

给细胞“送快递”？ 中国科学家打造多功能3D微纳机器人

想象一下，在比头发丝还要细的尺度上，有一双灵巧的“手”正在忙碌地工作——它能够精准地抓取微小颗粒，将其运送到指定位置，然后轻柔地释放。这不是科幻电影中的场景，而是中国科学院理化技术研究所科研人员的最新成果。这个仅有40微米大小的3D手型微纳机器人，正在刷新我们对微观世界操控能力的认知。

微观世界的精密挑战

在显微镜下的世界里，一切都变得不同寻常。水滴变成了汪洋大海，灰尘化作了巨石，而想要在这个尺度上进行精密操作，就如同戴着厚重的手套去穿针引线。长期以来，科学家们一直梦想着能够在微观尺度上实现如同宏观世界般灵活自如的操控能力。这不仅是技术上的挑战，更关系到精准医疗、靶向药物递送、细胞操控等诸多前沿应用领域的突破。

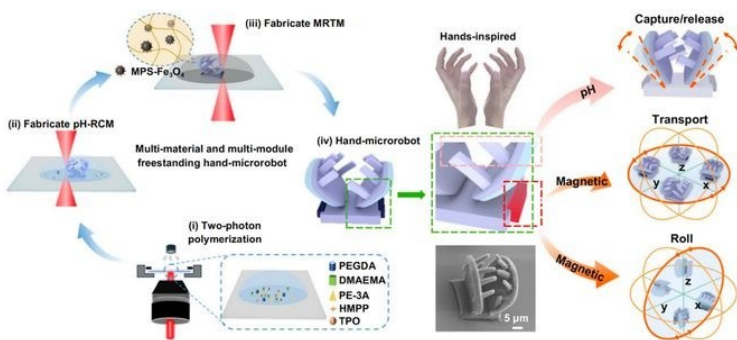
传统的微纳机器人往往面临着两个困境：要么功能单一，只能响应单一的外部刺激；要么结构复杂但难以精确控制。就像一个只会单一动作的机械臂，虽然能够完成特定任务，却无法应对复杂多变的工作环境。如何让微纳机器人既能感知环境变化，又能精准执行复杂动作，成为了摆在科研人员面前的一道难题。

中国科学院理化技术研究所会同北京石油化工学院，提出了一个创新性的解决方案：通过多材料集成和模块化设计，赋予微纳机器人多重响应能力。联合研究团队共同打造了具有划时代意义的微型“快递员”。

材料的智慧：双响应系统的巧思

这个微纳机器人的独特之处，在于它巧妙地整合了两种不同的智能材料系统。就像人的大脑和肌肉分工协作，机器人的顶部和底部分别承担着不同的功能。

顶部的pH响应模块，采用了含有2-(二甲氨基)乙基甲基丙烯酸酯(DMAEMA)的特殊光敏树脂。



多材料、多模块自由支撑“手形”微型机器人的飞秒激光直接写入制备示意图

这种材料中的叔胺基团就像一个灵敏的化学传感器，能够感知周围环境的酸碱变化。当环境变酸时，叔胺基团会发生质子化，带上正电荷，相互之间产生静电排斥，导致聚合物链条舒展开来，吸收更多水分而膨胀。这个过程就像海绵遇水膨胀一样自然，却又精确可控。当加入碱性溶液中和后，结构又会恢复原状，实现可逆的开合动作。

底部的磁响应模块则采用了另一套材料体系。研究人员首先合成了 Fe_3O_4 纳米颗粒，并用硅烷偶联剂MPS对其表面进行修饰，提高了纳米颗粒在有机体系中的分散性和稳定性。这些经过精心处理的磁性纳米颗粒被均匀分散在光敏树脂中，形成了可以被飞秒激光直接加工的磁性前驱体。通过局部高功率激光处理，铁含量可以达到45.71%的重量百分比，赋予整个微纳机器人强大的磁响应能力。

飞秒激光的精密雕刻

如何在如此微小的尺度上制造出结构复杂、功能精密的机器人？答案是飞秒激光直写技术。这项技术就像是一支能在微观世界作画的神奇画笔，通过双光子聚合原理，可以在三维空间中逐点“绘制”出所需的结构。

整个制备过程分为两个关键步骤。首先，研究人员将含有DMAEMA的光敏树脂滴入两片玻璃片之间的空腔中，然后用780纳米波长的飞秒激光按照预先设计

的三维模型进行逐点扫描。激光聚焦处的光敏树脂发生聚合反应，形成固化的聚合物网络。通过精确控制激光的扫描路径和功率，可以在“手掌”结构的内外两侧形成不同的交联密度。内侧经过重复扫描，交联密度更高，在酸性环境中膨胀程度较小；外侧交联密度较低，膨胀程度更大，从而实现了“手掌”的自动开合。

第二步是磁驱动模块的局部制备。激光焦点调整到微机器人的底部，滴加含有磁性纳米颗粒的前驱体，通过快速扫描将大量磁性纳米颗粒固定在指定位置。这种局部制备的方法突破了传统全磁性结构的限制，大大减少了磁性材料的用量，同时保持了良好的可控性。

微观世界的灵活舞者

完成制备的手型微纳机器人展现出了令人惊叹的运动能力。在外部磁场的引导下，它可以在溶液中自由游动，平均速度达到15.6微米每秒。虽然这个速度在宏观世界看来微不足道，但在微观尺度上已经相当可观——相当于它每秒可以移动接近半个身位的距离。

更令人印象深刻的是它的灵活性。通过改变磁场的方向和强度，微纳机器人可以实现上下左右的平面运动，还能够进行顺时针和逆时针的旋转。当遇到障碍物时，它甚至可以通过翻滚的方式越过障碍，就像一个训练有素的体操运

动员。这种三维空间的自由运动能力，为其在复杂微环境中的应用奠定了基础。

研究人员通过磁滞回线测量证实，所使用的 Fe_3O_4 纳米颗粒在室温下表现出超顺磁性，即在外部磁场时不会保留磁性。这一特性确保了微纳机器人在停止工作时不会相互吸引聚集，保持了良好的可控性和重复使用性。

从微粒到细胞的精准递送

这个微型“快递员”最引人注目的应用是对微小物体的精准操控。研究团队首先用直径10微米的聚苯乙烯微球进行了测试。整个捕获、运输和释放过程就像一场精心编排的舞蹈：当微球落入张开的“手掌”中后，滴加酸性溶液(pH=6)，“手掌”在5秒内迅速闭合，将微球牢牢抓住；随后在磁场引导下，携带着“货物”的机器人游向目标位置；到达目的地后，滴加碱性溶液(pH=10)，“手掌”重新张开，完成货物的释放。

更具挑战性的是对活细胞的操控。研究人员选择了786-O细胞(人肾透明细胞癌细胞)进行实验。与被动等待微球落入不同，对细胞的捕获需要更加主动的策略。微纳机器人可以在磁场控制下主动接近目标细胞，通过摆动调整姿态，然后在合适的时机通过pH变化实现捕获。令人欣慰的是，经过捕获、运输和释放的完整操作流程后，细胞存活率达到了97.76%，证明了这种操控方式的温和性和生物相容性。

研究团队还进行了生物相容性的系统评估。他们用DMAEMA光敏树脂制备了90微米×90微米×3微米的立方体结构，用于L929细胞(小鼠成纤维细胞)的培养。24小时后，细胞在结构上生长良好，细胞核和线粒体的荧光染色显示细胞保持着健康的生理状态，证实了材料良好的生物相容性。

模块化设计的无限可能

这项研究最具创新性的贡献

之一，是提出了模块化的设计理念。磁驱动模块可以被局部制备在任何预先制作的静态微结构上，赋予其运动能力。这就像是给静止的雕塑安装上了发动机，让它们瞬间获得了生命力。

