

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.02.023

硬脂酸锌对滚塑交联聚乙烯制品脱模及性能的影响

李文博¹, 张宜鹏^{1,2}, 廖辉荣¹, 高丙轮¹, 刘博¹

(1.北京华腾京研科技有限公司,北京 100084; 2.北京市化学工业研究院有限责任公司,北京 100084)

摘要:为降低滚塑交联聚乙烯(XLPE)成型过程中制品与模具之间的黏接力和摩擦力,提高脱模性能,明确内脱模剂(IMR)对制品性能的调控规律,以XLPE为基体,通过熔融挤出法制备了含有IMR的XLPE材料。首先通过黏接强度测试,对比了硬脂酸锌(ZnSt)、硬脂酸钙、聚乙烯蜡、褐煤蜡四种常用IMR的脱模效果,确定ZnSt为最优选择。随后通过改变ZnSt添加量,结合黏接强度测试、能量色散型X射线荧光光谱元素分析、力学性能测试、粉末特性表征及形貌观察等,揭示了ZnSt的脱模作用机制与最优添加量。结果表明,ZnSt在滚塑过程中会从XLPE内部迁移至外表面形成隔离膜,显著降低黏接强度;与未添加IMR的空白样品相比,添加0.3份ZnSt的样品黏接强度降低34%(从7.61 MPa降至5.00 MPa),且此时制品力学性能最优,拉伸强度达23.2 MPa,断裂伸长率为645.2%、缺口冲击强度为20.7 kJ/m²。随着ZnSt添加量增加,XLPE粉末流动性和堆积密度呈下降趋势,熔体流动速率略有上升;当ZnSt添加量达到0.5份后,制品外表面出现气泡且密度逐渐增加,内表面粗糙度上升,导致力学性能持续下降。综合脱模效果、加工性能及力学性能,滚塑XLPE中ZnSt的最佳添加量为0.3份。

关键词:交联聚乙烯;硬脂酸锌;滚塑成型;脱模性能;力学性能;加工性能

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)02-0184-07

Effects of zinc stearate on ejection and properties of crosslinked polyethylene product with rotational molding

LI Wenbo¹, ZHANG Yipeng^{1,2}, LIAO Huirong¹, GAO Binglun¹, LIU Bo¹

(1. Beijing Huateng Jingyan Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China;

2. Beijing Chemical Industry Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: To reduce the adhesion and friction forces between products and moulds during the molding of rotomolded cross-linked polyethylene (XLPE), improve ejection performance and clarify the regulation law of internal release agents (IMR) on product properties, XLPE materials containing IMR were prepared by melt extrusion using XLPE as the matrix. Firstly, the ejection effects of four common IMR, including zinc stearate (ZnSt), calcium stearate, polyethylene wax, and montan wax, were compared through adhesive strength tests, and ZnSt was determined as the optimal choice. Subsequently, by changing the addition amount of ZnSt and combining adhesive strength tests, energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopy elemental analysis, mechanical property tests, powder characteristic characterization, and morphology observation, the ejection action mechanism and optimal addition amount of ZnSt were revealed. The results show that ZnSt migrates from the interior of XLPE to the outer surface to form an isolation film during rotational molding, which significantly reduces the adhesive strength. Compared with the blank sample without IMR, the adhesive strength of the sample with 0.3 phr ZnSt decreases by 34%, which decreases from 7.61 MPa to 5.00 MPa, and the mechanical properties of the product are optimal at this addition amount, with a tensile strength of 23.2 MPa, an elongation at break of 645.2%, and a notched impact strength of 20.7 kJ/m². With the increase of ZnSt addition amount, the powder fluidity and bulk density of XLPE show a downward trend, while the melt flow rate increases slightly. When the ZnSt addition amount is not less than 0.5 phr, bubbles appear on the outer surface of the product and their density gradually increases, and the roughness of the inner surface rises, leading to a continuous decrease in mechanical properties. Considering the ejection effect, processing performance, and mechanical properties comprehensively, the optimal addition amount of ZnSt in rotomolded XLPE is 0.3 phr.

Keywords: crosslinked polyethylene; zinc stearate; rotational molding; ejection performance; mechanical property; processing property

通信作者: 李文博, 硕士, 研究方向为高分子材料改性

收稿日期: 2025-11-17

引用格式: 李文博, 张宜鹏, 廖辉荣, 等. 硬脂酸锌对滚塑交联聚乙烯制品脱模及性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(2): 184-190.

LI Wenbo, ZHANG Yipeng, LIAO Huirong, et al. Effects of zinc stearate on ejection and properties of crosslinked polyethylene product with rotational molding[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(2): 184-190.

