

# MIL-101(Fe)负载左旋咪唑制备缓控药物载体的研究

谷娜<sup>1</sup>, 赵东亚<sup>2</sup>, 高金龙<sup>2</sup>, 董静文<sup>2</sup>, 李宛萍<sup>3</sup>, 刘欣伟<sup>2\*</sup>

(1. 河北科技大学理学院, 河北石家庄 050018;

2. 河北科技大学化学与制药工程学院, 河北石家庄 050018;

3. 石家庄四药研究院, 河北石家庄 050011)

**摘要:**利用水热法制备金属有机骨架材料 MIL-101(Fe), 并用作模型药物左旋咪唑的药物递送载体。利用 XRD、SEM、TEM、TGA、IR、Zeta 电位和 N<sub>2</sub> 吸附解吸等温线对材料进行表征, 通过 MTT 法评价材料的细胞毒性。结果表明, 合成的 MIL-101(Fe) 为八面体结构的晶体, 粒径约为 1 μm。左旋咪唑质量浓度为 5 mg/mL 时 MIL-101(Fe) 载药量为 22.20%。左旋咪唑释放研究在模拟肿瘤细胞酸性环境 (pH=5.5) 和模拟静脉内溶液 (pH=7.4) 2 种不同 pH 的模拟体液中进行, 体外释放 72 h 的结果表明, pH 5.5 时释放率为 57.31%, 高于 pH=7.4 时的释放率; 体外释放 48 h 后药物释放量趋于稳定, 说明 MIL-101(Fe) 具有一定的缓释作用, MIL-101(Fe) 对 MCF-7 细胞无毒。

**关键词:** MIL-101(Fe); 左旋咪唑; 药物载体; 缓释

中图分类号: R944

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)06-0196-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.06.040

## Preparation of sustained drug delivery system by loading levamisole with MIL-101(Fe)

GU Na<sup>1</sup>, ZHAO Dong-ya<sup>2</sup>, GAO Jin-long<sup>2</sup>, DONG Jing-wen<sup>2</sup>, LI Wan-ping<sup>3</sup>, LIU Xin-wei<sup>2\*</sup>

(1. School of Sciences, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. School of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Hebei University of Science and Technology,

Shijiazhuang 050018, China; 3. Medicines Research Institute, SSY Group Limited, Shijiazhuang 050011, China)

**Abstract:** MIL-101(Fe), a metal-organic framework material, is prepared by hydrothermal method and applied as carrier for delivering model drug levamisole. MIL-101(Fe) is characterized by means of XRD, SEM, TEM, TGA, IR, Zeta potential and N<sub>2</sub>-adsorption and desorption isotherm, and its cytotoxicity is evaluated by means of MTT method. The results show that the synthesized MIL-101(Fe) is a crystal with an octahedral structure and its particle size is about 1 μm. The drug loading rate of MIL-101(Fe) for levamisole at a concentration of 5 mg·mL<sup>-1</sup> is 22.20%. Studies on release of levamisole from MIL-101(Fe) are performed in two simulated body fluids respectively with different pH values; the simulated the tumor cells acidic environment (pH=5.5) and the simulated intravenous solution (pH=7.4). Vitro release for 72 hours indicates that the release rate reaches 57.31% at pH=5.5, which is higher than that at pH=7.4. The amount of drug released tends to be stable after 48 hours in vitro release, indicating that MIL-101(Fe) has a certain sustained release effect. It is also verified that MIL-101(Fe) is non-toxic to MCF-7 cells.

**Key words:** MIL-101(Fe); levamisole; drug carrier; sustained release

近几十年来,人们致力于寻找新型纳米材料作为具有挑战性的治疗剂的载体,用以解决与药物溶解性、生物利用度、免疫相容性和毒性相关的重要缺陷<sup>[1]</sup>。金属有机骨架(Metal Organic Frameworks, MOFs)是一种由金属离子与合适的有机连接物相结合而成的新型晶形多孔材料<sup>[2-3]</sup>,广泛的应用于气体储存<sup>[4-5]</sup>、分离<sup>[6-7]</sup>、发光<sup>[8-9]</sup>、化学传感<sup>[10-11]</sup>和催化<sup>[12-13]</sup>等方面。其具有高表面积、晶体开放结构、可调节孔隙大小和功能<sup>[14-17]</sup>等优点,有希望成为新

