

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.09.028

连续纤维增强复合材料模内混合注射成型研究进展

陈杨,何继敏,常义,王胜于,白晓康

(北京化工大学塑料机械及塑料工程研究所,北京 100029)

摘要:介绍了连续纤维增强热塑性复合材料(CFRT)模内混合注射成型工艺的特点及应用,总结出分别以CFRT预浸料和连续纤维织物为嵌件的两种不同工艺方法,综述了注塑工艺、嵌件温度等对CFRT混合成型制品力学性能的影响,最后对模内混合注射成型技术今后的研究方向进行了展望,指出以模压成型的CFRT预浸料为嵌件并注塑短纤维增强热塑性塑料基体成型混合制品是未来发展趋势。

关键词:模内混合注射成型;连续纤维;力学性能;进展

中图分类号: TQ315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)09-0145-05

Research Progress of In-mold Hybrid Injection Molding of Continuous Fiber Reinforced Composites

Chen Yang, He Jimin, Chang Yi, Wang Shengyu, Bai Xiaokang

(Institute of Plastic Machinery and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : The characteristics and applications of the continuous fiber reinforced thermoplastic composite material (CFRT) in-mold hybrid injection molding process were introduced. Two different process methods using CFRT prepreg and continuous fiber fabric as inserts were summarized. The effects of injection molding process and insert temperature on the mechanical properties of CFRT hybrid molded products were reviewed. Finally, the future research direction of in-mold hybrid injection molding technology was prospected. It was pointed out that the use of compression molding CFRT prepreg as inserts and injection of short fiber-reinforced thermoplastic matrix molding hybrid products are the future development trend.

Keywords : in-mold hybrid injection molding ; continuous fiber ; mechanical property ; progress

随着环境污染加剧,汽车、航天等行业的零部件轻量化越来越得到人们重视^[1-2],纤维增强复合材料作为替代金属的主要材料,发挥着重要作用。其中强度高、比刚度大,耐热性、耐冲击性、结构稳定性好及使用寿命长的连续纤维增强热塑性复合材料(CFRT)以优异的性能和可回收性得到广泛应用^[3]。但CFRT多采用热压成型工艺,难以加工结构复杂的制品。注射成型作为塑料成型工艺中最重要的一种,具有成型结构复杂、效率高、周期短和可连续化生产的巨大优势。结合CFRT制品的优点,人们开发出了一种新的嵌件式注射成型工艺,即CFRT模内混合注射成型工艺。它是在塑料—金属模内混合注射成型^[4]的基础上提出的,其原理是将纤维增强体嵌件放入模具中^[5],通过在嵌件上注塑基体塑料而成型出CFRT制品。CFRT注射成型根据嵌件类型不同,一是将被加工成一定形状的CFRT预浸料作为嵌件,注塑基体塑

料而成型出辅助承力件或结构件。二是以被裁剪成后的纤维织物为嵌件,注塑基体塑料浸渍纤维从而成型出CFRT。相比塑料—金属模内混合注射成型,模内混合注射成型的界面粘接强度高、注塑层翘曲变形小,从而克服了塑料—金属混合成型过程中塑料与金属界面机械粘接效果差、易发生变形和产生应力集中的缺陷^[6],提高了产品品质又降低了质量。同时相比普通短玻纤注射成型和长玻纤注射成型,模内混合注射成型制品强度更高,并且表面质量好、没有浮纤等。

考虑到模内混合注射成型技术表现出来的加工效率高、周期短和可连续化生产等优势 and CFRT的应用前景,研究其成型工艺非常重要。笔者重点阐述模内混合注射成型技术的研究进展,介绍其成型过程和特点,分析工艺参数等对界面粘接性能和纤维浸渍效果的影响。

通信作者: 何继敏,博士,副教授,硕士生导师,主要从事超高分子量聚乙烯注塑成型及聚丙烯等注塑发泡成型研究

收稿日期: 2021-07-01

引用格式: 陈杨,何继敏,常义,等. 连续纤维增强复合材料模内混合注射成型研究进展[J]. 工程塑料应用,2021,49(9):145-149,154.

Chen Yang, He Jimin, Chang Yi, et al. Research progress of in-mold hybrid injection molding of continuous fiber reinforced composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9), 145-149, 154.

1 模内混合注射成型类型和工艺过程

嵌件式注塑的模内混合注射成型制品可根据增强体不同分为两个类型,一是嵌件为CFRT增强体,二是嵌件为连续纤维织物增强体。其中连续纤维织物包括有机聚合物纤维和无机(玻璃纤维、碳纤维等)纤维,当有机聚合物纤维作增强体嵌件并注塑同种聚合物基体材料时,制品称为单聚合物复合材料(SPC^[7])。

下面以GK公司利用模内混合注射成型技术生产的汽车撑杆构件为例,图1为原理示意图,其碳纤维增强复合材料嵌件式注射成型过程如下:

(1) 通过热压工艺将纤维织物增强塑料板热压成一定形状的复合材料嵌件。

(2) 使用机械手臂将复合材料嵌件安装固定在模具型腔内,红外加热嵌件到一定温度。

(3) 合模。经注塑、保压和冷却,在板材上覆盖注塑增强肋,开模后得到汽车撑杆构件。

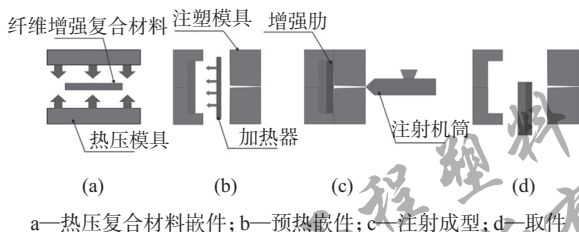


图1 模内混合注射成型加工过程示意图

对模内混合注射成型过程进行分析,可知嵌件与注塑层间界面粘接效果关系到制品整体质量。嵌件在放入模具型腔内之前需要进行热压、裁剪成型,为防止注塑过程中嵌件产生位移和变形需要采用多种定位装置,会极大增加模具结构的复杂性,提高对模具精度的要求。所以嵌件的界面粘接不良和模具加工困难成为制约该技术发展的主要原因。

2 模内混合注射成型工艺研究进展

国内外学者在模内混合注射成型中熔体与嵌件间界面粘接强度方面做了大量研究,得出粘接强度是决定制品性能的关键^[8]。针对注塑过程中存在的问题,解决嵌件与聚合物间界面粘接难点,提高粘接强度成为模内混合注射成型工艺发展的重点。目前已知预热嵌件、适当提高熔体温度和模具温度、增加保压时间,用Moldflow仿真软件模拟分析各工艺参数对模内混合注射成型制品界面粘接强度的影响规律从而优化工艺参数等,都可以有效提高界面粘接强度和结合质量。下面介绍模内混合注射成型工艺具体的研究现状。

2.1 CFRT为嵌件的注射成型研究

在嵌件的基础上进行二次注射成型功能件是模内混合注射成型重点研究方向。目前使用熔融浸渍法、粉末浸渍法、溶液浸渍法等成型工艺加工连续纤维增强热塑性预浸料已

非常成熟,其中热压、拉挤成型等技术生产的预浸料板材工艺简单、成本低廉,被作为嵌件广泛应用于模内混合注射成型中。关于复合材料嵌件与聚合物间界面粘接强度,人们提出了分子扩散理论,该理论指出粘接是高分子链相互缠结的结果。即在一定的压力下注塑聚合物,适当增加温度,延长保压时间会促进分子运动,使界面分子扩散造成的高分子链缠结明显增多,提高界面分子间的粘接强度^[9]。

(1) CFRT模内混合注射成型的应用。

朗盛旗下的连续纤维增强热塑性复合材料系列(Tepex)利用连续纤维增强聚酰胺6(PA6)胚料为嵌件,注塑短玻纤维增强聚酰胺66(PA66)成型的轻量化A柱首次应用于保时捷汽车,相比原来的高强度钢管减轻了约5 kg,但拥有相同抗侧翻能力^[10]。福吉亚汽车座椅公司在朗盛支持下利用该工艺成功开发出奥迪A8的后排座椅外壳,相比金属外壳,该复合材料外壳约轻45%,还能承受碰撞时的高机械载荷^[11]。

邹峰等^[12]发明了一种在热压纤维板嵌件上直接注塑附件的生产设备,首先在由黄麻、木纤维等植物纤维与聚丙烯(PP)材质混合热压成型的纤维板上钻出锥形孔或阶梯孔,小孔端一面朝着型腔放置在模具内再利用插针固定,通过钻孔往型腔内注塑附件。可以使成型附件与纤维板的连接强度增大3倍以上,从而省去胶水粘结,简化产品结构,减少了生产工序和生产成本。

曹相奎等^[13]发明了一种利用嵌件式模具注射成型纤维增强复合材料制品的方法,将树脂浸渍连续纤维成型的纤维增强复合材料进行加热后放入下模具后由上模具合模压成一定形状的嵌件,注塑同种树脂成型注塑品,该模具能很好防止嵌件的变形并能实现对嵌件的包覆成型。

(2) CFRT模内混合注射成型对制品性能的影响因素。

①工艺参数对相同基体制品性能的影响。

M. Fiorotto等^[14]将热压成型的斜纹玻纤维织物增强热塑性复合层压板作为嵌件置于模具中,注塑长玻纤维增强热塑性塑料用于形成包覆成型的格栅肋结构,研究了注塑速度、嵌件温度和熔体温度三种工艺参数对制品力学性能的影响。结果表明,当温度限制在不发生降解的最高熔融温度以下时,提高熔体温度会增加界面间分子扩散和缠结,从而显著提高层压板与肋结构的粘接强度,嵌件温度与注塑速度改变对粘接强度影响不大。对比有肋结构制件和无肋层压板发现,肋结构制件的比刚度和强度比无肋层压板高五倍左右,但改变工艺参数对比刚度大小没有多少影响。

何芳芳^[15]以热压成型的连续玻纤维增强聚丙烯(PP)基体板(厚2 mm)为嵌件,注塑玻纤维增强PP制备了混合注射成型板材试样,探究嵌件的存在对注塑层纤维取向及力学性能的影响。结果表明,通过Moldflow软件仿真模拟纤维取

向,嵌件的存在使试样整体纤维取向分布更加均匀,熔接线强度也有所降低,模具温度和熔体温度的提高有利于增强嵌件与基体间界面粘接效果,嵌件表面存在适当的粗糙度也会提高粘接质量。同时试样拉伸强度和弯曲强度随模具温度的升高而增大,模具温度从 30℃ 升到 90℃,试样拉伸强度和弯曲强度增加一倍以上,分别达到 57 MPa 和 85 MPa。熔体温度从 260℃ 升到 300℃,试样拉伸强度从 57 MPa 下降到 40 MPa。改变注塑速度和保压压力对拉伸强度和弯曲强度影响不大。

刘军霞等^[16]研究了模内混合注射成型中嵌件的存在对注塑层力学性能影响,从微观角度解释了 PP 结晶及玻纤在混合制件界面上渗入等行为,确定了最优成型工艺为熔体温度 270℃、模具温度 90℃、注塑压力 40 MPa、注塑速度 20 cm³/s。结果表明,模具温度、熔体温度对注塑层力学性能有较大影响;模具温度从 30℃ 升到 90℃ 时,试样的拉伸强度和弯曲强度提高了一倍左右,达到 56 MPa 和 84 MPa,所以适当提高模具温度可以提高界面粘接质量。熔体温度在 260℃ 以上时,试样的拉伸和弯曲强度会随熔体温度升高而逐渐降低,当熔体温度超过 280℃ 时会发生 PP 降解造成注塑层力学性能快速下降。并发现离浇口位置越近,粘接效果较好,从侧面证明了在适当温度范围内,温度越高,界面粘接情况越好的结论;以及嵌件微观结构的存在会促进界面重新熔融从而包覆纤维,垂直于熔体流动方向打磨嵌件表面比水平于熔体流动方向打磨嵌件表面更能促进纤维包覆渗入,提高界面粘接强度。

②工艺参数对不同基体制品性能的影响。

S. Y. Kim 等^[17]将碳纤维和橡胶相混合并热压成纤维增强热塑性复合材料嵌件,然后注塑 PA6 基体,制备了双组份双层结构的新型复合材料板材。结果表明,硝酸处理是对碳纤维进行等离子处理的最佳方法,可以改变碳纤维表面分子结构,增加粗糙度,改善界面分子间机械互锁,提高碳纤维和基体界面的结合强度。对比其它四种方式加工的试样(纯 PA6、碳纤维增强 PA6、橡胶颗粒填充 PA6、碳纤维和橡胶相嵌入 PA6),碳纤维和橡胶相嵌入 PA6 成型双组分双层结构复合板材试样的拉伸强度和冲击强度都有较大提高。其中相比纯 PA6 试样的拉伸强度和冲击强度分别提高 41.3% 和 105.7%,达到 90 MPa 和 14 kJ/m²。但该研究没有考虑注塑工艺参数和嵌件表面温度对注塑层力学性能及粘接强度的影响。

符亮等^[18]为了解决不同热塑性基体纤维增强复合材料界面间存在的粘接问题,采用全塑模内混合成型技术以连续玻纤增强 PP 复合材料为嵌件,注塑短玻纤增强 PA66 基体制备了混合成型试样。使用单因素实验法研究熔体温度、

嵌件温度、模具温度和保压压力对试样弯曲强度的影响规律。结果表明,试样弯曲强度随着熔体温度、嵌件温度、模具温度和保压压力的升高而增大。相比初始条件,增加嵌件温度和熔体温度可使试样弯曲强度分别提高 2.6 倍和 1.6 倍,而增加模具温度和保压压力仅使试样弯曲强度提高 30% 左右。并最终确定最优工艺组合:熔体温度 270℃、嵌件温度 210℃、模具温度 110℃ 和保压压力 50 MPa,此时试样弯曲强度高达 243 MPa。从而证明不同纤维增强热塑性塑料可以实现界面间分子扩散,形成良好的粘接质量。

③嵌件温度对制品性能的影响。

E. Lafranche 等^[19]在纤维质量分数为 70% 的连续玻纤增强 PA6 复合板材嵌件上注塑质量分数为 30% 的短玻纤增强 PA6 熔体。结果表明,混合成型试样的弯曲强度和界面剪切强度受嵌件温度、模具温度与注塑温度影响。通过对试样横向和纵向进行拉伸测试,发现嵌件温度在 150℃ 附近,纵向弯曲弹性模量、弯曲应力和表观层间剪切强度达到最大值,但嵌件温度对横向拉伸测试影响不大。当嵌件温度低于 150℃ 时,产生界面粘接不良,试样弯曲应力和表观层间剪切强度大大降低,但随着嵌件温度升高,试样弯曲应力和表观层间剪切强度逐渐增大;嵌件温度高于 150℃ 时,界面粘接质量良好,试样弯曲应力和表观层间剪切强度随嵌件温度升高变化不大。得出聚合物界面间分子的自扩散和互扩散存在温度界限,低于 150℃ 不会发生自扩散。

卢一等^[20]为了确定模内混合注射成型中连续玻纤增强热塑性复合材料热压板材嵌件与注塑质量分数为 30% 短玻纤增强 PP 间界面粘接强度受何因素影响,采用 Moldflow 仿真和实验验证的方法进行了研究。首先使用 Moldflow 软件进行单因素模拟仿真,研究了嵌件温度、保压压力和熔体温度对界面粘接温度场及压力场的影响规律,并用实验验证仿真结果的正确性。结果表明,嵌件是否加热对界面粘接强度的影响非常显著,在同种工艺下,红外加热嵌件的成型试样层间剪切应力是未加热嵌件成型试样的一倍左右。在嵌件达到结晶温度 165℃ 之前,试样层间剪切应力随着嵌件温度升高而逐渐增大,其中各工艺参数中熔体温度对粘接强度影响最大。加热到熔点温度以上时,随着熔体温度上升,分子扩散和短纤维穿越粘接界面的数量增多,但层间剪切应力增幅不大。

闫东等^[21]针对模内混合注射成型中嵌件表面温度对界面粘接强度的重要影响,设计了一套以红外线陶瓷加热器为热源的加热装置及电气控制系统。研究了加热温度和加热距离对连续玻纤增强 PP 热压板材(尺寸为 79.5 mm × 104 mm × 2.5 mm)嵌件表面升温速率的影响,结果表明,加热器在 650℃ 和 15 mm 距离时为最优参数组

合,可以使嵌件表面加热更加均匀,制品性能更好。

2.2 纤维织物为嵌件的注射成型研究

近年来,由于对连续纤维织物增强热塑性复合材料的需求不断扩大,人们开发出多种可以以纤维织物为增强体的复合材料成型技术。如热压成型、拉挤成型、热压罐固化成型和真空罐注成型等,但存在周期慢、工艺复杂和制品结构较简单等缺点。所以人们开始尝试以纤维织物为嵌件的模内混合注射成型技术加工 CFRT,将纤维织物嵌在模腔中间,利用锁模力固定,再注塑聚合物熔体,经保压冷却得到 CFRT。相比传统纤维织物增强热塑性复合材料成型技术,模内混合注射成型技术具有周期短、工艺简单和可连续化生产等优点。

(1) 工艺参数对 SPC 制品性能的影响。

Wang Jian 等^[22]通过在注塑机模腔内预置 PP 纤维织物增强体嵌件,并注塑 PP 基体制备 PP SPC,验证模内混合注射成型技术制备 PP SPC 的可行性。结果表明,在注塑压力 140 MPa、喷嘴温度 220℃下成型的 PP SPC 试样具有 43.3 MPa 的最大弯曲强度,相比未进行纤维增强的纯 PP 试样,弯曲强度提高了 54.2%。合理提高注塑压力和喷嘴温度能提高试样弯曲强度,但过高的注塑压力和喷嘴温度会导致纤维织物位移变形以及纤维融化。观测试样外观,纤维织物背对注射口的一面未被完全浸渍,在模具设计上存在缺陷。

Mao Qianchao 等^[23]以高密度聚乙烯(PE-HD)树脂熔纺成平纹纤维织物为增强体嵌件,使用双面胶带分别将织物粘在动模、定模两侧模腔内壁上,注塑相同 PE-HD 基体成型了 PE-HD SPC。研究了不同工艺参数对试样力学性能的影响,并采用 Moldflow 对实验结果进行对比验证。结果表明,注塑温度对 PE-HD SPC 试样力学性能影响最大,较高的注塑温度可以提高熔体流动性,增加纤维浸渍效果。当注塑温度为 240℃时,纤维质量分数为 30% 的试样拉伸强度高达 50 MPa,为非增强 PE-HD 试样的 2.8 倍。在 200~240℃内,PE-HD SPC 试样的剥离强度随着注塑温度的升高而增加,最大值达到 16.7 N/cm,证明了纤维和基体有很好的粘结性和相容性。

Wang Jian 等^[24]利用模内混合注射成型技术把 PP 纤维织物夹在模腔中间,注塑 PP 基体填充和浸渍纤维两侧,在 30 s 短周期内制备了表面光滑、性能优异的 PP SPC。通过正交实验分析喷嘴温度、保压时间、注塑压力和保压压力对单聚合物复合材料性能的影响。结果表明,喷嘴温度和保压时间对 PP SPC 的性能有很大影响,在 160~200℃注塑温度范围内,较低的喷嘴温度既防止纤维融化又能在较长的保压时间内提高纤维浸渍程度。注塑压力主要对提高渗透起作用,保压压力对提高基体粘附力起主要作用。相比纯 PP 样

品,PP SPC 拉伸强度平均提高 70% 左右,普遍达到 32 MPa 以上。使用扫描电子显微镜对 PP SPC 微观形貌分析,得出纤维和基体有很好的相容性和粘结性。

Mao Qianchao 等^[25]以 PP 颗粒熔纺成细丝织成的纤维织物为增强体嵌件,经热硅油进行热处理后用双面胶带粘在模腔内壁上,注塑相同 PP 基体以成型 PP SPC。结果表明,随着注塑温度的升高,基体与纤维间的分离逐渐减少,试样拉伸强度逐渐增大。当注塑温度为 260~265℃时,纤维质量分数为 36% 的试样拉伸强度最大值是 70 MPa,是纯 PP 拉伸强度的 2.3 倍。当注塑温度提高到 280℃时,一部分纤维被融化,导致试样拉伸强度快速下降到 39 MPa。同时熔纺 PP 纤维的热处理结果及热行为结果显示,纤维在注塑过程中能保持力学性能和完整性。

王建等^[26]选用传统平纹编织 PP 纤维布(面密度为 0.136 kg/cm²,每股纱线含 70 根纤维丝,纤维丝直径约为 48 μm,纤维布厚度约为 0.5 mm,纤维熔点为 172℃)与 PP 粒料(密度为 0.896 g/cm³,熔体流动速率为 18 g/10 min,熔点 142℃)采用模内混合注射成型制备了 PP SPC。使用 Moldex3D 软件对不同注塑温度进行数值模拟,并对比实验结果。研究表明,在相同注塑压力、保压压力和保压时间等工艺参数下,PP SPC 注射成型过程和普通 PP 注射成型过程在温度、黏度、翘曲变形方面存在差异。由于熔体渗透嵌件而产生较大预应力,造成 PP SPC 试样最大翘曲值比纯 PP 试样的最大翘曲值增加 10% 左右,并得出熔体注塑温度在 180℃时能取得很好的界面结合效果而且纤维不会发生融化。

王遂等^[27]为研究嵌件式注射成型过程中基体与增强体间的界面粘接采用了超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)纤维增强低密度聚乙烯(PE-LD)基体,在偏光显微镜下模拟了纤维与基体的结合过程,研究不同因素对界面结晶形态的影响。研究表明,适当的温度和剪切作用都有助于界面横晶的产生,提高界面结合效果,增强制品力学性能;并且温度比剪切对制品性能的影响大,注塑温度在 125~135℃时能保证纤维与基体良好结合的同时不减弱纤维增强作用;界面横晶产生同样受纤维丝间的相互影响,说明在嵌件式注射成型过程中增强体结构对基体渗透和界面结合有较大影响。

Wang Jian 等^[28]采用模内混合注射成型技术以 PE-UHMW 纤维织物为增强体嵌件,并注塑 PE-LD 基体制备了 PE SPC。结果表明,PE SPC 试样最佳拉伸、弯曲和冲击强度分别为 23.8 MPa,14.47 MPa 和 101.64 kJ/m²,比纯 PE 试样分别提高 163.90%,56.58% 和 69.43%。纤维与基体结合状况受注塑温度、注塑速度、保压时间和保压压力的工艺参数影响,其中注塑温度影响最大,其次为注塑速度、保压时

间和注塑压力。较高的注塑温度有利于基体渗透纤维,但过高的注塑温度也会导致在熔融浸渍过程中部分纤维融化,进而降低 PE SPC 力学性能。由于模具夹紧力不足、熔体流动阻力大,导致注塑过程中纤维织物会发生变形,造成数据存在一定偏差。

(2) 无机纤维织物嵌件。

O. Solorza-Nicolas 等^[29]将 $0/90^\circ$ 或 $\pm 45^\circ$ 取向的玻璃纤维编织网格布粘在聚碳酸酯 (PC) 薄膜上作为嵌件插入模腔中,注塑 PC 基体后利用注塑压缩模具制备了新型复合材料板材。通过 Moldflow 数值模拟分析,结果表明,在注塑过程中出现了纤维变形和浸渍不充分情况,并指出纤维不进行化学侵蚀也能得到性能良好的连续玻纤增强热塑性复合材料。但由于纤维存在导致试样发生翘曲变形,严重制约了该工艺的发展,如图 2 所示。

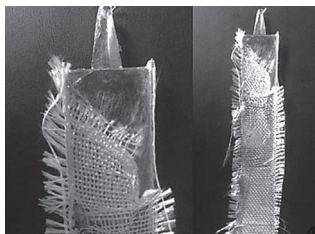


图 2 纤维不良浸渍和变形

3 结语

综合前人的研究可知,模内混合注射成型技术在工艺参数对嵌件与聚合物间粘接强度影响规律等方面的研究取得了较大进展。但成型模具结构复杂及对加工工艺要求较高,让该技术的应用与推广受到了很大限制。所以除了以复合材料为嵌件的成型方式被应用到实际生产中外,以纤维织物为嵌件的成型方式由于纤维的浸渍、固定和冲击变形等问题还没完全解决,其成型产品鲜有报道。

鉴于模内混合注射成型表现出来的周期短、可连续化生产的优势以及塑料制品回收再利用意识的提高,尽快实现模内混合注射成型技术快速工业化批量生产,对推动我国塑料加工行业高质量发展具有重大意义。

参考文献

- [1] 陈林山,等. 塑料工业,2017,45(7):103-106.
Chen Linshan, et al. China Plastics Industry, 2017, 45(7):103-106.
- [2] Klaus F, et al. Applied Composite Materials, 2013, 20(2):107-128.
- [3] 孙银宝,等. 航空科学技术,2016,27(5):1-7.
Sun Yinbao, et al. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(5):1-7.
- [4] Grujicic M, et al. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1):363-373.
- [5] Fiorotto M, et al. International Journal of Material Forming, 2013, 6(1):179-185.
- [6] 杨卫民,等. 注射成型新技术 [M]. 北京:化学工业出版社, 2008:392-421.
Yang Weimin, et al. New technology of injection molding[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008:392-421.
- [7] Capiati N J, et al. Journal of Materials Science, 1975, 10(10):1 671-1 677.
- [8] Jiang Genjie, et al. Society of Plastics Engineers Inc, 2010, 50(4):719-729.
- [9] Jiang Genjie, et al. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2014, 53(1):9-18.
- [10] 佚名. 化工新型材料, 2019, 47(11):268.
None. New Chemical Materials, 2019, 47(11):268.
- [11] Grace. 上海化工, 2019, 44(8):15.
Grace. Shanghai Chemical Industry, 2019, 44(8):15.
- [12] 邹峰,等. 纤维板上直接注塑附件的生产工艺及其生产装置: CN106273219A[P]. 2017-01-04.
Zou Hao, et al. Production process and production device of direct injection molding accessories on fiber board: CN106273219A[P]. 2017-01-04.
- [13] 曹相奎,等. 利用纤维增强复合材料的嵌件注塑成型方法及利用其的注塑成型品: CN107567375A[P]. 2018-01-09.
Cao Xiangkui, et al. Insert injection molding method using fiber reinforced composite material and injection molded product using the same: CN107567375A[P]. 2018-01-09.
- [14] Fiorotto M, et al. International Journal of Material Forming, 2013, 6(1):179-185.
- [15] 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 property of injection molding layer in all-plastic hybrid technology[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [16] 刘军霞,等. 上海塑料, 2018(3):25-31.
Liu Junxia, et al. Shanghai Plastics, 2018(3):25-31.
- [17] Kim S Y, et al. Carbon, 2011, 49(15):5 329-5 338.
- [18] 符亮,等. 中南大学学报:自然科学版, 2019, 50(5):1 078-1 081.
Fu Liang, et al. Journal of Central South University: Science and Technology, 2019, 50(5):1 078-1 081.
- [19] Lafranche E, et al. Key Engineering Materials, 2014, 23(5):821-828.
- [20] 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.
- [21] 闫东,等. 塑料工业, 2016, 44(3):75-78, 82.
Yan Dong, et al. China Plastics Industry, 2016, 44(3):75-78, 82.
- [22] Wang Jian, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 130(3):2 176-2 183.
- [23] Mao Qianchao, et al. Polymer Engineering & Science, 2015, 55(11):2 448-2 456.

合材料的选择、结构设计和优化特别是易碎盖中薄弱区的设计和优化方面开展了大量的数值模拟和试验验证等研究工作,取得了较为丰富的研究成果,为树脂基复合材料易碎盖技术的发展提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 张艳,等.理化检验-物理分册,2019,55(3):145-150.
Zhang Yan, et al. PTCA, Part A: Phys. Test., 2019, 55(3), 145-150.
- [2] 王岩,等.纤维复合材料,2019(3):49-52.
Wang Yan, et al. Fiber Composites, 2019(3):49-52.
- [3] 赵云峰,等.宇航材料工艺,2016(4):1-7.
Zhao Yunfeng, et al. Aerospace Materials & Technology, 2016(4):1-7.
- [4] 熊健,等.复合材料学报,2021,38(6):1629-1650.
Xiong Jian, et al. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2021, 38(6): 1629-1650.
- [5] 李斌太,等.航空材料学报,2016,36(3):92-100.
Li Bintai, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 92-100.
- [6] 徐文彬.科学技术创新,2019,17:88-89.
Xu Wenbin. Scientific and Technological Innovation, 2019, 17:88-89.
- [7] 魏凤春,等.工程塑料应用,2008,36(1):41-43.
Wei Fengchun, et al. Engineering Plastics Application, 36(1):41-43.
- [8] Doane W J. Frangible fly through diaphragm for missile launch canister: US Pat.4498368[P].1985.
- [9] Wang Huifang, et al. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1676, 012105.
- [10] 周光明,等.南京航空航天大学学报,2004,36(6):693-696.
Zhou Guangming, et al. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(6), 693-696.
- [11] 周光明,等.宇航学报,2006,27(2):276-280.
Zhou Guangming, et al. Journal of Astronautics, 2006, 27(2):276-280.
- [12] 周光明,等.宇航学报,2007,28(3):707-712.
Zhou Guangming, et al. Journal of Astronautics, 2007, 28(3): 707-712.
- [13] 钱元,等.航空学报,2012,33(3):487-493.
Qian Yuan, et al. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3), 487-493.
- [14] 曹然,等.固体火箭技术,2015,38(4):549-553.
Cao Ran, et al. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(4): 549-553.
- [15] 蔡登安,等.固体火箭技术,2016,39(6):797-802.
Cai Deng'an, et al. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(6):797-802.
- [16] Cai Deng'an, et al. Journal of Composite Materials, 2017, 51(18): 2607-2617.
- [17] 钱元,等.航空学报,2013,34(4):826-832.
Qian Yuan, et al. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(4), 826-832.
- [18] 徐澧明,等.上海航天,2021,38(1),119-127.
Xu Liming, et al. Aerospace Shanghai, 2021, 38(1), 119-127.
- [19] 孙志彬,等.南京航空航天大学学报,2012,44(6):803-808.
Sun Zhibin, et al. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(6):803-808.
- [20] Zhou Guangming, et al. Appl Compos Mater, 2016, 23: 623-638.
- [21] Wu J H, et al. Proc Inst Mech Eng, 1999, 213, Part G, 187-195.
- [22] Kam T Y, et al. Composite Structures, 1999, 47: 563-569.
- [23] Zeng Wei, et al. Applied Mechanics and Materials, 2013, 395-396: 55-59.
- [24] 李文龙,等.弹箭与制导学报,2019,39(1):21-24.
Li Wenlong, et al. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019, 39(1): 21-24.
- [25] 李文龙,等.兵器装备工程学报,2016,37(12):135-139.
Li Wenlong, et al. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(12):135-139.
- [26] 安庆升,等.复合材料科学与工程,2021(5):73-79.
An Qingsheng, et al. Composites Science and Engineering, 2021(5):73-79.
- [27] 王遂,等.材料科学与工艺,2017,25(1):92-96.
Wang Sui, et al. Materials Science and Technology, 2017, 25(1):92-96.
- [28] Wang Jian, et al. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2018, 31(8):1013-1028.
- [29] Solorza-Nicolas O, et al. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(2):1-8.
- [24] Wang Jian, et al. Composites Science and Technology, 2015, 117(5):18-25.
- [25] Mao Qianchao, et al. Composites Science and Technology, 2015, 106:47-54.
- [26] 王建,等.高分子材料科学与工程,2016,32(9):108-112, 118.
Wang Jian, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2016, 32(9):108-112, 118.

(上接第149页)