



移动扫码阅读

李功洲, 李小伟, 陈红蕾, 等. 深厚冲积层冻结孔布置分类技术对冻结调控的影响[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (12): 31-38. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.002
LI Gongzhou, LI Xiaowei, CHEN Honglei, et al. Classified arrangement technology of freezing holes in deep and thick alluvium and its influence on freezing control [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (12): 31-38. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.12.002

深厚冲积层冻结孔布置分类技术对冻结调控的影响

李功洲^{1,2}, 李小伟³, 陈红蕾², 李方政², 彭 飞²

(1. 国家开发投资集团有限公司 中国电子工程设计院有限公司, 北京 100142; 2. 煤炭科学研究总院 建井研究分院, 北京 100013; 3. 河南国龙矿业建设有限公司, 河南 郑州 450000)

摘 要:冻结孔布置方式不仅决定了能否按期形成设计所需的冻结壁有效厚度和平均温度, 还会影响冻结法凿井的速度、安全和施工成本。不合适的布置方式甚至会成为冻结法凿井的安全隐患, 因此冻结孔布置方式及其冻结壁形成特性一直是冻结法凿井的理论和技术研究热点和难点。提出深厚冲积层冻结孔按主冻结孔、辅助冻结孔、防片冻结孔 3 类功能分类设计和布置, 可较好地解决主冻结孔及冻结壁主体结构的安全和稳定; 根据冻结壁厚度需要及冻结时间均匀布置辅助孔, 可明显减少辅助孔数量, 提高冻结壁的均匀性和稳定性; 根据挖掘荒径变化布置多圈防片孔, 可提高冻结调控的灵活性和效果。工程实践表明: 以外圈为主冻结孔的布孔方法, 有利于主冻结孔和整体冻结壁的安全稳定, 可减少冻结孔数量、钻孔工程量、冻结需冷量, 提高了冻结的可调性和调控效果, 推荐为深厚冲积层冻结孔布置方式的首选。合理的冻结孔布置可为冻结壁安全稳定及冻结调控打下良好的基础, 施工过程中通过建立冻结壁形成特性实测分析、工程预报与冻结调控的机制, 定期对冻结壁有效厚度、平均温度和井帮温度发展趋势进行分析和预测, 提前对防片孔和辅助孔盐水流量、温度进行调控, 甚至停止盐水循环, 能有效控制井帮温度及冻土扩入荒径量, 为掘砌施工创造良好条件。国内外冲积层厚度最大之一的赵固二矿西风井通过采用以外圈为主冻结孔的布孔方式, 总的冻结孔数、冻结钻孔工程量、冻结需冷量均显著降低, 且冻结壁内部温度和强度的均匀性更好; 结合黏性土层井帮稳定性观测, 通过主动调控, 实现 400 m 以深井帮温度还可略高于设计调控目标, 635 m 以深井帮温度接近设计调控目标, 冻结壁厚度和平均温度始终满足设计要求, 冲积层深部黏性土层井帮温度控制在 -11 ℃ 以上, 砂性土层井帮温度在 -13 ℃ 以上; 冲积层的冻结壁稳定性良好, 冻掘配合好, 冲积层深部外壁掘砌速度基本维持在 75~80 m/月, 冲积层段外壁平均掘砌速度为 87.1 m/月, 冻结段外壁平均掘砌速度为 82.1 m/月。

关键词:深厚冲积层; 冻结孔布置; 主冻结孔; 辅助冻结孔; 防片冻结孔; 冻结调控

中图分类号:TD265.3 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)12-0031-08

Classified arrangement technology of freezing holes in deep and thick alluvium and its influence on freezing control