滚塑成型作为一种适用于生产中空一体式塑料制品的加工工艺,因具有模具成本低、制品整体性好且制品残余应力极低等优势,在大型容器、储罐、交通零部件、医疗等产品的加工领域得到广泛应用^[1]。在滚塑工艺使用的塑料中,聚乙烯(PE)仍然占滚塑所用塑料的90%以上,这主要是因为该材料的粉末流动性、熔体流动性和热稳定性非常适合滚塑工艺^[1-3]。由于交联能够提高PE的各项物理力学性能,因此交联聚乙烯(XLPE)凭借优异的耐候性、耐化学腐蚀性及强度,被越来越广泛地应用在滚塑工艺中^[4-5]。

然而在滚塑XLPE的实际生产中,仍面临一类频繁发生的关键问题:制品与金属模具间易发生黏附,导致脱模困难,不仅降低生产效率,还易造成制品表面缺陷^[6-7]。目前解决该问题的常用方法是使用脱模剂。脱模剂是在制品与模具之间形成隔离层,能帮助制品顺利从模具中脱离,同时保护模具表面的功能性物质,广泛应用于注塑、滚塑、纳米制造、压铸等多种制品加工工艺场景^[6-10]。

根据使用方式的不同,脱模剂可分为内脱模剂(IMR)和外脱模剂(EMR)^[11]。IMR预先添加至塑料、橡胶、复合材料等基材内部使用,EMR预先涂敷在模具表面使用。与EMR相比,IMR的主要优势为在大规模生产中能够节省时间,增强生产过程的稳定性^[7]。在使用IMR的过程中,省去了EMR在成型前对模具进行涂覆、干燥等预处理步骤的时间,对于结构复杂、死角较多的模具,EMR难以均匀覆盖,而IMR通过迁移作用可实现全方位脱模保护。从当前研究现状来看,滚塑成型领域的脱模剂研究仍以EMR为主。任百霞等^[6]指出,氟系、蜡系、硅系外脱模剂是滚塑行业的主流应用类型。Yeetsorn等^[7]针对汽车零部件滚塑工艺,研发了专用EMR,通过配方优化有效降低了脱模力。曹润生等^[12]合成的含氟丙烯酸酯共聚物脱模剂,在滚塑模具表面可形成低表面能膜层,不仅脱模力稳定,连续脱模次数更可达20次以上。与之形成对比的是,针对滚塑工艺的IMR研究仍较为匮乏。

为实现IMR在滚塑工艺中的有效应用,针对性选择适配的IMR至关重要。一方面,所选择的IMR应在制品生产过程中易于迁出到制品表面,在模具和制品之间形成隔离膜,这是降低制品脱模力的关键;另一方面,IMR应该尽可能有利于制品目标性

能的实现或者至少不会对制品性能产生大的不利影响。基于这一核心目的,国内外学者针对IMR的脱模性能及其对制品性能的影响进行了一系列的研究。例如,Zhang等^[13]以短氟碳链六氟己基乙基甲基丙烯酸酯(PFOL)和长烃链硬脂酸丙烯酸酯(SA)为原料,通过溶液聚合合成一系列氟化丙烯酸酯聚合物(FAP)作为IMR,研究发现FAP在氟橡胶加工中存在溶解-迁移行为,当PFOL单体物质的量与PFOL和SA物质的量之和的比值为0.7、重均分子量为23 000~26 000时脱模性能最优,可将氟橡胶O型圈脱模力从49 N降至20 N。Mishra等^[14]探究不同商用IMR浓度和固化温度对增强环氧和乙烯基酯复合材料弯曲性能和层间剪切强度的影响。结果表明,IMR的存在对环氧树脂复合材料的层间剪切强度影响不大,但在乙烯基酯树脂基复合材料中,添加IMR会导致层间剪切强度下降。Reichanadter等^[15]研究了极性IMR对环氧树脂固化动力学的影响,结果表明,额外添加的IMR会阻碍环氧树脂的固化反应速率反应。Tábi等^[16]发现在聚乳酸(PLA)中添加质量分数1%的硬脂酸钙(CaSt)作为IMR能够将脱模力稳定在2.1 kN,可完全避免注塑过程中PLA试样的断裂,最终实现PLA的连续注塑生产,但CaSt会轻微降低PLA试样的拉伸强度(由66.7 MPa降至62.5 MPa)和冲击强度(由3.1 kJ/m²降至2.2 kJ/m²)。

硬脂酸锌(ZnSt)作为一种常用的塑料助剂,兼具内润滑、脱模及热稳定功能,已在注塑、挤出工艺中广泛应用于改善聚合物脱模、润滑等加工性能^[17-20]。但针对滚塑工艺的特殊性——长时间加热、双向旋转成型等,ZnSt对XLPE的脱模、力学性能及加工性能的调控规律研究较少。

