

文章编号:1673-3363(2010)02-0149-05

## 深厚表土多圈管冻结温度场演变规律研究

胡 坤<sup>1</sup>, 周国庆<sup>1</sup>, 荆留杰<sup>2</sup>, 王建州<sup>1</sup>, 周 杰<sup>1</sup>, 魏亚志<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008

2. 北京三一重机有限公司, 北京 102206)

**摘要:** 为了得到深厚表土多圈管冻结温度场的演变规律, 考虑压力对土体结冰温度的影响, 研制了深厚表土冻结壁温度场试验系统。依据相似理论, 以赵楼风井井筒冻结工程为原型, 进行加载后的多圈管冻结温度场试验研究。结果表明: 3 圈冻结管冻结锋面交圈时间为 50 d, 冻结壁厚 11.2 m, 冻结壁平均温度  $-22.8^{\circ}\text{C}$ , 拟合得到冻结壁平均温度随时间变化函数  $T_1 = -3 \times 10^{-9} \tau^3 + 2 \times 10^{-5} \tau^2 - 0.0358 \tau + 2.932$ , 井帮温度随时间变化函数  $T_2 = -0.0207 \tau + 10.32$ 。特征面温度场进入拟稳定阶段后, 冻结壁厚度基本稳定, 冻结壁平均温度、井帮温度满足井筒开挖要求; 特征面温度场进入稳定阶段后, 冻结管冷负荷主要用于维护冻结壁向内扩展区和向外扩展区的温度。

**关键词:** 深厚表土; 多圈管冻结; 特征面; 温度场; 冻结壁

**中图分类号:** TD 265.3 **文献标识码:** A

## Experimental Research on Multi-Circle Freezing Temperature Field for Thick Top Soil

HU Kun<sup>1</sup>, ZHOU Guo-qing<sup>1</sup>, JING Liu-jie<sup>2</sup>, WANG Jian-zhou<sup>1</sup>, ZHOU Jie<sup>1</sup>, WEI Ya-zhi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. Beijing SANY Heavy Machinery Limited Company, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In order to get the evolution law of the multi-circle freezing temperature field for thick top soil, we establishe a test system to study the temperature field of frozen wall in in thick top soil. In this system, the effect of pressure on frozen point of soil is considered. Based on similarity theory, the experiment on muti-circle freezing temperature field after loading were carried out by taking the ventilation shaft of Zhao Lou coal mine as the prototype. The results show that the closure time of freezing front of three chilled pipes is 50 days, the thickness and the average temperature of frozen wall are 11.2m and  $-22.8^{\circ}\text{C}$ , respectively. And the fitting functions of the average temperature of frozen wall and the shaft-lining temperature changing with time are  $T_1 = -3 \times 10^{-9} \tau^3 + 2 \times 10^{-5} \tau^2 - 0.0358 \tau + 2.932$  and  $T_2 = -0.0207 \tau + 10.32$ , respectively. When the temperature field of the characteristic surfaces is in quasi-steady stage, the thickness of frozen wall is almost stable, so the shaft-lining temperature and the average temperature of frozen wall satisfy the requirements of excavating shaft. When the temperature field of the characteristic surfaces is in steady stage, the cooling loads of chilled pipes are mainly used to maintain the temperature of inward and outward extending areas of frozen wall.

**Key words:** thick top soil; multi-circle freezing; characteristic surfaces; temperature field; frozen wall

收稿日期: 2009-11-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50534040); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAB16B01); 国家自然科学基金项目(40471021)

作者简介: 胡 坤(1982-), 男, 山东省济宁市人, 博士, 从事人工冻结理论与技术方面的研究。

E-mail: hukun2008@cumt.edu.cn Tel: 13645202578

立井是新建矿井的关键部位,煤炭生产的交通咽喉,穿越深厚表土层建造立井,必将面临众多的技术难题<sup>[1-2]</sup>.要克服巨大的水土压力,复杂多变的地质条件,冻结法凿井是最常用、最有效的施工方法<sup>[3]</sup>.人工冻结施工技术具有技术可靠、工艺成熟、施工可控的特点<sup>[4]</sup>.然而伴随着表土层厚度和冻结深度的增加,冻结管圈数由单圈变成 3 圈或更多,冻结温度场规律也变得更加复杂.

