

水泥材料的自我修复——综述

金范费迪克, 内莱·德·瓦廷, 罗曼蒂特布姆, 尼古拉·伊万诺维奇·贝利
结构工程系, 利比亚的黎波里大学

摘要: 混凝土对裂缝的形成非常敏感。由于大裂缝会危及耐用性, 因此可能需要修复。然而, 这些维修工程提高了混凝土的生命周期成本, 因为它们是劳动密集型的, 而且结构在维修过程中会被废弃。1994年, C.Dry是第一个提出有意在混凝土中引入自愈特性的人。在接下来的几年里, 一些研究人员开始研究这个话题。本次审查的目的是对当今可用的不同自我修复方法进行深入比较。在这些方法中, 一些旨在改善自生裂缝愈合的自然机制, 而另一些则旨在通过嵌入合适的愈合剂的胶囊来改性混凝土, 使裂缝出现后以完全自主的方式愈合。在这篇综述中, 特别注意了所使用的愈合剂和胶囊的类型。此外, 根据所使用的触发机制对各种方法进行了评估, 并关注了由于自愈而恢复的属性。

关键词: 砂浆; 进一步水化; 封装; 聚合物; 细菌; 可持续性

Self-Healing in Cementitious Materials—A Review

Kim Van Fediuk, Nele De Vatin, Roman Tittelboom, Nikolai Ivanovich Belie
Department of Structural Engineering, University of Tripoli, Libya

Abstract: Concrete is very sensitive to crack formation. As wide cracks endanger the durability, repair may be required. However, these repair works raise the life-cycle cost of concrete as they are labor intensive and because the structure becomes in disuse during repair. In 1994, C. Dry was the first who proposed the intentional introduction of self-healing properties in concrete. In the following years, several researchers started to investigate this topic. The goal of this review is to provide an in-depth comparison of the different self-healing approaches which are available today. Among these approaches, some are aimed at improving the natural mechanism of autogenous crack healing, while others are aimed at modifying concrete by embedding capsules with suitable healing agents so that cracks heal in a completely autonomous way after they appear. In this review, special attention is paid to the types of healing agents and capsules used. In addition, the various methodologies have been evaluated based on the trigger mechanism used and attention has been paid to the properties regained due to self-healing.

Keywords: mortar, further hydration, encapsulation, polymers, bacteria, sustainability

引言:

由于其与生俱来的自愈合特性, 自愈合是混凝土的一种公认且众所周知的特性。一段时间后, 由于熟料矿物质的持续水化或氢氧化钙 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 的碳化, 裂缝可能会修复。另一方面, 自体愈合仅限于微小的裂缝, 并且只有在有水的情况下才有效, 这使得难以完全控制或预测其准确性。然而, 混凝土可以适应包括用于密封裂缝的细菌刺激剂系统。自上世纪九十年代以来, 自主SHC的发展就开始了尝试。2006年, 荷兰代尔夫特理工大学微生物学家 Henk Jonkers 教授发明了自愈混凝土 (SHC) 作为一种新型混凝土。经过 36 个月的测试, 他发现了完美的愈合剂, 即所谓的芽孢杆菌。

SHC 有一个独特的系统, 通常被定义为混凝土自发自修复裂缝的能力。它也被称为自修复混凝土。SHC通过某种物质的分泌来模拟身体伤口的自动愈合。SHC 是通过将含有修复溶液的特定材料 (例如胶囊或纤维) 分散到混凝土混合物中而产生的, 当出现裂缝时, 纤维或胶囊会破碎, 其中包含的液体会立即扩散以治愈裂缝。由于混凝土系统的抗拉强度低, 混凝土裂缝很常见。这些发展的裂缝降低了混凝土的长期耐久性, 因为它们允许危险的液体和气体泄漏。虽然混凝土可能会受到微裂缝的侵蚀, 但钢筋也可能受到有害气体和液体渗入混凝土系统所造成的攻击的影响。因此, 为了防止裂缝扩大, 快速处理它们至关重要。混凝土裂缝的自我

