

PET 酶在洗涤剂中的应用研究

谈雅婷, 孙飞野, 段细英, 黄家伟, 王俊*
(广东溢多利生物科技股份有限公司, 广东珠海, 519000)
DOI:10.61369/CDCST.2025040009

摘 要: 聚酯纤维在日常洗涤中常出现去污不足、毛球和泛灰等问题, 亟需开发针对性的酶制剂。为此, 研究系统评价了 PET 酶 (PET-L 001) 在不同 pH、温度条件下的酶学性质, 以及其在洗涤剂配方中的稳定性与应用效果。结果表明, PET 酶在 pH 8.0~11.0 和 30~60 °C 范围内保持较高活性, 具备与家用洗涤环境相匹配的特性; 在 50 °C 连续贮存 28 天后酶活力仍保留 95%, 在多款市售洗衣液中 37 °C 贮存 28 天后活性保持在 88%~100%。进一步测试显示, 添加 PET 酶的洗衣液在去除聚酯污渍和抑制污渍再沉积方面均表现出显著优势。研究结果表明, PET 酶在提升洗涤剂对聚酯织物的清洁方面具有应用潜力, 为新一代功能性洗涤酶的开发提供了实验依据。

关 键 词: PET 酶; 洗涤剂; 酶活力; 稳定性; 织物外观

第一作者简介: 谈雅婷, 大学本科, 现就职于广东溢多利生物科技股份有限公司, 助理工程师, 主要研究方向为生物酶制剂在洗涤剂中的应用。E-mail: yachtyT2021@163.com。

通讯作者简介: 王俊, 博士研究生, 现就职于广东溢多利生物科技股份有限公司, 主要研究方向为生物酶制剂的基因改造、应用研发和发酵生产工艺开发。E-mail: wangjun@vtrbio.com。



谈雅婷

聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) 是最重要的合成聚酯之一, 凭借优异的强度、耐磨性、尺寸稳定性和抗皱性, 广泛应用于服装、家纺、地毯及包装领域。近年来, 随着人们对快时尚和功能性纺织品的需求增加, 聚酯在纤维消费中的比例不断提升, 部分国家甚至超过总纤维消耗的一半^[1]。PET 纤维的大规模应用不仅带来了舒适、耐用的衣物, 也对家庭洗涤提出了新的挑战。

首先, 聚酯纤维表面疏水、缺乏极性基团, 导致其对皮脂、油脂、化妆品和颗粒性污渍具有较强的吸附力, 而传统洗涤剂依赖表面活性剂的乳化分散作用, 往往对这类疏水性残留去除不足^[2]。其次, 聚酯纤维在长期穿着和洗涤过程中易发生摩擦与微纤维断裂, 导致织物表面形成毛球 (pilling) 并出现灰暗泛黄现象, 从而影响外观与穿着舒适度。这些问题在合成纤维比例高的织物中尤为突出, 也是消费者在使用和购买聚酯衣物时最常见的抱怨^[3]。

在洗涤剂配方中, 酶制剂的引入为提高清洁效果和改善织物外观提供了突破口。蛋白酶在去除血渍、奶渍等蛋白类污渍方面效果显著; 淀粉酶能够水解淀粉类残留, 防止发黄和硬化; 脂肪酶则可协助去除油脂污渍。更为典型的案例是纤维素酶在棉织物洗涤中的应用: 通过温和水解纤维素纤维表面突出的微纤维, 纤维素酶不仅改善织物手感和光泽, 还能有效减少毛球和泛灰, 形成所谓的“焕新 (renewal)”效果^[4,5]。这一应用已在全球洗涤剂行业中普

及, 并成为高端洗涤剂差异化竞争的重要卖点。

与此形成对比的是, 针对聚酯织物的专属酶制剂至今仍是空白。尽管聚酯是现代纺织的主力纤维, 但传统的酶类几乎无法直接作用于其酯键结构。直到近年来, 随着对 PET 降解微生物及其酶的发现与研究, 新的可能性才被提出。2016 年报道的 *Ideonella sakaiensis* PETase 及其辅助酶 MHETase 开启了 PET 生物降解研究的新篇章^[1]。随后, 大量来源于细菌或真菌的 cutinase-like hydrolases (如 LCC、HiC、Cut190 等) 被发现能够在温和条件下催化 PET 的表面水解, 生成对苯二甲酸 (TPA)、乙二醇 (EG) 或中间体 MHET^[6-9]。这些研究最初的目标主要是塑料回收与环境治理, 但同时也为纺织与日化领域带来了启发: 如果 PET 酶可以在家庭洗涤的温度和配方条件下稳定存在并发挥作用, 就有望改善聚酯织物的去污和外观问题。

在纺织科学领域, 已有证据表明 PET 酶能在表面尺度上发挥效果。例如, LCC、HiC 等酶可使聚酯纤维表面产生羧基和羟基, 接触角显著下降, 表面亲水性增强, 从而提高染料上染率和润湿性能^[10,11]。这类表面选择性水解与洗涤中的去污机理高度契合: 亲水化增强了洗涤剂溶液的浸润与污渍去除, 同时减少了再次沉积的风险。此外, PET 酶的温和水解作用还能削弱或切断纤维表层突出的微纤维, 在功能上与纤维素酶对棉织物的“抗毛球、去泛灰”作用形成类比。

针对洗涤剂场景, PET 酶的潜在优势主要体现在以下

几个方面:

去污增效:通过表面水解改善聚酯表面亲水性,使油脂、颗粒等疏水性污渍更易被表面活性剂去除。

焕新织物:切削或削弱纤维表面微纤维,减少毛球和灰暗,恢复织物光洁与柔软。

防止再沉积:对聚酯微纤维表面受损不定形区的清除,降低了污渍和染料在表面的二次结合。

应用兼容性:部分 PET 酶(如 FAST-PETase、Cut190 变体)在 30~60 °C 的温度范围内仍保持活性,与家庭洗涤温度高度匹配;通过定点突变和定向进化获得的高稳定性变体,亦具备在含表面活性剂与助剂环境下工作的潜力^[12-15]。

近年来的专利与应用探索也印证了这一趋势。一些日化公司已提出将 PETase 或 cutinase 类酶添加到洗涤剂配方中,用于减少聚酯织物的毛球和泛灰,同时提升对白色或浅色衣物的亮白效果^[16,17]。这些构想与几十年前纤维素酶在棉织物中的应用路径高度相似:从实验室的表面水解机理,到最终成为提升消费者感知的卖点,进而发展为行业标配。

然而,PET 酶在洗涤剂中的应用仍面临若干挑战。首先,酶需要在含有阴离子、非离子和阳离子表面活性剂,以及活性氧、螯合剂等复杂体系中保持稳定;其次,聚酯纤维的高结晶度区域对酶的可达性有限,表面作用需通过配方优化与酶工程进一步增强^[18];此外,不同洗涤程序(快洗、低温、节能程序)对酶活性与作用时间的要求也需系统评估。

PET 酶的研究已从“塑料回收”逐渐延伸到“纺织表面调控”,其在洗涤剂行业的应用价值正逐渐凸显。本研究旨在系统评估 PET 酶在洗涤条件下对聚酯织物的去污性能,并与传统纤维素酶在棉织物应用中的成功经验进行对比。通过这一探索,我们希望明确 PET 酶在日化洗涤领域的潜在作用机理与实际应用前景,为下一代功能性洗涤酶制剂的开发提供理论与实验依据^[19]。

1. 材料与方法

1.1 材料与仪器

溢倍佳 PET-L 001,广东溢多利生物科技股份有限公司;PET 微粒(10~100 μm),实验室自制,由商业 PET 粒子经机械粉碎与分级筛选制备;对苯二甲酸,单(2-羟乙

基)对苯二甲酸酯,双(2-羟乙基)对苯二甲酸酯,乙二醇,乙腈,甲酸, Sigma-Aldrich;无水碳酸钠,无水碳酸氢钠,二水磷酸二氢钠,十二水磷酸氢二钠,氢氧化钠,盐酸,无水氯化钙,无水氯化镁,广州化学试剂厂;市售洗衣液;染料聚酯污布,实验室自制。

pH 计,梅特勒-托利多(上海)仪器有限公司;恒温水浴锅,上海一恒科学仪器有限公司;磁力搅拌器,德国 IKA;分析天平,德国 Sartorius;电子天平,德国 Sartorius;紫外可见分光光度计,日本岛津;涡旋振荡器,赛默飞世尔科技,高效液相色谱仪,安捷伦。

1.2 实验方法

1.2.1 酶活力测定方法

1.2.1.1 酶活力单位定义

在本研究中,PET 酶活力定义如下:1 个酶活力单位(U)指在规定的检测条件下,10 mg/mL PET 微粒,碳酸盐缓冲液,pH 9~11.0,30~60 °C,700 r/min 振荡,每分钟催化释放 1 μmol 对苯二甲酸当量(TPA-eq)的酶量。

1.2.1.2 标准曲线的绘制

取 6 支 2 mL 离心管,分别加入表 1 所列的对苯二甲酸(TPA)标准溶液及缓冲液,总体积为 1.0 mL。经充分混匀后,过 0.22 μm 滤膜进样,采用 HPLC 分析,在 254 nm 波长下检测峰面积。以峰面积为纵坐标,以 TPA 浓度为横坐标,绘制标准曲线。

表 1 酶活力标准曲线试液添加量

比色管号	0	1	2	3	4	5
缓冲液加入量/mL	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20	0.00
TPA 准液加入量/mL	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00

1.2.1.3 实验组

取 0.2 mL 酶液,加入 1.8 mL PET 微粒悬液(10 mg/mL,粒径 10~100 μm),置于 40 °C 恒温振荡器中反应 2 h(700 r/min)。反应结束后,加入等体积 1% TFA 终止反应,12,000 \times g 离心 10 min,取上清液过 0.22 μm 滤膜后进样 HPLC,测定水解产物(TPA、MHET、BHET)含量。

1.2.1.4 对照组

操作同实验组,区别在于酶液于终止反应(加 TFA)之后加入,排除非酶促释放的干扰

1.2.1.5 酶活力计算

$$U = \frac{(A-C)}{K \times t \times V_{enz}} \times n$$

式中:

U:酶活力(U/mL),定义为每分钟生成 1 μmol TPA

当量的酶量;

A : 样品上清液中产物的峰面积;

C : 标准曲线截距;

K : 标准曲线斜率(峰面积/浓度);

t : 酶解时间(min);

V_{enz} : 反应中加入的酶液体积(mL);

n : 酶液稀释倍数

1.2.2 去污力测定方法

参考 GB/T 13174-2021《衣料用洗涤剂去污力及循环洗涤性能的测定》,检测洗涤剂对染料聚酯污布的去污力。

染料聚酯污布:将2g黑色油性笔墨水滴于白色100%聚酯纤维布上,悬挂晾干既成。

1.2.3 pH值对PET酶活力的影响

在不同pH值分别为9.00、9.50、10.00、10.50和11.0的0.1 mol/L 碳酸盐缓冲液中配制10 mg/mL PET微粒悬液,按1.2.1方法在温度为40℃的条件下检测酶活力。

1.2.4 温度对PET酶活力的影响

在pH值为9.5的0.1 mol/L 碳酸盐缓冲液中配制10 mg/mL PET微粒悬液,按1.2.1方法在温度别为30℃、40℃、50℃和60℃的条件下检测酶活力。

1.2.5 PET酶的热稳定性

将100 mL酶液置于50℃恒温干燥箱中,分别于第7、14、21、28天取样,在pH为9.50的10 mg/mL PET微粒悬液液中,按1.2.1方法在温度为40℃的条件下检测酶活力。

1.2.6 PET酶在洗衣液中稳定性

本研究采用37℃热储加速老化的方法验证PET酶在洗衣液中的稳定性,根据行业经验,37℃热储28天基本等效于常温下储存90天。在四款市售洗衣液中添加0.2%溢倍佳PET-L 001,混匀后置于37℃恒温箱中,分别于第7、14、21、28天取样。在pH为9.50的10 mg/mL PET微粒悬液液中,按1.2.1方法在温度为40℃的条件下检测酶活力,参照1.2.2的方法进行去污力测定。

1.2.7 PET酶抗再沉积效果

将2块自制染料测试布分别放置在两个1 L烧杯底部,分别加入500mL纯净水,分别加入1 g含0.3%溢倍佳PET-L 001的洗衣液和未添加PET酶的洗衣液,搅拌清洗30 min,对比测试布的白边。

2. 结果与分析

2.1 pH值对PET酶活力的影响

以pH为8.0时的酶活力为基准,其他pH条件下测出的酶活力与其求出酶活力比值。如图1所示,溢倍佳PET-L 001的酶活力随着pH的升高而升高,最适pH范围在11.00以上,在通常的家居织物洗涤剂工作pH值范围8.00~11.00内均能保持较高酶活力。该结果表明,溢倍佳PET-L 001的酶学性质适合洗涤剂的碱性环境。

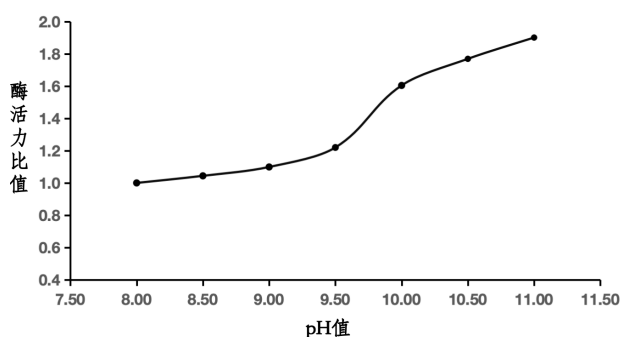


图1 溢倍佳PET-L 001在不同pH条件下酶活力比值

2.2 温度对酶活力测定的影响

在pH值为9.50的条件下,检测30℃、40℃、50℃和60℃的酶活力并与30℃的酶活力计算比值,如图2所示。结果表明,溢倍佳PET-L 001的酶活力随温度升高而增加,适合常温和加热洗涤条件。

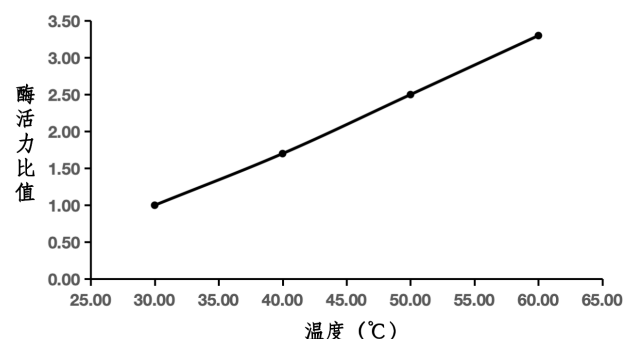


图2 溢倍佳PET-L 001在不同温度条件下酶活力比值

2.3 PET酶热稳定性

50℃储存0天、7天、14天、21天和28后,检测PET酶的酶活力并与第0天的酶活力计算比值,考察PET酶的原料稳定性。结果如图3所示,其中溢倍佳PET-L 001在50℃恒温放置28天后酶活力与第0天的酶活力比值仍然达到0.95,即酶活力保留率为95%,表明该PET酶具有良好的原料稳定性。

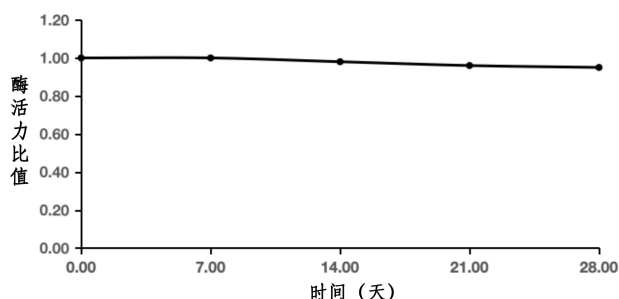


图3 溢倍佳 PET-L 001 在 50℃ 恒温放置 28 天酶活力变化

2.4 PET 酶在洗衣液中稳定性

2.4.1 酶活力变化

溢倍佳 PET-L 001 添加进入四款市售洗衣液中, 37℃ 恒温放置。分别检测 PET 酶第 0 天、7 天、14 天、21 天和 28 天在各个洗衣液中的剩余酶活力, 并计算与第 0 天酶活力的比值, 以评估其在洗衣液中的酶活力稳定性 (图 4)。结果显示, 28 天后酶活力比值分别为 0.88、0.95、1.00、0.90, 即酶活力保留率分别为 88%、95%、100%、90%, 表明该 PET 酶具有优良的洗衣液配方适用性。

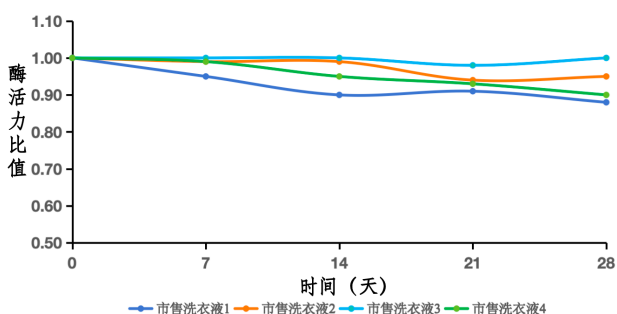


图4 添加 0.2% 溢倍佳 PET-L 001 的洗衣液在 37℃ 恒温放置 28 天酶活力变化

2.4.2 去污力变化

测试各未添加 PET 酶的市售洗衣液以及添加 PET 酶后的 4 种市售洗衣液在 37℃ 恒温放置第 0 天、7 天、14 天、21 天和 28 天对染料聚酯污布去污力 (表 2), 并计算与各未添加 PET 酶的市售洗衣液的去污力比值 (图 5), 结果显示, 添加溢倍佳 PET-L 001 后洗衣液在 37℃ 放置 0~28 天内, 各市售洗衣液对染料聚酯污布的去污能力均有且保持了显著提升, 在 28 天内均未见显著下降, 表明 PET 酶在洗衣液配方中具有良好的性能稳定性。

表 2 添加 0.2% PET 酶的洗衣液在 37℃ 恒温放置后与基液的去污比

时间 / 天	0	7	14	21	28
市售洗衣液 1	1.55	1.49	1.46	1.50	1.41
市售洗衣液 2	1.62	1.59	1.61	1.58	1.57
市售洗衣液 3	1.41	1.40	1.41	1.43	1.40
市售洗衣液 4	1.53	1.50	1.48	1.41	1.37

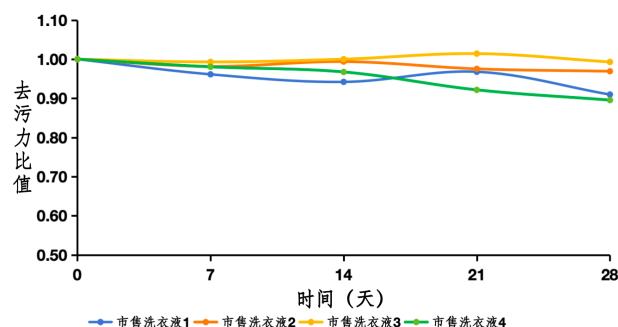
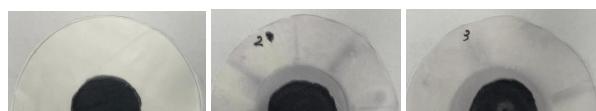


图5 添加 0.2% 溢倍佳 PET-L 001 的洗衣液在 37℃ 恒温放置 28 天去污力变化

2.5 PET 酶对污渍的抗再沉积效果

如图 6 所示, 添加 0.2% 溢倍佳 PET-L 001 的洗衣液洗涤后, 测试布边缘污渍再沉积现象显著优于未添加 PET 酶的清洗后污布。



注: 图左: 清洗前污布; 图中: 不含 PET 酶清洗后污布; 图右: 含 PET 酶清洗后污布。

图 6 添加 PET 酶的清洗效果

3. 结论

本研究系统评价了 PET 酶 (溢倍佳 PET-L 001) 在洗涤剂条件下的性能。结果显示, 该 PET 酶具有高适配性, 在 pH 8.0~11.0 和 30~60 °C 范围内均保持较高活性, 符合家庭洗涤环境。具有优异的稳定性, 在 50 °C 贮存 28 天后酶活保留率达 95%, 在多款市售洗衣液 37 °C 贮存 28 天后仍保持 88%~100% 的酶活。其应用效果显著, 添加 PET 酶的洗衣液在整个贮存周期内去污力稳定, 并有效减少污渍再沉积。

基于以上研究, 未来仍需解决的问题包括: 在含氧化剂、金属离子和柔顺剂等复杂配方中的长期稳定性; 对高结晶度聚酯纤维的作用效率及机理优化; 不同洗涤程序 (低温、快洗、节能模式) 下的应用表现与耐久性验证。

综上, PET 酶在洗涤剂中的应用具有现实可行性和产业化潜力, 但其性能边界和配方兼容性仍需进一步研究。

参考文献

- [1] Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)[J]. Science. 2016,351(6278), 1196-1199.

- [2] Rueda, L., Calvo, M. E., & Sarmiento, C. Application of enzymes in laundry detergents: A review[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2020,40(1), 31–49.
- [3] Cavaco-Paulo, A., & Gübitz, G. M. 2003. Textile processing with enzymes. Woodhead Publishing[D]. Cambridge.
- [4] Cavaco-Paulo, A. