

聚氨酯丙烯酸酯轮胎的 3D 打印成型及性能研究

程丽琴, 温广武*, 张丽娟, 侯永昭

(山东理工大学材料科学与工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:为了实现新型非充气式轮胎的绿色制造,制备了一种新型、具有软硬段结构的聚氨酯丙烯酸酯树脂,借助 3D 打印技术实现了蜂窝状聚氨酯丙烯酸酯轮胎的制造并分析了其基本力学性能。结果表明,利用不同多元醇为扩链剂和甲基丙烯酸羟乙酯为封端剂制备的聚氨酯丙烯酸酯树脂分子质量和性能可控,其中以丙三醇为扩链剂制备的聚氨酯丙烯酸酯树脂性能最佳。随着多元醇官能度的升高硬段结构增多,其拉伸强度从 7.23 MPa 增强至 36.19 MPa,断裂伸长率从 448% 降至 39.42%。此外,3D 打印的聚氨酯丙烯酸酯蜂窝状轮胎比传统轮胎减重 44.7%,且具有良好的亲水性。

关键词:聚氨酯丙烯酸酯;3D 打印;轮胎;扩链剂;多元醇

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)S1-0224-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S1.045

3D printing preparation and properties of polyurethane acrylate tire

CHENG Li-qin, WEN Guang-wu*, ZHANG Li-juan, HOU Yong-zhao

(School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract:To manufacture novel non-pneumatic tires in a green way, a novel polyurethane acrylate resin with soft and hard segments is prepared. Honeycomb-like polyurethane acrylate-based tires are prepared by means of 3D printing technology, and their basic mechanical properties are analyzed. It is shown that the molecular weight and performance of polyurethane acrylate resin are controllable as the resin is prepared by using different polyols as chain extender and hydroxyl ethyl methacrylate as end sealing agents. Among them, polyurethane acrylate resin prepared with propanetriol as chain extender shows the best performance. With the higher functionality of polyols, the resin has more hard segment structures, its tensile strength increases from 7.23 MPa to 36.19 MPa, and its break elongation decreases from 448% to 39.42%. In addition, 3D printed polyurethane acrylate resin-based honeycomb-like tires lose 44.7% weight than conventional tires, and have good hydrophilicity.

Key words: polyurethane acrylate; 3D printing; tire; chain extender; polyols

随着汽车行业的飞速发展,轮胎的更新换代日益加快,轮胎的设计和优化刻不容缓。传统充气轮胎因胎压不稳定且有爆胎风险^[1-2],越来越不能满足安全舒适性要求,而其较大的滚动阻力和复杂的制造工艺更达不到低碳环境下降低能耗和绿色环保的效果^[3-5]。与之相比,非充气轮胎采用新型树脂材料和轻质结构,兼顾了安全、稳定和节能,更大程度上体现了轮胎的智能化设计^[6]。

非充气轮胎的结构设计比传统充气轮胎复杂,如美国 Resilient 公司开发的蜂窝状非充气轮胎散热快、稳定性好,已成功应用在军用汽车上^[7]。北京化工大学研发的具备刚柔结构的非充气轮胎具有倒锥形通孔,实现了轮胎的轻质化和低能耗^[8]。但是

非充气轮胎的结构通常依靠浇铸工艺实现,其长周期的开模过程和高昂的成本限制了其快速发展。3D 打印技术是借助三维模型的分层切片和逐层叠加实现三维实体的无模制造技术,可有效降低非充气轮胎的制造周期和成本^[9-12]。如固特异公司在 2015 年制备的磁悬浮轮胎和米其林公司在 2017 年开发的蜂窝状轮胎都是采用 3D 技术^[13]。

非充气轮胎使用的材料不再局限于传统橡胶,而采用既能保持高强度又能保持柔软性的树脂材料,如北方车辆研究所设计的辐板式非充气轮胎和米其林公司开发的 Tweel 非充气轮胎都是采用聚氨酯类材料^[14-16]。为了实现轮胎的性能优化,新型聚氨酯丙烯酸酯(PUA)材料得到了广泛关注。聚氨酯

收稿日期:2023-03-09;修回日期:2023-06-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB3706300)

作者简介:程丽琴(1996-),女,硕士研究生,研究方向为树脂 3D 打印,c182122@163.com;温广武(1963-),男,博士,教授,研究方向为复合材料 3D 打印,通讯联系人,wengw@sdut.edu.cn。

酯丙烯酸酯兼具聚氨酯和丙烯酸树脂的优点,在光固化能力、耐候性和力学特性上表现突出;特别地,可通过分子设计使其具有不同的软硬段结构(软段为多元醇,硬段为异氰酸酯),实现材料性能的可调控性^[17-20]。

