



移动扫码阅读

王 鹏,林 斌,侯海杰,等.冻结管布置形式对冻结壁温度场发展规律影响研究[J].煤炭科学技术,2019,47(12):38-44. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.006

WANG Peng, LIN Bin, HOU Haijie, et al. Study on influence of freezing tubes layout on development law of temperature field of freezing wall [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47 (12): 38 - 44. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.12.006

冻结管布置形式对冻结壁温度场发展规律影响研究

王 鹏,林 斌,侯海杰,龙 依

(安徽理工大学 土木建筑学院,安徽 淮南 232001)

摘 要:淮南矿区煤矿立井凿井工程一般采用人工冻结法施工,根据对许多煤矿立井冻结设计方案分析,人工冻结法施工冻结管圈数越少圈径越小,冻结锋面半径和冻结壁有效厚度也越小,对于井筒净直径较小的风井,单圈管冻结设计方案即可满足设计要求,对于地质条件较为复杂,井筒净直径较大、深度较深的主井和副井,单圈管设计方案已不能满足设计要求,必须采用两圈管甚至三圈管冻结设计方案,而冻结设计方案中冻结管的布置位置又是关系工程成本和成败的因素之一。为了研究深厚黏土层冻结管不同布置形式对冻结壁温度场发展规律的影响,采用了FLAC^{3D}软件数值模拟两圈冻结管和三圈冻结管对冻结壁温度场发展规律的影响,并将三圈管冻结壁数值模拟结果与现场实测数据对比验证。结果表明:与两圈管冻结壁相比,三圈管冻结壁冷量叠加效果更好,交圈时间更早,内圈管交圈时间提前14~21 d,冻结锋面扩展速度较快,缩短了冻结时间,形成了更厚的冻结壁和更低的冻结壁平均温度,冻结壁平均温度随冻结时间的延长近似呈对数关系降低,冻结壁有效厚度随冻结时间的延长近似呈对数关系增长,主界面温度场曲线在冻结管处近似呈V形发展,逐渐由马鞍形转变为梯形分布,主界面温度随冻结时间的延长逐渐降低,三圈管数值模拟值与实测值基本一致,对比分析验证了数值模拟的可行性。

关键词:冻结法凿井;冻结管;冻结壁温度场;两圈管;三圈管

中图分类号:TD262

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)12-0038-07

Study on influence of freezing tubes layout on development law of temperature field of freezing wall

WANG Peng, LIN Bin, HOU Haijie, LONG Yi

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The coal mine vertical shaft sinking project in Huainan mining area is generally constructed by artificial freezing method. According to the analysis of many mine shaft freezing design schemes, the fewer number of frozen piping rings in the artificial freezing method, the smaller circle diameter, the smaller radius of the frozen front surface. For vertical wells such as wind shafts with a small net diameter of the wellbore, single-tube freezing design can meet design requirements. For the main and auxiliary wells with complex geological conditions and large net diameter and deep depth, single-tube design can no longer meet design requirements, the design scheme of the two-ring tube or even the three-ring tube must be used. The layout position of the freezing tube in the freezing design scheme is one of the factors related to the engineering cost and success or failure. In order to study the influence of different layouts of deep clay layer on the development of freezing wall temperature field, FLAC^{3D} software was used to numerically simulate the influence of two-ring freezing tube and three-ring freezing tube on the development law of freezing wall temperature field, and simulation results of the three-loop tubes are compared with measured data. The research results show that compared with the frozen wall of two-ring tubes, the cooling effect of the frozen wall of the three-ring tube is better, the time of the circle is earlier, and the time of inner tube is 14~21 days earlier. The expansion speed of the frozen front is faster and shorter, the larger freezing wall thickness and lower freezing wall average temperature are formed. The average temperature of the frozen wall decreases approximately logarithmically with the extension of the freezing time. The effective thick-

收稿日期:2019-06-18;责任编辑:朱恩光

基金项目:高校博士点专项基金资助项目(200803610004)

作者简介:王 鹏(1990—),男,安徽亳州人,硕士研究生。E-mail:992917071@qq.com

ness of the frozen wall is approximately logarithmic with the extension of the freezing time. As the relationship grows, the temperature field curve of the main interface develops in a V-shape in the freezing tube and gradually changes from saddle shape to trapezoidal distribution. The main interface temperature drops gradually with the extension of freezing time, the numerical simulation values of the three-ring tubes are in agreement with the measured values, the feasibility of numerical simulation is verified by comparative analysis.

