

纯亲水自组装体构建抗菌纳米材料

杨 禄^{1,2}, 陈韩婷¹

(1. 江南大学化学与材料工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 无锡麦克罗新材料科技有限公司, 江苏 无锡 214122)

摘要: 以纯亲水无规共聚物 poly(DMAEMA-*co*-AA) 在纯水相中诱导自组装, 构建出可用于负载抗菌活性成分的纳米自组装体。结果表明, 当 AA 链段质量分数为 51.6 % 时 poly(DMAEMA-*co*-AA) 在水中更倾向于形成球状与多孔球状自组装体; 另外, 随着 pH 值的升高, 自组装体表现出“呼吸”作用, 从小尺寸的球状逐步膨胀为多孔球状自组装体, 可稳定负载 85 % 以上抗菌成分(对羟基苯甲酸乙酯钠)构建抗菌纳米材料, 得到对数抗菌值高于 4.4 的抗菌材料, 用于抗菌包装后常温食品存储的时间显著延长。

关 键 词: 纯亲水无规聚合物; 水相自组装; 抗菌材料; 活性物负载

中图分类号: TQ 325.1 文献标识码: B 文章编号: 1001-9278(2020)10-0012-06

DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2020.10.003

Fabrication of Antibacterial Nanomaterials via Pure Hydrophilic Self-assembly

YANG LU^{1,2}, CHEN Hanting¹

(1. School of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Wuxi MACRO NMS Co, Ltd, Wuxi 214122, China)

Abstract: The self-assembly was induced for a hydrophilic random copolymer of poly(DMAEMA-*co*-AA) in pure water, and the self-assemblies were fabricated by loading antibacterial active components. The results indicated that when the random copolymer contained 51.6 wt % of AA, poly(DMAEMA-*co*-AA) tended to form spherical and porous spherical self-assemblies in pure water. With an increase of pH value, the self-assemblies exhibited a “breathing” behavior and varied from small-size spheres to porous spheres. More than 85 % ethyl *p*-hydroxybenzoate sodium as an antibacterial component could be stably loaded on the self-assemblies to form the antibacterial nanomaterials. Moreover, the other antibacterial components could also be loaded on the self-assemblies. The antibacterial nanomaterials achieved a logarithmic anti-bacterial value of above 4.4, and they could prolong the storage time of food at room temperature when used for anti-bacterial packaging.

Key words: purely hydrophilic random copolymer; aqueous self-assembly; antibacterial material; active load technique

0 前言

大分子自组装在微观结构方面有着重要的作用, 通过特殊构造的大分子可以自组装成多种形貌的微观结构, 如核-壳结构^[1-2]、三明治结构^[3]、棒状结构等^[4-6]。利用这些特殊的纳米结构可以研发制备靶向药物^[7-8]。另外, 可以通过包裹化妆品功效成分^[9-10]使得活性物稳定或者降低皮肤刺激等作用。然而, 目前大分子自组装的构建主要围绕双亲性高分子来进行, 通过选择性溶剂刺激诱导自组装, 对于纯亲水性高分子自组装体的构建研究少之又少。纯亲水性高分子尤其是纯亲水无规高分子不论从合成过程、还是分子结构都具有更好的生物相容性^[11], 研究其纯水相自组装, 构筑特殊形

貌的自组装体具有更高的科学价值与应用价值。

2003 年以来, 抗菌材料^[12-14]的研究得到了越来越多的重视, 抗菌材料在食品包装、马桶、毛巾、袜子、砧板等多种应用场景得到了初步应用^[15-18]。目前, 抗菌材料制品被科学家们以及民众进一步重视^[19-20], 抗菌口罩、抗菌防护服、抗菌护目镜等医疗器械成为抗菌材料的新应用点。然而目前抗菌纳米材料依然存在加工应用过程中的局限性, 研发适用于多种场景的高效抗菌纳米材料具有科学与应用意义。本文将研究纯亲水无规共聚物 poly(DMAEMA-*co*-AA) 在纯水相自组装行为及其自组装体负载及释放抗菌活性成分的特性, 且可作为抗菌材料在抗菌领域有应用价值。

