、冻结器单位热流量、冻结壁径向位移实测与掘砌段高调控、井壁及壁后冻土温度变化特性实测、高强高性能混凝土试验应用等冻结法凿井基础理论及关键技术的研究成果;详细论述了深厚冲积层冻结段井壁结构设计、冻结设计、冻结孔施工、制冷冻结、冻结段掘砌等应用技术;分析和总结了我国深厚冲积层冻结法凿井的技术水平和重大成就。

本书可供从事矿山建设冻结法凿井的科研、设计、教学和施工等单位的技术和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

深厚冲积层冻结法凿井理论与技术=Theory and Technology of Mine Freezing Shaft Sinking in Deep and Thick Alluvium/李功洲著. —北京:科学出版社,2016

ISBN 978-7-03-047109-3

I. ①深… II. ①李… 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(2016)第 002967 号

责任编辑:吴凡洁 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:黄华斌

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 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:35 3/4 插页:3

字数:836 000

定价:258.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

我国有大量的煤炭资源被深厚不稳定冲积层、松软含水基岩等复杂地层所覆盖,井筒要通过这些复杂地层必须要采取特殊凿井方法,冻结法凿井是最主要的特殊凿井方法,占特凿井筒总量的 90% 以上。我国自 1955 年在林西风井成功应用冻结法凿井技术以来,经过科研、院校、建设、施工等有关单位和工程技术人员努力,在冻结法凿井的理论、技术和应用等方面取得了辉煌的成绩和卓越的创见,形成了具有中国特色的冻结法凿井理论和技术体系。

李功洲研究员长期深入科研、生产一线,从事深井冻结凿井的基础理论、工艺、材料到信息化施工和预测预报等方面的研究。他于 1984 年在煤炭科学研究总院北京建井研究所工作后,就参加淮南潘谢矿区谢桥矿副井井筒冻结透水淹井事故处理和谢桥主井井筒加强冻结防止冻结管断裂技术研究工作。之后,在研究潘谢矿区冻结凿井经验教训的基础上,参加国家“七五”科技攻关课题“防止冻结管断裂技术”子课题研究,和我国老一辈工程技术人员一起研究建立冻结壁厚度、掘砌段高、冻结壁平均温度和计算参数优选“四位一体”的冻结壁设计计算体系,并在当时冻结最深的陈四楼副井冻结工程中成功应用,创下 374.5m 冲积层和 435m 冻结段无冻结管断裂、无外层井壁压坏和井壁无漏水的全国纪录,较好地解决了近 400m 冲积层冻结设计和防止冻结管断裂的技术难题,使我国深厚冲积层的冻结法凿井技术水平进入国际先进行列。21 世纪以来,他主持开展的多圈孔冻结“四位一体”冻结壁设计计算体系研究,创新和发展了深厚冲积层冻结壁设计理论体系,有效解决了大于 600m 深厚冲积层冻结壁设计难题,研究成果已在程村主副井、泉店主副风井、城郊西进风井和回风井、顺和主副风井等 14 个 400~500m 以及赵固一矿主副风井和西风井、赵固二矿主副风井等 7 个大于 500m 冲积层的 21 个冻结立井中应用,使我国深厚冲积层冻结设计居国际领先水平。他主持研究提出多圈冻结孔布孔原则和以外圈为主冻结孔圈与冻结工艺的优化组合技术,在试验应用 C60~C100 高强高性能混凝土筑壁材料、冻结法凿井信息化施工监测和工程预报、防止冻结管断裂、井筒外层井壁压坏、内层井壁开裂和安全经济快速施工等方面的研究取得多项科研成果和技术突破。研究成果能紧密结合生产实践,在大量的工程实践中应用,取得重大的经济效益和社会效益,先后获得国家科学技术进步奖二等奖 3 项,省部级和行业科学技术进步奖特等奖 1 项、一等奖 8 项等多个奖项。

系统分析、总结和研究我国冻结法凿井理论、技术成果及其应用经验和教训对该领域的发展和推广具有重要的现实意义。在卷帙浩繁的冻结法凿井资料中研究斟酌,提出工程中安全、经济、实用的理论体系和技术是一件很困难的工作,李功洲研究员结合自身开展深井冻结法凿井理论与技术研究 and 应用的经验和体会,研究和总结性地撰写《深厚冲积

层冻结法凿井理论与技术》。书中介绍了大量工程应用实例、实测数据,许多工程实践作者亲身经历,研究其中,体会深刻,书中理论和关键技术阐述清晰,紧密结合实际,实用性强,是我国论述冻结法凿井,特别是深厚冲积层凿井理论和技术及其应用的难得专著。该书的出版对冻结法凿井理论和技术的发展具有重要的、积极的推动作用,我相信该书系统而丰富的内容和翔实的资料对从事冻结法凿井的科研、设计、教学和施工人员大有裨益。特为之序。



中国工程院院士

2015年12月

序 二

李功洲研究员的新著《深厚冲积层冻结法凿井理论与技术》即将付梓,作者索序于我。我熟悉他 30 余年致力于特殊凿井技术的研究经历,对他长年深入现场进行科技攻关和新技术推广有深刻印象,他的成长过程也折射出八十年代一大批青年科技人员顽强奋斗、为煤炭科技发展执著奉献的足迹,因此欣然为此书提笔作序。

李功洲研究员 1984 年 7 月毕业于中国矿业学院,后分配到煤炭科学研究总院北京建井研究所工作。该所是我国研发推广冻结法、钻井法、注浆法等特殊凿井理论与技术的主要研究单位。他在此工作期间,一直致力于冻结法等特殊凿井理论和技术的研究,近年入职国家开发投资公司后仍潜心该领域的研究和推广应用工作,迄今已 30 余年。

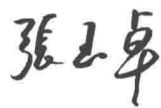
冻结法是井筒通过深厚冲积层、松软富水岩层最主要的凿井方法,涉及传热学、冻土力学、弹塑性力学、结构力学、工程材料等众多学科,是多项理论和技术的综合运用。冻结法凿井理论与技术是矿井建设的研究难题。功洲同志传承了煤炭科学研究总院建井人艰苦奋斗、扎根现场的工作作风,不断积累实践经验、研究创新,在深立井、深长斜井冻结法凿井,特别是深厚冲积层冻结法理论和技术方面取得了多项创新性成果,达到了国际领先水平。他先后参加我国煤矿的多个经典工程,如谢桥矿、陈四楼矿、程村矿、龙固矿、泉店矿、赵固一矿、赵固二矿、新庄矿、马泰壕矿、常家梁矿、杨村矿等数十个矿井井筒的冻结法等特殊凿井技术的攻关;参加和主持完成科研课题 50 余项。

他提出的深厚冲积层多圈孔冻结壁设计计算体系,不仅解决了深厚冲积层冻结壁设计计算理论难题,还解决了长期存在于行业内的冻结壁厚度经典计算公式不能用于深厚冲积层设计计算的疑惑。他在大量现场实测研究分析的基础上,深入开展单圈孔、双圈孔、多圈孔冻结壁温度场理论研究和应用技术开发,开发出以外圈为主冻结孔圈,且与冻结工艺相组合的深厚冲积层多圈孔冻结技术。他提出的冻结壁形成过程中的参数的动态分析方法,实现了冻结过程的精准预测预报,为冻结过程和冻结状态科学合理调控提供依据,为冻结法凿井的安全快速经济施工提供了技术保障。他主持开发的深厚冲积层冻结井筒外层井壁用低温早强低水化热 C60~C100 高强高性能混凝土、内层井壁用低水化热抗裂密实 C60~C100 高强高性能混凝土应用技术,有效地减薄了穿过深厚冲积层井筒井壁设计厚度,显著提高了矿井井筒混凝土耐久性,为更深厚冲积层科学合理应用冻结法凿井技术提供了可行方法。他和他团队的许多研究成果已在工程实践中广泛应用,并被国家、行业标准和规程规范所采纳,10 余次获得国家级省部级和行业的科学技术进步奖,取得了重大经济效益和社会效益。

该书系统总结分析了国内外冻结法凿井理论和技术状况,系统阐述了我国深厚冲积层冻结法凿井基础理论及关键技术的研究成果,并分别论述了这些基础理论和关键技术

在冻结法凿井的冻结段井壁结构设计、冻结设计、冻结孔施工、制冷冻结、冻结段掘砌等关键环节的应用方法。作者还根据多年从事冻结法凿井研究的经验体会,总结和分析了我国深厚冲积层冻结法凿井理论和技术的重要研究成就和国内外技术分析对比。该书不仅较为全面反映了我国冻结法凿井理论和技术发展现状,还凝聚了李功洲研究员在冻结法方面 30 多年的研究成就,具有较高的学术水平和很强的实践应用价值。该书结构完整、资料丰富、内容翔实,书中研究分析了大量冻结工程实例的经验和教训,对今后工程建设具有很好的借鉴作用。该书的出版,将对深厚冲积层冻结法凿井理论和技术的研究和发展产生积极的作用。

作为曾经煤炭科学研究总院的同事,我在此对作者取得的成就表示祝贺。



中国工程院院士

2015 年 12 月

前 言

冻结法凿井技术自 1955 年在林西风井成功应用以来,相继在河北、山西、辽宁、安徽、山东、江苏、河南、黑龙江、内蒙古、江西、宁夏、陕西、甘肃、新疆、吉林 15 个省区推广应用,逐步发展成为我国立井通过深厚冲积层、双深厚地层、含水松软基岩凿井的首选施工方案。截至 2014 年,计冻结立井数超过 1108 个,冻结总深度超过 $29.6 \times 10^4 \text{m}$ 。解决以深厚冲积层施工困难为主的立井冻结最大深度达 800m(李粮店副井、杨村副井),解决以含水基岩施工困难的立井冻结最大深度达 950m(核桃峪副井),穿过冲积层最大厚度为 675.6m(龙固北风井)。

纵观我国 1955~2014 年冻结法凿井的发展过程,我国工程技术人员不懈努力,经历了引进消化、探索改进、提高完善、创新攀高四段历程,形成了具有中国特色的冻结法凿井理论与技术体系。特别是在创新攀高阶段,对深厚冲积层冻结法凿井理论与技术的研究、应用达到国际领先水平。在井壁结构设计与应用,冻结壁设计与应用,冻结钻孔施工,制冻结,冻结壁形成特性工程预报与调控,高强高性能混凝土筑壁材料研究与应用,冻结施工过程温度、位移、压力实测,冻结段安全快速施工等诸多方面取得了举世瞩目的创新成果。创造了冻结法凿井的一个又一个奇迹,刷新了一次又一次记录。系统分析和总结这些为实践证明的成熟理论与技术成果,对科学推广应用业已取得的成果具有重要意义。

作者长期从事深井冻结法凿井的理论和技术研究工作,在深井冻结壁设计理论及其多圈孔冻结工艺、高性能混凝土井壁筑壁材料及施工工艺、冻结信息化施工监测和工程预报、防止冻结管断裂、外层井壁压坏、内层井壁开裂和安全快速施工等方面的研究取得多项重大科研成果和技术突破,参与和主持我国不同时期深井冻结凿井多个经典工程的技术攻关工作,如谢桥矿、陈四楼矿、东荣二矿、东荣三矿、车集矿、程村矿、泉店矿、赵固一矿、赵固二矿、新庄矿、马泰壕矿、常家梁矿等多个矿井的冻结法凿井技术攻关。研究总结深厚冲积层冻结法凿井技术及其应用成果,不仅是总结作者多年来的研究成果和应用情况,也是为了和从事该项技术的同行进行交流,为深井冻结法凿井理论和技术发展做些贡献。

本书第 1 章着力总结分析冻结法凿井在国外、国内应用与发展不同阶段的主要特点、技术成果、存在的技术问题,在对存在问题的分析中不仅为各阶段后续相关理论和技术研究提出方向,还阐述了不同阶段的理论、技术研究和应用中的经验教训。在第 1 章系统总结和 analysis 的基础上,第 2 章论述我国在冻结壁温度场、井筒地压、冻土物理力学性能试验、冻结器单位热流量、冻结壁径向位移实测与掘砌段高调控、井壁及壁后冻土温度变化特性实测、高强高性能混凝土试验应用、液压滑模筑壁等深厚冲积层冻结法凿井基础理论及关键技术的研究成果。第 3~7 章进一步系统论述深厚冲积层冻结段井壁结构设计、冻结设计、冻结钻孔施工技术、制冻结技术、冻结段掘砌技术及其应用等方面的系统成就。第 8 章结合作者研究的经验体会,阐述我国深厚冲积层冻结凿井技术水平和在冻结壁设计

计算体系、冻结段井壁结构选型、高强高性能混凝土技术、多圈孔冻结技术、冻结壁形成特性的预测预报技术、冻结壁径向位移实测与掘砌段高调控技术、冻结段安全快速施工技术及其应用诸方面取得的重大成就。

