

文章编号:1007-2780(2019)07-0682-08

多彩液晶微胶囊的制备及性能研究

孙 聪*

(东北石油大学秦皇岛校区 石化系, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:采用手性剂掺杂向列相混合液晶制备出具备类似胆甾相液晶温变显色性能的液晶混合物。通过控制向列相液晶中手性剂的添加量,调节混合液晶的颜色,制备出系列室温下呈颜色转变的液晶混合物。在此基础上,探究 3 种不同添加剂对混合液晶显色性能的影响,确定具备最佳温变显色性能的液晶混合物配方。以上述液晶混合物为芯材、异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)为壁材,采用界面聚合法在不同反应条件下制备出一系列液晶微胶囊,并确定最佳反应条件。结果表明:最佳反应条件下,制备的液晶微胶囊粒径范围在 50~105 μm 之间,平均粒径在 68.06 μm 左右,囊芯材料含量约占 35%。液晶微胶囊呈规则球形,粒径比较均匀,具有良好的温变显色性能,且热稳定性较高,热分解温度达 330 $^{\circ}\text{C}$ 以上。

关键词:向列相液晶;手性剂;掺杂;微胶囊;界面聚合

中图分类号:O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193407.0682

Preparation and properties of polychromatic liquid crystal microcapsules

SUN Cong*

(Department of Petrochemical, Northeast Petroleum University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Nematic phase liquid crystal mixture with chiral dopant was synthesized to replace cholesteric liquid crystal as the core of microcapsule. Firstly, series of liquid crystal mixture color-changed at room temperature were prepared by adjusting the different ratios of nematic liquid crystal and chiral additive. Afterwards, three extra additives were explored respectively as the addition of the polychromatic liquid crystal mixture to determine the best formulation of liquid crystal mixture displaying different color at varied temperature. A series of liquid crystal microcapsule were conducted and refined by isophorone diisocyanate (IPDI) filled with the above liquid crystal mixture (*i.e.* the core of microcapsule) in terms of interfacial polymerization reaction. It can be concluded from the characterization that the best liquid crystal microcapsules size range between 50-105 μm with average particle size of 68.06 μm and the contents of core materials is about 35%. The microcapsules exhibit spherical with uniform particle size and good temperature change color performance simultaneously. In addition,

收稿日期:2019-02-21; **修订日期:**2019-05-02.

基金项目:黑龙江省省属本科高校基本科研业务费项目——东北石油大学引导性创新基金(No.2018YDQ-07)

Supported by Fundamental Research Funds for the Heilongjiang Province Universities——Leading Innovation Fund of Northeast Petroleum University (No. 2018YDQ-07)

* 通信联系人, E-mail: sunc_qhd0223@163.com

thermal decomposition temperature of 330 °C confirms the better thermal stability of liquid crystal microcapsules in this work.

Key words: nematic liquid crystal; chiral additives; dope; microcapsule; interfacial polymerization

1 引言

微胶囊主要是指一类由天然或合成高分子材料通过不同的制备方法研制而成的微型容器,其平均粒径一般在 2~200 μm 的范围内,但理论上,平均粒径在 0.01~10 000 μm 的范围内的微球都属于微胶囊范畴^[1]。微胶囊可以保护芯材免遭环境破坏,拓展芯材的应用领域^[2]。微胶囊的制备方法众多,目前常用的有界面聚合法、原位聚合法和复凝聚合法、溶剂蒸发法等^[3-6]。对于液晶微胶囊的研究,国内外均有所报道。范菲等人采用原位聚合法制备了聚氨酯包覆的光致变色化合物微胶囊,通过探究实验,确定最佳预聚温度为 20~60 °C,微胶囊平均粒径与芯壁质量比、搅拌速率和乳化速率均负相关^[7]。张九敏、魏杰等人采用界面聚合法制备胆甾相液晶微胶囊,并制得具有良好热敏显色性的液晶微胶囊薄膜^[8]。韩玉英、吕奎等人采用溶剂蒸发法制得具有特殊形貌的液晶微胶囊,并实现了微胶囊表面形貌的可控调整^[9]。韩国的 Heo 等采用溶液分散法制得了以聚甲基丙烯酸甲酯为壁材的液晶微胶囊^[10]。Ju 等采用原位悬浮聚合方法制得了热敏液晶微胶囊^[11]。

