

DUOCHANG OUHE FENXI ZAI
SUIDAO GONGCHENG ZHONG DE YINGYONG

多场耦合分析在 隧道工程中的应用

何 川 谢红强 / 著



西南交通大学出版社

多场耦合分析 在隧道工程中的应用

何 川 谢红强 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 提 要

隧道工程是复杂地质系统中的工程,多场耦合问题是地质系统中普遍存在的前沿课题,尤其是在水下隧道和寒区隧道工程中。多场耦合分析已成为隧道工程的重要分析方法,全书以具体工程事例为对象,重点介绍多场耦合分析在隧道工程的应用问题。全书共分为三篇:第一篇介绍了隧道工程中耦合问题的发展与现状以及多场耦合分析的理论基础;第二篇介绍了越江、海等水下隧道中的水压问题、液固双场耦合分析及水下盾构隧道的施工控制问题等;第三篇介绍了寒区隧道中的冻害问题、热液固多场耦合分析以及在寒区隧道抗防冻方面的应用等。

本书可供从事隧道建设的科技人员使用,也可作为高等院校隧道及相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多场耦合分析在隧道工程中的应用 / 何川, 谢红强
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2015.8
ISBN 978-7-5643-4166-4

I. ①多… II. ①何… ②谢… III. ①耦合—有限元
分析—应用—隧道工程—研究 IV. ①U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 189098 号

多场耦合分析在隧道工程中的应用

何 川 谢红强 著

*

责任编辑 王小碧

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

四川省成都市金牛区交大路 146 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://www.xnjdcbs.com>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 182 mm × 256 mm 印张: 13.5

字数: 311 千

2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-4166-4

定价: 49.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

隧道工程总是赋存于一定的地质系统中,地下水、地应力和温度是该物理地质环境中的三个主要因素,隧道围岩温度场、渗流场和应力场之间相互依存、相互联系、相互影响,将各物理场分开进行研究而忽略其相互耦合作用的研究所得出的结论往往与工程实际情况不相适应,也不能满足当前隧道工程建设的需要,尤其对水下隧道及寒区隧道而言,有必要进行热液固多场耦合分析,探明各介质力学特性以及它们之间的相互影响,从而真实反映隧道结构及围岩实际工作状态,确保隧道施工安全性和长期运营安全性。

本书以高水压水下盾构隧道、寒区公路隧道为研究对象,应用多场耦合数学模型,综合现场跟踪试验、数值模拟等研究手段对水下盾构隧道及寒区公路隧道进行多场耦合分析,就水下盾构隧道的施工期安全性及寒区隧道抗防冻措施进行了较系统的研究。全书共分三篇十章。第一篇介绍了国内外耦合问题的发展与现状,以及隧道工程中的多场耦合问题,同时介绍了多场耦合的弹塑性力学、渗流力学及热力学知识,为多场耦合分析提供理论基础。第二篇为水下隧道问题,介绍了越江、越海等水下隧道工程的发展现状及水下隧道的高水压问题,阐述了水下隧道的液固双场耦合机理及相应的数学模型和数值解法,以典型的水下隧道——重庆长江排水盾构隧道为例,介绍了水下隧道施工期结构受力特征液固双场耦合数值模拟技术,并配合现场跟踪测试,对水下盾构隧道的施工安全性进行了评价及优化了施工控制技术。第三篇首先引入了寒区隧道工程及冻害问题;分析了寒区隧道的冻害机理;以典型寒区隧道——鹧鸪山隧道为例,以现场试验及数值模拟为手段,阐述了寒区隧道围岩及结构的温度场分布规律以及适合寒区特长公路隧道的抗防冻措施;引入热液固多场耦合理论,对抗防冻施作前后的抗防冻有效性进行了对比分析,揭示出寒区隧道的热液固耦合作用机理;最后介绍了寒区隧道的抗防冻结构的设计方法。

感谢国内在多场耦合分析理论研究方面的前辈与同行,本书引用借鉴了他们发表的部分基础性理论与调查成果,已在相应章节一一注明,在此一并向他们致以衷心的感谢!感谢重庆市排水有限公司、国道 317 线鹧鸪山隧道工程项目办公室在研究工作中给予的大力协助与支持!感谢中铁隧道集团有限公司一处、武警交通一总队二支队在现场试验中给予的协助!感谢西南交通大学李围、夏炜洋两位博士,马建新、孙文昊、赵强政三位硕士在现场试验方面所做的协助工作!

鉴于著者的水平及认识的局限性,对书中出现的不妥乃至谬误之处,望同行批评指正。著者联系方式:成都市二环路北一段 111 号,西南交通大学土木工程学院地下工程系何川(收),邮编 610031; Tel: 028-87601932; Fax: 028-87603021; E-mail: chuanhe21@sina.com。

著 者
于西南交通大学

目 录

第一篇 隧道工程多场耦合问题

第一章 绪 论	1
第一节 隧道工程中的耦合问题	1
第二节 国内外研究现状	3
第三节 本书主要研究工作	12
第二章 隧道工程耦合分析的理论基础	15
第一节 岩体弹塑性基本理论	15
第二节 岩体渗流力学基础	21
第三节 岩体传热力学基础	29

第二篇 水下隧道工程

第三章 水下隧道工程及高水压问题	37
第一节 水下隧道工程	37
第二节 隧道工程的水压问题	41
第三节 典型水下隧道工程——重庆过长江盾构隧道简介	51
第四章 水下盾构隧道施工期液固耦合效应的动态观测及分析	55
第一节 试验断面的确定	55
第二节 试验项目及方法	55
第三节 试验结果的分析	57
第四节 现场跟踪测试结论	63
第五章 水下盾构隧道施工期液固耦合效应研究	65
第一节 水下隧道渗流场与应力场耦合研究方法	65
第二节 水下盾构隧道施工期渗流场单场数值模拟	73
第三节 水下盾构隧道施工期液固耦合数值模拟	78
第四节 水下盾构隧道施工期主体结构安全性评价	93
第六章 高水压盾构隧道施工期专题技术研究	94
第一节 水下盾构隧道管片破损机理分析数值模拟	94

