

应用研究·非煤矿山·

拉陵高里河下游区域矿井井壁冻融受力特征研究

Study on Freeze-thaw Force Characteristics of Mine Shaft Wall in the Lower Reaches of Lalinggaoli River

黄鑫军¹, 周建华²

(1. 青海金川矿业有限责任公司, 青海 海西 817000; 2. 鞍钢矿业爆破有限公司, 辽宁 鞍山 114000)

摘要:为探究冻结施工条件下的冻融过程对矿井井壁的温度与力学影响,以拉陵高里河下游区域为例,采用ABAQUS软件建立土体与井壁模型。利用数值模拟方法分析了冻结与融沉过程中的土体温度分布特征、井壁Mises应力特征、竖向附加力与融沉附加力随温度的演化规律。结果表明:在0℃以下时,竖向附加力的数值较为稳定,当温度超过0℃时,竖向附加力伴随着融沉过程快速降低。在0~5℃过程中,融沉附加力快速增长,当温度超过15℃后,融沉附加力达到稳定状态。在深度影响下,井壁的应力主要受到地应力的控制。随着地层深度的逐渐增加,融沉附加力最大值呈现为指数类型的变化趋势。

关键词:冻融过程; 冻结法施工; 井筒施工; 数值模拟

中图分类号: TD262 文献标志码: A 文章编号: 1672-609X(2024)05-0001-05

Abstract: In order to investigate the influence of freeze-thaw process on the temperature and mechanics of mine shaft wall under freezing construction conditions, the soil and shaft wall model was established by ABAQUS software, taking the lower reaches of Lalingoli River as an example. The characteristics of soil temperature distribution, wall Mises stress, and the evolution of vertical and thawing additional forces with temperature during freezing and thawing were analyzed by numerical simulation. The results show that the value of vertical additional force is stable below 0℃, and when the temperature exceeds 0℃, the vertical additional force decreases rapidly along with the melt settling process. In the process of 0~5℃, the additional force of melt settling increases rapidly, and when the temperature exceeds 15℃, the additional force of melt settling reaches a stable state. Under the influence of depth, the stress of borehole wall is mainly controlled by ground stress. With the gradual increase of formation depth, the maximum value of the additional force shows an exponential trend.

Key words: freeze-thaw process; freezing method construction; shaft construction; numerical simulation

1 前言

井筒在穿越深厚表土层的建设过程中易受含水层、松散土体的制约,导致矿井新建井壁发生破裂与坍塌,为适应深厚表土层的地质特性,人工冻结法成为主要建井的施工技术^[1-4]。然而,冻结法施工在解冻过程中普遍存在井壁变形与井壁破裂问题,并且随着建井深度不断增加,井壁的原位环境更加复杂,并由此直接影响井壁的受力特征,致使新建深井的安全问题日益严峻^[5-6]。

针对井壁的损伤破裂问题,崔广心等^[7]通过对井壁开展表土层底部疏水模拟试验,首次表明了土体的沉降过程会对井壁产生竖向的摩擦力,即融沉附加力,并指出融沉附加力是引起井壁破坏的主要因素之一。付厚利^[8-9]来利用相似模拟实验与数值模拟实验方法分析了冻土在融化沉降过程中产生的附加力,及其对井壁应力的作用形式,表明融沉附加力的影响与土体力学性质,井壁埋深以及作用时间密切相关。汪鹏程^[10]针对土体融沉过程中的产生

[作者简介] 黄鑫军(1990—),男,汉族,甘肃陇南人,工程师,主要从事矿山地质、资源勘查工作。

[基金项目] 辽宁“兴辽英才计划”项目(编号:XYLC2203173);辽宁省中央引导地方科技发展资金计划项目(编号:2023JH6/100400022)。

[引用格式] 黄鑫军,周建华.拉陵高里河下游区域矿井井壁冻融受力特征研究[J].中国矿山工程,2024,53(5):1-5.