型药物载体<sup>[18-19]</sup>。其中,拉瓦锡骨架材料(materials of instiute Lavoisier frameworks, MIL)系列占据重要的地位, MIL 材料最早是 Férey 等<sup>[20]</sup>用过金属(铁、铬、铝、钒等)与含羧酸配体合成。Huxford 等<sup>[21]</sup>发现 Férey 研究组用铬基 MIL-101 和 MIL-100 对布洛芬的负载和释放,结果表明,2 种材料都具有缓释功能且 MIL-101 药物负载量较大。随后 Férey 等<sup>[22]</sup>用 MIL-101(Cr) 和 MIL-101(Fe) 依旧对布洛芬进行负载和释放,研究结果表明,对插入金属骨架

收稿日期:2021-07-01;修回日期:2022-04-02

作者简介:谷娜(1981-),女,博士,副教授,主要从事水环境污染功能材料研究,824359149@qq.com;刘欣伟(1987-),男,博士,讲师,研究方向为化学工程与工艺,通讯联系人,liuxinwei@hebest.edu.cn。

的药物的量与构成骨架的金属之间基本无关。鉴于Cr元素对人体细胞具有一定的危害,Fe元素是人体必需的微量元素,因此对人体无毒、生物利用度高的铁离子MIL材料是给药系统的最佳候选之一<sup>[23]</sup>,应用于生物医学领域。MIL-101(Fe)的结构式及其制备参见文献<sup>[24-26]</sup>。

近年来研究发现,广谱驱虫药左旋咪唑(LMS)具有免疫调节作用,可恢复被抗肿瘤药物抑制的巨噬细胞和T淋巴细胞的正常功能。现已用于肿瘤、慢性炎症和原发性免疫缺陷病的辅助治疗<sup>[27]</sup>。笔者主要研究了可生物降解的MIL-101(Fe)作为左旋咪唑抗癌载体的潜在应用,评估MIL-101(Fe)对左旋咪唑的负载效率,并研究了左旋咪唑的释放曲线,以确定MIL-101(Fe)质量浓度对左旋咪唑释放性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料及仪器

六水三氯化铁( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ),天津市大茂化学试剂厂生产;对苯二甲酸( $\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{BDC}$ ),阿拉丁试剂公司生产;*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF),天津市津东天正精细化学试剂厂生产;无水乙醇,分析纯,北京市永大化学试剂公司生产;左旋咪唑,自制;甲醇,天津市永大化学试剂有限公司生产;其他药品及试剂均为分析纯。

KQ5200DE 数控超声波清洗机、TGL-16 台式高速冷冻离心机、DZ-1A II 真空干燥箱、Frontier 红外光谱仪、Axios X 射线衍射仪、JEM-2100 透射电子显微镜、UV-1206 紫外分光光度计、JJ-1 精密定时电动搅拌器、SHA-B 水浴恒温振荡器、STD-2960 差热循环分析仪、S-4800-I 场发射扫描电子显微镜、NOVA2000 比表面积测试仪。

### 1.2 MIL-101(Fe)的合成

MIL-101(Fe)的制备<sup>[28-29]</sup>:称取233.48 mg的 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、71.24 mg的 $\text{H}_2\text{BDC}$ ,分别溶于40 mL DMF中,超声使其完全溶解。将溶解的 $\text{H}_2\text{BDC}$ 滴加到 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 中,超声10 min使其充分混合,将混合液倒入高压反应釜内110℃反应20 h,在烘箱内缓慢冷却后,离心回收棕色固体,用去离子水和无水乙醇交替洗涤3次。将洗涤后的产物于350 mL、60℃恒温的无水乙醇中进行活化,3 h后抽滤,真空干燥8~10 h,得MIL-101(Fe)。

### 1.3 药物负载

制备的MIL-101(Fe)与左旋咪唑按不同质量

比混合<sup>[31]</sup>。将MIL-101(Fe)(0.002 g)溶解在20 mL甲醇中,并加入一定量的左旋咪唑。悬浮液避光在室温下搅拌24 h,离心分离,收集上清液,甲醇洗涤,并在45℃下真空干燥。利用紫外-可见分光光度法在206 nm下测量包封率和载药量:

$$\text{包封率}(\%) = [(m_0 - m_f)/m_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{载药率}(\%) = (m_0 - m_f)/m_{\text{ads}} \quad (2)$$

式中: $m_0$ 为溶液中左旋咪唑的初始质量,mg; $m_f$ 为最终上清液中左旋咪唑的质量,mg; $m_{\text{ads}}$ 为用于装载左旋咪唑的干载体的质量,mg。

