

# 多圈管冻结壁温度场发展及冻结管偏斜影响\*

陈军浩<sup>1</sup>, 夏红兵<sup>2</sup>, 李栋伟<sup>3</sup>

1. 福建工程学院土木工程学院//福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118;
2. 安徽理工大学矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001;
3. 中国科学院寒区旱区与环境工程研究所//冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 人工多圈管冻结是深厚地层井筒掘砌的最有效方法, 为进一步了解冻结壁温度场发展特性, 以某冻结井筒为原型, 开展了室内多圈管冻结模型试验, 同时借助有限元软件对冻结管无偏斜以及随机偏斜两种条件下冻结壁温度场发展特性进行了分析比较。得出冻结管布置圈径对冻结壁环向扩展速率影响较小; 冻结管偏斜对井帮温度、冻结壁有效厚度影响较小, 但对不同位置冻结壁交圈时间及对径向方向冻结壁平均温度影响较大; 同时冻结管偏斜会使冻结壁内部产生更多的密闭未冻承压水仓, 引起冻结壁内部冻胀力增大, 对冻结壁整体稳定性产生不良影响。在冻结造孔时, 要严格控制冻结管偏斜。

**关键词:** 多圈管; 冻结壁; 温度场; 模型试验; 冻结管偏斜

**中图分类号:** TD262    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0529-6579(2016)04-0056-07

## Multi-circle-tube frozen wall temperature field development and deviation pipes influence

CHEN Junhao<sup>1</sup>, XIA Hongbing<sup>2</sup>, LI Dongwei<sup>3</sup>

1. College of Civil Engineering// Fujian Key Laboratory of Civil Engineering New Technology and Informationization, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China;
2. Research Center of Mine Underground Engineering of the Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
3. China Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** It is well known that artificial multi-circle-tube freezing method could provide better experiences on shaft excavation in deep stratum. For further researching on evolution of the thermal field, the analogy model simulation was carried on, and the temperature field characteristics in frozen wall without freezing tube deviation were analyzed as well as it in random deviation of freezing tube. Comparing the results, it was concluded that the radius of the circular distribution of freezing tube poses slight effects on the annular expanding velocity of the frozen wall, and freezing tube deviation has minor influences on the temperature distribution of the shaft wall and the effective thickness of the frozen wall as well. It has important impacts on the time of frozen wall circle-crossing in different positions and the average temperature distribution in radial direction. In addition, it could result more enclosed confined water storage within

\* 收稿日期: 2016-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51504070); 福建省教育厅中青年教育科研资助项目(JA15353); 福建工程学院科研启动基金资助项目(GY-Z15004)

作者简介: 陈军浩(1986年生), 男; 研究方向: 岩土与地下工程、冻土力学与工程; E-mail: chjhtougao@163.com

the inner of the frozen wall, thereby increasing the heave force inside the frozen wall with negative effects on the stability of the frozen wall. As a result, the freezing tube deviation should be controlled strictly as drilling freezing holes.

**Key words:** multi-circle-tube; frozen wall; temperature field; model test; deviation pipes

我国能源资源具有“富煤、贫油、少汽”的显著特点,煤炭占一次能源资源总量的94.22%。2013年、2014年全国煤炭产量分别为36.5亿t,38.7亿t,可以看出随着我国经济建设的稳步发展,国家对煤炭需求有增无减<sup>[1]</sup>。而我国煤炭产量的95%以上获得来自地下开采,因此,要保证我国煤炭产量的持续增加,深部开采已成为煤矿开采的必然趋势。目前在华东地区绝大多数浅部煤层已得到充分开采,新建或改扩建的井筒均需穿越深厚冲积层,如山东龙固矿、淮南丁集矿、郭屯矿、杨村矿等冻结深度均超过了500m,杨村矿风井表土层厚度更是达到了538.9m,冻结深度达到800m。随着井筒穿越表土地层厚度的不断增加,为保证工程施工安全,要求冻结壁厚度也不断增大,目前普遍采用三圈+辅助孔、四圈孔冻结管布置方式,实践证明多圈管冻结是解决深厚地层井筒掘砌的最有效方法<sup>[2-4]</sup>。

多圈管冻结凿井过程中,冻结壁的安全与稳定性至关重要,其受影响因素虽然有很多,但冻结造孔的质量好坏是基本因素,特别是随着井筒冻结深度的不断加大,冻结造孔质量要求显得尤为重要<sup>[5-7]</sup>。若冻结孔发生较大偏斜,则冻结孔之间的环(径)向间距大小不一,冻结所形成的冻结壁实际情况与设计结果会有很大差异,将影响到冻结壁的整体交圈时间,也会对平均冻结壁温度、有效厚度等关键技术指标产生影响,严重时甚至引起冻结管断裂、井筒出水等工程事故,不利于冻结凿井。

近年来,随着多圈管冻结凿井的普遍应用,已有不少专家学者对多圈管冻结壁温度场发展变化特征展开研究,并获得了大量实质性成果,但主要是通过数值计算或现场实测方式获得,较少结合模型试验以及考虑冻结管偏斜进行多圈管温度场发展分析<sup>[8-10]</sup>。本文以某三圈孔冻结井筒为原型,井筒冻结深度502m,冻结壁设计厚度9.2m,平均温度-14℃。通过室内模型试验,测得冻结壁温度场发展变化基本规律,同时利用有限元数值计算软件,建立冻结孔无偏斜、有偏斜两种模型,并比较两种方案计算结果与模型试验结果的差异,分析冻结孔偏斜对冻结壁温度场变化的影响。

## 1 多圈管冻结模型试验

### 1.1 模型试验介绍

模型试验土样来自现场-380~-410m厚黏土层,土体初始温度15℃。通过室内土工实验,获得该土层物理性能指标为:含水率26%;比热1.53J/(g·K);结冰温度-1.0℃;导热系数随温度变化而变化,在15、0、-2、-10、-20、-30℃时导热系数分别为1.32、1.36、1.52、1.73、1.79、1.83W/(m·K),各温度区间导热系数可采用线性内差法获得。

试验在矿山地下工程教育部工程研究中心人工多圈管冻结模型试验平台上进行,为提高试验效率,在合理设计相似比( $n=10$ )的基础上,将直径为3m的试验平台三等分,试验仅在1/3区域进行。试验过程始终满足相似准则<sup>[11]</sup>,几何缩比为 $C_g = n$ ;温度缩比为 $C_T = 1$ ;时间缩比 $C_t = n^2$ 。试验选用的冻结管为双重钢管,内、外径分别为14mm、20mm,由于土体冻结效果受冻结管外壁与接触土体热交换面积大小的影响,因此模型试验设计冻结管根数时,在考虑相似比的基础上,还考虑了现场与室内冻结管外径大小的差异,以保证单位面积土体上冷量分配的相似性<sup>[12]</sup>。同时在模型试验设计时,由于现场冻结管间距介于1.23~2.37m之间,通过相似比换算后,模型试验中冻结孔间距较小,仅为0.12~0.24m,若考虑偏斜,将不利于冻结管布置,因此模型试验设计冻结管处于无偏斜状态。

试验过程采用酒精制冷,循环温度-32℃,冻结时间70h。为掌握冻结壁温度场发展情况,在特征点位置布置了温度测点,其中1-8#布置在主面,9-16#测点布置在界面位置。界面各测点布置均在各区域距离冻结管最远处,分别位于掘砌荒径、内圈孔内侧、内圈孔中间、内-中圈孔之间、中圈孔中间、中-外圈孔之间、外圈孔中间、外圈孔外侧;距离井筒中心距离分别为:0.56、0.63、0.68、0.74、0.94、1.11、1.25、1.40m。现场原型与模型试验冻结设计参数见表1所示;测温元件布置情况见图1所示;模型试验现场效果见图2所示。

表 1 现场与试验冻结设计参数

Table 1 Field and test freeze design parameters

名称	原型参数			试验参数 (1/3 区域)		
	内圈孔	中圈孔	外圈孔	内圈孔	中圈孔	外圈孔
圈径/m	13.6	18.8	25	1.36	1.88	2.5
孔数/个	18	48	46	3	10	9
间距/m	2.37	1.23	1.71	0.36	0.16	0.22
外管径/mm	133	159	159	20	20	20
内管径/mm	121	145	145	14	14	14

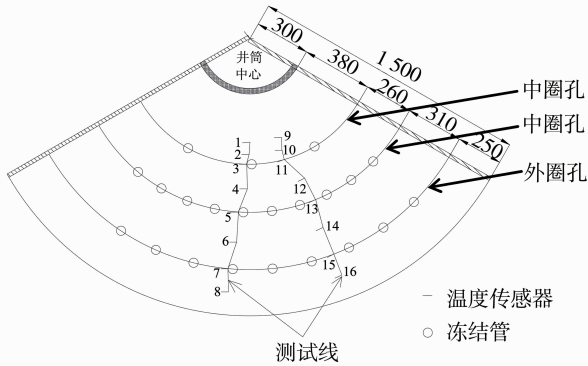


图 1 模型试验测温元件布置平面图 (单位: mm)

