松散软弱地层双圈冻结孔温度场分析及优化布置研究*

廖敦霞[1],刘文汇[2],万文[3],林卫星[1],盛佳[1,3],龚永超[1],肖宇[1],王玉丁[1]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.宏大爆破工程集团有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.湖南科技大学 资源与环境安全工程学院, 湖南 湘潭市 411201)

摘要:以莱州某矿主井冻结段的松散软弱地层为研究对象,采用现场实测、ANSYS数值模拟手段对双圈冻结孔的温度场分布规律进行对比分析,发现双圈冻结孔的冻结效果并不理想,在全面研究双圈冻结孔冻结壁形成和发展规律的基础上,提出一种新型三圈冻结孔的优化方案,即布置井筒内壁单圈冻结孔+外壁双圈冻结孔,并运用ANSYS有限元软件分析对比优化前后的温度场冻结效果。结果表明:优化方案的交圈时间缩短了10 d以上,有效降低了井筒内部温度并缩短了冻结壁交圈时间;优化方案冻结60 d时的冻结壁厚度已经达到了4.8 m左右,远远大于原方案的冻结壁厚度,且温度比原方案低4~5 ℃左右。这说明在井筒内加一圈冻结孔是行之有效的方法,能快速将井筒周围温度降到最低,对井筒掘砌安全施工、冻结难度大等地质条件复杂的立井开挖起到一定指导作用。

关键词:松散软弱地层;冻结孔;温度场;数值模拟

中图分类号:TD265.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0073-10

Study on Temperature Field Analysis and Optimal Layout of Double-Ring Freezing Hole in Loose and Weak Strata

LIAO Dunxia[1], *LIU Wenhui*[2], *WAN Wen*[3], *LIN Weixing*[1], *SHENG Jia*[1,3],
GONG Yongchao[1], *XIAO Yu*[1], *WANG Yuding*[1]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.School of Resource & Environment and Safety Engineering,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: Taking the loose and weak strata in the freezing section of the main well of a mine in Laizhou as the research object, the temperature field distribution law of the double-ring freezing hole was compared and analyzed by means of field measurement and ANSYS numerical simulation. It was found that the freezing effect of the double-ring freezing hole was not ideal. Based on the comprehensive study of the formation and development law of the freezing wall for the double-ring freezing hole, a new optimization scheme of the three-ring freezing hole was proposed, that is, the single-ring freezing hole on the inner wall of the well and the double-ring freezing hole on the outer wall were arranged, and the ANSYS finite element software was used to analyze and compare the freezing effect of the temperature field before and after optimization. The results show that the optimization scheme shortens the circulation time by more than 10 days, effectively reduces the internal temperature of the wellbore and shortens the circulation time of the freezing wall. After freezing for 60 days, the thickness of the freezing wall of the optimization scheme has reached about 4.8 m, which is much larger than that of the original scheme, and the temperature is about 4-5 ℃ lower than that of the original scheme. It shows that adding a circle of freezing holes in the well is an effective method, which can quickly reduce the temperature around the well to the lowest, and play a certain guiding role for well excavation with complicated geological conditions such as safe construction of well excavation and difficult freezing.

Key words: Loose and weak strata, Freezing hole, Temperature field, Numerical simulation

---

* **收稿日期**:2024-09-19
基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2023YFC2907404)
作者简介:廖敦霞(1997—),男,湖南隆回人,硕士,工程师,主要从事金属矿山采矿工艺研究工作。E-mail:1300760755@qq.com
通信作者:刘文汇(1995—),男,河南巩义人,硕士,助理工程师,主要从事金属矿山采矿科研管理工作。E-mail:574434324@qq.com

0 引言

长期以来,冻结法是凿井常用方法,冻结壁的形成对施工至关重要,其厚度与强度直接关乎井筒能否顺利开挖,当遇到极为复杂的地质条件时,会发生许多工程问题。如:地下水流速较大导致冻结壁未正常交圈、松散软弱地层较厚冻结壁未形成[1-3],冻结壁厚度不均匀、形状不规则等。如果对这些工程问题未及时发现,很可能在开挖时发生井底冒水、塌方事故。如新疆伊犁矿区某矿副井[4]、内蒙古赤峰市建昌营煤矿 2 号主井、亭南矿井[5]等。深竖井井筒穿过软弱复杂地层时,遇岩层涌水量大、岩石泥化等特殊情况,尽管采取了冻结措施,但仍会严重影响井筒内壁衬砌支护的稳定,造成井筒支护困难,形成片帮,井壁正掘施工环境恶劣,严重制约了机械化施工的应用,导致施工工期延长,井壁整体性差[6-7]。

我国冻结法开挖的案例越来越多,大部分学者都是从现场实测、模型试验、数值模拟来开展研究。在现场实测方面,郭玉超等[8]对冻结全深的营盘壕煤矿副井的井筒内壁温度场进行了实测分析,分析了大体积浇筑混凝土后温度上升到回温过程中井壁稳定性变化。李栋伟等[9]为获得矿井下各裂隙岩体层位的测温孔数据,对深部高承压水地层冻结法凿井进行现场实测,得到了测温孔不同时间、不同阶段温度的变化特征。杨平等[10]对冻结壁形成及解冻进行了全程实测,发现冻结过程中温度分为 5 个阶段,地表冻胀融沉在联络通道中线位置,呈正态分布规律。在模型试验方面,苏彦林等[11]通过室内模型试验研究了静水和不同渗流速度下饱和砂层冻结温度场的分布规律,发现渗流冻结时,冻结壁交圈时间变长,渗流速度介于 2.3～2.5 m/d 时,冻结壁难以交圈。宋雷等[12]基于相似准则,引入裂隙与渗流参数,对人工冻结水热耦合模型进行试验研究,发现裂隙渗流会极大影响冻结壁的交圈时间,并得出了能够交圈的极限渗流值,为研究西部富水岩层提供参考。在数值模拟方面,林斌等[13]采用 FLAC3D 软件模拟多圈冻结孔在深厚地层的温度场分布,与实际数据相比,发现冻结壁交圈从快到慢依次是中圈孔、外圈孔、内圈孔,冻结壁平均温度和测温孔温度均呈对数形式持续下降,最后趋于稳定,冻结壁厚度则恰好相反。蔡兵华等[14]采用有限元软件对不同深浅型冻土壁温度场进行三维数值模拟,结果表明,相变潜热对温度场的影响不大。目前我国关于数值模拟方面的研究正蓬勃发展,而且数值模拟一般都与实际工程相结合,可取长补短。但是针对东部沿海地区松散软弱地层的冻结法施工技术,数值模拟与现场实测相结合的研究相对较少。

