

木质基复合材料 3D 打印高端定制包装结构研究

姜凯译^a, 郭艳玲^b, 张慧^b, 于跃强^b

(东北林业大学 a.工程技术学院 b.机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: **目的** 为了顺应全球范围的高效、节能、低碳、环保的可持续发展要求, 满足消费者对于高端、可定制个性化包装产品的需求, 研究开发一种高价值可持续型木质基材料-红木/聚醚砜复合材料作为包装材料。**方法** 采用激光烧结 3D 打印技术作为具有复杂结构的可定制个性化包装产品制造的先进成型技术, 结合力学性能测试和微观结构表征技术研究制件性能, 以及加工参数对性能的影响。**结果** 红木/聚醚砜混合材料粉末组分分布均匀, 具有良好的铺粉流动性, 激光烧结制件具有天然红木的外观和芳香, 木纤维与聚醚砜界面间以机械互锁形式粘接, 制件具有较好的力学性能及成型精度。制件的拉伸强度及弯曲强度在激光功率为 9 W 时达到最大, 分别为 4.88, 7.87 MPa。**结论** 红木/聚醚砜复合材料用于激光烧结技术, 具有很好的可加工性能, 实现了珍贵材料加工剩余物的高附加值利用。采用 3D 打印技术可以实现高端定制复杂结构包装产品的设计制作。

关键词: 3D 打印; 激光烧结; 木质基复合材料; 红木; 可定制包装

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0061-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.010

3D Printing of Wood-based Composites for High-end Custom Carton

JIANG Kai-yi^a, GUO Yan-ling^b, ZHANG Hui^b, YU Yue-qiang^b

(a.College of Engineering and Technology b.College of Mechanical and Electric Engineering,

Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to research and develop a high valued sustainable rosewood/PES composite as packaging material, for the purpose of adapting to the global sustainable developing trends of high efficiency, energy saving, low carbon emission and environmental compatibility, and complying with the requirement of high-end individual custom carton. Laser sintering of 3D printing technology was selected as the advanced prototyping technology to produce individual custom packaging product with complex structure. Combined with mechanical testing and microstructure characterization, the sintered part's properties and the effect of processing parameters on the properties were studied. Rosewood/PES composite powder compositions had an even distribution, and good flowability during spreading. The sintered part possessed natural rosewood appearance and aroma. The interface between wood fiber and PES was formed through mechanical interlock. The sintered part had good mechanical strength and forming accuracy. The tensile strength and bending strength of sintered parts reached the peak of 4.88 and 7.87 MPa at a laser power of 9 W, respectively. Rosewood/PES composite has been shown to be extremely processable when applied in laser sintering and it realizes the high added-value utilization of the remainder of precious material processing. 3D printing can enable the design and prototyping of high-end custom packaging product with complex structure.

KEY WORDS: 3D printing; laser sintering; wood-based composites; rosewood; custom carton

收稿日期: 2018-05-20

基金项目: 中央高校基本科研项目 (2572017BB07); 东北林业大学“双一流”项目 (41113253); 国家自然科学基金 (51475089); 国家重点研发项目 (2017YFD0601004); 中央高校创新基金 (2572015AB12); 哈尔滨优秀学科带头人基金 (2015RAXXJ022); 中央引导地方科学技术发展专项 (ZY16C03)

作者简介: 姜凯译 (1986—), 男, 博士, 东北林业大学讲师, 主要研究方向为 3D 打印技术及包装工程。

增材制造 (AM) 技术^[1], 俗称为 3D 打印技术, 区别于传统减材制造, 采用层层叠加的方法制造三维实体, 是快速、精准、经济、高柔性的复杂三维结构制造技术。目前广泛应用于航空航天、汽车、建筑、珠宝以及工业设计等领域^[2]。理论上, 所有通过 CAD 软件设计的三维模型都可以通过 3D 打印制造出来。

激光烧结 (LS) 技术是一种计算机控制激光作为主要能量来源的粉末分层增材制造方法。激光束选择性地扫描粉床表面, 使粉末颗粒融化粘接, 固化后在其表面再铺上一层新粉, 过程往复而最终得到三维实体。激光烧结技术由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Deckard 博士于 1987 年首次提出。该技术对于缩短新产品设计评估周期, 为设计者、制造者及用户提供可视化实体模型从而进行功能测试具有重要的意义。激光烧结技术取材广泛, 如聚合物、金属、陶瓷及其相应的复合材料等^[3-5]。正因如此, 激光烧结技术在诸多领域得到广泛应用。

随前全球范围内对于能源及环境问题的持续关注, 世界各国都在节约能源, 控制制造业对环境的污染等方面达成了共识。科研工作者也在努力探索开发更清洁, 更高效的制造技术、绿色环保的环境友好型材料上不懈努力^[6]。

包装设计逐渐成为影响消费者消费决策的重要因素之一。随着生活水平的不断提高, 人们开始由物质享受向精神享受不断转变, 因此, 现代包装设计在满足功能性、合理性的基础上, 也开始更注重情感性、个性化设计。随着世界对环境问题的重视, 开发可持续型包装材料, 可重复及具有收藏价值包装结构成为了目前包装工程领域的热点之一^[7-10]。

研究目的在于开发一种天然的、可持续型的木质基包装材料, 同时采用激光烧结 3D 打印技术实现高

端的、个性化、可定制的复杂包装结构产品。

1 实验

1.1 材料制备

研究所使用的红木粉为将红木加工剩余木屑进行二次加工得到的 160 目的粉末。红木为带有天然香味的名贵木材。红木均具有强度高、密度大等特点, 可用于生产乐器、家具、地板等。由于过量的采伐, 目前世界红木剩余量较低, 因此高效利用红木材料具有非常重要的意义。

实验所用热融胶为上海远智热融胶有限公司生产, 120 ~ 180 目的 Y1201P80 型聚醚砜热融胶。该热融胶为热塑型共聚酯, 液相状态具有良好的流动性, 可快速浸润红木纤维, 将其包裹, 彼此粘接形成实体。同时具有较低的吸水性及收缩率, 并且热稳定性良好。同时, 微量添加剂, 如降粘剂、偶联剂、光稳定剂等也被加入复合材料体系中, 以改善材料性能, 总体添加质量分数少于 1%。

红木粉及 PES 的基本性能对比见表 1, 由表 1 中数据可以看出, 相比于 PES, 红木具有非常低的体现能和 CO₂ 排放量以及较高的热传导率, 可以充分说明采用红木粉添加到 PES 基体作为激光烧结原材料可以在一定程度上降低材料加工能量消耗及 CO₂ 排放。

在前期研究的基础上, 确定了木粉在 PES 复合材料体系中的最佳添加质量分数为 20%, 该比例在保证制件具有一定使用强度的基础上, 木粉添加量达到最大。分别称取 1 kg 红木粉, 4 kg PES 粉末, 将所有粉末置于陶瓷磨罐 (U.S. Stoneware 803 DVM) 中, 进行高速混合 5 h, 从而获得颗粒分布均匀的红木/聚醚砜混合粉末。

表 1 材料组分性能参数
Tab.1 Performance parameters of material compositions

性能参数	颗粒尺寸/ μm	颗粒形状	密度/ (g·cm ⁻³)	热传导率/ (W·mK ⁻¹)	体现能/ (MJ·kg ⁻¹)	CO ₂ 排放量/ (kg·kg ⁻¹)	玻璃化转变 温度/℃
红木	40 ~ 100	不规则	0.76 ~ 1.00	0.26	0.01	0.93	79 ~ 110
聚醚砜	180 ~ 250	不规则	1.37 ~ 1.46	0.183	148	15.3	220 ~ 230

1.2 激光烧结实验

红木/PES 复合材料激光烧结制件由北京隆源 AFS-360 型激光烧结机制造, 设备相关参数: 激光器类型为 CO₂ 射频, 55 W; 成型室尺寸为 360 mm×360 mm×500 mm; 分层厚度为 0.08 ~ 0.3 mm; 扫描速度为 2000 mm/s; 环境温度为 15 ~ 30 ℃。为了研究激光功率对于制件性能的影响, 根据前期研究, 实验选取一组激光功率见表 2, 其他固定加工参数: 扫描速度 2000 mm/s, 扫描间距 0.15 mm, 层厚 0.1 mm, 粉床温度 80 ℃。

表 2 激光烧结实验激光功率选用
Tab.2 Selection of laser power for laser sintering experiments

组号	激光功率/W
1	5
2	7
3	9
4	11
5	13
6	13

1.3 力学性能测试

红木/聚醚砜激光烧结制件力学性能通过 TMS 公司的 CMT5504 型测试机完成, 测试标准为: 拉伸性能, 根据 ISO 527—2 拉伸实验标准进行, 十字头速度为 5 mm/min, 标距为 50 mm; 弯曲性能, 根据 ISO178 三点压弯实验标准进行, 十字头速度为 0.1 mm/min, 标距为 64 mm。

1.4 微观结构表征

由于红木/聚醚砜复合材料不导电, 因此在进行扫描电镜观察前要对样品表面进行喷金处理。Duth 公司的 FEI Quanta200 扫描电镜用于粉末材料、制件断裂截面的微观结构表征。

2 结果与讨论

2.1 红木/聚醚砜复合材料粉末形貌

如图 1 所示, 混合质量比为 1:4 的红木/聚醚砜复合粉末表现呈均匀的红色, 近红木颜色。混合粉末具有较好的流动性, 便于在激光烧结过程中的均匀铺粉。该混合材料粉末的微观形貌见图 2。



图 1 红木/聚醚砜混粉
Fig.1 Rosewood/PES blend

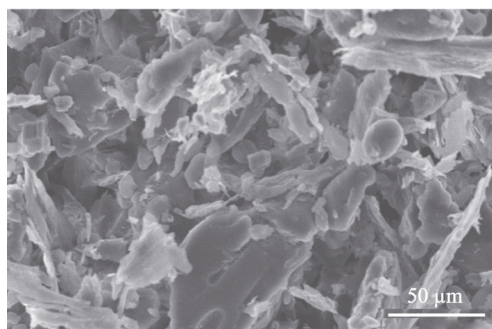


图 2 红木/聚醚砜混粉 SEM
Fig.2 SEM of rosewood/PES blend

由图 1 可以看出, 红木纤维表面粗糙, 外形呈现片状、针状及絮状等不规则形状, 且纤维尺寸不均匀。红木纤维散乱无序地扦插在 PES 颗粒间, 但分布较为均匀, 未出现纤维聚集现象。并且, 纤维较大的长径比大幅提高了其与 PES 的接触面积, 从而可在激光烧结过程中增加与 PES 间的界面结合性能。

2.2 激光功率对红木/聚醚砜制件力学性能的影响

激光功率对于红木/聚醚砜激光烧结制件的力学性能影响曲线见图 3, 包括拉伸性能和弯曲性能。

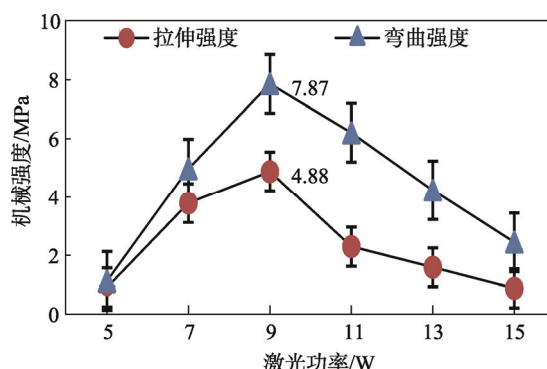


图 3 激光功率对制件机械强度的影响
Fig.3 Effect of laser power on mechanical strength of sintered part

如图 3 所示, 5 W 的激光功率一般不能得到满足使用要求的制件。由于较高的激光功率可以增加对于粉床的能量输入, PES 颗粒融化充份而具有较低的粘度, 流动性以及对于红木纤维的浸润大大增加, 进而获得更好的界面结合力, 因此制件的拉伸性能及弯曲性能会随着激光功率的升高而升高, 当激光功率达到 9 W 时, 制件力学性能达到最佳, 拉伸性能和弯曲性能分别为 4.88 MPa 和 7.87 MPa。随着激光功率超过 9 W 以后, 过高的能量输入会使得材料产生热解, 进而大幅降低制件性能。

2.3 红木/聚醚砜复合材料激光烧结机理

聚醚砜是一种具有适中熔融粘度的热塑性材料。红木纤维具有粗糙的表面, 在激光烧结过程中, 聚醚砜吸收激光能量, 温度瞬时上升超过其熔点, 融化后的聚醚砜流入孔隙, 高分子链扩散进入红木纤维之间, 通过毛细现象浸润红木纤维, 形成层插复合结构, 红木纤维被包裹后重新排序, 在激光扫描过后, 瞬间冷却粘接形成固体。

复合材料液相烧结机理见图 4^[11]。实线部分代表传统煅烧过程, 而激光烧结液相烧结机理由虚线的前段的绿线和冷却粘接表示。颗粒重排在绿线过程中发生。理论上, 木纤维是可以被融化的聚合物粘接到一起的。

采用研究所选用的激光烧结工艺参数, 大部分红木粉是可以被聚醚砜所粘接在一起, 形成大量的连续相, 见图 5。制件表面相对光滑, 少量被部分包裹的红木纤维暴露在表面。表面仍有不同尺寸的孔洞存在, 同时部分红木纤维被封装在孔洞中, 附着在聚醚砜连续相表面。该类孔洞是由于在激光烧结过程中, 液相聚醚砜的适中粘度以及红木纤维的阻碍而形成的。