第二节	水下盾构隧道管片壁后二次注浆控制技术研究	104
-----	----------------------------	-----

第三篇 寒区隧道工程

第七章	寒区隧道工程及其冻害问题	112
第一节	寒区的定义与分布	113
第二节	寒区隧道的分类	114
第三节	寒区隧道冻害问题	118
第四节	典型寒区工程——鹧鸪山隧道简介	124
第八章	寒区隧道冻害机理研究	127
第一节	寒区隧道冻害的调查分析	127
第二节	混凝土的冰冻破坏	128
第三节	局部存水冻胀破坏	130
第四节	冻胀性围岩冻胀破坏	136
第五节	引起隧道冻害的其他原因	139
第九章	寒区隧道围岩及结构温度场特性研究	141
第一节	一般隧道围岩温度场特性研究	141
第二节	寒区隧道围岩及结构温度场现场测试研究	148
第三节	寒区隧道伴相变非稳态温度场数值模拟研究	155
第十章	寒区隧道抗防冻热液固耦合效应研究	163
第一节	寒区公路隧道抗防冻措施	163
第二节	寒区隧道保温层相变温度场研究	168
第三节	寒区隧道热液固耦合机理及数学模型	178
第四节	寒区隧道抗防冻措施的最终设计	195
参考文献		203

第一篇

隧道工程多场耦合问题

第一章 绪 论

隧道工程总是赋存于一定的地质系统中，地下水、地应力和温度是该物理地质环境中的 3 个主要因素，隧道围岩温度场、渗流场和应力场之间相互依存、相互联系、相互影响，将各物理场分开进行研究而忽略其相互耦合作用的研究所得出的结论往往与工程实际情况不相适应，也不能满足当前隧道工程建设的需要，尤其对水下隧道及寒区隧道而言，有必要进行热液固多场耦合效应研究，探明各介质力学特性以及它们之间的相互影响，从而真实反映隧道结构及围岩实际工作状态，确保隧道施工安全性和长期运营安全性。

第一节 隧道工程中的耦合问题

天然岩（土）体总是赋存于一定的地质系统中，地下水、地应力和温度是该物理地质环境中的 3 个主要因素^[1]。在岩体地质系统的形成过程中，由于天然地质作用或人类活动而存在大量的断层、节理、孔隙等地质构造，从而为水流、气流或温度等流体介质的存在和运动创造了条件，使得工程对象不再是单一的固相介质，而是涉及温度、水流的多相介质体，工程研究不再是单一应力场和变形场，而涉及温度场、渗流场等物理量的研究分析^{[2]、[3]}。大量的工程实践表明，岩（土）体中温度场、渗流场和应力场之间相互依存、相互联系、相互影响，物理学上把这种 2 个或 2 个以上的体系或 2 种运动形式之间通过各种相互作用相互影响的现象称为耦合（Coupling）。

当前，耦合问题已涉及隧道工程、采矿工程、水电工程、边坡工程、石油/煤层气开采、地热开采、地震控制及预测、核废料深埋处理等土木工程领域中，其中以隧道工程的热液



固耦合问题尤为繁多^{[3]、[4]}。随着我国基础设施建设和城市市政建设的高速发展,特别是2005年国家高速公路网规划的发布,以寒区隧道、水下(江海、湖)隧道、城市地铁隧道、水工隧洞为代表的特殊、大型及复杂隧道工程呈日益增长的趋势,隧道工程面临更为广泛的应用前景;与此同时,随着国家西部大开发战略的实施,隧道工程也逐渐朝高海拔、高寒、深水及城市市政区域发展,使得工程的规模不断扩大,建设条件不断复杂起来。

一方面,在我国东北、华北、西北等地区广泛分布着季节性冻岩,在东北大、小兴安岭,西部高山和青藏高原等地区分布着多年冻土岩体,随着国家基础设施建设的深入,特别是国家西部大开发战略的推行,各等级公路建设出现了从平原微丘向山岭重丘发展的趋势,大量公路隧道将在高海拔、严寒等恶劣条件下进行修建^[5~7],如大坂山隧道、二郎山隧道、雀儿山隧道、鹧鸪山隧道、巴朗山隧道、拉纳山隧道、珠角拉山隧道、拉脊山隧道等。寒区隧道修建的技术问题比一般地区要复杂得多,其中一个关键问题是寒区隧道一般要受到季节性冻融、冻胀作用的影响:当大气温度降低,使岩体温度达到水的冰点温度时,岩中孔隙水和外来补给水便冻结形成冰晶或冰夹层等,引起岩体或水的体积增大,产生对隧道结构起加载作用的冻胀力,而当大气温度升高又使冻结岩体温度变为正温,岩体中的冰消融,出现融沉现象,造成对隧道结构的卸载,这种周期性的加载-卸载作用将造成隧道结构的破坏。目前,我国在寒冷地区建成的公路隧道数量极少,尚无特长公路隧道出现,但从国内寒冷地区的铁路隧道和欧美、日本等国寒冷地区的铁路、公路隧道的使用情况看,隧道结构的冻害现象十分严重,甚至出现因严重冻害而导致隧道主体结构报废和运营期间发生重大交通事故。如日本道路公团和日本铁道综合技术研究所相关的统计表明:日本全国3800座铁路隧道中有1100座因冻害原因,在冬季运营期间危及行车安全;而仅北海道地区的302座大型公路隧道中,发生严重冻害的就达104座,为消除侧墙壁冰和拱部冰柱,作为整治措施之一,就在较多隧道上设置了电加热装置,为此投入的整治费用十分惊人。在我国,新疆地区地下输油管线的冻裂曾造成巨大的经济损失;寒区公路隧道围岩的冻胀破裂、渗水、挂冰及失稳,每年的维修费十分惊人;寒区建筑物基础的冻胀、融沉,公路铁路路基的冻胀、融沉、泛浆等均严重影响正常的交通运行。大量寒区工程的实践表明,要解决这些关键问题,必须从冻融条件下岩体的根本因素,渗流、热传递及相变上进行深入研究,即进行岩体的温度场、渗流场与应力场的耦合效应研究。

