

3D 打印木塑填充结构的平压性能比较

刘德喜, 李 鹏, 陶毓博

(东北林业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 为了探究利用 3D 打印技术制作质轻抗压木塑复合材料制品的优化方案, 比较分析 12 种填充结构(二维、立体结构各 6 种)的平压性能。结果表明, 在平压性能方面, 二维交叉填充结构具有最高的平压强度和模量; 在打印效率方面, 三维立方体分区填充结构适合快速打印产品的概念模型。综合比较分析, 在二维结构中, 内六角填充结构同时具有高强度和打印时间短两点优势。建议根据产品设计的要求, 合理选择不同的填充结构, 以满足需求。

关键词: 3D 打印; 熔融沉积成型; 填充结构; 平压性能

中图分类号: TQ320.6; S784; TS657

文献标识码: B

文章编号: 1001-8654 (2019) 05-0039-05

Flatwise Compression Properties of 3D-printed Infill Patterns of Wood Plastic Composites

LIU De-xi, LI Peng, TAO Yu-bo

(College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: To explore potential applications of three-dimensional (3D) printing technology in developing anti-compression/lightweight products with wood-plastic filaments, twelve infill patterns including six two-dimension and six three-dimension infill patterns were selected to prepare wood plastic composite specimens. The flatwise compression properties of the specimens were measured and analyzed.

The two-dimension infill patterns presented high flatwise compression strength and modulus of compression. The three-dimension infill patterns were suitable for rapid prototyping in product design and manufacturing. The two-dimensional tri-hexagon infill pattern had good flatwise compression properties with high printing efficiency.

Key words: three-dimensional (3D) printing; fused deposition modeling (FDM); infill patterns; flatwise compression properties

3D 打印(增材制造)技术主要包括熔融沉积成型(Fused deposition modeling, FDM)、激光烧结成型(Selected laser sintering, SLS)和光固化快速成型

(Stereo lithography apparatus, SLA)等技术, 其中 FDM 成型技术应用最为普及^[1-2]。FDM 工艺主要采用低熔点的高分子材料, 如丙烯腈-丁二烯-苯乙烯、聚乳酸、聚碳酸酯或碳纤维/聚乳酸复合材料等^[3]。目前, 木塑复合材料已成功应用在 FDM 型 3D 打印技术中^[4], 与木塑挤出和压制成型的木塑制品相比, 采用 3D 打印技术可以获得外形和内部结构更复杂的制品, 并且能够通过内部结构设计, 获得质轻高强的制品。

收稿日期: 2018-12-04; 修改日期: 2019-04-29

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划“功能生物质复合材料与产品研究”(NCET-13-0711)。

作者简介: 刘德喜(1992—), 男, 硕士研究生。Email: liudexi@nefu.edu.cn。

责任作者: 陶毓博, 女, 副教授。Email: taoyubo@nefu.edu.cn。

制品内部结构主要由填充密度（填充率）和填充结构两个参数控制。已有研究表明，填充密度对制品的力学性能有很大影响，制品的冲击强度、拉伸强度和弯曲强度，都随着填充密度的增大而不断增强^[5-8]。以网格填充结构为例，当填充密度从20%提高到100%时，制品压缩强度从21.4 MPa增加到51.9 MPa^[9]。这是因为填充密度越高越接近于实心制品，但打印所需时间和材料成本也相应增加。所以，通过改变另一参数——填充结构，来提高制品的力学性能具有重要意义。

填充结构按照形态可分为：二维填充和立体填充两类，大多数3D打印软件以二维网格填充为默认的填充结构，使用频率高，具有代表性。已有研究表明，不同填充结构对制品力学性能的影响存在差异。1) 拉伸强度：在蜂窝、直线和同心填充结构中，以直线填充结构的拉伸强度最高^[10]；但在特定的填充密度条件下，蜂窝结构比直线和网格结构具有更高的拉伸强度^[11]；在直线、网格、快速蜂窝、全蜂窝、三角形和摆动填充等结构中，以摆动填充结构的拉伸强度最高；另外，栅格取向也影响材料的拉伸强度^[12]；2) 抗冲击性能：直线填充结构优于八边形和同心填充结构^[13]；3) 弯曲强度，六边形填充结构的弯曲模量和强度均高于三角形、网格等填充结构^[14]。还有研究表明，网格填充随填充角增大，拉伸强度和断裂伸长率增大，冲击强度减小^[15]。

