

The Influence of Plasticizer Content on the Properties of Optical Fiber Coil Curing Adhesive

Xu Xiong Yanhong Ding^{*} Teng Fu Jintao Yang Jiaxiang Yan

School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan, 412000, China

Abstract

To enhance the environmental adaptability of fiber optic gyroscopes (FOGs) under complex working conditions, this study aims to investigate the regulatory effect of the plasticizer diethyl terephthalate (DOTP) on the properties of the adhesive used for optical fiber coil curing. The influence of DOTP content on the thermal stability, mechanical properties, and process viscosity of the cured adhesive was systematically studied. Results indicate that DOTP effectively reduces the glass transition temperature and viscosity of the adhesive by shielding the intermolecular interactions in the polyurethane acrylate (PUA) chains. When the DOTP content is 6 wt% (PUA-T2), the cured adhesive exhibits optimal overall performance: excellent thermal stability, a 28.06% increase in elongation at break compared to unmodified PUA, and suitable viscosity. Temperature cycling tests of the optical fiber coils further demonstrate that coils wound with PUA-T2 adhesive show better bias stability and range performance than those with unmodified adhesive, confirming the potential of this optimized formulation for improving the environmental adaptability of FOGs.

Keywords

Optical fiber coil; Curing adhesive; Plasticizer

增塑剂含量对光纤环圈固化胶性能的影响

熊旭 丁燕鸿^{*} 傅腾 杨锦涛 颜嘉翔

湖南工业大学材料科学与工程学院，中国·湖南 株洲 412000

摘要

为提升光纤陀螺在复杂工况的环境适应性，本研究旨在探究增塑剂对苯二甲酸二辛酯（DOTP）对光纤环圈固化胶性能的调控作用。系统研究了DOTP添加量对固化胶热稳定性、力学性能及工艺黏度的影响规律。结果表明，DOTP通过屏蔽PUA分子链间的相互作用力，有效降低了固化胶的玻璃化温度与黏度。当DOTP添加量为6 wt%（PUA-T2）时，固化胶表现出最优的综合性能：热稳定性优良，断裂伸长率较未改性PUA提升了28.06%，且黏度适宜。光纤环圈温度循环测试进一步表明，采用PUA-T2胶绕制的光纤环在零偏稳定性及极差方面均优于未改性胶样，证实了该优化配方在提升光纤陀螺环境适应性方面的应用潜力。

关键词

光纤环圈；固化胶；增塑剂

1 引言

光纤陀螺作为现代惯性导航系统的核心部件，在航空航天、国防军工、精准制导等重大战略领域发挥着不可替代的作用。光纤环圈作为光纤陀螺的传感核心，其性能直接决定了陀螺系统的精度与长期稳定性。在实际应用中，光纤环圈需承受宽温、振动等复杂环境考验，因此其封装固化胶需兼具优良的力学强度、柔韧性、热稳定性及工艺操作性。本研究选用增塑剂DOTP对PUA基体进行改性，系统探究不

同DOTP添加量对固化胶体系力学性能、粘度、热稳定性及玻璃化转变温度的影响规律，并最终通过光纤环圈的温度循环测试验证其应用效果，旨在为高性能光纤环圈固化胶的研制提供理论依据和数据支持。

2 固化胶的制备

将PUA作为固化胶基体（由六亚甲基二异氰酸酯、多元醇和封端剂合成），用甲基丙烯酸异冰片酯对其稀释，60℃预热15min后，加入不同质量分数（3wt%、6wt%、9wt%）的增塑剂DOTP混合均匀，再加入光引发剂184和4265，搅拌至分散均匀，分别记为PUA-T1、PUA-T2和PUA-T3。混合胶液经真空脱泡处理30min后注入模具，在紫外光固化箱中完成固化。具体制备流程如图1(a)所示。

【作者简介】熊旭（2000-），男，中国湖南浏阳人，硕士，从事冶金物理化学及能源材料研究。

【通讯作者】丁燕鸿（1968-），女，中国湖南攸县人，博士，副教授，从事新能源材料研究。

3 结果与讨论

3.1 FTIR 分析

图 1 (b) 为 PUA、PUA-T1、PUA-T2 和 PUA-T3 的 FTIR 谱图。在 PUA 的红外光谱中，在 2270cm^{-1} 附近没有出现明显的异氰酸酯基 (-NCO) 特征峰，说明封端剂与异氰酸根反应完成。 3370 cm^{-1} 处的特征峰对应 N-H 的伸缩振

