

Ruanyan Dicengzhong Jingtong Kongzhi Dongjie Lilun Yu Shijian

软岩地层中 井筒控制冻结理论与实践

张 勇 王怀华 张忠富 王清虎 石荣剑 郑海滨 闫建华 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

软岩地层中井筒 控制冻结理论与实践

张 勇 王怀华 张忠富 王清虎
石荣剑 郑海滨 闫建华 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以宁夏等西部地区软弱、富含水地层非全井冻结法建井的冻结壁和井壁为研究对象,在解析计算、数值模拟、模拟试验和工程实测研究的基础上,综合介绍了软岩地层控制冻结的温度场影响因素、控制冻结温度场、既有井筒结构保护技术、冻结设计计算理论、非全井冻结施工工艺及信息化施工技术等方面的研究成果。

本书可供从事矿山建设、岩土工程和地下工程学习和研究的院校师生及其他科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

软岩地层中井筒控制冻结理论与实践 / 张勇等著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.6

ISBN 978-7-5646-2150-6

I. ①软… II. ①张… III. ①软岩层—冻结法(凿井)—研究 IV. ①TD265.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 286194 号

书 名 软岩地层中井筒控制冻结理论与实践
著 者 张 勇 王怀华 张忠富 王清虎 石荣剑 郑海滨 闫建华
责任编辑 吴学兵
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
开 本 787×1092 1/16 印张 10.5 字数 262 千字
版次印次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷
定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着我国经济建设的快速发展和人们生活水平的不断提高,能源的需求量越来越大,煤矿建设日益增多,面临的问题和困难越来越大。冻结法施工除了适用于解决第四系表土层的含水问题外,也适用于强度不高的含水基岩,以提高其强度。冻结法已成为我国采矿工业通过不稳定冲积层和裂隙含水层的主要施工方法。冻结法作为矿井建设的一种主要工法也面临新的问题。

冻结法作为一种软弱土体加固的工法自 20 世纪中叶在我国开始应用,近年来在我国矿井建设、隧道、地铁和建筑基础等领域中得到不断应用和发展。软岩地层中既有井筒条件下进行冻结施工是冻结法面临的新问题。本书基于大量的基础试验,模拟试验和实际工程,全面论述了软岩地层中既有井筒条件下冻结的基本特征和基本规律及实践。本书特别介绍了对软岩地层中既有井筒条件下冻结开展的综合研究,包括冻结土层的基本冻结参数、冻结温度场、软岩地层的冻胀及井筒的保护技术、软岩地层中既有井筒保护的控制冻结设计技术和信息化施工技术。

本书的特点如下:

- (1) 主体明确、内容全面、言简意赅。
- (2) 全书取材试验和工程实践,结合实际开展理论研究,注重实用价值。
- (3) 模拟试验和理论分析为工程提供理论依据,促进了相关理论的发展。
- (4) 对工程实例的内容叙述详细,为同类工程使用提供了参考。

本书的出版对我国当前的冻结工程的推广应用和地下工程的建设具有较高的指导意义和促进作用。

衷心感谢宁煤集团等相关单位的领导和专家长期以来给予的支持和帮助。

本书成果是集体智慧和劳动的结晶。参加相关课题研究并作出贡献的研究者有:岳丰田、陆路、郑彭生、曹小为、高书豹、夏阳、王星童、罗竹、吴昊、黄浩斌、阴悦、宋益明等,作者在此一并致以最诚挚的感谢!

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏欠妥或错误之处,恳请有关专家和广大读者不吝批评指正。

作 者

2016 年 3 月

目 录

1 概述	1
1.1 宁东地区地层的地质条件	1
1.2 人工地层冻结法	4
1.3 项目研究的内容	10
2 软岩地层控制冻结的温度场影响规律数值模拟研究	11
2.1 有限单元法基本理论	11
2.2 ANSYS 计算软件简介	12
2.3 ANSYS 热分析与相变问题	13
2.4 井筒控制冻结温度场的数学模型	14
2.5 典型参数下冻结温度场数值计算	16
2.6 温度场影响规律的数值计算方案	19
2.7 冻结温度场数值计算结果分析	20
2.8 冻结温度场的多因素回归	26
3 人工冻结冻胀机理及井筒保护措施研究	31
3.1 冻结过程中的水分迁移规律	31
3.2 冻胀模型的建立	33
3.3 土体冻胀性分类	35
3.4 冻土的冻胀影响因素	36
3.5 既有井筒保护措施的研究	39
4 软岩地层控制冻结物理模拟试验研究	72
4.1 模拟试验方法简介	72
4.2 相似准则与模化设计	73
4.3 试验系统	77
4.4 试验过程	81
4.5 试验结果分析	82

5 软岩地层既有井筒保护的控制冻结设计技术研究	86
5.1 常规的冻结壁设计方法	86
5.2 软岩地层冻结壁设计理论分析	90
5.3 麦垛山煤矿副井和风井的控制冻结设计	96
6 软岩地层控制冻结的信息化施工技术研究	107
6.1 概述	107
6.2 冻结信息化监测方案设计	107
6.3 麦垛山矿副井人工冻结监测数据分析	111
6.4 麦垛山煤矿回风立井冻结监测数据分析	126
6.5 井壁保护效果分析	141
附录 控制冻土边界热盐水循环系统及装置	143
参考文献	157

1 概 述

随着我国经济建设的快速发展和人们生活水平的不断提高,能源的需求越来越大。中国已成为继美国之后的世界第二大电力消费大国,电力对经济发展的制约作用开始显现,且呈越来越大之势。我国是煤炭资源比较丰富的国家,目前,煤炭依然在中国能源消费总量中居主导地位,占到能源消费总量的 $2/3$ 左右。2014 年全国煤炭产量 38.7 亿吨,接近世界一半。

因此勘探新的大型煤田,建设一批新的大型矿井已成为国家的当务之急。而冻结法凿井是采用人工制冷技术暂时加固不稳定地层和隔绝地下水的施工方法。目前,冻结法施工除了解决第四系表土层的含水问题外,对强度不高的含水基岩也适用,以提高其强度。冻结法已成为我国采矿工业通过不稳定冲积层和裂隙含水层的主要施工方法。

在表土段采用普通法施工井壁结构后,下部含水层使用冻结法施工时,要考虑到上部已建井筒的保护问题,即冻结法施工不能对上部已施工的井壁造成破坏,所以需要上部井壁的保护技术和方法进行专门研究,采取相应的保护措施,形成软岩地层中保护上部已建井筒的控制冻结技术。

1.1 宁东地区地层的地质条件

根据神华宁夏煤业集团麦垛山煤矿井筒检查孔的勘测资料,建设矿井附近未见基岩出露,被广泛的第四系风积砂、黄土和古近系的浅红色黏土所覆盖。检查孔揭露的基岩地层有侏罗系中统延安组、直罗组。各地层由老到新简述如下:

(1) 侏罗系中统延安组(J_2y)

为一套内陆湖泊三角洲沉积,是井田的含煤地层。检查孔揭露厚度 247.06 m。岩性为灰、灰白色中、粗粒长石石英砂岩、细粒砂岩,深灰、灰黑色粉砂岩、泥岩及煤等。

(2) 侏罗系中统直罗组(J_2z)

为一套干旱、半干旱气候条件下的河流—湖泊相沉积。检查孔揭露厚度 338.40 m。其岩性上部主要为灰白、浅灰、灰绿、灰色的细粒砂岩,灰色、褐色粉砂岩,夹粗、中粒砂岩。中下部以厚层状的灰白、黄褐或浅红色含砾粗粒石英长石砂岩(七里镇砂岩)为主,与其下含煤地层假整合接触。

(3) 古近系(E)

检查孔揭露厚度 45.40 m。其岩性主要由浅紫红色粉质黏土及黏土组成,底部为砾岩层。不整合于下伏各地层之上。

(4) 第四系(Q)

为冲积、洪积的黄土,底部见钙化结核。顶部为现代沉积的风成沙丘和黄土层。覆盖

在各地层之上,厚 3.00 m。

1.1.1 影响井筒施工的构造

根据麦垛山井田地质、地震资料,有可能影响副立井井筒的构造主要有 F9 逆断层(走向北北西,断面东倾, $H=0\sim 320$ m,倾角 $<65^{\circ}\sim 75^{\circ}$,平面上距离副立井检查孔约 380 m)、F10 逆断层(走向北北西,为断面西倾的逆断层,倾角约 $51^{\circ}\sim 62^{\circ}$,落差 $0\sim 180$ m,平面上距离副立井检查孔约 390 m)和于家梁周家沟背斜(走向北北西,平面上背斜轴距离检查孔约 220 m)。本次检查孔施工中,部分层段岩石裂隙发育,结合麦垛山井田地质资料,有可能为受断层或褶皱影响产生的裂隙。这些裂隙富水性、导水性好,有可能造成掘进工作面涌水量增大,在井筒掘进中要采取先探后掘的方法,以确保掘进工作面安全。据地震资料,F9、F10 逆断层在平面上摆动范围约为 30 m。

1.1.2 影响井筒施工的主要含水层

影响麦垛山煤矿立井井筒施工的含水层主要为侏罗系中统直罗组裂隙孔隙水含水层、2 煤~6 煤间砂岩裂隙孔隙含水层及 6 煤以下砂岩裂隙孔隙含水层,其中对井筒施工影响较为明显的有侏罗系中统直罗组裂隙孔隙水含水层、2 煤~6 煤间砂岩裂隙孔隙含水层。

(1) 侏罗系中统直罗组上段裂隙孔隙含水层(组)