平压性能反映制品保持其原来厚度而不发生压溃的能力，对于表面受力的木塑类制品十分重要。现有研究大多针对的是3D打印填充结构的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度，对制品平压性能与打印填充结构的关系研究鲜有报道。鉴于此，笔者比较分析了同一填充密度下12种填充结构的平压性能，探究填充结构的优化方案，以期实现结合FDM技术，使用木塑复合材料制造轻质抗压的产品，如家具面板、支撑零部件等，推进3D打印技术在家具设计制造中的应用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

木粉/聚乳酸复合线材，外购。直径1.75 mm，密度1.25 g/cm³，木粉质量分数约10%。

1.2 主要设备

Z-605S 熔融沉积成型3D打印机，JM 电子计数天平，D2F-6020ABF 电热真空干燥箱，CMT5504 微机控制电子万能试验机，等。

1.3 样品打印

参考 GB/T 1453-2005《夹层结构或芯子平压性能试验方法》，采用123D Design 三维建模软件，绘制矩形体模型。将绘制的模型转化为STL格式，导入Ultimaker Cura（版本3.2.1）软件中，并以其提供的12种填充模式作为填充结构，如图1所示。

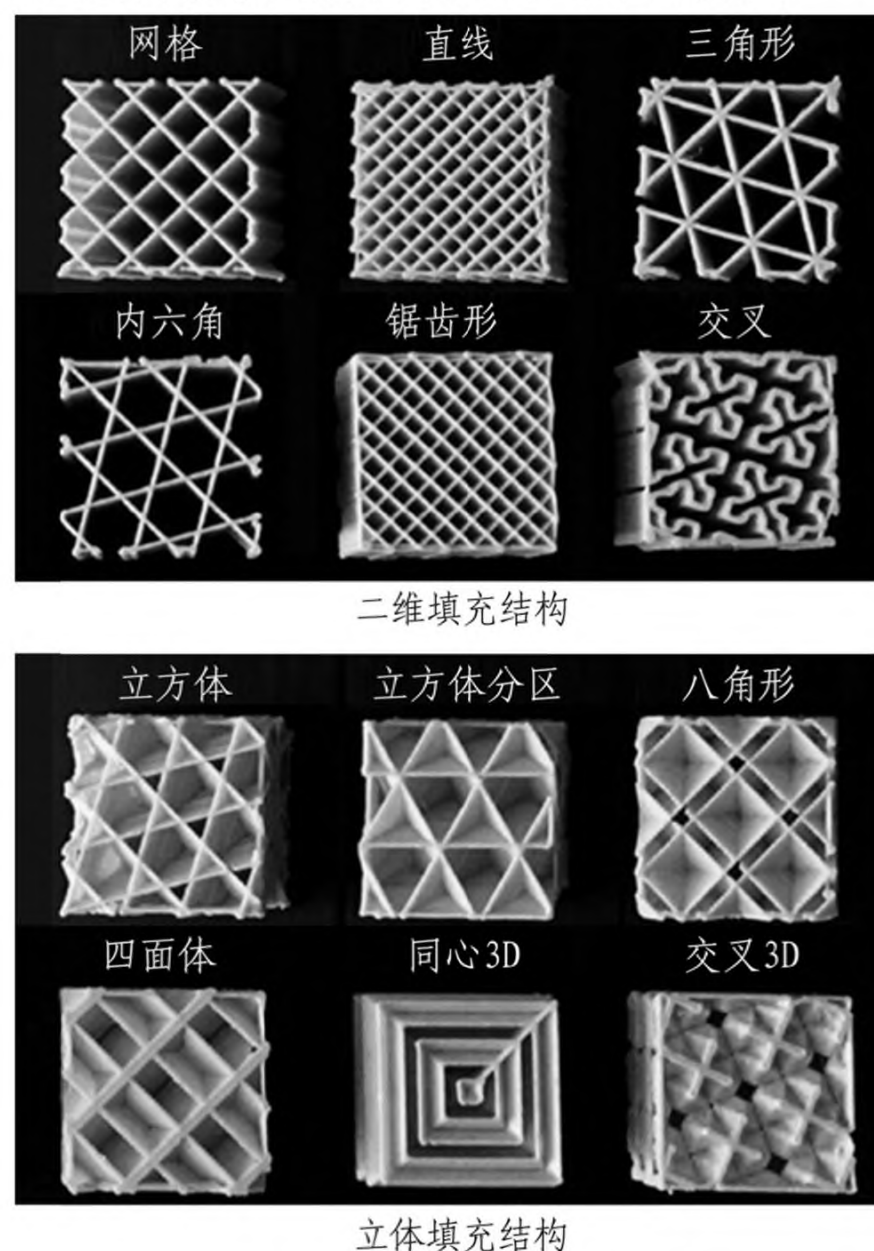


图1 二维和立体填充结构

Fig.1 2D and 3D infill patterns

样品打印参数设置：打印平台温度50℃；喷嘴温度210℃，喷嘴直径0.4 mm；层厚0.2 mm，壁厚、顶层与底层厚度均为0；填充密度（填充率）20%；沉积角度45°或0°；打印速度40 mm/s。