LI Gongzhou^{1,2}, LI Xiaowei³, CHEN Honglei², LI Fangzheng², PENG Fei²

(1. China Electronics Engineering Design Institute Co., Ltd., State Development and Investment Corp., Ltd., Beijing 100142, China;
2. Branch Institute of Mine Construction, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
3. Henan Guolong Mining Construction Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The arrangement of freezing holes not only determines whether the effective thickness and average temperature of the freezing wall required by the design can be formed on schedule, but also directly affects the speed, safety and construction cost of the freezing shaft sinking. Improper arrangement will even become the hidden danger. Therefore, the arrangement of freezing holes and formation characteristics of freezing wall are always the hot and difficult points in theory and technology research. The design and arrangement of freezing holes in deep and thick alluvium can be classified into three types: main freezing hole, auxiliary freezing hole and spalling-prevention freezing hole, which can solve the problems of safety and stability of main structure of main freezing hole and freezing wall. Arranging auxiliary holes evenly according to the thickness of frozen wall and freezing time can obviously reduce the number of auxiliary holes and improve the uniformity and stability of the freezing wall. The flexibility and effect of freezing control can be improved by arranging multiple circles of spalling-prevention freezing holes according to the change of excavation diameter. The engineering practice shows that the holes arrangement method with outer ring as the main freezing hole is beneficial to the safety and stability of the main freezing hole and the overall freezing wall, which can reduce the number of freezing holes, the work amount of drilling holes and the cooling capacity required, improve the adjustability and control effect of freezing, and is recommended as the first choice for the arrangement of freezing holes in deep and thick alluvium. The reasonable arrangement of freezing holes can lay a good foundation for the safety and stability of the freezing wall and the control of freezing. In the construction process, through the establishment of the mechanism of the actual measurement and analysis of the formation characteristics of the freezing wall, engineering prediction and freezing control, the development trend of the effective thickness, average temperature and the temperature of the frozen wall are analyzed and predicted on a regular basis, and the flow and temperature of salt water in the spalling-prevention hole and auxiliary hole are regulated in advance, or even the freezing and freezing cycles are stopped, which can effectively control the temperature of the shaft sidewall and the amount of frozen soil expanding into the excavation section, and create good conditions for the excavation. Through the practice and application of the outer ring as the main freezing hole in the West Ventilating Shaft of Zhaogu No.2 Coal Mine, which passes through one of the deepest alluvium thickness, the total number of freezing holes, the work amount of drilling holes and the cooling capacity required are decreased by 10.7%, 12.1% and 9.7% respectively, and the uniformity of temperature and strength inside the freezing wall is better. Combined with the observation of the stability of the shaft sidewall in the cohesive soil layer, through active control, the temperature of the shaft sidewall below 400 m can be slightly higher than the designed control target. The temperature of the shaft sidewall below 635 m is close to the designed control target. The thickness and average temperature of the freezing wall always meet the design requirements. The temperature of the shaft sidewall in the deep cohesive soil layer in the alluvium is controlled above $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the temperature of the shaft sidewall in the sandy soil layer is above $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$. The stability of the freezing wall of the alluvium is good, and the cooperation between freezing and excavation is good. The excavation speed of the deep outer wall of the alluvium is basically maintained at 75~80 m per month, the average excavation speed of the outer wall of the alluvium section is 87.1m per month, and the average excavation speed of the outer wall of the freezing section is 82.1 m per month.

Key words: deep and thick alluvium; arrangement of freezing holes; main freezing hole; auxiliary freezing hole; spalling-prevention freezing hole; freezing control

0 引 言

冻结法是立井穿过深厚冲积层主要凿井方法,随着冲积层厚度增大冻结壁设计厚度的不断增大^[1-3],为了达到设计的冻结壁厚度和平均温度,需要科学合理地布置冻结孔。冻结孔布置方式不仅决定了能否按期形成设计所需的冻结壁有效厚度和冻结壁有效平均温度,还会直接影响冻结凿井的速度、安全、施工成本^[2,4]。不科学合理的布置方式甚至会成为冻结法凿井的安全隐患。为此冻结孔布置方式及其冻结壁形成特性一直是冻结法凿井理论和技术的研究热点和难点,焦华喆等^[5]利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟某立井冻结过程中冻结壁温度场的变化,探讨了最外圈为主冻结孔对辅助冻结孔冻结壁发展的影响;杜猛等^[6]用 ANSYS 软件数值模拟冻结壁温度场分布情况,得出杨村煤矿副井井

帮温度合理取值;王衍森等^[7]介绍了用 ANSYS 软件数值模拟某井考虑冻结孔实际偏斜情况下的冻结壁温度场分析方法;荣传新等^[8]介绍了丁集矿主、副、风井冻结采用三圈孔冻结实施情况;陆军浩等^[9]通过顾北风井三圈孔冻结壁温度场模型试验研究,提出冻结孔开孔间距与交圈时间、内圈管径与井帮温度、外圈管与冻结壁有效厚度等的关系;宋常军^[10]研究了三圈管冻结壁温度场模拟试验与数值模拟一致性关系;盛天宝等^[11]开展了赵固二矿主、副、风井冻结壁温度场实测研究,分析了多圈孔冻结实施效果;魏国强等^[12]针对赵固一矿副井工程实践,提出外圈孔为主冻结孔的一般特点;李功洲等^[13]提出深厚冲积层冻结孔不同布置方式的一般性特征。这些研究为深厚冲积层冻结壁温度场理论与技术提供了有益的成果。

多圈孔冻结是形成深厚冲积层冻结法凿井所需

高强度冻结壁的重要手段。随着立井井筒穿过的冲积层厚度增加,我国冻结法凿井的冻结孔布置由单圈孔逐渐向主孔圈+防片孔圈、主孔圈+辅助孔圈或双圈孔、多圈孔演变^[14]。2003 年以来,厚 400 m 以上冲积层井筒基本上采用了多圈孔冻结,冻结壁内侧冻土扩至井帮的时间和井筒正式开挖时间大幅缩短,冻结壁稳定性显著提高,冻结法凿井的安全性、可靠性明显提高。不同的多圈冻结孔布置方式,导致同一个井筒的冻结孔数、钻孔工程量、冻结需冷量和冻掘配合难度等均产生较大差异,直接影响到冻结和掘砌的工程成本和建井速度。因此,研究科学合理的布孔方式,发挥不同类别孔圈的功能和作用具有理论和现实意义。笔者结合赵固二矿西风井深井冻结孔布置方式,分析主冻结孔不同位置的冻结壁界面及外侧土层温度与环向应力与 Mises 等效应力变化特征,对比冻结孔数量及钻孔工程量、冻结需冷量数值,开展冻结调控等问题讨论,并结合赵固二矿西风井冻结与掘砌相互配合所取得的成功经验,阐述多圈冻结孔分类布置方法及冻结调控技术对深厚冲积层冻结法凿井的影响。