Key words: freezing well drilling; frozen tube; frozen wall temperature field; two-ring tubes; three-ring tubes

0 引 言

随着煤炭开采量的持续增加,我国浅层煤炭资源逐渐枯竭,深部开采势在必行,许多新建的矿井基本都穿过了深厚表土层(丁集矿表土层厚 530 m,板集矿表土层厚 580 m)。深厚表土层一般含水量大、地压大、强度低,普通的凿井方法容易产生涌水等问题,而冻结法封水效果可靠,人工冻结法已是有效穿越深厚表土层或软岩层的特殊凿井方法被广泛应用于矿井建设中^[1-3]。该工法实质上是采用人工制冷临时改变土层性质以加固土层,保证施工顺利进行,冻结法必将应用于更深的凿井工程^[4-6]。在冻结法凿井施工中,注意黏土层中的温度场变化趋势,对于优化冻结方案具有重要意义^[7]。单排管冻结方案无论从冻结时间还是冻结壁强度、温度场等方面都不适应工程要求,必须采用双排管乃至多排管冻结方案,双排管或多排管冻结下冻结壁温度场不仅受同圈相邻冻结管的影响,也受邻排冻结管的影响,使冻结壁温度场的计算十分复杂^[8]。冻土强度直接影响冻土工程的稳定性^[9],对于超过厚度 400 m 的表土层,冻结壁强度设计缺乏理论指导,大多通过现场实测进行研究,冻结设计方案多采用多圈管布置形式。多圈管冻结条件下形成的冻结壁是温度场、水分场、应力场共同作用的结果,力学性质极其复杂,在冻结过程中温度场随时间和空间变化,是一个不稳定温度场^[10-11]。冻结壁温度场的形成有助于确定冻结时间、冻结壁平均温度和有效厚度、整体强度等,热失衡严重时会导致土壤冻结,此时土壤会释放大量的相变潜热,温度因素的影响贯穿整个冻结法凿井过程中,因此对冻结壁温度场的研究十分必要^[12-13]。笔者以 FLAC^{3D} 软件数值模拟研究两圈管和三圈管对冻结壁温度场发展规律的影响,对比分析冻结管 2 种布置方案的差别,并将三圈管模拟结果与现场实测结果对比分析验证数值模拟的可行性。

1 冻结壁温度场现场监测

1.1 工程概况

淮南某矿是淮南潘谢新区新建的大型矿井井田

处于淮河冲击平原,地形平坦,设计生产能力 4.0 Mt/a。井筒直径 8.4 m,表土层厚度 463 m,冻结深度 500 m,井筒全深 705.9 m。根据井检孔报告得知穿越地层主要是砂层和黏土层,在累深 373.35 ~ 418.55 m 见 45.2 m 深厚黏土层,冻结温度为 -1 ℃。

1.2 冻结方案和测温孔布置

冻结法施工采用三圈管冻结方案,布置内圈管、中圈管、外圈管 3 圈冻结管,距井筒中心距离 R 分别为 8.0、10.7、13.8 m,内圈管内侧布置一圈防片帮孔。在距井筒中心距离 12.5、9.4、6.3 m 分别设置 C_3 、 C_4 、 C_5 测温孔,测温孔直径为 159 mm,竖向垂直穿越表土层,深度为 465 m,三圈管平面布置如图 1 所示。

