

国家自然科学基金重点项目 (50534040)

国家自然科学基金面上项目 (50704033) 资助

国家科技支撑计划课题 (2006BAB16B01)

特厚冲积层冻结井外壁的 强度增长及受力与变形规律

王衍森 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金重点项目资助(50534040)

国家自然科学基金面上项目资助(50704033)

国家科技支撑计划课题资助(2006BAB16B01)

特厚冲积层冻结井外壁的 强度增长及受力与变形规律

王衍森 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以巨野矿区龙固煤矿副井建设为工程背景,对 400~600 m 特厚冲积层冻结井外壁的强度增长及其受力与变形规律开展了较为系统的研究。主要的研究内容包括:现浇高强混凝土外壁水化热温度场与冻结壁温度场的相互影响、外壁混凝土的早期强度增长规律、外壁的水平极限承载力、冻结井外壁外载——冻结压力的增长规律、冻结凿井期外壁钢筋轴力和混凝土应变的变化规律,最后,对特厚冲积层冻结井外壁设计所面临的外载取值、模型选择、混凝土强度取值等理论与技术问题进行了探讨。

本书可供矿井建设工程领域从事冻结法凿井的工程技术人员使用,也可供高等院校、科研机构从事矿井建设、人工地层冻结技术研究的教师、研究生作为参考资料使用。

图书在版编目(CIP)数据

特厚冲积层冻结井外壁的强度增长及受力与变形规律/

王衍森著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2008. 12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0103 - 4

I. 特… II. 王… III. 井壁—冻结法(凿井)—研究

IV. TD265.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 166053 号

书 名 特厚冲积层冻结井外壁的强度增长及受力与变形规律

著 者 王衍森

责任编辑 刘红岗

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

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 11.25 字数 281 千字

版次/印次 2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 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

我国是煤炭生产与消费的大国,长期以来,煤炭一直占我国一次性能源结构的 70% 左右。我国《能源中长期发展规划纲要(2004~2020 年)》中明确指出:中国将“坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的战略”。随着国民经济快速发展,煤炭需求量将逐年增加,预计 2020 年中国煤炭消费需求将超过 25 亿吨。因此,煤炭工业的健康、稳定、持续发展直接关系到国家能源的安全。

近年来,随着开采范围及开采强度的增大,我国浅部煤炭资源已经逐步趋于枯竭。为保证国民经济持续快速发展所需的能源供给,深部煤炭资源开采成为必然的选择。在此背景下,2000 年以后,我国华东、华北地区 400~600 m 特厚冲积层下煤炭资源的开采逐渐启动。

深厚冲积层中立井井筒建设的可行工法唯有冻结法与钻井法。其中,受钻井设备能力等的限制,钻井法长期以来难以施工净直径超过 7 m 的井筒,因此,冻结法一直是我国深厚冲积层中立井井筒建设的最主要工法。

冻结法凿井的关键在于“两壁一钻”(冻结壁、井壁、冻结孔钻进),其难度随冲积层厚度的增加而增大,因此,冻结法凿井穿过的冲积层厚度是冻结法凿井技术水平的重要标志。

2003 年以前,我国冻结法凿井穿过的最大冲积层厚度仅为 383 m(山东省金桥矿副井);世界范围内,冲积层厚度超过 400 m 的冻结井也仅有 10 个(其中,前苏联雅科夫列夫铁矿 2 号井以 571 m 冲积层厚度位居世界第一)。鉴于 400~600 m 特厚冲积层冻结法凿井工程经验的欠缺与基础理论研究的不足,我国冻结法凿井工程建设面临着前所未有的挑战。

受冻结凿井特殊的温度环境、荷载条件等限制,冻结井外壁的设计与施工一直是冻结法凿井的重点与难点之一。外壁浇筑后早期强度增长不足,难以抵抗急剧增长的冻结压力,曾一度导致我国冻结凿井史上外壁压坏事故频发,严重威胁着冻结凿井工程的安全。

为此,在巨野矿区龙固煤矿副井冻结法凿井过程中,新汶矿业集团公司联合中国矿业大学、煤炭工业济南设计研究院有限公司等单位,针对龙固副井建设所面临一系列基础理论与关键技术问题,开展了科技攻关。笔者有幸全面地参与了该课题的研究,取得了较为丰富的研究成果,并在此期间完成了博士学位论文。本书既是对该期间所取得成果的总结。

全书共分为 8 章。第 1 章回顾了我国冻结法凿井的历史与现状,外壁温度场、外壁混凝土强度增长及其受力与变形规律的研究历史与现状,介绍了本书的主要研究内容及技术路线。第 2 章采用多种手段研究了现浇高强混凝土外壁水化热温度场与冻结壁温度场的相互影响规律。第 3 章通过室内及现场试验研究了冻结凿井特殊的温度条件下外壁高强混凝土的早期强度增长规律。第 4 章较为系统地研究了外壁水平极限承载力及其影响因素,探讨了力学模型对井壁设计的影响。第 5 章研究了冻结井外壁的外载——冻结压力的增长规律。第 6 章基于工程实测,研究了冻结凿井期外壁钢筋轴力和混凝土应变的变化规律。第 7 章探讨了特厚冲积层中冻结井外壁设计面临的关键理论与技术问题,包括外载取值、模型

选择、混凝土强度取值等,并探讨了特厚或超深厚冲积层冻结井井壁设计必须进一步研究解决的问题。第8章是全书的主要研究结论。

本书的主要研究成果均是在杨维好教授、崔广心教授的精心指导下完成的,并在研究过程中得到了中国矿业大学周国庆教授、岳丰田教授、黄家会教授、宋雷副教授、李海鹏副教授、陈先德工程师、任彦龙讲师、杨志江讲师等的大力帮助,在此向他们表示诚挚的感谢!