笔者合成了一种具有软硬段结构的聚氨酯丙烯酸酯,通过不同多元醇扩链剂调控了其分子量^[21-22],再利用光引发剂、稀释剂等的复配开发了新型3D打印用光敏树脂;借助LCD打印设备优化其成型工艺和成型关键参数,实现了新型蜂窝状轮胎的制备。

1 试剂与仪器

1.1 试剂

异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI),上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产;聚四氢呋喃醚二醇(DMPA),南通润丰石油化工有限公司生产;二月桂酸二丁基锡(DBTDL),研峰科技生产;乙二醇、丙三醇、季戊四醇,玛雅试剂生产;甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA),北京伊诺凯科技有限公司生产;三乙胺(TEA),阿拉丁试剂(上海)有限公司生产;光引发剂184、光引发剂二苯基-(2,4,6-三甲基苯甲酰)氧磷(TPO)、三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)、己二醇二丙烯酸酯(HDDA),光易化工生产。

1.2 仪器

Nicolet5700型傅里叶红外光谱仪(FT-IR),美国Thermo Nicolet公司生产;AVANCE III 400型核磁共振仪(NMR),德国Bruker公司生产;PL-GPC220型凝胶渗透色谱仪(GPC),美国安捷伦公司生产;LCD紫外光固化打印机,eSUN易生深圳光华伟业股份有限公司生产;紫外光固化实验箱,深圳速猫派科技有限公司生产;GX-LL202型万能试验机,东莞高翔精密机械有限公司生产;Quanta 250型场发射环境扫描电镜,美国FEI公司生产;JC2001型静态接触角测量仪,德国Dataphysics公司生产。

2 实验方法

2.1 聚氨酯丙烯酸酯的制备

在氮气保护气氛下,向四口烧瓶中加入计算好的IPDI、DMPA以及少量丙酮,搅拌均匀后升温至80℃,反应2 h后降温至50℃,采用二正丁胺法进行-NCO含量的滴定,直至达到理论值;加入一定计量比的多元醇类扩链剂(乙二醇、丙三醇或季戊四醇)和DBTDL(0.3%),在75℃下继续扩链反应

4 h;降温至50℃后,加入甲基丙烯酸羟乙酯封端,65℃下反应3 h后,加入适量三乙胺中和,即可得到可光固化的聚氨酯丙烯酸酯树脂。其中,以乙二醇、丙三醇或季戊四醇为扩链剂制备的聚氨酯丙烯酸酯树脂分别命名为PUA-1、PUA-2和PUA-3。

2.2 聚氨酯丙烯酸酯的3D打印

将制备的聚氨酯丙烯酸酯树脂、TMPTA、HDDA(质量比为4:1:1)配制成光敏树脂,分别加入0.5%的光引发剂184和TPO,利用波长为405 nm的LCD打印机进行蜂窝状轮胎打印,设置3D打印成型参数,其中分层厚度为0.05 mm,普通层曝光时间为6.5 s;底层曝光时间为30 s,底层层数为5层。用无水乙醇清洗所得的蜂窝状轮胎,去除表面残留的光敏树脂后,再放置在紫外光固化箱中二次固化20 min。随后将打印的蜂窝状轮胎置于60℃烘箱中干燥8 h。

2.3 红外光谱分析

利用傅里叶红外光谱仪对液态PUA-1、PUA-2与PUA-3进行分析,选用透射溴化钾压片法,波数范围为4 000~400 cm⁻¹;利用傅里叶红外光谱仪对固化后的PUA-1、PUA-2与PUA-3进行分析,选用衰减全反射法,波数范围为4 000~675 cm⁻¹。

2.4 核磁共振氢谱分析

利用核磁共振仪测定并分析PUA-1、PUA-2、PUA-3的氢谱图,测试条件为¹H-NMR,以CDCl₃为溶剂。

2.5 凝胶渗透色谱分析

在35℃,利用凝胶渗透色谱仪测定液态PUA-1、PUA-2与PUA-3的分子质量及其分布。选用Waters 515流动柱、Waters 2414示差检测器,以聚苯乙烯为校准样,四氢呋喃(THF)为流动相,设置流速为1.0 mL/min。

2.6 力学性能测试

根据ASTM D638—2014标准,测试条类型选用I类杠铃型,厚度为4 mm。利用电子万能试验机记录测试条发生断裂时的拉伸强度、断裂伸长率、应力和应变随着拉伸过程变化的情况,同一样品应至少测量3次。设置试验机夹具以5 mm/min的拉伸速率加载,

2.7 静态接触角测试

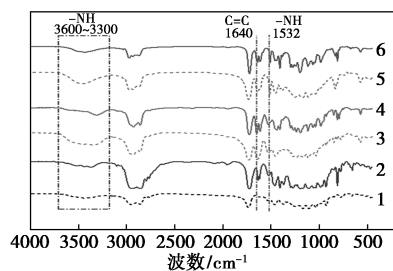
根据GB/T 30693—2014标准,利用静态接触角测量仪对试样件表面的接触角进行测试。在试样件表面滴5 μL去离子水,通过接触角测试仪拍照,采用液滴角度测量法测定试样件的水接触角。

