

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.008

聚丙烯与金属粘接界面的相互作用与耐久性调控

王道娟, 陈钺, 肖孟杰

(金发科技股份有限公司, 广州 510663)

摘要: 为系统性解决聚丙烯(PP)与 304 不锈钢粘接过程中存在的界面作用力弱、耐久性差等关键技术瓶颈,并深入探究 PP 材料组成结构对粘接行为的影响规律。通过多组分协同改性,开发了高性能 PP 基复合材料体系。首先针对 PP/不锈钢异质界面,研究开发了以马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)为核心的界面强化体系。结果表明,当接枝率为 0.65% 的 PP-g-MAH 添加质量分数为 30% 时,酸酐基团与不锈钢表面形成牢固化学键合,使粘接强度达到最优值。此外,研究了 PP 基体树脂本征特性对界面粘接性能的调控机制:在 PP 基体树脂的熔体流动速率(MFR)相近时,结晶度高的 PP 会抑制分子链扩散,降低粘接强度;而当 PP 基体树脂的结晶度相近时,高 MFR 的 PP 可显著促进界面分子链缠结,提升粘接性能;同时,PP 基体树脂中的乙丙橡胶(EPR)通过其非晶相分子链的高活动性,可有效促进界面扩散与本体增韧,使具有高 EPR 含量的 PP 树脂/不锈钢体系表现出更优异的界面粘接强度。其次,引入质量分数 15% 的高 MFR 的聚烯烃弹性体(POE),以增强熔体对不锈钢表面的浸润性。同时,还添加了质量分数 1% 的氧化镁作为水解抑制剂,经 80 °C 水煮 72 h 老化后,复合材料仍能保持 72% 以上的粘接强度,界面耐久性得到显著提升。

关键词: 聚丙烯; 不锈钢粘接; 马来酸酐接枝聚丙烯; 界面改性; 耐久性

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0058-08

Interaction and durability control of polypropylene-metal bonding interface

WANG Daojuan, CHEN Tan, XIAO Mengjie

(Kingfa Science and Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract : In order to systematically solve the key technical bottlenecks such as weak interfacial force and poor durability in the bonding between polypropylene (PP) and 304 stainless steel, and to deeply explore the influence of PP material composition and structure on bonding behavior, the high-performance PP-based composite system was developed through multi-component synergistic modification. Initially, for the heterogeneous interface between PP and stainless steel, an interfacial reinforcement system centered on maleic anhydride grafted polypropylene (PP-g-MAH) was researched and developed. Results indicate that when the mass fraction of PP-g-MAH with a grafting ratio of 0.65% is 30wt%, the anhydride groups form robust chemical bonds with the stainless steel surface, achieving optimal bonding strength. Furthermore, the regulatory mechanism of PP intrinsic properties on bonding performance was elucidated. At similar melt flow rates (MFR), high crystallinity inhibits molecular PP chain diffusion, reducing bonding strength. Whereas at comparable crystallinity, high MFR significantly promotes interfacial molecular chain entanglement, enhancing bonding performance. Concurrently, the ethylene-propylene rubber (EPR) of PP effectively promotes interfacial diffusion and matrix toughening through the high mobility of its amorphous molecular chains, resulting in superior bonding strength in PP/stainless steel system with high EPR content. The incorporation of 15wt% polyolefin elastomer (POE) with high MFR significantly improves the melt's wettability on the stainless steel surface. Additionally, by adding 1wt% magnesium oxide as a hydrolysis inhibitor, the composite material maintains over 72% of its bonding strength after being soaked in water at 80 °C for 72 hours for aging, indicating a significant improvement in interface durability.

Keywords : polypropylene ; stainless steel adhesion ; maleic anhydride grafted polypropylene ; interfacial modification ; durability

通信作者: 王道娟, 硕士, 工程师, 主要从事高分子复合材料的研究

收稿日期: 2025-10-19

引用格式: 王道娟, 陈钺, 肖孟杰. 聚丙烯与金属粘接界面的相互作用与耐久性调控[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 58-65.

WANG Daojuan, CHEN Tan, XIAO Mengjie. Interaction and durability control of polypropylene-metal bonding interface[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 58-65.

