

基于富水软岩层的鹰骏一号煤矿井筒冻结施工技术

朱连杰^{1,2}

¹山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

²内蒙古维华矿业公司鹰骏一号煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯

收稿日期: 2025年1月14日; 录用日期: 2025年2月25日; 发布日期: 2025年3月13日

摘要

鄂尔多斯盆地中生代地层煤炭资源丰富, 但煤层上覆地层岩体较软弱且含水量大。为保证煤矿矿井的快速建设, 鹰骏一号煤矿副立井井筒采用了冻结法快速施工技术。采用全深冻结方案, 冻结孔设置为主排孔 + 防片帮孔冻结。结合现场施工实践和冻结帷幕分析, 该技术能隔绝地下水, 且很好地提高了井壁稳定性, 为井筒高效掘砌提供了良好的条件。

关键词

西部软岩层, 冻结法, 地层加固, 防治水, 快速施工

Freezing Construction Technology for Shaft of Yingjun No.1 Coal Mine Based on Rich Water Soft Rock Layers

Lianjie Zhu^{1,2}

¹College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²Inner Mongolia Weihua Mining Company Yingjun No.1 Coal Mine, Ordos Inner Mongolia

Received: Jan. 14th, 2025; accepted: Feb. 25th, 2025; published: Mar. 13th, 2025

Abstract

The Mesozoic strata in the Ordos Basin are rich in coal resources, but the overlying rock mass of the coal seam is relatively weak and has a high water content. To ensure the rapid construction of coal

mines, the auxiliary shaft of Yingjun No.1 coal mine adopts the freezing method for rapid construction technology. Adopting a full depth freezing scheme, the freezing holes are set as the main row holes + anti plate auxiliary holes for freezing. Based on on-site construction practice and frozen curtain analysis, this technology can isolate water from the ground and greatly improve the stability of the wellbore, providing good conditions for efficient construction of the wellbore.

Keywords

Western Soft Rock Layer, Freezing Method, Ground Reinforcement, Water Prevention, Rapid Construction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国煤炭资源丰富，但是经过长期开发，东部大部分整装含煤区块已进入开发后期[1]，晋陕蒙宁地区已经成为我国煤炭工业高速发展的金三角，截至 2021 年，内蒙古累计探获资源储量 10011.79 亿吨，其中保有资源储量 6588.86 亿吨，居全国第一位[1]-[3]。其中，鄂尔多斯盆地煤矿数量最多，煤炭产能占内蒙古总产能的 65.38% [2]，为国家煤炭供应的重镇和煤炭勘探的重点区域。

鄂尔多斯盆地是多期叠合盆地，中生代为其主要成煤期，包括石炭纪、二叠纪、三叠纪和侏罗纪煤层[4]，在煤层之上，沉积中新生代较软弱碎屑岩，其中志丹群、直罗组含水层富水量大[5]，以中新生代碎屑岩为围岩的矿井涌水量大且持续时间长，在立井建设中需要进行止水和地层加固[6]。近年来，冻结法作为一种在富水岩层施工的有效手段逐渐受到人们的重视[7]。鹰骏一号煤矿副立井选用冻结法进行施工，通过地层冻结，能提供稳定的隔水层，岩石强度也可以得到大幅度提升[8]，为后续快速成井打下了坚实基础。

2. 工程与地层概况

鹰骏一号矿井井筒场地位于鹰骏一号井田的北部，地处内蒙古鄂尔多斯市鄂托克前旗西部，行政区划隶属于鄂尔多斯市鄂托克前旗上海庙镇管辖。矿井采用立井开拓方式，设计生产能力 6.00 Mt/a。煤区工业产地共设有三个矿井，包括主立井、副立井、中央回风立井，其中副立井井筒径直径为 10.5 m，井筒深度为 776.15 m。

副立井井筒建设中穿过的地层由老至新依次为三叠系上统延长组(T3y)；侏罗系中统延安组(J2y)、中统直罗组(J2z)；白垩系下统志丹群(K1zd)；古近系渐新统清水营组(E3q)；第四系(Q)。地层和水文地质情况、工程地质情况从上至下描述如下。

