

<http://pmse.scu.edu.cn>

二次注射成型界面结合强度的研究现状及技术展望

李方舟¹, 吴琼³, 周静³, 颜坤³, 罗兵³, 许忠斌^{1,2,4}

(1. 浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学宁波科创中心, 浙江 宁波 315000; 3. 贝隆精密科技股份有限公司, 浙江 宁波 315400; 4. 材料成型集成技术与智造装备浙江省工程研究中心(浙大城市学院), 浙江 杭州 310015)

摘要:二次注射成型技术具有工序流程短、制造成本低、生产效率高等诸多优势,在汽车制造、消费电子、轻工、通信等领域应用广泛。界面强度是影响二次注射成型产品质量的关键因素,文中总结了近几年国内外二次注射成型界面结合强度的研究,分析了界面结合强度的影响因素,讨论了不同影响作用原理、特点和优劣势,阐述了二次注射成型技术在不同领域中的应用,最后对二次注射成型技术未来的发展进行了展望。

关键词:二次注射成型;界面结合强度;影响因素;应用

中图分类号:TQ320.66² 文献标识码:A 文章编号:1000-7555(2025)01-0183-08

复合材料和复合结构由多种材料形成,不同的材料间可实现性能的互补,从而使得复合的制品具有比强度高、耐腐蚀性强、设计灵活等优势,在航空航天、车辆工程、消费电子、轻工、通信等领域都有广泛的应用^[1-4]。随着注塑和模具行业规模化、精密化、复杂化的发展,人们对注塑制品的产品精度、外观形状、使用功能等都提出了更高的标准和要求,而普通的注射成型工艺无法满足复杂化、精细化产品的制备,因此二次注射成型技术作为一种新兴的技术应运而生^[5]。

二次注射成型也称顺序注射成型,由于工序流程短、制造时间短和成本低等优势,在高分子加工领域得到了广泛的应用。与传统的注射成型相比,二次注射成型如图1所示,包括多个阶段的操作:通过注塑、模压等热成型手段得到成品的基底部分,随后将基底部分固定在模具内,最后在基底上注射熔融的塑胶,从而得到塑胶-基底复合制品^[6]。二次注射成型技术虽然常见于汽车制造、消费电子、通信等领域,但是限制其应用与发展的主要障碍是基底和

二次塑胶的界面结合强度不高^[7],例如通过该技术成型的汽车内饰件,在环境应力场中使用,不高的固熔体强度会在固熔界面诱发裂纹从而导致界面断裂。因此,探究二次注射成型界面结合机理以及界面结合强度的影响因素,控制注射工艺参数,对于提高二次注射成型的产品质量有着重要意义。近些年,大量研究围绕二次注射成型的界面结合强度,探究界面结合强度的影响因素、改善了基底和塑胶结合性能,然而,目前尚未有关于二次注射成型界面强度及其注塑制品的总结与分析。

本文介绍了二次注射成型的界面结合强度及其表征方法,概括分析了界面结合强度的影响因素,讨论了不同影响作用的原理、特点和优劣势,并阐述了二次注射产品在轻工业领域、交通制造业领域的应用,最后对二次注射成型技术未来的发展方向提出了总结与展望。

1 界面结合强度及其影响因素

1.1 界面结合强度

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0004

收稿日期:2023-12-13

基金项目:余姚重大项目(2023JH03010002);国家自然科学基金资助项目(52073247)

