

# 纤维增强复合材料拉挤成型工艺研究进展

赵 烁<sup>1</sup> 居浙海<sup>2</sup> 姜亚明<sup>1</sup>

1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387;
2. 浙江原田碳纤维有限公司, 浙江 海宁 314400

**摘要:**拉挤成型工艺可生产任意长度、多种等截面的线性或呈一定弯曲形态的复合材料,具有生产效率和原料利用率高的特点。所得复合材料轴向力学性能优异,已在汽车、航空航天、建筑等领域广泛使用。从热固性树脂和热塑性树脂2个角度对纤维增强复合材料拉挤成型工艺进行综述,详细介绍各自工艺的流程和特点。探讨温度和拉挤速度对拉挤成型复合材料性能的影响。总结展望拉挤成型工艺的未来发展方向,包括开发复杂结构拉挤成型工艺、开发天然材料拉挤成型工艺、集成先进控制系统和自动化生产线,以及构建拉挤成型工艺数学模型等,以降低成本和提高生产效率,提升拉挤成型复合材料的竞争力。

**关键词:**拉挤成型工艺;热固性树脂;热塑性树脂;纤维增强复合材料;温度;拉挤速度

中图分类号:TB 332

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)05-0024-09

## Research progress of pultrusion molding process for fiber reinforced composites

Zhao Shuo<sup>1</sup>, Ju Zhehai<sup>2</sup>, Jiang Yaming<sup>1</sup>

1. College of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;
2. Zhejiang Yuantian Carbon Fiber Corporation, Haining 314400, Zhejiang, China

**Abstract:** Pultrusion molding process can produce composites of any length, with various constant cross-sections, linear or certain curved shape. It has the advantages of high production efficiency and high utilization rate of raw materials. And the obtained composites have excellent axial mechanical properties, which are widely used in the automotive, aerospace, construction and other fields. The pultrusion molding processes for fiber reinforced composites were reviewed, from the perspectives of thermosetting resins and thermoplastic resins, and the processes and characteristics of each process were elaborated in detail. The effects of temperature and pultrusion speed on the properties of pultrusion molding composites were explored. The future development directions of the pultrusion molding process, including the development of pultrusion molding processes for complex structure, development of pultrusion molding processes for natural materials, integration of advanced control systems and automated production lines, as well as construction of mathematical models for pultrusion molding processes, etc., were summarized and looked forward, in order to reduce cost

收稿日期:2024-12-17

作者简介:赵烁,男,1998年生,在读硕士研究生,研究方向为拉挤复合材料成型及其性能研究

通信作者:姜亚明,教授,jiangyaming@tiangong.edu.cn

and improve production efficiency, and enhance the competitiveness of pultrusion molding composites.

**Keywords:** pultrusion molding process; thermosetting resin; thermoplastic resin; fiber reinforced composite; temperature; pultrusion speed

复合材料在现代工程和制造业中占据着重要地位。其性能优异,已在航空航天、汽车、建筑、船舶、体育器材和可再生能源<sup>[1-3]</sup>等领域得到广泛应用。其中,拉挤成型复合材料(也称拉挤型材)是一种性能优异且应用广泛(表 1)的复合材料<sup>[4]</sup>。其生产过程涉及将浸渍树脂的纤维在牵引设备的作用下单向通过模具,待树脂固化后即制得具有任意长度且等

截面的复合材料<sup>[5-6]</sup>。

相较于其他复合材料,拉挤型材可以实现大规模的连续生产,且生产过程即实现了增强纤维的高度取向,制品具有优异的轴向力学性能。此外,拉挤型材的截面可被加工成各种形状和尺寸,制品包括棒材、管材和梁材等,且生产过程对原材料的利用率高。

表 1 拉挤型材的典型应用

Tab. 1 Typical applications for pultruded profiles

应用领域	典型使用场景	对拉挤型材的要求
建筑	地板和墙壁系统、围栏、桥梁	质轻,强度高,防火性能好,抗疲劳,易于安装和维护
电气	电缆桥架支撑构件、梯子、输电杆、塔架	绝缘
海洋	污水处理	耐腐蚀
运输	铁路、车身面板	质轻,耐腐蚀
运动	曲棍球杆、滑雪杖、高尔夫球杆、箭、风筝、帆垫	质轻,耐腐蚀,易于安装

本文综述了纤维增强复合材料拉挤成型工艺研究进展。根据树脂基体的不同,将拉挤成型工艺分为热固性树脂复合材料拉挤成型工艺和热塑性树脂复合材料拉挤成型工艺。首先,详细介绍不同的纤维浸渍方法,阐述每种浸渍方法的特点和发展现状。其次,介绍拉挤成型工艺中温度和拉挤速度对拉挤型材的影响,以及目前的研究现状。最后,总结目前拉挤成型工艺面临的问题,并对拉挤成型工艺发展方向提出展望,以为未来拉挤型材的开拓创新提供一定的理论支撑。

## 1 拉挤成型工艺

### 1.1 热固性树脂复合材料拉挤成型工艺

热固性树脂目前应用广泛。其在室温下通常为液态,使用时需在特定的温度和固化剂作用下固化;其黏度低,能有效浸渍纤维。一般来说,热固性树脂强度相比热塑性树脂更高,抗蠕变性更好,适用于采用短纤维、长纤维或织物增强的大型零件<sup>[7]</sup>。

