

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.08.026

热塑性复合材料热压-注塑一体成型界面性能研究进展

赵颖志^{1,2}, 陈晓周³, 刘东¹, 祝颖丹^{1,2}, 陈明达¹, 颜春¹, 陈刚¹

[1. 浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江宁波 315201;

2. 中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049; 3. 富强鑫(宁波)机器制造有限公司, 浙江宁波 315000]

摘要: 综述了热塑性复合材料热压-注塑一体成型在制件界面性能方面的研究进展, 简要介绍了该种成型工艺不同于传统热塑性复合材料成型工艺的原理及其优势, 指出良好的异质结构界面是发挥热压-注塑一体成型制件优势的关键, 同时详细介绍了材料体系、工艺参数、界面结晶效应以及界面结合机制对热压-注塑一体成型制件界面性能的影响。最后总结了热压-注塑一体成型复合材料界面性能优化改善的方法以及目前研究存在的问题, 并对未来发展趋势进行了展望。

关键词: 热塑性复合材料; 热压-注塑; 一体成型; 界面性能; 优化

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)08-0166-06

Research Progress on Interfacial Properties of Thermoplastic Composites

by Thermoforming-Injection Molding

Zhao Yingzhi^{1,2}, Chen Xiaozhou³, Liu Dong¹, Zhu Yingdan^{1,2}, Chen Mingda¹, Yan Chun¹, Chen Gang¹

[1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Robotics and Intelligent Manufacturing Equipment Technology,

Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;

2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Fu Chun Shin (Ningbo) Machinery Manufacture Co., Ltd., Ningbo 315000, China]

Abstract : The research progress of thermoforming-injection molding of thermoplastic composites in interface properties was reviewed. The principle and advantages of this molding process different from the traditional thermoplastic composite molding process were briefly introduced. It was pointed out that a good heterostructure interface was the key to give full play to the advantages of integrated molded parts. The effects of material system, process parameters, interface crystallization effect and interface bonding mechanism on the interface properties of integrated molded parts were introduced in detail. Finally, the methods of optimizing and improving the interface performance of thermoforming-injection molding composites and the existing problems are summarized, and the future development trend is prospected.

Keywords : thermoplastic composite ; thermoforming-injection molding ; one-step molding ; interfacial property ; optimization

纤维增强热塑性复合材料(FRTP)具有高强度、高韧性、高抗冲击性、成型周期短、可回收再利用等优点^[1], 已成为汽车、航空航天、轨道交通、体育运动等领域减重增效的关键材料。尤其在汽车领域, 热塑性复合材料应用广泛, 如内饰件、防撞梁、座椅背板、车门内架模块、油箱底壳等, 带来了显著

的轻量化节能减排效果。汽车零部件往往结构复杂, 需要较强的承载能力, 对热塑性复合材料的力学性能和成型工艺提出了越来越高的要求。开发热塑性复合材料新型先进成型工艺, 满足汽车零部件结构复杂、强承载性需求已成为国内外汽车用复合材料技术的主流发展趋势。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A20165, 52003281), 浙江省自然科学基金项目(LD22E050011), 宁波市科技创新2025重大专项(2022Z043, 2021Z026)

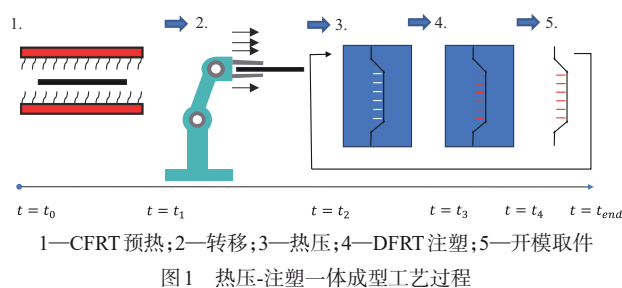
通信作者: 刘东, 博士, 高级工程师, 主要从事纤维增强树脂基复合材料的界面改性、成型工艺和连接技术等研究

收稿日期: 2023-06-07

引用格式: 赵颖志, 陈晓周, 刘东, 等. 热塑性复合材料热压-注塑一体成型界面性能研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8): 166-171.

Zhao Yingzhi, Chen Xiaozhou, Liu Dong, et al. Research progress on interfacial properties of thermoplastic composites by thermoforming-injection molding[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8): 166-171.

根据纤维形态的不同,热塑性复合材料可分为连续纤维增强型(CFRT)和非连续纤维增强型(DFRT)两种。其中,CFRT常用的成型工艺主要有热压、热塑性树脂传递模塑成型、自动铺放技术等,其主要优势是力学性能优异,可作为主承力件使用,但受限于连续纤维的可变形性,难以制造结构复杂构件;DFRT成型工艺主要有注塑、模压、玻璃纤维毡热塑成型、喷射成型等,其突出优势是成型速度快且可制造复杂精细构件,但其成型构件力学性能偏低,只能作为非承力件或次承力件使用。热压-注塑一体成型工艺(以下简称一体成型工艺)是将CFRT热压成型和DFRT注塑成型相结合的新型混合成型工艺,其基本原理如图1所示,在同一模具内首先通过热压成型完成产品的主结构,然后通过注塑完成加强筋等结构成型^[2]。相较于传统成型工艺,该工艺具有制品承载能力强、成型周期短、适合复杂结构、自动化程度高等优点^[3-6]。



热塑性复合材料的成型工艺会显著影响制件的最终性能^[7]。在将DFRT熔体通过模具型腔注塑到CFRT嵌件表面时,会产生连续纤维复合材料和非连续纤维复合材料的混合结构异质界面(以下简称界面),相对于本体结构,界面的结合性能相对较弱,会导致界面过早失效和后续整体结构的破坏,限制了该技术应用水平的提高和范围拓展^[8-10]。良好的界面性能是发挥一体成型制件优势的关键,因此开展界面性能研究具有十分重要的意义。笔者着重介绍热塑性复合材料热压-注塑一体成型的材料体系、工艺参数、界面结晶效应等对复合材料界面性能的影响,总结界面结合机制的研究工作进展。

1 材料体系对界面性能的影响

材料体系的选择对界面性能有显著影响,材料体系包括聚合物基体类型、纤维增强体类型等。

当CFRT嵌件(以下简称嵌件)的聚合物基体类型和注塑用聚合物基体类型不同时,一体成型制件界面能够实现结合,但相比于同类型基体,界面结合强度较弱。符亮等^[11]以连续玻璃纤维(GF)增强聚丙烯(PP)为嵌件材料,以短玻璃纤维(SGF)增强尼龙66(PA66)为注塑材料,采用一体成型工艺制备了PP/GF-PA66/SGF复合材料平板试件,利用单因素法,研究了模具温度、嵌件预热温度、熔体温度和保压压力对试件弯曲强度和界面性能的影响。结果表明,提高各工艺参数有利于提升制件弯曲强度。通过观察界面微观形貌发现,PP树脂和PA66树脂间发生扩散,聚合物基体之间形成融合

共混区域,从而证明了不同热塑性基体复合材料一体成型加工的可行性。Neveu等^[12]以连续碳纤维(CF)增强聚醚醚酮(PEI)和CF增强聚苯硫醚(PPS)为嵌件材料,以短碳纤维(SCF)增强PPS和SCF增强聚醚醚酮(PEEK)为注塑材料,制备了不同基体类型组合的一体成型制件。研究表明,与相同聚合物基体类型制件(PPS/PPS)相比,不同聚合物类型的制件(PEI/PPS,PEI/PEEK)的界面结合性能相对较差。

热塑性复合材料常用增强纤维类型主要有GF、CF以及天然纤维等。目前对GF复合材料一体成型的研究较多^[11,13-19]。GF具有较高的比强度、优良的热稳定性、化学稳定性、电绝缘性、耐磨损性以及较低的价格^[20-21],人们在应用开发中尝试混合使用CF和GF来制造一体成型制件。Wei等^[22]以CF增强尼龙6(PA6),PA6/GF为嵌件材料,以PA6/SGF为注塑材料,利用一体成型工艺成功制备了汽车座椅横梁,如图2所示。与钢制横梁相比,一体成型横梁质量减轻了32.4%,并且弯曲强度提高58.2%。Stegelmann等^[23]以PA6/CF为嵌件材料,以PA6/SCF,PA6/SGF为注塑材料,制备了不同纤维增强体类型组合的一体成型加强筋平板试件,并对试件进行拉拔界面性能测试和显微分析。结果表明,与相同纤维增强体类型制件(CF/CF)相比,不同纤维增强体类型的制件(CF/GF)界面拔出强度较低,并且断面显微图像显示PA6/CF嵌件和PA/SGF加强筋之间的界面层很薄,这可能是其界面拔出强度较低的原因。



图2 一体成型横梁^[22]

天然纤维强度普遍低于合成纤维,并且吸湿性强、耐火性和耐久性差以及加工温度范围有限^[24-25],但由于其具有生物降解性、低成本和可制备中等性能要求的复合材料产品等优点,在环境危机日益严重的今天,天然纤维在热塑性复合材料应用中得到重视,特别是天然纤维与可降解树脂组成的绿色复合材料已成为研究热点^[26-28]。Wis等^[26]通过将聚乳酸(PLA)注塑到PLA/黄麻纤维织物复合热压板材上,制备了环保、可生物降解的复合材料,发现其弯曲强度和冲击强度显著高于纯PLA注塑板材。Andrzejewski^[29]等通过将PLA/harl注塑到PLA/黄麻纤维织物复合热压板材上制备了天然纤维增强复合材料,其中harl是亚麻纤维生产过程产生的废料。研究表明,由于PLA/黄麻纤维织物复合材料具有较低的玻璃化转变温度,在注塑前无须对嵌件进行预热即可引起界面层大分子的相互扩散,缩短了成型时间,降低了能源消耗。

2 工艺参数对界面性能的影响

除材料体系外,一体成型工艺参数,如预热温度、模具温度、熔体温度和保压压力等对界面性能影响较大。

在一定范围内提高嵌件的预热温度有助于提高一体成型制件的界面性能。Paramasivam等^[13]采用一体成型工艺制备了PP/GF-PP/SGF复合材料,通过使用热风枪将嵌件提前预热至140℃,与未预热(NPH)样品相比,预热(PH)样品的层间剪切强度(ILSS)提高了17%,并且PH样品的I型层间断裂韧性 $G_{IC,init}$ 和 $G_{IC,prop}$ 也分别提高了430%和655%。Matsumoto等^[30]采用一体成型工艺制备了PP/CF-PP/SCF复合材料,并且在热压层和注塑层之间插入多壁碳纳米管薄膜(MWCNT)来增加层间的纳米级互连,通过使用红外加热炉对嵌件进行预热,温度达到嵌件熔融温度以上(200℃)。研究表明,PH样品与NPH样品相比界面结合性能显著提高30%~40%,并且将嵌件预热至熔融温度以上后,在其表面产生了许多孔洞,在孔洞附近观察到MWCNT缠结,这种结构可以有效地提高界面结合强度。为获得更好的加热效果,研究人员对嵌件的预热装置也进行了研究。闫东等^[31]设计制造了一套以红外线陶瓷辐射器为热源的嵌件模内预热装置,以PP/GF热压板材为研究对象,讨论了不同加热温度和加热距离对嵌件表面升温速率以及加热均匀性的影响,得到最优加热参数为600℃和15mm。该装置满足了嵌件表面快速均匀的加热需求,为提高一体成型制件的界面性能创造了有利条件。Ohishi等^[14]等利用陶瓷型远红外加热器、金属和碳加热型中红外加热器等三种预热装置分别对PA6/GF板材进行加热,讨论了三种装置的加热效果(达到设定加热温度所需时间、加热功耗和加热后温度分布)以及加热机制对一体成型制件力学性能的影响。研究表明,金属型中红外加热器的效果最好,制件界面结合强度最高,而使用碳加热元件的中红外加热器加热温度过高,导致聚合物基体的热解致使成型制件界面结合性能最低。

除了提高嵌件的预热温度外,在一定范围内提高成型过程中的模具温度,也可以提高一体成型制件的界面性能。例如Deng等^[32]以编织碳纤维(WCF)增强PEEK为嵌件材料,以PEEK/SCF为注塑材料,利用一体成型工艺制备了PEEK/WCF-PEEK/SCF复合材料,并利用短梁剪切试验和微观形貌观察的方法研究了模具温度对一体成型制件界面性能的影响。研究结果显示,当模具温度从190℃升高到260℃时,ILSS从15.8MPa显著提高到50MPa,并且复合材料的破坏模式也从整体分层破坏转变成了局部分层和弯曲断裂的混合破坏模式。Joppich等^[33]设计并制造了两种用于一体成型的模具,可以在成型过程中对嵌件和注射熔体进行实时温度监测,记录了两种预热温度(130,270℃)和三种熔体温度下成型过程中的温度数据。结果表明,在PEI/SGF熔体注塑到PEI/CF嵌件表面之前,两种嵌件的表面温度均会达到模具温度(165℃),这表明模具温度在一体成型工艺中的重要性。

在一定范围内提高熔体温度和保压压力对提高界面性能也有积极作用。Giusti等^[15]采用一体成型工艺制备了一种T型接头试件,通过对试件进行拉拔试验和结果方差分析,

评估了熔体温度和保压压力对最大结合强度(UTS)的影响。结果表明,提高熔体温度和保压压力有助于提高界面结合强度,机理在于加速了界面处聚合物基体之间的紧密接触和大分子的相互扩散。当对嵌件进行预热时,保压压力的作用更大。当在较高的温度下均匀预热嵌件时,过量注入的DFRT熔体可以渗入嵌件表面,并填补由于嵌件表层膨胀造成的空隙。这一现象扩大了两种异质材料界面的接触面积,并形成了机械锁合结构,从而提高了界面的结合性能。卢一等^[16]利用Moldflow软件仿真和试验方法,研究了预热温度、熔体温度和保压压力对一体成型制件界面性能的影响。研究结果表明,当对嵌件没有进行预热时,提高熔体温度和保压压力显著提高界面剪切强度,但当将嵌件预热至其熔点温度以上时,提高熔体温度和保压压力对界面剪切强度的提升作用较弱。

3 结晶效应对界面性能的影响

界面结晶效应会对一体成型复合材料的界面性能产生明显影响。Jiang等^[8]采用一体成型的方法制备了PP/GF-PP/SGF复合材料试件,通过控制PP/GF和PP/SGF界面处的温度梯度,利用X射线衍射和拉伸搭接剪切试验,研究了界面附近树脂基体的结晶度和晶体尺寸对界面性能的影响。结果表明,界面处PP树脂基体具有 α 和 β 两种晶型,相对于 β 晶, α 晶对热梯度更加敏感,随着界面热梯度的降低,界面处PP树脂基体的结晶度和球晶尺寸逐渐增大,界面的剪切强度也逐渐提高。Deng等^[32]利用一体成型工艺方法制备了PEEK/WCF-PEEK/SCF复合材料,通过控制模具温度和熔体温度,研究了结合界面处树脂的不同结晶度、晶粒尺寸对界面性能的影响。结果表明,当模具温度从190℃升高到260℃,界面附近PEEK基体结晶度从12.8%升高到了39.8%,晶粒尺寸从47nm增长到了60nm,ILSS也从15.8MPa显著升高到50MPa,但当熔体温度从380℃升高到420℃时,界面附近PEEK基体结晶度和晶粒尺寸并没有显著的变化规律。

此外,界面的结晶形态也会影响结晶高聚物界面的结合性能,例如,Yan等^[34]利用等规聚丙烯(iPP)进行注塑包覆成型,通过控制熔体温度、模具温度、注射压力和注射速度等热力工艺因素,研究了不同界面结晶形态的形成和形态发展,以及界面结晶形态与界面结合强度之间的关系。结果表明,横晶层(TCL)的形成可以显著提高界面结合强度,但串晶层(SKL)的存在降低了界面结合强度。Yang等^[35]的研究也证明结晶高聚物界面横晶的存在会提高界面性能。

