强磁场下材料的合成与应用

钱　勇　张潇潇　王　辉

（中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心 230031）

将磁场与化学反应相结合，研究磁场对化学反应的影响，有利于制备出突破现有极限性能的新型功能材料。类似于常规的反应条件如温度、压力等，磁场能有效地调控反应的速率、产率，及产物的结构和分布，成为合成和组装特殊材料的新参数。一般弱磁场的强度在0.01 T~0.1 T之间，当磁场的强度高于1.0 T时被称为强磁场(HMF)。极端条件的HMF向材料传递高强度的能量，改变其原子、分子、离子的排列、匹配和运动，这对化学反应及材料的结构和性质产生了巨大的影响。然而，磁场下材料的合成机理和应用机制尚不明确且实验条件苛刻，导致磁化学的发展速度缓慢。如今，磁化学迎来了新的发展契机。中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心建立了稳态强磁场实验装置(SHMFF)，为强磁场下的磁化学研究提供了一个卓越的平台。SHMFF中的水冷磁体(20 T)有20 cm的大孔径，适用于建立化学反应装置及高达20 T磁场下的各种化学反应体系。目前，磁场在化学反应动力学中的作用已经得到了广泛的探究，成为科学研究领域的重点研究对象。

过去的几十年中，已经发现施加磁场可以有效地将无序结构定向组装成有序结构。在化学合成期间使用磁场，生长单元的行为会发生改变，进而影响产物的表界面结构，这归因于表面能的降低、沿易磁化轴的定向生长、偶极-偶极相互作用的增强等。例如：在弱磁场存在的情况下具有易磁化轴的铁/亚铁磁性材料的生长可以诱发各向异性，导致沿易磁化轴方向上纳米线的形成。值得注意的是，磁场诱导合成通常是一种无模板的策略，与涉及表面活性剂和模板的传统方法相比，其合成纳米材料的方法是简单、清洁和通用的。此外，施加的磁场在纳米材料中会形成新的磁畴，改变晶体结构中离子的自旋状态，甚至决定最终产品的相分布。在同一反应系统中，存在磁场的情况下更容易形成较高磁化率的材料，这归因于磁场对吉布斯自由能的影响。此外，使用磁场来驱动纳米材料的组装还具有以下优点。首先，可以选择不同类型的磁性纳米材料(铁磁性、顺磁性、抗磁性)来改变响应；其次，磁场的强度和取向可以在空间和时间两者中变化或保持恒定；最后，与电场相比，磁场不会通过加速溶液中的带电粒子来感应电流，并且对表面电荷和pH不敏感。基于上述考虑，磁场无疑是制备有序结构的重要参数，包括薄膜、1D/2D/3D超晶格等材料。

近年来，磁场下的研究引起了人们广泛的关注。一方面，磁场影响材料形成的物理和化学过程，其涉及到对材料结构各个层面的调控，如形貌、相、晶体结构等。磁场作为一种外部驱动力，引起物质和能量传输的变化会影响过渡金属离子和有机自由基的化学反应，例如离子的运动和吉布斯自由能的变化。另一方面，磁场下的材料有着广泛的应用。目前，基于磁场下的催化、纳米医学和电子器件领域的工作被大量报道。本文简述了磁场下金属与非金属碳基材料的合成方法和机理分析，及其在生物医学、催化、电学等相关领域的应用。

一、磁场下纳米材料的合成

很大程度上，结构决定了材料的性质或器件的性能。纳米材料的生长过程决定了颗粒的形状和大小，同时施加外部磁场会影响颗粒的生长过程。颗粒生长是一个扩散辅助的过程，磁场决定了磁性

离子运动的优选方向，也使颗粒间的直接磁相互作用更加显著。

1. 磁场下镍基纳米材料的合成

铁磁性纳米材料的生长行为在化学合成过程中易受到磁场控制。镍，作为铁磁性纳米材料的代表，受到研究人员的特别青睐。不同的磁场强度和前驱体可以使镍基纳米材料的形态和微结构产生差异。

如图1(a)所示，研究人员在聚四氟乙烯里衬的不锈钢高压反应釜的上、下方各放置一块圆柱形NdFeB磁体，营造0.6 T的磁场环境。通过简单的溶剂热途径，在70 ℃下合成海胆状镍纳米粒子(UNNPs)，其中正丁醇和外加磁场在海胆状微结构的形成过程中起着关键作用。首先，正丁醇是一种弱极性溶剂，可用作表面活性剂，它能降低镍离子(Ni^{2+})分散后的迁移速度，同时正丁醇和水溶液之间的不充分相溶性会产生小的悬浮液液滴。当水合肼($N_2H_4 \cdot H_2O$)溶液滴加到正丁醇中，Ni^{2+}从正丁醇到液滴的迁移速率降低，导致Ni^{2+}的缓慢还原以及镍纳米晶体的成核和形成；其次，纳米晶体表面的Ni^{2+}持续还原，镍纳米晶体趋向表面能降低的方向，使得进一步生成镍纳米颗粒；最后，镍纳米颗粒某个晶面与磁力方向一致时，外磁场可以促使针状镍纳米晶的形成。在多次的外部磁场诱导下，最终形成了具有针状凸起的UNNPs。

如图2(a)所示，研究人员使用六水合氯化镍($NiCl_2 \cdot 6H_2O$)、水合肼、乙醇(C_2H_5OH)和聚乙二醇(PEG)-800作为前驱体，在9 T的HMF下，通过一步磁诱导的溶剂热法合成9 T磁场下PEG包覆的镍纳米团簇(9T-PUNNC)。9T-PUNNC的形成可能包含三个步骤：首先，乙醇溶剂中均匀分散的Ni^{2+}在水合肼的作用下还原成镍纳米晶体，PEG会覆盖生成的镍纳米晶体；接着，生成的镍纳米晶因其磁性相互作用和过饱和溶液，聚集成更大的二次团簇；最后，镍纳米团簇在反应体系中剧烈地热运动，在外加HMF的诱导下，团簇外的镍纳米晶进一步沿某些特殊晶面

