

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.09.023

基于 FDM 的船舶模型强度实验

夏添¹, 刘可峰¹, 郭乔¹, 姚震球²

(1. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 江苏镇江 212003; 2. 江苏科技大学海洋装备研究院, 江苏镇江 212003)

摘要:按比例缩小制造的船舶模型,是各种船舶性能实验研究的重要手段。运用熔融沉积成型(FDM)技术进行船舶模型制造,具有精度高、周期短、成本低廉等优势。主要材料聚乳酸(PLA)绿色环保、性能稳定,是制造船舶模型的理想材料。但由于目前主流设备的成型尺寸限制,一般需要分段打印进行拼接。选用常见的 2,3,4 mm 厚度,通过拉伸实验测定了典型成型工况下 PLA 材料以及两种拼接补强方案的拉伸强度和拉伸弹性模量,并通过有限元仿真对试样断裂原因进行分析,进一步佐证实验结论,并提出优化意见。通过实际应用,证实了 FDM 技术能够满足船舶模型强度需求,在制造时间和成型精度上相比传统工艺有较大优势。

关键词: 熔融沉积成型; 聚乳酸; 船舶模型; 拉伸强度; 有限元仿真

中图分类号: TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)09-0121-06

Experiment on Strength of Ship Model based on FDM

Xia Tian¹, Liu Kefeng¹, Guo Qiao¹, Yao Zhenqiu²

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. Marine Equipment and Technology Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract : The ship models which manufactured with a reduced scale was an important method of ship performance experimental researches. Using fused deposition molding (FDM) technology to manufacture ship models had the advantages of high precision, short cycle and low cost. Polylactide (PLA) was a mainstream material which was environmental protective and has the stable performance. However, due to the limitation of the molding size of mainstream equipment, segmented printing and then splicing is generally needed. Using samples of common thickness of 2,3,4 mm, which were manufactured in typical molding condition, the tensile strength and tensile modulus of PLA material and two spliced schemes were measured by tensile test. Further, the fracture reason of samples was analyzed by finite element simulation, and the experiment conclusion was confirmed, and the optimization suggestion was put forward. Through the practical application, it is proved that FDM technology can meet the strength requirements of ship model, and has greater advantages in manufacturing time and forming accuracy than traditional technology.

Keywords : fused deposition molding ; polylactide ; ship model ; tensile strength ; finite element simulation

根据船体的型值表和型线图,按一定比例缩小制造的船体模型,是各种船舶性能实验研究的重要手段^[1]。目前主流的船模制造方法有金属蒙皮焊接、木条蒙皮打磨、模具注塑等,但存在着蒙皮精度低、制造周期长,制造费用高昂等弊端,严重影响了船舶性能实验的研究应用。

使用 3D 打印技术制造船舶模型可以很好地解

决这些弊端。在国内,从工业生产到创客设计,熔融沉积成型(FDM)技术已经相当普及,桌面级设备的价格下降到千元级别,其耗材价格也较为便宜。FDM 技术以其较高的性价比,得到了广泛应用。其原理为送料机构将丝状的打印材料送入热熔喷头,丝材在喷嘴内被加热到熔融状态,在数控系统的控制下,喷嘴沿着设定轨迹运动,挤出后丝材冷却凝

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0309700),“大吨位沉船整体打捞总体设计及海上试验”项目(2018YFC0309701)

通讯作者: 刘可峰,讲师,硕士,主要研究方向为船舶与潜器设计、CFD 应用 E-mail: lkfgq@qq.com

收稿日期: 2019-06-11

引用格式: 夏添,刘可峰,郭乔,等. 基于 FDM 的船舶模型强度实验[J]. 工程塑料应用,2019,47(9): 121-126.

Xia Tian, Liu Kefeng, Guo Qiao, et al. Experiment on Strength of Ship Model based on FDM[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9): 121-126.

