

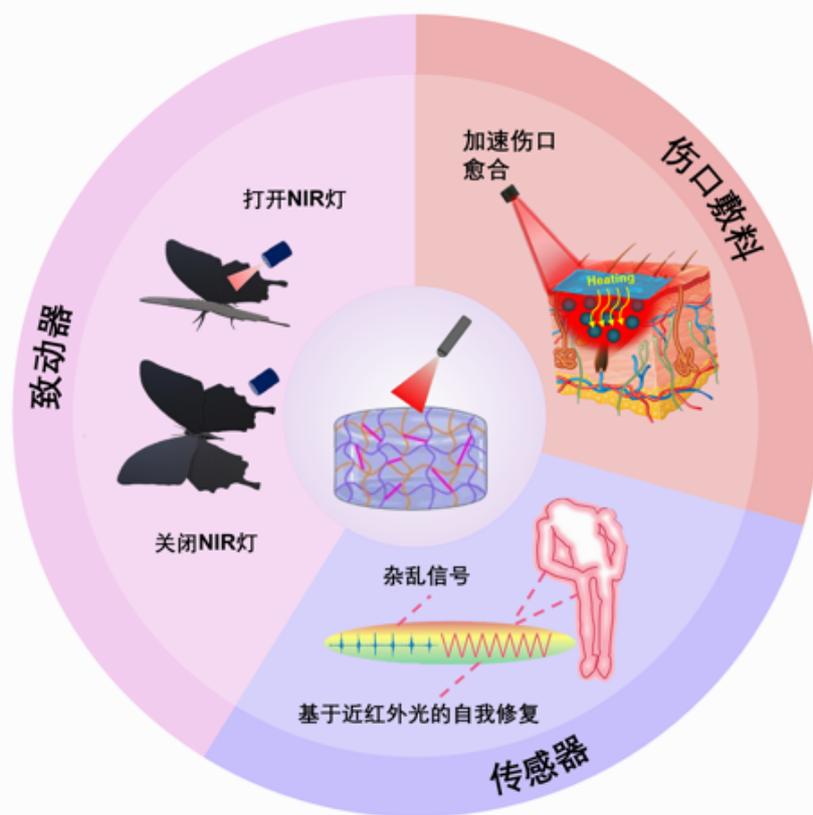
# 伤口会“报警”、机器人能“追光”？ 这种“智能凝胶”正在改写科技生活

作者：王孟朝，周迅，刘余敏，李雪龙；Email: 233393166@st.usst.edu.cn

当糖尿病患者的伤口反复感染、久不愈合时，医生只需用一支近红外光笔轻轻照射伤口敷料——神奇的事情发生了：敷料像被“唤醒”的卫士，一边释放温和热能杀死顽固细菌，一边通

过微弱的电流将伤口湿度、温度数据实时传到手机<sup>[1]</sup>；而在实验室里，一块薄薄的凝胶在光照下能像含羞草般快速收缩，甚至能驱动微型机器人抓取物体<sup>[2]</sup>。这些看似“科幻”的场景，背后都

离不开同一种材料——具有近红外光热效应的导电水凝胶（图1）。它既是“会发热的保湿海绵”，又是“能传信号的柔性电线”，正用独特的“超能力”改变医疗、机器人等多个领域。



①【图1】近红外（NIR）响应型导电水凝胶的应用领域——伤口敷料、驱动器、传感器。（素材来自参考文献[3-5]，图片作者原创）

## 它不是普通凝胶：一种“神奇成分”赋予它双重超能力

要理解这种材料的厉害，得先拆开它的“能力密码”。它的核心是“水凝胶”——一种像人体组织般柔软、能锁住自身质量百倍水分的三维聚合物网络，这让它能完美贴合皮肤且不刺激伤口。但光有柔软还不够，科学家给它加入了一类“特殊成员”，让它同时拥有“导电”和“光热”的超能力。