3 结果与讨论

3.1 聚氨酯丙烯酸酯结构表征

3.1.1 红外光谱分析

聚氨酯丙烯酸酯 FT-IR 表征结果如图 1 所示。由图 1 中可知,液态 PUA-1、PUA-2 和 PUA-3 在 $2\ 270\ \text{cm}^{-1}$ 处均未出现 IPDA 中 —NCO 基团的伸缩振动吸收峰,说明体系中 —NCO 基团已完全反应消耗; $3\ 400\sim 3\ 300\ \text{cm}^{-1}$ 处均未出现 DMPA 及扩链剂中 —OH 的特征吸收峰,且在 $3\ 600\sim 3\ 300$ 、 $1\ 532\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了 —N—H 的伸缩振动吸收峰和弯曲振动吸收峰,表明体系中 —NCO 基团与 —OH 发生反应形成了氨基甲酸酯基;在 $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了丙烯酸单体中 $\text{C}=\text{C}$ 双键的特征吸收峰,说明成功得到了 HEA 封端的聚氨酯。固化后的 PUA 在 $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 处 $\text{C}=\text{C}$ 的特征峰明显减少,这是由于在光引发剂 184 和 TPO 的激活下,体系中的 $\text{C}=\text{C}$ 双键成功参与了光固化交联聚合反应,表明 PUA-1、PUA-2 和 PUA-3 均具有良好的光固化性能。

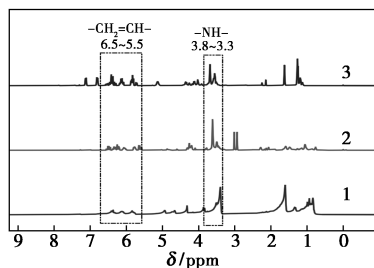


1—PUA-1 固化后;2—PUA-1 固化前;3—PUA-2 固化后;
4—PUA-2 固化前;5—PUA-3 固化后;6—PUA-3 固化前

图 1 PUA 的 FT-IR 谱图

3.1.2 核磁氢谱分析

为了进一步验证其结构,分别对 PUA-1、PUA-2 与 PUA-3 进行核磁氢谱(NMR-H)分析,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,PUA-1、PUA-2 和 PUA-3 均在 $\delta\ 3.8\sim 3.3$ ppm 处有氨基甲酸酯中



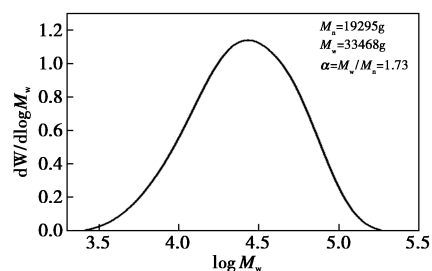
1—PUA-1;2—PUA-2;3—PUA-3

图 2 PUA 的核磁谱图

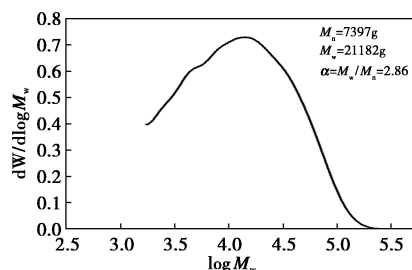
—NH 的质子峰,在 $\delta\ 6.5\sim 5.5$ ppm 处出现丙烯酸酯氧基中双键上 H 的质子峰。结合红外分析结果,预期结构的聚氨酯丙烯酸酯被成功合成。

3.2 扩链剂对聚氨酯丙烯酸酯分子量的影响

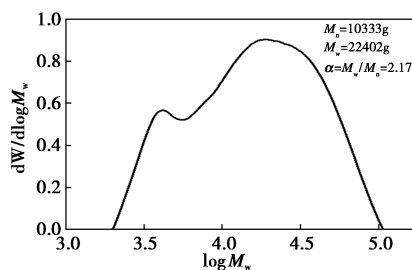
聚氨酯丙烯酸酯的分子量分布结果如图 3 所示。由图 3(a)、图 3(b)可知,PUA-1 与 PUA-2 的 GPC 曲线均有一个较宽的单峰,说明其分布较宽。其中 PUA-1 数均分子质量(M_n)为 $19\ 295\ \text{g/mol}$,重均分子质量(M_w)为 $33\ 468\ \text{g/mol}$,分散系数(α)为 1.73;PUA-2 的 M_n 为 $7\ 397\ \text{g/mol}$, M_w 为 $21\ 182\ \text{g/mol}$, α 为 2.86。由图 3(c)可知,PUA-3 的 GPC 曲线中有 2 个单峰,说明其分布较宽。其中 PUA-3 的 M_n 为 $10\ 333\ \text{g/mol}$, M_w 为 $22\ 402\ \text{g/mol}$, α 为 2.17。