研究人员还展示了不同姿态的手型微纳机器人——侧卧式和直立式，它们都能够成功捕获细胞。这种设计的灵活性意味着，未来可以根据不同的应用需求，定制各种形状和功能的多材料微纳机器人。比如，可以设计成钳子形状用于夹取，设计成笼状用于包裹，或者设计成螺旋形用于钻进狭窄空间等等。

更进一步，研究团队展望了多个微纳机器人协同工作的可能性。通过合理调整磁响应模块的位置和强度，可以实现多个机器人的集体运动控制，完成更加复杂的任务，如协同搬运大型物体或在不同位置同时进行操作。

微观操控的美好前景

站在这项突破性成果的基础上展望未来，我们可以想象出许多激动人心的应用场景。在精准医疗领域，这些微纳机器人可以携带药物直达病灶，实现真正的靶向治疗；在细胞工程中，它们可以精确操控单个细胞，辅助完成细胞注射、融合等精密操作；在环境治理方面，大量的微纳机器人可以协同工作，清除水体中的微塑料污染。

这项工作不仅在技术上实现了重要突破，更为微纳机器人的设计提供了新的思路。通过巧妙的多材料集成和模块化设计，他们成功地解决了单一材料系统功能受限的问题，为微纳机器人赋予了更强大的环境感知和执行能力。

当我们把目光从宏大的宇宙转向微小的世界，会发现那里同样充满了无限的可能。这双在微观世界中灵巧工作的“手”，正在为人类打开通向更精密、更智能的未来之门。或许在不久的将来，当医生需要在你的身体内进行精密治疗时，这些忠实的微型“快递员”就会悄然启程，完成它们的神圣使命。

火星失水之谜： 中国科学家揭示氢离子逃逸新机制

在浩瀚的宇宙中，火星这颗红色星球始终吸引着人类的目光。它荒凉的地表下隐藏着一个巨大的谜团——曾经可能拥有海洋和河流的火星，如今为何变成了一片干涸的荒漠？近日，中国科学院国家空间科学中心的研究团队在这个问题上取得了突破性进展，他们通过磁流体学模拟，发现了火星氢离子逃逸的潜在主导机制，为理解火星大气演化和宜居性丧失提供了新的视角。

氢离子的太空逃亡路径

火星大气层中的氢离子向太空逃逸，是火星失水的重要原因之一。长期以来，科学家们一直认为，这些氢离子主要是通过火星磁尾的电离层出流而损失的。然而，中国科学院国家空间科学中心以及南京大学深空探测科学与技术研究院的研究人员，通过精密的五流体磁流体学模型，得出了令人意外的结论。

研究团队发现，火星氢离子损失的主要源头并非传统认为的电离层离子通过磁尾的出流，而是氢外逸层电离产生的新生氢离子逃逸。这个发现颠覆了科学界的传统认知。模拟结果显示，超过90%的氢离子损失发生在磁鞘和太阳风区域，而通过磁尾逃逸的氢离子仅占总逃逸率的5%左右。这意味着，我们需要重新审视火星大气逃

逸的物理机制。

拾取离子：被太阳风“绑架”的氢原子

那么，这些氢离子是如何逃离火星引力束缚的呢？答案就在“拾取离子加速”这一独特的物理过程中。当火星外层大气(外逸层)中的中性氢原子与太阳风中的质子发生碰撞时，会发生电荷交换反应，中性氢原子失去电子变成氢离子，而太阳风质子则获得电子变成中性原子。新生成的氢离子立即被太阳风的对流电场捕获并加速，就像被太阳风“绑架”了一样。

这种拾取离子加速为氢离子提供了足够的能量来克服火星引力并逃逸到太空。研究发现，离子成分边界的位置在这个过程中起着关键的调节作用。离子成分边界是太阳风等离子体与行星离子之间的分界面，在这个边界上方，离子的运动主要受太阳风对流电场控制。由于氢离子的回旋半径较小，小于火星感应磁层的特征尺寸，它们表现出与太阳风流对齐的尾部逃逸轨迹，而不像氧离子那样形成明显的离子羽流。

