

自修复材料研究现状综述

邢博冉 唐 剑 阮佳慧 胡俊杰 徐梓翔
姚 杨 卢 明 王永伦 王 婷 刘鑫易

重庆科技大学, 重庆

摘 要 | 自修复材料作为材料科学领域的前沿研究方向, 模拟生物体损伤自修复机理, 能够对自身在使用过程中产生的损伤进行自我修复, 有效延长材料使用寿命, 降低维护成本。本文全面阐述了自修复材料的研究现状, 详细介绍了其分类、修复机理、研究进展及应用领域, 并对未来发展趋势进行了展望, 旨在为自修复材料的深入研究和广泛应用提供参考。

关键词 | 自修复材料; 修复机理; 研究进展; 应用领域

Copyright © 2025 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



在材料的使用过程中, 不可避免地会受到各种外力作用、环境因素影响而产生损伤, 如裂纹、划痕等, 这些损伤会逐渐削弱材料的性能, 缩短其使用寿命, 增加维护成本, 甚至引发安全隐患。受生物体损伤后能够自我修复现象的启发, 自修复材料应运而生。自修复材料能够自动识别损伤, 并通过自身的修复机制对损伤进行修复, 恢复材料的部分或全部性能, 为解决材料损伤问题提供了全新的思路和方法。自修复材料的研究对于推动材料科学的发展, 提高材

通讯作者: 邢博冉, 重庆科技大学, 研究方向: 油气田方向。

文章引用: 邢博冉, 唐剑, 阮佳慧, 等. 自修复材料研究现状综述 [J]. 环境与资源, 2025, 7 (1): 120-130.
<https://doi.org/10.35534/er.0701009>

料在航空航天、汽车、建筑、电子等众多领域的应用性能和可靠性具有重要意义。

1 自修复材料的分类

1.1 外援型自修复材料

外援型自修复材料是通过在材料内部或表面添加功能性载体来实现自修复。这种功能性载体通常包含修复剂，当材料受到损伤时，载体破裂释放出修复剂，修复剂与周围环境或材料基体发生反应，从而实现对损伤部位的修复。

(1) 微/纳米胶囊填充型

将含有修复剂的微/纳米胶囊预先埋植于聚合物基体或涂层中。当材料受到损伤（如光、热、压力、pH变化等引发）时，胶囊破裂并释放修复剂，修复剂遇到基体或涂层中的催化剂时发生交联固化反应，修复裂纹面，实现损伤部位的自我修复。例如，在金属防腐涂层领域，将腐蚀抑制剂微胶囊化作为自修复涂层，避免了因腐蚀抑制剂毒性大以及可破坏涂层稳定性而不宜直接加入涂层中的缺点。有研究制备了含不同类型腐蚀抑制剂的微胶囊，探讨了微胶囊粒径对几种不同涂层体系稳定性的影响以及微胶囊破裂时腐蚀抑制剂的释放能力，实验显示含有腐蚀抑制剂微胶囊的涂层涂于钢板上具有良好的防腐蚀效果。

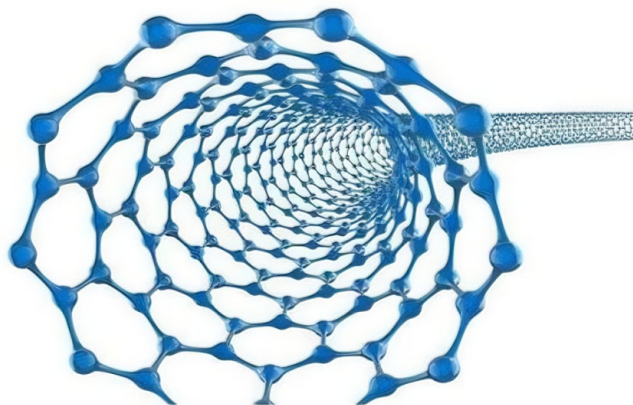


图1 微/纳米聚合物

Figure 1 Micro/nano polymers

(2) 微/纳米容器填充型

采用中空微纳米球或介孔微球等微纳米容器负载腐蚀抑制剂应用于自修复防腐涂层领域。例如,通过层层组装方法,以纳米 SiO_2 、高岭土或多孔纳米 TiO_2 粒子为核心,外层沉积包含腐蚀抑制剂苯并三唑(BTA)的多层聚合电解质的纳米活性单元,制备金属防腐涂层。当腐蚀发生时,pH的变化引起活性单元聚合电解质层的结构和渗透性改变,释放出腐蚀抑制剂,在金属表面形成吸附层,使金属表面钝化,有效地阻止了金属的腐蚀。