(a) PUA-1



(b) PUA-2



(c) PUA-3

图 3 PUA 的分子量分布

单从分子量上来说,PUA-1 分子量最大,表明其重复单元较多,分子链较长;PUA-2 分子量最小,PUA-3 的分子量居中,表明两者重复单元相对较少,分子链略短。这是因为以乙二醇制备的 PUA-1 为线性结构,整体分子链比较规整,在链增长过程中

空间位阻较小;而以丙三醇和季戊四醇制备的 PUA-2 和 PUA-3 整体链结构呈现支化状,链增长过程中空间位阻稍大。此外,PUA-2 和 PUA-3 比 PUA-1 的体系黏度较低,这是因为 PUA-1 为线性结构更容易发生缠结,支化结构在短距离内有一定的排斥作用,促进高分子链分散,即在相同分子量的情况下,支化的 PUA-2 和 PUA-3 均方旋转半径或流体力学体积小于线性分子 PUA-1 的均方旋转半径或流体力学体积。

3.3 3D 打印成型工艺分析

3.3.1 曝光时间对样品固化深度的影响

曝光时间是光固化成型工艺的重要参数之一,对样件的固化深度、力学性能及成型精度有着重要的影响。在光固化过程中,树脂的交联聚合程度受曝光时间的影响极大,充足的曝光时间能够保证树脂的交联聚合反应充分地进行,形成一定的固化深度,且在一定范围内,树脂的固化深度随着曝光时间的增加而增加。曝光时间对聚氨酯丙烯酸酯固化深度的影响如图 4 所示。由图 4 可知,在相同辐射照度条件下,当曝光时间设置在 3~6 s 时,随着曝光时间的延长,聚氨酯丙烯酸酯的固化深度随之增大。但当曝光时间达到一定值后,固化深度不再随之增加,这是因为此时树脂的固化深度已达到液态树脂本身的透射深度,即使再延长曝光时间,固化深度都趋于稳定。当曝光时间为 6 s 时,树脂的固化深度为 55 μm ;当曝光时间大于 6 s 时,树脂的固化深度趋于稳定。说明液态 PUA-2 的透射深度为 55 μm ,在切片时,分层厚度应小于 55 μm ,确保层与层之间可以粘结,使样品具有良好的力学性能。

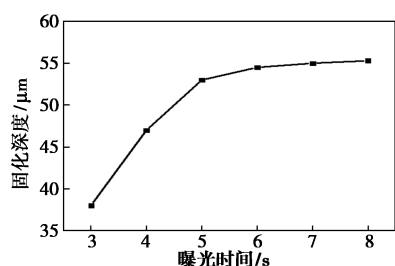


图 4 PUA 不同曝光时间时的固化深度

3.3.2 曝光时间对样品尺寸精度的影响

当液面曝光辐照度一定时,曝光时间决定着曝光能量的大小,曝光时间越长,曝光能量越大。当曝光时间过小时,曝光能量过低,不足以使模型边缘轮廓的液态树脂完成固化反应,导致 X、Y、Z 方向的成型尺寸小于模型设计值;当曝光时间过长时,曝光能量过大,过多的能量辐射到模型周围的树脂,不仅使

模型区域的树脂完全固化,而且使其周围的树脂也发生了固化现象,导致 X、Y、Z 方向的成型尺寸大于模型设计值。这 2 种情况下,样件的尺寸精度都难以保证。

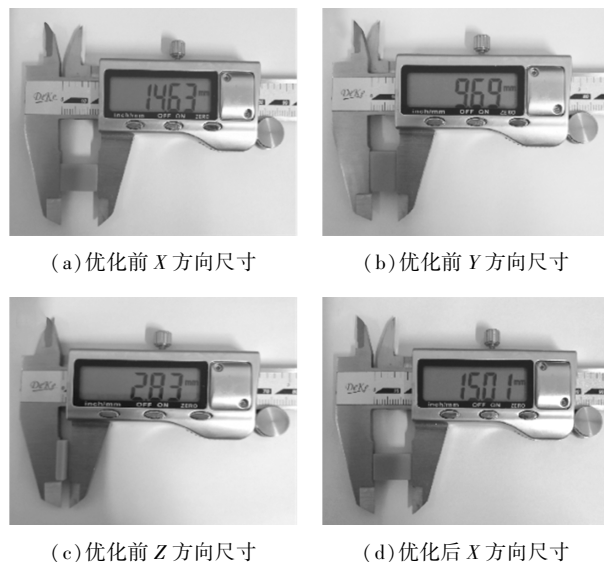
不同曝光时间的尺寸相对误差如表 1 所示。由表 1 可以看出,在相同辐照度条件下,当曝光时间在 5~6.5 s 时,样件在 X、Y、Z 方向的尺寸相对误差随着曝光时间的增加而减小;当曝光时间为 6.5 s 时,试样件的尺寸相对误差最小,X、Y、Z 方向分别为 0.55%、0.43% 和 0.7%;当曝光时间大于 6.5 s 时,随着曝光时间的增加,样件在 X、Y、Z 方向的尺寸相对误差呈现逐渐增大的趋势,说明 3 个方向的尺寸精度都遵循着由低到高再到低的变化规律。此外,随着曝光时间的增加,X、Y、Z 方向尺寸精度的绝对误差值由负值转变为正值,说明试样件 3 个方向的成型尺寸从小于模型设计值逐渐转变为大于设计值。

