

箕斗装载硐室冻结法施工实践

——以鹰骏一号煤矿主立井井筒冻结工程为例

朱连杰^{1,2}

¹内蒙古维华矿业公司鹰骏一号煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯

²山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2025年6月30日; 录用日期: 2025年8月22日; 发布日期: 2025年9月5日

摘要

在煤矿主立井箕斗装载硐室掘砌施工环节, 安全风险问题颇为棘手。本文选取鹰骏一号煤矿主立井工程作为重点研究对象, 为攻克难题, 采用了创新性的“主排孔 + 防片帮孔 + 箕斗辅助孔”全深冻结技术方案。通过数值模拟的分析手段, 并紧密结合现场实际施工实践, 对冻结帷幕展开深入分析。实践结果证明, 该技术方案成效显著, 不但能有效隔绝地下水的渗透, 还能大幅增强井壁结构的稳定性, 进而为井筒的高效掘砌施工创造了良好条件, 为煤矿安全生产提供保障。

关键词

箕斗装载硐室, 冻结法, 地层加固, 防治水, 快速施工

Construction Practice of Freezing Method in Skip Loading Chamber

—Consider the Yingjun No. 1 Coal Mine Main Shaft Freezing Project

Lianjie Zhu^{1,2}

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

²School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Jun. 30th, 2025; accepted: Aug. 22nd, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

The construction of skip loading chambers in the main shafts of coal mines poses significant safety

文章引用: 朱连杰. 箕斗装载硐室冻结法施工实践[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 341-350.

DOI: 10.12677/jogt.2025.473038

risks. This paper investigates the main shaft project of Yingjun No. 1 Coal Mine, adopting a novel “main row of holes, anti-chip gang holes, skip auxiliary holes” full-depth freezing technology programme to address these challenges. Through the utilisation of numerical simulation and in close conjunction with on-site construction practices, a comprehensive analysis of the freezing curtain was conducted. The findings of this study demonstrate the efficacy of this technical solution in not only effectively isolating the infiltration of groundwater but also significantly enhancing the stability of the shaft wall structure. Consequently, this enhances the conditions for efficient shaft excavation and provides a safety guarantee for coal mine production.

Keywords

Skip Loading Chamber, Freezing Method, Ground Reinforcement, Water Control, 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

鄂尔多斯地区以其复杂的地质条件和特有的地层特征而著称，该地区以岩石地层为主，其中冲积层相对较浅，还存在多个富水岩层。井筒掘进时需要快速穿过冲积层，而冲积层下方的弱胶结基岩厚度较大，易受外界因素影响发生结构变化。富水岩层中的水分在井筒掘进时可能大量涌入井筒，影响施工进度，威胁施工人员安全。因此，在井筒掘进和支护过程中需特别关注其稳定性问题[1]，同时考虑富水岩层的影响，制定有效的措施来隔绝水源，确保施工的安全进行[2] [3]。

除了地质条件的复杂性，鄂尔多斯地区的气候条件也十分恶劣。冬季严寒，夏季酷热，温差极大，这种极端的气候条件对井筒冻结技术提出了更高的要求。在严寒的冬季，冻结剂的制冷效果可能得到加强，但同时也需要考虑到设备在低温环境下的运行稳定性和可靠性。而在酷热的夏季，则需要采取有效的措施来防止冻结壁因高温而融化，确保冻结壁的稳定性和隔绝效果[4]。

鄂尔多斯地区的地质和气候条件对井筒冻结技术提出了多方面的挑战。在应用该技术时，必须充分考虑地区特点，制定针对性的技术方案和措施，以确保井筒施工的安全和稳固[5]。通过科学合理的冻结孔布置、冻结深度的确定以及冻结壁温度和厚度的控制等手段，可以有效地应对这些挑战，实现井筒施工的高效和安全[1] [6]。鹰骏一号煤矿主立井选用冻结法进行施工，针对箕斗装载硐室部位进行冻结孔优化设计。通过地层冻结，提供稳定的隔水层，大幅度提升岩石强度[2] [7]，为后续快速成井打下了坚实基础。

2. 工程及地层概况

2.1. 工程概况

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，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，其中主立井井筒直径为 7 m，井筒深度为 755 m。

2.2. 地层概况

井筒位置地表全部被第四系所覆盖。根据本次井筒施工钻孔和以往井田勘探施工钻孔揭露(表 1), 井筒场地内地层由老至新依次有: 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)。