作者在龙固煤矿副井建设工地开展冻结法凿井信息化施工技术研究期间,得到了新汶矿业集团公司龙固矿井筹备处张开顺总工、李炳胜总工、张衍昌高工、武文东高工,工程监理方于镇洪高工、彭连海高工,新陆冻结安装分公司的齐吉龙高工、王然芳高工,中煤三公司第71工程处的潘声杰高工、孔祥春工程师等的大力支持与帮助,在此向他们表示衷心的感谢!

本书研究课题得到了国家自然科学基金重点项目“深厚表土层中人工冻结法凿井基础研究”(编号:50534040)、国家自然科学基金面上项目“冻结法凿井多圈管条件的冻结管断裂机理研究”(编号:50704033)、国家科技支撑计划课题“深厚冲积层冻结法凿井技术”(编号2006BAB16B01)的大力资助,在此表示感谢!

最后,特别感谢为本书出版付出了辛勤劳动的刘红岗编辑及各位审校人员!

受作者的认识能力与理论水平限制,书中相当一部分问题的研究尚不够系统与深入,不足、疏漏甚至谬误之处在所难免,敬请专家与读者批评指正。

作 者

2008年7月于徐州

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国内外的研究历史与现状	2
1.2.1 冻结法凿井技术的应用历史与现状	2
1.2.2 外壁与冻结壁温度场相互影响问题的研究历史与现状	4
1.2.3 冻结井井壁高强混凝土应用及外壁强度增长规律的研究历史与现状	6
1.2.4 冻结井井壁外载的研究历史与现状	7
1.2.5 冻结凿井期外壁内力与变形规律的研究历史与现状	12
1.3 研究内容与思路	14
1.3.1 研究内容	14
1.3.2 研究方法与技术路线	14
2 外壁水化热温度场与冻结壁温度场的相互影响	16
2.1 概述	16
2.2 理论分析	16
2.2.1 井筒开挖前的地层冻结温度场	16
2.2.2 开挖后未支护条件下的冻结温度场	17
2.2.3 井壁浇筑后的外壁及冻结壁温度场	18
2.3 物理模拟研究	19
2.3.1 工程概况	20
2.3.2 试验模型	22
2.3.3 试验系统	23
2.3.4 试验方案	24
2.3.5 试验过程	25
2.3.6 试验结果与分析	27
2.3.7 物理模拟试验结论	30
2.4 数值计算研究	32
2.4.1 水泥水化热的释放过程模拟	32
2.4.2 冻土的相变过程模拟	35
2.4.3 泡沫板压缩过程中导热性能的模拟	36

2.4.4	数值计算模型	37
2.4.5	初始及边界条件	38
2.4.6	计算参数	39
2.4.7	计算方案	41
2.4.8	计算结果与分析	42
2.4.9	龙固副井外壁与冻结壁温度场相互影响预测分析	47
2.5	现场实测研究	48
2.5.1	现场实测方案	48
2.5.2	现场实测结果与分析	50
2.5.3	现场实测研究结论	57
2.6	本章小结	58
3	外壁混凝土的早期强度增长规律	60
3.1	概述	60
3.2	外壁混凝土早期强度增长规律的室内试验研究	60
3.2.1	概述	60
3.2.2	试验方案	60
3.2.3	试验过程	61
3.2.4	试验结果与分析	63
3.3	外壁混凝土早期强度增长规律的现场试验研究	71
3.3.1	概述	71
3.3.2	试验方案	71
3.3.3	试验过程	72
3.3.4	试验结果与分析	73
3.4	本章小结	77
4	外层井壁的早期水平极限承载力	79
4.1	概述	79
4.2	外壁水平极限承载力的理论分析	79
4.2.1	冻结凿井期外层井壁的力学模型	79
4.2.2	不同力学模型下井壁内缘的应力	80
4.2.3	混凝土的强度准则	81
4.2.4	基于不同强度准则的外壁水平极限承载力	82
4.2.5	龙固副井外层井壁的水平极限承载力计算	83
4.3	外壁水平极限承载力的数值计算研究	86
4.3.1	概述	86
4.3.2	井壁承载力计算的有限元模型	86
4.3.3	有限元模型	87
4.3.4	数值计算方案	87