1.4 性能检测

参照 GB/T 1453-2005《夹层结构或芯子平压性能试验方法》，测试平压强度和弹性模量。测试速率2 mm/min。每组试样5个，结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 二维填充结构的平压性能

2.1.1 二维填充结构的平压应力-应变曲线特征

交叉、内六角、网格、直线和三角形等五种二维填充结构，其应力-应变曲线，均可分为起始、弹性、塑性和破坏阶段。图 2 所示为交叉填充结构的应力-应变曲线。

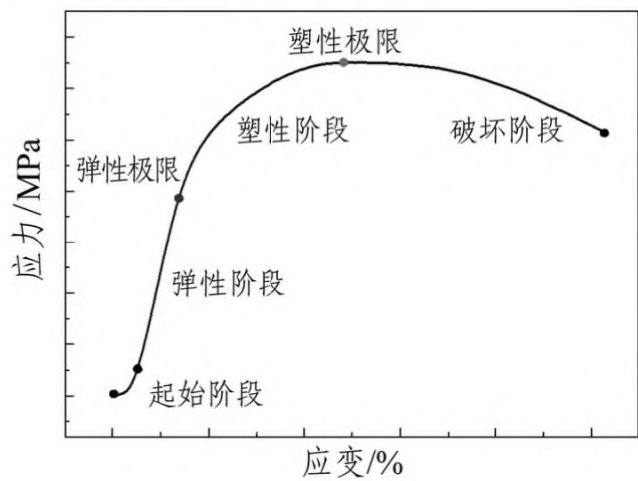


图 2 典型交叉二维填充结构的平压应力-应变曲线特征
Fig.2 Characteristics of flatwise compression stress-strain curve of a typical 2D cross infill pattern

起始阶段，主要是去除 FDM 成型过程中产生的层间孔隙；在弹性阶段，应力与应变呈正比变化，反映了填充结构的弹性受压，若撤去外力，则变形消失；塑性阶段，应力随着应变的增加而缓慢增长，产生不可逆的变形，主要反映出填充结构的强度特性；达到塑性极限时，打印件承受的应力达到最大值；破坏阶段，应力随应变的增加而衰退，此时打印件在外力作用下产生较大形变，整体结构被破坏。

锯齿形与直线填充结构在外观上十分接近，但二者的应力-应变曲线特征却不相同（如图 3 所示）。锯齿形的应力-应变曲线随着压力增加始终呈持续上升趋势，直至被压实，无明显塑性极限值。