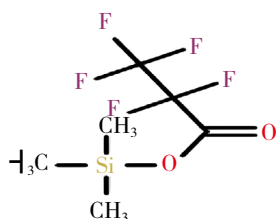


图 2 SiO_2 化学式

Figure 2 SiO_2 chemical reaction, chemical formula

(3) 液芯纤维型

液芯纤维型自修复高分子材料是典型的外援型自修复材料。其修复机理是在纤维中包裹可反应的修复剂,当材料破损后,修复剂外溢到基体材料中,通过修复剂和基体材料之间的固化交联反应对裂纹进行填充和修复。

1.2 本征型自修复材料

本征型自修复材料利用材料内部具有能进行可逆性化学反应的分子结构实现自我修复,这类修复方式常常需要光、热、电磁、湿度等特定条件引发。

(1) 基于可逆共价键

可逆共价键是一类能在特定条件下实现可逆断裂与重组的共价键。在聚合物基体中引入可逆共价键,在外界条件(如温度、光照等)的刺激下,聚合物可快速、高效自修复。例如,某些含有可逆共价键的聚合物材料,在受到损伤后,通过加热等方式刺激,可逆共价键发生断裂与重组,从而使材料实现自我修复,这有助于延长聚合物材料的使用寿命。

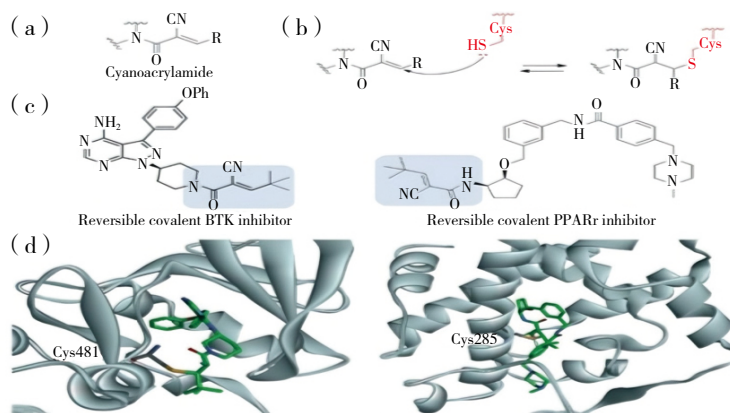


图3 可逆共价键

Figure 3 Reversible covalent bonds

(2) 基于非共价键相互作用

非共价键相互作用如氢键、配位键、范德华力、超分子动态作用等也可用于构筑本征型自修复材料。大量的超分子聚集在一起可以形成机械强度高的动态系统。当材料受到损伤时，这些非共价键相互作用能够发生可逆变化，使材料实现自我修复。例如，基于氢键相互作用的自修复聚硅氧烷材料，在一定条件下，氢键可以断裂和重新形成，从而实现材料的自修复，在电子封装、柔性器件、智能涂层等领域有较广阔的应用前景。

2 自修复材料的修复机理

2.1 化学修复机理

(1) 交联反应

在一些自修复材料中，当材料受损时，修复剂与催化剂或引发剂接触，发生交联反应。以微胶囊填充型自修复材料为例，微胶囊破裂释放出的修复剂（如双环戊二烯（DCPD）、环氧树脂等）与催化剂接触后，通过交联反应形成三维网络结构，从而填补裂纹，实现修复。在含环氧树脂修复剂的微胶囊自修复体系中，环氧树脂从微胶囊中释放后，与酰胺类固化剂发生交联反应，一

