

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.009

熔融共混法制备清管器用 PVAL 基水溶性复合材料

何宏庆¹, 袁比飞², 马国良³, 屈文涛¹, 龚昊⁴

(1. 西安石油大学机械工程学院, 西安 710065; 2. 中国石油集团长城钻探工程有限公司, 北京 100101;
3. 胜利工程管具技术服务中心, 山东东营 257000; 4. 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

摘要:为解决传统清管器在天然气管道中运行时易遭受卡堵问题,可结合可溶性材料与传统的清管器技术制备新型可溶性清管器。以聚乙烯醇(PVAL)为基体、甘油为增塑剂、自制酯化淀粉为添加剂,采用熔融共混法制备酯化淀粉/PVAL 复合材料。从复合材料的分子结构、微观形貌、热性能、表面亲疏水性、力学性能及溶解性能等方面,探讨甘油用量对酯化淀粉/PVAL 复合材料性能的影响,以获得较佳的水溶性天然气管道清管用复合材料配方。结果表明,加入甘油有利于复合材料的熔融加工,对复合材料的亲水性几乎没有影响,复合材料的热失重率和溶解速率均随甘油用量增加而增大,但同时力学性能变差。当 PVAL 用量为 40 g、甘油用量为 60 g、酯化淀粉用量为 10 g 时,酯化淀粉/PVAL 复合材料具有一系列优异的综合性能,其熔点为 125.5 °C,200 °C 时的质量保持率为 74.8%,水接触角为 18.60°,拉伸强度为 1.86 MPa,断裂伸长率为 35.5%,室温下在去离子水中浸泡 2 h 后的质量损失率为 52%,可用于制造可溶性清管器主体。

关键词: 清管器;聚乙烯醇;淀粉;溶解性能;力学性能

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0065-07

Preparation of PVAL-based water-soluble composites for pig by melt blending method

HE Hongqing¹, YUAN Bifei², MA Guoliang³, QU Wentao¹, GONG Hao⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. CNPC Great Wall Drilling Company, Beijing 100101, China; 3. Technical Service Center of Pipe Tools of Shengli Petroleum Engineering Company, Dongying 257000, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract : In order to solve the problem that the traditional pig is easy to suffer from jamming when it runs in the natural gas pipeline, a new soluble pig can be prepared by combining soluble materials with traditional pig technology. Polyvinyl alcohol (PVAL) was chosen as the matrix, with glycerol as the plasticizer and self-made esterified starch as the additive, and a melt blending method was adopted to prepare esterified starch/PVAL composites. In order to obtain a better formula of the water-soluble composite for natural gas pipeline pig, the effects of glycerol content on the performances of esterified starch/PVAL composites were explored in terms of the molecular structure, microscopic morphology, thermal properties, surface hydrophilicity, mechanical properties and solubility, etc. The results demonstrate that adding glycerol can facilitate the melt processing of PVAL and has little effect on the hydrophilicity of the composite, the thermal weight loss rate and dissolution rate of the esterified starch/PVAL composites increase with the increase of glycerol content, but the mechanical properties become worse. When the PVAL content is 40 g, the glycerol content is 60 g, and the esterified starch content is 10 g, the composite has a series of excellent comprehensive properties, encompassing a melting temperature of 125.5 °C, a mass residual rate of 74.8% at 200 °C, a water contact angle of 18.60°, a tensile strength of 1.86 MPa, a maximum elongation at break of 35.5%, and a weight loss of 52% following immersion in a deionized water for two hours at room temperature, which can be selected for preparing soluble pig bodies.

Keywords : pig ; polyvinyl alcohol ; starch ; solubility ; mechanical property

基金项目: 国家自然科学基金项目(52071261)

通信作者: 屈文涛,教授,工学博士,现从事石油天然气机械设备节能减排(含新材料在油气田中的应用)、人机工效评价领域科研工作

收稿日期: 2025-01-08

引用格式: 何宏庆,袁比飞,马国良,等. 熔融共混法制备清管器用 PVAL 基水溶性复合材料[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 65-71.

HE Hongqing, YUAN Bifei, MA Guoliang, et al. Preparation of PVAL-based water-soluble composites for pig by melt blending method[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 65-71.