2.1. 新生代第四纪松散层

该含水层层厚 36.84 m，岩性为松散沉积物。水位降深 10 m 时的单位涌水量为 0.1186 L/s·m，岩石饱和抗压强度为 0.07~1.45 Mpa，平均 0.44 Mpa，岩石总体属极软岩类，围岩不稳定。

2.2. 中生代碎屑岩层

井筒穿越下部白垩系、直罗组、延安组及三叠系地层主要由层状及块状结构的岩体组成。地层含水

量大, 饱和抗压强度为 0.5~5.5 MPa, 岩石总体属极软岩、软岩类, 围岩不稳定。该时期地层概述如下:

1) 古近系渐新统清水营组

地层层厚为 48.37 m, 岩性上部以粘土为主, 为隔水层。底部地层为半胶结的砂岩及砂砾石层, 为裂隙孔隙承压含水岩, 层厚约 5 m。当水位降深 57.12 m 时涌水量为 0.680 L/s, 单位涌水量为 0.01190 L/s·m。

2) 白垩系下统志丹群

该地层为粗碎屑岩沉积, 平均厚度 239.20 m, 上部发育砂质泥岩为隔水层, 中下部砂岩、砾石层为含水层。本组含水层厚度 140.48~152.42 m, 当水位降深 56.10 m、43.13 m 时, 涌水量为 1.142 L/s、1.000 L/s, 单位涌水量为 0.02036 L/s·m、0.02318 L/s·m。

3) 侏罗系中统直罗组

为一套干旱气候条件下的河流~湖泊相沉积, 层厚 149.41 m, 岩性主要为粗、细粒砂岩和杂色泥岩互层, 底部为一巨厚层灰绿色粗粒石英长石砂岩, 泥岩为含水层, 砂砾岩为隔水层。本组含水层厚度 99.59~129.93 m, 当水位降深 18.50~20.43 m 时, 涌水量 2.473~2.798 L/s, 单位涌水量 0.121~0.1512 L/s·m。

4) 侏罗系中统延安组

为一套河流~湖泊相三角洲相沉积体系, 厚度约 160 m, 岩性为岩, 粉砂岩、泥岩、煤和少量含铝土质泥岩, 底部为粗粒砂岩。本组含水层厚度 84.83 m, 当水位降深 37.21 m 时, 涌水量 1.961 L/s, 单位涌水量 0.0527 L/s·m。

5) 三叠系上统延长组

为井田延安组含煤地层的沉积基底, 本次施工未完全揭露。岩性为厚层状砂岩, 夹粉砂岩、泥岩。本层为含水层, 层厚 86.55 m, 当水位降深 99.73 m 时, 涌水量 0.374 L/s, 单位涌水量 0.00375 L/s·m。

2.3. 井筒含水量估算

根据井筒检查井抽水实验对井筒涌水量进行计算, 副立井井筒涌水量为 482.90 m³/h。根据地质报告分析, 岩体强度较低, 井筒涌水量大, 为了克服不利的地质因素, 防治水和加固地层, 使用冻结法施工。

3. 冻结设计和冻结施工流程

3.1. 冻结设计

3.1.1. 冻结深度

根据井筒地质报告, 矿区水文地质条件复杂, 立井建设过程中穿过六层主要含水层, 矿井涌水量大, 同时, 各层位井筒围岩岩体强度较低, 普通法建井难以穿过。使用冻结法施工, 地层冻结壁形成后, 有很好的隔水效果, 同时, 随着冻土平均温度的降低, 冻土强度逐渐增大, 且增幅非常明显, 如表 1 所示。

井筒采用全深冻结法冻结, 冻结深度根据公式(1)计算。

$$H^d = H_0^d + H^e \quad (1)$$

式中 H^d 表示冻结深度计算值, H_0^d 为井筒壁座底板的深度, H^e 为掘砌深度小于主冻结孔设计的深度值, H_0^d 为井筒深度 776.15 m, H^e 的取值如表 2 所示。

根据计算, 副井冻结深度应大于 790.15 m~794.15 m, 结合施工经验, 井筒冻结深度为 795 m。

3.1.2. 冻结深度

为保证井筒冻结壁厚度和强度, 实现井筒提前开挖, 并保证井筒连续掘进施工, 副立井设计采用主排孔 + 防片帮孔的冻结方式。根据冻结施工规范要求结合掘进荒径的变化、掘进速度要求综合确定冻结孔的个数、布孔圈径、开孔间距和管径。为保证表土段地层开挖时不片帮, 同时达到快速掘进的效果,