IMR的种类和添加量是影响制品脱模及力学等性能的关键因素。笔者首先通过黏接强度测试对比了ZnSt、CaSt、聚乙烯蜡(PE蜡)、褐煤蜡四种常用IMR对滚塑XLPE制品脱模性能的影响。在确定ZnSt对滚塑XLPE制品具有最佳脱模效果后,以此为创新点,系统探究ZnSt添加量对滚塑XLPE脱模性能的影响规律。通过对滚塑XLPE制品外表面和内部的元素分析,揭示ZnSt在滚塑过程中的迁移规律。最后通过对制品力学性能测试、形貌表征及制品粉末特性的分析,探究了ZnSt添加量对滚塑XLPE制品力学性能和滚塑加工性能的影响规律。

1 实验部分

1.1 主要原材料

高密度聚乙烯 (PE-HD):密度为 0.954 g/cm³,熔体流动速率(MFR)为 20 g/10 min (190 °C, 2.16 kg),美国陶氏公司;

双叔丁基过氧异丙基苯(BIPB)、三烯丙基异氰脲酸酯(TAIC):上海阿拉丁试剂公司;

β-(3,5-二叔丁基-4-羟基苯基)丙酸十八醇酯(抗氧化剂 1076):天津利安隆新材料股份有限公司;

ZnSt:632.33 g/mol,粒径 15 μm,上海麦克林生化科技股份有限公司;

CaSt:607.03 g/mol,粒径 15 μm,上海麦克林生化科技股份有限公司;

PE 蜡(L965):2 000~3 000 g/mol,粒径 15 μm,建德市华辰化工有限公司;

褐煤蜡(W-OP):800~900 g/mol,粒径 15 μm,德国 Völpker Spezialprodukte 公司。

1.2 主要仪器及设备

同向双螺杆挤出机:TSE-35,南京瑞亚挤出机械制造有限公司;

万能力学试验机:CMT4101,美国美特斯工业系统(中国)有限公司;

缺口冲击机:CEASST 9050,意大利CEAST公司;

MFR 仪:XRL-400A,承德精密试验机公司;

磨粉机:DC3-1,河北本辰科技有限公司;

能量色散型 X 射线荧光光谱(EDX)仪:EDX-LE Plus,日本岛津公司;

扫描电子显微镜(SEM):Phenom particleX,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

卧式滚塑机:YS-25L,无锡毅爽滚塑科技有限公司;

切片机:HM325,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

粉末流动性测试仪:BOS-21060,河北中贸路建仪器设备有限公司。

1.3 试样制备

物料准备:将 PE-HD 树脂、交联剂 BIPB、助交联剂 TAIC、抗氧化剂 1076 和 IMR 以预设配比加入高速混料机中,高速混合 90 s。不同 XLPE 材料对应的试样简称及配比见表 1。

表 1 不同 IMR 添加量 XLPE 材料的试样简称与配比

Tab. 1 Sample abbreviations and proportions of XLPE materials with different IMR addition amounts

Samples	PE-HD addition amount/phr	BIPB addition amount/phr	TAIC addition amount/phr	1076 addition amount/phr	IMR type	IMR addition amount/phr
S	100	0.4	0.3	0.1		0
S-W-OP	100	0.4	0.3	0.1	Montan wax (W-OP)	0.3
S-L965	100	0.4	0.3	0.1	PE wax (L965)	0.3
S-CaSt	100	0.4	0.3	0.1	CaSt	0.3
S-ZnSt	100	0.4	0.3	0.1	ZnSt	0.3
S-Zn _{0.1}	100	0.4	0.3	0.1	ZnSt	0.1
S-Zn _{0.3}	100	0.4	0.3	0.1	ZnSt	0.3
S-Zn _{0.5}	100	0.4	0.3	0.1	ZnSt	0.5
S-Zn _{0.7}	100	0.4	0.3	0.1	ZnSt	0.7
S-Zn _{0.9}	100	0.4	0.3	0.1	ZnSt	0.9

共混造粒及磨粉:将混合后的物料加入双螺杆挤出机中,挤出温度 130 °C,螺杆转速 300 r/min,料条经切粒机完成造粒。挤出后的 XLPE 颗粒经磨粉机刀盘被切割成粉末。

滚塑样品制备:将通过目数为 35~125 的筛网筛分后的 XLPE 粉末加入滚塑机,滚塑成型后制品为空心圆柱体,如图 1 所示。滚塑机主轴转速 15 r/min,170 °C 滚塑 20 min,随后风冷 20 min,取出滚塑样品并将其裁切成标准力学性能测试样条。

1.4 测试与表征

黏接强度测试:黏接强度测试借鉴 GB/T 5210—

2006 中的附着力测试方法,使用改进的附着力测试方法测试样品对模具的黏接力,通过黏接力除以样件黏接面积得到黏接强度。改进前拉力方向为竖直方向,样品与模具的黏接面为水平方向,在拉力方向垂直于样品与模具的黏接面条件下进行拉伸。改进后,拉力沿竖直方向不变,使用特制模具使样品与模具之间的黏接面与水平面呈倾斜角度黏接以此模拟滚塑脱模过程中塑料与金属模具之间的黏接。实际滚塑脱模过程中,脱模困难是由样品与模具之间的黏接力和样品与模具之间的摩擦力两方面因素共同作用导致的。因此,改进后的黏接强



图1 实验滚塑工艺制备的滚塑制品

Fig. 1 A rotomolded product prepared by experimental rotational molding process

度测试,不仅能够评价脱模过程中的黏接作用,还能同时评价脱模过程中切向的摩擦作用。

力学性能测试:使用万能力学试验机,按 GB/T 1040.2-2022 测试拉伸性能,拉伸速度为 10 mm/min;按 GB/T 1843-2008 测试悬臂梁缺口冲击强度,摆锤冲击能量为 4 J。

MFR 测试:150 °C 恒温 5 min,在 2.16 kg 载荷压力下进行测试。

粉末流动速率测试:根据 GB/T 40934-2021,通过粉末流动性测试仪进行测试,记录粉末完全流出漏斗的时间。

粉末堆积密度测试:根据 GB/T 1636-2008 测量并计算粉末的堆积密度。

元素分析测试:对滚塑后样品外表面和内部进行等厚度切片,然后采用 EDX 进行元素组成分析。加速电压 10~20 kV,通过分析特征 X 射线能量,确定样品中主要元素种类及相对含量。

2 结果与讨论

2.1 不同 IMR 的脱模效果对比

用黏接强度测试表征各种 IMR 对滚塑 XLPE 脱模性能的影响,结果如图 2 所示。未添加 IMR 的 XLPE 空白对照组黏接强度为 7.61 MPa,分别添加有褐煤蜡 W-OP、聚乙烯蜡 L965、CaSt、ZnSt 的 XLPE,黏接强度依次为 7.14、7.30、6.84、5.00 MPa。从图 2 中可以看出,相同滚塑工艺和相同脱模剂添加量的条件下,相比于蜡系 IMR 的 PE 蜡 L965 与褐煤蜡 W-OP,皂系 IMR 的 ZnSt 和 CaSt 使滚塑 XLPE 具有更好的脱模性能。这可能是因为含有羧酸盐基团的皂系 IMR 相比于蜡系 IMR 具有更强的极性,由于皂系 IMR 的极性与模具金属表面具有更强的

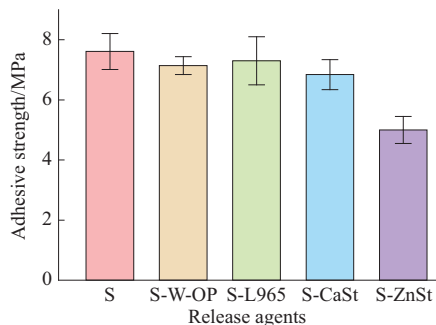


图2 不同IMR的黏接强度比较

Fig. 2 Adhesive strength comparison of different IMR

相互吸引力,因而其具有极性的“头”部能够黏附于金属表面,非极性“尾”部则向外伸入非极性 PE 基体材料中,从而在模具与制品界面形成更稳定的隔离膜,该隔离膜降低了制品在脱模过程中对机械剥离作用的抵抗程度^[21]。ZnSt 具有优于 CaSt 的脱模效果可能是因为 CaSt 过强的极性容易分散不均,不利于在 XLPE 表面形成均匀的隔离膜,因此 ZnSt 对界面的润滑作用优于 CaSt^[18]。

2.2 ZnSt 添加量对 XLPE 脱模性能的影响

图 3 为不同添加量 ZnSt 对 XLPE 脱模性能的影响,不添加 ZnSt 的空白对照样品黏接强度为 7.61 MPa,当 XLPE 中 ZnSt 的添加量分别为 0.1、0.3、0.5、0.7 份时,对应样品的黏接强度逐渐减小,依次为 6.07、5.00、4.41、3.61 MPa。与未添加 ZnSt 样品相比,S-Zn_{0.3} 的黏接强度降低 34%。同时还可以发现,随着样品中 ZnSt 添加量的增加,ZnSt 对 XLPE 脱模的作用总体呈减弱趋势。值得注意的是,S-Zn_{0.9} 的黏接强度略高于 S-Zn_{0.7}。使用 EDX 测试不同 ZnSt 添加量 XLPE 滚塑样品外表面的 Zn 元素含量,以此确定滚塑制品外表面 ZnSt 的添加量,结果如图 4 所示,其

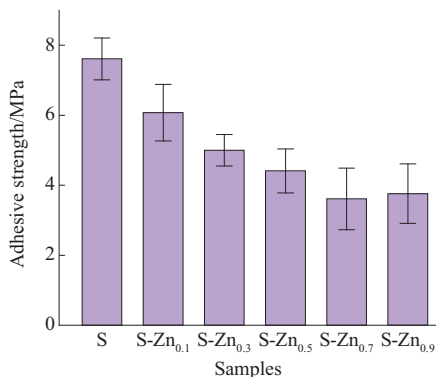


图3 不同ZnSt添加量样品黏接强度比较

Fig. 3 Adhesive strength comparison of samples with different ZnSt addition amounts

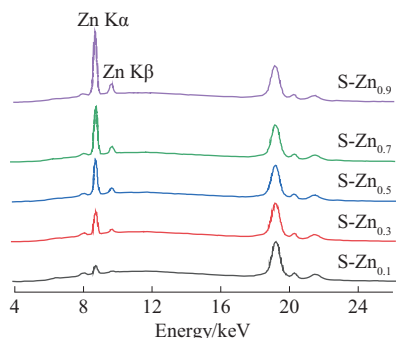


图4 不同ZnSt添加量XLPE滚塑样品外表面EDX能谱图
Fig. 4 EDX energy spectra of outer surface of XLPE rotomolded samples with different ZnSt addition amounts

中Zn K α 和Zn K β 均为EDX能谱图中识别锌元素的核心谱线,其中Zn K α 由锌原子L层电子跃迁至K层产生,能量较低、峰强度高,为锌的主特征峰,Zn K β 则由锌原子M层电子跃迁至K层产生,能量更高、峰强度微弱,为辅助特征峰。由图4可知,在考察的ZnSt添加量范围内,XLPE滚塑产品外表面均有ZnSt分布,即ZnSt在XLPE外表面会形成脱模剂隔离膜。该脱模剂隔离膜不仅阻隔了滚塑过程中XLPE样品析出外表面的各类有机物和低聚物,减弱了该类物质与滚塑金属模具的化学物理作用,即降低了该类物质与模具之间的黏接力,同时由于ZnSt的润滑作用,降低了XLPE样品外表面与滚塑金属模具的摩擦力。这两方面共同作用,最终表现为含有ZnSt的XLPE样品黏接强度的降低^[22]。

从图4还可以看出,随着XLPE中ZnSt添加量的增加,相应XLPE滚塑样品外表面的ZnSt添加量依次增加。相比于外表面含有较少ZnSt的样品,外表面含有更丰富ZnSt样品能使隔离膜层更致密,从而更加有效地阻隔滚塑过程中析出外表面的有机物和低聚物,同时进一步降低滚塑XLPE与外表面的摩擦力,因此,当ZnSt添加量小于0.7份,随着ZnSt添加量的增加,黏接强度逐渐减小。S-Zn_{0.9}的黏接强度大于S-Zn_{0.7},可能是由于在S-Zn_{0.9}表面富集较多的ZnSt,在熔融状态下这会增大ZnSt渗入模具金属表面缺陷形成的微孔中的概率,待S-Zn_{0.9}完全冷却后,部分嵌入微孔的ZnSt在一定程度上增大了S-Zn_{0.9}表面与金属模具之间的机械咬合,从而导致了黏接强度一定程度的增大。

2.3 滚塑过程中ZnSt的迁移

IMR的迁移性是指在滚塑过程中IMR从材料中迁出并向模具表面移动的能力。IMR具有较好的迁移性意味着可以在实际生产中使用较少量的

IMR就达到易于脱模的效果。笔者选取不同ZnSt添加量的样品S-Zn_{0.3}和S-Zn_{0.7}对滚塑过程ZnSt的迁移行为进行研究。通过EDX表征S-Zn_{0.3}和S-Zn_{0.7}外表面和样品内部的Zn元素含量,结果如图5所示,图例中的“interior”和“outer”分别表示相应样品内部和外表面的EDX测试结果。从图5可知在滚塑过程中,S-Zn_{0.3}和S-Zn_{0.7}中的ZnSt均存在从样品内部向样品外表面与金属模具表面之间的迁移现象,但是仍然有一部分ZnSt存在于样品内部。由于S-Zn_{0.3}外表面与内部的Zn元素含量的比值略大于S-Zn_{0.7}外表面与内部的Zn元素含量的比值,这表明在滚塑加工过程中,ZnSt的迁移性未随着其添加量的增大而增强。结合图4可知,与S-Zn_{0.3}相比,S-Zn_{0.7}外表面Zn元素含量更高的贡献主要来自S-Zn_{0.7}中更高的ZnSt添加量而不是来自ZnSt的迁移作用。

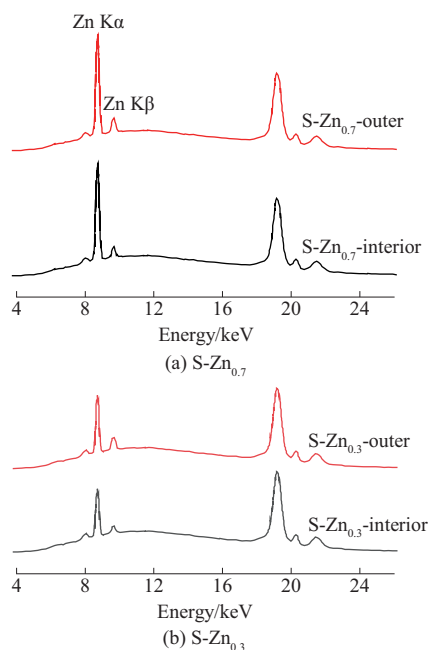


图5 XLPE滚塑样品外表面与内部的EDX能谱图

Fig. 5 EDX energy spectra of outer surfaces and interiors of XLPE rotomolded samples

2.4 ZnSt添加量对XLPE加工性能的影响

粉末流动性、堆积密度和MFR是滚塑成型加工过程中重要的品控要素^[23]。表2为不同ZnSt添加量下样品粉末流动性、堆积密度和MFR的测试结果。从表2可以看出,随着ZnSt添加量的增加,100 g粉末完全从粉末流动性测试仪中流出的时间逐渐变长,即样品流动性逐渐减弱,而样品堆积密度也逐渐变小。样品粉末流动性减弱,意味着滚塑过程中粉末更难被均匀地铺展开,同时会增加气泡产生的

表2 不同 ZnSt 添加量样品粉末的加工性能

Tab. 2 Physical properties of sample powders with different ZnSt addition amounts

Samples	Power flowability/ [s·(100 g) ⁻¹]	Bulk density/ (g·cm ⁻³)	MFR/ [g·(10 min) ⁻¹]
S	5.94	0.41	8.68
S-Zn _{0.1}	7.90	0.40	8.72
S-Zn _{0.3}	9.62	0.39	8.83
S-Zn _{0.5}	9.66	0.39	8.91
S-Zn _{0.7}	9.66	0.38	8.98
S-Zn _{0.9}	9.71	0.38	9.04

可能性。样品堆积密度减小,意味着单位体积的粉末样品中含有更多的气体存在于粉末颗粒之间,增加了滚塑过程中样品气泡的密度,由于气泡需要在滚塑过程中被排除,因此低堆积密度的粉末增加了滚塑制品的工艺难度。随着 ZnSt 添加量的增加,样品的 MFR 有轻微的增加,一定程度上减弱了滚塑中样品产生气泡等缺陷的可能。

图6是不同 ZnSt 添加量 XLPE 滚塑样品的外表面图。从图6可知,当样品 ZnSt 添加量增加到0.5份后,随着不同添加量 ZnSt 的加入,样品靠近模具一侧的外表面会产生气泡,且随着 ZnSt 添加量的增加,气泡密度增加。图7是 S-Zn_{0.1} 和 S-Zn_{0.9} 的样品内

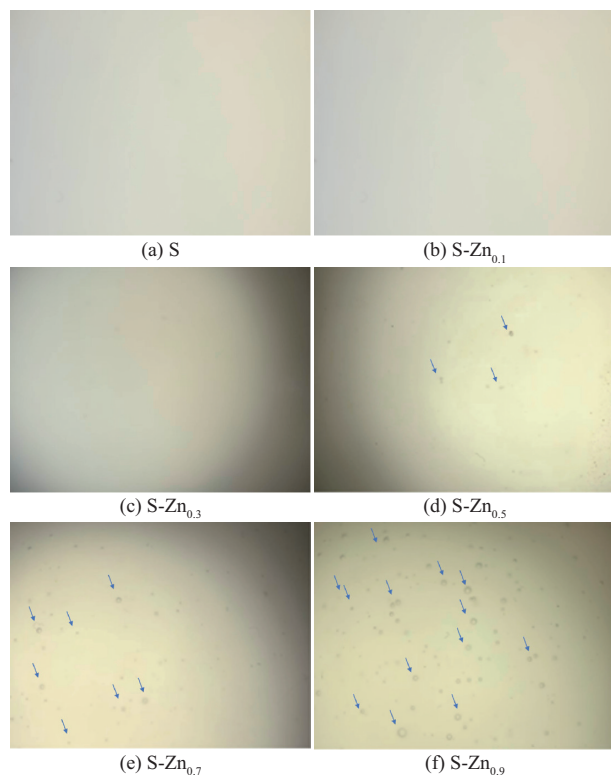


图6 不同 ZnSt 添加量 XLPE 滚塑样品的外表面图

Fig. 6 Outer surface images of XLPE rotomolded samples with different ZnSt addition amounts

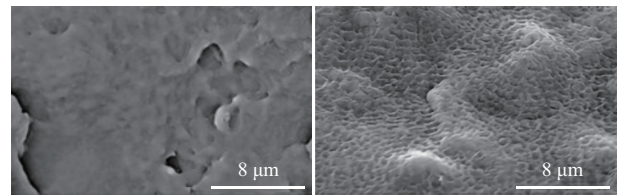


图7 不同 ZnSt 添加量 XLPE 滚塑样品内表面的微观形貌

Fig. 7 Micrographs of inner surfaces of XLPE rotomolded samples with different ZnSt addition amounts

表面的 SEM 图像。通过图7可以看出,相比于样品 S-Zn_{0.1}, S-Zn_{0.9} 内表面会产生粗糙的波纹状组织和凹坑。通过依次对比 S-Zn_{0.1} 到 S-Zn_{0.9} 样品内表面,可以发现 ZnSt 添加量增加后,内表面波纹状组织非常明显,内表面粗糙度增加,内表面凹坑增多,影响了样品的美观度。

通过表2和图6可知,当 ZnSt 添加量达到并超过0.5份后,粉末流动性、堆积密度对样品滚塑过程中带来的不利因素占据主导,MFR 增加对样品滚塑过程的有利因素占据次要地位,因此当 ZnSt 添加量达到并超过0.5份后,样品外表面开始产生气泡同时样品内表面平整度开始明显变差。样品中过量的 ZnSt 增加了滚塑 XLPE 制品的加工难度。

2.5 ZnSt 添加量对 XLPE 力学性能的影响

表3为不同 ZnSt 添加量样品的力学性能测试结果。通过表3可知,未添加 ZnSt 的 XLPE 样品拉伸强度为 21.8 MPa,加入 ZnSt 后,样品拉伸强度先增后减。当 ZnSt 添加量为 0.3 份时获得最大的拉伸强度 23.2 MPa,相比较未添加 ZnSt 的样品提升率为 6.4%。当 ZnSt 的加入量小于 0.9 份时,ZnSt 对样品断裂伸长率影响不大,但是当其添加量达到 0.9 份时,样品断裂伸长率会有剧烈的下降。当 ZnSt 添加量小于 0.3 份时,ZnSt 对样品缺口冲击强度影响较小,当 ZnSt 添加量增加到 0.5 份后,随着 ZnSt 添加量的增加,样品缺口冲击强度逐渐降低。

表3 不同 ZnSt 添加量 XLPE 滚塑样品的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of XLPE rotomolded samples with different ZnSt addition amounts

Samples	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%	Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)
S	21.8	631.1	19.1
S-Zn _{0.1}	22.8	634.9	18.2
S-Zn _{0.3}	23.2	645.2	20.7
S-Zn _{0.5}	23.0	621.3	15.9
S-Zn _{0.7}	22.7	602.9	15.3
S-Zn _{0.9}	22.9	106.4	12.8

从表3和图6可以发现,样品缺口冲击强度的降低从样品外表面出现气泡开始,随着样品外表面气泡密度的增加,样品缺口冲击强度不断减小。气泡破坏了制品基体的结构连续性,加速了冲击过程的裂纹扩展,并降低有效承载面积,最终表现为样品缺口冲击强度的降低。观察拉伸样条S-Zn_{0.9},发现样品在气泡处被拉开并断裂,气泡破坏了样品的受力连续性,使材料无法完成正常拉伸过程中的塑性变形。因此过量ZnSt的加入会给样品带来气泡缺陷,而这种缺陷会破坏基体连续性,加速裂纹扩展,对XLPE力学性能产生不利影响。

3 结论

(1)在滚塑XLPE常用IMR中,ZnSt的脱模效果最优,其通过成型过程中从基材内部迁移至表面形成隔离膜,显著降低滚塑样品与滚塑金属模具之间的黏接力与摩擦力。

(2)ZnSt添加量对滚塑XLPE的脱模性能、加工性能及力学性能存在协同调控作用:ZnSt添加量为0.3份时,与未添加ZnSt相比黏接强度降低34%,同时制品力学性能最优(拉伸强度23.2 MPa、断裂伸长率645.2%、缺口冲击强度20.7 kJ/m²);添加量达到0.5份后,粉末流动性下降、气泡缺陷增多,导致力学性能持续衰减。

(3)综合多性能指标,滚塑XLPE中ZnSt的最佳添加量为0.3份。上述结果可为滚塑XLPE制品的工业化生产提供技术参考,兼顾生产效率与产品质量。

参考文献

- [1] GUPTA N, RAMKUMAR P L, SANGANI V. An approach toward augmenting materials, additives, processability and parameterization in rotational molding: A review[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, 35(14): 1 539–1 556.
- [2] KELLY-WALLEY J, MARTIN P, ORTEGA Z, et al. Recent advancements towards sustainability in rotomoulding[J]. *Materials*, 2024, 17(11). DOI:10.3390/ma17112607.
- [3] ROY J, MARK P. *Practical guide to rotational moulding*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2022.
- [4] 刘博, 张宜鹏, 廖辉荣, 等. 滚塑中交联高密度聚乙烯的交联行为[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(2): 126–133.
LIU Bo, ZHANG Yipeng, LIAO Huirong, et al. Crosslinking behavior of cross-linked high-density polyethylene in rotational molding[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(2): 126–133.
- [5] 段雪蕾, 韩志华, 马琳鸽, 等. 聚乙烯油箱制品缺陷分析[J]. *中国塑料*, 2020, 34(2): 61–66.
DUAN Xuelei, HAN Zhihua, MA Linge, et al. Defect analysis of polyethylene oil tanks[J]. *China Plastics*, 2020, 34(2): 61–66.
- [6] 任百霞, 陈学连. 脱模剂及其在滚塑中的应用[J]. *塑料助剂*, 2020(5): 49–54.
REN Baixia, CHEN Xuelian. Release agent and its application on rotomoulding process[J]. *Plastics Additives*, 2020(5): 49–54.
- [7] YEETSORN R, PRISSANAROON-OUAJAI W, BOONPANAID C, et al. Rotomoulding release agent preparation for auto part fabrications[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 52: 2 365–2 371.
- [8] 洪富贵, 冯佳雄, 熊彬, 等. 铝合金压铸用水基脱模剂性能测试研究[J]. *铸造技术*, 2025, 46(8): 816–824.
HONG Fugui, FENG Jiaxiong, XIONG Bin, et al. Testing research on the performance of water-based release agents for aluminium alloy die casting[J]. *Foundry technology*, 2025, 46(8): 816–824.
- [9] OKADA M, YAMASHITA D, UNNO N, et al. Defect analysis and lifetime evaluation of a release-coated nanoimprint mold[J]. *Micro-electronic Engineering*, 2014, 123: 117–120.
- [10] YANG M Q, LI L H, ZHU Z Q, et al. Research progress on eco-friendly rubber release agents[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2025, 303(2): 163–174.
- [11] BJEKOVIC R, PIOTROWICZ K. Epoxy resin and release agents part I: Influence of external and internal release agents on the adhesive properties of epoxy resin[J]. *Journal of Applied Engineering Science*, 2015, 13(1): 45–50.
- [12] 曹润生, 蒋崇文, 王树华, 等. 含氟脱模剂的合成与应用研究[J]. *化工生产与技术*, 2007, 14(2): 12–14, 20, 65.
CAO Runsheng, JIANG Chongwen, WANG Shuhua, et al. Synthesis and applications of fluorine-containing demoulding agent[J]. *Chemical Production and Technology*, 2007, 14(2): 12–14, 20, 65.
- [13] ZHANG J G, HUANG Z S, XU J Y, et al. Synthesis and conformational relationship of new fluorinated acrylate polymer-based internal mold release agents[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, 142(13). DOI:10.1002/app.56675.
- [14] MISHRA R, BEHERA B K, RAJPUROHIT A N, et al. Effect of internal mold release agent on flexural and inter laminar shear properties of carbon and glass fabric reinforced thermoset composites[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32(1): 282–293.
- [15] REICHANADTER A, BANK D, MANSSON J A E. A novel rapid cure epoxy resin with internal mold release[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2021, 61(6): 1 819–1 828.
- [16] TÁBI T, PÖLÖSKEI K. The effect of processing parameters and calcium-stearate on the ejection process of injection molded poly(lactic acid) products[J]. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2021, 66(1): 17–25.
- [17] PHILLIPS J, WELDHAGEN M, MHLABENI T, et al. Thermal characterisation of metal stearate lubricant mixtures for polymer compounding applications[J]. *Thermochimica Acta*, 2021, 699. DOI:10.1016/j.tca.2021.178906.