

乙交酯、L-丙交酯均聚物及其共聚物的制备和性能研究*

孙斌¹ 许静² 张其坤¹ 曲文强¹ 侯昭升^{1**}

(¹山东师范大学化学化工与材料科学学院 教育部化学成像功能探针协同创新中心 济南 250014)

(²齐鲁工业大学 山东省轻工助剂重点实验室 济南 250353)

摘要 以辛酸亚锡为催化剂、1,4-丁二醇为引发剂,在高温、高真空条件下本体熔融开环聚合制备了聚乙交酯(PGA)、聚L-丙交酯(PLLA)及其不同比例的共聚物(PLGA)。通过红外光谱(IR)、核磁共振(¹H-NMR)对聚合物的结构进行了表征,用乌氏黏度计、凝胶渗透色谱仪(GPC)、示差扫描量热仪(DSC)、热重分析仪(TGA)、X射线粉末衍射仪(XRD)、流变仪等对聚合物的特性黏数、分子量与分子量分布、热性能、结晶性、流变性能进行了研究。结果表明 PLGA 和 PLLA 具有较高的分子量和窄的分子量分布;PGA、PLLA、PLGA 均具有较高的热稳定性,随着 PLGA 中 PGA 单元的增加,分解温度逐渐升高。直接熔融合成的 PGA 在各有机溶剂中溶解性都不理想,用二甲基亚砜(DMSO)重结晶后的 PGA 在六氟异丙醇(HFIP)中的溶解度增大;PGA、PLLA 具有较高的结晶度,而 PLGA 以非晶态存在,DMSO 重结晶后的 PGA 的结晶度降低。PGA、PLLA、PLGA 的熔体均是剪切变稀流体,但 PGA、PLLA 具有较高的储能模量,PLGA 具有较高的损耗模量。相对于 PGA 和 PLLA,无规共聚的 PLGA 易纯化,并且柔性较好,更易加工,因此 PLGA 是更适宜的生物可降解材料。

关键词 聚乙交酯,聚L-丙交酯,聚(L-丙交酯-co-乙交酯),开环聚合,性能

聚乙交酯(PGA)是一种人体可吸收的脂肪族高聚物,其优异的生物相容性已被广泛应用于医学领域^[1~4]。PGA缝合线是应用最广的合成可吸收缝合线^[5,6],但PGA纤维柔性较差,可能会损伤人体组织。聚丙交酯(PLA)柔性比PGA好,但降解速度比PGA慢,而仅靠调节PLA的分子量及分子量分布来控制降解速度有一定局限性,为了改善聚合物的生物降解性能,一般采用共聚的方法,通过调节聚合物中共聚单体种类、配比以及分子量等,以改变聚合物的亲水性、结晶性,从而达到调节聚合物降解速度的目的^[7]。为更好的适应人体环境,利用乙交酯与丙交酯共聚制备了乙交酯丙交酯共聚物(PLGA)可吸收缝合线^[8]。Miller^[9]等研究发现乙交酯(GA)和丙交酯(LA)共聚后可使降解速度比均聚物提高十倍左右,并且通过改变GA和LA的组分比,可以有效地调节共聚物的降解速率。

开环聚合是获得高相对分子质量PLGA的常用方法。Goosen^[10]等研究了辛酸亚锡引发聚酯开环聚合,认为想要得到较高分子量的聚合物,须保

证高纯度的单体在高真空度封闭条件下聚合。Sachiko^[11]等研究了GA和LA的纯化条件和聚合反应装置,并制得了高分子量的PLGA。

与PGA相比,PLGA大分子链上侧位甲基的存在,影响了其化学结构规整性,使其降解速度加快。PLGA纤维的初始模量降低,柔性增加,可满足手术缝合操作性能的要求。PLGA通过调节组成、分子量和增强改性,已被广泛地应用于生物医学工程领域,如药物缓释体系、生物体吸收性缝合材料、骨科固定及组织修复材料等。

由于PGA、PLLA的制备条件苛刻,其高结晶性导致PGA、PLLA硬度较高,不易加工。特别是PGA在大部分有机溶剂中不溶解,从而不易提纯、加工、成型。通过对其改性,制备无规共聚的PLGA,其结晶性大大降低,柔性增加,从而更易提纯、加工等,并且可通过改变其组成来控制其降解时间。