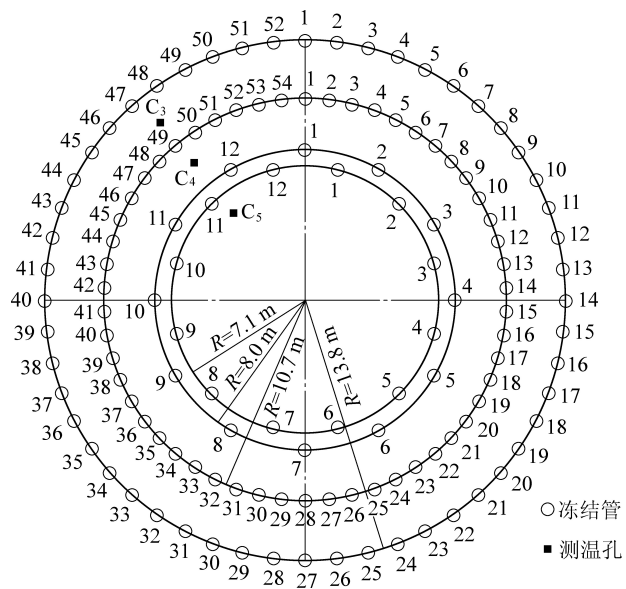


图 1 三圈管平面布置

Fig.1 Plane layout of three-loop tubes

2 冻结壁温度场数值模拟

2.1 数值模型建立

FLAC^{3D} 软件是率先将连续体快速拉格朗日分析法应用于岩土工程问题上,在解决相关问题上具有许多优越性,已成为技术人员理想的三维数值模拟工具^[14-15]。

由于地层埋深较深,建立模型时按平面问题考虑温度场。将盐水温度作为节点荷载考虑,即温度载荷直接施加在相对应的节点上^[16]。由于外边界温度受外圈管影响很小,且向外侧位移较小,在井筒

开挖后冻结壁向井筒中心发生位移,因而固定约束模型外边界,并在模型外边界设置为绝热条件。数值模型共划分 249 600 个网格单元,262 101 个节点,数值模型直径 32.4 m,地层初始温度设定为 20 ℃。模拟冻结时间 240 d,冻结时间采用 solve age 命令给定具体值改变步数^[17]。

2.2 冻结管布置及土体热物理力学参数

数值模拟两圈管平面布置如图 2 所示,数值模拟冻结设计技术参数见表 1。

通过对采集到的土体样本,在土工实验室和冻土研究所分批次试验,获得了土体的物理力学参数。利用 QTM-PD2 型导热系数仪,测得了土体的导热系数。利用成分分析法,计算出土体的比热容,设备采用高温炉 DR2-12 型。土体的物理力学及比热容、导热参数见表 2。根据进回路盐水温度确定冻结管外壁的温度情况,见表 3。

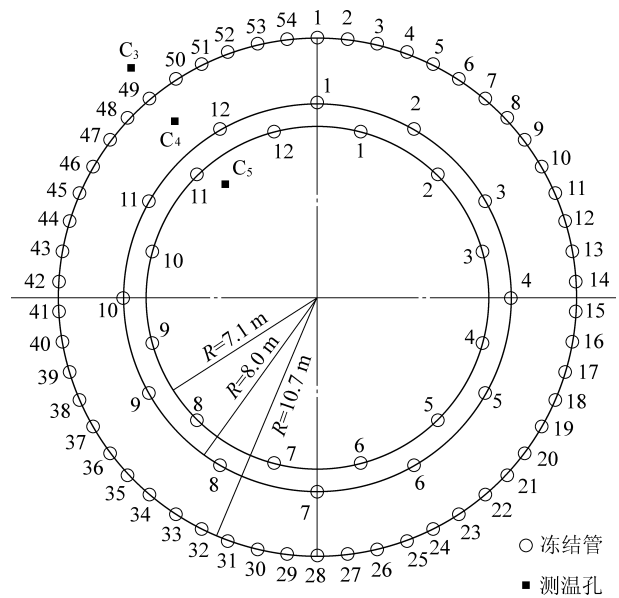


图 2 两圈管平面布置

Fig.2 Plane layout of two-loop tubes

表 1 冻结设计技术参数

Table 1 Freeze design technical parameters

项目	圈径/m				孔数/个				开孔间距/m			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
两圈管	16	21.4	—	14.2	12	54	—	12	4.141	1.244	—	3.675
三圈管	16	21.4	27.6	14.2	12	54	52	12	4.141	1.244	1.666	3.675

注:A 为内圈管;B 为中圈管;C 为外圈管;D 为防片帮孔。

表 2 土体的物理力学及比热容、导热参数

Table 2 Physical mechanics and specific heat and thermal conductivity parameters of soil

