

文章编号:1007-9629(2024)12-1101-11

# 混凝土减缩抗裂外加剂的研究与应用进展

李 华<sup>1,2</sup>, 王育江<sup>2</sup>, 高南箫<sup>2</sup>, 李 明<sup>1,2</sup>, 刘加平<sup>1,\*</sup>

(1. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 江苏苏博特新材料股份有限公司 高性能土木工程材料国家重点实验室, 江苏 南京 211103)

**摘要:**混凝土的收缩开裂是长期困扰工程界的一大技术难题,采用化学外加剂来减少混凝土收缩是提高混凝土抗裂性方便且经济有效的途径.本文针对工程混凝土收缩开裂突出的现状,首先简要介绍了收缩开裂的成因;在此基础上,从不同阶段、类型的收缩出发,综述了不同品种减缩抗裂外加剂的研究与应用进展,指出了当前应用过程中存在的技术难题以及需要进一步研究的方向,旨在为减缩抗裂外加剂的研究开发和应用提供参考.

**关键词:**化学外加剂;减缩;抗裂;混凝土

中图分类号:TU528.042

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.12.004

## Research and Application Progress of Chemical Admixtures for Shrinkage Reducing and Crack Resistance of Concrete

LI Hua<sup>1,2</sup>, WANG Yujang<sup>2</sup>, GAO Nanxiao<sup>2</sup>, LI Ming<sup>1,2</sup>, LIU Jiaping<sup>1,\*</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Sobute New Materials Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Shrinkage cracking of concrete is a major technical problem that has long plagued the engineering. Reducing the shrinkage of concrete by chemical admixtures is a convenient and cost-effective way to improve the crack resistance of concrete. This article focused on the research and application status of chemical admixtures for shrinkage reducing and crack resistance of concrete. Firstly, the causes of shrinkage reducing and crack of concrete were briefly introduced. Then, the research and application progress of different types of chemical admixtures corresponding to different types of shrinkage were summarized, and the technical challenges and further research requirements were pointed out. It aims to provide reference for the research, development and application of chemical admixtures.

**Key words:** chemical admixture; shrinkage reducing; crack resistance; concrete

混凝土的收缩开裂是长期困扰工程界的重大技术难题.工程实践表明,混凝土结构物 80% 以上的裂缝是由不同的收缩变形引起<sup>[1-2]</sup>.收缩裂缝会引起结构的渗漏,加剧有害离子的传输速率,严重时威胁到结构的长期安全性,缩短其使用寿命.随着中国重大基础设施工程向高原、荒漠、海洋等大温差、极干燥和强腐蚀等严苛环境的推进,以及

优质原材料资源稀缺以及工业废渣的普遍使用等带来的混凝土组成复杂化,混凝土的收缩开裂及由此造成的破坏现象也愈加突出.如何抑制混凝土的收缩开裂是混凝土工程建设亟需解决的问题,也是研究的热点.

实际工程中,可以从设计、材料和施工等多个方面采取措施控制收缩开裂.其中,化学外加剂作为现

收稿日期:2024-05-28; 修订日期:2024-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52293432);广西科技计划项目(桂科 AB22036007)

第一作者:李 华(1987—),女,江苏建湖人,东南大学博士生,江苏苏博特新材料股份有限公司高级工程师.E-mail:lihua@cnjsjk.cn

通讯作者:刘加平(1967—),男,江苏海安人,东南大学教授,博士生导师,博士.E-mail:liujiaping@cnjsjk.cn

代混凝土的重要组成部分之一,具有组分可调、功能可控和使用方便的特征,为混凝土性能的调控和提升提供了方便且经济有效的途径.减缩抗裂外加剂是具有减小混凝土收缩、抑制开裂功能的一大类化学外加剂的统称.目前,减缩抗裂外加剂种类较多,其作用原理、针对的收缩类型、作用效果以及适用的工程类型存在较大的差异.同时,随着研究与应用的深入,减缩抗裂外加剂本身还存在较大的改性和发展空间.基于此,本文首先简要介绍了混凝土收缩开裂的成因;在此基础上,针对不同阶段、类型的收缩,综

述了不同品种减缩抗裂外加剂的研究和应用现状、存在的技术难题及发展趋势,为减缩抗裂外加剂的研发及其在工程中创新应用提供参考.

## 1 收缩开裂成因

混凝土浇筑后,由于胶凝材料水化及其与环境的交互作用,会发生宏观体积收缩.实际工程中,具有一定尺寸且早期经历明显温升和温降历程的混凝土结构或构件,其收缩和开裂如图1所示,由图1可见,混凝土的收缩主要有以下几种类型:

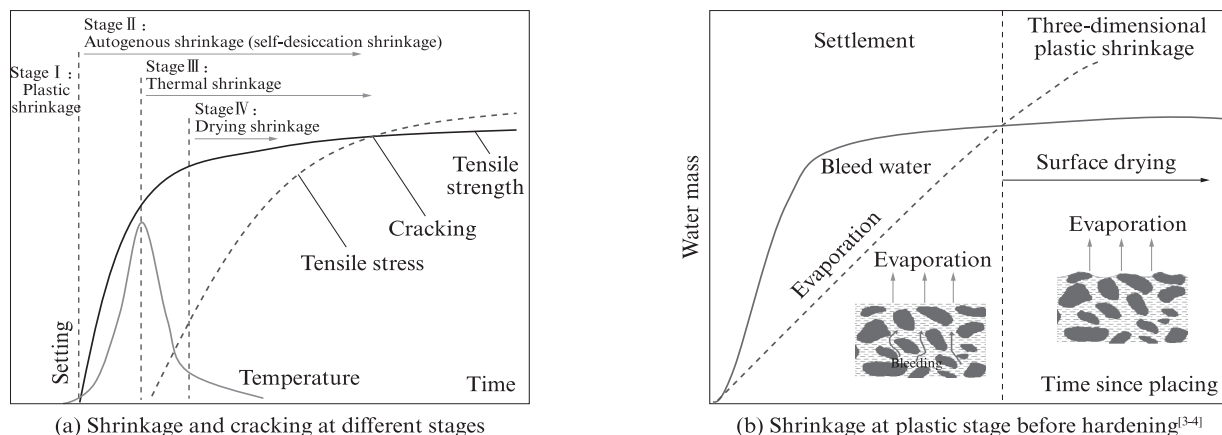


图1 混凝土收缩和开裂示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of shrinkage and cracking of concrete

(1)阶段Ⅰ:塑性收缩.在凝结硬化前的塑性阶段,混凝土固相骨架尚未形成,其收缩变形可分为塑性收缩和塑性沉降两类.新浇筑混凝土具有一定的流动性,由于其内部水、胶凝材料颗粒、骨料和气泡等在重力作用下的不均匀运动,混凝土首先表现为塑性沉降收缩.其后,随着水分蒸发和水化的进行,当蒸发速率大于泌水速率时,混凝土表面开始变干,并产生毛细孔负压,此时混凝土会产生三维方向的塑性收缩<sup>[4-5]</sup>.

(2)阶段Ⅱ:自收缩.自收缩一般是指由于水化所引起的混凝土表观体积减小,不包含温度变化、外部荷载等引起的体积变化<sup>[6]</sup>.自收缩产生的根本原因是水化所导致的化学收缩.在凝结硬化前,混凝土体系处于饱和态,自收缩等于化学收缩;凝结硬化后,混凝土内部湿度不断降低(自干燥),自收缩开始小于化学收缩<sup>[7]</sup>.在试验测试过程中,通常选择初凝或终凝作为自收缩的测试零点,此时测试出的自收缩通常为自干燥收缩<sup>[8]</sup>.

