

城市地下工程 人工冻结法理论与实践

杨平 张婷 著



科学出版社

城市地下工程人工冻结法 理论与实践

杨 平 张 婷 著

江苏高校优势学科建设工程资助项目出版资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以南京、苏州、宁波、无锡、上海等长江三角洲地区城市轨道交通施工过程中遇到复杂地质环境条件下施工难题为背景,以软弱地层地下工程冻结法施工理论与实践为主线,采用理论研究、室内试验、数值模拟、方案比选、实测分析相结合的综合研究方法,全面阐述了城市地下工程,特别是长江三角洲地区城市轨道交通建设中人工冻结法施工的理论性与关键技术。全书共分九章,包括人工冻结法基础理论,浅表土人工冻土物理力学性能,人工冻结数值模拟理论与方法,盾构始发与接收端头人工冻结加固技术与应用,地铁联络通道人工冻结施工技术与应用,盾尾刷渗漏防治技术,水泥土加固抑制冻胀融沉技术,人工冻结法施工监测技术,特殊地下工程人工冻结法应用。

本书可供从事城市轨道交通等城市地下工程施工、科研、设计与建设管理技术人员参考,也可作为高等院校教师教学科研用书或研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市地下工程人工冻结法理论与实践/杨平,张婷著. —北京:科学出版社, 2015.3

ISBN 978-7-03-043753-2

I. ①城… II. ①杨… ②张… III. ①城市建设-地下工程-冻结法施工 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 053585 号

责任编辑:杨 琪 程心珂/责任校对:胡小洁

责任印制:赵 博/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:22 1/2

字数:518 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着我国经济的快速增长，城市轨道交通建设也进入了大发展时期。地铁的造价不菲，每公里至少需要四五亿的投资，一个城市地铁项目所需的资金就能达到几十亿，甚至几百亿。截至 2013 年底，全国 17 个城市共建成 67 条轨道交通线路，总里程约 2060 公里，且在建规模仍在明显增大。已建成或已开工建设地铁的城市有北京、天津、香港、上海、广州、南京、深圳、大连、武汉、重庆、成都、杭州、沈阳、西安、青岛、哈尔滨、苏州等 20 多个。国务院已批准了 36 个城市的轨道交通近期建设规划，共建 197 条线路约 5373 公里，未来几年的年均建成里程可达 500 公里以上。目前，中国在世界地铁排行榜（按地铁运营里程排名）中位列第三位，仅在美国和日本之后；并且上海、北京分别以 459 公里和 439 公里进入世界城市轨道交通运营里程前十位。我国城市轨道交通规模将在 2020 年左右超过美国，成为全球规模最大、发展最快的轨道交通建设和运营市场，前景十分广阔。

然而，现阶段我国城市地铁隧道多为浅埋式，城市大规模地下空间的开发，使许多软弱地层地铁隧道会建在原有地下结构物附近，即处于复杂环境下（软弱地层、浅埋、建筑构筑物密集）。在这种复杂环境下，盾构始发与接收，联络通道、车站出入口暗挖等的施工存在很大风险。盾构隧道端头土体加固是盾构机安全始发与接收的重要保证，而隧道端头正是盾构法施工隧道的事故多发地带，因此盾构始发与接收已成为盾构法施工中风险最大的环节，选择合理的端头加固方法可以在很大程度上保证盾构法隧道顺利施工。盾构隧道的联络通道常采用竖井开挖或隧道内开孔暗挖法来施工，施工前也需要对开挖面的软弱地层进行加固。盾构隧道端头及联络通道加固方法的选取主要取决于地质情况、地下水、覆盖层、盾构机直径、盾构机型、联络通道的埋深、施工环境等因素，目前常用的加固方法有高压旋喷法、深层搅拌法、冻结法、注浆法等。当加固范围内含有富水砂层时，普通加固法难以满足加固质量，常需采用人工冻结法。该工法技术可靠、对地层条件要求宽、施工环保，是其他地层加固方法难以应用时的最终解决方案。

人工冻结法是利用人工制冷技术，使地层中的水结冰，把天然地层变成冻土，增强其强度和稳定性，隔绝地下水与地下工程的联系，以便在冻结壁的保护下进行地下工程掘进的一项施工技术。其作为临时加固地基的施工方法，已被广泛应用于地铁隧道盾构始发与接收端头加固、联络通道加固施工、隧道抢险及其他抢险工程等城市地下工程施工中。但是，目前人工冻结理论还不能完全满足多样性的工程实际所需，因此，本书以南京、苏州、上海、无锡、宁波等长江三角洲地区典型土层为背景，研究和介绍了人工冻结法基础理论、浅表土人工冻土物理力学性能、人工冻结数值模拟理论及方法、盾构始发与接收端头人工冻结加固技术与应用、地铁联络通道人工冻结法施工技术与应用、盾尾刷渗漏防治技术、水泥土加固抑制冻胀融沉技术等，以期解决复杂环境下城市地下

工程人工冻结理论与应用中的关键技术与问题,为我国大规模地铁建设人工冻结技术的应用提供理论与技术支撑。

具体来说,本书以南京、苏州、上海、宁波、无锡等长江三角洲地区城市轨道交通施工过程中遇到的复杂地质环境条件下施工难题为背景,以软弱地层地下工程冻结法施工的理论与实践为主线,采用理论研究、室内试验、数值仿真、方案比选、实测分析相结合的方法进行了研究,主要包括以下内容:①人工冻结法基础理论;②浅表土人工冻土物理力学性能;③人工冻结数值模拟理论与方法;④盾构始发与接收端头人工冻结加固技术与应用;⑤地铁联络通道人工冻结施工技术与应用;⑥盾尾刷渗漏防治技术;⑦水泥土加固抑制冻胀融沉技术;⑧人工冻结法施工监测技术;⑨特殊地下工程人工冻结法应用。

本书依托的工程背景得益于南京地铁建设有限公司余才高董事长、苏州轨道交通公司董朝文副总经理、宁波轨道交通有限公司陈斌副总经理、常州轨道交通有限公司胡导云副总经理等多位领导的支持和关心;在人工冻结施工和监测过程中也获得了上海机械化施工集团有限公司、上海隧道股份有限公司、中铁隧道集团有限公司、中铁14局、中铁19局、江苏建基集团有限公司、中煤隧道股份有限公司等在南京、苏州、宁波、无锡的多个项目部的帮助。本书的相关研究还得到了国家自然科学基金项目“人工冻土与混凝土结构相互作用接触面变形机理与本构模型研究”(51278251)、“人工冻融软土微观结构与融沉特性内在机理研究”(51478226);苏州市科技局苏州轨道交通专项课题“盾构隧道端头与联络通道加固方式及安全性研究”(ZXJ0802);南京地铁公司科研项目“南京地铁大直径隧道穿越长江进出洞技术及盾尾渗漏防护与控制”(D3-xy01-0001-1206);住建部科研项目“人工冻结加固盾构隧道端头关键技术与应用研究”(2014-K3-029);宁波地铁科研项目、中铁隧道局委托科研项目、中铁三局委托科研项目等的资助。同时感谢江苏高校优势学科建设工程资助项目对本书出版的资助。特别要感谢的是王效宾、胡俊、赵联桢、何文龙、袁云辉、覃伟、陈成、刘元昆、王杰、鲍俊安、王许诺、贺俊、张翔宇、贲志江、孙谷雨、朱峰、蒋大有等研究生在博士、硕士在读期间所做的相关研究工作,感谢刘贯荣、庄惠敏、王升福、陈瑾、何冬、沈阳研究生为本书相关文字、图表所做的大量工作,同时也要感谢南京林业大学岩土与地下工程研究团队的各位同仁为本书所做的贡献。本书引用了大量的发表于各类期刊和出版专著的资料成果,并将引用的文章和专著列入参考文献中,但难免会有遗漏,敬请谅解,并在此表示感谢!

由于作者水平所限,书中难免存在不足和疏漏之处,恳请读者批评指正。

杨 平 张 婷

2014年10月

目 录

前言

1 人工冻结法基础理论	1
1.1 概述	1
1.1.1 人工冻结法的应用现状	1
1.1.2 人工冻结法的研究现状	5
1.1.3 人工冻结法的特点	9
1.1.4 人工冻结法的发展趋势	10
1.2 人工冻结制冷原理与设备	11
1.2.1 常用的人工制冷方法	11
1.2.2 盐水制冷人工冻结系统	14
1.2.3 盐水冻结设备	15
1.3 人工冻结法制冷设计	20
1.3.1 氟利昂制冷系统	20
1.3.2 盐水循环系统	22
1.3.3 冷却水循环系统	26
1.4 冻结壁参数设计计算	28
1.4.1 冻结壁厚度与平均温度设计	28
1.4.2 冻结壁的形成与解冻	30
1.4.3 冻结壁形成有效厚度计算	32
1.4.4 冻结壁形成平均温度计算	35
2 浅表土人工冻土物理力学性能	39
2.1 长江三角洲地区软弱地层简介	39
2.2 人工冻土热物理特性	40
2.2.1 土体起始冻结温度	40
2.2.2 导热系数	43
2.2.3 比热容	47
2.2.4 导温系数	48
2.3 人工冻土冻胀融沉特性	48
2.3.1 土体冻胀基本理论与试验方法	48
2.3.2 土体冻结过程中的水分迁移	50
2.3.3 不同因素对土体冻胀特性的影响	54
2.3.4 土体融沉基本理论与试验方法	58
2.3.5 不同因素对土体融沉特性的影响	60

2.4	人工冻土强度特性	66
2.4.1	冻土应力-应变关系	66
2.4.2	冻土单轴抗压强度特性	68
2.4.3	冻土三轴剪切强度特性	72
2.4.4	冻土抗折强度特性	79
2.5	人工冻土蠕变特性	83
2.5.1	蠕变试验设备与方法	83
2.5.2	蠕变曲线特征及其蠕变参数	83
2.6	人工冻土动力学特性	85
2.6.1	动力参数测试方法	85
2.6.2	冻土动应力-应变关系	86
2.6.3	冻土动力学基本参数	88
2.6.4	冻土声波特性	90
2.7	人工冻土接触面剪切特性	94
2.7.1	人工冻土剪切试验设备	94
2.7.2	人工冻土与结构接触面单剪特性	96
2.7.3	人工冻土与结构接触面循环剪切特性	97
3	人工冻结数值模拟理论与方法	100
3.1	冻结温度场数值模拟理论与方法	100
3.1.1	温度场基本概念	100
3.1.2	温度场数值模拟基本理论	101
3.1.3	温度场计算流程	111
3.2	位移场数值模拟理论与方法	111
3.2.1	冻融土体的应力应变关系	112
3.2.2	冻胀位移场数值模拟理论与方法	114
3.2.3	融沉位移场数值模拟理论与方法	118
3.3	ADINA 软件在人工冻结数值模拟中应用	121
4	盾构始发与接收端头人工冻结加固技术与应用	128
4.1	盾构始发与接收端头加固方式比选	128
4.2	盾构始发与接收端头加固范围确定	128
4.2.1	化学加固范围确定	129
4.2.2	水平杯型冻结加固范围确定	134
4.3	盾构始发与接收端头冻结加固设计与施工	140
4.3.1	冻结设计一般规定	140
4.3.2	水平杯型冻结设计与施工	141
4.3.3	垂直冻结设计与施工	150
4.4	盾构始发与接收端头冻结加固数值模拟	155
4.4.1	水平杯型冻结温度场数值模拟	155

4.4.2	水平杯型自然解冻温度场数值模拟	163
4.4.3	水平杯型强制解冻温度场数值模拟	166
4.4.4	水平杯型融沉位移场数值模拟	172
4.5	大直径盾构隧道端头冻结加固工程实例	179
4.5.1	工程概况	179
4.5.2	盾构始发重、难点	180
4.5.3	盾构接收方式与技术	181
4.5.4	冻结加固方案	185
4.5.5	实测方案	185
4.5.6	实测结果分析	187
5	地铁联络通道人工冻结施工技术与应用	195
5.1	联络通道加固与开挖方法及对比分析	195
5.1.1	联络通道明挖法	195
5.1.2	联络通道暗挖法	195
5.1.3	联络通道竖井暗挖法	196
5.1.4	各种工法技术经济分析比较	197
5.1.5	联络通道加固措施	198
5.2	联络通道人工冻结设计与施工	199
5.2.1	联络通道冻结设计	199
5.2.2	联络通道冻结加固施工	209
5.3	联络通道冻结加固实例	214
5.3.1	工程概况	214
5.3.2	冻结加固方案	215
5.3.3	测点布置	216
5.3.4	数值模拟与实测结果分析	218
5.4	联络通道冻结加固敏感因素分析	223
5.4.1	不同因素对冻结温度场的影响	223
5.4.2	不同因素对冻胀位移场的影响	224
6	盾尾刷渗漏防治技术	228
6.1	盾尾渗漏与防治技术分析	228
6.1.1	盾尾渗漏原因分析	228
6.1.2	盾尾渗漏预防措施	231
6.1.3	盾尾渗漏封堵技术分析	233
6.2	盾尾刷更换止水方案比选	233
6.2.1	化学注浆止水	234
6.2.2	冻结法止水	234
6.2.3	止水方案对比分析	237
6.3	盾尾刷更换冻结止水方案设计与施工	240

6.3.1	水土压力计算	240
6.3.2	冻结加固体厚度确定	240
6.3.3	冻结参数设计	241
6.3.4	测温系统布置	245
6.3.5	强制解冻设计	245
6.3.6	盾尾刷更换条件	245
6.3.7	盾尾刷更换冻结施工工艺	245
6.4	盾尾刷更换液氮冻结温度场数值模拟研究	246
6.4.1	计算说明	246
6.4.2	管片直接打孔有限元计算结果分析	247
6.4.3	管片直接打孔冻结温度场影响因素分析	250
6.4.4	预制冻结管有限元模型计算结果分析	253
6.5	液氮冻结人工强制解冻温度场数值分析	257
6.5.1	计算说明	257
6.5.2	人工强制解冻温度场影响因素敏感性分析	257
6.6	工程应用	261
6.6.1	工程概况	261
6.6.2	冻结方案设计	262
6.6.3	液氮冻结施工工艺	264
6.6.4	温度场实测分析	266
7	水泥土加固抑制冻胀融沉技术	272
7.1	冻结水泥土热物理特性	272
7.1.1	水泥土起始冻结温度	272
7.1.2	水泥土导热系数、容积热容量	274
7.2	水泥土冻胀、融沉特性	276
7.2.1	水泥土冻胀特性	276
7.2.2	水泥土融沉特性	281
7.2.3	水泥土冻融前后压缩性	282
7.3	冻结水泥土强度与蠕变特性	284
7.3.1	冻结水泥土单轴抗压强度	284
7.3.2	冻结水泥土抗折强度	289
7.3.3	冻结水泥土蠕变特性	290
7.4	盾构端头垂直冻结水泥土加固数值模拟研究	292
7.4.1	工程背景	292
7.4.2	计算说明	293
7.4.3	数值模拟结果分析	295
7.4.4	人工垂直冻结水泥土改良法工艺参数研究	303

8 人工冻结法施工监测技术	311
8.1 监测项目及方法	311
8.1.1 冻结孔及冻结管质量控制	311
8.1.2 温度场监测	312
8.1.3 冻结压力监测	316
8.1.4 变形监测	317
8.1.5 其他监测项目	320
8.2 信息化监测	322
8.2.1 信息化监测微机管理软件	322
8.2.2 监测信息化发展	323
8.3 不同冻结工程的监测要求	324
8.3.1 盾构端头冻结法加固监测	324
8.3.2 联络通道冻结法监测要求	325
8.3.3 盾尾刷更换冻结止水监测	328
9 特殊地下工程人工冻结法应用	330
9.1 薄富含水层隧道矿山法施工工程	330
9.1.1 工程背景	330
9.1.2 冻结止水方案	331
9.2 车站出入口矩形水平冻结加固工程	332
9.2.1 工程背景	332
9.2.2 全断面注浆管棚与矩形水平冻结联合加固方案	333
9.3 南水北调穿黄工程退水洞	336
9.3.1 工程背景	336
9.3.2 冻结方案	336
9.4 液氮抢险、灾害修复工程	337
9.4.1 液氮抢险工程	337
9.4.2 液氮修复工程	339
参考文献	344

1 人工冻结法基础理论

1.1 概 述

人工冻结法是利用人工制冷技术使地层中的水结冰形成冻土,隔绝地下水与地下工程的联系,在冻结壁保护下进行地下工程施工的地基处理方法。作为一种临时地基加固方法,目前已被广泛应用于地铁隧道盾构始发与接收端头加固、联络通道加固施工、隧道抢险及其他抢险工程等城市地下工程施工中。

1.1.1 人工冻结法的应用现状

1. 人工冻结法的起源

19 世纪初,西伯利亚人在寻找和开掘金矿过程中利用寒冷季节挖掘矿井,冬天结束后就停工,等到来年冬天接着开挖,但施工到一定深度时土层已不是冻土,伴随出现了渗水、塌陷等现象。这是人类第一次在工程中利用天然冷量,也是在冻土利用方面迈出的第一步。

1862 年,英国南威尔士矿山首次用人工冻结法加固地层解决了松软含水地层立井开凿时的塌陷问题;1875 年,世界上第一台活塞式制冷机的问世成为人工冻结法被广泛应用的一个里程碑,这台机器选择了液态氨作制冷剂;1883 年,德国工程师 F. H. Poetch 在阿尔巴里德煤矿采用冻结技术进行 103m 深的立井施工,首次提出人工冻结法施工原理,同时获得“冻结法凿井技术”专利。冷冻机的出现为人工冻结法适用于特殊条件(矿井、深基坑、高含水 and 流砂地层中的地铁、地下隧道和输水管道建筑等)施工开辟了美好前景。

2. 国外人工冻结法的应用与发展

前苏联、德国、丹麦、法国、日本、美国、西班牙等国研究和应用人工土冻结技术起步较早,相继应用人工冻结法完成了许多地下工程施工,积累了大量成功经验。

20 世纪 60~80 年代前苏联采用人工冻结法对地铁、矿井和其他工业建筑施工达 200 余例,如某污水泵站冻结孔圈径 69m,冻结深度 60m,矿井开挖围护深度已达 800m。世界主要国家的最大冻结深度见表 1.1^[1]。日本从 1962 年开始使用人工冻结法,随后将该项技术推广到通过河流、铁路及其他构筑物下的隧道工程,支撑明挖的墙体工程和其他地下工程。东京环 7 线二号调节水仓盾构隧道,圆形工作井深 60m,端头冻结加固面直径达 28.1m,确保了直径为 13.94m 的大型泥水加压平衡盾构顺利被接收;大阪东南部的排水隧道,直径 6.5m,长 8.5km,分 5 个工区掘进,采用地下或海下对接,由于不开凿地面立井,于是应用冻结法加固,并取得了成功;凯横运河下盾构贯

通,采用水平冻结法成功穿越了泥质细砂地层;名古屋某两地铁隧道盾构始发与接收均采用了垂直冻结加固端头地层,连接两个不同直径的电力隧道时也成功应用了人工冻结法^[2]。

表 1.1 主要国家最大冻结深度

	英国	加拿大	波兰	比利时	德国	前苏联	法国	中国	荷兰
最大冻深/m	930	915	725	638	628	620	550	737	338

1991年西班牙瓦伦西亚修建地铁时,为保证干燥的施工环境,采用传统的水泥土搅拌法、高压喷射注浆法、化学注浆法等常规地基处理方法后,均未取得满意效果,后经人工冻结法处理地下水,有效避免了涌水发生^[3];美国威斯康星州密尔沃基市施工一段50m深竖井,开挖深度大,加之地下水不利影响,传统支护施工出现了很多问题,后来采用人工冻结法形成一个直径6.1m的冻土围堰和三个相邻的柱状冻土槽,确保了工程顺利进行^[4]。1994年,德国杜塞尔多夫(Dusseldorf)市火车站附近扩建地铁,对三段长40m的地铁隧道均采用了人工冻结法进行围护,其中一条钻凿面积45m²的隧道冻土墙厚度为1.5m,另一条钻凿面积96m²的隧道冻土墙厚度为2.2m,施工阶段同时对附近建筑基础进行了沉降观测,最大沉降量仅为13mm^[5]。1994年到1995年间,德国在横穿铁路的下水管道等几项施工中也成功地利用了液氮人工冻结法^[6]。1997年,在挪威奥斯陆海湾海底隧道施工中,运用冻结法成功穿越了松散地层,保证了该工程顺利完工^[7]。

人工液氮冻结用于加固地层在国外始于60年代,已报道的液氮冻结工程实例中,较著名的有德国慕尼黑地铁、美国肯塔基州大型机械经过Green River 700m的冲积平原等;未见正式报道的有巴黎塞纳河地铁、意大利比萨斜塔纠斜等^[8]。1991年德国艾斯巴赫(Eisbach)河底三个平行隧道施工时出现土体坍塌,随后使用了液氮冻结,而后在横穿铁路的下水管道等几项施工中也成功利用液氮冻结法,并开发出自动控制系统^[9]。

3. 国内人工冻结法的应用与发展

1955年,立井冻结法凿井技术从波兰引进,开滦林西煤矿风井建成的第一口立井在中国开创了人工地层冻结法的先河。随后人工冻结法很快在采矿工程中得到推广,河北、安徽、江苏、山东、河南、山西、辽宁、黑龙江、内蒙古、吉林等多省区均有工程采用了这种技术。目前,中国已成为世界上用冻结法凿井穿过表土层较厚的国家之一,成功解决了700多米冲积层深井冻结的冻结壁、井壁设计等关键技术问题^[10]。

1) 矿山工程

目前,我国已采用人工冻结法开凿了600多个井筒,总长度超过70km。我国冻结法凿井最大冻结深度已达737m,成为世界上用冻结法凿井穿过表土层最厚的国家之一,冻结法施工技术达到世界领先水平。

2) 桥梁工程

江苏润扬长江公路大桥南汉悬索桥南锚碇基础位于江边软土地基上,开挖总方量超过 10万 m^3 ,施工中为解决水土压力和渗流问题,通过人工冻结在基坑四周形成厚 1.3m 、深 40m 的冻结壁,同时在冻结壁内侧浇筑 140 根钻孔灌注桩,该组合支护结构是我国岩土工程施工方法的一项技术创新,首次有效结合冻结法和排桩法工艺,成为世界建桥技术上的历史性突破^[11]。

安徽凤台淮河大桥为一座斜拉桥,主桥墩分设于东西两岸,沉井法施工中,当两井筒沉至底部垂深 24m 左右时,均发生工作面四周涌砂涌水事故,最终选用人工冻结法进行了封水处理^[12]。

江西湖口大桥桥址处地质、水文、气候条件十分恶劣,水下基础施工难度很大,其中东塔基础覆盖层为软弱松散冲击层,厚度达 19m 之多,土质以淤泥和淤泥质亚黏土为主,基岩主要由石英砂岩组成,岩性坚硬脆,裂隙较易发育。经过对桩基设计构造特点、桥址地质水文情况及施工设备能力进行综合分析后,最终采用冻结法人工挖孔灌注桩方案进行了桩基施工^[13]。

3) 地铁隧道工程

(1) 垂直冻结

南京地铁 1 号线张府园车站南端头井采用地下连续墙围护、深层搅拌桩以及压密注浆加固,盾构始发凿除洞门过程中出现涌砂险情,采用双液浆堵水后仍有流砂,引起局部地面沉降;后采用垂直冻结壁,成为南京首次实施地下工程人工冻结法的范例^[14]。南京地铁 10 号线越江段盾构开挖直径 11.64m ,接收端头处于富水砂性土层中,由于水压高、工程地质条件差,经过比选,选用了“三轴深层搅拌桩+高压旋喷桩+垂直冻结+应急降水+水中接收”的方式。随着软土区盾构隧道数量增多,“化学加固+垂直冻结补强”的实例越来越多。

(2) 水平冻结

水平冻结无论在工艺过程、作业要求还是冻结壁受力都有着同垂直冻结截然不同的特点。1994 年上海地铁 1 号线联络通道泵站应用人工冻结施工成为我国地铁建设施工中第一次在联络通道中应用人工冻结技术。联络通道施工中开挖土方量不大,在类似粉细砂、淤泥质粉质黏土、粉质黏土等地层中,最大威胁来自地下水,当其他工法加固效果不明显或者无法成功加固时,人工冻结法成为施工联络通道的首要选择,这种方法在南京地铁、苏州轨道交通、上海地铁联络通道施工中已被广泛成功应用。南京地铁 2 号线中和村站(现雨润大街站)—油坊桥站盾构井 1# 联络通道地处粉质黏土与粉砂交互层,地下水丰富,线间距 20m ,净距 13.8m ,施工难度较大,后采用“双隧道打冻结管,中间交叉 1.5m ,每条隧道内各自安放冷冻机组同时冻结”的施工方案顺利完工^[15]。1998 年北京地铁复八线大北窑车站(现国贸站)南隧道基于技术与经济比较,完成了我国首例水平冻结施工,水平冻结距离 45m ,初步证明了水平冻结是暗挖隧道软弱含水地层中封水和加固土体的有效方法^[16]。

随着冻结技术发展,水平冻结逐渐被用到盾构始发与接收端头加固中。人工冻结法进行端头加固时,根据地层条件可以直接加固(提高强度、封水性),也可以与化学加固法联合加固(冻结加固体承担封水作用,化学加固体发挥强度作用),具体选择何种加固方法,与周边环境复杂程度、土层条件、地下水状况有关。

南京地铁2号线西安门站—大行宫站区间隧道,盾构始发地所处中山东路道路和龙蟠中路属城市干道,车流量、人流量较大,受地面环境限制,无法从地上进行土体加固施工,后采用地下水平杯型冻结法加固土体。南京地铁2号线集庆门车站盾构端头曾采用三轴搅拌桩、高压旋喷桩处理,通过探孔发现隧道底板以下砂层中仍然有水、砂涌出,最终采用水平杯型冻结法加固^[17]。苏州轨道交通2号线Ⅱ-TS-05标平河路站—苏州火车站站区间盾构进出洞端头地基加固中,靠近车站端头采用单排 $\phi 800@600\text{mm}$ 双管旋喷桩,搅拌桩采用三轴 $\phi 850@600\text{mm}$,后因不具备施工降水井条件于是也采用水平冻结加固^[18]。无锡地铁1号线胜利门站—三阳广场站盾构区间主要在老城区中心穿行,穿新雅都大酒店、中山北路改造5号房、侧穿中山北路4号房并转向中山路,周边环境极其复杂,盾构始发与接收均采用了水平冻结加固。

(3) 盾尾刷更换

盾构机长距离掘进时,有时出现盾尾密封油脂加注量不足或盾尾密封刷磨损致使盾尾刷失效,由于正常掘进时盾尾刷位于管片背后而无法更换,可预见情况下需提前选择停机位更换盾尾刷。更换盾尾刷时应确保管片拆卸后盾尾的密封、止水性能良好,封堵地下水仍以浆液凝固与人工冻结为主,前者以喷浆并通过增大同步注浆量来缩短浆液凝固时间为依据封堵地下水,但化学加固体的不均匀性使盾尾漏浆涌水现象不能被有效克服,风险大;而人工冻结壁的封水性能则相对优越,已被工程验证。杭州庆春路过江隧道两台盾构进入江底承压水层后,均出现不同程度的盾尾漏浆涌水现象,采用液氮冻结法封堵盾尾外侧地下水,并在冻结壁(设计厚度1.8m,平均温度 -15°C)保护下更换并增设盾尾刷,这种长距离液氮冻结用于高承压含水层中更换盾尾刷在国内尚属首次^[19]。

4) 抢险、修复工程

世界地铁建设史上也曾发生过隧道修建过程中涌水、坍塌等隧道损毁事故,有的采用施工难度较小的“改线修复”方案,但很多情况下受规划线路影响须进行隧道原位修复。近年来,液氮冻结多被用在抢险、修复工程中,因为液氮制冷土体冻结的发展速度是普通盐水制冷土体冻结速度的5~10倍。意大利AgriSauro盾构隧道掘进到2.63km时,盾构后方顶部衬砌中涌砂达 6000m^3 ,注浆法抢险失败后最终通过液氮冻结抢险成功^[20]。南京地铁2号线中和村站—元通站右线盾构到达元通站150m处出现突发性涌水、涌砂,造成部分已成型隧道局部坍塌,对接段采用液氮冻结形成塞子工程,保证基坑和隧道在排水清淤时冻结体能够完全封水并抵抗开洞口的水土压力,同时隔断完好隧道与外部土体之间联系。上海轨道交通4号线浦东南路站(现塘桥站)—南浦大桥站区间—联络通道施工时发生流砂事故,导致隧道塌陷,原位修复连接段采用了人工冻结加固暗挖施工^[21]。这类修复基本是在保护原未破损隧道基础上进行的,要求完好隧道与修复隧道尽量早日贯通,在不具备明挖、矿山法施工条件时,人工冻结法为修复工程提供

了技术保证,尤其是液氮冻结施工速度快、安全性较高,在隧道抢险修复中已被大量应用。

从人工冻结法应用实践来看,工程中仍以低温盐水作主要冻结冷源,液氮冻结仅被用在抢险或工期要求高的工程中;隧道冻结修复关键技术与普通人工冻结工程技术基本一致,冻结壁力学性能由冻结壁平均温度与厚度共同确定;冻结管的布置及液氮消耗量与冻结壁厚度及地层条件有关,液氮冻结拔管对热水循环要求相对较高。

1.1.2 人工冻结法的研究现状

1. 人工冻土热物理力学特性

土体热物理基本指标包括土的起始冻结温度、未冻水含量与含冰量、导热系数、比热、导温系数以及相变潜热等,其影响因素有温度、矿物类别及含量、含水率、饱和度和干密度、有机质含量等,此外,土中水分重分布以及液态水变成冰后相变与否对土的热物理性质也有较大影响。准确选取未冻土和冻土的热物理参数对于人工冻结工程的设计、理论计算和数值分析十分重要。

地层起始冻结温度大小对准确判别冻结壁厚度有很大影响,程知言、张婷等^[22-24]对不同地区各土质的冻结温度进行了试验研究,发现具有一定埋深土体的冻结温度为 $-0.28\sim-2.28^{\circ}\text{C}$,并利用BP网络模型来描述冻结温度与未冻水含量及其主要影响因素之间的关系。未冻水含量是冻土物理力学性质如强度、模量、阻尼、泊松比等变化的主导影响因子^[25,26],含量大小主要由土质、外界条件、冻融历史三个因素决定。土体导热性主要由其多孔介质性决定,并与干土、气体及空隙填充物(水)的含量密切相关。Johansen^[27]通过试验得出土体微观结构的差异对导热系数影响很小,主要取决于干密度和含水率,也有学者认为取决于未冻土的孔隙率、饱和度、未冻水含量及其含冰量以及土中各组成成分的导热性能、温度等^[28]。导温系数是影响介质温度场的变化速率和研究不稳定热传导过程常用的基本指标,取决于土体物理成分、干容重、含水率和温度状态等因素,逯兰^[29]等测定了原状冻土的导温系数。对于相变潜热的研究,Andersland^[30]则通过室内试验给出了整套计算方法。

2. 土体冻融前后物理力学差异性研究

土的渗透性、孔隙比、应力应变关系等物理力学性质经过冻融后将发生变化,很多学者先后研究了土体性质受冻融作用的影响。Chamberlain等^[31-34]研究了冻融循环对细粒土渗透性的影响,Konrad、Viklander等^[35-38]提出了基于冻融作用的残余孔隙比的概念,Graham、Leroueil和Ono等^[39-41]分别研究了冻融作用对土的结构型的影响以及对土体应力应变曲线特征的影响,Elliott、Lee等^[42-45]则认为冻融循环会引起土体模量降低,细粒越多其降低幅度越大。杨平^[46]依据试验研究了原状土与人工冻融土的密度、干密度、含水率、饱和度、孔隙比、塑限、液限、塑性指数、液性指数、渗透系数等物理指标,以及抗剪强度、无侧限抗压强度、压缩模量等力学指标的差异性。

唐益群等^[47]利用扫描电镜对冻融前后暗绿色粉质黏土的微结构进行分析发现,土

体经冻融作用后,胶结体以及土颗粒发生了明显的破坏,孔隙变大,导致土体内黏聚力与最大动应力显著下降。陈炜韬等^[48]也开展过类似的研究。刘瑞锋等^[49]在不同状态下(原状土、一次冻融土、二次冻融土)对3种不同的上海软土进行试验发现:与一次冻结相比,二次冻结时土的冻结温度、导热系数、冻胀力和冻胀率略有降低,而融沉率则变大。杨成松等^[50]研究后认为,经过多次循环后,土样的干容重趋于某一定值,这一定值与土体的初始干容重无关,而与土体的种类有关。齐吉琳等^[51]结合冻融作用对正常固结土的结构强化分析,通过试验研究和机理分析认为冻融作用对超固结土的结构有弱化效应。马巍等^[52]根据试验结果讨论了冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响,试验发现反复冻结和融化强烈影响着石灰土的强度特性,以后人们又对冻融后土的无侧限抗压强度、抗剪强度以及压缩性等力学性质开展了不少研究(汪仁和^[53]和和礼红^[54]等)。

3. 冻土力学参数研究

冻土力学参数也是冻结壁设计和隧道开挖的依据,因此对冻土力学性质的研究一直是国内外研究人员关注的焦点。人工冻土属于外载作用下应力-应变随时间变化的物质,其力学参数主要包括单轴抗压强度、抗拉强度、抗折强度、剪切强度、蠕变特性等。

关于温度和加载速率对冻土单轴抗压强度的影响,早在1930年前苏联冻土学的开创者崔托维奇^[55]即开展了冻结砂土单轴压缩试验研究,之后国外众多学者也进行了相关研究,如Vialov^[56]、Ladanyi^[57]等;国内张俊兵、李海鹏等^[58,59]分别研究了饱和冻结粉土、含盐冻土的单轴抗压强度随温度、应变率、含水率、盐溶液浓度的变化规律,付伟等^[60]对不同温度下冻土单轴抗压强度与电阻率关系进行了研究。

朱元林、卡皮^[61]在冻结粉砂的抗拉强度试验研究中发现:试样在某一应变速度下由塑性破坏过渡到脆性破坏时,对塑性破坏而言,它的极限抗拉强度随应变速度的增加急剧地增加;而脆性破坏时,则随应变速度的增加轻微地降低;同时发现极限抗拉强度随温度降低而增加,且当温度低于 -5°C 时增加得更加迅速。汪承维^[62]等对冻结黏土做了大量的三轴剪切试验,获得了不同冻结温度、固结围压和应力路径下的冻黏土剪切试验结果。冻土本构模型方面,李栋伟等^[63,64]将统计损伤理论应用到冻土蠕变本构模型中,并建立了深部冻结黏土蠕变损伤耦合本构模型;孙谷雨、杨平等^[65]通过冻土三轴剪切实验,研究南京地铁冻结粉质黏土的抗剪强度和变形特性,建立了以温度、围压为影响因素的冻结粉质黏土邓肯-张模型,并给出了模型参数。

关于冻土蠕变特性研究,20世纪70年代初,Andersland^[66]、Vialov^[67]相继提出了冻土蠕变的动化理论,Ladanyi等^[68]提出了冻土的非线性屈服准则,Ladanyi、Fish和Sekiguchi等^[69-71]通过试验分别提出了各种状态下的冻土蠕变模型;国内方面,陈湘生^[72]率先建立了我国人工冻结黏土的蠕变数学模型,为冻土墙蠕变计算奠定了理论基础;马巍等^[73]根据试验结果提出冻土蠕变强度的抛物线型屈服准则;吴紫汪、王廷栋等^[74,75]对冻土蠕变的光黏弹性模拟实验进行了可行性研究;赵联桢、杨平等^[76]研制了一台大型多功能冻土-结构接触面循环直剪仪(DDJ-1),能够模拟多种粗糙度的接触面,实现循环剪切和单调剪切两种剪切形式;能够观测接触带的破坏状态和厚度;同时可以

测量接触带土体内部的剪切位移,并在此基础上开展了相应的试验研究。

4. 人工冻土冻胀融沉特性

(1) 冻胀特性

1925年瑞典冻结会议上第一次进行了有关冻胀及冻结现象的讨论,随后在世界各国逐渐开展以防止或减轻冻胀措施为目的的冻胀研究。其研究主要集中在以下三个方面:冻胀机理研究,冻胀影响因素研究,冻胀数值计算及预报模型研究。

冻胀机理研究方面,20世纪30年代,Beskow^[77]提出“吸附—薄膜理论”,并通过试验揭示冻胀速度依赖于上部荷载和毛细管力,认为冻结引起的水分迁移是产生冻胀的主要根源。60年代,Everett^[78]首先提出了第一冻胀理论,指明使土中水分向冻结前缘移动、积聚而构成冰透镜体的推动力是毛细压力,但未能很好地解释非连续冰透镜体产生的原因,并低估了细颗粒土的冻胀压力。同年,Miller提出了第二冻胀理论,在新形成并继续增长的冰透镜体与冻结锋面之间存在一个低含水率、低导湿率的无冻胀区——冻结缘。Akagawa^[79]等围绕冻结缘及冻结锋面进行研究,发现冻结缘分为次冷带和平衡带,冻结锋面的冰透镜体增长速度随冻结速度增大而增大^[80],冰分凝面上,冰、水及固体颗粒较活跃^[81]。80年代,徐学祖^[82]通过边界温度恒定的岩盘冻胀试验,提出冻结缘厚度取决于冻结速度和冻胀速度,且具有随冻结历时增大、恒定和减小的三种模式,同时认为未冻水含量也是热流计算的重要指标。

冻胀影响因素研究主要以试验为主,在静态冻胀控制理论与试验结合基础上,得出静态冻胀量占总冻胀量的70%~80%^[83]。冻胀率影响因素有含水率、冷端温度、干密度、含泥量、荷载等^[84],粗颗粒土中粉黏粒含量对冻胀率有明显影响,当粉黏粒含量小于12%时,冻胀率不大于2%;当粉黏粒含量大于12%后,冻胀率明显增大^[85]。此外,发现冻胀力发展变化与冻结温度场密切相关,表现出显著的时空不均匀性^[86]。

20世纪40年代前苏联学者 OpHaTCKИe 教授首先开展了冻胀预报研究,给出了季节性冻土的水分积累公式,Hopke首次提出外荷载作用下的冻胀模型,Gilpin^[87]等也提出把外荷载作为影响冻胀的因子。随后,李洪升等^[88]在冻土多孔多相介质的基础上,建立冻土多孔多相微元体平衡方程、多孔固液介质的质量守恒方程及多孔多相介质的热能守恒方程,考虑水分迁移、热传导和约束压力之间的耦合作用,并基于季节冻土的水分场、温度场和外荷载的相互关系,提出考虑水分迁移、热质扩散和外荷载相互作用的冻胀预报模式^[89]。21世纪初,Harlan提出土体冻结过程中热质迁移数学模型,从此进入研究多场耦合问题阶段^[90],自此,我国学者做了大量的研究,徐学祖等通过试验得出冻结缘厚度取决于冻结速度和冻胀速度,提出可利用未冻水含量与温度关系曲线、土的起始冻结温度和冷端面温度估算冰分凝温度^[91],陈湘生等考虑离心力影响建立了土体冻胀融沉试验模型^[92],张婷等通过自行研制冻胀试验装置对南京地区典型土层开展了室内冻胀试验^[93],杨平采用多孔介质热运移理论,建立了考虑地下水流时冻结壁数学模型^[94],以及考虑水分、温度和应力场的冻胀研究模型^[95]。

(2) 融沉特性

融沉相对于冻胀的研究较少,至今没有成熟的理论。20世纪30年代,前苏联学者