另一方面,由于地球地质构造运动和地震活动,使地球表面形成江、河、湖、海等水域,造成各地域之间的交通障碍和文化差异。随着世界各国经济联系的日益加深,对修建水下隧道和实现各大陆陆路相通,已提到了议事日程。我国是江、河、湖、海以及岛屿分布较多的国家,海岸线就有18000 km,而岛屿岸线有14000 km。特别是沿海地区经济发展迅速,但交通基础设施建设相对滞后。由于海洋的阻隔妨碍了沿海诸省(如福建等)的社会和经济发展。到目前为止,世界上已修建了许多水下隧道,其结构形式以水下深埋暗挖隧道或盾构隧道或沉管隧道为主。而国内也开始了越江(海、湖)隧道的修建^{[7]、[8]},如已建的南京地铁玄武湖盾构隧道、重庆主城排水过江盾构隧道,在建的上海崇明越长江隧道、武汉过长江盾构隧道,拟建的南京长江公路隧道、哈尔滨松花江公路隧道、长沙浏阳河公路及铁路隧道、珠江狮子洋高速铁路隧道以及南京、上海、武汉等地的过江地铁隧道、重庆两江隧道等,对于此类水下隧道的修建而言,无论采用矿



山法、盾构法还是沉管法,客观评估高水压对隧道结构稳定性的影响都是隧道建设中的一个关键技术问题,甚至是工程成败与否的控制性因素,而通过单独考察渗流场或应力场来评价这种影响是不能令人信服的。

与此同时,在城市市政建设方面,世界各国对城市地下空间的开发愈发重视,以地铁、轻轨为代表的城市地下建筑修建正如火如荼,例如,我国北京、上海、南京、武汉、杭州、西安、广州等城市的地铁线建设以及成都天府广场地下广场建设等^{[8]、[9]}。由于城市市政工程的特殊性,需要在城市地下工程的施工中保证施工安全及降低对城市环境的影响,目前普遍采用辅助工法进行施工,使得地下开挖在无水或基本无水的条件下进行,其中主要的方式有:人工降低地下水位、地层注浆、采用压缩空气止水等;而城市地铁建设中对复杂、特殊地段的盾构隧道多采用冻结法施工,如何评价这些施工工法的有效性以及研究相应的优化措施,本质上是研究工程中的渗流场、温度场与应力场的耦合问题。

综上所述,几乎在所有的隧道工程中均涉及热(温度)、液(渗流)、固(应力)3种物理场的问题,而温度场、渗流场及应力场3场之间相互影响、相互制约,将各物理场分开进行研究而忽略其相互耦合作用所得出的结论往往与工程实际情况不相适应,也不能满足当前工程建设的需要,因此,有必要进行热液固的耦合效应研究,将结构、岩体及流体作为一个整体,研究各介质的力学特性以及它们之间的相互影响,从而真实反映结构及岩体的实际工作状态。实践证明,温度场、渗流场及应力场的耦合问题对于隧道工程建设,特别是寒区隧道、水下(海、湖)隧道、城市地铁隧道等大型、复杂隧道的建设具有其理论研究和实际工程意义,势必产生巨大的经济效益和社会效益。

第二节 国内外研究现状

岩(土)体的温度场、渗流场与应力场的耦合作用是一个相对复杂的问题,不仅表现在工程岩体的渗流场、温度场和应力场都是随时间、空间变化的,三者耦合作用又处于一种复杂的动态变化过程中,而且岩体在成岩过程中,因构造运动或人类活动的影响而呈现复杂的不连续性结构特征,使得岩体的渗透性能、热传导性和力学性能也呈现显著的复杂性和不确定性。因此,面向岩(土)体所进行的科学研究是随着人们认识水平的提高而深入的,就岩(土)体的耦合研究而言,经历了从单一场和单一影响因素的研究到热液固3个方面的综合研究过程。

3

一、温度场、渗流场单场研究综述

(一) 温度场研究

岩(土)体温度场的研究最初是从寒区冻土的研究开始的,到目前为止已有 160



多年的历史^[10],但直至 19 世纪前期,冻土及其温度场研究基本处于初步探索阶段;1890 年,俄国成立了冻土委员会,此后开展了较广泛的研究;进入 20 世纪,苏联又经历了 1945—1960 年和 1961—1971 年 2 个较快的发展期,开展了与温度场有关的热力学、物理力学、土壤水热改良、工程建筑稳定性以及地球表面和岩石圈温度场的形成等方面的实验研究和以解析解为主的理论计算研究。作为冻土温度场学科的公认奠基人,Сумгин М. И 真正开始了的理论性研究;Кудрявцев В. А^[10]等在温度场的热物理研究方面也做出了相应的贡献。在北美、西北欧等其他国家和地区出于自然资源开发的需要,也开展了冻土温度场及有关学科的研究;20 世纪初期,阿拉斯加的开采以及 1942 年北美战备公路的严重冻害,都促进了温度场理论较全面的研究;到 20 世纪 70 年代,这些国家相继进入研究的高潮,除了资源开发的需求外,主要原因之一就是现代检测手段和计算技术在冻土研究中得到充分应用。Bonaicina 和 Faasana, A (1973)^[11]求得了带相变一维非线性温度场的数值解;Comini 等^[12]应用有限元法研究了带相变非线性热传导问题;Bansal 等人 (1983)^[13]根据 1974 年在新德里地区气象数据的年变化,对温暖地区的不同地表状况进行了地温分布年变化的研究。Sandegren^[14]考察了在铁路隧道中塑料保温防止结冰的效果;Lee 和 Howell^[15],Lai 和 Kulacki 等人则对多孔介质的热质迁移进行了理论分析和试验研究,提出了确定热质迁移系数的方法。