4.3.5	计算结果与分析	89
4.4	外壁早期水平极限承载力的物理模拟试验研究	96
4.4.1	概述	96
4.4.2	相似准则的推导	96
4.4.3	原型参数与模化设计	97
4.4.4	基本试验方案	97
4.4.5	模型试验系统	97
4.4.6	试验结果及分析	98
4.5	本章小结	102
5	冻结压力的增长规律	103
5.1	概 述	103
5.2	冻结壁流变变形压力增长规律的理论分析	103
5.2.1	冻结壁与外壁的相互作用过程	103
5.2.2	冻结壁变形压力的弹黏性流变分析	105
5.2.3	龙固副井冻结壁变形压力的弹黏性分析	111
5.2.4	理论分析小结	115
5.3	冻结壁变形压力的数值模拟研究	116
5.3.1	概述	116
5.3.2	井筒掘砌施工的数值模型	116
5.3.3	模拟计算方案	118
5.3.4	计算结果及分析	119
5.3.5	数值模拟小结	124
5.4	冻结压力的现场实测研究	124
5.4.1	概述	124
5.4.2	测试方案	124
5.4.3	测试结果及分析	125
5.5	本章小结	130
6	冻结凿井期外壁的内力与变形	132
6.1	概述	132
6.2	现场实测方案	132
6.2.1	钢筋轴力测试方案	132
6.2.2	混凝土应变测试方案	133
6.3	井壁钢筋轴力的变化规律	133
6.3.1	井壁钢筋轴力的温度修正	133
6.3.2	竖向钢筋轴力	136
6.3.3	环向钢筋轴力	140
6.3.4	径向钢筋轴力	143

6.3.5	凿井期间外壁钢筋轴力的总体变化规律	147
6.4	井壁混凝土应变的变化规律	150
6.4.1	井壁混凝土应变的温度修正	150
6.4.2	混凝土竖向应变	151
6.4.3	混凝土环(切)向影响	154
6.4.4	混凝土径向应变	157
6.4.5	凿井期间外壁混凝土应变总体变化规律	159
6.5	本章小结	160
7	特厚冲积层中冻结井外壁设计探讨	161
7.1	特厚冲积层中冻结井外壁的工程环境及受力特点	161
7.1.1	特厚冲积层中冻结井外壁的温度环境	161
7.1.2	特厚冲积层中冻结井外壁混凝土的早期强度增长规律	161
7.1.3	特厚冲积层冻结井外壁的受力与变形规律	161
7.2	特厚冲积层冻结井外壁设计的几个问题	162
7.2.1	外壁设计的力学模型问题	162
7.2.2	外壁荷载的取值问题	162
7.2.3	混凝土强度的取值问题	163
7.3	特厚冲积层冻结井井壁设计中尚待研究的其他问题	163
7.3.1	深厚冲积层中永久水平地压的取值	164
7.3.2	深部原状土、深部原状土人工冻土的力学特性	164
7.3.3	冻结井井壁结构的革新	164
8	主要结论	166
	参考文献	168

1 绪 论

1.1 概 述

我国的华东、华北与东北的部分地区分布着大面积的深厚冲积层,其下部蕴藏着丰富的煤炭资源。其中,华北开滦矿区南部宋家营一带冲积层厚度超过 500 m,华东巨野煤田第三及第四系冲积层厚度普遍达到 500~600 m,最深处超过 700 m^[1, 2]。随着经济建设的发展及浅部煤炭资源逐步趋于枯竭,深部煤炭开采、深厚冲积层中的矿井建设成为必然趋势。

人工地层冻结法是指通过人工制冷在地层中形成具有一定厚度与强度的冻土结构(通常称为冻结壁),用于抵抗外部的水土压力,而后在其保护下开展地下工程掘砌施工的一种岩土特殊施工技术。冻结法最早于 1862 年在英国用于基坑加固,德国学者波茨舒(F. H. Poetsch) 1883 年首次将冻结法应用于煤矿立井开凿,并取得了冻结法凿井技术专利,此后该技术逐步得到推广应用^[3, 4]。

1955 年,我国与波兰合作,首次将冻结法用于河北省开滦矿区林西煤矿风井的建设,随后大力推广而成为国内厚冲积层中矿井井筒建设的主要施工方法。

截止到 2003 年,我国采用冻结法建成的井筒总数已接近 500 个,总延米超过 80 km。其中,济西矿井井筒以 457.78 m 的冲积层厚度及 488 m 的冻结深度位居国内第一。世界上,采用冻结法穿过的最大冲积层厚度是 571 m(前苏联雅可夫列夫铁矿 2 号井),最大冻结深度为 930 m(英国博尔比钾盐矿井,以冻结基岩封水为主)^[5, 6]。总体而言,采用冻结法建成的矿井中,冲积层厚度超过 400 m 者(以下称为“特厚冲积层”)国内尚很少见,世界范围内也为数不多。

2003 年起开工建设的巨野矿区龙固煤矿副井,其冲积层厚度为 567.7 m,冻结深度为 650 m。龙固煤矿副井的建设,标志着我国冻结法凿井进入了一个新的阶段,冻结凿井穿过的冲积层深度、冻结深度开始向世界最高水平迈进。

随着冲积层厚度的增大,冻结法凿井面临着一系列急需解决的关键理论与技术课题,冻结井外壁的设计理论及其施工技术就是其中之一。

冻结法凿井工艺的特殊性与复杂性决定了冻结井现浇外层井壁的养护条件、强度增长规律及其受力与变形规律的复杂性。在我国冻结法凿井历史上,凿井期间外层井壁被压坏的事故曾屡见不鲜,至今仍时有发生,严重者甚至造成了淹井事故^[7~11]。