热固性树脂复合材料拉挤成型工艺主要有 2 种:开放树脂浴拉挤成型工艺和注射拉挤成型工

艺(图 1)。

传统的开放树脂浴拉挤成型工艺中,热固性树脂对纤维的浸渍主要是在开放的浸胶槽中进行的。该工艺技术门槛相对不高,设备和运营成本较低,可根据需求加工多种类型的纤维和树脂,制造出多样化的产品,适合大规模生产。但开放的树脂浴可能会导致挥发性有机化合物(VOCs)的释放,这不仅对操作工人的健康构成了威胁,还对周边的环境造成了污染。此外,该工艺通常需持续加热树脂浴和模具,以促进树脂的浸渍和固化,且加热开放的树脂浴需消耗更多的热量,故树脂的固化时间和纤维的拉挤速度将受到影响。若树脂固化不完全,则拉挤型材的结构完整性和力学性能将受到影响。为了解决这一问题,注射拉挤成型工艺逐渐被推广并应用<sup>[8]</sup>。

注射拉挤成型工艺中,纤维束被输送至模具中,同时液态热固性树脂通过注射槽/口注入注射室,然后在压力的作用下实现树脂对纤维的浸渍。该工艺减少了空气泡和树脂富集区域的出现,提高了型材的品质和力学性能。此外,封闭的注射系统减少了 VOCs 的释放,环保性更佳。

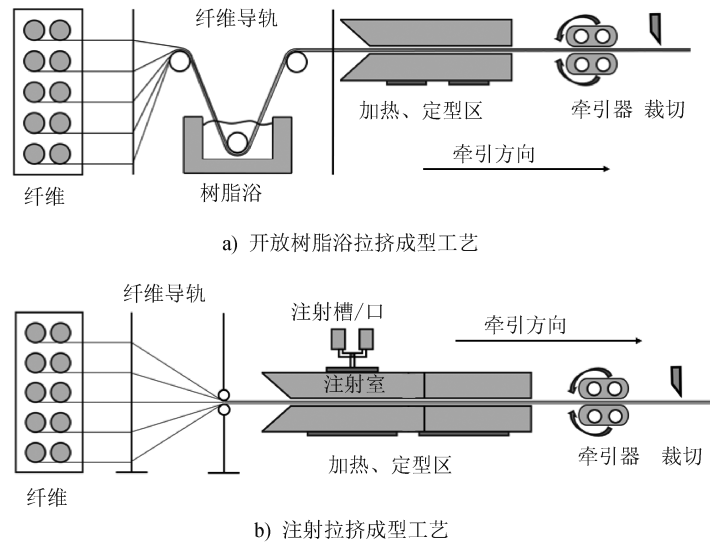


图 1 热固性树脂复合材料拉挤成型工艺  
Fig. 1 Pultrusion molding processes for thermosetting resin composites

当然,新的拉挤成型工艺也在不断探索中。Irfan 等<sup>[9]</sup>对现行的拉挤成型工艺进行了改进,其通过设计纤维铺展装置和树脂浸渍单元,实现了更高效的纤维浸渍,并减少了生产过程中树脂的浪费。Barkanov 等<sup>[10]</sup>利用有限元软件推导出新的电磁-热化学有限元模型和算法,用于开发和控制微波辅助拉挤成型工艺,以及设计模具。试验对比发现,微波辅助拉挤成型工艺大幅提高了拉挤效率,改善了产品性能。

### 1.2 热塑性树脂复合材料拉挤成型工艺

热塑性树脂具有线性分子链结构,这使得热塑性树脂受热会熔融,且这一过程可逆。因此,热塑性树脂复合材料可重复使用,还可通过加热的方式进行焊接<sup>[11]</sup>,加工时间短,且更经济、环保<sup>[12]</sup>。此外,热塑性树脂典型失效应变大于 50%,远大于热固性树脂典型失效应变(8%)<sup>[13]</sup>。因此,由纤维增强的热塑性树脂复合材料具有更高的韧性、损伤容限和极限失效应变<sup>[14-15]</sup>。热塑性树脂复合材料拉挤成型工艺开发于 20 世纪 90 年代,近年得到了普及<sup>[16-17]</sup>。由于熔融态热塑性树脂黏度大,相较于热固性树脂,其对纤维的浸渍性较差,因而拉挤成型时需将加热模具中的热塑性树脂和纤维增强材料共同加热至一定的温度,以更好地实现对纤维增强材料的浸渍。目前,根据浸渍方式的不同,热塑性树脂复合材料拉挤成型工艺又可分为反应型拉挤成型工艺和非反应型拉挤成型工艺<sup>[18]</sup>。

#### 1.2.1 反应型拉挤成型工艺

反应型拉挤成型工艺中,热塑性树脂的不同组分经由注射室注入浸渍区。这些组分通过实时的化学聚合反应形成大分子聚合物,然后浸渍纤维,最后经加热、冷却、定型得到复合材料<sup>[18]</sup>。

反应型拉挤成型工艺使用连续纤维作为增强材料,理论上可生产出无限长度的拉挤型材,生产效率高;但实际上,受限于热塑性树脂的聚合反应,拉挤成型工艺的生产速率取决于聚合速率,具体与树脂类型、加热温度及单体/引发剂配比等因素有关<sup>[19]</sup>。Luisier 等<sup>[18]</sup>基于反应型拉挤成型工艺,成功制备出玻璃纤维(GF)增强聚酰胺 12(PA12)复合材料,并开发出不同形状的模具(图 2),最大限度地提高了生产效率。Chen 等<sup>[19]</sup>基于反应型拉挤成型工艺,通过优化引发剂和活化剂配比,成功制备出连续 GF 增强聚酰胺 6(PA6)复合材料,其中 GF 体积分数占 50%。测试发现,该复合材料具有较好的界面黏附性和较高的模量。van Rijswijk 等<sup>[20]</sup>基于真空导流工艺,制备出 GF 增强阴离子 PA6 复合材料。其使用含长诱导时间的引发剂-活化剂组合,控制聚合时间,进而优化复合材料的制备。