Table 1. Relationship between uniaxial compressive strength and temperature of various layers in the auxiliary shaft
表 1. 副立井各地层单轴抗压强度与温度的关系表

岩性	试验温度/℃		
	-5℃	-10℃	-15℃
	抗压强度/MPa		
粉土	2.98	4.26	6.06
粘土	2.22	4.16	5.53
细粒砂岩	6.13	7.73	10.84
砂质泥岩	5.94	9.26	10.59
泥岩	5.57	7.27	9.12
粗粒砂岩	5.41	7.70	8.64
粉砂岩	9.31	10.23	11.90

Table 2. The depth of the frozen section wellbore is less than the design depth of the main frozen hole
表 2. 冻结段井筒的掘砌深度小于主冻结孔设计深度值

H ^d	设计深度值/m			
	≤300	>300~400	>400~500	>500
H ^e	10	>10~12	>12~14	>14~18

防片帮孔设计两排, 浅孔(N1~N19, 冻结深度 91 m)设计深度穿过表土层, 深孔(Z1~Z19, 冻结深度 330 m)穿过表土层和白垩纪含水层, 进入侏罗纪含水层, 主排孔(W1~W48, 冻结深度 795 m)均采用全深冻结。水文孔布置两个, 深度分别为 126 和 394 m; 测温孔三个, 浅孔深度为 91 m, 两个深孔深度为 795 m。冻结造孔设计布置参数和布置图如图 1 所示。

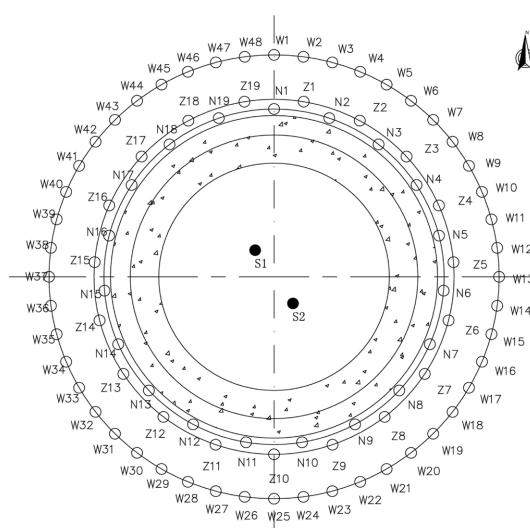


Figure 1. Layout plan of freezing holes in the auxiliary shaft of Yingjun No.1
图 1. 鹰骏一号副立井冻结孔平面布置图

3.1.3. 冻结壁厚度计算

按下列公式(2)计算冻结壁厚度。

$$E = \sqrt{3}(1-\xi) \frac{ph}{\sigma} k \quad (2)$$

式中 ξ 表示固约系数, 取 0.4; P 为冻结壁径向外荷载, h 为掘砌段高, 取值 4 m; k 为安全系数, 取 1.2, E 为冻结壁厚度, m。

根据计算结果, 综合考虑井筒开挖荒径的大小, 开挖前冻结时间要求及开挖速度要求, 并结合同地区同类工程的施工经验, 确定冻结壁厚度 E 为 4.2 m。

3.1.4. 制冷系统设置

通过下式(3)对井筒冻结需冷量进行了计算:

$$Q = \pi d n H q \text{ (Kcal/h)} \quad (3)$$

式中: d 为冻结管直径, m; n 为冻结管数目; H 为冻结深度, m; Q 为冻结管吸热效率, Kcal/m²·h, 取 280 Kcal/m²·h。

经计算, 井筒冻结需冷量为 568.2×10^4 Kcal/h。冻结站需冷量为井筒需冷量的 1.15 倍, 为 653.4×10^4 Kcal/h。为保证冷冻站具有足够的制冷量, 制冷设备选用 13 组 LG25L20SY 型双级撬块螺杆制冷压缩机组。冷冻站装机标准制冷量 2210×10^4 Kcal/h (工况制冷量 715×10^4 Kcal/h), 满足冻结需要。

3.1.5. 清、盐水系统设置

本工程选用高效蒸发式冷凝器, 该设备具有冷却效率高、耗水量低、气候温度适应性强等优点, 可大大减少新鲜水用水量, 节水环保。新鲜水使用量见表 3。

盐水系统选用 30.7°波美度的 CaCl_2 溶液, 共使用 380 吨固体氯化钙(70%晶体纯度)。盐水总循环量在积极冻结期设置平均每孔 $\geq 12\text{m}^3/\text{h}$, 盐水干管总流量大于 $864\text{ m}^3/\text{h}$, 盐水去路温度为 $-30\text{--}32^\circ\text{C}$, 维护冻结期根据冻结壁发展情况适当降低盐水流量和温度。根据流量分配及冻结工艺特点, 井筒集配液圈均采用一集、一配, 供、回液方式, 盐水干管为单去单回。盐水干管及集配液圈均选用螺旋焊管加工制作, 盐水干管及集配液圈规格型号为 $\Phi 426 \times 8$ mm。供液管选用 $\Phi 75 \times 6$ mm 聚乙烯塑料软管。

Table 3. Frozen water demand table
表 3. 冻结需水量表

施工阶段	单位用水量(m^3/h)
冻结造孔用水量	8
冻结积极运转期间用水量	26
冻结维护运转期间用水量	20

3.2. 冻结施工流程

冻结施工包括施工准备、冻结钻孔工程、冻结安装工程、冻结站系统调试和安装、积极冻结和维护冻结、工程监控、冻掘配合等, 具体流程如图 2 所示。

4. 冻结监测和冻掘配合

4.1. 监测系统原理

为了更好地了解冻结壁的发展, 布置了三个测温孔, 并在冻结现场配置温度采集器对测温孔、冻结

器、去回路盐水、清水温度等数据进行采集，实时显示并记录传感器所检测到的数值，方便查询。

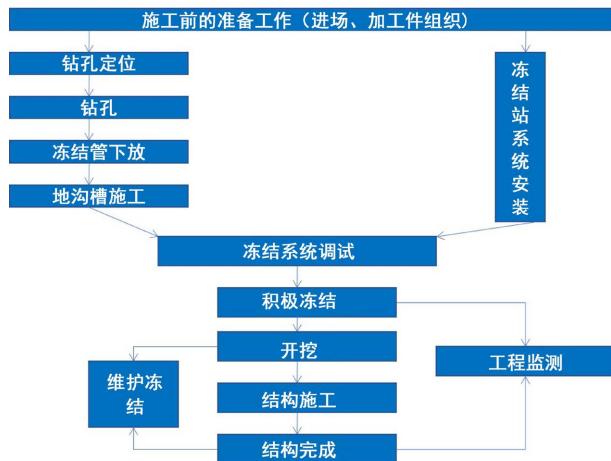


Figure 2. Freezing construction process flow
图 2. 冻结施工工艺流程

冻结站监测系统将现场的压缩机数据监测、液位数据监测、流量数据监测、温度数据监测、环境数据监测液位等传感器通过信号专用通讯线缆回传测试信号至数据采集器并将信号传输到上位机进行处理，通过配备立井冻结模型参数化技术，通过 Unity3D 动态生成模型，将模型参数作为一个开源数据，外部导入参数后生成模型，运行监测系统如图 3 所示。

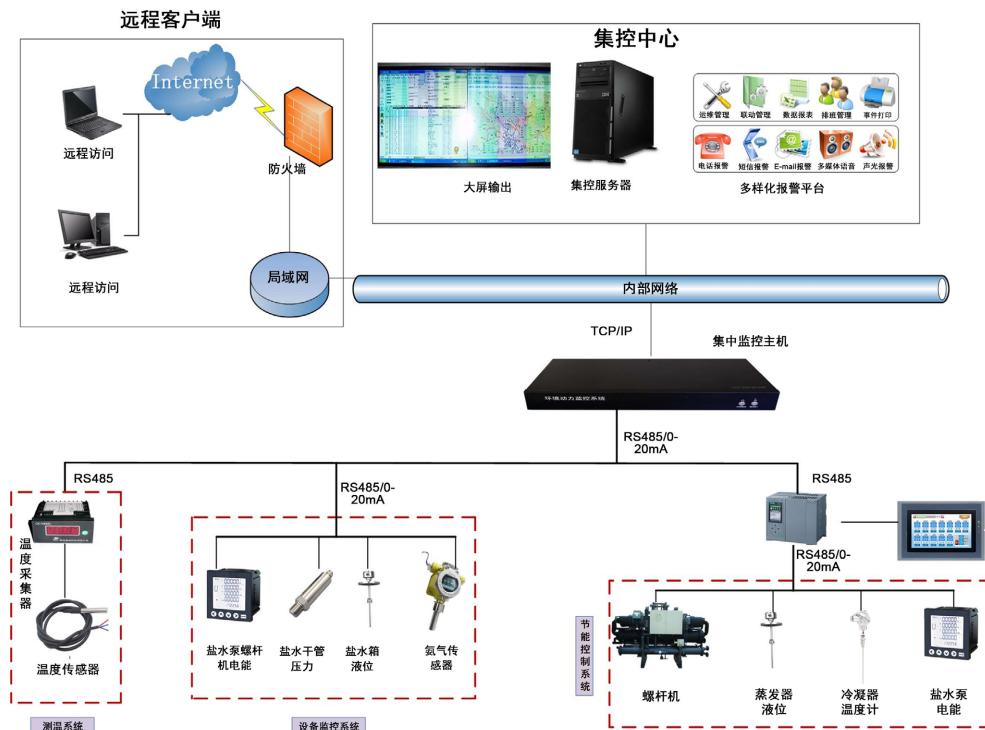


Figure 3. Schematic diagram of frozen station operation status monitoring system
图 3. 冻结站运行状态监测系统示意图

4.2. 冻结壁发展预测

通过盐水去回路温度、测温孔测点数据,冻土实验报告等资料,使用有限元模拟软件对副立井 43 m、91 m、120 m、169 m、390 m、457 m 层位进行了数值计算, 120 m、390 m 层位冻结交圈时间如图 4、图 5 所示。

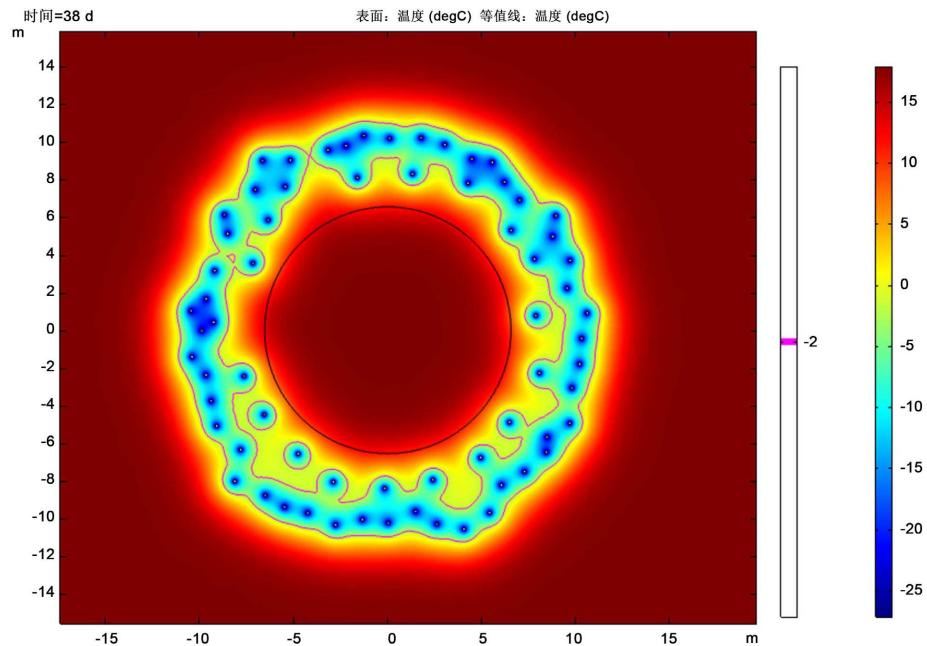


Figure 4. Frozen wall intersection time at 120 m layer (38 days)
图 4. 120 m 层位冻结壁交圈时间(38 天)

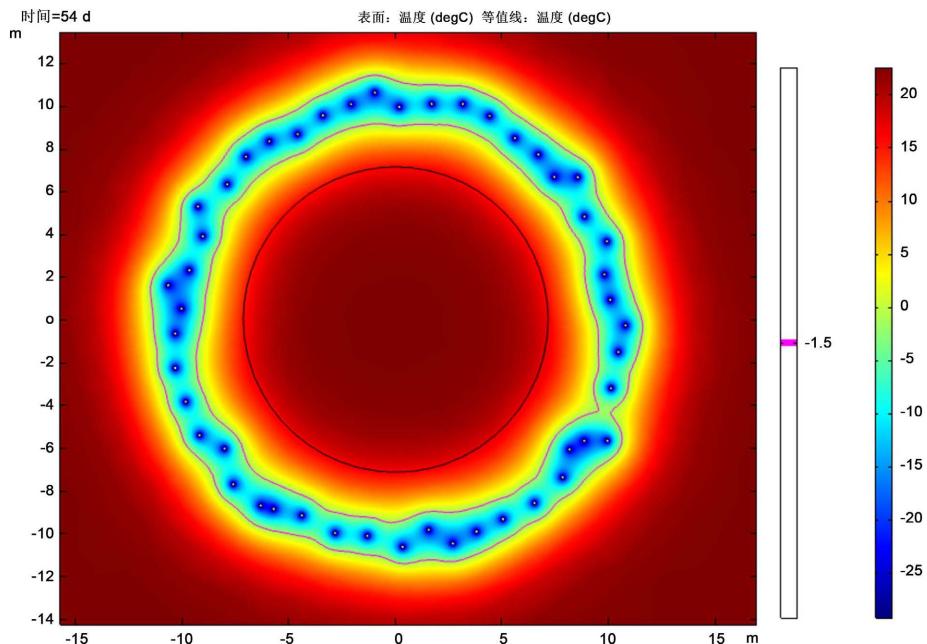


Figure 5. Frozen wall intersection time at 390 m layer (54 days)
图 5. 390 m 层位冻结壁交圈时间(54 天)

按冻结 59 天试开挖, 月成井 90~100 m/月的速度开挖井筒, 综合考虑工期安排计算各层位开挖时冻结天数, 并据此进行了模拟, 457 m 层位冻结壁情况如图 6 所示。冻结壁平均厚度、平均温度、冻土平均入荒量如下表 4 所示, 均能很好地满足开挖要求。

Table 4. Development of frozen walls during excavation of each layer
表 4. 各层位开挖时冻结壁发展情况

累深(m)	开挖时冻结天数(d)	冻结壁平均厚度(m)	冻结壁平均温度(°C)	模拟冻土入荒量(m)	实测冻土入荒量(m)
43	90	4.9	-13.6	0.6	0.6~0.8
91	112	4.7	-11.2	0.3	
120	122	4.9	-10.9	0.4	
169	154	4.8	-10.7	0.3	
390	228	5.9	-10.4	0.6	
457	250	6.2	-10.5	0.7	

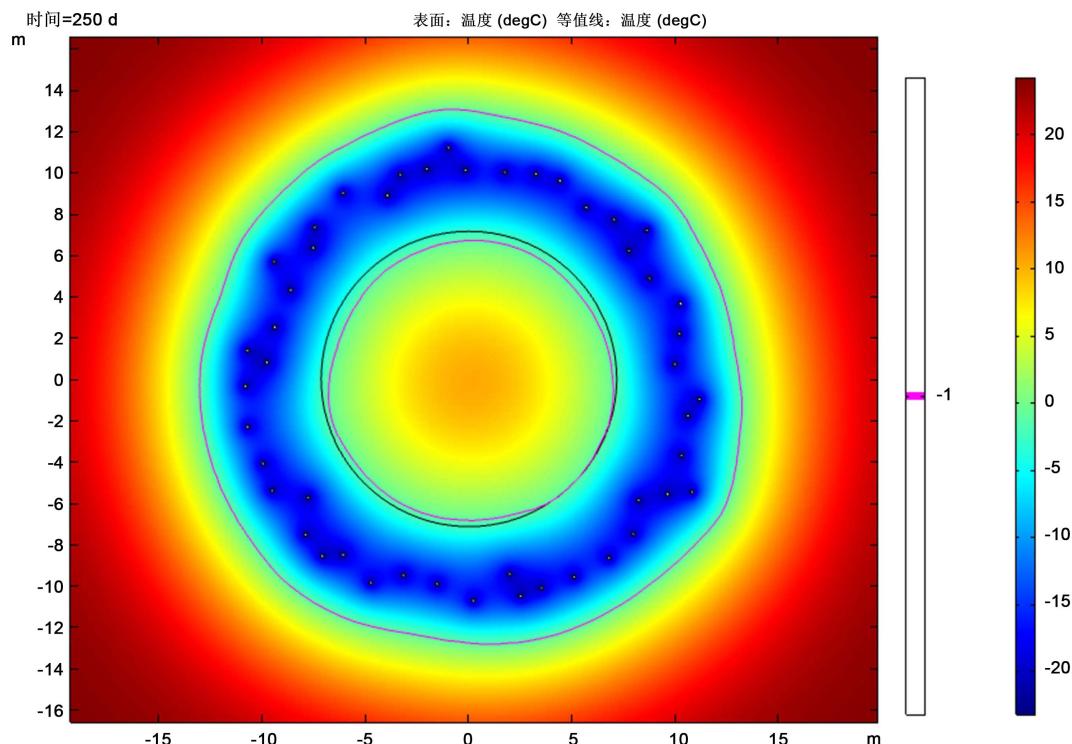


Figure 6. Development status of frozen wall during excavation of control layer (457 m) (250 days)
图 6. 控制层位(457 m)开挖时冻结壁发展状况(250 天)

4.3. 冻掘配合

冻结施工与掘砌施工是相互联系, 密不可分的, 冻结施工状况影响掘砌施工, 掘砌施工影响冻结施工安全。在井筒冻结段施工过程中冻结、掘砌应相互配合, 密切联系, 使冻结与掘砌施工处于可控状态。为了实现快速掘进, 本工程积极冻结期加强冻结, 防止前期开挖片帮; 锁口段掘砌时采用小段高快速施工, 减少井帮暴露时间, 及时做好支护, 做好防止锁口下沉或脱落的措施; 维护动结期加强井筒掘砌工

作面监测, 及时调整冻结供冷量, 为井筒掘砌提供了良好的冻结条件。

5. 结论

- 1) 鹰骏一号煤矿副立井采用全深冻结施工, 使用主排孔 + 防片帮孔冻结方案, 达到了隔绝地下水和加固地层的作用。
- 2) 选用 13 组 LG25L20SY 型双级撬块螺杆制冷压缩机组, 保证了冷量的持续供应, 确保了冻结壁的按时交圈。
- 3) 通过冻结分析和施工实践, 冻结壁平均厚度、平均温度、冻土平均入荒量都能很好控制, 结合冻掘配合措施, 为井筒快速掘进提供了条件。

参考文献

- [1] 王海宁. 中国煤炭资源分布特征及其基础性作用新思考[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(7): 5-9.
- [2] 霍超, 杜金龙, 齐宽, 等. 内蒙古煤炭资源分布特征及勘查开发布局研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(6): 33-36+119.
- [3] 孙杰, 陈美英, 唐朝苗, 郑翠. 我国煤炭资源勘查现状跟踪研究[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(11): 1-8.
- [4] 王双明. 鄂尔多斯盆地叠合演化及构造对成煤作用的控制[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 54-63.
- [5] 范立民, 迟宝锁, 王宏科, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组含水层研究进展与水害防治建议[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3535-3546.
- [6] 程德荣, 李德, 袁东锋, 高晓耕. 黔南地区巨厚灯影组富水白云岩井筒防治水方案比选研究[J]. 建井技术, 2019, 40(4): 9-12+52.
- [7] 郁志利, 孙忠远, 张伟. 冻结立井井筒快速施工技术在钱营孜煤矿的应用[J]. 能源技术与管理, 2024, 49(1): 134-137.
- [8] 李博融. 白垩系地层冻结井筒岩石物理力学特性及温度场研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2016.