针对东部沿海地区莱州某矿主井冻结段的松散软弱地层,通过现场实测、ANSYS 数值模拟手段,对比分析松散软弱地层中双圈冻结壁温度场的分布规律,进而提出一种新型三圈冻结孔优化方案,即布置井筒内壁单圈冻结孔＋外壁双圈冻结孔,并对比优化前后的温度场冻结效果,研究结果对后续矿井的方案设计、工程应用具有指导作用。

1 现场监测方案及分析

1.1 冻结施工方案

莱州某矿主井直径为 6.3 m,地处渤海海湾,由于水文地质条件极其复杂,距海很近,地下水流速大、含盐量高,冻结难度大,采用主冻结孔冻结全深,在主孔内设一圈辅助冻结孔,即采用双圈孔冻结施工方案。为充分了解和掌握井筒周围地层的冻结壁形成情况、温度场发展分布规律以及冻结壁交圈时间,在主冻结管布置圈的外侧设置了 C1、C2 两个温度监测孔,C1 布置在地下水流上方冻结孔外侧距冻结孔布孔圈径 1 m 处;C2 孔布置在 C1 孔的对称位置即地下水的下游处。冻结段井筒设计参数及主井冻结孔布置分别见表 1 和图 1。

表 1 冻结段井筒设计参数

Table 1 Design parameters of shaft in freezing section

井筒净直径/m	井壁厚度/mm	设计深度/m	冻结深度/m	冻结孔数量/个	冻结孔布孔圈径/m
6.3	外壁 550、内壁 500	1 417	93(＋3～－90)	主 29、辅 29	主 11.0、辅 10.2
冻结孔孔间距/m	冻结孔深度/m	测温孔/(个/m)	积极冻结期盐水温度/℃	维护冻结期盐水温度/℃	
主 1.191、辅 1.101	主 93、辅 60	1/85、1/60	－26～－28	－20～－22	

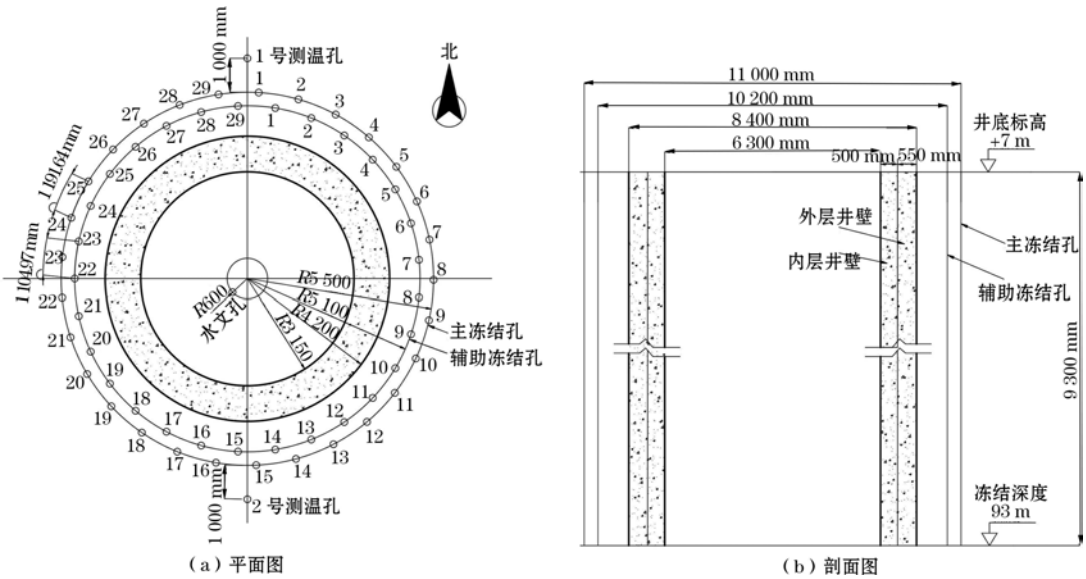


图 1　主井冻结孔布置

Fig.1　Layout of freezing hole in main well

1.2　冻结壁温度场监测分析

对现场大量实测数据进行还原，获得了 C1、C2 两个不同方位测温孔中不同测试层位岩体的温度变化曲线，如图 2 所示。

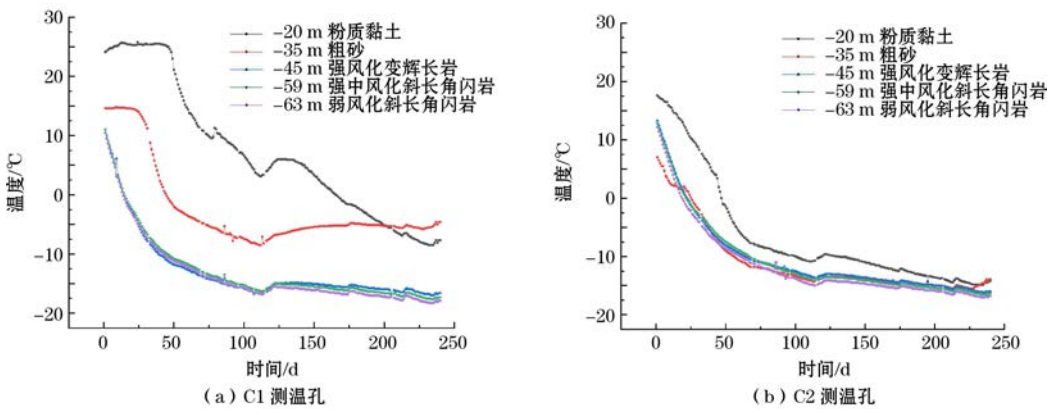


图 2　不同岩层冻结温度与时间的关系

Fig.2　Relationship between freezing temperature and time in different rock layers