通讯联系人:许忠斌,主要从事塑料制品成型加工及应用研究,E-mail: xuzhongbin@zju.edu.cn

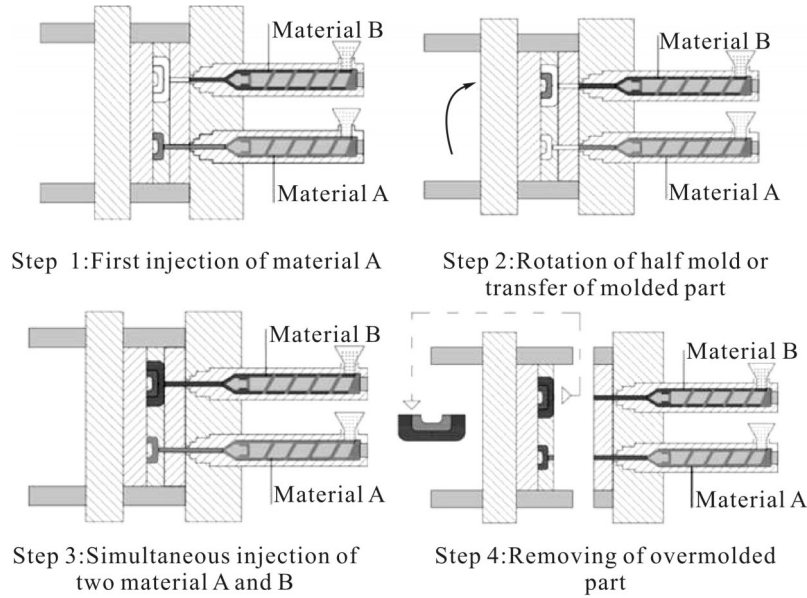


Fig. 1 Schematic diagram of secondary injection molding processing route^[8]

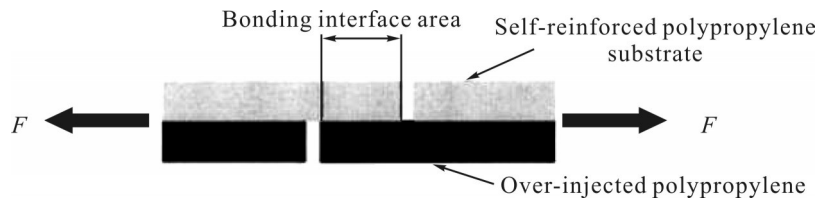


Fig. 2 Schematic diagram of shear strength test of lap shear joint^[7]

在二次注射成型过程中,原先放置在模具内的基底会与二次注入的熔融塑胶,在界面交界处发生分子扩散,随后冷却共结晶,由此在二者的交界处产生界面黏附,从而形成二次注射成型的制品^[9]。基底和塑胶的界面结合强度决定了制品的整体性能,因此如何调控不同组分之间的界面结合强度,是获得高质量二次注射成型制品的关键。

大多数研究者喜欢用层间剪切应力来表征界面结合强度^[10-12],将复合构件的制品,切割成搭接剪切接头形式的样本,放置在万能材料试验机上,控制好室内温度,并施加一定的拉伸速率,记录多组试样在失效时的剪切强度——用最大载荷除以搭接面积获得。为了提高界面结合强度的测量精度,研究者们会使用特殊的夹具,以确保样品在拉伸过程中始终处于水平方向。

层间剪切强度是表征复合结构抗分层的重要力学参数,它反映了金属-聚合物/聚合物-聚合物接触界面的结合强度,对于二次注射成型制品的质量有

着重要的意义^[13-15]。目前层间剪切强度的测量方法主要有双切口剪切法、短量剪切法、V型槽剪切法等^[16]。但传统的层间剪切强度测量方法存在着失效模式复杂、操作繁琐等缺陷^[17],并且,将层间剪切强度用于复杂曲面构件的结合强度表征,会有失准确性,因此,研究一种更加精确的、系统的方法用以评测界面结合强度显得尤为重要。

1.2 界面结合强度的影响因素

1.2.1 注射成型的工艺参数:

在注塑成型过程中,高分子聚合物材料需要经历温度压力的升高、塑化、剪切、冷却和保压等过程^[18]。注塑过程中的工艺参数直接影响了制品的收缩率与残余应力,而制品的收缩行为及残余应力会对制品的最终形状尺寸及质量产生较大的影响^[19,20]。二次注射成型的过程中,合适的工艺参数能够增强基底和熔融聚合物之间的界面分子扩散、表面微观互锁结构的形成和化学键的结合,因此优化工艺参数有助于提高二次注射成型制品的质量。

Kadoya等^[21]通过阳极氧化来制备多孔结构的金属表面,并以阳极氧化的时间来调控表面孔径密度,研究了不同的工艺参数对界面结合强度的影响,研究表明,当注射速度为10 mm/s,随着保压压力升高,接头强度略有增加;然而,当注射速度为300 mm/s时,使用较高的保压压力制造样本会导致接头强度下降。Kimura等^[22]将铝片基底经过表面处理后,放入模具内充当嵌件,随后注入熔融的聚对苯二甲酸丁二酯,研究了注射成型时的模腔峰值压力、保压压力及注射速度对两者结合强度的影响,结果表明,高的模腔峰值压力和保压压力以及低的注射速度会提高制品界面结合强度和复制率。

1.2.2 基底的预处理:(1)预热:研究发现,加工过程中,注射熔体和基底之间会形成陡峭的温度梯度,该温度梯度极大的影响了两者的界面结合强度,而界面结合强度的调控对于成型制品非常重要,当固液界面的相互作用比较弱时,会引起裂纹甚至界面断裂。二次注射成型过程中,熔融的聚合物在界面处发生分子相互扩散,由于随后的冷却共结晶而产生界面黏附^[23],而基底的预热对界面处分子的扩散及共结晶都起到促进的作用,因此,基底的预热是增强二次注射成型界面结合强度的重要原因。

基底的预热能加强注塑层和基底的黏合,蒋炳炎教授课题组^[24]将连续纤维热塑性复合材料作为模内注塑的预制件基底,在预制件上注射熔融聚丙烯,研究表明,两者间的界面结合强度随着预制件预热温度的升高,先升高后降低,并且预制件的预热能够显著地削弱注射熔体温度、保压压力对界面结合强度的影响。

(2)表面处理:二次注射成型的基底为金属或者聚合物,基底的表面形貌是影响二次注射界面结合强度的重要因素;二次注射塑胶在冷却时的收缩,并且和基底有着不同的热膨胀系数,会导致残余应力的产生;复杂的熔融体的流动也会削弱制品的界面结合强度^[25]。为了使注塑塑胶能够更好的贴合基底,通常会对基底进行表面处理,常见的表面处理方法有磨砂、喷丸、喷砂等。

Lucchetta等^[26]将铝板作为基底,采用扫描电子显微镜和白光干涉仪对铝金属表面进行非接触式表征,并测量喷丸处理后的表面粗糙度,实验数据表明,

对于聚苯硫醚-铝板(PPS-Al)制品而言,表面粗糙度在促进界面结合强度方面发挥了主要作用,而对于聚丙烯-铝板(PP-Al)制品而言,表面粗糙度的影响则是次要的;李熹平教授课题组^[10]使用不同粒径的砂对金属表面进行喷砂处理,获得了不同表面粗糙度的金属,通过测量扫描电子显微镜下单位面积“峰”的数量来表征金属表面的特征密度,研究表明,随着金属表面特征密度的提高,金属表面接触角减小,从而使得熔融的聚合物更容易填充金属表面,对应于更大的界面结合强度;Pinpathomrat等^[27]将玻璃纤维增强聚丙烯(GF/PP)制成半哑铃状的样本,作为嵌件放置在模具中,并用不同目数的砂纸来研磨嵌件,从而获得不同的表面粗糙度,研究表明,高表面粗糙度的嵌件能够获得更好的界面结合性能。

在聚合物和金属一体化注射成型方面,国内外的学者将更多的研究集中于铝合金和聚合物材料的结合,针对碳钢的研究则比较少。究其原因,主要是因为铝合金经过表面处理后,会在表面形成特殊的微纳结构与大量的羟基官能团,从而能和聚合物分子链形成化学键与互锁的机械结构。近几年,随着表面处理技术与材料科学的进一步发展,有关碳钢和聚合物的表面处理研究也逐渐增多。

李熹平教授课题组^[1]先对钢材表面进行喷砂、氧化处理后,再涂抹一层硅烷层,最后利用一体化注塑成型得到钢-聚氨酯复合构件,对碳钢表面分别进行机械抛光、46目棕刚玉喷砂、150目棕刚玉喷砂后,表征三者的表面粗糙度,研究发现,钢-聚氨酯复合构件的结合强度随钢基体表面粗糙度的变化并无正比例对应关系,而是取决于表面粗糙度、表面亲水性、模具温度等多因素的耦合作用;Zhao等^[28]对去除氧化层的铝片进行了热水处理(HWT),改变处理的水温,通过注射直接将聚对苯二甲酸丁二酯注射到铝板表面,用算术平均高度(S_a)和纳米结构的数量(N_n)来表征表面结构,研究结果表明,随着HWT处理温度的升高,界面结合强度逐渐升高,并在65℃水温时获得了最高的界面结合强度,但水温过高,则会对铝板表面的纳米结构造成破坏。下表列出了不同表面处理方法,并总结分析了这些表面处理方法对二次注射成型制品界面结合强度的影响与作用,以及不同方法的优势和局限。

Tab. 1 Surface treatment methods of substrates and their advantages and limitations

Main author	Surface treatment	Base	Injection plastic	Effect on interface bonding strength	Method advantages /limitation
Ding J, Li X, Zhao Y	Silanization	4Cr5MoSi V1 Mold steel	Polyurethane	Bonding strength is the result of the coupling effect of multiple factors. In most cases, silanization can improve the interface bonding strength	Functional groups can be constructed on the steel surface, but the scope of application is limited and will affect the surface hydrophilicity
Li X, Gong N, Yang C	Sandblasting	6061 Aluminum alloy	Polypropylene	Reduced sandblasting particle size, corresponding to greater bond strength	It can remove the surface oxide layer and increase the roughness, but it is not suitable for complex components
Lucchetta G	Shot peening	Aluminum plate	Polypropylene/polyphenylene sulfide	For PPS-Al products and PP-Al products, the shot peening mesh number plays a major and minor role respectively in promoting the interface bonding strength	Suitable for complex surfaces and low cost, but easy to cause deformation of the workpiece
Pinpathomrat B	Frosted	Glass fiber reinforced polypropylene	Polypropylene	Inserts with high surface roughness obtained by grinding can achieve better interface bonding performance	Can change the surface morphology, but the processing accuracy is low and the processing range is limited
Zhao S, Kimura F	Hot water treatment	Aluminum plate	Polybutylene terephthalate	The interface bonding strength gradually increases as the processing temperature increases	The method is simple, economical and environmentally friendly, but has high processing requirements and limited scope of use

1.2.3 其他影响因素:除了基底材料的特性和注射过程的参数对二次注射成型的界面结合强度会造成影响,研究人员还探索了其他方法以增强聚合物-聚合物或金属-聚合物之间的界面结合强度,例如通过接枝形成共聚物或者添加二次注射成型的中间层薄膜以增强界面结合强度。

吴宏教授课题组^[11]主要研究了退火与聚乙烯接枝马来酸酐(PE-g-MAH)的含量对界面结合强度的影响,用偏光显微镜观测制品的界面形貌,观测到界面缝隙随着模具温度的升高而逐渐变窄,并通过数据处理,发现退火前后界面强度与PE-g-MAH含量分别呈线性/平方关系;吴宏等^[29]同时也考察了薄膜中PE-g-MAH的含量、薄膜的厚度、第二次注射的熔体温度和模具温度等因素对界面结合强度的影响,并通过拉伸剪切试验、扫描电镜观察和差示扫描量

热分析等方法,分析了界面的断裂机制和形貌结构,文章指出,通过使用含有PE-g-MAH的薄膜作为连接层,可以有效地解决聚乙烯(PE)和尼龙6(PA6)之间的不相容性问题;冯余其等^[30]也对热塑性聚合物在热熔接过程的分子扩散行为展开了动力学模拟,模拟结果表明,升高压力或者温度,能够促进分子链的扩散迁移行为,从而获得更好的界面结合能和结合强度。

2 复合材料/二次成型的应用

2.1 在轻工业领域的应用

聚氨酯(TPU)材料因具有弹性、耐磨性好的特点,而通常作为鞋底的嵌件材料,且表面有细小网格,能起到防滑作用^[31-34]。江飞舟等^[35]分析了鞋底的二次注射成型及其工艺,这种鞋底采用玻纤增强尼

龙和TPU组成,考虑TPU和尼龙的成型温度,为了提高两者间的界面结合强度,研究者先通过注射成型TPU嵌件,再把TPU嵌件装入模具中,接着注射尼龙鞋底主体,实现复合构件鞋底的制备。

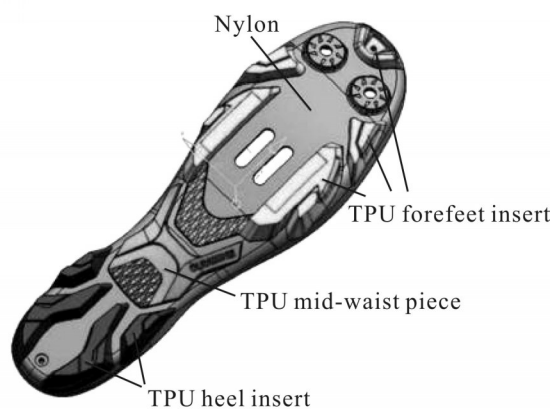


Fig. 3 Secondary injection molded sole composite parts^[35]

碳纤维复合材料,以其轻质、高强度、耐高温和长寿命的特性,已经从航空航天和船舶等传统领域扩展到家具和建筑等民生领域,展示出了巨大的应用潜力^[36-38]。陆莹等^[39]通过采用顺序阀浇口工艺和优化碳纤维的质量分数,研发出具有高综合性能的碳纤维复合材料,为家具设计提供了一种新的材料选择,同时为家具设计开辟了新的可能性。

赵建周等^[40]提供了一种用聚氨酯(PU)和聚丙烯(PP)2种塑料在一副模具上完成工业脚轮的二次注射成型的方法,提高了生产效率,降低了成本。文章详细描述了工业脚轮模具的注射成型流程,包括轮芯的注射、轮皮的二次注射和轴承的预放入等步骤,以及注射的工艺参数和注意事项。此外,陈军^[41]也介绍一种基于二次注射成型的塑料柄厨房剪刀的模具设计技术,该技术能够制造出外形美观、手感舒适的双色塑料柄剪刀。

2.2 在交通制造业领域的应用

二次注射成型在制造中的优势主要体现在产品质量、成本效益、多功能等方面,其广泛应用于汽车、飞机、家电等领域。而汽车内饰及内部的零件,需要复合的结构来提供强度,或者包覆的薄膜来提升质感和美观度,因此其制品多采用二次成型工艺。

李又兵等^[42]利用气压式顺序阀,控制熔体从多个浇口先后充填型腔的注射成型工艺,顺序注射成型了汽车前保险杠,并通过Moldflow软件模拟分析

注射成型过程中的熔体流动、温度、压力、冷却等参数的方法,从而预测和优化注射成型工艺和产品质量。柏秋阳等^[43]通过模内电子(IME)工艺设计并制造了一种替代传统机械开关的多功能开关,并将IME功能薄膜制作成实物,安装在实车上进行功能和性能的测试,结果表明,IME控制开关可以准确地进行所有功能的测试,并且实现了轻量化、美观、便捷等多个目标。

SFS公司与TxV公司合作,采用VictrexAE250复合材料和VictrexPEEK二次成型的热塑性混合复合材料,用于替代原有的铝制飞机储物箱支架,从而实现减轻质量和降低成本的目的^[44]。

近期,浙江吉利控股集团致力于研究汽车的智能表面,根据客户的需求,通过IME工艺,生产出汽车空调堵盖等集成多种功能的注塑件;在余姚市科技创新项目的支持下,宁波某模具公司联合浙江大学、浙大宁波理工学院开展了对光学防抖(Optical image stabilization, OIS)组件精密注塑成型技术的攻关,提出了注塑一体成型技术及过程参数监测等关键技术,该课题有望实现二次注射成型技术的重大突破与良好的产业化应用。

3 总结与展望

二次注射成型因其工艺流程短、生产成本较低而广泛的应用于注塑制品的生产中,为复合构件的制造提供了一种新途径。目前主要用层间剪切应力来表征二次注射成型的界面结合强度,层间剪切强度是表征复合结构抗分层性能的重要力学参数,对二次注射成型制品质量有着重要的意义。影响二次注射成型界面结合强度的主要因素包括注射成型的工艺参数、基底的预热以及各种表面处理技术。拥有良好的界面结合性能的二次注射成型制品在轻工业、交通制造业等领域有着广泛的应用,展示了其在提高产品质量、降低生产成本、实现产品多功能等方面的优势。

二次注射成型技术的发展方向包含以下几个方面。

(1)新型材料的研发:材料的选取是二次注射成型界面结合强度的决定性因素,在注射成型过程中,材料决定着塑胶和基底的热变形温度、两者相容性、

注塑熔融体黏度,这些因素都会影响成型制品的质量;基底的预处理与塑胶注射的工艺参数能够调控二次注射成型的界面结合强度,但需要以合适的材料为基础,因此未来二次注射成型所使用的材料,需要具备更好的兼容性与可处理性。

(2)与微纳技术的结合:目前可以通过HWT、阳极氧化等表面处理技术来生成基底表面的微纳结构,但这些微纳结构仍存在着精度不足和结构不可控等局限性,因此,应用纳米材料与纳米科技来获得殊的表面性能与微纳结构,对于获得质量可靠的制品、二次注射成型技术的进步与革新,有着十分重要的意义。

(3)工艺流程的优化:本文所介绍的提高界面结合强度的方法固然有效,但由于操作繁琐及过程复杂等问题,对于实际的工业生产来说,会造成生产效率低下、产品复制率不高等问题。此外,国内新能源汽车、新型电子器件等行业都展现出了巨大的潜力,而行业的迅速发展及市场的需求,会进一步推动二次注射成型技术及其工艺流程的优化。

参考文献:

- [1] 丁杰泰,李熹平,赵元,等. 钢-聚氨酯柔性复合构件一体化注塑成型及界面强度研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(14): 73-82.
Ding J T, Li X P, Zhao Y, *et al.* Research on integrated injection molding and interface strength of steel- polyurethane flexible composite components[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(14): 73-82.
- [2] 王文才,宋伟,张焱,等. 玻璃纤维增强热塑性复合材料在航空领域的应用进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(11): 156-164.
Wang W C, Song W, Zhang Y, *et al.* Progress in the application of glass fiber reinforced thermoplastic composites in the aviation field[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(11): 156-164.
- [3] 程晓林,王源升,王轩,等. 离子液体改性石墨烯/丁腈复合材料的摩擦性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(4): 70-77.
Cheng X L, Wang Y S, Wang X, *et al.* Frictional performance of ionic liquid modified graphene/nitrile composite materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(4): 70-77.
- [4] 王静,李闯,耿闻,等. 碳纤维复合材料高温界面性能研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(3): 163-171.
Wang J, Li C, Geng W, *et al.* Research progress on high-temperature interfacial properties of carbon fiber composite materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(3): 163-171.
- [5] Fu H, Xu H, Liu Y, *et al.* Overview of injection molding technology for processing polymers and their composites[J]. ES Materials & Manufacturing, 2020, 8: 3-23.
- [6] Jiang G, Wu H, Yan B, *et al.* Reinforcement of solid- melt interfaces for semicrystalline polymers in a sequential two-staged injection molding process[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2009, 47: 1112-1124.
- [7] Aurrekoetxea J, Castillo G, Cortes F, *et al.* Failure of multimaterial fusion bonding interface generated during over-injection molding/thermoforming hybrid process[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 102: 261-265.
- [8] Aliyeva N, Sas H S, Saner Okan B. Recent developments on the overmolding process for the fabrication of thermoset and thermoplastic composites by the integration of nano/micron-scale reinforcements[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 149: 106525.
- [9] Jiang G, Zhang F, Wu H, *et al.* Comparative studies on enhanced interfacial adhesion between PE and PA6 through two routes in a sequential injection molding process[J]. Polymer- Plastics Technology and Engineering, 2014, 53: 9-18.
- [10] Li X, Gong N, Yang C, *et al.* Aluminum/polypropylene composites produced through injection molding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 635-643.
- [11] Zhang X, Jiang G, Wu H, *et al.* Effect of the temperature gradient on the interfacial strength of polyethylene/polyamide 6 during the sequential injection molding[J]. High Performance Polymers, 2014, 26: 135-143.
- [12] 卢一,蒋炳炎,符亮,等. 模内混合注塑成型聚丙烯与预制品间界面黏结强度研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(7): 1626-1633.
Lu Y, Jiang B Y, Fu L, *et al.* Research on interfacial adhesion strength between polypropylene and preform in in-mold hybrid injection molding[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(7): 1626-1633.
- [13] Zhang C, Zhang G, Shi X, *et al.* Effects of carbon nanotubes on the interlaminar shear strength and fracture toughness of carbon fiber composite laminates: a review[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57: 2388-2410.
- [14] Monjon A, Santos P, Valvez S, *et al.* Hybridization effects on bending and interlaminar shear strength of composite laminates [J]. Materials, 2022, 15: 1302.
- [15] Cheon J, Kim M. Impact resistance and interlaminar shear strength enhancement of carbon fiber reinforced thermoplastic composites by introducing MWCNT- anchored carbon fiber[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 217: 108872.

- [16] 朱其伟. 竹木复合梁层间剪切与弯剪性能试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
Zhu Q W. Experimental study on interlaminar shear and bending-shear performance of bamboo- wood composite beams[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.
- [17] 韩天福. 纤维增强复合材料层间剪切强度测定方法的改进研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
Han T F. Research on the improvement of interlaminar shear strength measurement method for fiber reinforced composite materials[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022.
- [18] 王利霞, 王蓓, 申长雨. 工艺参数对注塑制品质量的影响研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003(3): 62-66.
Wang L X, Wang B, Shen C Y. Research on the influence of process parameters on the quality of injection molding products [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2003(3): 62-66.
- [19] 王利霞, 杨杨, 王蓓, 等. 注塑成型工艺参数对制品收缩率变化的影响及工艺参数优化[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(2): 173-176.
Wang L X, Yang Y, Wang B, *et al.* Influence of injection molding process parameters on the change of product shrinkage rate and optimization of process parameters[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2004, 20(2): 173-176.
- [20] 奚国栋, 周华民, 李德群. 注塑工艺参数对制品残余应力和收缩的影响[J]. 化工学报, 2007, 58(1): 248-254.
Xi G D, Zhou H M, Li D Q. Influence of injection molding process parameters on residual stress and shrinkage of products [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2007, 58(1): 248-254.
- [21] Kadoya S, Kimura F, Kajihara Y. PBT-anodized aluminum alloy direct joining: characteristic injection speed dependence of injected polymer replicated into nanostructures[J]. Polymer Testing, 2019, 75: 127-132.
- [22] Kimura F, Kadoya S, Kajihara Y. Effects of molding conditions on injection molded direct joining using a metal with nano-structured surface[J]. Precision Engineering, 2016, 45: 203-208.
- [23] Feistauer E E, dos Santos J F, Amancio-Filho S T. A review on direct assembly of through- the- thickness reinforced metal-polymer composite hybrid structures[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59: 661-674.
- [24] 卢一, 蒋炳炎, 符亮, 等. 模内混合注塑成型聚丙烯与预制品间界面黏结强度研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(7): 1626-1633.
Lu Y, Jiang B Y, Fu L, *et al.* Research on interfacial adhesion strength between polypropylene and preform in in-mold hybrid injection molding[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(7): 1626-1633.
- [25] Fabrin P A, Hoikkanen M E, Vuorinena J E. Adhesion of thermoplastic elastomer on surface treated aluminum by injection molding[J]. Polymer Engineering & Science, 2007, 47: 1187-1191.
- [26] Lucchetta G, Marinello F, Bariani P F. Aluminum sheet surface roughness correlation with adhesion in polymer metal hybrid overmolding[J]. CIRP Annals, 2011, 60: 559-562.
- [27] Pinpathomrat B, Mathurosemontri S, Uawongsuwan P, *et al.* Study on adhesive property of insert injection molded glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Energy Procedia, 2016, 89: 291-298.
- [28] Zhao S, Kimura F, Yamaguchi E, *et al.* Manufacturing aluminum/polybutylene terephthalate direct joints by using hot water - treated aluminum via injection molding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107: 4637-4644.
- [29] Jiang G, Wu H, Yan B, *et al.* Effect of a tie film on the enhanced interfacial adhesion between polyethylene and polyamide-6 in a sequential injection molding[J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 50: 719-729.
- [30] 冯余其, 罗怡, 孙屹博, 等. 热塑性聚合物热熔接过程界面扩散行为分子动力学模拟[J]. 焊接学报, 2011, 32(6): 41-44.
Feng Y Q, Luo Y, Sun Y B, *et al.* Molecular dynamics simulation of interfacial diffusion behavior during the hot melt bonding process of thermoplastic polymers[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(6): 41-44.
- [31] 吴晓霞, 张旭东, 甄茂民, 等. 阻燃剂对微孔聚氨酯弹性体性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(6): 1-10.
Wu X X, Zhang X D, Zhen M M, *et al.* The influence of flame retardants on the properties of microcellular polyurethane elastomers[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(6): 1-10.
- [32] 余川, 王璟, 李佳, 等. 聚氨酯预聚体改性沥青应用进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(11): 156-168.
Yu C, Wang J, Li J, *et al.* Progress in the application of polyurethane prepolymer modified asphalt[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(11): 156-168..
- [33] Das A, Mahanwar P. A brief discussion on advances in polyurethane applications[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2020, 3: 93-101.
- [34] Kemona A, Piotrowska M. Polyurethane recycling and disposal: methods and prospects[J]. Polymers, 2020, 12: 1752.
- [35] 江飞舟, 王娟. XC50鞋底二次注射成型工艺与模具设计[J]. 模具工业, 2012, 38(6): 15-18.
Jiang F Z, Wang J. Secondary injection molding process and mold design for XC50 soles[J]. Die & Mould Industry, 2012, 38(6): 15-18.

- [36] Zheng H, Zhang W, Li B, *et al.* Recent advances of interphases in carbon fiber- reinforced polymer composites: a review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 233: 109639.
- [37] Gao T, Li C, Wang Y, *et al.* Carbon fiber reinforced polymer in drilling: from damage mechanisms to suppression[J]. *Composite Structures*, 2022, 286: 115232.
- [38] Ahmad H, Markina A A, Porotnikov M V, *et al.* A review of carbon fiber materials in automotive industry[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 971: 032011.
- [39] 陆莹, 毛燎厚. 家具设计中碳纤维复合材料的注塑成型与性能研究[J]. *合成材料老化与应用*, 2022, 51(6): 76-78.
- Lu Y, Mao L H. Research on injection molding and properties of carbon fiber composite materials in furniture design[J]. *Aging and Application of Synthetic Materials*, 2022, 51(6): 76-78.
- [40] 赵建周. 工业脚轮二次注射成型模具优化设计[J]. *模具制造*, 2018, 18(2): 40-43.
- Zhao J Z. Optimal design of secondary injection molding die for industrial casters[J]. *Die & Mould Manufacturing*, 2018, 18(2): 40-43.
- [41] 陈军. 基于二次成型的剪刀柄模具技术的研究[J]. *模具制造*, 2021, 21(7): 32-35.
- Chen J. Research on mold technology for scissors handle based on secondary molding[J]. *Die & Mould Manufacturing*, 2021, 21(7): 32-35.
- [42] 李又兵, 胡学川, 赵利亚, 等. 汽车前保险杠顺序注射模流分析与工艺优化[J]. *中国塑料*, 2017, 31(3): 64-68.
- Li Y B, Hu X C, Zhao L Y, *et al.* Analysis of sequential injection mold flow for automotive front bumper and process optimization [J]. *China Plastics*, 2017, 31(3): 64-68.
- [43] 柏秋阳, 王辉, 危学兵, 等. 基于模内电子(IME)工艺的汽车多功能控制开关设计及研究[J]. *塑料工业*, 2018, 46(7): 56-60.
- Bai Q Y, Wang H, Wei X B, *et al.* Design and research of automotive multifunctional control switch based on in- mold electronics (IME) process[J]. *Plastics Industry*, 2018, 46(7): 56-60.
- [44] 通过二次成型热塑性混合复合材料来生产飞机支架[J]. *塑料科技*, 2019, 47(7): 11.
- Producing aircraft brackets by secondary forming of thermoplastic hybrid composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(7): 11.

Status and Technology Prospects of Interfacial Bonding Strength in Secondary Injection Molding

Fangzhou Li¹, Qiong Wu³, Jing Zhou³, Kun Yan³, Bing Luo³, Zhongbin Xu^{1,2,4}

(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Ningbo Innovation Center, Zhejiang University, Ningbo 315000, China; 3. Beilong Precision Technology Co., Ltd, Ningbo 315400, China; 4. Zhejiang Provincial Engineering Center of Integrated Manufacturing Technology and Intelligent Equipment (Hangzhou City University), Hangzhou 310015, China)

ABSTRACT: Secondary injection molding technology has many advantages such as short process flow, low manufacturing cost, and high production efficiency. It is widely used in automobile manufacturing, consumer electronics, light industry, communications and other fields. Interface bonding strength is the key to affecting the quality of secondary injection molded products. This article summarized the research on the interface bonding strength of secondary injection molding at home and abroad in recent years, analyzed the influencing factors of interface bonding strength, and discussed the working principles, characteristics, advantages and disadvantages of different influencing factors, elaborated on the application of secondary injection molding in different fields, finally, the future development of secondary injection molding technology was prospected.

Keywords: secondary injection molding; interfacial bonding strength; influencing factors; applications