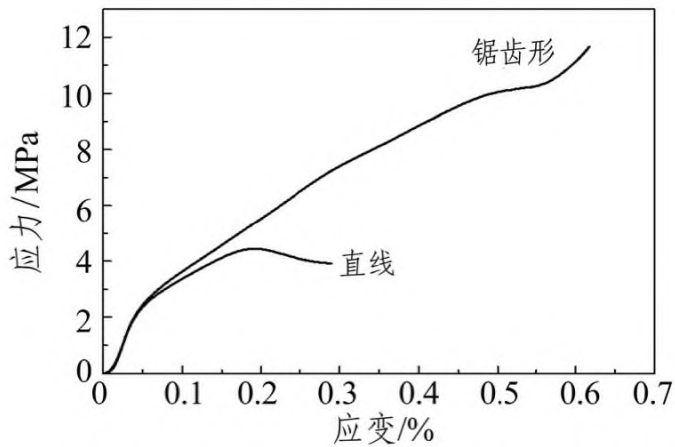


图 3 锯齿形和直线填充结构的平压应力-应变曲线比较
Fig.3 Flatwise compression stress-strain curves of Zigzag and Lines infill patterns

分析原因：1) 两种结构在打印时走线的路径不同，锯齿形填充的每一沉积层为连贯的线条，而直线填充仅是单线的组合排列；2) 锯齿形填充结构相邻沉积层之间的空隙明显小于直线填充，形成了锯齿形填充结构特殊的承压特性。

2.1.2 二维填充结构的平压强度和平压弹性模量

六种二维填充结构的平压强度和弹性模量检测结果，列于表 1。

表 1 六种二维填充结构的平压性能及打印时间

Tab.1 Flatwise compression properties and printing time of 2D infill patterns

样品序号	填充结构	平压强度/MPa	平压弹性模量/GPa	样品质量/g	打印时间/s
1	交叉	8.283	0.214	1.234	491
2	内六角	8.173	0.180	1.051	392
3	网格	7.165	0.167	1.056	404
4	三角形	5.256	0.155	1.042	403
5	直线	4.437	0.072	1.045	425
6	锯齿形	-	0.073	1.197	376

由表 1 可知，在相同材料、尺寸、填充率、打印速度等条件下，不同二维填充的平压强度、弹性模量、样品质量和打印时间存在明显差异。其中：

1) 交叉填充结构的材料消耗用量最多、用时最长，平压强度最高；

2) 内六角、网格、三角形和直线填充结构的材料消耗相近，内六角填充的六边形蜂窝结构，可起到更好的支撑作用^[16]，所以其平压性能仅次于交叉填充结构；

3) 在同等条件下，锯齿形填充结构的打印用时最短，适合快速打印设计的产品模型；

4) 内六角填充结构与交叉填充结构相比，既保证了较好的平压强度，又缩短了打印时间，可同时满足强度和效率两方面的平衡，更加符合产品设计的要求（如图 4 所示）。

2.2 立体填充结构的平压性能

2.2.1 立体填充结构的平压应力-应变曲线特征

六种立体填充结构的应力-应变曲线，不同于二维填充结构。以典型的同心 3D 立体填充结构为例，其应力-应变曲线如图 5。

由图 5 曲线可知，破坏阶段分为两部分：首先在局部发生断裂后形成新的结构继续承压，应力随

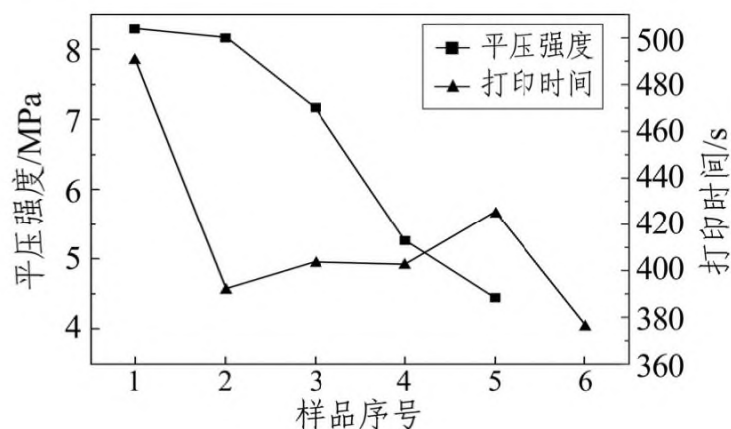


图4 六种二维填充结构的平压强度和打印效率

Fig.4 Flatwise compression strength and printing efficiency of 2D-infill patterns