该含水层(组)属于旱条件下的河流沉积物。本次检查孔揭露厚度 186.70 m,其中含水层厚 60.55 m。含水层岩性以细、中砂岩为主,泥质胶结,颗粒支撑。该含水层与厚度较大、分布较稳定的古近系黏土层直接接触,由于古近系黏土层的隔水作用,使得该段含水层与第四系含水层联系较差。简易水文观测,消耗量在直罗组上段地层钻进中变化不大,说明含水层渗透性较差,为弱富水性含水层。

根据检查孔直罗组上段含水层抽水试验结果,地下水静水位标高 1 313.47 m,水温 11°C 。当水位降深 $S=42.57$ m 时,涌水量 $Q=0.569$ L/s,单位涌水量 0.0134 L/(s·m),渗透系数 $K=0.0194$ m/d。据水质分析资料,地下水矿化度 14951 mg/L,为盐水; $\text{pH}=7.57$,为弱碱性水;总硬度 230.33 ,为极硬水;地下水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 型。

(2) 侏罗系中统直罗组下段裂隙孔隙含水层(组)

该含水层(组)是影响井筒施工的主要直接充水含水层之一,含水层厚 122.57 m。岩性主要为灰白、灰褐、浅红色夹紫斑的细、中、粗粒砂岩,局部夹薄层粉砂岩和泥岩,局部含砾;砂岩的成熟度较低,分选性差,接触式胶结为主。底部为一厚层灰白、浅红色含砾石英长石粗砂岩,俗称“七里镇”砂岩,砂岩底部含石英小砾石,泥质胶结、颗粒支撑,胶结程度较差。

根据检查孔直罗组下段裂隙孔隙含水层抽水试验结果,地下水静水位埋深 105.00 m,标高 1 312.38 m,水温 12°C 。当水位降深 $S=11.07$ m 时,涌水量 $Q=2.534$ L/s,单位涌水量 0.2289 L/(s·m),渗透系数 $K=0.1576$ m/d。据水质分析资料,地下水矿化度 12635 mg/L,为盐水; $\text{pH}=7.89$,为弱碱性水;总硬度 193.66 ,为极硬水;地下水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型。

(3) 2 煤~6 煤间砂岩裂隙孔隙承压含水层(组)

本含水层(组)岩性由灰白色不同粒级的砂岩组成,粉砂岩和煤层呈互层状夹于含水层

之中。含水层厚度 80.0 m,地下水水位水头标高 1 310.21 m,水温 14 ℃。含水层富水性属弱含水层。

根据检查孔抽水试验结果,当水位降深 $S=37.14$ m 时,涌水量 $Q=0.863$ L/s,单位涌水量 0.0232 L/(s·m),渗透系数 $K=0.0183$ m/d。据水质分析资料,地下水矿化度 11 921 mg/L,为盐水;pH=7.43,为弱碱性水;总硬度 130.92,为极硬水;地下水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型。

(4) 6 煤以下砂岩裂隙孔隙承压含水层(组)

本含水层(组)由浅湖~三角洲体系的三角洲平原相组成。含水层厚 22.01 m,分选性中等,渗透性较差,富水性弱。由灰色中、细粒砂岩组成,黑色泥岩、炭泥岩、灰色粉砂岩、煤夹于其中,岩性致密、坚硬。据矿井地下水水头标高 1 307.22 m,水温 15 ℃。

根据矿井检查孔抽水试验结果,当水位降深 $S=64.39$ m 时,涌水量 $Q=0.502$ L/s,单位涌水量 0.008 L/(s·m),渗透系数 $K=0.036$ m/d。据水质分析资料,地下水矿化度 12 871 mg/L,为盐水;pH=7.44,为弱碱性水;总硬度 130.21,为极硬水;地下水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型。

1.1.3 影响井筒施工的主要隔水层

矿井检查孔揭露的隔水层有:古近系黏土隔水层、直罗组砂岩粉砂岩、泥岩为主的隔水层,以及各主要煤层及其顶底板泥岩、粉砂岩组成的隔水层。现将主要隔水层分述如下:

(1) 古近系黏土隔水层

该隔水层是第四系与直罗组裂隙孔隙含水层之间的隔水介质,本孔隔水层层厚 33.50 m,埋藏深度 3.00 m。

据岩土物理力学分析资料,结合岩石鉴定成果认为:从力学属性来看,井筒区古近系黏土属高液限、具中等~强膨胀性的不良工程土体,吸水后膨胀,抗风化能力差,力学强度低。即使发育裂隙,也往往充填了自身破碎的泥质碎屑物和石膏。因此,其导水性与含水性很弱,且阻隔了第四系与基岩含水层之间的水力联系,构成井田含水层顶部隔水边界。

(2) 直罗组粉砂岩、泥岩隔水层

岩性以粉砂岩、泥岩为主,夹有少量薄层细粒砂岩,层厚 135.23 m。隔水层的隔水性与泥质含量高低成正相关,与沉积环境、地下水赋存状态及构造性质、裂隙发育程度有关;当隔水层为岩性较细且致密的粉砂岩,或泥质含量较高的细砂岩,或砂岩与泥岩类呈互层状,岩性分布较稳定时,隔水效果较好。

(3) 2 煤~6 煤之间隔水层

2 煤~6 煤之间隔水层包括煤层本身及顶底板粉砂岩、泥岩隔水层,层厚 78.02 m。岩性主要为煤、粉砂岩,局部夹炭泥岩。其中上段 2 煤、3 煤组本身及顶底板粉砂岩隔水层,隔水层分布稳定,原始状态下煤层未开采时,上下含水层之间联系程度低。

(4) 6 煤以下隔水层

主要为 6 煤、7 煤、8 煤本身及顶底板,隔水层岩性主要为煤、深灰色粉砂岩,层厚 66.19 m。6 煤本身及底板隔水层厚 11.20 m。隔水层厚度较大,使得该隔水层隔水性能相对较好。

1.1.4 井筒充水因素

大气降水多以地表径流的形式汇入沟谷再流向井田之外,加之古近系巨厚的黏土和粉质黏土的隔水层的作用,使大气降水对井筒充水的影响很小。麦垛山井田内无常年性地表水体,分析认为地表水对井筒的充水影响不大。影响井筒的地下水,是指第四系松散层孔隙水、古近系含水层、侏罗系中统直罗组砂岩含水层、延安组砂岩含水层。其中侏罗系中统直罗组砂岩含水层、延安组砂岩含水层对井筒充水影响较大。井筒开拓过程中,井筒充水含水层及充水方式,主要取决于岩层裂隙发育程度、上下含水层之间的水力联系以及掘进采动所形成的导水裂隙带能否波及上覆含水层。回风立井井筒位于于家梁周家沟背斜东翼(距离轴部约 300 m)、F10 逆断层下盘,基岩裂隙较为发育,充水、导水性较好,对井筒充水影响较大。据现场岩芯描述,基岩裂隙多为高角度裂隙,结合钻孔抽水试验,四个含水层(组)水头标高相差不大,但单位涌水量、水质相差较大,说明钻孔上下含水层之间有一定的水力联系,但联系较弱。

1.2 人工地层冻结法

1.2.1 人工冻结原理

冻结法凿井是在拟开凿井筒的周围打一定数量的钻孔,孔内装有带底锥的冻结器,以便输送低温盐水进行热交换,吸收管子周围地层的热量,使之降温乃至冻结。随着冻结工作的延续,各钻孔周围的冻结圆柱不断扩展而连成不透水的且能抵抗地压和水压的圆筒,然后在冻结壁的保护下进行井筒的掘砌工作。

土体是一个多相和多成分混合体系,由水、各种矿物质和化合物颗粒、气体等组成,而土中的水又可有自由水、结合水、结晶水几种形态。当降到负温时,土中的自由水结冰并将土体颗粒胶结在一起形成冻结整体。冻土的形成是一个物理力学过程,随着温度的降低,冻土的强度逐渐增大。

人工土层冻结法施工原理:在人工制冷作用下,形成低温盐水,通过低温盐水在埋设于地层中的管道内循环,在冻结孔内完成与地层的热交换,带走地层热量,使地温逐渐下降并结冰。随着制冷的继续,结冰区逐渐发展,形成设计要求的冻土结构,目的是满足安全掘砌施工要求。

地层冻结是通过一个个的冻结管向地层输送冷量的结果。循环盐水常用结冰点很低的氯盐类的水溶液,如氯化钙、氯化镁或氯化钠,其中最常用的是氯化钙溶液。循环盐水在冻结过程中起着传递能量的作用,它将携带的冷量通过冻结管传递给地层;又将地层传来的热量带至盐水箱,再将热量传递给制冷系统,由制冷系统排放到大气中。盐水在环形空间流动时吸收冻结管周围岩土层的热量,使岩土层冻结,每个冻结管四周形成多个单独的圆柱状冻结地基体,相邻的冻结圆柱体相交,形成冻土墙帷幕结构,冻土墙向两侧扩展,向内的扩展速度比向外的扩展速度要快,通常向内的扩展范围要先到达开挖边界。

土体冻结先是在每个冻结管的周围形成以冻结管为中心的降温区,分为冻土区、融土降温区、常温土层区。在靠近冻结管的周围,温度呈同心圆状分布的特征,但越向远处,该特征

越不明显,由于土体中水-冰之间的相变作用,土体中的温度分布曲线在相变温度点出现平台,据此可划分出冻结区和未冻区,地层中温度曲线呈对数曲线分布。

人工冻结法始于 19 世纪,是利用人工制冷技术降低地层温度,使地层中的水冻结,把天然岩土变成冻土,增加其强度和稳定性,隔绝地下水与地下工程的联系,以便在冻结壁的保护下进行地下工程施工的特殊施工技术。冻结法广泛应用于煤矿井筒施工中,是解决淤泥、流砂等不稳定含水表土和基岩裂隙含水段的可靠施工方法。其实质是利用人工制冷临时改变岩土性质以固结地层。