动峰， 1713 cm^{-1} 处的特征峰为氨基甲酸酯基团的羧基 (C=O) 吸收峰，表明体系中的羟基与异氰酸酯基反应生成了氨基甲酸酯^[1]。对比添加增塑剂 DOTP 后的胶液与 PUA 的红外光谱，可以发现各主要特征峰的位置和形状未出现明显变化，没有新的特征峰出现，这表明增塑剂 DOTP 与 PUA 之间主要以物理共混形式存在。增塑剂通过插入聚合物分子链间，削弱链间的相互作用力，增加自由体积来改善材料的性能^[2]。

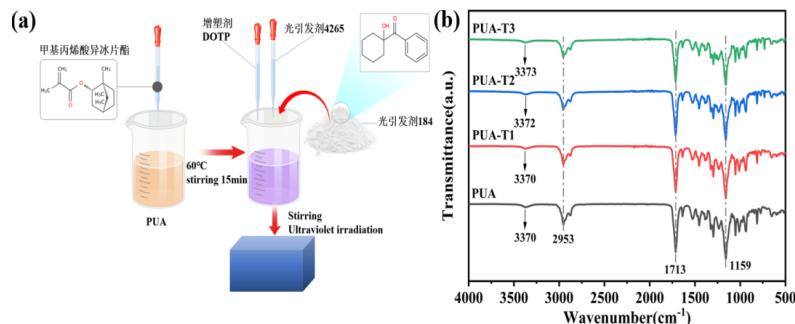


图 1 (a) 制备流程图 (b) 四组样品的 FTIR 图

3.2 热重分析

通过热重分析评估样品的热稳定性，结果如图 2 和表 1 所示，其中 T5%、T10% 分别为失重 5% 和 10% 时所对应的温度。四组样品均出现了两个热失重阶段，第一阶段主要是聚丙烯酸酯链热解，第二阶段对应残余的聚氨酯分子链的分解^[3-4]。PUA、PUA-T1、PUA-T2 和 PUA-T3 失重 5wt% 的温度分别为 248.8°C 、 249.0°C 、 254.8°C 和 252.5°C 。其

中 PUA-T2 的初始分解温度最高，热稳定性最优。 500°C 时残炭率分别为 2.56wt%、3.63wt%、3.09wt% 和 7.90wt%。DTG 曲线显示（图 2b），第一、第二阶段中四组样品的最大分解速率所对应的温度接近，并且硬段分解速率要高于软段的分解速率。由表 1 的玻璃化温度可以看出，随着增塑剂 DOTP 含量的增加，玻璃化温度呈下降趋势，这体现了 DOTP 作为小分子增塑剂对聚合物链段运动的增强作用。

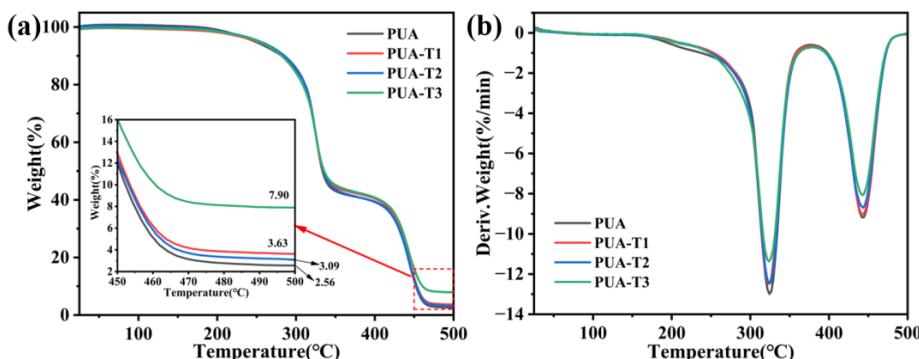


图 2 四组样品的 (a) TG 曲线和 (b) DTG 曲线

表 1 四组样品的热分析数据

样品	$T_{5\%}$ (°C)	$T_{10\%}$ (°C)	500°C 剩余质量 (wt%)	玻璃化温度 T_g (°C)
PUA	248.8	280.3	2.56	172.6
PUA-T1	249.0	283.9	3.63	165.7
PUA-T2	254.8	284.2	3.09	149.4
PUA-T3	252.5	282.6	7.90	145.9

3.3 力学性能分析

图 3 (a) 展示了四组样品的拉伸强度和断裂伸长率。随着 DOTP 含量的增加，固化胶的拉伸强度呈下降趋势，而断裂伸长率在显著上升。PUA、PUA-T1 和 PUA-T2 的拉

伸强度相差不大，而 PUA-T3 较 PUA 降低了 8.81%。添加 6wt% 增塑剂 DOTP 的 PUA-T2 的断裂伸长率达 7.21%，较 PUA 提升了 28.06%。这一结果表明，适量 DOTP 的引入能有效提高 PUA 固化胶的柔韧性，而不过度牺牲其强度。