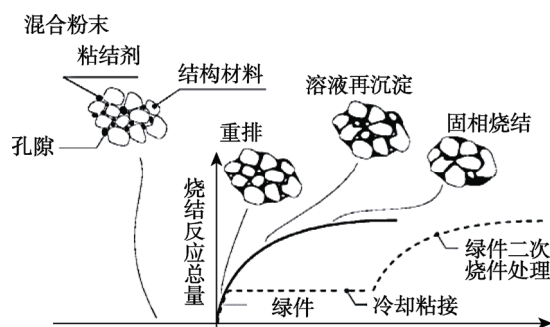


图4 液相烧结机理

Fig.4 Liquid phase sintering mechanism

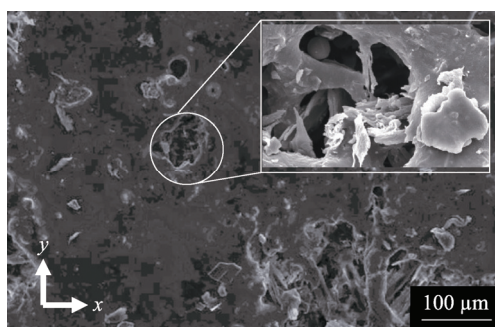


图5 表面 SEM 照片

Fig.5 Surface SEM picture

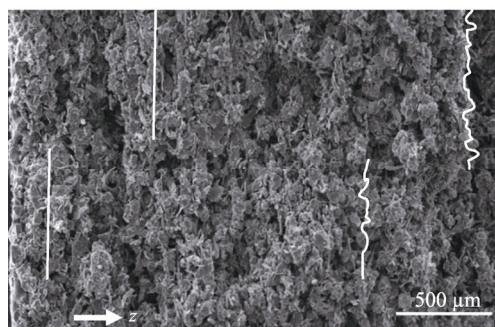


图6 截面 SEM 照片

Fig.6 Cross-section SEM picture

制件断裂横截面微观扫描电镜图片见图6，分层制造的片层结构可以清晰可见。从图6中可以看出，在层间结合的界面形式大致分为2种，一种为较为清晰的直线型界面边缘，而直线型界面结合力较低，容易产生分层现象；另一种为模糊的不规则锯齿型界面边缘，该类结合形式也被称为机械互锁界面，可以在层间提供较高的结合力，进而使制件聚有较高的力学性能。

2.4 高端定制包装盒的设计与烧结

面向传统制造技术的设计方法意味着包装设计需要尽自己所能将包装结构修改的简单规则，以期降低加工难度从而减少成本，而这大大限制了设计师的创新力。3D 打印技术的出现，因其不受模型复杂程度限制的加工能力，为面向传统制造技术的设计方法提供了一次重新思考的机会。利用3D 打印技术

可以方便地制作整体式个性化定制产品。基于其柔性制造能力，一个新的面向增材制造的设计方法被提出，该设计方法可以大大释放设计者的设计空间，设计者可以设计任意合理的复杂结构^[12-13]，而不用考虑其可加工性。这便使得个性化可定制的复杂包装结构的设计和制造成为现实，可以大大满足人们的需求^[14-15]。

随着3D 打印技术的不断成熟，其应用可以完全取决于设计者的想象力。它不仅可以满足消费者对于个性化可定制产品的需求，也大大缩短了产品的设计制造周期，降低了成本。设计者也正在尝试将3D 打印技术应用于包装工程领域之中，如异形包装、无缝包装以及嵌套网格格式包装等，这大大地提升了设计者的设计能力。定制镂空纸巾盒的CAD模型见图7，该包装盒具有薄壁以及精美雕刻花样，采用珍贵的红木/聚醚砜复合材料，通过激光烧结制作出的产品，不仅具有一定功能性，还具有美学及收藏价值。

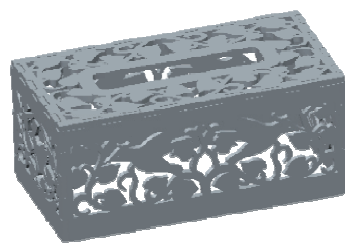


图7 定制包装盒 CAD 模型

Fig.7 CAD model of custom carton



图8 红木/聚醚砜包装盒实物

Fig.8 Rosewood/PES custom carton in kind

激光烧结红木/聚醚砜薄壁镂空纸巾盒样品见图8。制件为燕尾型组合式，成型精度高，特征清晰。相比于CAD模型，尺寸精度保持在98%以上。同时产品外观及手感均与实木雕刻产品相似，并带有红木的芳香。