石油/天然气管道输送已经成为国内外不可或缺的方式,在长输油气管道运行过程中,管道内容易累积杂质、积液、积污等^[1-2],严重影响管道运输效率及运行安全。因此需要定期进行清管作业,而清管器是主要的清管工具^[3-4]。然而,现有清管器在运行过程中,遇管道变形、有效流通面积减小、管道三通卡堵等情形易发生堵塞卡死现象,会对管道系统正常运行产生重大负面影响^[5-6]。

针对清管器卡堵这一难题,国内外学者开展了大量的研究工作,主要为两部分:一是通过改造清管器的机械构造或是优化操作策略,以增强清管器通行能力及降低管道堵塞的风险;二是选择水溶性材质来生产清管器,可以在不改变当前清管技术的基础上,以较低的成本迅速达到解除管道阻塞的目的。董月等^[7]建立了直板清管器在直管道中运行的有限元模型,计算清管器皮碗的应力、应变、变形量等参数,结构优化后的清管器运行稳定,皮碗磨损量小。尹丰丰^[8]将可溶性材料和清管过程相结合,以油溶性树脂、防蜡剂和自生热体系为基础,研制出3种可溶型清蜡球。但是,可溶清管器只能用于清理原油管线中的积垢,而不能用于处理含积液的天然气管线,其自发发热机理对操作条件和清管工艺有严格的要求。

常规清管器所用的材质包含了橡胶、聚氨酯泡沫、多种金属以及坚固材质等。为了适应不同的工作条件,有时还会用到特殊合金、陶瓷或者带有磁性的物料,从而更加精确地解决各种清洁难题。尽管如此,这些传统材质普遍存在难以分解的问题,同时,在生产和加工这些材质的过程中,所需的经济成本也较为高昂。更加严重的是,如果这些清管器在使用完毕后被随意丢弃,它们可能会对自然环境造成持久且难以恢复的污染。因此,在追求高效清洁效果的同时,还必须高度重视材料的环保特性和可持续发展的长远影响。

聚乙烯醇(PVAL)是一种无色透明且无害的环保型水溶性高分子化合物,以其卓越的阻隔性能、优异的水溶性和降解能力,在环保领域占据了重要地位。PVAL不仅具有黏接强度大、表面光滑的特点,还具备抗油耐磨的优点,经过特定处理,还能获得优秀的防水性能,这些特性极大地扩展了其使用领域。在涂料工业中,PVAL能够提升涂层的附着力和耐用度,作为黏合剂,它保障了材料的稳固黏

合,并促进颗粒的均匀分布,同时赋予薄膜所需的阻隔性能和加工特性。得益于其多样功能和环保优势,PVAL在涂料、黏合剂、分散剂和高性能膜材料等多个行业扮演着不可或缺的角色。Gómez-Aldapa等^[9]采用流延法,通过甘油增塑研究了PVAL含量对马铃薯淀粉膜性能的影响。结果显示,PVAL与淀粉相容性优异,PVAL显著提升了马铃薯淀粉膜的透气性和机械性能。Noshirvani等^[10]采用溶液浇铸法制备了增塑淀粉-PVAL/纤维素纳米晶(CNC)可生物降解纳米复合膜。结果显示,PVAL与CNC的复合显著增强了薄膜的性能,这归因于CNC与聚合物间形成的三维氢键网络,同时CNC的高结晶度和长径比也提升了薄膜结晶度。董增等^[11]采用流延法制备绿豆淀粉/PVAL复合膜,通过单因素实验优化配比。在固定绿豆淀粉与PVAL比例和交联剂添加量下,比较甘油、乙二醇和1,2-丙二醇的增塑效果。结果显示,甘油在提升复合膜拉伸强度和透光率上表现最优,成为首选增塑剂。王双华等^[12]采用类离子液体(PILs)增塑剂,与硬脂酸钙和B225抗氧剂熔融共混制备改性PVAL,研究PILs对PVAL热性能、流动性及可纺性的影响。结果表明,适量的PILs可以增强PVAL热稳定性,PILs会破坏PVAL原有氢键,降低熔点和结晶度,提升流动性,实现PVAL的熔融加工。

依据前期关于清管器卡堵判断方法及卡堵后处理措施的调研结果,在筛选清管器用可溶性材料时,材料的拉伸强度应不低于1.0 MPa,溶解时间需控制在2 h以内。针对这一要求,笔者以PVAL为基体、甘油为增塑剂、自制的酯化淀粉为添加剂,采用熔融共混法制备酯化淀粉/PVAL复合材料,探讨了甘油用量对酯化淀粉/PVAL复合材料的分子结构、微观形态和热稳定性的影响,研究了材料的亲/疏水性、力学性能和溶解性能,得到了材料的最佳配方,从而在不改变目前清管工作流程的情况下,以更低的成本实现对清管器的快速解堵,同时也为可溶性清管器用材料的研发提供支持。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PVAL:工业级,上海影佳实业发展有限公司;
甘油:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;
玉米淀粉:食品级,海宁枫园食品有限公司;
柠檬酸:分析纯,天津市华盛化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

