

大体积混凝土结构 温度场计算

朱振泱 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大体积混凝土结构 温度场计算

朱振泱 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书主要研究了大体积混凝土结构温度场计算中的边界条件问题、水管冷却问题和混凝土自身水化放热问题，具体包括浇筑温度的预测、浇筑温度测量值和有限元浇筑温度选取值、太阳辐射的模拟分析、仓面环境控制的模拟分析、水管周围混凝土温度梯度和温度场精确模拟、埋置单元法改进、早龄期混凝土水化放热精确模拟和晚龄期混凝土水化放热估算等内容。

本书可供水工、施工及相关专业从事大体积混凝土结构设计、施工和科研人员参考使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

大体积混凝土结构温度场计算 / 朱振泱著. — 北京：
中国水利水电出版社，2020.11
ISBN 978-7-5170-8987-2

I. ①大… II. ①朱… III. ①大体积混凝土施工—温度场—计算 IV. ①TU755.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第206350号

书 名	大体积混凝土结构温度场计算 DA TIJI HUNNINGTU JIEGOU WENDUCHANG JISUAN
作 者	朱振泱 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	清淞永业(天津)印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 12印张 173千字 6插页
版 次	2020年11月第1版 2020年11月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	66.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

混凝土温度裂缝是大体积混凝土施工期最常见的裂缝。许多大型坝体工程、隧洞衬砌结构、渡槽结构和桥梁结构都采取了温控防裂计算。目前混凝土温控防裂计算最为采用的方法是有限元法。

目前，计算中常常出现计算结果和实际情况偏差较大的情形，其主要原因是计算考虑的因素和实际情况差异较大：一些误差是不了解工程实际情况所导致的，如很多有限元计算中设定的浇筑温度为测量浇筑温度（混凝土表面以下10cm）处的温度；一些误差是忽略混凝土材料自身性能所导致的，如计算中忽略混凝土自身温度对混凝土水化放热的影响；一些算法忽略考虑水管周围混凝土温度梯度大而且不均匀的特性，导致温度场计算和实际偏差较大。

针对该情况，本书主要研究了大体积混凝土结构温度场计算中的边界条件问题、水管冷却问题和混凝土自身水化放热问题，主要内容包括：浇筑温度的预测，浇筑温度测量值和有限元法计算的浇筑温度的关系，太阳辐射的模拟分析，仓面环境控制的模拟分析，水管周围混凝土温度梯度和温度场精确模拟，埋置单元法改进，早龄期混凝土

水化放热精确模拟，以及晚龄期混凝土水化放热估算等。目的在于更加明确地了解混凝土施工情况、混凝土材料性能和含水管大体积混凝土的温度场特性，进而做出更为精确的模拟。

本书共分为 5 章，第 1 和第 2 章主要介绍学科进展和基础理论，其余章节均为作者在河海大学攻读博士学位、在华东勘测设计院进行博士后研究及在中国水利水电科学研究院期间的研究内容。感谢在研究工作及书稿编写过程中张国新教授、强晟教授和陈炜旻所给予的指导，以及武聪聪、颜志强和刘敏芝博士给予的帮助。

本书的资助项目包括：国家重点研发计划项目（项目编号：2018YFC0406703），国家自然科学基金项目（51779277），中国水利水电科学研究院科研专项（SS0145B612017，SS0145B392016），流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题（SKL2020ZY10）。