表 1 PUA 不同曝光时间时的尺寸相对误差

曝光时间/s	5	5.5	6	6.5	7	7.5
X 方向相对误差/%	3.5	2.7	1.6	0.6	2.2	3.1
Y 方向相对误差/%	3.8	2.5	1.4	0.4	2.1	3.3
Z 方向相对误差/%	4.3	3.2	2.0	0.7	1.9	3.8

3.3.3 成型工艺参数的验证

通过上述研究得知,聚氨酯丙烯酸酯的优化参数为分层厚度 50 μm 、普通层曝光时间为 6.5 s。为了对其进行验证,用优化前后的成型参数分别制作了尺寸为 15 mm×10 mm×3 mm 的小长方体,成型参数优化前后制备的小长方体各个方向的尺寸如图 5



(a) 优化前 X 方向尺寸

(b) 优化前 Y 方向尺寸

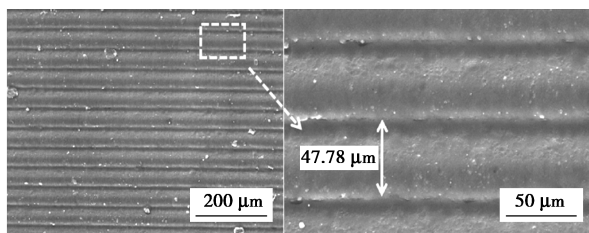
(c) 优化前 Z 方向尺寸

(d) 优化后 X 方向尺寸



(e) 优化后 Y 方向尺寸

(f) 优化后 Z 方向尺寸



(g) 微观形貌

(h) 层厚局部放大

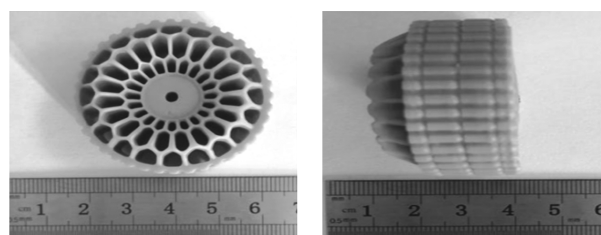
图 5 PUA 成型参数优化前后的尺寸与微观形貌所示。从图 5 可以看出,未优化参数的各方向的尺寸误差在 2.41%~5.6%,优化参数后各方向的尺寸误差小于 0.02 mm,样件的成型精度明显提高。

为了进一步确定在该优化参数下样件的层固化情况与层厚,对优化后的小长方体成型层面进行了形貌观察,如图 5(g)所示。从图 5(g)中可以看出,优化参数后的样件,每层树脂完全固化,层与层界限清晰可见,且由图 5(h)可知,实际打印层厚为 47.78 μm(树脂产生的固化收缩),在测量误差允许的范围内,进一步说明该组参数是最优参数。

3.4 蜂窝结构轮胎 3D 打印

3.4.1 蜂窝结构轮胎形貌

将分层厚度设置为 50 μm、普通层曝光时间设置为 6.5 s,成功打印出结构复杂的汽车轮胎,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,打印出的蜂窝轮胎



(e) 蜂窝轮胎实物顶部

(f) 蜂窝轮胎实物侧面

图 6 蜂窝结构轮胎模型及蜂窝结构轮胎打印件

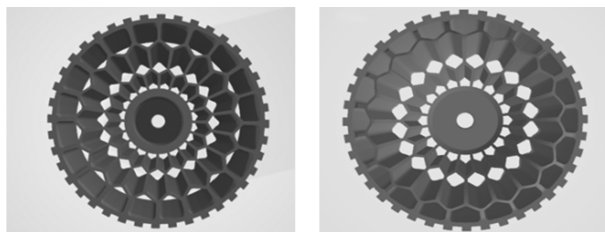
图形结构完整,每层蜂窝辐条形状、间隙及胎面纹均匀一致,成型质量优异。此种蜂窝结构轮胎和充气式轮胎相比,减重可达 44.7%。