胆甾相液晶分子分层排列,各层的分子长轴之间有轻微的扭曲角度,多层分子排列方向逐渐扭转,呈螺旋结构,其螺旋程度由螺距 P 表征。当螺旋结构的周期与入射光波长同量级时,螺距起到衍射光栅的作用,螺旋结构会选择性地反射光的偏振组分,从而呈现不同颜色。此外,当温度发生细微变化时,螺距也会随之改变,进而呈现出颜色的变化^[12-13]。与胆甾相液晶相似,手性掺杂向列相液晶也具有上述选择性反射的光学特性和显著的温度效应^[14-15]。因此,在向列相液晶中添加手性剂,就可形成螺旋结构,所得液晶混合物的螺距会随着手性剂添加量的不同而发生改变^[16],进而呈现不同的颜色。由于液晶材料的性能会因

环境干扰而产生较大变化,故采用微胶囊技术对其进行包覆保护。

本文完成了手性向列相液晶的配制及性能优化,并以最佳配方为芯材、异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)为壁材,采用界面聚合法制备了聚氨酯包覆的彩色液晶微胶囊。结合 IR、TG 推测微胶囊的结构及热稳定性,利用 SEM、POM 及激光粒度仪对微胶囊的形貌及尺寸大小进行表征。

2 实验

2.1 试剂与仪器

主要实验试剂:小分子向列相液晶(1[#]);手性剂(2[#]),CB15;含氰基液晶(3[#]),戊基联苯腈;含氟基液晶(4[#]),丙基双环己基对氟苯;含酯基液晶(5[#]),丙基双环己基甲酸-2,3-二氰基-4-戊氧基苯酚酯;聚乙烯醇(1788 低粘度型),阿拉丁;异氰酸酯二异氰酸酯(异构体的混合物),阿拉丁;二月桂酸二丁基锡,阿拉丁。

主要测试仪器:傅里叶红外光谱仪(Spectrum One),美国 PE 公司;差示扫描量热仪(DSC 204),德国 NETZSCH 公司;热台偏光显微镜(LEICA DMRX),德国 LEICA 公司;紫外可见分光光度计(Lambda 900),美国 PE 公司;热重分析仪;激光粒度仪;扫描电镜。

2.2 囊芯材料的配制

(1) 零添加剂系列手性向列相液晶的配制

将 1[#] 和 2[#] 依一定比例混合,加热至清亮使样品混合均匀,冷却备用,得到编号依次为 A₀~G₀ 的混合液晶,混合液晶 A₀~G₀ 组分质量含量如表 1 所示。

(2) 含添加剂系列手性向列相液晶的配制

取等量 A₀~G₀ 混合液晶,按一定比例分别加入 3[#]、4[#]、5[#],均加热至清亮使样品混合均匀,冷却备用,得到 3 个系列的混合液晶。将混合液晶命名为 S_{i-n},其中 S 表示编号 A~G, i 表示添

加剂成分, n 表示添加剂质量百分比。

表 1 混合液晶 $A_0 \sim G_0$ 的组分质量含量及颜色
Tab.1 Component quality content of liquid crystal mixture $A_0 \sim G_0$ and their colors

编号	1 [#] 和 2 [#] 的质量比	颜色
A_0	100 : 35	红
B_0	100 : 50	橙
C_0	100 : 58	黄
D_0	100 : 74	绿
E_0	100 : 88	青
F_0	100 : 95	蓝
G_0	100 : 111	紫

2.3 液晶微胶囊的制备

(1) 乳化剂聚乙烯醇水溶液的配制

称取 1 份 PVA-1788 白色粉末和 99 份去离子水混合, 高速搅拌至 PVA 粉末在水中全部溶解, 静置消泡后备用。

(2) 液晶微胶囊的制备

将混合液晶与适量的 PVA 水溶液混合, 乳化 6 min。在上述乳化液中缓慢加入异氰酸二异氰酸酯 (IPDI), 以相同乳化速率乳化 6 min。然后转移至三口烧瓶中, 加入催化剂二月桂酸二丁基锡 (DBTDL), 在一定的搅拌速率下反应 6 h, 反应温度为 40 ℃。反应结束后, 抽滤并真空干燥, 制得微胶囊粉末。

3 结果与讨论

3.1 囊芯材料的热性能分析

采用差示扫描量热仪测定混合液晶及其各组分 DSC 曲线, 探究添加剂 3[#]、4[#]、5[#] 对混合液晶热性能的影响。

结合混合液晶各组分的 DSC 曲线可知, 向列相液晶组分 1[#] 的清亮点为 105.44 ℃; 手性剂组分 2[#] 的熔点为 -24.29 ℃; 添加剂组分 3[#] 的熔点为 131.44 ℃, 清亮点为 237.94 ℃; 添加剂组分 4[#] 的清亮点为 106.23 ℃; 添加剂组分 5[#] 的熔点为 61.47 ℃。混合液晶 $A_0 \sim G_0$ 及 S_{i-n} 的 DSC 曲线如图 1 所示。