Fig. 1 Model test temperature measurement element layout

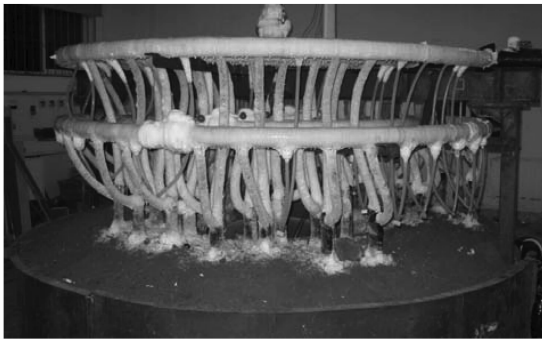


图 2 冻结模型试验过程

Fig. 2 Process of the freezing model test

### 1.2 模型试验结果分析

1.2.1 模型试验冻结壁发展特征 现场开机冻结 210 d 后开挖至厚黏土层位, 按相似比换算成模型试验冻结时间为 50 h。本文选择冻结壁相对薄弱的界面位置进行冻结壁温度场发展特征分析。通过对实测数据整理, 获得不同测点位置温度随时间变化曲线, 见图 3 所示。

从图 3 可以看出, 冻结壁沿界面方向土体降温速率不一, 总体表现为中间快, 内、外两侧慢。如掘砌荒径位置土体需冻结 20 h 才降至结冰温度; 而在冻结管之间土体, 受四周冷量叠加影响, 温度下降很快, 冻结 15 h 均可降至结冰温度, 其中主

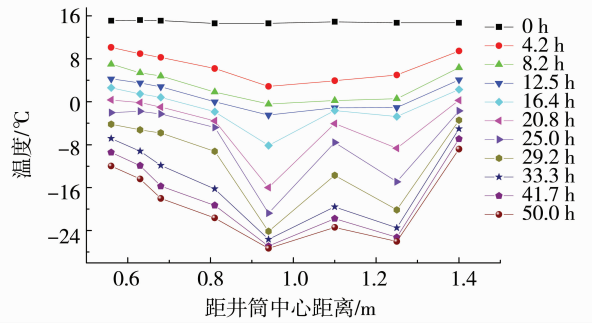


图 3 界面不同位置温度随时间变化

Fig. 3 Change of different position temperature in interface

冻结孔 (中圈孔) 中间位置土体在冻结 8 h 即进入负温状态, 降温速率达到 1.45 °C/h。受土体冻结过程释放潜热影响, 在结冰点温度附近, 土体温度梯度明显减小。

选取 11 - 15#测点温度变化做分析比较, 获得了不同位置冻结壁交圈时间。根据土工试验结果, 以土体结冰温度 -1 °C 为冻结壁边界, 可以计算出不同位置冻结壁发展速率, 见表 2 所示。

表 2 不同位置冻结壁交圈时间及扩展速率对比  
Table 2 Comparison of frozen wall circle-crossing time and growth rate

测点编号	11#	12#	13#	14#	15#
测点位置	内圈孔间	内-中圈间	中圈孔间	中-外圈间	外圈孔间
交圈时间/h	19.43	17.44	11.05	16.62	14.76
扩展速率/ (mm · h <sup>-1</sup> )	9.17	7.46	7.01	9.33	7.28
换算后交圈时间/d	80.95	72.65	46.04	69.25	61.51
换算后扩展速率/ (mm · d <sup>-1</sup> )	14.66	17.90	13.36	22.38	13.90

通过对试验结果分析, 各测点位置土体交圈时间差异很大, 中圈主冻结孔环向之间土体交圈时间最早, 仅为 11.05 h; 而内圈辅助孔环向之间土体交圈时间最迟, 达到 19.43 h。根据相似准则换算得出: 中圈、内圈、外圈孔之间冻结壁扩展速率分别为 13.36、14.66、13.90 mm/d, 三者相差很小, 表明冻结壁沿环向扩展速率受冻结管布置圈径影响较小。内-中圈管之间与中-外圈管之间冻结壁扩展速率虽然达到 17.90 mm/d 与 22.38 mm/d, 但由于径向两圈管间距要大于环向两冻结孔间距, 因此在径向冻结壁交圈时间大于环向冻结壁交圈时间。

