

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.04.025

聚合物-金属混合结构直接注塑成型及界面黏接技术研究进展

郝寒青^{1,2}, 王小平³, 刘生轶^{1,4}, 周明勇^{1,2,3}

[1. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083; 2. 中南大学极端服役性能精准制造全国重点实验室, 长沙 410083;
3. 镇江睿达新材料科技有限公司, 江苏镇江 212405; 4. 中船星惯科技(武汉)有限公司, 武汉 430223]

摘要: 聚合物-金属混合结构直接注塑成型是一种高效集成的聚合物-金属复合制造技术, 在减轻质量、降低成本等方面具有显著优势, 广泛应用于交通、家电及生物医学等领域。本文介绍了该技术的成型过程与基本原理, 总结了适用于此类结构的常用聚合物和金属, 并讨论了材料性能对界面强度及环境稳定性的影响。综述了聚合物材料改性与金属表面微纳米结构的制备工艺, 旨在增强界面相容性与机械锚固作用。进一步分析了注塑成型工艺对混合结构性能的影响, 指出提高金属表面温度与改善聚合物熔体渗透能力有助于增强界面结合。此外, 本文还综述了通过微观数值模拟与分子动力学方法研究界面黏接行为的最新进展, 揭示聚合物-金属界面相互作用机理。最后介绍了直接注塑成型技术制备聚合物-金属混合结构的主要结论和前景。

关键词: 聚合物-金属混合结构; 直接注塑成型; 表面处理与改性; 成型工艺; 微观模拟

中图分类号: TQ320.662 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)04-0216-08

Research progress on direct injection molding technology and interfacial bonding of polymer-metal hybrid structures

HAO Hanqing^{1,2}, WANG Xiaoping³, LIU Shengyi^{1,4}, ZHOU Mingyong^{1,2,3}

[1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. State Key Laboratory of Precision Manufacturing for Extreme Service Performance, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Zhenjiang Ruida New Materials Technology Co., Ltd., Zhenjiang 212405, China; 4. CSSC Starlink Technology (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430223, China]

Abstract: Direct injection molding of polymer-metal hybrid structures is an efficient and integrated manufacturing technology for polymer-metal composite, which exhibits remarkable advantages in terms of weight reduction and cost cutting, and has been widely applied in fields such as transportation, household appliances, and biomedicine. The molding process and basic principles of this technology were introduced, the commonly used polymers and metals suitable for such structures were summarized, and the effects of material properties on interfacial strength and environmental stability were discussed in this paper. The modification methods of polymer materials and the preparation processes of micro-nano structures on metal surfaces were reviewed, aiming to enhance interfacial compatibility and mechanical anchoring effect. Furthermore, the effects of the injection molding process on the properties of hybrid structures were analyzed, and increasing the surface temperature of metals and improving the melt penetration ability of polymers are conducive to enhancing interfacial bonding was pointed out. In addition, the latest progress in the study of interfacial adhesion behavior via microscopic numerical simulation and molecular dynamics methods was reviewed, so as to reveal the interaction mechanism of polymer-metal interfaces. Finally, the main conclusions and prospects of preparing polymer-metal hybrid structures via direct injection molding technology are presented.

Keywords: polymer-metal hybrid structure; direct injection molding; surface treatment and modification; molding process; microsimulation

随着“双碳”和轻量化政策的实施, 新材料和制造技术的发展已迫在眉睫。聚合物材料和金属材料性能具有互补

性。相较于金属, 聚合物的耐腐蚀性、抗氧化性及形状灵活性更好。相较于聚合物, 金属的刚性和强度更优良^[1-2]。这

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805550)

通信作者: 周明勇, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为聚合物微纳制造、轻量化结构设计制造

收稿日期: 2026-01-09

引用格式: 郝寒青, 王小平, 刘生轶, 等. 聚合物-金属混合结构直接注塑成型及界面黏接技术研究进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(4): 216-223.

HAO Hanqing, WANG Xiaoping, LIU Shengyi, et al. Research progress on direct injection molding technology and interfacial bonding of polymer-metal hybrid structures[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(4): 216-223.

种组合件具备单一材料(塑料件或金属件)不具有的性能^[3]。高效制备聚合物-金属复合结构可以减轻部件的质量,降低能耗和环境污染^[4],广泛应用于航空航天、汽车、国防和生物医学等领域^[5-6]。由于聚合物-金属混合结构(PMHs)的快速应用,推动聚合物和金属材料之间的连接技术刻不容缓。近几十年来常采用的传统连接技术,例如,机械紧固和黏接,都有一定的局限性和缺点^[4-5]。机械紧固可能会出现应力集中等问题,打孔可能导致材料的机械损伤和热损伤。黏接需要一定的固化时间,且性能相对较差。

目前,广泛应用的聚合物-金属混合结构成型技术主要包括:多组分包覆注塑成型技术^[7-8]、黏接成型技术^[9-10]、直接注塑成型技术^[11-14]三类。多组分包覆注塑成型技术是指将金属件作为插入件放在注塑膜腔中,使用两个及两个以上注塑系统,将聚合物熔融体注射到金属基体上,形成铆接结构或者冷却收缩包裹金属件^[15]。该工艺成型简单,但其接口处敏感易产生裂纹和应力集中。黏接成型技术是指在聚合物和金属基材之间覆盖一层黏接剂,使得高分子聚合物和金属材料紧密结合的工艺。其连接简单方便,但黏接剂成本高,固化时间长及对环境敏感性高等问题亟待解决。而PMHs直接注塑成型技术是通过表面处理方法在金属表面形成微纳级粗糙结构,再将处理后的金属放置在模具中进行直接注

塑,使聚合物和金属紧密相连的工艺^[16]。PMHs直接注塑成型技术具有成型稳定、操作简单、成型周期短、组件之间结合紧密等特点^[17]。研究表明,影响直接成型的因素有很多,如聚合物与金属材料的选择及其组合形式、材料表面改性/处理、注塑成型工艺与辅助技术等。聚合物基底材料直接决定界面的结合强度上限,而金属嵌件需兼顾结构的力学性能与表面处理可行性;注塑成型工艺则直接影响聚合物熔体在金属表面的充填质量和界面作用。此外,基于微观尺度的模拟方法可以有效地预测聚合物熔体的界面流动、浸润扩散和成键作用,能有效指导成型过程

因此,掌握聚合物-金属混合结构直接注塑成型领域的研究进展具有重要意义。本文首先介绍PMHs直接注塑成型的过程与界面结合的基本原理,如图1所示。其次,分析了聚合物基体与金属嵌件的选择及材料组合,从聚合物材料改性/与金属表面微纳级结构制备两个方面,总结提升界面相容性与机械互锁效应的关键方法。随后,分析了注塑成型工艺对熔体流动行为及结晶状态的影响,进而直接影响混合结构界面结合性能,阐述了微观数值与分子动力学模拟揭示界面形成机理的最新进展。最后,总结现有研究,对未来研究方向进行展望,为推动高性能PMHs的制备提供参考。

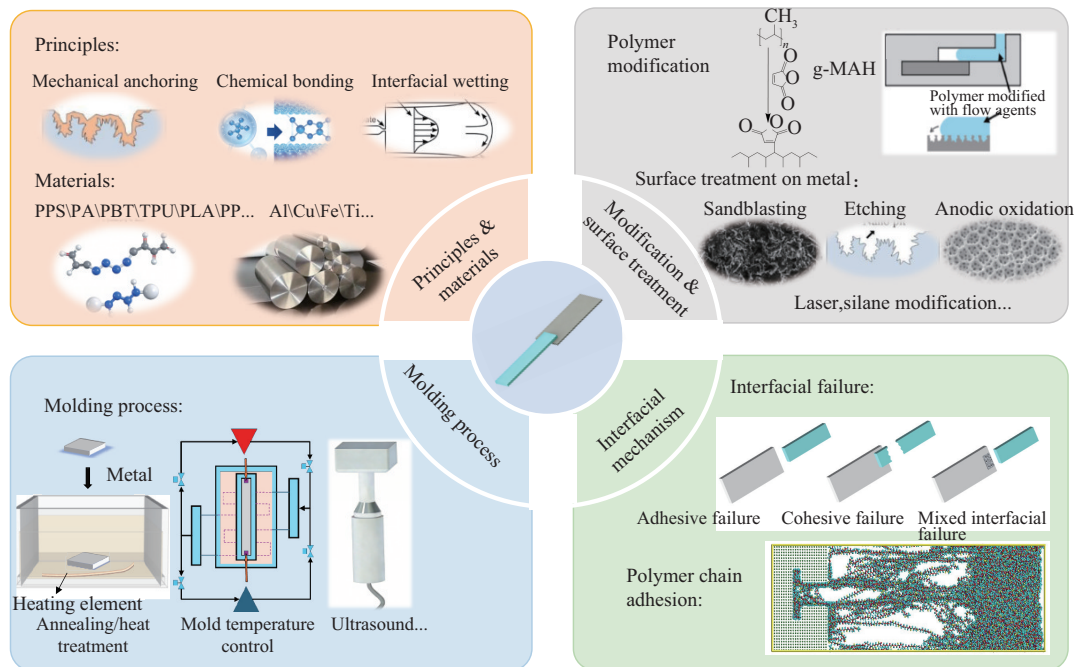


图1 聚合物-金属混合结构直接注塑成型及界面黏接技术概述

Fig. 1 Overview of direct injection molding technology and interfacial bonding of polymer-metal hybrid structures

1 PMHs直接注塑成型过程及原理

聚合物-金属直接注塑成型技术是指将聚合物和金属直接连接在一起的成型工艺,通过注塑方式直接将聚合物和金属结合,形成混合结构^[18]。其工艺过程如图2所示,首先将金属嵌件进行表面粗糙化处理后,放置在模具型腔内,将聚合物颗粒从料斗进料,加热机筒熔融聚合物颗粒,在给定速

率下,旋转螺杆将熔融聚合物通过浇道、流道和浇口传送到包含金属嵌件的模腔中,保压一定的时间,冷却固化,顶出工具将混合结构从模具腔体顶出。随后,另一个金属嵌件被放置在模具内,模具关闭,开始新的注塑成型循环。

PMHs直接成型的界面结合机理主要有微观机械互锁、化学成键机制以及浸润机制三种理论。微观机械互锁是指

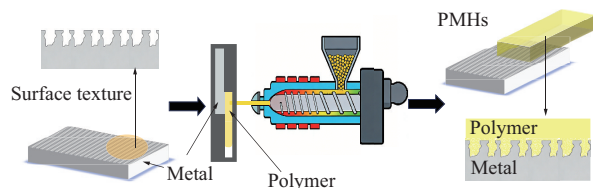


图2 聚合物与表面处理后的金属嵌件的注塑成型工艺流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of injection molding process for polymers and surface-treated metal inserts

在金属表面进行机械或化学处理,形成微纳级粗糙结构,放入到模具中,通过模具浇注系统在金属嵌件特定位置注射熔融态聚合物,熔融聚合物紧贴在金属粗糙微表面上,冷却后成微观几何结构效应产生的机械锁定^[16],以及纳米尺度上的聚合物分子与金属原子在界面处的非键合相互作用,如范德华力、库仑力等,作用范围往往在5.0~10 nm之间。化学成键机制则是金属界面进行一定程度的化学反应,生成自由基,直接注塑成型后,金属界面的自由基能够与聚合物的极性基团形成化学键,如共价键、离子键或金属键作用力等,从而构建紧密结合的界面,化学成键的作用范围在0.2~1.0 nm之间;第三种黏接机理为润湿机制。在浸润机制中,无论是机械互锁还是化学成键机制,建立连接的基础都在于确保熔融聚合物能够充分润湿并均匀扩散到金属表面,从而形成足够大的接触界面。在此前提下,原子与分子之间的相互作用可以进一步加深,从而形成更大的结合力。

