

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.09.013

连续玻璃纤维增强 PP 复合材料工字梁拉挤成型及补强

王子健, 周晓东

(华东理工大学, 上海市多相结构材料化学工程重点实验室, 上海 200237)

摘要: 现有的工字梁主要材料为金属或木材, 容易受到使用环境的限制。为此研究了不同拉挤成型工艺条件对连续玻璃纤维 (GF) 增强聚丙烯 (PP) 工字梁力学性能的影响, 以及 GF 网格布补强对工字梁破坏形式与性能的影响。研究表明, 在拉挤成型模具温度 235℃, 冷却定型模具温度梯度 65℃ / 85℃ / 105℃, 拉挤速度 80 mm/min 时得到的复合材料工字梁力学性能最优, 弯曲破坏载荷达 4842 N。GF 网格布的加入有效的改善了工字梁的破坏形式, 使工字梁弯曲破坏载荷提高了 6.0%。

关键词: 工字梁; 连续玻璃纤维; 聚丙烯; 拉挤成型

中图分类号: TQ325.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)09-0068-05

Pultrusion and Reinforcement of Continuous Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composite I-beam

Wang Zijian, Zhou Xiaodong

(Shanghai Key Laboratory of Chemical Engineering for Multiphase Structural Materials, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract : Main material of I-beam is metal or wood, these materials are easily limited by the use environment. The influence of different pultrusion process conditions on the mechanical properties of continuous glass fiber (GF) reinforced polypropylene (PP) I-beam and the influence of glass fiber mesh reinforcement on the failure mode and properties of I-beam were studied. The results show that the mechanical properties of I-beam are the best when the temperature of pultrusion die is 235℃, the temperature gradient of cooling die is 65℃ / 85℃ / 105℃ and the pultrusion speed is 80 mm/min. The research show that the addition of glass fiber mesh can effectively improve the failure mode of I-beam, improve the mechanical properties of I-beam, and the bending failure load reaches 4842 N. The addition of GF mesh cloth effectively improves the failure form of the I-beam and increases the bending failure load of the I-beam by 6.0%.

Keywords : I-beam ; continuous glass fiber ; polypropylene ; pultrusion process

工字梁被广泛应用于各种承重领域, 尤其在在我国发展建设的关键时期, 工字梁制品有着非常大的应用市场, 而市面上常见的工字梁通常为木质工字梁或工字钢, 其存在着耐腐蚀性较差, 单位质量较大等缺点, 在应用时容易受到环境以及使用条件的限制。所以对工字梁材质的研究已成为我国研究热点之一。

复合材料由于其质轻、力学性能优越、耐腐蚀能力强等优点, 被广泛应用于建筑、制造、航天、汽车、船舶等领域^[1-2]。随着我国经济与社会的飞速发

展, 在对环境友好的前提下发展科技已成为我国重要的政策之一。热塑性复合材料具有热固性复合材料所不具备的再塑性和可回收利用的优势, 已经成为了我国重点发展及使用的对象之一。将热塑性复合材料作为工字梁的原材料是一种减少工字梁发展制约的行之有效的方法。复合材料预浸带是一种将连续纤维和热塑性树脂基体通过熔融浸渍、粉末浸渍或混纺纤等工艺方法结合到一起后的产品^[3-6], 常用于热塑性复合材料的模压^[7]、铺放^[8-9]、缠绕^[10]、拉挤^[11-13]等工艺当中。在成型过程中预浸带中的

通信作者: 周晓东, 博士生导师, 教授, 主要从事热塑性聚合物复合材料的制备与成型技术、多相多组分聚合物材料界面设计与控制、生物资源高分子材料高性能化和实用化技术等方面的研究

收稿日期: 2021-07-04

引用格式: 王子健, 周晓东. 连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料工字梁拉挤成型及补强 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9):68-72.

Wang Zijian, Zhou Xiaodong. Pultrusion and reinforcement of continuous glass fiber reinforced polypropylene composite I-beam[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):68-72.