4 一体成型复合材料的界面结合机制

热塑性复合材料一体成型界面是在DFRT通过模具腔注塑到CFRT嵌件表面的瞬间形成的,在温度、压力等多场耦合的作用下,两种材料在界面处黏合、固结^[36]。当前,研究人员认为在界面黏合、固结过程中,界面处的树脂融合、机械锁合和纤维钉扎等界面结合机制是影响一体成型复合材料界面性能的主要原因。

在界面黏合过程中,界面处树脂融合程度对界面性能的好坏起到了关键作用。树脂融合过程起始于界面处聚合物之间的紧密接触,将聚合物已相互接触表面积与完全接触时总表面积之比定义为紧密接触的程度^[37]。达到完全紧密接触的时间(τ_{ic})与界面处树脂基体的黏度(η_0)成正比,与施加的压力(P)成反比^[38],如式(1)所示:

$$\tau_{ic} \propto \frac{\eta_0}{P} \quad (1)$$

当聚合物之间发生紧密接触之后,由于热运动,聚合物链可以扩散过界面,随后聚合物链与相邻表面聚合物链发生纠缠,该过程称为愈合,达到完全愈合的时间称为 t_w ,愈合程度(D_h)被定义为相对于最大结合强度(σ_∞)的相对强度。非等温条件下,非晶态热塑性聚合物的愈合程度随时间 t 的发展如式(2)所示^[39]:

$$D_h = \frac{\sigma(t)}{\sigma_\infty} = \left\{ \int_0^t \frac{1}{t_w[T(t)]} dt \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

式(2)中的 $T(t)$ 为界面处温度。显然, D_h 的提高表明了界面强度的提升。通过非晶态聚合物树脂融合理论可知,界面结合强度是温度、压力 and 时间的函数。通过提升 P ,降低界面 η_0 ,提升界面温度 $T(t)$,对提升界面性能有利。由于非晶态高聚物和半晶态高聚物的扩散过程不同^[40-41],因此该模型只适用于非晶态高聚物和处于熔融状态的半晶态高聚物。为了解决上述问题,Akkerman等^[5]引入了一种新的方法来预测半晶态高聚物的愈合程度,不再使用聚合物的愈合时间来描述聚合物链的扩散和缠结能力,而是假设结晶度主导聚合物链的扩散和缠结。在达到熔融温度之前,聚合物链的扩散和缠结受到限制,无法实现愈合,当达到熔融温度以上,聚合物中的晶体结构将会消失,聚合物可以实现完全愈合。该文献假设半晶态高聚物的熔融程度(D_m)与 D_h 成比例关系,进而实现对界面结合强度的预测。

上述理论的发展为热塑性复合材料一体成型界面树脂融合机制的研究奠定了良好的基础。为了更加深入地研究树脂融合机制对一体成型界面性能的影响,研究人员开展了一系列试验和仿真模拟研究。Wang等^[42]采用一体成型的方法制备了PA6/CF-PA66/SGF复合材料,在成型之前,将其中一个嵌件进行150℃预热(PH样品),另一个则没有预热(NPH样品),成型后利用扫描电子显微镜对样品界面进行微观结构观察。其中NPH样品界面显示为不规则且具有空隙的带状,这表明界面处CFRT和DFRT树脂基体不能很好地流动及融合,相反PH样品界面没有缺陷并且融合良好。以上结果表明,预热对界面处树脂的流动和聚合物链的扩散有积极作用,可促进界面的形成进而提高界面强度。然而,利用宏观试验的方法难以获取界面树脂融合机制的详细信息,因此研究人员采用分子动力学模拟(MD)的方法对界面树脂融合行为进行分析。Jiang等^[43]利用MD方法,研究了不同熔体温度和注射压力下制备的PP/GF-PA66/SGF复合材料的界面树脂融合机制,忽略界面处纤维的影响,将界面模型简化

为PP-PA66界面的原子模型。结果表明,在注射压力的作用下,随着时间的推移,PA66和PP层的间隙逐渐消失,聚合物链的扩散主要发生在界面区域附近,部分聚合物链穿过界面层与另一层聚合物链发生缠结。此外,界面扩散系数和结合能随熔体温度和注射压力的升高而增大。