(3)阶段Ⅲ:温降收缩.结构混凝土由于水化放热和散热的共同作用,混凝土内部会产生一定的温升和温降.在温度降低过程中混凝土出现的收缩变

形被称为温降收缩.

(4)阶段Ⅳ:干燥收缩.混凝土模板拆除或养护措施结束后,混凝土中的水分向环境中迁移,导致其内部湿度降低而引起干燥收缩.

上述各种收缩,除了塑性沉降收缩外,均可以归结为混凝土内部湿度降低或温度降低所造成的收缩.收缩受到约束时会产生拉应力,当拉应力超过混凝土抗拉强度时,则会产生开裂(见图1(a)).在塑性阶段,当混凝土的沉降收缩受到钢筋的限制,或由于结构截面高度变化而产生不一致时,在钢筋表面和变截面处易出现塑性沉降裂缝.塑性收缩引起的开裂通常发生在板式结构的表面,呈不规则分布,一般深度较小,但若不及时处理,后期可能会不断扩展甚至贯穿(如楼板结构).混凝土硬化后,各种收缩往往相互叠加,尤其是在早期快速水化阶段,自收缩和温降收缩的叠加是造成隧道、地下超长结构和桥梁桥塔等在早期出现贯穿性裂缝的主要原因<sup>[2]</sup>.干燥收缩持续的时间较长,且收缩的大小和环境条件密切相关,其产生的裂缝形态与约束条件有很大关系,可表现为乱向分布短裂缝或比较有规律的长裂缝,在薄板等结构中有可能贯穿.

## 2 塑性收缩开裂抑制技术

由于重力所导致的塑性沉降主要通过优化混凝土组成、控制和易性及优化施工工艺等措施解决.本部分重点介绍通过化学外加剂抑制塑性收缩开裂的技术.混凝土表面水分的快速蒸发是水泥基材料产生塑性收缩的根本原因,毛细孔负压则是引起塑性收缩的直接驱动力,因此能够降低混凝土表面水分蒸发或者毛细孔负压的减缩抗裂外加剂,均可以有效抑制塑性收缩开裂.

### 2.1 塑性阶段水分蒸发抑制剂

由于表面泌水的存在,塑性阶段混凝土的水分蒸发以平面水蒸发为主,传统成膜类养护材料无法在初凝前的塑性混凝土泌水表面成膜,而表面洒水、覆盖薄膜等养护方式会对混凝土表面性能造成负面影响.为了解决上述问题,笔者团队<sup>[9]</sup>提出采取单分子膜水分蒸发抑制剂降低混凝土塑性阶段水分蒸发的方法,其作用原理如图2所示.由图2可见,通过合成具有长链和小体积疏水端的乳化剂分子以及两亲性聚甲基丙烯酸月桂酯等材料,在混凝土高盐、高碱泌水表面实现自组装,并形成致密、稳定的单分子膜,进而降低混凝土表面水分的蒸发速率.研究表明,在温度35℃、相对湿度30%、风速5m/s的条件下,水分蒸发抑制剂可以降低水灰比(质量比,文中涉及的掺量、水灰比等均为质量分数或质量比)为0.5的混凝土60%的水分蒸发,进而显著降低塑性收缩开裂<sup>[10]</sup>.目前,塑性阶段水分蒸发抑制剂已形成了行业技术标准<sup>[11]</sup>,为混凝土的初期(混凝土浇筑至初凝时间段)养护提供了有效的技术途径<sup>[12]</sup>.需要说明的是,已有研究表明,水分蒸发抑制剂的作用效果对环境的风速较为敏感<sup>[13]</sup>,因此,提升单分子膜在较高风

速(大于5 m/s)下混凝土表面的成膜稳定性,是水分蒸发抑制剂需要进一步研究的方向.

### 2.2 养护剂

养护剂常用来作为水养的补充或替代措施,对混凝土进行养护.区别于内养护剂,通常所说的养护剂是一种喷洒或涂刷于混凝土表面,能在混凝土表面形成一层连续不透水密闭养护薄膜的乳液或高分子溶液.养护剂在混凝土表面形成的致密薄膜能有效减缓混凝土内部水分向外界空气中蒸发,从而起到抑制开裂和保障胶凝材料水化的作用.

养护剂最早是在20世纪40年代由美国提出并在工程使用,中国从70年代末开始相关的研究,并开发了多个品种<sup>[14]</sup>.目前主要使用的养护剂为高分子乳液(如丙烯酸乳液、苯丙乳液等)和石蜡乳液两大类.由于具有使用方便、不影响混凝土外观等优点,养护剂常用于水资源匮乏的干旱地区和难以及时水养的混凝土工程,尤其适用于立面、顶面和难于洒水养护的异型结构.鉴于养护剂的保水养护作用,养护剂在无泌水混凝土表面的施工时间越早,对水分蒸发的抑制作用越好.在终凝前无明水的混凝土表面使用养护剂,对水分蒸发导致的塑性收缩以及硬化后的干燥收缩有显著的降低作用,进而抑制塑性开裂和干燥开裂<sup>[15]</sup>.

养护剂的成膜在起到保水、抑制收缩作用的同时,会对混凝土与后续其他施工层(如表面装饰、表面防护层等)间的结合力产生一定的负面影响,限制了其在工程中的推广和应用.但这方面的研究工作目前还较少,如何通过调控养护剂的乳液分子结构等手段以提高其与其他界面的结合力,是目前养护剂应用需要解决的一大技术难题.此外,研发具有降解功能、养护防护一体化等性能的养护剂,是拓展养护剂的应用领域和范围的一大潜在方向.

### 2.3 保水剂

保水剂是具有提高水泥基材料保水效果的一类外加剂,常用于解决混凝土泌水、离析等问题以改善水泥基材料的流变性能和力学性能.常见保水剂主要是分子量较大的高分子聚合物(如聚丙烯酰胺、羟乙基甲基纤维素等).由于保水剂可有效改善水泥基材料的保水性能,因而对提升混凝土抗塑性开裂性能也有一定的作用.以聚丙烯酰胺为例,由于酰胺基、羧基等亲水性基团能够与自由水形成键合作用,适量聚丙烯酰胺的掺入可以显著降低大风条件下水泥砂浆的蒸发速率和泌水速率,降低砂浆塑性裂缝的数量和裂缝宽度<sup>[16-17]</sup>.

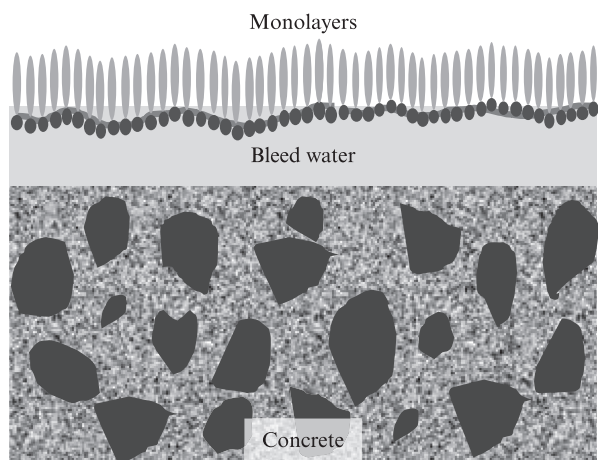


图2 混凝土水分蒸发抑制剂作用原理  
Fig. 2 Mechanism of evaporation retardants



## 2.4 其他外加剂

通过添加合适的外加剂,缓解混凝土内部湿度降低速率或降低孔溶液的表面张力,可以有效降低毛细孔负压,因而对塑性开裂的抑制也有利.其中,代表性的有减缩剂<sup>[5,18-19]</sup>、高吸水性树脂内养护剂<sup>[20]</sup>.需要说明的是,上述外加剂不仅可以降低混凝土塑性收缩开裂,还可以有效降低混凝土的自收缩和干燥收缩,其作用原理将在下文详细介绍.