固,与已成型部分粘合,逐层累加材料,最终形成模型。周倩^[2]对比打印实体平行于分层方向的强度和垂直于分层方向的强度,发现打印方向对拉伸强度影响较大,3D打印的逐层累加制造对材料的力学性能产生了不利影响,层与层之间的结合强度要低于材料内部强度。金泽枫^[3]等分析了打印温度对材料力学性能的影响,当温度较低时,线料的熔体黏度高,熔融状态较差,熔丝之间的熔合强度较低,随着温度的升高,熔丝黏度下降,熔丝之间的熔合强度改善,制品的力学性能提高,但打印温度过高后,线料出现热氧化降解,导致材料性能下降。美国海军水面作战中心一团队也成功利用3D打印技术制作出了一艘尺度大、结构复杂的美国海军医院船(T-AH 20)模型,用于测试船上风力气流的情况以提升直升机作业时的安全性^[4]。然而,目前大多数研究没有对FDM船舶模型应用的材料性能做特定性研究,对于FDM船舶模型的工程应用,其材料及连接强度的研究也具有强烈的必要性。

笔者根据典型成型工况制备了试样,通过拉伸实验测定其拉伸强度和拉伸弹性模量,结合船舶模型的特定应用设计和制作了相应的连接试样,通过拉伸实验对比分析了连接形式对连接强度的影响,并借助有限元仿真分析了试样的断裂原因,提出了优化方案,在实际船舶模型制造中成功应用,为今后的船舶模型快速成型提供了技术支持。

1 实验方法

1.1 原材料

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)和聚乳酸(PLA)是目前最常见的两种FDM打印材料,其性能对比如表1所示^[5-6]。

表1 两种材料性能对比

项目	ABS	PLA
打印温度/℃	230~250	190~220
热床温度	100℃以上	可以不需要加热
打印条件	需要保温,有刺激性气味	可开放式打印
成型效果	收缩严重,哑光	不易收缩,光亮
耐热性能	耐60℃	耐90℃
力学性能	冲击强度高	拉伸强度高
环保性能	不易降解	可生物降解
经济性能	廉价	稍贵

3D打印中,丝状材料经高温喷嘴挤出,在室温中成型固化,由于体积收缩而产生的内应力会引起模型的翘曲变形,严重时引起分层,甚至使成型无法进行^[7]。对于分段打印的船舶模型,连接处的翘曲更严重影响合拢精度和连接强度。PLA可以降解,

成型温度低,能耗少,打印成功率高,符合节能环保、绿色低碳的理念,适合仅做特定实验研究,重复利用率不高的船舶模型。综合考虑,PLA更适合应用于船舶模型快速成型技术。

PLA丝材:标称直径1.75 mm,大连精控多维科技有限公司,其实际直径和密度由实验室测定,熔体流动速率(MFR)由厂家提供,材料性能参数见表2。

表2 打印材料性能参数

材料	实际直径/mm	密度/(g·cm ⁻³)	MFR/[g·(10 min ⁻¹)]
PLA	1.72~1.74	1.24	4~8

胶粘剂(氰基丙烯酸酯速溶胶):Ergo5011型,黏度为0.1 Pa·s,初步固化时间50 s,以钢为基材的拉伸剪切强度20 MPa,实验室测定以PLA为基材的拉伸强度18.68 MPa,瑞士基士林公司。

玻璃纤维布:无碱平纹玻璃纤维方格布,厚度0.2 mm,面密度210 g/m²,昆山绿循电子材料有限公司。

环氧树脂:GCC135型,密度1.13~1.17 g/cm³,黏度为0.7~1.1 Pa·s,昆山绿循电子材料有限公司。

1.2 仪器及设备

3D打印机:Ultimaker2 Extended+型,大连精控多维科技有限公司;

电子万能试验机:CMT5105型,深圳市新三思材料检测有限公司;

引伸计:YYU-10/50型,钢铁研究总院。

1.3 试样制备

对于横截面变化平缓、没有悬空结构的船舶模型,其打印温度对表面质量影响不大,更需要尽可能提高其拉伸强度。结合文献^[2-3,7]综合考虑,选取的主要打印参数为层厚0.2 mm、热床温度55℃、挤出温度215℃、打印速度50 mm/s,直线填充、填充密度100%。

参照GB/T 1040-2006,试样选用哑铃型,标距长度50 mm,拉伸部分宽度10 mm。I型试样为基本试样,以3D打印机Z轴为长度方向一次成型。

由于目前主流的FDM打印机成型尺寸一般不大于400 mm×400 mm×400 mm,经常涉及的船舶模型总长在4 m以内^[8],因此需要分段打印然后拼接。

图1为II型试样搭接形式。根据主流FDM打印机的成型尺寸和精度,设计了如图1a所示的搭接

接头。Ⅱ型试样为基本试样对半成型(其中之一设有搭接接头)后进行冷压粘合,称为搭接试样。粘接面为图1b所示的A面、B面。

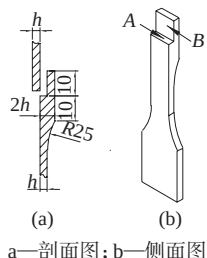


图1 Ⅱ型试样搭接形式

玻璃纤维是一种性能优异的无机非金属材料,其优点是绝缘性好、耐热性强、耐腐蚀性好,力学强度高,但缺点是性脆,耐磨性较差^[9]。玻璃纤维方格布是无捻粗纱平纹织物,其强度主要在织物的经纬方向上。在船舶模型的内表面粘附玻璃纤维布,可以增强模型强度并不影响外表面型线。Ⅲ型试样为基本试样对半成型,对接冷压粘合后,用玻璃纤维布,经线(或纬线)平行于拉伸方向,单面覆于试样,用环氧树脂浸润,固化48 h以上,称为增强试样。

1.4 性能测试与表征

由于FDM技术的工艺特性,其打印生成的实体以及所述的连接补强手段等与材料力学中设置的连续性假设、均匀性假设、各向同性假设都有较大差异^[10]。基于船模制造过程的实际工况,实验选用较常见的2,3,4 mm三个厚度值^[11],参照GB/T 1040-2006,对试样进行垂直于分层方向的拉伸实验,加载速度2 mm/min。其拉伸强度用 σ_M 来进行表征,如公式(1)所示计算:

$$\sigma_M = \frac{F}{b \times h} \quad (1)$$

式中: σ_M ——拉伸强度,即试验过程中试样承受的最大拉伸应力,MPa;

F ——所测的对应载荷,N;

b ——基材中部距离标距每端5 mm以内测量的宽度,mm;

h ——基材中部距离标距每端5 mm以内测量的厚度,mm。

其拉伸弹性模量由计算机对应力-应变曲线作线性拟合后取斜率得到^[12]。

2 结果与讨论

由于在拉伸过程中,Ⅱ型试样实际受力为图1b中A面的法向拉力和B面的剪切力,Ⅲ型试样的实

际厚度为试样和由环氧树脂固化的玻璃纤维层之和,但为方便对比,仍使用公式(1)进行计算。实验数据如图2和图3所示。

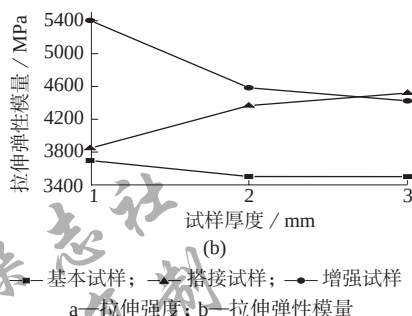
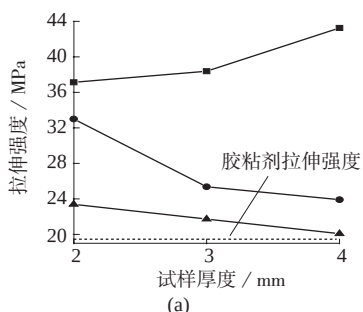


图2 不同厚度和形式的试样的力学性能

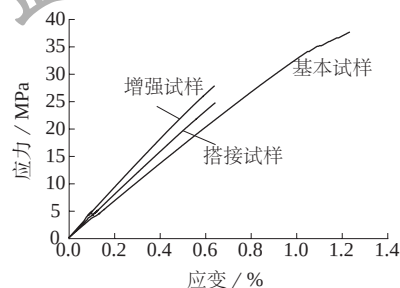


图3 试样的典型应力-应变曲线

基本试样的拉伸强度随着试样厚度的增加而增加。因为当厚度较小时,材料截面仅有2圈轮廓组成如图4所示。随着厚度增加,轮廓占比减小,材料分布更加均匀,拉伸强度也将趋于一致。同理,拉伸弹性模量也随着试样厚度增加而趋于一致。