人工冻结的应用和研究是以天然冻结条件下冻土的物理力学性质研究为基础,随着人工冻结凿井逐步发展起来的。英国工程师南威尔士 1862 年在建筑基础施工中首次使用了人工冻结技术加固地层。1883 年德国工程师 P. H. Poetsch 提出人工地层冻结原理(Artificially ground freezing method),成功应用于阿尔里德九号井凿井工程,并申请获得冻结凿井技术专利。我国自 1955 年在波兰专家的帮助下应用冻结法建立了开滦林西矿风井以来,冻结法凿井在我国广泛推广。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,冻结施工工艺技术日益完善,冻结法先后在德国、比利时、英国、波兰、苏联、法国、加拿大、南非、中国等国家得到了普遍应用。

冻结使土体的物理力学性质发生了突变,与未冻土相比,冻土的性质发生了较大的改变,主要表现在以下几方面:

- (1) 黏聚力增大、强度提高;
- (2) 土中水结冰,使原来松散含水土体成为不透水土体;
- (3) 压缩量明显减小;
- (4) 体积增大。

不透水和较高承载力正是土工工程所需要的,是对工程有利的,这种性质的改变使得人工冻土成为一种临时的承载结构,在这一临时承载结构的保护下,可以顺利完成岩土体工程的施工。因而人工冻结地层技术成为施工地下工程的一种重要方法。

采用冻结法围护结构在复杂和特殊地层施工中具有很大的优越性:

(1) 适应性强。它适应于各种复杂地质及水文地质条件下的任何含水地层的土层加固,并且基本不受结构形式、平面尺寸和深度的影响。

(2) 冻结加固土体均匀,整体性好。冻结加固体的形状、大小可以根据需要灵活设计,可以把设计的土体全部冻成冻土,形成地下工程施工帷幕。土层注浆和深层搅拌桩,只是对土体局部加固,加固范围不易控制、加固体强度不均匀。

(3) 隔水性好。由于地层中水在低温下结冰,冻结壁防渗性能是其他施工方法所无法相比的。

(4) 施工方便、简单。人工土冻结法由于基本不受支护范围和支护深度的限制,完全以地层本身形成支护体系,且冻结加固体形状可根据工程需要灵活设计,既可形成圆筒形加固体,又可形成棚拱形加固体。

(5) 环境污染少、影响小。它充分利用土体自身的特点,材料是土体本身,对地下水资源及周围环境无污染,冻结壁热水循环后,冻结管可以视情况回收,地下土层恢复原状,对地下工程较为有利。冻结工程施工最大的污染是钻孔时少量的泥浆排出。冻结过程中不向地层注入任何有害物质;冻结工程完毕后,地层自然融化恢复原有状况,不会在地层留下有碍

于其他工程施工的地下障碍物。作为一种“绿色”施工方法,符合当今环境岩土工程发展趋势。

(6) 经济上比较合理。国外的工程实例表明,冻结工程成本与其他施工(如注浆和旋喷)处于相同的数量级,而且随着加固深度的加大,冻结工法的经济性越来越明显。

近年来,随着人工制冷技术和冻土力学的发展,冻结法施工技术不断完善,其应用范围和施工规模不断扩大。在铁路隧道、公路隧道、海底隧道以及各种地下洞室的施工中得到了广泛的应用。据文献记载,英国采用冻结法最大冻深达 930 m。苏联 Kharkov 的沙洲污水泵站,埋深 39 m,冻结孔圈径 69 m,冻结深度 60 m。

1.2.2 岩土冻融过程

地层冻结是土中水冻结并将固体颗粒胶结成整体的物理力学性质发生变化的过程,土中水的冻结过程可以划分为五个阶段,如图 1-1 所示。

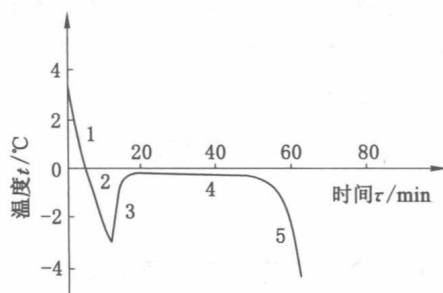


图 1-1 冻土中水冻结过程曲线

各阶段特点如下:

1——冷却段:温度从初态降低到水的冰点,此时尚无冰。

2——过冷段:温度继续降至冰点下,自由水仍不结冰,呈过冷现象。与温度、热平衡有关,但若在水达到冰点且全部水未结冰前,有结冰冰晶生长或有振动的影响,土中水将立即进入稳定冻结阶段,而无明显过冷现象产生。

3——温度突升段:部分孔隙水冻结,释放潜热,温度突升。

4——稳定冻结段:温度升至冰点并稳定,孔隙水开始冻结成冰,冻土逐渐形成。

5——冻土降温段:温度继续降低,冻结范围扩大、冻土强度增加,吸收冷量,温度进一步降低。

冻土融化是冻土温度升高后其中的冰融化,同时胶结的固体颗粒分散的物理力学性质发生变化的过程。冻土融化过程中按照土温随时间变化大致可分为两个阶段,如图 1-2 所示。