## 3 自收缩和干燥收缩抑制技术

自收缩和干燥收缩是导致混凝土硬化阶段发生开裂的重要诱因,其产生均与混凝土内部湿度降低有关.根据毛细管张力理论,因湿度降低而产生的毛细应力是引起混凝土自收缩和干燥收缩的驱动力,收缩的大小与混凝土内部相对湿度、孔溶液表面张力、毛细孔尺寸和基体弹性模量等因素相关.因此能够降低混凝土孔溶液表面张力、粗化毛细孔尺寸以及提升内部相对湿度的外加剂均可起到减小自收缩和干燥收缩的作用.

### 3.1 减缩剂

减缩剂是一种通过降低孔溶液表面张力等作用来减少混凝土自收缩和干燥收缩的外加剂,其实质是一种表面活性剂.减缩剂的发展起源于日本<sup>[21]</sup>,中国从20世纪90年代开始研制减缩剂.减缩剂按功能分为标准型和减水型;按组成可分为醇类、聚醚类和大分子聚合物类(由功能型不饱和醚型或/和酯型单体与活性小单体通过自由基共聚而得的).醇类和聚醚类减缩剂属于标准型减缩剂<sup>[22]</sup>.大分子聚合物类减缩剂<sup>[22-24]</sup>通常是指同时具有分散和减缩作用的减水型减缩剂.

由毛细管张力理论可知<sup>[6]</sup>,毛细管张力与孔溶液表面张力呈正比.减缩剂通过降低孔溶液表面张力来减小毛细管负压,从而降低混凝土自收缩和干燥收缩<sup>[25-26]</sup>.此外,减缩剂还可通过延缓水泥水化进而缓解内部相对湿度的下降<sup>[27-28]</sup>,以及改变孔溶液离子浓度进而提高氢氧化钙、钙矾石的过饱和度和结晶压力<sup>[25,29-30]</sup>等方式,起到减少收缩的作用.

得益于上述作用原理,减缩剂可以不同程度地减少水泥基材料的自收缩与干燥收缩.杨晓杰等<sup>[17]</sup>研究了聚醚型和减水型减缩剂对高强砂浆自收缩的影响,发现当2种减缩剂掺量为2.0%时,砂浆6d自收缩分别降低了69.3%和50.6%.Soliman等<sup>[31]</sup>研究了超高性能混凝土的自收缩,发现1.0%、2.0%聚醚型减缩剂的掺入使得混凝土30d自收缩分别降低了15.2%、28.4%.Weiss等<sup>[27]</sup>研究了不同环境相对湿度

下,5.0%聚醚型减缩剂的掺入对浆体长期干燥收缩的影响,发现当环境相对湿度分别为70%、50%和30%时,浆体182d干燥收缩分别降低49%、50%、33%.Tang等<sup>[32]</sup>研究了聚醚型减缩剂对C50混凝土长期干燥收缩的影响,发现1.0%减缩剂的掺入使得混凝土138d干燥收缩降低25.4%.

研究和实践结果均表明,为起到较好的减缩效果,标准型减水剂在混凝土中的掺量通常要达到胶凝材料用量的2.0%以上,但由于其成分主要为小分子有机物,具有一定引气作用,易造成混凝土含气量增加,因此在相同水胶比下会使混凝土强度降低,同时还存在与其他类型外加剂(如减水剂、缓凝剂等)一起使用时的相容性问题.减水型减缩剂由于同时具备分散和减缩作用,是目前减缩剂发展的一大方向,但其在掺量较低(作为减水剂使用时其掺量一般为胶凝材料用量的1.0%以下)的情况下减缩效果不及高掺量的标准型减缩剂.如何通过分子结构设计来提升多功能减缩剂在低掺量下的减缩效能,是减缩剂多功能化发展亟待研究解决的一大问题.

### 3.2 内养护剂

对于低水胶比的高强混凝土,由于其高致密性、低渗透性,水分很难由外部渗透到混凝土内部,传统外养护方式(如洒水、涂覆养护剂等)很难抑制其自干燥效应.20世纪90年代Philleo<sup>[33]</sup>首先提出采用混掺预吸水轻集料从混凝土内部引水进行内养护的概念.Jensen等<sup>[34]</sup>于2001年首次将高吸水性树脂(SAP)引入混凝土作为内养护剂使用,因其具有超高的吸液倍率,在混凝土中使用具有掺量低、内养护性能好的优点,引起了广泛的关注.

SAP含有强亲水性基团,具有三维网状结构,不溶于水但能大量吸水膨胀形成高含水凝胶.通过在水泥基材料中掺入SAP,预先吸收、储存一定量的水,这些储存水能作为“内部水源”促进水泥水化,提高毛细孔饱和度和内部相对湿度,降低毛细孔负压,达到减少自收缩的目的.SAP在混凝土中的吸释水过程直接决定了其内养护和减少收缩的性能<sup>[35]</sup>,而SAP的吸释水特性易受其自身结构<sup>[36-38]</sup>、所处的溶液环境及使用方法<sup>[39-40]</sup>等影响.通常而言,SAP亲水基团的亲水性越强,树脂与水的亲和力也就越大,树脂的吸水性能就越高,而树脂的吸水能力又随着交联度的增大而降低.此外,不同类型SAP的吸液能力随着被吸收液体特性的变化也会产生显著的差异,如在水泥浆盐溶液中,离子型SAP的吸液倍率相比于在纯水中大幅减小,两性离子型SAP的吸液倍率相

比于在纯水中有所增加,而非离子型SAP的吸液能力变化不明显.因此,对现有SAP进行结构优化设计和改性,以调控其在水泥基材料中的吸释液特性,进而提升其对水泥基材料的内养护和减缩效能,是目前SAP研究的一大热点方向<sup>[41-43]</sup>.而在此过程中,如何准确表征SAP在水泥基材料内部吸释液体的过程及其对周围浆体微结构的影响,是明晰SAP结构与性能关系的前提,也是SAP研究和应用亟待解决的关键问题.

SAP的掺入会不同程度地影响水泥基材料的力学和耐久性能.SAP对水泥基材料力学性能的影响有正负两方面效应:一方面,SAP释水会提高其周围水泥基材料的水化程度,减少周围小毛细孔的数量,提高周围基体强度<sup>[44-45]</sup>;另一方面,SAP释水后留下的孔对强度不利<sup>[46]</sup>.由于SAP改变了水泥基材料内部孔隙结构,影响水泥基材料的水分传输行为,进而影响其耐久性能<sup>[47-48]</sup>.通常而言,SAP引入的孔对水泥基材料的抗盐冻融性能<sup>[47]</sup>有改善作用.此外,由于SAP的吸释水过程改变了混凝土内部水分分布,从而影响水泥基材料的流变性能<sup>[49]</sup>.实际工程中,SAP吸释液特性调控的复杂性及其带来的对工作性能的负面影响往往是制约其应用的一大障碍.