图4 不同厚度试样的截面填充样式

搭接试样的拉伸强度明显低于基本试样,仅略高于对接试样,其断裂位置与A面同层。其拉伸弹性模量高于基本试样,主要因为搭接接头处横截面积变大,而计算面积不变,即小于实际面积,导致拉伸弹性模量增大。

增强试样的拉伸强度较对接试样提升较多,说

明玻璃纤维对试样力学性能的提高是有效的。但随着试样厚度的增加,增强效果下降,且断裂形式大多为对接接头处断裂而玻璃纤维不断。增强试样的拉伸弹性模量也由于玻璃纤维的粘附而显著增加。

3 仿真分析

为了进一步分析和证实搭接试样和增强试样的断裂原因,笔者借助 Solid Works 软件的 Simulation 功能进行有限元仿真分析^[13]。实验中试样断裂几乎在一瞬间发生,亦表现出明显的脆性,故采用第一强度理论进行分析。

由于成型工艺的关系,各型试样的力学性质较为复杂。但鉴于笔者仅为简要分析试样的断裂原因,且外部载荷仅在一个方向,该方向上的拉伸强度最低,但与其它方向差别不大^[14]。因此为简化仿真过程,将有限元模型类型设置为线性弹性各向同性。

3.1 搭接试样

采用上文曲线所展示的 3 mm 试样的典型实验数据,即 PLA 拉伸强度 38.38 MPa,拉伸弹性模量 3501.73 MPa,取聚合物一般泊松比 0.4,试样下部用夹具固定,上部通过夹具施加载荷 813 N (即实验中的最大载荷)。为避免应力奇异现象,结合实际成型效果考虑,对试样平行于分层平面的边线设置半径 0.2 mm 的圆角。由于胶接层厚度很小,其受力产生的变形也可忽略不计,故在误差允许的范围内,胶接面采用接合连结方式,即重合面之间没有相对位移。仿真分为以下两个阶段:(1) A 面未开裂前,假设搭接试样为整体,寻找危险截面,验证开裂最先由 A 面的胶接层开始;(2) A 面完全开裂后,验证在 A 面完全开裂后 B 面仍然不会开裂,而在 A、B 面交界处产生的应力集中足以使搭接接头部分继续开裂,即试样完全破坏。

图 5 为 II 型试样正应力仿真结果。第一阶段的仿真结果如图 5a 所示。接头处正应力在横截面上基本呈线性分布,在外边缘处最大,为 33 MPa,超过胶粘剂的拉伸强度 18.68 MPa,但小于 PLA 的拉伸强度 38.38 MPa。根据切应力仿真结果, B 面的切应力最大为 12 MPa,小于胶粘剂的拉伸剪切强度 20 MPa。在基材与搭接接头末端的交界处,由于未设置过渡,导致应力集中,最大正应力高达 41 MPa,略超 PLA 的拉伸强度,但由于胶粘剂溢出等原因缓和了应力集中,此处的实际正应力仍小于 PLA 的拉伸强度。而在 A 面,最大正应力为胶粘剂拉伸强度的 1.8 倍,因此可以得出,断裂由 A 面的胶

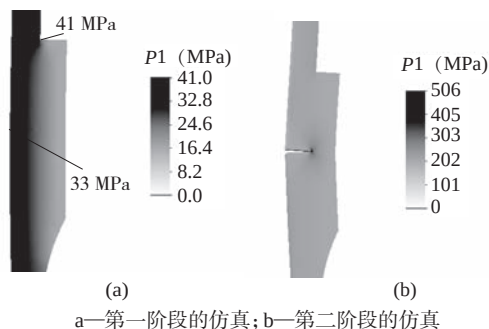


图 5 II 型试样仿真结果 (正应力云图)

接层开始。

第二阶段的仿真结果如图 5b 所示。A、B 面交界处的最大正应力高达 506 MPa,远大于 PLA 和胶粘剂的拉伸强度。根据切应力仿真结果, B 面的切应力在 A、B 面交界处有部分集中,但绝大多数位置均小于 20 MPa,无法形成有效滑移。因此,在 A 面完全开裂后,裂纹的扩展在 A 面的延伸方向进行,而 B 面仍然保持粘接状态。