由图 2(a)可知，粉质黏土岩层和粗砂岩层的冻结温度波动较大，冻结时间快 200 d 左右才达到－5 ℃以下，这是由于 C1 测温孔位于地下水的上方，地下水直接与海水联通，受潮汐、波浪和海产养殖抽取地下水的影响，该含水层组水位变化较快且水位浮动较大，导致在井筒开挖到相应位置时，井底已经开始冒水，冻结效果不容乐观；其他岩层同一测温孔在不同地层的温度与时间的变化走势基本一致，降温速率与冻结深度成正比，均经历积极冻结期和维护冻结期两个阶段。由此得出，C1 测温孔－35 m 以上的岩层受地下水流速大的影响，需要重点关注，而其他岩层不同深度的降温速率并没有明显的不同，受冻结站制冷效果的影响都是一样的。

2　双圈冻结孔温度场数值模拟分析

2.1　数值模型的构建

根据主井冻结孔的设计参数和现场实测热物理学参数，选取相对薄弱岩层的－20 m 粉质黏土、－35 m 粗砂两个层位作为研究对象，由于冻结深度相对较浅，不考虑其冻结孔的实际偏移。几何模型采用 4 节点热实体单元 PLANE55，以坐标原点为井筒中心，模拟冻结时间为 240 d。根据目前大量冻结工程实例和相关研究成果，计算模型的外边界半径通常不小于冻结壁最外缘半径的 5～10 倍[15]，则外边界半径设为 35 m，并且认为模型的外边界是绝热的。数值模拟计算的网格模型如图 3 所示。

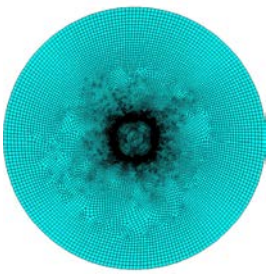


图 3 网格模型

Fig.3 Meshing model

2.2 参数的选取

在模拟计算中,参数的选取是模拟计算的前提,选取合适的最接近实际地层的参数,有利于提高数值模拟的准确性,对实际工程具有重要意义。通过考察莱州某矿主井实地情况,查阅地质土工试验资料,以及对收集到的附近矿井工程的冻土热物理力学试验结果进行汇总和对比分析,得出钻孔取出的土样结冰温度为−1.5 ℃,具体参数见表 2。

表 2 两个层位热物理参数

Table 2 Thermophysical parameters of two layers

岩层	密度/(g/cm³)	含水率/%	导热系数/(W/(m·K))		比热/(kJ/(kg·K))	
			冻土	未冻土	冻土	未冻土
−20 m 粉质黏土	1.60	22.0	1.93	1.482	1.230	1.447
−35 m 粗砂	2.35	19.1	2.07	1.346	1.180	1.489

不同地区、不同季节的初始地温差别较大,而此次所研究的两岩层相距不远且离地表较近,因此,取当地常年初始地温的平均值 17 ℃作为岩石冻结前的初始温度值。冻结管内盐水荷载的降温过程,则通过冻结管外表面的温度变化规律来模拟加载,根据以往的经验值,冻结管外壁温度可近似为盐水温度,具体温度值见表 3。

表 3 模拟层位各时间段的温度值

Table 3 Temperature value of the simulated layers at each time periods

冻结时间/d	−20 m 冻结管外壁温度/℃	−35 m 冻结管外壁温度/℃
30	−29.9	−30.4
60	−28.2	−28.5
90	−29.4	−29.6
120	−25.3	−25.1
180	−26.1	−26.3
240	−26.5	−26.9

2.3 数值模拟结果分析

通过对主井−20 m 粉质黏土和−35 m 粗砂两个层位的数值模型进行运算,得到了两个层位的冻结壁在 6 个时间点(即 30 d、60 d、90 d、120 d、180 d、240 d)的温度场云图,如图 4、图 5 所示。

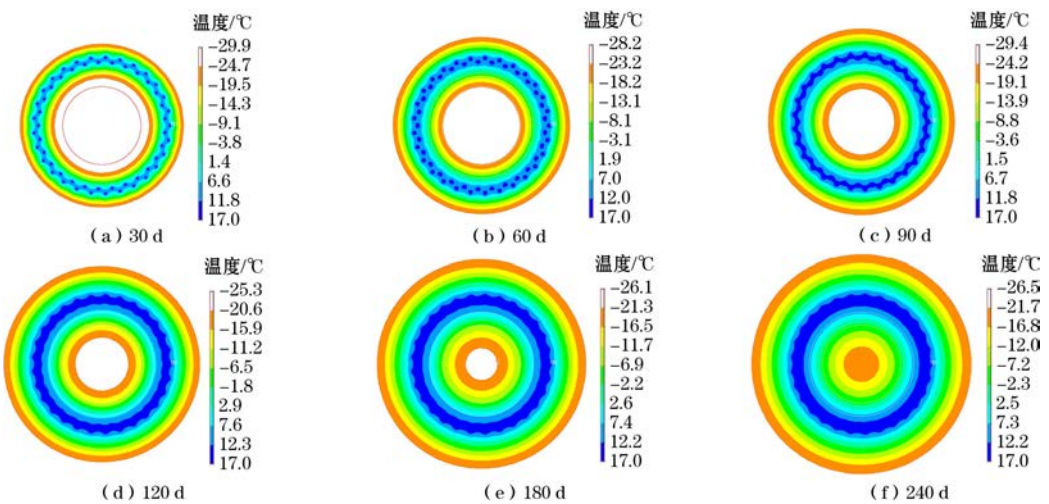
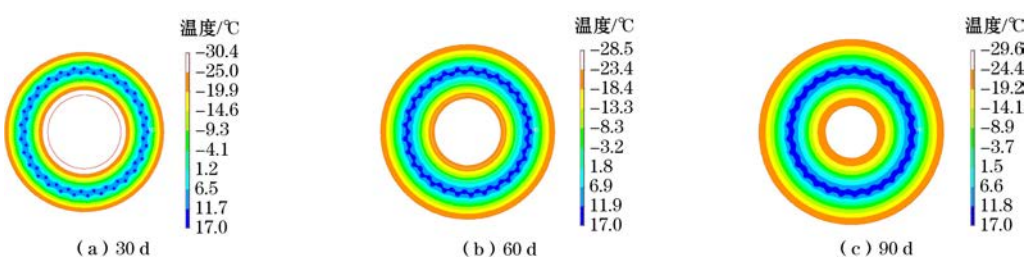


