

Janus 复合材料

梁福鑫, 刘 冰, 杨振忠*

(中国科学院化学研究所, 高分子物理与化学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: Janus 复合材料基本特征在于其微尺度空间具有明确分区的化学和功能。关键问题在于发展新方法, 精确控制形貌、微结构、和表面化学和功能严格分区。本文主要总结了本课题组的有关点滴成果, 指出了存在的重要问题及发展方向, 展望了近期有望突破领域。

关键词: Janus; 两亲性; 功能; 复合材料; 界面调控

引言

古罗马神 Janus 其头部有两个脸, 分别朝向过去和未来, 与中国的阴阳概念类似, 体现了事物的辩证统一。1992 年, 诺贝尔奖获得者 de Gennes 在颁奖演讲中^[1], 首次使用 Janus 描述两面具有不同组成或性质的颗粒, 指出 Janus 颗粒类似双亲性分子, 可在液/液界面组装并具有明确指向, 颗粒间缝隙为物质传输提供了通道。Janus 颗粒表面具有两种不同(如亲水/疏水)甚至相反(极性/非极性, 正电荷/负电荷等)的性质, 与分子表面活性剂双亲性类似, 具有重要应用意义, 如 Janus 颗粒能够稳定乳液, 在聚合物界面发挥增容、增强多重作用。功能 Janus 颗粒将赋予界面相应功能特性。均匀固体颗粒在油/水界面吸附能高, 能稳定相应乳液(Pickering 效应^[2,3]), 但在能降低界面张力方面能力很弱^[4,5]。Janus 颗粒集成了均匀颗粒的 Pickering 效应和表面活性剂两亲性, 在界面既具有大的吸附能, 又能显著降低界面张力, 大大改善了乳液稳定性^[6,7]。Janus 颗粒作为一种固体表面活性剂, 能组装成不同的超结构。Granick 等^[8~12]研究了 Janus 颗粒自组装行为。与表面活性剂不同, Janus 颗粒间相互作用呈现显著的方向性, 在取向相关的驱动力作用下, 获得特殊的超结构。Janus 颗粒体系组装的模拟^[13]以及 Janus 颗粒对稳定界面作用的计算^[14~16]也得到了广泛关注。近来, 人们更加关注 Janus 颗粒在界面的组装行为。燕立唐等通过模拟研究, 得到了不同形状的 Janus 粒子在嵌段共聚物层状相界面的独特取向结构^[17], 分别研究了静态体系^[18]和剪切体系^[19]下 Janus 纳米棒在聚合物二元体系界面的取向行为。

近二十年来, Janus 材料研究发展迅速, 展示了诸多新颖性质和诱人应用前景。但制备 Janus 材料的方法仍然存在诸多问题^[20]。最常用的界面保护法虽能实现 Janus 材料结构精确控制, 但难以批量化生产。微流体法制备的 Janus 材料组成严格分区、形态多样, 但尺寸较大, 无法获得亚微米甚至更小的材料。模板法过程复杂, 制备效率低。目前易于批量化生产的方法是相分离法和界面成核法, 但 Janus 材料化学组成分区不严格, 微结构控制不精确。

本课题组近十余年来, 围绕 Janus 复合材料合成方法学、结构控制及功能化、界面聚集行为开展了工作^[21,22], 发展了制备表面化学明确分区 Janus 材料方法学, 实现不同形貌和功能的精确调控, 将响应性聚合物、功能性纳米颗粒在 Janus 材料不同分区集成, 研究 Janus 材料界面聚集行为和界面调控。在技术层面, 探索典型 Janus 复合材料批量化制备, 解决制约其实际应用的瓶颈问题。

10.14028/j.cnki.1003-3726.2016.09.004

收稿: 2016-05-30; 修回: 2016-07-20;

基金项目: 国家自然科学基金(51233007);

作者简介: 杨振忠(1968—), 男, 中国科学院化学研究所高分子物理与化学国家重点实验室研究员, 主要研究方向为高分子复合材料微加工及其物理与化学问题;

* 通讯联系人, E-mail: yangzz@iccas.ac.cn.

