



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

液氮地层冻结的理论与实践

Yedan Diceng Dongjie De Lilun Yu Shijian

岳丰田 翁家杰 张勇 石荣剑 陆路 编著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

液氮地层冻结的理论与实践

岳丰田 翁家杰 张 勇 石荣剑 陆 路 编著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书基于大量液氮冻结模拟试验和液氮冻结实际工程,全面论述了液氮冻结的基本理论和液氮冻结的设计和施工技术以及相关信息化施工技术。本书可供从事地下工程建设的施工人员、技术人员和管理人员,以及相关专业的科研、设计、教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液氮地层冻结的理论与实践/岳丰田等编著. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2015. 9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2706 - 5

I. ①液… II. ①岳… III. ①液氮冻结法(凿井)
IV. ①TD265.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 127902 号

书 名 液氮地层冻结的理论与实践

编 著 岳丰田 翁家杰 张 勇 石荣剑 陆 路

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 9 字数 225 千字

版次印次 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着城市的快速发展,城市地下空间开发规模的逐渐扩大,地下工程面临的困难越来越多,尤其是在城市交通繁忙地区修建地下工程和处理紧急工程事故。由于面临的地质环境和地面环境越来越复杂,工程施工难度也越来越大,对地下施工技术的要求也越来越高,地下工程的施工技术需要与时俱进。

冻结法作为一种软弱土体加固的工法自 20 世纪中叶在我国开始应用,并从 20 世纪 90 年代以来在我国隧道、地铁和建筑基础等领域得到不断应用和发展。液氮冻结作为一种新兴人工冻结技术对于城市交通繁忙地区修建地下工程和处理紧急工程事故是一种有效、快捷、环保的方法。采用液氮冻结具有如下特点:

① 土层液氮冻结系统简单,使用设备少。简化了冻结组织工作,大大缩短了冻结准备时间,并降低了冷冻成本。

② 直接汽化不用冷媒,并且当冻结管渗漏液氮接触冻土时,不会像盐水冻结融化冻土。

③ 冻结速度快、温度低和冻土强度高,液氮挥发温度为 -195.8°C ,冻结温度非常低,据国外资料显示,液氮冻结的冻土发展速度为普通盐水冻结冻土发展速度的 8~10 倍,同时冻结壁平均温度低,冻结壁强度大。

④ 冻结加固土体的形式灵活,冻结规模可根据工程的实际情况而定,随时可人为控制加固土体的强度,工作方便。

⑤ 液氮是一种防爆和防火的制冷剂,其本身无毒性,且对周围环境无污染,冻结期间无工程噪声。

⑥ 土体的冻胀融沉远远小于普通盐水冻结。

本书基于大量的基础实验、模拟实验和实际工程全面论述液氮冻结的规律和实践。书中特别介绍了对液氮冻结开展的综合研究,包括液氮冻结土层的基本冻结参数、液氮冻结温度场、液氮冻结设计理论、液氮冻结施工技术和信息化施工技术。

本书的特点是:

① 内容新颖、全面系统、言简意赅。

② 全书取材试验和工程实践,结合实际开展理论研究,注重实用价值。

③ 模拟实验和理论分析为工程提供理论依据,促进了相关理论的发展。

④ 对信息化施工监测技术和工程实例的内容叙述详细,为同类工程使用提供了参考。

本书由岳丰田、翁家杰、张勇、石荣剑、陆路编著,分工如下:岳丰田编写第 1 章、第 2 章、第 4 章;翁家杰编写第 3 章;石荣剑编写第 6 章;张勇编写第 5 章、第 8 章;陆路编写第 7 章。全书由岳丰田负责统稿。

衷心感谢上海隧道股份有限公司、上海隧道施工技术研究所、北京中煤矿山工程公司、南京煤炭设计研究院的领导和专家长期以来给予的支持。

本书成果是集体智慧和劳动的结晶。参加相关课题研究并作出贡献的研究者包括石荣剑等,在此一并致以最诚挚的感谢!

本书的出版对我国当前的液氮冻结工程的推广應用和地下工程的建设具有较高的指导意义和促进作用。

本书如有疏漏欠妥或错误之处,恳请有关专家和广大读者不吝批评斧正。

作 者
2014年5月

目 录

1 概述	1
1.1 冻结法发展	1
1.2 液氮冻结法原理	2
1.3 液氮冻结法工艺流程	5
2 液氮冻结的冻土力学及热物理特性	6
2.1 冻土形成过程及其水分迁移	6
2.2 冻土的强度特性	8
2.3 冻土的热物理特性	11
3 液氮冻结温度场基本理论	13
3.1 温度场导热方程	13
3.2 温度场模拟实验	14
4 液氮冻结设计理念	47
4.1 冻结深度的确定	47
4.2 冻结壁厚度设计方法	47
4.3 平均温度计算	50
5 液氮冻结设计有限元分析	51
5.1 有限元简介	51
5.2 数值分析中考虑相变的常用方法	52
5.3 实例分析计算	53
6 液氮冻结施工技术	71
6.1 液氮冻结施工设备和方法	71
6.2 液氮冻结施工工艺	75
6.3 液氮冻结运行模式	80
6.4 武汉盾构工作井液氮冻结施工实例	86

6.5	上海轨道交通七号线上海大学站盾构出洞液氮冻结实例·····	92
7	液氮冻结信息化施工监测技术·····	102
7.1	冻结孔施工阶段的信息采集·····	105
7.2	温度场监测·····	106
7.3	变形监测·····	107
7.4	运营地铁隧道液氮冻结信息化监测实例·····	108
8	液氮冻结工程实例·····	114
8.1	上海地铁二号线南京东路站至陆家嘴站区间隧道旁通道排水管修复·····	114
8.2	天津地铁王顶堤站盾构出洞液氮冻结加固实例·····	122
8.3	灵东矿液氮封水工程·····	123
8.4	武汉长江穿越隧道新工作井液氮冻结·····	127
	参考文献·····	133

1 概 述

1.1 冻结法发展

人工冻结法始于 19 世纪,是利用人工制冷技术降低地层温度,使地层中的水冻结,把天然岩土变成冻土,增加其强度和稳定性,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施工的特殊施工技术。其实质是利用人工制冷临时改变岩土性质以固结地层。

人工冻结的应用和研究是以天然冻结条件下冻土的物理力学性质研究为基础,随着人工冻结凿井逐步发展起来的。近年来,随着对冻土力学性质方面研究的深入,越来越多的人工制冷技术被用于地层加固和稳定土体。一般来讲,人工地层冻结有两种方法:一是使用冷媒间接制冷法;二是制冷剂直接冻结法。如使液氮或干冰等在土体内部发生相变,吸收地层热量使土体降温至冻结。英国工程师南威尔士 1862 年在建筑基础施工中首次使用了人工冻结技术加固地层。1883 年德国工程师 P. H. Poetsch 提出人工地层冻结(Artificially ground freezing method)原理,成功应用于阿尔里德九号井凿井工程,并申请获得冻结凿井技术专利。随着人工制冷技术的发展以及冻土热力学、力学研究的不断深入,冻结施工工艺技术日益完善,冻结法先后在德国、比利时、英国、波兰、苏联、法国、加拿大、南非、中国等国家得到了普遍应用。冻结法凿井最大冻结深度已达 960 m(英国),冻结圆形基坑的最大直径达 69 m(苏联)。

人工地层冻结法加固地层广泛用于不稳定地层井筒建设工程的同时,在其他岩土工程领域特别是城市地下工程中得到迅速推广。在国外,冻结法施工技术已成为一种可行的和极具竞争力的软土及不稳定含水地层加固、隔水的有效施工方法。它已被广泛应用于基坑、隧道、井筒、地下硐室施工的临时支护,其施工规模小至地铁泵站、大到城市中整个街段的高层建筑基础、地铁车站及大型地下瓦斯仓库施工等。

人工冻结在城市地下工程中的应用始于 1886 年瑞典斯德哥尔摩 24 m 长的人行隧道建设工程。在此后的一个多世纪里,人工冻结法在许多国家的隧道、地铁和建筑基础等领域中得到不断应用和发展,例如 1906 年横断法国塞纳河底地铁工程,1942 年巴西 26 层大厦不均匀下沉的调整,1968 年英国的上水道管渠隧道工程,1973 年美国的湖底取水竖井安装工程。20 世纪 90 年代以来,国际上对人工冻结法的应用更为广泛。1991 年西班牙巴伦西亚地铁建设中,冻结法以其灵活、方便、有效的特点而获得好评;美国威斯康森州米尔沃基市在建设输洪大直径隧道起始段 50 m 深竖井时,采用冻结法支护、止水,很好地控制了土体的

位移;德国 Dusseldorf 市中心火车站附近地铁隧道工程通过提升土层含水量而提高冻土强度,使冻结法施工获得成功。Hass β 等阐述了将柏林的“U5”地铁线从东部延长至拟建于西部的车站工程的冻结施工计划与设计工作。整个工程设计冻结土体长度 490 m,体积达 $84\,200\text{ m}^3$,是截至目前世界上应用人工冻结法所施工的最大的隧道工程^[7]。日本名古屋市在建造地下输电隧道时,需垂直连接两个不同直径的隧道,于是在连接处应用了人工冻结法,施工历时 323 d。

我国自 1955 年首次在开滦林西风井使用冻结法凿井以来已有 60 年的历史,已用冻结法建造了 440 多个井筒,总长度超过 67 km,最大冻结深度已达 650 m,目前冻结深度更深的赵楼矿井和郭屯矿井正在施工中。

人工地层冻结法加固地层在广泛用于我国不稳定地层井筒建设工程的同时,和西方国家在 20 世纪 70 年代末一样,正在向其他岩土工程领域迅速推广,如解决上海地铁 1 号线淤泥质黏土中建造旁通道、集水泵站难题等。20 世纪 70 年代初首次在北京地铁建设工程中使用了人工冻结技术;1998 年在北京地铁国贸站南隧道进行的 45 m 水平冻结加固施工的成功标志我国地层冻结施工进入城市地下工程的一个新阶段;1998 年上海地铁 2 号线 5 个区间联络通道中有 4 个采用冻结法施工;2000 年广州地铁 1 号线纪越区间过清泉街断层采用水平冻结,隧道长 64 m,施工取得成功;之后南京、深圳等地地铁旁通道也相继使用了地层冻结工法。现今随着我国岩土工程的发展,深基础和其他地下市政工程的不不断涌现,冻结法围护结构以其独特的优越性而越来越受到重视,地层冻结技术已经全面进入我国城市地下工程领域。

采用冻结法围护结构在复杂和特殊地层施工中具有很大的优越性:

① 适应性强。它适应于各种复杂地质及水文地质条件下的任何含水地层的土层加固,并且基本不受结构形式、平面尺寸和深度的影响。

② 支护结构灵活、易控制。可根据不同地质条件、环境及场地条件灵活布置冻结孔、调节冷媒温度,从而获得高质量的冻土帷幕,特殊情况下还可以采用液氮进行快速抢险,与普通盐水人工冻结法相比,液氮人工冻结法具有深低温、冻结速度快、冻结强度高、无污染等优点。

③ 隔水性好。由于地层中水在低温下结冰,冻结壁防渗性能是其他施工方法所无法相比的。

④ 环境影响小。它充分利用土体自身的特点,材料是土体本身,对地下水资源及周围环境无污染,冻结壁解冻后,冻结管可以视情况回收,地下土层恢复原状,对地下工程较为有利。

⑤ 环境污染小。冻结工程施工最大的污染是钻孔时的少量的泥浆排出,冻结过程不向地层注入任何有害物质,冻结工程完毕后,地层自然融化恢复原有状况,不会在地层留下有碍于其他工程施工的地下障碍物。作为一种“绿色”施工方法,符合当今环境岩土工程发展趋势。

1.2 液氮冻结法原理

传统上,较普遍的人工冻结是使用盐溶液间接致冷法,就是将盐(如 CaCl_2)溶液通过氟

利昂(或氨)制冷压缩机冷却后,作为冷媒在土体内埋设的管道中循环,与土体进行热交换,吸收土体热量,增加自身显热,通过不断循环制冷,使周围土体冻结,达到加固和稳定土体的目的。与传统冻结方式相对应的是直接冻结法,不需要循环制冷,直接使用液氮或干冰等在土体内部发生相变,吸收地层热量使土体降温,形成冻土体。由于液氮常压下相变温度为 -195.8°C ,冻结温度相对传统冻结法较低,与常规盐水冻结相比利用液氮进行冻结具有以下优点:

① 土层液氮冻结系统简单,使用设备少。冻结土层的冷量不用专门的冻结设备制取,而是用杜瓦容器或液氮储存槽罐代替。液氮冻结储存设备简单、轻便,运输安装容易。因此,简化了冻结组织工作,大大缩短冻结准备时间,并降低了冷冻成本。

② 直接汽化不用冷媒。液氮冻结是在冻结管内直接通液氮蒸发制冷,不用冷媒剂(盐水),不用盐水泵,消除了冷媒剂冷量损失。并且当冻结管渗漏液氮接触冻土时,不会像盐水冻结融化冻土。

③ 冻结速度快、温度低和冻土强度高,液氮挥发温度为 -195.8°C ,冻结温度非常低,所以在此温度下冻结壁发展速度很快,据国外资料显示,液氮冻结的冻土发展速度为普通盐水冻结冻土发展速度的8~10倍,同时冻结壁平均温度低,冻结壁强度大。

④ 冻结加固土体的形式灵活,冻结规模可根据工程的实际情况而定,随时可人为控制加固土体的强度,工作方便。

⑤ 液氮是一种防爆和防火的制冷剂,其本身无毒性,且对周围环境无污染,冻结期间无工程噪声。

⑥ 土体的冻胀融沉远远小于普通盐水冻结。定压比热容:在压强不变的情况下,单位质量的某种物质温度升高1 k所需吸取的热量,叫做该物质的“定压比热容”

1.2.1 液氮的物理性质

氮在自然界分布很广,在空气中的体积含量为78.03%。常温、常压下,氮是无色、无味、无毒的气体。在常压下冷至 -195.8°C 时,变成无色透明易于流动的液氮。在 -210.1°C 时,液氮凝固成雪状的固体。在工业上,液氮的制取是通过空气分离装置,将氮液化精馏而获得的。

液氮的惰性很强,稳定性好,与任何物质不起化合反应。液氮在常压下的蒸发温度为 -195.8°C ,蒸发潜热为 161.2 MJ/m^3 ,定压比热为 $1.03\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,从它的沸点到 -20°C 的冻结终端温度所挥发的制冷量为 $383.1\text{ kJ/kg}^{[55]}$ 。表1-1为液氮的主要物理性质。

表 1-1 液氮的物理性质

沸点 / $^{\circ}\text{C}$	冰点 / $^{\circ}\text{C}$	液氮密度 / (kg/L)	临界密度 / (kg/L)	临界压力 / (kg/cm^2)	临界温度 / $^{\circ}\text{C}$	标准状态潜热 / (kcal/kg)
-195.8	-215.0	0.807	0.311	33.558	-147	0.017 78

1.2.2 液氮制冷机理

液氮在挥发过程中只是物理性质的变化。在制冷系统中以液态、气态和液气混合态三种状态存在,此三种状态称为氮的过冷、过热和饱和状态。

(1) 过冷态氮

过冷液氮中氮液体温度低于对应饱和压力下的饱和温度，流态氮中无蒸汽时才会出现过冷。在过冷情况下，氮液体温度和压力之间不存在一一对应的关系。液氮制取过程中氮凝结成饱和液体后仍可能继续放热冷却而成为过冷态的液氮。

(2) 过热态氮

过热态氮中氮气体的温度高于对应饱和压力下的饱和温度，液态氮蒸发后才会出现过热。过热情况下氮气体温度和压力之间不存在一一对应关系。液氮完全蒸发后仍继续吸收热量而变成温度高于饱和温度的过热氮气。所谓过热，就是在氮气中没有液体存在，制冷剂完全蒸发并开始变热。

(3) 饱和状态氮

饱和状态氮中气液转化处于动态平衡，此时的液体、气体处于饱和状态。饱和温度和饱和压力之间存在着一一对应关系，饱和压力随着饱和温度升高而升高，两者中有一个发生变化，另一个也将出现相应的变化。即对于任意一个饱和温度，都可确定制冷系统中的运行压力，而且只有一个饱和压力。

液氮冻结是利用液氮的两汽化潜热和升温显热实现制冷，吸收地层中的热量，实现土层的快速冻结，属于物态变化的制冷范畴。液氮汽化过程的热力参数和计算，可根据氮的焓—压($i-P$)图(图 1-1)进行。

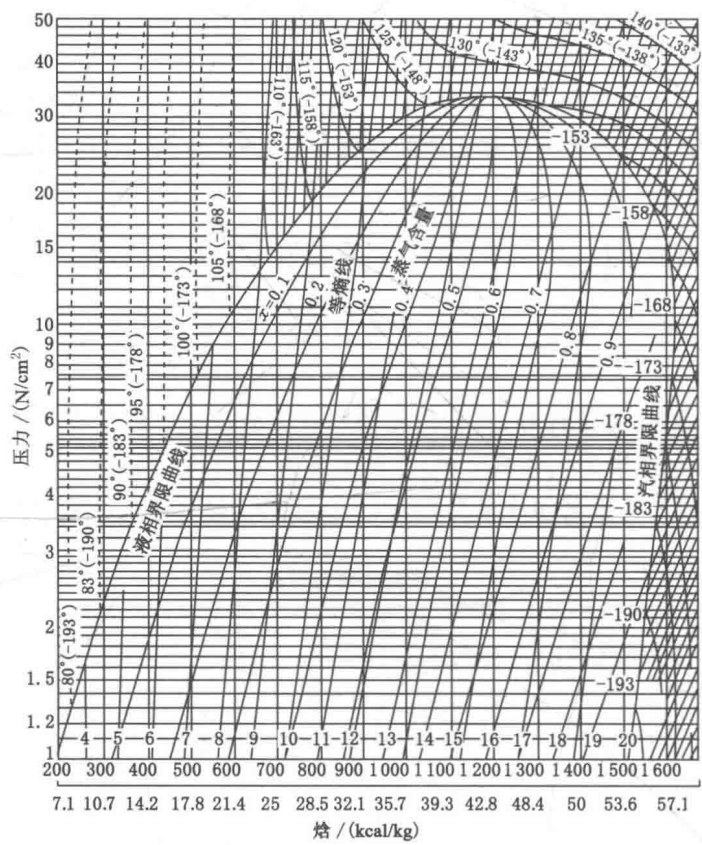


图 1-1 氮的焓—压($i-P$)图

当液氮汽化压力为 $P_0 = 1.2 \text{ N/cm}^2$ 时,液氮的焓 $i_1 = 7.2 \text{ kcal/kg}$,其相应的汽化温度为 $t_0 = -193.92^\circ\text{C}$ 。液氮吸热汽化过程是等压吸热过程,待液氮完全转化为气态,其焓值增加为 $i_2 = 54.8 \text{ kcal/kg}$ 。因此当汽化压力 $P_0 = 1.2 \text{ N/cm}^2$ 时,1 kg 液氮完全汽化获得的热量 $i_2 - i_1 = 47.6 \text{ kcal/kg}$ 。继续汽化,氮依靠自身过热获取热量。根据氮的显热为 $0.25 \text{ kcal}/(^\circ\text{C} \cdot \text{kg})$,如果氮从冻结管的最后排除温度为 -60°C ,则过热继续吸收的热量为 34 kcal/kg 。则 1 kg 液氮的制冷量为 81.6 kcal/kg 。这个制冷量即 1 kg 液氮从冻结管周围土体吸走的热量。由此可知,1 kg 液氮的制冷能力接近氟利昂,而低于氨。

1.3 液氮冻结法工艺流程

液氮冻结法的施工工艺一般流程如图 1-2 所示。



图 1-2 液氮冻结法施工一般流程

2 液氮冻结的冻土力学及热物理特性

2.1 冻土形成过程及其水分迁移

2.1.1 冻土形成过程

冻土是非常复杂的由各种成分组成的多相土层,它处于不同的相态(固态、理想塑性态、液态、气态)下,相互联系、相互影响。只有在一定条件下,例如一定体积的冻土中,土的各相成分不随时间重新分布时,才被认为是单一成分体(连续体)。普遍认为冻土为四相体系,包括固体矿物颗粒、理想塑性的冰包裹体(胶结冰和冰夹层)、液态水(结合态和未冻水)以及气态成分(蒸汽和空气)。所有上述成分处于相互联结之中,冻土不但与各相性质有关,而且还与外部作用有关。

冻土的形成过程,实质上是土中水冻结并将固体颗粒胶结成整体的物理力学性质发生质变的过程。如图 2-1 所示,土中水的冻结过程可以划分为五段:

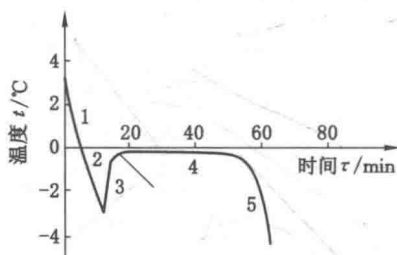


图 2-1 冻土中水冻结过程曲线

- ① 冷却段:向土层供冷初期,土体逐渐降温并达到冰点;
- ② 过冷段:土体降温至 0°C 以下时,自由水尚不结冰,呈现过冷现象;
- ③ 突变段:水过冷后,一旦结晶就立即放出结冰潜热,出现升温现象;
- ④ 冻结段:温度上升接近 0°C 时稳定下来,土体中的水结冰,将矿物颗粒胶结成整体形成冻土;
- ⑤ 冻土继续冷却段:随着温度的降低,冻土的强度逐渐增大。

2.1.2 水分迁移

在冻结过程中,已冻土内以及已冻土和未冻土间存在的水的移动现象,称为水分迁移。不同种类湿土在冻结过程中的水分迁移方向是不同的,一般在粗粒土冻结时水分向未冻土

区方向迁移,而在细粒土冻结时水分则向已冻区方向迁移。冻土内部的水分迁移是由温度梯度诱导的土中毛细水和薄膜水的迁移。水在结冰时体积膨胀约9%,故水分向已冻区方向迁移的量越大,冻土的体积冻胀量就越大。因此水分迁移现象从19世纪末就引起了许多学者的关注,至今仍是冻土学的一个重要研究内容。

水分迁移现象的基础理论研究主要包括成冰作用和水分迁移机理(包括迁移原动力、迁移系数和迁移量的确定)等方面;而应用基础理论研究主要包括冻胀规律和盐渍化(包括盐胀)规律等方面。开展水分迁移现象研究的目的是解决寒区工程防冻害及人工冻结工程的设计和施工问题(徐学祖,邓友生,1991)。

水分迁移(徐学祖,邓友生,1991)的原动力的一种被普遍称为吸着力,即一系列分子作用力的总和。为了确定原动力的数值,曾有过下列观点:

① 毛细管理论。由斯图肯别列格(В. И. Штукенберг, 1885)提出的冻结孔隙的毛细管理论认为:冻胀是由于水沿裂隙孔(冻结孔隙)形成的毛细管上升而产生的水分迁移引起的。这一假说未被试验证实,故未得到进一步发展。

② 水头压力理论。由聂柯夫洛夫(К. О. Никифоров, 1912)和苏姆金(М. И. Сумгин, 1929)等提出的水头压力理论是依据对永久冻土条件下冰丘形成过程的观察提出的。目前认为这一理论只适用于封闭系统中饱水土体的冻结情况。

③ 薄膜迁移理论。列别捷夫(А. Ф. Пе́дедев, 1919)和别斯柯沃(G. Beskow, 1935)提出了含水细粒土冻结过程中的薄膜水迁移理论。土颗粒外围的薄膜水未冻结,它把冰和土颗粒分开。这个未冻水层是不对称的,暖面最厚,冷面最薄。这种不对称性导致了一个平衡的渗透压力,引发水分的迁移。该理论已被大多数学者所承认。

④ 结晶力理论。布沃索斯(Вуыосос, 1923)、塔贝尔(Tabel, 1917, 1929)在研究土中冰的结晶过程时,对冻土的薄膜迁移理论作了补充,提出了结晶力对水分迁移的作用。但该理论不能解释未冻土中的水分迁移现象,因而未被公认。

⑤ 渗透压力理论。由戈里什腾(М. И. Гопьдштейн, 1948)提出,它与薄膜迁移理论相似,只在有限程度上确定冻土中的水分迁移机理。由于只有水中盐溶液浓度相当高时才有明显的渗透,故该理论难以被普遍应用。

⑥ 抽吸力理论。由茹克里(R. Ruckli, 1943)和普扎柯夫(Н. А. Пузаков, 1950)提出,认为抽吸力是迁移力总效应的一个计算当量。该理论已获相当广泛的承认,但它对水分迁移的实质未予研究。

⑦ 化学势理论。秋秋诺夫(И. А. Тютюнов, 1959)认为水分迁移量是矿物颗粒表面自由能或其等压势的函数。

⑧ 吸附—薄膜联合作用理论。奥尔洛夫(В. О. Орпов, 1962)和哈依柯斯奇(Hoekstra, 1960)等认为不同厚度的薄膜中的水取决于矿物颗粒表面活化中心的作用而有不同的特点,导致水从具有较活跃分子的厚膜处向薄膜处移动。

⑨ 热—质交换理论。普扎柯夫(Н. А. Пузаков, 1960)等以雷柯夫(А. В. Рыков)的热—质交换理论为基础进行理论分析。他假设:结合水的压力梯度与未冻水量梯度成正比;在吸附力(结晶力、扩散力、楔入力)综合作用基础上确定“计算抽吸力”,进而确定水分迁移量。

还有一些理论,如分子动力学理论(А. А. Ананян, 1959)、吸附压力理论(Х. Р. Хакимов, 1956)、冰压力梯皮理论(Millee 等, 1975)等。

2.2 冻土的强度特性

冻土强度,是由冰与土颗粒胶结后形成的黏结力和内摩擦力所组成,包括抗压强度、抗剪强度。冻土的强度性能是冻土力学中最重要的内容之一,它不仅与温度、变形速率(加载速率)、土质、含水量、加载形式及围压等因素有关,而且还受冻土中的冰、未冻水、颗粒间摩擦和土骨架的矿物黏聚力等所制约,它们之间的相互作用造成了冻土强度的复杂性。

(1) 冻土的强度与土质的关系

关于这方面的研究报道相当多,据朱元林等^[54]的研究结果,相同条件下,冻结砂土的强度>冻结粉土的强度>冻结粉质黏土的强度。也有许多学者进行了盐渍土的研究,发现随盐渍度的增加,冻土强度减小(Nixon,1974,1984;Miller,1990)。

(2) 冻土的强度与温度的关系

关于这一影响因素的研究是极为详尽的,其主要作用是随温度的降低冻土强度增大,为线性关系。但是,Bourbonnais and Ladanyi (1985)的试验发现,当温度低于 -15°C 时冻土强度出现降低的趋势;翁家杰^[1]在液氮冻结土层的理论与实践一文中提到当冻土温度低到 $-70\sim-80^{\circ}\text{C}$ 以下时,强度不但不增反而下降;而彭万巍和吴紫汪等^[55]的 $-2\sim-80^{\circ}\text{C}$ 的冻结黏土试验并未发现这一点。一般情况下,冻土的短时单轴抗压强度近似是温度的线性函数,可按下式计算(吴紫汪、马巍,1994):

$$\sigma = a + b\theta \quad (2-1)$$

式中 σ ——冻土的短时单轴抗压强度,MPa;

a, b ——与土质有关的常数;

θ ——冻土温度(取绝对值), $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 冻土的强度与含水量的关系

关于这一点,崔托维奇^[11]在他的《冻土力学》一书中经典性地阐述了水分对冻土强度之影响,后有许多学者给出了类似的结果。冻土的强度随含水量的增大而增大,当接近饱和含水量时,强度达到最大值,其后随含水量的增大而减小,最后趋向冰的强度。如图2-1所示,在非完全饱水及结构松散情况下(含水量低于 $w_{\min}$,图2-1中曲线之OA段),抗压强度随着含水量的增加而增大。而在完全饱和情况下,开始随着含水量的增加而减小(AB段),并达

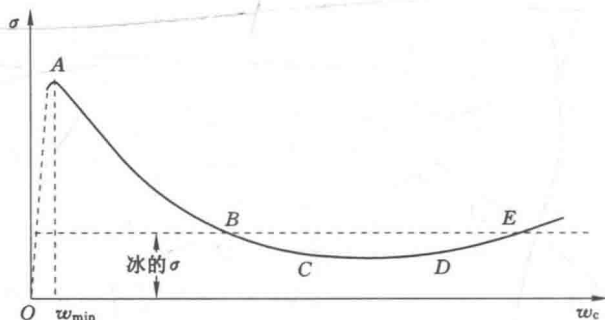


图 2-1 冻土抗压强度 σ 与总含水量 w_c 关系的一般特征
(虚线表示非完全饱水;实线表示完全饱水)

到冰的抗压强度(B点);然后在高含水量下(相应于曲线CD段),它实际上保持不变;随着含水量的进一步增加,它逐渐地再次接近纯冰的抗压强度(曲线上E点)。

(4) 冻土的强度与变形速率的关系

关于这一点也有相当多的研究报导,一般的规律为:随变形速率的增大,冻土的破坏形式由塑性向脆性转变,在塑性范围内,冻土强度随变形速率的增大而增大,为指数关系;在脆性范围内,冻土强度不随变形速率而变化(Sayles and Epauchin, 1966; Zhu et al., 1988)。但 Bragg and Andersland (1980)^[57]的试验发现,在脆性范围内,冻土强度随变形速率的增大略有降低。经李洪升等用不同的方法,推演强度与应变速率关系的表达式,则有:

$$\sigma_c = A(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^n \quad (2-2)$$

式中 n ——指数(无量纲);

$\dot{\epsilon}$ ——应变速率;

$\dot{\epsilon}_0$ ——参考应变速率, s^{-1} ;

A ——与温度 t 有关得参数(与强度同量纲)。

(5) 冻土的强度与加载形式的关系

① 拉伸:抗拉强度是冻土的重要力学指标之一。由于试验手段的限制,这方面的研究工作较少。冻土的拉伸特性类似于单轴压缩的,只是抗拉强度低于单轴抗压强度。朱元林的研究发现,冻结粉土抗压和抗拉强度随应变速率变化在 $\dot{\epsilon} = 10^{-2} s^{-1}$ 处分叉,即当 $\dot{\epsilon} < 10^{-2} s^{-1}$ 时,抗拉强度与抗压强度几乎相同;而当 $\dot{\epsilon} > 10^{-2} s^{-1}$ 时,抗拉强度远小于抗压强度。据 Hawker 和 Mellor (1972) 报道,多晶冰也存在这种分叉现象,其分叉发生在 $\dot{\epsilon} = 10^{-5} s^{-1}$ 处。

② 扭转:扭转试验的目的是为了研究纯剪应力状态下冻土的应力—应变特性。目前这方面的资料很少,仅看到的是关于实心样品的扭转试验结果^[60]。他们的试验得到如下结果:弹性极限强度及破坏扭矩的倒数与剪应变率的对数有良好的关系,含水量的大小决定冻土的抗破坏能力,对于冻结粉土,当含水量为液塑限中值时,其能力达到最大。

③ 抗剪:关于这方面的研究报导相当多,一般可有:在相同条件下,冻土的抗剪强度一般低于抗拉强度。据吴紫汪等的研究(1994),对砂土和黏性土,不论是原状的还是重塑的,当应力小于 9.81 MPa 时,其冻结后的抗剪强度均可用库仑公式表示:

$$\tau_f = C + \sigma \tan \varphi \quad (2-3)$$

但是,当压力变化范围很大时,冻土的抗剪强度与压力关系已不是线性关系,而必须将剪切图考虑成不同时段各不相同的极限应力圆的包络线。朱元林等通过三轴压缩试验研究了冻土的抗剪强度,他发现冻结粉土的内摩擦角 $\varphi = 0$,其库仑定律可简化为:

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)_m \quad (2-4)$$

这与 Chamberlain 等(1972)和 Ourvy (1985)的试验结果相一致。

(6) 冻土的强度与围压的关系

继 Tsytovich (1975), Vialov (1955, 1962) 等的研究结果,即“冻土强度随围压的增大而增大之后, Chamberlain 等(1972), Paralneswaran 和 Jones (1981)、马巍和吴紫汪等(1994, 1996)通过大量的试验发现:冻结砂土的强度随围压的增大会出现峰值,之后随围压的继续增大强度逐渐降低。对冻结黏土或粉土来说,强度不随围压变化(朱元林, 1988; 沈忠言和吴

紫汪等,1996)或强度随围压增加略有降低(Duvry,1985),但 Chen Xiangsheng(1988)的报道却是:强度随围压的增大而增大。

围压的作用仅仅是增强了冻土内部的强化作用,即增加了冻土的强度。但随着研究的进一步深入,有学者通过试验证实,冻土的强度主要依赖于冻土中冰的强度、颗粒间摩擦和它们之间的相互作用,围压的增加可以抑制膨胀软化效应,也可诱导膨胀软化现象,即随着围压的增大,冻土的强度会出现最大值,随着围压的继续增大,强度逐渐降低(Gaughnour, 1968; Chamberlain, 1972; Alkire, 1973; Parameswaran, 1981; Sayles, 1973)。

2.2.1 冻土抗压强度

(1) 温度与强度的关系

冻土抗压强度随冻土温度的降低而增大。随着温度降低,土中水结冰量增大,冰的强度和胶结能力增强。关于冻土强度的研究仍以试块试验研究为主,而且以无围压的单独试验居多。根据试验研究成果,苏联学者(特鲁巴克,1958)建议用以下公式计算冻结饱水砂的极限抗压强度:

$$\sigma_b = -0.0153 |t|^2 + 1.1 |t| + 2 \quad (2-5)$$

或

$$\sigma_b = -0.8 |t| + 2 \quad (2-6)$$

式中 σ_b ——极限抗压强度,MPa;

t ——冻土的温度,℃。

苏联科学院试验站(崔托维奇,1985,1958)认为:计算地面浅部土冻土的极限强度用式(2-5);舒舍丽娜和维亚洛夫的研究表明:计算冻结凿井工程中的冻土强度,应采用式(2-6)。

(2) 含水量对冻土强度的影响

实验研究证明(中国矿业学院,1981):含水量是影响冻土强度的主要因素之一。对于不饱和水的土,冻土强度随含水量的增大而提高。当含水量达到饱和后,随着含水量增加冻土强度反而会降低。

(3) 土的颗粒组成与冻土强度的关系

土颗粒成分和大小是影响冻土强度的重要因素。在其他条件相同时,粗颗粒越多,冻土强度越高,反之就低。这是由于土中所含结合水的差异造成的。

(4) 冻土强度与荷载作用时间的关系

实验证明:冻土强度随荷载作用时间的延长而降低。这个特性称为冻土的强度松弛。在实验室条件下,荷载作用时间少于1 h时的冻土强度称为瞬时强度,大于1 h的强度称为长时强度。一般荷载作用200 h时的破坏应力称为长时强度。两个强度值相差很大,而且冻土温度越高,相差越大(图2-2)。

当冻土温度在 $-4 \sim -5$ ℃时,冻土长时抗压强度为瞬时抗压强度的 $1/2 \sim 1/2.5$ 。

2.2.2 冻土抗剪强度

试验表明:当正应力小于10 MPa时。冻土的抗剪强度可用库仑表达式描述:

$$\tau_b = C_0 + \sigma \tan \varphi \quad (2-7)$$

式中 τ_b ——冻土的抗剪强度,MPa;

C_0 ——冻土的黏结力,MPa;