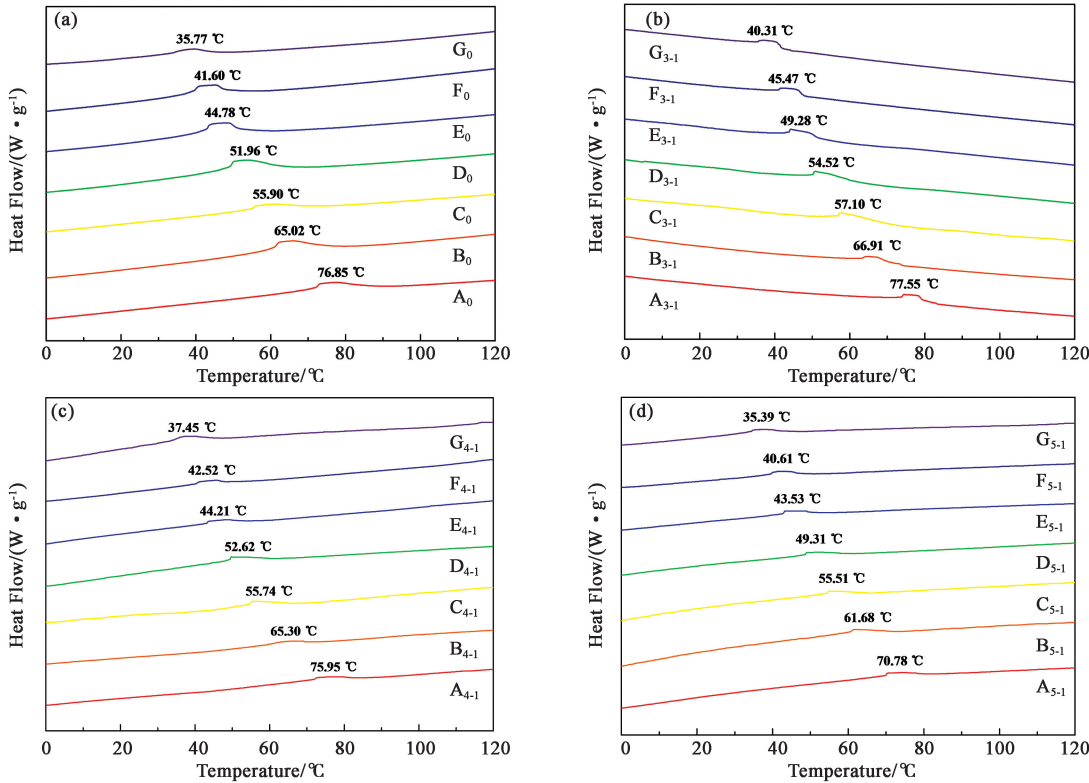


图 1 混合液晶的 DSC 曲线。(a) $A_0 \sim G_0$; (b) $A_{3-1} \sim G_{3-1}$; (c) $A_{4-1} \sim G_{4-1}$; (d) $A_{5-1} \sim G_{5-1}$ 。
Fig.1 DSC curves of liquid crystal mixture. (a) $A_0 \sim G_0$; (b) $A_{3-1} \sim G_{3-1}$; (c) $A_{4-1} \sim G_{4-1}$; (d) $A_{5-1} \sim G_{5-1}$.

由图 1(a)可知,随着组分 2[#] 含量的增加,混合液晶的清亮点逐渐降低,且均低于单一组分 1[#] 的清亮点 105.44 °C,清亮点区间在 30~80 °C。由图 1(b)可知,当加入组分 3[#] 时,清亮点均有所升高,且随着组分 2[#] 含量的增加,升高幅度呈上升趋势。由图 1(c)可知,当加入组分 4[#] 时,清亮点呈波动变化。由图 1(d)可知,当加入组分 5[#] 时,清亮点均有所降低,且随着组分 2[#] 含量的增加,降低幅度基本持平。

综上所述,4 个系列的混合液晶清亮点区间

均在 30~80 °C 范围内,3 种添加剂的加入对混合液晶的清亮点有不同程度的改变。添加剂 3[#] 可用于提高混合液晶清亮点,添加剂 5[#] 可降低混合液晶清亮点,添加剂 4[#] 则对混合液晶清亮点影响不稳定,忽大忽小,但改变幅度均不大。

