

建井工程工具书系列

陈文豹 等 编著

冻结法凿井施工手册

CONSTRUCTION HANDBOOK OF FREEZING SHAFT SINKING

 煤炭工业出版社

冻结法凿井施工手册

陈文豹 等 编著



煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

冻结法凿井施工手册/陈文豹等编著. --北京:煤炭工业出版社, 2017

ISBN 978 - 7 - 5020 - 6035 - 0

I. ①冻… II. ①陈… III. ①冻结法 (凿井) — 冻结法
施工—技术手册 IV. ①TD265.3 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 182431 号

冻结法凿井施工手册

编 著 陈文豹 等

责任编辑 刘永兴 尹燕华

责任校对 孔青青 尤 爽

封面设计 于春颖

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

电 话 010 - 84657898 (总编室)

010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京玥实印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 43 插页 2 字数 1053 千字

版 次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

社内编号 8915 定价 280.00 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,电话:010 - 84657880

编 审 委 员 会

主 任	陈明和				
副 主 任	王继献	盛天宝	刘志强	周少雷	颜传宝
	高木福				
顾 问	张永成	胡德铨	汤志斌	邓文芳	庞荣庆
委 员	刘民东	王景余	段邦奎	刘文民	卢相忠
	齐吉龙	王俊杰	于新胜	陈朝晖	曲振亭
	张振金	周秀隆	荣传新	王圣公	
主 编	陈文豹				
副 主 编	李功洲	王宗金	陈章庆	丁 易	杜庆军
	张云利	程志彬	史贵生	曾凡伟	逯心杰
	辛德林	刘庆礼	邓 楠	张家勋	楼根达
	魏国强	赵根全	刘阳军	高春勇	陈新明
编 写	江新春	张步俊	张庆武	高 伟	翟延忠
	陈道翀	王 峰	郭 垒	王 毅	冯连岱
	王家春	李振民	李新政	张 英	贾成刚
	李现春	杨云祥	张 岩	陈 镭	何 伟
	吕高乐				

主编单位 中煤特殊凿井有限责任公司
煤炭科学研究总院建井研究分院
中煤第五建设有限公司第三工程处
大地工程开发（集团）有限公司
唐山开滦建设（集团）有限责任公司
河南国控建设集团有限公司（原河南煤炭建设
集团有限责任公司）
兖矿新陆建设发展有限公司
河南国龙矿业建设有限公司
中煤科工集团武汉设计研究院有限公司
中赞国际工程股份有限公司（原煤炭工业郑州
设计研究院）
淄博翔宇勘探工程有限责任公司
内蒙古伊泰广联煤化有限责任公司
河南浩迪工程咨询有限公司

主办单位 中煤老科协煤炭开发工程技术咨询专家委员会

承办单位 北京煤科联应用技术研究所

前 言

冻结法是在复杂地质、水文地质条件的地层中普遍采用的一种施工方法，广泛应用于矿山井巷工程中的立井、斜井、马头门等施工，目前也被广泛应用于施工地铁、地下（包括海底）隧道、桥涵、港口、大容积地下硐室以及深基础工程。1986年由煤炭部组织编写的《建井工程手册》第十六篇（冻结法施工）对指导冻结法施工起到了积极作用，受到广大读者的欢迎。

20世纪90年代初，我国立井穿过的冲积层最大厚度和冻结最大深度分别达到374.5 m和435 m，并取得近400 m冲积层冻结段的冻结管无断裂、外层井壁无压坏和内层井壁无漏水的优异成果，使我国深厚冲积层冻结法凿井综合技术指标跃居国际先进水平。

进入21世纪后，我国冻结法凿井的冲积层厚度相继突破400 m、500 m，近年来又超过700 m，至2016年共计施工超过500 m冲积层的冻结井筒数达到32个，冻结最大深度达894 m（以冻结冲积层为主）和950 m（以冻结含水基岩为主），井筒均安全通过冻结段；十几年来，我国施工了600多个冻结井筒，冻结法凿井的新理论、新技术、新工艺、新设备、新材料快速发展，特别是多圈孔冻结工艺、钢筋混凝土塑料夹层井壁结构、四位一体的冻结壁设计计算体系、高强高性能混凝土等在我国创立及应用，为冻结段安全快速施工创造了有利条件，使我国冻结法凿井综合技术指标跃居国际领先水平。编写新的冻结法凿井施工手册，对冻结法凿井的技术、施工方法和应用成果进行系统总结，能够更好地满足冻结法凿井工程的需要，对我国冻结法凿井技术的发展也是非常有益的。

为了编写好《冻结法凿井施工手册》（以下简称《手册》），中煤老科协专家委员会组织并成立了由全国科研、设计、施工、监理等单位的有关专家、技术人员组成的《手册》编审委员会，陈明和同志任编审委员会主任，编审委员会召开多次会议，研究并制定了《手册》的编写提纲、内容、原则及各参编单位的分工，责成陈文豹同志担任主编并会同有关单位编写组人员完成《手册》的编写等工作。《手册》共计11章，各章主要内容如下：

第1章冻结法凿井技术简况，总结国内外冻结法凿井技术的发展状况和各阶段的工程特点，对比分析我国与国外的主要技术特点及水平，展现我国冻结法凿井综合技术指标和水平。

第2章冻结法凿井相关的基本理论,介绍冻结法凿井相关的地压、冻结压力、冻土物理力学性能,以及冻结壁形成特性的分析方法、冻结壁形成的基本特性和冻结壁解冻特性;系统总结单圈孔及多圈孔冻结壁形成特性等方面的分析方法、研究成果和工程应用。

第3章冻结段井壁结构与筑壁材料,简介冻结法凿井井壁结构的基本形式及其应用效果,分析立井冻结段井壁的相关问题,以及高强高性能混凝土在我国冻结段井壁结构的应用;在深厚冲积层中冻结段采用钢筋混凝土塑料夹层井壁结构,内外层井壁推广应用高强高性能混凝土和低温早强高强混凝土,并已取得明显效果。

第4章立井冻结设计,系统总结我国冻结设计的指导思想及主要内容,冻结壁厚度、掘砌段高、冻结壁平均温度和冻结设计参数优选四位一体的冻结壁设计计算体系,多圈孔冻结与冻结工艺的优化组合、制冷冻结与调控、含水基岩冻结凿井研究与应用。

第5章打钻设备、材料及钻孔施工技术,重点介绍我国冻结孔打钻装备与施工技术、冻结器安装,以及特殊地层冻结孔施工经验。

第6章制冷冻结设备材料及安装运转,重点介绍我国制冷设备及材料、冻结站安装、冻结站供配电、冻结站运转与维护、冻结站拆除及冻结孔充填,以及液氮冻结技术应用等。

第7章立井冻结段掘进与支护,着重介绍我国冻结段井壁掘砌施工工艺及主要施工方法、机械化装备水平、冻结段安全快速施工措施和掘砌技术特点。

第8章立井冻结法凿井工程检测与应用,着重介绍冻结法凿井工程主要检测内容、目的、手段、措施、应用效果及注意问题。

第9章冻结法凿井工程问题分析与处理,着重对水位孔未及时冒水、冻结管断裂、外层井壁压坏、冻结壁透水、井壁透水和收缩开裂等问题的原因及防治进行分析,提出防止类似问题发生和处理的措施。

第10章斜井冻结设计与施工,系统总结斜井冻结段井壁结构设计、冻结设计、冻结段掘进与支护、检测技术、冻结工程遇到的问题与防治措施,并通过斜井冻结工程案例,为解决斜井冻结工程中的突出问题提供例证。

第11章冻结法凿井工程技术管理,根据我国60年来的冻结凿井经验和相关技术规范,重点阐述施工组织设计及主要技术措施的监督与管理、钻孔施工与冻结管安装的工程技术管理、冻结站安装与运转工程技术管理、冻结段掘砌工程技术管理。

编审委员会根据国家有关政策、法规和工程实践经验,本着科学性、先进性和适用性的原则组织编写《手册》,在内容上,以我国冻结法凿井60年

科研、设计、施工、管理经验为主，选用新技术、新工艺、新设备、新材料，并选入部分国外深冻结井有关资料和先进经验做到“洋为中用”；在表达形式上，以图表为主，必要的说明为辅，力求简明，查阅方便；在技术措施上，力求安全可靠，对未经实践检验的公式、方法一般不予采用。《手册》主要供现场组织与指挥施工的工程技术人员和管理干部查阅，也可供有关专业设计、科研人员和院校师生参考。

由于我们水平有限，错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

《冻结法凿井施工手册》编审委员会

2016年12月

目 录

1	冻结法凿井技术简况	1
1.1	冻结法凿井的实质、适用条件、应用范围	1
1.2	冻结法凿井在国外的创立与发展简况	1
1.3	冻结法凿井在中国的应用与发展	17
1.4	国内外冻结法凿井技术浅析	29
2	冻结法凿井相关的基本理论	40
2.1	地压	40
2.2	冻结压力	48
2.3	冻土物理力学性能	58
2.4	冻结壁形成的基本特性	79
2.5	冻结壁形成特性的分析方法	104
2.6	冻结壁解冻特性	132
3	冻结段井壁结构与筑壁材料	140
3.1	井壁结构的基本型式及应用效果	140
3.2	高强高性能混凝土的试验应用对冻结段井壁结构设计和施工的影响	157
4	立井冻结设计	168
4.1	冻结设计必备资料	168
4.2	冻结设计的指导思想及主要内容	169
4.3	冻结深度	173
4.4	冻结壁设计计算体系	174
4.5	冻结孔布置与冻结工艺	190
4.6	制冷与调控设计	225
4.7	冻结设计优化	231
4.8	检测孔设计	238
4.9	冻结法凿井主要节点工期分析	240
4.10	冻结方案设计主要技术指标	244
4.11	含水基岩冻结凿井研究与应用	249
5	打钻设备、材料及钻孔施工技术	254
5.1	打钻设备机具	254
5.2	钻孔施工	270
5.3	冻结管及检测孔(管)安装与验收	286
5.4	特殊地层冻结钻孔施工工程案例	294

6	制冷冻结设备材料及安装运转	310
6.1	制冷冻结设备	310
6.2	制冷冻结材料	370
6.3	冻结站安装	379
6.4	冻结站供配电	403
6.5	冻结站的运转与维护	409
6.6	冻结站拆除和冻结孔充填	435
6.7	液氮冻结技术与应用	444
7	立井冻结段掘进与支护	449
7.1	冻结段掘进与支护施工组织设计编写大纲	449
7.2	冻结段开挖前的准备工作	451
7.3	冻结段开挖条件与开挖时间	451
7.4	冻结段外层井壁掘砌	453
7.5	内层井壁套壁	480
7.6	冻结段塑料夹层井壁壁间注浆	497
7.7	高强高性能混凝土在井壁工程中的应用	501
7.8	我国深厚冲积层冻结段掘进与支护的技术特点	507
8	立井冻结法凿井工程检测与应用	513
8.1	冻结法凿井工程检测的主要内容、部位、目的	513
8.2	冻结器及盐水干管的温度、流量检测与调控	514
8.3	水位孔水位的检测与应用	516
8.4	冻结壁温度场检测与分析	518
8.5	冻结壁径向位移检测	529
8.6	井壁温度及壁后冻土融化回冻特性检测	531
8.7	冻结压力检测	534
9	冻结法凿井工程问题分析与处理	538
9.1	水位孔未按预测时间冒水的原因与应对措施	538
9.2	冻结管断裂问题分析及防治措施	547
9.3	冻结段掘砌过程透水事故的原因及防治措施	557
9.4	外层井壁压坏、开裂等问题分析及防治措施	570
9.5	内层井壁施工存在的主要问题及防治措施	575
10	斜井冻结设计与施工	579
10.1	斜井冻结施工组织设计大纲	579
10.2	斜井冻结井检孔	582
10.3	斜井冻结段井壁结构设计	583
10.4	斜井冻结方案设计	584
10.5	斜井冻结系统设计、施工与运转	601
10.6	斜井冻结段掘进与支护	609
10.7	斜井冻结检测技术及应用	614

10.8	斜井冻结凿井工程遇到的问题与防治措施·····	621
10.9	斜井冻结工程案例·····	622
11	冻结法凿井工程技术管理·····	658
11.1	施工组织设计及主要技术措施的监督与管理·····	658
11.2	钻孔施工与冻结管安装工程技术管理·····	661
11.3	冻结站安装与运转工程技术管理·····	662
11.4	冻结段掘砌工程技术管理·····	666
	参考文献·····	672

1 冻结法凿井技术简况

1.1 冻结法凿井的实质、适用条件、应用范围

1.1.1 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，吸收冻结器周围地层的热量，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，使冻结圆柱不断扩大而连接成不透水且能抵抗地压的冻结帷幕（俗称冻结壁），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）。

1.1.2 适用条件

- (1) 不稳定冲积层、风化裂隙含水岩层、松软破碎岩层。
- (2) 大流速冲积层及含水岩层。
- (3) 含盐地层。

1.1.3 应用范围

- (1) 地质、水文地质条件复杂地层的正规施工方法。
- (2) 工程抢险和事故处理。
- (3) 广泛应用于矿山井巷工程中的立井、斜井、马头门等施工，也被广泛用于地铁、地下（包括海底）隧道、桥涵、港口、大容积地下硐室以及深基础工程。

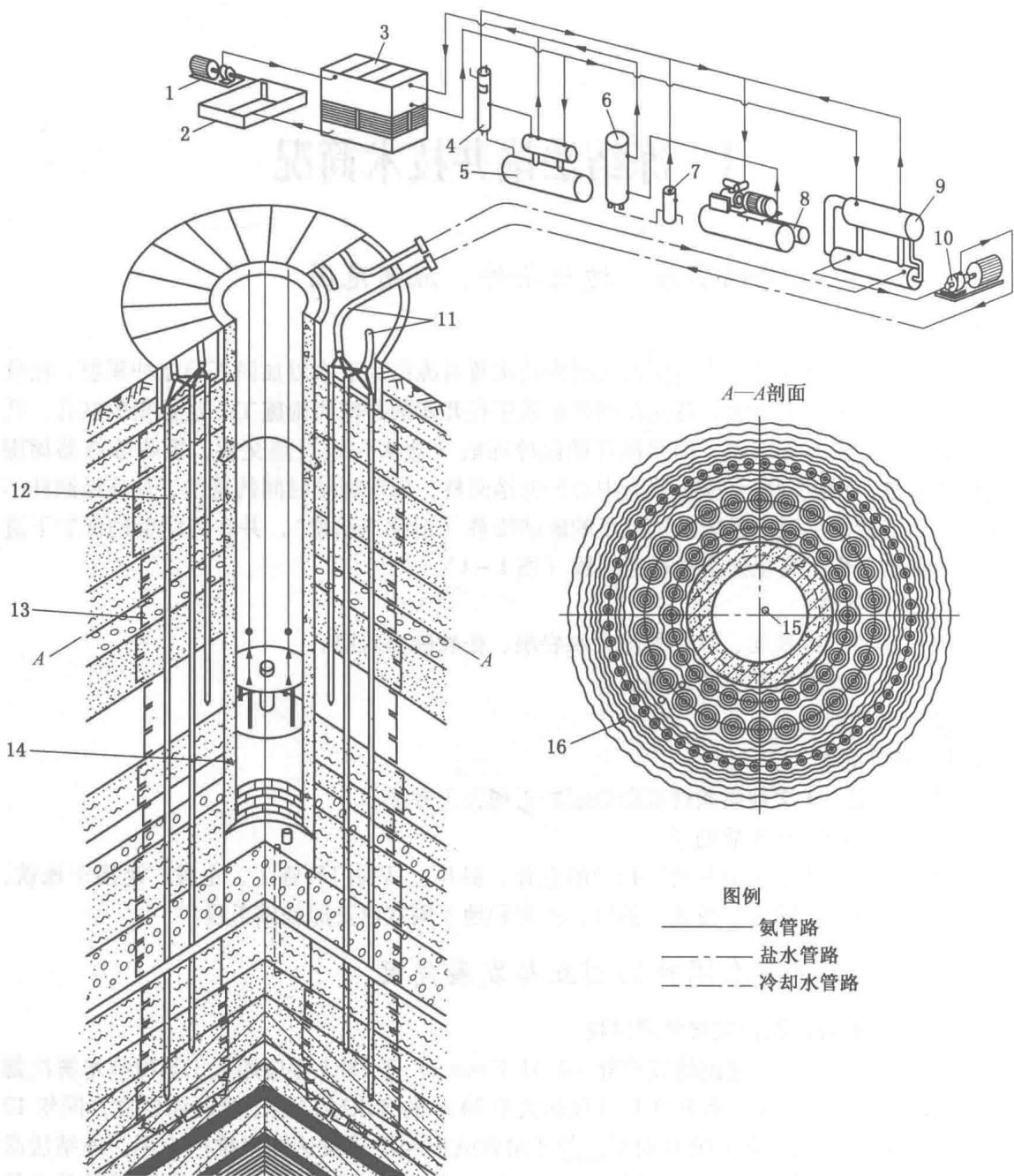
1.2 冻结法凿井在国外的创立与发展简况

1.2.1 冻结法凿井的创立与发展过程

冻结法凿井是由德国的波茨舒（F. H. Poetsch）于1883年应用人工制冷技术解决德国阿西巴德（Archibald）煤矿9号井埋深大于34m的含水砂层施工难题而创立，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。冻结法凿井迄今已有130多年的历史，经历了1883—1914年的创立探索、1915—1944年的基本停顿（受两次世界大战影响）、1945—1989年的提高完善、1990年以来的半停滞状态等4个阶段。

1.2.2 国外冻结法凿井创立探索阶段的发展简况

冻结法凿井于1883年在德国阿西巴德（Archibald）煤矿9号井试验应用成功后，很快在德国、法国、波兰、比利时等国的煤矿、铁矿、铜矿、钾盐矿中推广应用，取得重大进展，至1914年共计冻结270多个立井（表1-1），成功率达95%以上，最大冻结深度达415m，特别是在钾盐矿的成功应用，冻结盐水温度达到 $-40 \sim -50^{\circ}\text{C}$ ，对冻结法凿井的发展起到了推动作用。



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、配液筒；
12—冻结管；13—冻结壁；14—井壁；15—水位观测孔；16—测温孔

图 1-1 冻结法凿井示意图

1.2.3 冻结法凿井提高完善阶段以来的发展简况

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，不少井筒穿过的地质、水文地质条件复杂，冻结法凿井在德国、波兰、苏

表 1-1 冻结法凿井在国外创立探索阶段的发展过程

序号	时间/年	冻结法凿井创立探索阶段的发展过程
1	1883	德国人波茨舒 (F. H. Poetsch) 领导的泼埃希公司采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 34 m 的含水流砂层施工难题, 同年 12 月 12 日获得了冻结法凿井的专利权
2	1884—1893	1. 1884—1885 年首先在法国、波兰推广应用 2. 至 1893 年泼埃希公司共计冻结了 10 个立井, 其中 3 个井筒因冻结孔成孔间距大、冻结管材质量差、施工管理不善等原因造成冻结壁透水淹井, 导致泼埃希公司破产
3	1894—1898	由吉比浩特·库尼科公司继承了泼埃希公司的冻结法凿井的发展任务, 共计施工了 26 个冻结立井, 并在钾盐矿应用冻结法凿井取得了成功, 最大冻结深度达到了 190 m
4	1899—1906	吉比浩特·库尼科公司共计施工了 130 个冻结立井, 其中有 12 个井筒冻结深度超过 300 m, 德国最大冻结深度达 415 m
5	1907—1914	1. 共计冻结 100 多个立井, 冻结深度进一步增大 2. 煤矿、铁矿、铜矿冻结的盐水温度由 $-20 \sim -25^{\circ}\text{C}$ 降至 -30°C , 采用氯化镁溶液作冷媒剂 3. 钾盐矿的冻结盐水温度为 $-40 \sim -50^{\circ}\text{C}$, 采用掺入变性酒精的氯化钙溶液作冷媒剂

联、英国、加拿大等国的煤矿、铁矿、铜矿、钾盐矿立井中得到广泛的应用和发展 (表 1-2), 冻结法凿井提高完善阶段国外共计冻结 750 多个立井, 年均冻结约 17 个立井, 冻结最大深度和冲积层最大厚度分别达到 960 m 和 571.2 m (表 1-3 ~ 表 1-5)。

随着冻结深度和冲积层厚度的增大, 地压和水压相应加大, 对井壁的强度和防水性、冻结壁的强度和稳定性、冻结孔的垂直度和成孔间距、制冷冻结的可靠性和可控性、冻结段的掘砌速度和工程质量, 以及检测调控技术等提出更高的要求。应当指出: 德国、波兰、苏联、英国、加拿大等采用冻结法凿井的主要国家对冻结法向纵深发展遇到的难题深有体会, 也非常重视, 从 20 世纪 50—60 年代就结合深井冻结遇到的难题开展研究与应用, 在“两壁”设计和打钻、冻结、掘砌、检测等技术方面取得一定突破, 为冻结法凿井向纵深发展奠定了基础, 至 20 世纪 80 年代, 冻结法凿井已成为立井井筒安全通过深厚冲积层和含水松软岩层的首选施工方案。

表 1-2 冻结法凿井在国外提高完善阶段的发展简况

国家	冻结法凿井的发展简况
德国	1. 1883—1914 年共计冻结 200 多个立井 2. 1945—1965 年共计冻结 200 多个立井井筒, 最大冻结深度为 415 m 3. 1966—1989 年共计冻结 100 多个立井井筒, 其中: 1966 年施工的钾盐矿瓦伦打井冻结深度为 591 m; 1970 年施工的克利夫兰钾盐矿 Boulby 矿井冻结深度为 960 m, 采用局部冻结工艺, 主要冻结埋深为 596 ~ 960 m 的含盐地层; 1984 年施工的索菲亚煤矿雅科巴井冲积层厚度为 360 m, 冻结深度为 560 m (由波兰的公司施工)
波兰	1. 1885 年开始应用冻结法凿井, 1960 年之前的冻结深度小于 300 m, 冲积层厚度小于 200 m 2. 从 1960 年开始, 把冻结法凿井作为通过不稳定冲积层和松软含水岩层的主要施工方法; 至 1969 年, 在留宾铜矿、莱格尼查—格沃古夫铜矿等应用冻结法凿井, 冲积层最大厚度超过 350 m, 冻结最大深度为 470 m 3. 20 世纪 80 年代施工的卢布林 K_2 煤矿冻结深度达 760 m, 苏瓦乌克铁矿冻结深度达 860 m

表 1-2 (续)

国家	冻结法凿井的发展简况
苏联	<ol style="list-style-type: none"> 1. 1927 年开始采用冻结法凿井, 至 1989 年共计施工了 350 多个冻结立井 2. 1950 年之前冻结深度小于 150 m; 1960 年在扎波罗兹铁矿井冲积层最大厚度达 269.2 m, 冻结深度达 425 m 3. 1976 年施工的雅可夫列夫铁矿 II 号罐笼井, 冲积层厚度为 571.2 m, 冻结深度为 620 m, 选用双圈孔分期冻结工艺
英国	<ol style="list-style-type: none"> 1. 1947 年开始采用冻结法施工 2. 至 1960 年在凯瑟琳煤矿采用冻结法凿井, 共计施工 11 个立井, 冻结深度为 105 ~ 350 m 3. 1963—1969 年施工的博尔比钾盐矿, 冻结深度为 930 m, 采用单圈孔局部冻结工艺, 主要冻结埋深 552 ~ 930 m 的本特砂岩, 0 ~ 552 m 段不进行冻结 4. 20 世纪 70 年代后期在富尔比煤矿冻结 7 个立井并筒, 冻结最大深度为 315 m
加拿大	<ol style="list-style-type: none"> 1. 1946 年开始采用冻结法施工, 至 1989 年在钾盐矿施工了十几个冻结立井 2. 1950 年开工的萨尔喀彻温钾盐矿, 冻结深度为 915 m, 主要冻结埋深 610 ~ 915 m 的白雷摩尔岩层; 1957 年的柯明克钾盐矿, 冻结深度为 441 m