1.2.3 岩土冻结实质

冻土的基本成分是:固体矿物颗粒、黏塑性冰包裹体、液相水(未冻水和强结合水)和气态包裹体(水汽和空气)。

(1) 冻土的固体矿物颗粒对冻土性质有极为重要的影响。冻土性质不仅决定于矿物颗粒的尺寸和形状,而且决定于矿物颗粒表面的物理化学性质和矿物颗粒的分散度。

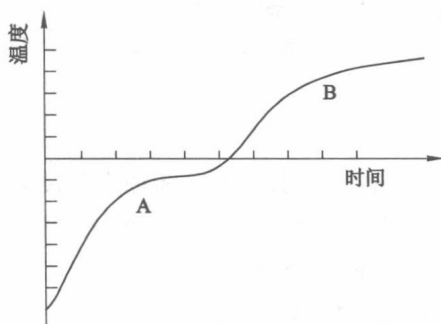


图 1-2 冻土中冰融化过程曲线

A——融化过程阶段:随着冻土中液态水含量增高,融化温度不断升高;

B——融后阶段:土中冰晶全部融完后,土温逐渐与环境温度达到平衡

(2) 冻土中存在着冰包裹体,其独特的性质在很大程度上制约着冻土的力学性质。冰具有强烈的各向异性,而且即使在极小的应力作用下,都会出现黏塑性变形。在天然条件下由于热动力条件(温度、压力等)经常发生某些变化,冰的性质(组构和黏滞性等)也会随之显著变化,这种冰的不稳定性决定了冻土性质的不稳定性。

(3) 冻土中的未冻水通常在负温(甚至可达 -70°C)下总有一定数量存在,未冻水以强结合状态和弱结合状态两种方式存在。未冻水的含量直接影响到土体的相变潜热,影响土体冻结速度的快慢,而且直接制约着冻土的力学性质。

(4) 冻土中的水汽从弹性较高处(主要决定于温度)向弹性较低处转移。在非饱和土中水汽可能是土温变化和冻结过程中水分重分布的主要原因。

冻土的形成过程实质上是土中水的结冰过程。水结冰一方面起着分离土粒的作用,使土粒间不发生显著的摩擦力;另一方面又将土粒胶结成为一体。

土壤冻结前后,土体的强度、水分,以及热物理参数等基本性质发生较大变化:

(1) 强度提高。由于冰和矿物颗粒胶结后具有较大的黏结力和内摩擦力,从而使冻土的抗压、抗剪、抗拉等强度较未冻状态大大提高。

(2) 水分迁移。水分迁移是冻土的主要物理力学过程,冻结过程中由于水分迁移和水结冰引起体积膨胀(约9%)和土层隆起,融化过程中由于体积收缩引起土层沉陷。

(3) 热物理性质的变化。由于冰的导热系数 $[\lambda_i = 2.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 约为水 $[\lambda_w = 0.582 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 的4倍,而冰的热容量约为水的1/2,这就决定了冻土和非冻土在热物理性能上的差别,冻土中的含冰量越大,其物理性能的差别也越显著。

1.2.4 影响冻结的主要因素

1.2.4.1 岩土体性质

工程上的研究对象大都直接或间接和岩土体有关系,岩土体性质决定了所研究对象的基本物理性质,这些性质影响着冻融温度场的形成和发展。岩土体本身的性质包括矿物成分、粒度组成、岩土体的含水量以及岩土热物理性质等。

冻结岩土体是一种内部结构极其复杂的不连续岩土工程材料,它是由未冻水、岩土、冰、气等多相介质组成的体系,内部细观介质的组成和结构形态决定了其在外部环境和荷载作

用下的热力学特性,结构决定了冻融岩土温度场的分布形态。矿物颗粒是冻土多相和多成分体系的主体。颗粒的大小和形状直接影响冻土的性质。矿物成分对冻土的形成过程和性质都有很大影响。

1.2.4.2 冻结、融化温度

土的冻结和融化温度实际上是土中水的冻结和融化温度。冻结或融化温度是判定土冻结或融化程度的基本指标,它相应影响了土中的温度梯度。标准大气压下纯净的水在 0°C 时冻结,称其冰点为 0°C 。土是一种多相介质,土中水一方面受土颗粒表面能的作用,另一方面水中或多或少含有一定量的溶液,所以土的冻结温度要低于纯水的冰点。

土的冻结温度受到土本身性质如土颗粒的矿物成分、含水率、含盐量及外界压力的影响。具体定性关系为:矿物比表面积越大,颗粒周围的水需要克服表面能冻结成冰需要的能量越大,土的冻结温度越低;含水率越高,土的冻结温度越接近水的冰点;含盐量越大,土的冻结温度越低;含水量低的土在受到外界压力后,由于大部分压力都有骨架承担,冻结温度变化不大,而对于高含水量的土,随着土中水或冰分担的外界压力逐渐增大,冻结温度将随外界压力增大而降低。