本文以辛酸亚锡催化、1,4-丁二醇引发,在高真空、高温条件下通过本体熔融开环聚合制备了PGA、PLLA及GA与L-LA不同比例的共聚物

* 2014-01-16 收稿,2014-04-09 修稿;山东省自然科学基金(基金号ZR2013EMM004)、国家级大学生创新计划项目(项目号201101020236)资助。

** 通讯联系人,E-mail:houshaosheng@tsinghua.org.cn

doi:10.11777/j.issn1000-3304.2014.14008

PLGA. 对制备的聚合物进行了黏度、分子量与分子量分布、结晶性能、热性能、流变性能的研究,为此类可降解材料的应用和工业化生产提供理论基础.

1 实验部分

1.1 原料与仪器

乙交酯(GA,99%,乙酸乙酯重结晶3次,北京百灵威科技有限公司),L-丙交酯(L-LA,99%,乙酸乙酯重结晶3次,北京百灵威科技有限公司),辛酸亚锡(95%,上海晶纯生化科技有限公司),二甲基亚砜(DMSO,色谱纯,上海晶纯生化科技有限公司),六氟异丙醇(HFIP,99.5%,上海晶纯生化科技有限公司),其他试剂均为分析纯.

乌氏黏度计,内径0.78 mm,测定温度25℃;核磁共振波谱仪,型号AVANCE II 400 MHz,德国Bruker公司;傅里叶变换红外光谱仪,型号ALPHA,德国Bruker公司,扫描范围500~4000 cm⁻¹;凝胶渗透色谱仪(GPC),型号2414,美国Waters公司,溶剂四氢呋喃.X-射线粉末衍射仪,型号D8 AVANCE,德国Bruker公司,扫描速度10(°)/min,扫描范围5°~60°;示差扫描量热仪(DSC),型号DSC SP,氮气氛,升温速率20 K/min,30~250℃,在250℃保持1.0 min,降温到50℃,降温速率10 K/min(液氮);热重分析(TGA),型号Pyris 1 TGA,美国Perkin Elmer公司,升温范围50~500℃,升温速率20 K/min;高级流变仪,型号DHR-2,美国TA公司,剪切速率0.1~100 s⁻¹.

1.2 PGA 的制备

将10 g GA装入三口烧瓶中,加入40 μL(50 mg)催化剂辛酸亚锡和7.5 μL(0.086 mmol)引发剂1,4-丁二醇.抽真空至10 Pa,在搅拌条件下加热至190℃,直到烧瓶边缘开始有白色固体产生,0.5 h内升温到220℃,继续反应5 h.反应完成后,维持真空度,冷却至室温,机械粉碎成粉状,记为PGA-A.

取6 g PGA-A在150℃完全溶解在50 mL DMSO中,溶解后,在冰盐水中急速冷却,抽滤,用无水乙醇多次淋洗,真空常温干燥24 h,记为PGA-B.

1.3 PLGA 的制备

将GA与L-LA按照一定比例放入三口烧瓶中,加入催化剂辛酸亚锡(单体质量的0.5%)和

引发剂1,4-丁二醇(单体物质的量的0.1%).抽真空至10 Pa,在搅拌条件下加热至200℃,反应5 h,反应结束后维持真空度冷却到室温,用少量二氯甲烷溶解产品,再用溶液体积10倍量的冰乙醚进行沉降,抽滤,所得产品在真空干燥箱中常温干燥72 h,根据GA、L-LA投料质量比2:8、5:5、8:2,产品分别记为PLGA-28、PLGA-55、PLGA-82.

1.4 PLLA 的制备

将10 g L-LA装入三口烧瓶中,操作方法同1.3节,得到的产品记为PLLA.

2 结果与讨论

2.1 核磁共振

图1为PLLA、PLGA的¹H-NMR谱图.由于合成的PGA分子量较高,在各种溶剂中溶解度都不理想,因此未能进行¹H-NMR表征.图1中PLLA的¹H-NMR谱图(400 MHz, CDCl₃, δ): 5.17 (q, 1H, —CH(CH₃)—), 1.60 (d, 3H, —CH₃), 峰面积比为S_A:S_C=3.12:1≈3:1,符合理论值.在δ=1.55和4.97无L-LA单体的峰,聚合物中已没有未反应的单体.