### 1.4 体外释放

LMS@MIL-101(Fe)采用透析袋在pH=7.4和pH=5.5的缓冲溶液中进行体外释放<sup>[31]</sup>。将样品(40 mg)均匀分布在PBS缓冲液(10 mL, pH=7.4或pH=5.5,含有0.5%吐温80)中,并将悬浮液倒入透析袋中。然后将透析袋置于装有60 mL PBS缓冲液的锥形瓶中,将其置于(37±0.5)℃的水浴恒温器中,速率为100 r/min。定期除去5 mL释放介质,并添加等量的新鲜PBS缓冲液。稀释后,通过紫外分光光度计测量吸光度。代入标准曲线 $A = 0.10008C + 0.00091$ ( $R^2 = 0.9996$ )中计算其浓度。

$$\text{累积释药量}(Q_n) =$$

$$C_n \times V_0 + (C_1 + C_2 + \dots + C_{n-1}) \times V \quad (3)$$

$$\text{累积释药率}(\%) = (Q_n/M) \times 100\% \quad (4)$$

其中: $Q_n$ 和 $C_n$ 分别为第 $n$ 个采样点的累积释放量和第 $n$ 个采样点的浓度; $V_0$ 和 $V$ 分别为释放介质的总体积和每个样品的体积; $M$ 为理论总剂量。

绘制累积释放速率随时间变化的曲线,考察MIL-101(Fe)载药后的体外释放性能。

### 1.5 细胞毒性

MTT法用于检测MIL-101(Fe)对人乳腺癌细胞MCF-7的细胞毒性<sup>[30-31]</sup>。MCF-7细胞接种于96孔微量培养板中,置于含5%二氧化碳的培养箱中,37℃培养24 h后分别用不同质量浓度的MIL-101(Fe)或LMS@MIL-101(Fe)溶液(10~50 μg/mL),以不含任何物质的培养基作为空白对照。24 h后,除去细胞培养基,用PBS缓冲液洗涤细胞3次。通过酶标仪测量490 nm处的吸光度(OD值)。利用MTT方法检测细胞存活率,重复3次取平均值。

$$\text{细胞抑制率}(\%) =$$

$$1 - ([OD]_{\text{实验}}/[OD]_{\text{对照}}) \times 100\% \quad (5)$$

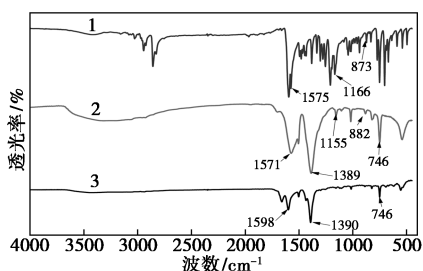
式中:[ $OD$ ]<sub>实验</sub>为实验组的吸光度;[ $OD$ ]<sub>对照</sub>为对照组的吸光度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表征分析

#### 2.1.1 IR 分析

左旋咪唑、MIL-101(Fe) 和 LMS@MIL-101(Fe) 的红外光谱如图 1 所示。由图 1 中可以看出, 在 MIL-101(Fe) 的红外光谱中, 对苯二甲酸的羧基在  $1598\text{ cm}^{-1}$  和  $1390\text{ cm}^{-1}$  处有对称和反对称振动峰,  $759\sim 481\text{ cm}^{-1}$  为 C—H 异相弯曲振动。与 MIL-101(Fe) 相比, 负载左旋咪唑的 MIL-101(Fe) 在  $1571\text{ cm}^{-1}$  处具有 C—S 特征峰, 在  $1155\text{ cm}^{-1}$  处具有 C—N 键伸缩振动峰。MIL-101(Fe) 在  $1598$ 、 $1389\text{ cm}^{-1}$  和  $746\text{ cm}^{-1}$  处的峰保留在 LMS@MIL-101(Fe) 中, 表明 MIL-101(Fe) 已负载上左旋咪唑<sup>[29]</sup>。

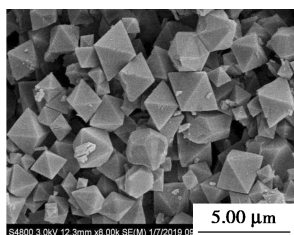


1—LMS; 2—LMS@MIL-101(Fe); 3—MIL-101(Fe)