我国冻土温度场的研究起步较晚,正式开始温度场的理论研究仅有 50 余年历史。20 世纪 50 年代,余力教授开始对人工冻结凿井温度场进行研究,在此期间,主要开展室内外观测和实验的经验方程计算研究,用稳定和非稳定一维线性问题的解析法和半解析法进行。直至 20 世纪 70 年代后期,才逐渐开展非线性相变温度场的数值模拟。近年来,随着寒区隧道、隧洞、路基、挡土墙以及基坑等岩(土)体工程的增多,国内学者进行了大量面向温度场的研究。李东庆等对青藏高原退化的多年冻土路堤进行了热稳定分析;陈永平和施明恒基于分形理论研究了对多孔介质导热系数的计算方法;何春雄等 (2000)^[16]分析了在空气对流换热条件下祁连山区大坂山隧道围岩的冻融状况;张建明等 (2003)^[17]采用稳态比较法,对铁路碎石道碴层的导热系数进行了测试;乜凤鸣 (1988)^[18]提出寒区隧道内的温度分布不是均匀而是变化的,且隧道围岩的初始温度一般也是变化的,要清楚隧道围岩沿轴向的冻融范围,就必须对隧道进行三维空间分析;赖远明等 (2000)^[19~21]运用无量纲量和摄动技术求出了寒区圆形截面隧道温度场的解析解,并根据冻土地区的实际情况对圆形隧道正冻区和未冻区的热传导方程进行简化,应用无量纲量和摄动技术对简化方程进行求解,给出了圆形隧道冻结过程的近似解析解;刘志强等^[140]对带隔热门的通风管路基三维温度场进行了数值模拟,通过带相变的瞬态热平衡微分方程,用伽辽金法导出了有限元计算公式;张学富等^[22]根据带相变瞬态温度场问题的热量平衡控制微分方程,应用 Galerkin 法推导出三维有限元计算公式并编制计算程序,对寒区隧道在不同施工季节、不同初始条件及不同保温材料厚度和导热系数情况下进行了温度场分析;万志军等 (2005)^[23]基于三维稳态热传导理论并忽略对流换热及地质构造等次要因素印象的地温场及地温梯度场的反演方法,提出了高温岩体地热资源模拟与预测方法。

随着世界各国对寒区工程的重视以及相关学科的发展、科技的进步、环境预报要求

的提高以及工程应用精度的需要,单一温度场的研究已不能满足工程应用和理论发展的要求,学科研究逐渐向多相非线性问题以及多场相互作用问题理论模型的建立和求解,研究和应用现代化高效能及高精度的试验技术领域发展。

(二) 渗流场研究

岩(土)体渗流场研究首先从土体介质中开始,土体渗流分析一般采用多孔连续介质渗流理论,然而隧道等地下工程多处于裂隙型或裂隙岩溶型岩体中,使得裂隙围岩中的裂隙渗流呈现明显的各向异性和非均匀性特点,传统的多孔介质渗流理论对其渗透性的研究无能为力。因此,对存在裂隙的岩(土)体,渗流分析应采用岩(土)体渗流分析方法。

裂隙介质的渗流研究从单裂隙中渗流问题研究开始。20世纪40年代,苏联学者ВорожтньКо和Ломзе^[2]用一对平行板模拟了单裂隙中的水流,验证单裂隙介质中地下水运动的立方定律(Cubic Law)。此后,Louis^[24]、Witherspoon和Neuzzi^[25]等人先后提出了粗糙面单裂隙中地下水渗流公式。随着研究的深入,裂隙介质的渗流场研究逐渐转入裂隙网络系统渗流模型的研究。G. Barenblatt (1960)^[26]最早提出了以裂隙导水、孔隙岩块介质储水为特征的双重介质模型;Snow (1969)^[27]基于裂隙面为无限延伸的假定推导了单个裂隙、一组平行裂隙的渗透张量公式,并提出多组岩(土)体的渗流张量具有可叠加性;Wilson和Witherspoon (1970)^[28]将岩体当做连续和不连续介质进行计算比较,提出最大裂隙间距或平均裂隙间距与最小边界尺寸之比分别大于1/50或1/20时应按不连续介质考虑;Huyakorn^[28]、Streltsora (1977)、Duguid (1977)等学者也分别研究了双重介质模型,Wittke (1996, 1986)等不考虑岩块的渗流,以真实裂隙网络分布为基础,运用线单元法建立裂隙网络水流的线索模型,后发展为岩(土)体渗流的裂隙网络模型。Lough (1998)等^[29]提出了以边界元法求解岩(土)体渗流的方法,将岩(土)体看成埋置在孔隙岩块中的平面源(汇)流;Wei等 (1998)^[30]提出研究岩(土)体水力化学特性的离散-连续介质耦合模型。

国内对裂隙介质渗流场的研究起步较晚,20世纪80年代末大型水利工程的兴建,为裂隙介质渗流场的研究提供了机遇。田开铭等 (1986)^[31]进行了不等隙宽交叉裂隙的水力学试验,得出了交叉裂隙的“偏流效应”,后发展成为偏流理论;毛昶熙 (1991)^[32]和张有天 (1997)^[33]研究了具有自由面的渗流分析和初流量法;朱学愚和谢春红 (1990)^[34]提出了一种计算裂隙渗流的多孔介质模型和有限元解法,将局部坐标下的各向异性导水系数转化为全局坐标下的各向异性导水系数;周志芳等 (1993—1997)^[35]应用有限元法反演了岩(土)体的渗透系数张量,提出了裂隙渗流分析的混合网络有限元法;万力等 (1993)^[36]提出了三维裂隙网络的多边形单元渗流模型;速宝玉等^[37]对光滑型裂隙水流及交叉裂隙水流进行了模型试验;王媛^[38]提出的一种新型混合遗传算法来求解相应的参数问题,成功确定了重力坝坝基岩体的相对渗透系数;谢和平等 (1996, 1998)^[39]将分形理论应用到岩体裂隙网络分析,描述裂隙面产状和凹凸不平粗糙度;赵阳升 (1994)^[40]、申晋等 (1998)^[41]应用分形理论研究岩体裂隙分布规律,指出小尺度岩体裂隙分布与大尺度岩体裂隙分布存在一种自相似关系;莫海鸿等 (1997)^[42]提出了裂隙介质网络水流的拓扑模型;王洪涛等 (1997)^[43]提出了三维随机裂隙网络非稳定渗流模型;周创兵等





(1997, 1998)^[44]对岩石节理面形态和水力特性的关系进行了研究,并对岩石节理非饱和和渗流特性、节理张开度概率模型与随机模拟进行了研究;王恩志等(1998)^[45]、成建梅等(1998)^[46]和沈洪俊(1999)^[47]进行了气液二相流体裂缝渗流规律的模拟实验研究;崔中兴等^[48]利用非连续介质裂隙网络渗流数值分析方法结合工程地质勘察方法,对水工隧洞进行了裂隙网络渗流分析;仵彦卿、柴军瑞等^[49~52]对国内外岩(土)体的渗流数学模型进行了系统总结、归纳、发展和分类,将岩(土)体渗流数学模型分为等效连续介质渗流模型、裂隙网络渗流模型及广义(狭义)双重介质渗流模型,提出了岩体渗流的确定-随机性数学模型,并从岩体裂隙网络渗流的特点出发,分析了岩体裂隙网络渗流对岩体裂隙壁施加的法向渗透静水压力和切向动水压力,推导出二维及三维情况下裂隙单元因2种作用力而产生的等效结点力。

二、热液固双场耦合研究综述

(一) 渗流场、温度场双场耦合研究

Parts (1966)^[53]用解析方法探讨了在多孔介质中自由对流的规律,同时讨论了水平来流对自由热对流的影响;Harlan, R.L. (1973)^[54]提出的土体冻结过程中的热质迁移数学模型,第1次将渗流场与温度场耦合起来进行分析,将冻胀理论推向一个新的阶段;Hodgkinson (1980)^[55]建立了核废料围岩水热对流的数学模型,采用级数方法探讨其运动规律,讨论水平来流对自由热对流的影响;Morrow (1981)^[56]进行了模拟核废料环境条件的室内渗流试验,测定热源温度在200~310℃,轴压为10、20 MPa,围压为30、60 MPa条件下的渗透性,发现渗透率随温度而下降,原因在于花岗岩矿物成分在高温下溶解度增加,遇低温区溶解度下降及热膨胀所致;Wickens (1984)^[57]用有限元法模拟核废料围岩地下水流动模式,并同时考虑了潜水面及热对流2种驱动力的作用;Johansen等(1988)^[58]针对在阿拉斯加费尔班克附近地区的多年冻土区的试验隧道,研究了多年冻土蠕变特性和多年冻区地下洞的开挖方法及特殊支护方法;Lowell (1990)^[59]探讨了热弹性对平行裂隙及裂隙渗流的影响,认为因热膨胀作用,裂隙产生自闭,可驱动流体流动;Abdallah (1995)^[60]采用离散单元法研究了在不连续面由于岩体与水体的热传导性不同,存在着岩体与水体有能量交换条件下的热对流问题。

Liu Jiankun (1996)^[61]提出了冻土路基中水热运移耦合问题的计算办法;苗天德等(1996)^[62]以混合理论为基础,借助连续理论的研究方法并参考R. de Boer关于多孔介质的理论框架,研究了含相变多孔介质的本构理论并推导了相应本构方程,初步研究了冻土冻结过程中的水热迁移问题;李守义等(1996)^[63]编制了渗流场、温度场和温度应力3个三维有限元程序,分析了渗流对温度场及温度应力的影响,并考虑到碾压混凝土坝上游面设有防渗面板、排水孔及水平渗透系数和竖直渗透系数的不同;李南生、孙焕纯等(1997)^[64]基于Harlan热质迁移模型和Darcy定理的渠系基础冻结过程水热耦合数学物理模型,对非稳定相变水热耦合输运过程进行数值模拟,采用变物性、系数效应滞后全隐差分格式对非线性变系数水热耦合方程实现电算;黄涛、杨立中(1999)^{[65]、[66]}通



过隧道裂隙围岩体渗透性能与热物理性能的等效连续化处理,初步建立了围岩体温度场与渗流场耦合作用数学模型,并应用于秦岭隧道工程;陆宏轮(1999)^[67]应用混合物的连续介质理论,建立了冻融过程中饱和多孔介质的渗流场、应力场和温度场耦合作用的数学模型,模型以多孔骨架位移、水头和温度为基本变量;赖远明等^[21~23]根据热传导理论和渗流理论,提出了带相变温度场和渗流场耦合问题的数学力学模型和控制微分方程,然后应用伽辽金法导出了这一问题的有限元公式,并对寒区隧道、大坝等岩土工程进行了分析;何春雄等^[16]建立了隧道内空气与围岩对流换热及固体传热影响的综合模型,分析了隧道内空气分别为层流和混流的情况时,隧道内气温及围岩冻结、融化状况;柴军瑞等^[49~52]提出了三维岩体渗流场与温度场耦合分析的连续介质数学模型,并以考虑渗流的一维导热方程的解析解为基础,研究混凝土坝渗流场与稳定温度场耦合分析的数学模型及其数值计算方法,比较客观地反映了渗流场与温度场之间的相互作用关系;何建、马景骏(2001)^[68]根据傅里叶定律和达西水分传导定律导出了路基路面结构体系温度场和湿度场耦合作用的一维计算模型,将冻土区和未冻区统一起来,利用显热容法处理了冻土复杂的相变问题;王铁行、胡长顺等(2003)^[69]基于冻土路基特殊的工程地质,对水分迁移结果即含水量变化对温度场的影响,特别是对热物理参数的影响进行了研究,提出了冻土路基水热耦合计算模型,并给出了水热耦合计算的总体流程图;胡建华、汪稔(2004)^[70]根据傅里叶热传导定律和非饱和土壤水分运动的达西定律,推导了多年冻土区地基-地质体双向冻结过程的湿热耦合的数学模型,并运用有效热容量的概念,对统一已冻区和未冻区的数学形式,利用显热容法处理双向冻结过程中双冻结锋面的复杂相变问题。

(二) 温度场、应力场双场耦合研究

在地下工程、水电工程以及核废料处置工程中,温度应力具有重要的意义。由于施工或运行期内温度变化而造成的结构破坏屡见不鲜。如寒区隧道围岩裂隙和孔隙水因冻胀、消融而对结构产生长期循环作用,造成隧道衬砌的开裂和剥落,导致隧道漏水、结冰、挂冰等冻害;地处寒冷地区的大坝,由于冻融作用而隆起产生冻胀变形,随着时间的推移,大坝的内部被冻结和融化,坝壳表层会出现疏松剥落现象;水电工程大体积混凝土浇注过程中的温度应力造成破坏,等等。

出于寒区工程建设的需要,前苏联于20世纪30年代初对冻胀融沉机理进行了研究,北美在20世纪50年代初开始进行冻土强度理论的研究,美国于20世纪60年代以W. H. Hass为代表开始了现场冻胀的观测工作;R. D. Miller(1972)^[71]提出正冻粘土的冰透镜体底面与冻结锋面间存在冻结缘;Willians和Wood(1985)^[72]通过试验测试了正冻土中的内应力变化;日本的Masami Fukuda和Seiiti Kinoshita(1985)^[73]对土体冻胀时引起对管壁产生的膨胀力进行了观测。

随着我国寒区工程建设、水电工程大体积混凝土浇注以及人工冻结技术在地铁和采矿工程中的应用,我国也开始着手温度场与应力场的耦合研究。20世纪60年代,我国学者开始研究冻土强度,并于70年代开始系统研究冻土强度和蠕变特征,吴紫汪、马巍等(1983)^[74]围绕不同围压下冻土三轴抗剪强度特性做了一系列试验研究;朱强(1983)^[75]



等对渠道的冻融和衬砌进行了大量试验及数值模拟工作；朱伯芳等（1976）^[76]以考虑渗流的一维导热方程的解析解为基础，分析了坝体渗流随坝高、水头、渗透系数变化对坝体稳定温度场的影响；倪国荣等（1995）^[77]充分考虑冻结壁轴对称非均质特性和弹、塑性屈服条件，推导出有关应力、位移公式和井壁厚度的设计方法；龙述尧、陈军^[141]等用加权有限差分-边界元耦合方法对瞬态温度应力场问题进行了研究；丁靖康等（1996）^[78]对冻土区挡土建筑物的设计与冻胀力计算进行了分析研究；王青海等（1997）^[79]探讨了中低放射性核废料地下处置对围岩介质温度场的影响，同时分析了花岗岩介质的热应力效应；赖远明、吴紫汪等^[19-22]利用弹性粘弹性相应原理，导出了衬砌-正冻围岩-未冻围岩系统冻胀力在拉氏象空间中的有关算式，然后采用数值逆变换的方法，求得了寒区隧道的冻胀力和衬砌应力；柴军瑞等^{[51]、[52]}研究了混凝土坝渗流场与稳定温度场耦合分析的数学模型及其数值计算方法，从而为混凝土坝的设计、施工提供重要参考；曹为民、吴健等^[80]发展了能精细反映混凝土材料特性和模拟施工浇筑过程及外界环境条件变化的温度场和应力场计算的数值方法，并研发相关仿真程序，对种种可能的影响因素进行了量化计算分析和综合评判；张淑娟、赖远明等（2004）^[81]借助与程控装置配套的CT技术，研究了青藏高原火火山隧道拱顶和侧拱处的砂质泥岩在冻融循环条件下的损伤扩展特性，并讨论了该条件下引发损伤的主要因素。大量的工程实践表明，温度场与应力场的双场耦合研究在水电工程的大体积混凝土浇注研究等领域得到了较好的应用。

（三）渗流场、应力场双场耦合研究

关于孔隙介质与水流的相互作用研究最早出现于 Terzaghi K（1943）^[82]对有关地面沉降的研究，其主要内容限于考虑一维弹性孔隙介质中饱和和流体流动时的固结，提出了著名的有效应力公式，该公式至今仍是研究孔隙介质与流体相互作用的基础公式；1941年起，Biot（1942，1954，1956）^[83]将 Terzaghi 的工作推广到三维固结问题，奠定了孔隙介质与流体耦合作用的基础；Verruijt（1969）^[84]进一步发展了多相饱和渗流与孔隙介质耦合作用的理论模型，在连续介质力学框架内建立了 Euler 型多相流体运移和变形孔隙介质耦合的理论模型；Snow（1968）^[27]通过试验得出平行裂隙在应力作用下渗透系数的表达式；Gangi（1984）^[85]和 Tsang 分别提出钉床模型和洞穴-凸起模型，用来讨论裂隙渗流与应力关系；Killsall（1984）^[86]从岩体渗透的立方定律出发，考虑 Goodman 单元的节理法向刚度模型，导出了应力与裂隙隙宽、渗透系数之间的关系式；Oda（1986）^[87]由裂隙几何量来统一表达岩体渗流与变形之间的关系；Erichsen（1987）^[2]从岩体裂隙压缩或剪切变形分析出发，建立了渗流与应力之间的耦合关系；Noorishad（1989）^[88]以 Biot 固结理论为基础，将多孔弹性介质的本构模型推广到裂隙介质的非线性变形本构关系，提出裂隙渗流与应力的耦合分析模型；Ohnishi^[52]研究了非连续节理岩体的渗流与应力耦合方法，提出了以节理元为基础的有限元模型；Oda（1985，1986）^[87]以岩体节理统计为基础，运用渗透系数张量法，建立了岩体渗流场与应力场耦合的等效连续介质模型。

在我国，陶振宇（1991）^[1]用有限元法分析了对水库诱发地震的有利断层组合，对某水库诱发地震的震级进行了拟合分析；陈平和张有天等（1994）^[89]提出了岩体渗流与