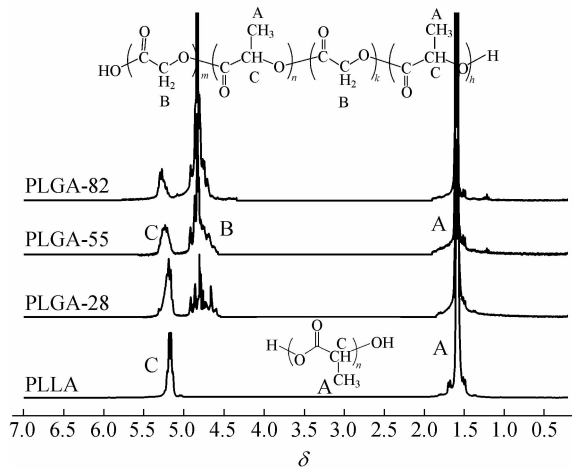


Fig. 1 ¹H-NMR spectra of PLLA and PLGA

图1中PLGA的¹H-NMR谱图(400 MHz, CDCl₃, δ): 5.28 (q, 1H, —CH(CH₃)—), 4.81 (s, 2H, —CH₂—), 1.60 (d, 3H, —CH₃). L-LA聚合后的甲基峰为峰A,GA聚合后的亚甲基峰为峰B,因此PLGA中GA和L-LA聚合产生的重复单元摩尔比可通过峰面积之比计算:S_A/3:S_B/2. PLGA-28, PLGA-55, PLGA-82中S_B/2:S_A/3分别为1:2.68、1:0.68、1:0.32.同样可计算出PLGA-28, PLGA-55, PLGA-82中由PLLA重复单元的质

量百分比分别为 72.8%、40.5%、24.2%。由计算结果可以看出 PLGA-28 与 PLGA-55 中反应的 L-LA 要比投料的比例小,这是因为 L-LA 的竞聚率较小($r_{LA} = 0.2$, $r_{GA} = 2.8$)、活性太低的缘故,而 PLGA-82 中反应的 L-LA 比例高于投料比,是因为投料中 GA 比例较高,有利于 L-LA 参与反应^[12]。

2.2 红外表征

图 2 为 PGA-B (PGA-A 与 PGA-B 红外谱图基本一致,图 2 中仅以 PGA-B 为例讨论)、PLLA、PLGA 的红外谱图。从图 2 中可看出,各样品的红外谱图差别不大,只是在 1400 cm^{-1} 左右处的峰强度不同。随着聚合物中重复单元 $-\text{CH}_2-\text{CO}-$ 的比例降低,其产生碳碳键振动峰(A)变小;峰 B、C 为重复单元 $-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CO}-$ 的碳碳键振动峰,随着 $-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CO}-$ 在聚合物中比例增加,峰 B、C 的强度逐渐增加。峰 A、B、C 强度变化的规律与单体投料比相同,可以对共聚物中重复单元进行定性分析。

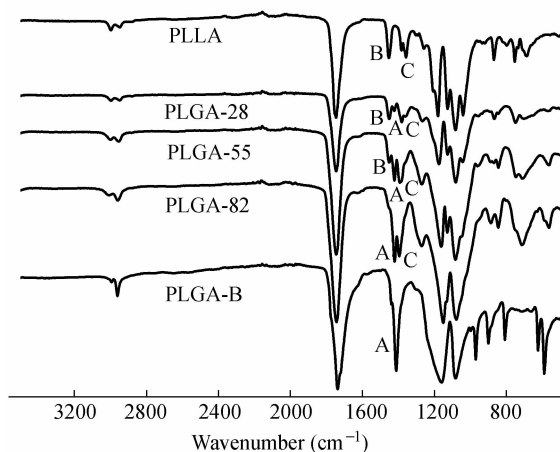


Fig. 2 IR spectra of PGA-B, PLGA and PLLA

2.3 X-射线粉末衍射(XRD)

PLLA、PGA、PLGA-55 (PLGA 各样品的 XRD 基本相同,图中仅以 PLGA-55 为例讨论)的 XRD 谱图见图 3。从图 3 中可看出,PLLA、PGA-A、PGA-B 都有较尖锐的结晶峰,具有较高的结晶度,而共聚物 PLGA-55 没有明显的结晶峰,因此可以判断 PLGA 是非晶态存在的。PGA 经 DMSO 重结晶后结晶峰强度明显变小(图 3 中 PGA-A、PGA-B),表明 PGA 经 DMSO 重结晶不仅会除掉残留的单体和低聚物,同时也会降低原有的结晶度,从而导致 PGA 重结晶后在六氟异丙醇中溶解度增大^[13]。