土层性质	深度/m	含水率/%	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	未冻土比热容/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	冻土比热容/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	未冻土导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	冻土导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
钙质黏土	373.3~401.3	19.51	2.090	0.826	1.326	1.291	1.458

表 3 冻结管外壁温度

Table 3 Outer wall temperatures of freezing tube

冻结时间/d	6	30	60	90	120	180	240
冻结管外壁温度/℃	-6.1	-25.6	-29.7	-30.4	-30.3	-29.5	-29.8

2.3 冻结壁各圈管交圈过程

计算中忽略土层在竖直方向的相互热影响,只考虑井壁在水平方向对其周边冻土的热影响,且地层埋深较深,所以计算区域简化为二维平面问题^[18]。

按照冻结管 2 种布置方案分别进行数值模拟计算,通过 FLAC^{3D} 软件分别提取 -1 ℃ 冻结锋面判断三圈管、两圈管冻结壁交圈时间如图 3—图 4 所示。

由图 3—图 4 分析可知,两圈管和三圈管冻结壁在各圈管交圈之前,以冻结管为中心,以向四周发展,在冻结管交圈之后向两侧发展。

三圈管冻结壁中、外、内圈管交圈时间分别为 55、74、95 d,两圈管冻结壁中、内圈管交圈时间分别为 60、115 d,由于三圈管冻结壁各圈管冷量叠加效果更好,内圈管交圈时间比两圈管冻结早 20 d 左右。与两圈管冻结壁相比,三圈管冻结壁有效厚度更厚。

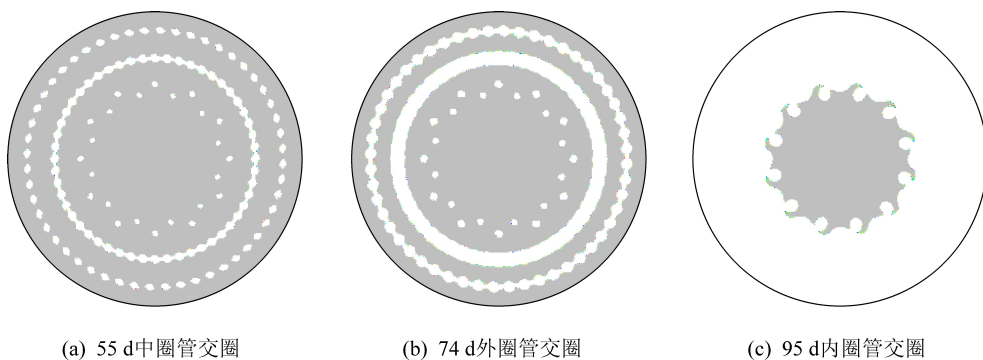


图 3 三圈管冻结壁交圈时间

Fig.3 Intersection time of three-loop tubes freezing wall

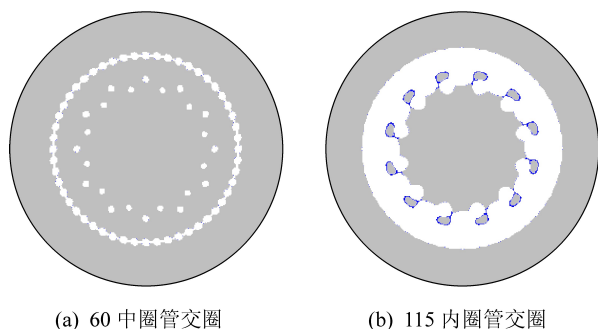


图 4 两圈管冻结壁交圈时间

Fig.4 Intersection time of two-loop tubes freezing wall

3 冻结壁温度场数值模拟与实测结果分析

3.1 测温孔温度模拟值与实测值

通过 FLAC^{3D} 数值模拟分别提取两圈管、三圈管冻结壁测温孔温度,并将三圈管测温孔温度与现场实测结果对比验证。两圈管测温孔温度模拟值与冻结时间关系如图 5 所示,三圈管测温孔温度模拟值和实测值与冻结时间关系如图 6 所示。