有趣的是，研究还发现，拾取的氢离子主要起源于离子成分边界之外，这是因为在边界处加速的氢离子由于较小的回旋半径会再循环回电离层。相比之下，氧分子离子则被离子成分边界处的强电

场有效加速，形成离子羽流，确认了它们的电离层起源。这种差异揭示了不同质量离子在火星磁层环境中的独特行为模式。

沙尘暴与太阳风暴的推波助澜

火星上的沙尘暴不仅改变着这颗红色星球的地貌，还深刻影响着它的大气逃逸过程。研究团队通过模拟发现，季节性重复或沙尘暴驱动的氢外逸层密度变化，可以显著调节氢离子逃逸率。在火星南半球夏季的沙尘暴期间，大气加热和水汽输送会导致氢外逸层密度增加，进而增强氢离子的逃逸。模拟结果表明，在沙尘暴条件下，氢离子逃逸率可以增加至正常条件下的三倍以上。

更引人注目的是太阳风条件对氢离子逃逸的影响。当日冕物质抛射等空间天气事件发生时，增强的太阳风通量会直接放大氢离子的产生率。在极端太阳风条件下(太阳风密度增加三倍、速度增加一倍)，全球氢离子逃逸率可以激增五倍以上。这种对太阳风通量的依赖性凸显了拾取离子逃逸通道在火星历史上对氢损失的重要性。

研究还考察了火星壳磁场位置的影响。当壳磁场位于夜侧时，由于减少了日侧的磁场屏蔽，离子成分边界的高度降低，使更多离子

暴露于太阳风加速作用下，从而略微增加了氢离子逃逸率。这些发现表明，火星氢离子逃逸是一个受内部和外部多种因素共同控制的复杂过程。

火星演化史的新线索

尽管现今条件下氢离子全球逃逸率比中性氢原子的热逃逸率低1至2个数量级，表明氢离子逃逸在当前火星大气损失中扮演次要角色，但这项研究为理解火星的长期演化提供了重要线索。在火星历史的早期，当太阳更年轻、太阳风更强烈时，拾取离子逃逸过程可能以更快的速度剥夺火星的氢元素，进而导致水的大量损失。

这一发现与我国“天问一号”火星探测器的科学目标高度契合。天问一号搭载的火星离子与中性粒子分析仪正在对火星离子逃逸进行观测，有望为这一理论提供更多观测证据。通过结合地面模拟和空间探测，科学家们正在逐步拼凑出火星从温暖湿润世界转变为今天干燥星球的完整图景。

研究团队使用的五流体磁流体学模型能够分别求解太阳风质子、行星氢离子、氧离子、氧分子离子和二氧化碳离子的连续性、动量和能量方程，实现了对离子加速、运输和逃逸过程的详细分析。模型采用了从火星表面上方100公里延伸到40个火星半径的大型计

算域，避免了边界效应的影响。这种高精度的数值模拟为理解复杂的等离子体相互作用提供了强有力的工具。

展望：理解行星宜居性的钥匙

这项发表在《地球物理研究快报》上的研究成果，不仅加深了我们对火星大气逃逸机制的理解，也为研究其他类地行星的大气演化提供了重要参考。火星作为地球的近邻，其大气演化历程对理解地球自身的宜居性维持机制具有重要启示意义。

随着人类探索火星的步伐不断加快，理解火星大气逃逸的物理过程变得愈发重要。这不仅有助于重建火星的气候历史，预测其未来的演化趋势，还可能为未来的火星改造计划提供科学依据。中国科学家在这一前沿领域取得的突破，标志着我国在行星科学研究中正发挥着越来越重要的作用。

火星氢离子逃逸的故事，是一个关于时间、空间和物质相互作用的宏大叙事。从微观的电荷交换反应到宏观的行星演化，从瞬时的太阳风暴到漫长的地质年代，这项研究将不同时空尺度的物理过程巧妙地联系在一起，展现了行星科学研究的魅力。随着更多探测数据的积累和理论模型的完善，我们终将揭开火星失水之谜的全貌，并从中获得保护地球家园的智慧。