为此,本书以龙固煤矿副井冻结法凿井工程为背景,开展了特厚冲积层冻结井外壁的强度增长及其受力与变形规律的研究,以解决龙固矿副井冻结表土段外壁设计与施工所面临的部分关键理论与技术难题。本研究不仅为龙固副井冻结法凿井工程提供了重要的安全保障,而且为今后特厚冲积层中冻结井现浇高强混凝土外壁的设计与施工提供了可靠的理论依据。

1.2 国内外的研究历史与现状

随着冲积层厚度增加、地压增大,冻结井井壁不得不采用高强或高性能混凝土结构。冻结法凿井工艺的特殊性与复杂性,决定了冻结井外壁浇筑后,混凝土的强度增长伴随着水泥水化热温度场与冻结壁温度场的相互影响、外壁与冻结壁之间的力相互作用而发生、发展。因此,本课题的研究必须从外壁水化热温度场与冻结壁温度场的相互影响开始。

以下将围绕本书的研究课题,对相关问题的国内外研究现状进行综述。

1.2.1 冻结法凿井技术的应用历史与现状

自1955年我国首次采用冻结法施工开滦矿区林西风井以来,根据冻结凿井的冲积层深度、冻结凿井理论与技术的发展与完善程度,我国冻结凿井的历史可分为以下四个阶段^[1, 12~15]。

1.2.1.1 冻结凿井技术应用的早期:1955年至20世纪60年代初

该阶段属于冻结法引进应用的早期,以学习、模仿国外冻结凿井施工技术为主。1955~1959年间,我国共建成18个冻结井筒,最大冲积层厚度与最大冻结深度分别为154.8 m、162 m(荆各庄矿主井)。该时期,国内对冻结技术的特殊性认识尚很有限,冻结井多采用单层井壁结构,井壁解冻后漏水现象时有发生。

1.2.1.2 冻结凿井技术的逐步研究与完善阶段:20世纪60年代中期至80年代初

1960~1965年间,我国共建成26个冻结井筒,期间逐渐认识到冻结压力这一临时荷载不可忽视,同时也认识到了单层井壁防水存在的问题。

20世纪60年代初期,邢台煤矿副井(冲积层厚度为240.9 m,冻结深度为260 m)的建设标志着我国冻结凿井开始向250 m厚度的冲积层迈进。邢台煤矿主井建设期间,首次开展了冻结压力、温度的实测研究,并改用双层井壁结构,按“外壁承受冻结压力,内外壁共同承担永久水平地压”设计。此后至60年代末,采用双层井壁建成井筒19个,最大冲积层厚度及最大冻结深度分别达到324.4 m和330 m。

实践证明,双层井壁并未从根本上解决井壁漏水问题。但是,冻结压力、冻结温度的实测研究及双层井壁结构的使用标志着国内冻结凿井技术研究的真正开始。

1970~1974年间,建成冻结井筒70多个,但永久水平地压与冻结压力的取值、井壁结构漏水、高强支护材料等问题日益突出。70年代中期开始的淮北、淮南矿区大规模开发期间,通过在内、外层井壁间敷设塑料板,形成了“复合井壁结构”,基本解决了漏水问题。80年代初,通过在外壁与冻结壁之间铺设发挥“隔热、缓冲”作用的泡沫板,有效地防止了外壁破坏事故的发生,复合井壁结构得到进一步完善。1975~1979年,我国共建成冻结井筒59个,最大表土层厚358.8 m,最大冻结深度415 m。

本阶段是随着冻结凿井工程的大量开展,对于冻结凿井技术的特殊性、复杂性的认识不断深入的阶段。通过大量的工程实测及理论研究,可以说,截止到80年代初,冻结法凿井中出现的主要技术难题(井壁漏水)已基本解决。

1.2.1.3 400 m深度冲积层以内的冻结凿井技术基本成熟阶段:20世纪80年代初到20世纪末

20世纪80年代初至1995年,采用“复合井壁结构”建成冻结井筒100多个。其中,潘

三东风井的建设使国内冻结凿井的冻结深度首次超过 400 m,达到 415 m;陈四楼矿井的冲积层厚度与冻结深度分别达到 374.5 m 和 435 m;此后建设的元氏煤矿副井冻结深度达到 410 m。而在上个世纪末建设的金桥副井,则以 383 m 的冲积层厚度位居国内第一^[6]。

该阶段,冻结凿井中突出的问题是冻结壁变形过大及冻结管断裂。为此,解决途径主要有两条:一方面,强化冻结,降低冻结壁平均温度,提高冻结壁强度,并通过快速掘进,缩短井帮暴露时间以减小井帮变形;另一方面,加强冻结管管材、管接头力学性能的研究,尤其是焊接式内接箍管接头的采用,有效地改善了冻结管的弯曲适应性,减少了断管事故的发生。

可以说,截止到 20 世纪末,我国 400 m 深度以内冲积层中的冻结凿井经验已很丰富,该深度范围内的冻结凿井技术基本趋于成熟。

80 年代中后期,在淮南孔集西风井与开滦东欢坨副井冻结凿井工程中,曾引进德国的 AV 柔性井壁结构^[16],但终因造价太高,该型井壁结构未能在国内推广。

1.2.1.4 特厚冲积层冻结凿井阶段:21 世纪初起

21 世纪初,冻结凿井面临着挑战 400 m~600 m,甚至超过 600 m 的特厚冲积层的艰巨任务。地层深度增加及水平地压增大,使冻结法凿井面临许多急需解决的理论问题,例如:冻结壁设计的原有弹塑性理论公式不再适用、外载难以确定给冻结壁与井壁设计造成的困难。

