

混凝土材料与结构热变形 损伤机理及抑制技术

马军涛 仝玉萍 丁沙 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

混凝土材料与结构热变形 损伤机理及抑制技术

马军涛 仝玉萍 丁沙 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书针对大温差地区的气候特征,系统模拟研究了水泥混凝土材料在大温差环境(室温~85℃)服役下各组成相间热膨胀性能的差异。通过观察水泥混凝土材料在热疲劳循环作用下的性能变化,深入研究了硬化水泥石和水泥混凝土的热膨胀性能及物相间热相互作用机理,探讨了适应于大温差地区下的热变形协调性混凝土制备技术,并结合实体工程对我国北方大温差地区的空心薄壁墩结构进行了时变温度效应规律和热应力研究。

本书适合于大温差地区的混凝土相关研究人员及相关专业研究生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土材料与结构热变形损伤机理及抑制技术 / 马军涛, 仝玉萍, 丁沙著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018.8

ISBN 978-7-5170-6775-7

I. ①混… II. ①马… ②仝… ③丁… III. ①混凝土—建筑材料—热变形—研究②混凝土结构—热变形—研究
IV. ①TU528②TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第197446号

书 名	混凝土材料与结构热变形损伤机理及抑制技术 HUNNINGTU CAILIAO YU JIEGOU REBIANXING SUNSHANG JILI JI YIZHI JISHU
作 者	马军涛 仝玉萍 丁沙 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	北京虎彩文化传播有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.25印张 172千字
版 次	2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	48.00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

水泥混凝土材料是一种非均质的多相复合材料,其中各组成物相的热膨胀性能均不相同。当环境温度发生剧烈变化时,混凝土内各组分间会产生不均匀的热膨胀,并由此产生热应力,以致界面出现微裂纹,严重时会引起混凝土结构的开裂。本书针对大温差地区的气候特征,系统模拟研究了水泥混凝土材料在大温差环境(室温 $\sim 85^{\circ}\text{C}$)服役下各组成相间热膨胀性能的差异。通过观察水泥混凝土材料在热疲劳循环作用下的性能变化,深入研究了硬化水泥石和水泥混凝土的热膨胀性能及物相间热相互作用机理。在此基础上,对比了不同掺量下粉煤灰、硅灰和苯丙乳液对水泥混凝土材料热膨胀性能的影响,探讨了适应于大温差地区下的热变形协调性混凝土制备技术。此外,本书还采用红外热像仪研究了混凝土结构的温度分布与热损伤趋势分析,并结合实体工程对我国北方大温差地区的空心薄壁墩结构进行了时变温度效应规律和热应力研究。

试验结果表明,在室温 $\sim 85^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,硬化水泥石和粗集料的热膨胀性能存在明显的差异。水泥混凝土经多次热疲劳循环后,界面过渡区产生微裂纹,并沿着集料边缘方向扩展,且微裂纹的宽度随热疲劳循环次数的增加而增大。随着热疲劳循环次数的增加,水泥混凝土的抗压强度逐渐降低。

粉煤灰、硅灰和苯丙乳液的掺入,均能不同程度地降低硬化水泥石的热膨胀率和热膨胀系数,其降低程度随外掺物掺量的增加而增大。粉煤灰能降低升温早期的热膨胀率及热膨胀系数,硅灰对升温后期的热膨胀率及热膨胀系数影响较大,苯丙乳液能同时大幅降低水泥石最大热膨胀参数和最小热膨胀参数。

粉煤灰、硅灰和苯丙乳液的掺入均能对混凝土的热膨胀系数有不同程度的降低效果,苯丙乳液影响效果最大,粉煤灰影响效果其次,硅灰影响效果最小。利用粉煤灰、硅灰和苯丙乳液制备的热变形协调性混凝土均能不同程度地改善混凝土热疲劳循环后的宏观和微观性能,宏观性能体现在热疲劳循环后,掺外掺物的混凝土抗压强度损失均能得到不同程度的减小,混凝土内

部的微裂缝也得到一定程度的控制。

粉煤灰、硅灰的掺入可降低水泥混凝土材料中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量并改善其孔结构，从而能有效限制水泥混凝土材料的热膨胀性能。苯丙乳液的掺入能在水泥混凝土材料中的 C-S-H 凝胶和未水化水泥颗粒表面形成一层密实的聚合物薄膜，因此增强了材料的韧性，形成了一个膨胀“缓冲区”，从而降低了水泥混凝土材料自身的热膨胀系数。

在上述研究的基础上，通过采用矿物掺和料、有机聚合物等对水泥浆体热膨胀性能的调节，提高了水泥浆体、砂浆和粗集料之间的热变形协调性，从而发展了具有较高抗热膨胀变形能力的热变形协调性混凝土设计和制备技术。

利用红外热像仪和温度传感器对大温差条件混凝土结构的温度分布进行了观察和分析，重点探讨了结构表面温度分布与其内部结构特征之间的关系。在此基础上发展了基于温度分布的混凝土结构损伤发展趋势的无损评估方法。利用此方法，不但可以直接发现结构表面附近的宏观缺陷（空鼓、蜂窝等），还可以判断在大温差作用下混凝土的温度场分布、结构热应力和热损伤发展趋势，为防止结构热损伤的发生提供技术支撑。本书还结合我国内蒙古阿尔山地区一座空心薄壁墩结构桥梁工程建设，开展了低热膨胀系数混凝土配合比设计和制备技术研究，且在服役期间利用红外热像仪对薄壁墩结构的实时温度监测，研究了薄壁墩结构的时变温度场与结构热应力。

感谢国家自然科学基金“无机超分子材料抑制混凝土硫酸盐侵蚀反应的基础研究”（项目批准号：51508191）和华北水利水电大学高层次人才启动项目（项目编号：201313）对本书研究和出版的资助。