由于对深厚表土多圈管冻结温度场演变规律掌握不足,冻结壁厚度、平均温度、井帮温度等多种重要参数精度不够,冻结壁强度和稳定性得不到保障,使凿井施工过程易出问题.因此,加强对此课题的研究具有十分重要的现实意义.

国内外学者大多在无压条件下进行多圈管冻结温度场的研究<sup>[5-6]</sup>.实际上,随着压力的增大,结冰温度降低,导致冻结壁实际厚度减小<sup>[7-10]</sup>.为了得到更加客观、准确的冻结壁厚度、井帮温度、冻结壁平均温度等重要参数,本文选取赵楼煤矿风井冻结工程为原型,通过相似理论和相似模化建立物理试验模型,实施深厚表土 3 圈管冻结模拟.通过先加载后冻结的方法以期能更加贴近工程实际状况,得到深厚表土多圈管冻结温度场分布及其演变规律.

## 1 试验系统

依据相似理论确定试验模型的相似缩比,通过自行研发的深厚表土冻结壁温度场试验系统,模拟深厚表土 3 圈管冻结过程.深部土重塑装样、高压加载模拟地层压力、热电偶实时精确采集,力求获得全面可信的冻结壁温度场演变规律.

### 1.1 相似模化

要满足试验模型和原型相似,必须使试验系统中的参数满足几何相似、温度相似、时间相似和地层性质相似等,这是进行模化设计的基础.

为保证良好的试验模拟效果,得到课题研究的预期成果.根据原型尺寸、试验条件、测量传感器等因素,取试验的几何比为  $C_l = 20$ .由于模型材料与原型材料相似,根据相似理论,由柯索维奇准则、傅立叶准则、力学准则分别推导出试验的温度比  $C_t = 1$ ,时间比  $C_\tau = 400$ ,应力比  $C_\sigma = 1$ .

模拟试验以赵楼煤矿风井冻结井筒为研究对象,该井筒穿越约 500 m 厚的冲积表土层,采用 3 圈管冻结凿井施工,试验模型尺寸和参数通过相似比计算得出如下结论,如表 1 所示.

表 1 原型和模型参数表

Table 1 Parameters of prototype and model

| 系统参数               | 原型             | 模型                |
|--------------------|----------------|-------------------|
| 井筒净直径/m            | 6.5            | 0.325             |
| 冻结壁厚度/m            | >9             | >0.45             |
| 冻结管圈径<br>(外/中/内)/m | 22.5/17.6/14.5 | 1.12/0.88/0.72    |
| 冻结管间距<br>(外/中/内)/m | 1.5/2.2/1.9    | 0.073/0.115/0.094 |
| 冻结管数量<br>(外/中/内)/根 | 46/23/23       | 48/24/24          |
| 盐水温度/℃             | -30            | -30               |
| 初始温度/℃             | 10             | 10                |
| 围压/MPa             | 7.2            | 7.2               |

### 1.2 试验系统

本试验使用自行研制的深厚表土冻结壁温度场试验系统.它主要由试验台主体、伺服液压加载系统、冻结系统、制冷系统、测试系统等构成.

试验台主体为钢质筒体结构,可承受伺服液压加载系统提供的巨大围压,达到模拟深厚表土地层压力的效果.试验台模拟开挖荒径 0.4 m,模拟地层厚度 0.6 m,设计承受最大压力 20 MPa.试验台主体结构见图 1.

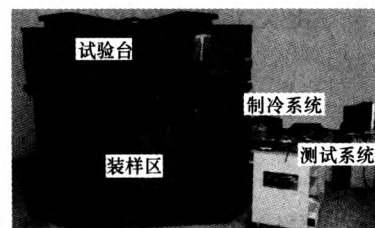


图 1 试验台主体结构

Fig. 1 Main structure of experiment system

试验系统在试验过程中必须为冻结土样提供内压、围压和竖向压力.内压和围压由伺服液压加载系统向内、外压压力室注入甲基硅油提供.竖向压力通过上筒盖施加,高强螺栓和 U 型卡将上盖与筒体紧密结合,试验台反力架和 6 个实心钢柱直接对试验台的上盖施加压力.试验模拟 500 m 深处地层冻结,每次试验应在土样填实压密之后,将压力加载至设计值(约 5 h)并维持稳压固结,然后实施冻结过程.

