

# 我国地层人工冻结工程技术的进展、应用和问题

苏立凡, 徐兵壮

(煤炭科学研究总院北京建井研究所, 北京 100001)

**摘 要** 近 20 多年来, 我国地层人工冻结工程技术取得了重要进展, 深井冻结基本杜绝了大规模断管事故的发生, 冻结法施工已成功推广应用到地铁等复杂的市政工程。本文最后指出了目前应用中尚存在的问题, 今后在冲积层大于 500m 情况下冻结法凿井及其他工程应用要进一步解决的问题。

**关键词** 冻结工程; 技术; 进展; 问题

**中图分类号** TD265

**文献标识码** A

## 0 引 言

我国于 1955 年引进地层人工冻结技术用于建设深厚冲积层中的矿山立井, 得到广泛应用, 我国已具备了建造冻深 500m 的能力和水平。目前有数个冻深达 480m 左右的冻结井在施工。20 世纪 80 年代后期以来, 深厚黏土层的冻结凿井技术取得长足进步, 基本克服了大批断管等重大事故的发生。在非矿山工程冻结法应用中, 近年来又进一步将垂直孔冻结方法应用于大型桥基工程、基坑护坡冻结工程和隧道盾构进出口工程等中。在冻结工程应用日益广泛的同时, 其应用基础研究也取得了一定的进展。本文主要阐述近 20 年来我国冻结工程技术的进展、应用和存在的问题。

## 1 冻土试验和试验标准

立井冻结壁设计和施工安全涉及冻土的单轴抗压强度、三轴剪切强度和相应的蠕变试验指标取值, 不仅同土性、温度等固有因素有关, 还同试样尺寸、形状、加载方式密切相关。为便于应用, 根据近年来对冻土蠕变试验结果的工程应用分析, 在最近制订“煤矿冻结法凿井技术规范”时, 明确规定采用下列修正的维亚洛夫蠕变方程:

$$\epsilon = A\sigma^B t^C \quad (\text{三轴蠕变方程类似})$$

式中,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  为试验参数;  $\epsilon$  为蠕变变形;  $\sigma$  为应力;  $t$  为时间。

除了上述应用研究外, 在其他冻结工程中所需的抗拉强度、弯曲强度、抗剪断强度及蠕变研究开展得并不多。建井所对上海污泥质黏土的准瞬时抗弯强度做了试验, 采用 KZJ-500 型水泥抗折仪做适当的改进后用于冻土试验, 三点式加荷, 试件尺寸为  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ , 试验中逐步加载, 9~12min 达到破坏, 结果表明在  $-10^\circ\text{C}$  下, 污泥质黏土在含水量为 25%~40% 时, 其抗弯强度为 2.8~3.2MPa, 试件均为断裂脆性破坏。

## 2 人工冻土结构物的承载研究和设计

我国对立井圆筒形冻结壁作了不少研究, 20 世纪 80 年代开始, 对均质和非均质的平面

冻结壁开展了大量的工作。考虑土层自重时弹性冻结壁的计算式,将井壁-冻结壁-地层作为一个系统,用摩尔-库伦准则研究问题,同样用摩尔准则研究弹塑问题,为避免解超越方程的麻烦,给出了冻结壁计算的拟合公式;研究冻结壁同带泡沫层外壁的互相作用问题,研究中将泡沫层作为弹性元件,将冻结壁分为塑性区和黏弹性区;把冻土蠕变黏性作为鲍埃丁-汤姆逊模型来研究平面冻结壁同井壁的互相作用。上述工作均把冻结壁作为均质体。而把平面冻结壁作为圆柱形各向异性体来处理,其轴面上有最低温度,内外缘温度为 $0^{\circ}\text{C}$ ,用对数形式表征温度分布,从而给出冻土特征随径向不同的参数值,分别用差分法或者列赫尼斯基的各向异性弹性理论方法对冻结壁应力场等作了研究,结果表明, $\sigma_{\theta}$ 和 $\sigma_z$ 最大值发生在轴面上,而不是发生在内缘处, $\sigma_r$ 的分布则同均质体近似,轴面上有最大的用于强度验算的当量应力值,故而尽管轴面上温度最低,冻土强度最高,但在一定条件下仍有可能最先进入塑性状态。

有限段高冻结壁的设计方法特别适合于深井和厚黏土层冻结工程。基于维亚洛夫的基本假设和以刃脚等为特征研究点的简化方法,我国研究者也提出了自己的一些结果。认为维氏在公式推导中,把待定函数 $f(r)$ 取为 $a/r$ 不合理,应取为 $f(r) = (r-a)/r$ ,并由此推导计算式。设定冻结壁位移函数如下

$$u = (a_0 + a_1 z + a_2 z^2) f(r)$$

式中 $a_0, a_1, a_2$ 为与最大位移 $U_{\max}$ 有关的系数。

以此来研究冻结壁位移问题。将冻结壁分为塑性和黏弹性区,通过研究冻结壁最大位移处的特殊情况,导得了有限高冻结壁承载计算式。模型试验的最大优点是更客观地反映实际,因此它适用于重要和困难的工程的前期研究,但费用高,尤其当试验的材料同实际差别较大时,其结果的正确性将受到质疑。此外模型试验量测到一般是位移、温度,对于土中应力、应变等只能反演推测。

有限元数值方法可以在更大范围、更复杂工况和更长时间流程中模拟冻结壁状况,且容易获得应力场、位移场等全面情况,但计算中遇到各种特性参数和本构方程这些复杂问题,使其结果可能出现大的偏差研究。以上研究都把问题处理成轴对称空间问题。用三维八节点实体元来处理以冻结管为核心的扇形体,进行有限元分析,其结果同一般轴对称单元有所区别。这些研究情况各异,但可得知如下一些有用结果:工作面下冻结壁超前变形不容忽视,常占总变形的主要部分;超前变形影响深度一般超过井筒直径,甚至很深(厚黏土层中);冻结壁的变形随掘进段高的增加成比例增大;加快掘砌速度可以减少变形;变形随时间而增加;在砂-黏土层界面处冻结管受到很大的剪切和弯曲的联合作用,而厚层黏土层的中间则有最大的弯矩作用;降低井帮温度,使冻土更多扩入直径可以有效减少冻结壁变形和超前变形的深度;冻结壁轴面部分 $\sigma_z, \sigma_{\theta}$ 最大,而 $\sigma_r$ 分布类同于平面均质圆筒。

对于实际立井的工程设计,经对国内外研究成果的对比和应用分析,已形成一套较为有效的实用方法:设计中首先根据地层的土层分布,选用最深一层砂层作为控制层,用无限段高弹塑性公式计算出一个初定的设计厚度,一般不大于 $6\sim 7\text{m}$ ,再用维亚洛夫有限高强度和变形计算式对各厚层黏土层的冻结壁作复核计算,通过调整段高和暴露时间等参数,使最终选定的冻结壁厚度满足工程的安全等各方面要求。

### 3 存在的问题

随着冻结法应用向深度和广度的拓展,出现如下新的问题需要解决。

① 冻土的抗拉、抗弯、抗剪断的特性研究和试验方法研究需要加强,以满足隧道水平冻结等复杂工程的需要。

② 超深井冻结工程技术的研究是一项大的系统工程,涉及深土条件的冻土特性研究,超深井的井壁结构、冻结壁的优化设计,掘进技术,快速超深孔打钻技术,新型冻结管技术以及井壁材料等,以确保像山东巨野等矿区超深冻结井在冲积层 450~600m 条件下能安全、经济地建成。

③ 开展工程冻胀、融沉特性及防治技术的研究。城市地下工程应用冻结法,最大的问题是冻胀、融沉,它不仅使地层发生额外变形,而且使已有建筑物受到额外的冻胀力和融沉作用,保证其安全是顺利应用冻结法的前提条件之一。但这方面工作进行得还不多,更没有可借鉴的经验方法和理论分析方法,必须大力加强。

④ 大力开展现场量测研究,以获得第一手资料,积累数据资源,指导工作。我国在 20 世纪 60~80 年代曾对冻结立井开展大规模的现场量测,取得了大量有用资料,对于解决冻结井的有关技术问题和分析事故起到了不可替代的作用,但进入 20 世纪 90 年代后,现场量测研究进行得很少,致使在建设超深冻结井时无量测资料可借鉴。理论分析和数值分析虽有一定的作用,但仍感缺乏实践的支持,使设计和施工时心中无底。近年来已开展了不少水平冻结工程和其他市政工程,但现场量测资料除位移、温度有一些数据外,对于冻胀力、结构内力等几乎没有量测数据。现场量测研究需要资金投入和各方面合作,难度大而又非常必要,必须解决和加强。

⑤ 疏水沉降地层中冻结井壁的研究,近十多年来在华东地区已有近 50 个冻结井井壁在成井若干年后发生破坏事故,严重影响安全 and 生产,对此问题已作了大量研究,其原因是地层降水产生负摩擦力作用及季节性温度应力诱导作用,成因已明,但在新建井时,如何合理设计井壁结构和合理选取作用力仍需开展大量现场和理论研究。

#### 4 结 语

人工冻结技术用于建设,得到广泛应用,我国已具备了建造冻深 500m 的能力和水平。目前有数个冻深达 480m 左右的冻结井在施工。深厚黏土层的冻结凿井技术取得了长足的进步,基本克服了大批断管等重大事故的发生。与此同时,随着城市地铁等市政工程日益增多,遇到在建筑物下、江河下、桥梁下和交通要道下施工处于软弱地层中地下工程的困难工况,给冻结法的拓广应用和技术发展提出了新的要求。对冻土的研究有十分广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 苏立凡等. 地层冻结法在我国的应用和展望. 煤矿建设科研 40 周年论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 1997
- [2] 虞相等. 我国地层冻结技术的新发展. 地层冻结工程技术和应用论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 1995
- [3] 路耀华, 崔增祁. 中国煤矿建井技术(冻结法篇). 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995
- [4] 徐兵壮, 苏立凡. 上海地铁长沙路泵站地下冻结施工和变形. 地层冻结工程技术和应用论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 1995
- [5] 张文. 我国煤矿冻结法凿井 40 年. 地层冻结工程技术和应用论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 1995

- [6] ISGF Working Group 1. Freezing methods for frozen soils. Ground Freezing 91. Rotterdam: Balkema, 1991
- [7] ISGF Working Group 2. Frozen ground structures—Basic principles of design. Ground Freezing 91. Rotterdam: Balkema, 1991
- [8] 沈忠言等. 轴向压裂法测定冻土抗拉强度初步研究. 冰川冻土, 1995, 17 (1)
- [9] 沈忠言等. 冻结黄土拉伸蠕变特性. 冰川冻土, 1995, 17 (2)
- [10] 杨平. 深井冻结壁变形计算的理论分析. 淮南矿业学院学报, 1994, 14 (2)
- [11] 郁楚侯等. 冻结壁三轴流变变形模拟试验研究. 煤炭学报, 1992, 17 (3)
- [12] 吴紫汪等. 人工冻结壁变形的模型试验. 冰川冻土, 1993, 15 (1)
- [13] 汪和仁. 黏土冻结壁的变形特性和计算. 冰川冻土, 1996, 18 (1)
- [14] 翁家杰等. 冻结壁弹塑性反演分析. 中国矿业大学学报, 1991, 11 (1)
- [15] 方兴华. 冻结壁稳定性和冻结管曲率试验法. 淮南矿业学院学报, 1994, 14 (1)
- [16] Y. Zhang, etc. Deformation of artificially frozen shafts during excavation. Ground Freezing 94. Rotterdam: Balkema, 1994
- [17] 苏立凡. 对我国建设 700m 冻结立井的技术要素分析. 地层冻结工程技术和应用论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 1995

## Recent Evaluation Appliance and Problem of Manpower's Frozen Soil Engineering Technology of Our Country's Stratum

SU Li-fan, XU Bing-zhuang

(Beijin Jianjin Graduate School of Coal Scientific Research Institute, Beijing 100001)

**Abstract** Twenty years newly, manpower's frozen soil engineering technology of our country's stratum made great progress. Frozen soil engineering technology of deep well eliminated many accidents of broken pipe. Frozen soil engineering technology was applied in complex civil project, for example, underground. This text pointed out using problem at present and for the future should solve problem of more than 500m rushing stratum and other engineering appliance.

**Keywords** frozen soil; engineer; technology; progress; problem