1.2.2 模型试验冻结壁特征参数 冻结壁稳定性两个主要参数指标为冻结壁有效厚度与平均温度,计算时可将温度低于土体结冰温度的区域认为是冻结壁已经形成区域,并对该区域沿径向方向对温度进行面积分,计算出赋存在该区域的冻结壁总冷量,而后除以径向方向冻结壁有效厚度,进而计算出冻结壁平均温度。由于现场井筒掘砌时,需挖走掘砌荒径以内的冻土,因此当井帮温度低于土体冻结温度后,冻结壁有效厚度内边缘固定为掘砌荒径位置;冻结壁外边缘计算时,可假设外圈孔外侧测点温度只受到相邻两根冻结管影响,采用两根冻结管相互影响下的温度场计算公式获得<sup>[13]</sup>。通过计算获得模型试验过程冻结壁特征参数随时间变化情况,见图4所示。

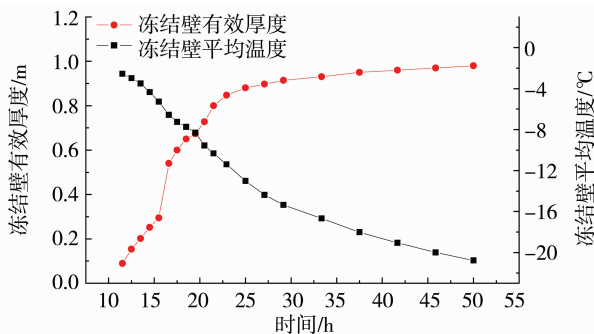


图4 模型试验冻结壁特征参数随时间变化情况

Fig. 4 Characteristic parameters of the frozen wall change with time of the model test

从图4中可以看出,冻结壁形成及发展情况与表2冻结壁各区域形成时间相对应:冻结11.05 h时,中圈孔环向之间土体交圈,冻结壁形成并迅速扩展,至冻结13.5 h时,冻结壁厚度增长至0.20 m;冻结14.76 h时虽然外圈孔环向之间土体交圈,但由于中-外圈之间土体尚未交圈,且外圈孔冻结壁厚度小于中圈孔冻结壁厚度,该阶段冻结壁厚度仍由中圈孔形成的冻结壁厚度决定;冻结16.6 h时,中-外圈孔之间土体交圈,中圈孔与外圈孔形成的冻结壁合二为一,引起冻结壁厚度突然增大,达到0.54 m,该阶段冻结壁平均温度迅速下降至 $-6.56^{\circ}\text{C}$ ;冻结19.43 h时,内圈孔环向之间土体交圈,使得内-中-外三圈孔形成的冻结壁合为一个整体,冻结壁厚度出现再次跳跃,达到0.73 m,该阶段冻结壁平均温度变化较小,降至 $-8^{\circ}\text{C}$ ;冻结22.2 h时,井帮位置土体温度降至结冰温度,冻结壁有效厚度范围变为井帮位置至外圈孔

外侧形成的冻结壁,因外圈孔外侧冻结壁扩展速率较慢,因此在此之后冻结壁厚度增长速率缓慢,但冻结壁平均温度下降较快;至冻结50 h时,冻结壁有效厚度为0.98 m,冻结壁平均温度降至 $-20.76^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 冻结壁温度场发展数值模拟

### 2.1 人工冻结温度场控制微分方程

人工冻结温度场是一个存在相变且冻结锋面在不断迁移的瞬态非线性数学物理方程<sup>[14]</sup>。其理论求解难度大,控制微分方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q'}{c\gamma} \quad (1)$$

式中: $a = \lambda/(c\gamma)$ 为导温系数,  $\text{m}^2/\text{h}$ ;  $\lambda$ 为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $c$ 为比热,  $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ;  $\gamma$ 为土体的重度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $Q'$ 为内热源,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