修复可以延长混凝土结构的使用寿命,使结构更加环保,同时提高其可持续性。

最近提出了几种自我修复策略。它们主要包括自愈方法,例如基于胶囊的自愈、血管自愈、电沉积自愈、微生物自愈和通过形状记忆合金(SMA)集成的自愈。值得一提的是,据称早期混凝土具有最佳的自愈能力。为了在压力和解理下产生混凝土的自修复,使用了填充有环氧树脂的尿素-甲醛微胶囊(直径20-70微米)和填充有丙烯酸树脂的明胶微胶囊(直径125-297微米)。这是由通过玻璃管输送的空气固化剂构成的。管子一端暴露在大气中,另一端弯曲以传递愈合因子。当混凝土开裂导致管道内的物质耗尽时,可能会通过开口端引入额外的化学物质,以修复较大的裂缝。电极位置法是一种修复断裂混凝土结构的方法,并研究了该方法对各种混凝土性能的影响。此外,还探索了细菌在混凝土中作为自愈剂的能力,即它们修复现有裂缝的能力。作者证明,使用细菌孢子作为自愈剂似乎是一种潜在的应用。据透露,使用SMA线作为钢筋可以帮助封闭裂缝并修复混凝土结构中的紧急损坏。由于插入的SMA的高弹性特性,裂缝被密封。

一、自我修复的方法

根据源自聚合物自愈的方法,胶凝材料的自愈可大致分为三组:内在愈合、基于胶囊的愈合和血管愈合。每种方法在用于完成受损区域愈合的机制上都不同。

内在的自我修复

由于水泥基体的组成,本征自愈材料表现出自愈特性。在这种方法中,愈合依赖于自愈合、改进的自愈合或聚合物改性混凝土内部聚合物的反应。

-自愈

胶凝材料内在裂纹愈合的最广泛研究的机制之一是自愈合。自生裂缝愈合主要归因于两种机制:(1)未水合水泥颗粒的水化和(2)Ca(OH)₂的溶解和随后的碳化。除了这两种机制外,由于进水中存在的碎屑或开裂导致的松散混凝土颗粒引起的基体膨胀和裂缝阻塞也可能导致自愈合。

这些机制的总体贡献仍然存在争议。显然,导致自愈能力最高的机制取决于开裂时的混凝土年龄。由于其未水化水泥颗粒含量相对较高,持续水化是年轻混凝土的主要愈合机制。在后期,碳酸钙(CaCO₃)沉淀成为主要机制。虽然对于导致自体愈合的主要机制存在不同的看法,但研究人员一致认为,对于每种机制,水的存在都是必不可少的。

在不同作者的报告中,观察到可以通过自体愈合愈

合的最大裂缝宽度存在显著差异,即5至10 μm、100 μm、200 μm、205 μm和300 μm。从上述研究可以看出,较窄的裂缝更有可能通过自体愈合而完全愈合。N. ter Heide等人也证明了这一点。他们研究了裂纹闭合对自体愈合效率的影响,并得出结论,当使用压缩力使两个裂纹面相互接触时,可以改善愈合。

-聚合物改性混凝土的愈合

Abd-Emoaty研究了聚合物改性混凝土(PMC)内部的自愈合行为。PMC是由有机聚合物分散在混凝土的搅拌水中制成的。水泥水化后,聚合物发生聚结,从而在整个混凝土中形成水合水泥和聚合物膜的共基质。他们表示PMC的愈合过程与传统混凝土的愈合方式相同。然而,与传统混凝土相比,由于聚合物将水泥颗粒包裹为一种膜,因此在基质中可获得更多未水合水泥,因此愈合发生的程度更大,并延长了更长的时间。

胜畑等研究了不含固化剂的含PMC环氧树脂的自愈效率。在这种情况下,在与碱金属和氢氧根离子接触时,会形成具有硬化外壳和液态核的环氧树脂滴。机械性能的恢复证明在裂缝形成时,液滴内的未硬化环氧树脂填充裂缝并在与碱金属或氢氧根离子接触时硬化。

在他们的研究中,Reddy和Liang寻找了一种使油井水泥不透水的机制。他们提到,SAP颗粒的密封效率取决于接触正确类型的流体。因此,他们更喜欢使用具有低玻璃化转变温度、低熔点或低固液相转变温度的弹性体,或那些具有冷流动性的弹性体,这些弹性体可以让断裂的样品在不与任何类型的流体接触的情况下自行修复。通过破裂样品的水流减少证明了这种方法的效率。

袁等人建议将乙烯醋酸乙烯酯(EVA)共聚物颗粒混合到基质中。裂缝形成后,将试样加热至150℃,然后EVA颗粒熔化,粘合剂飞入裂缝,填充并修复裂缝。

基于胶囊的自我修复

基于胶囊的自愈材料将愈合剂隔离在离散的胶囊内。当胶囊例如因损伤而破裂时,通过损伤区域中愈合剂的释放和反应触发自愈机制。虽然一些试剂在与水分或空气接触或由于加热或在水泥基质本身接触时发生反应,但其他试剂在与存在于基质中或由额外胶囊提供的第二组分接触时发生反应。在基于胶囊的方法中,胶囊可以具有球形或圆柱形。

-因水分、空气或热引起的反应

Cailleux和Pollet探索的系统将桐油或Ca(OH)₂封装在带有明胶壳的球形微胶囊内。当将包封的愈合剂混入混凝土修复砂浆中时,显示一些胶囊在混合过程中被破坏,导致包封剂的释放。在混合过程中幸存下来的

胶囊仅在出现裂纹时破裂。此时，桐油与空气接触会硬化。另一种建议的愈合剂是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，在与 CO_2 反应后形成 CaCO_3 晶体。

该机制按照相同的原理工作，尽管胶囊具有圆柱形形状。Carolyn Dry 应用了这种机制，她将填充有甲基丙烯酸甲酯 (MMA) 并涂有蜡的多孔圆柱形 PP 胶囊嵌入混凝土中。在出现裂纹时，需要对梁进行加热，以便蜡涂层熔化并通过胶囊的孔隙释放愈合剂。由于高温，MMA 开始在裂缝内固化。

在她后来的研究中，Dry 使用了填充有氰基丙烯酸酯 (CA) 的圆柱形玻璃胶囊。在出现裂纹时，易碎的玻璃纤维断裂，导致 CA 释放，其在与空气接触时固化。

Joseph 等人、Van Tittelboom 和 De Belie 以及 Sun 等人。还使用了由圆柱形胶囊封装的空气固化 CA。约瑟夫等人。注意到在裂缝形成时几乎没有胶水从胶囊中泄漏出来。在他的实验装置中，裂纹的毛细吸引力和流体质量上的重力似乎不足以克服圆柱形胶囊的毛细阻力和密封端引起的负压力。

为了克服后一个问题，Li 等人将含有 CA 的圆柱形玻璃胶囊的使用与大量 PE 纤维的使用结合起来。纤维限制了裂缝宽度，因此增加了将愈合剂从管中拉出的毛细作用力。虽然一些样品在重新加载后刚度恢复，但来自同一测试系列的其他样品的结果令人失望。对破裂样品的检查表明，愈合剂在产生裂纹之前已在胶囊内硬化。

Pang 和他的同事们没有使用非常活泼的 CA，而是使用了一种单组分环氧树脂愈合剂。与前面提到的研究类似，愈合剂被圆柱形玻璃胶囊封装，并在与空气接触时固化。然而，由于该试剂的反应性较低，因此在裂纹出现之前管内没有发生硬化。

为了减少圆柱形胶囊密封端所产生的吸力，de Rooij 及其同事建议将愈合剂封装在有涂层的中空植物纤维内。当裂缝在混凝土基体中扩展时，纤维束倾向于分层，并且愈合剂从分裂的纤维束中释放到受损区域，随后在受损区域发生反应。

二、不同类型愈合剂的功效

对于每个代理，都提到了最相关的属性。为了适合作为愈合剂，需要满足几个要求，这些要求将在以下各节中讨论。

流变特性

一个非常重要的参数是愈合剂的粘度。粘度不能太高，以便能够从胶囊中流出并填充裂缝。然而，如果粘度太低，试剂可能会从裂缝中泄漏出来，或者由于周围基质的吸收而消失。

Dry 得出结论，愈合剂的粘度应在 100 到 500 cps 之间。尽管 CA 具有低得多的粘度 (<10 cps)，但它经常用于自愈混凝土。研究人员注意到，这种药剂填充了宏观裂缝，此外，还渗入了断裂过程区内的微裂缝区域。在这里，由于裂纹周围的基体和裂纹本身都充满了硬化剂，因此药剂能够渗透到裂纹面后面被认为是一个优势。这是 CA 的特点，是由于其固化时间短所致。

MMA 是另一个具有非常低粘度的愈合剂的例子。由于 MMA 的固化速度不如 CA (30 分钟对几秒)，因此 MMA 可能会被周围的基质完全吸收并留下空洞。相反，正如 Dry 和 McMillan 所注意到的，药剂可能会从裂缝中泄漏出来，这也会导致裂缝填充不完全。Van Tittelboom 等人通过添加聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 作为增稠剂来增加 MMA 的粘度，以将脱模剂保留在裂缝内。这比 Huang 和 Ye 提出的方案更实用。他们在 Na_2SiO_3 溶液固化期间将样品包裹在箔中以防止泄漏。

环氧树脂大多太粘而无法渗透到裂缝中。虽然市场上可以找到具有合理粘度的树脂，但 Feng 等人提出添加稀释剂化学品来调节环氧树脂的粘度。

固化条件和固化时间

由于混凝土结构在出现裂缝时可能处于潮湿状态，因此愈合剂应该能够在潮湿环境下发生反应。一些试剂不受这一事实的阻碍，因为它们的反应是在与水分接触时引发的。当愈合剂在与水分接触时不发生反应时，单组份剂在与空气 (桐油)、空气中的 CO_2 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液)、基质 (Na_2SiO_3 溶液和亚硝酸钙 ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) 溶液) 或加热后 (环氧树脂和 MMA)。对于这些药剂，在潮湿环境中固化的能力是一个需要进一步研究的重要参数。

还需要研究双组分愈合剂在潮湿环境中的反应能力。此外，对于双组分试剂，当组分混合不良以及混合比例不当时的反应动力学应该是一个值得关注的问题。当 Mihashi 等人使用环氧树脂进行手动裂纹修复时，选择适当的混合比并充分混合两种组分时，在重新加载时注意到高强度恢复，而当两种试剂嵌入单独的胶囊中并且混合取决于流出到裂缝。由于环氧树脂的固化主要依赖于正确的混合化学计量，因此双组分环氧树脂不适合用于自愈混凝土。

该剂不应固化太快，因为它应该能够完全填充裂缝。但是，另一方面，能够几乎立即修复裂缝的快凝粘合剂可以防止进一步的裂缝扩展，并且在快速循环加载条件下可能是有益的。

由于 CA 的固化时间短，Joseph 等人已经注意到在

裂纹产生过程中机械性能的恢复。在他们的实验中，注意到胶在胶囊下方和上方的破裂区域中迁移。此外，在重新加载时注意到额外的 CA 释放。这让作者得出结论，尽管 CA 在以薄层沉积时具有快速固化能力，但当以较大体积释放时，固化速率显著降低。

当封装其他基于聚合物的试剂（例如环氧树脂或 MMA）时，愈合需要更长的时间。Tran Diep 仅注意到他的环氧树脂在裂缝形成 7 天后完全固化，然而，Nishiwaki 等人能够通过 60℃ 下加热将他们的环氧树脂的愈合时间减少到 100 分钟。然而，当后一种试剂被封装时，愈合仍然比碱性二氧化硅或细菌溶液反应所需的时间快得多。此外，细菌孢子只有在进水几天后才会活跃，因为孢子需要一些时间才能发芽。Wiktor 和 Jonkers 注意到细菌裂缝愈合在浸入水中 20 天后开始，并持续到浸入水中 100 天。

密封能力

出现裂纹时，会创建一个额外的体积。当愈合剂从胶囊中释放出来以填充该体积时，胶囊内会保留一个空白空间。因此，如果愈合剂在聚合时膨胀，将是有益的，这样可以填充更大的裂缝空间，而在封装过程中只保留很小的体积。

Van Tittelboom 等人使用的 PU 的膨胀反应不仅填充了额外的空间，而且还充当了愈合剂从胶囊中出来的驱动力。尽管需要膨胀反应来完全密封裂缝，但需要注意膨胀应变不超过混凝土的拉伸应变能力。Sisomphon 和 Copuroglu 注意到由于钙矾石形成时膨胀而产生的许多微裂纹，钙矾石用作修复剂。

当温差和循环载荷导致裂纹变宽或变窄时，需要硬化剂的弹性行为。为了不失去修复剂与水泥基体之间的结合力，从而保持裂缝封闭能力，Letsch 表示，对于手动裂缝修复，需要使用具有可压缩体积的修复剂。通过将含有可压缩气体的微型气球混合到环氧树脂中，他形成了一种满足这些要求的新型修复材料。Dry 等人通过将空的 PP 珠嵌入封装的 CA 中，将类似的试剂引入到他们的自愈混凝土中。

三、合适的封装技术

混合过程的生存和对可加工性的影响

为了促进自愈混凝土的生产，优选在制备过程中将包封的愈合剂添加到混凝土混合物中。这意味着胶囊应该能够经受住混合过程。不仅由于混凝土搅拌机施加的力，而且由于骨料颗粒的冲击力，搅拌过程的生存是一个很大的挑战。此外，胶囊的添加不应过多地影响新拌混凝土的和易性。

很明显，管状封装系统不能在混合过程中应用。需要事先将管子放入模具中，这会导致额外的处理并因此产生额外的成本。即使在混凝土浇筑时，也需要注意不要破坏长而脆的管子。因此，作者认为这种方法不适合实际应用。

对于球形和圆柱形胶囊，都存在将它们混合的可能性，但是，球更容易在混合过程中存活，而且它们对基质的可加工性影响较小。在几项研究中，球形胶囊已经成功混入。

植物纤维最有可能在混合过程中存活下来。在其他方法中，使用了玻璃或陶瓷等脆性材料，这些材料可能无法通过混合过程。为了承受混合，可以增加胶囊的壁厚。然而，虽然这可以防止混凝土搅拌时破裂，但在壁厚较高的情况下，管子的破裂可能不会及时导致愈合剂的释放和随后的裂缝修复。Tran Diep 等人经历了这一点：虽然壁厚为 2 毫米的玻璃管能够在裂纹形成时破裂，但 3 毫米厚的玻璃管不会破裂。在他们后来的研究中，玻璃管用螺旋线和 3.5 毫米厚的砂浆层盘绕。这还不允许混合胶囊，但它可以防止在铸造过程中过早损坏。

Dry 建议用水溶性胶水捆绑圆柱形玻璃胶囊，以在混合过程中存活。在混合过程中，胶囊会分散，因为混凝土中的水会溶解胶水。她证明，使用这种技术，圆柱形玻璃胶囊能够在卡车搅拌机内的混合过程中存活下来。

Dry 还建议将进一步研究重点放在胶囊的开发上，这些胶囊在制造时是柔性的，并且在混凝土混合物硬化时变得更脆。

作者认为，对于预制混凝土构件，可能会使用无法经受混合的脆性封装材料。尽管将需要额外的步骤将胶囊放入模具中，从而导致额外的成本，但胶囊可以集中在需要它们的区域，因此需要添加的胶囊更少。这不仅会导致成本的降低，而且对基体的力学性能的影响也会较小。

对机械性能的影响

包含填充有愈合剂的空心胶囊可能会影响混凝土的抗拉和抗压强度。此外，在愈合剂释放后，球形、圆柱形或管状孔保留在结构中。因此，胶囊尺寸需要足够小，以免过多地改变结构的特性。

在他们的研究中，Feng 等人使用了直径为 120 μm 的 UF 球形微胶囊，并得出结论，混凝土抗压强度不受这些胶囊的影响。Pelletier 等人还指出，当嵌入球形 PU 微胶囊时，抗压强度不受影响。一般来说，球形胶囊对机械性能的影响较小，因为它们的形状减少了空胶囊留下的空隙周围的应力集中。

四、触发自主治疗行动的机制

为了获得自主裂纹愈合，需要一种机制来触发愈合作用。迄今为止，文献中报道的自愈方法是由液体或气体的进入、热量的施加或裂纹的形成触发的。

液体和气体的进入

一个优点是，对于这种触发机制，愈合剂本身大部分分散在基质中或包含在基质骨料中，因此它们可以在混凝土制造过程中混入。

一个缺点是，只要所需的药剂不侵入裂缝，愈合就不会被激活。在损伤形成和愈合激活之间的时期内，混凝土基体的降解仍然可能发生。例如，SAP 颗粒会在水进入的那一刻阻止裂缝，但在干燥期间不能阻止气体进入。

为了验证使用进水作为触发机制的方法的效率，在整个愈合期间将样品浸入水中或暴露于湿/干循环中。然而，在实践中，大多数结构只会因降雨而被弄湿，有些甚至可能永远不会被弄湿。在后一种情况下，水触发系统将不会激活，可能包含 SAP 的系统除外。Snoeck 注意到，SAP 颗粒在暴露于高相对湿度时已经诱导自体愈合，因为它们能够从空气中捕获水分。需要更多的研究来确定是否也可以使用更现实的条件触发其他愈合机制。

为了激活 Jonkers 等人提出的细菌自愈混凝土，裂缝内需要存在水和 O₂。虽然由于毛细作用，即使是最微小的微裂缝也会吸水，但可能会出现的问题，即裂缝深处是否会存在足够的氧气。到目前为止，Jonkers 等人使用在裂纹表面检测到 CaCO₃ 晶体作为裂纹愈合的指示。然而，尚未研究晶体是否也沉积在裂缝内。Wang 等人将硝酸盐添加到营养物质中作为替代电子受体，使细菌 CaCO₃ 沉淀成为可能，而无需 O₂ 的存在。

发热量

当需要从外部施加热量时，该机制不能完全被认为是一种自主裂纹愈合机制。此外，供热由于加热工作以及需要检查是否出现裂缝而增加了成本。在 Nishiwaki 等人的方法中，至少在提供永久电流时避免了检查的需要。然而，应变敏感传感器的使用和电流的持续供应都增加了该系统的成本，因此不太方便。

如果过热，混凝土可能会变质。混凝土中的水在超过 100℃ 的温度下会蒸发和扩散，而在超过 180℃ 的温度下会发生微观结构的脱水和塌陷。Isaacs 等人加热至 90℃ 以激活 PET 可收缩聚合物，因此基体中不会发生或发生有限的损坏。然而，Dry 加热到 100℃，Yuan 等人甚至加热到 150℃，以降低熔融 EVA 颗粒的粘度。这些温度可能已经对混凝土基体造成损坏。

另一方面，使用热来触发愈合机制的优点是使用的封装材料不需要是脆的，因此样品的铸造可能变得不那么困难。

五、恢复特性和愈合性能评估

增加耐用性

当裂缝的自我修复导致气密性和水密性恢复时，可以提高耐久性。几种方法旨在使混凝土防水；例如，当 SAP 颗粒嵌入水泥基体中时。然而，应注意 SAP 颗粒的溶胀效果取决于液体的类型。Lee 等人注意到当自来水、合成地下水或氯化钠溶液进入裂缝时完全密封，而当合成海水侵入时 SAP 颗粒的膨胀受到限制。因此，他们得出结论，这种自我修复方法不太可能适用于海洋结构。此外，在冻结时，饱和的 SAP 颗粒内的水会膨胀并由于内应力的发展而造成损坏。此外，SAP 颗粒会释放其截留的液体并在干燥期间收缩。这可能会导致混凝土降解，因为释放的液体可能含有硫酸盐、氯化物等离子。此外，SAP 颗粒在未膨胀时不再形成屏障。此外，SAP 无法防止有害气体如 CO₂ 和 O₂ 的进入，这些气体可能导致基体碳化和钢筋腐蚀。

当裂缝充满沉积的晶体时，气密性得以恢复，水密性变得永久且独立于侵入液体的类型。在 Ahn 和 Kishi、Morimoto 等人以及 Sisomphon 和 Copuroglu 的系统中，裂缝被沉积物完全填满，成为气密性和水密性。

Jonkers 等人和 Wang 等人提出的细菌自愈混凝土中的裂缝在细菌激活、养分消耗和沉积的 CaCO₃ 晶体填充裂缝后变得不透气和不透水。

Cailleux、Pollet 和 Van Tittelboom 等人指出，含有填充聚合物愈合剂的胶囊的受损样品的透水性与未受损样品的值相似。Yang 等人测量了含有油芯/硅胶壳微胶囊的样品的透气性，并注意到，相对于对照样品，观察到受损自愈砂浆的渗透系数降低百分比最高，即 50.2%。

同样对于实际应用，表明封装的愈合剂可以使破裂的结构防水。Dry 在混凝土桥面的表面上创建了控制接头，作为一排横向的密封胶填充管。这些管子的张力比混凝土弱，因此它们由于收缩应变而破裂，从而沿着这条线集中横向裂缝。然后从管中释放粘合剂并密封裂缝。使用的修复剂具有低模量，从而允许进一步的裂纹运动以保持水密性。

结论

从 S. White 在 Nature 上发表论文的那一刻起，人们对自愈材料的兴趣迅速增加。如本综述所示，为了在水泥材料中获得自愈性能，世界各地的研究小组提出了不同的方法。然而，很难选择最有效的方法，因为每个研