Table 1. Statistical table of formation thickness

表 1. 地层厚度统计表

孔号	地层	Q (m)	E3q (m)	K1zd (m)	J2z (m)	J2y (m)	T3y (m)
本次施工钻孔	J1	36.90	46.72	240.84	127.57	151.83	256.50
	J2	36.84	48.37	239.20	149.41	152.06	210.59
	J3	35.13	43.19	247.09	168.39	157.46	153.66
	Jf	36.95	50.89	237.24	151.02	2.10	/
	平均	36.46	47.29	241.09	149.10	153.78	206.92
勘探施工钻孔	Y1406	14.56	73.27	235.63	180.14	148.15	/
	Y1407	18.00	78.19	233.28	192.13	260.10	/
	Y1508	13.95	70.13	263.63	168.44	230.48	/
	平均	15.50	73.86	244.18	180.24	212.91	/

2.3. 井筒水文地质条件

根据地下水的赋存条件、水力特征及含水层的纵向分布结构, 本次工作将井筒位置含水层由上至下划分为 6 层。第一层为第四系松散层孔隙潜水含水层(I); 第二层为古近系渐新统清水营组底部砾岩孔隙、裂隙承压含水层(II); 第三层为白垩系志丹群碎屑岩孔隙、裂隙承压水含水层(III); 第四层为侏罗系中统直罗组碎屑岩孔隙裂隙承压水含水层(IV); 第五层为侏罗系延安组砂岩孔隙裂隙承压水含水层(V); 第六层为三叠系砂岩孔隙裂隙承压水含水层(VI)。

2.4. 分析评述

通过对上述各含水层特征分析, 第四系松散层潜水(I)与直罗组承压水(IV)属富水性中等。(I)含水层岩性结构疏松, 分布面积广, 接受降水补给条件优越, 地下水丰富, 井筒开凿易发生井壁坍塌、涌砂、强涌水等地质灾害; (IV)含水层厚度大, 岩石软弱(类似泥化), 孔隙发育, 透水性强, 地下水侧向补给条件充分且水源丰富, 井筒开凿此段易发生井壁鼓帮、缩径张裂、坍塌、强涌水灾害。其它(II)、(III)、(V)、(VI)含水层富水性弱, 对井筒开凿将产生的涌水量随揭露含水层的厚度而变化, 延安组含水层(V)厚度大、水压高, 其形成的水量较大。白垩系志丹群强风化层, 岩石软弱、局部透水性较好, 不利于井筒施工的现象主要为坍塌、岩石泥化。从施工效率、安全生产角度考虑, 本区井筒开凿宜采用冻结法技术措施。

3. 冻结施工方案及理论计算

3.1. 控制层位

根据井检孔竣工报告资料, 选取白垩系 324.50 m 砾岩为控制层位。按照表 2 中冻结孔布置的主要参

数进行以下计算并补充完善。

Table 2. Main parameters of freezing hole arrangement
表 2. 冻结孔布置主要参数表

序号	项目名称	单位	主立井
1	井筒净直径	m	7.00
2	最大荒径	m	10.50
3	主冻结孔	布置圈径	16.10 (硐室部分距离硐室荒径 1.20)
		开孔间距	1.330
		孔数	41
		孔深	772.00
4	防片帮孔	布置圈径	11.00/11.50
		开孔间距	1.965
		孔数	9/9
		孔深	89.00/330.00
5	硐室辅助冻结孔	布置圈径	16.10
		开孔间距	2.946
		孔数	2
6	测温孔	孔深	700
		孔数	2
6	测温孔	m/个	772.00/2, 425.00/1
7	水文孔	m/个	376.00/1, 27.00/1
8	冻结孔工程量	m	36823
	钻孔工程量	m	39195

3.2. 冻结壁厚度计算

按照招标资料所提供冻土实验报告、岩石力学性质试验报告等参数，结合我单位在邻近地区施工经验，采用有限长黏塑体按强度条件(1)计算冻结壁厚度：

$$E = \sqrt{3}(1-\xi) \frac{Ph}{\sigma'_t} k \quad (1)$$

式中： E ，计算的冻结壁厚度，m； ξ ，暴漏段冻结壁两端固定程度系数； h ，掘进段高，即冻结壁暴露高度，m； k ，安全系数，采用 1.1~1.3； P ，控制层地压值。