树脂在高温下熔融,并在压力的作用下发生二次浸渍,使树脂更好地浸入纤维束中,起到增强性能的作用^[14-15],并通过冷却成型过程得到所需的制品^[16]。

笔者以连续玻璃纤维 (GF) 增强聚丙烯 (PP) 预浸带为原材料,通过拉挤成型的方法制备了 PP 复合材料工字梁,研究了预浸带进料量、成型工艺对复合材料工字梁力学性能的影响。同时,对其成型及使用中所产生的问题进行了研究,针对其在测试时的破坏模式提出了改进方案,改善了其破坏形式,减少了其在受力时发生翼缘破坏和翼缘与腹板连接处破坏的几率。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP/GF(37% GF) 预浸带: 自制;

GF 网格布: 13 目、10 目、8 目,南通金鹏玻纤制品有限公司。

1.2 主要设备及仪器

履带式牵引机: 张家港格瑞科技发展有限公司;

拉挤加工生产线: 自制;

电子万能材料试验机: CMT4204 型,深圳市新三思材料检测有限公司;

电子天平: SF-400A 型,东莞市南城长协电子制品厂;

切割机: 002 型,上海市斯海森工贸有限公司。

1.3 样品制备

将长度为 200 mm 的拉挤成型模具固定在拉挤架上,将准备好的连续 GF 增强 PP 预浸带束依次通过烘道、拉挤成型模具、冷却成型模具、牵引机。待拉挤成型模温度和冷却成型模具温度梯度都达到设定温度并保持稳定后,使用牵引机按设定牵引速度进行拉挤实验,得到热塑性复合材料工字梁。整个工字梁拉挤成型工艺如图 1 所示。

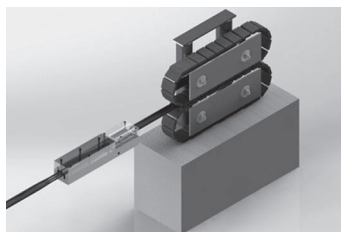


图 1 连续 GF 增强 PP 拉挤流程示意图

1.4 性能测试

对拉挤制得的复合材料工字梁的弯曲性能进行测试,参考标准为 GB/T 1449-2005。

使用电子天平称量得到待测试样的质量 m_1 ,再将此物体放入装有去离子水的量筒中,读数得到待测试样的体积 v ,再通过下式计算可得所需密度。

$$\rho = \frac{m_1}{v} \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 进料量对工字梁的影响

图 2 为不同预浸带进料根数下工字梁的密度。

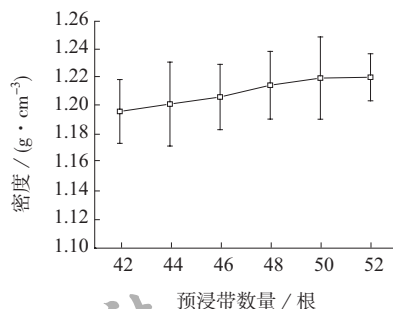


图 2 不同预浸带数量下工字梁的密度

从图 2 可以看出,在理论预浸带进料根数 (42 根) 下制备的工字梁密度略小于预浸带密度 (预浸带密度为 1.2112 g/cm^3),这说明在实际拉挤过程中所需的预浸带进料量要高于理论计算值。同时可以看出工字梁密度随预浸带进料量的增多而升高。这说明随着预浸带进料量的增加,树脂在模具中受到的压力不断增大,进料中携带的空气被挤压出去,树脂被挤进纤维束的内部,二次浸渍效果有所提升。同时,树脂在模具压力的作用下会发生回流。而回流的树脂又会被新的进料牵扯着向前移动,与树脂回流相互阻碍,互相抵消,达到动态的平衡,使树脂含量维持稳定。

当进料量不断增大,预浸带在模具受到的压力增加,造成了纤维的断裂以及树脂回流的加剧,树脂和纤维被留在模具中未参与后续的拉挤过程,使得工字梁制品密度随进料根数的变化不再显著。

