

郭之章 傅 华 编著



The background of the cover features a technical drawing of a dam cross-section. The drawing is composed of several horizontal dashed lines representing different layers or zones. Solid black lines represent the dam's profile and internal structural elements. A prominent solid line curves from the top left towards the bottom right, intersecting the horizontal dashed lines. Another solid line is positioned above it, also curving. The drawing is set against a light orange background with a grid pattern, which is itself set against a larger blue grid background.

# 水工建筑物的温度控制

水工建筑物设计丛书 潘家铮 主编

水利电力出版社

THE HYDRAULIC STRUCTURE  
DESIGN SERIES

TEMPERATURE CON-  
TROL OF HYDRAULIC  
STRUCTURES

水工建筑物设计丛书 潘家铮 主编

水工建筑物的  
温度控制

郭之章 傅 华 编著

水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书较为系统地介绍了大体积混凝土水工建筑物的温度与温度应力的一般计算方法、控制温度防止裂缝的技术措施与实践经验。主要内容有：混凝土的变形特性、温度变化规律、混凝土浇筑块、板、梁结构的温度应力与应力松弛计算、控制温度防止裂缝的各种技术措施及实例。

本书可供大体积混凝土水工建筑物的设计、施工人员使用，也可供大专院校水利、土木等专业师生参考。

\*\*\*\*\*

本书为傅华、郭之章合著。第一、四、十、十一、十二章为傅华编写；第六、七、八、九章为郭之章编写；第二、三、五章为傅、郭俩合写；郭之章并负责统稿。最后经潘家铮审定。

水工建筑物设计丛书 潘家铮 主编

### 水工建筑物的温度控制

郭之章 傅华 编著

\*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 16.125印张 358千字

1990年11月第一版 1990年11月北京第一次印刷

印数 0001—1570册

ISBN 7-120-01185-5/TV·390

定价11.75元

## 序 言

二十多年前笔者曾写过一套《水工结构应力分析丛书》，虽然体例庞杂，取材不精，而且有不少讹误，但在当时尚能满足实际设计同志的需要，所以受到欢迎。直到目前，笔者还经常接到各地读者来信的鼓励，并建议重版。这不仅是对笔者的勉励，更是一种鞭策。但在跨入八十年代的今日，原书内容显然不能满足要求了，所以再重版旧笈是不适宜的。

为了满足许多读者的期望，在有关领导的关心和鼓励下，我们试图以一套新的丛书来替代旧著，这就是即将陆续与读者见面的《水工建筑物设计丛书》。编写这套丛书的目的，乃在弥合教科书、论文文献和实际设计工作间的距离，供广大的水利水电设计同志，特别是基层设计同志在实际工作中参考，还可作为有志进修者的自学材料。在编写时，我们除力图保持原著一本书一个专题、篇幅精简短小的特点外，还想有所提高。即除了仍以结构的分析计算为中心外，适当论述一点有关设计上的问题，同时尽量反映国内外在近二十年来的成就和进展，力求跟上当前形势的需要。全书以实用为主，但也适当注意理论上的论述和概括，并不写成像手册一样。当然，要做到这些是很困难的。每种水工建筑物都有它的特点和复杂的一面，要详尽地讨论它们的设计问题，不仅是我们水平所不及，而且也断非小小的篇幅所能容纳。所以，本书在选材时力求在篇幅所及的范围内结合分析计算，择要介绍一些主要设计原则。基于同样理由，对理论分析中的许多详细的推导过程，也不得不割爱，而只列出基本理论、假定

和重要的成果和公式。当然，我们也力求写得清晰连贯，使读者不难自行导证，并尽量给出有关的文献名称，使读者在必要时可以找到出处。

要编写这样一套丛书，已非笔者个人的能力和时间所及，因此邀请了有较丰富实践经验的同志来共同撰写，笔者只分担了小部分编写任务并做了力所能及的校阅工作。

根据原丛书的内容，并在征求了一些同志的意见后，本丛书将暂定为以下十种分册：压力钢管、水工隧洞和调压室、重力坝、拱坝、土石坝、溢洪道、坝内的孔口和廊道、水工建筑物的温度控制、水工建筑物的有限单元分析以及工程地质计算和基础处理。各分册将视撰稿进度陆续出版。

最后，笔者代表所有参加编写的同志，向热情审阅和加工本丛书的同志们表示衷心的感谢。对本丛书的批评和改进意见请寄水利电力出版社转。

潘家铮

1981年

## 主要符号表

$T, T(x, y, \tau), T(r, \tau)$ ——温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$x, y, z$ ——直角坐标;

