

混凝土结构 温控防裂分析

Analyses on Thermal Control and Crack Prevention
of Concrete Structures

赵顺波 郭磊 陈守开 郭利霞 汪伦焰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

混凝土结构 温控防裂分析

赵顺波 郭磊 陈守开 郭利霞 汪伦焰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了混凝土结构温控防裂仿真计算分析的研究成果及工程应用情况。内容包括：混凝土热力学特性、混凝土温度和应力仿真计算理论与方法、高拱坝施工及初运行期温控防裂方法、混凝土重力坝施工温控防裂方法、碾压混凝土重力坝施工防裂方法与反分析、碾压混凝土坝孔口结构温控防裂方法、水闸与泵站混凝土防裂方法、渡槽高性能混凝土温控防裂方法、地下厂房岩壁吊车梁混凝土施工防裂方法。

本书可供土木水利工程等领域的科技人员进行相关研究、工程设计与施工等工作参考，也可作为相关专业研究生的学习用书。

图书在版编目（C I P）数据

混凝土结构温控防裂分析 / 赵顺波等著. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2013.9
ISBN 978-7-5170-1289-4

I. ①混… II. ①赵… III. ①混凝土结构—气温控制—分析②混凝土结构—防裂—分析 IV. ①TU370.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第233083号

书 名	混凝土结构温控防裂分析
作 者	赵顺波 郭磊 陈守开 郭利霞 汪伦焰 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 (发行部)
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
刷 印	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 20.25印张 480千字
版 次	2013年9月第1版 2013年9月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	60.00元



凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

混凝土是由水泥、细骨料（砂）、粗骨料（石子）、掺合料、化学外加剂等多种基材组成，经过加水混合搅拌、成型和养护后形成的一种多相水泥基复合材料，从其问世迄今已有 150 多年的历史，目前仍是土木、水利、交通、港口等基础工程建设中应用广、用量大的建筑材料之一。然而，由于固有的材料热力学特性，混凝土也易于开裂。混凝土裂缝问题成为业界面临的一大难题，它不仅影响混凝土工程的耐久性和使用寿命，也影响工程的安全性。针对裂缝产生机理和预防措施，国内外众多学者长期以来做了大量的研究工作，并取得了很多成果。

本书共 9 章，阐述了现代混凝土的热力学特性及其规律、混凝土温控防裂有限元仿真计算理论与方法及其程序开发，结合典型水工混凝土建筑物进行了温控防裂仿真计算分析，为大体积混凝土的温控防裂提供了理论依据与工程实践参考。

第 1 章分析了混凝土热力学特性，阐述了混凝土的温升和力学性能与水泥水化反应的内在联系，分析了影响水泥水化反应的主要因素。介绍了描述水泥水化反应的水化度和成熟度概念及其关系，结合混凝土绝热温升试验对比分析了基于水化度的几种绝热温升计算模型。介绍了采用一种缓凝高效减水剂对混凝土绝热温升进行峰值调控的试验结果。通过混凝土温度场的算例分析说明采用考虑水化度的水化放热和热传导模型，能够更全面地描述实际结构中混凝土的温度分布和发展过程。基于混凝土力学性能历时变化的实质，介绍了基于水化度等效龄期的强度、泊松比和线胀系数计算模型以及考虑成熟度影响的弹性模量计算式。依托具体工程进行的混凝土自收缩试验结果，提出了考虑自身温度影响的、基于水化度和等效龄期的混凝土自收缩计算模型。阐述了 MgO 混凝土膨胀机理与自生体积膨胀变形特性，给出了基于水化度的 MgO 混凝土自生体积变形计算模型，对比研究了坝体不同部位采用 MgO 混凝土对结构应力的影响，以验证 MgO 混凝土的温度补偿效果。归纳总结了混凝土徐变的主要影响因素及徐变理论计算方法，概括了几种混凝土徐变预测模型的适用范围。

第 2 章介绍了混凝土非稳定温度场的基本理论与有限单元求解方法、混凝

土应力场的基本理论与三维有限元方法、混凝土水管冷却技术的计算理论及含有冷却水管的混凝土温度场（包括精密的水管沿程水温增量计算及冷却水温迭代计算）和应力场仿真计算方法。基于静力分析的有限元子模型法原理，引入一种高效的等参逆变换方法，解决了子模型等参单元在切割边界上的插值问题，用于混凝土温度场和应力场的分析，给出了在时间域和空间域上确定切割温度边界和位移边界的方法，推导了非稳定温度场和应力场的有限元子模型法的仿真计算公式。提出了“非均质层合单元法”仿真计算方法，实现了混凝土成层非均质单元的数学处理，可用于进行碾压混凝土坝温度应力的精细、高效仿真计算。阐述了混凝土工程施工期温度场反分析的基本模式及求解模型，改进了基于遗传算法和粒子群优化算法的反演算法，对多个室内及现场试验的温度计算特征参数进行了反演分析，表明其具有可信度好、精度高等特点，可达到多参数反演的目的。