由于作者水平有限，有限元数值分析法发展又较快，书中难免有不足之处，诚挚地欢迎读者批评指正。

作者

2020 年 7 月

目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 混凝土温度场计算方法的研究进展	2
1.2.1 混凝土温度与应力场仿真的研究进展	2
1.2.2 基于水化度理论的混凝土温度与应力研究进展	4
1.2.3 水管冷却算法的研究进展	6
1.2.4 反分析方法的研究进展	7
1.3 主要研究内容及方法	8
1.3.1 大体积混凝土有限元温度场计算边界条件研究	8
1.3.2 含水管大体积混凝土温度场研究	9
1.3.3 混凝土水化放热的精确模拟	11
第 2 章 含水管大体积混凝土温度场计算理论基础	13
2.1 结构温度场有限元理论基础	13
2.2 基于热流量积分的水管冷却大体积混凝土温度场算法	15
2.2.1 水管内部热交换	15
2.2.2 水温精确迭代计算	17
第 3 章 混凝土结构温度场初始状态和边界条件	18
3.1 浇筑温度的预测和分析	18
3.1.1 基本定义和理论基础	19
3.1.2 混凝土浇筑过程中的温度变化计算	21

3.1.3	老铺筑层热传导对混凝土浇筑温度影响	27
3.1.4	混凝土浇筑过程中环境温度计算	29
3.1.5	浇筑期间水化热温升	30
3.1.6	混凝土浇筑温度和铺筑层平均浇筑温度的关系	31
3.2	生产运输过程的温度变化模拟	33
3.2.1	温度场计算理论和骨料随机投放有限元	34
3.2.2	细观有限元法预测生产及浇筑过程中混凝土温度变化	36
3.3	太阳辐射的模拟	41
3.3.1	太阳辐射计算的研究基础	43
3.3.2	一种新的太阳光线遮蔽准则	47
3.3.3	考虑太阳辐射的混凝土温度场计算方法	49
3.3.4	太阳辐射算法的工程实例	51
3.4	喷雾降温效果模拟	55
3.4.1	试验设置	56
3.4.2	喷雾与环境降温的关系	57
3.5	本章小结	60
第4章	含水管大体积混凝土温度场计算方法	62
4.1	水管周围混凝土的温度空间梯度特性及对应算法	62
4.1.1	水管周围混凝土温度场特性	62
4.1.2	薄壁结构水管周围温度梯度研究算例	65
4.1.3	非薄壁结构水管周围温度梯度研究算例	70
4.1.4	离散水管模型迭代求解混凝土温度场的误差产生原因分析	71
4.1.5	算法的提出	73
4.1.6	算法的准确性验证	81
4.2	含水管大体积混凝土埋置单元法的改进	91
4.2.1	埋置单元法基本理论	92
4.2.2	埋置单元法的改进	95
4.2.3	管壁放热系数反分析	98
4.2.4	改进的埋置单元法准确性验证	111
4.3	含水管混凝土网格布置研究及工程应用实例	114

4.3.1	含水管混凝土网格布置研究	115
4.3.2	效率分析及网格剖分实例	118
4.3.3	工程应用实例	121
4.4	本章小结	128
第5章	大体积混凝土水化放热计算模拟	130
5.1	基于 Arrhenius 方程的考虑温度历程的混凝土水化放热反应	130
5.1.1	混凝土水化度和活化能与气体常数的比值关系研究	131
5.1.2	混凝土水化放热模型研究	137
5.1.3	算例	140
5.2	混凝土温度场迭代计算收敛性	146
5.2.1	水化放热模型改进	147
5.2.2	考虑自身温度历程的力学性能变化发展	150
5.2.3	工程实例	152
5.3	晚龄期混凝土的水化放热分析	158
5.3.1	早龄期混凝土绝热温升试验的热损失	159
5.3.2	晚龄期混凝土的绝热温升	162
5.4	本章小结	164
参考文献	参考文献	166

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景

混凝土（普通混凝土）是由水泥、砂、石和水按适当比例配合的拌和料经一定时间硬化而成的人造石材。为了改善混凝土的某些性能，还可在混凝土中添加适量的外加剂和掺合料。混凝土具有抗压强度高、可塑性好、耐久性好、原料丰富、价格低廉、可用钢筋加强等优点，广泛应用于建筑工程、水利工程、道路、地下工程和国防工程等，是当代最重要的建筑材料之一，也是世界上用量最大的人工建筑材料。混凝土结构由于内外因素的作用很容易产生裂缝，而裂缝是混凝土结构物承载能力、耐久性及防水性降低的主要原因。混凝土在建筑工程中发挥着不可缺少的作用，但温度裂缝严重影响混凝土的性能。解决温度裂缝问题要建立在混凝土温度准确预测的基础上，但混凝土的一些特性使得其温度场难以被准确预测，具体主要包括以下几方面内容：