然而,工程建设的紧迫性使得大量基础理论问题难以先期解决,信息化施工技术遂成为保证特厚冲积层中冻结法凿井工程安全的主要手段,相关的工程实测研究得以逐步展开。

冻结法凿井基础理论研究的相对滞后,以及工程实测、信息化施工技术的广泛应用,是目前特厚冲积层冻结法凿井的主要特征。

2003 年,河南程村煤矿主井、山东济西煤矿副井先后穿过厚达 429.9 m、458.5 m 的特厚冲积层,冻结深度分别达到 485 m、488 m;同期,尚有相当数量的特厚冲积层冻结凿井工程正在进行中。巨野矿区龙固煤矿副井(冲积层厚度 567.7 m,冻结深度 650 m)的建设,无疑标志着我国冻结法凿井技术已经开始向世界最高水平迈进。

世界范围而言,自德国最早开展冻结法凿井以来,人工地层冻结技术已在英国、法国、荷兰、波兰、比利时、加拿大、前苏联等数十个国家得到了广泛应用。其中,尤其是德国与前苏联在深厚冲积层冻结凿井过程中积累了最为丰富的经验。

截至 2003 年,前苏联雅可夫列夫铁矿 2 号井以 571 m 的冲积层深度位居冻结法凿井冲积层厚度的世界首位;英国博尔比钾盐矿则以 930 m 深度位居冻结深度世界首位,但后者的冻结以富水岩层封水为主,难度远小于特厚冲积层冻结法施工。

德国采用冻结法施工的维尔德风井、索菲亚·雅克巴 8 号井、莱茵贝格井等井筒穿过的松散冲积层也超过了 500 m,比利时、波兰、加拿大也有部分矿井的冲积层厚度或深度超过 400 m^[5, 6](见表 1-1)。但总体而言,厚度超过 400 m 的特厚冲积层中的冻结凿井工程,世界范围内也并不多见。

尤其需要指出的是,由于井壁结构与工艺的差异,使得国内外冻结法凿井技术的研究重点并不完全一致。例如,国外很少采用现浇混凝土双层复合井壁(如前苏联多采用铸铁丘宾块组合井壁),因而对于冻结凿井条件下外壁混凝土的强度增长很少关注;同时,其对冻结压力增长规律的关注也远不如国内。

总体而言,从 20 世纪 80 年代至今,我国的冻结凿井技术已逐步走在了世界的前列。目

前广泛开展的特厚冲积层冻结凿井更是其他国家所不曾面临的;因此,在特厚冲积层中冻结凿井的理论与关键技术的研究一旦获得成功,将使我国的冻结法凿井技术处于世界领先水平。

表 1-1 国外冲积层深度达到与超过 400 m 的深冻结井

国 别	井筒名称	净直径/m	冲积层厚度/m	冻结深度/m
前苏联	雅可夫列夫铁矿 1 号井	6.0	<571	—
	雅可夫列夫铁矿 2 号井	7.5	571	620
	雅可夫列夫铁矿 3 号井		<571	
	扎波罗热铁矿 1 号井风井	6.0	410	425
德 国	索菲亚·雅克巴 8 号井	4.0	543.5	558
	维尔德风井	6.0	540	581
	莱茵贝格井	7.0	<510	528
	劳贝克 3 号风井	6.5	423	450
比利时	候泰灵井	4.99	400~500	
波 兰	莱格尼查和格沃古夫铜矿	6.0	400	425
加拿大	雅百 1 号井	5.5	0~88.1	0~100
			377~437	366~441

1.2.2 外壁与冻结壁温度场相互影响问题的研究历史与现状

冻结井外壁浇筑后,随着水泥水化热的释放,一方面,热量向外传递将导致壁后冻土升温甚至融化,影响冻结壁的强度与变形,进而影响冻结压力的增长;另一方面,随着热量的散失,外部冷量将向外层井壁传递,并使其进入负温状态,进而可能影响混凝土的强度增长。

由此可见,开展外壁水化热温度场与冻结壁温度场的相互作用研究,无论是对于研究外壁混凝土强度增长,还是分析冻结压力增长规律及冻结壁的安全性,都具有重要的意义。

然而,尽管目前采用数值模拟、物理试验、现场实测甚至理论分析手段,针对冻结温度场发展规律、冻结壁平均温度等问题开展的研究已相当普遍,并取得了丰富的成果^[17~22],但针对“外壁水化热温度场与冻结壁温度的相互影响”问题所开展的研究却相当有限。

20 世纪 70 年代,兴隆庄矿在主井建设过程中曾开展了外层井壁浇筑后冻结壁内温度变化的监测。测试结果表明:壁后冻土的融化范围基本介于 200~600 mm 之间^[23],该测试结果对于融土回冻冻胀压力的提出提供了重要依据。

然而,需要指出的是:当时冻结壁与外壁之间尚未铺设起“保温、缓冲”作用的泡沫塑料板,且井壁厚度小、强度等级低。因此,早期开展的冻结井外壁与冻结壁相互影响程度的现场测试、研究的结果(见表 1-2)对于当前冻结井外层井壁的指导意义有多大难以确定。