第3章依托高拱坝工程实例，对其施工及初运行期温控防裂方法进行了仿真计算分析。对施工过程中不同冷却水管层距和间距、冷却通水时间、浇筑层厚度、间歇时间、浇筑温度和表面保温厚度等不同工况进行对比分析，并根据不同部位裂缝产生机理，提出具有针对性的温控防裂措施。通过对混凝土内部水管冷却温度场的等效计算分析，对坝体浇筑、灌浆和蓄水过程进行了全面仿真分析，对裂缝产生部位进行预报，提出了水管通水一期冷却、接缝灌浆过渡通水、二期冷却调控方案。提出了在同一高程水平面上、自坝上游面至坝下游面将水管布置成能够独立控制的多根冷却水管，通过二期冷却对不同水管冷却历时进行协调控制以调控同一高程坝体上下游封拱温度以降低坝体开裂可能性的建议。

第4章依托混凝土重力坝溢流坝段工程实例，建立了坝段温控防裂仿真计算有限元模型，通过无温控措施时坝体应力场的计算分析获得坝体的准稳定温度场，对比研究了不考虑与考虑成熟度影响的混凝土弹性模量和徐变对坝体混凝土应力场的影响，表明是否考虑成熟度影响所获得的混凝土弹性模量和徐变应力场有较大差异，计算混凝土温度徐变应力时，应该考虑混凝土长期徐变对坝体应力状态的影响。通过系统计算分析坝段表面保温、浇筑温度、混凝土施工间歇时间、水管冷却方式（包括不同的水管布置、进水温度和通水时间）等温控参数及是否设置纵缝，从各块体中部最高温度、断面主应力、典型点应力发展过程等方面系统地分析了实施温控防裂措施前后的应力发展历程，根据预设的多种工况优化选取了适合施工的温控防裂方案及温控指标。表明在诸多优选防裂方案中，合理的施工期表面保温和内部水管冷却降温方

法是施工期防裂的最为关键的控制措施，需要给予重视和严格执行。

第5章依托碾压混凝土坝工程实例，分析了碾压混凝土施工期的温度和应力变化规律、混凝土开裂机理及相应的裂缝类型，有针对性地提出了适度表面保温和内部水管冷却降温相结合的碾压混凝土坝温控防裂新思路，使得高温干燥气候条件下快速连续施工的整个坝体混凝土，总体上没有出现结构性的温度裂缝，收到了很好的防裂效果。依据施工现场溢流坝段温度测点的实测温度资料，采用改进粒子群优化算法对混凝土的热学和力学参数、坝段温度场进行反演计算分析，运用反演所得参数再反馈计算分析坝体的温度场和应力场，分析了坝体的整体抗裂特性，为施工期动态跟踪观测和施工反馈分析研究提供了工作基础。

第6章基于碾压混凝土重力坝工程现场混凝土试验实测温度数据，采用改进遗传算法，反演了仿真计算的混凝土边界参数。采用子母模型联合反馈算法，对典型坝段孔口结构温度场和应力场进行了精细仿真计算，分析了泄流中孔、排水廊道及闸门槽孔口结构施工期的温度和应力变化规律，并对其裂缝产生的内在机理以及可能的启裂位置、启裂时间和发展趋势进行了详细描述。通过多方案抗裂特性的仿真分析，提出了有针对性的防裂方案。

第7章依托泵送混凝土退水闸工程实例，采用三维非稳定温度场和应力场仿真算法，结合基于水化度与成熟度的混凝土热力学参数，分析了闸墩混凝土施工期的温度和应力变化、混凝土开裂的内在机理及可能出现的裂缝类型，提出了防止闸墩开裂的各种针对性工程措施，对实际防裂效果进行了分析比较，表明适度表面保温和内部水管冷却降温相结合，可取得较好的闸墩混凝土温控防裂效果。依托泵站工程实例，比较分析了各种防裂措施的实际防裂效果，提出了针对底板、进水和出水流道混凝土的综合温控防裂方案。

第8章依托南水北调中线工程大型三联矩形断面渡槽工程实例，研究了渡槽高性能混凝土温控防裂方法。渡槽作为水工混凝土薄壁结构，主梁内表面和底肋、外表面和侧肋接触处应力最大，内外温差和上部墙体混凝土加层与膨胀是渡槽产生早期裂缝的主要原因。可视工程要求，采取降低混凝土浇筑温度、通水冷却和表面保温等措施进行温控防裂。

第9章依托水电站地下厂房岩锚混凝土吊车梁工程实例，进行了温度与应力仿真计算，表明引起岩锚梁混凝土开裂的主要因素是温度应力和混凝土收缩自生变形应力。岩锚梁在混凝土温升期出现的裂缝一般都是启裂于表面、“由表及里”扩展，启裂点往往位于混凝土表面的中心区域。岩锚梁在混凝土降温期出现的裂缝主要是从内部启裂、“由里及表”扩展。采取顶面保温和梁

体内水管冷却的导热降温措施后，混凝土的温度和拉应力均得到了明显改善。通过研究水管的布置形式、通水方式对岩锚梁混凝土在各龄期的温度和应力分布规律的影响，选择了合理的水管布置方案和水管冷却运行方式。

