加个“活扣”，环氧树脂的“跷跷板难题”破解了

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/38192.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

加个“活扣”，环氧树脂的“跷跷板难题”破解了

。在日常生活中，环氧树脂是一种很常见的材料——艺术家们用它制作丰富多彩的装饰品，环氧地坪在工厂车间、医院等地也特别常见，它还是AB胶的主要材料……

但事实上，环氧树脂的作用远不止于日常生活，特别是很多高端环氧树脂，目前被广泛应用于手机电路板封装、风电叶片支撑、飞机机身加固等工业和加工领域，甚至被称为现代工业的“隐形骨架”。

只不过，这个“隐形支架”并不完美。

“实际应用中，环氧树脂存在高强度、高耐热性与韧性、可加工性难以兼顾的问题，这又被称为‘跷跷板困境’。”接受《中国科学报》采访时，天津大学化工学院教授汪怀远说，该问题已经困扰了相关行业数十年之久。

不久前，汪怀远团队成功破解了这一难题，研发出兼具耐高温、高强韧与可回收特性的新型环氧树脂，并为高端材料绿色化提供了解决方案。

相关成果目前已经刊发于《先进材料》。

利弊全因“分子网”

作为航空航天、新能源、电子封装等战略领域的核心材料，目前环氧树脂的全球市场规模已经超过了130亿美元，这一巨大的应用市场与其自身优异的粘接力、机械强度和耐化学性直接相关。

但在这些优异的性能背后，则是其靠传统手段难以克服的“跷跷板困境”，以及巨大的环保威胁。

以风电为例，据论文第一作者、汪怀远团队博士生焦学伟介绍，作为风电叶片制造的关键基材，每年会有约5800吨环氧树脂复合材料由于风电叶片的退役而变为废弃物。这些废弃物很难被回收利用，却只能依赖填埋或焚烧处理，既浪费资源又污染环境。

环氧树脂的优势和劣势，均与其自身的分子结构有关。

“ 环氧树脂的分子结构中存在很多活性基团，它们在特定条件下的相互连接就会形成一张致密的‘ 分子网 ’。 ” 汪怀远解释说，这张网就是让环氧树脂拥有超高机械强度和耐化学性，以及优异粘结力的关键。

然而，环氧树脂的“ 跷跷板困境 ” 和环保问题也来自这张“ 分子网 ”。

“ 一方面，‘ 分子网 ’越紧密，环氧树脂就越结实、越耐腐，但这会导致其韧性大大降低，材料会变得更脆；反之，降低‘ 分子网 ’的密度会提升材料的韧性和可加工性，但环氧树脂也就不再结实。这是一个只能‘ 二选一 ’的难题。 ” 汪怀远说。

另一方面，由于其结构本身的牢固性，“ 分子网 ” 一旦形成，就如同被永久胶水粘死，不管用物理还是化学方法，都很难将其拆解，也就遑论回收利用和自然降解了。

“ 长期以来，人们往往会通过添加剂的方式提升环氧树脂的性能，但由于这些添加剂很难触及其分子结构，也就导致了‘ 治标不治本 ’，很难取得令人满意的效果。 ” 汪怀远说。

在“ 死结 ” 中加一个“ 活扣 ”

“ 既然传统分子网络结构是一个‘ 死结 ’，能不能给它加上可断开重连的‘ 活扣 ’？ ” 这是在经过多年的探索后，汪怀远团队想到的一个思路。

正是这个思路，成为了破解“ 跷跷板困境 ” 的钥匙。

焦学伟告诉《中国科学报》，所谓的“ 活扣 ”，就是一种可逆的“ 酸碱离子对 ”，研究团队将这种离子对嵌入到传统环氧树脂的刚性网络中，从而形成了一种新型结构。

在这一结构中，“ 酸碱离子对 ” 扮演着双重角色——既是吸收冲击能量的“ 微型减震器 ”，又是能在高温下启动键位重组的“ 智能催化剂 ”。

具体而言，当环氧树脂受到外部能量冲击时，这些“ 活扣 ” 会率先断开并吸收能量，避免整个“ 分子网 ” 的断裂，让材料变得更坚韧，打破“ 越硬越脆 ” 的困境；而当需要回收利用时，通过加热，“ 活扣 ” 就会启动键位重组，原本致密的“ 分子网 ” 能轻松拆解，既可以重新加工成新环氧树脂材料，也能减少废弃物污染，从而一举解决“ 性能 ” 与“ 环保 ” 两大难题。

这一设计看似简单，实则攻克了诸多技术难关。

“ 关键是要找到反应的‘ 平衡点 ’，既要保证离子对能有效发挥作用，又不能破坏材料本身的强度和耐热性。 ” 汪怀远回忆，团队筛选了上百种试剂组合，监测了无数次温度曲线，才最终确定了最佳方案。

为国产化替代开辟广阔空间

实验数据印证了这一方案的成功。

“ 新型环氧树脂强度达到78兆帕，玻璃化转变温度超过245摄氏度。这意味着其在1平方厘米的面积上，能承受780公斤的压力，几乎等同于1.5头成年水牛的重量；同时，在245摄氏度的环境中，

该材料依然能保持原有的硬度和结实度。”汪怀远说，对比市售高端产品，其耐热性提高约15%。

除了超高强度和耐热性外，该材料的断裂韧性也达到了每立方米8.2兆焦耳，相较于市面上出售的高端环氧树脂材料，其断裂韧性更是提升了近3倍。

“也就是说，这种材料不但完美地解决了环氧树脂的‘跷跷板难题’，材料本身的高强度、高耐热性与韧性也均有了大幅度提升。”汪怀远说。

更重要的是，新型环氧树脂还具备了传统环氧树脂缺乏的自修复能力和可回收性。

“我们首次在如此高性能的热固性环氧树脂中实现了形状可编程及化学降解。”汪怀远表示，这种材料可以多次再加工和物理回收，性能下降不超过10%。这打破了传统环氧树脂“一次固化即永久定型”的局限。

这些性能的背后，是广阔的应用前景。

比如，团队通过简单热压印工艺，利用新型环氧树脂成功制备出超疏水、高导热复合涂层，在添加氮化硼填料后，其导热系数显著提升，能直接解决5G基站、高性能芯片的散热痛点。汪怀远表示，采用该涂层后，芯片运行温度降低15-20℃，稳定性显著提高。

对于风电行业而言，这项技术更能带来革命性变化。“以前每年5800吨退役叶片废弃物只能填埋焚烧，现在通过高温处理，就能分解再加工为新基材。”汪怀远说。

在航空航天和新能源汽车领域，新型环氧树脂的优势同样突出。“飞机机身加固需要高强度和轻量化兼顾，传统材料韧性不足，在高空湍流冲击下易出现裂纹。”汪怀远表示，新型材料在重量减轻10%的同时，其抗冲击能力可大幅提升，能有效抵御湍流和起降应力。

目前，团队已为这项技术申请多项专利，正与产业界积极对接。“高端环氧树脂长期依赖进口，我们的材料性能更优、还兼具环保特性，能为国产化替代开辟广阔空间。”汪怀远表示，未来随着技术产业化的落地，各类高端制造产品都将实现更耐用、更环保的升级跨越，从而为我国“双碳”目标的实现提供坚实支撑。

相关论文链接：https://doi.org/10.1002/adma.202512584

作者：陈彬,金梦婷,王鹤立 来源：中国科学报

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发