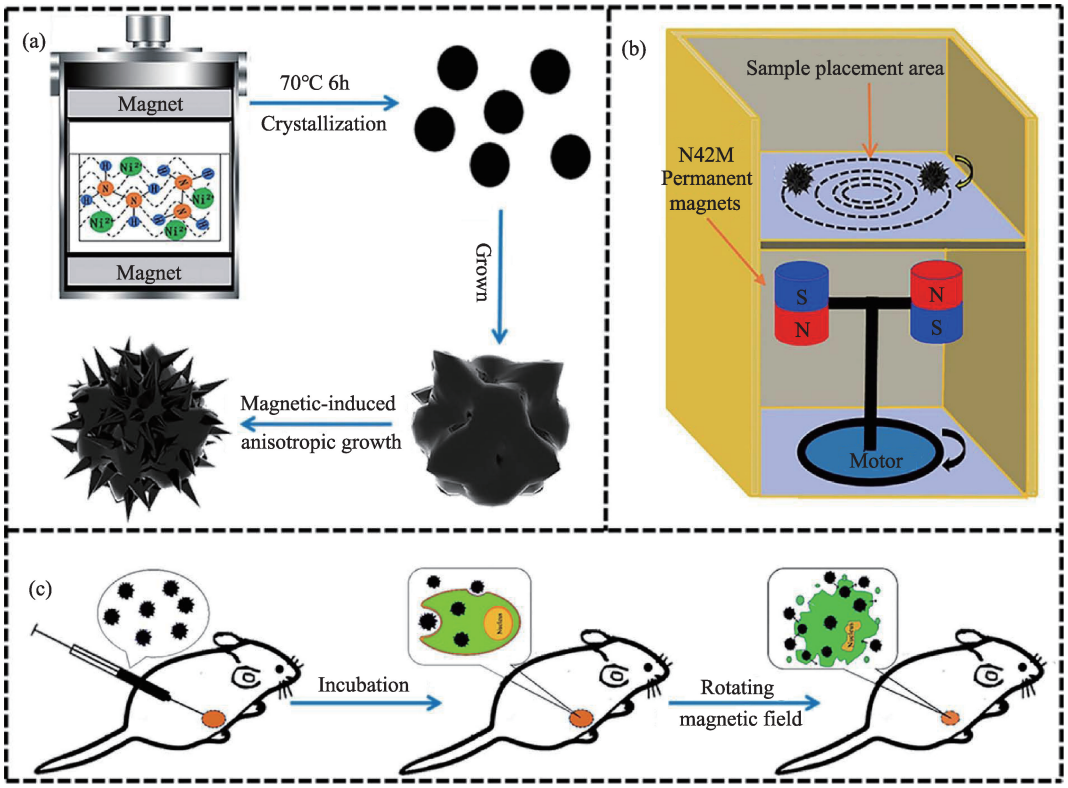

图1　(a)合成UNNPs的示意图；(b)低频旋转磁场(RMF)横截面示意图；
(c) UNNPs在RMF下产生的机械力抑制肿瘤生长(*Chem. Eng.* J. 2020, 400, 125823)

生长，形成表面具有针状凸起增加的镍纳米团簇。

9T-PUNNC的形貌呈海胆状，尺寸分布为230±50 nm (图2(b))，其不规则针状凸起的表面覆盖约有1.5 nm的PEG (图2(c))。单个9T-PUNNC中间位置的高倍透射电子图像，显示存在若干个平均尺寸约为10 nm的纳米晶体且成团簇结构。此外，这些纳米晶体的晶格间距为0.205 nm，与面心立方镍的(111)晶面一致(图2(d))。从单个9T-PUNNC的元素图谱看出，存在C、Ni和O元素，其中C和O来自PEG涂层(图2(e))。

1D镍纳米结构因其在磁性传感器和存储设备中的潜在应用，使人们产生了浓厚的兴趣。目前已证实磁场下溶剂热系统中Ni^{2+}的化学还原和1D结构的形成过程。在磁场下，镍微晶将沿着磁力线生长形成镍线，其中磁矩沿相同方向排列，导致在细线中形成单畴。相反，由于内部畴壁的不平行自旋，多畴结构中交换的能量增加。如图3所示，研究人员使用磁溶剂热法合成聚乙烯吡咯烷酮(PVP)导向的镍纳米线(PNNWs)。水热法合成的纳米材料主要经历成核和生长两个阶段。在很大程度上，初始成核速率由反应物浓度和反应条件决定，而结构导向剂有助于选择纳米材料的生长取向和速率。在上述反应系统中，PNNWs的形成包括以下过程。最初，乙二醇(EG)作为反应的粘性溶剂，减缓溶液中Ni^{2+}的成核和生长速度。当强碱性环境中的水合肼滴加到混合溶液中时，其强还原性会发生如下的氧化还原反应：$Ni^{2+} + 3N_2H_4 \rightarrow [Ni(N_2H_4)_3]^{2+}$; $[Ni(N_2H_4)_3]^{2+} + N_2H_4 \rightarrow Ni\downarrow + 4NH_3\uparrow + 2N_2\uparrow + H_2\uparrow + 2H^+$。显然，络合离子$[Ni(N_2H_4)_3]^{2+}$的优先形成使溶液中$Ni^{2+}$的浓度降低，这有助于再次减缓反应和成核的速率。此外，PVP添加剂同时充当结构导向剂、保护剂和稳定剂，其中的O和N原子可以向Ni^{2+}提供孤对电子，进一步形成配位络合物并降低游离的Ni^{2+}浓度。在整个反应过程中，外磁场作为诱导纳