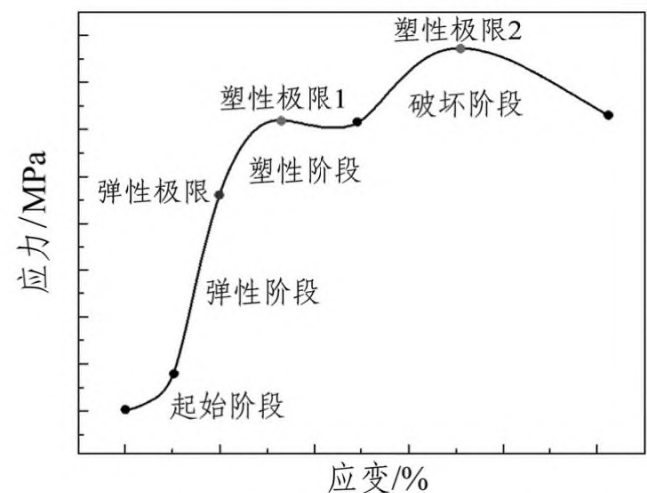


图5 典型同心3D立体填充结构的平压应力-应变曲线特征

Fig.5 Characteristics of flatwise compression stress-strain curve for a typical 3D concentric infill pattern

应变的增加呈现缓慢上升趋势，与塑性阶段的特征相似；当新结构超过第二个塑性极限点后，整体破坏。虽然第二个塑性极限值大于第一个塑性极限值，但实质是在第一个塑性极限点时，打印件就已经产生了破坏，失去了可靠性，因此平压性能只依据曲线上第一个塑性极限点之前的部分。

2.2.2 立体填充结构的平压强度和平压弹性模量

六种立体填充结构的平压强度和平压弹性模量检测结果，列于表2。

表2 六种立体填充结构的平压性能及打印时间

Tab.2 Flatwise compression properties and printing time of 3D infill patterns

样品序号	填充结构	平压强度/MPa	平压弹性模量/GPa	样品质量/g	打印时间/s
1	八角形	2.336	0.059	1.046	401
2	交叉3D	2.290	0.052	1.177	456
3	立方体	2.284	0.057	1.034	391
4	四面体	2.238	0.051	1.047	404
5	同心3D	1.571	0.045	0.956	314
6	立方体分区	1.243	0.032	0.784	304

由表2可见：1) 六种立体填充结构中，八角形填充结构的平压强度最高。

2) 交叉3D、立方体与四面体填充结构，三者平压性能十分接近，但材料消耗和打印时间（图6）存在差异。可见，填充结构的强度并非随着材料消耗增加而增大，体现的是结构本身的承压性能。

3) 立方体分区填充特殊的内部结构，其打印用时最短，材料消耗最少，适合快速打印产品模型。

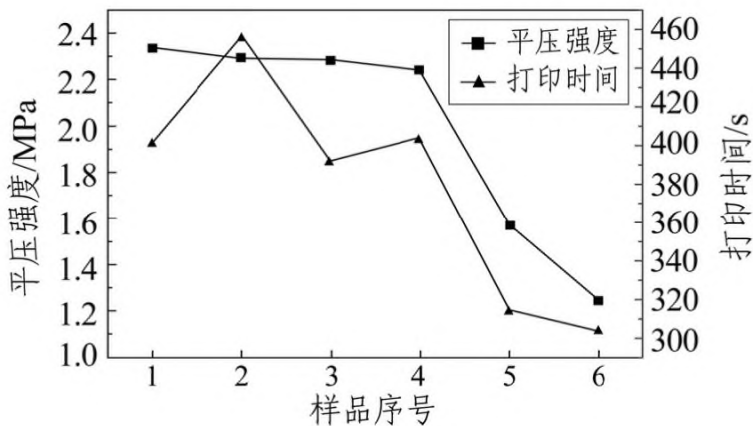


图6 六种立体填充结构的平压强度和打印效率

Fig.6 Flatwise compression strength and printing efficiency of 3D infill patterns