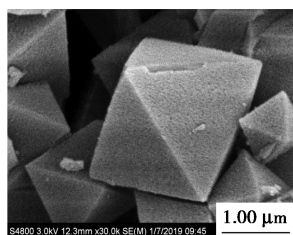
图 1 LMS、LMS@MIL-101(Fe)、MIL-101(Fe) 的红外光谱

#### 2.1.2 TEM 与 SEM 分析

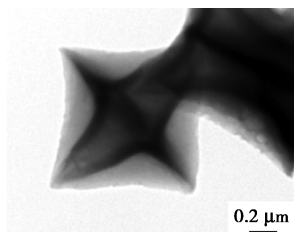
MIL-101(Fe) 的 TEM 和 SEM 图如图 2 所示。从图 2(a)~图 2(d) 中可以看出, 材料呈规则八面体结构, 粒径为  $1\text{ }\mu\text{m}$ , 结晶度较高。从图 2(e)、图 2(f)



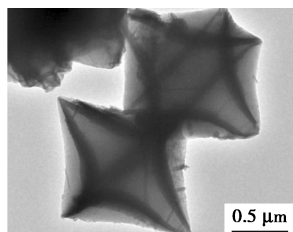
(a) MIL-101(Fe) 的 SEM 图像  
(放大倍数 8.00 k)



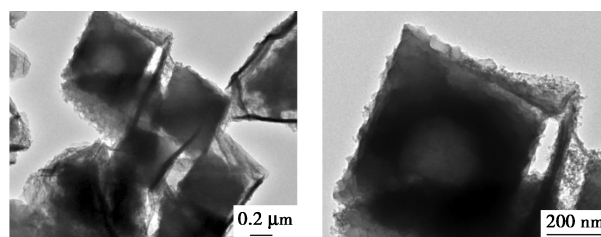
(b) MIL-101(Fe) 的 SEM 图像  
(放大倍数 30.0 k)



(c) MIL-101(Fe) 的 TEM 图像



(d) MIL-101(Fe) 的 TEM 图像



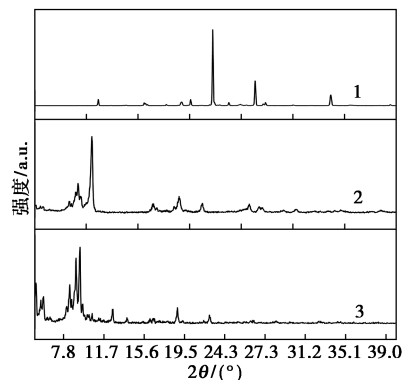
(e) LMS@MIL-101(Fe) 的 TEM 图像  
(f) LMS@MIL-101(Fe) 的 TEM 图像

图 2 MIL-101(Fe) 的 TEM 和 SEM 图

中可以推断, 当左旋咪唑负载在 MIL-101(Fe) 上时, 对其八面体结构产生的影响较小。

#### 2.1.3 XRD 分析

LMS、LMS@MIL-101(Fe)、MIL-101(Fe) 的 X 射线衍射图如图 3 所示。从图 3 中可以看出, MIL-101(Fe) 的各衍射峰强度较高、谱峰尖锐, 材料结晶度高。LMS@MIL-101(Fe) 的衍射峰(113)、(115)和(357)晶面分别出现在  $8.42^\circ$ 、 $8.96^\circ$  和  $10.58^\circ$ , 与标准 XRD 数据卡一致<sup>[29,32-33]</sup>, 表明左旋咪唑已负载到 MIL-101(Fe) 上。



1—LMS; 2—LMS@MIL-101(Fe); 3—MIL-101(Fe)

图 3 LMS、LMS@MIL-101(Fe)、MIL-101(Fe) 的 XRD 图谱

#### 2.1.4 TGA 分析

MIL-101(Fe) 的热重分析曲线如图 4 所示。由图 4 中可以看出, MIL-101(Fe) 的失重主要分为 3 个阶段: 第 1 阶段从室温到  $140^\circ\text{C}$  左右, 这一阶段的失重主要是材料孔隙内自由溶剂的去除和所吸附的气体的解吸所致, 失重质量分数为  $11.87\%$ ; 第 2 阶段从  $140^\circ\text{C}$  到  $360^\circ\text{C}$  左右, 这一阶段为材料中 3 个配位水分子的去除, 失重质量分数为  $19.96\%$ ; 第 3 阶段为  $360^\circ\text{C}$  到  $650^\circ\text{C}$ , MIL-101(Fe) 骨架开始崩塌分解, 失重质量分数为  $37.73\%$ , 最后剩余物质为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  残渣 (质量分数为  $30.44\%$ )。说明合成的 MIL-101(Fe) 具有良好的热稳定性。