图 4 −20 m 粉质黏土层温度场云图

Fig.4 Cloud maps of temperature field in −20 m silty clay layer



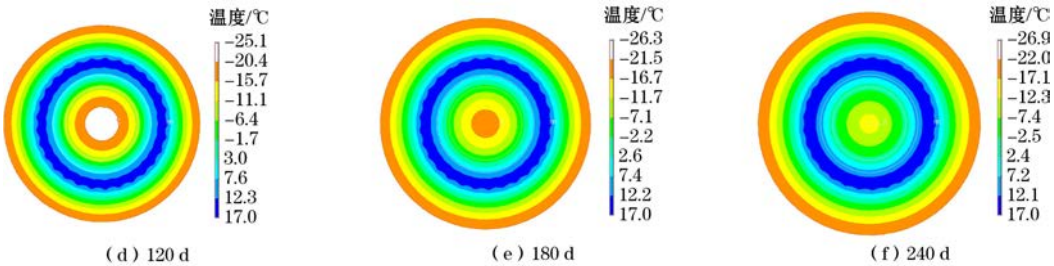


图 5　－35 m 粗砂层温度场云图

Fig.5　Cloud maps of temperature field in －35 m coarse sand layer

从图 4(a)、图 5(a)可以看出，模拟冻结 30 d 时，－20 m 粉质黏土层位和－35 m 粗砂层位的温度相差不大，两个层位的冻结壁均未开始交圈，均以其冻结管中心为原点，以圆环形向外扩散发展，0～17 ℃的土体分布面积还占据着较大比例，温度正在慢慢下降。从图 4(b)、图 5(b)可以看出，模拟冻结 60 d 时，－35 m 粗砂层位的冻结壁已经开始交圈，而－20 m 粉质黏土层位还未开始交圈，并且温度均略高于－35 m 粗砂层位，原因在于土层的导热系数不同以及冻结管外壁温度差异。模拟冻结 90 d 至 240 d 时，冷量继续向冻结管两边持续扩散，－20 m 粉质黏土层位冻结壁也已经交圈，井筒周围 0 ℃以下的冻土分布已占据主导地位，主冻结管、辅助冻结管的冻结锋面已经接触，各圈冻结壁已基本合拢并形成封闭的整体冻结壁，－35 m 粗砂层位冻结效果较－20 m 粉质黏土层位略好，其后随着冻结时间的推移，冻结岩体的温度逐渐下降，冻结影响范围变大，冻结壁厚度增加，且冻结锋面的推移速度加快。

2.4　数值模拟与工程实测对比分析

使用 ANSYS 软件提取相对应的两个测温孔的温度数据，通过 Origin 拟合出测温孔温度与冻结时间的关系曲线，并与现场实测数据进行对比分析，如图 6、图 7 所示。

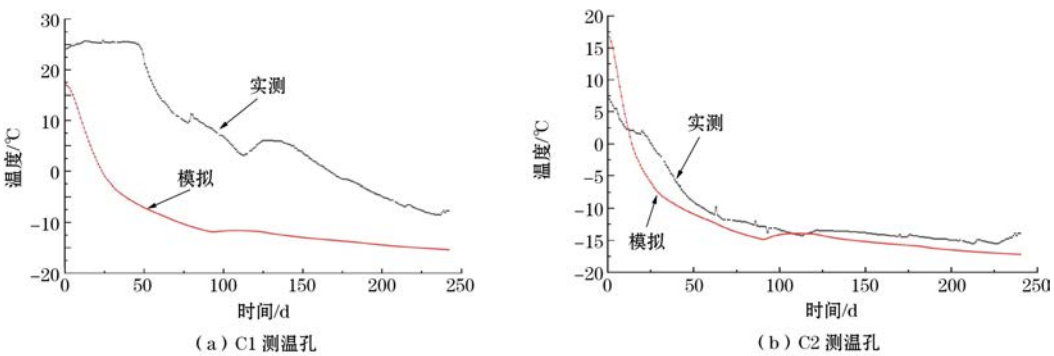


图 6　－20 m 粉质黏土层模拟与实测温度变化对比

Fig.6　Comparison of temperature changes between simulated and measured temperature of －20 m silty clay layer

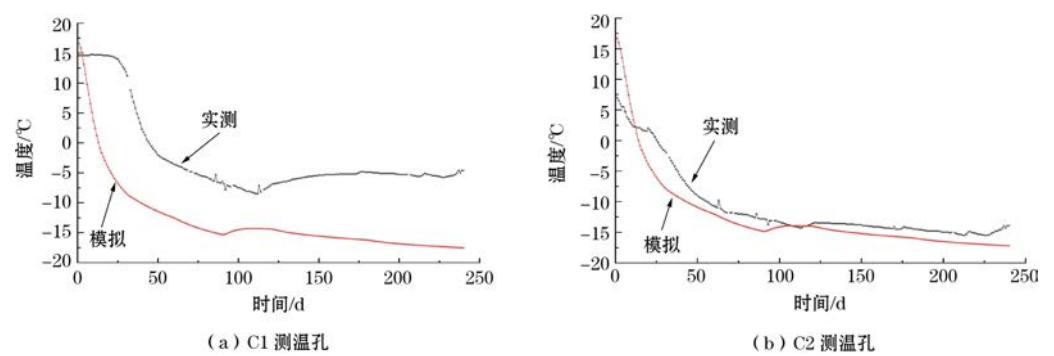


图 7　－35 m 粗砂层模拟与实测温度变化对比

Fig.7　Comparison of temperature changes between simulated and measured temperature of －35 m coarse sand layer