数显恒温水浴锅:HYSWC-001C,博科控股集团有限公司;

真空干燥箱:DZF-6050,沈阳科晶自动化设备有限公司;

集热式磁力搅拌器:DF-101S,上海析牛莱伯仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet iS50,美国赛默飞世尔科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Sigma300,德国卡尔·蔡司股份公司;

热重(TG)分析仪:TGA8000,美国Perkin Elmer公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC6000,美国Perkin Elmer公司;

接触角测量仪:KRUS DSA25,德国克吕士公司;

万能拉力试验机:68TM-50,英斯特朗(上海)试验设备贸易有限公司。

1.3 试样制备

依据相关实验分析^[13],精确称量100 g玉米淀粉,加入适量的去离子水中,搅拌直至淀粉彻底溶解。之后,向此淀粉溶液中加入33 g柠檬酸,快速搅拌使之混合均匀。然后,把混合液置于75 °C恒温的水浴环境中,以恒定速度搅拌持续反应24 h,以保证各组分充分作用,实现预定的混合与溶解效果。将反应后的玉米淀粉/柠檬酸混合溶液在80 °C下干燥,然后研磨至粉末,洗涤、抽滤3次,最后置于40 °C真空干燥箱中干燥24 h,所得最终产物为酯化淀粉。

称取一定比例的PVAL、甘油和酯化淀粉,在集热式磁力搅拌器加热甘油,当温度升至200 °C时,再依次加入PVAL颗粒与酯化淀粉,使其在熔融状态下匀速搅拌共混1 h,最终将共混物熔体注入模具中,降温到室温,然后在真空干燥箱中干燥3.5 h,制得酯化淀粉/PVAL复合材料^[14]。将甘油用量分别为70,65,60,55 g的酯化淀粉/PVAL复合材料依次命名为PGES-1,PGES-2,PGES-3,PGES-4,材料具体配方见表1。

1.4 测试与表征

微观形貌表征:将复合材料试样切割为边长为1 cm正方形块状样品,80 °C干燥后对样品截面喷金

表1 酯化淀粉/PVAL复合材料各组分质量

Tab. 1 Mass of each component of esterified starch/PVAL composites

Samples	g		
	PVAL	Glycerol	Esterified starch
PGES-1	30	70	10
PGES-2	35	65	10
PGES-3	40	60	10
PGES-4	45	55	10

预处理,然后通过SEM在5 kV加速电压条件下观察样品截面微观形貌并拍照记录。

FTIR测试:将复合材料试样干燥处理后切割为直径为1 cm圆片状样品,使用衰减全反射(ATR)模式对样品进行扫描。

TG测试:利用热重分析仪,在氮气密封的环境下进行TG测试,氮气流量为50 mL/min。升温范围为25~250 °C,升温速度保持在10 °C/min,以保障测试结果的均衡性和准确性。

DSC测试:在氮气气氛下(氮气流量为40 mL/min),以10 °C/min的升温速度将温度从25 °C升至200 °C进行测试。

亲疏水性能测试:选取测试样品尺寸为1 cm边长的正方形,将待测样品置于接触角测量仪样品台,利用样品台高度调整钮与焦距调整钮,使待测样品清晰出现在显示屏;分别利用两个针筒位置调整钮调整分配器的水平及垂直位置,使针头位置处于显示屏的水平中心点,固定针头;顺时针旋转液滴分配器的微米头以推出4 μm^3 的去离子水液滴,使用切线法测量样品表面接触角。

溶解性能测试:将复合材料试样干燥至恒重后切割为1 cm×1 cm正方形样品,并记录样品质量为 m_1 。在室温环境下使用悬挂浸泡法将待测样品置于超纯水中浸泡,每个样品浸泡时间分别为20,40,60,90,120 min。浸泡后取出样品置于30 °C真空干燥箱中干燥至恒重,记录干燥后的质量为 m_2 ,最后使用式(1)计算样品质量损失率 W 。

$$W = \left[\frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \right] \times 100\% \quad (1)$$

力学性能测试:将复合材料试样加工为标准哑铃形试样进行拉伸试验。根据GB/T 1040.2-2006在拉伸速度为20 mm/min状态下,使用最大力为5 kN的万能拉力试验机对酯化淀粉/PVAL复合材料试样进行拉伸性能测试,为减小测试误差,所得测试结果为每种样品5组测试数据平均值。

2 结果与讨论

2.1 SEM分析

4种不同甘油用量的酯化淀粉/PVAL复合材料样品的截面SEM照片如图1所示。从图1可以看出,4种PVAL复合材料截面均呈现连续的山峰状结构,复合材料微观形态相对均匀。结果表明,甘油与PVAL具有良好的相容性,可以与PVAL形成均相体系。随着甘油用量的增加,在一定范围内样品表面更加平滑。添加甘油对PVAL有明显的增塑作用,从图1b中PGES-2样品截面SEM照片能看出甘油的用量已基本达到增塑PVAL的极限,但如果继续加入甘油,则多余的甘油在共混过程中会增强本身的化学结合,从而与PVAL发生了相分离,导致图1a中PGES-1样品表面平滑度下降,有明显的异相析出,故PGES-1的相容性较差。

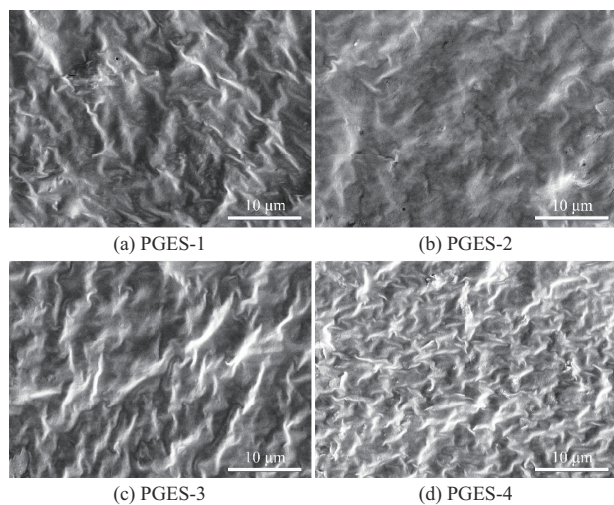


图1 酯化淀粉/PVAL复合材料的截面SEM照片

Fig. 1 SEM photos of section of esterified starch/PVAL composites

2.2 FTIR分析

图2为4种不同甘油用量的酯化淀粉/PVAL复合材料FTIR谱图。从图2可以看出,3 295 cm^{-1} 处是O—H的伸缩振动吸收峰,说明PVAL与酯化淀粉在经过共混改性后,其分子内的氢键作用均变为与甘油分子间的氢键作用。2 937 cm^{-1} 和2 882 cm^{-1} 处是复合材料中C—H的伸缩振动吸收峰,2 322 cm^{-1} 处出现向上的峰值,可能是空气中 CO_2 干扰导致。1 718 cm^{-1} 处是酯化淀粉中C=O的伸缩振动吸收峰,1 650 cm^{-1} 处是复合材料中O—H的弯曲振动吸收峰,1 419 cm^{-1} 处是复合材料中的一 CH_2 —的弯曲振动吸收峰,1 105 cm^{-1} 处是复合材料中C—O的伸缩振动吸收峰,1 032 cm^{-1} 处是C—H的面内弯曲振

动吸收峰。从图2可以看出,PGES-4的FTIR曲线中O—H的伸缩振动吸收峰和C—H的面内弯曲振动吸收峰强度最大,PGES-2曲线中O—H的伸缩振动吸收峰和C—H的面内弯曲振动吸收峰强度最小。这可能是由于随着甘油用量的增加,PVAL的分子链间距增加,削弱了范德华作用力,羟基振动更加自由,但过量的甘油加入后,PGES-1发生了相分离,相容性较差,导致对应的吸收峰强度增加,这与SEM形貌表征结果一致。

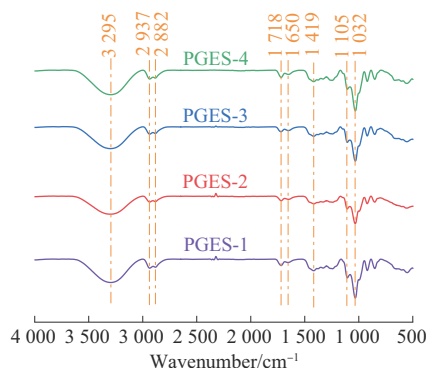


图2 酯化淀粉/PVAL复合材料的FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectra of esterified starch/PVAL composites

2.3 TG分析

图3为4种不同甘油用量的酯化淀粉/PVAL复合材料的热失重曲线。从图3可以看出,4种复合材料样品的热失重曲线趋势大致相同,且均有两个阶段的热解过程。其中PGES-3在200 $^{\circ}\text{C}$ 环境下质量保持率为74.8%。在25~165 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,失重率为13%左右,这是PVAL中的水及甘油的挥发。在165~250 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,失重率为60%左右,这是PVAL体系中,酯化淀粉相和PVAL相的裂解及高分子结构的断裂^[15]。在第1阶段25~165 $^{\circ}\text{C}$ 中,4种样品的热失重速率和失重率基本一致,并无明显差异。但在第2阶段165~250 $^{\circ}\text{C}$ 中,失重率随甘油用量的增加而

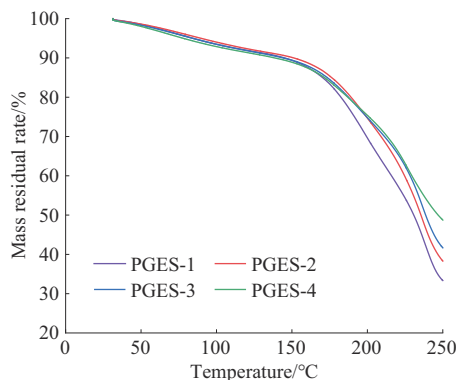


图3 酯化淀粉/PVAL复合材料的TG曲线

Fig. 3 TG curves of esterified starch/PVAL composites

增加,热稳定性下降,且PGES-1热失重速率明显快于其他样品,这是由于甘油与PVAL已发生充分增塑作用,而过量的甘油会提前受热降解。在天然气管道清管作业中,清管器承受的温度范围通常介于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[16],且最高温度不会超过 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。TG分析结果表明,制备的酯化淀粉/PVAL复合材料完全能够在实际的清管操作中发挥其效用,且4种样品均符合应用温度要求。

2.4 DSC分析

图4为四种不同甘油用量的酯化淀粉/PVAL复合材料的DSC曲线。由图4可见,PVAL的熔点随着甘油用量的增加而降低。经过甘油增塑改性后,PVAL的熔点降低,熔融峰面积减少。这是由于引入甘油作为微小分子增塑剂,它能够渗透进PVAL的非晶区域,在此区域中,甘油分子与PVAL分子内的羟基形成氢键作用,从而实现增塑作用,有效削弱并拆解了PVAL分子间及分子内的氢键结构,这导致PVAL分子间的间隙扩大,提升了PVAL分子链的活动性能,破坏了PVAL原有的晶体结构,使得PVAL的结晶度降低,从而引起PVAL的熔点下降,并且使得融化峰的面积有所缩减^[17-18]。PGES-3的熔点降至 $125.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着甘油用量的继续增加,PVAL复合材料的熔点基本趋于恒定。当甘油用量达到某一程度后,复合材料熔点不再有显著的下降,原因在于,一定醇解度的PVAL的分子间作用力是一定的,甘油与PVAL之间的作用力足够大,从而使PVAL被塑化熔融,而残余的甘油并没有与PVAL形成键合,因此不能降低PVAL熔点。添加适量的甘油,不仅可以使PVAL的分子链结构发生变化,而且甘油渗入PVAL非晶区域后,又会软化PVAL结晶区的边界,从而促进晶内滑移^[17],使PVAL晶体结构发生变化,降低了PVAL的结晶程度,进而使PVAL的熔点下降,为PVAL的塑化熔融提供了有利

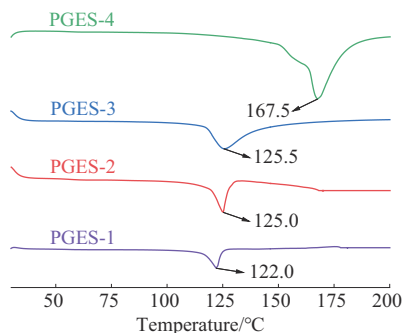


图4 酯化淀粉/PVAL复合材料的DSC曲线

Fig. 4 DSC curves of esterified starch/PVAL composites

条件^[19]。另外,DSC分析结果表明,制备的酯化淀粉/PVAL复合材料在使用过程中,由于工作温度较低,不会造成材料预先加热熔化,因而具有一定的工程实用价值。

2.5 亲疏水性能分析

图5为4种不同甘油用量的酯化淀粉/PVAL复合材料水接触角测试结果。由图5可以得出,在不同甘油用量情况下,PGES-1至PGES-4样品水接触角分别为 20.30° , 24.20° , 18.60° 和 16.90° 。通常情况下,接触角超过 90° 的为疏水性物质,而接触角小于 90° 的为亲水性物质,4种样品的接触角都在 90° 以下,具有优良的亲水性能。随着甘油用量的增大,样品的亲水性能几乎没有改变。在输送管线中,清管器需要承受输送介质的密闭和推动工作,而制备的酯化淀粉/PVAL复合材料具有优良的亲水性能,更有助于加快其在管线中的溶解速度,避免长期发生阻塞,影响管线的安全运行,故这4种水溶性复合材料均满足使用要求。

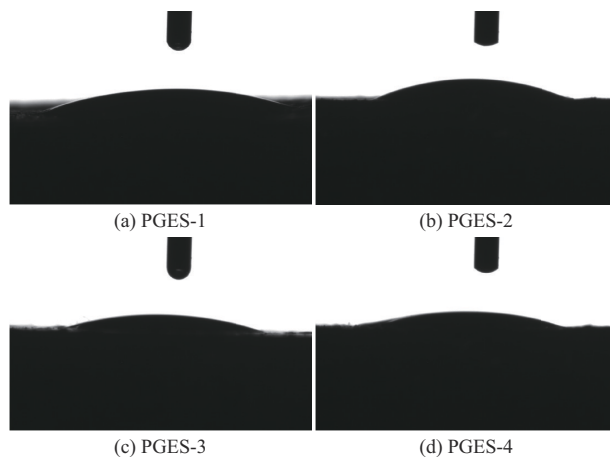


图5 酯化淀粉/PVAL复合材料的水接触角测试结果

Fig. 5 Water contact angle test results of esterified starch/PVAL composites

2.6 溶解性能分析

图6为4种不同甘油用量的酯化淀粉/PVAL复合材料的溶解性能(质量损失率)与甘油用量之间的关系曲线。由图6可以看出,随着甘油用量的增加,水溶性复合材料在固定时间内的质量损失率随之上升,溶解性能逐渐提高。其中,PGES-3与PGES-4的质量损失率相差不大,PGES-3在室温去离子水中浸泡2 h后的质量损失率为52%,PGES-4的质量损失率相对低一些。与PGES-3和PGES-4相比,PGES-2在水中的质量损失速度有所增加,PGES-1的质量损失速度最快,即溶解速率最快。加入甘油

后,PVAL的晶体结构受到干扰,分子间的排列密度减小,使得PVAL分子在水分子的影响下更易分散至水中^[20-21]。此外酯化淀粉也是水溶性物质,同样易溶于水,这一现象进一步加剧了材料在水中的分解速度。深入探讨复合材料的水溶性对于确定适宜的甘油用量至关重要,需要在满足力学性能要求的条件下,通过改变甘油的用量来研制不同溶解性能的材料。实验中发现,材料浸水前和浸水后的体积变化不大,但总体呈软化状态并丧失力学性能。在实际操作中,清管器与管道的过盈量最大值是10%^[22],可以看出,4种材料在30 min内的质量损失率都超过10%,并且其力学性能也会发生明显变化,所以它们都能满足溶解性的需求,用这些材料制备的清管器可以在管道被堵塞的情况下进行有效的解堵。

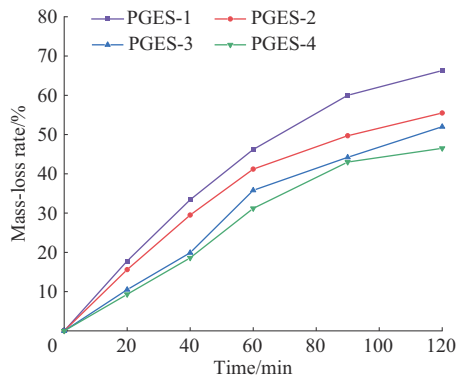


图6 酯化淀粉/PVAL复合材料的溶解性能测试结果

Fig. 6 Dissolution performance test results of esterified starch/PVAL composites

2.7 力学性能分析

图7为4种不同甘油用量的酯化淀粉/PVAL复合材料的拉伸性能测试结果。从图7可以观察到该水溶性复合材料的拉伸强度随着甘油用量的减少整体呈增长趋势,其中PGES-4的拉伸强度最大,为1.94 MPa,PGES-3的拉伸强度次之,为1.86 MPa。甘油与PVAL相互作用,分子间的自由空间得以扩展,使得分子链布局趋于疏散,从而提高了分子链结构转变及其重新组合的可能性,分子间作用力的减弱以及聚合物黏度的下降,导致材料的拉伸强度持续减小^[23]。与PGES-1相比,PGES-2的拉伸强度有显著提高,这主要是由于PGES-1号样甘油的过量加入使甘油与PVAL的相容性较差,发生了相分离,导致复合材料拉伸强度显著降低。而材料断裂伸长率随着甘油用量的减少先升高然后下降,其中PGES-3的断裂伸长率最大,为35.5%。随着甘油用

量的减小,复合材料的断裂伸长率不断增大,甘油的添加增加了PVAL的分子链间距,削弱了范德华作用力,使PVAL分子链间的束缚作用得以缓解,进而使PVAL的分子链具有更大的活动空间,故材料断裂伸长率得到大幅提升^[24]。实验发现,除PGES-1力学性能不能满足要求外,其他3种复合材料的拉伸强度都达到了1.0 MPa以上,但由于PGES-4的熔融温度相对较高,不利于熔融加工,所以为了实现由水溶性复合材料制备的可溶清管器在管线中受阻后能迅速溶解破裂,综上可选PGES-3用于制备可溶清管器用复合材料。

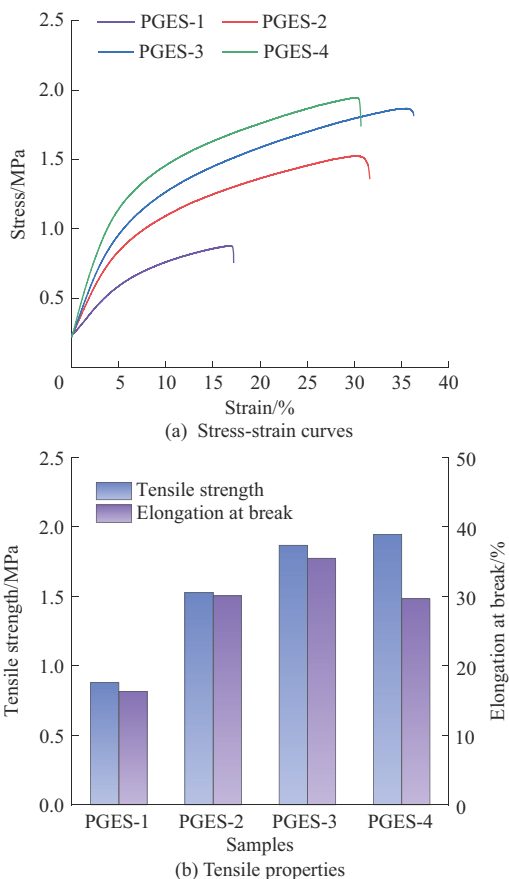


图7 酯化淀粉/PVAL复合材料拉伸性能测试结果

Fig. 7 Tensile properties test results of esterified starch/PVAL composites

3 结论

(1)通过熔融共混法制备不同甘油用量的4种水溶性酯化淀粉/PVAL复合材料。根据材料性能测试结果可知,随着甘油用量的减少,复合材料样品的拉伸强度和热稳定性不断提高。其中PGES-1的相容性、力学性能和热稳定性较差,溶解速率相对较快。PGES-2与PGES-3的相容性、热稳定性和亲水性大致相同。PGES-3较PGES-2力学性能更为优异

而溶解性能略低,但两者都具有较好的相容性、力学性能和溶解性能。PGES-4的力学性能和热稳定性最好,但溶解性能最差,且熔融加工难度较高。

(2)拉伸强度测试结果表明,除PGES-1外,其他3种材料的拉伸强度都超过1.0 MPa。其中PGES-3相容性较好,在200 °C环境下质量保持率为74.8%;拉伸强度为1.86 MPa,断裂伸长率为35.5%;水接触角为18.60°,具有良好的亲水性;室温下在去离子水中浸泡2 h,其质量减少了52%,并且完全丧失了力学性能。因此,PGES-3是一种较为理想的清管用可溶性水溶性复合材料。

(3)所研制的水溶性酯化淀粉/PVAL复合材料能较好地满足可溶清管器的使用需求,但在力学、溶解性能等方面仍需改进。笔者仅研究了甘油用量对酯化淀粉/PVAL复合材料在模拟条件下的力学和溶解性能的影响,未来可通过添加纳米材料或其他改性淀粉等方法对水溶性PVAL复合材料进行增强改性或进一步提高其溶解性能。

参考文献

- [1] 李秋扬,赵明华,张斌,等. 2020年全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2021, 40(12):1 330–1 337, 1 348.
LI Qiuyang, ZHAO Minghua, ZHANG Bin, et al. Current construction status and development trend of global oil and gas pipelines in 2020[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(12): 1 330–1 337, 1 348.
- [2] ADEYANJU O A, OYEKUNLE L O. Experimental study of water-in-oil emulsion flow on wax deposition in subsea pipelines[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 182. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106294.
- [3] 王馨饶,金莹,李卫全,等. 割刀清管器的研制及应用[J]. 管道技术与设备, 2023(6):45–47, 51.
WANG Xinrao, JIN Ying, LI Wei-quan, et al. Development and application of pig with cutter[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2023(6):45–47, 51.
- [4] ZHANG L, ZHOU J W, HE H G. Modeling and simulation of pigging for a gas pipeline using a bypass pig[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(1). DOI:10.1155/2020/2047352.
- [5] 董爽. 油气管道清管技术分析[J]. 科学技术创新, 2019(28):56–57.
DONG Shuang. Analysis of pigging technology for oil and gas pipelines[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(28): 56–57.
- [6] GAO X D, HUANG Q Y, ZHANG X, et al. Estimating wax plug transportation force in crude oil pipeline pigging[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(3):3 110–3 120.
- [7] 董月,陈利琼,李南,等. 直板清管器力学性能研究及结构优化[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4):1 460–1 468.
DONG Yue, CHEN Liqiong, LI Nan, et al. Mechanical properties research and structure optimization on the straight plate pig[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(4):1 460–1 468.
- [8] 尹丰丰. 适于油田集输系统用可溶性清蜡球的开发[D]. 西安:西安石油大学, 2021.
YIN Fengfeng. Suitable for the development of soluble wax removal balls for oil field gathering and transportation systems[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [9] GÓMEZ-ALDAPA C A, VELAZQUEZ G, GUTIERREZ M C, et al. Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 239. DOI:10.1016/j.matchemphys.2019.122027.
- [10] NOSHIRVANI N, HONG W, GHANBARZADEH B, et al. Study of cellulose nanocrystal doped starch-polyvinyl alcohol bionanocomposite films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107:2 065–2 074.
- [11] 董增,张兴桃,邵雨辰,等. 绿豆淀粉/PVA复合膜的制备及性能研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22):215–219.
DONG Zeng, ZHANG Xingtao, SHAO Yuchen, et al. Preparation and characterization of Vigna radiata (Linn.) Wilczek starch/PVA composite films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22):215–219.
- [12] 王双华,王冬,付少海. 类离子液体增塑改性聚乙烯醇的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(8):48–55.
WANG Shuanghua, WANG Dong, FU Shaohai. Preparation and properties of polyvinyl alcohol plasticized by pseudo ionic liquids [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(8):48–55.
- [13] 徐梓轩,丁姣,周向阳,等. 柠檬酸改性淀粉/PVA薄膜的制备及其对芒果保鲜的研究[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2019, 32(1): 17–22.
XU Zixuan, DING Jiao, ZHOU Xiangyang, et al. Preparation of citric acid modified starch/PVA film and its application in preservation of mango[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2019, 32(1):17–22.
- [14] 屈文涛,王泽威,钟磊,等. 天然气管道清管用可溶性PVAL材料制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2):39–46.
QU Wentao, WANG Zewei, ZHONG Lei, et al. Preparation and performances of water soluble PVAL material for natural gas pipeline pig[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):39–46.
- [15] 王盛. 聚乙烯醇/可溶性淀粉保鲜膜的制备及其性能研究[D]. 浙江农林大学, 2023.
WANG Sheng. Preparation and properties of polyvinyl alcohol/soluble starch cling film[D]. Zhejiang A&F University, 2023.
- [16] 刘清丽. 含液输气管道的清管器运动过程分析[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2018.
LIU Qingli. Analysis of the motion process of the pigs in liquid included gas pipeline[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.