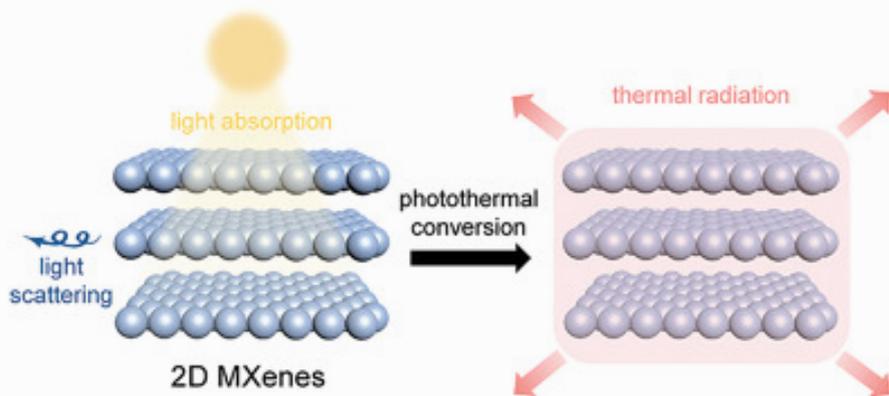
比如文献中研究的 MXenes 纳米片，在近红外频率下表现出强烈的局部表面等离子体共振，以实现宽带吸收。得益于强大的光吸收和局域表面等离子共振 (LSPR) 效应，MXene 材料具有优异的光热转换性能，即高效收集太阳能以及存储和利用转化热能 (图 2) [6]。

这些“特殊成员”像“微型能量转换站”，既能让电流在凝胶里顺畅传递，又能高效捕捉近红外光并转化为热能，缺一不可。

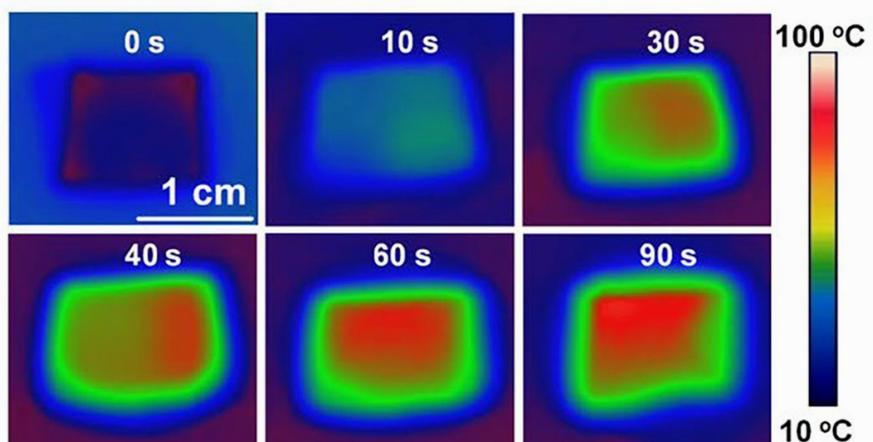
## 近红外光：激活凝胶超能力的“隐形钥匙”

为什么偏偏是“近红外光”能激活凝胶？因为它是一把“温柔的能量钥匙”。

我们平时看到的可见光（比如太阳光里的红光、蓝光）会被



① 【图 2】二维 MXenes 中光热转换的示意图 [6]



① 【图 3】水凝胶在 808 nm 近红外光不同时间照射下的红外热图像 [7]

皮肤表层吸收，而近红外光的波长更长 (808~1064 nm)，能像“穿透薄雾”一样穿过皮肤表层，直达深层组织，却不会伤害细胞。当它遇到凝胶里的“特殊成员”时，这些成分会像“接住快递”一样吸收光能，再通过“非辐射跃迁”把光能变成热能——整个过程就像“凝胶在悄悄晒太阳发热”，温度能精准控制在 38~50 °C，既不会太冷没效果，也不会太热伤

组织。

更妙的是，只要调节近红外光的强度和照射时间，就能“指挥”凝胶干活：照得弱一点，凝胶温和发热促进伤口愈合；照得强一点，温度升高到 50 °C，杀死耐药细菌；如果暂停光照，凝胶又会慢慢冷却，恢复柔软状态——就像给凝胶装了个“光控开关” (图 3) [7]。

## 从医疗到机器人：它的“超能力”正在解决实际难题

这种凝胶的厉害之处，在于它能把“发热”和“导电”结合起来，解决很多传统材料做不到的事。

### 1. 伤口护理的“智能卫士”

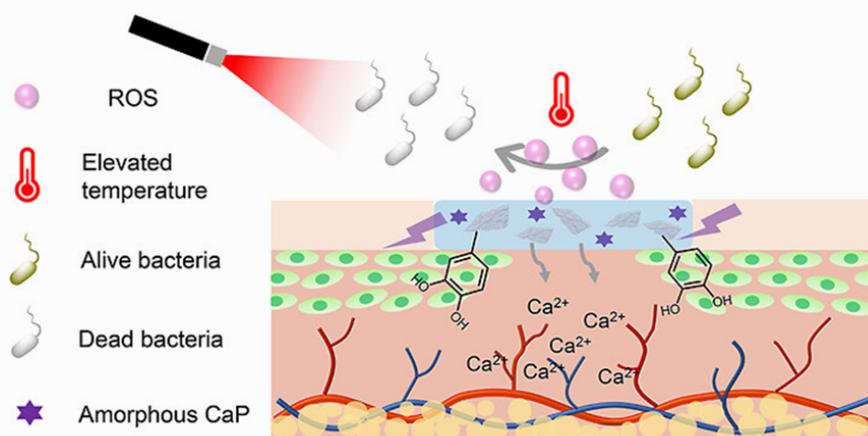
传统伤口敷料要么只能保湿，要么只能杀菌，而这种凝胶是“全能护士”。

**光热杀菌：**针对糖尿病足、烧伤等易感染伤口，光照后释放的热能杀死 98% 以上的大肠杆菌、金黄色葡萄球菌，甚至能对付“超级细菌”MRSA（耐甲氧西林金黄色葡萄球菌）<sup>[8]</sup>。

**促进伤口愈合：**导电性通过增强电荷传输发挥作用，一方面能加速炎症细胞清除坏死组织，还能促进修复细胞迁移增殖，光热效应除实现高效杀菌外，还能通过适度高温优化伤口局部微环境，且具备良好循环稳定性，为细胞修复和组织再生提供持续适宜的条件<sup>[9-10]</sup>。

**智能给药：**有的凝胶里藏着抗生素，光照发热时会“打开”凝胶网络，让药物精准释放到伤口，避免全身用药的副作用<sup>[11]</sup>。

**伤口报警：**凝胶的导电性还能监测伤口——如果伤口感染，



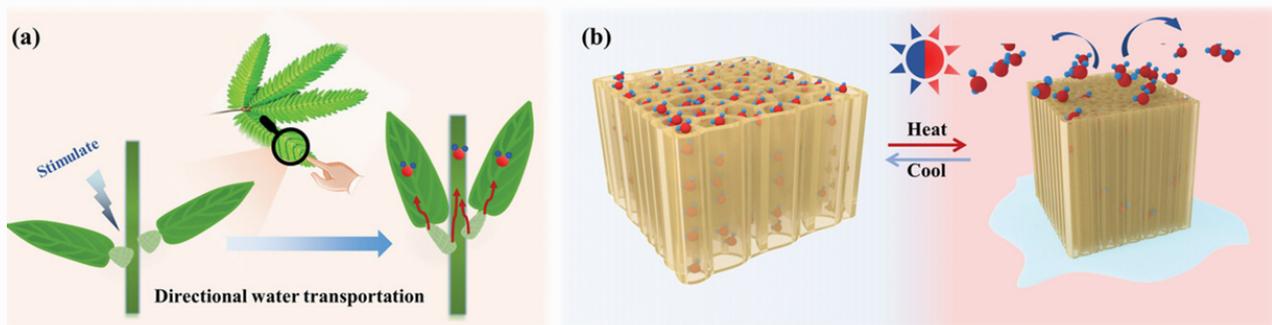
④【图 4】近红外光照射下的感染伤口愈合<sup>[13]</sup>

温度、湿度会变化，凝胶的电阻也会跟着变，凝胶内置的柔性微电极实时采集电阻、温度信号，通过微型柔性电路模块转化为数字信号，再经低功耗蓝牙传输至患者手机 APP，一旦数据异常（如湿度 > 70% RH 提示渗液过多，电阻骤升提示感染），APP 立即弹窗报警，并同步数据至医生端平台。医生可远程查看伤口动态，通过 APP 指导患者调整光照强度或用药方案，无需患者反复复诊，显著提升慢性伤口的管理效率<sup>[12]</sup>。