1 冻结孔分类及其作用

以往多圈冻结孔布置主要根据冲积层厚度及冻结壁设计厚度按 2 圈、3 圈(内、中、外圈)、4 圈(防片、内、中、外圈)考虑,有时某圈冻结孔会插花布置成 2 圈。随着冲积层厚度的增加,笔者认为按圈数考虑布孔方式还是有些固化,未能充分体现和发挥各圈冻结孔的功能及效果,应考虑按冻结孔在形成整体冻结壁承载地压和封水贡献角度,按功能分类布置,并发挥各冻结孔圈相互协作的优势。

冻结孔按功能分类,可分为主冻结孔、辅助冻结孔、防片冻结孔 3 类,不必限制其圈数,有利于冻结孔间冷量协调供给,提高制冷效率。3 类孔定义分别为:主冻结孔是指形成和强化冻结壁主体结构的冻结孔;辅助冻结孔是指用于协助主冻结孔扩展(增加)冻结壁有效厚度、增强冻结壁强度和稳定性的冻结孔,简称辅助孔;防片冻结孔是指提高冻结壁内侧稳定性,防止冻结壁片帮的冻结孔,简称防片孔。3 类孔形成的孔圈定义分别为:主冻结孔圈是指沿井筒周围布置主冻结孔的冻结孔圈,也称主孔圈;辅助冻结孔圈是指沿井筒周围布置辅助冻结孔的冻结孔圈,也称辅助孔圈;防片孔圈是指沿井筒周围布置防片冻结孔的冻结孔圈,也称防片孔圈。

这 3 类冻结孔在冻结法凿井中发挥各自作用,主冻结孔形成冻结壁承载地压的主体结构并发挥隔

水功能,辅助孔、防片孔按需求均衡布置和供应冷量,辅助孔扩展冻结壁厚度并提高冻结壁内侧强度及稳定性,防片孔结合井壁变径和掘砌施工进度情况采取不同深度、多圈径、异管径等方式布置,提高井帮的稳定性。

冻结孔按功能分类布置,设计者可将主冻结孔作为解决冻结壁交圈隔水和主结构安全稳定问题来重点考虑,尽可能将主冻结孔布置在低应力和低变形的稳定区域,以确保冻结壁主体结构的安全;辅助冻结孔扩展冻结壁的厚度,确保冻结壁内外成为相对均匀的整体结构,以均匀布置为宜,数量要根据掘砌施工进度计划,满足冲积层深部对冻结壁厚度和强度的要求即可,深厚冲积层冻结和掘砌时间均较长,辅助孔布置一般较为稀疏;防片孔部位并非冻结壁的主体结构,对提高冻结壁承载没有实质需要和帮助,为配合掘砌和提高井帮稳定性,可适当增加孔数和圈数,以便在井筒掘砌过程中调整盐水温度和流量,以及采取间歇式循环、提前停冻、停冻循环等多种措施加强冻结调控力度。

例如,赵固二矿西风井冲积层厚度 704.6 m,设计优化后冻结深度 783 m,布置 1 圈主冻结孔(外圈,52 个)、2 圈辅助孔(32 个)、3 圈防片孔(25 个)^[15]。主冻结孔确保了冻结壁尽早交圈,冻结壁主体结构整体安全稳定;辅助孔稀疏布置,扩展冻结壁内侧厚度,满足了冲积层深部冻结壁厚度和强度设计要求;防片孔配合挖掘荒径变化,提高了井帮稳定性和冻结可调性,实现了冻结设计的井帮温度调控目标。

2 主冻结孔位置对多圈孔冻结的影响

2.1 赵固二矿西风井 2 种多圈孔设计方案

多圈孔冻结工艺是我国工程技术和科研人员对冻结法凿井技术的创新和贡献,目前已应用多圈孔冻结工艺建成穿过冲积层厚度 500、600、700 m 的冻结井筒分别有 28、4、4 个,穿过冲积层厚度最大达 753.95 m。根据我国多圈孔冻结工程资料分析,多圈孔布置主要分为以中内圈为主冻结孔圈或以外圈为主冻结孔圈 2 大类方式。赵固二矿西风井冻结方案设计过程中,也曾开展以中内圈为主冻结孔圈方案和以外圈为主冻结孔圈方案(井筒净直径 6.0 m,冲积层厚度 704.64 m)的探讨,以下讨论不同的方案对多圈孔冻结的影响,见表 1。