计算结果为 4.40 m，结合相似井筒成功经验，主立井冻结壁厚度取 4.60 m。

3.3. 冻结壁平均温度

按照基岩导热系数大的特点，结合邻近井筒冻结实际扩展速度，对井筒井帮温度、冻结壁厚度进行

预测, 用成冰公式(2) (3)计算冻结壁平均温度。

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

$$toc = tb \left(1.135 - 0.352l^{1/2} - 0.875E^{-1/3} + 0.266E^{-1/2} \right) - 0.466 \quad (3)$$

式中: tc , 冻结壁平均温度; toc , 按零度边界计算的冻结壁平均温度; tn , 井帮温度; l , 冻结孔间距; tb , 盐水温度; E , 冻结壁厚度。

经计算, 冻结壁平均温度 -10°C 。

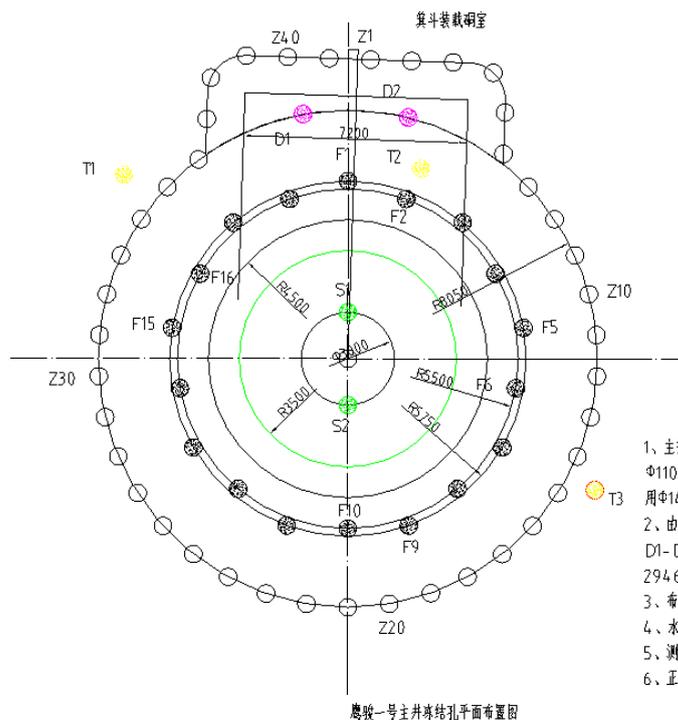
3.4. 冻结孔布孔方式

为保证施工安全, 并兼顾井筒较高的掘砌速度, 同时考虑岩层以钻爆法为主的掘进施工工艺, 采用主冻结孔 + 防片帮孔 + 硐室辅助孔的布孔方式, 将硐室部位做突出设计使硐室部位在后期开挖时摒除冻结孔影响, 有较高冻土强度, 保证硐室开挖安全。主冻结孔冻结管距荒径 2.80 m, 深度 772 m; 防片孔冻结管距荒径 1.00/1.25 m, 深度 89.00/330.00 m (至第四系底界和白垩系底界)。冻结管 300 m 以浅采用 $\phi 140 \times 5$ mm 无缝钢管, 300 以深采用 $\phi 140 \times 6$ mm 无缝钢管(图 1, 图 2)。

主冻结孔孔径布置: 按基岩段采用钻爆法施工公式(4)计算

$$D_0 = D'_i + 2(1.2 + Q'_f h_0) \quad (4)$$

式中: D'_i , 基岩中井筒最大掘进直径, m; Q'_f , 基岩段冻结孔允许偏斜率; h_0 , 井筒冻结深度。



- 1、主册冻结孔圈径 $\phi 16100$ mm, 布置41个冻结孔, 冻结孔深度772000mm; 防片冻结孔圈径 $\phi 11000/11500$ mm, 布置18个冻结孔, 冻结深度89000/330000mm, 冻结管材300m以上选用 $\phi 140 \times 5$ 无缝钢管; 300m以下选用 $\phi 140 \times 6$ 无缝钢管。
- 2、由于装载硐室高度高度大出于安全考虑利用部分主冻结孔Z1-Z5、Z37-Z41和硐室冻结孔D1-D2, 将硐室部分进行强化冻结保证在施工过程中不偏移、不漏浆。硐室冻结孔间距2946mm, 冻结孔深度为700000mm。
- 3、布置测温孔3个, 主册冻结孔外侧水流上、下方各有布置1个, 主册孔内侧最大孔间距处布置1个。
- 4、水文孔布置2个, 距井心1.5m处, S1孔径376000mm, S2深度27000mm。
- 5、测温孔、水文孔管材选用 $\phi 108 \times 5$ 无缝钢管。
- 6、正北方向为1号孔。