20 世纪 90 年代,淮南新集一矿西风井在建设中的监测发现:在混凝土入模温度为 11℃ 的条件下,外层井壁浇筑后 30 h 左右达到最高温度 24.2℃,其内、外最大温差在 10℃ 左右;随着水化热的减小,外壁混凝土在 14 d 左右进入负温;而通过冻结壁表面 700 mm 深度范围内的冻土温度测试发现:井帮冻土的最大融化范围为 190 mm(见图 1-1)。但是,该测试是在深度为 185 m 处的地层内进行的,该部位井筒外壁的设计厚度为 450 mm,混凝土

强度等级仅为 C35,开挖时,该深度处井帮温度为 -6°C ^[24]。

表 1-2 冻结井井壁混凝土降至 0°C 的时间^[6]

井壁名称	冻土土性	井帮温度 $/^{\circ}\text{C}$	混凝土 强度等级	井壁厚度 $/\text{mm}$	入模温度 $/^{\circ}\text{C}$	浇筑后降至 0°C 的时间/d		
						井壁 横断面	井壁与井帮 交界处	井壁下部 接茬刃脚
外层及单 层井壁	沙层及 砂质黏土	$-5\sim-10$	C20~C25	300~400	20~25	6~7	5~6	3~4
				500~600	15~20	12	10~11	8~9
				850~900	10~15	20	16~18	14~16
内层井壁	沙层及 砂质黏土	$-5\sim-10$	C20~C25	400~500	15~20	>30		

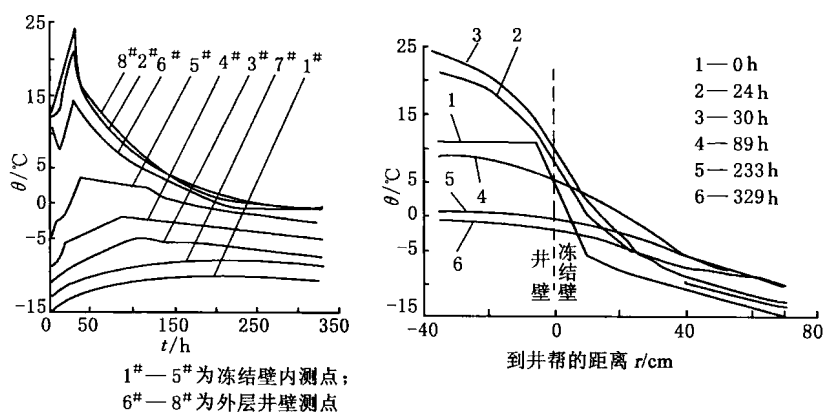


图 1-1 外壁与冻结壁内不同时刻温度分布曲线^[24]

在济西矿井主井凿井中,姚直书等^[25]首次在 400 m 以下的地层中,对 C65 混凝土外层井壁浇筑后的温度变化开展了现场测量。测试结果表明:井壁浇筑后 2 d 其内部最高温度达到 $40^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$,至第 14 d 时,外壁外侧仍处于正温,约为 6°C (见图 1-2)。

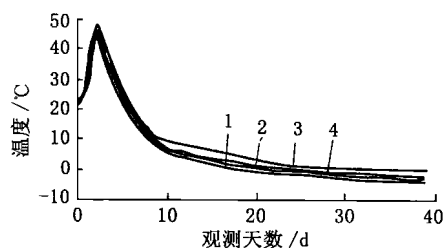


图 1-2 外壁混凝土浇筑后温度变化^[25]

1——南;2——北;3——西;4——东

除此之外,未见其他研究报道。总体来看,特厚冲积层中“冻结井外层井壁水化热温度场与冻结壁温度场的相互影响”方面的研究还很少见,仅限于数量极少的工程实测。

1.2.3 冻结井井壁高强混凝土应用及外壁强度增长规律的研究历史与现状

与普通混凝土相比,高强混凝土不仅对于原材料(水泥、石子、沙子、矿物掺加料、化学掺加剂)与施工工艺(如砂石的洗选、混凝土的搅拌、浇筑、振捣等)有着严格的要求,对于养护条件(温度、湿度等)的要求也较高。

随着高层建筑、大型桥梁及大型水利、水电工程的建设,高强混凝土在国内外已经广泛应用。其中,C80~C100的现浇混凝土已在国内高层建筑与桥梁工程中成功地应用;我国的国家大剧院工程则成功地采用了C110泵送混凝土。美、日等发达国家,C120高强商品混凝土也已开始应用,美国西雅图双联大厦则使用了C130高强混凝土^[26, 27]。

冻结凿井施工工艺的特殊性决定了冻结外层井壁养护条件的复杂性。因而,长期以来人们对于高强混凝土能否在冻结凿井中成功应用存在疑问,冻结井井壁结构设计也一直以采用相对较低的标号为主。

20世纪60年代初期以前,由于冻结冲积层深度小,我国冻结井的井壁混凝土设计标号一般为C18。70年代后期,随着冲积层的深度逐渐突破300m,混凝土标号逐渐提高到C38。潘二矿南风井冻结基岩段施工中试验段浇筑了C43号混凝土。1982年,潘三矿东风井井壁设计混凝土采用C38,施工中达到C43^[5, 7]。

