

环氧 - 复合稀释剂拉挤体系的制备及其性能研究

李炳章¹, 葛继文², 曹亚周², 陈旭², 孙玉玺², 王富强¹, 李雨帆¹

¹中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

²中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

收稿日期: 2026年5月12日; 录用日期: 2026年6月8日; 发布日期: 2026年6月18日

摘要

以新戊二醇二缩水甘油醚(D-678)与聚丙二醇二缩水甘油醚(PPGDGE)为复合活性稀释剂, 制备适配拉挤成型工艺的环氧树脂体系。通过差示扫描量热法(DSC)、旋转粘度测试、纤维浸润性观察、力学性能测试及动态力学分析(DMA), 系统表征体系固化行为、工艺特性、界面相容性、宏观力学性能与微观网络结构参数, 揭示复合稀释剂协同调控机制。结果表明: 复合稀释剂体系25℃粘度368 mPa·s, 80℃降至174 mPa·s, 纤维浸润时间 ≤ 62 s, 满足拉挤快速浸渍要求; 高温反应活性高, 固化放热峰温154.59℃, 适配连续高效生产; 拉伸强度77.41 MPa、弯曲强度97.62 MPa, 强度保持率优于单一稀释剂体系; DMA测试显示, 复合体系储能模量、玻璃化转变温度(T_g)与交联密度介于两种单一稀释剂体系之间, 微观交联网络更均衡, 从分子层面证实协同增效机理。该体系兼顾低粘度、优浸润、高活性与高强度, 可满足拉挤工艺与长期服役要求, 工程应用前景良好。

关键词

复合稀释剂, 环氧树脂, 拉挤成型

Preparation and Performance of Epoxy Resin-Composite Diluent System for Pultrusion

Bingzhang Li¹, Jiwen Ge², Yazhou Cao², Xu Chen², Yuxi Sun², Fuqiang Wang¹, Yufan Li¹

¹The Thirty-Third China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

²CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

Received: May 12, 2026; accepted: June 8, 2026; published: June 18, 2026

文章引用: 李炳章, 葛继文, 曹亚周, 陈旭, 孙玉玺, 王富强, 李雨帆. 环氧-复合稀释剂拉挤体系的制备及其性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(6): 79-86. DOI: 10.12677/ms.2026.166140

Abstract

An epoxy resin system suitable for pultrusion molding was prepared using neopentyl glycol diglycidyl ether (D-678) and polypropylene glycol diglycidyl ether (PPGDGE) as composite reactive diluents. The curing behavior, process characteristics, interfacial compatibility, macroscopic mechanical properties and microstructure parameters were systematically characterized by differential scanning calorimetry (DSC), rotational viscosity test, fiber wettability observation, mechanical property test and dynamic mechanical analysis (DMA). The results show that the composite diluent system has a viscosity of 368 mPa·s at 25°C and decreases to 174 mPa·s at 80°C, with fiber wetting time ≤ 62 s, meeting the rapid impregnation requirements of pultrusion. It has high reactivity at high temperature with a curing exothermic peak temperature of 154.59°C, suitable for continuous and efficient production. The tensile strength is 77.41 MPa and the flexural strength is 97.62 MPa, with higher strength retention than single diluent systems. DMA tests show that the storage modulus, glass transition temperature (T_g) and crosslinking density of the composite system are between the two single diluent systems, and the micro crosslinking network is more balanced, confirming the synergistic mechanism at the molecular level. This system integrates low viscosity, excellent wettability, high reactivity and high strength, which can meet the process and long-term service requirements of pultrusion, and has good engineering application prospects.

Keywords

Composite Diluent, Epoxy Resin, Pultrusion Molding

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

复合材料凭借质轻、比强度高、耐环境腐蚀等优异特性，在航空航天、轨道交通、建筑与能源等领域展现出不可替代的应用价值[1]。在轨道交通行业轻量化、高速化的发展趋势下，复合材料因长期服役稳定性优异，成为推动车辆结构件性能升级的核心材料，其应用水平更是衡量轨道交通装备制造技术的重要指标[2]。自 20 世纪 80 年代复合材料涉足轨道交通车辆建造领域以来，我国在该领域实现了从技术引进到自主研发的突破，多款拥有自主知识产权的复合材料制造技术及批量化产品相继问世，为行业转型升级注入了强劲动能[3]。

拉挤成型是低成本、连续化制造高性能复合材料型材、板材的关键技术，也是实现复合材料规模化工程应用的重要途径[4]。该工艺对树脂体系有着严苛的综合要求，不仅需要具备低粘度、高反应活性以保障纤维浸渍效率与连续成型的顺畅性，更需在固化后展现出高强度、高韧性、良好耐热性等性能，才能满足轨道交通结构件的服役标准[5]。当前轨道交通用耐高温环氧树脂体系虽能满足耐热性需求，却普遍存在粘度高、纤维浸透性差的问题，在拉挤成型复杂结构构件时，极易出现树脂浸润不充分的情况，导致制品内部产生孔隙、分层等缺陷，严重降低构件的力学性能和使用寿命[6]。

稀释剂作为调控环氧树脂体系工艺性能与使用性能的重要助剂，可通过降低树脂粘度有效改善其纤维浸润性和工艺操作性，进而提升复合材料制品的成型质量[7]。单一活性稀释剂虽能实现降粘效果，但

受自身结构与反应特性限制,易造成树脂固化后力学性能衰减、耐热性下降等问题,难以兼顾拉挤工艺的低粘度要求与制品的综合性能[8]。而复合稀释剂可通过不同类型稀释剂的功能协同,在高效降粘的同时,最大程度保留树脂体系的固化活性与力学性能,是适配拉挤成型工艺的优选方案[9]。然而,目前关于稀释剂对耐高温环氧树脂拉挤体系的研究多聚焦于单一稀释剂的用量调控,针对复合稀释剂与单一稀释剂对体系性能影响的对比研究仍较为匮乏,尚未明确二者对树脂流变特性、固化行为及力学性能的调控差异,难以指导实际生产中稀释剂的合理选择与优化配伍[10]。

基于此,本研究以轨道交通拉挤成型用环氧树脂为研究对象,选用新戊二醇二缩水甘油醚与聚丙二醇二缩水甘油醚为稀释剂组分,分别构建单一稀释剂与复合稀释剂环氧树脂体系。通过系统对比两类体系的粘度特性、固化行为、纤维浸润性及固化后力学性能,探究复合稀释剂的协同调控机制,明确其相较于单一稀释剂的性能优势,开发出兼顾低粘度、优浸润、高活性与高强度的环氧拉挤树脂体系。研究结果旨在为解决环氧树脂拉挤成型中浸润不足、制品性能不佳等问题,同时为拉挤用环氧稀释剂体系的优化设计提供参考,进一步推动拉挤成型复合材料在轨道交通等高端领域的应用与推广。

2. 材料与方法

2.1. 主要原材料

环氧树脂(华东理工大学华昌聚合物有限公司 3881A); 固化剂(华东理工大学华昌聚合物有限公司 3881B); 稀释剂(武汉匠信生物科技有限公司 D-678); 稀释剂(武汉鹏垒生物科技有限公司 PPGDGE); 偶联剂(南京辰工有机硅 KH-550 与 201); 脱模剂(湖北鑫润德化工 8015)。

2.2. 实验配方

未改性树脂: 环氧树脂 100 份, 固化剂 120 份, 偶联剂 1.5 份, 脱模剂 1.3 份;

D-678 体系: 环氧树脂 100 份, D-678 20 份, 固化剂 120 份, 偶联剂 1.5 份, 脱模剂 1.3 份;

PPGDGE 体系: 环氧树脂 100 份, PPGDGE 20 份, 固化剂 120 份, 偶联剂 1.5 份, 脱模剂 1.3 份;

D-678/PPGDGE 复合体系: 环氧树脂 100 份, D-678 10 份 + PPGDGE 10 份(总稀释剂 20 份, 质量比 1:1), 固化剂 120 份, 偶联剂 1.5 份, 脱模剂 1.3 份。

2.3. 主要实验设备

SNB-2 数显粘度测试仪, 上海平轩科学仪器有限公司; EP214C 精密电子天平, 广州罡然机电设备有限公司; HY-HHJ 双行星双搅拌混合机, 广州红运混合设备有限公司; Q200 差示扫描量热仪, 美国 TA 公司; CMT4000 微机控制电子万能试验机, 深圳三思纵横科技股份有限公司。DMA Q800 动态热机械分析仪, 美国 TA 仪器公司。

3. 主要实验内容

3.1. 树脂体系的制备

以 3881A 环氧树脂为基体, 新戊二醇二缩水甘油醚(D-678)、聚丙二醇二缩水甘油醚(PPGDGE)为稀释剂组分, 设置单一稀释剂组与复合稀释剂组进行对比(固定环氧树脂与稀释剂总添加比例, 分别制备 3 种稀释剂体系: 仅添加 D-678、仅添加 PPGDGE、添加 D-678/PPGDGE 复配体系)。将环氧树脂、活性稀释剂、偶联剂、脱模剂按 2.2 比例在双行星搅拌机中搅拌, 真空度 -0.08 MPa、转速 30 r/min 搅拌 30 min 至均匀; 随后加入固化剂, 同工艺继续搅拌 20 min, 制得待测环氧树脂体系。

3.2. 树脂体系性能测试

树脂体系的各项性能按以下标准测试。

3.2.1. 粘度测试

粘度按照 GB/T 2794-2013 测试, 转子型号 4#, 转速 20 r/min, 测试 25°C、40°C、60°C、80°C、100°C 下体系粘度, 每个温度平衡 3 min 后读数。

3.2.2. 力学性能测试

按照 GB/T 2567-2008、GB/T 7124-2008 制备标准试样, 经梯度固化(80°C/1 h + 120°C/1 h + 150°C/2 h) 后测试。

3.2.3. 纤维浸润性测试

采用单层纤维布(面密度 400 g/m²)完全浸渍法, 记录 25°C、60°C、80°C 下树脂完全浸润纤维布的时间, 对比单一与复合稀释剂对浸润性的改善效果。

3.2.4. 固化特性测试

采用差示扫描量热仪(DSC)进行非等温固化测试, 升温速率 10°C/min, 氮气氛围。

3.2.5. 动态力学分析(DMA)

依据 GB/T 33061.11-2022 测试, 升温速率 3°C/min, 测试范围 30~200°C, 频率 1 Hz, 获取储能模量(E')、损耗因子(tan δ)、玻璃化转变温度(T_g, tan δ 峰值温度), 按公式计算交联密度。

4. 结果与讨论

4.1. 工艺特性与纤维浸润性

如图 1 所示, 随温度升高, 各体系粘度均呈下降趋势。其中, 单一 D-678 体系整体粘度偏低, 但高温下粘度降幅较小, 对温度敏感性较弱; 单一 PPGDGE 体系低温粘度较高, 降粘效果弱于 D-678, 但高温下粘度持续降低, 表现出更好的高温流动性。二者单独使用时, 均难以在全温区实现理想的流变匹配。

与单一稀释剂相比, D-678/PPGDGE 复合稀释剂体系呈现明显协同效应: 在 25°C 时体系粘度为 368 mPa·s, 80°C 时降至 174 mPa·s, 温度升至 60°C 以上, 复合体系粘度低于 235 mPa·s, 同时表 1 显示, 在 25°C、60°C、80°C 条件下, 采用面密度 400 g/m² 碳纤维布进行完全浸渍测试, 结果表明: 未改性树脂浸润缓慢, 25°C 完全浸润时间达 214 s; 单一 D-678 与 PPGDGE 体系浸润速度显著提升; D-678/PPGDGE 复合稀释剂体系浸润效率最优, 25°C 仅需 88 s, 60°C 缩短至 62 s, 80°C 仅 43 s 即可完全浸透, 这是由于 D-678 分子小、降粘能力强, PPGDGE 柔韧性好、界面润湿性优, 二者复配可互补增效, 在快速降低粘度的同时提升树脂对纤维的润湿铺展能力, 更契合拉挤工艺快速浸渍需求。

Table 1. Permeation performance of various curing systems in 400 g/m² carbon fiber fabric

表 1. 不同固化体系在 400 g/m² 碳纤维布渗透情况

名称	未改性树脂	D-678 改性	PPGDGE 改性	D-678/PPGDGE 改性	
渗透时间(s)	25°C	214	99	106	88
	60°C	143	65	69	62
	80°C	102	48	53	43

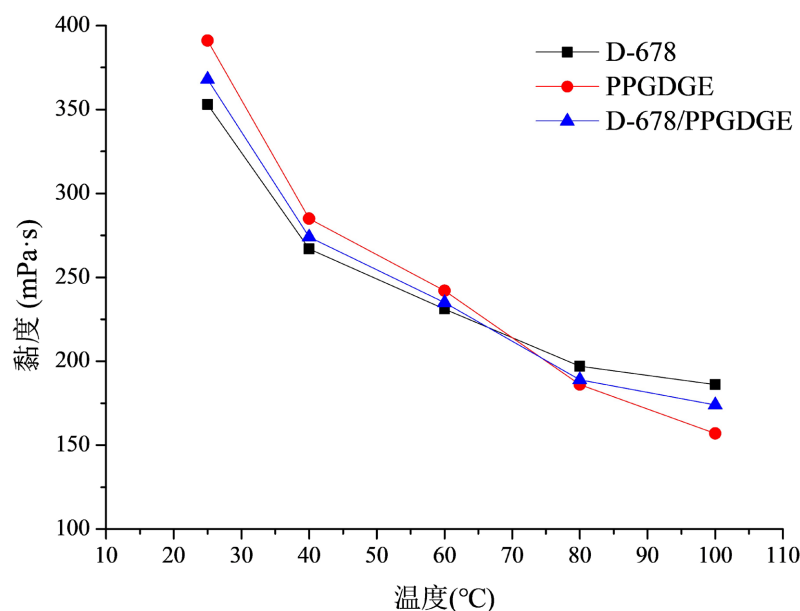


Figure 1. Relationship between viscosity and temperature of resin system

图 1. 树脂体系粘度与温度之间关系

4.2. 树脂浇注体力学性能

表 2 为未改性树脂及不同稀释剂改性体系浇注体的力学性能对比。与未改性树脂相比，添加稀释剂的体系拉伸、弯曲及剪切强度均略有下降，这是由于活性稀释剂的引入降低了体系的交联密度，导致力学强度出现一定程度的衰减。

Table 2. Mechanical properties of resin system castable

表 2. 树脂体系浇注体力学性能

名称	拉伸强度(MPa)	弯曲强度(MPa)	剪切强度(MPa)
未改性树脂	81.23	103.02	37.16
D-678 改性	75.16	96.22	36.61
PPGDGE 改性	76.22	97.15	35.42
D-678/PPGDGE 改性	77.41	97.62	35.12

其中，单一 D-678 体系的强度降幅最大，单一 PPGDGE 体系次之，而 D-678/PPGDGE 复合稀释剂体系的强度保持率最高，其拉伸强度为 77.41 MPa、弯曲强度为 97.62 MPa，均优于两种单一稀释剂体系，表明两种稀释剂之间存在协同效应，可在降低粘度的同时，最大限度保留树脂基体的力学性能。剪切强度受稀释剂类型影响较小，各组间差异不超过 5.5%，说明稀释剂的引入未显著削弱体系的界面结合能力。综合来看，复合稀释剂体系在工艺性与力学性能之间实现了更好的平衡，更适配拉挤成型对树脂基体的综合要求。

4.3. 树脂固化特性

由图 2 可见，未改性环氧树脂体系呈现出尖锐且高耸的放热峰，峰值温度约为 168 °C，表明其固化反

应剧烈、交联密度高,但工艺窗口较窄。引入稀释剂后,各改性体系的放热峰峰值均出现不同程度降低,峰形趋于宽化。与单一稀释剂体系相比,D-678/PPGDGE 复合稀释剂改性体系的固化放热峰温度为 154.59℃,起始固化温度约为 92℃,终止固化温度约为 210℃,峰形较窄、放热集中,固化反应速率快,更适配拉挤成型连续高效固化的工艺需求。通过外推法计算得到复合稀释剂体系的凝胶温度为 118℃、固化温度为 132℃、后处理温度为 185℃,其凝胶温度与固化温度差较小,反应活性高,工艺窗口稳定。

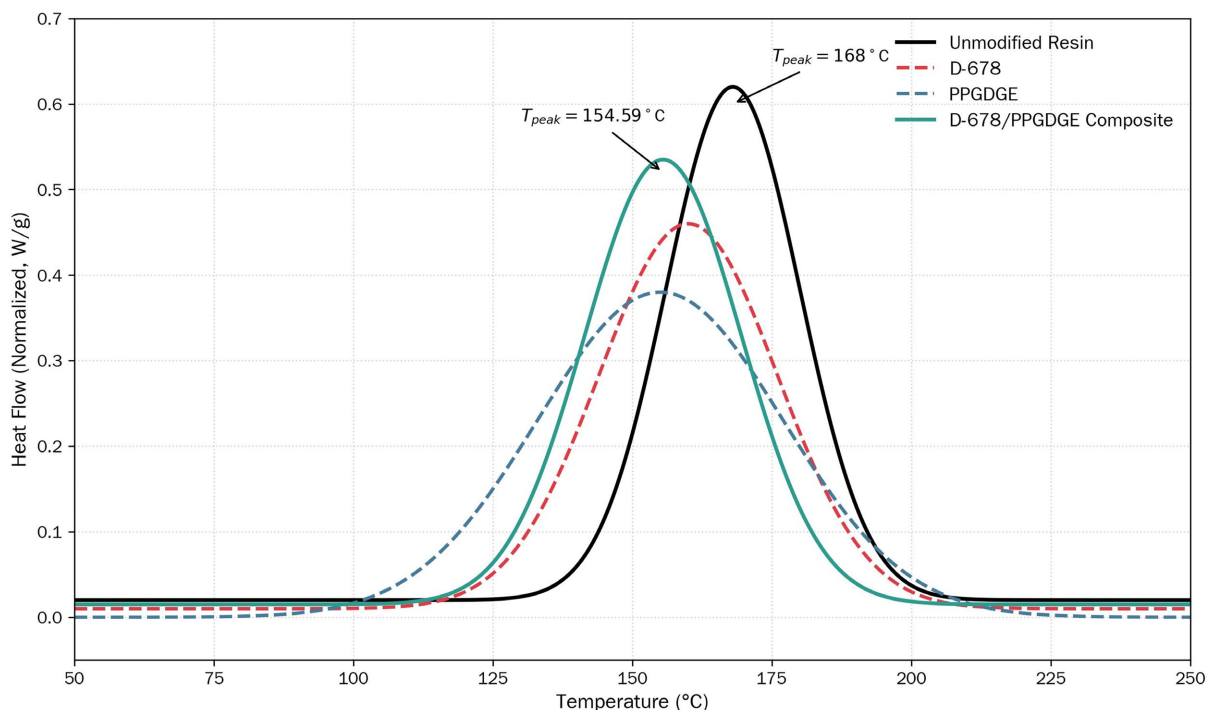


Figure 2. DSC curing curve of resin system

图 2. 树脂体系 DSC 固化曲线

综合来看,复合稀释剂改性体系在降低粘度、改善工艺性的同时,仍能保持较高的固化反应活性与交联反应效率,可在拉挤成型过程中快速完成固化,为制品提供稳定的力学性能保障。

4.4. 动态力学分析(DMA)

如表 3 所示,未改性树脂体系的储能模量最高,这是由于未引入稀释剂,其交联网络最为致密。加入稀释剂后,不同体系的储能模量均出现下降,这是因为稀释剂的加入在一定程度上降低了树脂本体的交联密度。然而,对比两种单一稀释剂体系,复合稀释剂改性体系的储能模量更接近未改性体系,表明其在降低粘度的同时,更好地保持了固化网络的刚性。

未改性树脂的 T_g 最高(175.6℃),这与其剧烈的固化反应和高交联密度特征相符(见 4.3 节)。引入稀释剂后,各改性体系的 T_g 均有所降低,这是由于活性稀释剂分子链的引入,增加了网络结构中柔性链段的比例,从而增强了分子链段的活动能力。值得注意的是,D-678/PPGDGE 复合改性体系的 T_g 同样更接近未改性体系。这一结果与储能模量的变化趋势一致,进一步证实了复合稀释剂的协同作用。

根据橡胶弹性理论,利用橡胶态平台的储能模量计算了各体系的交联密度(ν_e),结果如表 3 所示。交联密度从高到低依次为:未改性树脂 > D-678/PPGDGE 复合体系 > PPGDGE 单一体系 > D-678 单一体系

系。这表明，复合稀释剂体系成功构建了一种更为均衡的微观交联网络。单一 D-678 因其小分子结构，在有效降粘的同时，可能对网络结构的完整性造成较大干扰，导致交联密度最低；而柔性链较长的 PPGDGE 在参与交联时，形成的网络交联点密度也有限。当两者以适当比例复配后，D-678 提供反应位点和刚性，PPGDGE 提供链段柔性和长度，二者协同参与了环氧网络的构建，形成了一种“刚柔并济”、缺陷更少的交联结构，从而使其交联密度和最终力学性能(见 4.2 节)均优于任一单一稀释剂体系。

综合 DMA 分析可知，D-678/PPGDGE 复合稀释剂体系在分子尺度上实现了性能的优化与平衡。其储能模量、玻璃化转变温度与交联密度等关键微观结构参数均介于单一稀释剂体系与未改性体系之间，这不仅从动态热机械性能角度解释了其保持较高力学强度的原因，也直接证实了两种稀释剂在改善工艺性的同时，通过功能互补实现了对环氧树脂固化网络结构的协同增强，使其更适配于对工艺和性能均有严苛要求的拉挤成型技术。

Table 3. Dynamic mechanical analysis of resin system

表 3. 树脂体系动态力学分析

名称	储能模量(30°C)/GPa	玻璃化转变温度 T _g	交联密度/(mol/m ³)
未改性树脂	3.21	175.6	3251
D-678 改性	2.65	148.3	2218
PPGDGE 改性	2.78	144.7	2360
D-678/PPGDGE 改性	2.89	157.5	2480

5. 结论

本研究制备了以 D-678/PPGDGE 为复合活性稀释剂的拉挤用环氧树脂体系。复合体系具有优异的流动性和浸润性(25°C 粘度 368 mPa·s, 80°C 浸润时间仅 43 s)，完全满足拉挤工艺对树脂快速、充分浸渍纤维的要求；体系固化反应活性高、放热集中(峰值 154.59°C)，且凝胶、固化与后处理温度窗口(118°C、132°C、185°C)匹配良好，适于连续高效的拉挤成型；在有效降低粘度的同时，复合体系最大限度地保留了基体强度，其浇注体拉伸强度(77.41 MPa)和弯曲强度(97.62 MPa)均优于两种单一稀释剂体系，实现了工艺性与最终性能的最佳平衡；动态热机械分析表明，复合体系构建了更均衡的微观交联网络，其储能模量、玻璃化转变温度与交联密度均介于单一体系与未改性体系之间。这从分子层面证实了 D-678 (刚性、降粘)与 PPGDGE (柔性、润湿)的协同作用，是宏观性能得以优化的根本原因。

综上所述，D-678/PPGDGE 复合稀释剂通过功能互补，协同解决了拉挤工艺中高粘度浸润与高性能保持的矛盾，为制备高性能拉挤复合材料提供了一种理想的树脂基体解决方案。

基金项目

2025 年青岛市关键技术攻关及产业化示范类项目(25-1-1-gjgg-19-gx)基金资助。

参考文献

- [1] 张颖, 刘晓峰, 阎述韬, 等. 碳纤维粉改性环氧树脂基玻纤复合材料力学性能研究[J]. 功能材料, 2020, 51(11): 11103-11109.
- [2] 李明高, 张丽娇. 轨道交通装备复合材料应用现状及发展趋势展望[J]. 纺织导报, 2020(7): 20-24.
- [3] 李令龙, 徐月圆, 郭长刚. 碳纤维复合材料在汽车轻量化中的应用[J]. 汽车测试报告, 2025(20): 61-63.
- [4] 赵新涛, 姜宁, 王明道, 等. 纤维增强热塑性复合材料拉挤成型工艺研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(1): 224-232.

- [5] 闫亦. 针对拉挤应用的快速固化环氧树脂固化动力学及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- [6] 王成忠, 陈伟明, 梁平辉, 等. 耐高温拉挤环氧树脂及其复合材料性能研究[C]//中国环氧树脂应用技术学会. 第十一次全国环氧树脂应用技术学术交流会论文集. 2005: 275-278.
- [7] 庞鑫, 叶周景. 活性稀释剂对环氧树脂基的影响[J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(2): 235-244.
- [8] 孙琴, 王钧, 蔡浩鹏. 活性稀释剂种类对环氧树脂体系性能的影响研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(6): 6-8.
- [9] 王伟, 王鹏, 张鹏, 等. 活性稀释剂对环氧树脂涂层的性能影响[J]. 全面腐蚀控制, 2014, 28(12): 61-64.
- [10] 李山剑, 邓双辉, 冯云龙, 等. 活性稀释剂对环氧树脂结构和性能的影响[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2016, 36(6): 604-613.