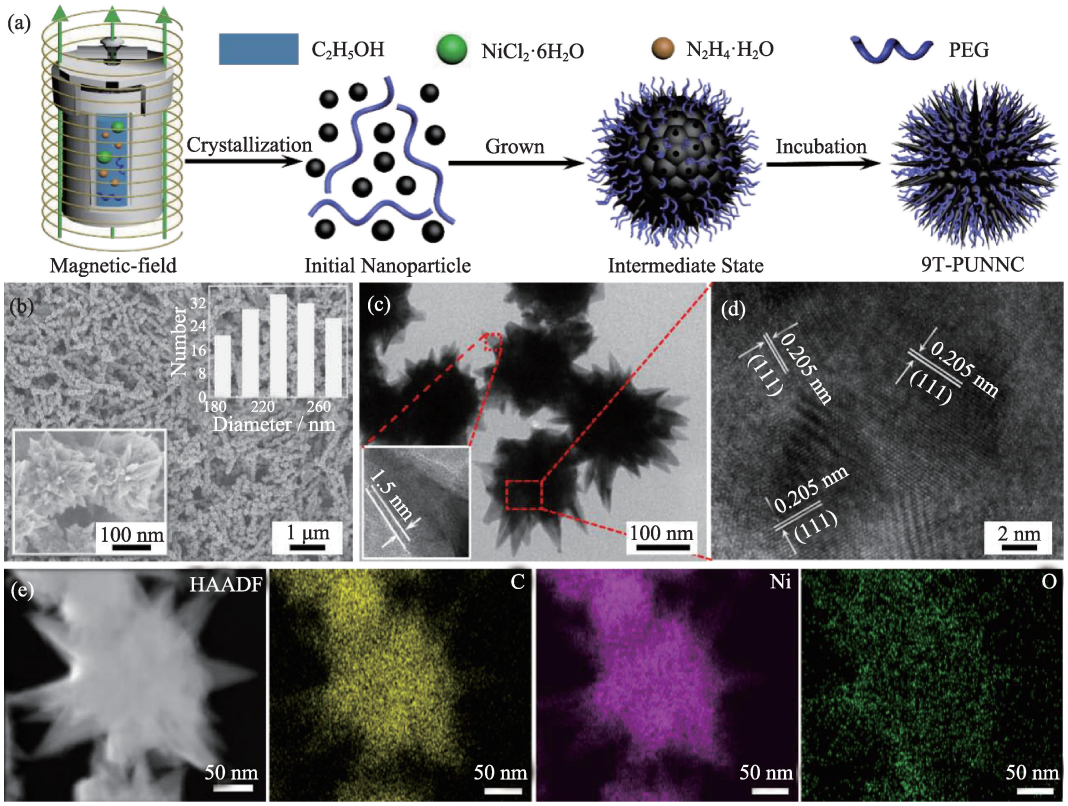

图2　9T-PUNNC的形成和结构(a)合成示意图；(b) 扫描电子显微(SEM)图像(左下插图)和尺寸分布(右上插图)；(c) 透射电子显微(TEM)图像和单根针状的高倍放大(插图)图像；(d) 高分辨透射电子显微(HRTEM)图像；(e) 高角度环形暗场(HAADF)和相应的元素映射(C、Ni和O)(*Theranostics*, 2022, 12(8), 3690-3702)

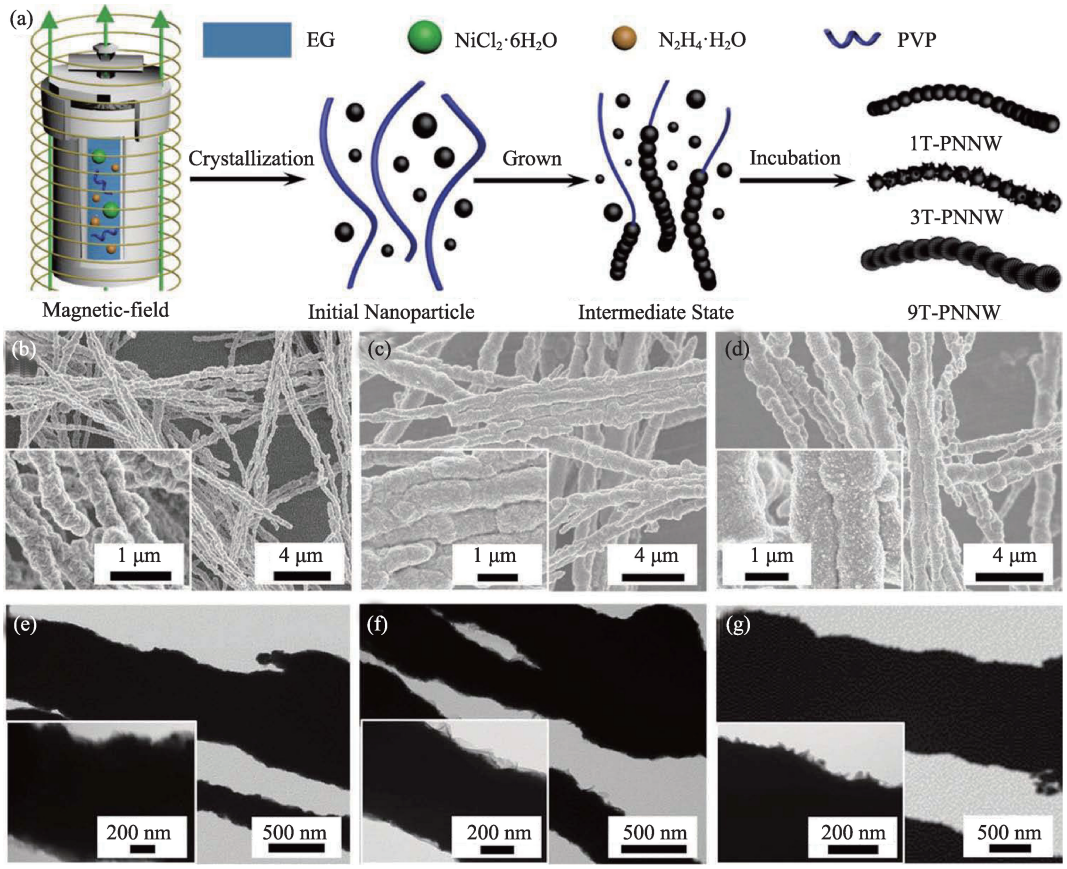

图3　PNNWs的形成和形貌(a)合成示意图；在不同磁场强度下合成的PNNWs的SEM和TEM以及相应局部放大(插图)图像(b，e) 1 T；(c，f) 3 T；(d，g) 9 T(*Adv. Mater. Interfaces*, 2022, 10(3), 2201604)

米线形成的关键因素，$[Ni(N_2H_4)_3]^{2+}$复合物优先迁移至磁力线，并沿磁力线排列，促进了初生镍核沿磁场方向的定向生长，导致1D平行线的形成(图3(a))。

2. 磁场下铁基纳米材料的合成

作为铁磁性材料的另一重要代表——铁基纳米材料，特别是四氧化三铁纳米材料因其独特的磁学性能和应用而受到纳米医学等诸多领域的广泛关注。

图4(a)展示了九水合硝酸铁($Fe(NO_3)_3·9H_2O$)作为前体、尿素($CO(NH_2)_2$)作为表面活性剂，合成中空磁铁矿纳米团簇(HMNC)可能形成的过程。首先，由硝酸铁和尿素组成的复合物在210℃下完全分解，形成磁铁矿纳米晶体；其次，随着浓度的增加，过饱和溶液中的磁铁矿纳米晶聚集成更大的次级固态磁铁矿纳米团簇(SMNC)；最后，位于SMNC最外层的磁铁矿纳米晶体将在奥斯特瓦尔德熟化过程中，以小的内部颗粒为代价进一步生长。外部磁场能诱导内部颗粒的溶化并加速向外迁移，使HMNC中的空腔形成。

如图4(b)所示，HMNC呈现出类似球状的结构，并以215±20 nm的尺寸均匀分布。图4(c)可知HMNC具有由空腔和介孔壳组成的分级介孔结构。明亮的同心圆衍射环(图4(c)的插图)体现了HMNC的多晶特征。图4(d)显示HMNC由若干个尺寸为40±5 nm的纳米晶体组成。此外，纳米晶的可见晶格条纹(0.297 nm)来自磁铁矿的(022)晶面(图4(d)的插图)。

3. 磁场下碳基纳米材料的合成

铁磁性纳米材料对于磁场有很好的响应，科研人员对碳基纳米材料也进行了探索。

磁场对石墨烯碳量子点(GQDs)的合成也有辅

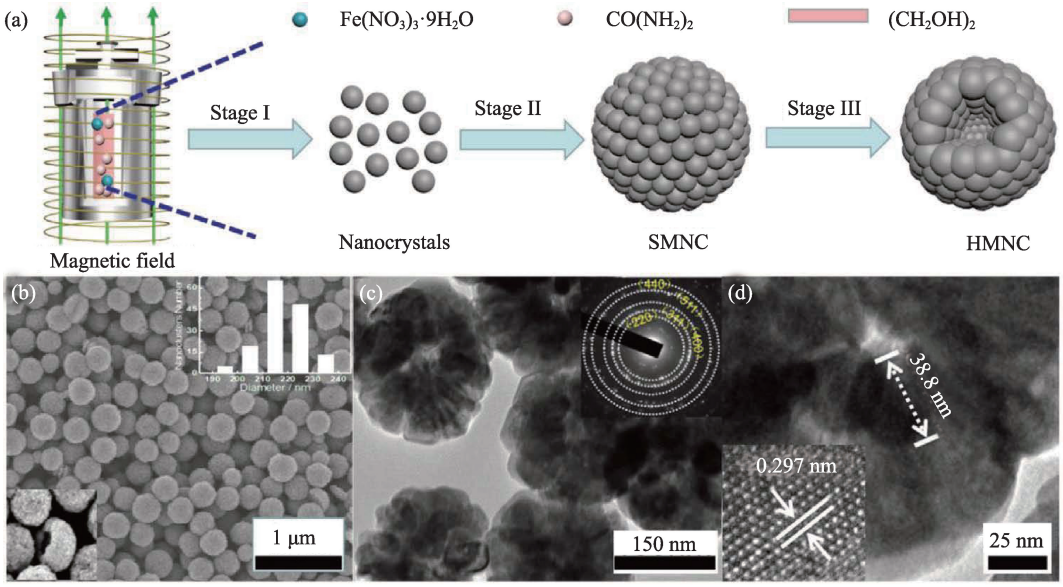

图4　HMNC的合成与结构(a)磁诱导HMNC的形成示意图;(b) HMNC的SEM图像、尺寸分布(右上插图)和单个HMNC的SEM图像(左下插图);(c) HMNC的HRTEM图像和选择性区域电子衍射(SAED)图像(插图);(d)单个HMNC的HRTEM图像和磁铁矿晶格条纹(插图)(*Small*, 2021, 17 (31), 2100794)

助作用。如图5(a)所示,研究人员在9 T的HMF下,通过一步溶剂热处理合成了9T-GQDs,其中苯酚作为碳前体,过氧化氢作为氧化剂,丙酮作为有机溶剂。9T-GQDs自下而上的形成涉及液-气界面生长,这已被证实是制备二维纳米结构的有效策略。整个过程应该包括两个步骤。首先,苯酚分子倾向于在外部HMF下通过苯环中的电子云共轭形成层状大分子。过氧化氢在高温下分解的氧分子和气态水分子在丙酮溶剂中形成气泡,而HMF强度有助于增加氧分子的溶解度,促进反应系统中产生更多的气泡;接着,层状酚大分子可以通过分子吸附或氢键作用吸附到气泡(氧分子和水分子)的表面;然后,大分子中C-H与苯环之间的化学键在高温下断裂形成碳基自由基,进而形成二维小碳碎片。电子从碳基自由基中逃逸,与溶解氧反应分子和水分子生成超氧阴离子的自由基和羟基自由基。在HMF下,高活性超氧阴离子具有优异的稳定性,并与二维的小碳片段反应,形成包括超氧键在内的官能团。由溶剂气化形成的氧和水分子引起的高温和高压,促使碳碎片因其过饱和而形成功能性更强的GQDs;此外,外部HMF下增加的氧分子会影响气泡表面小碳碎片的结晶,生成更多的内部空位缺陷。

9T-GQDs的TEM图像显示它们分散良好(图5(b)),其晶面间距约为0.346 nm(图5(b)插图),对应于石墨的(002)晶面。石墨烯的厚度约为0.6 nm,从AFM图像可知9T-GQDs在约1.7 nm处有高度分布峰(图5(c)),因此9T-GQDs由两层或三层的石墨烯组成。如图5(d)所示,X射线衍射(XRD)图中约22°处的特征峰与块状石墨匹配。图5(e)中的拉曼光谱显示了9T-GQDs中G/D带的高强度比(1.21),表明其高度石墨化。

二、磁场下材料的应用

随着磁场下材料的合成和组装的迷人发展,相关的多领域应用也应运而生。目前,磁场下的材料在生物医学、催化和电子器件等方面高速发展,成为科研人员的重要研究课题。

1. 磁场下镍基纳米材料的结构调控在生物医学领域的应用

如前文图1(b)所示,研究人员在进行RMF诱导细胞死亡和肿瘤治疗前,设计出一种由永磁铁制成

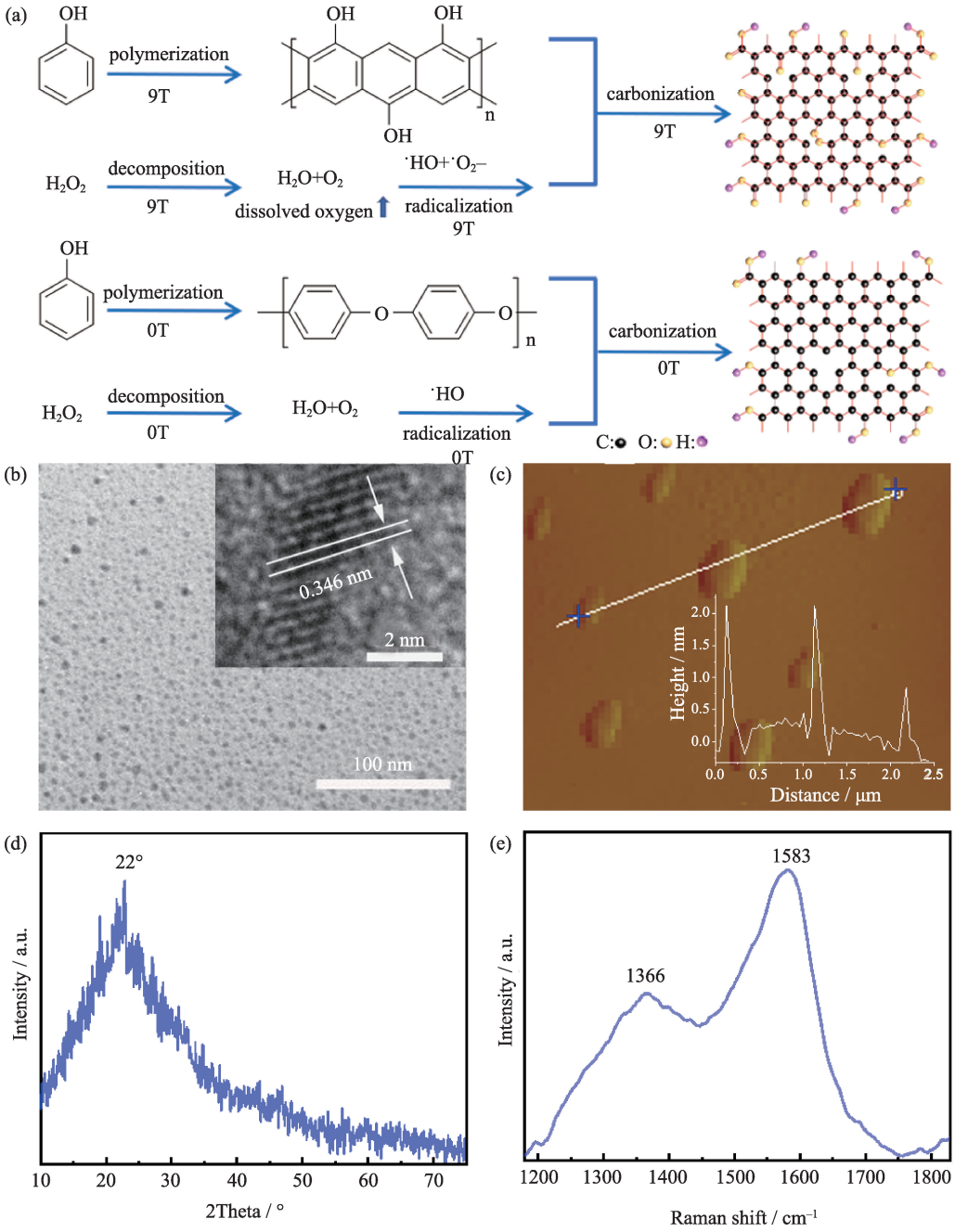

图5　9T-GQDs的示意图、形态、结构和相位表征(a)形成0T-GQDs和9T-GQDs的示意图；(b)9T-GQDs的TEM和HRTEM图像(插图)；(c)9T-GQDs的原子力显微镜(AFM)图像和对应于(c)中所示白线的高度轮廓(插图)；9T-GQDs的XRD衍射图(d)和拉曼光谱(e)(*Biomaterials*, 2020, 232, 119700)

的设备，该设备可以产生强度为0.1或0.4 T、频率只有4.2 Hz的低频RMF。四个永磁体被分为2组，每组分别安装在具有北极和南极的旋转电机上，并置于长44 cm、宽41 cm、高52 cm的盒子中。

后期的生物实验在上述的RMF装置上进行，通过将UNNPs经皮下注射到荷瘤小鼠的肿瘤部位，再在不同磁场强度的RMF作用下造成肿瘤组织的非程序性死亡，达到治疗肿瘤的目的(图1(c))。如图6所示，以接种人乳腺癌细胞系(MDA-MB231)的荷瘤裸鼠为模型，得到UNNPs在不同磁场强度

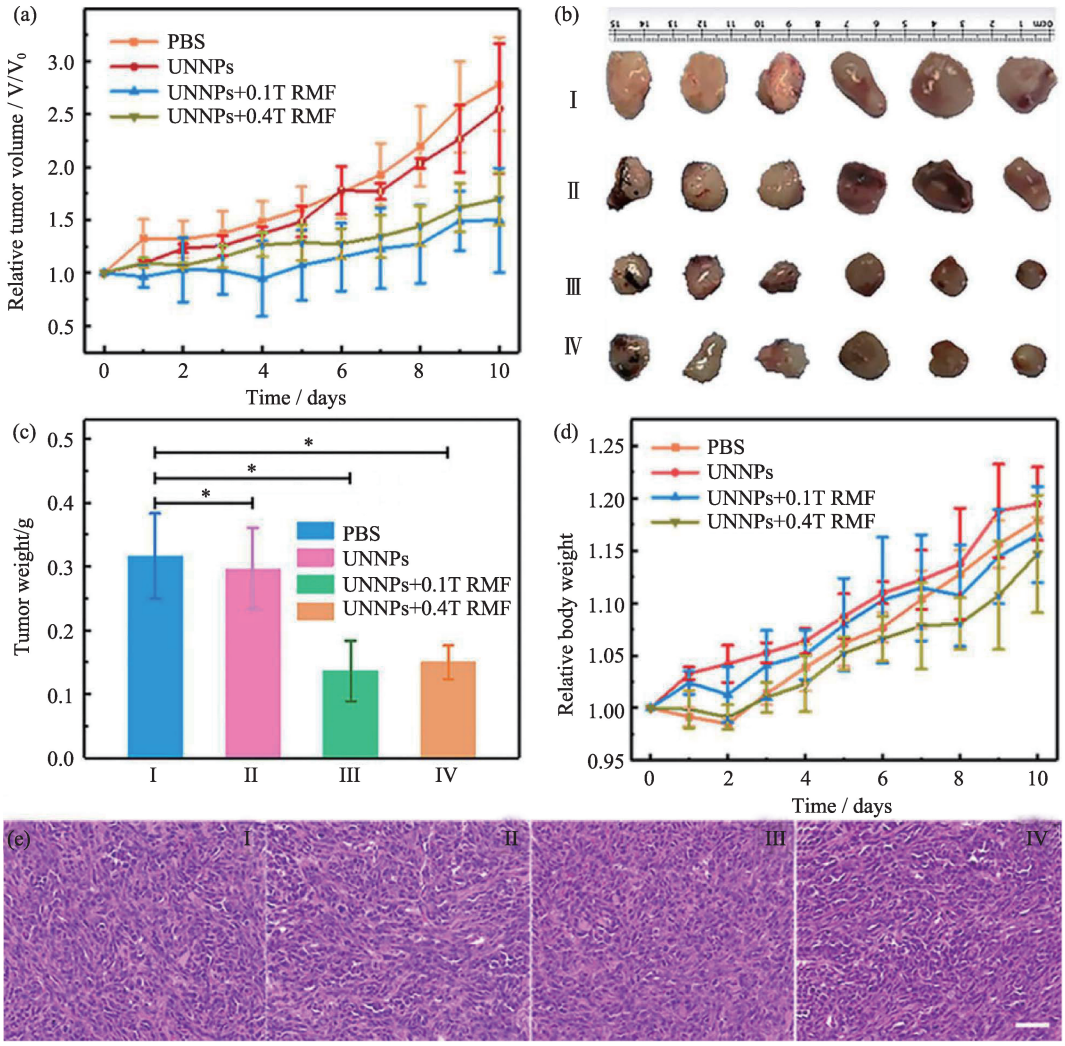

图6　体内疗法(a)接受不同治疗后小鼠的肿瘤生长曲线(每个治疗组6只小鼠);(b)在治疗结束时(第10天)从每只小鼠收集的肿瘤的典型照片;(c)在治疗结束时(第10天)从小鼠收集的肿瘤的平均重量;(d)接受不同治疗后小鼠的相对体重;(e) H&E染色的肿瘤切片。I) PBS,II) UNNPs,III) UNNPs + 0.1 T RMF,IV) UNNPs + 0.4 T RMF。比例尺为50 μm(*Chem. Eng.* J. 2020, 400, 125823)

的RMF作用下体内治疗的结果。在没有RMF诱导的情况下,PBS/UNNPs治疗组中的肿瘤快速生长;相反,用UNNPs和RMF治疗组中小鼠体内肿瘤的生长速度(0.1/0.4 T)被明显抑制(图6(a))。在治疗后第10天收集所有的肿瘤并称重,发现肿瘤质量、体积与肿瘤生长曲线一致(图6(b)-6(c)),说明UNNPs和RMF能够抑制肿瘤的生长。此外,四组中所有小鼠的体重增加量近似(图6(d)),表明UNNPs具有良好的生物相容性。接着,对四组肿瘤切片进行HE染色来评估治疗过程中可能出现的副作用。经组织学分析显示,来自对照组和实验组的肿瘤组织未被大量破坏,仍有正常的膜和核结构(图6(e)),表明磁力诱导肿瘤疗法对周围组织无明显副作用,是一种安全有效的肿瘤治疗方法。

2. 磁场下铜基纳米材料的结构调控在电催化领域的应用

研究人员在一台能产生原位磁场的小型无冷冻剂系统中进行电化学测试,其工作电极(碳纸)垂直于磁感应线。如图7所示,CO_2RR具有复杂的反应路径(图7(a))。目前认为CO_2分子的活化是第一步,被吸附的*CO_2被还原成*OCHO或*COOH后,进一步被还原成HCOOH和*CO。其中*CO是CO_2RR的重要中间体,它可以通过随后的质子耦合