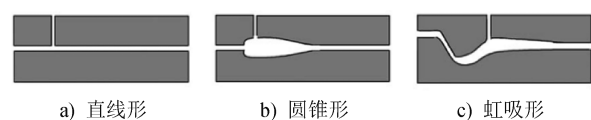


图 2 反应型拉挤成型工艺模具  
Fig. 2 Molds for reactive pultrusion molding process

在反应型拉挤成型工艺中,为提高生产效率,热塑性树脂被注入模具,并在拉挤过程中边原位聚合边浸渍纤维,故被称为原位拉挤成型工艺(图 3)。Zoller 等<sup>[21]</sup>基于热塑性丙烯酸树脂,通过添加引发剂和设置多个加热区的方法,使树脂在模具中原位聚合,制得力学性能与传统热固性树脂拉挤型材相当的新型复合材料。Epple 等<sup>[22]</sup>为防止水分影响活化的阴离子聚合,对模具进行分段控温。其将 GF 预热后送入模具,并将己内酰胺单体、催化剂和引发剂注入模具中,最终成功制备出连续 GF 增强 PA6 复合材料(图 4)。Kaczmarek 等<sup>[23]</sup>对熔融热塑性树脂原位浸渍干纤维丝束展开了探究。其先推导出一维流条件下的 Darcy 定律,并使用 Gebart 方程估算树脂对纤维丝束的浸渍性和渗透性;其次,根据估算的结果改进原位浸渍工艺;最后,通过试验成功制备出与理论预测相符合的热塑性树脂复合材料试样。

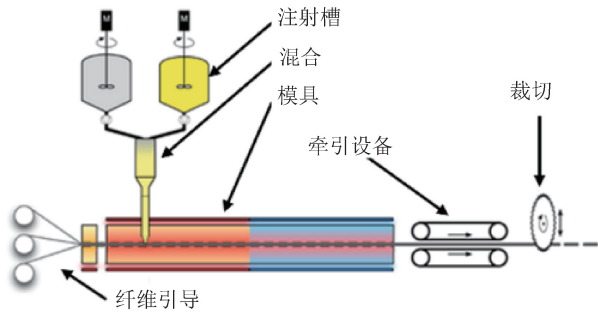


图 3 原位拉挤成型工艺流程示意

Fig. 3 Process flow diagram of *in-situ* pultrusion molding process

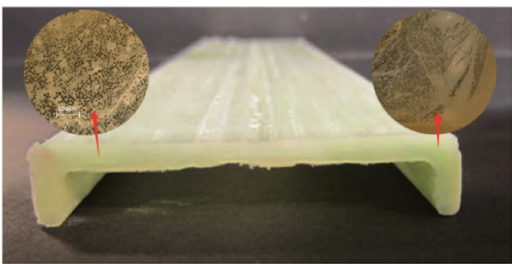


图 4 反应型注射拉挤成型工艺制备的 GF 增强 PA6 复合材料

Fig. 4 Glass fibers reinforced PA6 composites prepared with reactive injection pultrusion molding process

### 1.2.2 非反应型拉挤成型工艺

与反应型拉挤成型工艺不同,在非反应型拉挤成型工艺中,热塑性树脂在浸渍纤维前就已完成聚合。但热塑性树脂黏度大,拉挤过程中不易浸渍纤维,因此纤维在被引入模具前需进行预浸、预加热等

预处理。其工艺流程如图 5 所示<sup>[4]</sup>。

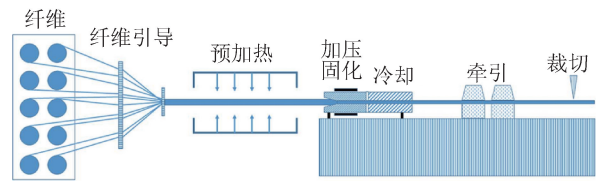


图 5 非反应型拉挤成型工艺流程示意

Fig. 5 Process flow diagram of non-reactive pultrusion molding process

在非反应型拉挤成型工艺中,热塑性树脂对纤维的浸渍方式主要有溶液浸渍、熔体浸渍、纤维混杂[图 6a)、粉末浸渍[图 6b)],以及预固浸渍[图 6c)]等。

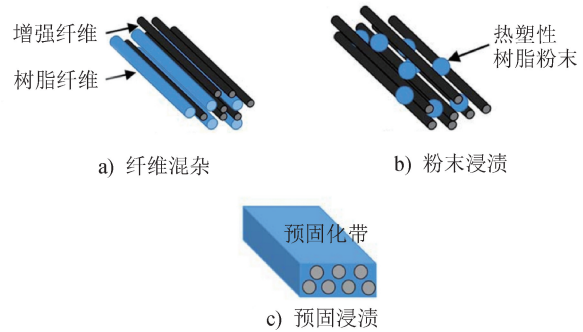


图 6 热塑性树脂对纤维的浸渍方式

Fig. 6 Impregnation methods of thermoplastic resin on fibers

溶液浸渍法将热塑性树脂溶解于合适的溶剂中,得到低黏度的溶液,并用其浸渍纤维。随后,通过去除溶剂得到预浸料<sup>[24-25]</sup>。该方法的优势是,得到的溶液能更快、更充分地浸渍纤维,生产效率高。但是,大部分热塑性树脂很难找到合适的溶剂,这在一定程度上限制了该方法的使用。另外,即便有了合适的溶剂,后续处理也很难彻底将溶剂去除。残留的溶剂会在复合材料成型过程中形成气泡和孔隙,对产品性能造成不利影响。

熔体浸渍法与热固性树脂拉挤成型工艺类似,都是在一定的温度和压力下利用熔融的热塑性树脂浸渍纤维的。Wang 等<sup>[26]</sup>使用自行设计的熔融拉挤设备,以聚甲醛(POM)浸渍表面经偶联剂处理的玄武岩纤维束,制备玄武岩纤维增强 POM 复合材料(图 7)。熔体浸渍法经济方便,适用于绝大部分热塑性树脂。但熔融态热塑性树脂黏度大,对纤维的浸渍效果较差,需先对纤维进行预处理。此外,拉挤成型过程中热塑性树脂长时间处于熔融状态,可能会出现

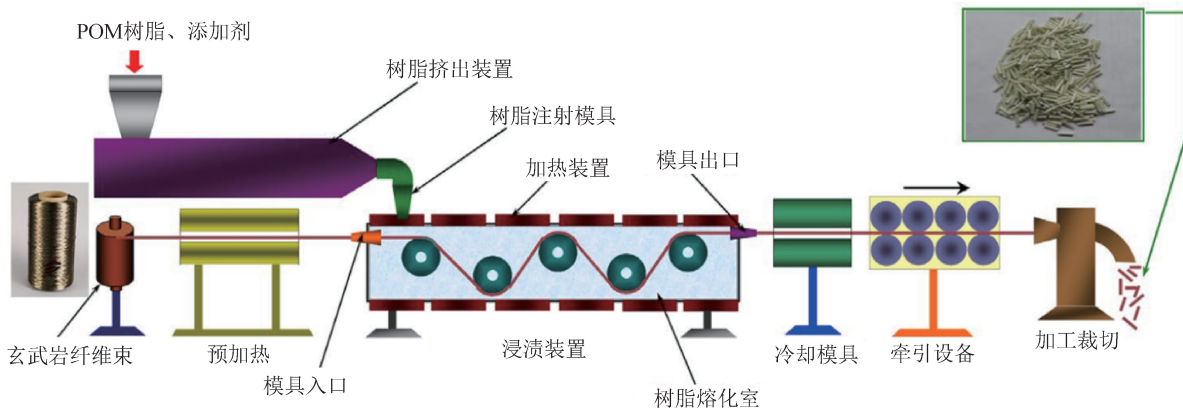


图7 熔体浸渍法制备玄武岩纤维增强 POM 复合材料流程示意

Fig. 7 Process flow diagram of preparing basalt fibers reinforced POM composites with melt impregnation method

热降解。

纤维混杂法先将热塑性树脂纤维与增强纤维混合均匀,然后在高温密闭的拉挤环境中熔融热塑性树脂纤维,实现对增强纤维的浸渍,最终拉挤成型<sup>[27-28]</sup>。相较于粉末浸渍法,该方法能明显减小拉挤过程中纤维之间、纤维与拉挤模具之间的摩擦力,有效降低拉挤成型过程中纤维受损的概率,提高生产效率和制品品质<sup>[29-30]</sup>。相较于其他方法,纤维混杂法能够更好地浸渍纤维。Volk 等<sup>[31]</sup>基于设计的批量拉挤系统,使用玻璃纤维/聚对苯二甲酸乙二醇酯(GF/PET)混纺纱,拉挤制备直径为 40 mm、孔隙率小于 2%的棒材。

粉末浸渍法先将粉末状的热塑性树脂均匀地分散于纤维表面,然后在拉挤过程中将其熔融,实现树脂对纤维的浸渍<sup>[32]</sup>。此法的优点在于,树脂粉末能均匀分布于每根纤维之间,故能实现更充分的浸渍,并极大程度地缩短浸渍时间,提高生产效率。Goud 等<sup>[33]</sup>基于干式静电喷涂技术向纤维束喷涂热塑性聚酯粉末,发现静电喷涂技术可以有效解决热塑性聚酯难以均匀浸渍的问题,提高复合材料的整体性能。Nunes 等<sup>[34]</sup>基于设计的干法粉末涂层设备向 GF 丝束喷涂聚丙烯(PP)粉末,然后通过拉挤成型工艺将其加工成型材。研究发现,在粉末涂层工艺中,拉挤速度越高,型材中聚合物质量分数越低,且当温度在 400~450 °C 时,聚合物对纤维的浸渍效果最佳。

预固浸渍法即针对已被树脂浸润的预固化带(PCT)进行拉挤以制备型材<sup>[35-36]</sup>。Novo 等<sup>[37]</sup>分别对 GF/PP PCT、PP 粉末包覆的 GF 丝束及 GF/PP