书中引用和介绍了大量工程应用实例、实测数据,有些数据是许多单位的前辈或同行的工作成果,对这些内容作者力求在书中交代说明;许多是作者亲身经历的科学研究和工程实践的成果,首次以本书内容的形式向大家介绍。在此作者衷心感谢共同参与历次科技攻关和工程实施的科研院校,建设、施工、监理单位的同志;感谢我曾经工作过的煤炭科学研究总院北京建井研究所、北京中煤矿山工程公司、国投煤炭有限公司的各级领导和同事对我的关怀、帮助和支持;感谢介绍冻结法凿井技术入门、长期一起参与科技攻关,并对我专业业务成长起到重要作用的陈文豹、汤志斌教授级高级工程师;感谢一同共事过的邓文芳、刘云涛、张世芳、盛天宝、王景余、陈灿亭、陈章庆、张云利、田培、王玲、高春勇、翟延忠、李明、吴里杨、高木福、刘民东、陈新民、庞荣庆、齐吉龙、段帮奎、刘文民、张步俊、郭永富、卢相忠、李振民、高伟等领导和专家;也感谢同行内多位前辈、朋友的鼓励和支持。

本书在撰写过程中,得到陈文豹教授级高级工程师、汤志斌教授级高级工程师的支持和帮助,得到中国工程院洪伯潜院士、袁亮院士、张玉卓院士的鼓励和指导,还得到北京煤科联应用技术研究所同志的帮助,作者对此表示衷心感谢。全面总结阐述我国 60 年冻结法凿井方方面面的成果是一项浩大的工作,由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者指出。

李功洲

2015 年于北京

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 概论	1
1.1 冻结法凿井的实质	1
1.2 冻结法凿井在国外的应用与发展简况	1
1.2.1 冻结法凿井在国外的应用与发展	1
1.2.2 冻结法凿井鼎盛时期的技术状况	4
1.3 冻结法凿井在中国的应用与发展简况	18
1.3.1 冻结法凿井的四大阶段	18
1.3.2 冻结法凿井不同阶段的技术简况	21
第 2 章 冻结法凿井基础理论与关键技术	55
2.1 冻结壁温度场	55
2.1.1 冻结壁温度场的特点及研究方法	55
2.1.2 中国对深厚冲积层冻结壁温度场的研究	56
2.2 冻结井筒地压	144
2.2.1 水平地压	144
2.2.2 水压	149
2.2.3 冻结压力	150
2.2.4 竖向附加力	160
2.3 冻土物理力学性能	161
2.3.1 研究简况	161
2.3.2 冻土和未冻土的基本物理性质	162
2.3.3 冻土和未冻土的热物理参数	163
2.3.4 冻土的力学性质	165
2.3.5 部分矿井冻土物理力学性能试验结果及应用建议	174
2.4 冻结器单位热流量	175
2.4.1 影响冻结器单位热流量的主要因素	175
2.4.2 国外对冻结器单位热流量的研究简况	177
2.4.3 中国对冻结器单位热流量的试验实测研究	177
2.4.4 主要成果	185
2.5 冻结壁径向位移与外层井壁位移特性	188

2.5.1	冻结壁径向位移实测研究	188
2.5.2	外层井壁位移实测研究	217
2.6	井壁及壁后冻土温度变化特性	228
2.6.1	实测简况	228
2.6.2	井壁及壁后温度变化特性实测成果分析与应用	262
2.7	高强高性能混凝土试验应用	263
2.7.1	混凝土技术的发展简况	263
2.7.2	高强高性能混凝土的原材料组成及基本性能	264
2.7.3	C60~C80 高性能混凝土在冻结段井壁工程中的试验应用	264
2.7.4	C80~C100 高性能混凝土在冻结段井壁工程中的试验应用	295
2.7.5	应用 C100 高性能混凝土技术经济分析	326
2.7.6	高强高性能混凝土施工注意事项	330
2.8	立井液压滑模筑壁技术	335
2.8.1	研究应用简况	335
2.8.2	液压滑模模板筑壁的特点	336
2.8.3	立井液压滑升模板构件及液压动力系统	338
2.8.4	滑模套壁工艺	348
2.8.5	液压滑模筑壁的优缺点及发展方向	355
第3章	深厚冲积层冻结段井壁结构设计	357
3.1	冻结段井壁结构、荷载计算、筑壁材料的演变简况	357
3.1.1	井壁结构的变化简况	357
3.1.2	不同结构的井壁荷载计算原则	360
3.1.3	不同冻结阶段的筑壁混凝土类型及最高标号	360
3.2	不同井壁结构的试验应用	361
3.2.1	钢筋混凝土单层井壁的应用与改进	361
3.2.2	钢筋混凝土双层井壁的试验应用	361
3.2.3	不同结构的外层井壁整体受力性能试验	365
3.2.4	钢筋混凝土塑料夹层井壁的试验应用	381
3.2.5	滑动井壁等的试验应用简况	383
3.3	钢筋混凝土塑料夹层井壁对含水基岩冻结段的适用性	385
3.3.1	内外层井壁受力计算	385
3.3.2	含水基岩冻结段井壁结构的探讨	386
第4章	深厚冲积层冻结设计	388
4.1	冻结法凿井不同阶段的冻结设计简况	388
4.1.1	引进消化阶段的冻结设计	388
4.1.2	探索改进阶段的冻结设计	389
4.1.3	提高完善阶段的冻结设计	393

4.1.4 创新攀高阶段的冻结设计	399
4.2 深厚冲积层冻结方案设计	402
4.2.1 设计要点	402
4.2.2 冻结深度	403
4.2.3 冻结壁设计计算体系	403
4.2.4 冻结制冷设计	412
4.2.5 冻结需冷量、冷却水需用量、盐水循环量的计算与调控	431
4.2.6 冻结法凿井工期分析	434
第5章 深厚冲积层冻结钻孔施工技术	437
5.1 不同发展阶段的冻结钻孔施工简况	437
5.1.1 引进消化阶段钻孔施工	438
5.1.2 探索改进阶段钻孔施工	439
5.1.3 提高完善阶段钻孔施工	441
5.1.4 创新攀高阶段钻孔施工	442
5.2 提高钻孔垂直度和缩短打钻工期的主要措施	448
5.3 特殊地层的冻结钻孔施工技术	452
第6章 深厚冲积层制冷冻结技术	470
6.1 不同发展阶段的制冷冻结技术简况	470
6.1.1 引进消化阶段制冷冻结技术	470
6.1.2 探索改进阶段制冷冻结技术	471
6.1.3 提高完善阶段制冷冻结技术	473
6.1.4 创新攀高阶段制冷冻结技术	473
6.2 创新攀高阶段制冷冻结技术特点	477
6.3 提高制冷冻结技术水平的主要措施	481
6.4 冻结壁交圈时间异常工程案例	483
第7章 深厚冲积层冻结段掘砌技术	493
7.1 不同发展阶段掘砌技术简况	493
7.2 不同发展阶段的施工速度分析	495
7.3 创新攀高阶段的技术创新	503
7.3.1 安全快速施工的主要技术创新	503
7.3.2 技术创新效果	526
第8章 我国深厚冲积层冻结法凿井理论和技术的成就	532
8.1 重要成就	532
8.1.1 冲积层冻结段井壁结构类型的确立与应用	532
8.1.2 C60~C100 高强高性能混凝土技术	534
8.1.3 深厚冲积层冻结壁“四位一体”设计计算体系的建立与应用	539
8.1.4 多圈孔的冻结技术及其应用	542

8.1.5	冻结壁形成特性的预测预报技术与供冷量调控的机制	543
8.1.6	冻结壁径向位移实测与掘砌段高调控技术	546
8.1.7	冻结段安全快速施工技术	547
8.2	国内外技术水平对比分析	551
8.2.1	国外冻结法凿井技术水平	551
8.2.2	中国冻结法凿井技术水平	552
参考文献		556
附表 部分矿井井筒穿过的土层取样常规土工试验和冻土力学性能试验结果汇总表		

第 1 章 概 论

1.1 冻结法凿井的实质

冻结法凿井是井巷工程应用人工制冷技术暂时冻结地下水以加固不稳定冲积层、松软含水岩层的特殊施工方法。首先在拟开凿的或正在开凿的井筒周围施工一定数量的钻孔,孔内安装带有底锥的冻结器,用以循环低温冷冻液(盐水)进行热交换,吸收管子周围地层的热量,使之降温与冻结,形成以各个冻结器为中心的冻结圆柱。随着冻结时间的延续,冻结圆柱不断扩大而连接成不透水且能抵抗地压的冻土帷幕(简称冻结壁),并在冻结壁的保护下进行井筒掘砌工作,直至安全通过冻结段(图 1-1)。

1.2 冻结法凿井在国外的应用与发展简况

1.2.1 冻结法凿井在国外的应用与发展

德国泼埃希(Poetsch)于 1883 年应用人工制冷技术解决了德国阿西巴德(Archibald)煤矿 9 号井埋深大于 34m 的含水砂层施工难题,同年 12 月 12 日获得了冻结法凿井的专利权,并开始在欧洲经济较发达国家推广应用,迄今已有 130 多年的历史。但 1914 年下半年至 1945 年受第一次世界大战和第二次世界大战的影响,各国经济遭受严重破坏,新建矿井很少,冻结法凿井处于半停滞状况;1946~1988 年冻结法凿井得到广泛的应用,技术水平得到大幅度提高和完善;1989 年以来,随着石油、天然气能源比重的快速增长,新建矿井大幅缩减,冻结法凿井又处于半停滞状态。因此,冻结法凿井在国外的应用与发展可概括为以下两大阶段。

1. 1883~1914 年冻结法凿井的创立应用阶段

冻结法凿井于 1883 年创立后,法国、比利时于 1884 年、1885 年率先推广应用。至 1893 年,泼埃希公司共计施工 10 个冻结立井,并取得不同程度的成功,但也由于冻结孔间距大、冻结管材质量差、工程管理不善等原因造成 3 个井筒发生透水淹井事故,并导致泼埃希公司的破产;在冻结法凿井遇到困难的情况下,由吉比浩特·库尼科(Gebhardt & Koenig)有限公司继承了冻结法凿井的发展任务,至 1898 年又施工了 26 个冻结立井,最大冻结深度达到 190m,并在钾盐矿应用冻结法凿井取得了成功,获得较好的声誉,使很多公司开始推广应用冻结法凿井;至 1906 年,吉比浩特·库尼科有限公司就施工了 130 个冻结立井,有 12 个井筒冻结深度大于 300m,其中德国最大冻结深度达 415m^[1]。

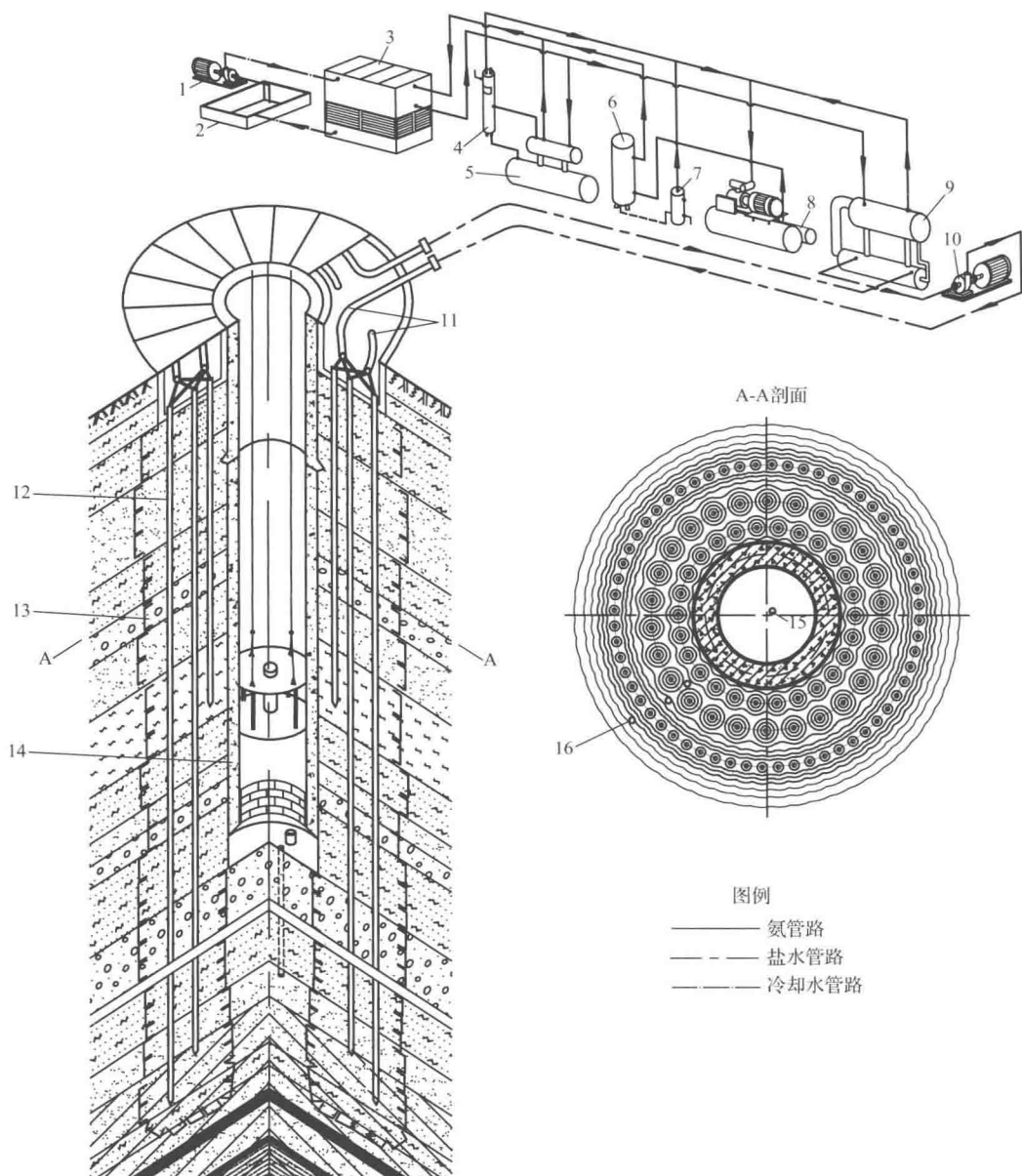


图 1-1 冻结法凿井示意图

1-清水泵;2-水池;3-蒸发式冷凝器;4-空气分离器;5-热虹吸氨贮液器;6-氨油分离器;7-集油器;8-螺杆氨压缩机;
9-氨虹吸蒸发器;10-盐水泵;11-集、配液圈;12-冻结管;13-冻结壁;14-井壁;15-水位观测孔;16-测温孔

1907~1914年冻结法凿井的特点之一是向纵深发展,特点之二是解决钾盐矿上部覆盖层的低温冻结难题。至1914年,冻结凿井技术有了新的发展;一般煤矿、铁矿、铜矿立井冻结的盐水温度为 $-20\sim-30^{\circ}\text{C}$,采用氯化镁溶液作冷媒剂;钾盐矿的冻结盐水温度为 $-40\sim-50^{\circ}\text{C}$,在 -40°C 以内时采用氯化钙溶液作冷媒剂,在 $-40\sim-50^{\circ}\text{C}$ 时,在氯化钙溶液中掺入变性酒精作冷媒剂。

2. 1946~1988 年冻结法凿井的提高完善阶段

第二次世界大战结束后,各国经济得到全面的恢复和发展,采矿工业发展迅猛,新开矿井数量增多,冻结法凿井在煤矿、铁矿、铜矿、钾盐矿立井中得到广泛的应用^[2-5],冻结深度不断刷新(表 1-1),对井壁结构、冻结设计、钻孔施工、制冷冻结、冻结段安全快速施工以及检测技术提出了更高的要求,并得到不断提高和完善,使冻结法凿井成为立井通过不稳定冲积层和含水松软岩层的有效施工方法。

表 1-1 国外最深冻结井简况

项目		德国	英国	加拿大	波兰	比利时	苏联
		克利夫兰钾盐矿 Boulby 矿井	博尔比钾盐 矿 1 号井	萨斯喀彻温钾 盐矿 I 号井	卢布林 煤矿 K ₂ 井	侯泰灵 2 号井	雅可夫列夫铁 矿 II 号罐笼井
冻结 地层 /m	冲积层		<100		34	377	571.2
	含水基岩	上部冰碛层及 下部含盐地层	以本特砂岩 为主	以白雷摩尔 岩层为主	以白垩系、侏 罗系岩层为主	261	砂岩 48.8
冻结深度/m		960	930	915	760	638	620
开钻年份		1970	1963	1954	1982	1927	1974
备注		(1)顿长建井公司施 工;(2)局部冻结深 度为 596~960m	局部冻结深 度为 552~ 930m	局部冻结, 成井后井壁 漏水量达 270m ³ /h	苏瓦乌克铁矿 的冻结深度为 860m,但未获 得具体数据	掘深 359m 时,冻结管 断裂导致透 水淹井	冻结管断裂 15 根

(1) 德国:于 1883 年创立冻结法凿井,至 1988 年共计施工 300 多个冻结立井,其中 1906 年之前施工的立井冻结深度小于 190m,1966 年施工的钾盐矿瓦伦打井冻结深度为 591m,1970 年由顿长建井公司施工的克利夫兰钾盐矿 Boulby 矿井,上部为冰碛层,下部为含盐地层,局部冻结深度为 596~960m^[1]。

(2) 波兰:1885 年开始应用冻结法凿井,1960 年的冻结深度小于 300m;至 1969 年,随着留宾铜矿、莱格尼查-格沃古夫铜矿、布雷尼克煤矿的开发,40%的立井采用冻结法施工,冻结最大深度达到 470m;至 1975 年、1980 年立井采用冻结法施工的比例分别达到 50%和 80%,1982 年施工的卢布林煤矿冻结深度达到 720(K₁井)~760m(K₂井);根据查询苏瓦乌克铁矿的冻结深度达到 860m。

(3) 苏联:1927 年开始应用冻结法凿井,至 1983 年共计施工 400 多个冻结立井,1950 年之前冻结深度小于 150m,1960 年在扎波罗兹铁矿的井筒冻结深度达到 425m,1976 年施工的雅可夫列夫铁矿 II 号罐笼井的冻结深度为 620m,穿过冲积层厚度为 571.2m,采用双圈孔分期冻结工艺。

(4) 英国:1947 年开始应用冻结法施工,至 1960 年在凯瑟琳煤矿施工的 11 个冻结井,冻结深度为 108~250m;1963~1969 年施工的博尔比钾盐矿主要冻结埋深 552~930m 的本特砂岩,采用局部冻结工艺,0~552m 段不进行冻结。

(5) 加拿大:1946 年开始应用冻结法施工,至 1988 年在钾盐矿施工了十几个冻结立

井,1954年开工的萨斯喀彻温 I 号井的冻结深度为 915m,冻结地层埋深为 610~915m 的白雷摩尔岩层,采用局部冻结工艺,小于 610m 段不进行冻结。

1989 年以来,随着石油、天然气能源比重的快速增长,欧美经济发达国家对煤炭的需求量大幅缩减,基本不建新井,冻结法凿井处于半停滞状态。但应指出,对冻结段井壁结构的封水性能方面还做了一些探索和改进工作。

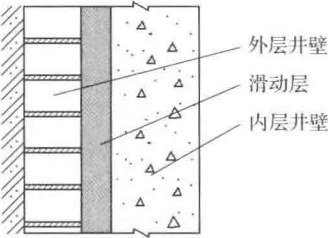
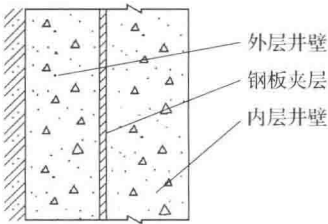
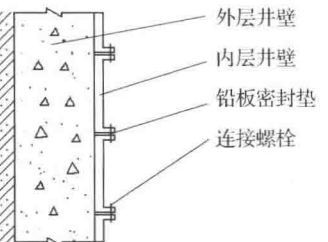
1.2.2 冻结法凿井鼎盛时期的技术状况

1946~1988 年是国外冻结法凿井的鼎盛时期,井壁结构、冻结壁设计、钻孔施工、制冷冻结、冻结段掘砌以及检测技术均达到较高水平。

1. 冻结段井壁结构

国外冻结法凿井的主要国家,基本于 20 世纪 60 年代初就提出适合本国国情的井壁结构基本类型(表 1-2),并在实践中根据冻结井筒的地层埋藏条件和受力、防水要求进行适当的修改。

表 1-2 深冻结井井壁结构基本形式及其特点

序号	国家	井壁结构		特点
		类型	示意图	
1	德国、加拿大	AV 型滑动井壁		(1) 外层井壁:小型混凝土预制块夹可缩板,混凝土标号为 C40~C50,可缩板厚 10~20mm (2) 沥青滑动层:厚 150~250mm (3) 内层井壁:钢筋混凝土或钢筋混凝土夹钢板,混凝土标号为 C35~C50,钢板厚 5~15mm
2	英国	钢筋混凝土钢板夹层井壁		(1) 外层井壁:钢筋混凝土,混凝土标号为 C40~C50 (2) 钢板夹层:外层井壁内侧加钢板或内层井壁的内、外侧均为钢板,钢板厚 10mm 左右 (3) 内层井壁:钢筋混凝土,混凝土标号为 C40~C50
3	苏联	铸铁丘宾筒与钢筋混凝土复合井壁		(1) 外层井壁:钢筋混凝土,混凝土标号为 C30~C40 (2) 内层井壁:铸铁丘宾筒 (3) 丘宾块之间加 3mm 铅板进行密封