应力耦合分析方法,以裂隙渗流理论和变形本构关系为基础,对重力坝坝基进行了岩(土)体渗流应力的二维耦合分析;杨延毅和周维垣(1994)^[90]提出了一种渗流-损伤耦合分析模型,阐述渗流岩(土)体的力学作用和岩体的应力状态对裂隙渗流性的影响;张玉卓、张金才(1997)^[91]等通过对较大尺寸的岩(土)体试块渗流与应力的耦合机理研究,提出了不同应力条件下岩(土)体渗流量与应力成四次方关系的观点;耿克勤、吴水平(1997)^[92]分析了岩体裂隙的受力变形机理,研究了单裂隙在法向应力、剪切应力及复杂应力状态下的流固耦合特性,建立了相应的渗透系数与应变相关岩(土)体的流固耦合数学模型,并对拱坝和坝肩岩体的力学与渗流耦合分析进行求解;高海鹰(1997)^[93]在忽略不计完整岩块渗透系数的条件下,借助层面缝隙流运动规律和变分基本原理,建立了三维岩(土)体渗流场和应力场耦合模型,推导出有限元支配方程,提出运用同一套单元网络对2场进行区域耦合离散的观点;王媛^[38]等提出了岩(土)体渗流与应力耦合的“四自由度全耦合分析方法”,将岩(土)体渗流场与应力场作为同一场进行分析,联立岩(土)体满足的渗流方程和应力方程,建立起以节点位移和节点渗流压力为未知量的耦合有限元方程组;杨明举(2003)^[94]通过对地下水封裸洞储气工程应力场、渗流场以及储气场各自特性及相互作用研究,建立了地下水封储气耦合的数学模型;黄涛、杨立中(1999)^{[65]、[66]}基于系统理论研究及工程实践的分析应用,在裂隙围岩介质渗透性能等效处理的基础上,提出了渗流与应力耦合环境下裂隙围岩隧道涌水量预测计算的确定性数学模型方法(包括理论解析法、经验解析法和水文地质数值模拟法);盛建龙、刘新波(1999)等^[95]探讨了岩体内固液相耦合的有限元分析方法,考虑了地下孔隙压力与岩体变形之间的相互耦合作用,建立了孔隙水压的计算模型;沈振中等(2000)^[96]采用伯格模型模拟基岩的粘弹性流变特性,并假设其渗透系数与应力的关系为指数函数关系,提出坝基岩体粘弹性应力场与渗流场的耦合分析模型,对坝基开挖过程进行了模拟分析;陈庆中等(2000)^[97]结合 Sandhu 和钱伟长的成果,建立3场耦合问题的分析方法,为解决3场耦合系统问题提供了理论基础;仵彦卿、柴军瑞^{[2]、[49-52]}等将岩体渗流场与应力场耦合分形的数学模型建模方法分为机理分析法、混合分析法及系统辨识法,并分布形成岩体渗流场与应力场的理论模型,经验-理论模型及集中参数模型,由于对岩体介质的不同处理方法,每种模型又分为等效连续介质模型和非连续介质模型,以机理分析法建立的渗流-应力耦合模型分为等效连续介质模型、裂隙网络模型及双重介质模型(狭义、广义);盛金昌、速宝玉(2001)等^[98]把岩(土)体概化为等效连续介质,基于表征单元体的概念建立了统一的渗流-弹塑性应力全耦合控制方程;引入能反映裂隙剪胀特性的非线性弹塑性本构模型,从而考虑了裂隙非线性法向变形和剪胀对裂隙隙宽的影响,更实际地反映了裂隙变形对岩体渗透性的影响;朱珍德、黄润秋等(2003)^{[99]、[100]}基于能量互易定理并考虑裂隙扩展过程中能量转换和裂隙扩展过程中的相互作用,探讨了岩(土)体在复杂应力状态下本构关系与损伤演化方程,建立了多岩(土)体渗流场与损伤场耦合分析模型,并对三峡永久船闸高边坡稳定进行了分析;李宗利等^[101]以简单的圆形隧洞为研究对象,考虑渗流场作用对其弹塑性解析解进行了研究;吉小明等^[3]分析了岩(土)体渗流场与应力场相互作用的实质,提出了渗流的渗透体积力、渗透压力以及对应力场的影响机理并采用有限元数值模拟的方法计算出渗流场影响



下的应力场分布, 应力场影响下的渗流场分布以及应力场和渗流场各自非耦合分布; 李廷春、李术才等^[102]依据流固耦合理论, 应用三维快速拉格朗日法进行数值分析了厦门海底隧道开挖后的应力分布、洞周位移、塑性区、孔隙水压力分布等结果。

三、热液固 3 场耦合研究综述

国内外对岩(土)体热液固 3 场耦合研究经历了从单场、单因素到多场、多因素, 从多孔介质土体到裂隙介质的发展历程。20 世纪 80 年代初, 出于石油、地热等能源开发以及核废料深埋地质处理等工程实际需要, 国内外开始关注温度场-渗流场-应力场耦合问题, 早期的研究主要集中在 3 场耦合数学模型的建立以及数学求解方法(数值模拟)有限性的检验方面。

Harlan, R.L. (1973)^[54]提出了土体冻结过程中水-热迁移的耦合数学模型, 从此进入了多场耦合问题的研究阶段, 随着对冻胀研究的深入, 出现了一些伴有相变的冻土 3 场耦合模型; Dempsey (1978)^[103]建立了非饱和土中水热耦合运移的数学预报模型; Klein (1981)^[104]根据冻土的蠕变特性提出了一种弹性有限元法; Noorishad 等 (1984)^[88]基于扩展的 Biot 固结理论, 首次提出了饱和岩(土)体的固液热耦合基本方程式; Barton (1985)^[105]对工程岩体地下水渗流场、应力场和温度场之间的耦合关系进行了初步探讨性研究; Hart 等 (1986)^[137]提出了热-水-水流完全耦合系统内的相互作用机理, 并根据混合物理论退到了饱和孔隙介质的热-水-水流完全耦合方程组; Mctigue (1986)^[106]提出了可压缩性的固液 2 相介质具有不同热膨胀性的固液热 3 场耦合方程, 但忽略了介质的热传导性; M.Fremond (1991)^[107]根据连续介质力学和宏观热力学原理推导了饱和冻土冻结时的数学模型; Lunardini (1991)^[137]对正冻土融土中的热传导进行了系统分析; Ngugen 等 (1995)^[137]根据包含热效应的广义 Biot 固结理论, 得出了饱和孔隙介质非等温固结的控制方程组(没有考虑地下水的对流作用); Neaupane^[108]从不可逆过程热力学和连续介质力学理论出发, 推导了岩(土)体的非线性、弹脆塑性热-液-力完全耦合控制方程并围绕方程的求解作若干简化, 得出了冻结温度下冰与岩石的膨胀耦合系数的表达式; Yamabe (2001)^[109]等通过试验研究了低温下日本 Sirahama 砂岩的热-力耦合性质; Konrad (1993)^[110]提出了一个描述正冻土的冰晶形成与水分迁移的模型; Thomas 等 (1991, 1995)^[111]建立了变形非饱和土中热、水、水蒸气及空气传输相互作用复杂的理论模型; 瑞典核能研究所的学者 Jing^[112]结合放射性废物处置问题的研究, 给出了相对较系统的岩体地下水渗流场、应力场和温度场耦合作用的研究模型, 但模型简化实用研究还不够; Millard 等 (1995)^[137]在研究岩(土)体 THM 耦合时提出了较为全面的 THM 耦合作用模式; Gatmiri 等 (1997)^[113]提出了考虑土体骨架非线性变形的固-液-热耦合模型, 较全面考虑了土体介质的变形非线性弹性、液体可压缩性和热膨胀性及热对流; Abousit 等^[114]较早研究了弹性多孔介质中不计水的压缩性和热膨胀性时固液热耦合变分原理; Foriero 等^[137]用有限元模拟了冻土边坡的蠕变; Masters 等^[115]把位移、孔隙压力和温度值当做初始未知量, 研究了土体变形、流体温度和孔隙压力之间的耦合规律。

从 20 世纪 90 年代开始, 美国、英国、法国、瑞典、芬兰、加拿大、日本等 7 国以

及欧盟的 12 个研究小组开始进行 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation) 的国际合作研究计划, 他们采用不同的方法对核废料储库围岩体的 THM 耦合行为进行理论和试验研究, 并已取得了瞩目的成果。我国的 THM 耦合研究始于 20 世纪 90 年代中期, 已进行的工作主要有岩体耦合数学模型的数值模拟及相关的试验研究。我国学者李宁、赖远明、安维东、吴紫旺、马巍、朱元林、李述训、程国栋、徐学祖、苗天德等人先后对冻土的水分迁移与热质转移, 水力耦合问题都进行了较深入的试验和理论研究。

周希圣 (1998) ^[116]首次对上海隧道人工冻结过程的水、热、力、位移的耦合进行了研究, 提出了隧道冻结工程的水、热、力、位移耦合模型; 黄涛、杨立中 (1999) ^{[65]、[66]}探讨了工程岩体赋存地下水渗流场、应力场与温度场之间存在的相互作用, 从场性能等效的原则出发, 通过等效性能场之间耦合作用机理的研究, 初步建立了一个工程岩体地下水渗流场、应力场与温度场耦合作用的简单的数学模型, 为 3 场之间耦合作用定量研究提供了参考; 赖远明等 (1999) ^[119-211]根据传热学、渗流理论及冻土力学提出了带相变的温度场、渗流场和应力场耦合问题的数学力学模型及其控制方程, 应用伽辽金法导出了这一问题的有限元计算公式, 并利用所建立的耦合模型对寒区隧道、挡土墙等寒区工程进行了温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析; 何平等 (2000) ^[117]根据连续介质力学、热力学原理, 提出了土体冻结过程中的 3 场耦合方程, 并指出土体冻结过程中的体积变化与应力状态、补-排水条件、冻结条件密切相关; 刘亚晨等^[118]从不逆热力学基本原理出发, 对核废料储库围岩裂隙围岩体介质 3 场耦合问题进行了探讨, 并根据热力学的基本原理导出了核废料储库饱和岩 (土) 体介质热-液-力 3 场耦合控制方程组, 并进行了正交单、正岩 (土) 体的渗透试验, 分析了裂隙结构面变形规律, 并以试验结果为基础, 给出了岩样裂隙结构面的温度-应力-水力耦合本构关系式; 梁冰等人 (2001) ^[142]、王瑞凤等人 (2002) ^[143]在赵阳升、Brueel 和中井仁彦等人的基础上给出了三维裂隙网络的块裂介质高温岩体固流热耦合方程组; 杨代泉、沈珠江 (2000) ^[119]描述了非饱和孔隙气、水、汽、热耦合运动的理论模型 (该模型假定孔隙气和孔隙水运动分别遵循达西定律, 而影响水蒸气运动的 2 种主要因素分别是分子扩散和孔隙气运动, 其中受分子扩散影响的孔隙水蒸气运动可用 Fick 定律描述) 并根据有限单元法, 编制了一个三维的计算机程序用以模拟非饱和孔隙气、水、汽、热的耦合运动; 李宁、陈波等 (2001) ^[120]在推证多孔介质 3 场耦合数学模型微分控制方程的基础上, 系统地推导了 6 节点三角形单元的固液耦合 2 相介质的温度场、变形场、渗流场 3 场耦合问题的有限元格式, 开发了我国的单场耦合数值分析软件 CDST, 并对该程序的可靠性及分析精度进行了论证, 在冻土多相介质静力平衡方程, 质量守恒原理, 能量守恒原理, 土骨架与冰颗粒、水之间的传力机制, 以及水、冰之间相变机制的基础上, 系统地推导了土、冰、水 3 相介质的温度场、变形场和水分场的 3 场耦合问题的微分控制方程, 开发了相应的冻土 3 场耦合有限元软件; 柴军瑞 (2003) ^[49-52]从岩体渗流-应力-温度三者两两之间的相互作用关系出发, 分别建立了应力和温度影响下的渗流场模型、渗流和温度影响下的应力场模型、渗流和应力影响下的温度场模型, 耦合三者成为岩体渗流-应力-温度 3 场耦合的连续介质模型, 并对此 3 场耦合模型及其数值解法进行了讨论; 靳德武、牛富俊等 (2003) ^[121]