图 3 为预浸带进料量对工字梁弯曲性能影响。从图 3 可以看出,在进料量为 50 根之前弯曲性能随

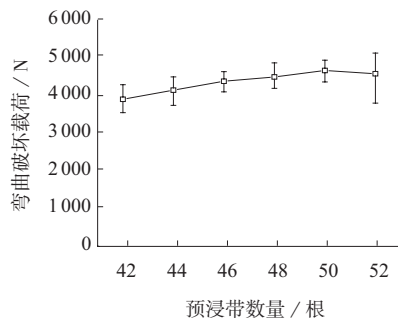


图 3 不同预浸带数量时工字梁弯曲破坏载荷

预浸带进料量的增多呈现上升趋势,这与工字梁的密度变化趋势是相同的。这说明随着进料量的增多,压力增大,预浸带二次浸渍不断加强,树脂与纤维结合的更加紧密,减少了工字梁的内部缺陷。但当进料量增加到 50 根之后,进料量过多会发生纤维的断裂以及树脂回流的加剧,造成其内部缺陷的增多,使其弯曲性能有所减少。进料量为 52 根时的弯曲破坏载荷最高能达到 5 129.80 N,但最低值为 3 801.02 N,极差是其余进料量时的 2 倍左右,达到了 1 329 N,工字梁的平均弯曲性能也有所降低,其稳定性也存在着巨大的缺陷,在实际使用中存在着重大的隐患。所以进料量为 50 根(即为理论进料量的 1.2 倍)时是其最优进料量。

2.2 工艺条件对工字梁的影响

拉挤成型模具温度对工字梁弯曲性能的影响如图 4 所示。由图 4 可知,弯曲破坏载荷随着拉挤成型模具温度的升高先上升后下降。这说明随着拉挤成型模具温度的升高,熔融更加完全,二次浸渍的效果显著上升,弯曲性能随之提高。但当温度过高时,一部分 PP 会发生氧化及降解,使得工字梁性能下降。同时,由图可知在 200~235℃这一温度区间弯曲性能有明显提高,这是因为在温度达到 200℃后 PP 树脂链段活动能力增强,分子间作用力减弱,粘度下降,流动性有了显著的提高,有利于二次浸渍的发生,工字梁弯曲性能显著提高。但当温度达到 235℃后,温度的升高对分子间作用力以及链段的缠结影响不再明显,工字梁性能不再有显著变化。

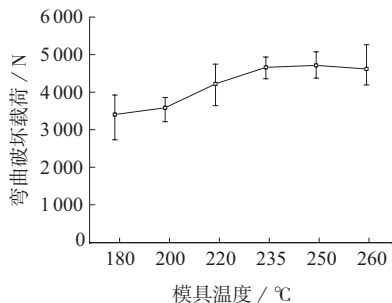


图4 不同拉挤成型模具温度时工字梁弯曲破坏载荷

图 5 为冷却成型模具温度梯度对弯曲破坏载荷的影响。由图 5 可知,工字梁弯曲性能随着冷却成型模具温度梯度的上升而下降,在 65℃/85℃/125℃时性能最优,达到 4 842 N。这是由于在冷却成型模具中,温度过高,会发生冷却结晶不完善情况,这使得工字梁制品表面已经结晶成型但内部还未完全冷凝,产生热膨胀现象,导致工字梁制品内部出现缺陷,造成弯曲性能下降。同时,在模具内通道

摩擦力作用下工字梁外表面会发生脱落,使得纤维暴露在外,影响工字梁外观并造成性能下降。未完全冷却工字梁在离开冷却成型模具后还会由于失去约束而发生两侧翼缘收缩,使制品形貌不符合标准。