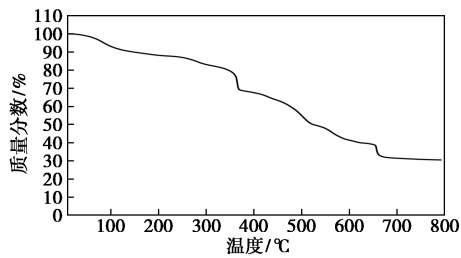
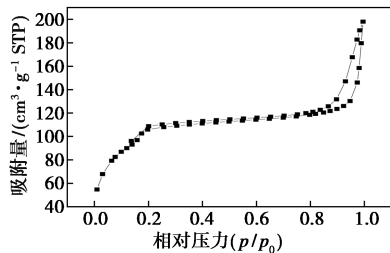
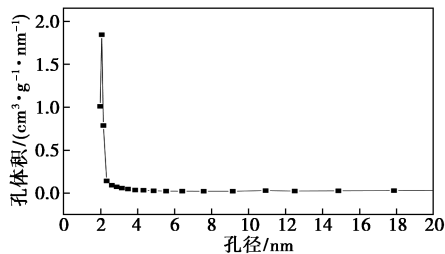


图4 MIL-101(Fe)的热重分析曲线

### 2.1.5 N<sub>2</sub> 吸附-脱附与粒径分布

MIL-101(Fe)的N<sub>2</sub>-吸附解吸等温线及孔径分布如图5所示。从图5(a)中可以看出, MIL-101(Fe)的N<sub>2</sub>-吸附和解吸等温线是典型的IV型,表明MIL-101(Fe)是一种介孔材料。从图5(b)中可以看出, MIL-101(Fe)的孔径主要分布在2~4 nm, BET比表面积为390.93 m<sup>2</sup>/g, Langmuir比表面积为546.92 m<sup>2</sup>/g, 平均孔宽为2.31 nm。

(a) MIL-101(Fe)的N<sub>2</sub>-吸附解吸等温线

(b) MIL-101(Fe)的孔径分布

图5 MIL-101(Fe)的N<sub>2</sub>-吸附解吸等温线及孔径分布

### 2.1.6 Zeta 电位和粒径分析

MIL-101(Fe)的粒径和Zeta电位如表1所示。从表1中可以看出, MIL-101(Fe)的粒径大小为(1135±88) nm, PDI较大,说明材料粒径大小不均匀,但在SEM图观察到的(粒径大小1~3 μm)范围内。在pH=7.4的磷酸盐缓冲液中材料带负电荷,而带正电荷的物质对细胞的活性是有害的,正电荷物质的内化导致细胞内活性氧(ROS)的产生,最终引发促炎症标记物的分泌和细胞死亡<sup>[34]</sup>,因此,表面带负电荷的MIL-101(Fe)作为药物载体应用是安全的。

表1 MIL-101(Fe)的粒径和Zeta电位

材料	粒径/nm	PDI	Zeta 电位/mV	
			C/ (mg·mL <sup>-1</sup> )	PBS (pH=7.4)
MIL-101(Fe)	1135±88	0.527±0.07	1.0	-22.4±0.3
			0.1	-23.2±0.2

### 2.2 细胞实验

MIL-101和LMS@MIL-101在MCF-7上的细胞存活率如表2所示。从表2中可以看出,当MIL-101(Fe)质量浓度为50 μg/mL时, MCF-7细胞存活率无明显变化,说明MIL-101在一定范围内无毒,具有良好的生物相容性。基于MIL-101(Fe)对人体细胞的低毒性,可用于人体给药。经MIL-101@LMS处理后,细胞存活率降低,表明该药物具有抗癌作用,具有抑制MCF-7细胞的潜力。

表2 MIL-101和LMS@MIL-101在MCF-7上的细胞存活率情况

质量浓度/(μg·mL <sup>-1</sup> )	0	10	20	30	40	50
MIL-101	97.49	96.38	97.42	97.07	98.73	96.94
LMS@MIL-101	97.09	92.34	87.69	79.98	73.65	69.38

### 2.3 药物负载

将载药后的离心上清液稀释一定倍数,在206 nm处测定吸光度,计算负载左旋咪唑的MIL-101(Fe)的载药量和包封率。不同质量浓度左旋咪唑的载药量和包封率如图6所示。当左旋咪唑质量浓度为5 mg/mL时,包封率为60.00%,载药量为22.20%。此后,包封率和载药量不再随质量浓度的增加而增加,说明左旋咪唑载量基本达到饱和。