在界面形成过程中,DFRT和CFRT的机械锁合作用对界面性能的提升具有重要作用。机械锁合源于两种材料界面处的不规则形貌,如凹坑和孔隙等,当两种材料相互接触,一种材料会渗入到另外一种材料表面的凹坑和孔隙中,材料固结后机械锁合作用会增强界面结合强度^[44-45]。Akpınar等^[46]利用力学钻孔的方法,在注塑PP/SGF之前对PP/GF嵌件板材钻取锥形孔,通过制备T型接头试件和拉拔试验,研究了孔数、孔径对界面结合强度的影响。研究结果表明,随着孔数的增加,界面结合强度显著提高,这主要是因为钻孔增强了界面处的机械锁合作用。当孔径从1mm升高到2mm时,界面结合强度表现出先增加后减小的趋势,这主要是因为增加孔径的过程中,孔的锥度先增加后减小,在拉拔试验中,锥度的增加会提高PP/SGF对孔侧向的压应力,进而提高界面结合强度。Liebsch等^[47]采用光纤激光处理技术选择性去除嵌件表面基体树脂,从而增强嵌件和DFRT材料间的机械锁合作用。结果表明,对于单搭接剪切试样和加筋平板试样,激光预处理提高了界面结合强度。力学钻孔和高能激光处理虽然可以提高界面结合强度,但会造成嵌件表面和内部形成裂纹,降低热压-注塑制件整体性能。针对上述问题,Wei^[48]等采用砂纸打磨、喷砂和纳米尺度的互连等方法对嵌件表面进行了预处理,并通过开展双悬臂梁试验、端部缺口弯曲试验、单搭接剪切试验、十字拉伸试验和三点弯曲试验,研究了预处理对界面性能和整体性能的影响。结果表明,通过对界面进行预处理,界面剪切强度和I型断裂韧性,以及整体拉伸、弯曲强度均得到了改善。随着使用的喷砂粒径和砂纸粗糙度的减小,嵌件表面粗糙度下降,界面I型断裂韧性以及整体拉伸强度升高,界面剪切强度、II型断裂韧性以及整体弯曲强度下降。

目前对于一体成型复合材料界面性能的研究大多依赖于试验,而试验除了成本高、耗时长外,只能获得界面的极限载荷和失效模式。为了更好地研究界面处的起裂和扩展问题,Wei等^[49]基于界面机械锁合机制针对一体成型复合材料界面进行了有限元仿真模拟研究,发现界面是类似于波浪形的机械锁合结构,如图3所示。通过建立一体成型混杂材料的介观代表性体积单元(RVE)模型,模拟研究了波高(H)、波宽(W)和界面层厚度(T)等界面几何参数对界面性能的影响。研究结果表明,增大 H 会增加机械锁合的程度,使得界面剪切强度提高;而增加 W 会减少机械锁合的位点,从而降低界面剪切强度;增加 T 会增大异质材料的连接区域,进而提高界面剪切强度。通过有限元模拟发现,裂纹首先出现在界面区域,然后在注塑区域基体中损伤累积,进而纤维-基体界面发生脱黏。热压区域的失效顺序由纤维-基体界面和基体的