冻结系统即冻结法凿井中的多圈冻结管,采用外径 10 mm 的无缝钢管焊接而成,上下集液圈管径为 20 mm.制冷系统使用 3 台杭州雪中炭恒温技术有限公司生产的 XT5704LT 系列高低温恒温液浴循环装置制备低温酒精,并分别通过硅胶软管与外中内 3 圈冻结管相连循环制冷.

数据采集系统由计算机和 Datataker 组成,测

试系统由热敏电阻和自制热电偶组成<sup>[11]</sup>。温度测点主要布置在冻结管进、出口,井帮以及冻结壁特征面上。从井帮(距离井心0.2 m)处径向布置十测点的热电偶两串,一串测量共主面径向温度,另一串测量界主面径向温度,见图2所示。

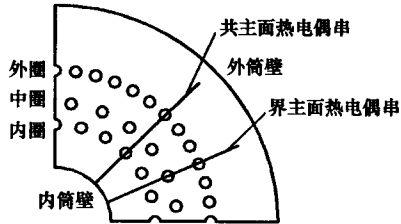


图2 热电偶串布置示意图  
Fig. 2 Disposing of thermocouple serials

### 1.3 试验材料及步骤

试验用土取自赵楼风井510~515 m深部黏土,参考取土时测定的原始土性参数,确定模拟试验土样含水量按18%进行重塑配制,保证土样的密实程度。试验步骤如下:

1) 准备工作。试验用土制备,测温传感器制作和标定,冻结系统和制冷系统保温,伺服液压加载系统调试等。

2) 装样。严格控制土体含水量,密封24 h,使水分扩散均匀。装样时分层人工夯实。

3) 测温传感器布置。当土样装至试验冻结壁中间层位开始布置埋设测温传感器,严格按照设计埋设,保证传感器位置准确,运行正常,并具有长时监测的能力。

4) 加载固结。模拟实际工程地层压力,启动液压加载系统,向围压室和内压室注入高压硅油,维持压力稳定,使土样在试验台中固结24 h。

5) 制冷冻结。开启制冷系统并循环酒精,调节设定制冷机冷媒温度,使试验模型冻结管温度符合实际工程各个时期的冻结温度,且满足流量要求。

6) 数据采集。实现温度的自动采集,保证特征面位置的传感器数据采集正常,监测温度场演变规律。

7) 试验数据处理。

## 2 试验结果及分析

试验温度场由自制热电偶测得,并由Datataker每10 min自动采集保存。测点测量内容包括冻结管进出口温度、冻结壁径向温度、井帮温度等。

### 2.1 冻结管进出口温度

在冻结系统的进出口处分别布置了3组单点热电偶,可测量内、中、外3圈冻结管的外壁温度,

对酒精与冻结管、冻结管与土体的传热有整体直观的认识。图3所示为中圈冻结管外壁进出口温度。

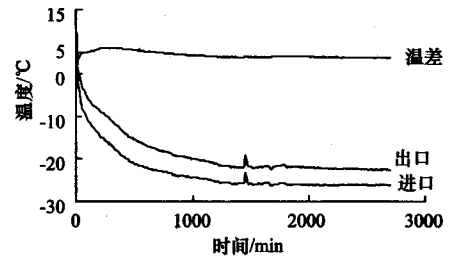


图3 中圈冻结管外壁进出口温度  
Fig. 3 Import and export temperature at the outside of the middle chilled pipe

由图3可知,冻结管进、出口温度变化趋势一致,即温度随时间逐渐降低,并于1600 min后基本稳定。冻结管进、出口温度分别稳定在-26℃和-22.5℃。冻结管外壁温度与循环酒精温度相差4℃,在合理范围之内。