1 Janus 复合材料结构/功能设计

1.1 Pickering 乳液界面合成

界面法是制备 Janus 材料的直接方法,利用界面对胶体颗粒的分区作用,能实现胶体颗粒的部分保护。为了提高产量,从传统二维平面拓展到三维乳液界面。然而,胶体颗粒在液体界面上容易转动,导致颗粒表面的分区改性失败。关键问题在于如何抑制胶体在界面的转动。Granick 等最早报道了 Pickering 乳液界面制备 Janus 颗粒的方法^[23]。改性二氧化硅颗粒固定在石蜡/水 Pickering 乳液界面。降低温度凝固石蜡,抑制微球在界面转动。以硅烷偶联剂改性二氧化硅裸露在外的表面,得到 Janus 颗粒。为进一步实现 Janus 颗粒形貌精确控制,我们提出 Pickering 乳液界面与化学刻蚀联用,制备非球形 Janus 颗粒的方法(如图 1a 所示)^[24]。改性的二氧化硅颗粒镶嵌在石蜡球表面,对其裸露在水相部分进行化学刻蚀,同时镶嵌在油相的官能团得以保持。控制刻蚀程度,得到不同结构非球形 Janus 颗粒。颗粒一侧的官能团为进一步复合其它组分提供了反应场所,如自由基聚合生长高分子。为了解决颗粒在液-液界面转动问题,我们提出微球两面在油-水界面同时进行原子转移自由基聚合,分别接枝亲油和亲水聚合物,一步制备 Janus 颗粒的方法(如图 1b 所示)^[25]。聚合反应一旦发生,界面颗粒就具备了 Janus 特性,两亲性颗粒在界面具有明确取向,一致了颗粒的无规转动,确保了颗粒表面的严格分区。通过特殊作用,对该 Janus 颗粒表面特定区域进一步复合功能物质,衍生系列功能性 Janus 颗粒。

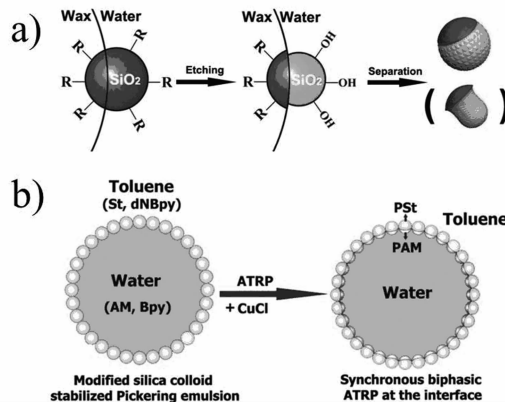


图 1 Pickering 乳液界面合成 Janus 高分子/无机复合颗粒

Figure 1 Pickering emulsion interfacial synthesis of polymeric-inorganic Janus composites

1.2 乳液界面材料化

乳液界面两侧化学不同,相应的微环境可看作具有“Janus”特性。以“Janus”界面为模板,自组织诱导取向生长,形成内、外两侧组成严格分区的 Janus 壳层,得到 Janus 中空球。在乳液 Janus 界面进行多组分硅偶联剂溶胶-凝胶反应,实现界面材料化,诱导亲水和亲油基团自发地分别朝向水相和油相,壳层内、外两侧组成不同,获得 Janus 中空球(见图 2)^[26]。若内侧含有双键,进一步通过自由基聚合反应,在内侧接枝聚合物,制备无机/聚合物复合 Janus 中空球^[27]。Janus 中空球壳内、外表面化学组成不同,与胶束结构类似,具有双亲特性。但 Janus 中空球更稳定。外侧亲水、内侧亲油的 Janus 中空球作为特殊容器,能够选择性地从外部亲水环境中富集油溶性物质并装载到空腔内,为油水分离提供了新途径。在 Janus 中空球内负载具有光催化作用的二氧化钛纳米颗粒,制备了 Janus 微反应器,实现了有机染料的富积和催化降解^[28]。在 Janus 中空球内部引入响应性聚合物如热敏聚合物 PNIPAM,能够实现油溶性物质的温度控制装载和释放^[29]。在 Janus 中空球内部复合石墨烯,装载油性物质如阿霉素。在近红外光辐射下,石墨烯表面生热,促进 DOX 快速释放,实现光热疗法与化疗的协同作用^[30]。