本书由华北水利水电大学水工结构工程学科赵顺波教授、郭磊副教授(博士)、陈守开博士、郭利霞博士、汪伦焰副教授编著，由郭磊副教授负责初稿统稿工作，赵顺波教授负责终稿统稿与审定。部分成果来源于国家自然科学基金(51109081)：混凝土早龄期拉伸徐变的试验及仿真研究，部分成果为郭磊、陈守开、郭利霞在河海大学师从朱岳明教授攻读博士学位期间取得的研究成果，谨此对朱岳明教授表示深切的怀念。本书出版得到了华北水利水电大学水利工程博士授权学科重点建设经费资助，在此表示衷心谢意。

由于水平所限，本书一定存在着不妥和需要进一步改进之处，尚祈工程技术界的同仁不吝赐教指正。

作者

2013年8月于郑州

目 录

前言

第 1 章 混凝土热力学特性	1
1.1 混凝土的绝热温升	1
1.2 混凝土的力学性能	18
1.3 混凝土的变形特性	26
1.4 本章小结	64
参考文献	65
第 2 章 混凝土温度和应力仿真计算理论与方法	72
2.1 概述	72
2.2 混凝土非稳定温度场基本理论与有限元方法	73
2.3 混凝土应力场基本理论与有限元方法	79
2.4 混凝土水管冷却理论及有限元法	81
2.5 混凝土温度和应力仿真计算有限元子模型法	98
2.6 混凝土温度与应力仿真的非均质层合单元法	114
2.7 混凝土温度场反分析方法	117
2.8 本章小结	133
参考文献	134
第 3 章 高拱坝施工及初运行期温控防裂方法	138
3.1 概述	138
3.2 中孔坝段施工期仿真分析与防裂方法	139
3.3 整体等效仿真与防裂方法研究	152
3.4 封拱温度分析	167
3.5 横缝开度分析	168
3.6 本章小结	170
参考文献	170
第 4 章 混凝土重力坝施工温控防裂方法	171
4.1 工程概况与基本资料	171
4.2 坝段仿真计算模型	174
4.3 无温控措施时坝体应力场的计算分析	178
4.4 坝体温控防裂仿真计算分析	184
4.5 温控防裂方案与控制指标	198

4.6 本章小结	200
参考文献	201
第5章 碾压混凝土重力坝施工防裂方法与反分析	202
5.1 工程概况	202
5.2 基本资料	202
5.3 坝段施工防裂仿真计算分析	207
5.4 坝段施工期温度观测资料反分析	214
5.5 本章小结	223
参考文献	223
第6章 碾压混凝土坝孔口结构温控防裂方法	224
6.1 工程概况	224
6.2 基本资料	225
6.3 坝区混凝土块试验及温度场反演分析	229
6.4 典型坝段孔口混凝土的温控防裂反馈研究	237
6.5 本章小结	249
参考文献	249
第7章 水闸与泵站混凝土防裂方法	250
7.1 概述	250
7.2 水闸混凝土裂缝成因与防裂方法	250
7.3 泵站混凝土裂缝成因与防裂方法	259
7.4 本章小结	271
参考文献	271
第8章 渡槽高性能混凝土温控防裂方法	273
8.1 工程概况与基本资料	273
8.2 计算模型	275
8.3 计算条件	279
8.4 混凝土仿真计算分析及防裂方法	279
8.5 本章小结	284
参考文献	284
第9章 地下厂房岩壁吊车梁混凝土施工防裂方法	285
9.1 工程概况与基本资料	285
9.2 计算模型	289
9.3 仿真计算结果分析	293
9.4 防裂方法	312
9.5 本章小结	314
参考文献	314

第1章 混凝土热力学特性

1.1 混凝土的绝热温升

1.1.1 水化放热

1.1.1.1 水化反应原理

目前,国内外对水泥水化反应机理尚无定论,被普遍接受的解释是1968年 Douigill 等人提出的一种类似“硅酸盐框架”结构的假设^[1]:水泥遇水后,在硅酸盐颗粒周围生成半渗透的硅酸盐水化物外壳,它将无水的表面和主液体隔开,因而产生诱导期,钙离子(Ca^{2+})能够通过这层外壳进入主液体,硅酸盐离子则不能,仍留在外壳内,因而使渗透压增大。当渗透压增大到一定程度时,耗尽了钙的水化硅酸盐被挤入主液体中,又重新与 Ca^{2+} 结合形成空心管状的或其他形状的水化产物,标志着诱导期的结束,原粒子边缘内的水泥组分又进一步溶解。

国内外对水泥水化反应的研究很多,主要通过数值模拟和先进试验的方法对水化反应过程进行阐述。Pommershei 等^[2]率先运用数值分析技术对单个组分硅酸三钙(C_3S)进行了模拟,Jennings 等^[3]在此基础上,用计算机数字图片对 C_3S 的水化过程以及微观结构进行了二维模拟。Phan 等^[4]认为水泥水化反应进程的两大主要机理是相界面控制和扩散控制,为此,他结合了一些系统参数对熟料单矿物的水化进程进行了模拟。Bentz 等^[5]根据水泥颗粒粒径分布、水灰比以及矿物组成等参数,研究出了以纯水泥水化三维模型来模拟纯水泥体系水化的全过程。V. Morin 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^[6]。G. Ye 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^[7,8]。K. O. Kjellsen 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^[9]。类似的研究还有 John J. O'Donnell^[10]、W. J. McCarter^[11]、Bertil Persson^[12]等人从事过。虽然这些研究的方法和手段并不相同,但结论大体一致,可概括为:根据水化反应的趋势和进程,可将水泥的水化过程分为5个阶段^[13-16],

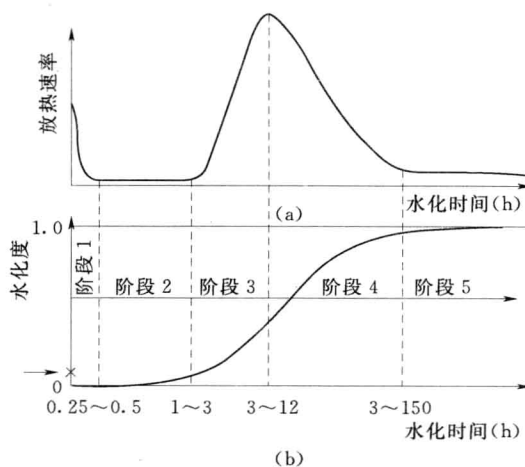


图 1-1 水泥水化趋势和进程

即初始水解期、诱导期、反应加速期、衰退期和稳定期，且每个阶段的水化产物不同，如图1-1和图1-2所示。

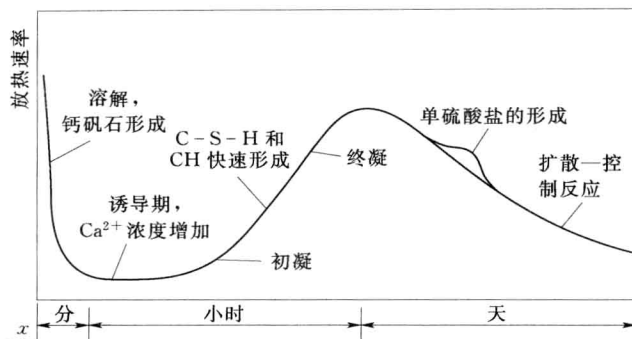


图 1-2 普通硅酸盐水泥不同阶段的水化产物

1.1.1.2 水化反应影响因素

研究表明，影响混凝土中水泥水化反应的因素很多。混凝土中大多数成分均在一定程度上影响着水化反应的进程。其中除水泥熟料外，含水量、矿物掺合料、外加剂及混凝土中各种成分的含量、形状等都影响着水泥的水化反应。此外，养护条件（如养护温度、湿度）、初始温度、拌和程度等对水泥也都有一定的影响。

1. 熟料组成

普通硅酸盐水泥熟料主要是由硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙 4 种矿物组成^[17]，其比例大致为硅酸三钙 37%~60%、硅酸二钙 15%~37%、铝酸三钙 7%~15%、铁铝酸四钙 10%~18%。这 4 种熟料遇水后均会发生水化反应，而硅酸二钙和硅酸三钙占 70%~80%，因此水泥的水化反应主要是硅酸二钙和硅酸三钙的水化反应。另外，这 4 种熟料的水化反应速度和强度存在差异，大致顺序为铝酸三钙>硅酸三钙>铁铝酸四钙>硅酸二钙，如图 1-3 所示。此外，这些熟料的水化反应速率还取决于粒径分布、颗粒尺寸、反应温度及生产过程等^[18]。

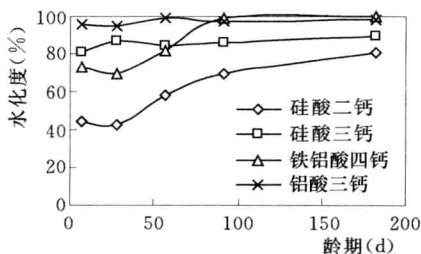


图 1-3 4 种熟料的反应速度

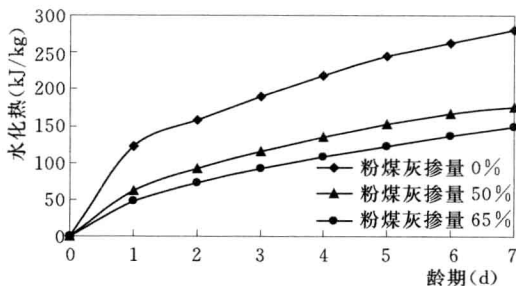


图 1-4 不同粉煤灰掺量的水泥水化放热量

2. 矿物掺合料

为了改善混凝土的性能和减小水化热，通常在拌和混凝土时加入具有一定细度和活性的矿物掺合料，如粉煤灰、矿渣、火山灰等。研究发现，掺合料的成分、含量、颗粒形状

及细度对水泥水化反应过程和放热量有较大影响。如矿渣水泥比普通水泥的水化放热量要低许多,且和普通水泥的水化放热过程相比,在水化过程中要经历两个水化放热高峰^[18-20]。火山灰水泥由于其矿物成分能够加速水泥的水化,水化放热速率要高于一般水泥,但总的水化放热量降低^[21]。在水泥中掺入粉煤灰则能够有效地减小水化放热量和水化反应速率,且减小程度与粉煤灰含量和成分有关^[22-25]。图 1-4 所示为不同粉煤灰掺量的同一种水泥的水化热试验结果^[26]。目前,粉煤灰水泥应用越来越广泛,大部分学者认为粉煤灰混凝土比普通硅酸盐混凝土需要更长养护时间。

3. 化学外加剂

为了改善混凝土的各种性能,通常在拌制混凝土时会添加各类化学外加剂,如减水剂、引气剂等,掺量一般不超过水泥质量的 5%^[27-29]。经验表明,外加剂对硅酸盐水泥水化的影响主要是对 C_3A 和 C_3S 水化的影响,可以不考虑 C_2S 和 C_4AF ^[30]。缓凝高效减水剂能够减缓水泥的水化反应速度和放热速率^[31,32]。聚羧酸减水剂与萘系、氨基磺酸系相比,可以从早期开始促进多组分水泥的反应^[33]。FDN 系列减水剂在工程中已得到大量应用,有良好的分散性和高的减水率,但在保持分散性方面不理想,坍落度经时损失偏大,影响了混凝土的施工性能。氨基磺酸系的 FNF 高效减水剂对水泥粒子具有高的分散性,减水率高达 30%,并且具有控制坍落度经时损失的功能。糖蜜缓凝剂等化学外加剂能不同程度降低水泥净浆的水化热和温升,推迟热峰出现时间。 Na_2SO_4 早强剂会提高水化热和温升,使热峰出现时间提前。松香引气剂对水化热和温升影响不明显^[32]。

4. 温度

温度在水泥水化反应中扮演着十分重要的角色,随着水泥水化反应不断产生热量,混凝土温度升高,而温度升高又加快了水化反应速率,水化放热率提高。因此,水泥水化反应过程中的温度与水化反应之间是相互促进的。随着环境和自身温度升高,混凝土水化反应速率不断加快,因此混凝土各项力学性能随龄期的发展同样受温度影响^[34-36]。

1.1.1.3 水化反应的描述

混凝土热力学特性不仅与龄期有关,还与自身温度及温度历程等因素有关^[34]。目前,国内外通常采用两种概念来描述混凝土的水化反应及其对混凝土热力学性能的影响:一种是混凝土水泥水化反应程度即水化度 (Degree of hydration); 另一种是混凝土的成熟度 (Maturity)。

1. 水化度

从水泥水化机理与过程中可以看出,水泥与水拌合后,会发生一系列的物理变化和化学反应,并释放热量。由于某一时刻水泥水化反应的程度与该时刻水化放热量密切相关,因此需要定义某一时刻的水泥水化程度 (水化度)。目前,根据评价和测定标准的不同,水化度的定义方法也不同。Kjellsen 提出^[37],对于纯水泥体系,根据龄期 t 的水泥浆体的化学结合水含量与水泥浆体完全水化后的化学结合水含量,可得出龄期 t 的硬化水泥浆体的水化度^[37,38]

$$\alpha(t) = \frac{W_n(t)}{W_{n,\infty}} \quad (1-1)$$

式中: $W_n(t)$ 为龄期 t 时刻硬化水泥浆体的化学结合水含量; $W_{n,\infty}$ 为完全水化水泥浆体

的化学结合水含量。

在粉煤灰—水泥体系中，用复合胶凝材料的化学结合水量来直接表征其中所含水泥的水化反应程度不再适用。石明霞等^[39]提出一种等效化学结合水量法，并给出了将复合胶凝材料的总化学结合含水量转化为单位质量水泥对应的化学结合含水量的转换公式，即

$$W_{ne,C} = \frac{W_{ne}}{1 - f_{FA}} \quad (1-2)$$

式中： W_{ne} 为单位质量胶凝材料对应的化学结合水含量； $W_{ne,C}$ 为单位质量水泥的化学结合水含量； f_{FA} 为粉煤灰的掺量百分数。

由式(1-1)和式(1-2)可知，如果可以测定 $W_{n,\infty}$ ，即可求出粉煤灰—水泥体系的水化度。但由于式(1-2)并未考虑粉煤灰水泥中粉煤灰结合用水量的贡献，且 $W_{ne,C}$ 、 $W_{n,\infty}$ 本身仅是一个粗略值，依据上述方式评价粉煤灰—水泥的水化度往往误差较大^[40]。因此，有学者借助试验结合数学计算的方法对复合胶凝材料中水泥水化程度的确定进行了相关改进。X. Y. Wang等^[41]通过对水泥颗粒水化模型的建立，模拟出含有低钙粉煤灰的混合水泥中各熟料矿物反应程度的变化曲线，同时借助试验手段对特定龄期的水泥各矿物含量进行测定，发现实测值能很好地满足理论模型的曲线。A. Q. Wang等^[42]通过测试粉煤灰—水泥浆体孔隙率和氢氧化钙(CH)含量，计算出浆体中水泥熟料和粉煤灰各自的反应程度，并认为体系和粉煤灰的反应程度随粉煤灰掺量的增加而降低，而水泥的反应程度反而增大。Lam等^[43]通过测试不同水胶比的复合胶凝材料的化学结合水量和粉煤灰的反应程度，借助回归分析建立了粉煤灰水泥浆体中水泥反应程度与有效水胶比的定量关系，其相关系数超过0.95。李响等^[40]对粉煤灰反应程度和CH含量进行了测定，并结合水泥水化平衡计算理论，建立了基于CH含量的复合胶凝材料中水泥水化程度的评定方法。

2. 成熟度

混凝土成熟度概念最早由Saul提出^[44]，他认为当某一种混凝土的原材料、组成比例已知，其成熟度的增长主要由温度与龄期决定，为此，将成熟度函数 M 定义为

$$M = \sum (T - T_0) \Delta t \quad (1-3)$$

式中： M 为成熟度； Δt 为混凝土龄期增量； T 为混凝土温度； T_0 为基准温度。

1953年，Bergstrom等^[45]根据Saul的成熟度法则，对一系列抗压强度试验的结果进行了归纳，认为混凝土硬化的起始温度为 -10°C ，提出了常温养护条件下混凝土的成熟度方程，即

$$M = \sum (T + 10) a_T \quad (1-4)$$

式中： T 为养护温度； a_T 为温度 T 的养护时间。

此后，Rastrup^[46]提出了另一种表示成熟度的方式——等效龄期的概念。但是随后Wastlund^[47]指出较大温度范围时，运用Rastrup方程计算的混凝土力学性能准确性比Nurse-Saul方程式(1-3)差。1960年Copeland等^[48]提出可以根据水泥的水化程度来表达混凝土的成熟度，并建议用Arrhenius方程来描述温度对水泥水化速率的影响。1977年Freiesleben Hansen和Pedersen^[49]建立了基于Arrhenius函数的等效龄期成熟度函数，即

$$t_e = \sum_0^t \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} + \frac{1}{273 + T} \right) \right] \cdot \Delta t \quad (1-5)$$

式中： E_a 为混凝土活化能，kJ/mol； T_r 为混凝土参考温度，℃，一般取 20℃； T 为时段 Δt 内的混凝土平均温度，℃； t_e 为相对于参考温度的混凝土等效龄期成熟度，d。

之后，Freiesleben Hansen 等对上述模型进行了完善，建立积分形式的等效龄期成熟度模型，即

$$t_e = \int_0^t \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] dt \quad (1-6)$$

其中，
$$\begin{cases} E=33500 & T \geq 20^\circ\text{C} \\ E=33500+1470(20-T) & T < 20^\circ\text{C} \end{cases}$$

Byfors^[50] 和 Naik^[51,52] 研究表明，基于 Arrhenius 方程的等效龄期成熟度函数可以更有效地反映出养护温度和龄期对混凝土各种性能的影响，他们还指出 Nurse-Saul 和 Rastrup 的成熟度方程适用的温度范围很窄，为 10~32℃，而基于 Arrhenius 方程的等效龄期成熟度函数适用范围则更广。

3. 水化度与成熟度的关系

国外研究者在试验基础上提出了一些水化度与等效龄期成熟度的关系式，常用的主要包括以下 4 种：

(1) 复合指数式^[53]，即

$$\alpha(t_e) = \exp \left(- \left(\frac{m}{t_e} \right)^n \right) \quad (1-7)$$

式中： t_e 为相对于参考温度的混凝土等效龄期成熟度，见式 (1-5)； $\alpha(t_e)$ 为基于等效龄期成熟度 t_e 的水化度； m 为水化时间参数，常数； n 为水化度曲线坡度参数，常数。

(2) 复合指数式二^[54]，即

$$\alpha(t_e) = \exp(-\lambda_1 (\ln(1+t_e/m))^{-n}) \quad (1-8)$$

式中： λ_1 为水化度曲线形状参数； n 为水化度曲线坡度参数； m 为水化时间参数。三者均为常数。

(3) 双曲线式^[55]，即

$$\alpha(t_e) = \frac{t_e}{t_e + 1/C} \quad (1-9)$$

式中： C 为水化度曲线形状参数，常数。

(4) 指数式^[56]，即

$$\alpha(t_e) = 1 - \exp(-\gamma t_e) \quad (1-10)$$

式中： γ 为水化度曲线形状参数，常数。

1.1.2 绝热温升试验

试验依托具体工程进行，其主要目的在于研究施工用混凝土的水化放热特性，研究不同初始温度与温度历程对混凝土水化放热特性的影响，以期在试验结果的基础上建立针对性更强的混凝土水化放热计算模型。

1. 试验概况

绝热温升试验，分别按初始温度 5℃、20℃和 30℃ 3 种情况进行。试验用混凝土配合比如表 1-1 所示。

表 1-1 试验用混凝土配合比 (kg/m³)

水	水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	水灰比	砂率
155	240	60	626	659	659	0.52	33%

按照上述配合比拌和混凝土，制成直径为 0.20m、高为 0.40m 的混凝土试件，放入绝热温升仪内，测定各个时刻试件中心的温度，持续观测 28d，前 15d 尤其是前 10d 为重中之重，具体试验方法按《水工混凝土试验规程》(SD 105—82) 要求进行。

2. 试验结果

不同初始温度下的混凝土绝热温升试验结果如表 1-2 和图 1-5 所示。由于仪器故障，浇筑温度 5℃时的混凝土绝热温升只做到 21d，为保证试验结果的可靠性，5℃时的数据分析时只取前 10d。

由表 1-2 和图 1-5 可知，混凝土初始温度越高，早期水化放热越剧烈，温升速率越快，但最终混凝土绝热温升值受初始温度的影响较小，基本不变，同时也说明，混凝土绝热温升计算模型中，不考虑自身温度对水化放热的影响，而仅考虑温度随龄期的变化特性是不全面的。

表 1-2 混凝土绝热温升试验结果

龄期(d)	5℃	20℃	30℃	龄期(d)	5℃	20℃	30℃	龄期(d)	5℃	20℃	30℃
0.0	0.00	0.00	0.00	7	23.48	29.83	33.27	18	35.76	43.16	43.89
0.25	0.68	1.09	1.37	8	25.67	32.79	35.32	19	36.28	43.44	44.12
0.50	0.95	1.41	1.72	9	27.45	35.02	37.37	20	36.76	43.65	44.32
0.75	0.99	1.64	2.03	10	28.95	36.79	39.16	21	37.20	43.82	44.50
1	1.11	2.06	2.69	11	30.22	38.22	40.27	22		43.98	44.65
1.50	1.37	3.83	5.47	12	31.31	39.36	41.15	23		44.11	44.78
2	1.79	5.81	8.48	13	32.27	40.29	41.85	24		44.23	44.90
3	6.24	11.83	15.55	14	33.12	41.04	42.42	25		44.33	45.00
4	11.80	17.80	21.80	15	33.88	41.85	42.90	26		44.42	45.09
5	17.01	22.65	26.40	16	34.57	42.41	43.29	27		44.51	45.17
6	20.70	26.52	30.42	17	35.19	42.84	43.61	28		44.60	45.24

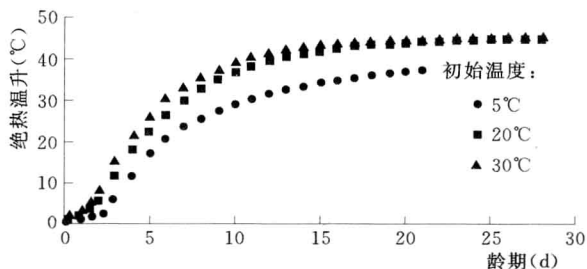


图 1-5 混凝土绝热温升试验结果比较

1.1.3 绝热温升计算模型

1. 反应速率—温度关系式

由于混凝土的导热和导温性能较差，随着水化反应的进行，混凝土内部温度将发生变化，温度的改变又会对水泥的水化反应产生重要影响。一般认为，混凝土的水化反应速率服从 Arrhenius 速率—温度关系式^[57]，即

1.1 混凝土的绝热温升

$$k(T) = Ae^{-\frac{E_a}{R(T+273)}} \quad (1-11)$$

式中： $k(T)$ 为水化反应速率； A 为指前因子，可取常数； E_a 为混凝土活化能，J/mol； R 为气体常数，J/(mol·K)， $R=8.3144\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ； T 为混凝土的反应温度，℃。

混凝土的活化能 E_a 可根据试验得到，Freiesleben Hansen 和 Pedersen 给出以下经验公式^[58]，即

$$E_a = \begin{cases} 33.5, (\text{kJ/mol}, T \geq 20^\circ\text{C}) \\ 33.5 + 1.47 \cdot (20 - T), (\text{kJ/mol}, T < 20^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (1-12)$$

从式 (1-11) 和式 (1-12) 可知，温度 $T \geq 20^\circ\text{C}$ 时， $E_a/R = 4000\text{K}$ ，因此，水化反应速率 $k(T)$ 随温度升高而加快。温度对水化反应速率的影响服从 Arrhenius 方程，即

$$\frac{d(\ln k(T))}{dT} = \frac{E_a}{RT^2} \quad (1-13)$$

在温度分别为 T 和 T_r 时，水化反应速率之比 $k(T)/k(T_r)$ 可以表示为

$$\frac{k(T)}{k(T_r)} = \exp\left(\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (1-14)$$

由式 (1-14)，当参考温度 $T_r = 20^\circ\text{C}$ ，相对参考温度的混凝土水化反应速率如图 1-6 所示。可知，温度为 25°C 、 30°C 、 35°C 和 40°C 时，相对参考温度 20°C 的水化反应速率分别为 1.26、1.57、1.94 和 2.39。