由于检测和研究方法受到多方面因素的控制和制约，本书的研究有一定的局限性，敬请各位同行专家本着关心和爱护的态度，予以批评指正。

作者

2018年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书的主要研究内容及方法	13
第 2 章 水泥混凝土物相间的热相互作用及其调控	15
2.1 概述	15
2.2 试验设计与试验装置	16
2.3 试验结果及数据分析	21
2.4 本章小结	35
第 3 章 热变形协调性混凝土的设计与性能研究	37
3.1 概述	37
3.2 热变形协调性混凝土的设计	37
3.3 试验设计	38
3.4 结果与分析	39
3.5 本章小结	45
第 4 章 红外热像法评估混凝土结构损伤及温度场的研究	46
4.1 概述	46
4.2 红外热像法的检测原理	46
4.3 基于红外热像的混凝土温度场有限元法分析原理	48
4.4 红外热像法检测混凝土结构损伤及缺陷	48
4.5 基于红外热像法的混凝土温度场分布有限元分析	53
4.6 本章小结	60
第 5 章 混凝土结构温度场与热应力实例分析	61
5.1 内蒙古呼和地勒德尔大桥实例分析	61
5.2 内蒙古省道 203 道工程实例	73
5.3 混凝土内部缺陷和温度的检测及工程实例	88
第 6 章 结论	101
参考文献	102

绪 论

1.1 研究背景及意义

水泥混凝土是我国各类工程建设最为重要和主要的结构材料之一,应用于各类各种复杂地理、气候和环境条件中^[1],承受温度、荷载、盐碱等各种环境作用。大量混凝土结构工程服役过程中观察到数量不等的开裂现象,其开裂原因十分复杂,多为各种因素复合作用的结果。其中,温度对混凝土结构的影响是一个不可忽视的因素。这些温度作用可能是水泥混凝土水硬化过程中自身放热引起,也可能是环境温度变化的结果。研究处于热环境条件下的混凝土性能改变,可以帮助理解其服役能力,以期寻求提高、改善混凝土材料抗热作用、减小其热变形的技术途径。

水泥混凝土是由水泥浆体、粗细集料、孔隙等多种物相组成的一种复合材料,其组分具有互不相同的热变形特征。当材料温度发生变化时,其组成物相也会产生不同热变形,引起组分热应变,导致固相组成之间由于热膨胀性能的差异互相挤压或拉伸。并且,如果材料由于硬化龄期增加或者与外界组分的反应引起化学成分和孔隙结构改变,则进一步改变其组成及其热变形性质,改变了混凝土结构温度条件下的服役性能。^[2,3]

水泥混凝土材料服役过程中经历的热作用根据温度范围不同可以大致分为两大类:即气候温差(负温 $\sim 100^{\circ}\text{C}$)和高温过程(高于 100°C)。^[4]气候温差是由于混凝土材料受到气候环境影响而升温、降温的过程,由季节和天气特征决定。对于大部分工程结构而言,混凝土材料经历高温的过程通常是由一些非正常服役环境引起的,如火灾、爆炸的高温环境。本书研究的混凝土材料热变形特征及其性质演变主要针对气候温差因素开展。

热学性能是混凝土的重要性能之一^[5],热胀冷缩变化是其中一个常见的热学行为。国内外许多学者已经基于混凝土的结构破坏对混凝土在高温区域的性能进行了广泛深入的研究。^[6-9]同时,一些学者们研究了处于低温范围的硬化水泥浆体结构的冻胀特征,并且指出硬化水泥浆体里溶液的结冰点并不处于 0°C ,而是与硬化水泥浆体的孔隙大小有着密切的关系。当水泥浆体处于冻结温度之下,浆体中的水可划分为结冰水和过冷水,而硬化水泥浆冻结和膨胀的原因正是由于结冰水产生的体积膨胀压力和过冷水产生的渗透压力。^[10-12]

当温度发生变化时,不同材料产生的热膨胀均不相同。以往对大体积混凝土开裂可理解为水化热过大而产生的温差变形。^[13]当环境的温度发生改变时,混凝土材料热膨胀应变将产生热应力,增加了材料裂缝形成的可能。^[14]因此,水泥混凝土的热膨胀特性及其组分

间的热相容性是影响其热稳定性和体积稳定性的重要因素。

热胀冷缩是混凝土的一个重要特性,短时间的太阳暴晒或是大幅度的温差变化或是温度比较温和的周期性变化都可能会使混凝土出现开裂现象。混凝土材料因温度变化引起的裂缝,其中一个主要原因可认为是内外温差变化,由热胀冷缩和内外热变形的不一致而导致产生不同特征的裂缝。^[15]我国内蒙古、新疆等地区季节温度差异大,寒暑季节温度变化剧烈,春秋两季时间较短,冬夏两季时间较长,年度温差变化较大,即使同一日早晚的温差也变化明显,可达 $30\sim 45^{\circ}\text{C}$ 。^[16,17]据历史资料统计,在我国新疆,室外的最高温度达到了 81.4°C ,而最低温度则达到了 -43.5°C 。

在环境温差下,混凝土内部各组分间的热变形不均匀性,而对应的附加热应力也往往会作用在混凝土内部最薄弱的区域。一旦这种热疲劳应力超过了混凝土中薄弱区域的剪应力强度时,混凝土内部就会产生微裂纹甚至造成结构的损伤。这种由混凝土组成相之间的热不相容性原因而导致产生的损伤在不同温度下都很明显,被认为是混凝土结构破坏的一个重要原因。在我国新疆、内蒙古等大温差地区,发现了大量由于温度的大幅度剧烈变化而引起的混凝土开裂现象。

此外,在我国各类工程建设中,大体积混凝土和超长结构混凝土得到了普遍、广泛应用。这类结构的特点是混凝土水硬化过程放热量大,容易聚集而导致内部温度急剧上升。因此,由于混凝土的水化放热和周围环境辐射而产生的热量导致大体积混凝土结构的内部温度出现升高。混凝土在降温过程中由于受到周围建成结构的约束或者内部钢筋约束,产生拉应力,如果超过混凝土极限抗拉能力,则容易导致混凝土开裂。例如,在温差变化较大地区的一些隧道和大型桥梁等超长结构中,温度的急剧变化造成混凝土结构出现大幅度热胀冷缩,常常会造成结构开裂退化,进而影响到其耐久性。

尽管有许多学者对水泥混凝土材料的热学特性进行了诸多研究,然而却鲜有研究者指出大温差地区混凝土材料与结构的热损伤现象及其机理。因此,本书将研究处于大温差环境下的水泥混凝土材料与结构损伤机理,进而针对该现象开展抑制技术研究。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 水泥混凝土的组成与结构

水泥混凝土是一种由水泥、粗细集料、水和外掺物组成的复杂多相聚集体。^[18]图1.1显示了典型混凝土的结构组成,包含水化水泥浆体、集料和界面过渡区。硬化水泥浆体是混凝土中骨料嵌固的基体,发挥将离散骨料胶结形成具有承载能力整体的作用,并且在一定条件下是外界物质侵入混凝土的通道,具有和外界环境交换物质的能力,因此水泥浆体也是混凝土最重要的组成部分。水泥浆体主要由水泥水化反应生成的结晶体、无定形产物和孔隙组成^[19],具有胶凝能力的主要固相物质是高度无定形和具有巨大内比表面积的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶^[20],它的体积比例占整个硬化水泥浆体的70%左右。水泥浆体中其他水化产物包括氢氧化钙和钙矾石等。

图1.2所示为硬化水泥浆的典型微观结构和主要水化产物形貌。硬化水泥浆体中的水化产物可以归纳为以下几种主要物质。^[18]

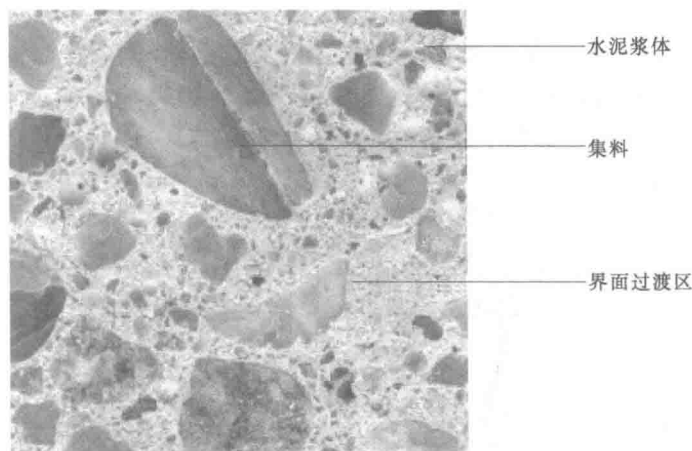


图 1.1 典型混凝土的结构组成

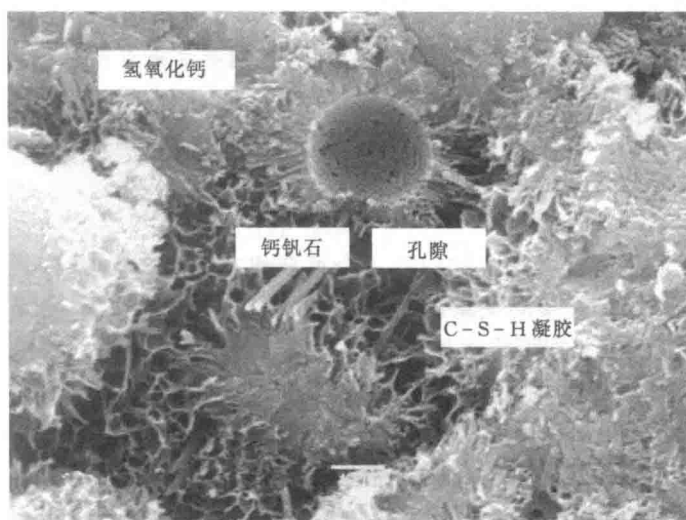


图 1.2 硬化水泥浆体的水化产物形貌

1. C-S-H 凝胶

C-S-H 凝胶由水泥颗粒水化而成，呈无定形态，具有典型多孔结构特征和巨大的内比表面积，其化学组成及变化主要受钙硅比及其他外掺离子的影响。^[21] 已有研究显示^[22]，硅酸盐水泥水化生成的 C-S-H 凝胶其钙硅比值一般在 1.4~2.0 之间。矿物外掺料和水化龄期对 C-S-H 凝胶的结构和组成有十分重要的影响，并且 C-S-H 凝胶中的水分对环境温度和湿度十分敏感，容易产生干燥收缩。

国内外许多学者长期针对 C-S-H 凝胶的结构和性质进行了大量研究。Grudemo^[23] 开创了对其结构的认识，后期的 Taylor、Grutzeck、Wieker 和 Viehland 等人^[24-28] 又对其进一步深入地展开研究，并提出许多创新的研究手段，发展比较成熟的主要包括钼酸盐反应法^[29]、三甲基硅烷化法^[30,31] 和核磁共振法等。当前比较普遍采用核磁共振的方法对