$r$ ——极坐标;

$\tau$ ——时间;

$a$ ——导温系数(温度扩散系数),  
 $\text{m}^2/\text{h}$ ;

$\lambda$ ——导热系数(热传导系数),  $\text{kJ}/$   
 $(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$c$ ——比热,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$

$\rho$ ——密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\beta$ ——放热系数(热交换系数),  $\text{kJ}/$   
 $(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$\alpha$ ——线胀系数,  $1/^{\circ}\text{C}$ ;

$E$ ——混凝土弹性模量,  $\text{MPa}$ ;

$\sigma$ ——应力,  $\text{MPa}$ ;

$\varepsilon$ ——应变;

$\mu$ ——泊松比;

$C_v$ ——离差系数;

$T_p$ ——混凝土浇筑温度;

$T_r$ ——混凝土水化热温升;

$T_f$ ——坝体稳定温度;

$R$ ——混凝土浇筑块约束系数;

$K_p$ ——混凝土应力松弛系数;

$C(t, \tau)$ ——混凝土徐变度。

# 目 录

## 序言

## 主要符号表

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第一章 概述                   | 1   |
| 第一节 水工建筑物及大体积混凝土的特点      | 1   |
| 第二节 温度及温度应力问题的性质         | 2   |
| 第三节 历史回顾                 | 3   |
| 第四节 温度控制的目的和内容           | 5   |
| 第二章 热传导原理和计算资料           | 7   |
| 第一节 热传导方程及边值条件           | 7   |
| 第二节 边界条件的近似处理            | 10  |
| 第三节 气温、水温及日照             | 14  |
| 第四节 混凝土的热学性能             | 22  |
| 第五节 混凝土的力学性能             | 28  |
| 第六节 混凝土的不均匀性、质量的保证和检查    | 37  |
| 第三章 混凝土的浇筑温度及水化热温升计算     | 43  |
| 第一节 混凝土出机口温度的计算          | 43  |
| 第二节 混凝土的浇筑温度             | 49  |
| 第三节 混凝土浇筑后的内部温度变化及最高温度计算 | 51  |
| 第四章 混凝土坝的天然冷却            | 114 |
| 第一节 外温不变时平板的冷却过程         | 114 |
| 第二节 外温作正弦变化时对平板的温度影响     | 125 |
| 第三节 变外温情况下平板的冷却过程计算      | 137 |
| 第四节 二向及三向的冷却             | 145 |
| 第五节 差分法计算                | 149 |
| 第五章 混凝土坝的人工冷却            | 156 |



|     |                           |     |
|-----|---------------------------|-----|
| 第一节 | 后期冷却计算的理论分析 .....         | 158 |
| 第二节 | 初期冷却计算的传统分析方法 .....       | 165 |
| 第三节 | 初期冷却计算的有限单元法 .....        | 168 |
| 第四节 | 初期冷却效果的分析 .....           | 177 |
| 第五节 | 实用后期通水冷却计算 .....          | 183 |
| 第六节 | 水管布置、管径、流量、水温、管长的确定 ..... | 189 |
| 第七节 | 坝体测温方法 .....              | 193 |
| 第八节 | 通水冷却的具体工艺要求和拔管技术 .....    | 194 |
| 第六章 | 混凝土坝的稳定温度场 .....          | 201 |
| 第一节 | 外温变化的影响深度 .....           | 202 |
| 第二节 | 坝体稳定温度场的计算 .....          | 203 |
| 第三节 | 有限元方法的应用 .....            | 208 |
| 第四节 | 坝体稳定温度场的边界条件 .....        | 216 |
| 第七章 | 自由板的温度应力 .....            | 221 |
| 第一节 | 计算原理 .....                | 221 |
| 第二节 | 水泥水化热引起的温度应力 .....        | 228 |
| 第三节 | 初始温差引起的应力 .....           | 234 |
| 第四节 | 拆模引起的表面应力 .....           | 236 |
| 第五节 | 寒潮引起的表面应力 .....           | 239 |
| 第六节 | 外温简谐变化引起的温度应力 .....       | 243 |
| 第八章 | 混凝土浇筑块的温度应力 .....         | 251 |
| 第一节 | 嵌固板的温度应力 .....            | 252 |
| 第二节 | 弹性基础上浇筑块均匀冷却时的温度应力 .....  | 260 |
| 第三节 | 弹性基础上浇筑块的水化热温度应力 .....    | 266 |
| 第四节 | 弹性基础梁的温度应力 .....          | 276 |
| 第五节 | 混凝土框架结构的温度应力 .....        | 282 |
| 第九章 | 混凝土的应力松弛和计算实例 .....       | 295 |
| 第一节 | 混凝土的徐变 .....              | 295 |
| 第二节 | 徐变应力分析方法 .....            | 306 |