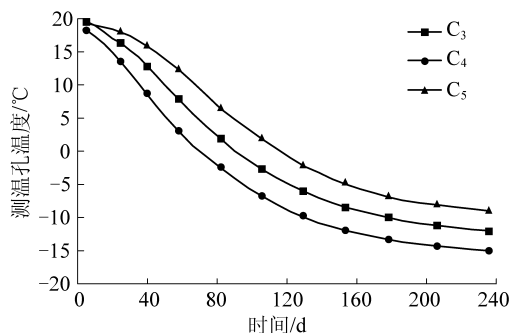


图 5 两圈管测温孔模拟值

Fig.5 Simulated values of measured temperatures hole of two-loop tubes

由图 5—图 6 分析可得,三圈管冻结壁测温孔模拟值与实测值随冻结时间的变化规律基本一致,模拟值比实测值小,主要是数值模拟未考虑冻结管偏斜、水力场等因素的影响。三圈管冻结壁测温孔

模拟值均比两圈管模拟值小,采用三圈管布置方案比两圈管布置方案更容易降低冻结壁温度。

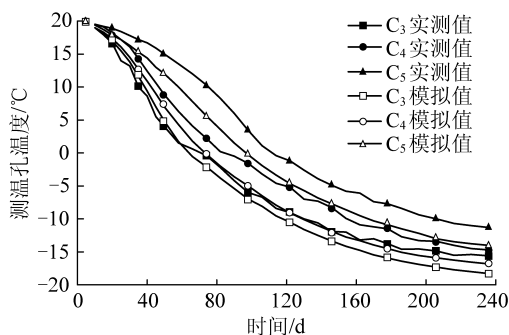


图 6 三圈管测温孔实测值与模拟值

Fig.6 Measured values and simulated values of measured temperatures hole of three-loop tubes

3.2 冻结壁平均温度

通过整理数据获得 2 个重要的特征参数冻结壁平均温度和有效厚度随冻结时间的变化规律。两圈管、三圈管冻结壁平均温度与冻结时间关系如图 7 所示。

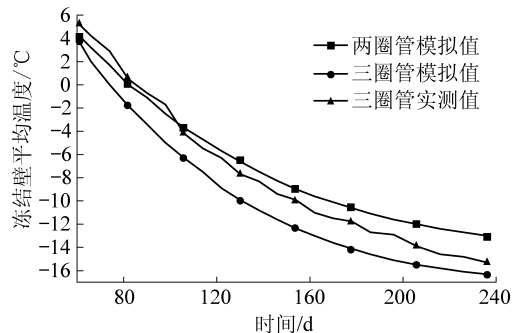


图 7 冻结壁平均温度与冻结时间关系

Fig.7 Relationship between freezing wall average temperature and freezing time

由图 7 可得,三圈管冻结壁平均温度模拟值与实测值随冻结时间的变化规律十分相似,由于数值模拟未考虑冻结管的偏斜、水力场等因素的影响,模拟值比实测值小,差值一般在 2 °C 左右。表明冻结

管偏斜对冻结壁平均温度影响较大,而温度是影响冻土强度的最显著因素^[11]。

两圈管和三圈管冻结壁平均温度变化趋势基本一致,近似呈对数关系下降。与两圈管冻结相比,三圈管冷量扩散叠加使得冻结壁温度降低更快,冻结壁平均温度更低,缩短冻结时间,平均温度可降低20%~30%且随冻结时间的延长差值逐渐增大,在冻结236 d时,两圈管冻结壁平均温度为-13.1℃,三圈管冻结壁平均温度为-16.4℃,差值为3.3℃,降低了25.38%,能满足工程实践要求。

3.3 冻结壁厚度与冻结时间关系

数值模拟未考虑冻结管偏斜、水力场等因素的影响,冻结壁交圈及形成均较早,在中圈管交圈之后,冻结壁的有效厚度明显增大。两圈管、三圈管冻结壁厚度与冻结时间关系如图8所示。