由图 6(a)、图 7(a)的对比分析结果可知,C1 测温孔实测值与模拟值相差较大,这是因为实际冻结施工过程中,上游地下水直接与海水联通等影响导致地下水流速较大,冻结效果不明显,井筒周围温度未能降到理想状态。由图 6(b)、图 7(b)可知,C2 测温孔除了初期的实测降温速率较模拟值稍慢外,后期的降温速率随时间的变化趋势基本一致,由于数值模拟未考虑渗流场、水力场、与外边界热量交换等实际工程因素的影响,测温孔模拟值略低于人工现场实际测量的数值。实测值与模拟值均随冻结时间的延长逐渐减小,随着冻结时间的延长,测温孔温度均逐渐变得稳定,两者均经历两个阶段,即快速降温阶段与平稳降温阶段,这与其冻结过程的积极冻结阶段、维护冻结阶段相对应。

3 冻结方案优化研究

原方案未考虑周围渔民养殖、海水地下水贯通等因素对井筒周围地下水的影响。现场实测期间,在冻结施工掘砌到井下 −6.9 m 的冻结段时,井底开始冒水并且冻结温度还在 0 ℃以上,冻结壁厚度、强度均不能满足开挖要求,最后只能补打冻结孔,加强冻结效果,前后延误了一个月时间,严重影响了施工进度和质量,这说明针对不同的水文地质条件选择合理可靠的冻结方案是十分重要的,如只是参考周围副井冻结方案选择,将会极大影响冻结施工的进度,甚至威胁生命财产安全。故对此主井的双圈冻结孔方案进行优化设计研究。

3.1 优化方案设计

传统的冻结凿井法通常在井壁外侧布置两圈或三圈冻结孔,它们的共同点都是将冻结孔布置在井壁设计断面的外围,缺少对井壁设计断面内侧冻结的关注,遇岩层涌水量大、岩石泥化等特殊情况,仍会严重影响井筒内壁衬砌支护的稳定,引起一系列工程问题并制约机械化施工的应用。为解决传统冻结施工方法在松散软弱地层施工过程中所遇到的问题,设计一种内外圈冻结掘砌的布孔方式,布置井筒内壁单圈冻结孔+外壁双圈冻结孔。优化后的冻结孔布置如图 8 所示。

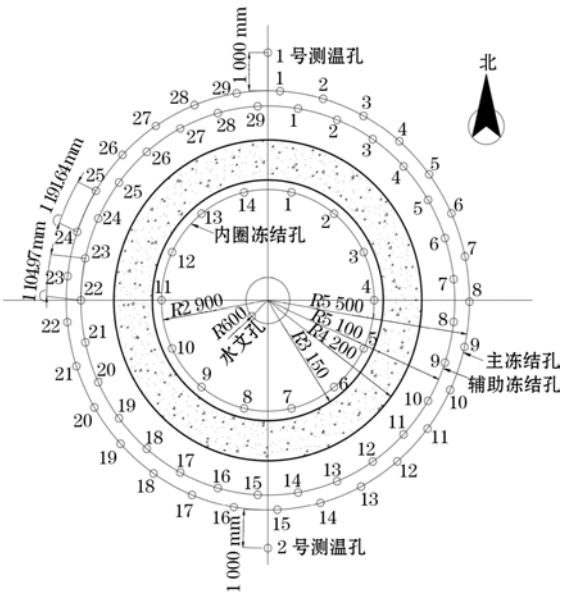


图 8 优化后冻结孔的布置

Fig.8 Optimized layout of freezing holes

与传统冻结凿井法相比,在井筒内部距井壁 0.25 m 处布置一圈半径为 2.9 m 的冻结孔,冻结深度为 20 m,冻结孔数量为 14 个,井筒外的双圈冻结孔数据保持不变。这样内壁冻结孔钢管和冻结的内壁侧围岩对井壁内松散岩体形成超前支护,内外冻结超前支护原理如图 9 所示,确保井壁内外侧围岩稳定以利于井筒掘砌作业,在这样复杂的松散透水表土地层中实现安全优质施工,具有安全可靠、成井速度快等优点。在表土层极松散且地下水流速较大的情况下,能克服注浆法和传统冻结法凿井施工中井壁围岩泥化、井壁片帮垮裂维护困难、成井维护困难等问题。

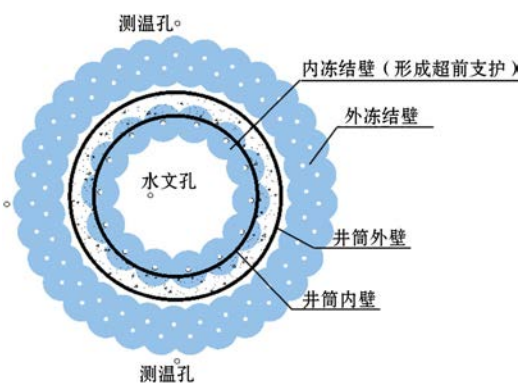


图 9 内外冻结超前支护原理

Fig.9 Advance support principle for internal and external freezing

3.2 优化效果

鉴于井筒内圈冻结孔的冻结深度以及冻结 70 d

井筒开挖后内圈冻结孔将拆除，数值模拟分析不考虑－35 m 粗砂周围的温度场影响，只对比－20 m 粉质黏土层冻结 60 d 的研究，其他所有冻结参数一样，在模型的建立上改成优化后的冻结方案。考虑前面双圈冻结孔模拟时将 60 d 作为一个节点，故只模拟冻结时间为 60 d，细分为 6 个时间节点进行对比分析，即冻结 10 d、20 d、30 d、40 d、50 d、60 d，冻结管外壁温度分别为－26.5 ℃、－29.3 ℃、－29.9 ℃、－28.3 ℃、－28.0 ℃、－28.2 ℃，均近似为盐水温度。

3.2.1　温度场优化效果分析

－20 m 粉质黏土在原方案与优化方案下分别冻结 10 d、20 d、30 d、40 d、50 d、60 d 后的温度场云图如图 10、图 11 所示，分析两者冻结壁交圈的时间以及井筒周围温度变化情况。