混杂丝束进行拉挤成型,发现:相较于另 2 种材料,使用 GF/PP PCT 拉挤成型的复合材料中树脂对纤维的浸渍效果最好,且复合材料的弯曲强度和层间剪切强度更高。Vedernikov 等<sup>[38]</sup>将自制的 GF/PP PCT 加工成拉挤型材,并与利用工业生产的 PCT 拉挤制成的型材进行对比,发现:利用自制的 GF/PP PCT 制成的拉挤型材实现了更均匀的浸渍,减少了未浸渍区和裂纹,且其弯曲强度、拉伸强度及层间剪切强度分别提高了 106.0%、6.4%、27.6%。Minchenkov 等<sup>[39]</sup>研究了不同拉挤速度(2、5、8 m/min)制造的 GF/PP PCT 对最终所生产的拉挤型材性能的影响,发现:所得拉挤型材在力学性能上差异显著,其中利用拉挤速度为 8 m/min 制造的 GF/PP PCT,得到的拉挤型材弯曲强度最大(554.8 MPa)。还有研究<sup>[40]</sup>表明,使用预固化板(PCS)拉挤的型材比使用 PCT 拉挤的型材性能更好。

## 2 拉挤成型工艺影响因素

拉挤成型工艺中,树脂的类型和黏度,增强纤维的类型和体积分数,以及加工制造参数等都会影响拉挤型材的品质。后文简要介绍温度和拉挤速度对拉挤型材品质的影响。

### 2.1 温度

温度对拉挤型材品质至关重要。对于热固性树脂,合适的温度可以促进树脂的交联。在热固性树脂复合材料拉挤成型工艺中,温度的控制主要集中在对模具的精确调控上。Chaparala 等<sup>[41]</sup>研究了模具温度对恒定拉挤速度下乙烯基酯树脂体系固化反

应的影响。结果表明,随着模具温度的升高,树脂固化速率加快,固化程度增加。其还发现,120 °C 条件下制备的型材力学性能最佳;但当温度达到 140 °C 时,树脂内部会产生残余热应力,导致型材力学性能下降。Sandberg 等<sup>[42]</sup>通过数值模拟技术,成功展示了拉挤过程中温度对树脂固化程度、黏度及压力的影响。

对于热塑性树脂,由于其在常温下黏度大,因而浸渍纤维时需较高的温度以提高其流动性,但过高的温度会导致树脂热解,故热塑性树脂复合材料拉挤成型时需严格控制模具的温度。Chen 等<sup>[43]</sup>针对 GF 增强 PA6 复合材料开发了一种新型热塑性反应注射拉挤成型工艺,并评估了模具加热区温度对树脂结晶度、熔点和拉挤型材力学性能的影响。结果表明:当模具加热区温度为 150 °C 时,PA6 基体的结晶度( $X_c$ )最高(43.3%),拉挤型材的弯曲强度和弯曲模量分别达到最大值(1 061 MPa 和 38 384 MPa);当模具加热区温度为 180 °C 时,拉挤型材层间剪切强度最高(71.5 MPa)(图 8)。此外,热塑性树脂被加热到玻璃化转变温度( $T_g$ )以上时,会从玻璃态转变为黏流态,此时聚合物的黏附性发生改变<sup>[44-46]</sup>,进而拉挤成型工艺中树脂与模具之间的微观黏附行为和摩擦行为受到影响。当热塑性树脂和模具之间具有较高的黏附力,甚至超过拉挤型材的强度时,拉挤成型可能会引起树脂脱落,甚至导致纤维受损。为解决这一问题,可通过设置模具的温度呈一定的梯度分布,即在模具加热区后设置冷却区,缩短聚合物凝胶态时间。此外,设置冷却区还可以使热塑性树脂复合材料在拉挤过程中产生一定的收缩,减小拉挤成型工艺的拉力<sup>[47]</sup>。

## 2.2 拉挤速度

决定拉挤成型工艺成本的一个关键因素是拉挤速度。因此,在保证增强材料得到良好浸渍、树脂充分聚合且具有可控结晶度的同时,需要平衡考量拉挤速度。提高拉挤速度可以加快生产,但拉挤速度过大,对于热固性树脂会导致固化度过低,对于热塑性树脂会导致对纤维的浸渍较差,所得拉挤型材孔隙率高,力学性能降低。若拉挤速度过小,对于热固性树脂则固化时间过长,生产效率低,对于热塑性树脂则会因加热区停留时间过长而导致树脂分解,拉挤型材力学性能受影响<sup>[48]</sup>。Lapointe 等<sup>[49]</sup>研究发

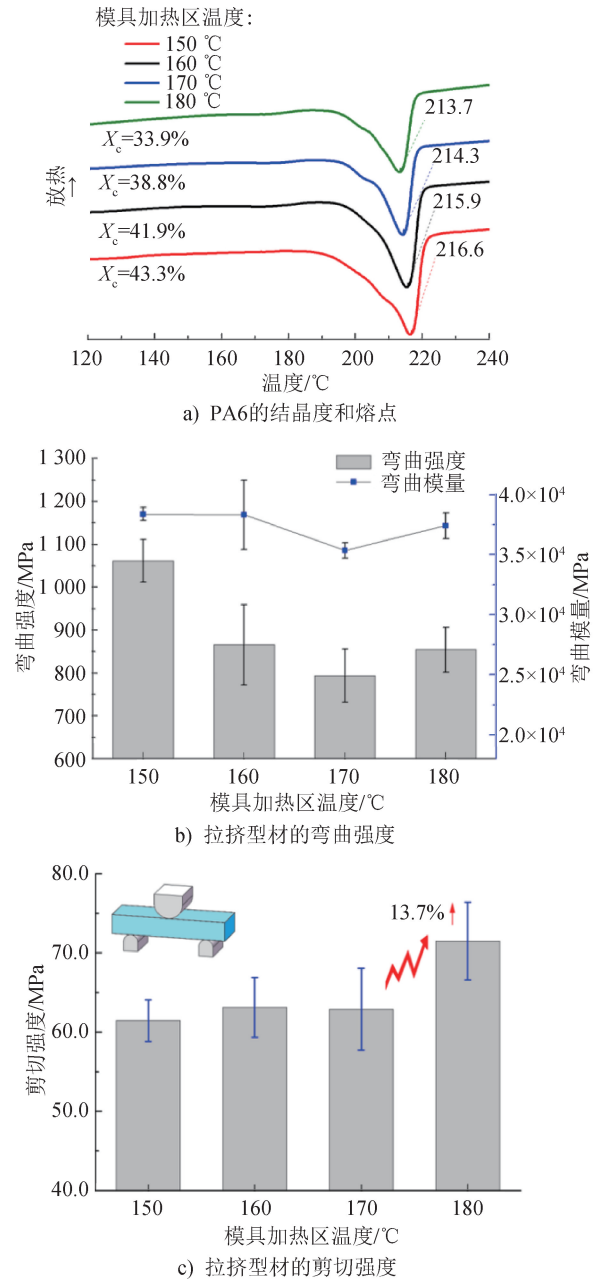


图 8 模具加热区温度对树脂结晶度及拉挤型材力学性能的影响

Fig. 8 Influence of temperature in heating zone of mold on crystallinity of resin and mechanical properties of pultruded profile

现,当热塑性树脂复合材料拉挤成型工艺的拉挤速度从 100 mm/min 降至 50 mm/min 时,型材的孔隙率降低 1.7%。路振华等<sup>[50]</sup>研究拉挤速度对工字形复合材料芯体温度和固化度的影响,发现:随着拉挤速度的增加,芯体最高温度出现位置后移,且处于高温状态的时间缩短,树脂固化不完全(图 9)。

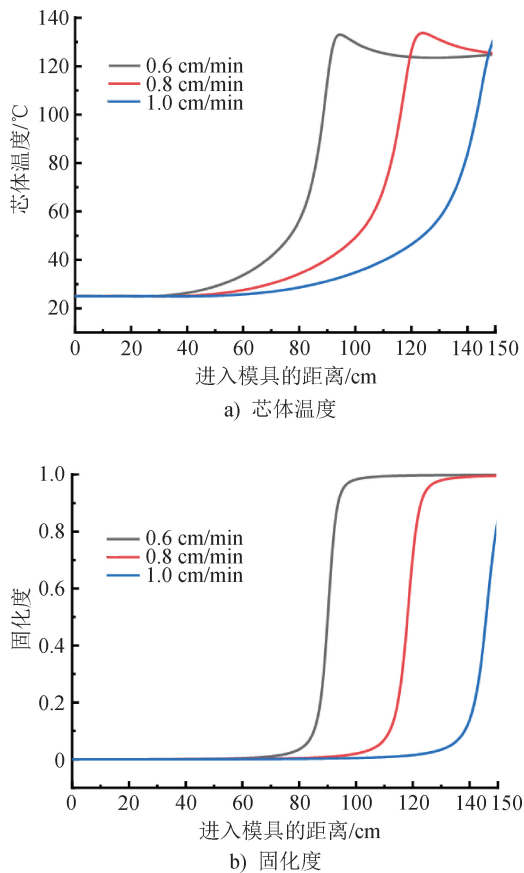


图9 不同拉挤速度下芯体温度和固化度曲线  
Fig. 9 Core temperature and curing degree curves under different pultrusion speeds

### 3 结束语与展望

拉挤成型工艺作为一种高效且自动化程度高的复合材料生产技术,其产品性能卓越,在多个领域展现出巨大的应用潜力。从风电叶片到轻量化汽车,从轨道交通到建筑结构,拉挤成型复合材料的应用范围在不断拓展,并为现代工业带来了革命性的变化。且随着拉挤成型技术的不断进步和创新,拉挤成型工艺在提高生产效率、降低成本、增强产品性能等方面发挥着越来越重要的作用。但基于当前的研究现状和工业实际需求,拉挤成型工艺也面临诸多问题有待解决,未来应注重以下几个方向:

(1) 拉挤成型工艺虽能生产简单的弯曲状型材,但面对异形结构复合材料仍无能为力。未来,可探究复杂结构拉挤成型复合材料的生产工艺,包括复合材料的拼接、组装等,拓展此类复合材料的应用。

(2) 热固性树脂复合材料回收难度大,对环境污染较大;热塑性树脂虽具有可塑性和可焊接性,在可回收性方面具有许多优势,但其黏度大,对纤维的浸渍性差,加工时拉伸模具需达到很高的温度,同时需配备冷却系统处理型材,加工工艺繁琐,能耗高。针对这些不足,未来可开发天然纤维增强材料和天然树脂基复合材料。

(3) 随着科技的发展,借助先进计算机控制系统和自动化生产线,可实现更高精度的材料控制和更快速的生产,同时降低生产成本。此外,通过构建数值模型,可以全面了解拉挤成型过程中发生的物理变化和化学反应,最大限度地减少型材的残余应力和形状扭曲,防止过早开裂和分层。利用流体仿真和固化动力学模拟技术,可以使树脂更充分地浸渍纤维,进而更精准地控制拉挤过程中的峰值温度和聚合反应,最大限度地减少孔隙率,提高生产效率,降低能耗,指导生产,使拉挤成型复合材料在应用领域更具竞争力。