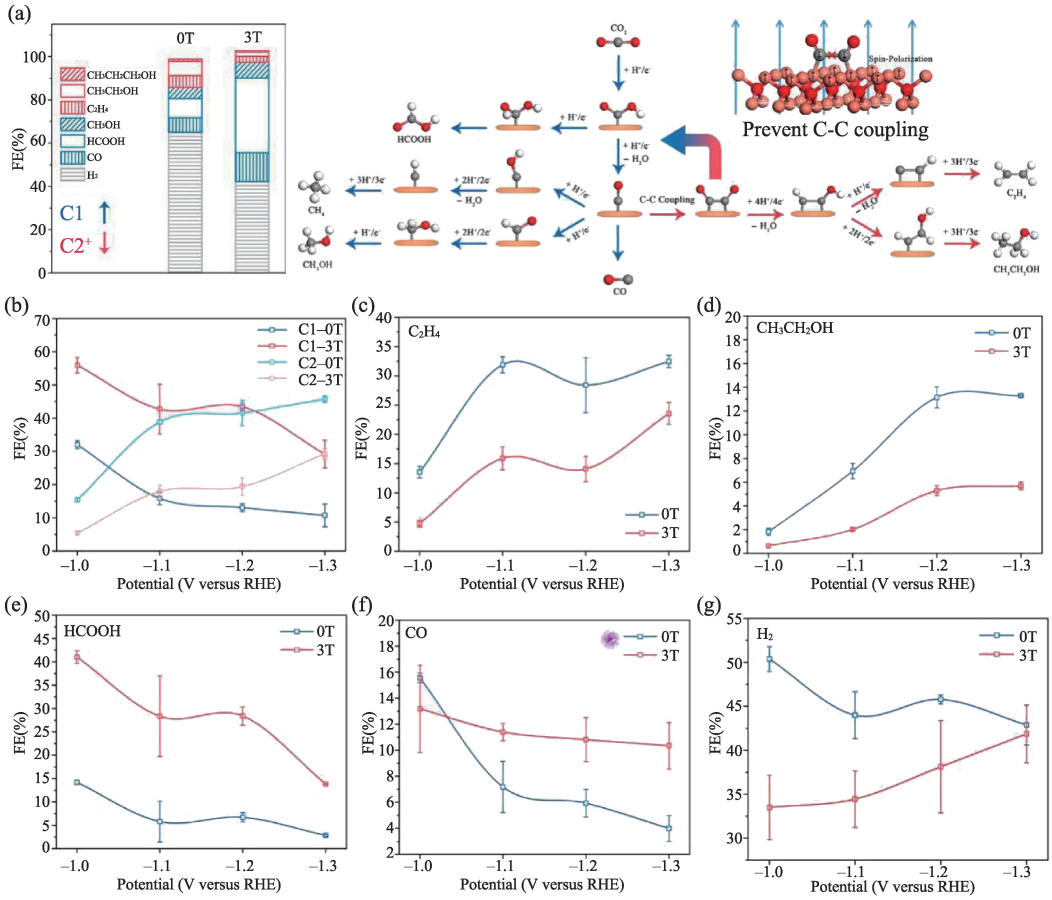

图7　(a)不同磁场下-1.1V VRHE中的法拉第效率和Cu_2O催化剂上CO_2RR的反应路线图；通过防止C-C耦合，红色路径在磁场中被抑制。有/无磁场的C_1、C_2 (b)、C_2H_4 (c)、CH_3CH_2OH (d)、HCOOH (e)、CO (f)和H_2 (g)的法拉第效率图。所有测试均在0.1 M碳酸氢钾中进行，误差条代表标准差(n = 3)(*Magnetochemistry*, 2023, 9(3), 65)

电子转移被还原成C_1产物(CH_3OH和CH_4)，或者通过解吸形成CO。此外，相邻活性位点上的一对*CO可以进一步偶联形成C_{2+}产物(C_2H_4和CH_3OH)。研究人员收集了在高超电势区有/无磁场的各种电势下的产物(−1.0 V_{RHE}− −1.3 V_{RHE})，显示随着H_2和C_{2+}产物(C_2H_4、C_2H_5OH和C_3H_8O)的法拉第效率降低，C_1产物(HCOOH和CO)的法拉第效率显著增加(图7(b)-7(g))。

3. 磁场下薄膜材料的结构调控在电学领域的应用

研究人员在水平旋转的HMF (HR-HMF)中，成功实现了n型聚合物P(NDI2OD-T2)薄膜的高度离面排列，达到了面外取向98.2%的正面层状织构的变化且π-π堆积晶体相关长度增加了1.6倍。随后，研究人员提出了HR-HMF制备的平面外取向膜的整体形成机制(图8(a)-8(b))。P(NDI2OD-T2)是一种典型的基于NDI的共轭聚合物，有高度延伸的π共轭结构和足够的分子间接触。此外，P(NDI2OD-T2)溶液显示了溶剂诱导的预聚集，具有高度平坦的主链构型。众所周知，π共轭结构具有抗磁性，最大抗磁性的轴近似垂直于共轭环的平面。因此，这些预聚体被认为是类似于多层石墨烯的2D圆盘材料。示意图中展示出静态和HR-HMF分子之间的排列差异。具体而言，盘状反磁性分子应该与垂直其难磁化轴的磁场方向对齐，即与平行于共轭平面的磁场方向对齐。静磁场下的排列将显示典型的简并情况，其中垂直磁场方向的空间角度分布是等能量的(图8(a))；也就是说，难磁化轴(共轭平面的法线)可以位于垂直磁场平面中的任何角度。因此，共轭