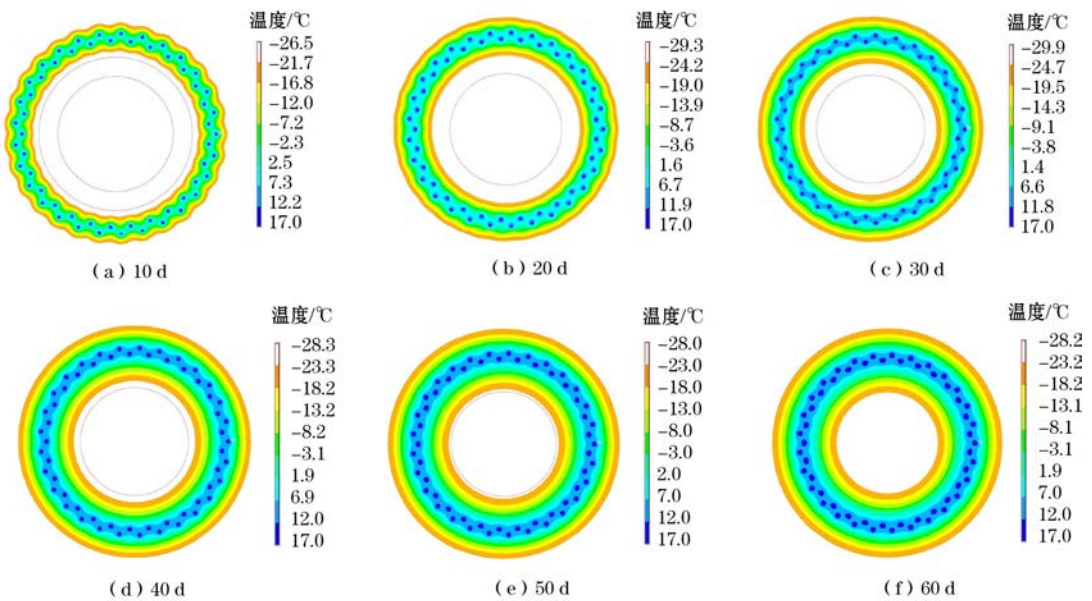


图 10　原方案冻结温度场效果

Fig.10　Freezing temperature field results of the original scheme

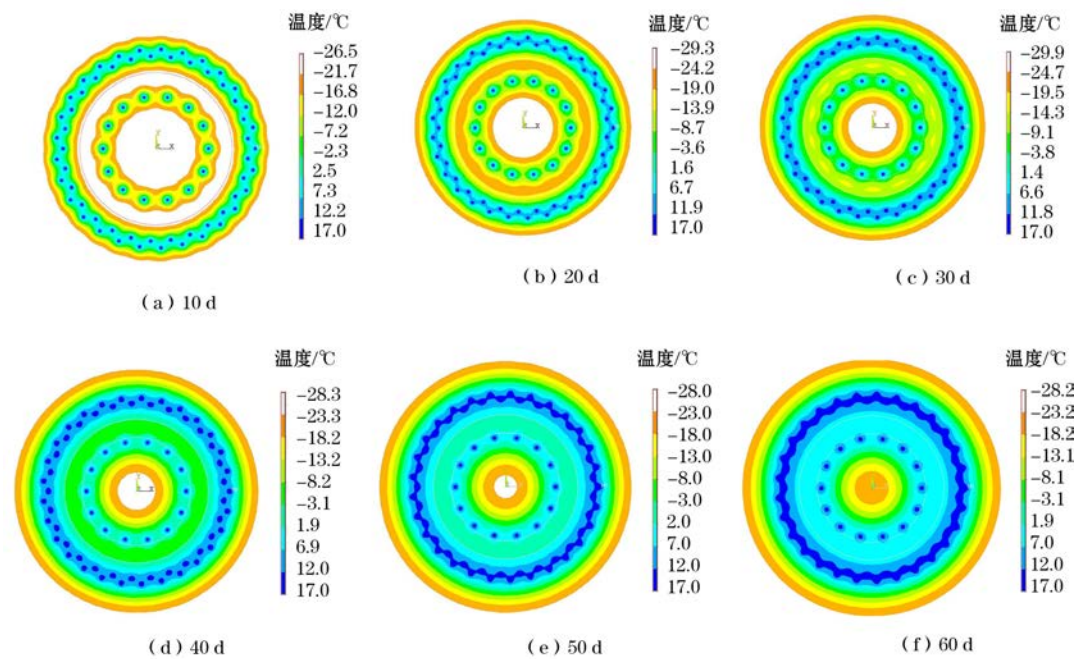


图 11　优化方案冻结温度场效果

Fig.11　Freezing temperature field results of optimization scheme

由图 11(a)温度场变化云图可知,冻结持续 10 d,优化方案井筒的内圈冻结管开始向两边扩张。由图 10(e)、图 11(e)可知,优化方案冻结 50 d 时,外圈的主辅冻结管已形成－20 ℃以下的冻结圆环,井筒的内圈冻结管开始迅速积聚能量,继续向两边扩张;而原方案冻结 50 d 时,外圈主辅冻结管相邻冻结管间仍未出现冻结圆环。由图 10(f)、图 11(f)可知,相较于原方案,优化方案冻结 60 d 时,可以看出井筒内圈已无空白区域(颜色标识见电子版),这说明优化方案已经有效实现了降低井筒内部的温度并加快冻结壁交圈时间的目的。后续井筒开挖时,不会出现井壁周边冒水而补打冻结孔和内部土层未冻结加固而坍塌等状况。

3.2.2 径向温度优化效果分析

平面温度场云图只能看到片面的温度变化,无法对冻结壁的形成厚度进行判断,接下来将对 C1 测温孔正北位置处的径向温度进行分析,对比优化前后在冻结 30 d、60 d 两个时间节点的冻结壁厚度变化,如图 12、图 13 所示。