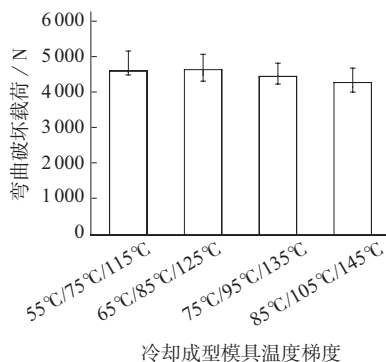


图5 不同冷却成型模具温度梯度时工字梁弯曲破坏载荷

图 6 为拉挤速度对工字梁弯曲破坏载荷的影响。从图 6 可以看出,工字梁弯曲性能随着拉挤速度的提升先上升后降低,这是由于预浸带在成型模具中发生二次浸渍是树脂熔融和模具给予压力共同作用的结果,在拉挤速度在 80 mm/min 以下时,树脂熔融完全,模具给予压力成为二次浸渍的控制因素,这时工字梁性能会随着拉挤速度的提升而增加。随着拉挤速度的提升,模具给予的压力不断提高,树脂熔融程度成为二次浸渍的控制因素,拉挤速度过快会导致预浸带在拉挤成型模具中停留时间较短,树脂熔融较差,二次浸渍不充分,使得工字梁性能降低。同时,当拉挤速度过慢时,拉挤材料在经过冷却成型模具时会发生在未通过模具入口区域时就已经降温结晶,使模具入口堵塞,实验无法再继续进行,在实验中应尽量避免这一问题。

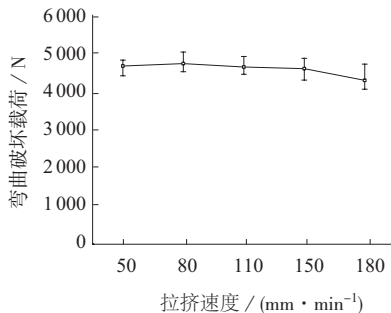


图6 不同拉挤速度时工字梁弯曲破坏载荷

2.3 GF 网格布补强后工字梁性能

图 7 为工字梁局部载荷下破坏形式。在测试工字梁性能时发现,工字梁在受到局部载荷时的破坏形式主要有腹板屈服(图 7a)和翼缘的破坏(图 7b)。其中翼缘破坏会使工字梁在使用中失稳,使得翼缘破坏时弯曲性能低于腹板屈服下的性能。为减

少翼缘破坏的发生,本实验在原有预浸带的基础上加入了 GF 网格布,为其提供了横向纤维分布,以增加其稳定性,减少翼缘破坏。



(a) a—腹板屈服; b—翼缘屈服
图 7 工字梁局部载荷下破坏形式

补强后的工字梁性能如图 8 所示,以 1+3+1(即两侧翼缘处分别添加 1 根 3 cm 宽的玻纤网格布,在腹板处添加 3 根 2 cm 宽的玻纤网格布)的方式加入 8 目的网格布后,工字梁弯曲破坏载荷提升了 6.0%,达到了 5 132 N。这说明 GF 网格布能为工字梁提供横向纤维约束,为翼缘提供了一定的支撑。并且网格布能够削弱裂纹造成的应力集中,减缓了裂纹的产生和扩展,使得工字梁力学性能有显著提升。但随着网格布用量的增多,工字梁力学性能显著下降。这是因为网格布的加入会使得工字梁原本的纤维分布有序性下降,随着网格布用量的增加弯曲性能有所下降。同时,如图 9 所示,网格布加入使得工字梁的收缩率也有所改善,45°斜纹网格布对工字梁收缩率改善最为明显,竖向下降幅度达到了 28.26%,横向收缩率下降了 34.43%,但会对其力学性能造成不良的影响。综合考虑 8 目网格布是其最优选择,使得工字梁竖向收缩率下降了 15.49%,横向收缩率下降了 33.33%。

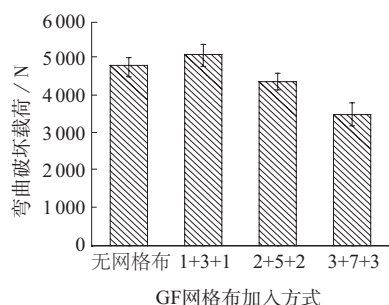


图 8 不同 GF 网格布加入方式时工字梁弯曲破坏载荷

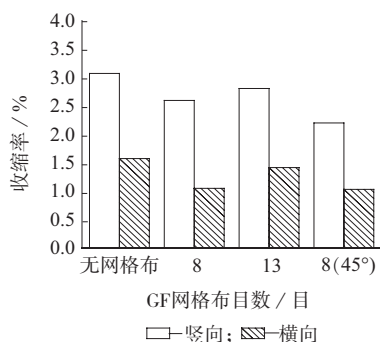


图 9 不同网格布目数时工字梁收缩率

3 结论

(1) 以 GF 质量含量为 37% 的预浸带为原料,实际进料为理论进料的 1.2 倍时,PP/GF 工字梁力学性能最优。

(2) 在拉挤成型模具温度为 235℃,冷却成型模具温度梯度为 65℃/85℃/125℃,拉挤速度为 80 mm/min 工艺条件下的 PP/GF 工字梁弯曲性能最佳,弯曲破坏载荷可以达到 4 842 N。

(3) 在工字梁拉挤过程中加入 8 目 GF 网格布,有效减少了工字梁的翼缘破坏,提升了工字梁的力学性能,弯曲破坏载荷提高了 6.0%,达到了 5 132 N。同时对工字梁收缩也起到了改善作用,竖向收缩率下降了 15.49%,横向收缩率下降了 33.33%。

参考文献

- [1] Kirill M, Alexander V, Alexander S, et al. Thermoplastic pultrusion: A review[J]. Polymers, 2021.doi:10.3390/POLYM13020180.
- [2] 吴磊. 热塑性树脂基复合材料在航空领域的研究进展[J]. 价值工程, 2020, 39(9):210-211.
- [3] 李华宙. 连续碳纤维热塑性预浸带的制备机理及实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [4] Li Huazhou. Manufacturing mechanism and experimental study on continuous carbon fiber reinforced thermoplastic towpreg tape[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [5] Steggall-Murphy C, Simacek P, Advani S G, et al. A model for thermoplastic melt impregnation of fiber bundles during consolidation of powder-impregnated continuous fiber composites[J]. Composites Part A: applied science and manufacturing, 2010, 41(1):93-100.
- [6] Ren Feng, Zhang Cong, Yu Yang, et al. A modeling approach to fiber fracture in melt impregnation[J]. Applied Composite Materials, 2017, 24(1):193-207.
- [7] Wiegand N, Mäder E. Commingled yarn spinning for thermoplastic / glass fiber composites[J]. Fibers, 2017.doi:10.3390/fib5030026.
- [8] Tanaka K, Hirata A, Katayama T. Continuous fiber reinforced thermoplastics molding by melted thermoplastic-resin transfer molding process[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 2019, 68(8):628-635.
- [9] 宋清华, 刘卫平, 肖军, 等. 热塑性复合材料自动铺放工艺参数分析与优化[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5):1 149-1 157.
- [10] Song Qinghua, Liu Weiping, Xiao Jun, et al. Analysis and optimization of automatic placement process parameters of