20世纪80年代后期相继施工的兖州白马河副井、济宁2号井中央风井井筒,配制使用了C50混凝土。1990年施工的陈四楼主、副井(冲积层深度分别达到369m、374.5m),则采用了C40~C55混凝土,冻结井井壁混凝土强度等级首次超过C50。山东枣庄付村主井基岩段施工中,采用了网喷混凝土支护、薄壳筒C50高强混凝土的复合并壁结构^[5, 7, 29]。山东金桥煤矿副井内壁施工中采用了具有自膨胀特性的C50混凝土。此外,山东鲁西煤矿设计采用了强度等级为C50的混凝土。淮北矿区祁南主井为C48,而祁南的副井与西风井井壁设计强度等级达到C58(注:上述两井发生了严重的外壁破坏事故^[30])。除此之外,还有少量冻结井井壁也设计采用了C50混凝土,截至20世纪末,未见到国内其他矿井使用更高强度等级的混凝土的报道。

根据高强混凝土的定义,强度等级等于或高于C50(相当于过去的520号)的混凝土才能称为高强混凝土。由此可见,截止到20世纪末,除少数矿井外,高强混凝土在我国冻结凿井中的应用很少,并且,部分矿井尽管采用了强度等级高达C60的混凝土,仍发生了严重的井壁破坏。

2000年之后,随着冲积层厚度超过400m及水平地压增大,对井壁承载力的要求越来越高。为了有效地减小井壁厚度,高强混凝土的使用势在必行。2002年左右开工建设的程村矿井、济西矿井中先后采用了C60、C65混凝土,目前在建的冲积层厚度超过400m的矿井,也无一例外地采用了高强混凝土,如龙固副井建设中外层井壁采用C70混凝土。

综上所述,现浇高强混凝土在冻结凿井中的大规模应用才刚刚开始,能否真正取得成功还有待于实践检验。尤其需要指出的是,以往采用的“高强混凝土”,都是指在“标准养护条件下”混凝土标准试块已经达到或超过了高强混凝土的设计强度,而对于实际工程之冻结凿井低温条件下,混凝土强度是否真正达到了设计要求,未见有研究报告或文献发表。

事实上,正如对于外层井壁破坏研究所发现,外层井壁的破坏往往是其早期强度增长缓慢,无法抵挡增长过快的冻结压力所致。可见,在“冻结凿井环境”条件下,高强混凝土的“强度增长速度”才是需要格外关注的重点,而非仅仅注重“最终强度”(28d强度)。

济宁 2 号井中央风井、付村主井中采用的 C50 低温、早强、高强混凝土的混凝土试块试验研究表明:其 3 d 强度能达到 28 d 强度的 70%^[29]。而陈四楼矿井建设中采用的 C40~C55 混凝土强度增长速率超过了冻结压力的强度增长速率^[5]。

杨俊杰^[31]等曾对强度等级为 C40 的现浇外层井壁的强度的增长开展了现场实测研究。结果表明:井壁混凝土强度增长滞后于标准养护混凝土,一般在 60 d 后可以达到自然养护条件下 28 d 的强度(见图 1-3),但该结论能否适用于高强混凝土值得探讨。

杨平^[24]则开展了低温环境下混凝土试块的强度增长规律研究。试验表明:与同龄期的常温养护试块相比,低温条件下养护的混凝土试块强度低 28%~48%;但随着养护时间延长,二者的差异逐渐减小(见图 1-4)。需要指出的是,由于井壁属于大体积的混凝土结构,低温条件下试块的强度增长规律是否就代表井壁内混凝土的强度增长规律有待于深入探讨。

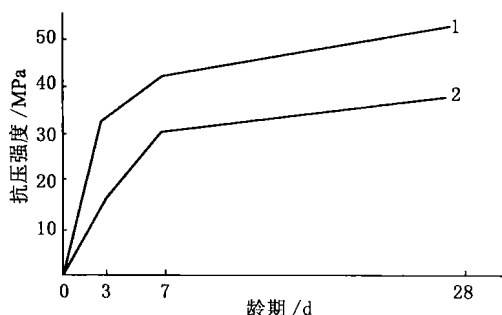


图 1-3 井筒外壁 C40 混凝土强度增长情况

1——试块标准养护强度;2——现场取芯强度

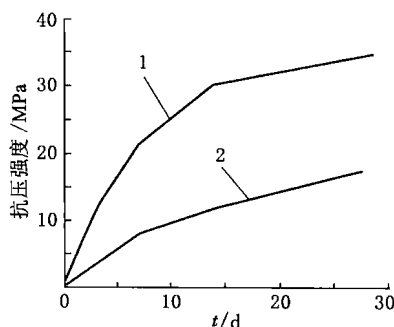


图 1-4 井筒外壁混凝土强度增长情况^[24]

1——常温混凝土强度;2——低温混凝土强度

此外,未见冻结凿井条件下混凝土强度增长规律方面的研究资料或文献发表,而至于现浇高强混凝土,则更未见类似的研究成果。

对于特厚冲积层中的冻结凿井工程,考虑到仍采用现浇外层井壁时,其设计强度等级将达到 C70,甚至超过 C80。因此,开展冻结凿井条件下现浇高强混凝土的强度增长规律研究已经显得极为迫切与必要。

1.2.4 冻结井井壁外载的研究历史与现状

井壁外载是冻结井井壁结构设计的前提,然而,井壁与冻结壁相互作用的复杂性决定了井壁外载的复杂性,也决定了冻结井井壁结构研究的复杂性。可以说,冻结井井壁结构的发展历史就是人们对井壁外载的认识不断深入的历史。

对于冻结井井壁外载的认识,可以分成三个阶段^[32, 33]:

(1) 第一阶段:1955 年到 20 世纪 60 年代初期

该阶段属于国内冻结凿井的初期,人们对于井壁外载的认识还相当肤浅,基本认为冻结井壁承担的就是外部永久水平地压(水土压力)。

井壁结构设计时,引用松散体挡土墙土压力理论计算永久水平地压;井壁自重认为由地层承担;后来为了安全,将部分井壁自重(10%~40%)作为井壁竖直荷载。

该阶段采用单层井壁结构,冲积层深度均在 200 m 以内,凿井期间基本未出现井壁压

坏事故,但井壁养护过程中往往出现大量裂缝,导致解冻后井壁漏水。

(2) 第二阶段:20 世纪 60 年代初期到 80 年代末

1960~1964 年间在大量冻结井的建设过程中,人们逐渐认识到冻结压力这一临时荷载的重要性,并最早在邢台矿主井建设过程中开展了大量的现场实测,同时井壁结构也改用双层井壁的形式,并按“外壁承担冻结压力,内外壁共同承担永久水平地压”的思路设计井壁。此后建设的兴隆庄主井、芦岭西风井、南屯主井等在矿井建设中也开展了冻结压力的测量。

基于现场实测数据,马英明^[23]、苏立凡^[34]等对冻结压力性质及其变化规律的研究表明:冻结压力主要由冻结壁变形压力、冻胀压力组成。变形压力是由于外层井壁阻止井筒开挖后冻结壁的弹塑性及蠕变变形所致,与地层深度、土层性质、冻结壁的强度与变形性质、砌壁前井帮已经产生的位移量、外层井壁的可缩性等均有关系;而融土回冻压力则是井帮冻土受混凝土水化热影响融化后,再次冻结时冻胀变形趋势受阻而产生的。

根据冻结压力的增长规律不同,马英明^[23]将冻结压力分为两种类型:“邢台型”、“兴隆庄型”(见图 1-5)。其中,邢台型在外层井壁浇筑初期冻结压力来压慢,一般在 15 d 内不超过最大冻结压力的 30%,此情形主要在冻结壁强度较高、变形较小的地层中出现。而兴隆庄型冻结压力来压迅速,一般在外壁浇筑后 3~5 d 内冻结压力即达到最大值的 50%~70%。由于井壁强度增长是一个渐进的过程,一旦井壁强度增长无法满足抵挡冻结压力的需要,外壁就将被压坏,该情形主要在冻结壁强度低、变形大的地层中出现。

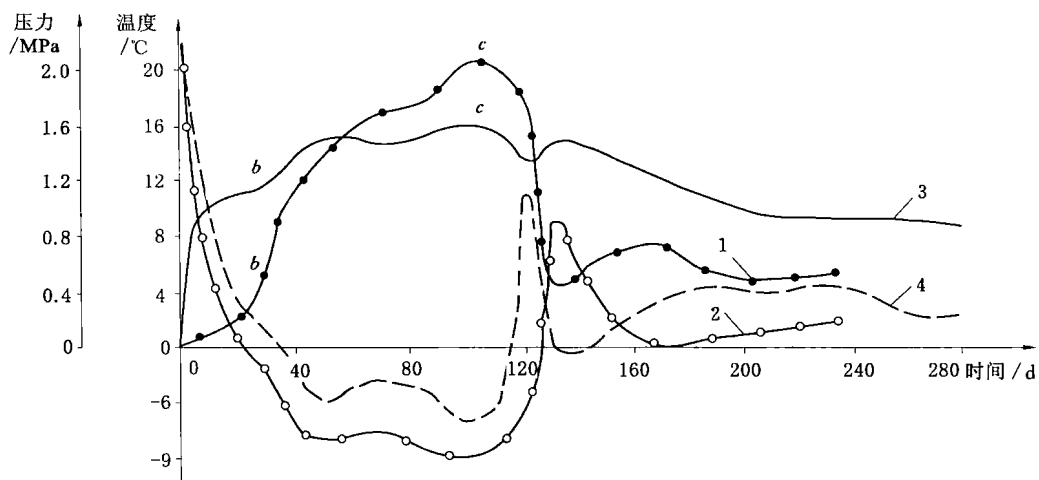


图 1-5 冻结压力增长的两种不同类型^[23]

1,2——分别为邢台型压力和温度曲线(深 165 m,砂质黏土);

3,4——分别为兴隆庄型压力和温度曲线(深 151 m,黏土)

至于冻结压力随深度的变化规律,马英明根据 20 世纪 60~70 年代国内 7 个井筒的实测资料(见图 1-6),回归得到了冻结压力的经验公式:

$$\begin{cases} p_d = 1.74(1 - e^{-0.02H}) & H \leq 100 \text{ m} \\ p_d = 0.005H + 1.0 & H > 100 \text{ m} \end{cases} \quad (1-1)$$

式中 p_d ——冻结压力, MPa;

H ——地层深度, m。