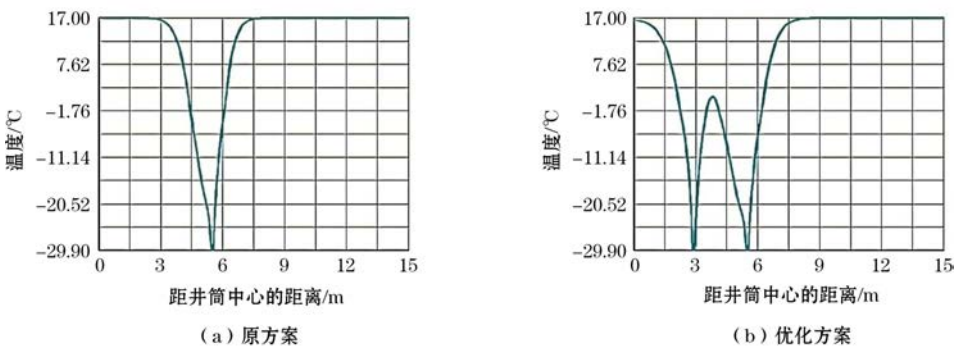


图 12 冻结 30 d 后的径向温度变化曲线对比

Fig.12 Comparison of radial temperature change curves after freezing for 30 days

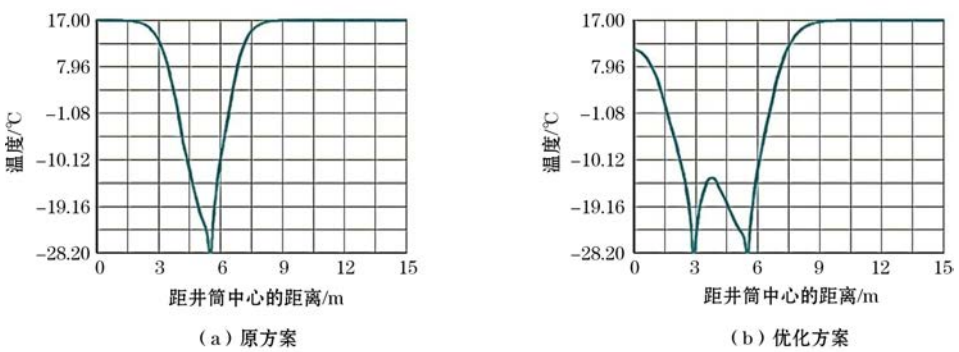


图 13 冻结 60 d 后的径向温度变化曲线对比

Fig.13 Comparison of radial temperature change curves after freezing for 60 days

通过对比冻结 30 d、60 d 两个时间节点的径向温度可知,原方案的径向温度变化曲线均呈“V”字形状,优化方案的径向温度变化曲线均呈“W”字形状。由图 12 可知,冻结 30 d 时,优化方案的井筒内圈冻结管与外圈辅助冻结管的冻结壁开始相遇,冻结壁厚度约为 3.2 m,而原方案,外圈主辅冻结管冻结壁只有 1.5 m 左右,优化方案的冻结壁厚度增加了不止一倍。由图 13 可知,相较于原方案,优化方案冻结 60 d 时的冻结壁厚度已经达到了 4.8 m 左右,远远大于原方案的冻结壁厚度,这对于后续的井筒开挖是非常可靠安全的。

3.2.3 测温孔对比优化效果分析

优化前后两种方案冻结 60 d 内－20 m 粉质黏土岩层下的 C1、C2 测温孔的温度变化曲线如图 14 所示。对比优化前后两种方案的 C1、C2 测温孔温度模拟曲线可知,优化后的 C1、C2 测温孔温度从开始冻结降温到最后均比优化前降温速率更快,在冻结 60 d 时,温度比原方案低 4～5 ℃。这说明在井筒内加一圈冻结孔是行之有效的方法,能快速将井筒周围温度降到最低,有利于后续的井筒开挖。

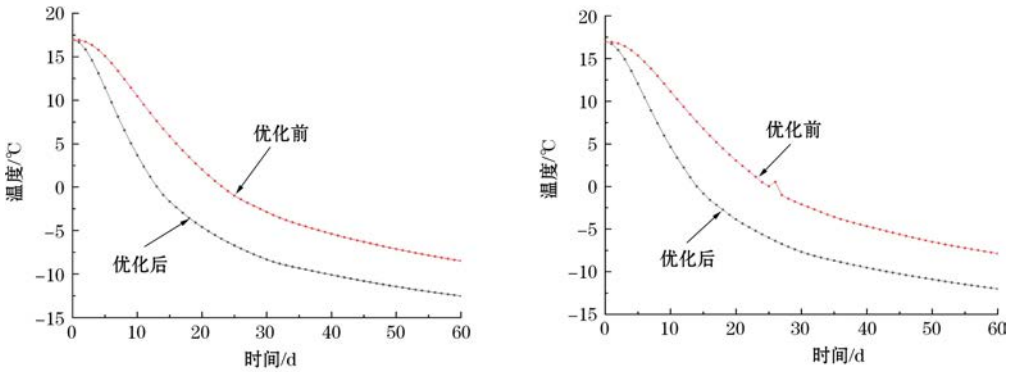


图 14 优化前后测温孔温度变化对比

Fig.14 Comparison of temperature changes before and after optimization

4 结论

(1) 对不同岩层测温孔数据进行实测分析可知，C1 测温孔－20 m 粉质黏土和－35 m 粗砂温度变化曲线差别较大，由此得出，C1 测温孔－35 m 以上的岩层受地下水流速大的影响，冻结效果不理想，需要重点关注。其他岩层同一测温孔在不同地层的温度随时间变化的趋势基本一致，均经历积极冻结期和维护冻结期两个阶段。

(2) 通过对比数值模拟结果与工程实测的测温孔数据，－20 m 粉质黏土层和－35 粗砂层的 C1 测温孔实测值与模拟值相差较大，这是因为实际冻结施工过程中地下水流速较大，冻结效果不明显。而 C2 测温孔除了初期的实际降温速率较模拟值稍慢些外，后期的降温速率随时间的变化趋势基本一致，两者均经历两个阶段，即快速降温阶段与平稳降温阶段，这与其冻结过程的积极冻结阶段、维护冻结阶段相对应。

(3) 本文提出了在井筒内部距井壁 0.25 m 处布置一圈半径为 2.9 m 的冻结孔的新型三圈冻结孔优化方案，相较于原方案，优化方案的交圈时间缩短了 10 d 以上，有效实现了降低井筒内部的温度并加快冻结壁交圈时间的目的；优化方案冻结 60 d 时的冻结壁厚度已经达到了 4.8 m 左右，远大于原方案的冻结壁厚度，温度比原方案低 4～5 ℃，这说明在井筒内加一圈冻结孔是行之有效的方法，能快速将井筒周围温度降到最低，有利于后续井筒开挖。

(4) 冻结方案优化设计的主要思路中，不仅考虑了增加井筒内圈冻结管来加速外圈主冻结管提前交圈，而且考虑到内部土层松散情况下开挖会出现坍塌等状况，优化方案冻结效果十分明显，有效缩短了冻结时间，极大提高了冻结管的冻结效能。

参考文献(References)：

[1] 周洁，李泽垚，万鹏，等.组合地层渗流对人工地层冻结法及周围工程环境效应的影响[J].岩土工程学报，2021，43(3)：471-480.
ZHOU Jie，LI Zeyao，WAN Peng，et al. Effects of seepage in clay-sand composite strata on artificial ground freezing and surrounding engineering environment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2021，43(3)：471-480.

[2] 胡伟丰，闫小兵，赵培东.沿海复杂条件立井冻结施工数值模拟与工程验证[J].矿业研究与开发，2025，45(3)：41-48.
HU Weifeng，YAN Xiaobing，ZHAO Peidong. Numerical simulation and engineering verification of freezing construction of vertical shaft under complex coastal conditions[J]. Mining Research and Development，2025，45(3)：41-48.

[3] 荣辉，黄海鹏.井筒冻结法在大贾庄铁矿井建中的应用[J].矿业工程，2020，18(4)：70-72.
RONG Hui，HUANG Haipeng. Application of shaft freezing method in dajiazhuang iron ore mine construction [J]. Mining Engineering，2020，18(4)：70-72.

[4] 叶玉西，石红伟，杨明红.伊犁矿区某矿副井冻结壁不交圈原因分析及处置[J].矿业工程，2013，11(6)：20-21.
YE Yuxi，SHI Hongwei，YANG Minghong. Analysis and treatment of unjoint circle of auxiliary shaft of a Yili mining area[J]. Mining Engineering，2013，11(6)：20-21.

[5] 邓维国，申建红，乔光磊.西部地区煤矿建井存在的一些问题思考[J].建井技术，2010，31(4)：29-33.
DENG Weiguo，SHEN Jianhong，QIAO Guanglei. Some problems in coal mine construction in western China[J]. Well Construction Technology，2010，31(4)：29-33.

[6] 江文辉,王晓健,朱建,等.基于西部风积砂层渗流特性的冻结壁发展规律研究[J].建井技术,2024,45(2):73-77.
JIANG Wenhui, WANG Xiaojian, ZHU Jian, et al. Research on the development law of frozen wall based on seepage characteristics of eolian sand layer in western China [J]. Well Construction Technology,2024,45(2):73-77.

[7] 王恒.深厚冲积层立井冻结井筒井帮温度调控及效果分析[J].黄金,2023,44(7):83-89.
WANG Heng. Shaft wall temperature regulation for shaft freezing of the vertical shaft in the deep thick alluvial layer and its effect analysis[J]. Gold,2023,44(7):83-89.

[8] 郭玉超,纪洪广,李成江,等.冻结井筒大体积混凝土井壁温度场实测研究[J].建井技术,2015,36(6):36-40.
GUO Yuchao, JI Hongguang, LI Chengjiang, et al. Research on temperature field measurement of large volume concrete wall in frozen well bore[J]. Well Construction Technology,2015,36(6):36-40.

[9] 李栋伟,周艳,靳鹏伟,等.深部高承压水地层裂隙岩体冻结温度场实测研究[J].冰川冻土,2016,38(1):140-144.
LI Dongwei, ZHOU Yan, JIN Pengwei, et al. Monitoring and studying the freezing temperature field in deep fractured rock mass with high confined water [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(1):140-144.

[10] 杨平,陈瑾,张尚贵,等.软弱地层联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测研究[J].岩土工程学报,2017,39(12):2226-2234.
YANG Ping, CHEN Jin, ZHANG Shanggui, et al. Whole range monitoring for temperature and displacement fields of cross passage in soft soils by AGF[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(12):2226-2234.

[11] 苏彦林,岳祖润,李晓康,等.渗流作用下砂层冻结模型试验研究[J].铁道标准设计,2020,64(10):94-100+108.
SU Yanlin, YUE Zurun, LI Xiaokang, et al. Model test study on freezing of sand layer under seepage condition[J]. Railway Standard Design,2020,64(10):94-100+108.

[12] 宋雷,王国柱,杨成立,等.渗流裂隙岩体冻结温度场模型试验研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(6):1256-1263.
SONG Lei, WANG Guozhu, YANG Chengli, et al. Model test study on freezing temperature field of seepage fissure rock mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019,36(6):1256-1263.

[13] 林斌,王鹏,侯海杰,等.深厚黏土层多圈管冻结壁温度场发展规律[J].煤田地质与勘探,2018,46(4):135-141.
LIN Bin, WANG Peng, HOU Haijie, et al. Development law of the multi-loop tube freezing temperature field in deep thick clay layer[J]. Coal Geology and Exploration,2018,46(4):135-141.

[14] 蔡兵华,刘文博,胡俊,等.冻结管新型排布方式温度场敏感性分析[J].低温建筑技术,2018,40(12):114-117.
CAI Binghua, LIU Wenbo, HU Jun, et al. Sensitivity analysis of temperature field under new configuration of freezing pipes [J]. Low Temperature Architecture Technology,2018,40(12):114-117.

[15] 顾人钊.井巷特殊施工设计与计算[M].徐州:中国矿业大学出版社,1994.
GU Renzhao. Special construction design and calculation of shaft and lane[M]. Xuzhou:China University of Mining and Technology Press,1994.

[16] 黄建华,杨鹿鸣,王蕴晨.水泥改良对地层冻结温度场影响分析[J].科学技术与工程,2020,20(27):11308-11314.
HUANG Jianhua, YANG Luming, WANG Yunchen. Influence of cement soil on stratum freezing temperature field[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(27):11308-11314.