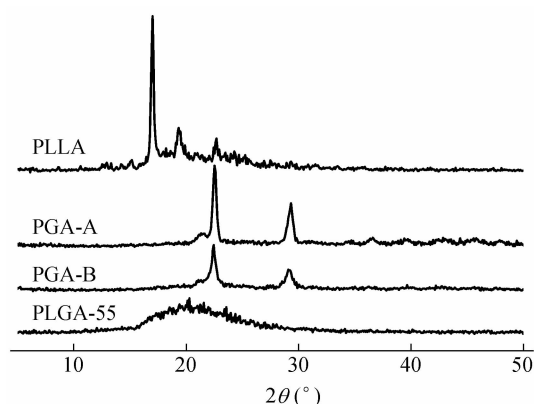


Fig. 3 X-ray diffraction patterns of PGA, PLGA-55 and PLLA

2.4 特性黏数与分子量

配制 PLGA、PLLA 样品浓度为 1.0 g/dL 的氯仿溶液,通过“一点法”^[14]获得特性黏数: $[\eta] = [2(\eta_{sp} - \ln \eta_r)]^{1/2}/c$,其中 η_r 为相对黏度; η_{sp} 为增比黏度; c 为质量浓度。

图 4 为反应的 L-LA 在共聚物中的质量分数与特性黏数的关系曲线。从图 4 中可看出,其呈现良好的线性关系:回归方程 $y = -0.1948x + 2.54624$,线性相关系数为 0.9985。可初步判断,在本研究的制备条件下,可根据回归方程估算不同组成的共聚物的特性黏数。PLLA 的特性黏数为 2.37 dL/g ,根据 Mark-Houwink 方程 $[\eta] = 5.45 \times 10^{-4} M_v^{0.73}$ ^[15]可计算黏均分子量约为 96400,小于理论计算值(理论值 144000)。

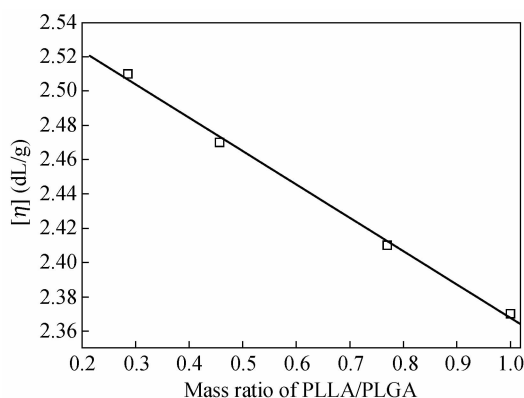


Fig. 4 The relationship between intrinsic viscosity and mass ratio of PLLA/PLGA

配制 PGA-B 浓度为 1.0 g/dL 的六氟异丙醇溶液,通过“一点法”得到 PGA-B 的特性黏数为 0.56 dL/g 。根据文献方程 $\ln[\eta] = 0.98774 \ln M_w - 11.1478$ ^[16]可计算 PGA-B 黏均分子量约为 44300,小于理论计算值(理论值 116000)。

表 1 为 PLLA 与 PLGA 的 GPC 测量结果(四氢呋喃为溶剂,PGA 仅微溶于六氟异丙醇中,未能进行 GPC 测定),PLLA 的数均分子量为 60125,小于黏均分子量,但仍符合熔体纺丝的要求^[17]. PLGA 数均分子量介乎于 40000 ~ 60000 之间,符合熔体纺丝要求. PLLA 与 PLGA 的分散系数介乎于 1.3 ~ 1.6 之间,分子量分布较好.