在乳液补丁结构界面,界面反应选择性地界面其中一相发生,实现界面选区材料化,控制 Janus 材

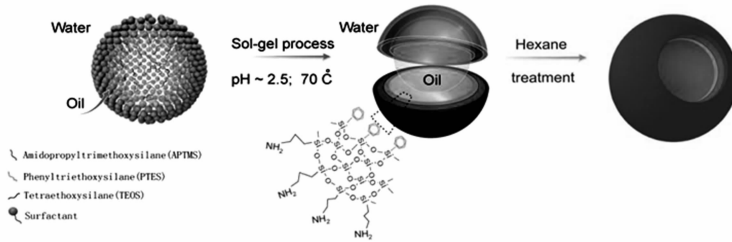


图 2 乳液界面自组装溶胶-凝胶材料化合成 Janus 中空球

Figure 2 Self-assembled sol-gel synthesis of Janus hollow spheres at emulsion interface

料微结构。部分水解苯乙烯-马来酸酐共聚物和 Tween-80 复合乳化剂共用,当聚合物表面活性剂为连续相时,诱导在连续相通过溶胶/凝胶成壳,形成多孔 Janus 复合中空球(见图 3a)。当聚合物表面活性剂为分散相时,选区材料化,无需破碎,直接得到一侧具有纳米突起结构,另一侧为平面的 Janus 颗粒(见图 3b)^[31]。进一步发展了联合传统乳液和原位生成颗粒 Pickering 效应的制备方法,得到组成严格分区和形状可控的 Janus 颗粒^[32,33]。对于传统乳液,在分散相油中进行自由基聚合导致相分离获得可形变聚合物微粒,聚合物微粒由于 Pickering 效应向界面扩散迁移并稳定在界面处。调节三相接触线界面张力差,作用于颗粒并诱导形变,实现聚合物颗粒形态调控。结合表面聚合物改性复合,实现颗粒表面化学分区。在乳液补丁结构界面得到锥形 Janus 颗粒(见图 3c)^[32]。在均一的乳液界面,得到飞碟结构 Janus 颗粒^[33]。利用亲水聚合物与功能物质的特殊作用,复合其它功能物质如 Fe₃O₄ 等,制备功能复合 Janus 材料。Janus 颗粒具有表面活性剂特性,能在固/气界面自组装形成单层结构,亲水/亲油两侧分别均具明确的空间取向。当使用杨梅状 Janus 复合颗粒,一侧为疏水聚合物改性纳米突起结构、另一侧含有可与基底键合的官能团,自组装后疏水一侧朝向空气,含官能团一侧与基底通过化学键合连接形成牢固涂层,构筑微纳结构表面^[31]。该涂层具有高强度、超疏水特性(滚动角小于 2°)。当使用锥形聚合物 Janus 复合颗粒时,疏水聚合物改性的锥顶朝向空气形成牢固涂层,具有水滴高粘附特性^[32]。使用 Janus 颗粒构筑具有特殊润湿性涂层方法简单易操作,特别适用于复杂结构表面。

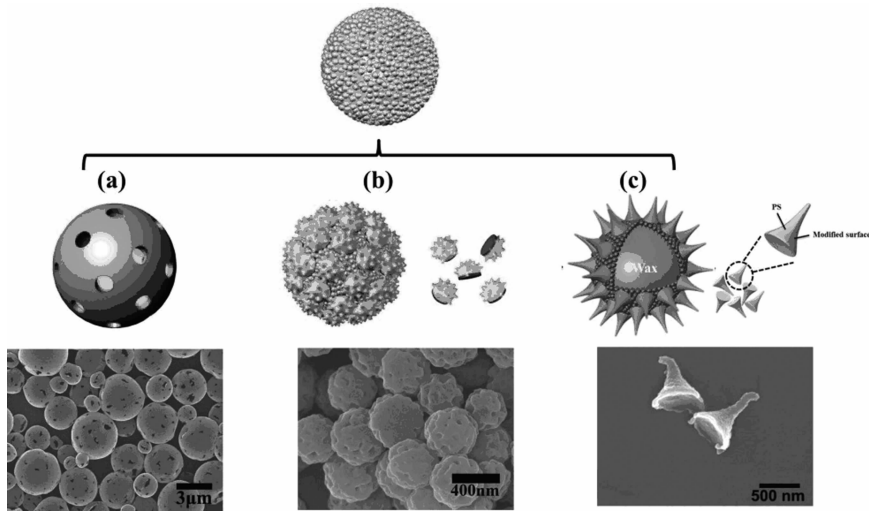


图 3 乳液界面“补丁”结构调控 Janus 材料微结构

Figure 3 Microstructure controlling of Janus materials via patchy interface of emulsion

1.3 Janus 纳米片材料

Janus 中空球破碎得到 Janus 纳米片(见图 4a)^[34]。该方法制备过程简便,适于大规模制备化学组成和结构可调的 Janus 片材料。与球形 Janus 颗粒相比,片状 Janus 材料具有高度各向异性,在乳液界面转

动受到限制,保证乳液更稳定。Janus 纳米片稳定的乳液甚至可在空气稳定存在,得到“干液滴”。选区复合功能纳米粒子,如在亲水一侧吸附 Fe_3O_4 纳米粒子,获得磁响应性,实现了乳液液滴磁分离和颗粒乳化剂磁回收。

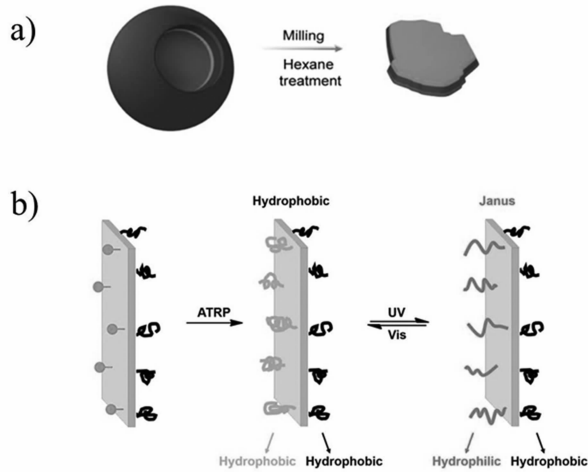


图4 Janus 纳米片制备及响应性聚合物选区复合

Figure 4 Synthesis of Janus nanosheets and selective modification of responsive polymer

在 Janus 片材料某侧选区复合响应性聚合物,赋予 Janus 复合片温度、pH、离子等响应性,为调控 Janus 片材料表面浸润性提供更多变量。在 Janus 片氨基一侧通过酰胺化反应引入 ATRP 聚合引发剂,聚合接枝具有 pH 响应性的聚合物(聚 *N,N*-二乙基氨基甲基丙烯酸乙酯, PDEAEMA),得到响应性的 Janus 复合纳米片,进一步与磁性纳米颗粒复合,制备具有 pH 和磁双响应性的 Janus 复合纳米片^[35]。以双响应性的 Janus 复合纳米片作为颗粒乳化剂稳定乳液,实现了液滴磁操控和乳液稳定性 pH 控制。同理,通过 RAFT 聚合,选区引入温敏性聚合物(聚 *N*-异丙基丙烯酰胺, PNIPAM),赋予 Janus 片温度响应性和乳液稳定性温度操控。利用 Janus 片两侧不同基团,在片两侧分别接枝不同响应性聚合物,如一侧为温敏性 PNIPAM、另一侧为 pH 响应性 PDEAEMA^[36],实现了 Janus 复合片两侧浸润性响应性调控,能够在更大范围内调控其聚集结构,实现乳液类型和稳定性调控。接枝光响应性聚合物(PSPMA),得到光响应的无机/聚合物复合纳米片(见图 4b)^[37]。在紫外光和可见光照射下,调控复合片在两侧疏水和两亲之间可逆转变。在 Janus 片选区引入离子液体或聚合离子液体,利用离子液体通过阴离子交换调控亲/疏水性质特点,实现了 Janus 片的离子操控^[38,39]。借助离子液体丰富的阴离子组成,引入催化等功能性。在固/液界面,通过单体与模板单分子层吸附/交联,形成纳米薄膜。对薄膜外侧进行改性,得到 Janus 纳米片。Janus 纳米片厚度 3.5nm,高度柔润,能够适应液滴界面曲率发生弯曲,实现了 Janus 纳米单个片包裹石蜡液滴^[40]。

1.4 种子乳液聚合诱导相分离

溶胀聚合诱导多组分聚合物相分离是制备非球型颗粒通用方法^[41~45]。但是,相分离往往不完全,导致颗粒内组分分区不严格。我们以交联聚丙烯腈(PAN)中空球作为种子,采用种子乳液聚合,在 PAN 中空球表面生长 PS 球,制得聚合物非球型颗粒。尽管 PS 部分不含有 PAN,但 PAN 部分一定含有少量 PS,因此颗粒内组分分区不严格。进一步对 PAN 一侧化学改性获得聚合物凝胶并引入官能团,诱导功能物质生长,保证了组成严格分区(见图 5a)^[46]。控制单体含量,调节 Janus 颗粒两部分比例,调控其 Janus 平衡值。同理,以交联 PS 中空微球为模板,以 3-甲基丙烯酰氧丙基三甲氧基硅烷(MPS)溶胀聚合相分离,结合溶胶-凝胶反应,制备了 PMPS/PS 雪人结构 Janus 颗粒^[47]。选区复合磁性纳米颗粒,获得磁响应性 Janus 颗粒,拓展了组成及功能性。

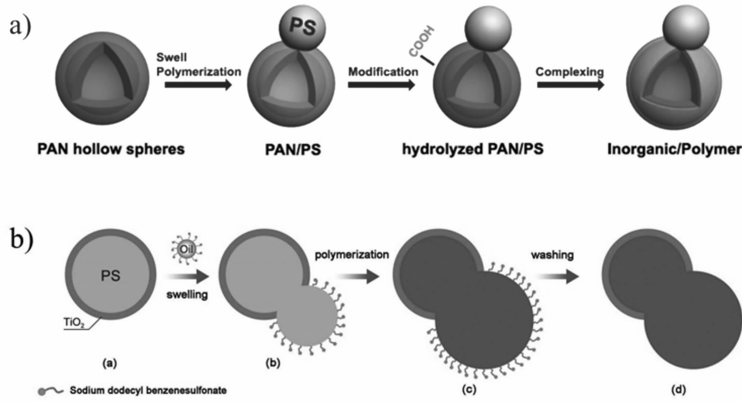


图 5 雪人结构 Janus 颗粒

Figure 5 Snowman-like Janus particles

以无机颗粒为种子,聚合诱导在球面去润湿,制备非对称结构非球形颗粒^[48,49]。但是,无机颗粒表面往往被聚合物覆盖,复合颗粒不是真正意义的 Janus 颗粒。我们提出通过超声辅助表面刻蚀,选择去除聚合物薄层部分,重新露出新鲜 SiO₂ 表面,获得组成严格分区的 Janus 颗粒^[50]。核/壳结构复合颗粒是一类有趣材料体系,两种不同组分分布在核和壳层,经常用作模板在除去内核后制备中空微球。因溶解渗透压作用,如果壳层具有足够强度,在壳层上形成一个孔洞。Wang 等^[51]利用四氢呋喃/水混合溶剂对聚苯乙烯/聚电解质核/壳结构颗粒溶胀并挤出聚苯乙烯内核,制备表面化学分区可控的 Janus 颗粒。但是,溶出的颗粒部分容易脱落,在高固含量时容易导致颗粒粘连融合。我们从聚苯乙烯/二氧化钛核/壳结构颗粒出发,以乳化的溶剂对核/壳结构颗粒进行溶胀,导致无机壳层破裂并释放聚苯乙烯核岛壳表面,得到雪人状 Janus 颗粒(见图 5b)^[52]。若选用可聚合单体作为溶剂,溶胀后升温聚合即可得到交联聚合物突起,得到结构稳定的雪人状 Janus 颗粒。因体系中存在表面活性剂,保证 Janus 颗粒即便在高固含量时仍能稳定不粘连,为大量制备 Janus 颗粒提供新思路。

1.5 嵌段聚合物组装法

嵌段聚合物由多组分通过化学键连接,是衍生 Janus 纳米材料的重要原料。传统方法需要预先将嵌段聚合物组装制备超分子结构,部分交联后再解组装获得 Janus 纳米材料。Janus 材料形状(如球、棒、片等)由超分子微结构确定。该方法需要嵌段聚合物分子量分布均一和链段足够长,保证强相分离后微结构均一。我们提出嵌段聚合物受限空间组装,选择性拆解制备 Janus 材料新思路(见图 6)。以乳液液滴为受限空间,溶剂挥发后,聚苯乙烯-聚乙烯吡啶(PS-*b*-P4VP)在液滴内相分离得到补丁组装结构(见图 6a)。选择交联 P4VP 补丁,使用溶剂解离获得 Janus 纳米颗粒^[53]。进一步,选择中性表面活性剂聚乙烯醇(PVA),控制 PS-*b*-P4VP 浓度及液滴大小,调控组装结构中 P4VP 补丁数目,获得胶体分子^[54]。特别是,当聚合物浓度足够低、液滴尺寸足够小,能够调控 P4VP 补丁数目为一,便非常简单地制备了 Janus 纳米颗粒^[55],无需繁琐的组装/解组装步骤。利用乳液-溶剂挥发法制备了 PS-*b*-P4VP 自组装椭球,PS 与 P4VP 呈交替平行层状排列。使用乙醇溶剂选择性解离 P4VP 层,同时保证 PS 层不受影响,得到 P4VP/PS/P4VP 三明治结构纳米盘。交联 P4VP 层后,解离 PS 层,得到 P4VP/PS 双层 Janus 纳米盘(见图 6b)^[56]。Janus 纳米盘形状规则,厚度均匀。P4VP 面电荷性质可调,复合金属和磁性物质,显著拓展其功能性。

2 结论与展望

Janus 材料表面具有两种不同(如亲水/疏水)甚至相反(极性/非极性,正电荷/负电荷等)的组成/性质明确分区特性,作为功能颗粒乳化剂将在制备功能超结构和界面功能化及操控方面具有重要意义,有

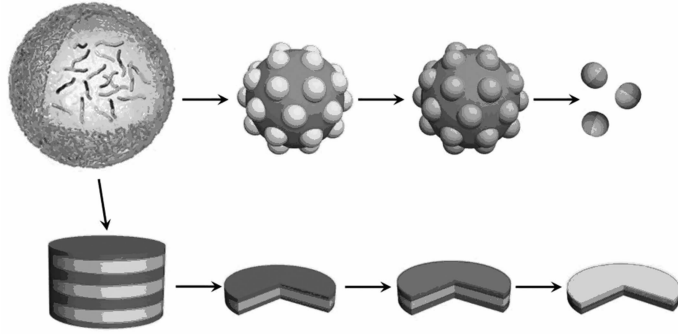


图 6 嵌段共聚物受限液滴中性界面诱导组装/解组装制备 Janus 材料

Figure 6 Synthesis of Janus materials by interface induced stepwise assembly-disassembly of block copolymers in confined droplets

望为水处理、功能表面和高分子多组分材料界面功能化及相态调控提供新思路。发展制备纳米尺度 Janus 复合功能材料的新方法,集成纳米颗粒功能和高分子链官能团及功能调节特性,将在复合材料微结构及界面调控方面具有重要意义。从技术层面,发展新的制备方法学,大批量制备结构可控的 Janus 材料仍具挑战性,一旦获得突破,将使 Janus 材料众多诱人潜在应用得以真正实现。

参考文献:

- [1] de Gennes P G. *Rev Mod Phys*, 1992, 64, 645.
- [2] Ramsden W. *Proc R Soc, London*, 1903, 72, 156.
- [3] Pickering S U. *J Chem Soc*, 1907, 91, 2001.
- [4] Vignati E, Piazza R, Lockhart T P. *Langmuir*, 2003, 19, 6650.
- [5] Binks B P, Lumsdon S O. *Langmuir*, 2001, 17, 4540.
- [6] Binks B P, Fletcher P D I. *Langmuir*, 2001, 17, 4708.
- [7] Takahara K Y, Ikeda S, Ishino S, Tachi K, Ikeue K, Sakata T, Hasegawa T, Mori H, Matsumura M, Ohtani B. *J Am Chem Soc*, 2005, 127, 6271.
- [8] Chen Q, Whitmer J K, Jiang S, Bae S C, Luijten E, Granick S. *Science*, 2011, 331, 199.
- [9] Hong L, Cacciuto A, Luijten E, Granick S. *Nano Lett*, 2006, 6, 2510.
- [10] Hong L, Cacciuto A, Luijten E, Granick S. *Langmuir*, 2008, 24, 621.
- [11] Chen Q, Bae S C, Granick S. *Nature*, 2011, 469, 381.
- [12] Chen Q, Diesel E, Whitmer J K, Bae S C, Luijten E, Granick S. *J Am Chem Soc*, 2011, 133, 7725.
- [13] Munao G, Preisler Z, Vissers T, Smallenburg F, Sciortino F. *Soft Matter*, 2013, 9, 2652.
- [14] Vannozzi C. *Soft Matter*, 2012, 8, 5214.
- [15] Park B J, Lee D. *ACS Nano*, 2012, 6, 782.
- [16] Ruhland T M, Groschel A H, Ballard N, Skelton T S, Walther A, Mueller A H E, Bon S A F. *Langmuir*, 2013, 29, 1388.
- [17] Yan L T, Popp N, Ghosh S K, Boeker A. *ACS Nano*, 2010, 4, 913.
- [18] Xu K L, Guo R H, Dong B J, Yan L T. *Soft Matter*, 2012, 8, 9581.
- [19] Li W, Dong B J, Yan L T. *Macromolecules*, 2013, 46, 7465.
- [20] Jiang S, Granick S. *Janus particles synthesis, self-assembly and applications*, RSC, London, England, 2012.
- [21] Liang F X, Zhang C L, Yang Z Z. *Adv Mater*, 2014, 26, 6944.
- [22] 张成亮, 韦玮, 梁福鑫, 杨振忠. *中国科学:化学*, 2012, 11, 1616.
- [23] Hong L, Jiang S, Granick S. *Langmuir*, 2006, 22, 9495.
- [24] Liu B, Zhang C L, Liu J G, Qu X Z, Yang Z Z. *Chem Commun*, 2009, 3871.
- [25] Liu B, Wei W, Qu X Z, Yang Z Z. *Angew Chem Int Ed*, 2008, 47, 3973.
- [26] Liang F X, Liu J G, Zhang C L, Qu X Z, Li J L, Yang Z Z. *Chem Commun*, 2011, 47, 1231.
- [27] Chen Y, Liang F X, Yang H L, Zhang C L, Wang Q, Qu X Z, Li J L, Cai Y L, Qiu D, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2012, 45, 1460.

