



青藏铁路冻土环境和冻土工程



“十二五”国家重点图书出版规划项目
冻土工程研究与实践

热棒工程

郭宏新 马巍 熊治文 著
张鲁新 主审

THE THERMOSTICK ENGINEERING



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

热棒工程

郭宏新 马巍 熊治文 著

张鲁新 主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书是国内首部系统论述热棒工程相关理论与实践应用的专著。主要内容有从传热基础理论出发剖析了热棒这种特殊传热元件的工作机理、影响因子和分类特征,基于工艺保证理论论述了热棒制作的关键技术和保证工艺,应用冻土工程学的“冷却地基”理论试验研究和论证了热棒降低地基土体温度、冷却地基土体的特殊作用,进而从工程安全可靠度理论的视角论述了热棒在寒区工程中节能高效的换热效果及对工程稳定性的长期效果。

本书内容丰富,涵盖理论、试验、工程的诸多方面,可供相关工程技术人员参考,亦可作为寒区工程岩土工程等专业的研究生教学教材。

图书在版编目(CIP)数据

热棒工程 / 郭宏新, 马巍, 熊治文著. —北京:
人民交通出版社股份有限公司, 2016. 1
ISBN 978-7-114-12235-4

I. ①热… II. ①郭… ②马… ③熊… III. ①铁路路
基—冻土地基—路基工程 IV. ①U213.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 101703 号

书 名: 热棒工程

著 作 者: 郭宏新 马 巍 熊治文

责任编辑: 王 霞 陈力维

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 26.5

字 数: 610 千

版 次: 2016 年 1 月 第 1 版

印 次: 2016 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12235-4

定 价: 98.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

“热棒工程”作者简介

郭宏新



男,1963年生,工学博士、教授,享受国务院政府津贴专家,“万人计划”高层次人才。曾任南京工业大学热管技术研究院副院长,科技部国家热管推广中心副主任,现任新加坡上市公司江苏中圣集团董事长,中科院南京冻土工程中心主任。承担完成数项国家火炬计划和国家科技支撑计划的项目,获得数十项国家专利,获数项省部级科技进步一等奖和其他奖项,作为“全国交通工程设施标准化技术委员会热棒工作组”组长,牵头和主持制定的《热棒》标准获国家标准创新贡献奖。

马巍



男,1963年生,博士,研究员,博士生导师,从事多年冻土力学与冻土工程研究工作。现任中国科学院寒区旱区环境与工程研究所所长、冻土工程国家重点实验室主任。曾经主持、参与、完成包括“青藏铁路”在内的国家和省部级科技成果奖15项,现为国家“973项目”首席科学家、国家基金委创新群体学术带头人,优秀国家重点实验基金项目负责人。作为中国科学院知识创新重大工程重大项目“青藏铁路工程与多年冻土相互作用及其环境效应”首席科学家,为青藏铁路多年冻土筑路技术提供了坚实的科学基础;作为“973项目”的首席科学家,在为我国冻土区重大工程建设、设计提供理论基础的同时,其学术成果促进了我国寒区工程及相关学科的发展。

熊治文



男,1968年生,工学博士,研究生导师,教授级高工,中铁西北科学研究院有限公司副总经理、总工程师,茅以升铁道科学技术奖获得者。现任甘肃省岩石力学与工程学会秘书长、青海省环境与冻土工程重点实验室主任。主要从事冻土及其他特殊土地区铁路、公路、输油管道、输电线路等工程修筑技术和病害治理方面的科学研究、技术服务等工作。先后主持科研课题18项,解决多项特殊土地区工程建设、维修养护技术难题,获国家科技进步二等奖1项、省部级科技进步奖11项;获国家专利13项,其中发明专利5项。发表论文20余篇,合作著有《青藏铁路冻土环境和冻土工程》学术专著1部,参编国家技术标准两部。

张鲁新



男,1947年生,教授、博士生导师,我国著名冻土工程专家,中铁西北科学研究院研究员、专家委员会专家。青藏铁路建设期间担任青藏铁路建设总指挥部专家咨询组组长,为青藏铁路建设作出突出贡献,作为主要人员获得国家科技进步特等奖,并获得全国火车头奖章和全国五一劳动奖章。研究经历和研究成果曾经在中央电视台多个专题节目介绍和海内外新闻媒体多次详细报道,具有广泛社会影响。

他毕生从事我国寒区工程的科学研究工作和工程技术工作,主持多项重大研究课题,研究成果为青藏铁路、哈大高速铁路建设提供了重要的技术咨询和技术支撑,在中铁西北科学研究院、兰州大学、北京交通大学和中国科学院冻土工程国家重点实验室担任教授和博士生导师期间,为寒区工程建设和科学研究单位培养数十名博士研究生,研究成果获得铁道部、教育部科技进步一等奖各一项。2011年出版专著《青藏铁路冻土环境与冻土工程》,该书2014年获得中国政府专项图书奖和原创奖。

Preface

前言

岩土工程问题多是研究荷载作用下工程本体和工程基础的变形和强度问题,一般地区岩土条件下,影响工程本体和工程基础变形和强度的主要因素主要是地基土体的岩性和水分。寒区工程的变形和强度由于岩土中水的相变转换而呈现剧烈波动,因此相变产生的土体温度就成为地基土体变形和强度的关键性也是特殊性的影响因素。

寒区工程变形和强度问题由于温度的介入和影响,演变为热学过程主导的力学问题,解决这类工程问题则需要从传热学的基本概念和基本现象入手,以控制传热过程为基础,最终以力学问题的研究和解决为最终目标。

寒区工程建设面临的主要工程问题最终可以归结为两类,即多年冻土地区以融化过程主导的工程稳定和变形问题,季节冻土地区以冻结过程主导的工程稳定和变形问题。前者工程变形以融沉变形为主,后者工程变形则以冻胀变形为主。

目前解决多年冻土地地区的融沉问题主要是以“冷却地基”的思路提出的工程设计理论和工程措施,解决季节冻土区的冻胀问题主要是以“控制水分”为核心思路提出的一系列防冻胀工程设计理论和工程措施。但是从工程问题的本质分析,寒区工程的主要问题还是传热过程控制的工程变形问题,因此解决这些问题的具体方法还是离不开对传热过程的诱导和控制,除了多年冻土地区“冷却地基”的思路以外,作者认为“加热地基”的思路也可以在解决季节冻胀问题的过程中推广和应用。

热棒就是控制工程本体传热过程影响的一种特殊工程构件,就其传热特点和传热过程而言热棒是一种无源热虹吸管,它是一种高效传热元件。这种管状金属传热元件,由于青藏铁路冻土工程中热棒的广泛应用而受到诸多关注,也把国内热棒研究和应用技术提高到新的理论和实践水平。

热棒工程是指热棒技术与工程紧密结合和大规模应用的工程结构形式。热棒工程的概念是从青藏铁路冻土区工程建设开始提出的,随着我国冻土学界提出以“冷却地基”的思路修建青藏铁路,以散热导冷为主要机理和功能的热棒开始发挥独特的作用,随后在青藏公路改建工程、青藏铁路运营期工程补强工程、青海省柴达木地方铁路冻土区工程和青藏铁路输变电塔基工程建设中陆续扩大了其应用范围,热棒工程逐渐显示了它的生命力和卓越的工程效果。近期对我国热棒工程的应用状态调研证明了热棒技术及其相关理论与实践的成功,也促使我们进一步思考关于热棒技术和热棒工程应用的深层次问题,这些对提高我国寒区工程建设水平具有重要的意义。

本书是业内第一部关于热棒这种特殊传热元件,热棒工程这种冷却地基的工程措施的全面详细的论著。作者及其所供事单位都是我国冻土区工程理论研究和应用技术研究的开

拓单位和参加单位,也是包括青藏铁路在内的其他冻土区重要工程研究和建设的亲历者。

本书的作者长期从事工程用传热元件的研究和生产工作,多年来致力于青藏铁路、青藏公路等国内重要工程热棒技术的应用研究和工程实践,主持研究和制定了我国第一部热棒技术国家标准。近年来继多年冻土地区热棒技术的成功应用后,在季节冻土区也正在拓展热棒技术应用的另一条途径,为我国寒区工程建设普遍存在的季节冻胀问题提供了新的解决思路和方法。

本书是作者对长期研究和生产实践成果的梳理、探索和总结,也是对国内外冻土工程、热棒生产应用领域专家、学者和工程技术人员已有成果和经验的学习和借鉴,对涉及热棒技术的一些关键专用词汇及其物理含义、工程意义等,由作者第一次给出了论述和定义,并在本书和作者主持、参与、编写、制定的规范和标准中都有所体现。这些对热棒的标准化生产,热棒工程的科学应用,对冻土区工程设计、施工和既有工程病害整治,都具有一定借鉴和指导意义。

本书的写作得到了中铁西北科学研究院张鲁新教授的具体指导和帮助,作为我们的师长张鲁新教授对全书构架、章节内容、数据分析付出了辛勤的劳动,逐字逐句的推敲和修改印证了对我们一贯的无私帮助,使我们受益匪浅,仅用感谢不能表达我们的心情。

写作过程中中国科学院南京冻土工程中心、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室、中铁西北科学研究院、江苏中圣高科技产业有限公司等许多同仁也提供了密切的合作和具体的支持,对此表示衷心的感谢。

由于编写材料繁多、编写时间有限,本书中的疏漏和不当之处在所难免,恳请广大专家和读者不吝指正。

作者

2014年10月

Contents

目 录

第1章 绪论	1
1.1 热棒工作机理基础性研究	3
1.2 热棒工程应用基础技术研究	6
1.3 热棒工程应用形式研究和实践	11
1.4 热棒工程理论和试验研究思路	15
第2章 热棒传热理论基础	18
2.1 热棒基本特征和传热机理	18
2.2 热棒传热极限	29
2.3 冻土区热棒工况	36
2.4 冻土区热棒分类	38
第3章 热棒工艺技术基础和制作	44
3.1 热棒材质和管壳设计	44
3.2 工质选择和充注	45
3.3 热棒结构参数验证计算	47
3.4 除锈和防腐	52
3.5 散热翅片类型和制作工艺	54
3.6 热棒制作工艺流程	55
3.7 热棒检测技术	57
3.8 结语	62
第4章 热棒技术标准和专利技术	63
4.1 技术标准制定的科学和创新意义	63
4.2 热棒技术标准制定理论基础	64
4.3 热棒技术标准涵盖内容	65
4.4 热棒专利技术对技术标准的提升	70
第5章 热棒工程应用理论基础	75
5.1 冷却地基理论	75
5.2 传热均衡理论	86

5.3	有效传热范围和合理埋设间距	93
5.4	热棒散热导冷环境模糊评价理论	103
5.5	冻土区工程病害整治理论	121
第6章	热棒工程应用技术	129
6.1	热棒应用环境评价	129
6.2	影响热棒散热导冷的结构参数	142
6.3	热棒散热导冷现场试验	152
6.4	热棒工程实体试验技术	169
6.5	热棒工程结构设计	176
6.6	热棒工程施工技术	187
6.7	热棒工程运行状态监测技术	188
第7章	热棒工程典型应用	193
7.1	冻土区边缘地区热棒工程	193
7.2	环境气温较高的低温冻土热棒工程	207
7.3	高温冻土区热棒工程	228
7.4	冻土沼泽地段热棒工程	245
7.5	冻土区输变电塔基热棒工程	273
7.6	冻土区点式基础病害整治热棒工程	284
7.7	冻土区公路热棒工程应用	301
第8章	热棒工程长期冷却效果评价分析	312
8.1	热棒工程传热物理模型	313
8.2	热棒工程传热计算模型	316
8.3	热棒工程传热计算条件	327
8.4	热棒路基传热效果计算分析	331
第9章	热棒工程应用现状和展望	359
9.1	热棒工程应用技术程序	359
9.2	热棒工程应用现状综述	360
9.3	冻土区热棒工程运行状态	363
9.4	热棒技术应用展望	371
附件1	热棒工艺和热棒工程照片	374
附件2	《热棒》国家标准(报批稿)	385
附件3	《热棒式管架》国家标准(报批稿)	399
参考文献		412
跋		414

第1章

绪论

热棒是两相闭式热虹吸管(Two-Phase Closed Thermosyphon)的工程应用的称谓,是冻土区广泛使用的一种传热元件。热棒原来在传热元件制造界被称为低温热管,冻土工程界一般在非承载应用时称之为热棒,在承载应用时则称之为热桩。国家技术标准制定后,定名为热棒。

与普通热虹吸管所不同的是,这种热棒内没有吸液芯,冷凝液从冷凝段返回到蒸发段不是靠吸液芯所产生的毛细力,而是靠冷凝液自身的重力。因此这种热虹吸管的工作具有一定的方向性,蒸发段必须置于冷凝段的下方,这样才能使冷凝后的液体工质靠自身重力得以返回到蒸发段。但是在更复杂的工程条件下,热棒的埋设方法受到限制,需要通过管芯来帮助液体从冷凝段返回到蒸发段,因这种管子无法依赖于重力开启工作。

热棒工程指在冻土区设置热棒的工程结构物。如,路基不同部位(路肩、边坡、护道、坡脚、排水沟等)设置热棒;桥梁墩台周围设置热棒;涵洞进出口设置热棒;房屋基础周围设置热棒;输油管道支撑和输变电塔基设置热棒等。设置热棒以后的工程结构物综合系统称为热棒工程。

热棒工程的研究对象,包括热棒和工程结构物两个主要工程单元。这两个工程单元都置身于寒区环境和冻土环境下,因此热棒工程的研究内容应该包括:

- ①寒区环境和冻土环境条件及其对热棒传热过程、传热效果的影响;
- ②热棒置身于寒区环境和冻土环境下的工程效果;
- ③工程结构物在热棒影响下工程稳定性变化;
- ④为更好发挥热棒的工程效果对热棒自身结构的工艺技术改进等。

人们对热棒和热棒工程的认识和深化是随着寒区工程建设的发展而不断延伸和变化的。尤其是在当今全球性气温变化向着升温方向发展的趋势日益明显的情况下,被动的应对气温变化对寒区工程的影响已经被实践证明了其局限性,而用“冷却地基”的思想,主动应对气温升高对寒区工程热稳定性带来的巨大影响,逐渐成为寒区工程界的共识。热棒作为“冷却地基”的首选措施越来越广泛的应用在寒区工程中,热棒工程也逐渐成为一种特殊的综合工程结构物在寒区工程建设中发挥着特殊的作用。

人们对冻土和冻土环境变化影响冻土工程结构物的工程表现和热学本质的研究和试验结果,更加深了对热棒和热棒工程的这种特殊作用的认识。

地球上寒区面积约占陆地面积的50%,寒区主要指分布多年冻土、季节冻土和瞬时冻土的区域。在我国,多年冻土与季节性冻土区域的面积占国土总面积的60%以上,其中多年冻土区域面积占国土面积的22.4%。这些地区的工程建设不可避免地遇到越来越多的寒区工

程问题。已经通车的青藏铁路和哈尔滨到大连的高速铁路的研究和建设实践,证明寒区工程稳定性问题是多年冻土地区和季节冻土地区工程建设的主要技术难题。

多年冻土地区工程问题集中体现在土体融沉引起的工程变形,季节冻土区工程问题集中体现在土体冻胀引起的工程变形,这些工程变形问题都是影响寒区工程结构物正常使用的主要问题。热棒和热棒工程主要解决的是多年冻土地区的融沉造成的工程变形问题。

青藏铁路建设开始前的几十年研究积累,为解决多年冻土区的工程问题奠定了坚实的技术基础,青藏铁路建设初期工程实体试验研究为解决冻土工程问题做出卓有成效的拓展和深化,这些研究和实践都证明:从传热理论基础来讲,调控辐射、调控对流和调控传导,均可有效地调控地基土体的温度场,最终达到工程建筑物的变形稳定。

冻结和融化过程对冻土工程的影响以及冻土在温度变化时对冻土工程的影响都是热学过程的力学表现,控制这种过程使冻土工程保持稳定状态,是冻土工程技术的核心。

热学过程的控制主要应该通过传热媒介进行。热棒作为一种高效传热元件,在控制这种热学过程中具有无可替代的作用。热棒技术成为调控热传导的一种重要技术,它利用和采集自然能,在工作季节降低土体温度,提高土体的热惰性,减缓气温变化对未来冻土路基冻融变形的影响,避免建筑物地基出现灾难性破坏。热棒技术还可以预防建筑物可能发生的冻土融沉病害。

这种能够利用自然能源又不破坏既有建筑物地基基础原有状态的热棒技术,已经成为冻土区保证工程稳定性的重要手段。对于已经建成的冻土工程的补强和病害预防整治工作,热棒技术更是具有不可替代的优势。

多年冻土地区面临的主要技术问题是气温变化导致的多年冻土温度变化,使冻土热稳定性及冻土工程力学稳定性发生变化,这些变化主要表现在以下几个方面:

- ①多年冻土上限(最大季节融化深度)变化导致发生冻融变化过程的土体厚度改变;
- ②多年冻土上限附近的地下冰融化,导致附加融化下沉并引发一些次生冻融灾害;
- ③冻土负温值变化决定冻土强度,因而也是决定冻土用作建筑物地基时的承载力能否满足要求的关键因素,多年冻土地温升高,改变了多年冻土热稳定性,也改变了地基土体承载力。

热棒技术对传热过程和传热效果的调控和影响,最终改变了建筑物地基土体的力学性质,改善了其工程稳定性,这种功效集中表现在:

- ①在多年冻土区,热棒降低土体温度,增加土体冷量储备,增加了土体的热惰性,减缓多年冻土上限的变化甚至使多年冻土上限抬升,土体温度的降低还改善了土体力学性质,在抑制工程变形发展的同时,还可以提高土体力学强度;
- ②在季节冻土区饱和土壤中埋置热棒后,土体冻结过程由自上而下的单向冻结改为垂直和水平方向的多向冻结,从而抑制了冰透镜体生成,对季节冻胀起到抑制作用。

综上所述,热棒工程包括热棒和工程两大基础部分,研究和应用应该从热棒自身传热基础理论和工艺制作技术、工程应用基础技术两个方面进行。

基于以上的基本认识,以往国内外科学技术人员对热棒和热棒工程的研究的展开与深化可以概括为以下几个方面:

- ①热棒传热机理和传热效率、传热效果影响因素的基础理论研究;

②热棒应用环境对热棒工程状态影响途径和影响方式的应用基础研究;

③热棒解决冻土工程问题的应用性研究。

由于研究环境和研究条件以及工程应用条件的差异和局限,目前国内外既有的研究工作单方面深化研究的报道较多,系统性、综合性研究工作的报道鲜有出现。

1.1 热棒工作机理基础性研究

早在1942年,美国发电机工程师Gaugler就曾提出热棒的原理。1964年,美国Los Alamos科学实验室的Grover等人独立地推出了类似Gaugler提出的一种器件,取名为热棒。美国科学家做了第一批试验,证明了热棒高效的传热能力,此后在业界引起了广泛关注,德国、意大利、荷兰、英国、苏联、法国及日本等均开展了大量的研究工作。

加拿大在20世纪60年代后期,向美国购买了热棒专利,开展热棒技术应用研究,并于70年代成立了加拿大北极基础有限公司,向加拿大北极多年冻土区提供热棒及相关技术服务。

苏联在20世纪60年代初期曾由C. Taneeb提出过热传导桩的概念,当时的列宁格勒铁路运输设计院,曾用煤油做工质,设计了单相单管和单相多管热传输系统。20世纪70年代,开展了两相热传输技术研究。

1.1.1 热棒结构参数和热传输性能的研究

Andros和Frank Edward(1980)通过可视化的试验研究,观察并解释了热棒的热传输特征是由以下条件决定:

- ①温度和不同液体填充数量;
- ②热传输速率;
- ③冷凝器温度;
- ④蒸发段与冷凝段长度之比。

研究发现随着液体填充量急速增加到31%,热传输极限迅速增加;而对于更大的填充量,传输极限不依赖于热棒中流体的数量。

Li H, Akbarzadeh A和Johnson P(1991)以水为工质研究了在蒸发器和冷凝器之间具有最小的温度差时热棒的稳态热传输性能,给出了需要启动和维持低温热棒沸腾的最小温差。

Vincent Charles C J等(1992)研究了在瞬态运行时两相封闭回路热棒的整体性能。使用一维方程描述了热棒系统蒸汽运动与液相变化,发现蒸汽-液体的密度之比、无量纲的摩擦系数以及水柱的长度能分别决定热棒的总体动力行为特征。

Lock G S H和Fu Jialin(1992)研究了工质为水的蒸发条件下直角热棒的传热性能。研究考虑了两种情况——垂直冷凝器(下面是水平蒸发器)和垂直蒸发器(上面是水平冷凝器),给出了热传输数据并对两种情况进行比较。

Zuo Z J和Gunnerson F S(1994,1995)研究了热棒的运行温度、几何尺寸、工质数量以及冷凝器散热性能的参数。通过水为工质的模型试验,研究了尺寸减小对两相热棒稳态热传输行为的影响。研究考虑了干涸、临界热流量和溢出极限等对热棒性能的限制,使用的热棒

直径从大约 3mm 到 37mm, 长度 80 ~ 1200mm。研究认为随着热棒变小, 热振荡发生的幅度就越大, 热传输的能力和效率就会显著地降低。

Farsi Hichem 和 Joly Jean Louis 等(2003)进行了两相封闭热棒瞬态温度场的试验和理论研究, 建立数学模型来获得系统随时间变化的分析表达式, 发现不同参数的反应时间依赖于热棒的几何尺寸和热传输规律。

1.1.2 热棒埋置倾斜角度研究

传统的热棒, 一般要求顶部到底部至少具有一定倾斜度, 以保证冷凝后液体通过重力作用回流到热棒底部, 倾斜角度随着蒸发器直径的变化而变化。对于 50mm 直径的热棒典型的倾斜度是 5%; 75mm 直径的热棒为 3%; 100mm 直径的热棒为 2%。

美国进行了许多计算倾斜热棒的研究, 这些研究模拟了热棒的瞬态运行, 瞬态热棒建模的难度非常大, 特别是冻结启动问题。

T Payakaruk 和 P Terdtoon(2000)研究了无量纲的参数(Bond 数、弗鲁德数、Weber 数和 Kutateladze 数)对倾斜热棒热阻之上的热传输速率的影响。

G S H Lock 和 J D Kirchner(2003)通过试验研究了低雷诺数下倾斜封闭热棒的特征, 给出了加热段和冷凝段长度相同的热棒的热传输数据并且讨论了内部流的概念模型。

Gholami M M(2003)通过试验研究了封闭两相热棒的倾斜角度对热传输行为的影响。试验使用水为工质的垂直和倾斜碳钢管。试验表明, 热棒中最大的热流量依赖于倾斜角度, 在倾斜角度为 70° ~ 90° 时热流量最大值为 230W。同时, 发现热棒有效的热传导系数在很大程度上依赖于倾斜角度和热流率, 因此倾斜角度越大, 热流率越大, 有效的热传导也就越高。冷却区的冷凝具有最大的传输阻抗。加热区沸腾时的热传输根据倾斜角度的不同也有较大的局部差别。

工程应用中的地基系统几何形态有可能限制了热棒的倾斜角度, 最近又开发出了一种新的热棒系统, 允许热棒的冷凝器安装时不要倾斜角度, 即所谓水平放置的热棒。

水平热棒是使用气-液对流热传输系统的倾斜热棒的特例。水平系统的差别在于冷凝器通过蒸发器进行循环的方式不同。水平系统的一端连接散热器/冷凝器, 另外一端连接冷凝物收集器的底部。当冷凝器中的冷凝物冷却成为液体, 通过重力降落到冷凝物收集器中(实际上是一个液体冷凝剂的存储器), 这个收集器保持液体冷凝物的垂直下落, 迫使液体冷凝物进入到蒸发器的循环中。液体冷凝物从土体吸收热量, 然后通过蒸发器回路中压力差的作用汽化, 在冷凝器中形成环流。这一过程使得冷凝剂通过蒸发器回路从液体收集器到冷凝器形成回流, 冷凝物和蒸气始终在一个方向流动从而使得热棒壁一直保持湿润状态。

1.1.3 热棒流体性能和传热过程模拟试验研究

Bernier M A 和 Baliga B R(1992)研究了具有垂直蒸发段的封闭热棒一维/二维模型, 模型考虑了混合对流效果和绝缘部分的热损失(热收益), 将提出的一维/二维模型与补充的试验进行了对比。

Harley(1994)开发了一个瞬态的两维热棒模型, 该模型考虑了管壁和下落的冷凝物之间的热耦合。

Zuo Z J 和 Gunnerson F S (1994, 1995) 使用热力学第一定律建立了两相封闭热棒的数值模型, 模型能够进行热棒的优化研究和设计。他们的模型中包含了之前研究所忽略的液膜运动时水平对流形成的轴向应力, 并且发现该轴向应力对热棒的性能有很大的影响。该研究使用了数值技术来解非线性控制方程和边界条件。

Li Xiulun 和 Wen Jiaping 等 (1996) 通过在热棒中插入两个内置管设计了一种新型的两相封闭热棒, 并基于 Saliman 冷凝热传输模型来建立狭长区域环形冷凝热传输的数学模型。

REED Jeffrey 和 Gordon (2002) 研究了两相封闭热棒的分析模型, 建立了蒸气和液膜在热棒的不同部分流动时的质量、动量和能量平衡的控制量方程。该模型对于预测系统的运行特征、系统运行时的溢出和干涸很有效。

Hangying Hu 和 Cunzhen Wu (2003) 研究了相变和热棒结合的热传输问题, 提出了高温相变介质冻结时两相封闭热棒的组合热传输模型。

Bayley & Lock (1965) 基于加热端和冷凝端之间的温度差假定液体流可以被分为较大温差、小温差和适度温差三大类。

Japikse (1973) 描述了从填充空气的圆形热棒的横断面看到的流体, 但没有给出在横断面和热棒整个区域的具体流体形式。

Mallinson 等 (1981) 对没有绝缘段的封闭方形热棒自然对流引起的三维流和热传输进行了数值和试验研究, 并且报道了流场和温度场的详细情况。

Chen Shyh-jou (1984) 观察了考虑翻转蒸气流的重力无芯热棒的返回流的冷凝流动现象以及系统的运行限制。发现采用 Nusselt 数不能满意地解释观察到液膜冷凝的现象, 蒸气剪切滞后冷凝物的流动从而增加了液膜的厚度, 摩擦因子成为相变期间扩大剪切边界的因素, 而出现在界面上的波可以增加热传输效率。

Lavine Adrienne Gail (1984) 通过环形热棒的试验表明在稳态流的条件下, 轴向速度和温度不是对称的, 断面流的速率不是 0, 区域存在逆流。简单的一维/二维分析数据不能够解释这些现象, 研究给出对于两个控制参数 (Grashof 数和倾斜角度) 不同值的结果, 证明流体的翻转对于管壁摩擦和浮力有很大的影响, 最终对轴向速度也有影响, 从而认为没有考虑翻转流的简化分析实际上是错误的。

S S Leong 研究了封闭热棒中的自然对流, 给出了封闭式热棒浮力驱动流的三维数值方程的解法。

Yerkes (1990) 研究了航空旋转热棒热控制应用。

Peterson (1991) 研究了热棒的携带极限以及装有气体返回流热棒中流体的不稳定性。

Niro Alfonso 和 Beretta Gian Paolo (1992) 通过试验研究了两相封闭热棒蒸发器中液-气混合物填充量的简化理论模型, 得出混合物的密度与蒸气的流动速率相关联的结论, 并给出了混合物容量、液体的注入量和能量输入之间的关系式。

Monde Masanori 等 (1993) 研究了有逆向环流液膜和蒸气流的两相热棒的极限热流量。研究使用一个方程控制液膜的流动, 其他方程控制热棒质量和能量平衡。研究认为当液体补充给热棒时极限热流发生。

Randy Clarksean (1993) 通过试验研究了热棒中的自然对流。加利福尼亚伯克利大学的 Fox (1993) 使用己烷-戊烷与己烷-R11 的混合物观察了热棒中的热质传输, 建立了这些热棒

中的热传输与两种混合物之间的关系。

Zhou X 和 Collions R E (1995) 对包含不可压缩气体的两相逆流热棒接触区进行了模型试验,发现在高能量条件下,接触区蒸气-液体边界是不稳定的,接触区的质量传输很大程度上受到该区域对流的影响。

A C KEARY 和 R J BOWEN (1998) 研究了自然对流对于低温热棒冻结的影响。Ángela Jiménez 等 (2001) 进行了包含 Soret 效应的封闭热棒的数值分析,考虑以温度为变量的温度传输效果来获得热棒的通用模型。

Ishihara 等 (2002), 以一个垂直壁作为热传输表面的垂直方块,通过数值方法和试验揭示了液体流和热传输特征以及热棒的自然对流和温度特征,发现它们和直径与热棒长度的比率、热传输表面的温度差以及工质的普朗特数有关。X Zhou 和 R E Collins 研究了两相翻转热棒中蒸气冷凝热传输的度量方法。

近十年来,国外冻土工程技术界还关注了对热棒结构中若干技术问题,如:

①当流体是空气时,在层流条件下鳍齿管流动和摩擦特征的试验和数值研究中,分析了雷诺数、长度/半径的比率、内外管面积之比的影响;

②对大倾角甚至垂直方位的两相热虹吸管传热极限,即干涸限、沸腾限和淹没现象研究,理论分析推导了垂直放置的无芯重力热棒的相应于干涸限的最佳充灌量计算方法,得到干涸限 $Q_{\max}$ 与工质充入量 m 的关系;

③对热棒管内流动的淹没现象提出了经验公式来计算开始出现淹没现象时的热流量等。

以上理论和试验研究对热棒自身结构参数的确定和优化提供了理论支持,并具有一定技术指导作用。

1.2 热棒工程应用基础技术研究

热棒自身性能研究是工程应用的前提条件,而热棒应用在冻土工程中成为热棒工程,需要在以下几个方面进行基础性和系统性研究:

- ①热棒和土体之间传热系统研究;
- ②热棒应用类型和热棒工程形式研究;
- ③热棒工程规模化实体工程研究。

1.2.1 热棒-土体耦合传热系统研究

在热棒应用于寒区工程用以保护多年冻土的研究过程中,不同国家的学者和工程技术人员从不同角度,对大气-热棒-土体这一热交换系统进行了深入的多层次的研究,在热棒工程不同应用领域得到了卓有成效的研究成果。这些研究成果体现在以下几个方面。

20 世纪 70 年代开始进行的热棒在多年冻土地基中应用的评估和试验研究以及单相和两相热棒的试验观测工作由 Bayley 和 Lock (1965)、Jahns (1973)、Japikse (1973)、Galate (1974)、Reid 和 Tennant (1974)、Glover (1975)、Feldman 和 Munje (1979) 完成。

20 世纪 80 年代陆续得出了在不考虑冰边界处水的对流时,通过水和冰的热敏感性的准

静态分析方法。利用热阻模型对冻结土体中热棒蒸发器传热过程的研究分析由 Haynes 和 Zarling(1983)给出。模型热棒试验发现:使用水平蒸发器热传导率有明显的降低,蒸发段有“干涸”(冷凝物在蒸发之前不能到达管的底部)现象,这一现象在使用不同蒸发段倾斜角度($0^{\circ} \sim 12^{\circ}$)的热棒实体试验中得到证实(Lee 和 Bedrossian、Negishi 和 Sawada、Haynes 和 Zarling,1983—1988 年)。

20 世纪 90 年代的工作证明:低温热棒在季节冻结土体的应用是消除冻胀影响的有效技术,在热棒的作用下,土体冻结很快发生,通过限制水从非冻结区向冻结区的运动而消除冻胀(Hangfu Fan 和 Cunwu Wu 等,1995 年)。阿拉斯加应用热棒的实践及研究结果证明,当热棒的单位热传输率值为 $1.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 时,使用热棒技术对于保持多年冻土地区地基的稳定性是合理的。实体两相热棒在大气风洞试验研究,计算了热棒各个部件的热阻抗,发现通过土的热传导阻抗和从冷凝器鳍齿到空气的热传输具有密切关系。

1984 年,黑龙江低温建筑研究所刘鸿绪高级工程师率先在国内研究热棒的传输特性,但由于种种原因未能取得研究成果。2013 年开始,中交第一公路勘察设计研究院为青藏高原高速公路进行的前期研究课题,涉及了有关热棒传输性能及影响因素的试验研究和数值计算研究。

大气-热棒-土体热传输系统涉及的因素很多,状态变化复杂,因此数值模拟具有很大的难度。Haynes 和 Zarling(1988)通过带相变的两维非稳态热传导的计算机有限元程序分析认为,蒸发段最优的埋置位置为粗颗粒填土的底部,该程序允许指定不同的边界方程和描述年气温变化的周期方程。

F D Hayens 和 J P Zarling(1988)在热棒应用于多年冻土分层地基的设计中,使用有限元技术建模,认为填土中的融化深度随着热棒的导热率和绝热层的厚度的增加而减少。模拟显示:热棒蒸发器垂直于填土放置的效果更好。

Paterson Lincoln 和 Schlanger Harry P(1992)用一个冷却土体的热棒研究了封闭的热对流回路与周围土体的热耦合问题,按照热流来自独立的热源对应用于多孔介质的热棒进行了近似分析和数值模拟。研究得到,当 Rayleigh 数超过 1 的时,对流导致热源附近的土体温度降低。

Yau Y H(2001)使用 Microsoft Visual Basic 6.0 开发的程序模拟了基于热棒热交换的无芯热棒在自然通风建筑基础中的热性能,应用效力-热传输单元(NTU)方法和迭代的方法预测了热棒断面温度的分布、热性能及总体热传输效率。

俄罗斯 C·C·维亚洛夫等对土体和热棒做了一系列的假设后用焓法对应用于多年冻土地区的热棒进行热物理计算,认为在考虑到土温和荷载随时间的变化的情况下,应用热棒能使基础尺寸减小若干倍。

潘阳和吴存真(2001)研究了饱和土中热棒的物理数学模型,建立了柱坐标系的连续方程、动量方程和能量方程,并通过 Simple 法用数值方法求解,代入我国东北地区地质与气象条件,将模拟值和实测值进行比较。

1.2.2 热棒-大气-土体系统传热影响因素研究

众多学者研究了热棒-大气-土体系统的传热影响因素,其中环境温度(土体温度和环境

风速)是最为显著的影响因素,因此对这两种因素的研究相对深入和广泛。

(1) 环境风速对热棒传热的影响研究

很多学者认识到环境风速对热棒传热的显著影响,已有研究得出热棒的导热率是风速和蒸发器倾斜角度的函数,并随着空气速度的增加成指数增加(G. S. H. Lock 等,1989)。

国外学者曾经研究利用人工风加速在热棒内产生强迫对流冻结地基土体,提出了诸如主动法、文氏管法、涡轮通风法以及涡轮-风扇法等不同控制强迫对流的方法,讨论了风驱动热棒空气流动速率变化时的流动损失和热传输率(应用于热棒管壁周边的冻结土体中)计算的详细过程。还有研究发现了热棒的几何形状和风速对冻结半径的影响。中铁西北科学研究院在1984年根据当时我国所采用的热棒散热条件器,得出蒸发器和冷凝器之间的温差与通过散热器的风速有关,热棒散热器的热扩散系数可以看作是风速的函数。

Haynes Frank Donald 和 Zarling John P 等(1992)在试验室中模拟热棒埋入土体的野外条件进行试验研究,试验中热棒蒸发段水平放置,具有鳍齿的冷凝端垂直放置,并且热棒具有一个可以将部分冷凝物返回到蒸发器底部的设备,研究得到了直接加在冷凝器表面的风速为 $0 \sim 2.4\text{m/s}$ 的单位热传导率,并将这一热传导率值用在有限元分析中来验证多年冻土的设计。

Evans Austin Lewis(1985)通过对热棒保护多年冻土的试验研究,对速度和温度的观测数据证明,低频率、高振幅的摆动存在于整个流体场中,风的模拟表明夏天的空气受迫对流是一个值得注意的问题;研究结果显示翻转流发生的时候,周围的空气从桩的出口进入、入口离开,研究建立的理论模型用来分析影响翻转流的几个影响因素;模型给出了包括空气流过桩之前和启动条件下的传导和辐射的热传输控制微分方程的解法。

(2) 环境温度对热棒传热的影响研究

俄罗斯研究学者斯洛耶夫进行了关于装有热棒装置的中、小型桥柱墩地基中预报不稳定温度场的理论研究。研究编制了计算装有冷却装置的物体温度场的专门算法;详细分析了适用于温度计算方法的前提条件;查明了与自然因子和结构因子有关的热棒装置的应用范围。该计算研究用三维问题数学模拟法完成。研究认为热棒装置在冷却桥墩地基中的应用范围主要受年平均气温 t_a 指标的限制。在 t_a 高于 -5°C 的地区应用冷却装置是不合适的;在 t_a 低于 -5°C 的低温区,冷却装置适用,尤其适用于存在融区带、高含冰量土等的复杂场合。

1999年的夏天,瑞典学者提出一个名为“亚北极气候中的热棒”的研究课题,用来研究在斯堪的那维亚和其他相似的亚北极气候条件下使用的热棒技术和环境温度之间的内在联系。研究详细记录了地温变化和气候数据,正如预想的一样,与自然地基相比,热棒地基获得了较大的冷量。

1.2.3 热棒应用类型研究

热棒应用类型的研究,随着寒区工程建设的进展以及不同工程类型提出的保护冻土的要求,深入开展并得到长足的进展。

(1) 垂直热棒

冻土区的线形条带状工程,以铁路、公路路基为典型代表,为减少路基横断面上多年冻