(1) 初始计算条件以及边界条件难以准确确定。不同时刻浇筑的以及不同部位的混凝土初始温度差异很大，各个工程的边界条件也差异较大。目前很多计算均对这些条件做简单处理，结果误差往往较大，甚至进一步影响对应的温度应力。

(2) 混凝土的温度裂缝与水泥的水化放热有密切关系。水泥作为混凝土的胶凝材料，直接影响混凝土各种性能。水泥的基本物质是硅酸盐类水泥，一般由硅酸盐水泥熟料、石膏和混合材料三部分组成。硅酸盐水泥熟料的主要矿物质包括硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙，水泥的水化反应主要是这四种物质和水的反

应。水泥的水化与其自身温度有密切的关系：通常情况下，温度越高，水泥的水化反应越快；温度越低，水泥水化速度越慢，在负温下，水泥的水化趋于停止。精确考虑温度对混凝土水化速率的影响较为困难。

(3) 水管冷却效果难以精确模拟。为了控制混凝土内部温度，大体积混凝土内部往往布置冷却水管。冷却水管分铁管和塑料管，铁管的导热性能好，而塑料管则往往较容易布置。混凝土是热的不良导体，水管附近混凝土温度梯度很大。如何精确计算出水管及其周围混凝土温度场，也是一个难点问题。目前，离散迭代法可以计算出水管及其周围混凝土温度场，但用该方法求解混凝土温度场问题存在一定的局限性。由于水管半径只有 1~2cm，为了保障计算精度，在水管附近必须采用密集网格；而如果在水管附近采用密集网格，对于大体积混凝土三维温度场的模拟又往往需要大量的节点，对计算机性能要求较高，且网格密集的程度对温度场计算精度的影响难以判断。

本书主要内容是在前人研究的基础上，对边界条件、水化放热和水管冷却的相关细致模拟做进一步研究。本章主要对前人研究成果和本研究的创新点及主要内容进行阐述。

1.2 混凝土温度场计算方法的研究进展

1.2.1 混凝土温度与应力场仿真的研究进展

20 世纪 60 年代末，美国加州大学土木工程系教授 Wilson E. L. 研发了第一个大体积混凝土结构施工期的二维温度场有限元仿真程序 DOT-DICE，这也是有限元方法首次应用于混凝土温度分析中，该成果在 Dworshak 坝成功运用。1985 年美国工程师 Stephen B. 等在 Wilson E. L. 编写的程序基础上做了一些改进后，将其应用于全美第一座碾压混凝土坝（RCCD）——Willow Creak 坝的温度场分析。他们第一次对混凝土的施工过程进行了模拟，并用逐步递推的方法求出了不同时期坝体的温度分布。尽管采用的是比较简单的一维模型，但在当时是最先进的方法，并且计算结果和实测结果吻合

得相当好，因此该项成果被认为是温度场有限元分析的首份重要文献。混凝土徐变应力场分析方面，几乎在温度场仿真程序 DOT-DICE 研发成功的同一时期，二维徐变应力场计算程序也编制完成，却因当时很难提出一个可靠的弹性模量和徐变随时间变化的关系而一直没有得到广泛应用。1988 年，在第 16 届国际大坝会议上，Ditchey E. J. 等和 Yonezawa T. 等发表的两篇文章表明当时的混凝土温度和应力场计算均已开始考虑时间因素。1992 年，Barrett P. K. 等为了更加准确地模拟混凝土的温度和应力场，创造性地将 Smearred Crack 裂缝模型添加到温度和应力仿真分析中，也就是三维温度和应力场计算软件 ANACAP。近年来，日本学者在这方面的研究成果也较多，逐渐走在世界前列。

国内在这方面的研究起步也较早，从 20 世纪 50 年代开始就从未停止过且一直处于世界先进水平。朱伯芳院士早在 1956 年就公开发表了《混凝土坝的温度计算》一文，此后一直在该领域进行深入研究，《朱伯芳院士文选》和《大体积混凝土温度应力与温度控制》是其多年研究成果的总结，成为当前国内学术界和工程界公认的权威资料。之后，很多高校和科研机构都在该领域进行了大量研究，包括中国水利水电科学研究院、河海大学、清华大学、天津大学、武汉大学、西安理工大学、大连理工大学、三峡大学等，取得了显著的成果。不同学者对该问题的研究越来越具体化和有针对性。张国新在数字化温控防裂、非均质材料温度场计算和氧化镁微膨胀混凝土模拟研究等领域均做出了出色的贡献。丁宝瑛等在仿真计算中考虑了材料参数变化的影响。刘光廷、麦家焯等把断裂力学成功运用到混凝土表面温度裂缝问题研究中。赵代深等在混凝土坝多因素仿真方法研究方面取得了一些成果。李国润研究了浇筑速度对温度应力的影响。张国新等在边界元方法计算 RCCD 温度及应力方面取得了一些进展。刘广廷对混凝土施工期温度对弹性模量的影响效应做了探讨。朱岳明在多个工程推广水管冷却算法精确计算，并取得了出色的成就。还有一批学者对新型混凝土材料（如 MgO 微膨胀混凝土）和外加剂等的性能及其工程应用提出了许多独到见解。梅明荣从细

观角度对掺 MgO 混凝土的自收缩特性做了一些尝试性研究。

随着现代筑坝技术的不断发展, 仿真计算模型越来越复杂、规模越来越巨大、对精度的要求也越来越高, 这些都促进了科研人员对高效率、高精度仿真方法的探索。朱伯芳院士率先提出了“扩网并层算法”, 采用拟均质单元。王建江提出的“非均匀单元法”将梯形分布的材料参数近似地看作单元局部坐标的连续函数。朱岳明提出了“非均质层合单元法”, 该方法仿真原理严密且实际应用效果良好。陈尧隆提出的“浮动网格法”在 RCCD 中运用成功。王宗敏、刘光廷提出基于位移等效的等效连续模型, 能够加大有限元网格的尺寸。另外, 黄达海提出的“波函数法”和刘宁的“子结构技术”等也是有效的计算方法。上述算法均能有效降低计算规模和提高计算速度, 仿真结果的精度针对不同问题则各有千秋。

1.2.2 基于水化度理论的混凝土温度与应力研究进展

国外对水泥(混凝土)水化的研究很多, 多采用先进的试验方法对水泥水化过程进行观测, 根据观测结果阐释水泥水化过程和机理。Kjellesn K. O. 采用 X 射线对混凝土水化过程中形成的“空壳”进行跟踪观测, 从“空壳”的变化过程研究混凝土的水化。Ye G. 利用超声波脉冲对水泥基材料的微观结构形成过程进行数值模拟和试验, 并利用试验结果修正数值模拟, 从而将水泥的水化分为两个重要的过程。Morin V. 利用超声波对混凝土的水化过程进行观测, 得到混凝土内部毛细管的演变过程。类似的还有 Jhon J.、Bertil P.、McCarter W. J. 等所做的研究, 这些研究方法虽然各不相同, 但结果都基本一致。普通硅酸盐水泥的水化是熟料组分、硫酸钙和水发生交错的化学反应, 反应的结果导致水泥浆不断稠化和硬化, 即: 从化学上讲, 水化是一种复杂的溶解-沉淀过程, 各种水泥矿物质以不同的速率同时进行而且彼此影响。水泥水化机理的解释有多种, 至今仍无统一的结论, 但普遍认为水泥水化过程可以分为 5 个阶段, 即初始水解期、诱导期、加速期、衰退期和稳定期。

影响混凝土水化反应的因素很多, 包括水泥的质量、水灰比、矿物质掺合料、外加剂、水化温度等。提高水泥细度, 增加表面

积，可以使水化反应诱导期缩短。水灰比较大时，溶液中的离子的溶解度较大，水化速度较快。采用外加剂可以调节水泥的水化速率，常用的外加剂有促凝剂、缓凝剂、快硬剂等。绝大多数无机电解质都有促进水泥水化的作用，有机外加剂对水泥水化有延缓作用。矿物掺合料主要包括粉煤灰、矿渣、火山灰等，对水泥水化的影响各不相同。水泥中如掺入粉煤灰，则水化放热量和水化反应速率减小。矿渣水泥比普通水泥的水化热要低，而且和普通水泥的水化放热过程相比，在水化过程有可能经历两个水化放热高峰。火山灰水泥的矿物成分会加速水泥的水化，水化放热速率也要高于一般水泥，但总的水化放热量降低。

水化度 (Degree of Hydration) 即水化反应程度，即某一时刻水化反应与胶凝材料完全水化的状态相比所达到的程度。研究表明，温度对水泥水化反应速率的影响较大，后者随温度的升高而加大，且服从 Arrhenius 函数。成熟度函数是温度与龄期的函数，最初用于刻画混凝土强度随水化反应变化的特性。随着 Arrhenius 函数逐渐被接受，Freiesleben H. 等于 1977 年提出基于该函数的等效龄期成熟度函数，在描述混凝土强度的同时，也用于反映混凝土的热学特性。对于同种混凝土而言，无论其养护温度和龄期如何变化，成熟度相同，则水化度也相同，其热力学性能必然也相同。因此，水化度概念成为混凝土等效龄期成熟度与热力学特性之间的桥梁，能更直观地表述混凝土龄期、温度以及水化反应对其热力学特性的影响。基于上述思想，国外研究者在试验基础上提出了若干水化度与等效龄期成熟度的函数关系式，主要有复合指数式、双曲线式和指数式。

混凝土的各种热力学特性，如绝热温升、导热系数、强度、弹性模量、热膨胀系数等都与水化度有关，且可用水化度来表示。Kim J. K. 指出用来描述水化反应速率的混凝土活化能不是常数，而是不断变化的，并在试验基础上建立了活化能函数。目前有研究对基于水化度的四种水化放热模型做了对比，并推荐在研究中采用复合指数式。Anton K. S. 等建立了基于水化度的导热系数计算模

型，计算结果显示混凝土水化过程中导热系数随水化度的增加而减少，Schutter G. D. 和 Reinhardt H. W. 等也得到了相同的结论。不少学者提出了基于 Arrhenius 函数和等效龄期的混凝土抗压强度模型，Hattle J. H. 认为混凝土在由液态向固态转化的过程中泊松比是不断减小的，并提出了基于等效龄期的混凝土泊松比计算式。有三位学者研究混凝土热膨胀系数的变化过程，尽管在早期的变化幅度有所不同，但均承认混凝土水化早期热膨胀系数快速减小，1 天后趋于稳定。1962 年，England G. L. 等通过室内试验研究了徐变度随温度的变化规律。上述研究表明人们对混凝土的水化放热过程及热力学特性的认识已经取得了较大发展，从而提高了对混凝土温度与应力问题的研究水平和数值模拟的可靠性。

1.2.3 水管冷却算法的研究进展

混凝土是热性材料，在浇筑后不久，受水泥的水化反应影响，混凝土温度不断上升，内部温度最高可达 $30\sim 70^{\circ}\text{C}$ ；它同时又是一种热惰性材料，内部热量散发慢于表面，形成了内部温度高于表面温度的情形。过大的基础温差和内外温差的存在均易导致降温过程中混凝土的开裂，因此，从根本上防止裂缝出现的方法就是及时地将混凝土内部的热量导出。

自美国垦务局于 20 世纪 30 年代首次将水管冷却技术成功运用于胡佛坝以来，该项技术成为一种有效的坝体温控防裂措施，至今仍被广泛应用于诸多工程。水管冷却的温度场问题是一个复杂的非线性问题，国内外均对其理论基础和数值方法进行了长期的研究。美国垦务局用分离变量法对水管二期冷却问题进行了求解，最终得出了无热源平面问题的严格解答和空间问题的近似解答。朱伯芳利用积分变换对水管一期冷却问题进行求解，得到了有热源平面问题的严格解答和空间问题的近似解答，还提出了水管冷却效果的等效热传导方程、非金属水管冷却计算方法、有限元法等；朱岳明将精确算法应用于多个大体积混凝土温控结构计算中，并取得了很好的效果。麦家焯则把水管冷却的解析解和有限元结合起来求解。

工程应用方面，Roy R. 等曾研究过水管布置方式对冷却效果的

影响；朱伯芳研究了聚乙烯冷却水管的等效间距以及高温季节结合水管冷却技术的混凝土表面保温问题；陆阳、陆力讨论了混凝土后期冷却的优化控制；黎汝潮通过现场试验指出塑料管的冷却效果也是比较明显的；朱岳明利用精确算法对混凝土中塑料管冷却效果进行了试验研究，发现并非管径越大冷却效果越好，原因在于管径越大，管壁也就越厚，冷却效果反而越差。

1.2.4 反分析方法的研究进展

反分析分为系统辨识和参数辨识。系统辨识是通过量测得到系统的输出和输入数据来确定描述这个系统的数学方程，即模型结构。参数辨识是在模型结构已知的情形下，根据能够测出来的输入和输出，来决定模型中的某些或全部参数。

参数辨识是近几年发展较快的年轻学科，在各个领域都引起了重视。根据问题的性质和寻找准则函数极值点算法的不同，参数辨识法可分为正法和逆法。逆法和正法的求解过程相反，它是把模型输出表示为待求参数的显函数，利用此函数关系由模型的量测量来反求待求参数。正法不是利用极值的必要条件求出参数，而是首先对待求参数指定初值，然后反复计算模型输出量，并和输出量测值比较，直到准则函数达到最小值。如果吻合良好，假设的参数初值就是要找的参数值，否则修改参数值，重新计算模型输出值，再和量测值进行比较，直到准则函数达到极小值，此时的参数值即为所要求的值。

可以看出，正法和逆法都是寻求准则函数的极小点，但寻求的算法不一样。正法比逆法具有更广泛的适用性，它既适用于模型输出是参数的线性函数的情形，也适用于非线性的情况。逆法需要有较明确的解析解，正法可以采取数值解法，在实际运用中应用更为广泛。目前，常用的正反分析方法有最小二乘法、阻尼最小二乘法、鲍威尔法、单纯形加速法、模式搜索法、变量轮换法、复合形法、可变容差法等，较新的发展较快的还有神经网络分析法、摄动反演分析法、遗传算法等。

对于混凝土温度反分析问题，由于热传导的模型结构已知，

目前主要研究的是参数辨识。在混凝土温度场计算中,温度参数主要包括水化放热模型参数、热传导参数(导热系数、导温系数、比热、密度)和边界热交换参数。

朱岳明利用试验结果,采用阻尼最小二乘法对温度场的绝热温升计算参数、导热系数、表面热交换系数进行反分析计算。张宇鑫等采用遗传算法对混凝土的绝热温升参数、导温系数和表面热交换系数进行了反分析,采用最优保护策略和二点交叉、对适应性函数进行拉伸的方法对基本的遗传算法进行改进,并用于温度场参数的反分析。李守巨将热传导反问题作为非线性优化问题处理,建立了基于模糊理论的混凝土热力学参数识别方法,并分析了混凝土热力学参数识别结果的统计特性。