起初在设计搭接接头时,考虑到接头末端设置过渡在成型效果上不是很理想,因此只在接头一端设置了过渡。仿真结果表明,未过渡所导致的应力集中非常危险,因此在成型条件允许的情况下,搭接接头的两端均应设置过渡段。

3.2 增强试样

采用玻璃纤维一般力学性能数据:拉伸强度 200 MPa,拉伸弹性模量 10 GPa,泊松比 0.22,环氧树脂固化效果简化为接合连结方式,其它设置与上文相同,施加载荷 925 N。仿真分为以下两个阶段:(1) A 面未开裂前,假设搭接试样为整体,寻找危险截面,验证开裂最先由 A 面的胶接层开始;(2) A 面完全开裂后,验证在 A 面完全开裂后,产生的应力集中可能仍然不足以使玻璃纤维断裂,即试样未完全破坏。

图 6 为 III 型试样正应力仿真结果。第一阶段的仿真结果如图 6a 所示。基材上的正应力分布较为均匀,平均为 26 MPa,大于胶粘剂的拉伸强度而小于 PLA 的拉伸强度。排除夹持部位的应力集中,玻璃纤维上的正应力也均匀分布,平均为 76 MPa,在靠近对接处略有集中,最大为 84 MPa,小于玻璃纤维的拉伸强度 200 MPa。根据切应力仿真结果,其切应力均处于较低水平。因此,断裂在对接处的胶接层开始。

第二阶段的仿真结果如图 6b 所示。胶接层完全破坏后,载荷全部转为玻璃纤维承担,其正应力

明显增大,大部分均大于玻璃纤维的拉伸强度,最大正应力集中在对接处附近,高达 537 MPa。而实验中大多数情况却能保持不断裂,原因在于有限元模型将玻璃纤维与环氧树脂层简化成一个厚度为 0.2 mm 的均质实体,而不是经纬分布的纤维,使得其弯曲刚度远远超出实际,所以仿真结果失真。玻璃纤维经环氧树脂固化后,复合层厚度约为 0.5 mm,根据理论计算,在 925 N 载荷的理想情况下,当胶接处完全裂开后,玻璃纤维受到的正应力为 185 MPa,尚未达到玻璃纤维的拉伸强度,所以仍不会断裂。因此实际应用中,即便对接处断裂,整个结构的载荷转由玻璃纤维承担后仍有一定的可能不发生断裂。

进一步仿真结果表明,在基材厚度相同时,增加玻璃纤维层的厚度可以使胶接层正应力减小,即载荷主要由玻璃纤维承担,PLA 主要起控制成型的作用。另外,在条件允许且强度需要的情况下,双面粘附玻璃纤维能进一步提高其拉伸强度。

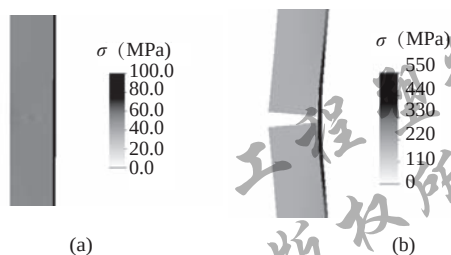


图 6 III 型试样仿真结果(正应力云图)

图 7 为 III 型试样在第二阶段的切应力仿真结果。基材上的切应力为 0,对于玻璃纤维,在对接面切应力为 0,向两端对称递增,最大切应力为 38 MPa,大于胶粘剂的拉伸剪切强度 20 MPa。随后继续缓慢向两端递减至 0。且正应力仿真结果显示,层间正应力十分微小。因此在对接处,由于切应力,玻璃纤维与基材发生了部分剥离,实验结果也与此一致。剥离会改变船体表面形状,也影响水密性能。

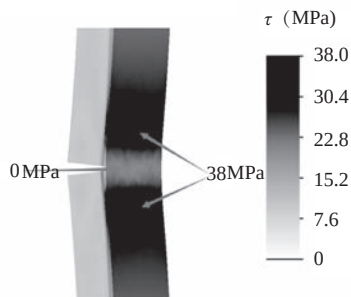


图 7 III 型试样仿真结果(切应力云图,第二阶段)

4 实际应用

以上研究表明,基于 FDM 技术打印 PLA 材质的船舶模型分段,对接粘合后粘附玻璃纤维加以增强,是船舶模型快速成型的有效工艺。进一步地,可以根据船舶总体和局部强度特征,使用其它材料如碳纤维、铝合金等,对模型做进一步加强。

根据某实际船舶的静水载荷曲线^[15]如图 8 所示,依照比例和相似准则数计算船模所受载荷,其最大正应力 7.98 MPa,最大切应力 0.03 MPa。由此设计了一条总长 1.38 m,型宽 0.2 m,型深 0.2 m,标准排水量 15 kg 的双体船片体模型如图 8 所示。该模型划分为五个分段进行 3D 打印,设置相应孔位,以碳纤维管作为中内龙骨和舷侧纵桁,以 PLA 打印件作为肋骨,并在表面粘附玻璃纤维,构建起了完整的船舶结构体系。整体建造周期约为 100 h 3D 打印另加 5 h 人工拼装,成本仅千余元,实现了船舶模型的快速成型。

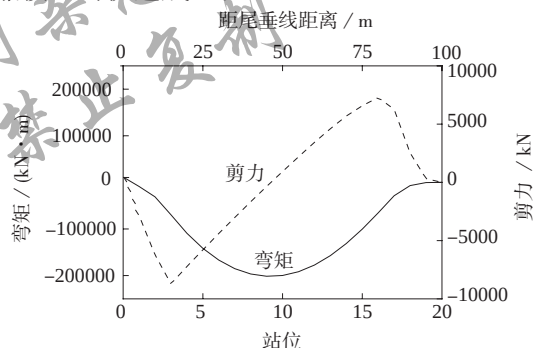


图 8 某实际船舶的静水载荷曲线

图 9 为基于所述工艺的双体船模型。经过拖曳水池实验见图 9b,该船舶模型的强度和精度均符合预期,证实了该工艺的可行性和优势。使用传统的木条蒙皮工艺建造相同尺度的船舶模型,大约需要十几天时间,且精度较难控制^[8]。

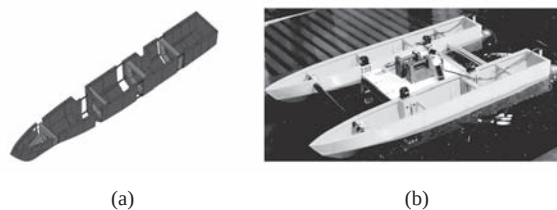


图 9 基于所述工艺的双体船模型

5 结论

通过实验测定了 2,3,4 mm 三个厚度值的 PLA 基本试样、搭接试样和增强试样的拉伸强度和拉伸弹性模量,并进行了有限元仿真,分析了断裂原因。结果表明,用玻璃纤维增强以提高试样的连接

强度是较为有效的,其拉伸弹性模量也能得到相应提高。随着基材厚度的增大,需要增加玻璃纤维的厚度来提高增强效果。而通过设置搭接接头进行连接,其工艺简单,但效果仅能比直接对接略好,且需要在接头两端尽量设置过渡段。

在实际船舶模型应用中,通过附加一些其它结构物,能够更好地完善船舶结构体系,满足了强度、精度需求,验证了FDM技术制造船舶模型的可行性。与传统工艺相比,其在制造周期、成型精度、成本控制等方面显示出较大优势。