3 结论

1) 3D打印的二维和立体填充结构，其应力-应变曲线都经历了弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段，立体填充结构在破坏阶段分为两部分。

2) 二维填充结构的平压强度均高于立体填充结构，其中交叉填充结构的平压强度最高，达到8.283 MPa，可被优先用于打印强度要求高的制品。

3) 在12种填充结构中，立方体分区填充结构的打印用时最短，打印效率最高，材料消耗亦最少，适合快速打印产品模型。

4) 综合而言，二维的内六角填充结构同时具有强度高和打印时间短两项优势，而常用的网格填充结构，在平压性能和打印效率两方面均不具备绝对优势。在进行3D打印时，除了考虑填充率、沉积角度、打印速度等因素，还应根据产品设计的需求，合理选择填充结构。

参考文献：

[1] 付航, 李鹏, 陶毓博. 3D打印技术在圈椅模型开发中的应用[J]. 木材工业, 2017, 31(2): 53-56.
FU H, LI P, TAO Y B. Development of round-backed armchair model by 3D printing [J]. China Wood Industry, 2017, 31(2): 53-56.

[2] 王红蕾,李鹏,陶毓博. 植物纤维/聚乳酸复合材料研究现状及3D打印应用展望[J]. 科技创新导报, 2018 (2): 108-110.

[3] 齐俊梅,姚雪丽,陈辉辉,刘川. 3D打印聚合物材料的研究进展[J]. 热固性树脂, 2019, 34(2): 60-63.

QI J M, YAO X L, CHEN H H, LIU C. Research progress of polymeric materials for 3D printing technology[J]. Thermosetting Resin, 2019, 34(2): 60-63.

[4] Yubo T, Honglei W, Zelong L, et al. Development and Application of Wood Flour-Filled Polylactic Acid Composite Filament for 3D Printing[J]. Materials, 2017, 10(4): 339.

[5] 舒友,胡扬剑,魏清茂,黄蓉,荆王莉. 3D打印条件对可降解聚乳酸力学性能的影响[J]. 中国塑料, 2015, 29(3): 91-94.

SHU Y, HU Y J, WEI Q M, HUANG R, JING W L. Effects of 3D printing conditions on mechanical properties of biodegradable Poly (lactic acid) [J]. China Plastics, 2015, 29(3): 91-94.

[6] 余旺旺,张杰,吴金绒,邓玉和. 打印方式对熔融沉积(FDM)产品力学性能的影响[J]. 塑料工业, 2016, 44(8): 41-43.

YU W W, ZHANG J, WU J R, DENG Y H. Influence of printing patterns on the properties of fused deposition modeling (FDM) Products[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(8): 41-43.

[7] 毕永豹,杨兆哲,许民. 打印方式对熔融沉积成型制品性能的影响[J]. 塑料科技, 2017, 45(4): 59-64.

BI Y B, YANG Z Z, XU M. Influence of printing conditions on properties of FDM products[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(4): 59-64

[8] 王晗,杨卫民,焦志伟,迟百宏,阎华. FDM工艺中填充率对塑料制品力学性能的影响[J]. 塑料, 2018, 47(1): 92-94.

WANG H, YANG W M, JIAO Z W, CHI B H, YAN H. Effects of filling ratio in FDM technology on the mechanical properties of plastic products[J]. Plastics, 2018, 46(1): 92-94.

[9] 高士友,黎宇航,周野飞,等. 熔融沉积(FDM)3D打印成形件的力学性能实验研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(1): 200-206.