- thermoplastic composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(5):1 149–1 157.
- [9] Aghababaei T O, Van Hoa S, Shadmehri F, et al. Determination of convective heat transfer coefficient for automated fiber placement (AFP) for thermoplastic composites using hot gas torch[J]. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2020, 6(2):86–100.
- [10] 单毫, 陈宇, 李俊杰, 等. 红外加热缠绕成型工艺参数对 CF / PEEK 复合材料层间剪切性能的影响 [J]. *复合材料科学与工程*, 2020(1):39–46.
- Shan Hao, Chen Yu, Li Junjie, et al. Effect of infrared heating winding forming process parameters on interlaminar shear properties of CF / PEEK composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(1):39–46.
- [11] Khandan R, Noroozi S, Sewell P, et al. The development of laminated composite plate theories: a review[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(16):5 901–5 910.
- [12] Yassin K H M. Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2018, 31(12):1 676–1 725.
- [13] 黄生江. 连续玻璃纤维增强聚丙烯的两步法拉挤成型工艺研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- Huang Shengjiang. Study continuous glass fiber reinforced polypropylene by two-step pultrusion[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.
- [14] 陈同海, 贾明印, 杨彦峰, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料制备与熔融浸渍机理研究 [J]. *工程塑料应用*, 2013, 41(7):52–56.
- Chen Tonghai, Jia Mingyin, Yang Yanfeng, et al. Study on preparation of continuous fiber Reinforced thermoplastic composites and melt impregnation mechanism[J]. *Engineering Plastics Application*, 2013, 41(7):52–56.
- [15] 方立. 连续纤维增强热塑性复合材料制备及其性能的研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- Fang li. Study on preparation and characters of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.
- [16] Alsinani N, Ghaedsharaf M, Lebel L L. Effect of cooling temperature on deconsolidation and pulling forces in a thermoplastic pultrusion process[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021. doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2021.108889.
-
- (上接第 59 页)
- nano-SiO₂ on properties of rigid polyurethane foam with blowing agent of HFC-365 mfs[J]. *China Plastics*, 2014, 28(9):30–35.
- [13] 夏敏, 李萍, 刘俊聪, 等. 纤维增强改性聚氨酯泡沫研究进展 [J]. *工程塑料应用*, 2015, 43(6):137–139.
- Xia Min, Li Ping, Liu Juncong, et al. Research progress of fiber reinforced polyurethane foam[J]. *Engineering Plastics Application*, 2015, 43(6):137–139.
- [14] 魏建国, 马端人, 柳佳, 等. 玻纤增强聚氨酯泡沫的研制 [J]. *聚氨酯工业*, 2020(1):33–35.
- Wei Jianguo, Ma Duanren, Liu Jia, et al. Development of glass fiber reinforced polyurethane foam[J]. *Polyurethane Industry*, 2020(1):33–35.
- [15] Jihwan Park, Insang Jung, Kibae Lee, et al. Case study in Korea of manufacturing SRF for polyurethanes recycling in e-wastes[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20(4):1 950–1 960.
- [16] 梁术, 顾晓华, 张晓华, 等. 废旧聚氨酯的回收与高端发泡胶的研究 [J]. *齐齐哈尔大学学报: 自然科学版*, 2020, 36(1):75–77, 94.
- Liang Shu, Gu Xiaohua, Zhang Xiaohua, et al. Study on recovery of waste polyurethane and high-end foam[J]. *Journal of Qiqihar University: Natural Science*, 2020, 36(1):75–77, 94.
- [17] Aleksandra Kemona, Malgorzata Piotrowska. Polyurethane recycling and disposal: methods and prospects[J]. *Polymers*, 2020. doi: 10.3390/polym12081752.
- [18] 佚名. 新的回收方法可使聚氨酯材料具有可持续性 [J]. *橡塑技术与装备*, 2021, 47(12):59–62.
- None. The new recycling method can make the polyurethane material sustainable[J]. *China Rubber / Plastics Technology and Equipment*, 2021, 47(12):59–62.
- [19] Aleksandra Kemona, Malgorzata Piotrowska. Polyurethane recycling and disposal: methods and prospects[J]. *Polymers*, 2020, 12(8):245–252.
- [20] 赵激景, 顾晓华, 杜星, 等. 聚氨酯废旧材料的降解回收再利用的研究 [J]. *齐齐哈尔大学学报: 自然科学版*, 2017, 33(2):39–42.
- Zhao Lianjing, Gu Xiaohua, Du Xing, et al. Study on degradation and recycling of polyurethane waste material[J]. *Journal of Qiqihar University: Natural Science*, 2017, 33(2):39–42.
- [21] Diego Simón, Ana Maria Borreguero, Antonio Lucas. Novel polyol initiator from polyurethane recycling residue[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2014, 16(3):525–532.