收稿日期: 2020-04-01

联系人, luyang06@126.com

1 实验部分

1.1 主要原料

poly(DMAEMA-*co*-AA),自制;

对羟基苯甲酸乙酯钠,99 %,浙江圣效化学品有限公司;

超纯水,德国赛多利斯 arium pro VF 超纯水系统;其他试剂,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要设备及仪器

紫外分光光度计,UV-2700,株式会社岛津制作所;

透射电子显微镜(TEM),JEM-2100,日本电子株式会社。

高压灭菌锅,XFS-280CB,浙江新丰医疗器械有限公司;

场发射扫描电子显微镜(SEM),S-4800,日本日立株式会社;

二级生物安全柜,BHC-1300IIA/B3,上海鼎科科学仪器有限公司。

1.3 样品制备

纯亲水无规共聚物水相自组装体构建:将2 mL浓度为5 mg/mL的poly(DMAEMA-*co*-AA)水溶液用超纯水稀释至接近10 mL,在20 °C及磁力搅拌下,以40 μL/min的速率加入0.1 mol/L的HCl或NaOH缓慢调节至所需pH后用超纯水稀释至10 mL,得到1 mg/mL的poly(DMAEMA-*co*-AA)水溶液;在指定温度±0.1 °C的水浴中恒温24 h,得到指定温度和指定pH的poly(DMAEMA-*co*-AA)自组装体溶液。

1.4 性能测试与结构表征

通过TEM研究自组装体微观结构;

对羟基苯甲酸乙酯钠负载稳定性:对羟基苯甲酸乙酯钠标准曲线的绘制使用紫外分光光度计,定量称取5 mg对羟基苯甲酸乙酯钠,分别用pH 7.4的磷酸盐缓冲溶液(PBS)、pH 6.5的PBS、pH 2.0的柠檬酸盐缓冲溶液(CPBS)定容于100 mL容量瓶中作为母液;从100 mL容量瓶中再分别移取1、3、5、7、10、12 mL母液,定容于25 mL容量瓶,即得浓度在2~24 μg/mL的对羟基苯甲酸乙酯钠溶液;用紫外可见光分光光度计测定对羟基苯甲酸乙酯钠的最大吸收波长处的吸光度,并绘制标准曲线;用移液管移取5 mg/mL的poly(DMAEMA-*co*-AA)和5 mg/mL的对羟基苯甲酸乙酯钠各2 mL于反应瓶中,加入一定量的超纯水;在磁力搅拌下,每隔1 min滴加40 μL浓度为0.1 mol/L的HCl或NaOH调节pH,最终溶液的总体积为10 mL,

进行对羟基苯甲酸乙酯钠的包裹;在20 °C的水浴中恒温24 h后,取5 mL上述溶液于截留分子量为3 500的透析袋中,再置于250 mL指定pH值、指定温度的HCl或NaOH溶液中透析,每隔1 h换水,除去游离的药物,透析袋中溶液即为poly(DMAEMA-*co*-AA)自组装体负载体系;通过紫外可见光分光光度仪测定透析袋对外对羟基苯甲酸乙酯钠的吸光度,计算透析袋对外对羟基苯甲酸乙酯钠的量;将最初投入的对羟基苯甲酸乙酯钠的量记为m₁;透析时,透析袋外溶液中对羟基苯甲酸乙酯钠的量记为m₂,则poly(DMAEMA-*co*-AA)自组装体负载量记为a,计算公式为:

$$a = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \% \quad (1)$$

抗菌性能测试:将0.3 % 抗菌材料水溶液在0.1 m²的PE电晕面进行涂膜,分别涂膜1、3、5次,记为C1、C2、C3,对涂膜后的PE涂层面进行抗菌效果测试,参考国际通用的抗菌标准JIS Z 2801:2010对抗菌材料的PE涂膜抗菌性能进行测试。

2 结果与讨论

2.1 “呼吸”作用自组装体的构建

通过纯亲水无规共聚物poly(DMAEMA-*co*-AA)在纯水中实现自组装,利用pH响应性调节链段中的亲水能力,从而实现具有“呼吸”特点的自组装体,以供进一步构建抗菌纳米材料。AA链节质量分数为51.6 %的poly(DMAEMA-*co*-AA)自组装形貌进行TEM表征,如图1所示。当调节至pH 2.0时[图1(a)],poly(DMAEMA-*co*-AA)自组装体为直径50 nm为主的球状结构,此纳米球状结构分布均匀且稳定,因为此时AA链段中羧酸根以-COOH形态存在分布于纳米自组装体的内部,而此时的DMAEMA链段亲水性强于AA链段,从而形成AA-AA的氢键络合结构,为自组装体的形成提供了氢键聚集力。因为特殊设计的poly(DMAEMA-*co*-AA)中AA链节质量分数为51.6 %,AA链段的分布占主体分散于球状自组装体内部,自组装体聚集力要大于DMAEMA链段亲水拉伸力,使得自组装体倾向于形成小尺寸的球状,又因为poly(DMAEMA-*co*-AA)链段的无规分布性,所以球状自组装体表面也会分布AA链段,使得自组装体互相吸引互相聚集。随着pH值的升高(pH = 2.0~7.4)[图1(b)],AA链段主要以羧酸根离子(-COO⁻)的形态存在亲水性逐渐增强,从而形成了多孔疏松的400 nm左右的纳米颗粒[图1(b)],此时DMAEMA链段间的氢键作用提供了自组装的主要驱动力,AA链段中羧酸根

($-\text{COOH}$)与DMAEMA链段形成氢键作用构成了自组装的辅助驱动力。因为AA链段占比高,因此自组装体形成大量的亲水孔。当pH=6.5时[图1(c)和(d)],poly(DMAEMA-*co*-AA)形成多孔条状自组装体,此时DMAEMA链段间的氢键作用提供了自组装的主要驱动力,AA链段中羧酸根($-\text{COOH}$)与DMAEMA链段形成氢键作用构成了自组装的辅助驱动力。AA链段羧酸根离子($-\text{COO}^-$)提供了强亲水性,从而形成多孔结构。但是由于pH=6.5时,AA链段的亲水性弱于pH=7.4时,所以此自组装体中的孔小于pH=7.4时。这种特殊设计的纯亲水自组装体表现出了智能化的“呼吸”作用,从pH=2.0的“吸”到pH=7.4的“呼”。利用这种特殊的纳米“呼吸”结构可以用来负载抗菌活性物构建抗菌纳米材料。

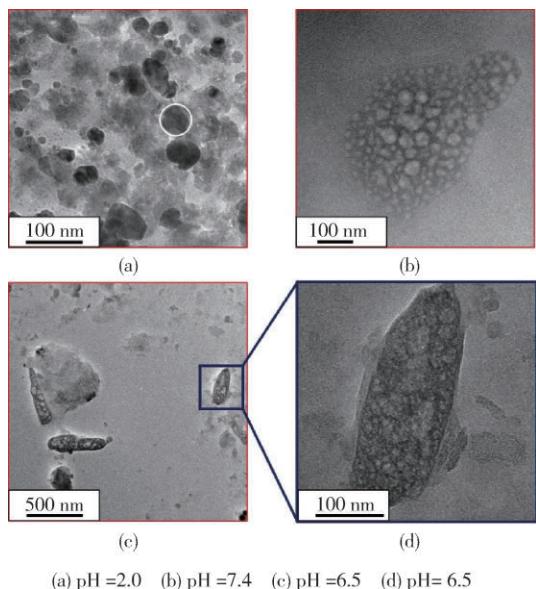


图1 pH响应性poly(DMAEMA-*co*-AA)自组装体的TEM照片
Fig. 1 TEM images of poly(DMAEMA-*co*-AA) self-assemblies

2.2 自组装体构建抗菌纳米材料

利用纯亲水自组装体对抗菌活性物的包裹构筑抗菌纳米材料,实现在液体或者固体中的控释抗菌作用,如图2所示。分别考察球状结构[图1(a)]和多孔球状结构[图1(b)和(d)]为载体包裹对羟基苯甲酸乙酯钠的负载稳定性。pH=2.0的缓冲溶液中,对羟基苯甲酸乙酯钠在14 h达到负载平衡,负载率为98%以上,这是由于自组装体为紧实的球状结构,可以更牢固的将对羟基苯甲酸乙酯钠稳定包裹于球形内部;在pH=6.5与pH=7.4的缓冲溶液中,对羟基苯甲酸乙酯钠在8 h达到负载平衡,负载率为85%以上,此时的载体处于“呼吸”膨胀状态,具有丰富的多孔结构,对于抗菌剂的包裹不够紧实,更容易游离出来,同时负载率低于球

状结构。通过这种方法可以构筑不同抗菌剂的抗菌纳米材料,可以将此抗菌纳米材料用于抗菌制剂的配制,抗菌塑料的加工方面,从而保持活性物的加工稳定性,提高分散性。

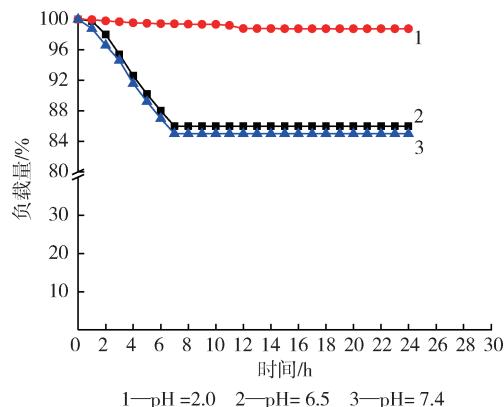


图2 poly(DMAEMA-*co*-AA)自组装体的对羟基苯甲酸乙酯钠负载稳定性
Fig. 2 Drug loading curve of poly(DMAEMA-*co*-AA) self-assemblies

2.3 自组装体构建抗菌纳米材料的抗菌性能

参考国际通用的抗菌标准JIS Z 2801:2010对抗菌材料的PE涂膜抗菌性能进行测试,测试结果如表1所示,JIS Z 2801:2010判定标准为对数抗菌值 $R \geq 2.0$ 时具有抗菌效果。从表1中可以看到,C1、C2、C3的对数抗菌值 R 皆大于3.0,说明涂膜后的PE薄膜具有强抗菌效果,随着涂膜次数的增加,在PE薄膜表面覆盖的抗菌材料增加,从而提升了PE薄膜抗菌性,但是很明显的看出抗菌材料对于大肠杆菌的杀灭能力要优于金黄色葡萄球菌。

在经过1次涂膜过程测得的大肠杆菌对数抗菌值 R 为3.636 8,金黄色葡萄球菌对数抗菌值 R 为3.013 6,说明抗菌材料具有较高的抗菌效率。随着涂层次数的增多,C3薄膜大肠杆菌对数抗菌值 R 为5.034 8,比C1提高1.384 4倍,金黄色葡萄球菌对数抗菌值 R 为4.451 2,比F1提高1.477倍。虽然从抗菌值方面抗菌材料并不如AgNPs效果明显,但是其作为水果包装时对包装内环境的pH、温度变化会比较敏感,随着水果呼吸作用的增长,包装内环境pH会逐步降低,抗菌材料活性释放会越来越强,从而形成对内空间的动态抗菌作用,实现水果保鲜的目标。

2.4 自组装体构建抗菌纳米材料的保鲜效果测试

将上述C3薄膜用于图3中的樱桃保鲜测试,首先将成熟度一致的市售樱桃挑选出来,装入可密封的纸盒中,测试温度为夏天的室温(25~30℃),对照组为直接

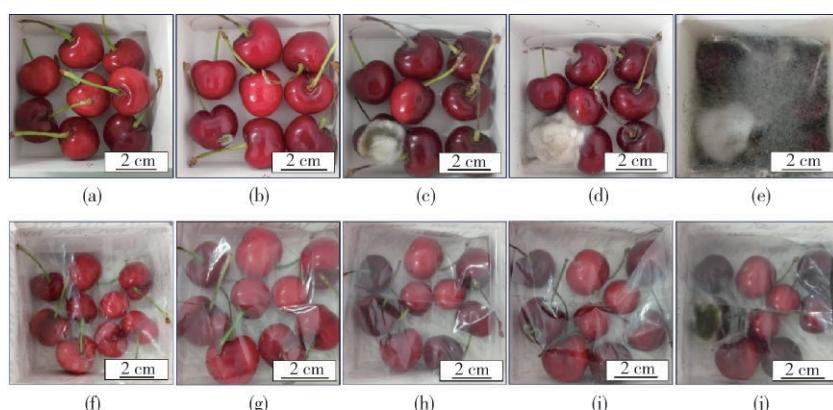
表1 涂膜后的PE薄膜抗菌性
Tab. 1 Antimicrobial activity of PE film

序号	测试菌种	菌种浓度/cfu·mL ⁻¹	样品	回收菌种浓度/cfu·cm ⁻²		R
				接触时间为“0 h”	接触时间为“24 h”	
1	大肠杆菌 ATCC 8739	6.6×10^5	C1 对照样品	— 2.7×10^4	1.5×10^2 6.5×10^5	3.636 8 —
	金黄色葡萄球菌 ATCC 6538P	6.5×10^5	C1 对照样品	— 2.6×10^4	6.3×10^2 6.5×10^5	3.013 6 —
2	大肠杆菌 ATCC 8739	6.6×10^5	C2 对照样品	— 2.7×10^4	1.0×10^2 6.5×10^5	3.812 9 —
	金黄色葡萄球菌 ATCC 6538P	6.5×10^5	C2 对照样品	— 2.6×10^4	3.9×10^2 6.5×10^5	3.221 8 —
3	大肠杆菌 ATCC 8739	6.6×10^5	C3 对照样品	— 2.7×10^4	0.6×10 6.5×10^5	5.034 8 —
	金黄色葡萄球菌 ATCC 6538P	6.5×10^5	C3 对照样品	— 2.6×10^4	2.3×10 6.5×10^5	4.451 2 —

注: $R = [\log(B/A) - \log(C/A)] = \log(B/C)$, A 为 3 组对照样品接种时的平均菌种浓度值; B 为 3 组对照样品“24 h”时的平均菌种浓度值; C 为 3 组测试样品“24 h”时的平均菌种浓度值。

将樱桃放入纸盒中,测试组是将抗菌C3薄膜放入纸盒中,再将樱桃放入,用抗菌薄膜将樱桃包裹覆盖,在测试过程中纸盒盖密封,模拟快递运输条件。从图3中,可以发现对照组在96 h后出现个别应该长霉菌的情况,如图3(b)所示,当192 h后樱桃杆部完全脱水,樱桃颜色呈暗红色,霉菌已经将1/2个樱桃包裹并开始向周围扩散,如图3(c)所示,随后对照组樱桃快速腐烂,盒子内部长满

霉菌,如图3(d)和(e)所示。对于测试组来说,在0~192 h中,如图3(f)~(h)所示,樱桃缓慢成熟,樱桃杆脱水不明显,在288 h首次出现了樱桃局部腐烂的情况,但是霉菌并没有向立体空间生长,说明抗菌PE薄膜具有良好的抑制作用,当384 h时,第一个腐烂的樱桃腐烂50%,并开始向周围感染,但是并未出现对照组中霉菌,抗菌材料薄膜在常温水果保鲜中有着非常好的效果。



对照组: (a) 0 h (b) 96 h (c) 192 h (d) 288 h (e) 384 h
测试组: (f) 0 h (g) 96 h (h) 192 h (i) 288 h (j) 384 h
对照组为直接放入纸盒中; 测试组为抗菌PE薄膜覆盖

图3 常温(25~30℃)保鲜测试对比照片

Fig. 3 Photo images of preserving freshness test at normal atmospheric temperature

将上述C3薄膜用于图4中的芒果保鲜测试,测试用芒果选自四川攀枝花种植基地,直接采摘成熟度均匀的芒果随机包装测试,测试环境为夏天的室温(25~30℃)。测试组用C3抗菌PE薄膜热封制袋将芒果包裹,对照组为空气裸放,从图4中我们可以发现,测试组

芒果经过8 d,192 h的常温测试,成熟度并没有明显变化,同时袋子里面并没有出现水蒸气,袋子膨胀等现象,说明抗菌材料可以有效抗菌的同时,抑制了芒果的呼吸作用。而当对照组的空气裸放芒果,经过8 d后,可以看到,其中一个芒果已经完全变黄,成熟度快速提

升,达到了此类芒果腐烂前的状态,另外2个芒果虽然没有变黄严重,但是表面已经开始变软,成熟度接近全熟。通过实际对比发现,抗菌材料抗菌PE薄膜在较高温度下,仍然可以有效抑制水果的呼吸作用,抑制细菌繁殖,从而实现延长保质期的效果。



对照组为直接放入纸盒中;测试组为抗菌PE薄膜包装

图4 攀枝花产地常温保鲜测试对比照片

Fig. 4 Photos of preserving freshness test at normal atmospheric temperature

3 结论

(1) 纯亲水无规共聚物 poly(DMAEMA-*co*-AA)可以在纯水相中诱导自组装,随着pH值的升高自组装体表现出“呼吸”作用,从紧实的球状(pH 2.0)逐步膨胀为多孔球状自组装体(pH= 6.5 与pH=7.4);

(2) 该具有“呼吸”作用的自组装体可负载抗菌活性成分(对羟基苯甲酸乙酯钠),负载率在85 %~98 %;将自组装体涂膜于PE薄膜上得到了具有抗菌性能的薄膜;

(3) 用抗菌PE薄膜进行抗菌测试,大肠杆菌对数抗菌值 R 在3.636 8~5.034 8之间,金黄色葡萄球菌对数抗菌值 R 在3.013 6~4.451 2之间;在25~30 ℃环境下,使得樱桃的开始腐败时间从96 h延长到288 h,延长了3倍;抗菌材料PE薄膜包装攀枝花芒果测试,8 d后依然保持芒果成熟度不变,但是在空气中裸放的已经变软变黄;

(4) 抗菌材料涂膜后的PE薄膜作为水果包装时对包装内环境的pH、温度变化会比较敏感,随着水果呼吸作用的增长,包装内环境pH会逐步降低,抗菌活性释放会越来越强,从而形成对内空间的动态抗菌作用,抑制细菌繁殖,有效抑制水果的呼吸作用,实现水果保鲜的目标;本文提供了一种用来实现抗菌活性成分负载构建抗菌纳米材料的新思路,可被广泛应用于液体、固体抗菌材料加工。

参考文献:

- [1] JENEKHE S A, CHEN X L. Self-Assembled Aggregates of Rod-Coil Block Copolymers and Their Solubilization and Encapsulation of Fullerenes [J]. *Science*, 1998, 279 : 1 903-1 907.
- [2] KIM S K, JUNG E, GOODMAN M D, et al. Self-Assembly of Monodisperse Starburst Carbon Spheres into Hierarchically Organized Nanostructured Supercapacitor Electrodes [J]. *Acs Appl Mater Inter*, 2015, 17 (7) : 9 128-9 133.
- [3] GORGOLL R M, TSUBOTA T, HARANO K, et al. Cooperative Self-Assembly of Gold Nanoparticles on The Hydrophobic Surface of Vesicles in Water [J]. *J Am Chem Soc*, 2015, 137 (24) : 7568-7571.
- [4] HUANG M, SCHILDE U, KUMKE M, et al. Polymer-Induced Self-Assembly of Small Organic Molecules into Ultralong Microbelts with Electronic Conductivity [J]. *J Am Chem Soc*, 2010, 132 (11) : 3 700-3 707.
- [5] BROSnan S M, SCHLAAD H, ANTONIETTI M. Aqueous Self-Assembly of Purely Hydrophilic Block Copolymers into Giant Vesicles [J]. *Angew Chem Int Edit*, 2015, 54 (33) : 9 715-9 718.
- [6] HWANG J, HEIL T, ANTONIETTI M, et al. Morphogenesis of Metal-Organic Mesocrystals Mediated by Double Hydrophilic Block Copolymers [J]. *J Am Chem Soc*, 2018, 140 (8) : 2 947-2 956.
- [7] CHEN B, HE X Y, YI X Q, et al. Dual-Peptide-Functionalized Albumin-Based Nanoparticles with pH-Dependent Self-Assembly Behavior for Drug Delivery [J]. *Acs Appl Mater Inter*, 2015, 7 (28) : 15 148-15 153.
- [8] XIAO M S, LAI W, WANG F, et al. Programming Drug Delivery Kinetics for Active Burst Release with DNA Toehold Switches [J]. *J Am Chem Soc*, 2019, 141 (51) : 20 354-20 364.
- [9] KHEZRI K, SAEEDI M, DIZAJ S M. Application of Nanoparticles in Percutaneous Delivery of Active Ingredients in Cosmetic Preparations [J]. *Biomed Pharmacother*, 2018, 106 : 1 499-1 505.
- [10] TRAN V V, NGUYEN T L, MOON J Y, et al. Core-Shell Materials, Lipid Particles and Nanoemulsions, for Delivery of Active Anti-Oxidants in Cosmetics Applications: Challenges and Development Strategies [J]. *Chem Eng J*, 2019, 368: 88-114.
- [11] ZHOU J M, ZHANG W J, HONG C Y, et al. Silica Nanotubes Decorated by pH-Responsive Diblock Copolymers for Controlled Drug Release [J]. *Acs Appl Mater Inter*, 2015, 7 (6) : 3 618-3 625.
- [12] 李炜罡, 吕维平, 王海滨, 等. 抗菌材料进展[J]. 化工新型材料, 2003(3):9-12.

- LI W G, LYU W P, WANG H B, et al. Progress of Antibacterial Materials [J]. New Chemical Materials, 2003 (3): 9-12.
- [13] 石锐,耿欢,张静爽,等.一种非溶出广谱抑菌型聚己内酯/明胶-有机硅季铵盐纳米纤维膜用于伤口敷料[J].生物医学工程学杂志,2018(3):396-402.
- SHI R, GENG H, ZHANG J S, et al. An Insoluble and Broad-Spectrum Bacteriostatic Polycaprolactone / Gelatin Organosilicon Quaternary Ammonium Salt Nanofiber Membrane for Wound Dressing [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2018 (3): 396-402.
- [14] SCHNAIDER L, GHOSH M, BYCHENKO D, et al. Enhanced Nano - Assembly Incorporated Antimicrobial Composite Materials [J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(24).
- [15] 赵俊燕,罗世永,许文才.抗菌包装研究进展[J].包装工程,2012, 33(5):132-137.
- ZHAO J Y, LUO S Y, XU W C. Research Progress of Antibacterial Packaging [J]. Packaging Engineering, 2012, 33 (5): 132-137.
- [16] 韦士才. JUC长效抗菌材料治疗体股癣和手足癣144例的疗效观察[J].中国真菌学杂志,2016, 11(4):232-234.
- WEI S C. Observation on the Efficacy of JUC Long-Acting Antibacterial Material in the Treatment of 144 Cases of Tinea Corporis Cruris and Tinea Manus and Pedis [J]. Chinese Journal of Mycology, 2016, 11 (4): 232-234.
- [17] 张文征.载磷酸锆钠银抗菌除臭袜[J].化工新型材料,2004(1):41-42.
- ZHANG W Z. Antibacterial and Deodorizing Socks Containing Zirconium Sodium Phosphate and Silver [J]. New Chemical Materials, 2004(1): 41-42.
- [18] PILATI F, ESPOSTI M D, BONDI M, et al. Designing of Antibacterial Plastics: Thymol Release from Photo-cured Thymol-Doped Acrylic Resins[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(12):4 378-4 386.
- [19] 王慧君,杜思昊,岳霞,等.冠状病毒肺炎的病理学特征回顾与展望[J].法医学杂志,2020, 36(1):E028.
- WANG H J, DU S H, YUE X, et al. Review and Prospect of Pathological Characteristics of Coronavirus Pneumonia [J]. Journal of Forensic Medicine, 2020, 36 (1): E028.
- [20] 北京协和医院新型冠状病毒感染的肺炎诊治专家组.北京协和医院关于“新型冠状病毒感染的肺炎”诊疗建议方案(V2.0)[J].协和医学杂志,2020, 11:E003.
- Expert Group on Novel Coronavirus Novel Coronavirus Pneumonia in Peking Union Medical College Hospital. Recommendations for Diagnosis and Treatment of Pneumonia in “New Coronavirus Infection” (V2.0) [J]. Concordia Medical Journal, 2020, 11 : E003.
- [21] MINOO R H, HASSANZADEH D, AZARMI S, et al. Effect of Synthesis Method and Buffer Composition on the Lcst of a Smart Copolymer of N-Isopropylacrylamide and Acrylic Acid [J]. Polym Advan Technol, 2007, 18 (12): 986-992.

《热塑性聚合物改性及其发泡材料》简介

泡沫塑料具有质轻、隔声降噪、缓冲减震、隔热保温等优异性能,自第二次世界大战以来,在飞机制造、汽车内饰件、建筑保温、防护性包装等领域中得到了广泛的应用,几乎影响了现代生活的方方面面。近几十年来,全球聚合物泡沫在产量和质量上都有了长足的发展,满足了人们日益增长的消费需求。此外,环境保护形势日渐严峻,石油资源日趋枯竭;对轻量化和高效燃油经济性的需求以及对节能减排和可持续发展的要求,将促使飞机制造业和汽车制造业更多地使用泡沫材料;同时随着包装与运输等行业的快速发展以及人民生活水平的提高,相信未来对泡沫塑料,尤其是高性能泡沫塑料和/或可生物降解泡沫塑料的需求将越来越高和越来越多。由北京工商大学周洪福、王向东编著的《热塑性聚合物改性及其发泡材料》一书全面阐述了热塑性聚合物发泡机理、材料性能与发泡工艺之间的关系。

本书的特点:(1)作者结合自己的研究成果和经验,介绍了石油基热塑性聚合物、生物质基可生物降解聚合物和石油基可生物降解聚合物的改性技术。(2)详细阐述了各种热塑性聚合物相应的发泡技术,包括挤出发泡、注射发泡、模压发泡、釜压发泡和滚塑发泡等;(3)本书单列一章专门介绍了挤出发泡技术及所用挤出机的种类和技术要求等。

本书主要介绍热塑性聚合物改性及其发泡材料,具体包括聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚乳酸、聚丁二酸丁二醇酯、聚羟基烷酸酯等七种主要的热塑性聚合物的改性及其发泡成型方法(挤出法、釜压法、模压法、注射法)和制品应用,讨论不同改性方法、发泡工艺条件、成型方法对基体材料分子量及其分布、分子链构造、结晶行为、流变性能、发泡性能的影响,简要介绍聚合物挤出发泡原理及设备。本书可供从事热塑性聚合物改性及发泡研究的科研人员、工程技术人员和从事相关制品生产的工程师使用。