方面固化涂层树脂，另一方面过量的酰胺与环氧树脂修复剂聚合实现自修复功能。

（2）可逆化学反应

本征型自修复材料中，基于可逆共价键或非共价键相互作用的自修复过程涉及可逆化学反应。材料发生断裂时，内部的可逆动态键（如可逆共价键、氢键等）在特定条件下发生断裂，当受到外界刺激（如光、热、电磁等）时，这些键又能重新形成键合作用，从而在宏观上实现自我修复。

2.2 物理修复机理

（1）微胶囊/微容器释放填充

外援型自修复材料中的微胶囊/微容器填充型材料，其修复机理主要是物理填充。当材料受损导致微胶囊或微容器破裂时，其中的修复剂（如干性油、腐蚀抑制剂等）释放出来，填充到裂纹或损伤部位，形成物理阻挡层，阻止损伤进一步扩展。如以干性油为修复剂的微胶囊自修复涂层，微胶囊破裂后释放出来的干性油与空气接触后被氧气氧化形成自修复膜层，填充裂纹。

（2）分子扩散

在一些本征型自修复材料中，分子扩散也起到重要作用。当材料出现损伤时，分子在浓度差的驱动下向损伤部位扩散，填补空隙，实现一定程度的修复。某些具有自修复功能的聚合物材料，在损伤处分子链段的扩散和重排能够使材料的性能得到部分恢复。

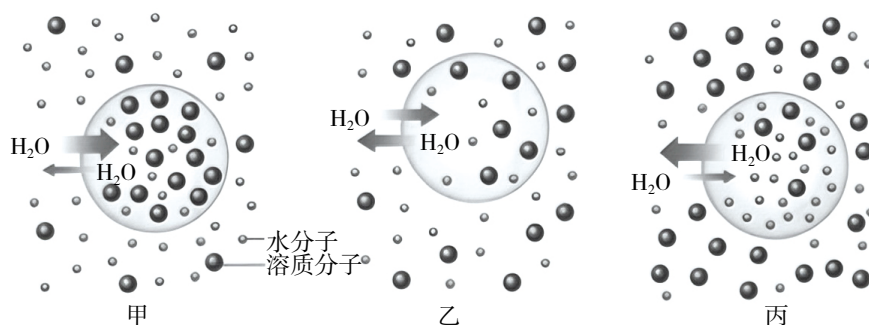


图 4 分子扩散运动

Figure 4 Molecular diffusion movement

3 自修复材料的研究进展

3.1 新型自修复材料的研发

近年来,研究人员不断探索新型自修复材料体系,取得了一系列重要成果。例如,中国科学院宁波材料技术与工程研究所的研究人员以天然蛛丝和珍珠为灵感,通过协同将柔性二硫键和动态六氢键加入聚氨酯(PU)中,开发出一种具有超高强度和韧性的室温自修复超分子材料。这种材料在具有动态多氢键的氧化石墨烯纳米片与PU基体之间的界面引入了丰富的氢键,从而提供了强大的界面相互作用。该材料具有创纪录的机械强度和韧性,优异的拉伸性能和快速的室温自修复能力。

东南大学智能材料研究院院长李全教授团队利用四芳基琥珀腈(TASN)和聚硅氧烷基液晶弹性体(LCE),合成TASN-LCE材料。用这种材料构建的海星状软驱动器,不仅可以随着温度变化而变形,还能自愈合、再加工。

3.2 自修复材料性能的提升

为了提高自修复材料的性能,研究人员从多个方面进行了深入研究。在材料的力学性能方面,通过优化材料的微观结构和组成,提高材料的强度、韧性和耐久性。在自修复效率方面,研究新型的修复剂和修复机制,以加快修复速度,提高修复效果。通过改进微胶囊的制备工艺和性能,使其能够更有效地保护修复剂,并在材料受损时及时、准确地释放修复剂。同时,研究人员还关注自修复材料在不同环境条件下的性能稳定性,如高温、高湿、强酸碱等恶劣环境对自修复材料性能的影响,并采取相应的措施进行改进。

3.3 自修复材料与其他技术的融合

自修复材料与3D打印技术、纳米技术、生物工程技术等的融合成为研究热点。3D打印技术可快速制造具有复杂形状和结构的自修复材料,实现材料内部的自愈合功能,用于定制医疗设备、航空航天零部件等。纳米技术的应用可以制备出具有特殊性能的纳米自修复材料,如纳米粒子增强的自修复复合材料,

能够显著提高材料的力学性能和自修复性能。在生物工程领域，自修复材料与生物可降解材料结合，开发出用于组织工程和药物输送的自修复生物材料，具有良好的生物相容性和生物活性。

4 自修复材料的应用领域

(1) 航空航天领域

在航空航天领域，航天器和飞机等设备在运行过程中面临着复杂的环境和巨大的应力，材料的损伤可能会导致严重的后果。自修复材料的应用可以大大提高航空航天材料的可靠性和使用寿命，降低维护成本和风险。将自修复复合材料用于飞机机翼、机身等结构部件，当材料出现裂纹时，能够自动修复，避免裂纹扩展导致结构失效。在航天器上，预先将包覆活性树脂的微胶囊和催化剂分散在复合材料中，当航天器受损伤出现裂纹时，微胶囊破裂活性树脂流出，在催化剂作用下发生化学反应，使裂纹自行愈合，从而延长航天器的使用寿命。



图 5 用于航空领域

Figure 5 For use in aviation

(2) 汽车工业领域

汽车在行驶过程中，车身、轮胎等部件容易受到刮擦、碰撞等损伤。自修复材料在汽车工业中的应用可以提高汽车的外观质量和耐久性，减少维修次数

和成本。自修复涂层可以应用于汽车车身表面，当涂层出现划痕时，能够自动修复，保持车身的美观。自修复轮胎在被扎破后，内部的修复材料可以自动填充破洞，防止漏气，确保行车安全。

（3）建筑领域

建筑物在长期使用过程中，会受到自然环境（如温度变化、风雨侵蚀等）和人为因素的影响，出现裂缝等损伤，影响建筑物的结构安全和使用寿命。自愈混凝土是一种具有自修复功能的混凝土，可以自动修复微小的裂缝，在保证强度的前提下提高混凝土结构的耐久性和安全性，被广泛应用于公路、铁路、桥梁、隧道等建筑工程领域。自修复涂料可以用于建筑物的外墙、屋顶等部位，当涂层出现损伤时，能够自动修复，提高建筑物的防水、防腐性能。

（4）电子领域

电子产品的小型化、轻量化和高性能化对材料的要求越来越高。自修复材料在电子领域的应用可以提高电子产品的可靠性和稳定性。在电子封装材料中使用自修复材料，当材料出现裂纹或损伤时，能够自动修复，防止水汽、杂质等进入电子元件，影响其性能。自修复的柔性电子材料可以用于可穿戴设备、柔性显示屏等，提高其使用寿命和可靠性。

5 自修复材料的发展趋势

（1）多功能化

未来自修复材料将朝着多功能化方向发展，除了具备自修复功能外，还将兼具其他性能，如抗菌、防污、导电、隔热等。在医疗领域，开发具有自修复功能且生物相容、抗菌的材料，用于医疗器械和组织工程支架，可减少感染风险，促进组织修复。在航空航天领域，研发具有自修复、隔热、高强度等多种性能的材料，以满足飞行器在复杂环境下的使用要求。

（2）智能化

随着智能技术的发展，自修复材料将更加智能。材料能够实时感知自身的损伤程度和位置，并根据损伤情况自动调整修复策略，实现精准修复。通过在自修复材料中引入传感器和智能控制系统，使其能够与外部设备进行通信，实

现远程监测和控制。在建筑结构中，自修复材料与智能监测系统结合，可实时监测建筑物的健康状况，当出现损伤时及时进行修复，保障建筑物的安全。

（3）绿色可持续化

在环保意识日益增强的背景下，自修复材料的绿色可持续发展至关重要。开发环境友好、可降解的自修复材料，减少对环境的影响。利用可再生资源制备自修复材料，降低对不可再生资源的依赖。优化自修复材料的制备工艺，减少能源消耗和废弃物排放。荷兰代尔夫特理工大学研发的真菌自愈材料，实现了零化工合成、100%降解，为自修复材料的绿色可持续发展提供了新的思路。

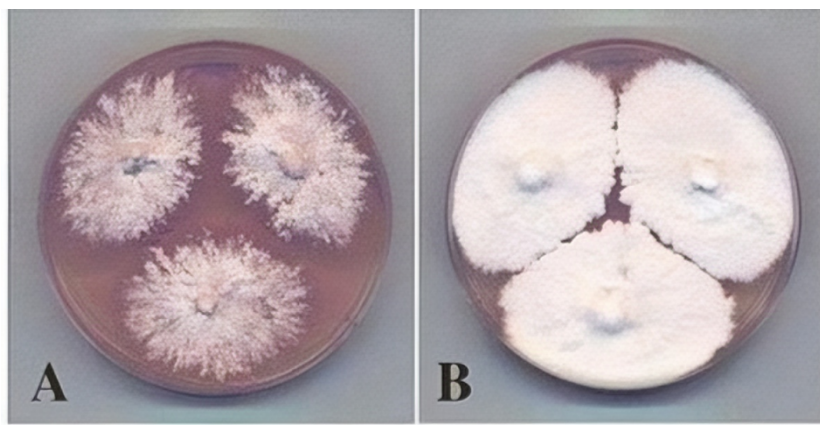


图 6 真菌自愈材料

Figure 6 Fungal self-healing materials

6 结论

自修复材料作为材料科学领域的重要研究方向，经过多年的发展，在材料分类、修复机理、研究进展和应用领域等方面都取得了显著成果。外援型自修复材料和本征型自修复材料各有特点，通过不同的修复机理实现材料的自我修复。新型自修复材料的不断研发和性能提升，以及与其他技术的融合，拓展了自修复材料的应用范围。在航空航天、汽车工业、建筑、电子等领域，自修复材料展现出了巨大的应用潜力，能够提高材料的可靠性和使用寿命，降低维护

成本。未来,自修复材料将朝着多功能化、智能化和绿色可持续化方向发展,为解决材料损伤问题提供更加有效的解决方案,推动相关领域的技术进步。然而,自修复材料的研究仍面临一些挑战,如修复效率和修复程度有待进一步提高、材料的稳定性和耐久性需要加强、制备成本较高等。因此,在今后的研究中,需要进一步深入探索自修复机理,开发新型的自修复材料和制备工艺,以克服这些挑战,实现自修复材料的广泛应用和产业化发展。

参考文献

- [1] 邢博冉,唐剑,阮佳慧,等. 自修复材料在航空航天领域的应用研究进展 [J]. 材料工程, 2024, 52 (3): 1-12.
- [2] WHITE S R, SOTTOS N R, GEUBELLE P H, et al. Autonomic healing of polymer composites [J]. Nature, 2001, 409 (6822): 794-797.
- [3] 李全,张伟,王磊,等. 基于动态共价键的自修复弹性体材料研究 [J]. 高分子学报, 2023, 54 (6): 721-733.
- [4] WANG Y, PHAM D T, JI C. Self-healing concrete using bacteria: A review [J]. Construction and Building Materials, 2022 (319): 126123.
- [5] CHEN X, DAM M A, ONO K, et al. A thermally re-mendable cross-linked polymeric material [J]. Science, 2002, 295 (5560): 1698-1702.
- [6] JONKERS H M, SCHLANGEN E. Self-healing of cracks in concrete using bacteria [J]. Ecological Engineering, 2019 (129): 1-7.

A Review of the Current Research on Self-healing Materials

Xing Boran Tang Jian Ruan Jiahui Hu Junjie Xu Zixiang
Yao Yang Lu Ming Wang Yonglun Wang Ting Liu Xinyi

Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Abstract: Self-healing materials, as a cutting-edge research area in the field of materials science, simulate the self-repair mechanisms of biological organisms. These materials can repair damage they sustain during use, effectively extending their lifespan and reducing maintenance costs. This article provides a comprehensive overview of the current state of research on self-healing materials, detailing their classification, repair mechanisms, research advancements, and application areas. It also looks ahead to future trends, aiming to serve as a reference for further research and broader applications of self-healing materials.

Key words: Self-healing materials; Repair mechanism; Research progress; Application fields