3.4.2 蜂窝结构轮胎力学特性

PUA-1、PUA-2、PUA-3 拉伸断裂前后的实物图及相应的应力-应变曲线如图 7 所示,其相应的力学性能数据如表 2 所示。从表 2 可知,3 个样品中,PUA-1 的断裂伸长率最大,达 448.37%,拉伸强度最低,为 7.23 MPa,表明其有优异的柔韧性,结合图 7(a)的应力应变曲线,说明该材料具备软而韧的特性。这是因为乙二醇为扩链剂制备的 PUA-1 软度结构较多,分子链整体呈现柔性。而 PUA-2 的拉伸强度为 36.19 MPa,是 3 种材料中抗拉能力最强的,其断裂时的伸长率为 39.42%。从图 7(b)中可以看出,其在拉伸过程中出现明显的屈服、细颈现象。从图 7(c)中可以看出,PUA-3 的拉伸强度为 30.45 MPa,断裂伸长率为 20.66%,且该材料是在屈服点附近拉伸断裂。相对于 PUA-1 来说,以丙三醇和季戊四醇制备的 PUA-2 和 PUA-3 具有更多的羟基,能和异氰酸基团形成更多的硬段结构(异氰酸酯),PUA-3 硬段结构过多导致材料脆性增加。从非充气式轮胎的使用需求来说,蜂窝状的轮胎更应

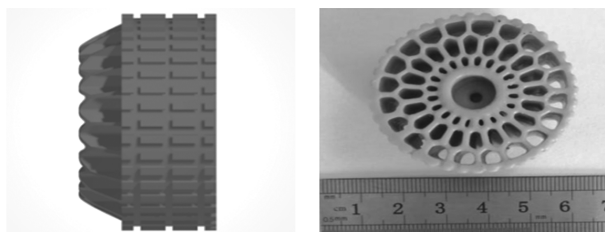
表 2 PUA 拉伸强度及断裂伸长率

样品	σ/MPa	$\varepsilon/\%$
PUA-1	7.23±0.32	448.37±24.48
PUA-2	36.19±0.73	39.42±0.58
PUA-3	30.45±0.9	20.66±0.71



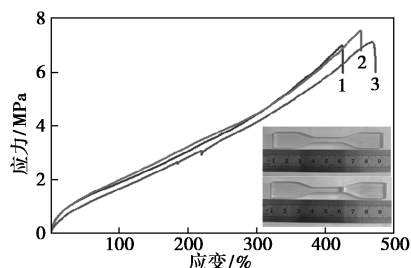
(a) 蜂窝轮胎模型底部

(b) 蜂窝轮胎模型顶部

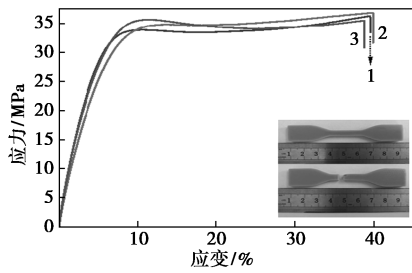


(c) 蜂窝轮胎模型侧面

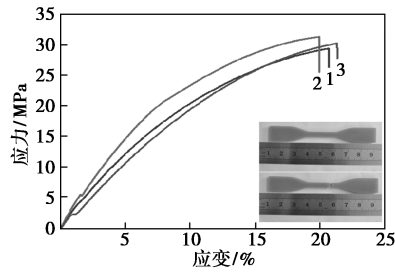
(d) 蜂窝轮胎实物底部



(a) PUA-1 应力应变曲线



(b) PUA-2 应力应变曲线



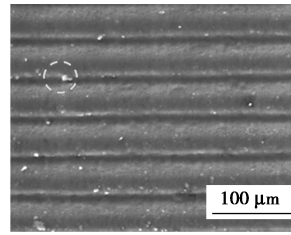
(c) PUA-3 应力应变曲线

1—第一次测量;2—第二次测量;3—第三次测量

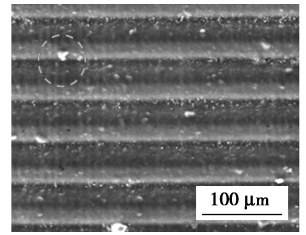
图 7 PUA-1、PUA-2、PUA-3 的力学性能

选用 PUA-2 这种又强又韧的材料。

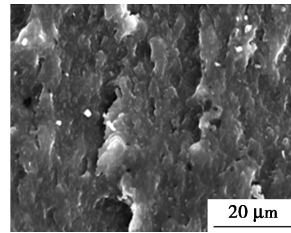
3 个样品拉伸试件的微观形貌如图 8 所示。从图 8(a)、图 8(b)、图 8(c) 中可以看出,PUA-1、PUA-2 的表面只有零星的凸起,整体是平整光滑的;而 PUA-3 表面上有大面积的凸起,相对较为粗糙,这是树脂体系中各组分之间相容性差导致的分相所致。从图 8(d)、图 8(e)、图 8(f) 中可以看出,3 种树脂打印层厚均一,层与层粘结良好,但表面有些许小颗粒或者褶皱,小颗粒是表面有灰尘或者杂质,褶皱是打印完成后表面残留的树脂未清理干净所致。通过对各个层面的分析可知,制备的聚氨酯丙