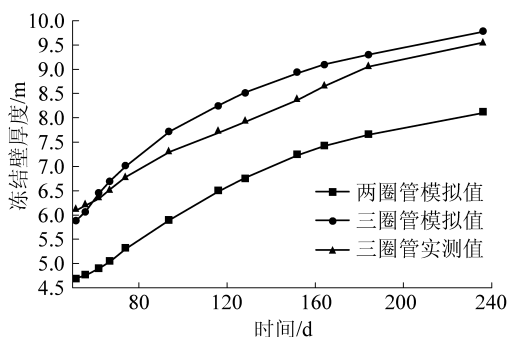


图8 冻结壁厚度与冻结时间关系

Fig.8 Relationship between freezing wall thickness and freezing time

由图8分析可知,三圈管冻结壁厚度模拟值与实测值随冻结时间的变化趋势基本一致,模拟值略大于实测值,是因为数值模拟未考虑冻结管偏斜和热量交换,导致冷量扩散较快。

在冻结壁交圈之后,冻结壁厚度增长明显,当冻结壁内边缘到达掘砌开挖直径时,冻结壁厚度增长缓慢。三圈管冻结壁厚度明显大于两圈管冻结壁厚度,冻结58 d后两者差值超过1.5 m。冻结壁厚度相同时,三圈管冻结时间明显比两圈管冻结时间少。冻结壁厚度达到8.0 m时,两圈管和三圈管冻结时间分别为218、110 d,三圈管冻结时间大约是两圈管冻结时间的0.5倍,节约了108 d。

两圈管和三圈管冻结壁厚度与冻结时间关系通过origin软件分别拟合得出如下公式:

$$E_2 = 2.428 \ln t - 5.058 4 \quad (1)$$

$$E_3 = 2.641 \ln t - 4.419 6 \quad (2)$$

其中, E_2 、 E_3 分别为两圈管和三圈管冻结壁厚度,m; t 为冻结时间,d。式(1)、式(2)的决定系数 R^2 分别为99.24%、99.46%。

3.4 冻结壁主面界面温度场

通过FLAC^{3D}软件提取过井筒圆心、内圈管3号和中圈管10号冻结管为主面温度场数据及过井筒中心、中圈管9和10号冻结管中间点为界面温度场的的数据,分析得出两圈管、三圈管不同冻结时间下的冻结壁主、界面上不同径向距离的温度变化情况如图9—图10所示。

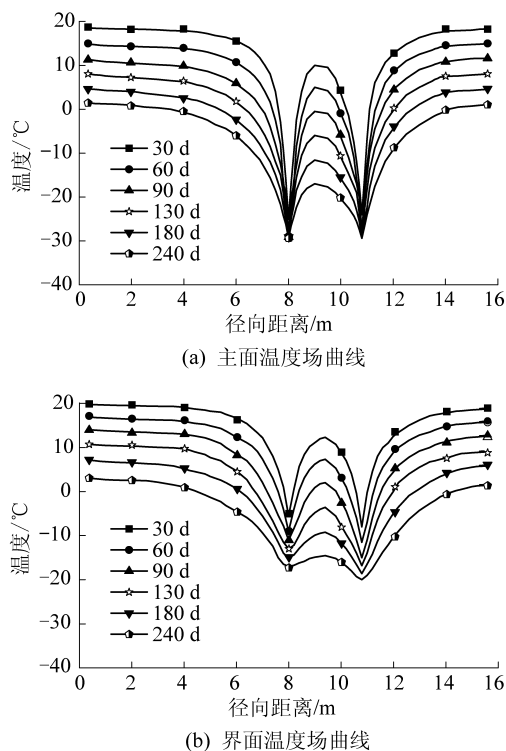


图9 两圈管冻结壁主面界面温度场曲线

Fig.9 Curves of main surface and interface temperature field of freezing wall of two-loop tube

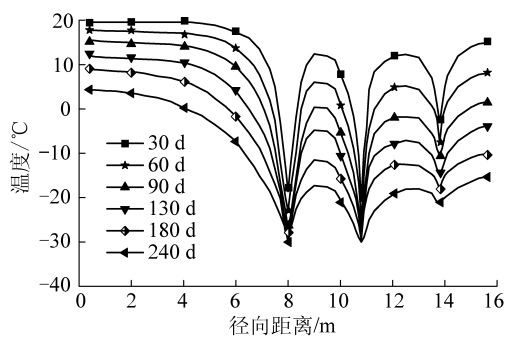
由图9—图10分析可知,两圈管和三圈管冻结壁主面、界面温度场曲线在冻结管处均随冻结时间的延长近似呈V形发展,主面、界面温度随冻结时间的延长逐渐降低,逐渐由马鞍形转变为梯形分布。