3.2 囊芯材料的织构分析

采用热台偏光显微镜测定混合液晶的 POM 图片,探究添加剂 3[#]、4[#]、5[#] 对混合液晶液晶性能的影响。在室温条件下(25 °C 左右)测定混合液晶 A₀~G₀ 的 POM 图片如图 2 所示。



图 2 混合液晶 A₀~G₀ 的 POM 图片

Fig.2 POM photos of liquid crystal mixture A₀-G₀

由图 2 可知,在室温条件下,随着组分 2[#] 含量的增加,向列相液晶的各层分子长轴间扭曲角度不断改变,从而显示出不同的颜色。

对混合液晶 A₀~G₀ 及 S_n 分别进行变温条件下的 POM 测试,选定颜色变化范围较宽的 D 系列混合液晶。在变温条件下测定混合液晶 D₃₋₁、D₄₋₁

及 D₅₋₁ 的 POM 图片如图 3 所示。由图 3 可知,随着温度的升高,混合液晶发生颜色变化,依次出现绿色、浅蓝、深蓝、紫色、红色、橙色、黄色。通过比较,变温条件下,混合液晶 D₄₋₁ 的变色效果最稳定,且变色温度范围在 20~50 °C 之间,可选择混合液晶 D₄₋₁ 作为微胶囊包覆的囊芯材料。

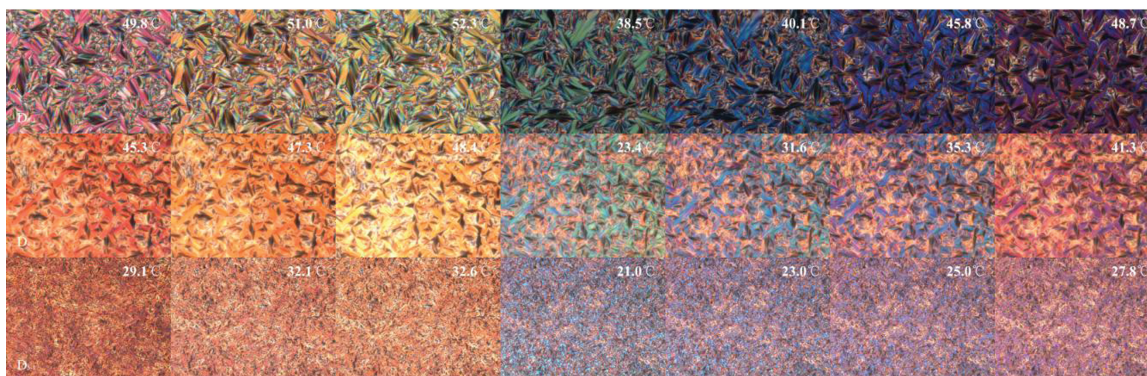


图 3 混合液晶 D₃₋₁、D₄₋₁ 及 D₅₋₁ 的 POM 图片。

Fig.3 POM photos of liquid crystal mixture D₃₋₁, D₄₋₁ and D₅₋₁.

3.3 囊芯材料的反射图谱测定

采用紫外可见分光光度计测定室温下混合液晶 A₀~G₀ 及 S_n 的反射图谱,探究添加剂 3[#]、4[#]、5[#] 对混合液晶显色性能的影响。

在室温条件下(25 °C 左右)测定混合液晶 A₀~G₀ 及 S_n 的反射图谱,如图 4 所示;各峰值对应的波长如表 2 所示。结合图 4 和表 2 可知,随着组

分 2[#] 含量的增加,混合液晶的反射峰值波长呈下降趋势,响应波长范围对应的颜色依次为红色、橙色、黄色、绿色、浅蓝、深蓝和紫色,这与偏光图片显示的结果相一致。图 4(a)中,浅蓝与深蓝区域有重叠,说明混合液晶 A₀~G₀ 在室温下不能完整表示 7 种渐变色,E₀ 与 F₀ 颜色相近,不易区分。经比较,图 4(b)和图 4(d)中未明显改善此现象。

图 4(c)中,7 种渐变色被明显区分,说明混合液晶 $A_{4-1} \sim G_{4-1}$ 在室温下能够完整表示 7 种渐变色。

通过比较,室温条件下可选择混合液晶 $A_{4-1} \sim G_{4-1}$ 作为微胶囊包覆的囊芯材料。

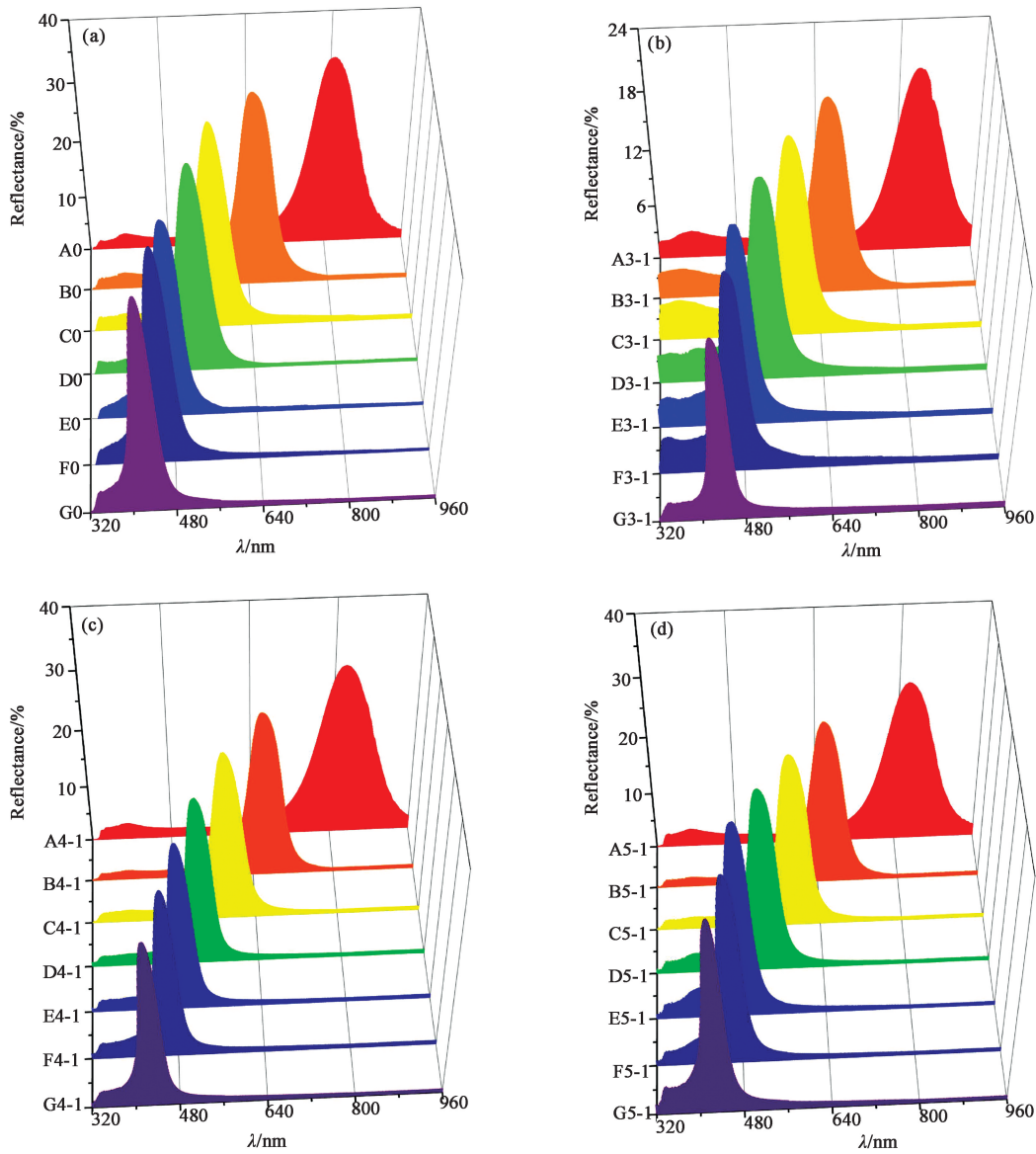


图 4 混合液晶的反射图谱。(a) $A_0 \sim G_0$;(b) $A_{3-1} \sim G_{3-1}$;(c) $A_{4-1} \sim G_{4-1}$;(d) $A_{5-1} \sim G_{5-1}$ 。

Fig.4 Reflection spectra of liquid crystal mixture.(a) $A_0 \sim G_0$;(b) $A_{3-1} \sim G_{3-1}$;(c) $A_{4-1} \sim G_{4-1}$;(d) $A_{5-1} \sim G_{5-1}$.

表 2 混合液晶的反射峰值波长

Tab.2 Peak wavelength of liquid crystal mixture (nm)

编号	S_0	S_{3-1}	S_{4-1}	S_{5-1}
A	808	831	821	818
B	647	659	657	650
C	561	583	581	583
D	521	528	526	525

续 表

编号	S_0	S_{3-1}	S_{4-1}	S_{5-1}
E	471	478	481	480
F	453	463	461	459
G	425	434	431	434

3.4 微胶囊的结构表征

采用傅里叶红外光谱仪分别测定包覆前后微

胶囊的红外光谱,如图5所示。图5中,曲线a表示已包覆芯材微胶囊的红外光谱,曲线b表示未包覆芯材微胶囊的红外光谱。未包覆芯材时,曲线b中在 $2\,265.83\text{ cm}^{-1}$ 处出现异氰酸酯中 $\text{—N}=\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰;包覆芯材后, $\text{—N}=\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰消失,在 $1\,735.70\text{ cm}^{-1}$ 处出现酯基 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰。说明合成的含芯微胶囊中包覆有目标囊芯材料。

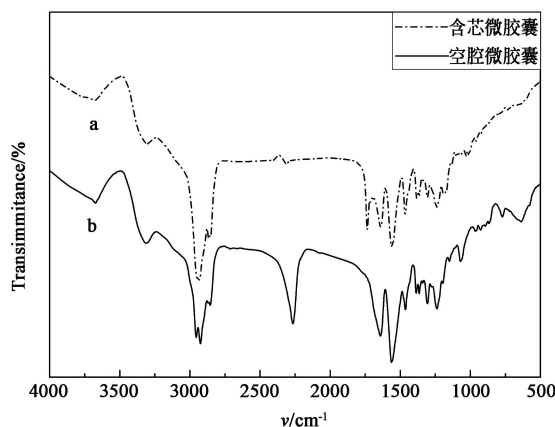


图5 包覆前后微胶囊的红外光谱

Fig.5 Infrared spectra of microcapsules before and after encapsulation

3.5 微胶囊的热稳定性分析

采用热重分析仪分别测定包覆前后微胶囊的TG曲线,如图6所示。

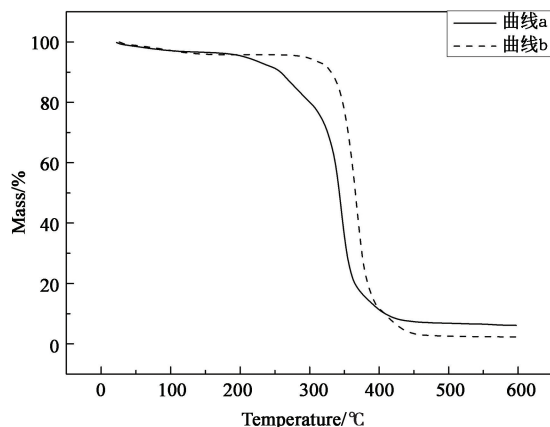


图6 包覆前后微胶囊的TG曲线

Fig.6 TG curves of microcapsules

图6中,曲线a表示已包覆芯材微胶囊的TG曲线,曲线b表示未包覆芯材微胶囊的TG曲线。从曲线a可以看出,在混合液晶的分解温度 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之前,只有少量的重量损失,这部分质量损失主

要是由少量水分和未包覆的囊芯材料的分解导致的,说明囊芯材料被包覆在囊壁材料内。随着温度的升高,囊壁内的混合液晶开始迅速分解,当温度达到 $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,囊芯材料基本分解完全,此时可以粗略地估算出囊芯材料含量为 35% 。由曲线b可知,囊壁材料在 $310\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开始分解,至 $452\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,基本分解完全,据此推测微胶囊的热稳定温度在 $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

3.6 微胶囊的粒径测试

采用激光粒度仪对不同反应条件下制备的液晶微胶囊进行粒径分散测试,并绘制粒度分布图,如图7所示。

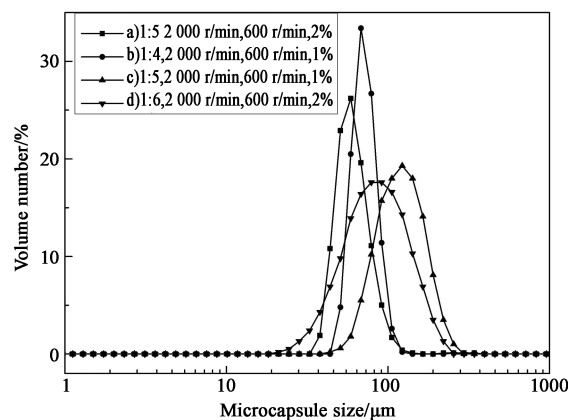


图7 液晶微胶囊在不同反应条件下的粒径分布图

Fig.7 Particle size distribution of liquid crystal microcapsules under different reaction conditions