1. 冻结法凿井向纵深发展

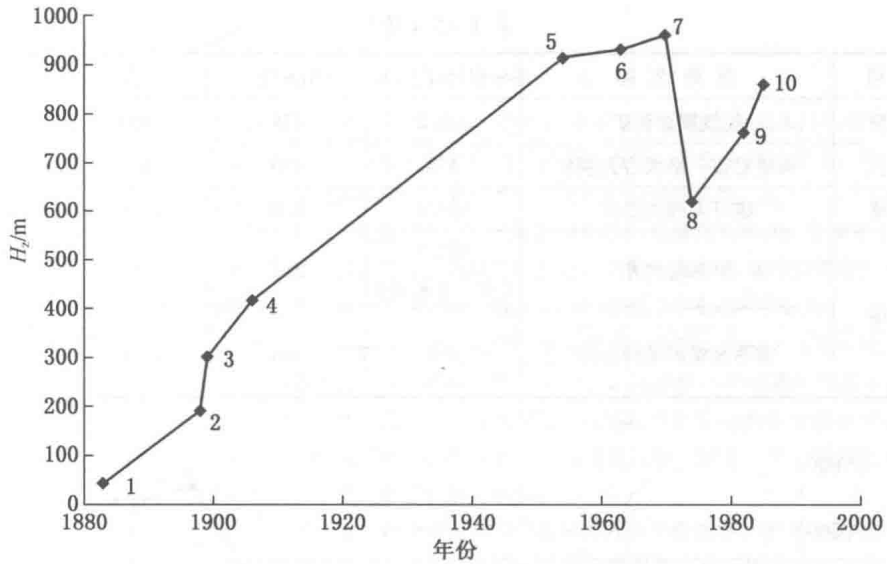
立井冻结深度的发展趋势见表 1-3、图 1-2, 国外最深冻结井简况见表 1-4。1954 年和 1970 年的冻结深度分别达到 915 m 和 960 m; 立井冻结冲积层厚度的发展趋势见表 1-5、图 1-3, 1974 年的冲积层厚度达到 571.2 m; 通过技术创新, 在冻结段井壁、冻结壁设计和打钻、冻结、掘砌、检测调控技术等方面均取得重大突破。

表 1-3 国外冻结深度的发展趋势

序号	国别	井筒名称	冻结深度/m	年限
1	德国	阿西巴德煤矿 9 号井	> 42	1883
2		阿西巴德钾盐矿	190	1898
3		阿西巴德钾盐矿	300	1899
4		卡姆品煤矿	415	1906
5	加拿大	萨尔喀彻温钾盐矿	915	1954
6	英国	博尔比钾盐矿	930	1963
7	德国	克利夫兰钾盐矿	960	1970
8	苏联	雅可夫列夫铁矿 II 号井	620	1974
9	波兰	卢布林煤矿 K ₂ 井	760	1982
10		苏瓦乌克铁矿	860	1985

2. 井壁结构

深冻结井承受的地压和水压较大, 井壁结构较为复杂。20 世纪 60—70 年代, 德国、英国、波兰、苏联均根据冻结深度和地层特性等条件提出具有本国特色的井壁结构, 如德国的 AV 型井壁、英国的钢筋混凝土钢板防水夹层井壁、波兰的小型混凝土块(外壁)或



注：图中1、2~10号标注与表1-3中井筒对应序号表述相同

图1-2 国外冻结深度 (H_z) 的发展趋势

表1-4 国外最深冻结井简况

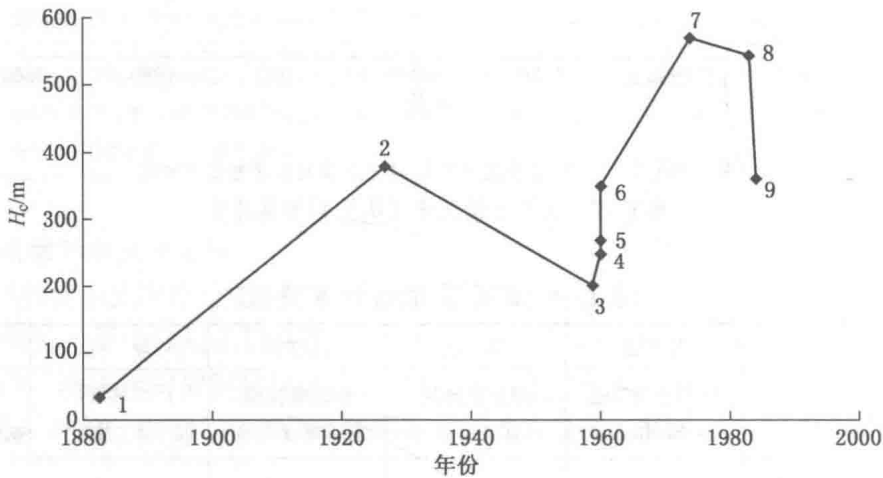
序号	国家		德国	英国	加拿大	波兰	苏联
	井筒名称		克利夫兰钾盐矿 Boulby 井	博尔比钾盐矿 I 号井	萨尔喀彻温钾盐矿 I 号井	卢布林煤矿 K ₂ 井	雅可夫列夫铁矿 II 号罐笼井
1	冻结地层/m	第四系冲积层	浅部冰碛层	<100	34		571.2
2		松软含水基岩	深部含盐地层	以本特砂岩为主	以白雷摩尔岩层为主	埋深 31 ~ 591 m 的白垩系含水地层	以白雷摩尔岩层为主
3	冻结深度/m		960	930	915	760	620
4	开钻年份		1970	1963	1954	1982	1974
5	备注		1. 顿基建井公司施工 2. 局部冻结深度 596 ~ 960 m	局部冻结深度为 552 ~ 930 m	局部冻结深度为 610 ~ 915 m, 成井后井壁漏水量达 270 m ³ /h	从杂志查获苏瓦乌克铁矿的冻结深度为 860 m	冻结管断裂 15 根

表1-5 国外立井冻结冲积层厚度的发展趋势

序号	国别	井筒名称	冲积层厚度/m	冻结深度/m	年限	备注
1	德国	阿西巴德煤矿 9 号井	> 34	> 42	1883	
2	比利时	侯泰灵 2 号井	(377)	638	1927	施工至 359 m 时, 冻结管断裂淹井
3	波兰	留宾铜矿	< 200	300	1959	
4		留宾铜矿	> 250	365	1960	断管 66 根, 3 个井筒透水淹井

表 1-5 (续)

序号	国别	井筒名称	冲积层厚度/m	冻结深度/m	年限	备注
5	苏联	扎波罗兹铁矿	269.2	425	1960	3个井筒断管61根
6	波兰	莱格尼查-格沃古夫铜矿	350	470	1969	
7	苏联	雅可夫列夫铁矿	571.2	620	1974	断管15根
8	德国	维尔德风井	542.3 (含三系地层)	582	1983	断管6次
9		索菲亚煤矿雅科巴井	360	560	1984	波兰公司施工,未发生断管



注：图中1、2~9号标注与表1-5中井筒对应序号表述相同

图 1-3 国外立井冻结冲积层厚度 (H_c) 的发展趋势

钢筋混凝土的塑料软板夹层井壁、苏联的铸铁丘宾筒与钢筋混凝土复合井壁 (表 3-2), 前 3 种为夹层井壁, 由 3 部分组成: 外层为小型混凝土块 (含砌块之间夹可压缩板) 或混凝土 (含钢筋混凝土); 夹层为钢板防水层、沥青滑动层或塑料软板夹层; 内层为钢筋混凝土或钢筋混凝土加钢板 (外侧钢板主要起防水作用, 内侧钢板主要是承压作用)。

由于国外以浅冲积层和含水基岩冻结为主, 因此井壁结构中较为普遍地使用了小型混凝土预制块。

3. 冻结设计

国外冻结壁设计、冻结设计参数、冻结孔布置方式与冻结工艺、制冷剂与冷冻液、冻结管与供液管的材质和规格等冻结设计的基本状况见表 1-6。

表 1-6 国外深井冻结设计简况

序号	设计内容		基本状况
1	冻结壁设计	冻结壁厚度公式	1960 年之前, 绝大多数冻结井的冲积层厚度小于 200 m, 只按强度条件计算冻结壁厚度: 当冲积层厚度小于 100 m 时, 采用拉麦公式计算; 当冲积层厚度为 100 ~ 150 m 时, 采用古别拉公式计算; 当冲积层厚度大于 150 m 后, 一般采用多姆克公式计算或各国各自提出的冻结壁厚度计算公式