### 2.2 特征面分析

特征面温度是冻结壁温度场中最主要的特征指标,它决定着冻结壁厚度、冻结壁平均温度,进而影响冻结壁的强度和稳定性,如图4所示。

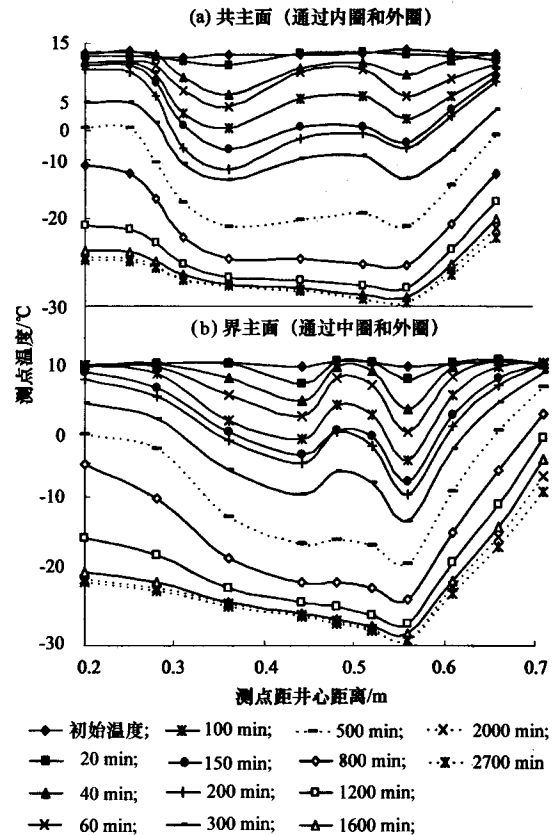


图4 特征面温度场  
Fig. 4 Temperature field of characteristic surfaces

由图4可见,共主面温度场和界主面温度场具有相同的温度变化趋势,表现为径向温度场随时间

变化首先呈波浪形曲线,最终演变为梯形曲线.依据曲线形状和温度分布,可将冻结壁厚度范围划分为 3 区:向内扩展区为井帮至内圈管圈径位置;内核区为内圈管至外圈管圈径范围;向外扩展区为外圈管圈径向外延伸至冻结锋面位置.

由图 4 可知,界主面中圈管和外圈管之间的部位在 140 min 时温度降至结冰温度,表明中圈管和外圈管环状冻结锋面开始相交;共主面内圈管和外圈管之间的部位在 180 min 时温度降至结冰温度,表明 3 圈管之间的环状冻结锋面两两开始相交,对应工程实际交圈时间 50 d 左右.

分析图 4a 冻结壁厚度范围内 3 个区域的温度曲线,冻结壁内核区温度下降迅速,向内扩展区和向外扩展区的温度下降速度与距离成反比,距离冻结管越远,温度下降越缓慢.1 600 min 后共主面温度曲线进入稳定阶段,冻结壁内核区的平均温度基本稳定在  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与冻结管入口温度相同;冻结壁的平均温度在  $-22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,与冻结管出口温度基本相同.说明特征面温度场进入稳定阶段后,冻结管冷负荷主要用于维护冻结壁向内扩展区和向外扩展区的温度.

根据图 4 曲线簇分析计算冻结壁厚度、冻结壁平均温度随时间变化关系,见表 2,图 5.

表 2 冻结壁温度场特征值随时间变化表  
Table 2 Variation of characteristic values of frozen wall

| 冻结时间/<br>min | 冻结壁厚度/m |      | 冻结壁平均温度/ $^{\circ}\text{C}$ |       |
|--------------|---------|------|-----------------------------|-------|
|              | 共主面     | 界主面  | 共主面                         | 界主面   |
| 200          | 0.29    | 0.27 | -2.8                        | -3.9  |
| 300          | 0.34    | 0.33 | -5.7                        | -7.3  |
| 500          | 0.41    | 0.46 | -12.3                       | -10.7 |
| 800          | 0.50    | 0.50 | -16.5                       | -15.7 |
| 1 200        | 0.52    | 0.52 | -20.7                       | -20.3 |
| 1 600        | 0.53    | 0.53 | -22.4                       | -22.4 |
| 2 000        | 0.55    | 0.54 | -22.7                       | -22.7 |
| 2 700        | 0.56    | 0.56 | -22.8                       | -22.8 |

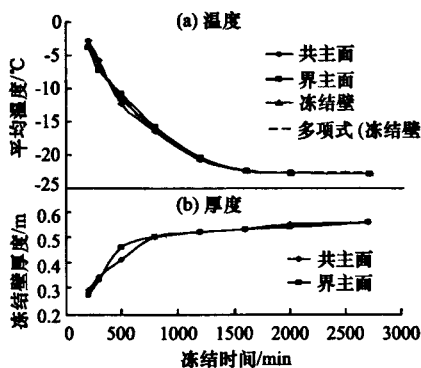


图 5 冻结壁温度、厚度变化曲线  
Fig. 5 Curves of temperature and thickness of frozen wall

从图 5a 可知,冻结壁平均温度随时间变化曲线分为 3 个阶段:0~800 min 为快速发展阶段,该阶段冻结壁平均温度随时间急剧降低;800~1 600 min 为拟稳定阶段,该阶段降温速度逐渐减小;1 600 min 后进入稳定阶段,温度基本保持不变.

冻结壁平均温度随时间变化的函数表达式,如式(1)所示.

$$T_1 = -3 \times 10^{-9} \tau^3 + 2 \times 10^{-5} \tau^2 - 0.0358 \tau + 2.932, \quad (1)$$

式中:  $T_1$  为冻结壁平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$  为冻结时间, min.

值得注意的是,物理模拟试验进行至 1 200 min 时的冻结壁平均温度为  $-20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与之相对应的,赵楼风井井筒冻结工程进行至 330 d 时的冻结壁平均温度实测值仅为  $-16.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .分析原因是实际冻结工程中冻结管穿越浅层表土时,由于大气温度变化引起冷量损失,造成冻结管外壁温度高于试验中冻结管外壁温度所致.冻结法凿井施工过程中,应加强冻结壁温度场的现场监测,以便对积极冻结期、井筒开挖时间等作出及时调整.

冻结壁厚度随时间变化曲线,如图 5b 所示.冻结壁厚度在 800 min 前呈线性增长趋势,800 min 时的冻结壁厚度为 0.5 m,对应实际工程为 10 m;800 min 至试验结束,冻结壁厚度基本稳定,最终值为 0.56 m(对应实际工程 11.2 m).将图 5a,b 进行比较后可知,在冻结壁平均温度快速发展阶段,冻结壁厚度也随之快速增长;而冻结壁平均温度进入拟稳定阶段后冻结壁厚度不再变化.即冻结壁厚度的发展在冻结壁平均温度快速发展阶段的末期结束.

### 2.3 冻结壁井帮温度

单点测量的还包括井帮温度,井帮温度是冻结壁温度场一个重要指标.井帮温度测量结果见图 6.

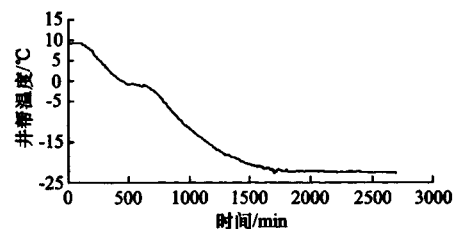


图 6 井帮温度变化曲线  
Fig. 6 Variation of shaft-lining temperature

图 6 中,井帮温度变化曲线在 470~650 min 内出现了一平缓的降温过程,这是由于井帮处土体水分结冰释放潜热,致使降温趋势变平缓.此时井

帮温度小于  $0^{\circ}\text{C}$ , 说明有压条件下土体结冰温度低于  $0^{\circ}\text{C}$ 。

井帮温度曲线在  $0\sim 1\ 600\ \text{min}$  内处于线性减小阶段, 每  $\text{min}$  减小约  $0.02^{\circ}\text{C}$ ;  $1\ 600\ \text{min}$  后稳定在  $-22^{\circ}\text{C}$  左右。对线性减小阶段的井帮温度进行线性拟合, 得到函数如式(2)所示。

$$T_2 = -0.0207\tau + 10.32, \quad (2)$$

式中:  $T_2$  为井帮温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

物理模拟试验中, 井帮温度在  $700\sim 900\ \text{min}$  时间范围内降至  $-9^{\circ}\text{C}$  左右。赵楼风井井筒冻结工程进行至  $240\ \text{d}$  时井帮温度降至  $-8.1^{\circ}\text{C}$ , 井帮温度实测数据与试验数据基本吻合。

由表 2 可知  $800\ \text{min}$  时, 冻结壁厚度为  $0.5\ \text{m}$  (实际为  $10\ \text{m}$ ); 冻结壁平均温度为  $-16.1^{\circ}\text{C}$ 。冻结壁在厚度达到要求时, 井帮温度也处于  $-8\sim -12^{\circ}\text{C}$  的合理范围内。

### 3 结 论

1) 深厚表土冻结壁温度场试验系统进行了加载后的 3 圈管冻结温度场试验研究, 得到了深厚表土多圈管冻结温度场分布及其演变规律。

2) 试验得到冻结壁重要参数如下: 3 圈冻结管交圈时间  $50\ \text{d}$ , 冻结壁厚  $11.2\ \text{m}$ , 冻结壁平均温度  $-22.8^{\circ}\text{C}$ , 拟合得到冻结壁平均温度随时间变化函数为  $T_1 = -3\times 10^{-9}\tau^3 + 2\times 10^{-5}\tau^2 - 0.0358\tau + 2.932$ , 井帮温度的变化函数为  $T_2 = -0.0207\tau + 10.32$ 。

3) 面温度场发展至拟稳定阶段初期 (即冻结  $800\ \text{min}$  后), 冻结壁厚度及平均温度、井帮温度满足井筒开挖要求。

4) 面温度场进入拟稳定阶段后, 冻结壁厚度基本稳定; 特征面温度场进入稳定阶段后, 冻结管冷负荷主要用于维护冻结壁向内扩展区和向外扩展区的温度。

### 参考文献:

- [1] 翁家杰. 井巷特殊施工[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [2] 张文. 我国煤矿冻结法凿井 40 年[C]//地层冻结工程技术和应用—中国地层冻结工程 40 年论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 1995: 53-60.
- [3] 王文顺, 王建平, 井绪文, 等. 人工冻结过程中温度场的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 388-391.

WANG Wen-shun, WANG Jian-ping, JING Xu-wen, et al. Experimental study of temperature field in course of artificial freezing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(4): 388-391.

- [4] 周晓敏, 苏立凡, 贺长俊, 等. 北京地铁隧道水平冻结法施工[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(35): 319-322.  
ZHOU Xiao-min, SU Li-fan, HE Chang-jun, et al. Horizontal ground freezing method applied to tunneling of Beijing underground railway system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(35): 319-322.
- [5] 纳斯诺夫, 苏普利克. 立井冻结壁形成规律[M]. 陈文豹, 伍期建, 梁惠生, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- [6] 徐士良, 汪仁和. 人工地层冻结温度场试验台设计和研究[J]. 低温建筑技术, 2004(5): 66-67.  
XU Shi-liang, WANG Ren-he. Testing frame design and research of temperature field of frozen artificial ground[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2004(5): 66-67.
- [7] 崔广心, 李毅. 有压条件下湿砂结冰温度的研究[J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 320-326.  
CUI Guang-xin, LI Yi. The study on freezing point of wet sand under loads[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(4): 320-326.
- [8] 崔广心, 杨维好, 李毅. 受荷载的湿土结冰温度变化规律的研究[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 321-327.  
CUI Guang-xin, YANG Wei-hao, LI Yi. A study on the relation between freezing point and load of wet soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(4): 321-327.
- [9] 崔广心. 厚表土层湿土结冰温度与冻结壁厚度确定的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(3): 1-4.  
CUI Guang-xin. Study on freezing point of wet soil and thickness determining of freezing wall in deep alluvium[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(3): 1-4.
- [10] 崔广心, 杨维好, 吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [11] 崔亦飞, 曹云乾. 简易热电偶的制作与标定[J]. 仪器仪表学报, 1994, 15(2): 187-189.  
CUI Yi-fei, CAO Yun-qian. Manufacturing and demarcating of the simple thermal couple[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1994, 15(2): 187-189.