比如有研究团队做的“PDA/GO 凝胶”，给感染伤口贴上后，用近红外光照射，伤口温度升到适宜温度，7 天伤口就能结痂，比传统敷料快了一半时间（图 4）<sup>[13]</sup>。

### 2. 软机器人的“柔性肌肉”

传统机器人的“肌肉”是金属电机，又硬又重，而这种凝胶做的“肌肉”又软又轻，还能“追光行动”，为机器人技术开辟了新路径：其兼具高弹性与快速响应特性，3D 打印工艺可定制仿生结构。其驱动与抓取原理依托“光热致动——结构联动”：科学家将光热响应凝胶（PNIPAM 复合凝胶）与 CNTs-弹性体复合，制成“仿生肌肉”致动器，并与微型抓取爪集成。当近红外光（808 nm）照射致动器时，凝胶吸收光能转化为热能，使 PNIPAM 组分因温度升高发生疏水收缩，带动抓取爪向内侧弯曲，实现对微型器件的抓取；关闭光照后，凝胶温度降至室温，PNIPAM 重新吸水溶胀，致动器舒展，抓取爪张开释放物体。这种“光控抓取”精度极高<sup>[14]</sup>。



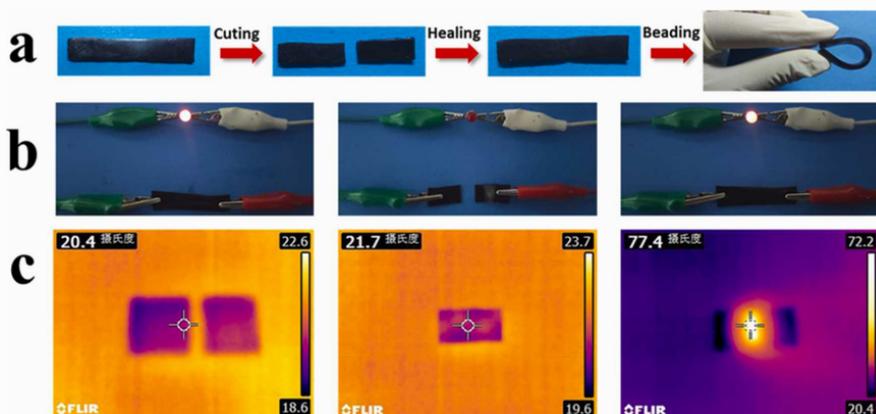
❶ 【图5】 (a) 含羞草叶的刺激和收缩引起的叶子闭合的示意图；(b) 快速变形水凝胶致动器的变形过程<sup>[2]</sup>

另有团队模仿含羞草(图5), 做了“光控凝胶机器人”: 只要用近红外光照射它的一侧, 这侧凝胶收缩, 机器人就会朝着光照方向“爬”, 像跟着光走的小虫子, 未来能用来在狭窄空间里运输药物<sup>[2]</sup>。

### 3. 可穿戴设备的“隐形传感器”

现在的智能手环大多是硬塑料, 戴久了会硌手, 而这种凝胶做的传感器能像“第二层皮肤”一样贴在手腕上, 这依赖其精准匹配的物理性能: 拉伸率应大于人体皮肤的应变(25%)以适应手腕活动, 一定的皮肤黏附强度确保运动时不脱落, 且杨氏模量需小于人体皮肤的杨氏模量(0.5~1.95 MPa)以减少异物感。

它能够通过导电性监测心率和血氧——当血液流动变化时, 凝胶的电阻会轻微改变, 转化成电



❶ 【图6】 (a) 水凝胶自愈过程的数码照片；(b) 水凝胶作为离子导体的自修复过程；(c) 红外热像仪观察自愈过程<sup>[15]</sup>

信号就是心率数据; 天冷时, 还能通过近红外光照射让凝胶发热, 既保暖又不影响监测。有的凝胶甚至能“自我修复”——如果不小心扯破了, 用近红外光照几十秒, 破口就能自动黏合, 继续使用(图6)<sup>[15]</sup>。

### 未来可期: 它还在突破“小难题”

虽然这种凝胶已经很神奇,

但科学家还在帮它“升级”: 比如怎么让它更便宜(目前部分成分如MXene成本较高)、怎么让它在反复光照下不容易“疲劳”(比如多次使用后光热效率下降)、怎么让它在体内更长时间工作(比如做植入式传感器)。

不过不用等太久——也许再过三、五年, 我们就能在药店买到这种“光热智能创可贴”, 运

动时戴的手环会变成“凝胶腕带”，甚至微型机器人能帮医生在体内精准给药。这种“会发热、能导电、懂响应”的神奇凝胶，正用科技的温柔力量，把更多“不可能”变成“日常”。

## 参考文献

- [1] Wang Q, Qiu W, Liu H, et al. Conductive hydrogel dressings based on cascade reactions with photothermal effect for monitoring and treatment of diabetic wounds[J]. *Compos Part B: Eng*, 2022, 242: 110098.
- [2] Yan Q, Ding R, Zheng H, et al. bio-inspired stimuli-responsive  $Ti_3C_2T_x$ /PNIPAM anisotropic hydrogels for high-performance actuators[J]. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2301982.
- [3] Yang K, Zhou X, Li Z, et al. Ultrastretchable, self-healable, and tissue-adhesive hydrogel dressings involving nanoscale tannic acid/ferric ion complexes for combating bacterial infection and promoting wound healing[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 43010-43025.
- [4] Cui X C, Liu Z Z, Zhang B, et al. Sponge-like, semi-interpenetrating self-sensory hydrogel for smart photothermal-responsive soft actuator with biomimetic self-diagnostic intelligence[J]. *Chem Eng J*, 2023, 467: 143515.
- [5] Ding J, Qiao Z, Zhang Y S, et al. NIR-responsive multi-healing HMPAM/dextran/AgNWs hydrogel sensor with recoverable mechanics and conductivity for human-machine interaction[J]. *Carbohydrate Polym*, 2020, 247: 116686.
- [6] Xu D X, Li Z D, Li L S, et al. Insights into the photothermal conversion of 2D MXene nanomaterials: synthesis, mechanism, and applications[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30: 2000712.
- [7] Qian C H, Li Y Q, Chen C, et al. A stretchable and conductive design based on multi-responsive hydrogel for self-sensing actuators[J]. *Chem Eng J*, 2023, 454: 140263.
- [8] Wang Q, Qiu W, Liu H, et al. Conductive hydrogel dressings based on cascade reactions with photothermal effect for monitoring and treatment of diabetic wounds[J]. *Compos Part B: Eng*, 2022, 242: 110098.
- [9] Qiao L P, Liang Y P, Chen J Y, et al. Antibacterial conductive self-healing hydrogel wound dressing with dual dynamic bonds promotes infected wound healing[J]. *Bioact Mater*, 2023, 30: 129-141.
- [10] Wang R Y, Li C Y, Zhang Y X, et al. Injectable, conductive MXene@Mg<sup>2+</sup> hydrogel with photothermal antibacterial and angiogenic properties for bacteria-infected wound healing[J]. *Chem Eng J*, 2025, 514: 163472.
- [11] Maleki A, He J H, Bochari S, et al. Multifunctional photoactive hydrogels for wound healing acceleration[J]. *ACS Nano*, 2021, 15: 18895-18930.
- [12] Shan M, Chen X, Zhang X, et al. Injectable conductive hydrogel with self-healing, motion monitoring, and bacteria theranostics for bioelectronic wound dressing[J]. *Adv Health Mater*, 2024, 13: 2303876.
- [13] Xie C M, Luo J Q, Luo Y J, et al. Electroactive hydrogels with photothermal/photodynamic effects for effective wound healing assisted by polydopamine-modified graphene oxide[J]. *ACS Appl.Mater.Interfaces*, 2023, 15: 42329-42340.
- [14] Li H, Liang Y, Gao G, et al. Asymmetric bilayer CNTs-elastomer/hydrogel composite as soft actuators with sensing performance[J]. *Chem Eng J*, 2021, 415: 128988.
- [15] Xu L J, Chen Y, Yu M L, et al. NIR light-induced rapid self-healing hydrogel toward multifunctional applications in sensing[J]. *Nano Energy*, 2023, 107: 108119.