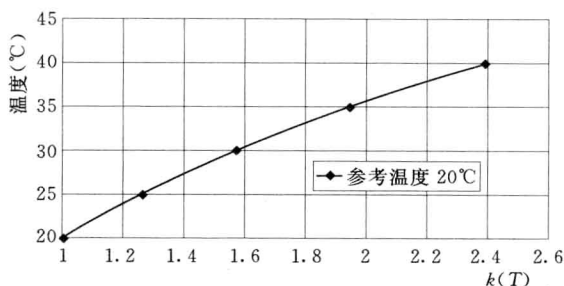


图 1-6 不同温度水化反应速率与 20°C 时的比值

2. 水化度模型

水泥水化反应的一个重要特点是释放大量的热量，而且单位质量胶凝材料

所产生的水化热是不变的，因此可采用水化放热量来定义混凝土的水化度，即可将水化度定义为 τ 时刻混凝土放热量与混凝土总热量的比值^[59]，即

$$\alpha(\tau) = \frac{Q(\tau)}{Q_{\max}} \quad 0 \leq \alpha(\tau) \leq 1 \quad (1-15)$$

式中： $\alpha(\tau)$ 为 τ 龄期的水化度，随水泥的水化反应单调增加； $Q(\tau)$ 为 τ 龄期水化放热量； $Q_{\max}$ 为水泥完全水化时的放热量。

根据热学特性，混凝土的放热量与绝热温升的关系为

$$Q(\tau) = c\theta(\tau) \quad (1-16)$$

式中： c 为混凝土比热容， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ； $\theta(\tau)$ 为龄期 τ 时的混凝土绝热温升，℃。

将式 (1-16) 代入式 (1-15)，可进一步定义水化度为

$$\alpha(\tau) = \frac{\theta(\tau)}{\theta_{\max}} \quad 0 \leq \alpha(\tau) \leq 1 \quad (1-17)$$

由式 (1-17) 可知，混凝土的水化度与混凝土的绝热温升密切相关，同样受混凝土

材料组成、自身温度等因素的影响。对于同种混凝土而言，不同的龄期和温度，水化度也不同。同种混凝土在非绝热条件下，不同温度的部位的水化度不相同。

3. 基于水化度的绝热温升模型

由式 (1-17) 可知， $\theta(\tau) = \theta_u \cdot \alpha(\tau)$ ，同理，有

$$\theta(\alpha(t_e)) = \theta_u \cdot \alpha(t_e) \quad (1-18)$$

式中： $\theta(\alpha(t_e))$ 为基于水化度的混凝土绝热温升， $^{\circ}\text{C}$ 。

由式 (1-11) 至式 (1-14)，可得 4 种基于水化度的混凝土绝热温升计算模型如下：

(1) 复合指数式一，即

$$\theta(\alpha(t_e)) = \theta_u \cdot \alpha(t_e) = \theta_u \exp\left(-\left(\frac{m}{t_e}\right)^n\right) \quad (1-19)$$

式中： t_e 为相对于参考温度的混凝土等效龄期成熟度，见式 (1-5)； m 为水化时间参数，根据试验数据确定； n 为水化度曲线坡度参数，同样根据试验数据确定。

(2) 复合指数式二，即

$$\theta(\alpha(t_e)) = \theta_u \cdot \alpha(t_e) = \theta_u \exp(-\lambda_1 (\ln(1+t_e/m))^{-n}) \quad (1-20)$$

式中： λ_1 为水化度曲线形状参数； n 为水化度曲线坡度参数； m 为水化时间参数。三者均为常数。

(3) 双曲线式，即

$$\theta(\alpha(t_e)) = \theta_u \cdot \alpha(t_e) = \theta_u \frac{t_e}{t_e + 1/C} \quad (1-21)$$

式中： C 为水化度曲线形状参数，常数。

(4) 指数式，即

$$\theta(\alpha(t_e)) = \theta_u \cdot \alpha(t_e) = \theta_u (1 - \exp(-\gamma t_e)) \quad (1-22)$$

式中： γ 为水化度曲线形状参数，常数。

采用上述 4 种基于水化度的绝热温升计算模型，对 1.1.2 节绝热温升试验结果进行拟合，结果如表 1-3 所示，拟合模型与试验数据的比较如图 1-7 所示。

表 1-3 绝热温升模型拟合结果

名 称	拟 合 结 果	均方误差
复合指数式一	$\theta = 50.174 \exp\left(-\left(\frac{4.70897}{t_e}\right)^{0.9538}\right)$ $t_e = \int_0^t \exp\left(1760\left(\frac{1}{273+T_r} - \frac{1}{273+T}\right)\right) dt, \text{ 下同}$	0.771
复合指数式二	$\theta = 50.174 \exp\left(-0.00976 \left(\ln\left(1 + \frac{t_e}{574.365}\right)\right)^{-0.96269}\right)$	0.769
双曲线式	$50.174 \left(\frac{t_e}{7.091+t_e}\right)$	2.603
指数式	$44.939 (1 - e^{-0.10663 t_e})$	1.361

比较 4 种模型的拟合结果，双曲线式和指数式模型只有两个控制参数，因此适应能力较差，拟合结果不理想，均方误差都超过 1.3°C ，双曲线模型的均方误差甚至达到 2.60°C 。另外，指数式的最终绝热温升 θ_u 拟合结果为 44.939°C ，与试验结果不符。两种