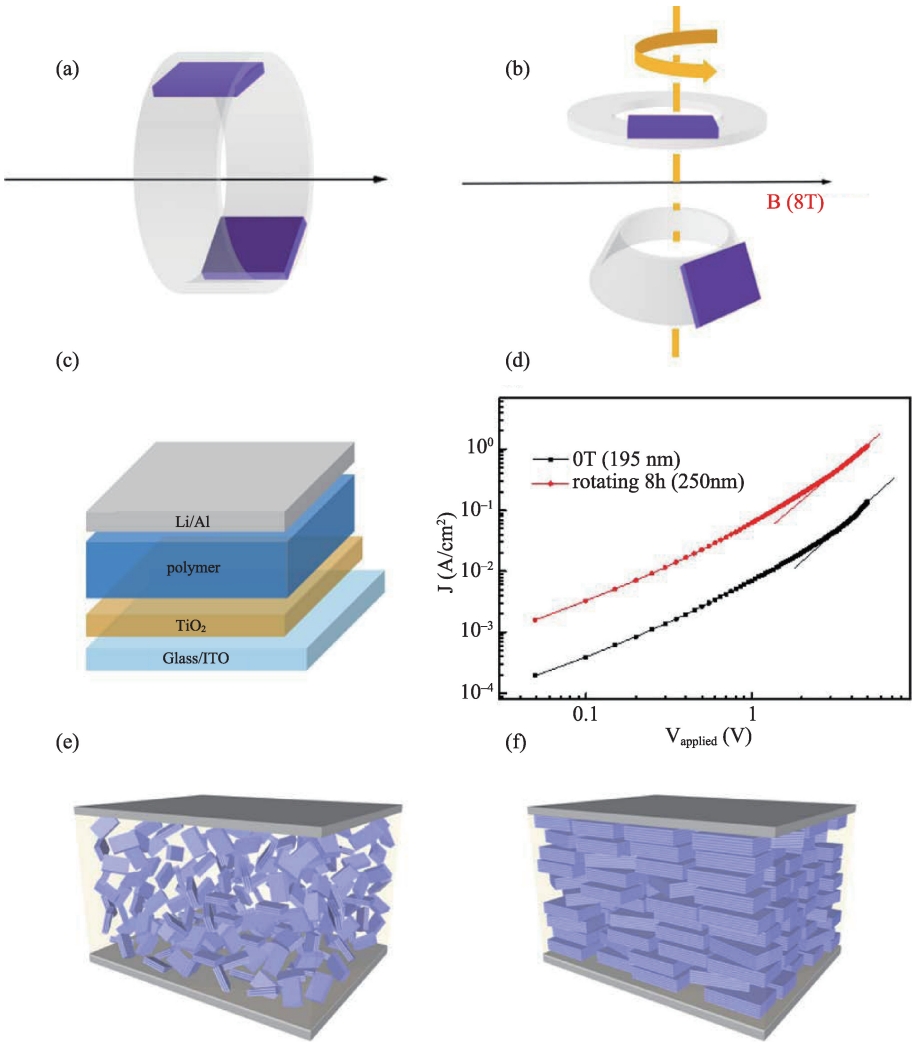

图8　在静磁场(a)和HMF(b)下旋转的层状和圆柱形微畴的等能态；(c)纯电子设备的示意性配置；(d)基于P(NDI2OD-T2)膜的纯电子器件的电流密度-电压(J-V)特性，该P膜在无磁场和样品旋转8小时的磁场下浇铸。图中线条是使用SCLC模型的拟合结果。纯电子器件中不含(e)和含(f)平面外取向膜的P(NDI2OD-T2)示意图(*J. Phys. Chem. Lett.*, 2021, 12(14), 3476-3484)

环平面可以绕磁场轴旋转，而不改变系统的势能。然而，在表面法线轴上水平旋转的样品会有效地打破简并。在这种情况下，只有共轭平面法线沿着旋转轴的薄层组才能在整个旋转周期中保持最低的自由能状态(图8(b))。HR-HMF方法对无序状态的有效抑制，及所有P(NDI2OD-T2)预聚体的高度平坦和均匀排列，都有效地促进了相邻分子链间的层状堆积和π-π堆积，从而在膜内形成更大的畴。总的来说，D-A聚合物分子预聚集的情况普遍存在，而HR-HMF策略提供了一种实现面外取向的有效方法，成功制备出超高面取向度的薄膜。

如图8(c)所示，纯电子器件由ITO/TiO_2/活性层/Li/Al的结构构成。图8(d)为在SCLC配合下未对准薄膜和HR-HMF对准薄膜的J-V曲线，时间均为8小时。所有曲线都在大多数研究的电压范围内，且电流密度与施加电压呈平方关系，证实了由HR-HMF引起的正面堆积的增强，实质上改善了面外方向上电荷的输运性质。与没有HR-HMF的滴铸膜相比，通过HR-HMF排列的P(NDI2OD-T2)膜表现出更高程度的正面堆叠(图8(e)-8(f))。

三、总结和展望

本文简述了镍基、铁基和碳基纳米材料在磁场下的合成及形成特殊形貌的可能机理；并阐述了磁

场调控材料的结构在生物医学、电催化和电学等相关领域的应用，证实了磁场诱导法已经发展成为控制纳米材料合成和组装的有效手段，展现出磁场下材料的广泛应用，为今后磁场下的相关研究提供了借鉴和参考意义。

磁场下的探究工作还有以下几个方面供参考。首先，在配位化学中发挥了重要作用，例如多铁性金属有机框架(MOFs)的生长，电性和磁性共存的多铁性化合物受到了广泛的关注；其次，磁场可以用于手性选择反应，例如碳纳米管和左旋化合物，单壁碳纳米管(SWNTs)中手性指数的微小变化可以使导电性由金属态向半导体态转变；然后，磁场能够调节贵金属催化剂的活性，在大多数催化反应中，贵金属催化剂的选择性和活性取决于表面原子的排列，而强磁场可以作为调节表面结构(如悬挂键和晶面指数)的替代条件来调节其催化行为，但是在特定位置实现氮掺杂并精确的控制掺杂含量仍然是一个挑战；最后，在氮掺杂的石墨烯合成过程(尤其是液相合成)中使用强磁场，可以有效地控制氮掺杂的类型和含量。

此外，磁场下材料合成和组装的几个基础科学问题需要进一步研究：(1) 磁场下反应介质(如水和其他有机溶剂)物理性质的变化，包括电导率、介电常数、溶解度和pH值；(2) 磁场下反应物的输运行为；(3) 磁场与反应物分子之间的相互作用能。随着强磁场技术的发展，我们相信并期待更多具有所需结构和性能的材料可以通过磁场诱导法制备出来。

科苑快讯

甜蜜的记忆：糖会影响大脑“可塑性”并有助于学习、记忆和恢复

复杂的糖分子控制着神经元周围网络的形成(图中绿色部分)，这些网络包围着神经元，帮助稳定大脑中的连接。研究人员发现葡糖氨基葡聚糖(glycosaminoglycans，GAG)上的硫酸盐基团影响小鼠的大脑可塑性，为人类记忆过程和神经损伤的潜在治疗提供了新的见解。

确定GAG的功能可以帮助我们了解人类记忆和学习的工作方式，并提供修复损伤后神经连接的方法。研究人员在2023年8月16日的美国化学学会(American Chemical Society，ACS)秋季会议上公布了他们的研究结果。

使水果、糕点变甜的糖其实只是糖类中的几个简单品种。它们串在一起时，可以制造出各种各样的复合糖。GAG然后通过连接其他化学结构(包括硫酸盐基团)得以形成。

研究大脑中的GAG化学成分，可以了解大脑的可塑性，未来利用这些信息还有望恢复或增强与记忆有关的神经连接。这些糖调节着许多蛋白质，它们的结构在发育和疾病过程中会发生变化。

在大脑中，最常见的GAG形式是硫酸软骨素(chondroitin sulfate)，它存在大脑许多细胞周围的胞外基质中。硫酸软骨素还可形成一种被称为“神经周围网”(perineuronal nets)的结构。这种结构包裹着单个神经元，并稳定它们之间的突触连接。

通过改变硫酸化基序或附加于糖链的硫酸盐基团模式，可以改变GAG的功能。这使研究人员有朝一日能够调节这些功能，作为中枢神经系统损伤、神经退行性疾病或精神病的潜在治疗方法。

当研究组删除负责在小鼠硫酸软骨素上形成两种主要硫酸化模式的Chst11基因时，缺陷在它们的神经周围网络中形成。然而在没有硫酸化基序的情况下，神经网络的数量实际上增加了，从而改变了神经元之间突触连接的类型。而且这些老鼠无法认出其之前接触过的同类，表明这些模式影响了社会记忆。实验证明，在青春期或成年期操纵这些网络，可能会潜在地重新连接或加强某些突触连接。

(高凌云编译自2023年8月17日SciTechDaily网站)