期刊采编平台



中国知网下载

### 参考文献

- [ 1 ] 李明,李志文,韩晶珠,等.碳纤维复合材料在轨道交通领域的研究与应用进展[J].合成纤维,2024,53(9):19-25.
- [ 2 ] RANGAPPA S M, SIENGCHIN S, PARAMESWARANPILLAI J, et al. Lignocellulosic fiber reinforced composites: progress, performance, properties, applications, and future perspectives[J]. Polymer Composites, 2022, 43(2): 645-691.
- [ 3 ] 吕淑扬,郑凯,赵英男,等.碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用[J].聚酯工业,2024,37(3):71-73.
- [ 4 ] SAFONOV A A, CARLONE P, AKHATOV I. Mathematical simulation of pultrusion processes: a review [J]. Composite Structures, 2018, 184: 153-177.
- [ 5 ] 葛继文,夏元平,曹亚周,等.复合材料拉挤成型技术及其运用分析[J].模具制造,2024,24(5):172-176.
- [ 6 ] VOLK M, YUKSEL O, BARAN I, et al. Cost-efficient, automated, and sustainable composite profile manufacture: a review of the state of the art,

- innovations, and future of pultrusion technologies [J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 246: 110135.
- [ 7 ] SABA N, JAWAID M. A review on thermomechanical properties of polymers and fibers reinforced polymer composites [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2018, 67: 1-11.
- [ 8 ] VOORAKARANAM S, JOSEPH B, KARDOS J L. Modeling and control of an injection pultrusion process [J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33(13): 1173-1204.
- [ 9 ] IRFAN M S, SHOTTON-GALE N, PAGET M A, et al. A modified pultrusion process [J]. Journal of Composite Materials, 2017, 51(13): 1925-1941.
- [10] BARKANOV E, AKISHIN P, NAMSONE-SILE E. Effectiveness and productivity improvement of conventional pultrusion processes [J]. Polymers, 2022, 14(4): 841.
- [11] YOUSEFPOUR A, HOJJATI M, IMMARIGEON J P. Fusion bonding/welding of thermoplastic composites [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2004, 17(4): 303-341.
- [12] YASSIN K, HOJJATI M. Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2018, 31(12): 1676-1725.
- [13] GE J, CATALANOTTI G, FALZON B G, et al. Process characteristics, damage mechanisms and challenges in machining of fibre reinforced thermoplastic polymer (FRTP) composites: a review [J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 273: 111247.
- [14] VAIDYA U K, CHAWLA K K. Processing of fibre reinforced thermoplastic composites [J]. International Materials Reviews, 2008, 53(4): 185-218.
- [15] OZTURK F, COBANOGLU M, ECE R E. Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2024, 37(9): 3084-3116.
- [16] LINGANISO L Z, BEZERRA R, BHAT S, et al. Pultrusion of flax/poly(lactic acid) commingled yarns and nonwoven fabrics [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2014, 27(11): 1553-1572.
- [17] 赵新涛, 姜宁, 王明道, 等. 纤维增强热塑性复合材料拉挤成型工艺研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38(1): 224-232.
- [18] LUISIER A, BOURBAN P E, MÅNSON J E. Reaction injection pultrusion of PA12 composites: process and modelling [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003, 34(7): 583-595.
- [19] CHEN K, JIA M Y, HUA S, et al. Optimization of initiator and activator for reactive thermoplastic pultrusion [J]. Journal of Polymer Research, 2019, 26(2): 40.
- [20] VAN RIJSWIJK K, TEUWEN J J E, BERSEE H E N, et al. Textile fiber-reinforced anionic polyamide-6 composites. Part I: the vacuum infusion process [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(1): 1-10.
- [21] ZOLLER A, ESCALÉ P, GÉRARD P. Pultrusion of bendable continuous fibers reinforced composites with reactive acrylic thermoplastic ELIUM<sup>®</sup> resin [J]. Frontiers in Materials, 2019, 6: 290.
- [22] EPPLÉ S, BONTEN C. Production of continuous fiber thermoplastic composites by *in-situ* pultrusion [C]. Melville: American Institute of Physics, 2014: 457.
- [23] KACZMAREK D, WALCZYK D, GAROFALO J, et al. An investigation of *in situ* impregnation for additive manufacturing of thermoplastic composites [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 972-981.
- [24] AKBAR S, DING C Y, YOUSAF I, et al. E-glass/phenolic prepreg processing by solvent impregnation [J]. Polymers and Polymer Composites, 2008, 16(1): 19-26.
- [25] LIU Q X, ZHANG Y Y, SUN Z, et al. High mechanical performance short carbon fiber reinforced polyetherimide composites *via* solution mixing process [J]. Composites Science and Technology, 2023, 244: 110296.
- [26] WANG Y T, WANG X D, WU D Z. Mechanical and tribological enhancement of polyoxymethylene-based composites with long basalt fiber through melt pultrusion [J]. Composite Interfaces, 2016, 23(8): 743-761.
- [27] KIM D H, LEE W I, FRIEDRICH K. A model for a thermoplastic pultrusion process using commingled yarns [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(8): 1065-1077.
- [28] BERNET N, MICHAUD V, BOURBAN P E, et al. An impregnation model for the consolidation of thermoplastic composites made from commingled yarns [J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33(8): 751-772.
- [29] SVENSSON N, SHISHOO R, GILCHRIST M. Manufacturing of thermoplastic composites from commingled yarns: a review [J]. Journal of Thermoplastic Composite