式(1)为抛物线型微分方程,在时间上采用有限差分法,空间上采用有限单元法进行求解。可采用 Galerkin 加权余量法来建立热传导问题的有限元方程。

### 2.2 多圈管冻结温度场计算模型建立

采用冻结法凿井时,冻结壁温度场的发展性状直接依赖于先期冻结造孔的质量好坏,其最直接的判断标准为冻结造孔偏斜率的控制问题。若相邻两根冻结管呈“八”字型成孔,冻结壁交圈时间将加大,同时也将提高该区域冻结壁平均温度,进而降低该区域冻结壁强度大小。因此本文模型建立时以现场冻结井筒为原型,考虑冻结管无偏斜与冻结管随机偏斜两种方案,以比较冻结管偏斜对冻结壁温度场发展的影响情况。本文考虑冻结管随机偏斜时,规定冻结管偏斜率 $\leq 0.15\%$ ,相邻两个冻结孔终孔间距 $\leq 2.8 \text{ m}$ ,利用 VC++ 软件编写出冻结管随机偏斜程序<sup>[15-16]</sup>,随机获得中、外圈最大冻结孔间距分别为2.0、2.48 m,符合《煤矿井巷工程施工规范》规定。

模型建立时选取土体物理性能参数参照1.1节土工实验结果。由于地层埋深较深,在模型建立时,可按平面问题来简化考虑温度场。同时考虑冻结管尺寸较小,为方便建模,将盐水温度作为节点荷载考虑,即计算时将冻结管以温度荷载形式直接施加在节点上,温度荷载取值与现场回管路盐水温度一致,为 $-32^{\circ}\text{C}$ 。计算模型见图5所示,温度场计算云图见图6所示。

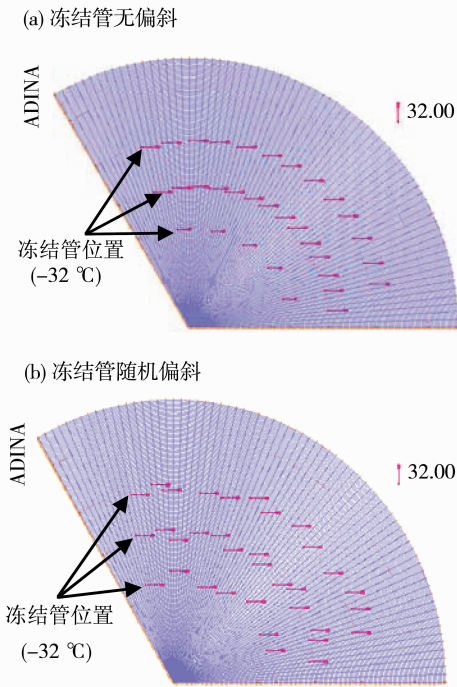


图 5 冻结温度场计算模型

Fig. 5 Freezing temperature field calculation model

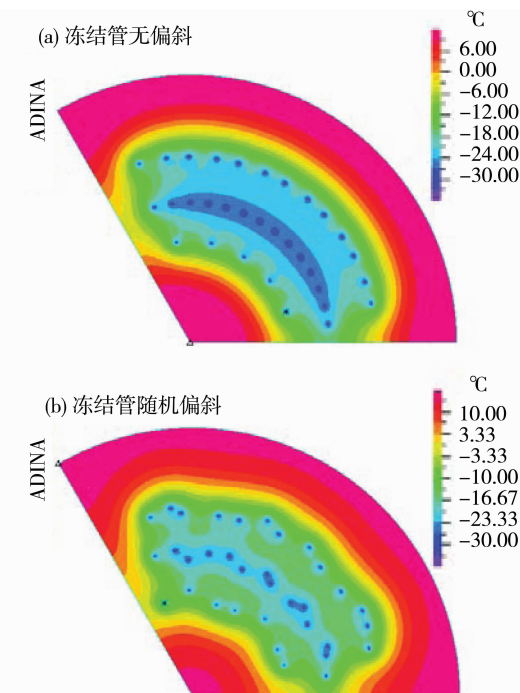


图 6 温度场计算云图

Fig. 6 Temperature field calculation cloud

### 2.3 数值计算结果

通过后处理, 以土体结冰温度为临界点, 绘制出不同位置土体交圈时冻结壁  $-1\text{ }^\circ\text{C}$  等值线, 见图 7、图 8 所示。同时将冻结管无偏斜、偏斜时数值

计算获得的冻结壁交圈时间与模型试验结果进行对比, 见表 3 所示。

表 3 冻结壁交圈时间对比

Table 3 Comparison of frozen wall circle-crossing time d

测点位置	内圈	内-中	中圈	中-外	外圈
	孔间	圈间	孔间	圈间	孔间
模型试验换算	80.95	72.65	46.04	69.25	61.51
无偏斜模拟	78	70	44	66	56
随机偏斜模拟	128	94	56	80	74

## 3 冻结管偏斜对冻结壁温度场影响

### 3.1 冻结管偏斜对冻结壁交圈时间影响

对比图 7、图 8 可以看出, 冻结管处于理想无偏斜条件时, 各位置土体获得的冷量均匀, 冻结壁以冻结管节点为中心, 规则地向四周发展直至各位置交圈; 当冻结管处于偏斜条件时, 冻结初期受冷量分配不均匀影响, 冻结壁温度场发展较为紊乱, 不规则地向四周发展。由于中圈孔间距最小, 且环向土体同时受环向、径向冻结管传递的冷量叠加影响, 交圈时间最快, 在冻结管无偏斜与偏斜条件下交圈时间分别仅为 44、56 d; 外圈土体环向交圈时间次之, 分别为 56、74 d, 二者差值均很大, 表明冻结管偏斜对冻结壁交圈时间影响明显。当外圈土体环向交圈后, 虽然在较短时间内径向位置中圈与外圈孔之间土体即可完成交圈, 但仍有部分土体处于正温状态, 特别是在冻结管偏斜条件下, 冻结 80 d 后, 冻结壁内部形成较多封闭空间, 在适宜的工程地质条件下, 随着冻结锋面逐渐收缩, 由于封闭空间内的水无法及时迁移排出, 将在冻结壁内部形成密闭未冻承压水仓<sup>[17]</sup>, 引起冻结壁内部冻胀力增大, 而冻土在外荷载作用下, 冻结壁强度随外荷载增大呈减小趋势<sup>[18]</sup>, 因此密闭未冻承压水仓将对冻结壁整体稳定性产生不良影响。内圈孔属于辅助冻结孔, 冻结管布置少, 因此在径向上内圈与中圈孔之间土体交圈时间较迟, 在冻结管无偏斜与偏斜条件下交圈时间分别为 70、94 d, 此时内、中、外圈孔之间冻结壁连成一个整体。

从表 3 可以看出, 通过模型试验换算获得的现场冻结壁交圈时间与冻结管无偏斜条件下较为接近, 但与冻结管偏斜条件下差异很大, 同样表明冻结管偏斜对冻结壁交圈时间影响显著。不同位置冻结壁交圈时间先后顺序为: 环向中圈孔之间土体——环向外圈孔之间土体——径向中外圈孔之间土体——径向内中圈孔之间土体。

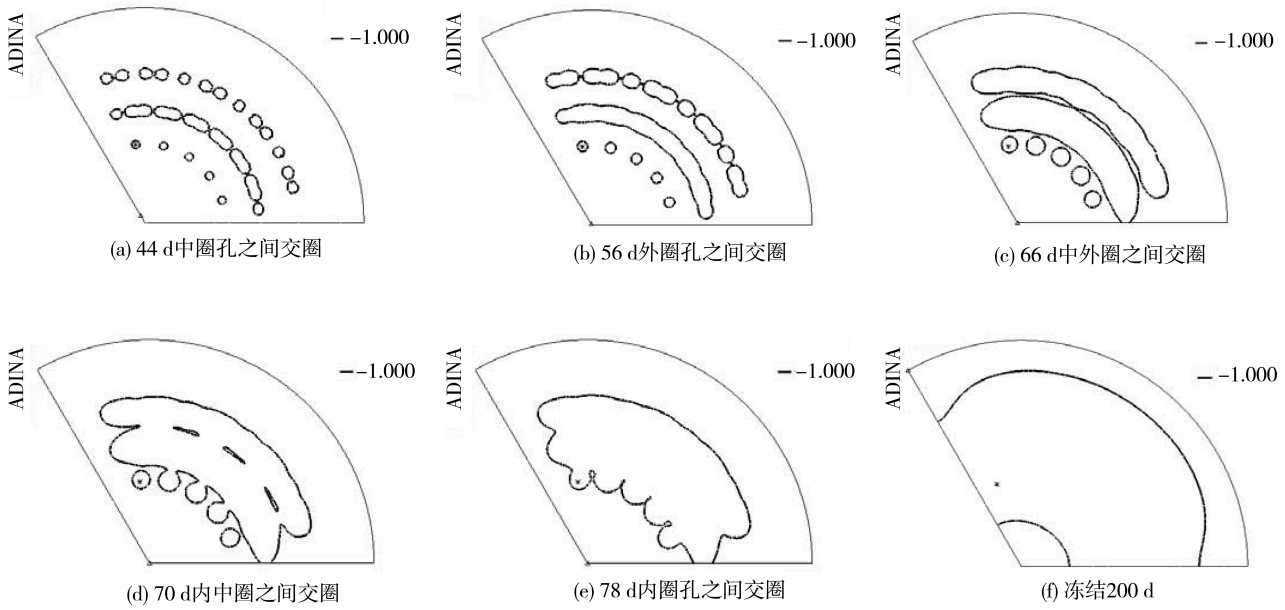


图 7 冻结管无偏斜条件下冻结壁发展性状

Fig. 7 Development of frozen wall under the condition of frozen pipe without defective

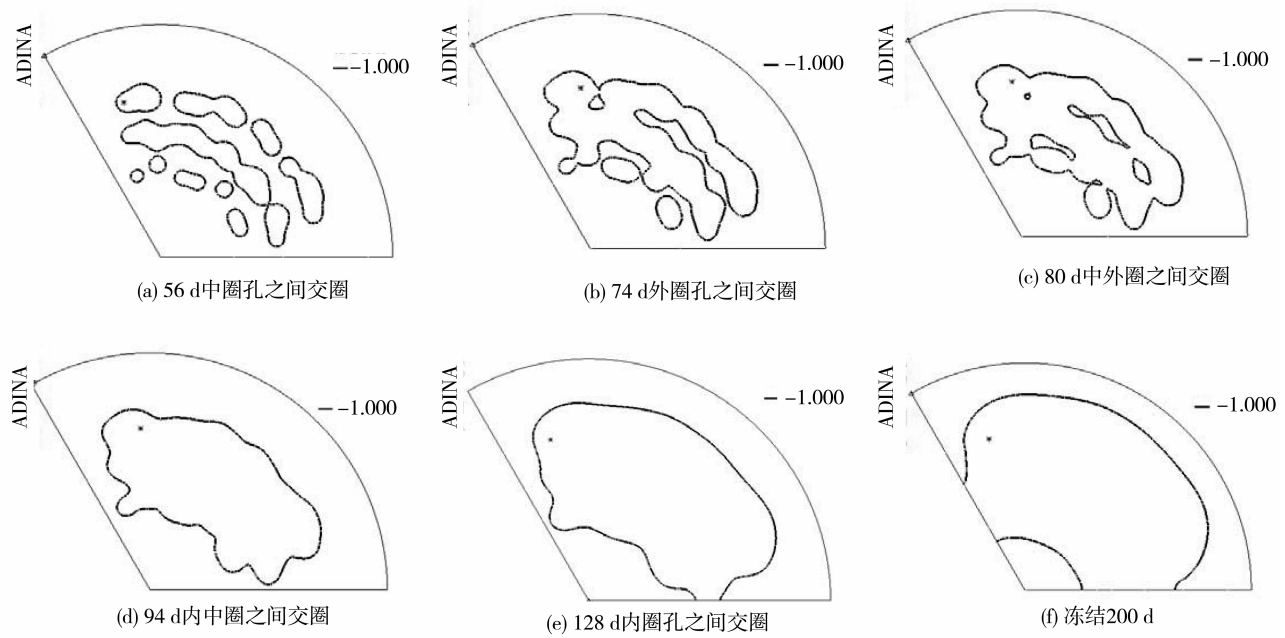


图 8 冻结管随机偏斜条件下冻结壁发展性状

Fig. 8  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  development of frozen wall under the condition of frozen pipe random defective

### 3.2 冻结管偏斜对冻结壁特征参数影响

冻结凿井安全与否主要体现在井筒掘砌过程，除受冻结壁稳定性影响外，还与井帮温度大小直接相关，通过对模型试验及数值计算结果进一步分析，获得不同方案下冻结 200 d 后井筒开挖至厚黏土层时井帮温度、冻结壁平均温度、有效厚度等特征参数变化对比情况，见表 4 所示。

冻结管偏斜对内外圈之间主面与界面位置土体温度影响较大，但对内圈孔内侧特别是井帮位置土体，以及外圈孔外侧土体温度影响较小。冻结管偏斜条件下，主面与界面井帮位置温度分别为  $-9.64$ 、 $-9.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，沿环向井帮平均温度为  $-9.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与冻结管无偏斜时  $-9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，差别不大，表明冻结管偏斜对井帮温度影响较小；而模型试验

结果井帮平均温度较低, 为  $-12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 这主要是由于模型中心采用厚钢筒代替井壁, 减少了中心部分土体吸收冷量所引起的。