在给定含水量及无外载条件下土体的冻结温度可用下式计算:

$$t_d = -\exp\left(\frac{\ln a - \ln W}{b}\right) \quad (1-1)$$

式中 t_d ——土体的冻结温度, $^{\circ}\text{C}$;

W ——土体的含水量, %;

a, b ——与土质有关的常数,由试验确定。

在相同初始含水量的情况下,土颗粒细的冻结温度低;土颗粒粗的冻结温度高。一般情况下,当含水量为液限含水量时,黏性土类的冻结温度为 $-0.1 \sim -0.3^{\circ}\text{C}$;砂和砂性土为 $0.0 \sim -0.2^{\circ}\text{C}$ 。

土的含盐量的大小也影响着其冻结温度的高低,含盐量大,其冻结温度低。而含盐量又与水分有关,土的含水量大,土中盐稀释,冻结温度高;土的含水量小,盐的浓度增大,冻结温度就低。试验表明,当土的含水量不同时,冻结温度也不同,其规律是土的冻结温度随含水量的增加而升高。

在不同含盐量、不同外载作用下,结冰温度可按下式求得:

$$t_d = t_s + \eta p \quad (1-2)$$

式中 t_s ——无外载条件下含盐湿土的结冰温度, $^{\circ}\text{C}$;

η ——不含盐湿土结冰温度随外载的平均变化率,一般在 $-0.07 \sim -0.08^{\circ}\text{C}/\text{MPa}$ 之间;

p ——湿土所受外荷载, MPa 。

对兰州砂土、兰州黄土和内蒙古黏土等土壤进行冻融试验得到的冻结和融化温度及差值的关系为:土的冻结和融化温度均随含水量的增大而升高,含水量相同时,融化温度始终高于冻结温度。融化和冻结温度均随土类变细或孔隙溶液浓度增大而降低,且其间的差值增大。融化与冻结温度间的差值随含水量增大而减小。经历数次冻融后,融化温度略有升高。

含水量、含盐量和外加荷载对冻结温度的影响具有叠加性。人为条件下,由于外载引起

土体冻结温度的下降,可计算后进行叠加。天然条件下,土的冻结温度和融化温度应取现场扰动土进行实测。

1.2.4.3 冻结孔布置方式

不同的冻结孔布置方式会形成不同的冻结温度场。改变冻结孔的圈数、冻结孔布置圈径和冻结孔的个数在相同时间内会形成不同形状、厚度和强度的冻结壁。热水循环时一般仍会利用原有全部或部分冻结孔,采用全区或分区的方式,因此,冻结孔的布置方式也影响了热水循环温度场的发展。

1.2.4.4 盐水温度及流量

盐水温度是影响冻融温度场发展的重要参数,相同条件下,盐水温度越低,冻结温度场的发展速度越快,达到设计的冻结壁厚度和强度的时间就越短;热水循环时情况类似,盐水温度越高,热水循环温度场发展速度越快,达到热水循环要求的时间就越短。

盐水的流量对冻结壁的形成和发展至关重要。单位时间内盐水吸收周围土体的热量和盐水去回路温差及盐水流量成正比。

$$Q=q \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta t \quad (1-3)$$

式中 Q ——单位时间内盐水吸收土体的热量, kJ/h ;

q ——盐水流量; m^3/h ;

c ——盐水比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

Δt ——盐水去回路平均温差, $^{\circ}\text{C}$;

ρ ——盐水密度, kg/m^3 。

1.2.4.5 冻结形式

正确选择冻结形式,是冻结设计中必须首先解决的问题。冻结形式不仅关系到冻结速度、技术经济效益,而且关系到工程的成败。选择哪种形式,应全面分析井筒穿过地层的工程地质和水文地质情况,同时考虑到冷冻设备和施工队伍的技术水平,以取得最佳的技术经济效益为原则。不同的冻结形式会有不同的冻结温度场分布、发展情况。

常见的冻结形式有:一次冻全深冻结形式、差异冻结形式、分段冻结形式和局部冻结形式。

(1) 一次冻全深冻结形式

一次冻全深冻结形式是指所有冻结孔的深度与最大冻结深度一致,并且全深一次冻结形成冻结壁的冻结方式。这种形式应用广泛、适应性强,能通过多层含水砂层;其不足之处是深部冻结壁和浅部冻结壁厚度相差不大,需要的制冷能力大。

(2) 差异冻结形式

差异冻结形式又叫长短管冻结形式,是指冻结管的深度不同,长短管交错布置于一圈上,一次冻结形成冻结壁的冻结方式。此形式主要用于同时冻结冲积层和含水基岩的情况,长管超出短管深度的部分以冻结基岩、封堵地下水为主要目的;而其上部以与短管共同形成承受水土压力的冻结壁为目的。

(3) 分段冻结形式

分段冻结形式又叫分期冻结形式,当冻结深度较大,且有合适的水文地质与工程地质条件时,将整个冻结深度从上而下分为数段,分段冻结形成冻结壁,并使井筒掘砌工作不间断进行的冻结方式即为分段冻结形式。它的冻结管布置方式与一次冻全深冻结形式相同,只