Table 1 GPC data of PLLA and PLGA

Samples	M_n	M_w	Polydispersity	Theoretical molecular weight
PLLA	60100	93200	1.55	144000
PLGA-28	42300	62900	1.49	138490
PLGA-55	53100	75300	1.42	130090
PLGA-82	59200	78400	1.32	121690

根据 PLLA、PLGA 的数均分子量与理论分子量的差值(表 1)以及核磁结果(图 1)中 PLGA 中重复单元的比值,可计算出聚合物 PLLA 与 PLGA (PGA 未能做核磁表征和 GPC 分子量测定,因此未能进行单体转化率计算)中单体转化率. PLLA 中 L-LA 转化率为 41.8%; PLGA-28、PLGA-55、PLGA-82 中 GA 的转化率分别为 49.6%、54.5%、48.4%,L-LA 的转化率分别为 26.7%、29.9%、49.8%. 聚合物中单体转化率偏低,原因是在真空聚合过程中,单体易升华从而导致单体损失.

2.5 DSC 分析

PGA 重结晶前后的 DSC 谱图见图 5. 玻璃化转变温度(T_g)大约在 48.5 °C,与文献值基本一致^[18]. PGA 重结晶前的熔融吸热峰具有较大的焓变(PGA-A, $\Delta H = 230.63$ J/g; PGA-B, $\Delta H = 143.78$ J/g)和较高的熔点(PGA-A, 218 °C, PGA-B, 202 °C). 这表明 PGA 经 DMSO 重结晶后导致结晶度变低,与 XRD 结果相同.

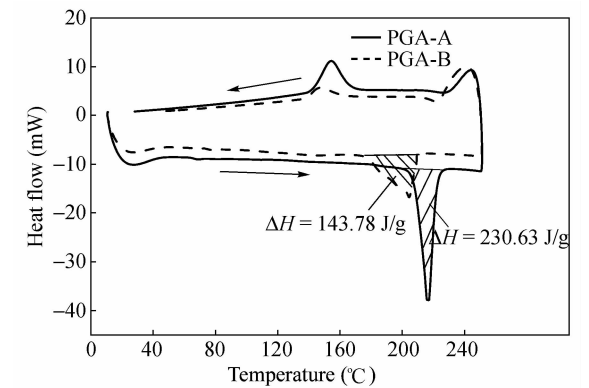


Fig. 5 DSC curves of PGA

图 6 为 PLLA、PLGA-55 (PLGA 各样品的 DSC 基本相同,图 6 中仅以 PLGA-55 为例讨论)的 DSC 谱图,谱图中没有明显的 T_g . 在 PLLA 的 DSC 谱图中 100 °C 左右的吸热峰应为样品中水汽化所产生的,PLLA 的熔融焓变为 72.61 J/g,比 PGA 的要小得多. 图 5 和图 6 对比可以看出,PLLA 的结晶度、熔点都低于 PGA. PLGA 的 DSC 图中没有明显的熔融峰,而是随温度升高不断吸热,说明其共聚物是非晶态存在的,其结果与 XRD 一致.

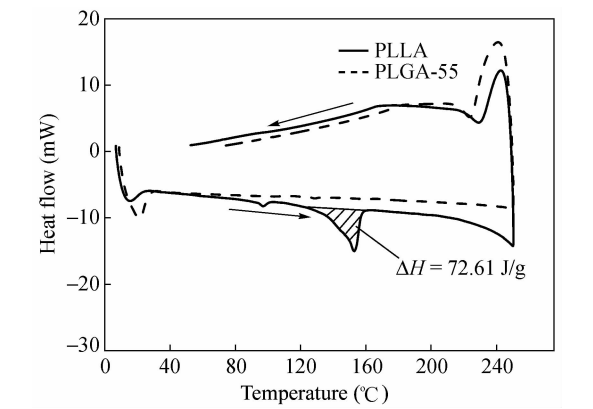


Fig. 6 DSC curves of PLLA and PLGA-55

2.6 TGA 测试

PGA、PLLA 的 TGA 谱图见图 7. 重结晶前的 PGA (PGA-A) 在 100 ~ 250 °C 有大约 10% 的失重,分解温度为 385 °C;重结晶后的 PGA (PGA-B) 的热稳定性基本没有变化(分解温度为 383 °C),但只有一个失重区间. 这是因为 PGA 经 DMSO 重结晶后除掉了具有低分解温度的残留单体及少量低聚物. PLLA 的 TGA 谱图中只有一个失重区间,PLLA 分解温度为 306 °C,可见聚合物中不存在未反应单体.