总之,混凝土温度参数反分析问题与其他反分析问题具有很多共性,相应的,各种各样的反分析方法都在混凝土温度反问题中得到了应用。对目前的混凝土温控防裂研究来讲,这些方法都是非常有用的。

1.3 主要研究内容及方法

本书的第 1 章主要介绍了目前温控防裂的一些进展,第 2 章主要介绍了温度场、应力场有限元方法和考虑水管冷却大体积混凝土温度场的精细算法和等效算法。

1.3.1 大体积混凝土有限元温度场计算边界条件研究

在温度场有限元计算中,初始条件和边界条件的准确确定是精确计算的基础,本书的第 3 章重点研究温控计算中有限元边界条件,并在以下几个方面做出改进:

(1) 提出一种浇筑温度预测方法,该方法无须进行有限元模拟即可精确预测浇筑温度。研究环境温度和老铺筑层混凝土热传导作用对混凝土浇筑过程温度的影响。对所有可能的情况均进行数值模拟并求出相应的系数。采用公式拟合导热系数、导温系数和表面放热系数和混凝土温升系数的关系。提出日平均环境温度和最高环境温度浇筑时段的平均环境温度的计算方法,用于求解日平均浇筑温

度和最高浇筑温度。研究混凝土水化放热对混凝土浇筑温度的影响，提出相应的计算公式。

(2) 大型混凝土坝工程浇筑铺筑层内部温度分布不均匀。规范规定的混凝土浇筑温度（铺筑层表面以下 10cm 处的温度），并不能代表铺筑层的平均温度。本书提出一种由浇筑温度计算铺筑层平均温度的方法。与直接使用实测浇筑温度作为有限元计算使用浇筑温度相比，将铺筑层平均温度作为有限元计算的浇筑温度，计算结果更为精确，提高了跟踪分析结果的科学准确性。

(3) 对于大型水利工程，由于风冷技术、低热水泥和大型机械化施工的应用，混凝土生产到浇筑过程中的温度变化规律和以往有较大不同。本书根据观测结果，建立相应的细观有限元理论，编写程序并计算分析。根据实测结果和细观有限元验证，由于风冷造成的粗骨料、细骨料和砂浆的温度分布不一致，可造成生产、浇筑和运输过程中的混凝土温度场分布不均匀。采用细观有限元分析可以较好地模拟运输、浇筑到铺筑层覆盖过程中的混凝土温度发展。

(4) 本书对高拱坝温控仿真中太阳辐射影响进行深入研究，提出一种高效且易于实现的遮蔽满算法，使得计算大体积混凝土施工期和运行温度应力过程中能考虑太阳辐射的影响且不影响计算效率。改进考虑太阳辐射温度场计算方法，实现混凝土施工期考虑太阳辐射温度场精确计算。基于当地的气象条件，在西南地区高拱坝的温控防裂跟踪模拟计算中考虑太阳辐射的影响。计算结果表明，考虑太阳辐射后，坝体部分区域拉应力明显增大。

(5) 目前智能化控制需要研发仓面气候自动控制系统，可以在浇筑过程中根据浇筑要求和外界环境温度，实现喷雾设备的自动调节，将混凝土浇筑温度和仓面湿度控制在合理范围内。控制系统中的喷雾模型十分重要。基于此，本书提出一种仓面环境控制模型，研究仓面内外环境和喷雾机运行参数之间的关系。

1.3.2 含水管大体积混凝土温度场研究

对于大坝等大体积混凝土结构，通水冷却时最常见的也是最难以模拟的是温控措施。本章系统地研究了精确算法和埋置单元法，