聚丙烯(PP)作为一种综合性能优异、成本低廉的通用塑料,其应用范围常因其固有的低表面能、化学惰性及高结晶度而受到限制,尤其是在与高表面能材料(如金属)的粘接与复合方面面临严峻挑战^[1-3]。为改善PP的界面性能,研究者们已开发出多种有效的表面与体相改性策略。例如,等离子体处理可在不损伤材料本体的前提下,通过引入含氧极性官能团(如羟基、羧基)显著提升PP表面能与润湿性^[4-6];另一方面,通过化学接枝将甲基丙烯酸缩水甘油酯、马来酸酐(MAH)等极性单体引入PP分子链,可从根本上增强其与极性表面的相互作用与反应活性,这在PP与铝箔/板等金属的复合体系中已被证实成效显著^[7-9]。为进一步强化界面结合,还可对金属基材进行表面构筑,如在铝合金表面通过阳极氧化构建多孔微观结构,以增强界面机械互锁效应^[10]。

然而,现有研究绝大多数集中于PP与铝合金间的粘接,而对不锈钢这一在工业中广泛应用、但表面化学活性与钝化特性显著不同于铝合金的金属基材,相关研究则相对匮乏。不锈钢表面固有的低反应活性,使得基于极性相互作用和化学键合的粘接机制面临更大挑战,这限制了高性能PP/不锈钢复合结构的开发与应用,例如在窗户暖边条等特定产品中的应用^[11]。

本文系统性地研究了改性PP与304不锈钢的粘接界面,旨在突破PP材料在此类“难粘”金属体系中的应用瓶颈,立足于窗户暖边条材料的实际开发需求,通过设计树脂体系,考察不同熔体流动速率(MFR)、结晶度和乙丙橡胶(EPR)含量的均聚PP和共聚PP体系以及不同MFR、弯曲模量、结晶度的聚烯烃弹性体(POE)树脂对复合材料界面粘接强度的影响,不仅为解决PP/不锈钢的强韧、耐久粘接提供了明确的技术路径与材料方案,也为拓展PP在高端复合结构领域的应用提供了新的理论与实践依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

(1)均聚PP树脂。

L5E89:MFR为3.1 g/10 min (230 °C, 2.16 kg),中国石油化工股份有限公司;

4220:MFR为0.45 g/10 min (230 °C, 2.16 kg),北京燕山石油化工有限公司;

HP500N:MFR为12 g/10 min (230 °C, 2.16 kg),

荷兰利安德巴塞尔工业公司。

(2)共聚PP树脂。

B8101:MFR为12 g/10 min (230 °C, 2.16 kg),北京燕山石油化工有限公司;

BX3800:MFR为30 g/10 min (230 °C, 2.16 kg),韩国SK公司;

BX3500:MFR为10 g/10 min (230 °C, 2.16 kg),韩国SK公司;

EP300M:MFR为9 g/10 min (230 °C, ×2.16 kg),广东中海壳牌石油化工有限公司;

K9017:MFR为20.0 g/10 min (230 °C, 2.16 kg),中国台湾化学纤维公司。

(3)马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH):自制,接枝率为分别为0.31%,0.49%,0.65%,0.87%,1.02%;对应的MAH单体残留率分别为0.69%,0.15%,0.45%,0.32%,0.21%。

(4)乙烯-丙烯酸共聚物:MFR为10 g/10 min (190 °C, 2.16 kg),美国陶氏化学公司。

(5)乙烯-乙酸乙烯酯共聚物(EVA):MFR为3.0 g/10 min (190 °C, 2.16 kg),美国埃克森美孚公司。

(6)C5石油树脂:软化点温度为98~105 °C,美国伊士曼化工公司。

(7)苯乙烯-乙烯-丁烯共聚物(SEBS):苯乙烯含量为31%,密度为0.91 g/cm³,中国台湾李长容化学工业股份有限公司。

(8)威达美橡胶:密度为0.863 g/cm³,MFR为9 g/10 min (190 °C, 2.16 kg),美国埃克森美孚公司。

(9)POE树脂。

ENGAGE 8677:密度为0.87 g/cm³,MFR为0.5 g/10 min (190 °C, 2.16 kg),美国陶氏化学公司;

ENGAGE 8150:密度为0.868 g/cm³,MFR为0.5 g/10 min (190 °C, 2.16 kg),美国陶氏化学公司;

ENGAGE 7467:密度为0.862 g/cm³,MFR为1.2 g/10 min (190 °C, 2.16 kg),美国陶氏化学公司;

NEXLENE 891:密度为0.885 g/cm³,MFR为1 g/10 min (190 °C, 2.16 kg),韩国SK公司;

ENGAGE 7447:密度为0.865 g/cm³,MFR为5 g/10 min (190 °C, 2.16 kg),美国陶氏化学公司。

(10)滑石粉:粒径为5 μm,径厚比为15,辽宁海城添源化工有限公司。

(11)氧化镁(MgO):日本协和化学工业株式会社。

(12)碳化二亚胺:上海尤恩化工有限公司。

(13)硅烷偶联剂:安徽沸点新材料有限公司。

(14)304不锈钢板:佛山市金景盛五金制品有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:TST30,科倍隆(南京)机械有限公司;

平板流化仪:BL-7160-A,东莞市宝轮精密检测仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:TGA 200F3,德国NETZSCH公司;

MFR测试仪:BMF-003,德国ZWICK公司;

万能试验机:HIT5.5,德国兹维克公司。

1.3 试样制备

(1)复合材料的制备。

按照表1配方中的物料和质量分数称取相应的质量,混合均匀,加入双螺杆挤出机中,挤出温度200~220℃,螺杆转设定200 r/min,挤出完成后切粒,切粒大小控制在3~4 mm,粒子不能有气孔。

表1 复合材料配方
Tab. 1 Formula of composites

Component	Mass fraction/%
PP	30~70
Polarity modifiers	10~50
Elastomer	5~20
Filler	2~5

表1中极性改性剂为PP-g-MAH、乙烯-丙烯酸共聚物、EVA中的一种;弹性体为C5石油树脂、SEBS、威达美橡胶、POE树脂中的一种;填料为滑石粉;水解抑制剂为碳化二亚胺、硅烷偶联剂、氧化镁中的一种。

(2)塑料-金属粘接复合板的制备。

称取100 g复合材料平整地铺展在金属板上相应模具中,再在温度为220℃的平板流化仪中先不加压预热10 min,再加热加压15 min,然后加压冷却至室温出模,压力设定在15 MPa,出模的试片应平整光洁、厚度均匀、无气泡,满足后续测试或应用要求。

(3)复合板的水煮老化。

将粘接复合材料试样浸泡于蒸馏水中,并置于80℃恒温水浴环境,定期监测粘接强度的衰减情况。

1.4 测试与表征

MFR测试:按照ISO 133-1/2-2011进行测试,

条件为2.16 kg,230℃。

密度测试按照ISO 1183-1-2019进行测试。

粘接强度测试:按照标准ASTM D1876-72(1983)对复合材料进行T型剥离测试。

DSC测试:采用DSC设备,在氮气氛围中,以20℃/min的速度从30℃加热到200℃,恒温5 min以消除热历史,随后以20℃/min的速度从200℃降温到30℃,再以20℃/min的速度从30℃加热到200℃。

2 结果与讨论

纯PP及其与POE复合体系对不锈钢基材表现出极低的粘接强度。通过引入极性改性剂可显著增强界面相互作用,对比了几种极性改性剂对粘接强度的影响,列于表2,其中PP树脂选用的是PPB8101,POE树脂选用的是ENGAGE 7447。由表2可见,PP+POE+PP-g-MAH展现出最优的改善效果。

表2 不同极性改性剂对粘接强度的影响

Tab. 2 Bonding strength with different polarity modifiers

Component	Bonding strength/ (N·cm ⁻¹)
PP	0
PP+POE	5
PP+POE+PP-g-MAH	48
PP+POE+EVA	15
PP+POE+Ethylene-acrylic acid copolymer	25

2.1 粘接强度的影响因素

2.1.1 PP-g-MAH的影响

PP-g-MAH对改性PP树脂与不锈钢间界面作用的影响受到以下三种因素的调控:PP-g-MAH的添加含量、分子链上的有效接枝率以及MAH单体的残留率。这三种因素对材料体系界面作用的影响如图1所示。由图1a可见,界面粘接强度随PP-g-MAH添加含量的变化呈现典型的非线性关系,表现为先升高后降低的趋势。当PP-g-MAH质量分数低于30%时,粘接强度随其添加量的增加而迅速提升,并在质量分数为30%处达到峰值(52.3 MPa),然而,当PP-g-MAH含量超过此临界值后,粘接强度不升反降。这是由于过量的PP-g-MAH破坏了基体树脂的连续相结构,引发基体脆化与相分离现象,导致本体力学性能劣化,进而削弱了界面力的有效传递^[12]。

粘接强度与接枝率的关系呈现线性关系,如图1b所示,粘接强度随着接枝率的增加不断提升,且

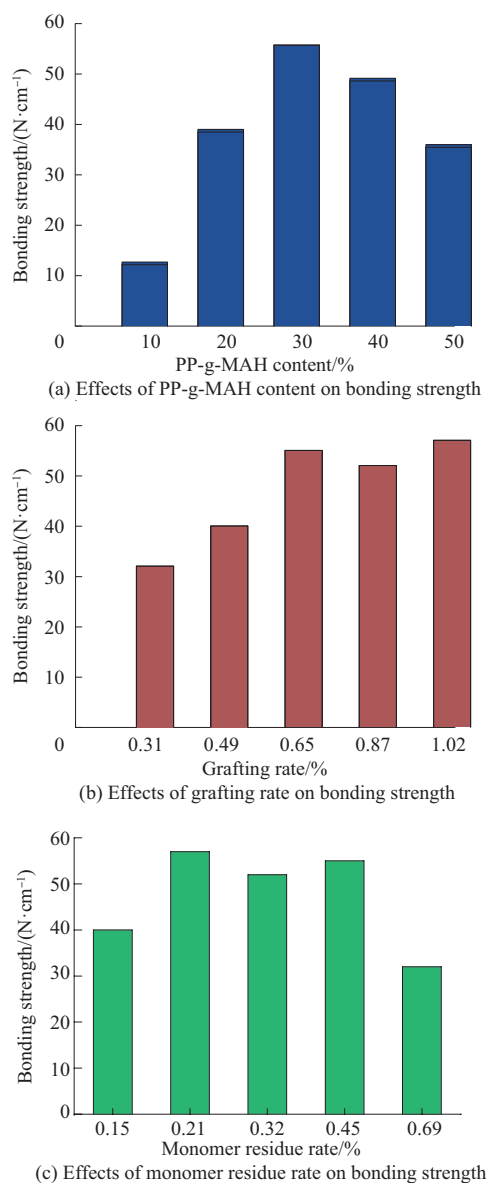


图1 PP-g-MAH 三种因素对粘接强度的影响

Fig. 1 Effects of three factors of PP-g-MAH on interfacial bonding strength

当接枝率超过 0.65% 后,粘接强度增长趋于饱和。此外,如图 1c 所示,残留单体浓度与粘接强度呈负相关。从单体残留量维度分析,单体残留浓度从

0.2% 增加至 0.45%,粘接强度主要受接枝率的调控,接枝率越大,粘接越强,当单体残留量继续增加时,强度下降;当残留量进一步增至 0.69% 以上时,强度降至 40 MPa 以下。这是因为残留的单体小分子不仅无法参与有效界面键合,反而会在界面区域聚集,形成弱边界层,阻碍 PP-g-MAH 中有效的酸酐官能团与金属表面接触,从而显著削弱界面键合强度^[13-15]。

因此,为实现 PP/不锈钢间的最优粘接,必须对 PP-g-MAH 的添加含量、接枝率及残留单体进行系统性的协同优化,调控其在“界面键合增强”与“基体结构破坏”之间的平衡点。

2.1.2 基体 PP 树脂的影响

固定 PP-g-MAH 质量分数为 30%、接枝率 0.65%;POE 树脂选用 ENGAGE 7447,添加质量分数为 10%,继续探讨不同种类基体树脂 PP 对粘接强度的影响,相关数据列于表 3,由表 3 可见,基体 PP 对粘接性能的影响主要受 MFR、结晶度、EPR 含量的调控。其中 PP 的结晶度由 DSC 测试材料的熔融热行为计算得到。

(1) MFR 和结晶度的协同影响。

在均聚 PP 与共聚 PP 中,PP 基体树脂与不锈钢材料界面间的粘接性能均与 PP 结晶特性及 MFR 密切相关。具体而言:当二种基体 PP 树脂的 MFR 相近时(如对比 BX3500 与 EP300M),结晶度越高,分子链运动能力越弱,界面扩散越困难,粘接强度越低;当结晶度相近时(如对比 B8101 与 BX3800),MFR 越高,则体系黏度越低,分子链更易运动与扩散,从而形成更强的界面缠结,粘接强度也相应提升。MFR 与结晶度共同调控着分子链在界面处的运动与缠结行为,并最终决定粘接强度。这一协同作用可解释三组均聚 PP (4220, HP500N 与 L5E89) 的对比结果:4220 虽结晶度低,但 MFR 小、黏度高,限制了分子链扩散;而 HP500N 与 PP LE589 虽结晶

表 3 不同种类基体树脂 PP 对粘接强度的影响

Tab. 3 Effect of different kinds of matrix resin PP on bonding strength

Types of PP		Crystallinity/%	MFR/[g·(10min) ⁻¹]	EPR content/%	Bonding strength/(N·cm ⁻¹)
Homopolymerized PP	4220	32.3	0.45	0	36.48
	L5E89	46.7	3.1	0	33.53
	HP500N	62.0	12	0	32.48
Copolymerize PP	B8101	24.0	12	20	40.3
	BX3800	24.1	30	20	54.2
	BX3500	21.3	10	20	45.5
	EP300M	22.8	9	25	43.7
	K9017	29.5	20	28	57.1

度高,但其MFR大、黏度低,增强了扩散能力。正反因素相互抵消,使得三者的粘接强度最终趋于接近。

(2) EPR 含量的影响。

对比不同共聚PP树脂中不同EPR含量对界面粘接强度的影响可见,EPR含量更高的共聚PP树脂(如K9017)与不锈钢粘接时表现出更优异的粘接强度。这主要是因为EPR作为非晶橡胶相,其分子链段的活动能力远高于结晶性的PP。在热粘接过程中,这些活动性更强的EPR分子链更容易迁移扩散到界面,以产生界面结合力。

2.1.3 弹性体的影响

在PPB8101+30%PP-g-MAH(接枝率0.65%)体系中引入10份不同种类的弹性体,研究了弹性体种类对粘接性能的影响,如图2所示。由图2可见,弹性体的引入普遍提升了材料整体的粘接强度,其中POE(NEXLENE 891)表现出最佳的增强作用。

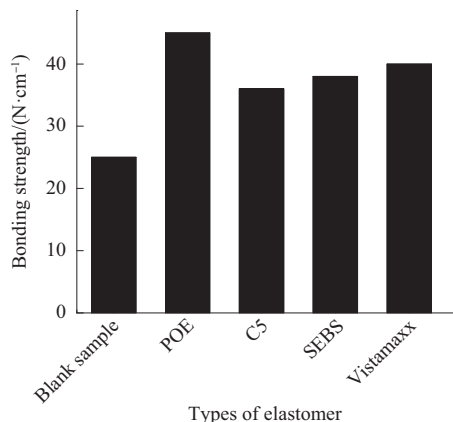


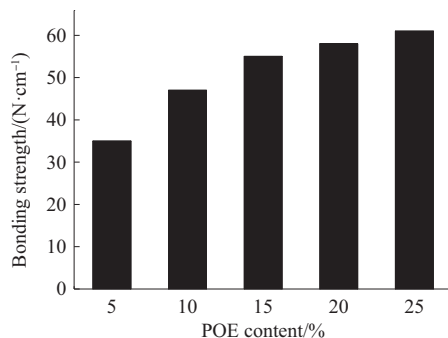
图2 不同种类弹性体对粘接强度的影响

Fig. 2 Effects of different types of elastomers on bonding strength

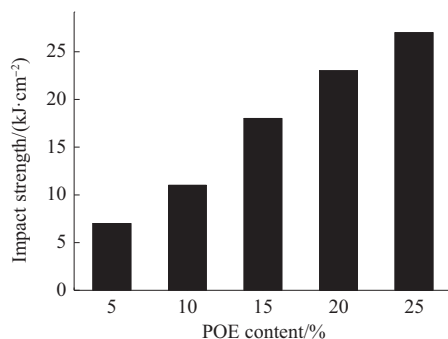
进一步考察POE含量对复合材料粘接强度、冲击强度和弯曲模量的影响,如图3所示。由图3可见,随着POE含量的增加,材料体系的粘接强度和冲击强度呈上升趋势,弯曲模量呈下降趋势,综合评估材料的粘接性能与力学性能,优选NEXLENE 891质量分数为15%的改性PP基体树脂,以实现材料在保持足够刚性的同时达到最佳的界面粘接强度。

选取一组密度相当的POE树脂,对比了不同种类POE对应的不同MFR、硬度、熔点,见表4。

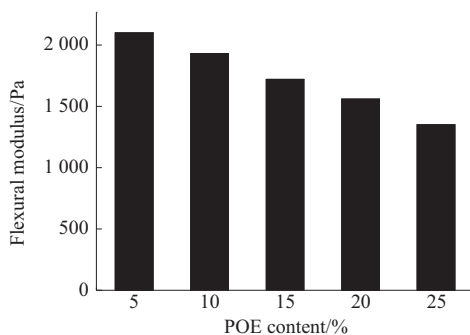
图4为不同种类POE对复合材料粘接强度、冲击强度和弯曲模量的影响。如图4a所示,ENGAGE 7447因具备高MFR、低熔点与低硬度的



(a) Effect of POE content on bonding strength



(b) Effect of POE content on impact strength



(c) Effect of POE content on flexural modulus

图3 POE含量对复合材料粘接强度、冲击强度和弯曲模量的影响
Fig. 3 Effects of POE contents on bonding strength, impact strength and flexural modulus of composites

表4 不同POE树脂的性能对比

Tab. 4 Performance comparison of different POE resins

POE	Density/ (g·cm ⁻³)	MFR/ [g·(10 min) ⁻¹]	Shore D	Melting point/°C
ENGAGE 7447	0.865	5	12	35
NEXLENE 891	0.885	1	29	74
ENGAGE 7467	0.862	1.2	12	34
ENGAGE 8150	0.868	0.5	20	55
ENGAGE 8677	0.87	0.5	11	118

特性,表现出最优的粘接强度。对比MFR相近的ENGAGE 8150与ENGAGE 8677,后者由于熔点较高,粘接性能相对较差;而NEXLENE 891因硬度大、熔点高,粘接强度也较低。上述规律表明,较高MFR与较低熔点的POE更有利于提升粘接强度,其

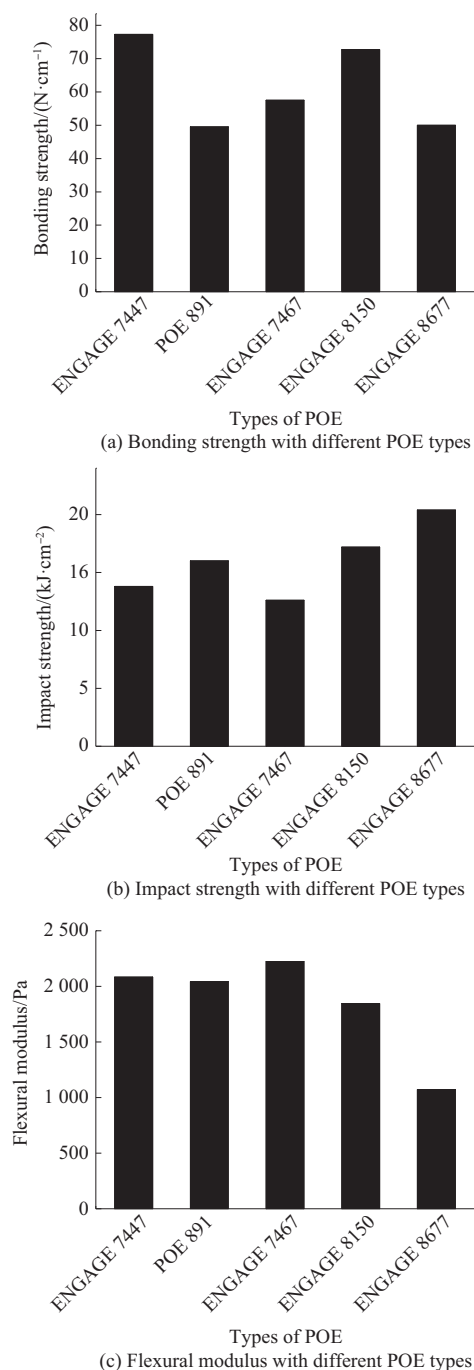


图4 不同种类POE对复合材料粘接性能的影响

Fig. 4 Effects of different types of POE on bonding properties of composites

内在机理在于:高MFR赋予分子链更佳的流动性,促进界面扩散;而低熔点(对应低结晶温度)则保障了在加工温度下分子链具备充分的活动能力,从而实现对基体的有效浸润。

进一步从力学性能角度分析,图4b与图4c显示了不同种类POE体系对应的冲击强度与弯曲模量。其中,ENGAGE 7447与ENGAGE 7647与其它3种

POE对比均表现出较低的冲击强度与较高的弯曲模量,但差异不大。因此,在粘接性能显著占优且力学性能相当的前提下,综合优选ENGAGE 7447作为复合材料体系的弹性体组分。

2.2 粘接老化失效分析和耐久性调控

材料在实际服役过程中,不可避免地暴露于多种环境应力之下,如长期紫外线辐照与由昼夜温差引发的周期性热胀冷缩。这些因素会加速材料的老化进程,进而可能导致粘接界面失效。文献显示粘接的典型失效模式主要包括内聚破坏(发生于基材内部)、界面破坏(发生于粘接界面)以及混合破坏^[13]。

2.2.1 粘接失效分析

为系统评估界面的耐久性,设计了加速老化实验:将粘接复合材料试样浸泡于蒸馏水中,并置于80℃恒温水浴环境,定期监测粘接强度的衰减情况。考察PP-g-MAH的接枝率与单体残留量对粘接耐久性的影响。

不同接枝率的PP-g-MAH体系水煮老化后粘接强度的保留率存在差异,如图5所示,这初步验证了界面化学键合稳定性是影响粘接耐久性和耐老化的关键因素。进一步地,研究发现残留的MAH单体浓度与老化程度呈正相关,如图6所示,单体残留越多,水煮老化后,粘接强度变化越大,当单体残留率达到0.45%时,老化21 d后,粘接强度变为零。其作用机理在于,残留MAH在水热环境中会逐渐水解,释放出酸性物质,导致局部pH下降。此酸性微环境会显著加剧界面化学键(特别是酯键)的水解速率,从而引发粘接强度的加速下降^[16]。

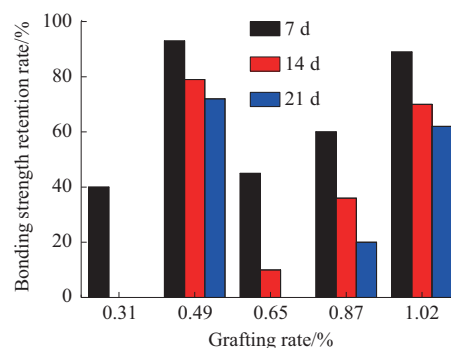


图5 接枝率对粘接强度保留率的影响

Fig. 5 Effects of grafting rate on bonding strength retention rate

2.2.2 粘接耐久性

在体系中加入水解抑制剂来抑制水解作用,对比几种不同水解抑制剂(MgO、硅烷偶联剂与碳化亚

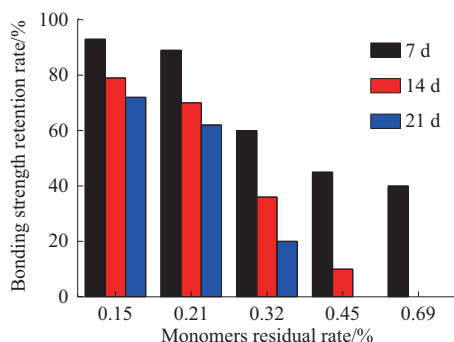


图6 单体残留率对粘接强度保留率的影响

Fig. 6 Effects of monomer residual rate on bonding strength retention rate

胺),水煮480 h后PP的粘接强度保持率均获得显著提升,无机碱MgO的稳定效果最优,如图7所示。继续研究MgO添加量的影响发现,粘接强度保留率随着MgO添加量的增加而增加,在质量分数1%时达到最大值70%,如图8所示,当MgO含量继续增加时粘接强度保留率反而下降,这是因为MgO作为多孔碱性物质,可有效吸附并中和残留MAH及其

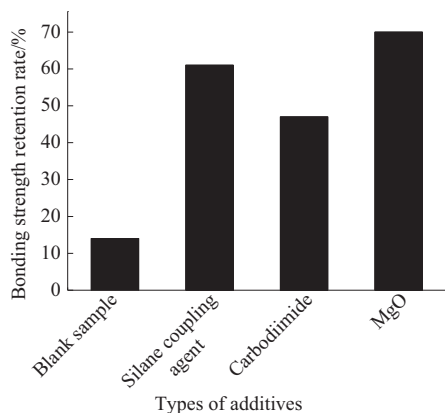


图7 添加不同助剂对水煮老化后PP粘接强度保持率对比

Fig. 7 Comparison of PP bonding strength retention rate after boiling aging with different additives

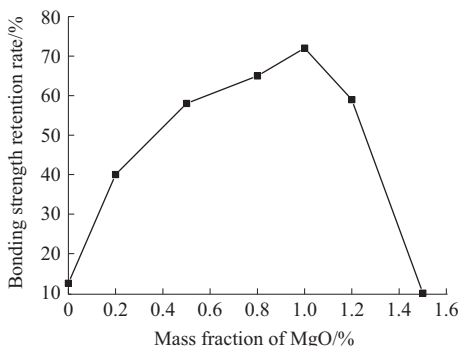


图8 不同MgO含量对水煮老化后PP粘接强度保持率的影响

Fig. 8 Effect of different MgO content on bonding strength retention rate of PP after boiling aging

水解产物,维持界面区域的pH稳定性,从而抑制酯键断裂^[17-18]。当MgO质量分数为1%时,可有效中和残留MAH单体,含量过高则可能导致其继续消耗MPP中已接枝的马来酸酐官能团反而削弱有效界面键合。因此,确定1%为MgO的最佳添加质量分数。

3 结论

研究了PP自粘接不锈钢体系粘接强度的影响因素以及粘接耐久性的调控,得出以下结论。

(1)界面化学键合是实现高强度粘接的核心机制。极性改性剂PP-g-MAH通过其酸酐基团与金属表面形成稳定的化学键合,对粘接强度起决定性作用。当PP-g-MAH添加质量分数为30%、接枝率为0.65%时,体系达到最优粘接性能;过量添加或接枝率不足均会因界面键合不充分或基体破坏而导致性能下降。

(2)基体树脂的微观结构显著影响粘接性能。具有高MFR、低结晶度及高EPR含量的PP树脂体系,通过增强链段运动能力与界面扩散行为,可实现更优异的粘接强度。

(3)弹性体POE通过增强界面浸润性进一步提升粘接性能。添加质量分数15%的高MFR的POE可在保持体系刚性的同时显著改善界面相容性与链段活动性,实现刚韧平衡。

(4)粘接耐久性调控。引入质量分数1%的MgO可中和残留MAH水解产生的酸性物质,抑制界面酯键水解,使复合材料在80℃水煮后仍保持70%以上的粘接强度。

参考文献

- [1] WAN G, SHAN C L P, FENG S G. Advances in bonding plastics [M]. Elsevier eBooks, 2023:327-358.
- [2] ZHANG C, BAI Y P, CHENG B Q, et al. Adhesion properties of atactic polypropylene/acrylate blend copolymer and its adhesion mechanism for untreated polypropylene materials[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017, 80:7-15.
- [3] MANDOLFINO C. Polypropylene surface modification by low pressure plasma to increase adhesive bonding: Effect of process parameters[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 366: 331-337.
- [4] LIANG C S, LV Z F, BO Y, et al. Effect of modified polypropylene on the interfacial bonding of polymer-aluminum laminated films[J]. Materials & Design, 2015, 81:141-148.
- [5] WANG H, YANG C H, HE L M, et al. Enhancement of polypropylene bonding through plasma-ultrasonic treatment[J]. Polymers,

- 2025, 17(6). DOI:10.3390/polym17060726.
- [6] CUI H, GAO X L. Surface modification on polyimide yarn by plasma treatment to enhance adhesion with polypropylene resin[J]. *Polymers*, 2022, 14(19). DOI:10.3390/polym14194232.
- [7] 张翼, 齐暑华, 段国晨, 等. 聚烯烃粘接的研究进展[J]. *材料导报*, 2011, 25(9):77–80.
- ZHANG Yi, QI Shuhua, DUAN Guochen, et al. The development of polyolefin adhesion[J]. *Materials Reports*, 2011, 25(9):77–80.
- [8] CHEN J, DU K P, CHEN X M, et al. Influence of surface microstructure on bonding strength of modified polypropylene/aluminum alloy direct adhesion[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 489: 392–402.
- [9] MATSUMOTO T, SHIMIZU Y, NISHINO T. Analyses of the adhesion interphase of isotactic polypropylene using hot-melt polyolefin adhesives[J]. *Macromolecules*, 2021, 54(15):7 226–7 233.
- [10] OYMAK Z, ARAS O. Aging resistance and adhesion strength of cold plasma treated aluminum-polypropylene joints: The role of surface treatments and curing agents[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2025, 140. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2025.104027.
- [11] LONG W L, ZHOU X Y, DU B, et al. Enhancing the lap shear performance of resistance-welded GF/PP thermoplastic composite by modifying metal heating elements with silane coupling agent [J]. *Materials*, 2024, 17(20). DOI:10.3390/ma17204944.
- [12] COIAI S, AUGIER S, PINZINO C, et al. Control of degradation of polypropylene during its radical functionalisation with furan and thiophene derivatives[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, 95(3):298–305.
- [13] QIU W L, ZHANG F R, ENDO T, et al. Effect of maleated polypropylene on the performance of polypropylene/cellulose composite[J]. *Polymer Composites*, 2005, 26(4):448–453.
- [14] LI R, ZHANG X R, HOU Y B, et al. Maleic anhydride grafted polypropylene compatibilizer modified low-temperature resistant based on ethylene propylene diene monomer/polypropylene thermoplastic elastomers[J]. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2025, 31(6):1 354–1 365.
- [15] SRINIVASAN D V, RAVICHANDRAN V, IDAPALAPATI S. Failure analysis of GFRP single lap joints tailored with a combination of tough epoxy and hyperelastic adhesives[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 200. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108255.
- [16] REDFEARN H N, GODDARD J M. Antioxidant and dissociation behavior of polypropylene-graft-maleic anhydride[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(32). DOI: 10.1002/app.52764.
- [17] 薛天雨, 黄仲, 黄忍, 等. 改性轻烧氧化镁细粉的抗水化性能[J]. *耐火材料*, 2024, 58(1):30–34.
- XUE Tianyu, HUANG Zhong, HUANG Ren, et al. Hydration resistance of modified light-burned MgO fine powders[J]. *Refractories*, 2024, 58(1):30–34.
- [18] GAO Y, DONG L, HUANG L, et al. A first-principles study on the hydration behavior of $(\text{MgO})_n$ clusters and the effect mechanism of anti-hydration agents[J]. *Materials*, 2022, 15(10). DOI: 10.3390/ma15103521.