冻结壁平均温度在冻结管无偏斜、随机偏斜条件下分别为  $-19.6$ 、 $-18.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 表明冻结管偏斜对冻结壁平均温度影响较大; 模型试验计算结果较低, 为  $-20.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 与井帮温度偏低受影响原因一致。以  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  为边界, 得出冻结壁有效厚度在冻结管无偏斜、随机偏斜条件下分别为  $10.3$ 、 $10.1\text{ m}$ , 二者差异较小; 模型试验计算结果较小, 为  $9.8\text{ m}$ , 主要是由于试验时外圈孔外侧土体仅  $0.25\text{ m}$  厚, 受室内大气对流影响较大, 导致冻结壁外边缘离外圈孔较近。

表 4 井帮温度、冻结壁有效厚度及平均温度对比  
Fig. 4 Comparison of excavation surface temperature, frozen wall effective thickness and average temperature

参数	井帮温度 / $^{\circ}\text{C}$	冻结壁有效 厚度/ $\text{m}$	冻结壁平均 温度/ $^{\circ}\text{C}$
无偏斜模拟	-9.8	10.3	-19.6
随机偏斜模拟	-9.6	10.1	-18.9
模型试验换算	-12.3	9.8	-20.7

## 4 结 论

本文以某冻结井筒为原型, 开展了室内多圈管冻结模型试验, 同时借助有限元软件对冻结管无偏斜、随机偏斜条件下冻结壁温度场发展性状进行了分析比较, 得到以下结论:

1) 多圈管冻结时, 由于各圈冻结孔环向及径向交圈时间不同, 冻结壁厚度呈跳跃性增长趋势, 且在冻结壁形成过程时, 各圈之间容易产生密闭未冻承压水仓。

2) 冻结壁沿环向扩展速率受冻结管布置圈径影响较小, 但冻结管偏斜对冻结壁交圈时间影响很大; 而冻结壁交圈与否是井筒能否开挖的直接依据, 因此在冻结造孔时, 要严格控制冻结管偏斜。

3) 冻结管偏斜对井帮温度、冻结壁有效厚度影响较小, 但对径向方向冻结壁平均温度影响较大, 而冻结壁强度受温度影响较大, 因此沿径向方向冻结壁强度不一, 多圈管冻结条件下形成的冻结壁属于非均质材料。

4) 冻结管偏斜容易使冻结壁内部产生更多的

密闭未冻承压水仓, 引起冻结壁内部冻胀力增大, 降低该区域冻结壁强度, 对冻结壁整体稳定性产生不良影响。

## 参考文献:

- [1] 贺佑国, 叶旭东, 王震. 煤炭工业发展形势及十三五展望[N]. 中国能源报, 2015-02-02(12).
- [2] 钱鸣高. 煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 529-534.
- [3] 唐永志, 荣传新. 淮南矿区复杂地层大型矿井建设关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(4): 40-44.
- [4] 金川. 淮南矿区冻结法凿井的几个关键技术问题[J]. 建井技术, 2006, 27(6): 26-29.
- [5] 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.
- [6] 陆卫国. 冻结井开挖初期出水原因分析[J]. 煤炭技术, 2012, 31(1): 5-7.
- [7] 盛天宝. 特厚冲积层冻结法凿井关键技术研究与应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2011.
- [8] 胡坤, 周国庆, 王建州, 等. 深厚表土多圈管冻结温度场演变规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 149-153.
- [9] 奚家米, 李庆平, 孙永岗, 等. 宁正煤田白垩系岩层冻结温度场实测与数值分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(5): 764-768.
- [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.
- [11] 顾大钊. 相似材料和相似模型[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995: 83-97.
- [12] 陈军浩. 多圈管冻结模型试验及人工冻土冻胀规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- [13] 翁家杰. 井巷特殊施工[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [14] 汪仁和. 人工多圈管冻结地层的水热力耦合研究及其冻结壁计算[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [15] 汪仁和, 王伟. 冻结孔偏斜下冻结壁温度场的形成特征与分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 668-661.
- [16] 陈军浩, 陈飞敏. 冻结孔偏斜对白垩系地层冻结凿井影响研究[J]. 中国煤炭, 2013, 39(2): 41-46.
- [17] 袁慧, 尚海军. 未冻水仓影响深厚冻结壁安全的探讨[J]. 山西建筑, 2011, 37(30): 63-64.
- [18] H A 崔托维奇. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.