- Materials, 1998, 11(1): 22-56.
- [30] RAMASAMY A, WANG Y J, MUZZY J. Braided thermoplastic composites from powder-coated towpregs. Part I: towpreg characterization [J]. Polymer Composites, 1996, 17(3): 497-504.
- [31] VOLK M, WONG J, ARREGUIN S, et al. Pultrusion of large thermoplastic composite profiles up to  $\phi 40$  mm from glass-fibre/PET commingled yarns[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 227: 109339.
- [32] RAMANI K, BORGAONKAR H, HOYLE C. Experiments on compression moulding and pultrusion of thermoplastic powder impregnated towpregs [J]. Composites Manufacturing, 1995, 6(1): 35-43.
- [33] GOUD V, ALAGIRUSAMY R, DAS A, et al. Dry electrostatic spray coated towpregs for thermoplastic composites[J]. Fibers and Polymers, 2018, 19(2): 364-374.
- [34] NUNES J P, SILVA J F, NOVO P J. Processing thermoplastic matrix towpregs by pultrusion [J]. Advances in Polymer Technology, 2013, 32(S1): 306-312.
- [35] TUCCI F, RUBINO F, PASQUINO G, et al. Thermoplastic pultrusion process of polypropylene/glass tapes[J]. Polymers, 2023, 15(10): 2374.
- [36] ESFANDIARI P, SILVA J F, NOVO P J, et al. Production and processing of pre-impregnated thermoplastic tapes by pultrusion and compression moulding[J]. Journal of Composite Materials, 2022, 56(11): 1667-1676.
- [37] NOVO P J, SILVA J F, NUNES J P, et al. Pultrusion of fibre reinforced thermoplastic pre-impregnated materials[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 89: 328-339.
- [38] VEDERNIKOV A, MINCHENKOV K, GUSEV S, et al. Effects of the pre-consolidated materials manufacturing method on the mechanical properties of pultruded thermoplastic composites [J]. Polymers, 2022, 14(11): 2246.
- [39] MINCHENKOV K, GUSEV S, ROGOZHEVA A, et al. Pultrusion of thermoplastic composites with mechanical properties comparable to industrial thermoset profiles [J]. Composites Communications, 2023, 44: 101766.
- [40] MINCHENKOV K, VEDERNIKOV A, KUZMINOVA Y, et al. Effects of the quality of pre-consolidated materials on the mechanical properties and morphology of thermoplastic pultruded flat laminates [J]. Composites Communications, 2022, 35: 101281.
- [41] CHAPARALA S A C, ALAJARMEH O, SHELLEY T, et al. Characterisation of curing of vinyl ester resin in an industrial pultrusion process: influence of die temperature[J]. Polymers, 2023, 15(18): 3808.
- [42] SANDBERG M, YUKSEL O, BARAN I, et al. Numerical and experimental analysis of resin-flow, heat-transfer, and cure in a resin-injection pultrusion process [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 143: 106231.
- [43] CHEN K, JIA M Y, SUN H, et al. Thermoplastic reaction injection pultrusion for continuous glass fiber-reinforced polyamide-6 composites [J]. Materials, 2019, 12(3): 463.
- [44] KIM K S, HEO J C, KIM K W. Effects of temperature on the microscale adhesion behavior of thermoplastic polymer film [J]. Tribology Letters, 2010, 38(2): 97-106.
- [45] KIM K S, ANDO Y, KIM K W. The effect of temperature on the nanoscale adhesion and friction behaviors of thermoplastic polymer films [J]. Nanotechnology, 2008, 19(10): 105701.
- [46] HEYDERMAN L J, SCHIFT H, DAVID C, et al. Flow behaviour of thin polymer films used for hot embossing lithography[J]. Microelectronic Engineering, 2000, 54(3/4): 229-245.
- [47] ALSINANI N, GHAEDSHARAF M, LABERGE LEBEL L. Effect of cooling temperature on deconsolidation and pulling forces in a thermoplastic pultrusion process[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 219: 108889.
- [48] 高硕, 周邦泽, 何梦瑶, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料拉挤成型工艺 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(12): 6-19.
- [49] LAPOINTE F, LEBEL L L. Fiber damage and impregnation during multi-die vacuum assisted pultrusion of carbon/PEEK hybrid yarns[J]. Polymer Composites, 2019, 40(S2): 1015-1028.
- [50] 路振华, 周松松, 周军, 等. 拉挤工字形复合绝缘子芯体工艺过程的热传递和固化模拟 [J/OL]. 复合材料科学与工程: 1-8 [2024-11-14]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=GQPEaosfmU\\_sfHO1RzayT1Nq1QbnnIz6DRXrACfpi8VqniQoyyX7Oik4hL556fghQnEgbY7KSVB0\\_Qgs20id5mDy6i6oCRkStiT0jCA3a\\_7CGI5r5o7RHMkXfYwkUev1SQZW6N4grJgCf4MENiewOWM11ikQTta&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=GQPEaosfmU_sfHO1RzayT1Nq1QbnnIz6DRXrACfpi8VqniQoyyX7Oik4hL556fghQnEgbY7KSVB0_Qgs20id5mDy6i6oCRkStiT0jCA3a_7CGI5r5o7RHMkXfYwkUev1SQZW6N4grJgCf4MENiewOWM11ikQTta&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG)