



视觉中国供图

自修复材料：谁说破镜不能重圆

走近超材料②

◎ 实习记者 苏菁菁

从钢铁侠可以自动愈合的战衣，到阿丽塔全身可拉伸的电子器件组装，自修复材料在科幻作品中十分常见。

自修复材料又称自愈合材料，是一种受损后能够进行自我修复的新型材料。

内含可逆动态键，能进行自我修复

在使用过程中，物品会不可避免地出现损伤，严重时会产生较大尺寸的裂缝并断裂，影响材料的使用效率与寿命。以自修复材料制造的物品出现损伤后，不需要或者只需很少的干预，破损处就能自动修复。受生物学中的自修复现象启发，人们开始设计自修复高分子材料，这类材料可以自行发现裂纹，并通过一定机理将裂纹重新填补、自行修复，有效延长材料的使用寿命，具有重要的科学意义和应用价值。

朱锦表示，物品的损坏通常从细小的表面裂缝开始，这些裂缝肉眼是无法发现的。这些裂缝形成后会不断扩大，这将削弱材料的原始性能，直到最后完全无法使用。而自修复材料能够很好地避免上述情况的出现，将裂缝扼杀在摇篮里。

根据修复方式的不同，可以将自修复材料分为外塑型自修复与本征型自修复两类。外塑型自修复指通过在材料内部或表面添加功能性载体实现自修复，其修复效率和载体与基材间的相容性、载体的分散均匀性、载体中修复剂的含量密切相关。液芯纤维型自修复高分子材料就是典型的外塑型自修复材料，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，修复剂外溢到基材材料中，通过修复剂和基材材料之间的固化交联反应对裂纹进行填充和修复。

“自修复材料的特点是能够识别损害的出现，并立即进行自我修复。这类材料可在确保物品使用安全性和完整性的同时，降低维护成本，延长物品寿命。”中国科学院宁波材料技术与工程研究所研究员朱锦近日在接受科技日报记者采访时说。从电子产品到汽车飞机，再到建筑建材，自修复材料的应用前景十分广阔。那么，关于自修复材料有哪些创新性研究，其产业化前景如何？

本征型自修复指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。资料显示，目前已有基于氢键、配位键、二硫键和硼酸酯键等多种本征型自修复聚硅氧烷材料，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。

朱锦告诉记者，自修复材料之所以能够“破镜重圆”，是因为这些材料内部含有可逆动态键，即材料发生断裂时，这些键互相之间能够重新形成键合作用，从而在宏观上实现自我修复。“可逆动态键大体可分成以下三类，第一类是范德华力，第二类是可逆共价键，第三类是超分子动态作用。”朱锦说。

范德华力一般指分子间的作用力，通常是较弱的。但当范德华力聚集在一个聚合物内且按同一方向排列时，便可累积足够大的力量使材料进行自修复。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，在外界条件的刺激下，聚合物可快速、高效自修复，这有助于延长聚合物材料的使用寿命。超分子动态作用是一种非共价键作用，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，基于超分子动态作用构筑自修复材料也获得了学界的关注。

机器人液化后“越狱”，《终结者》情节成真

◎ 实习记者 苏菁菁

小机器人从固态变为液态，在磁场的引导下穿过“牢笼”，并通过放置在栏杆外的模具重新凝固，成功“越狱”。

这种科幻电影《终结者》中的情节，出现在中美科学家联合提出的“磁控固-液相变材料”的实验中。该研究由中山大学广东省传感技术与生物医疗仪器重点实验室、浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室和卡内基梅隆大学软体机器人实验室合作完成。相关研究论文日前发表于国际期刊《物质》。

固液气状态“切换自如”

相变，指物质从一种状态到另一种状态的转变。相变材料则指可以发生固液气三种状态切换的材料。

论文通讯作者之一，中山大学教授蒋乐伦告诉科技日报记者，相变材料按照化学成分，可以分为使用金属合金、无机盐等无机物的无机相变材料，使用石蜡、多元醇等有机物的有机相变材料和复合相变材料。

由于相变材料在发生相变时，会吸收或者释放大量的能量，因此相变材料的典型应用是储能。

“相变材料主要利用潜热储能，具有储热密度大，蓄热装置结构紧凑，相变过程中自身温度基本不变，易于管理等特性。其应用场景包括太阳能储能系统、空调储能系统等。”蒋乐伦说。

相变材料的另一应用是传热。“热管可以利用内部工质，如水、酒精等，实现从液到气之间的可逆相变。在此过程中，热管会吸收和释放大量的热量，成为高效传热的元件。目前，热管已经广泛应用于笔记本CPU散热，高功率电子元器件散热等领域。”蒋乐伦说。

固态刚度强，液态可形变

“我们提出磁控固-液相变材料，主要的灵感来源是电影《终结者》与动物海参。”蒋乐伦说，《终结者》中的液态金属机器人的手，可以在固液切换后，变成一把刀。同时，机器人还可以变成液态后越狱。海参也非常有趣，可以通过改变富含蛋白的原纤维间基质的硬度，来改变体表外形。”

磁控固-液相变材料是在液态金属的基础上制造的。据蒋乐伦介绍，液态金属通常可以在较低环境温度下实现固态和液态之间的切换，是一种无机相变材料。

为了充分利用液态金属在特定条件

技术不断深入，创新成果层出不穷

随着研究不断深入、技术不断进步，自修复材料领域涌现出越来越多的创新成果，自修复材料种类也不断增多。此前，中国科学院宁波材料技术与工程研究所王立平研究员和赵海超研究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。同时，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。这种具有反向人工珍珠层结构的含脲PU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)和聚硅氧烷液晶弹性体(LCE)，合成TASN-LCE材料。他们用这种材料构建

尚处实验室阶段，但未来前景广阔

从研发屏幕划痕自我修复显示技术，到研制形状记忆合金自修复材料；从自修复的系列自愈合聚氨酯弹性体改善手术效果，自修复材料的使用场景与应用领域十分广阔。

朱锦说：“车胎被尖锐物品刺穿是常有的事。但是如果胎内是由自修复材料制备的话，那么车胎将会自动恢复初始性能，补胎将会退出我们的生活。未来，具有自修复功能的汽车膜可以使汽车表面划痕自动消失，降低维护成本。”朱锦表示，目前自修复材料多处于科研阶段，鲜有能够实现产业化的企业。“但是英国知名研究公司IDTechEx发布了业界首份关于自修复材料技术及市场的综合报告，到2042年，自修复材料的市场将达到数十亿

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。

近期，朱锦团队联合韩国科研团队根据触觉细胞的机械刺激响应原理，模拟真实人体皮肤的自愈功能和生物离子信号传递机制，设计合成了一种含有动态二硫键功能基团和氯取代基的新型热塑性聚氨酯材料，这一材料拥有像人体皮肤一样的弹性且具有自我修复能力，灵敏的触觉功能可以随着伤口的愈合而恢复。

“为了学习人体的‘离子信号传输机制’以进行外力的感知，同时匹配人体感知所要求的高灵敏度和耐用性，我们在自修复聚氨酯的结构中导入了‘离子抓取位点’，合理调控硬相区和软相区的结构比例，并将离子液体填入作为离子传输介质，最终得到了一系列耐用的自修复聚氨酯材料。”朱锦说。

美元。”朱锦说。

朱锦告诉记者，在他看来，未来有前景的研究领域可能在如下几个方面：一是新型自修复的动态键的结构设计与性能研究。争取开发新的动态键，在保证材料原始性能的同时，力求自愈合效率的最大化。二是自修复材料的多功能化研究，自修复材料在使用过程中，往往需要兼顾其他性能，例如抗汗、抗菌、生物相容等。多功能的集成化，有助于增加自修复材料的应用价值和场景。三是自修复材料的综合性能与应用场景的匹配性研究。“我们需要根据应用场景的实际情况，来设计自修复材料需要具备的其他性能，力求材料使用寿命的最大化和高度匹配性。只有实现具体应用，才能体现材料的价值。”朱锦说。

寻材问料

全天然仿木气凝胶 隔热耐火性能优越

科技日报讯(记者吴长锋)近日，科技日报记者从中国科学技术大学获悉，该校俞书宏院士团队以天然生物质和天然矿物为原料，制备了一种具有优良隔热和耐火性能的纯天然仿木气凝胶，相关研究成果日前发表于《德国应用化学》。

木材作为一种用途广泛的材料和丰富的资源，已被广泛使用了数千年。

近年来，各种具有独特物理性能和应用广泛的仿木材料也被开发出来。基于塑料和树脂的仿木气凝胶生物降解性差，会导致废物的积累并带来严重的环境问题。而基于现有的纳米结构基元的仿木气凝胶则存在可持续性不足、成本高等问题。因此，为解决目前材料的不可持续性问题，开发低成本、低能耗、环保的新型结构基元将对仿木气凝胶的发展起到至关重要的作用。

该团队巧妙地通过表面化学调控方法，成功实现了在温和条件下活化微米尺度的木屑颗粒表面，从而暴露出纤维素纳米纤维。这些颗粒表面的纳米纤维显著增强了颗粒之间的相互作用。结合单向冷冻技术，该团队成功构建了强韧耐用的仿木气凝胶。这种气凝胶有着与天然木材类似的取向通道结构，其仿木结构可以大大降低气凝胶的热导率，具有17.4毫瓦每米开尔文的超低径向热导率，优于现有纤维素基气凝胶材料和各类商用海绵。同时，加入天然黏土纳米片使得这种气凝胶的耐火性能也有了很大的改善，可以承受1300℃高温的火焰，并且至少在20分钟内不被烧透。

该团队研究人员认为，这种全天然仿木气凝胶的隔热和防火性能均优于天然巴沙木和大多数商业海绵，有望成为现有商业隔热材料的理想替代品。此外，其天然的原料来源和低能耗低排放的制备工艺使得这种气凝胶具有良好的生物降解性和可持续性，从而可以减少隔热材料在生产、使用和废弃过程中对环境的负面影响。

新型液态金属封装复合材料 兼具拉伸性和高气密性

科技日报讯(申清臣 记者王春)近日，上海交通大学材料科学与工程学院邓涛教授和高文副研究员课题组联合美国北卡罗来纳州立大学迈克尔·迪基(Michael D. Dickey)教授课题组和A123系统研发中心的王凌博士，在柔性封装材料与技术领域取得了重要突破。相关研究成果近日发表在《科学》杂志上。

通过将常见液态金属镓铟共晶合金(EGaIn)与弹性体材料复合，并巧妙地利用微米玻璃球阵列作为支撑体防止该封装材料在变形过程中塌陷而引起密封性能的衰减，研究人员开发了一种高气密性、可拉伸、能集成无线通讯功能的封装材料，测得其氧透过系数接近于金属铝，比传统硅胶弹性体材料低8个数量级以上，解决了传统封装材料无法同步兼顾拉伸性和高气密性的难题。在此基础上，研究人员还进一步设计构筑了可无线通信的柔性封装系统，实现了柔性可拉伸锂离子电池封装，展示了其在柔性能源、电子信息及生物医学等领域的广阔应用前景。

联合团队应用该液态金属封装复合材料对基于水系电解质的可拉伸锂离子电池进行封装和性能测试。测试发现，在自然未拉伸状态下，封装的锂离子电池可逆容量为105.5毫安时/克，经500次充放电循环后，仍可保持72.5%的初始容量，而传统弹性体封装的电池在循环约160次后则完全失效；在20%拉伸应变状态下，该液态金属封装复合材料封装的电池容量仍可维持在105.0毫安时/克，且在拉伸、弯曲、扭曲等变形状态下，其恒流充放电曲线和相应的容量都几乎保持不变。

此外，联合团队还发现液态金属封装复合材料对乙醇等常用有机溶剂也具有优异的密封效果。联合团队设计制备了以乙醇为工质的可拉伸气液相变传热器件，研究结果表明，在拉伸和加热状态下，该液态金属封装复合材料封装后的器件有效导热率可稳定维持在300瓦/米·度以上，有望为柔性电子器件热管理提供全新可靠的解决方案。

华科大团队 制备超疏水阻燃复合材料

科技日报讯(记者吴纯新 通讯员高翔)近日，科技日报记者从华中科技大学(以下简称华科大)获悉，该校化学与化工学院瞿金平院士团队关于“受防护林启发具有根-土互锁微纳结构的超疏水阻燃复合材料”的研究成果日前在线发表于《先进功能材料》。

阻燃材料是指能够抑制或者延缓燃烧，而自己并不容易燃烧的材料，在电子电器、家电、化工、消防、国防等领域被广泛应用。

如今，不断升级的电子器件为现代生活提供了极大便利，但其高功耗引发的热量累积对绝缘阻燃材料的适用性和耐久性提出了更高要求。

基于此，瞿金平团队受河滩防护林根-土互锁结构固土的作用启发，结合工业化的微挤压压缩成型技术和简易的一步喷涂技术，制备了一种具有根-土互锁微纳结构的超疏水阻燃聚乙烯-醋酸乙烯酯/氢氧化铝复合材料。

据介绍，该超疏水阻燃复合材料表面接触角为 $156 \pm 1.0^\circ$ ，滚动角为 $4 \pm 1.0^\circ$ ，且在高温、酸碱溶液、动态冲击等耐久性试验下具有优异的超疏水性。具体而言，仿生根-土互锁的微纳结构为阻燃复合材料提供了足够的润湿稳定性、优异的光热能力和稳健的适应性，从而有利于提高其耐酸碱性、耐热性、被动防冰和光热除冰性能。

此外，在界面和表面功能的协同作用下，该超疏水阻燃复合材料的阻燃性能显著提高，极限氧指数为42%，阻燃性能达到UL-94V-0级，且峰值放热率、总放热量、峰值烟雾产生率和总烟气释放量均显著降低。