2 材料选择及其组合

聚合物-金属混合结构的界面性能与材料的选择密切相关。聚合物材料的选择直接决定连接界面的结合强度、耐环境稳定性及整体结构性能,其极性特征是决定界面结合机制的关键因素。目前,在PMHs直接成型技术中,对于聚合物的表面改性方法相对较少,主要是通过引入活性官能团,提升熔融聚合物浸润性改变聚合物特性,提升连接稳定性。金属嵌件的选择主要根据PMHs的应用场景和表面处理难易程度,同时金属表面处理是影响混合结构键合性能的关键因素之一,能够促进界面机械互锁和化学键合,进而增强了混合结构性能^[19]。

在聚合物-金属直接注塑成型中,聚合物的极性是决定界面结合机制的关键。根据电荷亲和力的差异,聚合物可分为两大类:极性聚合物和非极性聚合物。极性聚合物,如聚苯硫醚(PPS)^[20]、聚酰胺(PA)、聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)、热塑性聚氨酯(TPU)等,因其分子链中含有由高电负性元素如氧或氮组成的活性官能团,可与金属表面氧化物形成氢键或其他化学键,从而在机械互锁基础上提供较强的化学键合作用,显著提升界面强度与耐久性。与此同时,聚合物的链段刚度同样是决定其与金属界面结合性能的关键因素。Jiao等^[21]通过对比纳米注塑成型的PBT-Cu与PPS-Cu接头的拉伸强度,分别为76.23和90.639 MPa,揭示了即使PBT的极性基团含量高,PPS因其更高的链段刚度,在实际拉伸与剥离过程中表现出更强的抗拉能力,最终获得更高的键合强度。

故在选择用于提高聚合物-金属界面强度的聚合物时,应重点关注聚合物的综合性质。聚乳酸(PLA)作为一种中等极性的生物基聚合物,其酯基提供与金属表面形成氢键和化学吸附的能力,有利于在注塑直接连接中实现较高的界面结合强度。上述这些极性聚合物材料与铝合金之间的界面作用力强,混合结构的黏接强度往往可达到20 MPa甚至更高。而聚丙烯(PP)等非极性聚合物缺乏这些活性官能基团或化学结构中的电负性物质,主要依靠机械互锁作用,界面结合强度较低,常需通过接枝改性或对金属表面进行偶联剂处理以引入活性位点,从而改善金属与聚合物之间的界面黏附。纤维增强热塑性塑料是一种复合材料,其极性主要取决于所选用的热塑性树脂基体,机械和热性能通常取决于纤维长度和纵横比的分布,高纵横比的纤维使其具有高冲击强度、高模量、高尺寸稳定性和高强度^[22]。但纤维表面化学惰性较强,需通过表面处理引入极性官能团。因此,在选择聚合物基体时,极性特征应作为界面设计的重要依据,以实现更高性能的混合结构。

根据PMHs的应用场景和表面处理难易程度,PMHs中的金属基材主要有铝合金、不锈钢、钛合金、镁合金等。铝合金密度低(2.7 g/cm³)、比强度高,具有良好的导热性和可加工性,是轻量化混合结构的首选金属基材之一,与PA、PPS等聚合物的连接效果优异。不锈钢具有极佳的耐腐蚀性、耐高温性和力学强度,化学稳定性强,适用于高温、高腐蚀环境下的混合结构,常与聚醚醚酮(PEEK)、PPS等耐高温聚合物杂化。钛合金具有优异的力学性能、耐腐蚀性和生物相容性,表面易形成稳定的TiO₂氧化膜,与PEEK、PLA等聚合物的连接研究较为广泛。镁合金密度仅1.8 g/cm³,是目前实际应用中最轻的金属材料,具有优异的减震性和电磁屏蔽性。但其表面氧化膜疏松多孔,耐腐蚀性差,需通过化学转化处理、微弧氧化等工艺制备稳定的表面膜层,常与PA、TPU等聚合物结合。

3 材料改性与表面处理

聚合物和金属的界面特性是影响PMHs的接头性能的关键因素。现有研究主要从两个角度探究界面特性的作用:一是通过引入活性官能团及提升熔融聚合物浸润性调控聚合物特性,缩小与金属嵌件性能的差异,提升连接稳定性;二是通过物理、化学或电化学等方法改变金属嵌件的表面粗糙度和化学键,加强与熔融聚合物的机械互锁作用,促进化学成键。

3.1 聚合物材料改性方法

聚合物材料改性^[23]主要原理是提升材料极性与活性基团含量,针对非极性聚合物以及极性较低的聚合物材料,通过接枝改性等手段引入极性基团,从而改善金属与聚合物之间的界面结合。以PP为例,常规的PP材料无法有效黏接在金属表面上,通常需要进行马来酸酐改性,以提高材料极性。Chen等^[24]使用双螺杆挤出机,以过氧化二异丙苯为引发剂,通过马来酸酐(MAH)和苯乙烯固相接枝共聚改性。改性后

的PP表面能从原来的26.53 mN/m提升至36.72 mN/m,在铝合金表面的浸润性得到明显改善,可有效实现PP-Al混合结构的黏接。刘生轶^[25]通过对比PP与MAH改性PP(PP-g-MAH)的流变特性和表面特性,发现PP-g-MAH的剪切黏度及其熔体在金属表面的接触角均小于PP,混合结构的断裂形式源于材料本身的内聚失效。

此外,在注塑成型过程中,熔融聚合物的流动性是影响浸润状态的主要因素。适当添加流动剂可改善聚合物的流动性,从而提高聚合物对金属表面微纳级结构的浸润率,达到更好的互锁效果。Wang等^[26]在聚酰胺6(PA6)中添加羧酸类流动剂OSGOL MF-11,可有效削弱PA6分子间氢键,使其熔体流动速率从16.7 g/10 min提升至39.9 g/10 min,促进了熔融聚合物对金属表面结构的渗透,从而增强机械互锁效应,使接头剪切强度提升。采用衰减全反射傅里叶变换红外光谱分析,流动剂引入的C=O基团可与金属表面—OH形成氢键,在机械互锁基础上叠加化学键合作用。然而,过量添加(>10%)会导致聚合物基体强度下降,反而不利于接头性能。适量流动剂的使用是一种高效的聚合物改性策略,通过增强熔融聚合物流动性和聚合物与金属间的化学键合,提升混合结构的强度。

对成型后的PMHs进行退火处理,是另一种重要的界面强化途径。该工艺通过促进界面区域聚合物链段的热松弛,有效消除因冷却过程中聚合物与金属热膨胀系数不匹配所引起的内应力,避免聚合物从金属微纳结构中脱黏,从而增强由锚定效应产生的机械互锁,进一步提升整体结构的界面结合强度。Li等^[27]利用界面荧光共振能量转移技术,发现快速冷却导致的高热应力会使聚合物链从金属纳米孔中剥离。通过对聚甲基丙烯酸丁酯(PBMA)与铝快冷试件进行退火处理或慢速冷却,能有效耗散内应力,使聚合物链持续与金属孔壁紧密接触,界面黏结强度可提升数倍乃至18倍。

退火处理的效果与聚合物的基体性质密切相关。对于热塑性聚氨酯TPU,Parodi等^[28]的研究表明在100℃下进行退火,能促进TPU内部硬段的有序重排与结晶,增强分子间氢键作用,同时可能引发界面水分子的脱附,从而共同提升了TPU与带涂层金属基板间的锚定密度与界面相互作用,使破坏模式由界面失效转变为部分内聚破坏,界面结合力由264 N增加至311 N。对于PA6等半结晶聚合物,退火主要通过提升聚合物基体的结晶度来间接增强界面性能。Wang等^[29]发现退火处理(如180℃)会促进PA6结晶和晶体生长,同时使分子链排列致密化,释放残余应力,进一步强化了聚合物基体的力学性能,从而将PA6/GF-Al接头强度从37.8 MPa提升至46.6 MPa。

另外,PA6结晶度不仅取决于退火处理,注塑成型过程中的工艺调控亦至关重要。Zhao等^[30]通过碳纤维增强并提高注射温度至300℃,可直接改变PA6在填充过程中的冷却历程与热环境,从而主动调控其结晶行为。随着注射温度从255℃提升至300℃,碳纤维增强PA6的结晶度从16.2%提

升至30.9%,CFPA6-Al试样的键合强度从18.3 MPa提升至40.8 MPa。其本质原因在于高温与缓冷促进了聚合物基体的结晶,从而增强了界面机械互锁及聚合物基体的承载能力。退火处理通过对不同聚合物基体结构的作用机制,如促进硬链重排及提升基体结晶度,增强聚合物-金属界面性能。

3.2 金属表面处理方法

多数金属表面易形成天然氧化膜,部分氧化膜化学稳定性过强,难以与聚合物发生相互作用。在与聚合物连接之前,金属嵌件的表面处理是聚合物-金属界面高强度连接的关键。研究表明,由未经处理的金属嵌件制备的PMHs表现出较弱的力学性能^[5]。制备微纳级粗糙结构时,通过调控金属表面极性,改善与聚合物材料的相容性,从而获得具有高机械强度和耐久性的混合结构。金属表面处理的常用工艺有喷砂、化学刻蚀、阳极氧化,同时激光处理、硅烷改性及激光粉末熔融也是确保PMHs界面强度的高效方法。

采用喷砂处理方法,可以通过高速砂粒射流的物理冲击,有效去除污垢、锈蚀和氧化层,形成表面的粗糙结构^[31]。粗糙表面增加了金属与聚合物之间的实际接触面积,通过类似机械互锁和钉销的机制提供更多机械锚固点,从而形成更强的结合^[32]。Kajihara等^[33]采用不同粒径的氧化铝颗粒对A5052铝合金进行高压喷砂,通过注塑成型技术与PBT直接连接。结果表明,使用氧化铝颗粒在较高压力下喷砂可获得超过15 MPa的剪切强度,而玻璃珠喷砂则无法形成有效连接。其关键影响因素为表面孔隙的纵横比,即纵横比大于0.1的孔隙对机械互锁具有显著贡献,其数量与连接强度呈强相关。喷砂处理不仅提升表面粗糙度,更通过调控表面微结构形态与分布,优化机械互锁效应,从而显著提升金属-聚合物界面的连接性能。

化学刻蚀^[34]通常无需外接电源,直接将金属嵌件浸入专用蚀刻溶液中,发生化学反应,生成离子或官能团,有助于化学键的结合,同时能有效改变金属表面的微观形态和性质,提升机械互锁效果。Li等^[35]提出了一种实现聚合物与金属直接连接的化学刻蚀辅助方法。该方法通过对Al5052铝合金进行三步化学刻蚀处理,在铝合金表面形成微坑和纳米孔结构,从而在微观层面实现有效的机械互锁,接头界面强度达到6.45 MPa。同时揭示化学刻蚀金属表面的主要黏合机制依赖于熔融聚合物在微纳米孔中的渗透和凝固形成的机械互锁。

阳极氧化电化学处理方法可在金属表面形成多孔且均匀的氧化膜,这些氧化膜的微纳米孔隙有助于在铝合金和聚合物之间提供机械锚固点和化学键合点,显著增强异质界面之间的结合力^[36]。Zhou等^[37]通过两步阳极处理对Al5052铝合金进行预处理,构建出纳米级多孔结构,使金属表面水接触角从101.5°降至9.5°,显著增强了金属表面润湿性和熔融聚合物的流动性。两步阳极氧化后的PP-Al5052拉伸强度最高达17.54 MPa,且破坏发生在聚合物基体内部,表明界面结合已超过基体强度。阳极氧化的基础理论研究相对成熟,

为聚合物-金属的直接连接技术的发展提供了强有力的支持。

激光处理是指通过不同波长的脉冲波激光器或连续波激光器,将光能集中在微小区域,成为一种高精度的金属表面加工方法。Enami等^[38]使用皮秒、纳秒和连续激光在Al5052铝合金表面形成周期性凹陷,采用注塑工艺制备玻璃纤维(GF)增强PBT(GF/PBT)和Al5052的单搭接接头,在相同的加工面积下,直径较小的凹孔的连接强度更高,皮秒激光处理产生了最高的凹点密度,达到了最高的连接强度。Woitun等^[39]利用纳秒脉冲激光对铝结构进行精确激光结构化,随后通过注塑成型与PBT连接,系统评估沟槽几何参数对接头强度的影响。结果表明,沟槽最佳宽高比约为1,该比例下接头表现出较高的拉伸剪切强度,深度为100 μm 的沟槽在拉伸剪切强度上优于更深且具有相同表面积和宽度的沟槽结构。这些结论表明,在聚合物-金属混合结构的激光结构化设计中,应统筹考虑沟槽几何参数、分布均匀性、密度及方向等多重因素,以实现界面力学性能的系统优化。

硅烷改性剂是常用的偶联剂,是一种分子结构中含有与单个金属原子键合的有机和无机活性基团的材料。硅烷通常以稀释水溶液的形式应用于金属表面,发生水解和缩合反应生成硅醇基团和有机官能团。硅醇基团可与金属表面发生化学结合,而有机官能团通过相互扩散交联与聚合物相互作用。Lin等^[40]通过直接注塑连接工艺制造了TPU-Al5052铝合金单搭接接头,浸入硅烷溶液前,对金属嵌件进行电解抛光和阳极处理,并进行等离子处理以改善表面羟基含量。随后,使用具有双硫基基团的硅烷偶联剂(TESPA)处理一次、两次或三次,与仅阳极氧化基底相比,TPU/Al5052接头金属基材用TESPA溶液处理两次后,连接强度提高了37.1%,失效时TPU整体断裂而非界面失效。

激光粉末熔融是一种增材制造技术,它使用高强度激光作为能源,熔化金属粉末的选择性区域,在惰性气体中逐层制造金属零件,以保护加热零件不被氧化。调节激光粉末熔融技术的参数可以改变烧结区域的表面粗糙度,其黏接机制主要是固化聚合物与金属表面结构之间的微机械互锁。Oliveira等^[41]使用激光粉末熔融技术(L-PBF)对有无亚毫米级蘑菇状表面结构的AlSi10Mg铝合金基材进行了快速成型制造,然后使用聚碳酸酯进行注塑包覆成型。接头键合强度达到20.5 MPa,超过了采用不同技术制备的金属基注塑成型聚合物-金属混合结构的平均水平。

随着对界面性能要求的不断提升,单一的表面处理技术在综合性能上往往存在局限,近年来复合表面处理方法逐渐成为研究与应用的焦点。这类方法通过组合两种或多种表面处理技术,在金属表面构建多孔结构或进行改性处理,从而实现对界面性能的显著增强。Lyu等^[42]研究了通过喷砂与等离子电解氧化复合处理技术,显著提升钛合金与PPS在注塑直接连接结构中的界面结合强度。通过在等离子电解氧化电解液中添加尿素,在钛合金表面引入氨基和羟基官能

团,从而增强与PPS的化学结合。在尿素浓度为6 g/L时,黏接强度达到最优,分别为仅喷砂处理的17倍和未添加尿素等离子电解氧化处理的2.4倍。该方法的界面键合机制归因于电解氧化形成的多孔结构提供的机械互锁与表面官能团促成的化学键合的共同作用。Zou等^[43]采用氢氟酸刻蚀结合硫酸阳极氧化的两步法,通过调控硫酸浓度,在钛合金表面形成微孔结构并增加表面羟基密度,成功实现了超双亲表面的制备。当硫酸浓度为20%时,获得的钛合金TC4与超高分子量聚乙烯复合接头搭接剪切强度高达18.05 MPa,且断裂发生在聚合物基体内部而非界面,实现了无缺陷的超高性能连接。

4 成型工艺对PMHs界面性能的影响

PMHs直接注塑成型工艺影响着熔融聚合物与金属表面结合时的界面相互作用^[44]。除材料选择和表面处理外,作为聚合物-金属混合结构的关键制造工艺,注塑成型工艺过程是一个复杂物理化学过程。金属界面的热力学状态及熔融聚合物的流动和固化决定了混合结构的力学性能。因此,理解并控制注塑成型工艺,是确保聚合物-金属混合结构高性能结合与稳定服役的关键技术。

Chen等^[45]采用热水处理技术,在镀锌高强度钢表面诱导生长出均匀的纳米针状结构,开发了一种基于注塑成型的PBT-镀锌高强度钢(GHSS)混合结构制造新技术。当热水处理时间20 min,温度75 $^{\circ}\text{C}$,接头的拉伸剪切强度达到23 MPa。将热处理作为二级表面处理,改善喷砂钢材的表面形貌和润湿性,促进PBT渗透到表面结构中,从而在接合界面处实现更强的锚固效果。通过二次热处理,钢材表面产生了花状纳米结构,表面粗糙度从112.9 nm提升至145.0 nm,表面自由能提升至76.2 mN/m,呈现出超亲水性,具有优异的润湿性,混合结构强度提升了45%,达到24.5 MPa^[46]。

熔融聚合物与金属之间的热传递过程在熔体填充过程中非常重要,提高金属温度可以使得熔体的表皮层变薄甚至完全消失,提升熔体流动能力有助于熔体填充结构并提升注塑成型工艺中聚合物-金属混合结构的连接强度。Li等^[47]建立了一种温度控制系统,在将熔融聚合物注入模具前,由加热装置提供的加热介质加热模具和金属至所需温度,结果熔体黏度降低,流动能力显著提升。具体来说,Li等^[48]将Al6061铝合金温度提高至PP的热变形温度,研究了金属表面温度对搭接剪切强度的影响。温度低于60 $^{\circ}\text{C}$ 时,熔融PP的表层固化,阻碍熔体在金属纳米表面的填充。温度从90 $^{\circ}\text{C}$ 升至120 $^{\circ}\text{C}$,搭接剪切强度从39.2 N增加到130.5 N。同时高的金属表面温度有利于PP的 β 晶体含量增加,形成了大量垂直于金属基底的 β 相晶体,显著提升了界面强度。

采用超声波辅助等先进工艺,引入高频振动能量,在熔体局部瞬间降低聚合物黏度,促进微观流动填充,有助于熔融聚合物快速渗透到金属表面孔隙,从而实现紧密的界面结合。Bi等^[49]提出了一种带有模内超声波振动的新型注塑模具,以PPS树脂为主要材料,探讨了不同超声波振动持续时

间和阶段对熔体填充行为和产品性能的影响。与传统模具相比,超声辅助模具降低熔体黏度38%。Cheng等^[50]借助超声振动对30%的GF增强PA6(GF/PA6)-A2024铝合金接头实现了原位化学键合,分析了超声波时间和超声波功率对不同温度下界面结合强度的影响。结果表明,在超声时间为10 s、超声功率为400 W的条件下,混合接头的常温拉伸剪切强度达到了40.98 MPa,比没有超声振动时提高了97.9%。适当的超声波能量可以降低PA6熔体的黏度,提高结晶度,从而实现PA6与A2024之间的界面结合,显著提升界面键合效率。

5 微观模拟分析界面黏接机理

由于聚合物-金属界面键合是一个从宏观流动填充到分子级相互作用的跨尺度复杂过程,因此,通过计算模拟方法深入剖析界面黏接性能,已成为揭示其界面结合机制的重要途径。具体而言,基于微观分析的数值模拟能够仿真熔体在金属表面结构上的流动与渗透过程,主要预测工艺参数对界面残余应力和力学失效行为的影响。此外,分子动力学模拟可以从原子/分子层面探究不同材料组合和表面处理下的结合机理,从而阐明界面强度的影响机制。

Zhang等^[51]研究了短玻纤增强PA66和DP590+Z高强度钢混合板的低速冲击响应。冲击器简化为三维刚体,而混合板则模拟为三维可变形部件。采用内聚力模型来模拟高强度钢与复合材料层间的界面行为。在失效的有限元模型中,观察到高速钢和复合材料界面出现轻微的塑性变形,界面分层发生在组分材料失效之前,是混合结构最薄弱的部位,对冲击载荷非常敏感。Pan等^[52]建立并验证了一套适用于PMHs互锁界面的参数化内聚力模型。在传统双线性内聚力模型基础上,引入沟槽几何等设计变量,建立反映机械互锁效应的参数化修正本构关系,以直接搜索算法识别修正模型中的关键参数,验证该修正模型在复杂载荷下预测界面失效的可靠性。

数值模拟为预测PMHs宏观成型的界面失效提供了参考价值,但难以从根本上揭示聚合物与金属两类异质材料间界面性能的形成机理与失效本质。聚合物与金属注塑的型腔特征尺寸(如孔隙、沟槽)通常在几十到几百纳米,在这个尺度下,材料的连续介质假设失效,聚合物分子链在金属表面纳米结构中的润湿和吸附进一步放大,聚合物链的取向、密度和有序度直接影响界面的传力效率和稳定性。界面性能取决于微观尺度下分子链扩散、官能团相互作用以及界面结晶等复杂物理化学过程。分子动力学模拟将体系视为由原子或分子组成的粒子集合,通过计算粒子间的相互作用力更新位置和速度,揭示分子链在填充过程中扩散、相变及断裂等动态过程,提供实验难以捕捉的瞬态细节和机理洞察。

Zhou等^[53]构建了三种金属表面结构的PP-铝合金界面模型。通过分析PP分子链在金属表面及纳米型腔中的构象变化,揭示了混合结构在界面处形成机械互锁。通过分子动力学模拟研究了PP熔体在金属铝、镍和铁表面的润湿行为,

金属基底粗糙度越高,相互作用面积增加,从而引起相互作用界面能增加。PP-Fe混合结构模型在分离过程中少量聚合物分子链黏附在金属基底上,表现出更高的界面结合力^[54]。Liu等^[55]模拟研究了PPS、PA6和PP与铝和铜基底纳米成型中的界面相互作用及黏附机制。对于PA6,铝基底和铜基底的凹坑在100 ps内填满;PPS熔体在200 ps内填满铝基底的凹坑,在250 ps内填满铜基底的凹坑;对于等规PP,铝基底和铜基底的凹坑均未填满。结果表明,在使用相同聚合物的情况下,金属铜的锚固强度和填充率均优于铝基底。高极性聚合物由于具有更强的表面活性,单链在聚合物-金属界面上的壁滑现象更为明显。Li等^[56]探究了以铝为金属基底的PA6和聚乙烯(PE)注塑成型的界面相互作用,模拟结果与Zhou等^[53]和Liu等^[55]报道的结果相似。在填充过程中,聚合物链沿着纳米空腔的内壁出现了壁滑行为。由于PE链流动性更好,在200 ps前的填充空腔的速度比PA6快,但聚合物填充腔体后的空腔区域有限,导致填充速率变慢。最终,在填充完成阶段,PA6的整体填充率高于PE的填充率。在分离过程中,靠近铝基底的聚合物链高度拉伸,而远离界面的聚合物链则相对稳定。Xin等^[57]选择PPS和铜作为聚合物和金属材料,研究了纳米注塑过程中异质界面的相互作用行为,探究聚多巴胺(PDA)涂层影响铜-PPS界面黏附行为的机理。PDA的引入在界面上形成了许多锚定结构,在不同程度上抑制了聚合物的滑移行为,提高了界面黏合强度。与Cu-PPS模型相比,PDA涂层的界面系统都具有更高的界面能。

6 结语和展望

PMHs可在多个行业和应用领域取代或部分取代全金属零件,具有广泛的应用前景。常规机械紧固和黏接等技术制备出的PMHs结构,容易出现应力集中、机械损伤和热损伤,成型工艺较为复杂,存在一定的局限性。PMHs直接注塑成型技术具有成型稳定、操作简单、成型周期短、组件之间结合紧密等特点。金属嵌件的表面处理工艺与聚合物基体的选择直接决定连接界面的结合强度和整体结构性能,需重点关注其表面处理方法及其与注塑工艺的兼容性。聚合物-金属混合结构的界面特性对混合结构的性能有重大影响,提高熔融聚合物的润湿性和金属表面改性对键合强度有积极作用。在注塑成型工艺中,提升金属表面温度及超声波辅助技术可降低聚合物黏度和凝固层厚度,有助于熔融聚合物快速渗透到金属表面孔隙,从而提高聚合物与金属的连接强度。通过微观数值及分子动力学模拟探究PMHs界面黏接性能,从两个维度探究聚合物与金属之间的相互作用机制。基于当前的研究和应用需求,未来PMHs直接注塑成型技术的发展可从以下几个方向重点突破。

(1)材料体系。除目前常用的PPS、PBT、PA6和非极性材料如PP聚合物外,纤维增强材料的应用也越来越广泛,纤维成分、含量、取向等对界面黏接及PMHs的界面力学性能的影响规律仍需进一步探究。此外,金属结构部分主要以铝合

金为主,其表面处理技术较为丰富,目前钛合金、铜及铜合金等材料也逐步应用于PHMs中,需进一步开发相应的表面处理工艺与技术。

(2)表面处理。针对金属表面的处理工艺主要有喷砂、化学刻蚀、阳极氧化、激光处理、硅烷改性等,以及大成普拉斯株式会社提出的纳米成型技术(NMT)以及比亚迪、劲胜公司等提出的改进NMT技术。未来对于金属基体的处理方式也越来越趋于各种机械方法和化学方法相结合的方式,或者是更短流程的、快捷的一体化制造技术。

(3)微观黏接机理。虽然PMHs结构的界面黏接主要有微观机械互锁、化学成键机制以及浸润机制,但具体工艺下的黏接机理及其贡献程度尚不清晰,也难以通过实验手段准确表征。此外,聚合物熔体在微纳粗糙结构的充填行为、链段取向及结晶特性等均会影响微观黏接及其强度,需结合分子动力学等微观模拟手段进一步探明界面黏接机理。

(4)综合性能。随着PMHs结构的应用不断拓展,对组零件的黏接强度及其在极端环境、恶劣工况下的耐久性,如耐温性、耐湿性及疲劳性能等也提出了更高的要求。未来的研究重点也将侧重于PMHs结构的整体力学性能与服役性能及其改进技术。

由于聚合物-金属混合结构的键合机制以及聚合物在注塑成型过程中的流动和凝固的复杂性,了解直接注塑成型PMHs结构中的工艺-结构-性能关系仍然是一项挑战。因此,需要在上述这些方向开展进一步研究,探索PMHs结构中的材料组合、金属表面结构技术、注塑成型工艺、微观黏接机理及其综合性能。

参考文献

- [1] VASCONCELOS R L, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2023, 63(3):691-722.
- [2] WU J, CHEN C. *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, 33(7): 2 221-2 230.
- [3] 张巍,等. *工程塑料应用*, 2025, 53(10):104-115.
ZHANG W, et al. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(10): 104-115.
- [4] CHEN J, et al. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023. DOI:10.1016/j.ijadhadh.2023.103361.
- [5] LAMBIASE F, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 93: 1-14.
- [6] ZOU X, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(23): 27 383-27 396.
- [7] 陈杨.连续纤维增强复合材料模内包覆注塑成型的研究[D].北京:北京化工大学,2022.
CHEN Yang. Research on in-mold overmolding of continuous fiber reinforced composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [8] 张文超,等. *中国塑料*, 2025, 39(4):104-110.
ZHANG Wenchao, et al. *China Plastics*, 2025, 39(4):104-110.
- [9] QIAO Y, et al. *Applied Surface Science*, 2024. DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.159092.
- [10] LIANG Y, et al. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2025. DOI:10.1016/j.ijadhadh.2025.104171.
- [11] 邹德波,等. *舰船科学技术*, 2024, 46(16):39-42.
ZOU Debo, et al. *Ship Science and Technology*, 2024, 46(16): 39-42.
- [12] 黄鑫.钛合金-塑料注塑成型关键技术研究[D].盐城:盐城工学院,2024.
HUANG Xin. Research on key technologies of titanium alloy-plastic injection molding[D]. Yancheng: Yancheng Institute of technology, 2024.
- [13] 侯学伟. SOP-8 塑料封装器件注塑成型技术及湿气扩散研究[D].西安:西安电子科技大学,2023.
HOU Xuewei. Research on injection molding technology and moisture diffusion of SOP-8 plastic packaging devices[D]. Xidian University, 2023.
- [14] 丁杰泰,等. *机械工程期刊*, 2023, 59(14):73-82.
DING Jietai, et al. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(14):73-82.
- [15] 樊聪,等. *上海交通大学学报*, 2018, 52:176-181.
FAN Cong, et al. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2018, 52:176-181.
- [16] KAJIHARA Y, et al. *CIRP Annals*, 2023, 72. DOI: 10.1016/j.cirp.2023.04.004.
- [17] 郭荣盛,等. *上海交通大学学报*, 2021, 55(1):96-102.
GUO Rongsheng, et al. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(1):96-102.
- [18] 樊聪.聚合物-金属直接成型制品粘接强度的研究[D].上海:上海交通大学,2018.
FAN Cong. Study on bonding strength of polymer-metal direct molded parts[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [19] TAN C, et al. *Composites, Part B*, 2022. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109966.
- [20] 王志伟,等. *能源化工*, 2025, 46(4):9-14.
WANG Zhiwei, et al. *Energy Chemical Industry*, 2025, 46(4): 9-14.
- [21] JIAO Y, MA W. *Mater Today Commun*, 2022. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104291.
- [22] 张岩,等. *工程塑料应用*, 2024, 52(8):190-196.
ZHANG Yan, et al. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(8): 190-196.
- [23] 赵翔,等. *工程塑料应用*, 2025, 53(11):229-236.
ZHAO Xiang, et al. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(11):229-236.
- [24] CHEN J, et al. *Applied Surface Science*, 2019, 489:392-402.
- [25] 刘生秩.聚合物-金属混合结构注射成型及界面特性研究[D].长沙:中南大学,2023.
LIU Shengyi. Study on injection molding and interface properties of polymer-metal hybrid structures[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [26] WANG S, et al. *Precision Engineering*, 2021, 72:620-626.
- [27] LI H, et al. *Polymers*, 2022. DOI:10.3390/polym14091652.

- [28] PARODI A, et al. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52: 3 669–3 680.
- [29] WANG B, et al. *Applied Surface Science*, 2023. DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.157231.
- [30] ZHAO W, et al. *Polymer Composites*, 2024, 45(14): 13 089 – 13 098.
- [31] WEI F, et al. *Journal of Materials Science*, 2025, 60(14): 6 023 – 6 058.
- [32] SKOWRON K, et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2025, 56(11): 5 235–5 251.
- [33] KAJIHARA Y, et al. *CIRP Annals*, 2018. DOI: 10.1016/j.cirp.2018.04.112.
- [34] HU Y, et al. *Composites, Part B*, 2019. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107478.
- [35] LI J, et al. *Materials & Design*, 2021. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109641.
- [36] ZUO S, et al. *Coatings*, 2023. DOI: 10.3390/coatings13050903.
- [37] ZHOU M, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 95: 508–520.
- [38] ENAMI K, et al. *Precision Engineering*, 2020, 62: 273–281.
- [39] WOITUN D, et al. *Journal of Laser Applications*, 2020. DOI: 10.2351/7.0000060.
- [40] LIN W, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117180.
- [41] OLIVEIRA G H M, et al. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2025. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2025.104045.
- [42] LYU X, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2025. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2025.131893.
- [43] ZOU X, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2024. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131404.
- [44] 郑津烁, 等. *工程塑料应用*, 2024, 52(9): 178–182. ZHENG Jinshuo, et al. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(9): 178–182.
- [45] CHEN W, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 85: 295–305.
- [46] CHEN W, et al. *Materials Letters*, 2023, 333. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.133651.
- [47] LI X, et al. *Composite Structures*, 2018, 184: 545–553.
- [48] LI X, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 635–643.
- [49] BI M, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024. DOI: 10.1002/app.55927.
- [50] CHENG B, et al. *Thin-Walled Structures*, 2025. DOI: 10.1016/j.tws.2025.112983.
- [51] ZHANG Y, et al. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 123: 1–13.
- [52] PAN W, et al. *Composite Structures*, 2023. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116593.
- [53] ZHOU M, et al. *Applied Surface Science*, 2019, 478: 680–689.
- [54] ZHOU M, et al. *Polymers*, 2020. DOI: 10.3390/polym12081696.
- [55] LIU D, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2021, 61(1): 95–106.
- [56] LI S, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2022, 62(10): 3 279–3 289.
- [57] XIN Y, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2024, 64(4): 1 645–1 657.

(上接第 215 页)

- [12] RUAN K, ZHONG X, SHI X, et al. Liquid crystal epoxy resins with high intrinsic thermal conductivities and their composites: A mini-review[J]. *Materials Today Physics*, 2021, 20. DOI: 10.1016/j.mtphys.2021.100456.
- [13] HAO Y T, LI Q H, PANG X H, et al. Synergistic enhanced thermal conductivity and dielectric constant of epoxy composites with mesoporous silica coated carbon nanotube and boron nitride nanosheet[J]. *Materials*, 2021, 14(18). DOI: 10.3390/ma14185251.
- [14] YIM Y J, PARK S J. Effect of silver-plated expanded graphite addition on thermal and electrical conductivities of epoxy composites in the presence of graphite and copper[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 123: 253–259.
- [15] CHEN C, XUE Y, LI X W, et al. High-performance epoxy/binary spherical alumina composite as underfill material for electronic packaging[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 118: 67–74.
- [16] 陈明华, 孟宏远, 李誉, 等. 聚合物基导热绝缘复合材料研究与应用进展[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(17): 6 895–6 913. CHEN Minghua, MENG Hongyuan, LI Yu, et al. Research and application progress of polymer-based thermal-conductive electric-insulating composite materials[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(17): 6 895–6 913.
- [17] GHAFARI-MOSANENZADEH S, AGHABABAEI TAFRESHI O, DAMMEN-BROWER E, et al. A review on high thermally conductive polymeric composites[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(2): 692–711.