2.2 冻结壁受力对比分析

实际冻结温度场纵向热量传导远大于冻结管轴向的热量传导,温度场分析模型可以简化为平面温

度场模型。应力场分析中,冻结壁受力状况也可简化为平面应变问题。在 ANSYS 有限元分析软件中,

表 1 按中内圈、外圈为主冻结孔圈布孔方式的冻结设计参数

Table 1 Freezing design parameters of holes arrangement of central inner ring and outer ring as main freezing hole		
主冻结孔布孔方式	中内圈为主冻结孔圈	外圈为主冻结孔圈(实施方案)
冻结深度/m	820	783
冻结盐水温度/℃	-33~-28	-34
控制层位冻结壁平均温度/℃	-23	-21.5~-18.0(砂性土层);-19~-16(黏性土层)
冻结壁厚度/m	11.2	10.3(砂性土层);9.9(黏性土层)
外圈孔参数	圈径 28.2 m、深度 715 m、孔数量 48 个、开孔间距 1.846 m;冻结管规格:深度≤300 m 为 φ159 mm,>300 m 为 φ127 mm	圈径 24.8 m、深度(767/783)m、孔数(26/26)个、开孔间距 1.498 m;冻结管规格:φ159 mm
中圈孔(或辅助孔)参数	圈径 22.1/21.1 m、深度 820 m、孔数量(13/13)个、开孔间距 5.786/5.524 m;冻结管规格:φ127 mm	圈径(16.7/19.7)m、深度 736 m、孔数量(16/16)个、开孔间距(3.279/3.868)m;冻结管规格:小圈深度 0~600 m 为 φ159 mm×7,>600 m 为 φ140 mm;大圈为 φ159 mm
内圈孔参数	圈径 15.1 m、深度 720 m、孔数量 34 个、开孔间距 1.395 m;冻结管规格:φ159 mm	—
防片孔参数	圈径 12 m、深度 300 m、孔数量 14 个、开孔间距 2.693 m;冻结管规格:φ127 mm	圈径(11/12.5/14.5)m、深度(193/423/535)m、孔数(5/10/10)个、开孔间距(6.912/3.927/4.555)m;冻结管规格:小圈为 φ133 mm/中圈深度 0~298 m 为 φ159 mm,>298 m 为 φ133 mm/大圈为 φ159 mm
冻结孔总工程量/m	84 320	74 096
冻结需冷量/(10 ⁷ kJ·h ⁻¹)	4.523 5	4.084 8
冻结标准需冷量/(10 ⁸ kJ·h ⁻¹)	1.292 41	1.237 85

可利用间接耦合的方法研究不同冻结孔布置对冻结壁受力的影响。首先,为避免在冻结壁应力场计算中出现数值畸变,将按设计孔位计算的温度场沿径向进行温度条带化,然后,建立线弹性力学参数与土体温度之间的关联进行应力场计算,据此分析线弹性模型中冻结壁的受力问题。以赵固二矿西风井深 545 m 附近黏土层不同主冻结孔布孔方式为例,分析比较冻结壁径向温度及工作面挖掘后受力特点如下。

1)中内圈为主冻结孔圈的冻结壁(冻结时间 265 d,有效厚度 10.85 m,平均温度-21.87 ℃)内缘附近及内侧出现温度低值,界面温度最低值为-27.5 ℃,环向应力峰值和 Mises 等效应力峰值均出现在冻结壁内缘附近(图 1),分别为 17.3 MPa 和 14.9 MPa。冻结壁内侧和中内圈主冻结孔均处在高应力区,冻结壁内缘及内侧易产生塑性区,并向冻结壁内部扩展,影响中内圈主冻结孔安全。

主冻结孔区域应力较大,而外侧冻结壁发挥承载能力弱,冻结壁整体承载能力没有得到充分利用。

2)以外圈为主冻结孔圈的冻结壁(冻结时间

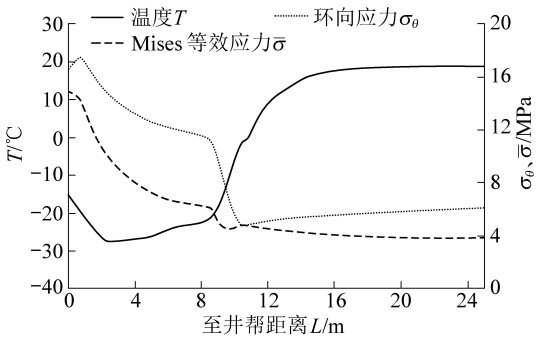


图 1 以中内圈为主冻结孔的冻结壁界面及外侧土层温度与环向应力与 Mises 等效应力变化

Fig.1 Temperature, circumferential stress and Mises equivalent stress of interface and outside of freezing wall with central inner ring as main freezing hole in cohesive soil

265 d,有效厚度 11 m,平均温度-18.06 ℃)中外侧出现温度低值,界面温度最低值-26.6 ℃。

冻结壁内缘附近环向应力和 Mises 等效应力均明显降低(图 2),其值分别为 9.9、9.8 MPa,较中内圈为主冻结壁的应力分别降低了 7.4、5.1 MPa。

冻结壁承载环外移,以外圈为主冻结孔圈冻结壁环向应力和 Mises 等效应力峰值分别为 14.4 MPa

和 10.7 MPa,冻结壁环向应力峰值下降2.9 MPa,约 16.6%,冻结壁 Mises 等效应力峰值下降4.2 MPa,约 28.3%。

以外圈为主冻结孔圈的应力峰值区向冻结壁中外侧移动,逐步进入低温高强度区,降低了冻结壁内侧进入塑性区的概率,同时主冻结孔圈应力带更趋于三向受压状态和低应力区,降低了主冻结管断裂风险,提高了冻结壁整体的承载能力、稳定性和安全性。

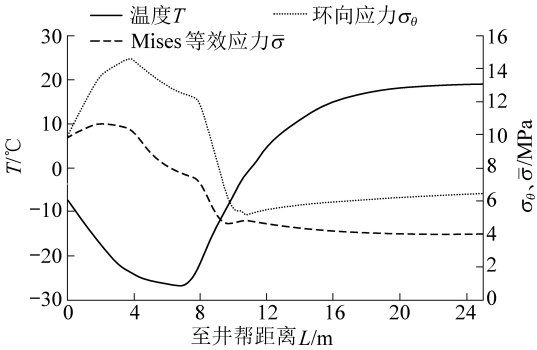


图 2 以外圈为主冻结孔的冻结壁界面及外侧土层温度与环向应力与 Mises 等效应力变化曲线
Fig.2 Curves of temperature, circumferential stress and Mises equivalent stress of interface and outside of freezing wall with outer ring as main freezing hole in cohesive soil

2.3 冻结孔数量及钻孔工程量、冻结需冷量对比

以中内圈为主孔圈布置方式,主冻结孔数量比以外圈为主冻结孔时少,为确保冻结壁按时交圈和冻结壁主体结构的安全稳定,中圈或内圈冻结孔数量和深度也不能稀少和过浅,而为确保冻结壁厚度和整体性,外圈冻结孔也不能少;因此,以中内圈为主孔圈布置的均较高,表 1 以中内圈为主孔圈的方案冻结孔数量、冻结钻孔工程量、冻结需冷量分别为 122 个、84 320 m、4.523 5×10⁷ kJ/h。

以外圈为主孔圈布置方式,外孔圈径可以相应减小,外圈冻结孔相对密集,孔数增加并不多,但在主圈孔的包围下,辅助孔、防片孔布置相对稀疏、均匀,防片孔布置更为灵活,总的冻结孔数、冻结钻孔工程量、冻结需冷量都相对减少,表 1 以外圈为主孔圈的方案冻结孔数、冻结钻孔工程量、冻结需冷量分别为 109 个、74 096 m、4.084 8×10⁷ kJ/h,相比之下分别下降 10.7%、12.1%、9.7%,且冻结壁内部的温度和强度的均匀性更好。

2.4 对冻结和掘砌工程的影响

2.4.1 冻结调控效果对比

内孔圈为主冻结孔布置时,主冻结孔圈内侧的冻结孔数量少,井帮温度受内圈主冻结孔影响较大,而主冻结孔要兼顾冻结壁主体结构和深部的冻结强

度,自身的可调范围受到限制,同时主孔圈深部距井帮相对较近,其有限的调整对冲积层中深部所能发挥的作用极小,冻结壁内侧可调控的冻结孔数量又少,因此冻结调控效果很差。

中孔圈为主冻结孔布置时,若防片孔和内圈孔数量少,浅部井帮温度不易降低,防片孔结束后井帮温度回升幅度较大,中浅部基本无法调控;若防片孔和内圈孔数量多,井帮见冻土浅,见冻土前不宜调控,井帮见冻土后温度快速下降,易出现调控滞后,随后的井帮温度受中圈主冻结孔影响显著,冲积层深部冻结调控效果较差。

以外圈为主冻结孔布置的冻结壁内侧温度场,中浅部主要受防片孔控制,冲积层深部主要受辅助孔数量及供冷时间控制;防片孔部位并不是冻结壁的主结构,从冻结壁主体结构稳定性分析,也可以称防片孔处的冻结壁为“多余部分”,允许大幅度调控防片孔的盐水流量和温度,而防片孔数量相对增多,并与荒径变化相匹配,冻结调控便利,调控井帮温度及冻土扩入荒径量的效果显著;辅助孔稀疏布置,距荒径略远,辅助孔调控主要针对冲积层深部和基岩段,盐水流量和温度可以提前调控,可调控时间周期长,因此冲积层深部和基岩段的井帮温度调控效果较为明显。

2.4.2 掘砌工作面井帮温度变化对比

中内圈为主冻结孔布置时,防片孔数量相对减少(14 个),至井帮距离随荒径变大而变小,井帮温度受中内圈孔影响较大,井帮见冻土后,井帮温度基本一直较快下降;防片孔结束后,虽然井帮温度有明显回升,但快速下降的总趋势未能改变,特别是以内圈为主冻结孔布置严重影响冻结调控效果,冲积层中深部井帮温度降得很低,中部井筒趋于冻实,深部井筒基本冻实,深部井帮温度一般都低于-20℃,如图 3 所示。

以外圈为主冻结孔布置的防片孔数量多(25 个),按掘进荒径变化分圈布置,井帮温度会出现几次回升的波动,由于防片孔的盐水温度和流量便于大幅度调控,可以抑制各圈防片孔深部的井帮温度下降,减小各圈防片孔井帮温度的回升幅度,使井帮降温整体可控、趋缓,冲积层中深部井帮温度可控制在适当范围内(700 m 以上冲积层黏性土层-12℃以上),如图 3 所示。

2.4.3 冻结与掘砌配合对比

以外圈为主冻结孔的冻结壁主体结构处于低应力和低变形的安全区域,为掘砌施工安全和冻掘配合奠定了基础,可以通过冻结壁形成特性实测、工程

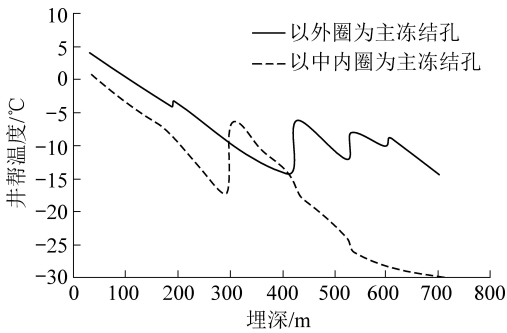


图3 赵固二矿西风井未经调控的黏性土层不同深度井帮温度预测分析

Fig.3 Temperature prediction on different depths shaft sidewall in unregulated cohesive soil layers of West Ventilating Shaft of Zhaoqu No.2 Coal Mine

预报和冻结调控机制的合理应用,结合掘砌施工速度的变化,分析和预测冻结壁有效厚度、平均温度和井帮温度发展趋势,根据需要提前对防片孔和辅助孔进行温度、流量控制,从而实现冻结设计的井帮温度调控目标或冻掘配合的调整目标,为掘砌施工创造良好条件;冻结调控同样可为深厚或超深厚冲积层深部爆破掘进提供良好的炸药起爆温度及钻孔、筑壁施工条件,提高爆破掘进效率^[16-17]。

由于以中内圈为主冻结孔的布置方式存在冻结调控局限性,冲积层中深部井帮温度控制较为困难,井帮温度下降较快,冻土扩入井帮较多,影响掘砌速度,陷入挖得越慢井帮温度越低、井帮温度越低越难挖的不良循环之中,即使采用爆破掘进也会因荒径内冻土温度过低,影响炸药的起爆率及爆破效果。

2.5 冻结孔布置及冻结工艺对冻胀力的影响

以中内圈为主冻结孔的布置方式增加了冻结壁内侧及内缘附近的冻结管数量,有的冻结设计者要求采用异步冻结工艺,即内圈和防片冻结孔早于其他孔圈2~3个月冻结,旨在强化冻结壁内缘冻结和挤走冻结孔圈之间的夹层水。问题是中粗砂快速冻结时,才能出现冻结面排水现象,挤走冻结孔圈之间的夹层水,减小冻胀力,而中粗砂冻结壁的冻胀和稳定性问题原本不突出;多数黏土层出现原位冻结和体积膨胀,且未冻区域水分被抽吸、集聚至冻结锋面,当未冻结区域补给水分充分时,更易出现严重的水分迁移和冻胀现象^[18-20];强化冻结壁内缘冻结和上述异步冻结工艺不仅未能解决黏性土层的冻胀问题,甚至有加重冻胀的作用,增大冻土挖掘后冻结壁径向位移及冻结壁内侧冻结管的剪切受力,而井筒挖掘后未充分释放的冻胀力,又继续作用在新浇筑的外层井壁上,易影响外层井壁早期强度的增长。

以外圈为主冻结孔的布置方式一方面考虑了改

善冻结壁受力状态,发挥冻结壁整体承载能力;另一方面提高了冻结壁内侧的冻结调控能力及效果,为掘砌施工创造良好条件;再则将主冻结孔布置在低应力区,控制井帮附近温度,可减小冻结壁内缘附近的冻胀力,降低冻胀力释放过程对冻结壁内侧冻结孔造成的剪切破坏和外层井壁早期强度增长的影响。

我国厚500 m以上冲积层的冻结井筒中,有7个井筒发生了5根以上冻结管断裂现象^[4],共计断管122根,井均断管17.43根,均发生在以中内圈为主冻结孔圈的冻结井筒中,其中以内圈为主冻结孔圈的井筒断管问题最为严重,主冻结孔圈布置在高应力区和高冻胀区是造成冻结管断裂及冻结壁失稳的主要原因之一。

3 以外圈为主冻结孔的冻结调控方法及其应用

如前文所述,以中圈为主冻结孔布置方式的冻结调控力度和效果受到很大限制,以内圈为主冻结孔的布置方式冻结调控效果更差,因此,笔者较为坚持深厚冲积层以外圈为主冻结孔的布置方式,主冻结孔内侧增设辅助孔和防片孔。

以外圈为主冻结孔的布置方式为实际冻结工程的调控打下了良好基础,冻结工程引入冻结壁形成特性实测分析、工程预报与冻结调控的机制也非常重要,应用成熟的冻结壁形成特性分析的作图法、有限元数据模拟法、综合分析法,结合冻结壁温度场实测数据和掘砌施工速度的变化,每半个月至1个月分析和预测冻结壁有效厚度、平均温度和井帮温度发展趋势^[21]。例如,赵固二矿西风井冲积层段施工过程中冻结工程预报及调控建议的报告多达10余份,在掘至井帮见冻土、挖掘荒径变化、各圈防片孔中深部和厚砂性土层之前,提前对防片孔和辅助孔进行温度和流量控制,甚至采取提前停止防片孔制冷、实施不制冷循环及防片孔主干管散冷循环等措施,调控各圈防片孔和辅助孔的供冷量,在确保安全的基础上,抑制冷量向井帮的过度扩展,以实现井帮温度设计的调控目标或实际工程需要的调整目标,为掘砌施工创造良好条件^[22]。

赵固二矿西风井主冻结孔圈、辅助冻结孔圈与防片冻结孔圈采用3组去回路干管,分别于2018年3月5日、8日、11日开机运转,冻结66 d开始试挖,冻结81 d转为正式开挖;浅部冻土扩展慢,测温点及井帮温度降低较缓慢,掘砌至深180 m后井帮温度快速下降,防片孔开始进行减流量和间歇式循环

的调控;掘至深 250 m 后中圈防片孔采取了停冻及停冻间歇式循环的调控,抑制冷量向荒径内的扩展;鉴于黏性土层井帮稳定性较好,主动控制 400 m 以深井帮温度略高于设计调控目标,635 m 以深井帮温度接近设计调控目标。冻结壁厚度和平均温度始终满足设计要求,冲积层深部黏性土层井帮温度控制在 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,砂性土层井帮温度在 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,冲积层段实测井帮温度如图 4 所示;冲积层的冻结壁稳定性良好,冻掘配合非常好,冲积层深部外壁掘砌速度基本维持在 75~80 m/月,冲积层段外壁平均掘砌速度为 87.1 m/月,冻结段外壁平均掘砌速度为 82.1 m/月。

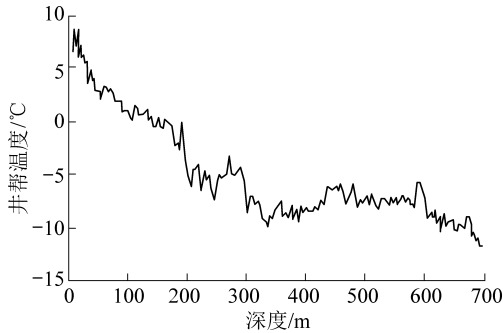


图 4 冲积层段不同深度的井帮温度实测值

Fig.4 Measured values of different depths shaft sidewall temperature of cohesive soil layers in alluvium section

4 结 论

1)深厚冲积层冻结孔按主冻结孔、辅助冻结孔、防片冻结孔 3 类功能和作用分类设计和布置,可较好地解决主冻结孔及冻结壁主体结构的安全和稳定,根据冻结壁厚度需要及冻结时间均匀布置辅助孔,可明显减少辅助孔数量,提高冻结壁的均匀性和稳定性,根据挖掘荒径变化布置多圈防片孔,可提高冻结调控的灵活性和效果。

2)以外圈为主冻结孔的布孔方法,有利于主冻结孔和整体冻结壁的安全稳定,可减少冻结孔数量、钻孔工程量、冻结需冷量,提高了冻结的可调性和调控效果。

3)合理的冻结孔布置可为冻结壁安全稳定及冻结调控打下良好的基础,施工过程中建立冻结壁形成特性实测分析、工程预报与冻结调控的机制,定期对冻结壁有效厚度、平均温度和井帮温度发展趋势进行分析和预测,提前对防片孔和辅助孔盐水流量、温度进行调控,甚至停冻、停冻循环,能有效控制井帮温度及冻土扩入荒径的量,为掘砌施工创造良好条件。

参考文献 (References):

- [1] 程 桦.深厚冲积层冻结法凿井理论与技术[M].北京:科学出版社,2016.
- [2] 李功洲,陈道翀,高 伟.厚 600 m 以上冲积层冻结壁厚度设计方法研究[J].煤炭科学技术,2020,48(1):150-156.
LI Gongzhou, CHEN Daochong, GAO Wei. Research on design method for thickness of freezing wall in thick alluvium over 600 m [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 150-156.
- [3] 李功洲.深厚冲积层冻结法凿井理论与技术[M].北京:科学出版社,2016.
- [4] 李功洲,陈章庆.深厚冲积层冻结壁设计计算体系研究与应用[J].煤炭工程,2015,47(1):1-4.
LI Gongzhou, CHEN Zhangqing. Research and application of calculation system for deep alluvium freezing wall design [J]. Coal Engineering, 2015, 47(1): 1-4.
- [5] 焦华喆,孙冠东,陈新明,等.深厚冲积层多圈孔冻结壁温度场发展研究[J].煤炭学报,2018,43(S2):443-449.
JIAO Huazhe, SUN Guandong, CHEN Xinming, et al. Development of temperature field of multi-circle freezing wall in deep alluvium [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 443-449.
- [6] 杜 猛,荣传新,郑腾龙.冻结管断管原因及冻结温度场数值计算分析[J].安徽建筑工业学院学报,2014,22(1):5-9,25.
DU Meng, RONG Chuanxin, ZHENG Tenglong. The numerical simulation of freezing temperature field and the reasons of freezing pipes broken [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture and Industry, 2014, 22(1): 5-9, 25.
- [7] 王衍森,杨维好,任彦龙.冻结法凿井冻结温度场的数值反演与模拟[J].中国矿业大学学报,2005,34(5):626-629.
WANG Yansen, YANG Weihao, REN Yanlong. Numerical back analysis and simulation of temperature field for shaft sinking with artificial ground freezing method [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, 34(5): 626-629.
- [8] 荣传新,盛卫国.深厚冲积层冻结法凿井工程设计及其应用.煤炭科学技术,2007,35(11):25-28.
RONG Chuanxin, SHENG Weiguo. Design and application of mine shaft sinking with ground freezing in deep and thick alluvium [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(11): 25-28.
- [9] 陈军浩,刘桐宇,李栋伟.人工三圈管冻结模型试验及冻结方案研究[J].煤炭科学技术,2017,45(12):94-100.
CHEN Junhao, LIU Tongyu, LI Dongwei. Study on Artificial three-tube freezing model test and freeze program comparison [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 94-100.
- [10] 宋长军.厚表土立井冻结工程热-力耦合效应模型试验及数值分析[D].北京:中国矿业大学(北京),2012.
- [11] 盛天宝,魏世义.特厚黏土层多圈孔冻结壁温度场实测研究与工程应用[J].岩土工程学报,2012,34(8):1516-1521.
SHENG Tianbao, WEI Shiyi. Measurement and engineering application of temperature field multiple-ring hole frozen wall in extra-thick clay strata [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1516-1521.
- [12] 魏国强,李功洲,陈道翀.深厚冲积层冻结孔布置及井帮温度设计探讨[J].煤炭工程,2015,47(12):18-21.

- WEI Guoqiang, LI Gongzhou, CHEN Daochong. Discussion on freezing holes arrangement and shaft wall temperature design in deep alluvium freezing sinking[J]. Coal Engineering, 2015, 47(12): 18-21.
- [13] 李功洲, 陈道翀. 深厚冲积层冻结孔布置方式的探讨[J]. 煤炭工程, 2015, 47(2): 5-7.
- LI Gongzhou, CHEN Daochong. Discussion on freezing hole arrangement mode of deep alluvium[J]. Coal Engineering, 2015, 47(2): 5-7.
- [14] 陈文豹, 等. 冻结法凿井施工手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [15] 陈道翀, 李功洲, 曾凡伟. 赵固二矿西风井深厚冲积层冻结方案设计研究与应用[J]. 煤炭工程, 2019, 51(12): 13-18.
- CHEN Daochong, LI Gongzhou, ZENG Fanwei. Research and application on freezing schematic design of deep alluvium in west ventilating shaft of Zhaogu No. 2 Coal Mine [J]. Coal Engineering, 2019, 51(12): 13-18.
- [16] 于建新, 郭敏, 张英才, 等. 超深厚冲积层立井冻结爆破快速掘砌施工技术[J]. 煤炭工程, 2019, 51(11): 33-37.
- YU Jianxin, GUO Min, ZHANG Yingcai, *et al.* Construction technology of rapid excavation and laying by freezing blasting an vertical shaft with ultra-deep alluvium[J]. Coal Engineering, 2019, 51(11): 33-37.
- [17] 曾凡伟, 郭敏, 于建新, 等. 深厚冲积层大直径千米立井冻土掘进爆破参数优化[J]. 爆破, 2019, 36(4): 119-125.
- ZENG Fanwei, GUO Min, YU Jianxin, *et al.* Optimization of blasting parameters for frozen soil excavation in large-diameter vertical shaft with deep alluvium[J]. Blasting, 2019, 36(4): 119-125.
- [18] 周扬. 冻土冻胀理论模型及冻胀控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- [19] 刘波, 李岩, 戴华东, 等. 竖向直排人工冻结施工土体温度及冻胀力. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 70-75.
- LIU Bo, LI Yan, DAI Huadong, *et al.* Soil temperature and frost heaving force in artificial vertical straight multirow freezing construction[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 70-75.
- [20] 赵建军, 董金梅, 王沛, 等. 正冻土的水热耦合模型. 天津城市建设学院学报, 2001, 7(1): 47-52.
- ZHAO Jianjun, DONG Jinmei, WANG Pei, *et al.* A model of coupled heat-fluid transport in freezing soil[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2001, 7(1): 47-52.
- [21] 李功洲, 陈道翀. 冻结壁形成特性综合分析方法[J]. 煤炭工程, 2014, 46(S2): 1-5.
- LI Gongzhou, CHEN Daochong. Comprehensive analysis method of freezing wall formation features[J]. Coal Engineering, 2014, 46(S2): 1-5.
- [22] 曾凡伟, 陈道翀, 曾凡毅, 等. 冻结壁形成特性预报与冻结调控机制在赵固二矿西风井中的应用[J]. 煤炭工程, 2019, 51(11): 28-32.
- ZENG Fanwei, CHEN Daochong, ZENG Fanyi, *et al.* Application of frozen wall formation characteristics forecasting and freezing control mechanism in west ventilating shaft of Zhaogu No.2 Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2019, 51(11): 28-32.