与两圈管冻结相比,三圈管冻结锋面扩展速度较快,提高1.20~1.55倍,形成的冻结壁厚度也越厚。形成相同厚度的冻结壁,三圈管冻结所需要的时间比两圈管冻结时间少。

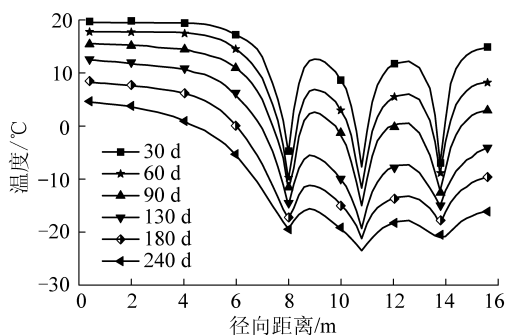
随着开挖深度的增加,表土层厚度的增加,两圈管冻结难以形成厚度9 m以上的冻结壁,而许多新建煤矿冻结壁厚度已经达到10 m,甚至超过了10 m,选择三圈管冻结方案可以满足冻结壁厚度和平均温度设计要求。

由图10可知由于中圈管孔间距最小,内圈管孔间距最大,主面温度场曲线中圈管和内圈管的温度最低,在积极冻结期一直与冻结管温度保持一致,界

面温度场曲线中圈管温度最低,内圈管温度最高,外圈管温度居中。



(a) 主面温度场曲线



(b) 界面温度场曲线

图 10 三圈管冻结壁主面界面温度场曲线

Fig.10 Curves of main surface and interface temperature field of freezing wall of three-loop tube

4 结 论

1) 两圈管冻结壁交圈顺序依次是外、内圈管;三圈管冻结壁交圈顺序依次是中、外、内圈管,且内圈管交圈时间比两圈管提前 14~21 d。

2) 与两圈管冻结相比,三圈管冻结扩展速度较快,提高 1.20~1.55 倍,形成相同冻结壁厚度,三圈管冻结大幅缩短了冻结时间,且可以形成更大的冻结壁厚度(差值大于 1.5 m)和更低的冻结壁平均温度(降低 20%~30%)。

3) 两圈管冻结壁厚度与冻结时间公式: $E_2 = 2.428 6 \ln t - 5.058 4$, 三圈管冻结壁厚度与冻结时间公式: $E_3 = 2.641 \ln t - 4.419 6$ 。

4) 主界面温度场曲线在冻结管处随冻结时间近似呈 V 形发展,逐渐由马鞍形转变为梯形分布,主界面温度随冻结时间逐渐降低。对比分析验证了数值模拟的可行性,为井筒中心土体开挖及相似工程提供参考。

参考文献 (References) :

[1] 李 坤. 白垩系软岩交圈前冻结壁扩展速度研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(11): 39-41.

LI Kun. Study on the expansion velocity of the frozen wall before the formation of soft rock in cretaceous [J]. Coal Engineering, 2015, 47(11): 39-41.

[2] 杨更社, 荣腾龙, 奚家米, 等. 煤矿立井冻结壁温度场演化规律数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 420-425.

YANG Gengshe, RONG Tenglong, XI Jiami, et al. Numerical simulation analysis of the evolution of temperature field of frozen wall of coal mine shaft [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 420-425.

[3] 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.

[4] 徐 立, 刘干斌, 叶俊能. 海相沉积软土地区人工冻土强度特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 73-78.

XU Li, LIU Ganbin, YE Junneng. Experimental study on mechanical properties of artificial frozen soil in marine sedimentary soft clay [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(2): 73-78.

[5] 张 涛, 杨维好, 黄家会, 等. 管内盐水流动状态对单管冻结温度场影响规律分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2057-2064.

ZHANG Tao, YANG Weihao, HUANG Jiahui, et al. Influence law of brine flow state in pipe on single pipe freezing temperature field [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2057-2064.