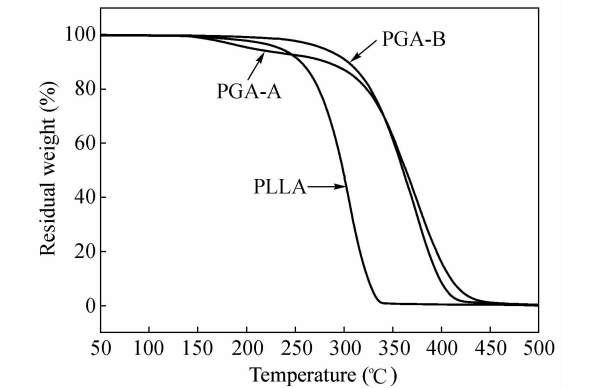


Fig. 7 TGA curves of PGA and PLLA

PLGA 的 TGA 谱图见图 8. PLGA-28、PLGA-55 和 PLGA-82 分解温度分别为 327、346 和 367 ℃,随着共聚物中聚乙交酯单元比例的增加,分解温度逐渐增高,且分解温度介乎于 PLLA 与 PGA 的之间. PLGA 在 200 ℃ 无失重表明共聚物中无残留单体,而不同组成的 PLGA 均只有一个失重区间,可判断 PLGA 应为无规共聚物.

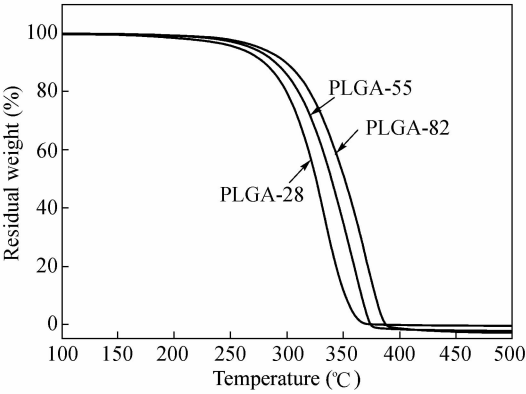


Fig. 8 TGA curves of PLGA

2.7 熔体流变性能

PGA-B、PLLA 和 PLGA-55 的流变曲线分别见图 9、10、11. PGA 重结晶前后的流变曲线基本相同,图 9 中仅以 PGA-B 为例讨论;PLGA 各样品的流变曲线基本相同,图 11 中仅以 PLGA-55 为例讨论. 3 种物质的表观黏度均随剪切速率的增大而下降,为剪切变稀流体. 这是因为随着切应力的增大,平衡构象相应的发生移动,使分子链间部分缠结点被拆除,而缠结点浓度的下降相应的使表观黏度下降. 因此,可以通过提高剪切速率来有效的降低其表观黏度,增加熔体的流动性使加工顺利进行.

随着剪切速率增大,PGA-B 的储能模量显著增大,损耗模量基本不变(图 9). 可见,PGA-B 刚性较强,不易变形,不易降解. 随着剪切速率增大,PLLA 的储能模量逐渐增大,但增加的幅度远低于 PGA-B,损耗模量逐渐降低(图 10). 因此,PLLA 的刚性也较强,但要低于 PGA-B,同样不易降解. 而随着剪切速率增大,PLGA-55 的储能模量与损耗模量均增强,且剪切速率大于 50 s⁻¹时,损耗模量高于储能模量(图 11). 因此,PLGA 柔性较好,储能模量数值不高,容易改变形状,便于加工,容易降解.