3 结语

研究开发了一种高价值可持续型木质基材料-红木/聚醚砜复合材料，作为包装材料，采用激光烧结3D 打印技术制作高端定制包装产品。一种新的面向增材制造技术的设计方法被植入到个性化复杂包装

结构设计中,明确了使用 3D 打印技术在情感化、个性化包装设计制作中的优势。红木/聚醚砜复合材料的激光烧结制造展现出使用高价值可持续型复合材料应用在增材制造中,从而生产具有红木外观及手感的可定制复杂结构包装产品,该包装产品具有可重复使用和一定的美学及收藏价值。文中仅进行了初步研究,获得了概念展示模型,进一步的性能探索将在后续研究中进行。

参考文献:

- [1] BEAMAN J J, BARLOW J W, BOURELL D L, et al. Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing[M]. Kluwer Academic Publishers Press, Boston, MA, 1997.
- [2] KWON D, PARK E, HA S, et al. Effect of Humidity Changes on Dimensional Stability of 3D Printed Parts by Selective Laser Sintering[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(9): 1275—1280.
- [3] BOURELL D L, BEAMAN J J, MARCUS H L, et al. Solid Freeform Fabrication, an Advanced Manufacturing Approach[J]. Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 1990: 1—7.
- [4] SALMORIA G V, LAUTH V R, CARDENUTO M R, et al. Characterization of PA12/PBT Specimens Prepared by Selective Laser Sintering[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 98: 92—96.
- [5] WARNAKULA A, SINGAMNENI S. Selective Laser Sintering of Nano Al_2O_3 Infused Polyamide[J]. Materials, 2017, 10: 864—883.
- [6] LEU M C, BOURELL D L, ROSEN D W. Roadmap for Additive Manufacturing-identifying the Future of Freeform Processing[M]. Laboratory for Freeform Fabrication, Advanced Manufacturing Center, the University of Texas at Austin, 2009.
- [7] BRAS J, MENDEZ J A, KROUIT M, et al. Process and Recyclability Analyses of Innovative Bio-composite for Tray[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23: 177—188.
- [8] 刘婷婷. 3D 打印技术在礼品包装订制设计中的应用[J]. 中国包装工业, 2014(22): 103—105.
- LIU Ting-ting. Application of 3D Printing Technology in Custom Design of Gift Packaging[J]. Chinese Packaging Industry, 2014(22): 103—105.
- [9] 李漾. 3D 打印技术对容器包装设计的影响及应用研究[J]. 美术教育研究, 2016(18): 74.
- LI Yang. Study on the Application and Effect of 3D Printing Technology on the Design of Packaging Container[J]. Art Education Research, 2016(18): 74.
- [10] 周爱民, 欧阳晋焱, 李奋强. 基于 3D 打印技术的产品开发设计模式研究[J]. 中国包装, 2014(2): 20—23.
- ZHOU Ai-min, OUYANG Jin-yan, LI Fen-qiang. Study on the Design Mode of Product Development Based on 3D Printing Technology[J]. China Packaging, 2014(2): 20—23.
- [11] MERCELIS P, KRUTH J P, VAN F. Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(1): 26—36.
- [12] 黄丽婕, 王晓彤, 周雷, 等. 3D 打印在包装工业中的应用与前景[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(4): 122—126.
- HUANG Li-jie, WANG Xiao-tong, ZHOU Lei, et al. Application and Prospect of 3D Printing in Packaging Industry[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(4): 122—126.
- [13] 乔益民, 王家民. 3D 打印技术在包装容器成型中的应用[J]. 包装工程, 2012, 33(22): 68—72.
- QIAN Yi-min, WANG Jia-min. Application of 3D Printing Technology in Container Molding Design[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(22): 68—72.
- [14] KRIVEC M, ROSHANGHIAS A, ABRAM A, et al. Exploiting the Combination of 3D Polymer Printing and Inkjet Ag-nanoparticle Printing for Advanced Packaging[J]. Microelectronic Engineering, 2017, 176: 1—5.
- [15] 李翔, 王子健. 基于 3D 打印技术的儿童玩具定制平台设计[J]. 包装工程, 2018, 39(8): 211—216.
- LI Xiang, WANG Zi-jiang. Customized Platform Design for Children's Toys Based on 3D Printing Technology[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(8): 211—216.