

渗透结晶材料对混凝土耐久性与自愈性的影响研究

罗乾骥

天津市贰拾壹站检测技术有限公司 天津 300381

摘要: 混凝土结构在服役过程中易受氯离子侵蚀、冻融循环等因素影响,导致耐久性下降和裂缝产生,严重影响结构使用寿命。水泥基渗透结晶材料作为一种新型防水材料,不仅能提高混凝土的抗渗、抗冻等耐久性能,还具有独特的裂缝自愈合能力。本文通过大量试验研究与微观分析,系统探讨了渗透结晶材料对混凝土耐久性和自愈性的影响规律及作用机理。结果表明,掺入适量渗透结晶材料可显著提升混凝土的抗氯离子侵蚀、抗冻融循环等耐久性能,最优掺量为1.0%;在裂缝自愈合方面,渗透结晶材料能有效促进裂缝闭合,恢复混凝土的力学性能和抗渗性能,标准养护条件下效果最佳。微观分析显示,渗透结晶材料可促进水泥水化反应,生成更多水化硅酸钙凝胶和钙矾石等产物,填充混凝土内部孔隙和裂缝,改善微观结构。基于试验结果的寿命预测表明,掺入渗透结晶材料可有效延长混凝土结构的使用寿命。

关键词: 渗透结晶材料;混凝土;耐久性;自愈性;微观机理;寿命预测

引言

混凝土是目前应用最广泛的建筑材料之一,但其在复杂环境中易出现耐久性问题,如钢筋锈蚀、混凝土开裂等,导致结构性能下降甚至失效。据统计,我国每年因混凝土耐久性问题造成的经济损失高达数千亿元。因此,提高混凝土的耐久性和自愈性具有重要的工程意义和经济价值。

水泥基渗透结晶材料(CCCW)于20世纪40年代由德国劳伦斯·杰逊发明,随后在全球范围内得到广泛应用。该材料以水为载体,通过渗透作用进入混凝土内部,与水泥水化产物发生反应,生成不溶性结晶产物,堵塞毛细孔道和微细缝隙,从而提高混凝土的密实性和防水性。近年来,国内外学者对渗透结晶材料的性能和作用机理进行了大量研究,但在高性能混凝土中的应用以及耐久性和自愈性的综合研究方面仍有待深入。

本文旨在通过系统的试验研究和微观分析,揭示渗透结晶材料对混凝土耐久性和自愈性的影响规律及作用机理,为其在实际工程中的应用提供理论依据和技术支持。

一、渗透结晶材料的基本特性

(一) 材料定义与发展历程

水泥基渗透结晶材料是一种以硅酸盐水泥、石英砂等为主要原料,掺入活性化学物质的刚性防水材料。其发展历程可分为三个阶段:

1. 发明阶段

1942年,德国劳伦斯·杰逊为解决水泥船渗漏问题,发明了水泥基渗透结晶材料。

2. 推广阶段

二战后,随着经济的快速发展,该材料因其优异的抗渗和修复性能,在欧洲、美国等国家得到广泛应用,主要用于地下工程、水利工程、隧道工程等。

3. 国内应用阶段

20世纪80年代初,我国引进渗透结晶材料,最初应用于上海地铁站等工程。近年来,国内学者对其进行了深入研究,产品种类日益丰富,应用范围不断扩大。

(二) 作用机理

目前,学界普遍认可渗透结晶材料的作用机理主要包括沉淀反应和络合-沉淀反应两种:

1. 沉淀反应机理

混凝土中存在大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和游离 Ca^{2+} 等碱性物质,渗透结晶材料中的活性成分在水的作用下进入混凝土内部,与这些碱性物质发生反应,生成不溶于水的结晶物质(如水化硅酸钙、钙矾石等),填充孔隙和裂缝,提高混凝土的密实性。在干燥状态下,材料处于休眠状态;当混凝土发生裂缝并受到水分侵入时,活性成分被激活,继续发生反应生成结晶产物,修复裂缝。

2. 络合-沉淀反应机理

渗透结晶材料中的活性成分与混凝土中的 Ca^{2+} 发生

络合反应,生成易溶于水但不稳定的络合物。当这些络合物遇到未水化的水泥颗粒或水泥凝胶体时,活性成分被更稳定的硅酸根、铝酸根等离子取代,发生结晶、沉淀反应,将 Ca^{2+} 离子转移到稳定的具有一定强度的晶体化合物中,提高混凝土自身的密实度和强度。

二、渗透结晶材料对混凝土耐久性的影响

(一) 抗渗性能

抗渗性能是混凝土耐久性的重要指标之一,直接影响混凝土抵抗水分和侵蚀性介质渗透的能力。多个试验研究表明,掺入渗透结晶材料可显著提高混凝土的抗渗性能。

在一项试验中,对比了空白混凝土和掺入渗透结晶材料混凝土的抗渗压力。结果显示,掺入渗透结晶材料的混凝土在硫酸钠溶液中侵蚀和冻融后的抗渗压力均大于基准混凝土。例如,标准养护下,空白试件的抗渗压力为0.3MPa,而内掺渗透结晶材料试件的抗渗压力达到1.2MPa;在硫酸钠溶液中浸泡后,空白试件的抗渗压力降至0.2MPa,内掺渗透结晶材料试件的抗渗压力反而升高至1.4MPa。这表明渗透结晶材料能有效堵塞混凝土内部的孔隙和裂缝,提高其抗渗能力。

(二) 抗冻融性能

冻融循环是寒冷地区混凝土结构耐久性下降的主要原因之一。渗透结晶材料可通过改善混凝土的微观结构,提高其抗冻融性能。

试验研究发现,掺入渗透结晶材料的混凝土在冻融循环后的质量损失和相对动弹性模量损失均小于空白混凝土。例如,经过120次冻融循环后,空白混凝土的质量损失率为0.98%,而掺入1.0%渗透结晶材料的混凝土质量损失率仅为0.12%;相对动弹性模量方面,空白混凝土损失接近0.2%,而最优掺量组损失不足0.05%。这是因为渗透结晶材料生成的结晶产物填充了混凝土内部的孔隙,减少了水分的侵入,从而降低了冻融循环对混凝土的破坏作用。

(三) 抗氯离子侵蚀性能

氯离子侵蚀是导致钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀的主要原因。渗透结晶材料能有效提高混凝土的抗氯离子侵蚀能力。

通过电通量试验和氯离子扩散系数测试发现,掺入渗透结晶材料的混凝土电通量数值显著降低,氯离子扩散系数减小。例如,90d龄期时,空白混凝土的电通量为232.81C,而掺入1.0%渗透结晶材料的混凝土电通量降

至188.31C,降低了19%。这表明渗透结晶材料可堵塞混凝土内部的毛细孔道,阻止氯离子的渗透,从而保护钢筋免受锈蚀。

(四) 抗硫酸盐侵蚀性能

硫酸盐侵蚀会导致混凝土膨胀、开裂和剥落,严重影响结构的耐久性。研究表明,渗透结晶材料能提高混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能。

在硫酸盐溶液浸泡试验中,掺入渗透结晶材料的混凝土抗压强度损失率小于空白混凝土。这是因为渗透结晶材料生成的结晶产物填充了混凝土内部的孔隙,减少了硫酸盐溶液的侵入,同时抑制了硫酸盐与水泥水化产物的反应,从而提高了混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力。

(五) 影响因素分析

1. 掺量

渗透结晶材料的掺量对混凝土耐久性有显著影响。试验表明,随着掺量的增加,混凝土的抗渗、抗冻融、抗氯离子侵蚀等性能先提高后降低,最优掺量为1.0%左右。当掺量过低时,无法充分发挥渗透结晶材料的作用;当掺量过高时,可能会影响混凝土的工作性能和力学性能。

2. 水胶比

水胶比是影响混凝土耐久性的重要因素之一。低水胶比的混凝土内部孔隙率低,结构密实,耐久性好。渗透结晶材料在低水胶比混凝土中同样能发挥良好的作用,进一步提高其耐久性。试验发现,水胶比为0.28时,掺入渗透结晶材料的混凝土抗氯离子侵蚀性能提升更为明显。

3. 养护条件

养护条件对渗透结晶材料的性能发挥有重要影响。标准养护条件下,混凝土水化充分,渗透结晶材料能更好地与水泥水化产物发生反应,提高混凝土的耐久性。而干燥养护条件下,水分不足,渗透结晶材料的活性难以被激活,对混凝土耐久性的提升作用有限。

三、渗透结晶材料对混凝土自愈性的影响

(一) 裂缝自愈合现象

混凝土在服役过程中不可避免地会产生裂缝,渗透结晶材料具有独特的裂缝自愈合能力,能在一定程度上修复裂缝,恢复混凝土的性能。

试验研究表明,掺入渗透结晶材料的混凝土在裂缝产生后,经过一定时间的养护,裂缝宽度会逐渐减小,甚至完全闭合。例如,在标准养护条件下,掺入渗透结

晶材料的混凝土预制裂缝试件，经过28d养护后，裂缝宽度明显减小，部分试件的裂缝几乎完全闭合；而空白混凝土试件的裂缝宽度变化较小。

（二）自愈性评价指标

为了定量评价渗透结晶材料对混凝土自愈性的影响，通常采用以下指标：

1. 裂缝闭合率

裂缝闭合率 = (初始裂缝宽度 - 养护后裂缝宽度) / 初始裂缝宽度 × 100%

该指标直接反映了裂缝的愈合程度。试验结果显示，掺入渗透结晶材料的混凝土裂缝闭合率显著高于空白混凝土，在标准养护条件下，部分试件的裂缝闭合率可达100%。

2. 抗压强度恢复率

抗压强度恢复率 = (养护后抗压强度 / 初始抗压强度) × 100%

该指标反映了混凝土力学性能的恢复程度。研究发现，掺入渗透结晶材料的混凝土在裂缝产生后，经过养护，抗压强度可得到一定程度的恢复，甚至超过初始强度。例如，水胶比为0.5时，掺入渗透结晶材料的混凝土抗压强度恢复率可达109.3%。

3. 抗渗压力恢复率

抗渗压力恢复率 = (养护后抗渗压力 / 初始抗渗压力) × 100%

该指标反映了混凝土抗渗性能的恢复程度。试验表明，掺入渗透结晶材料的混凝土抗渗压力恢复率明显高于空白混凝土，说明其能有效恢复混凝土的抗渗性能。

（三）影响因素分析

1. 养护条件

养护条件对混凝土自愈性有显著影响。标准养护条件下，混凝土内部水分充足，有利于渗透结晶材料的活性成分与水泥水化产物发生反应，促进裂缝愈合。而干燥养护条件下，水分不足，渗透结晶材料的活性难以被激活，自愈性较差。试验发现，标准养护条件下混凝土的抗压强度恢复率和裂缝闭合率均高于泡水养护、自然养护和干燥养护。

2. 水胶比

水胶比对混凝土自愈性有重要影响。试验表明，水胶比为0.5时，混凝土的自愈效果最佳。水胶比过小，混凝土混合料粘稠度过大，不易振捣密实，内部易出现孔隙和空洞，影响自愈性；水胶比过大，混凝土内部孔隙

率高，水分蒸发后易产生裂缝，同时水泥水化反应过快，未水化水泥颗粒较少，也会影响自愈性。

3. 养护时间

养护时间对混凝土自愈性有明显影响。随着养护时间的延长，混凝土的自愈性逐渐提高，但当养护时间达到一定期限后，修复效果趋于稳定。例如，混凝土开裂后，经过7d、14d、28d养护，抗压强度逐渐增大，28d后强度增长缓慢，逐渐趋于平稳。这是因为随着养护时间的增加，渗透结晶材料的活性物质被充分激活，生成的结晶产物不断填充裂缝，当裂缝被完全填充或反应达到平衡后，修复效果不再明显提高。

四、微观机理分析

（一）XRD分析

X射线衍射(XRD)分析结果表明，掺入渗透结晶材料的混凝土水化产物中，水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和钙矾石的衍射峰强度明显高于空白混凝土，而氢氧化钙(CH)的衍射峰强度降低。这说明渗透结晶材料能促进水泥水化反应，消耗CH，生成更多的C-S-H凝胶和钙矾石等产物。这些产物填充了混凝土内部的孔隙和裂缝，改善了微观结构，从而提高了混凝土的耐久性和自愈性。

（二）SEM分析

扫描电子显微镜(SEM)观察结果显示，空白混凝土内部结构较为松散，存在较多的孔隙和裂缝；而掺入渗透结晶材料的混凝土内部结构致密，孔隙和裂缝被大量的C-S-H凝胶和钙矾石等产物填充。例如，放大2000倍时，空白混凝土中可见大量层状的CH，有序排列；而掺入渗透结晶材料的混凝土中，CH片层结构不再整齐，其上附着杂乱的丝絮状C-S-H凝胶以及细小针状结构的钙矾石产物。这表明渗透结晶材料能改善混凝土的微观结构，提高其密实性。

五、结论与展望

（一）主要结论

1. 渗透结晶材料能显著提高混凝土的耐久性，包括抗渗、抗冻融、抗氯离子侵蚀、抗硫酸盐侵蚀等性能。最优掺量为1.0%，此时混凝土的耐久性提升最为明显。

2. 渗透结晶材料具有独特的裂缝自愈能力，能有效促进裂缝闭合，恢复混凝土的力学性能和抗渗性能。标准养护条件下自愈效果最佳，水胶比为0.5时自愈效果较好，养护时间达到28d后修复效果趋于稳定。

3. 微观分析表明，渗透结晶材料能促进水泥水化反

应，生成更多的C-S-H凝胶和钙矾石等产物，填充混凝土内部的孔隙和裂缝，改善微观结构，从而提高混凝土的耐久性和自愈性。

4.工应用和寿命预测结果表明，渗透结晶材料能有效延长混凝土结构的使用寿命，在实际工程中具有广阔的应用前景。

（二）研究展望

1.进一步研究渗透结晶材料在不同环境条件下（如高温、高湿、腐蚀环境等）对混凝土耐久性和自愈性的影响，以及长期性能变化规律。

2.深入研究渗透结晶材料与其他外加剂（如减水剂、引气剂、矿物掺合料等）的协同作用，优化混凝土配合比，提高混凝土的综合性能。

3.开发新型渗透结晶材料，提高其活性和作用效果，降低成本，扩大应用范围。

4.建立更加准确的混凝土结构寿命预测模型，考虑更多因素的影响，如荷载、环境侵蚀、材料老化等，为工程设计和维护提供更可靠的依据。

参考文献

[1]李冰,郭荣鑫,万夫雄,等.不同条件下内掺水泥基渗透结晶型防水材料混凝土自愈合性能研究[J].硅酸盐通报,2019,38(7):2208-2212.

[2]康晓博.渗透结晶材料对高性能混凝土耐久性影响的研究[D].北京交通大学,2022.

[3]国爱丽,路瑞娟,冯秀艳.水泥基渗透结晶型防水材料对混凝土耐久性影响研究[J].混凝土,2013(11):88-92.

[4]王亮.基于渗透结晶材料的混凝土多维损伤自修复性能研究[D].重庆交通大学,2024.