的摩擦力对井壁的作用开展了弹塑性力学分析,表明摩擦力随井壁深度存在非线性分布规律,同时分析了井壁在温度影响下发生的伸长与扩张变形。

以上研究有效指明了冻融过程中井壁的力学分析要素,冻结法施工过程中,温度的变化会引起井壁外载荷的不确定性变化,在结构应力场的重新调整作用下,井壁会产生相应的力学变形行为^[11-12]。为深入研究冻融全过程中的井壁受力特征,以拉陵高里河下游区域的地质特征为例,采用数值模拟方法对矿井井壁在冻融过程中的应力、竖向附加力、融沉附加力演化规律开展研究与分析。

2 工程概况

拉陵高里河下游区域某矿井井筒设计深度为920 m,建设过程中需穿越540 m的深厚土层,冻结施工深度约为500 m,其中第四系土层厚度约为140 m,主要由砂土组成,新近系土层厚度约为400 m,主要由粉土与黏土组成,遇水软化,失水硬化。二叠系以下主要为泥岩与砂岩为主,构成基底岩层。实际工程中,冻结法的施工方案如图1所示,

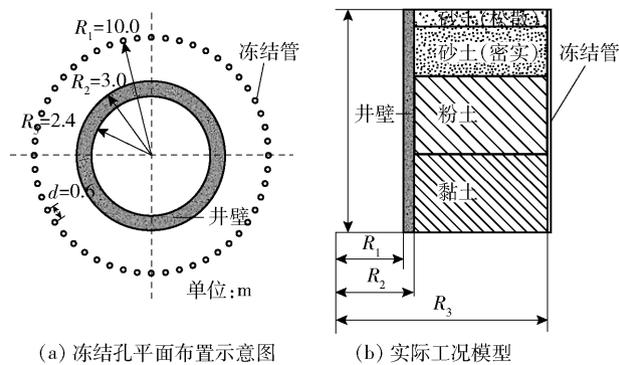


图1 矿井冻结法施工示意图

立井井筒的外径为6.0 m,井壁的厚度为0.6 m,冻结管沿径向分布在井壁外侧,两冻结管间距为0.6 m,冻结管距离井筒中心点距离为10.0 m,冻结管内部通入低温盐水形成冻结壁。

3 数值模拟模型建立

根据拉陵高里河下游的实际地层条件设置数值计算模型,数值模拟采用ABAQUS软件,在软件中建立圆柱坐标系,设置表土层的总厚度为500 m,其中砂土(松散)层的厚度为30 m,砂土(密实)层的厚度为100 m,粉土层的厚度为170 m,黏土层的厚度为170 m。井壁内半径为2.4 m,井壁外半径为3 m,冻结管的半径为8 m。设置数值模拟模型如图2所示。将模型的底部与圆柱外侧设置为固定边界条件,将顶部设置为自由边界条件。冻结管所在径向平面设置温度边界条件。数值模拟采用摩尔-库伦准则进行计算。土体的参数设置为相应的土层参数,井壁参数设置为混凝土C40参数,具体数值模拟参数见表1。

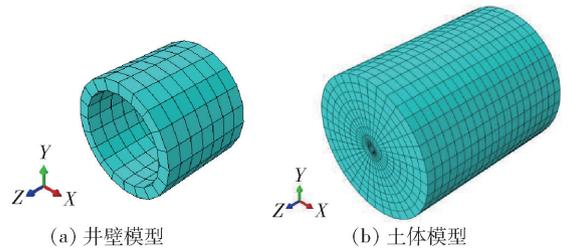


图2 数值模拟计算模型

4 土体冻融过程温度分布特征

4.1 土体冻结过程温度分布特征

数值模拟过程中通过设定温度边界条件对模型

表1 数值模拟岩性参数

性质	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	杨氏模量/MPa	泊松比	内聚力/kPa	摩擦角/ $(^\circ)$	比热容/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	导热系数
砂土(松散)	1 700	20	0.25	2	40	960	2.8
砂土(密实)	2 200	40	0.29	6	30	1 150	3.1
粉土	1 900	20	0.25	17	23	1 500	1.0
黏土	1 600	30	0.25	11	24	1 600	3.8
混凝土 C40	2 500	330	0.2	4 500	29	970	460.8

的温度场进行控制,设置土体在冻结温度过程中的为 $-16\text{ }^\circ\text{C}$,在融沉温度过程中的最高为 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 。绘制土体冻结过程中的温度场分布特征如图3所示。设置数值模型中的土体材料在初始条件下的温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 。在试验进行100 min时,冻结管边界位置的温度降低至 $0\text{ }^\circ\text{C}$,随着深度逐渐向井壁中心延伸,温度

呈现为梯度增加的趋势。当试验进行200 min时,冻结管位置的温度降低至 $-10\text{ }^\circ\text{C}$,图3(c)中的土体内部的温度分布状态与图3(b)中的分布状态近似相等。当试验进行3 000 min时,冻结管位置的温度与土体内部的温度均达到 $-16\text{ }^\circ\text{C}$ 。

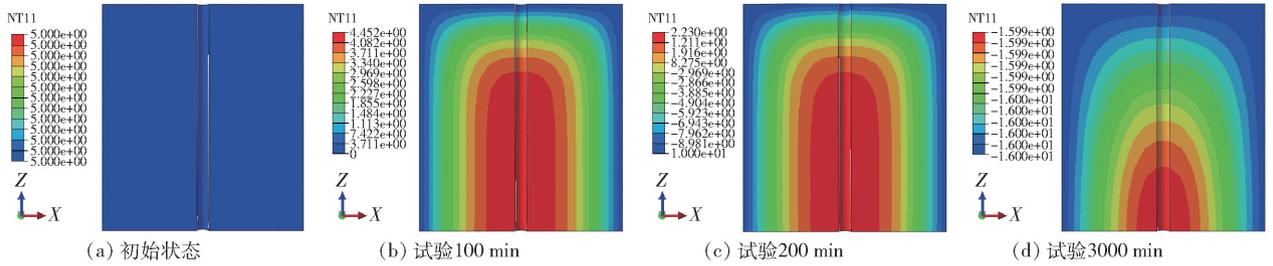


图3 土体冻结过程中温度分布特征

4.2 土体融沉过程温度分布特征

绘制土体融沉过程中的温度场分布特征如图4所示。融沉试验继冻结试验的基础上继续开展,在试验进行3500 min时,冻结管边界位置的温度上升至0℃,随着深度逐渐向井壁中心延伸,温度呈现为梯度降低的趋势,井壁位置的温度约为-14℃。当

试验进行4000 min时,冻结管位置的上升至20℃,井壁位置的温度约为-6.7℃。当试验进行5500 min时,冻结管位置的温度上升至30℃,井壁位置的最低温度约为29℃。当试验进行至6250 min时,模型中的温度近似达到35℃的平衡状态。

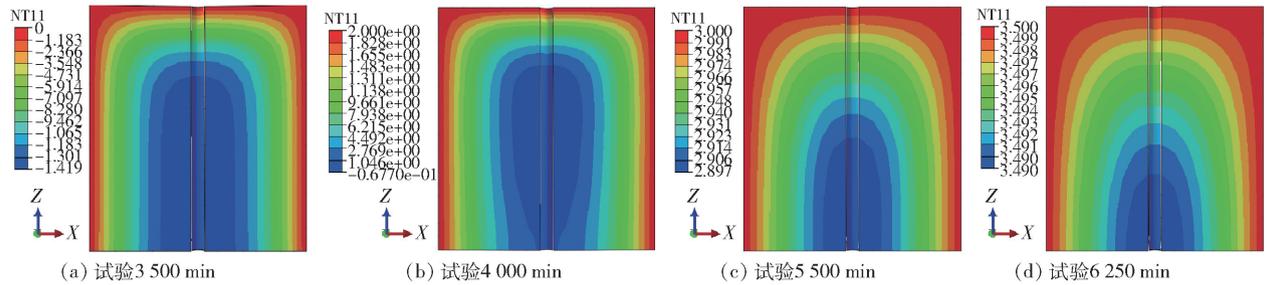


图4 土体融沉过程中温度分布特征

5 井壁温度与受力特征分析

5.1 -500 m 深度井壁温度与 Mises 应力特征

采用数值模拟方法对不同深度的井壁温度与受力特征进行分析,根据拉陵高里河下游的季候气温设置井壁温度边界的最低温度为-30℃,最高温度为30℃。节选绘制-500 m 深度井壁的温度与受力特征如图5所示。在不同温度边界条件下,井壁温度均表现为两端头应力较低,而中部应力较高的特征。当温度为-30℃时,井壁的最大 Mises 应力约为33.05 kPa,当温度为-20℃时,井壁的最大应力约为32.04 kPa,当温度为-10℃时,井壁的最大应力约为31.81 kPa,当温度为0℃时,井壁的最大应力约为31.39 kPa,当温度为5℃时,井壁的最大应力约为21.58 kPa,当温度为15℃时,井壁的最大应力约为21.58 kPa。

5.2 -500 m 深度井壁温度与附加力特征

在实际施工过程中,土体在冻结融化导致的井壁冻胀作用即为竖向附加力,土体融化沉降即在井壁上作用为垂直的融沉附加力,在数值模型中选取

井壁与土体的接触节点提取数据,绘制竖向附加力随温度的变化规律如图6(a)所示,融沉附加力随温度的变化规律如图6(b)所示。根据图6(a)进行分析可知,当温度为-30℃时,竖向附加力的数值最大,约为33.1 kPa,随着温度逐渐升高至0℃,竖向附加力的数值缓慢降低,但效果不明显。当温度上升突破0℃后,竖向附加力的数值急剧下降。在15℃时,竖向附加力降低至21.5 kPa。根据图6(b)进行分析可知,当温度由0℃上升至5℃时,融沉附加力快速由0 kPa增加至8 kPa,当温度由5℃上升至15℃时,融沉附加力的增长趋势不明显,当温度超过15℃后,融沉附加力的数值稳定在10.5 kPa左右,表明土体的融沉达到极限。

5.3 -300 m 与 -100 m 深度井壁温度与 Mises 应力特征

对比绘制-300 m 与 -100 m 土层区域的井壁温度与受力特征如图7与图8所示。对比分析可知,随着埋深的逐渐减小。-300 m 深度条件下,当温度为-15℃时,井壁的最大应力约为13.05 kPa,当温度为0℃时,井壁的最大应力约为12.51 kPa,

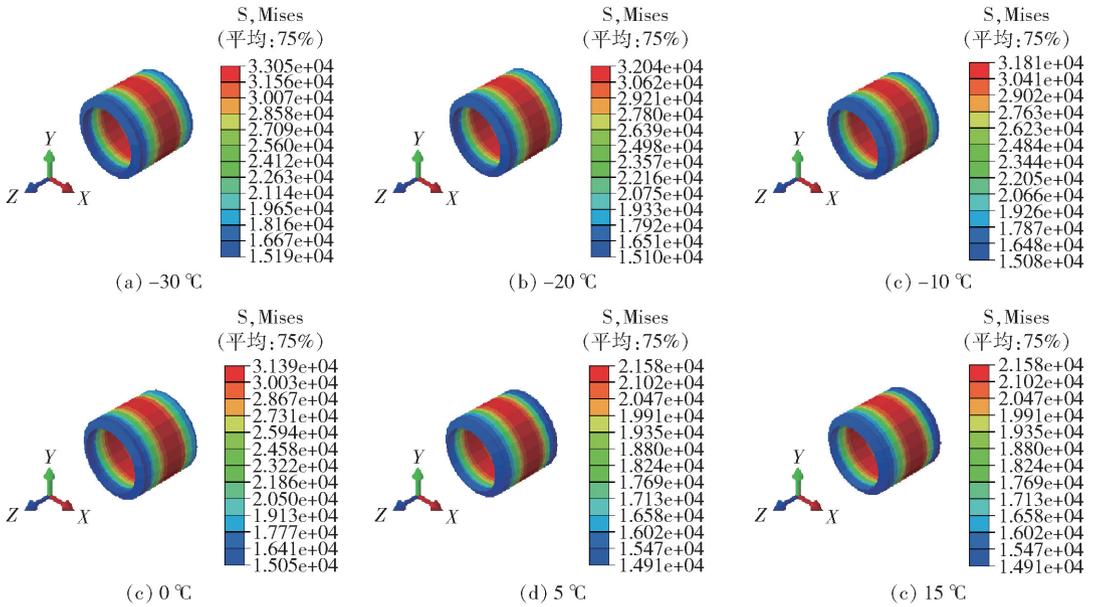


图5 -500 m 深度井壁温度与 Mises 应力特征

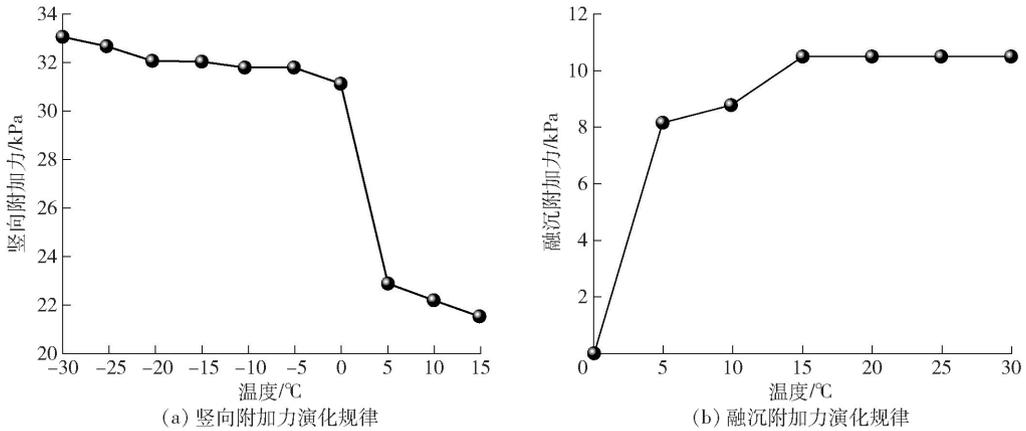


图6 冻融全过程中井壁所受附加力特征演化规律

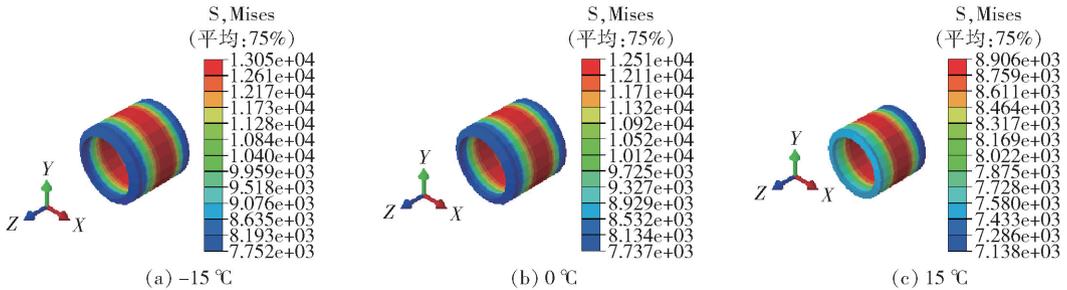


图7 -300 m 深度井壁温度与 Mises 应力特征

当温度为 15 °C 时,井壁的最大应力约为 8.91 kPa。-100 m 深度条件下,当温度为 -15 °C 时,井壁的最大应力约为 1.65 kPa,当温度为 0 °C 时,井壁的最大应力约为 1.62 kPa,当温度为 15 °C 时,井壁的最大应力约为 1.45 kPa。井壁在不同深度条件下所承受

的最大应力逐渐降低。主要原因是在深度影响下,在深地条件下土体的自重应力相较于浅地表条件下土体自重应力明显降低,井壁的应力主要受到地应力的控制。

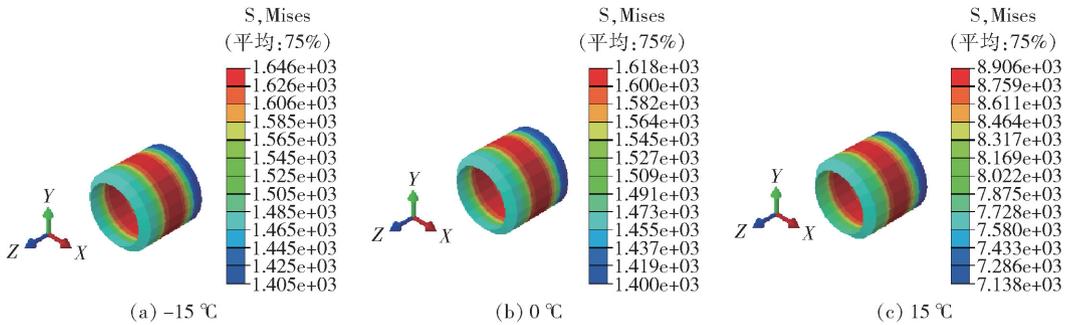


图8 -100 m 深度井壁温度与 Mises 应力特征

5.4 不同深度井壁所受融沉附加力特征

统计 -500 m、-300 m、-100 m、0 m 深度条件下的井壁承受的融沉附加力最大值,绘制融沉附加力最大值随深度的演化规律如图9所示。当深度为0 m 时,融沉附加力最大值为0 kPa,当深度为-100 m 时,融沉附加力最大值约为0.2 kPa 左右,当深度为-300 m 时,融沉附加力最大值约为4.1 kPa 左右,当深度为-500 m 时,融沉附加力最大值约为10.5 kPa。随着深度的逐渐增加,融沉附加力最大值呈现为指数类型的变化趋势。

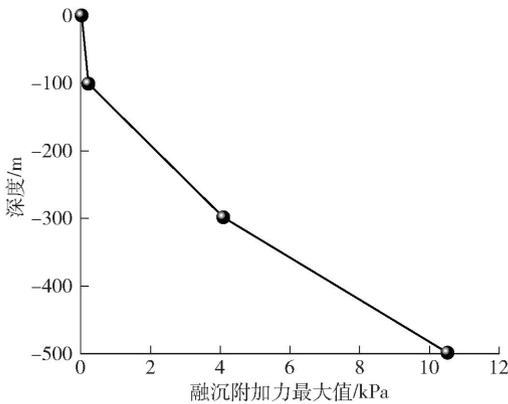


图9 融沉附加力随深度演化规律

6 结论

(1) 采用数值模拟方法分析了冻结与融沉过程中的土体材料温度场随时间变化的分布特征,以及矿井井壁在不同深度温度环境下的 Mises 应力演化规律,竖向附加力与融沉附加力的演化规律。

(2) 井壁所受竖向附加力与融沉附加力在0 ~ 5 °C 范围内会发生转换。在0 °C 以下时,竖向附加力的数值较为稳定,当温度超过0 °C 时,竖向附加力伴随着融沉过程快速降低。在0 ~ 5 °C 过程中,融沉附加力快速增长,当温度超过15 °C 后,融沉附加力达到稳定状态。

(3) 在深度影响下,在深地条件下土体的自重应力相较于浅地表条件下土体自重应力明显降低,井壁的应力主要受到地应力的控制。地表位置土体对井筒无融沉作用力,在深地条件下土体的自重应力作用明显提升,导致在深度增加的情况下,融沉附加力的最大值呈现为指数类型的变化趋势。

[参考文献]

[1] 王博, 刘志强, 孙方浩, 等. 地层冻融过程井壁受力模型试验研究[J]. 中国测试, 2021, 47(6): 33-37.

[2] 汪仁和, 张瑞, 李栋伟. 多圈管冻结壁形成和融化过程冻胀力实测研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 538-542.

[3] 郑铁骑. 白垩系含水软岩地层冻结与强制解冻规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.

[4] 郑小平, 孟超, 王怀华, 等. 冻融温度场作用下既有井壁受力变形规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(12): 33-36+68.

[5] 刘波, 周德照, 韩文文, 等. 某矿山高溜井三维可视化模型的井壁破坏特征研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(1): 57-59+96.

[6] 李志鹏, 程中平, 鲁爱辉. 田铁矿井壁开裂修复处理方法探讨与实践[J]. 现代矿业, 2019, 35(3): 196-198.

[7] 崔广心. 冻结法凿井的模拟试验原理[J]. 中国矿业大学学报, 1989, 1(1): 59-68.

[8] 付厚利. 深厚表土中冻结壁解冻阶段井壁垂直附加力变化规律的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000.

[9] 付厚利, 丁敏. 深厚表土中井壁解冻应力解答[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005(3): 20-22.

[10] 汪鹏程, 杨俊杰, 朱向荣. 用有限元法探讨冻结井壁上融沉负摩擦性状[J]. 矿冶工程, 2003, 23(5): 1-4.

[11] 刘珣, 梁鹏. 城市地下工程中人工冻结法的防冻胀优化设计研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2004(4): 387-390.

[12] 王贺寅. 特厚表土层立井井壁破裂机理及修复加固技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.