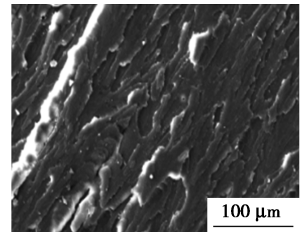
(e) PUA-2 沿 Z 轴微观形貌



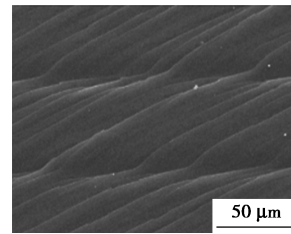
(f) PUA-3 沿 Z 轴微观形貌



(g) PUA-1 拉伸后微观形貌



(h) PUA-2 拉伸后微观形貌



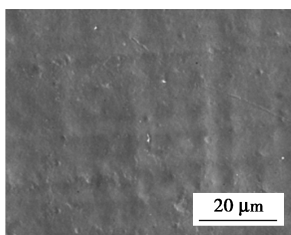
(i) PUA-3 拉伸后微观形貌

图 8 PUA 在 XY 轴平面微观形貌、沿 Z 轴微观形貌及拉伸后微观形貌

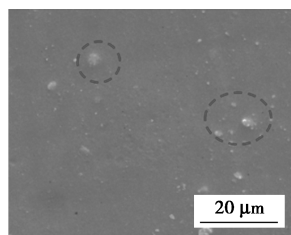
烯酸酯在打印中致密度好、无明显缺陷。经拉伸测试后,PUA 试样发生断裂,其断裂后形貌如图 8(g)、图 8(h)、图 8(i) 所示。在图 8(g) 中,PUA-1 拉伸断裂时,断面产生的是短而窄的裂纹,且断裂纹路较为粗糙,说明裂纹在扩展过程中因受阻改变了方向,符合裂纹偏转机制,该材料为韧性材料;而图 8(h) 中,PUA-2 断面不仅出现了断层,且断裂纹路呈现出粗糙的特征,说明这款树脂具备强而韧的特性,由图 8(i) 可知,PUA-3 在受到拉伸断裂时,断面比较光滑,长而宽且平行的断裂纹路在断面上直线传播,呈掰开型,表现出脆性断裂特征。

3.4.3 蜂窝结构接触角分析

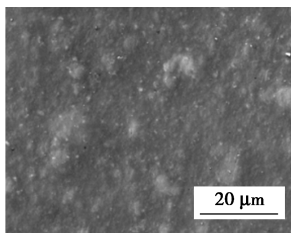
样品的接触角如图 9 所示。从图 9 中可以看出,3 种树脂的接触角均小于 90° ,表面呈现出亲水性,这是因为多元醇和丙烯酸单体中都含有羟基,而羟基为亲水性基团。其中,PUA-1 表面的亲水性最好,水接触角为 51.08° ;PUA-2 与 PUA-3 的水接触角较接近,分别为 66.82° 和 64.90° ,这是因为丙三醇、季戊四醇和异氰酸酯基团反应,造成树脂中疏水性硬段异氰酸酯比例增加,PUA 的亲水性略有降低。