是采用不同结构的冻结器来分段冻结。

(4) 局部冻结形式

当只有局部地层需要冻结时可以采用局部冻结形式。采用局部冻结的冻结器结构形式有隔板式、压气隔离式、盐水隔离式以及套管式等。

热水循环时一般仍利用原有的冻结器,或稍加改造进行,所以冻结形式影响了冻结温度场,进而又影响了热水循环温度场。

1.3 项目研究的内容

人工冻结法是解决井筒建设施工中穿越含水地层的特殊施工方法,可以解决复杂地层井筒建设中常见的问题,在东部地区深厚表土层中应用广泛,但对于西部地区,特别是宁东地区的侏罗系地层应用很少,而人工冻结法的设计和施工受到地层条件的影响比较大,当地层条件比较特殊时,需要进行专门的研究,以解决设计和施工中存在的问题。

麦垛山副井、风井井筒使用普通法掘砌 250 m 左右,上部井壁的设计、施工全部按普通凿井考虑,没有按冻结法井壁设计、施工。改用冻结法施工后,如果按常规做法,冻结产生的冻胀势必造成上段井壁破坏,而上段井壁破坏后修复或凿除重新做井壁会增加工程费用,延误建井总工期。

项目研究针对宁东地区的地层特点,考虑到人工冻结法施工特点和施工要求,从设计和施工方面开展研究,同时对上部井筒的保护措施进行研究,提出保护已建井筒的控制冻结设计和施工方法,形成相关的关键技术,以解决冻结法凿井的冻结设计、方案优化和上段井壁保护问题。

根据冻结法施工特点和要求,项目研究的内容包括:

- (1) 软岩地层控制冻结温度场影响规律的数值模拟;
- (2) 软岩地层人工冻结冻胀机理及井筒保护措施研究;
- (3) 软岩地层控制冻结的物理模拟试验;
- (4) 软岩地层既有井筒保护的控制冻结设计技术;
- (5) 软岩地层控制冻结的信息化施工技术。

2 软岩地层控制冻结的温度场影响规律数值模拟研究

2.1 有限单元法基本理论

对于许多力学和物理问题,人们已经得到了它们应遵循的基本方程和相应的定解条件,但能用解析方法求出精确解的只是少数方程性质比较简单且几何形状相当规则的问题。对于几何形状不规则或者边界条件比较复杂的问题,由于它的导热微分方程不能积分,无法得到解析解。这类问题的解决通常有两种途径,一是引入简化假设,将方程和几何边界简化为能够处理的情况,从而得到问题在简化状态的解答,但是这种方法只在有限的情况下是可行的,因为过多的简化可能导致误差很大甚至得出不正确的解答。因此人们多年来寻找和发展了另一种求解途径和方法——数值解法。

在实际土木工程领域,用数值模拟技术对结构进行受力和响应分析,就能在设计 and 施工前预知工程的危险区域,预测结构的大概破坏情况,从而采取措施解决。目前在工程实际应用中,常用的数值求解方法有:有限单元法(Finite Element Method)、有限差分法(Finite Difference Method)、边界单元法(Boundary Element Method)等。从实用性和使用范围来说,有限单元法是随着计算机的发展而广泛应用的一种有效的数值计算方法。

温度场的数值计算,目前常用有限差分法和有限单元法两种方法。有限差分法是由导热偏微分方程及定解条件,推导节点温度的线性代数方程的。有限差分法首先将求解域划分为网格,然后在网格的节点上用差分方程近似微分方程,当采用较多节点时,近似解的精度可以得到改进。借助于有限差分法,可以求解某些相当复杂的问题,特别对于建立于空间坐标系的流体流动问题,有限差分法有自己的优势。但用于几何形状复杂的问题时,它的精度将降低,甚至求解困难。

有限单元法是由导热定解问题的泛函变分或者从微分方程出发用加权余量法推导节点温度线性代数方程的。在有些情况下微分方程不能满足变分原理的条件,无法建立与微分方程相应的泛函,此时加权余量法常会收到好的效果。有限单元法的基本思想是,把连续的求解区域离散为一组有限个且按一定方式连接在一起的单元的组合体。由于单元能按不同的联结方式进行组合,且单元本身又可以有不同的形状,可以将模型简化为几何形状复杂的求解域。有限单元法作为数值分析方法的另一个重要特点是,利用在每一个单元内假设的近似函数来分片表示全求解域上待求的未知场函数,单元内的近似函数通常由未知场函数或其导数在单元的各个节点的数值和其插值函数来表达,从而一个连续的无限自由度问题就变成离散的有限自由度问题,一经求解出这些未知量,就可以通过插值函数计算出各个单元内场函数的近似值,从而得到整个求解域上的近似解。

有限单元法与力学、计算数学和计算机技术相结合,有着极其广泛的应用,从弹性平面