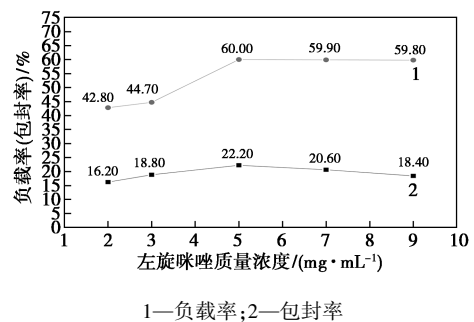
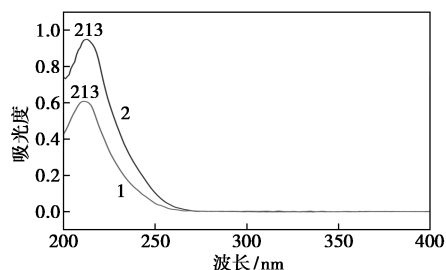


图6 MIL-101(Fe)负载左旋咪唑的载药/包封率

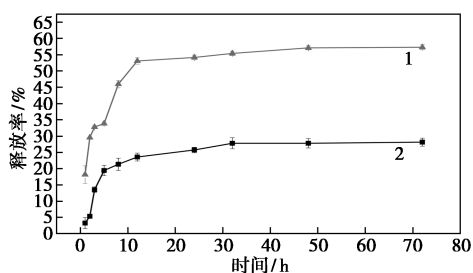
### 2.4 体外释放

LMS在pH=7.4和pH=5.5 PBS缓冲溶液中的最大吸收波长及累积释放曲线如图7所示。从图7(a)中可以看出,在pH为7.4和5.5的PBS缓冲

释放介质中,左旋咪唑的最大吸收波长均为 213 nm,表明溶剂对左旋咪唑的紫外吸收没有影响。从图 7(b)中可以看出,在 pH=7.4 时,左旋咪唑的释放在最初 8 h 内达到 21%,随后保持稳定,72 h 内释放了 28%的左旋咪唑;在 pH=5.5 时,约 45%的左旋咪唑在 8 h 内被释放。药物释放曲线表明,MIL-101(Fe)@LMS 表现出药物释放酸敏感性,在 pH=7.4 释放介质中释放少量药物,而在肿瘤部位(pH=5.5 释放介质中)能够快速释放左旋咪唑,这是由于疏水性药物左旋咪唑具有一定的 pH 敏感性,在酸性溶液中快速溶解且材料 MIL-101(Fe)在酸性环境下不稳定,导致骨架崩解。



(a) LMS 在 pH=7.4 和 pH=5.5 PBS 缓冲溶液中的最大吸收波长



(b) LMS@MIL-101(Fe) 的累积释放曲线

1—pH=5.5; 2—pH=7.4

图 7 LMS 在 pH=7.4 和 pH=5.5 PBS 缓冲溶液中的最大吸收波长及累积释放曲线

### 3 结论

采用水热溶剂法合成了 MIL-101(Fe),并通过物理方法成功地将左旋咪唑负载在 MIL-101(Fe)上。MIL-101(Fe)的平均粒径为 1  $\mu\text{m}$ , MIL-101(Fe)的平均孔径为 2.31 nm。MIL-101(Fe)在释放过程中表现出优异的左旋咪唑负载能力和缓释能力。在 pH=5.5 时,左旋咪唑的负载率为 60%,缓释率为 45%,具有潜在的治疗用途。细胞实验结果表明,MIL-101 具有良好的生物相容性。载有左旋咪唑的 MIL-101(Fe)用于肿瘤治疗。尽管临床应用还需要考虑更多的改进因素,但通过 MIL-101(Fe)载体控释左旋咪唑对于减少不良副作用和提

高药物在肿瘤组织中的有效释放具有重要意义。

### 参考文献

- [1] Čendak T, Žunkovič E, Godec T U, *et al.* Indomethacin embedded into MIL-101 frameworks: A solid-state NMR study[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014, 118: 6140–6150.
- [2] Jiang K, Zhang L, Hu Q, *et al.* A zirconium-based metal-organic framework with encapsulated anionic drug for uncommonly controlled oral drug delivery[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019, 275: 229–234.
- [3] Pentyala V, Davydovskaya P, Ade M, *et al.* Carbon dioxide gas detection by open metal site metal organic frameworks and surface functionalized metal organic frameworks[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 225: 363–368.
- [4] Yang X, Xu Q. Bimetallic metal-organic frameworks for gas storage and separation[J]. *Crystal Growth & Design*, 2017, 17(4): 1450–1455.
- [5] Zheng J, Cui X, Yang Q, *et al.* Shaping of ultrahigh-loading MOF pellet with a strongly anti-tearing binder for gas separation and storage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 354: 1075–1082.
- [6] Ozen H A, Ozturk B. Gas separation characteristic of mixed matrix membrane prepared by MOF-5 including different metals[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 211: 514–521.
- [7] Liu L, Wang L, Liu D, *et al.* High-throughput computational screening of Cu-MOFs with open metal sites for efficient C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> separation[J]. *Green Energy & Environment*, 2020, 5(3): 333–340.
- [8] Zhang X, Ge C, Zhang N, *et al.* A MOF material based on zinc(II) and mixed ligands: Synthesis, structure and luminescence behavior[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2019, 496: 119035.
- [9] Shi W J, Li Y Z, Hu Q X, *et al.* New scu topological MOF based on azoly-carboxyl bifunctional linker: Gas adsorption and luminescence properties[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2020, 283: 121170.
- [10] Müller Buschbaum K, Beuerle F, Feldmann C. MOF based luminescence tuning and chemical/physical sensing[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2015, 216: 171–199.
- [11] Wang L, Hu Z, Wu S, *et al.* A peroxidase-mimicking Zr-based MOF colorimetric sensing array to quantify and discriminate phosphorylated proteins[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2020, 1121: 26–34.
- [12] Zhang Y, Yang X, Zhou H C. Synthesis of MOFs for heterogeneous catalysis via linker design[J]. *Polyhedron*, 2018, 154: 189–201.
- [13] Rao P C, Mandal S. Potential utilization of metal-organic frameworks in heterogeneous catalysis: A case study of hydrogen-bond donating and single-site catalysis[J]. *Chemistry-An Asian Journal*, 2019, 14(23): 4087–4102.
- [14] Du P D, Thanh H T M, To T C, *et al.* Metal-organic framework MIL-101: Synthesis and photocatalytic degradation of remazol black B dye[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 2019: 1–15.
- [15] He H, Li R, Yang Z, *et al.* Preparation of MOFs and MOFs derived materials and their catalytic application in air pollution: A review[J]. *Catalysis Today*, 2021, 375: 10–29.

- [16] Kim K, Lee S, Jin E, *et al.* MOF x biopolymer: Collaborative combination of metal-organic framework and biopolymer for advanced anticancer therapy[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(31): 27512–27520.
- [17] Anlır G, Sert E, Yılmaz E, *et al.* Preparation and performance of functionalized metal organic framework, MIL-101, for Knoevenagel reaction[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2020, 283: 121138.
- [18] Lázaro I A, Forgan R S. Application of zirconium MOFs in drug delivery and biomedicine[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2019, 380: 230–259.
- [19] Zhang L, Chen Y, Shi R, *et al.* Synthesis of hollow nanocages MOF-5 as drug delivery vehicle to solve the load-bearing problem of insoluble antitumor drug oleonic acid (OA) [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2018, 96: 20–23.
- [20] Asiabi M, Mehdinia A, Jabbari A. Electrospun biocompatible chitosan/MIL-101(Fe) composite nanofibers for solid-phase extraction of  $\Delta^9$ -tetrahydrocannabinol in whole blood samples using Box-Behnken experimental design[J]. *Journal of Chromatography A*, 2017, 1479: 71–80.
- [21] Huxford R C, Della Rocca J, Lin W. Metal-organic frameworks as potential drug carriers[J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2010, 14(2): 262–268.
- [22] Horcajada P, Serre C, Maurin G, *et al.* Flexible porous metal-organic frameworks for a controlled drug delivery [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(21): 6774–6780.
- [23] Wang J, Chen D, Li B, *et al.* Fe-MIL-101 exhibits selective cytotoxicity and inhibition of angiogenesis in ovarian cancer cells via downregulation of MMP[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1–13.
- [24] Zhou R, Yu J, Chi R. Selective removal of phosphate from aqueous solution by MIL-101(Fe)/bagasse composite prepared through bagasse size control[J]. *Environmental Research*, 2020, 188: 109817.
- [25] Wang D, Huang R, Liu W, *et al.* Fe-based MOFs for photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction: Role of coordination unsaturated sites and dual excitation pathways[J]. *ACS Catalysis*, 2014, 4(12): 4254–4260.
- [26] Sun J, Yu G, Huo Q, *et al.* Epoxidation of styrene over Fe(Cr)-MIL-101 metal-organic frameworks [J]. *RSC Advances*, 2014, 4(72): 38048–38054.
- [27] Hegde M, Karki S S, Thomas E, *et al.* Novel levamisole derivative induces extrinsic pathway of apoptosis in cancer cells and inhibits tumor progression in mice[J]. *PLOS ONE*, 2012, 7(9): e43632.
- [28] Liu X, Liu Z, Zhang Q, *et al.* Hydrothermal catalytic conversion of glucose into lactic acid with acidic MIL-101(Fe) [J]. *Journal of Chemistry*, 2020, 2020: 1–7.
- [29] Barbosa A D S, Julião D, Fernandes D M, *et al.* Catalytic performance and electrochemical behaviour of metal-organic frameworks: MIL-101(Fe) versus NH<sub>2</sub>-MIL-101(Fe) [J]. *Polyhedron*, 2017, 127: 464–470.
- [30] Karimi Alavijeh R, Akhbari K. Biocompatible MIL-101(Fe) as a smart carrier with high loading potential and sustained release of curcumin[J]. *Inorganic Chemistry*, 2020, 59(6): 3570–3578.
- [31] Ebrahimi A K, Barani M, Sheikhshoaei I. Fabrication of a new superparamagnetic metal-organic framework with core-shell nanocomposite structures: Characterization, biocompatibility, and drug release study[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2018, 92: 349–355.
- [32] Skobelev I Y, Sorokin A B, Kovalenko K A, *et al.* Solvent-free allylic oxidation of alkenes with O<sub>2</sub> mediated by Fe- and Cr-MIL-101 [J]. *Journal of Catalysis*, 2013, 298: 61–69.
- [33] Salman F, Zengin A, Celik Kazici H. Synthesis and characterization of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-supported metal-organic framework MIL-101(Fe) for a highly selective and sensitive hydrogen peroxide electrochemical sensor[J]. *Ionics*, 2020, 26(10): 5221–5232.
- [34] Narmani A, Mohammadnejad J, Yavari K. Synthesis and evaluation of polyethylene glycol- and folic acid-conjugated polyamidoamine G4 dendrimer as nanocarrier[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2019, 50: 278–286. ■

## 赢创全新过程助剂登陆中国,提升光伏硅片切割质量

赢创面向中国市场全新推出 TEGO® Surten E 过程助剂产品组合,可提升光伏硅片切割的质量与效率,从而改善光伏组件的整体性能和生产效率。

光伏发电与其他能源相比在成本上是否具有优势,是影响该行业未来发展的决定性因素之一。因此,光伏组件生产商正不断寻求解决方案,致力在降低生产成本的同时,提高电池的光电转换效率。

金刚石线(DWS)切割是光伏电池生产过程中的关键步骤之一,而使用传统表面活性剂的切割液难以满足当今最前沿的高性能切割工艺需求,低效的切屑排除能力和金刚石线镀层退化可造成深切口线痕和凹陷线痕,不仅影响硅片本身的质量,在后期制绒扩散步骤中还会导致大晶体形成,从而使收集光子的硅片表面积缩小,降低电池光电转化效率。

TEGO® Surten E 系列润湿剂和消泡剂在动静态表面张力之间取得平衡,可有效、持久地去除切屑。在切割液配方

中添加少量 TEGO® Surten E 产品,即可在更高的切割速度和更小线径的情况下,在较大的 M12 硅片上实现更优异的切割质量比,此举不仅可以提高 A+级硅片产品产量,硅片切割后所需的高成本后处理工艺也能大大减少,从而提升生产过程的成本效益。与此同时,借助经赢创产品优化后的切割液配方可实现较大硅片均一的切割质量,从而大幅提升光伏发电量。

此外,TEGO® Surten E 产品理想的润湿特性可改善切割液的整体冷却性能,使其在极端操作条件下也能循环使用。这一优势有助于使金刚石切割线更为耐用、性能更佳,并提高切割工艺的整体效率和可持续性。

作为过程助剂,TEGO® Surten E 系列表面活性剂也适用于诸多光伏领域的新应用,例如有助于打造更均匀、品质更高的抗反射涂层,还能提供其他技术表面改性,提高整体发电量。

(杨惠莹)