参考文献

- [1] 李应波. 圆舢艇球艏快速性能设计研究[J]. 中国造船, 2016, 57(2):137-148.
Li Yingbo. Design research on rapidity performance of U-boat with bulbous bow[J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(2):137-148.
- [2] 周倩. FDM快速成型表面质量及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2017:31-34.
Zhou Qian. Research on surface quality and mechanical properties of fused deposition modeling[D]. Jinan: Shandong University, 2017:31-34.
- [3] 金泽枫, 金杨福, 周密, 等. 基于FDM聚乳酸3D打印材料的工艺性能研究[J]. 塑料工业, 2016, 44(2):67-70.
Jin Zefeng, Jin Yangfu, Zhou Mi, et al. Research of processing property of PLA materials for 3D printing based on FDM[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(2):67-70.
- [4] 祁斌. 3D打印技术在船舶领域的应用[J]. 中国船检, 2016(6):94-100.
Qi Bin. Application of 3D printing technology in ship field[J]. China Ship Survey, 2016(6):94-100.
- [5] 杨锦, 贾仕奎, 郭香, 等. 3D打印聚乳酸材料加工技术与应用进展[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(2):132-136.
Yang Jin, Jia Shikui, Guo Xiang, et al. Progress on process technology and application of 3D printing poly(lactic acid) materials[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2):132-136.
- [6] 乔雯钰, 徐欢, 马超, 等. 3D打印用ABS线材性能研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(3):18-23.
Qiao Wenyu, Xu Huan, Ma Chao, et al. Research on properties of ABS filament used in 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(3):18-23.
- [7] 杜林芳. FDM 3D打印塑件翘曲变形影响因素的研究[J]. 中国塑料, 2018, 32(9):108-112.
- [8] 唐勇, 茅宝章, 居惠红. 现代化船模制作车间工艺设计[J]. 造船技术, 2016, 334(6):1-7.
Tang Yong, Mao Baozhang, Ju Huihong. Process design of modern ship model workshop[J]. Marine Technology, 2016, 334(6):1-7.
- [9] 杨敏. 船舶制造基础[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2012:31-32.
Yang Min. Shipbuilding foundation[M]. 2d edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2012:31-32.
- [10] 张黎, 王新宇, 李征, 等. 熔融沉积3D打印材料粘接强度及模量预测研究[J]. 化工学报, 2019, 70(7):2727-2736.
Zhang Li, Wang Xinyu, Li Zheng, et al. Prediction study on bond strength and modulus of fused deposition modeling product[J]. CIESC Journal, 2019, 70(7):2727-2736.
- [11] 张勇, 张洪毅, 王晓曼, 等. 试样厚度对手糊玻璃钢力学性能的影响[J]. 建材发展导向(下), 2017, 15(5):19-20.
Zhang Yong, Zhang Hongyi, Wang Xiaoman, et al. Effect of sample thickness on mechanical properties of manual glass fiber reinforced plastics[J]. Development Guide to Building Materials (ii), 2017, 15(5):19-20.
- [12] 邓小青, 沈超明. 实验力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013:23-26.
Deng Xiaoqing, Shen Chaoming. Experimental mechanics foundation[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013:23-26.
- [13] Daniel F, Chris M. Materials testing of 3D printed ABS and PLA samples to guide mechanical design[C] // Proceedings of the ASME 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference. Virginia: American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [14] 迟百宏, 解利杨, 高晓东, 等. FDM工艺中构建取向对塑料制品力学性能的影响[J]. 塑料, 2015, 44(4):40-42.
Chi Baihong, Xie Liyang, Gao Xiadong, et al. Effects of build orientation in FDM technology on mechanical properties of plastic products[J]. Plastics, 2015, 44(4):40-42.
- [15] 陈钰, 邓乐, 唐文勇. 内河船舶可靠性分析中的波浪弯矩统计与极值分布[J]. 船舶工程, 2016, 38(6):6-9.
Chen Yu, Deng Le, Tang Wenyong. Statistics and extreme value distribution of wave-induced bending moment for reliability analysis of inland waterway ships[J]. Ship Engineering, 2016, 38(6):6-9.

茂名石化成功试产高融高透丙丁聚丙烯新产品

8月19日, 茂名石化化工分部在2[#]聚丙烯装置成功试产出高融高透丙丁聚丙烯新产品PPD-MT60约550 t。该材料具有流动性好、透明度高、析出少、刚韧平衡性好、注塑周期短、成型快、低翘曲率等优点, 特别在高剪切速率下具有低

黏度的特性, 有助于加工厂商降低加工温度和缩短成型时间, 从而能节约成本和能耗。该新产品还突破了传统的透明塑料成本高、加工难度大、市场受限等因素, 适合于快速成型薄壁透明食品容器、整理箱等制品, 尤其适合应用于奶茶杯的生产。
(中国石化新闻网)