由图7可知,曲线a中 $d(0.5)=58.77\text{ }\mu\text{m}$,曲线b中 $d(0.5)=68.06\text{ }\mu\text{m}$,曲线c中 $d(0.5)=122.40\text{ }\mu\text{m}$,曲线d中 $d(0.5)=85.05\text{ }\mu\text{m}$ 。曲线b对应的液晶微胶囊粒径分布最窄,平均粒径在 $68.06\text{ }\mu\text{m}$,粒径范围在 $50\sim 105\text{ }\mu\text{m}$ 之间,其反应条件为:芯壁比为 $1:4$,乳化速率为 $2\,000\text{ r/min}$,搅拌速率为 600 r/min ,乳化剂用量为 1% 。

3.7 微胶囊的显色效果表征

采用热台偏光显微镜测定不同反应条件下制备的液晶微胶囊的POM图片,探究液晶微胶囊的显色效果。当反应条件满足芯壁比为 $1:4$ 、乳化速率为 $2\,000\text{ r/min}$ 、搅拌速率为 600 r/min 、乳化剂用量为 1% 时,显色效果最佳。随着温度的升高,液晶微胶囊发生明显的颜色变化,但由于包覆成微胶囊对液晶材料有一定束缚,其变色情况

与未包覆的囊芯材料混合液晶 D₄₋₁ 不尽相同。偏光显微镜下,微胶囊依次出现红色、橙色、黄色、绿色、蓝绿、蓝紫,且变色温度范围在 30~65 ℃ 之

间,该液晶微胶囊在升温条件下的 POM 图片如图 8 所示。

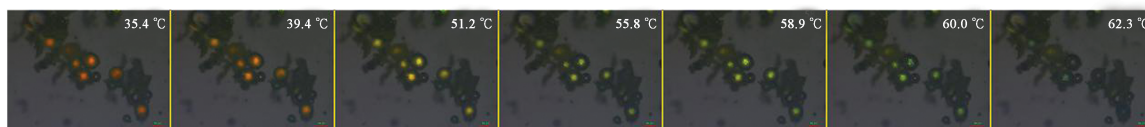


图 8 显色液晶微胶囊在升温条件下的 POM 图片

Fig.8 POM photos of liquid crystal microcapsules under heating conditions

3.8 微胶囊的形貌表征

依据粒径分析结果及偏光测试,确定最佳反应条件应设定如下:芯壁比为 1:4,乳化速率为 2 000

r/min,搅拌速率为 600 r/min,乳化剂用量为 1%。采用扫描电镜对上述反应条件下制备的液晶微胶囊进行形貌表征测试,得到如图 9 所示的 SEM 图。

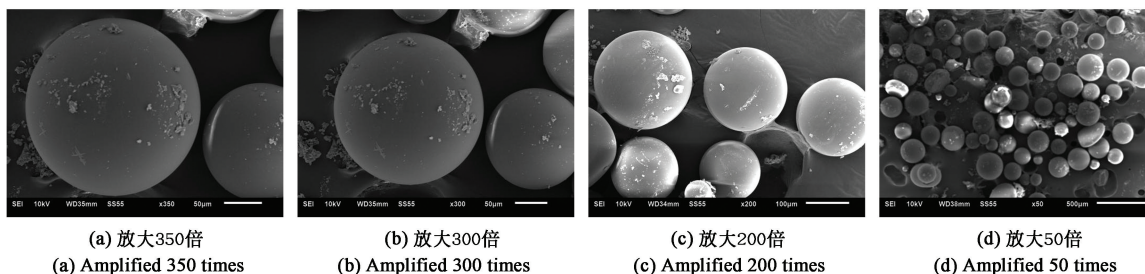


图 9 液晶微胶囊的 SEM 图

Fig.9 SEM images of liquid crystal microcapsules

图 9 中,液晶微胶囊基本呈规则球状,表面致密,粒径比较均匀。图中球体表面颗粒状物质为未除净的乳化剂 PVA 析出沉积物,平均粒径在 70 nm 左右,与粒径分析结果基本相符。

4 结 论

本文采用界面聚合法在不同反应条件下制备

出一系列液晶微胶囊,并确定最佳反应条件:芯壁比为 1:4,乳化速率为 2 000 r/min,搅拌速率为 600 r/min,乳化剂用量为 1%。通过对液晶微胶囊的一系列性能表征,成功证明该方法制备的液晶微胶囊呈规则球形,粒径范围在 50~105 μm 之间,平均粒径约为 68.06 μm,囊芯材料含量约占 35%,热稳定温度为 330 ℃,具有良好的变温显色性能。