|      |                       |     |
|------|-----------------------|-----|
| 第三节  | 徐变应力分析的有限单元法 .....    | 313 |
| 第四节  | 温度徐变应力计算实例 .....      | 322 |
| 第十章  | 温度控制标准和控 制措施 .....    | 328 |
| 第一节  | 温度控制原理 .....          | 328 |
| 第二节  | 温度控制 标准 .....         | 330 |
| 第三节  | 合理的分缝形式 .....         | 347 |
| 第四节  | 合理组织施工 .....          | 363 |
| 第五节  | 合理选择及使用水泥 .....       | 366 |
| 第六节  | 混凝土出机前温控措 施 .....     | 374 |
| 第七节  | 运输及浇筑时的温控措 施 .....    | 378 |
| 第八节  | 新浇混凝土早期温控措 施 .....    | 381 |
| 第九节  | 混凝土的表面保护 .....        | 389 |
| 第十一章 | 混凝土坝的裂缝及防裂处理措 施 ..... | 396 |
| 第一节  | 裂缝的分类 .....           | 396 |
| 第二节  | 裂缝原因及防止措 施 .....      | 400 |
| 第三节  | 裂缝的检查和处理 .....        | 422 |
| 第十二章 | 制冷方法及冷却系统的布置和设计 ..... | 432 |
| 第一节  | 冰屑的制造 .....           | 432 |
| 第二节  | 预冷骨料 .....            | 445 |
| 第三节  | 制冷容量的计算 .....         | 479 |
| 第四节  | 冷却方法的选择 .....         | 493 |
| 第五节  | 冷却系统的布置和设计 .....      | 494 |
| 参考文献 | .....                 | 505 |

# 第一章 概 述

## 第一节 水工建筑物及大体积混凝土的特点

大体积混凝土水工建筑物系指水利枢纽工程中的大坝、电站厂房、通航建筑物和泄水建筑物等大型混凝土结构，它们不同于一般的工业与民用建筑物，而是与高压或高速水流相接触，起到挡水或泄水等作用，以满足防洪、发电、过船、灌溉、给水等需要的建筑物。这些水工建筑物的施工条件和运用条件都非常复杂，并与工程所在位置的水文、地理、地质条件有直接的关系。它们的型式与尺寸，除取决于各建筑物的用途和工作条件外，施工条件与施工方式也是重要的因素。其共同的最大特点是混凝土的体积大，结构形状复杂，孔洞多；或以大体积的板、墩、梁、柱结构型式出现。混凝土的材料成分也因各种建筑物的不同运用条件而有相应的要求：如建筑物的不同应力部位，需要有不同强度的混凝土；在多沙河流中，必须考虑混凝土的耐磨性能；在高速水流区，混凝土应有抗磨损及抗空蚀的能力；寒冷地区应考虑混凝土抗冻性；水下，尤其迎水面混凝土要能抗渗等；除此以外对大体积混凝土都要有抗裂能力的要求。

根据大体积混凝土建筑物的特点，这些建筑物一般要承受两种类型的荷载：第一类为结构荷载；另一类为混凝土体积变化荷载。结构荷载一般是指建筑物所承受的水压力、土压力、扬压力、浮托力、地震力、建筑物自重以及所承受的

设备重量等，这些荷载都会使水工建筑物产生相应的结构应力。大体积混凝土的体积变化荷载，主要是由于温度、徐变、自生体变所引起的体积变化，以及表面湿度的变化（内部湿度变化甚小）。这种体积变化也会引起很大的应力，其中以温度应力最为重要。因此，在设计水工建筑物时必须考虑这类荷载，并应采取温度控制措施，以防止结构物出现裂缝的破坏。关于温度及由此而引起的温度应力及对其危害的防止，将是本书叙述的主要内容。

## 第二节 温度及温度应力问题的性质

水工混凝土建筑物，一般体积都很庞大，而且由于施工和结构上的需要，常常是大块地浇筑。这样，混凝土中的水泥在水化硬结过程中，会发生数量可观的水化热，使混凝土的温度发生显著上升，然后逐渐散发。水泥的水化热随水泥的品种和标号而异。我国生产的水泥，一般在28天内总的水化热为： $209\sim 335\text{J/g}$ ，3天为 $125.6\sim 251.0\text{J/g}$ ；绝热温升可达 $10\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，一般混凝土的最高温度可比浇筑时高出 $7\sim 35^{\circ}\text{C}$ ，由此可知混凝土内温度升值是很高的。

应该指出的是，水泥的水化热发生的过程集中在早期。温度越高，水化反应越快，往往在最初几天内就会发生绝大部分的水化热量，从而使混凝土在浇筑后的最初几天里，内部温度很快上升。当达到最高温度值后，温度开始下降。但因混凝土是一种导温性质极为不良的材料，如果任其自然散发，往往需要较长时间。尤其如果浇筑层较厚（例如大于 $4\sim 5\text{m}$ ）， $3\sim 5$ 天后即行覆盖，则水泥产生的水化热基本未能散发，而使混凝土的内部温度会迅速达到很高的值。由

于混凝土的这种特性，对于大体积的混凝土块体，如重力坝，如果不采取人工冷却措施，有时会需要数十年甚至要上百年的时间，坝体内部的温度才会达到稳定状态。

混凝土温度的这种变化会产生一系列后果。首先，当混凝土内部温度与外界温度相差悬殊，温度梯度很陡时，就容易在混凝土表面引起巨大拉力和出现开裂现象。其次，在混凝土温度达到最高值后开始下降时，体积随之收缩，当受到底部基岩或老混凝土约束时，又可能会产生垂直裂缝，或者使结构缝张开，这对于结构作用和建筑物防渗都是极为不利的（对拱坝影响尤为严重）。因此，研究混凝土的温度和温度控制的主要目的是为了防止由于温度应力引起的混凝土裂缝，这种裂缝，不仅有碍于混凝土的观瞻，而且会改变混凝土结构的受力条件，严重的将直接影响建筑物的安全。在钢筋混凝土结构中若出现较宽的裂缝，还会导致钢筋的锈蚀，缩短建筑物的运用年限；若裂缝出现在水工建筑物的迎水面或者是直接承受水压力的构件中尤为严重，因为这种裂缝很容易发展，破坏结构物的整体性、降低混凝土的抗渗性和抗冻性，甚至影响结构的正常运行，因此，对大体积混凝土进行必要的温度控制是很重要的问题。

### 第三节、历史回顾

在20世纪初，对混凝土坝内的温度变化过程及其后果还知之甚少，因此在设计和施工中对此也缺少应有的注意，任意采用整体式大块的浇筑。在实践中，人们发现，在各种水工建筑物内出现了许多性质不同的裂缝，有些甚至是很严重的。通过长期的观测和试验，人们开始认识到混凝土产生裂

缝的主要原因是由于温度应力。于是就开始深入研究温度变化问题、温度应力问题和控制温度及温度应力的措施等，而且获得了很多成就。

对于大体积水工混凝土温度控制的系统研究，是从30年代中期美国修建鲍尔德坝（现改称胡佛坝）开始的。由于鲍尔德坝是当时世界上最高大的混凝土建筑物，故对坝体的温度状况进行了较系统的研究，并在坝体的分缝分块，通水强迫冷却及天然散热冷却方面，取得了很多成果，有些做法沿用至今。50年代以后随着我国筑坝工程的开展，我国对大体积混凝土结构的温度应力和温度控制问题也作了大量的研究，取得了很大的成就，在世界上有一定的地位。

从实际设计和施工水平方面看，自40年代到70年代，各国（如美国、苏联、巴西和我国等）对大体积混凝土的温度控制标准、温控措施及裂缝问题的研究都做了深入的探讨，如：合理分缝、分块，适当减少水泥用量，选择水泥品种，各种制冰的方法（由块冰到片冰）；各种预冷骨料方法（由各种单独冷源冷却到水冷、真空气化法、风冷等几种方法的综合冷却法），和对裂缝的深入研究等。同时也都设法采用各种方法对出现的裂缝进行有效的处理。一般来说，50年代世界各国建造的大坝在不同程度和数量上仍都出现裂缝。直至60年代末到70年代，苏联声称它所建的托克托古尔坝没有产生大的裂缝，细小裂缝也很少。在我国60年代中至70年代建的一些坝，如：丹江口坝后期浇筑的混凝土及葛洲坝的电厂、船闸和泄水建筑物，严格按防裂要求施工的，有的分块尺寸面积达 $1700\text{m}^2$ 也没有产生裂缝。目前防裂问题的重要性和混凝土产生裂缝的规律基本上已被人们所认识，只要采取适当措施，大体积混凝土的裂缝是可以控制的。