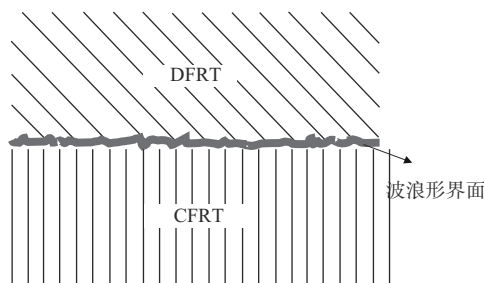


图3 界面波浪形机械锁合结构

相对强弱决定,二者较弱者先发生破坏。

除了树脂融合和机械锁合机制外,研究人员发现一体成型复合材料还存在一种纤维钉扎效应的界面结合机制。在将DFRT注入到CFRT的表面时,部分非连续纤维会穿过界面扎进嵌件层,类似一种“板上钉钉”的效果。Jiang等^[50]对纤维钉扎效应进行了深入的研究。为了指导试验设计,他们首先利用RVE方法建立了纤维钉扎效应的数学模型,找出影响纤维钉扎效应的主要因素:模具温度、熔体温度和纤维体积分数,随后采用一体成型工艺制备了PEEK/WCF-PEEK/SCF复合材料薄板制件,通过控制模具温度、熔体温度和纤维体积分数,研究了纤维钉扎效应对界面性能的影响,以及工艺、材料参数与纤维钉扎效应的关系。结果表明,由于纤维钉扎效应的存在,界面结合强度得到了提高,并且随着钉扎深度加深,界面结合强度变大;与熔体温度相比,模具温度对树脂融合和纤维钉扎效应的影响更大,当模具温度达到临界愈合温度(270℃)之上时,界面处树脂实现完全融合,并且纤维的钉扎深度达到最大;此外,纤维钉扎效应随着纤维体积分数的增加而增强。何芳芳^[51]的研究也观察到注塑的非连续纤维在一定程度上穿过界面嵌入嵌件表面。

5 结语

异质界面是热塑性复合材料热压-注塑一体成型制品性能提升和应用推广的主要瓶颈。为提高界面性能,除了提高模具温度、熔体温度和保压压力,在不超过嵌件基体分解温度的前提下,提高预热温度也相当关键。同时,CFRT和DFRT选用相同的增强纤维和基体树脂、增强界面结晶效应也可以提高界面性能。可以将仿真模拟技术与试验相结合,如通过MD对一体成型界面树脂融合过程进行模拟,通过有限元仿真对界面固结后起裂和扩展问题进行模拟,节省试验成本的同时获得更多界面信息。

不同于纯树脂注塑包覆成型,一体成型界面附近存在大量增强纤维,在结晶效应与界面性能影响规律研究过程中,存在难以准确提取界面区域、观察界面结晶形态困难等问题。此外,一体成型制件界面微观跨尺度结合机制较为复杂,既有宏观层次的机械锁合,又有介观层次的纤维钉扎,还有微观层次的树脂融合,以及一些尚未明确的结合机制,现阶段对界面结合机制的研究尚不够完善,未来对界面结合机制的研究将朝着多参数、精细化方向发展。优化和改善制件界面性能可以极大地发挥一体成型技术优势,促进热塑性复

合材料热压-注塑一体成型工艺在汽车工业、轨道交通、航空航天等重点领域发挥更大的应用价值。

参考文献

- [1] 张婷.航空制造技术,2013,435(15):32-35.
Zhang Ting. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 435 (15):32-35.
- [2] 刘彬,等.航空制造技术,2021,64(22):80-90.
Liu Bin, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64 (22):80-90.
- [3] Giusti R, et al. Modeling the adhesion bonding mechanism in over-molding hybrid structural parts for lightweight applications[C]// Key Engineering Materials. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2014:915-921.
- [4] Fiorotto M, et al. International Journal of Material Forming, 2013, 6 (1):179-185.
- [5] Akkerman R, et al. Frontiers in Materials, 2020, 7. DOI: 10.3389/fmats.2020.00027.
- [6] Aliyeva N, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 14. DOI:10.1016/j.compositesa.2021.106525.
- [7] 郑兵.编织碳纤维增强热塑性复合材料热压-注塑整体化成形关键技术[D].武汉:华中科技大学,2019.
Zheng Bing. Key technologies of thermoforming-injection integrated forming process for woven carbon fiber reinforced thermoplastic composites[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [8] Jiang B, et al. Polymer Composites, 2020, 41(10): 4064-4 073.
- [9] Tanaka K, et al. WIT Trans Built Environ, 2016, 166:317-327.
- [10] Tanaka K, et al. WIT Transactions on The Built Environment, 2016, 166:287-296.
- [11] 符亮,等.中南大学学报:自然科学版,2019,50(5):1 075-1 081.
Fu Liang, et al. Journal of Central South University: Science and Technology, 2019, 50(5):1 075-1 081.
- [12] Neveu F, et al. Composite Structures, 2022, 284. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106525.
- [13] Paramasivam A, et al. Journal of Composite Materials, 2021, 55 (29):4 387-4 397.
- [14] Ohishi M, et al. Journal of Mechanical Engineering and Automation, 2017, 7(1):1-7.
- [15] Giusti R, et al. Polymer Engineering & Science, 2018, 58(4): 592-600.
- [16] 卢一,等.中南大学学报:自然科学版,2018,49(7):1 626-1 633.
Lu Yi, et al. Journal of Central South University: Science and Technology, 2018, 49(7):1 626-1 633.
- [17] Fu L, et al. Polymer Testing, 2020, 91. DOI:10.1016/j.polymertesting.2020.106870.
- [18] Hirsch P, et al. Polymers, 2021, 13(21). DOI: 10.3390/polym13213846.
- [19] Lafranche E, et al. Key Engineering Materials, 2014, 611:821-828.

- [20] Pereira A, et al. *Materials*, 2021, 14(23). DOI: 10.3390/ma14237299.
- [21] Ray K, et al. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 33(8): 5 273–5 278.
- [22] Wei J, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 220. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108968.
- [23] Stegelmann M, et al. Integration of textile reinforcements in the injection-moulding process for manufacturing and joining thermoplastic support-frames[C]/20th International Conference on Composite Materials(ICCM). Aalborg, Copenhagen: Aalborg University, Technical University of Denmark, 2015:19–24.
- [24] Tajuddin M, et al. *BioResources*, 2016, 11(2):5 600–5 617.
- [25] Khan T, et al. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2018, 37(11):770–779.
- [26] Wis A A, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(20). DOI:10.1002/app.48692.
- [27] Aliyeva N, et al. *Research Square*. 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2596389/v1.
- [28] Faruk O, et al. *Progress in Polymer Science*, 2012, 37(11):1 552–1 596.
- [29] Andrzejewski J, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(2). DOI:10.1002/app.49646.
- [30] Matsumoto K, et al. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38(13):616–627.
- [31] 闫东,等. *塑料工业*, 2016, 44(3):75–78.
Yan Dong, et al. *China Plastics Industry*, 2016, 44(3):75–78.
- [32] Deng T, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(48). DOI:10.1002/app.53222.
- [33] Joppich T, et al. *Procedia CIRP*, 2017, 66:137–142.
- [34] Yan B, et al. *ACS Applied Materials&Interfaces*, 2010, 2(11): 3 023–3 036.
- [35] Yang S, et al. *Macromolecules*, 2015, 48(12):3 965–3 973.
- [36] Valverde M A. An improved description of the bonding and consolidation for overmoulded thermoplastic composite ribbed plates[D]. Bristol:University of Bristol, 2021.
- [37] Butler C A, et al. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1998, 11(4):338–363.
- [38] Lee W I, et al. *Journal of Composite Materials*, 1987, 21(11): 1 017–1 055.
- [39] Yang F, et al. *Macromolecules*, 2002, 35(8):3 213–3 224.
- [40] De Gennes P G. *The Journal of Chemical Physics*, 1971, 55(2): 572–579.
- [41] Awaja F, et al. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2015, 29(15):1 593–1 606.
- [42] Wang Q, et al. *Polymer Testing*, 2018, 70:215–225.
- [43] Jiang B, et al. *Polymers*, 2020, 12(6). DOI: 10.3390/polym12061270.
- [44] Kim W S, et al. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010, 30(6):408–417.
- [45] 赵凡笛.聚碳酸酯透明件/有机硅涂层/TiO₂薄膜的耐紫外老化性能研究[D].郑州:郑州大学, 2017.
Zhao Fandi. Study on ultraviolet aging resistance of polycarbonate transparent parts with silicone coatings/TiO₂ films[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2017.
- [46] Akpınar S, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2022, 62(10): 3 206–3 217.
- [47] Liebsch A, et al. *Procedia CIRP*, 2019, 85:212–217.
- [48] Wei J, et al. *Composite Structures*, 2023, 309. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116740.
- [49] Wei J, et al. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 146. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107145.
- [50] Jiang W, et al. *Polymer Testing*, 2022, 108. DOI: 10.1016/j.polymer-testing.2022.107509.
- [51] 何芳芳.全塑混合成型注塑层的纤维取向及力学性能研究[D].长沙:中南大学, 2014.
He Fangfang. Fiber orientation and mechanical properties of injection molding in layer hybrid all-plastic technology[D]. Changsha: Central South University, 2014.