Figure 1. Freezing hole layout
图 1. 冻结孔平面布置图

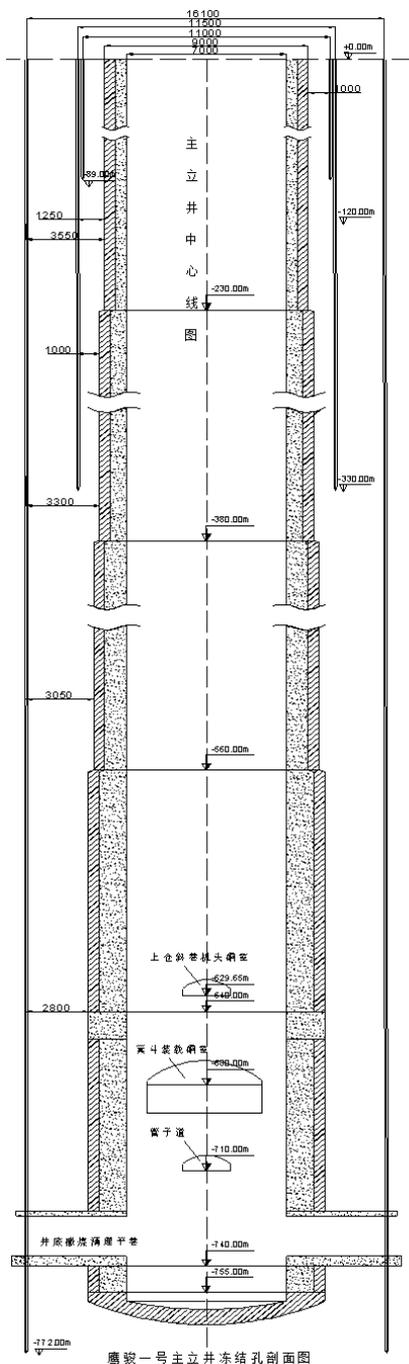


Figure 2. Sectional view of the freezing hole of the main shaft of Yingjun No. 1
 图 2. 鹰骏一号主立井冻结孔剖面图

3.5. 水文孔及测温孔布置

根据井筒检查孔地质报告资料，井筒布置 2 个水文孔，报道第四系和侏罗系直罗组主要含水层的水位变化情况，S1 深度 376.00 m；S1 深度 27.00 m。

根据本冻结工程实际情况，井筒布置 3 个测温孔(表 3)。其中 T1 布置在主冻结孔外侧孔间距较大处水流上方；T2 布置在防片帮孔最大孔间距处；T3 布置在主冻结孔外侧水流下方。测温孔具体位置可视现场

情况适当调整, T1 距主冻结孔圈径外 1.5 m, T3 距离主冻结孔圈径内 1.5 m。测温孔孔斜、向内偏要求同冻结孔。

Table 3. Parameters of hydrological holes and temperature measuring holes layout

表 3. 水文孔及测温孔布置参数表

井别	水文孔/m	测温孔/m
主立井	376.00/1, 27.00/1	T1:772.00, T2:425.00, T3:772.00
	水文孔、测温孔规格/mm	Φ108 × 5

4. 冻结制冷系统

4.1. 制冷设备

结合以往的冻结施工经验, 适当增大冷冻站装机数量, 对快速降低盐水温度、提前交圈有促进作用, 因此设备选择考虑足够的装机富余系数。主立井选取 12 台 LG25LG20S 双级双机螺杆机组及相应辅助设备, 装机标准制冷量为 1837 万 Kcal/h。

4.2. 冷却水系统

冷却水主要由蒸发式冷凝器消耗水为主, 高效蒸发式冷凝器每台需要新鲜水补给量 3.0 m³/h, 主立井最大消耗水量为 33.0 m³/h。清水泵选用: IS125-100-200 清水泵 2 台, 一用一备。

4.3. 盐水系统

冻结期盐水温度选取为: 积极期不高于-30℃, 维护期-25℃~-28℃。主立井冻结施工中, 主冻结孔与防片帮孔均共用一套盐水循环系统。主冻结孔单孔流量控制在 12~16 m³/h, 防片帮孔单孔流量控制在 10~14 m³/h。因此: 主立井主冻结孔盐水最大循环量 W = 706 m³/h; 防片孔盐水最大循环量 W = 56 m³/h, 主冻结孔和防片孔盐水最大循环量 W = 760 m³/h。

主立井盐水干管及配液圈直径 d = 0.360 m, 主立井采用主冻结孔与防片帮孔用一套配集液圈、盐水干管, 选用 Φ377 × 8 mm 钢管; 主立井盐水系统均选用 12sh-6 型盐水泵 3 台(单台流量为 792 m³/h, 2 用 1 备), 配套电机功率每台为 315 kw。

4.4. 其它附属设备

其它附属设备见表 4。

Table 4. Selection and quantity of auxiliary equipment for main shaft

表 4. 主立井附属设备选型及数量表

序号	设备名称	型号规格	数量	额定功率(KW)	生产能力
1	撬块式蒸发器	GZF-240	12		蒸发面积 250 m ²
2	蒸发式冷凝器	EXV-290	14	17.5	排热量 1500 KW
3	贮氨器	ZA-5	3		容积 5 m ³
4	热虹吸	HZA-2.0	6		容积 2 m ³

5. 冻结监测和冻掘配合

5.1. 监测系统原理

为保证井筒冻结施工质量,在井筒冻结工程中将信息化管理融入施工全过程,利用国内最先进的OCEAN计算机巡回测温系统、BIM技术,对冻结施工进行实时监测,对各种冻结参数(温度、压力、流量、液位、电流等)进行监测,实现对冻结器运行、冻结壁形成、冻结站运转电机的动态监测管理,根据测温孔数据对冻结壁的形成进行预测;同时把网络技术应用到监测系统中,实现对冻结施工各种数据的远程观察、读取,实现现场、公司总部的信息共享,进而提高对冻结分析的及时性、准确性、科学性,保证工程的优质、高效进行(图3)。

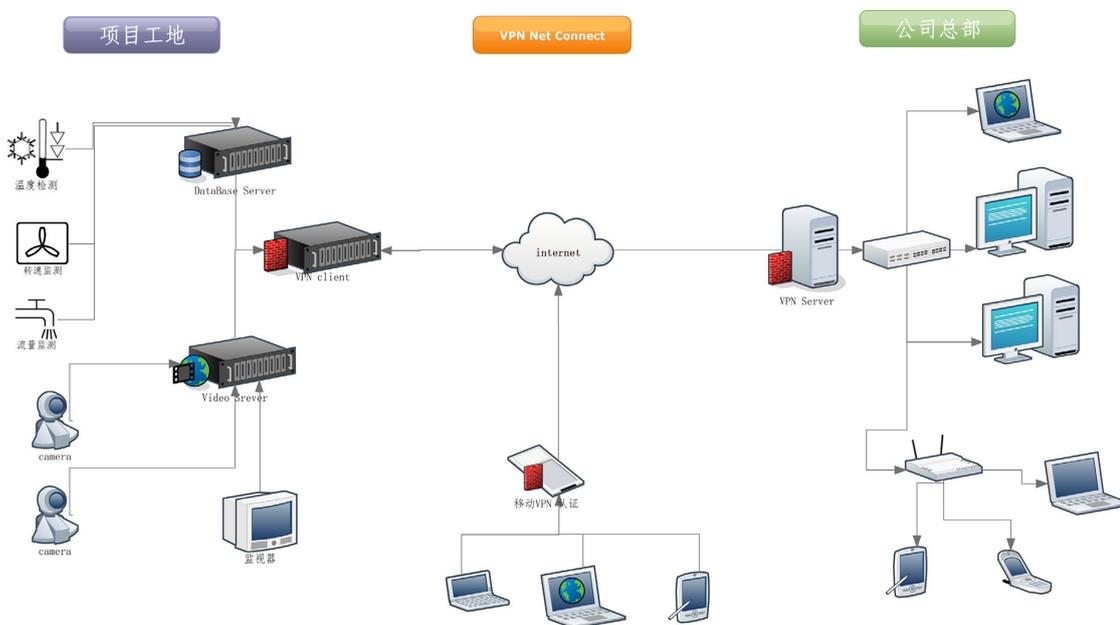


Figure 3. Schematic diagram of the freezing station operation status monitoring system
图3. 冻结站运行状态监测系统示意图

5.2. 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,使用模拟软件对主立井各层位进行了数值计算,通过计算机软件模拟冻结壁形成(表5,图4)。

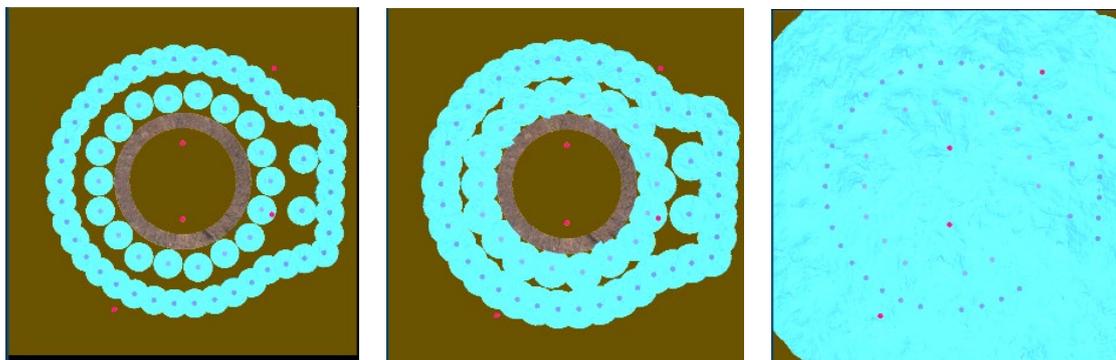
5.3. 冻结壁井帮温度

通过对井帮温度测量(表6),进一步验证模拟冻土扩展真实、准确性,保证了掘砌单位施工安全,保证了硐室施工的安全、高效。

Table 5. Freezing and closing time of hydrological borehole layer (27 m, 376 m)

表5. 水文孔层位(27 m, 376 m)冻结交圈时间

项目	模拟值		水文孔冒水时间	
报导层位	27 m	376 m	22~27 m	368~376 m
交圈天数(d)	35	44	35	46



(左至右分别为 27 m, 35 d; 376 m, 46 d; 700 m, 246 d)

Figure 4. Development of frozen walls at different levels

图 4. 不同层位冻结壁发展状况

Table 6. Freezing wall temperature

表 6. 冻结壁井帮温度

观测深度 m	累计深度 m	掘进 荒径 m	岩性	井帮温度/℃								冻土进荒 mm
				东	东南	南	西南	西	西北	北	东北	
25	25	9	细砂	-1.2	-1.5	-1.6	-1.3	-1.2	-1	-0.9	-1	0~100
29	29	9	粉土	-4.7	-3.1	-2.9	-3.1	-2.7	-2.4	-2.6	-2.4	400~500
49	49	9	粘土	-5.8	-5.3	-5.2	-4.4	-4.0	-4.0	-3.9	-4.5	500~600
81	81	9	含砾 粘土	-5.2	-4.7	-5.4	-4.9	-5.1	-4.7	-3.0	-2.9	600~700
85	85	9	砾岩	-5.2	-4.7	-4.6	-4.8	-4.9	-4.7	-4.9	-4.1	700~800

5.4. 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；维护冻结壁，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。

6. 结论

(1) 鹰骏一号煤矿主立井采用全深冻结施工，使用主排孔 + 防片帮孔 + 硐室辅助孔冻结方案，达到了隔绝地下水和加固地层的作用。

(2) 选用 12 组 LG25L20S 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、强度、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。

(4) 通过对硐室区域冻结孔设计变更，使硐室区域地层保持有效冻土厚度，且不会破坏该区域冻结管即可进行前期施工，保证施工安全。

参考文献

- [1] 朱连杰. 基于富水软岩层的鹰骏一号煤矿井筒冻结施工技术[J]. 矿山工程, 2025, 13(2): 286-294.
- [2] 周爱平, 谭杰, 乔文俊, 等. 深厚富水弱胶结围岩井筒冻结深度影响因素分析及优化[J]. 煤炭工程, 2025, 57(5): 1-7.
- [3] 张伟, 李渊. 冻结孔造孔施工工艺研究——以园子沟煤矿矿井为例[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(15): 25-27.
- [4] 樊志霆. 矿井冻结法施工常见事故分析及预防措施[J]. 河北企业, 2019(8): 153-154.
- [5] 刘志强. 矿井建设技术发展概况及展望[J]. 煤炭工程, 2018, 50(6): 44-46, 50.
- [6] 袁昌盛. 大型冻结井壁结构箕斗装载硐室设计施工的难点分析及对策[J]. 中州煤炭, 2016(3): 69-70, 73.
- [7] 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.