发展水电，是我国能源发展的主要方向之一。此外，我国水利水电建设的任务也很重，今后必将兴建许多大、中、小型水利水电工程，其中大体积混凝土建筑物为数众多，现阶段对任何一座大体积混凝土建筑物尤其是大型混凝土坝，都必须把温度控制和防裂措施作为重要内容来研究，同时还应考虑在防裂允许的条件下如何简化温控措施，加大浇筑块尺寸，以简化施工。这方面的进展方兴未艾。例如，目前已有不少工程采用碾压混凝土筑坝，这就是一种新的材料、结构和施工工艺。

## 第四节 温度控制的目的和内容

### 一、温度控制的目的

水工大体积混凝土温度控制的目的：

1) 防止由于混凝土温度的不利分布而产生各种裂缝，包括防止最高温度过高引起降温总量过大，内外温差过大及寒潮袭击（气温骤降）产生的不同情况的各种裂缝。

2) 为了进行接缝（纵、横缝等）灌浆，使坝体满足结构受力要求，采用人工冷却措施，降低坝体温度至预定温度（如稳定温度或年平均气温等）。

3) 为了简化施工程序，提高机械化施工程度和工效，要求尽可能地大块浇筑，这就对温度控制提出了更严格的要求。

### 二、温度控制的内容

为了达到上述目的，大体积混凝土闸、坝温度控制的内容应该包括下述3方面：

1) 降低混凝土内产生的最高温升，即减少混凝土最高

温度与将来预定温度（如稳定温度等）间的差值；

2）使各点温度尽量均匀，不致形成混凝土承受不了的温度梯度；

3）使坝体按照规定要求达到它的预定温度值（如稳定温度、准稳定温度、年平均温度等），以便进行灌缝处理，也解除了以后再产生较大温度应力的威胁。

为了实现上述温度控制，一般要从下述4个途径进行：

1）通过控制混凝土原材料的温度和用量来控制混凝土的温度，如预冷（或预热）砂石料，减少水泥用量，掺混合材料等；

2）通过预埋在混凝土内部的水管通冷水直接冷却混凝土；

3）通过控制混凝土表面散热特性（热交换系数）来控制混凝土的温度，例如：寒潮袭击及内外温差大时在混凝土表面加保温材料；在初凝后的新混凝土表面上形成流水借以加快散热等；

4）严寒地区需在冬季浇筑混凝土时，通常用加热拌和混凝土并覆盖隔温物或设保温棚及保温模板，以防混凝土浇筑过程中结冰，同时防止混凝土块温度过份低于稳定温度。



## 第二章 热传导原理和计算资料

### 第一节 热传导方程及边值条件

根据热传导理论和能量守恒定律, 对于均匀的各向同性的具有内部热源的固体, 在直角坐标系下 (图2-1) 的热传导微分方程式为<sup>[1]</sup>:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{A}{c\rho} \quad (2-1)$$

式中  $T$  —— 温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\tau$  —— 时间,  $\text{h}$ ;

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$  —— 导温系数 (又

称温度扩散系数),  $\text{m}^2/\text{h}$ ;

$A$  —— 内部热源的单位功率,  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ;

$\lambda$  —— 导热系数,  $\text{kJ}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$c$  —— 比热,  $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$\rho$  —— 密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

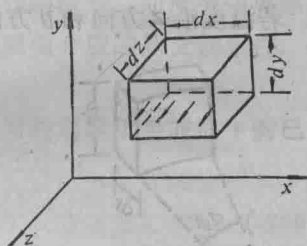


图 2-1 经过单元体积的热流

对于水工混凝土, 所谓内部热源, 主要是水泥的水化热。由于水泥水化热的作用, 在绝热条件下, 混凝土的温度上升速度为

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{A}{c\rho} = \frac{Wq}{c\rho} \quad (2-2)$$

式中  $\theta$  ——混凝土的绝热温升,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$W$  ——单位水泥用量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$q$  ——单位质量水泥在单位时间放出的水化热,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 。

因此, 根据式 (2-2), 热传导微分方程 (2-1) 可改写为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (2-3)$$

若温度沿  $z$  方向是常数, 则温度场是两向的, 属平面问题, 热传导方程 (2-3) 可简化为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (2-4)$$

若温度沿  $z$  方向和  $y$  方向都是常数, 就得到单向的热传导微分方程为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (2-5)$$

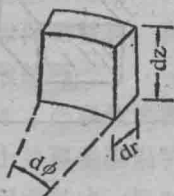


图 2-2 经过单元圆柱面坐标的热流

如果采用圆柱坐标 ( $r, \varphi, z$ ) 系 (图 2-2), 则热传导微分方程为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (2-6)$$

对于温度不随  $\varphi$  与  $z$  变化而变化的轴对称问题, 其热传导微分方程则为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (2-7)$$