C-S-H凝胶的结构进行研究。^[32,33]C-S-H的凝胶结构一般可分为单相或两相。^[34]Richardson等^[35]通过对C-S-H凝胶进行测定,认为它是 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 四面体的单相组成。Taylor^[36]则认为C-S-H凝胶可划分为C-S-H(I)型和C-S-H(II)型两种组成相,其中C-S-H(I)是类似于脱勃莫来石晶体结构,C-S-H(II)则具有类似于羟基硅钙石的晶体结构。

2. 钙矾石

钙矾石(Aft)属三方晶系,呈柱状结构^[37],其组成主要决定于水泥浆体中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 OH^- 和 AlO_2^- 四种离子的浓度积。此外,液相中的离子浓度积也对Aft的生成速率与形貌产生影响。^[38,39]

3. 氢氧化钙

水泥浆体中的氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 呈六角棱柱结构,其形貌在不同的条件下具备不同的特点,既有扁平板状的大晶体,也有相同尺寸的细小晶体,还有大的、细长的、薄的晶体及介于其间的变种,取决于其生成环境和空间条件。

4. 水

水是硬化水泥浆体的一个重要组成相,以包含大量离子的孔溶液形式存在,容易与环境中的水分发生交换。因此,硬化水泥浆体中的含水量会随着环境湿度的变化而变化。不同层次的结合水会对水泥混凝土材料的性能产生不同影响。根据存在状态的不同,硬化水泥浆体中的水可划分为化学结合水、层间水、吸附水和毛细孔水。

5. 孔隙及孔隙率

孔结构是水泥混凝土材料微观结构的一个重要组成部分^[40],其宏观性质如强度、渗透、膨胀等与孔结构都有直接的关系。^[41]水泥混凝土孔直径一般在 $10\mu\text{m}\sim 5\text{nm}$ 之间,分布较广。^[42]根据孔径大小不同可将水泥混凝土的孔隙分为凝胶孔、毛细孔和大孔。^[43]气液物理吸附法和压汞法^[44]是常见的两种测定分析孔结构的方法。水泥混凝土孔隙结构的主要特征参数为孔隙率、孔径分布和孔隙连通性。其中,孔隙率是应用较多、较为容易测试的一项指标,与混凝土的强度、密实程度有直接联系。孔径分布受水泥组分、环境和约束影响显著,是评价水泥混凝土微观结构特征的一项重要指标,与孔隙连通性一起决定混凝土的抗渗透能力和内部传输特性。

1.2.2 水泥混凝土的热变形性质研究

热膨胀^[45]指的是物质的长度或者体积随着温度升高而增大。一般人们常说的热胀冷缩,指的就是物体体积随温度升高而增大,随温度降低而减小。不同物质热膨胀性质不同,即使对同一物质而言,其热膨胀性能也会随着其内部晶体结构的不同而不同。^[46]假设材料的初始长度为 L_0 ,初始温度为 T_0 ,当温度升高 ΔT 后材料的长度增加了 ΔL ,则在某一温度变化范围内材料的平均热膨胀系数可由式(1.1)计算得到^[46],即

$$\alpha_t = \frac{1}{L_0} \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (1.1)$$

式中: α_t 为材料的平均线胀系数,即温度升高1K时物体的相对伸长量。

则材料在温度 T 时的长度 L_T 为

$$L_T = L_0 + \alpha_t \Delta T \quad (1.2)$$

瞬时热膨胀系数指在某温度附近材料小范围温度变化对应的热膨胀系数。如果材料性质随温度变化显著,则应当考虑其瞬时热膨胀系数,其计算方法为

$$\alpha_{\text{inst}} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT} \quad (1.3)$$

式中: α_{inst} 是材料的热膨胀-温度斜率,指的是瞬时状态下物体发生热变形的大小。

作为一种复合材料,混凝土的热膨胀系数取决于其组成相的性质及其含量,以及水泥浆体、集料、孔隙的组分比例和各自热变形性质。对各组分的弹性模量大体接近的复合材料来说,其热膨胀系数 α_0 可由式 (1.4) 计算,即

$$\alpha_0 = \sum_i \alpha_i \nu_i \quad (1.4)$$

式中: ν_i 为材料中 i 组分的体积百分含量; α_i 为材料中 i 组分的线热膨胀系数。如果各组成材料的弹性模量相差很大,则其复合材料的热膨胀系数 α_0 可表示为^[47]

$$\alpha_0 = \frac{\sum_i \alpha_i B_i \nu_i}{\sum_i B_i \nu_i} \quad (1.5)$$

式中: B_i 为材料中 i 组分的体积模量; ν_i 为材料中 i 组分的体积百分含量; α_i 为材料中 i 组分的线热膨胀系数。当不同组分之间界面的切应力必须考虑时,混凝土材料线热膨胀系数可用式 (1.6) 来计算,即

$$\alpha = \frac{(\alpha_d - \alpha_m) V_d}{\frac{12 B_m G_m}{3 B_m + 4 G_m} \left(\frac{V_d}{3 B_m} + \frac{1}{4 G_m} + \frac{1 - V_d}{3 B_d} \right)} \quad (1.6)$$

式中: B_d 为分散相材料的等温体积模量; B_m 为基体材料的等温体积模量; G_m 为基体材料的切变模量; α_d 为分散相材料的线热膨胀系数; α_m 为基体材料的线热膨胀系数; V_d 为分散相材料的体积分数。

水泥浆体的固相组成及含量、水的多少和孔隙率大小是影响硬化水泥浆体热膨胀性能的主要因素。一般认为,水泥浆体中氢氧化钙的热膨胀系数最大,C-S-H凝胶最小,水泥浆体中的氢氧化钙含量越多,其热膨胀系数就越大。^[48] 通常情况下结构致密的物质其热膨胀系数会较大,而结构疏松多孔的物质其热膨胀系数会较小。所以硬化水泥浆体的热膨胀系数随着水泥浆体孔隙率的升高而降低。

水的线热膨胀系数为 $69 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 体积热膨胀系数为 $210 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。水泥浆体中的自由水和吸附水随着温度的升高而逐渐脱去,但内部的化学结合水无法排解,从而使水泥浆体产生了湿热膨胀。^[49] 因此,湿度也影响着水泥混凝土的热膨胀性能。^[50] 自由水进、出水泥浆体的运动分别会导致膨胀和收缩,而热膨胀系数中取决于湿度的部分并不包括这两种运动,这一部分需要在达到平衡后才能被确定。^[50] 干燥时的硬化水泥浆体毛细孔不能向胶体提供水分,也没有膨胀产生。湿饱和时的硬化水泥浆体则由于没有毛细孔弯液面,温度的变化对其没有影响。当水泥浆体处于这两种状态下时,其热膨胀系数都低于半饱和状态。所以只有在湿饱和或干燥情形下测定的热膨胀系数才是比较客观真实的。

水泥浆体的热膨胀主要有以下表现:

(1) 水泥浆体 C-S-H 凝胶的受热膨胀。C-S-H 凝胶由于自身的热膨胀系数较小,

所以水泥浆体这一部分的膨胀值较小。

(2) 水泥浆体中的凝胶孔中的水发生的受热膨胀。因为水的热膨胀系数要远远大于水泥浆体的热膨胀系数,所以当凝胶孔中的水受热而产生膨胀时,其体积迅速变大,从而引起凝胶体的迅速膨胀。

(3) 毛细孔中水产生的湿胀压力。^[4]

针对水泥混凝土材料的热膨胀性能,国内外学者展开了长期研究,研究对象主要侧重于水泥混凝土材料的热膨胀系数。Kraft^[51]研究发现,硬化水泥浆体的线胀系数大致在 $(11\sim 20)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间,砂浆大致在 $(10.1\sim 18.5)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间,而混凝土大致在 $(7.4\sim 13.1)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间。Glisic等^[52]在混凝土中预埋了特制的传感器来测定其体积变化。武汉理工大学的水中和等^[53]对水泥基材料各组分间的热变形协调性及其对水泥混凝土结构和性能的影响展开了系统的研究。Meyers等^[54]指出,在 $-10\sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内,水泥浆体的热膨胀系数会发生变化,水泥浆体的含水量、水灰比和龄期均对其有影响,他们测得的28d水泥浆的瞬时热膨胀系数在 $(15\sim 20)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间。

当前对水泥混凝土材料热变形的测试方法有很多,代表方法包含清华大学建材研究所研发的“温度-应力实验机”^[55],可以用来测定水泥混凝土材料热膨胀性能。哈尔滨工业大学的马新伟、钮长仁用静水力学称重法^[5]测量了早期混凝土的热膨胀系数。静水力学称重法的原理是通过测量试件在水中的浮力变化大小来计算其体积变化大小。^[57]东南大学的丁士卫、钱春香等^[58,59]用直接测长法测定了硬化水泥浆体的热膨胀系数,该方法可以通过电加热控制温度直接测试不同温度下试件的长度变形大小,通过热膨胀系数的计算公式直接得出实验结果。中国建材研究院的李清海^[60]则专门针对水泥混凝土材料在高温区域的热膨胀性能进行了研究。

当前,人们发现水泥混凝土在受热状态下产生裂缝的一个直接原因就是材料变形大小的不同。实际工程中对水泥混凝土材料进行设计时必须考虑到混凝土的热稳定性,因此对材料的热膨胀系数设计就需要更精确。对水泥混凝土各组成相间的热变形性能及其机理的研究,可以为研究水泥混凝土的耐久性提供一个十分必要的理论补充。

1.2.3 水泥混凝土的热敏感性研究

水泥混凝土是由水泥、粗细集料、水和外掺物等共同组成的一个复杂多相聚合体。通常在研究混凝土的宏观力学性能时可以将其看作一个完整体系,而实际上混凝土各组成相之间存在着较大的差异。从更深层次看,硬化水泥浆体的显微结构由水泥C-S-H凝胶、氢氧化钙晶体、未水化的水泥、孔隙等组成。当温度发生改变时,其中的各种物相也会随之发生改变而表现出一定的差异性。

当环境温度在 $0\sim 60^{\circ}\text{C}$ 时,集料的热膨胀系数为 $(0.9\sim 16.0)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,比如常用的石灰岩集料的常温线胀系数为 $(3.0\sim 6.0)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。有些矿物虽然化学组成相同,但其本身的热膨胀系数有很大差别^[61],比如方解石和石英。表1.1为一些常用集料及其对应的混凝土的热膨胀性能。^[62]

硬化水泥浆作为另一个重要的组成相,其热膨胀性能对环境的变化很敏感。已有研究表明,硬化水泥浆是一个复杂多相体系,其对温度的变化十分敏感,含水量、水灰比和龄

表 1.1 常用集料及对应混凝土的热膨胀系数 (0~60℃)^[62]

集 料	热膨胀系数 (10 ⁻⁶ /℃)	
	集料 (平均)	混凝土 (平均)
燧石	11.8	13.2
石英岩	10.3	12.1
砂岩	9.3	11.4
花岗岩	6.8	9.6
玄武岩	6.4	9.3
石灰岩	5.5	8.6

期都会对其热变形产生较大的影响。^[63]Meyers 和 Zolders 等人^[64,65]研究了硬化水泥浆的热膨胀性能,指出在环境温度下水泥浆体 28d 的线热膨胀系数为 (15~25)×10⁻⁶/℃。未水化水泥的常温热膨胀系数为 (3.0~4.0)×10⁻⁶/℃,水的热膨胀系数约为 210×10⁻⁶/℃。硬化水泥浆在干燥或饱水时的线热膨胀系数分别大约为 10×10⁻⁶/℃或 20×10⁻⁶/℃,因此含水率的多少会使得环境温度下热膨胀系数出现明显差别。在显微层面下,硬化水泥浆体的各物相间的热膨胀大小也不相同,如 C-S-H 凝胶、氢氧化钙晶体以及未水化的水泥颗粒。Schulson^[66]通过中子衍射实验,发现氢氧化钙晶体在 a 轴和 c 轴方向上结构不同导致其热变形也具有显著向异性,在水泥浆体中将产生不同的热应力。

水泥浆体作为混凝土中的基体材料,其热膨胀性质变异性较大,影响因素多,是水泥混凝土中热变形性质最为复杂的组分,也是有望通过调控减小其热敏感性的组分,因此研究其热性质对于理解水泥混凝土的热变形特征具有十分重要的意义。图 1.3 所示为硬化水泥浆体的热应变大小随温度的变化趋势^[67],可以看出,室温环境下,随着环境温度升高硬化水泥浆由于内部固相和孔溶液的膨胀而主要表现为膨胀的趋势;而在高温范围内,由于水分的迅速脱去和水化产物的相变,水泥浆体热变形随温度升高表现为热收缩。

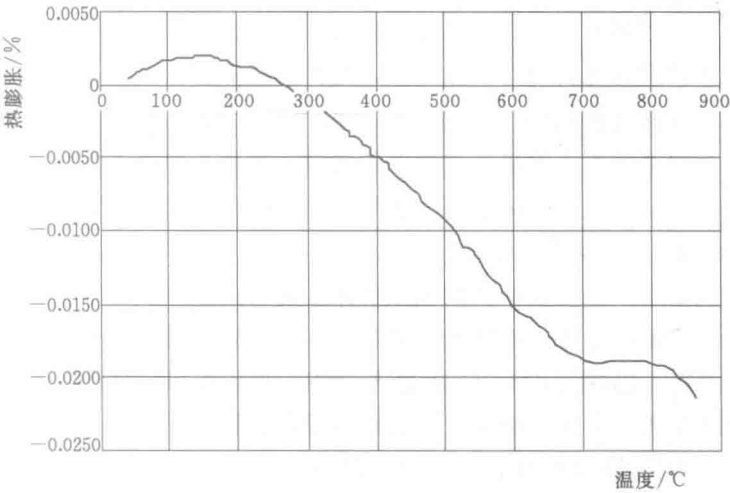


图 1.3 硬化水泥浆体的热应变大小随温度的变化趋势^[67]

因此,水泥混凝土各组成相的热膨胀性能无论从宏观还是微观层面上看都存在着较大差异。当温度发生改变时,其彼此物相间会产生热变形的不一致,从而对混凝土结构内部的热稳定性构成影响。

1.2.4 水泥混凝土的热不相容性研究

温度的变化对水泥混凝土材料结构和性能最显著的影响是混凝土的体积会随温度的变化而变化,此过程的反复进行可能会引起组成相界面区域的热疲劳损伤。因此,在温度变化幅度较大的环境条件下混凝土各组成相间的温度协调性也是一个必须考虑的问题。

我国内蒙古、新疆等一些地区温度变化幅度大,且常年处于干燥环境状态(相对湿度最低为0,新疆)。这些地区^[17]不仅日温差高(最高35.8℃,1962年新疆)、年温差变化幅度大(最高98.4℃,1986年新疆),而且结构的温度也较高(最高82.3℃,1974年新疆)。这些地方混凝土开裂比较频繁的原因就在于环境温度对混凝土的影响非常大。^[68-71]图1.4所示为我国内蒙古地区某桥梁墩身由于热疲劳引起的表面水泥浆体剥落的情况。

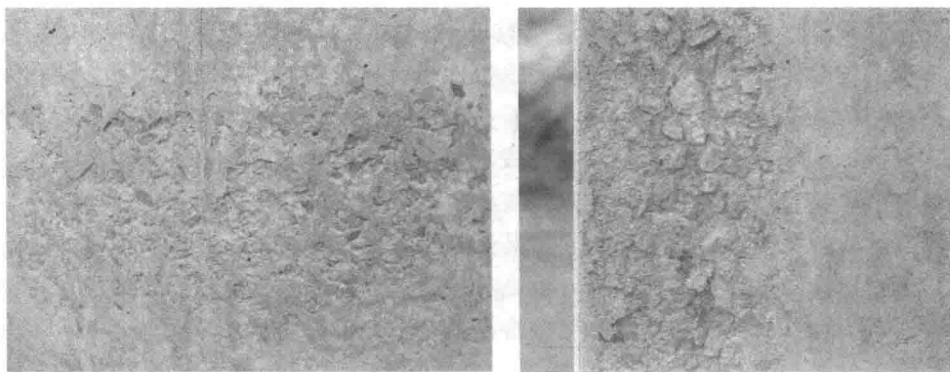


图 1.4 内蒙古西部某桥梁墩身混凝土表面剥落情况

通常人们往往忽略环境温度下的温差对混凝土性能的影响。然而,当温度超过某一临界值或是温度的反复剧烈波动多次,混凝土的结构就非常容易出现损伤。这种结构损伤往往出现在水泥浆体和集料之间的界面过渡区,是两者热相互作用的结果。

一些研究者对界面过渡区展开了深入的研究^[72-75],指出其结构和硬化水泥浆体有较大的区别,并认为它是混凝土中组成最薄弱的区域。另外,界面过渡区的一些主要特征包括过渡区的厚度很小,仅为50μm左右;过渡区的强度和密度均小于硬化水泥浆基体;集料表面周围的Ca(OH)₂六方晶体较大。^[76,77]

当温度产生变化时,混凝土中硬化水泥浆体和集料由于其热膨胀特性的差异而在界面处产生相对运动和错位的趋势,而这个趋势的大小则主要由温度变化的大小和两者的热膨胀性能的差异所决定。温度变化可以造成混凝土内部由于温度梯度而产生热应力,以及各相间由于热作用变形而产生挤压应力。目前许多学者已经认识到这个机理适用于高温环境下的混凝土,但在变化范围较小的环境温度范围内(小于100℃),反复的热疲劳循环也能对混凝土产生损伤。研究表明,当气温达到32℃时,混凝土试块的温度可达63℃;当气温达到40~47℃时,混凝土试块的表面温度可高达80~90℃。混凝土试块经过365d环

境温度下的热疲劳循环后,前60d其抗压强度下降约12%,到120d时下降了约17%,而后变化不大。但是当混凝土表面的最高温度达到90℃时,其120d后的抗压强度降低了超过24%^[78],如图1.5所示。

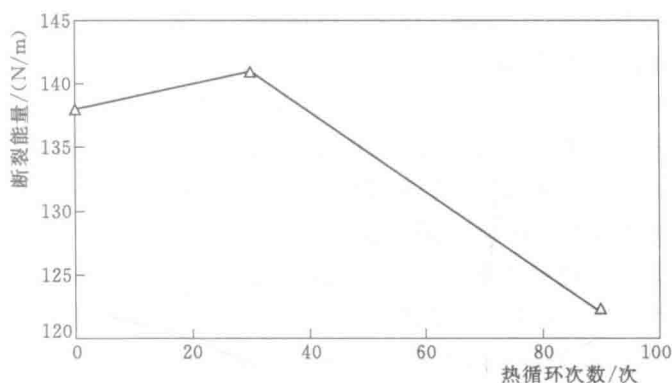


图 1.5 温度循环对混凝土断裂能量的影响^[79]

Kanellopoulos 等人^[79]的研究表明,热循环处理对水泥混凝土断裂能量有十分显著的影响,30次25~90℃热循环处理后,混凝土的断裂能量略有增加,而90次热循环后,其断裂能量降低大约10%。由此,多次热循环后混凝土的性能显著下降。

1.2.5 混凝土结构物内部缺陷与湿度的无损检测方法

早在20世纪30年代,人们就开始研究混凝土的无损检测技术。1948年,瑞士科学家施密特(E. Schmidt)研制成回弹仪;1949年,莱斯利(Leslie)等人用超声脉冲成功检测混凝土;20世纪60年代,费格瓦洛(I. Facaoaru)提出用声速、回弹综合法估算混凝土强度;20世纪80年代中期,美国的玛丽·圣萨洛内(Mary Sansalone)等用机械波反射法进行混凝土无损检测;自20世纪90年代以来,随着科学技术的快速发展,涌现出一批新的测试方法,如微波吸收、雷达扫描、红外线谱、脉冲回波等方法。我国从20世纪50年代开始引进瑞士、英国、波兰等国的超声波仪器和回弹仪,并结合工程应用开展了一定的研究工作;20世纪60年代初,我国研制成功多种型号的超声波仪器,随后广泛进行了混凝土无损检测技术的研究和应用;20世纪80年代,混凝土无损检测技术在我国得到快速发展,并取得了一定的研究成果,除了超声、回弹等无损检测方法外,还进行了钻芯法、后装拔出法的研究;20世纪90年代以来,雷达技术、红外成像技术、冲击回波技术等进入实用阶段,同时超声波检测仪器也由模拟式发展为数字式,可将测试数据传入计算机进行各种数据处理,以进一步提高检测的可靠性。

随着科学技术的发展,无损检测技术也突破了原有的范畴,不仅涌现出一批新的测试方法,并且测试内容由强度推定、内部缺陷探测等扩展到更广泛的范畴,其功能由事后质量检测发展到了事前的质量反馈控制。混凝土无损检测技术的发展虽然时快时慢,但由于工程建设的实际需要,它始终具有较强的生命力。可以预料,随着科学技术的发展和工程建设规模的不断扩大,无损检测技术的发展前景是广阔的。

1. 探地雷达法

探地雷达法是一种利用电磁波技术对地下的或物体内部不可见的目标或界面进行定位的

无损检测方法。通过发射的高频电磁波在介质中传播时,其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电磁特性和几何形态而变化,对接收信号进行分析处理,可判断地下的结构或埋藏物等。探地雷达具有携带方便、操作简单、成像直观等诸多特点。

探地雷达的概念早在1910年就被提出,但一般认为第一个提出应用脉冲技术确定地下结构思路的人是德国的胡尔森贝奇(Hulsenbech),他于1926年指出,电磁波在介电常数不同的介质交界面上会产生反射,这个结论也成了探地雷达研究领域的一条基本理论根据。探地雷达的初期应用仅限于对电磁波吸收很弱的冰层、岩盐等介质中。例如,1951年斯蒂森(Stenson)用雷达探测冰川的厚度;1970年哈迪森(Hatison)在南极冰层上取得了800~1200m穿透深度的资料等。近几年,人们开始致力于研究用GPR探测混凝土内部的病害和缺陷,如面层中沥青的剥落、混凝土板下的空洞和钢筋的定位等。

在土木工程方面,国外GPR技术最早应用是在1974年。国外有许多专家对探地雷达进行了深入的研究工作。例如,斯巴泰(Sbartai)系统地研究了探地雷达从基本原理到使用方法再到实际应用的全过程,并总结出了探地雷达中直达波(Direct Wave)的诸多优点。S. 劳伦斯(S. Laurens)等通过雷达实验建模,对混凝土电阻率和介电常数进行了测量,间接地表征了混凝土中水分的含量。约翰内斯·胡根施密特(Johannes Hugenschmidt)和罗曼·卢瑟(Roman Loser)研究了湿度和含氯量对雷达信号振幅的影响。

我国起步较晚,中国地质大学在1990年引进了GPR技术,最早在中国开始了探地雷达的应用和研究。有研究人员对探地雷达在隧道和涵洞检测工程中的应用进行了研究,并对良好部位和含缺陷部位的雷达图进行了对比,最后给出了探地雷达检测技术在实际工程中应用的一些经验。

2. 超声波法

超声波仪是一种通过发射和接收超声波来对结构物进行检测的仪器。超声波是指振动频率大于20kHz以上的声波,通常以纵波的方式在弹性介质内部传播,是一种能量的传播形式,其特点是超声频率高、波长短,在一定距离内沿直线传播具有良好的束射性和方向性。

超声波法(即超声脉冲法)在国内外广泛用于检测混凝土的质量,它不受构件几何尺寸的影响,测试迅速,数据可信,有其独特的优点。采用超声脉冲波检测混凝土结构缺陷的基本原理是,利用脉冲波在技术条件相同(指混凝土的原材料、配合比、龄期和测试距离一致)的混凝土中传播的时间(或速度)、接收波的振幅和频率等声学参数的相对变化,来判定混凝土的缺陷。

混凝土超声波检测技术已应用到建筑、水电、交通、铁道等各类工程中。检测的应用范围和应用深度也不断扩大,从地面上部结构的检测发展到地下结构的检测,从一般小构件的检测发展到大体积混凝土的检测,从单一测强发展到测强、测裂缝、测缺陷、测破坏层厚度以及弹性参数的全面检测。

3. 冲击回波法

为了解决超声脉冲回波法中高频应力波被各向异性材料吸收的问题,20世纪80年代中期美国国家标准局(U. S. National Bureau of Standards, NBS)发明了冲击回波法,它是一种对混凝土及砖石结构进行无损评估的声学方法。该方法已经得到广泛的开发和应

用,对金属、塑料和其他均质材料来说,已成为一种全面、可靠的无损检测方法。

冲击回波法的原理可以概括为:利用一个短时的机械冲击产生低频的应力波,应力波传播到结构内部,被缺陷和构建地面反射回来,这些反射波被安装在冲击点附近的传感器接收,并被送到一个内置高速数据采集及信号处理的便携式仪器,将所激励的信号进行时域或频域分析即可得出混凝土的厚度或缺陷的深度。

4. 红外检测法

红外热像无损检测技术是国内外最新发展起来的检测材料缺陷和应力的技术,受到广泛的关注。红外检测技术最初是出于军事目的的研究和发展起来的,后来被广泛应用于电力和铁道行业中进行对设备热状态的检查和故障诊断,现在逐渐扩展到航空航天领域内对复合材料内部缺陷的检测以及对涂层的定量测量阶段,另外红外热像技术在其他方面应用也十分广泛,如建筑节能评测、森林防火、农作物优种、地震预报研究、固体力学、遥感地质勘探、医学热像诊断等。任何物体只要其温度高于绝对零度,都会从表面发出与温度有关的热辐射能。

红外检测法的基本原理是利用被检物体的不连续性缺陷对热传导性能的影响,进而反映在物体表面温度的差别上,即物体表面的局部区域产生温度梯度,导致物体表面红外辐射能力发生差异,检测出这种差异就可以推断物体内部是否存在缺陷。

5. 微波测湿法

微波测湿法是采用微波对介质进行湿度的测试。微波是一种电磁波,其波长在 $1\text{cm}\sim 1\text{m}$ 之间,频率在 $300\text{MHz}\sim 300\text{GHz}$ 之间。在微波波段,介质对电场的损耗主要为偶极子的取向极化损耗。水分子是一种极性很强的偶极子,在外场作用下,水的极化程度远大于其他物质。由于微波对介质的介电常数敏感,而介电常数又和其含水率有关,因此可以采用这种方法。通过测量含水物质在微波场中的介电系数,便能间接测得物质中含水量的多少,但是现实中微波测湿往往不能直接测量出介电常数,而是测量微波通过物体时的衰减常数、相移常数、谐振腔的谐振频率等来间接地测量湿度。微波测湿具有快速、连续、无损伤、实时、灵敏度高以及对被测物料形状不破损等优点。

国际上从事微波测湿研究的国家有美国、俄罗斯、波兰、德国、英国、加拿大、法国、匈牙利等国家。其应用领域有农产品、建材、土壤、食品、造纸、化肥、石油、纺织、煤炭、选矿等。尽管微波测湿技术发展较早,但大多数国家只是从事其应用方面的研究,而忽略了微波与含水物质相互作用的微观机理方面的研究,致使目前仍然没有一套完备的理论来描述微波与含水物质的相互作用。德国 HF Sensor GMBH 公司研制成功了 MOIST-200 手持式微波湿度测试仪,它最大测试深度为 300mm ,仪器轻便,可测试混凝土、砖、EIFS、沥青、木材和其他建筑材料。

6. 电测法

由于结构物内部湿度的变化,其电学性质如电阻率、电容、电导率等也会跟着发生变化,通过测量这些电学参数,经过分析即可判断。

产自爱尔兰的 Tramex 渗漏检测仪以及美国生产的 Leak-Seeker 渗漏巡检仪都是采用电测原理的仪器,它们适用于复合防水层和单层防水层,但不适合某些含有炭黑的橡胶型防水材料,如 EPDM 和丁基等防水片材。该类仪器采用电池供电,能产生两种低频电