究组都使用自己的测试方法来评估愈合效率。我们认为，标准测试方法的开发对于比较一种方法与另一种方法的效率非常有用，因此应该是未来的目标之一。

虽然目前还无法详细预测哪种技术会比另一种更好，但我们已经可以就不同方法的有效性给出我们的一般意见。过去，很多研究都致力于自愈，但出于两个原因，我们建议将未来的研究重点放在自愈（基于胶囊和血管的自愈方法）上。第一个原因是自愈将始终仅限于小裂缝，第二个原因是自愈的可靠性较低，因为它始终取决于基体的成分，确定可行的反应机制，在裂纹的时刻形成。

关于基于胶囊和管状自我修复，由于与水分或空气接触而发生反应的愈合剂似乎不太有趣，因为胶囊内的试剂可能会过早固化，并且反应不会在释放后立即开始。此外，由于仍然需要人工干预，因此加热时的反应也不那么有趣，这将提高成本。根据作者的观点，与（存在于其中的）水泥基质或由额外胶囊提供的第二成分的反应是最有趣的。

除了与愈合剂固化有关的要求外，其他要求取决于预期的应用。您是否只应对早期裂缝，预期裂缝宽度是多少，宽度是否保持稳定，或者您是否正在处理动态裂缝，水是否流入裂缝，除了恢复空气和液体外，还需要强度恢复紧密度，审美观点重要吗，等等？

为了使基于胶囊的方法实际适用，重要的是未来的研究致力于开发能够在混凝土搅拌和制造过程中幸存下来，同时不会过多影响混凝土的机械性能的胶囊。可以使用管状或球形胶囊，这取决于对上述特性的最有效响应，并考虑到裂纹撞击胶囊的概率、释放效率和可愈合裂纹体积应该足够高。管状封装方法仅适用于预制混凝土元件，因为需要手动引入管状胶囊。该系统的优点是裂纹撞击管子的可能性更高，并且如果需要，最终可以对管子进行补充。

从这篇综述文章中应该清楚地看到，自愈混凝土是一个真正的跨学科研究课题，涉及微生物学、化学、材料科学、土木工程等。具有不同专业知识的研究人员将至关重要。

然而，任何自愈方法的原位应用将主要取决于所需的成本。因此，最重要的是保持机构的成本尽可能低，并优先低于结构生命周期内出现的直接和间接维修成本

的总和。只有这样才能帮助说服制造商使用自愈混凝土。

参考文献：

[1]Cailleux E., Pollet V. Investigations on the development of self-healing properties in protective coatings for concrete and repair mortars; Proceedings of 2nd International Conference on Self Healing Materials; Chicago, IL, USA. 28 June - 1 July 2009.

[2]Malinskii Y.M., Prokopenko V.V., Ivanova N.A., Kargin V.A. Investigation of self-healing of cracks in polymers. *Mekhanika Polim.* 1969;2:271 - 275.

[3]Wool R.P. Crack healing in semicrystalline polymers, block copolymers and filled elastomers. *Adhes. Adsorpt. Polym.* 1979;12A:341 - 362.

[4]Wool R.P., O' Connor K.M. A theory of crack healing in polymers. *J. Appl. Phys.* 1981;52:5953 - 5963. doi: 10.1063/1.328526.

[5]Dry C.M. Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. *Smart Mater. Struct.* 1994;3:118 - 123.

[6]Šavija B., Schlangen E. Autogeneous healing and chloride ingress in cracked concrete. *Heron.* 2016;61:15 - 32.

[7]Van Tittelboom K., De Belie N. Self-healing in cementitious materials—A review. *Materials.* 2013;6:2182 - 2217. doi: 10.3390/ma6062182.

[8]Lesovik V., Fediuk R., Amran M., Vatin N., Timokhin R. Self-healing construction materials: The geomimetic approach. *Sustainability.* 2021;13:9033. doi: 10.3390/su13169033.

[9]Sangadji S., Schlangen E., Milenkovic A. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III, Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012, Cape Town, South Africa, 3 - 5 September 2012. CRC Press; Boca Raton, FL, USA: 2012. Porous network concrete: Novel concept of healable concrete structures; pp. 228 - 233.

[10]Han B., Yu X., Ou J. Self-Sensing Concrete in Smart Structures. Butterworth Heinemann; Oxford, UK: 2014. Challenges of Self-Sensing Concrete; pp. 361 - 376.