- [28] Zhao L L, Zhu L J, Chen Y, Wang Q, Li J L, Zhang C L, Liang F X, Qu X Z, Yang Z Z. *Chem Commun*, 2013, 49, 6161.
- [29] Chen Y, Yang H L, Zhang C L, Wang Q, Qu X Z, Li J L, Liang F X, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2013, 46, 2754.
- [30] Tang L, Zhu F Y, Liang F X, Wang Q, Qu X Z, Yang Z Z. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8, 12056.
- [31] Yang H L, Liang F X, Chen Y, Wang Q, Qu X Z, Yang Z Z. *NPG Asia Mater*, 2015, 7, e176.
- [32] Zhao H, Liang F X, Qu X Z, Wang Q, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2015, 48, 700.
- [33] Wang Y H, Zhang C L, Tang C, Li J, Shen K, Liu J G, Qu X Z, Li J L, Wang Q, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2011, 44, 3787.
- [34] Liang F X, Shen K, Qu X Z, Zhang C L, Wang Q, Li J L, Liu J G, Yang Z Z. *Angew Chem Int Ed*, 2011, 50, 2379.
- [35] Yang H L, Liang F X, Wang X, Chen Y, Zhang C L, Wang Q, Qu X Z, Li J L, Wu D C, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2013, 46, 2754.
- [36] Zhao Z G, Liang F X, Zhang G L, Ji X Y, Wang Q, Qu X Z, Song X M, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2015, 48, 3598.
- [37] Cao Z Q, Wang G J, Chen Y, Liang F X, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2015, 48, 7256.
- [38] Ji X Y, Zhang Q, Liang F X, Chen Q N, Qu X Z, Zhang C L, Wang Q, Li J L, Song X M, Yang Z Z. *Chem Commun*, 2014, 50, 5706.
- [39] Ji X Y, Zhang Q, Qu X Z, Wang Q, Song X M, Liang F X, Yang Z Z. *RSC Adv*, 2015, 5, 21877.
- [40] Liu Y J, Liang F X, Wang Q, Qu X Z, Yang Z Z, *Chem Commun*, 2015, 51, 3562.
- [41] Kim J W, Larsen R J, Weitz D A. *J Am Chem Soc*, 2006, 128, 14374.
- [42] Kim J W, Lee D Y, Shum H C, Weitz D A. *Adv Mater*, 2008, 20, 3239.
- [43] Saito N, Kagari Y, Okubo M. *Langmuir*, 2006, 22, 9397.
- [44] Saito N, Nakatsuru R, Kagari Y, Okubo M. *Langmuir*, 2007, 23, 11506.
- [45] Tanaka T, Okayama M, Kitayama Y, Kagawa Y, Okubo M. *Langmuir*, 2010, 26, 7843.
- [46] Tang C, Zhang C L, Liu J G, Qu X Z, Li J L, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2010, 43, 5114.
- [47] Sun Y J, Liang F X, Qu X Z, Wang Q, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2015, 48, 2715.
- [48] Ge J P, Hu Y X, Zhang T R, Yin Y D. *J Am Chem Soc*, 2007, 129, 8974.
- [49] Reculosa S, Legrand C P, Perro A, Duguet E, Lami E B, Mingotaud C, Ravaine S. *Chem Mater*, 2005, 17, 3338.
- [50] Zhang C L, Liu B, Tang C, Liu J G, Qu X Z, Li J L, Yang Z Z. *Chem Commun*, 2010, 46, 4610.
- [51] Yu H K, Mao Z W, Wang D Y. *J Am Chem Soc*, 2009, 131, 6366.
- [52] Liu B, Liu J G, Liang F X, Wang Q, Zhang C L, Qu X Z, Li J L, Qiu D, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2012, 45, 5176.
- [53] Deng R H, Liang F X, Qu X Z, Wang Q, Zhu J T, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2015, 48, 750.
- [54] Deng R H, Liu S Q, Liang F X, Wang K, Zhu J T, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2014, 46, 3701.
- [55] Deng R H, Li H, Zhu J T, Li B H, Liang F X, Jia F, Qu X Z, Yang Z Z. *Macromolecules*, 2016, 49, 1362.
- [56] Deng R H, Liang F X, Zhou P, Zhang C L, Qu X Z, Wang Q, Li J L, Zhu J T, Yang Z Z. *Adv Mater*, 2014, 26, 4469.

Janus Composites

LIANG Fu-xin, LIU Bing, YANG Zhen-zhong*

(*State Key Laboratory of Polymer Physics and Chemistry, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: Janus composites possess two different compositions thus functions distinctly compartmentalized onto the same objects. It is key to precisely tune their morphology, microstructure, and composition thus performance. Our recent progress in synthesis of Janus composites is summarized. Some challenging issues remain unsolved. A huge of practical applications ask for commercial availability of Janus functional composites.

Key words: Janus; Amphiphilic; Functional; Composites; Interfacial engineering