参 考 文 献:

- [1] 王东辉,赵裕蓉.微胶囊的应用及研究进展 [J].化工新型材料,1999,27(7):11-14.
WANG D H, ZHAO Y R. Application and recent progress of microencapsulation [J]. *New Chemical Materials*, 1999, 27(7): 11-14. (in Chinese)
- [2] 宋健,陈磊,李效军.微胶囊化技术及应用 [M].北京:化学工业出版社,2001:20-40.
SONG J, CHEN L, LI X J. *Microcapsule Technology and its Application* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 20-40. (in Chinese)
- [3] FREITAS S, MERKLE H P, GANDER B. Microencapsulation by solvent extraction/evaporation: reviewing the state of the art of microsphere preparation process technology [J]. *Journal of Controlled Release*, 2005, 102(2): 313-332.
- [4] LI M, ROUAUD O, PONCELET D. Microencapsulation by solvent evaporation: state of the art for process engi-

- neering approaches [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2008, 363(1/2): 26-39.
- [5] DALMORO A, BARBA A A, LAMBERTI G, *et al.* Intensifying the microencapsulation process: ultrasonic atomization as an innovative approach [J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2012, 80(3): 471-477.
- [6] HEISKANEN H, DENIFL P, PITKÄNEN P, *et al.* Effect of concentration and temperature on the properties of the microspheres prepared using an emulsion-solvent extraction process [J]. *Advanced Powder Technology*, 2012, 23(6): 779-786.
- [7] 范菲,王潮霞.聚氨酯-光致变色微胶囊的制备及其粒径研究[J].功能材料,2013,44(10):1511-1514.
FAN F, WANG C X. Preparation and the particle size study of polyurethane microcapsules containing photochromophores [J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(10): 1511-1514. (in Chinese)
- [8] 张九敏.胆甾相液晶微胶囊的制备与显色性能的研究[D].北京:北京化工大学,2012.
ZHANG J M. Microencapsulation of cholesteric liquid crystals by interfacial polymerization and its thermochromic characteristics [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] 韩玉英,吕奎.溶剂蒸发法液晶微胶囊表面形貌研究[J].广东化工,2015,42(6):53-54,41.
HAN Y Y, LV K. Morphology studies on liquid crystals microcapsules prepared by solvent evaporation [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2015, 42(6): 53-54, 41. (in Chinese)
- [10] HE O J S, PARK N H, RYU J H, *et al.* Preparation of cholesteric liquid crystal microcapsules for application in colour image storage media [J]. *Liquid Crystals*, 2004, 31(4): 497-502.
- [11] JU H K, KIM J W, HAN S H, *et al.* Thermotropic liquid-crystal/polymer microcapsules prepared by in situ suspension polymerization [J]. *Colloid and Polymer Science*, 2002, 280(10): 879-885.
- [12] 谢淑云,金昭廷,彭传才.色彩微胶囊液晶膜的研究[J].国防科技大学学报,1983,5(4):55-64.
XIE S Y, JIN Z T, PENG C C. Investigation of the colour liquid crystal film with the encapsulations [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1983, 5(4): 55-64. (in Chinese)
- [13] ADAMS J, HAAS W. The relationship between pitch change and stimulus in cholesterics [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1972, 16(1/2): 33-37.
- [14] 李克轩,王慧慧,张立培,等.液晶微胶囊制备宽波反射凝胶[J].液晶与显示,2012,27(5):583-589.
LI K X, WANG H H, ZHANG L P, *et al.* Broadband reflection gels prepared from microcapsules containing chiral nematic liquid crystal with negative dielectric anisotropy [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(5): 583-589. (in Chinese)
- [15] 原小涛,弓爱君,杨槐.手征性向列相液晶复合体系的研究[J].液晶与显示,2013,28(2):155-161.
YUAN X T, GONG A J, YANG H. Helical twisting behavior of chiral nematic mesophase [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(2): 155-161. (in Chinese)
- [16] 黄维,边震宇,肖久梅,等.具有宽波反射特性的手征向列相液晶的研究进展[J].液晶与显示,2009,24(3):322-332.
HUANG W, BIAN Z Y, XIAO J M, *et al.* Recent development of chiral nematic liquid crystals with characteristics of broadband reflection [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(3): 322-332. (in Chinese)

作者简介:



孙 聪(1992—),女,黑龙江大庆人,硕士,助教,2017年于东北大学获得硕士学位,主要从事复合材料微胶囊化方面的研究。E-mail: sunc_qhd0223@163.com