3 结论

以 1,4-丁二醇为引发剂、辛酸亚锡为催化

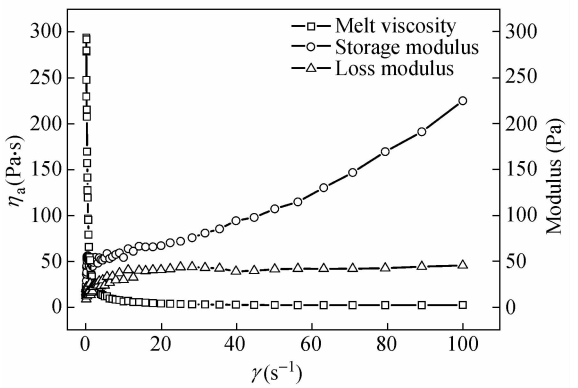


Fig. 9 The rheological curves of PGA-B

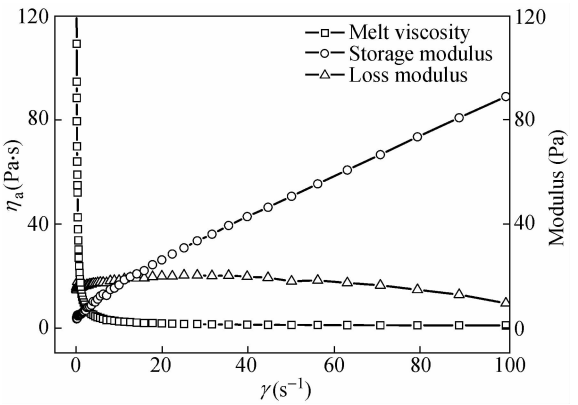


Fig. 10 The rheological curves of PLLA

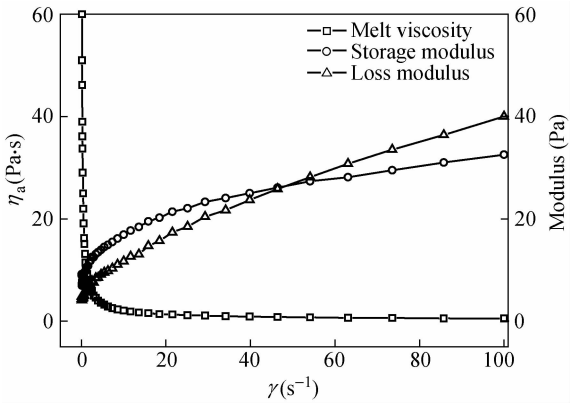


Fig. 11 The rheological curves of PLGA-55

剂,在高温、高真空条件下本体熔融开环聚合制备了 PGA、PLLA,及 GA 与 L-LA 不同比例的共聚物 PLGA. 利用 IR、¹H-NMR 确认了聚合物的结构,运用 GPC、DSC、TGA、XRD、流变仪等对聚合物的特性黏数、分子量与分子量分布、热性能、结晶性、流变性能进行研究. 结果表明 PGA、PLLA、PLGA 均具有较高的热稳定性,随着 PLGA 中 PGA 单元的增加,分解温度逐渐升高;PGA、PLLA 具有较高的结晶度,而 PLGA 以非晶态存在,PGA 重结晶后的

结晶度降低、在六氟异丙醇中的溶解度提高。PGA、PLLA、PLGA 的熔体均是剪切变稀流体,但 PGA、PLLA 具有较高的储能模量,PLGA 具有较高的损耗模量。相对于 PGA 和 PLLA,PLGA 易纯化,并且柔性较好,更易加工,因此 PLGA 是更适宜的生物可降解材料。

REFERENCES

1 Harding S L, Afoke A, Brown R A, Macleod A, Shamlou P A, Dunnill P. *Bioproc Biosystem Eng*, 2002, 25(1):53 ~ 59

2 Suzuki M, Fukuhara K, Unno M, Rikiyama T, Takeuchi H, Uchiyama T, Matsuno S. *J Hepatobiliary Pancreat Surg*, 1998, 5(3):292 ~ 296

3 Vainionpää M D S. *Arch Orthop Trauma Surg*, 1986, 104(6):333 ~ 338

4 Muhonen J, Suuronen R, Oikarinen V J, Sarkiala E, Happonen R P. *J Mater Sci-Mater M*, 1994, 5(1):40 ~ 42

5 Yang Fei(杨飞), Yang Yaming(杨亚明), Liu Jianhong(刘建红), Li Xiaomeng(李晓萌), Feng Zengguo(冯增国). *Journal of Beijing Institute of Technology*(北京理工大学学报), 2001, 21(4):518 ~ 523

6 Moreno M, Magos F J, Arcovedo R, Olachea P, Palacios J A, Salazar A, Ramirez M E, Herrera J J. *Surg Endosc*, 2004, 18(1):157 ~ 160