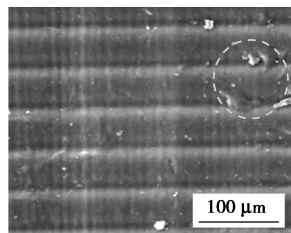
(a) PUA-1 在 X、Y 轴平面微观形貌



(b) PUA-2 在 X、Y 轴平面微观形貌



(c) PUA-3 在 X、Y 轴平面微观形貌



(d) PUA-1 沿 Z 轴微观形貌

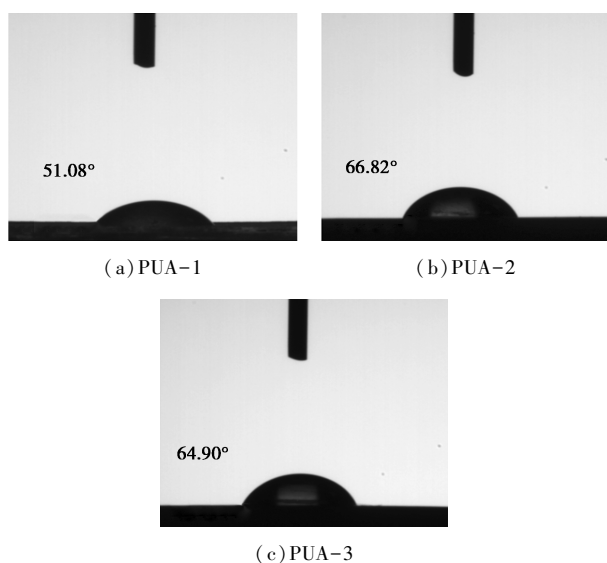


图 9 PUA-1、PUA-2、PUA-3 的接触角

4 结论

以 IPDI 和 DMPA 制备了一种聚氨酯预聚物, 通过不同多元醇为扩链剂和以甲基丙烯酸羟乙酯为封端剂制备了分子质量不同的聚氨酯丙烯酸酯树脂; 在光引发剂和稀释剂的作用下, 成功实现聚氨酯丙烯酸酯轮胎的 3D 打印, 且分层厚度为 50 μm 、层曝光时间为 6.5 s 时, 打印效果最佳。其中, 以丙三醇为扩链剂制备的聚氨酯丙烯酸酯轮胎性能最佳, 其拉伸强度高达 36.19 MPa, 断裂伸长率为 39.42%, 制备的蜂窝状结构轮胎比传统充气式轮胎减重 44.7%, 且具有良好的亲水性。

参考文献

- [1] 王传铸. 轮胎与汽车的性能匹配分析[J]. 轮胎工业, 2004, 24(11): 643-648.
- [2] 郭孔辉, 黄江, 宋晓琳. 爆胎汽车整车运动分析及控制[J]. 汽车工程, 2007, 29(12): 1014-1045.
- [3] Kim S, Sung K, Lee D, *et al.* Cavity noise sensitivity analysis of tire contour design factors and application of contour optimization methodology[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(8): 2386-2393.
- [4] 于清溪. 轮胎的绿色特性与发展[J]. 橡塑技术与装备, 2013, 39(1): 21-32.
- [5] 王丽丽. 环保型轮胎的发展[J]. 轮胎工业, 2012, 32(5): 259-262.
- [6] 高晓东. 国内外非充气轮胎的最新研究进展[J]. 橡胶工业, 2015, 62(3): 183-187.
- [7] 高树新, 何建清, 解来卿. 安全轮胎及其在军车上的应用[J]. 轮胎工业, 2009, 29(5): 259-263.
- [8] 北京化工大学. 一种刚柔结构非充气轮胎: CN201210097712.0 [P]. 2012-07-18.
- [9] Avraham L, Petach T. Reverse thermal gels and the use thereof for rapid prototyping; IL US10218514 [P]. 2005-03-08.
- [10] Syed A M, Elias P K, Amit B. Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities[J]. Materials Today, 2017, 1: 1-16.
- [11] Ge G, Wang Q, Zhang Y Z, *et al.* 3D Printing of hydrogels for stretchable ionotronic devices[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(52): 2107437.
- [12] Zhou L Y, Fu J, He Y. A review of 3D printing technologies for soft polymer materials [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(28): 2000187.
- [13] Vision, the michelin concept tire, an expression of mobility for the future(EB/OL). [2017-06-15].
- [14] Begam S. Design and analysis of alternating spoke pair concepts for nonpneumatic tire with reduced vibration at high speed rolling[D]. South Carolina: Clemson University, 2009.
- [15] Narasimhan A. A Computation method for analysis of material properties of a non pneumatic tire and their effect on static load-deflection, vibration and energy loss from impact rolling over obstacle[D]. South Carolina: Clemson University, 2009.
- [16] 李莉, 胡立臣, 邵朋礼. 一种新型轮胎的设计与分析[J]. 工业设计学报, 2008, 15(3): 220-224.
- [17] Park J M, Jeon J H, Lee Y H, *et al.* Synthesis and properties of UV-curable polyurethane acrylates containing fluorinated acrylic monomer/vinyltrimethoxysilane [J]. Polymer Bulletin, 2015, 72(8): 1921-1936.
- [18] 何明俊, 胡孝勇, 柯勇. UV 固化聚氨酯丙烯酸酯涂料的研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2017, 26(10): 49-53.
- [19] Ma G, Guan T, Hou C, *et al.* Preparation, properties and application of waterborne hydroxyl-functional polyurethane/acrylic emulsions in two-component coatings [J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2015, 12(3): 505-512.
- [20] Kang S Y, Ji Z, Tseng L F, *et al.* Design and synthesis of waterborne polyurethanes [J]. Advanced Materials, 2018, 30(18): 1706237.
- [21] Saeed A, Shabir G. Synthesis of thermally stable high gloss water dispersible polyurethane/polyacrylate resins [J]. Progress in Organic Coatings, 2013, 76(9): 1135-1143.
- [22] Sanna R, Alzari V, Nuvoli D, *et al.* Polymer hydrogels of hydroxyethyl acrylate and acrylic acid obtained by frontal polymerization [J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2012, 50(8): 1515-1520. ■