[6] 王 勇, 杨维好. 斜井表土段冻结井壁解冻过程中受力规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 133-139.

WANG Yong, YANG Weihao. Study on mechanical law of freezing inclined Shaft lining in topsoil during frozen wall thawing [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 133-139.

[7] 姚兆明. 人工冻土温度场影响因素灵敏度分析[J]. 水文地质工程地质, 2006(3): 38-40.

YAO Zhaoming. The sensitivity analysis of factors affecting the temperature field developed in artificial freezing soils [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(3): 38-40.

[8] 汪仁和, 曹荣斌. 双排管冻结下冻结壁温度场形成特征的数值分析[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 181-185.

WANG Renhe, CAO Rongbin. Numerical analysis of the temperature field features in the frozen wall with double rows of freezing pipes [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 181-185.

[9] 卢连长, 张 泽, 冯文杰, 等. 冻融循环作用下冻结黏土矿物物理力学性质研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 118-123.

LU Lianchang, ZHANG Ze, FENG Wenjie, et al. Research on variability of freezing-thawing cycle on basic physical and mechanics properties of clay minerals [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44(4): 118-123.

[10] 李栋伟, 汪仁和, 胡 璞. 多圈管冻结瞬态温度场有限元数值分析[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(2): 38-41.

LI Dongwei, WANG Renhe, HU Pu. FEM analysis of transient

- freezing temperature field of frozen multi-wall tube[J]. Coal Geology and Exploration, 2007, 35(2): 38-41.
- [11] 陈军浩, 李栋伟. 多圈管冻结温度场特性分析及工程应用[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1568-1574.
- CHEN Junhao, LI Dongwei. Temperature field frozen with multi-circle pipes in shaft sinking: feature analysis and engineering application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1568-1574.
- [12] 金光, 张之强, 吴 暄, 等. 严寒地区地源热泵埋管周围土壤冻结影响因素的实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 163-168.
- JIN Guang, ZHANG Zhiqiang, WU Xuan, *et al.* An experimental study of the influence factors of soil freezing surrounding a buried pipe of ground source heat pump in a cold region [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44(6): 163-168.
- [13] 杨维好. 十年来中国冻结法凿井技术的发展与展望[C]//中国煤炭学会成立五十周年高层学术论坛文集. 北京: 中国煤炭学会, 2012: 7.
- [14] 罗周全, 吴亚斌, 刘晓明, 等. 基于 SURPAC 的复杂地质体 FLAC^{3D} 模型生成技术 [J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1334-1338.
- LUO Zhouquan, WU Yabin, LIU Xiaoming, *et al.* FLAC^{3D} modeling for complex geologic body based on SURPAC[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1334-1338.
- [15] 杜 猛, 陈亚妮, 陈孝文, 等. 深厚钙质黏土层冻结特征与冻结温度场数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(5): 72-76.
- DU Meng, CHEN Yani, CHEN Xiaowen, *et al.* Freezing characteristics of deep and thick calcareous clay layer and numerical simulation of freezing temperature field[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(5): 72-76.
- [16] 陈军浩, 夏红兵, 李栋伟. 多圈管冻结壁温度场发展及冻结管偏斜影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2016, 55(4): 56-62.
- CHEN Junhao, XIA Hongbing, LI Dongwei. Multi-circle tube frozen wall temperature field development and deviation pipes influence[J]. Acta Scientiarum Naturalium University Sunyatseni, 2016, 55(4): 56-62.
- [17] 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.
- [18] 曹 伟, 盛 煜, 吴吉春, 等. 煤矿井工开采对冻土环境的影响分析[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(4): 98-104.
- CAO Wei, SHENG Yu, WU Jichun, *et al.* Impact of underground mining on permafrost environment[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(4): 98-104.
- [19] 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 [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 94-100.
- [20] 周 霖, 刘承志, 张广学, 等. 全深冻结井筒冻结孔导水通道预注浆技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 88-93.
- ZHOU Lin, LIU Chengzhi, ZHANG Guangxue, *et al.* Pre-grouting technology of freeze hole water channels in full-deep freeze shaft[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 88-93.