### 3.3 膨胀剂

除上述通过降低混凝土孔溶液表面张力或向内部引水来减少收缩的手段外,利用膨胀剂在混凝土中产生的膨胀来补偿收缩也是降低混凝土收缩变形的另一途径<sup>[50]</sup>.根据主要膨胀源的不同,目前常用的膨胀剂可分为硫铝酸钙类膨胀剂、氧化钙(CaO)类膨胀剂和氧化镁(MgO)膨胀剂.此外,还有一些膨胀剂同时包含了上述两种或多种膨胀源,如硫铝酸钙-氧化钙类膨胀剂、钙镁复合膨胀剂等.硫铝酸钙类和CaO类膨胀剂的研制和应用均起源于日本,中国从20世纪70年代开始进行混凝土膨胀剂的研究<sup>[50]</sup>.以中国建筑材料科学研究院等为代表的单位陆续研制出以硫铝酸钙或CaO为主要成分的膨胀剂<sup>[50-51]</sup>,以南京化工学院(现南京工业大学)为代表的单位于20世纪80年代成功研制出MgO膨胀剂<sup>[52]</sup>.鉴于不同类型膨胀剂膨胀源及水化特性的差异,混凝土的宏观膨胀性能也不相同.

硫铝酸钙类膨胀剂的水化需水量较大,对混凝土湿养护要求高,适合用于高水胶比中低强度等级混凝土的收缩补偿,掺加硫铝酸钙类膨胀剂的混凝土通常在水养4~7 d后达到膨胀峰值.但由于硫铝酸钙类膨胀剂的水化产物钙矾石是一种物理化学性质很不稳定的结晶体,在70~80℃就可产生分解,干燥

条件下易脱水,压力水作用下易发生溶解、迁移和重结晶,因此不适合用于长期处于高温、高压环境以及难以湿养护的混凝土结构.

MgO膨胀剂的膨胀性能与其自身活性相关.其中,高活性MgO膨胀剂膨胀发展相对较快、膨胀稳定时间早,可用于混凝土自收缩和干燥收缩的补偿<sup>[53-54]</sup>.鉴于MgO膨胀剂的湿度敏感性,近年来将其与内养护材料复合是研究热点之一<sup>[55-56]</sup>.内养护材料的补水效应能够促进MgO的水化,提升MgO在常温下的早期膨胀效能,进而起到更好地补偿自收缩和干燥收缩的作用,而膨胀产物生成所起到的填充效应也有利于降低内养护材料对强度的不利影响.

CaO类膨胀剂膨胀速率快,水化需水量较低,对低水胶比高强混凝土的自收缩和干燥收缩有较好的补偿作用,同时其水化生成的Ca(OH)<sub>2</sub>可以补充混凝土由于掺用矿物掺合料而消耗的Ca(OH)<sub>2</sub>,对提高抗碳化性能有利<sup>[57]</sup>.但由于CaO水化较快,混凝土通常在成型后的1~3 d内即达到膨胀峰值,且随着养护温度的升高,膨胀峰值时间进一步提前<sup>[2]</sup>,后期膨胀效能不足,因此在实际结构变温条件下其补偿收缩效能有限.采用改性措施优化CaO类膨胀剂的水化膨胀历程,以提高其与混凝土收缩历程的匹配性,是近年来是CaO类膨胀剂研究的一大方向,如碳酸化改性<sup>[58]</sup>、有机物包裹改性<sup>[59]</sup>等.但上述手段存在工业化实现困难、调控效能低等问题.鉴于CaO类膨胀剂的组成、结构特征及制备过程,借鉴水泥熟料活化等技术,探索离子掺杂等手段的影响,可能是实现CaO类膨胀剂水化膨胀历程调控的一大可行途径.

## 4 温降收缩抑制技术

温降收缩是导致混凝土在硬化阶段发生开裂的又一因素,且往往是导致大体积混凝土开裂的最主要因素.温降收缩导致的开裂问题不仅出现在大坝混凝土中,在桥梁、隧道甚至是工民建墙板结构中也愈发凸显.目前,从外加剂角度降低混凝土温降收缩的途径主要有两种:一种是通过膨胀剂的膨胀来补偿温降收缩;另一种是通过外加剂来调节水泥水化放热历程,进而降低混凝土结构温升,减少温降收缩和开裂.

### 4.1 MgO膨胀剂

MgO膨胀剂具有膨胀历程可设计的优点,不仅可以用于补偿混凝土的自收缩和干燥收缩,且是目前用于补偿大体积混凝土温降收缩、抑制温度裂缝的主要材料措施之一.



1980年, Mehta等<sup>[60]</sup>首次提出了在大体积混凝土中使用MgO作为添加剂来产生膨胀应力的思路, 但相关研究仅停留在实验室. 自1985年起, 中国开始采用菱镁矿制备MgO膨胀剂并应用于大坝混凝土的研究和应用工作, 并基于此形成了MgO混凝土快速筑坝技术<sup>[61]</sup>. 迄今为止, MgO膨胀剂已在50多座大坝混凝土的建造中得到应用<sup>[62]</sup>, 近年来也陆续应用于民用工程、交通工程等混凝土结构<sup>[63-64]</sup>.

不同于水泥中水化极为缓慢、易导致安定性不良的过烧游离MgO, MgO膨胀剂主要是以菱镁矿等为原料、经800~1100℃低温煅烧制备得到的轻烧MgO, 其掺入混凝土后, 能够较快地水化生成氢氧化镁, 从而产生可控膨胀. 关于MgO膨胀剂在混凝土中的补偿收缩性能, 已经历了近40a的研究. 结果表明, MgO膨胀剂的自身结构和水化活性是影响其补偿收缩特性的主要因素<sup>[52]</sup>, 这也是MgO膨胀剂膨胀过程可调控设计的关键. 如3.3所述, 通常而言, 高活性MgO膨胀剂可用于补偿混凝土的早期自收缩和干燥收缩. 而中低活性MgO膨胀剂(活性反应时间通常在100~300s)膨胀发展较慢、膨胀稳定时间晚, 其延迟性膨胀可用于补偿大体积混凝土的温降收缩. 此外, 混凝土内部湿、热、化学、力学状态的变化也是影响MgO膨胀剂补偿收缩性能的重要因素, 混凝土水胶比<sup>[65-66]</sup>、矿物掺合料<sup>[67]</sup>、养护温度<sup>[68-69]</sup>、养护湿度<sup>[55-56, 70]</sup>、试件尺寸<sup>[71]</sup>和限制条件<sup>[72]</sup>等材料、环境因素的变化均通过改变混凝土内部的微环境或力学状态来改变MgO膨胀剂的水化和膨胀特性, 进而导致宏观补偿收缩效能的变化. 关于MgO膨胀剂的具体膨胀特性、机理及应用, 已有较多的研究和报道<sup>[52, 62]</sup>, 这里不再赘述.

近年来, 研究者们陆续开展了与实际工程相对应的变温变湿条件下MgO补偿收缩性能的研究<sup>[63-64, 73-75]</sup>. 结果表明, 不同活性的MgO膨胀剂, 其不同变温历程下补偿温降收缩和降低温降开裂的性能存在较大差异<sup>[63]</sup>, 且其膨胀历程对湿度变化历程的敏感性也有一定的差异<sup>[75]</sup>. 因此, 需要根据实际混凝土工程条件来针对性选择合适类型和掺量的MgO膨胀剂. 如何量化MgO在混凝土中的膨胀性能与其自身活性及微结构的关系, 进而能够根据混凝土的不同收缩补偿需求进行MgO活性及结构的反向设计, 是有待继续研究解决的一大技术难题.

## 4.2 水化温升抑制技术

水化温升抑制技术是通过降低由于混凝土水化产生的温升来抑制温度裂缝的技术. 广义上, 降低水泥和胶凝材料用量、使用中低热水泥等措施均属于

该范畴. 混凝土外加剂技术的发展, 使得人们设想能否从水泥水化放热历程调控的角度来实现对混凝土温度历程和温度裂缝的控制.

Justnes等<sup>[76]</sup>通过复合传统的缓凝剂与早强剂, 得到一类能够降低水泥水化速率的外加剂, 并将该类外加剂定义为“硬化延缓剂”, 发现0.15%的柠檬酸复合1.5%的硝酸钙能使水泥水化速率峰值下降近50%.

近年来, 出现了一类以淀粉类衍生物为主要成分的新型化学外加剂<sup>[77-78]</sup>, 即水化温升抑制剂(TRI), 其掺入水泥混凝土中可有效降低水泥加速期水化放热速率, 且基本不影响水化总放热量(见图3, 图中REF为未掺TRI的参照样). 在非绝热条件下的混凝土结构中, TRI能减少早期水化集中放热, 进而有效降低混凝土结构的温峰<sup>[2, 79]</sup>.

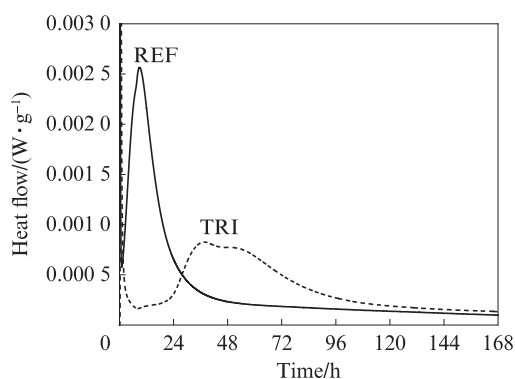


图3 TRI对水泥水化放热速率的影响

Fig. 3 Effect of TRI on hydration heat release rate of cement (20℃)<sup>[77-78]</sup>

基于TRI对水泥水化历程影响的研究发现, 粉末状TRI在水泥基材料内部存在一个缓慢溶解释放的过程, 在水化早期, 溶解的TRI分子能够吸附在水泥颗粒表面, 抑制水化硅酸钙(C-S-H)的成核, 降低C-S-H的成核密度, 进而减缓水泥早期水化速率<sup>[80]</sup>, 而后伴随着钙矾石的生成, 消耗了体系残余的TRI, 水泥体系开始重新成核, 恢复正常水化<sup>[81]</sup>. TRI在水泥基材料中的缓释过程受温度、体系pH值以及搅拌剪切速率等因素的影响. 关于TRI对掺加粉煤灰或矿粉的复杂胶凝体系水化影响的研究<sup>[82-83]</sup>发现: 一方面, 粉煤灰、矿粉的掺入降低了体系pH值, 不利于TRI固体颗粒的溶解, 同时粉煤灰、矿粉的填料效应促进了早期水化产物的生成, 弱化了TRI的降峰作用; 另一方面, 由于水泥对TRI的吸附能力强于粉煤灰或矿粉, 导致复合体系中单位水泥对应的TRI含量增加, 强化其降峰效果. 这两种效应的同时存在导致TRI对复杂胶凝体系水化放热历程的调控效果受矿物掺合料种类和掺量的影响.

综合现有研究和工程实践发现,由于TRI的缓释吸附特性受胶凝体系组成、pH值、温度和搅拌剪切速率等因素影响,因此其效果在不同作用环境下存在一定的敏感性.如何根据不同应用场景需求,通过TRI结构设计以针对性地控制其缓释吸附特性,是TRI研究和应用需要进一步解决的问题.

## 5 典型应用

### 5.1 塑性收缩开裂抑制技术

暴露面较大的板式混凝土结构,往往在还没有凝结硬化的塑性阶段便因水分蒸发而产生塑性收缩开裂.水分蒸发抑制剂、养护剂等降低混凝土塑性开裂风险的手段便捷且有效,已在铁路道床板、T型梁、水电站泄洪洞水垫塘导墙混凝土和屋面混凝土等工程得到应用.

兰新铁路第二双线沿线地区气候以高温、干旱及少雨为主,是国内最炎热的地区之一,蒸发环境尤为恶劣,道床板混凝土浇筑之后,表面出现结壳、起皮和严重的塑性开裂现象.在新疆段全线采用了水分蒸发抑制剂后,混凝土表面结壳、起皮现象得到了明显缓解,且有效遏制了其塑性开裂,保障了后续正常收平施工,同时节约了宝贵的水资源,降低了养护成本<sup>[26]</sup>.在兰新二线张掖以西地区以及张掖以东高海拔地区正线施工中采用了内养护材料与外养护剂相结合的技术<sup>[84]</sup>,有效降低了道床板混凝土开裂情况.乌东德、白鹤滩水电站等干热河谷地区的大坝混凝土在采用水分蒸发抑制剂后,不仅抑制了塑性开裂的发生、改善了混凝土表面形貌,而且还对分层浇筑混凝土的力学性能有改善作用<sup>[11,85]</sup>.

需要注意的是,上述材料尤其是水分蒸发抑制剂、养护剂等外用材料的效果与其开始作用于混凝土的时间以及混凝土的施工环境等因素息息相关,因此需要根据混凝土实际水分蒸发情况调整其作用时间和用量,以便充分发挥其作用效能.这一点在新颁布实施的JC/T 60018—2023《现浇混凝土养护技术规范》中给出了相关建议.

### 5.2 硬化阶段收缩开裂抑制技术

以现浇隧道、桥塔和轨道交通工程地下车站为代表的超长、大体积混凝土结构,由于混凝土温降收缩大并受到混凝土内外强约束,在与自收缩叠加作用下,极易在硬化过程中产生贯穿性收缩裂缝,引起渗漏或耐久性性能劣化问题.通过水化温升抑制剂、膨胀剂和减缩剂等的使用,配合适当的工艺措施,可以实现混凝土不开裂、无渗漏,成套技术已在隧道、桥梁和轨道交通等百余个工程中得到了应用.

以太湖隧道为例,隧道全长10.79 km,宽43.60 m,采取明挖现浇施工工艺,暗埋段主体结构厚1.20~1.50 m,混凝土设计等级为C40P8.基于混凝土抗裂性专项设计,在采用普通大宗原材料、适当入模温度和分度长度控制的基础上,工程选取了利用水化温升抑制剂和钙镁多元复合膨胀剂制备低温升高抗裂混凝土为核心的抗裂方案<sup>[86]</sup>.工程现场构件试验结果表明,抗裂外加剂可降低混凝土温升值6.6℃,增加温升阶段膨胀变形2.5倍以上,降低温降阶段收缩变形20%<sup>[87]</sup>.为控制长期干燥收缩,工程还优选了减缩型聚羧酸减水剂.持续跟踪结果表明,减缩抗裂外加剂的应用有效降低太湖隧道140余万m<sup>3</sup>大体积混凝土开裂风险,结合施工养护等所形成的成套技术方案解决了水下隧道大体积混凝土开裂渗漏的难题.

### 5.3 无收缩充填混凝土

对于钢管混凝土拱桥、水电站导流洞等结构或部位,管内混凝土或封堵混凝土等充填混凝土的体积稳定性是保障钢-混组合结构协同受力以及洞口封堵质量的关键.采用基于膨胀剂补偿收缩技术制备低收缩甚至是无收缩混凝土是解决钢管混凝土早期脱黏脱空问题,保障封堵混凝土充填质量的主要途径<sup>[88]</sup>,其关键在于膨胀材料的膨胀历程应能够与混凝土收缩类型、发生时间及大小相匹配.

以藏木特大桥为例,该桥是首座跨过雅鲁藏布江的铁路桥梁,拱肋直径大于1.6 m,管内采用C60混凝土.高海拔、大温差和低气压的环境条件不仅增加了高强混凝土施工难度,还加剧了管内混凝土收缩脱空风险.在混凝土工作性能调控的基础上,反向设计了由CaO、不同活性MgO等组成的多元复合分时膨胀材料,实现了管内混凝土收缩的分阶段、全过程补偿<sup>[64,73]</sup>,为高原复杂环境下自密实、无收缩混凝土的制备提供了有效技术保障.

## 6 结论与展望

(1)收缩是引起工程混凝土开裂的主要原因,现代混凝土的组成、服役环境等因素的复杂性,导致混凝土收缩加大、开裂问题突出.采取功能性外加剂,降低混凝土不同阶段的多种收缩,是提升混凝土抗裂性的有效技术途径.

(2)水分蒸发抑制、化学减缩、内养护、膨胀补偿、水化温升抑制等关键技术和材料,是目前抑制混凝土硬化前塑性收缩以及降低硬化后自收缩、温降收缩和长期干燥收缩的主要技术手段.针对混凝土材料体系特征的变化以及环境需求,进一步提升外

加剂的作用效能及适应性,是外加剂发展的一大方向。

(3)工程混凝土的开裂是一种或多种收缩耦合作用的结果。针对结构形式、环境条件和材料组成的特征,优选减缩抗裂外加剂的品种、掺量及技术指标,结合混凝土材料设计和施工技术优化,使之与混凝土收缩的类型、历程相匹配,才能有效抑制甚至解决现代混凝土的收缩开裂问题。

(4)未来,随着工程建设向严酷环境的推进,在环境疲劳等因素作用下,仅依靠减少混凝土收缩的技术途径可能难以完全满足工程的抗裂需求,需要进一步开发实现混凝土强韧协同的新技术和新材料,形成抗防一体化裂缝控制技术。

### 参考文献:

- [1] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1997:4-6.  
WANG Tiemeng. Crack control in engineering structures [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 1997:4-6. (in Chinese)
- [2] 刘加平, 田倩. 现代混凝土早期变形与收缩裂缝控制[M]. 北京: 科学出版社, 2020:1-20, 238-262.  
LIU Jiaping, TIAN Qian. Early-age deformation and shrinkage crack control of modern concrete [M]. Beijing: Science Press, 2020:1-20, 238-262. (in Chinese)
- [3] ACI Committee 308. Guide to External Curing of Concrete: ACR 308R-16[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2016:5-6.
- [4] LIU J P, TIAN Q, MIAO C W. Investigation on the plastic shrinkage of cementitious materials under drying conditions: Mechanism and theoretical model [J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(6):551-561.
- [5] LEEMANN A, NYGAARD P, LURA P. Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 46:1-7.
- [6] RILEM TC 181-EAS. Early age cracking in cementitious systems—State of the art report of the RILEM technical committee 181-EAS [R/OL]. (2002-12-15) [2024-05-28]. <https://www.rilem.net/publication/publication/89>.
- [7] JENSEN O M, HANSEN P F. Autogenous deformation and RH-change in perspective [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(12):1859-1865.
- [8] 田倩, 孙伟, 缪昌文, 等. 高性能混凝土自收缩测试方法探讨[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(1):82-89.  
TIAN Qian, SUN Wei, MIAO Changwen, et al. Study on the measurement of autogenous shrinkage of high performance concrete [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(1):82-89. (in Chinese)
- [9] LIU J P, LI L, MIAO C W, et al. Characterization of the monolayers prepared from emulsions and its effect on retardation of water evaporation on the plastic concrete surface [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 366(1-3):208-212.
- [10] LIU J P, LI L, MIAO C W, et al. Reduction of water evaporation and cracks on plastic concrete surface by monolayers [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, 384(1-3):496-500.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土塑性阶段水分蒸发抑制剂: JG/T 477—2015 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2015: 1-3.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Evaporation retardants for concrete during plastic stage: JG/T 477—2015 [S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2015:1-3. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部. 现浇混凝土养护技术规范: JC/T 60018-2023 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2024: 4-7.  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Echnical code for curing of cast-in situ concrete: JC/T 60018—2023 T [S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2024:4-7. (in Chinese)
- [13] 杨广进, 牛旭婧, 李庆斌, 等. 蒸发抑制剂对白鹤滩大坝混凝土层间性能影响[J]. 水力发电学报, 2022, 41(5):50-58.  
YANG Guangjin, NIU Xujing, LI Qingbin, et al. Influence of evaporation retardants on concrete interlayer performance of Baihetan dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(5):50-58. (in Chinese)
- [14] 覃立香, 杨德坡. 混凝土养护剂的发展及应用[J]. 国外建材科技, 1999, 20(4):59-60.  
QIN Lixiang, YANG Depo. Development and application of concrete curing agent [J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 1999, 20(4):59-60.
- [15] 谢迁, 陈小平, 温丽媛. 混凝土养护剂的发展现状与展望[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(6):1761-1766, 1771.  
XIE Qian, CHEN Xiaoping, WEN Liyuan. Development status and prospect of concrete curing agent [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(6):1761-1766, 1771. (in Chinese)
- [16] LI H X, NI D Y, LI L, et al. Insight into the role of polyacrylamide polymer powder on the cracking in plastic period of cement mortar [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260:119914.
- [17] 杨晓杰, 董鹏, 马一平, 等. 聚丙烯酰胺对水泥砂浆塑性收缩开裂性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1):1-6.  
YANG Xiaojie, DONG Peng, MA Yiping, et al. Influence of polyacrylamide on plastic shrinkage cracking of cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1):1-6. (in Chinese)
- [18] YANG G, WU Y K, LI H, et al. Effect of shrinkage-reducing polycarboxylate admixture on cracking behavior of ultra-high strength mortar [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 122:104117.
- [19] ZHANG J, MA Y F, ZHAO H X, et al. Effect of a novel shrinkage-reducing polycarboxylate superplasticiser on plastic



- shrinkage cracking of mortars [J]. Magazine of Concrete Research, 2022, 74(11):572-581.
- [20] BOSHOF W, MECHTCHERINE V, SNOECK D, et al. The effect of superabsorbent polymers on the mitigation of plastic shrinkage cracking of conventional concrete, results of an inter-laboratory test by RILEM TC 260-RSC [J]. Materials and Structures, 2020, 53:1-16.
- [21] SATO T, GOTO T, SAKAI K. Mechanism for reducing drying shrinkage of hardened cement by organic additives [J]. Cement Association of Japan Review, 1983, 5:52-55.
- [22] AÏTCIN P C, FLATT R J. Science and technology of concrete admixtures [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016: 200-207.
- [23] ZUO W Q, FENG P, ZHONG P H, et al. Effects of novel polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age autogenous deformation of cement pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100:413-422.
- [24] ZHANG J, MA Y F, WANG J, et al. A novel shrinkage-reducing polycarboxylate superplasticizer for cement-based materials: Synthesis, performance and mechanisms [J]. Construction and Building Materials, 2022, 321:126342.
- [25] RAJABIPOUR F, SANT G, WEISS J. Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38:606-615.
- [26] PLANK J, SAKAIE, MIAO C W, et al. Chemical admixtures—Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 78:81-99.
- [27] WEISS J, LURA P, RAJABIPOUR F. Performance of shrinkage-reducing admixtures at different humidities and at early ages [J]. ACI Materials Journal, 2008, 105:478-486.
- [28] BENTZ D P, GEIKER M R, HANSEN K K. Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31:1075-1085.
- [29] ZHAN P M, HE Z H. Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 201:676-690.
- [30] SANT G, LOTHENBACH B, JUILLAND P, et al. The origin of early age expansions induced in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41:218-229.
- [31] SOLOMAN A M, NEHDI M L. Effects of shrinkage reducing admixture and wollastonite microfiber on early-age behavior of ultra-high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 46:81-89.
- [32] TANG C, DONG R Z, TANG Z, et al. Effects of shrinkage reducing admixture and internal curing agent on shrinkage and creep of high performance concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 71:106446.
- [33] PHILLEO R. Concrete science and reality [M] // SKALNY J, MINDESS S. Materials science of concrete II. Westerville: American Ceramic Society, 1991: 1-8.
- [34] JENSEN O M, HANSEN P F. Water-entrained cement-based materials: II. Experimental observations [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(6):973-978.
- [35] YANG L, SHI C J, LIU J H, et al. Factors affecting the effectiveness of internal curing: A review [J]. Construction and Building Materials, 2021, 267:121017.
- [36] TAN Y W, LU X S, HE R, et al. Influence of superabsorbent polymers (SAPs) type and particle size on the performance of surrounding cement-based materials [J]. Construction and Building Materials, 2021, 270:121442.
- [37] HE R, TAN Y W, CHEN H X, et al. Preparation and properties of novel superabsorbent polymer (SAP) composites for cementitious materials based on modified metakaolin [J]. Construction and Building Materials, 2020, 258:119575.
- [38] ZHONG P H, HU Z L, GRIFFA M, et al. Mechanisms of internal curing water release from retentive and non-retentive superabsorbent polymers in cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 147:106494.
- [39] YANG J, WANG J F, SU Y, et al. On the factors affecting the swelling behavior of superabsorbent polymers in cement-related environment [J]. Construction and Building Materials, 2023, 409:133938.
- [40] 李明, 徐文, 王康臣, 等. 高吸水树脂在水泥浆体硬化过程中的释水行为[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2):111-116.
- LI Ming, XU Wen, WANG Kangchen, et al. Desorption behavior of super absorbent polymer in cement paste during harden process [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2): 111-116. (in Chinese)
- [41] ZHONG P H, WYRZYKOWSKI M, TOROPOVS N, et al. Internal curing with superabsorbent polymers of different chemical structures [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 123: 105789.
- [42] JIANG D B, LI X G, ZHAO P Q, et al. Internal curing with superabsorbent polymer modified by nano SiO<sub>2</sub>: Shrinkage mitigation and microstructure refinement [J]. Cement and Concrete Research, 2024, 175:107353.
- [43] BOSE B, DAVIS C R, ERK K A. Microstructural refinement of cement paste internally cured by polyacrylamide composite hydrogel particles containing silica fume and nanosilica [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 143:106400.
- [44] MA X W, YUAN Q, LIU J H, et al. Effect of water absorption of SAP on the rheological properties of cement-based materials with ultra-low w/b ratio [J]. Construction and Building Materials, 2019, 195:66-74.
- [45] 郭利霞, 武铮, 钟凌, 等. 高强混凝土内养护效果的微观量化表征与分析[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(7):697-704.
- GUO Lixia, WU Zheng, ZHONG Ling, et al. Microscopic quantitative characterization and analysis of internal curing effect of high strength concrete [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7):697-704. (in Chinese)
- [46] YANG J, WANG F Z, HE X Y, et al. Pore structure of affected zone around saturated and large superabsorbent polymers in cement paste [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 97: 54-67.

- [47] OLAWUYI B J, BABAFEMI A J, BOSHOFF W P. Early-age and long-term strength development of high-performance concrete with SAP [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267: 121798.
- [48] XU J T, QIN X, LIN Y K, et al. Research on performance deterioration of internally cured pavement concrete under the coupling effect of salt freeze-thaw [J]. *Polymers*, 2023, 15 (3):476.
- [49] XU J T, QIN X, HUANG Z Y, et al. Effect of superabsorbent polymer (SAP) internal curing agent on carbonation resistance and hydration performance of cement concrete [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022:3485373.
- [50] 赵顺增, 游宝坤. 补偿收缩混凝土裂渗控制技术及其应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010:8-24.  
ZHAO Shunzeng, YOU Baokun. Crack and seepage control technology of shrinkage compensating concrete and its application [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010:8-24. (in Chinese)
- [51] 刘加平, 张守治, 田倩, 等. 氧化钙类膨胀剂的制备方法: 101774777A[P]. 2010-07-14.  
LIU Jiaping, ZHANG Shouzhi, TIAN Qian, et al. Preparation of CaO type expansive agent:101774777A[P]. 2010-07-14. (in Chinese)
- [52] MO L W, DENG M, TANG M S, et al. MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future [J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 57:1-12.
- [53] WANG L, LI G X, LI X, et al. Influence of reactivity and dosage of MgO expansive agent on shrinkage and crack resistance of face slab concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 126: 104333.
- [54] REVILLA-CUESTA V, EVANGELISTA L, DE BRITO J, et al. Mechanical performance and autogenous and drying shrinkage of MgO-based recycled aggregate high-performance concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 314: 125726.
- [55] MO L W, FANG J W, HUANG B, et al. Combined effects of biochar and MgO expansive additive on the autogenous shrinkage, internal relative humidity and compressive strength of cement pastes [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 116877.
- [56] WANG K, MOON J, DU H J, et al. Early-age shrinkage and hydration of concrete incorporating a mutually reinforcing systems of super absorbent polymers and MgO expansive agent under low humidity conditions [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 417:135350.
- [57] 赵顺增, 刘立. 膨胀剂对掺粉煤灰混凝土碳化的影响及其机理研究[J]. *膨胀剂与膨胀混凝土*, 2008(2):17-21.  
ZHAO Shunzeng, LIU Li. The effect and mechanism of expansion agents on carbonization of concrete with fly ash [J]. *Expansive Agent & Expansive Concrete*, 2008(2): 17-21. (in Chinese)
- [58] 李华, 陆安群, 王育江, 等. 碳酸化改性对  $\text{CaO-C}_4\text{A}_3\text{S}$  膨胀剂熟料矿物组成及水化历程的影响[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23 (4):778-781, 800.  
LI Hua, LU Anqun, WANG Yujiang, et al. Effect of carbonation modification on composition and hydration process of  $\text{CaO-C}_4\text{A}_3\text{S}$  expansive clinker [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(4): 778-781, 800. (in Chinese)
- [59] WANG R, TIAN Q, ZHANG S Z, et al. Improving efficiency of calcium oxide expansive additives by polylactic acid film [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2016, 68(20):1070-1078.
- [60] METHA P K, PIRTZ D, KOMANDANT G J. Magnesium oxide additive for producing self-stress in mass concrete [C]//7th International Congress on the Chemistry of Cement. [s.l.]: [s. n.], 1980.
- [61] 曹泽生, 徐锦华. 氧化镁混凝土筑坝技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003:1-4.  
CAO Zesheng, XU Jinhua. MgO concrete dam construction technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003:1-4. (in Chinese)
- [62] CHEN C L, CHEN R F. Application of magnesium oxide expansive agent in hydraulic concrete in China [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2023, 75(2):97-106.
- [63] LI H, TIAN Q, ZHAO H T, et al. Temperature sensitivity of MgO expansive agent and its application in temperature crack mitigation in shiplock mass concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 170:613-618.
- [64] XU W, LI H, ZUO W Q, et al. Preparation and construction techniques of in-tube concrete containing calcium and magnesium oxides-based expansive agent [J]. *Materials and Structures*, 2023, 56(3):52.
- [65] 曹丰泽, 阎培渝. 水胶比对氧化镁膨胀剂的水化程度及膨胀性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(2):171-177.  
CAO Fengze, YAN Peiyu. Effect of water-binder ratio on hydration degree and expansive characteristics of magnesium oxide expansive agents [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 47(2):171-177. (in Chinese)
- [66] CHEN X, YANG H Q, LI W W. Factors analysis on autogenous volume deformation of MgO concrete and early thermal cracking evaluation [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 118: 276-285.
- [67] ZHANG J R, LÜ T, HAN Q H, et al. Effects of fly ash on MgO-based shrinkage-compensating cement: Microstructure and properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 339: 127648.
- [68] 刘加平, 王育江, 田倩, 等. 轻烧氧化镁膨胀剂膨胀性能的温度敏感性及其机理分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(2):359-364.  
LIU Jiaping, WANG Yujiang, TIAN Qian, et al. Temperature sensitivity of light calcined magnesite expansion agent and its mechanism analysis [J]. *Journal of Southeast University(Natural Science)*, 2011, 41(2):359-364. (in Chinese)
- [69] MO L W, FANG J W, HOU W H, et al. Synergetic effects of curing temperature and hydration reactivity of MgO expansive agents on their hydration and expansion behaviours in cement pastes [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 207:

- 206-217.
- [70] LU J Y, FENG P, SHAO L J, et al. The effect of internal relative humidity on the early age deformation of cement paste containing magnesia [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 283:122604.
- [71] CHEN C L, CHEN R F, ZHAO Z H, et al. Influence of specimen size on autogenous volume deformation of long-aged MgO-admixed concrete [J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8: 639838.
- [72] 李延波, 邓敏, 莫立武, 等. 约束条件下外掺MgO混凝土的强度与膨胀应力[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(4):446-450.  
LI Yanbo, DENG Min, MO Liwu, et al. Strength and expansive stresses of concrete with MgO-type expansive agent under restrained conditions [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15 (4):446-450. (in Chinese)
- [73] LI H, WANG Y, WANG Y J, et al. Effect of CaO and MgO based expansive agent on deformation and mechanical properties of concrete-filled steel tubes [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 250:118723.
- [74] 卢存, 李华, 徐文, 等. MgO膨胀剂对长龄期混凝土性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(5):524-529.  
LU Cun, LI Hua, XU Wen, et al. Effect of MgO expansive agent on properties of long-age concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(5):524-529. (in Chinese)
- [75] 刘奎生, 崔勇, 于晓, 等. 恒湿与变湿养护条件下MgO膨胀剂对水泥砂浆膨胀性能的影响分析[J/OL]. *材料导报*, 2025, 39(7): 1-14 [2024-05-28]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20240426.1656.004>.  
LIU Kuisheng, CUI Yong, YU Xiao, et al. Analysis of the effect of MgO expansive agent on the expansion performance of cement mortar under constant and variable humidity curing conditions [J/OL]. *Materials Reports*, 2025, 39 (7) : 1-14 [2024-05-28]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20240426.1656.004>. (in Chinese)
- [76] JUSTNES H, WUYTS F, VAN GEMERT D. Hardening retarders for massive concrete [C]//Fifth ACI/CANMET/IBRACON International Conference on High-Performance Concrete Structures and Materials. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008: 41-56.
- [77] WANG W B, LIU J P, LI L, et al. Novel admixture using to control the hydration evolution and temperature rise of concrete [C]//3rd International RILEM Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. Paris:RILEM Publication SARL, 2016:374-381.
- [78] LIANG T, LUO P H, MAO Z Y, et al. Effect of hydration temperature rise inhibitor on the temperature rise of concrete and its mechanism [J]. *Materials*, 2023, 16(8):2992.
- [79] LIU J P, TIAN Q, WANG Y J, et al. Evaluation method and mitigation strategies for shrinkage cracking of modern concrete [J]. *Engineering*, 2021, 7(3):348-357.
- [80] YAN Y, OUZIA A, YU C, et al. Effect of a novel starch-based temperature rise inhibitor on cement hydration and microstructure development [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 129: 105961.
- [81] YAN Y, SCRIVENER K L, YU C, et al. Effect of a novel starch-based temperature rise inhibitor on cement hydration and microstructure development: The second peak study [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 141:106325.
- [82] 秦媛, 王文彬, 刘加平. 淀粉基水化温升抑制剂对水泥-粉煤灰复合胶凝材料水化的影响[J]. *材料导报*, 2021, 35(16): 16065-16069.  
QIN Yuan, WANG Wenbin, LIU Jiaping. Effect of starch-based hydration temperature rise inhibitors on hydration of cement-fly ash composite cementitious materials [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(16):16065-16069. (in Chinese)
- [83] ZHOU Y C, YAN Y, QIN Y, et al. The effect of temperature rise inhibitor on the hydration and strength development of slag/fly ash blended cement paste [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 395:132307.
- [84] 王保江. 兰新铁路CRTS I型双块式无砟轨道道床板混凝土抗裂技术[J]. *铁道建筑*, 2014(2):101-104.  
WANG Baojiang. Crack resistance technology for bed slab concrete in CRTS I double block ballastless track of Lanzhou-Xinjiang Railway [J]. *Railway Engineering*, 2014(2): 101-104. (in Chinese)
- [85] 熊明. 单分子层水分蒸发抑制剂在水工混凝土浇筑中的应用研究[J]. *水利技术监督*, 2021(3):85-88.  
XIONG Ming. Research on the application of single molecule layer water evaporation inhibitor in hydraulic concrete pouring [J]. *Water Conservancy Technical Supervision*, 2021(3):85-88. (in Chinese)
- [86] 周欣, 夏文俊, 王峻, 等. 太湖隧道结构混凝土收缩裂缝闭环控制关键技术[J]. *混凝土*, 2021(2):151-156.  
ZHOU Xin, XIA Wenjun, WANG Jun, et al. Key technology of closed loop control of shrinkage crack for Taihu Lake tunnel [J]. *Concrete*, 2021(2):151-156. (in Chinese)
- [87] LI M, XU W, WANG Y J, et al. Shrinkage crack inhibiting of cast in situ tunnel concrete by double regulation on temperature and deformation of concrete at early age [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 240:117834.
- [88] ZHENG J L, DU H L, MU T M, et al. Innovations in design, construction, and management of Pingnan Third Bridge—The largest-span arch bridge in the world [J]. *Structural Engineering International*, 2022, 32(2):134-141.