3.4 黏度测试

工艺黏度是影响固化胶涂覆与环圈绕制质量的关键参数。使用黏度温控一体机对四组样品的黏度进行测试，测试温度为常温。四组样品的黏度测试结果如图3(b)所示。可见，随着增塑剂DOTP含量的增加，胶液的黏度逐渐下降。这归因于DOTP小分子作为惰性稀释剂，有效隔离并润滑了PUA高分子链，降低了链间的相互作用力，从而改善了胶液的流动性与加工性^[5]。

3.5 光纤环圈温度循环测试

固化胶在光纤环圈的应用中，需综合考虑热稳定性、力学性能、玻璃化温度、黏度等因素，其中增塑剂DOTP

添加量为6wt%的PUA-T2胶性能最优。分别使用PUA胶和PUA-T2胶绕制光纤环。对比两组光纤环在温度循环(-45℃~70℃)过程中的零偏变化趋势，观察光纤环在高低温下的输出表现，重点关注其零偏稳定性和极差，结果如表2所示。

实验结果表明，PUA-T2胶所制光纤环的常温、低温及高温零偏值均低于PUA胶光纤环。更重要的是，其经过补偿后的零偏极差和零偏稳定性均优于PUA胶所制光纤环。输出性能的提升可能归因于PUA-T2胶具有更高的柔韧性和热稳定性，使其能更好地缓冲光纤在温度变化时产生的微应力，从而输出更稳定的信号。

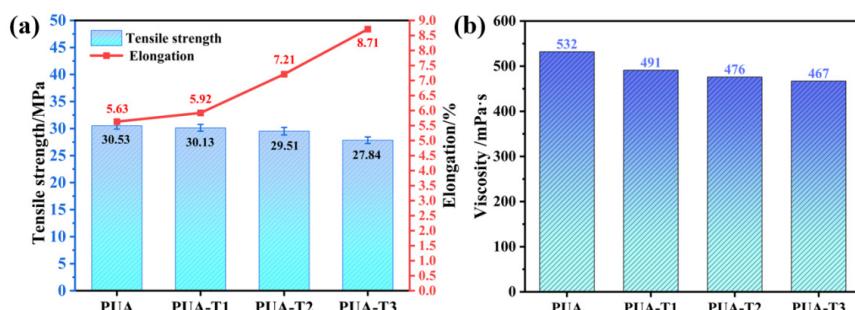


图3 四组样品的(a)拉伸强度和断裂伸长率和(b)黏度测试结果

表2 两组光纤环的温度循环测试结果

编号	常温零偏(°/h)	低温零偏(°/h)	高温零偏(°/h)	补后极差(°/h)	补后零偏(°/h)
PUA-T2环	0.0459	0.0342	0.0237	0.0491	0.0194
PUA环	0.0518	0.0364	0.0325	0.0598	0.0262

4 结论

本研究通过引入增塑剂DOTP对光纤环圈固化胶进行了改性，系统研究了DOTP含量对固化胶性能及光纤环圈可靠性的影响。结果表明，DOTP通过屏蔽PUA分子链间的相互作用力，有效降低了固化胶的玻璃化温度和体系黏度，从而改善工艺操作性。当DOTP添加量为6wt%时(PUA-T2)，固化胶的热稳定性最佳。在力学性能方面，DOTP的引入显著增强了材料的柔韧性，随着其含量增加，固化胶的断裂伸长率明显提升，其中PUA-T2的断裂伸长率较未改性PUA提升了28.06%。光纤环圈温度循环实验表明，采用PUA-T2胶封装的光纤环其零偏稳定性和极差均优于未改性胶液，充分验证了该改性方案可有效提升光纤陀螺在复杂工况下的环境适应性。

参考文献

- [1] 王玉杰, 刘浩, 孔明朋, 等. 绿色环保型聚氨酯胶粘剂的制备及性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2017, 26(06): 23-25+55.
- [2] 王金龙. 聚氨酯/DOTP复合改性乳化沥青及其微表处混合料性能研究[D]. 山东:山东交通学院, 2025.
- [3] 肖思浩, 黄成尚, 梅唯, 等. 超支化聚氨酯丙烯酸酯胶粘剂的制备与性能[J]. 中国胶粘剂, 2024, 33(06): 55-60.
- [4] 黄成尚, 肖思浩, 梅唯, 等. 紫外光/湿气双重固化改性聚氨酯丙烯酸酯胶粘剂[J]. 中国胶粘剂, 2023, 32(12): 1-6+18.
- [5] Altun A, Fellah M F. A mini-review on different synthesis reactions of diethyl terephthalate (DOTP) and properties of DOTP plasticized PVC[J]. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 2022, 28(7): 1001-1013.