7 Chen Hongli(陈红丽), Bei Jianzhong(贝建中), Wang Shenguo(王身国). *Acta Polymerica Sinica*(高分子学报), 2000, (5):626 ~ 631

8 Qin Dongyu(秦冬雨), Wang Wenzu(王文祖). *Industrial Textiles*(产业用纺织品), 2001, 19(10):16 ~ 19

9 Miller R A, Brady J M, Cutright D E. *J Biomed Mater Res*, 1977, 11:711 ~ 719

10 Zhang X C, Wyss U P, Pichora D, Goosen M F A. *Polym Bull*, 1992, 27:623 ~ 629

11 Sachiko K, Shuichi M, Antonios G M, John P F. *Nat Protoc*, 2007, 2:2767 ~ 2771

12 Gilding D K, Reed A M. *Polymer*, 1979, 20:1459 ~ 1460

13 Cui Aijun(崔爱军), Li Zhanfei(李战飞), Chen Qun(陈群), He Mingyang(何明阳). *New Chemical Materials*(化工新型材料), 2012, 40(7):87 ~ 90

14 Thomer D K, Thomes T A. *J Appl Polym Sci*, 1960, 3:129 ~ 131

15 Perego G, Cella D G, Bastioli C. *J Appl Polym Sci*, 1996, 59:37 ~ 43

16 Tian Junkai(田俊凯), Cui Aijun(崔爱军), Lu Weiliang(陆卫良), Zhu Ye(朱晔), Chen Qun(陈群), He Mingyang(何明阳), Wu Guibao(吴桂宝), Wang Zeyun(王泽云). *Polymer Bulletin*(高分子通报), 2012, (8):98 ~ 104

17 Yang Lixin(杨立新), Zhao Shuzhen(赵淑珍), Chen Xuesi(陈学思), Jing Xiabin(景遐斌), Wang Jun(王俊), Li Xuenong(李学农), Li Chunhao(李春浩). *Acta Polymerica Sinica*(高分子学报), 2007, (10):959 ~ 966

18 Cui Aijun(崔爱军), Li Zhanfei(李战飞), Chen Qun(陈群), He Mingyang(何明阳). *New Chemical Materials*(化工新型材料), 2012, 40(7):87 ~ 90

Preparation and Properties of Polyglycolide, Poly(L-lactide) and Poly(L-lactide-co-glycolide)

Bin Sun¹, Jing Xu², Qi-kun Zhang¹, Wen-qiang Qu¹, Zhao-sheng Hou^{1*}

⁽¹⁾ College of Chemistry, Chemical Engineering and Materials Science, Collaborative Innovation Center of Functionalized Probes for Chemical Imaging, Key Laboratory of Molecular and Nano Probes, Ministry of Education, Shandong Normal University, Ji'nan 250014)

⁽²⁾ Key Laboratory of Fine Chemicals of Shandong Province, Qilu University of Technology, Ji'nan 250353)

Abstract Polyglycolide (PGA), poly(L-lactide) (PLLA) and poly(L-lactide-co-glycolide) (PLGA) were prepared by bulk ring-opening polymerization at high temperature and high vacuum using stannous octoate as catalyst and 1,4-butanediol as initiator. The chemical structures of the polymers were characterized by infrared spectroscopy (IR) and ¹H nuclear magnetic resonance (¹H-NMR), and their properties were studied by gel permeation chromatography (GPC), differential scanning calorimetry (DSC), thermo gravimetric analysis (TGA), X-ray diffraction (XRD) and rheometry. The results of GPC showed that PLGA and PLLA had high molecular weight and narrow molecular weight distribution. The results of TGA showed that PGA, PLLA and PLGA had high thermal stability and the decomposition temperature increased slowly with increasing units of PGA in PLGA. PGA directly obtained with bulk polymerization was not dissolved in various organic solvents, while the solubility of PGA in hexafluoroisopropanol (HFIP) increased obviously after recrystallization from dimethyl sulfoxide (DMSO). PGA and PLLA had higher crystallinity while PLGA was amorphous, PGA crystallized from DMSO had lower crystallinity. The melts of PGA, PLLA and PLGA were shear-thinning fluids, while PGA and PLLA had higher storage modulus and PLGA had higher loss modulus. Amorphous PLGA was much more easily purified and processed than PGA and PLLA having higher crystallinity, thus PLGA was more suitable to be used as biodegradable material.

Keywords Polyglycolide, Poly(L-lactide), Poly(L-lactide-co-glycolide), Ring-opening polymerization, Properties

* Corresponding author: Zhao-sheng Hou, E-mail: houzhaosheng@tsinghua.org.cn