GAO S Y, LI Y H, ZHOU Y F, et al. Mechanical properties experiment of 3D printing forming specimens with fused deposition modeling (FDM) [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(1): 200-206.

[10] Khan SA, Siddiqui BA, Muhammad. Evaluation of the effect of infill pattern on mechanical strength of additively manufactured specimen[J]. Materials Science Forum, 2017 (887-887): 128-132.

[11] Fernandez-Vicente M, Calle W, Ferrandiz S, et al. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2016, 3(3): 183-192.

[12] Dudesu C, Racz L. Effects of Raster Orientation, Infill Rate and Infill Pattern on the Mechanical Properties of 3D Printed Materials [J]. ACTA Universitatis Cibiniensis, 2017, 69(1): 23-30.

[13] Tsouknidas A, Pantazopoulos M, Katsoulis I, et al. Impact absorption capacity of 3D-printed components fabricated by fused deposition modelling[J]. Materials & Design, 2016, 102: 41-44.

[14] Lubombo C, Huneault MA. Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts[J]. Materials Today Communications, 2018, 17: 214-228.

[15] 马昊鹏,迟百宏,李飞,焦志伟,杨卫民. FDM工艺中填充方式对塑料制品力学性能的影响[J]. 塑料, 2017, 46(2): 47-49.

MA H P, CHI B H, LI F, JIAO Z W, YANG W M. Effects of fill pattern in FDM technology on mechanical properties of plastic products[J]. Plastics, 2017, 46(2): 47-49.

[16] 范华林,金丰年,方岱宁. 格栅结构力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(1): 35-52.

FAN H L, JIN F N, FANG D N. Structural mechanics of lattice grids[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(1): 35-52.

(责任编辑 向琴)



(上接第38页)

表3 各分量不确定度值

Tab.3 Uncertainty of various components

板材 种类	1 m ³ 气候箱测定过程的不确定度分量			
	甲醛收集过程	标准曲线绘制	甲醛浓度测定过程	重复性测量
LPB				9.55×10 ⁻²
MPB	5.25×10 ⁻²	2.44×10 ⁻²	3.82×10 ⁻³	5.14×10 ⁻²
HPB				3.57×10 ⁻²

表3说明,对于低甲醛释放量人造板样品,重复测量引入的不确定度,对总体不确定度的贡献最大。

3 结论

1) 1 m³气候箱法分析的甲醛检出限,建议采用50 mm光程比色皿进行分析,并按照检出限的一般确定方法进行计算,此方法检出限约为0.005 mg/m³。

2) 对于低甲醛释放量的人造板样品,重复测量引入的不确定度对总体不确定度的贡献最大。因此在检测过程中,每一个步骤都应更严格按照规范操作,以保证数据的准确性和可靠性。

参考文献:

[1] 国家林业局林产工业规划设计院. 中国人造板产业报告 2017[R].

[2] Jan Gunschera, SibelMentese, TungaSalthammer, et al. Impact of building materials on indoor formaldehyde levels: Effect of ceiling tiles, mineral fiber insulation and gypsum board[J]. Building and Environment, 2013(64): 138-145.

[3] Klepeis N E, Nelson W C, Ott WR. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants[J]. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 2001,11(3): 231-252.

[4] Stylianos K, Kimmo K, Dimitrios K, et al. Harmonization of indoor material emissions labelling systems in the EU (ECA Report No.24) [R]. Italy, 2005.

[5] Mohamed ZM Salem, MartinBöhm, et al. Evaluation of formaldehyde emission from different types of wood-based panels and flooring materials using different standard test methods[J]. Building and Environment, 2012, 49: 86-96.

[6] HJ 168-2010, 环境监测分析方法标准制订技术导则[S].

[7] 郭学桃. 化学检测中检出限的测定与运用[J]. 大众标准化, 2018(5): 42-45.

[8] JJF 1059.1-2012, 测量不确定度评定与表示[S].

[9] JJG 196-2006, 常用玻璃量器[S].

(责任编辑 孟凡丹、向琴)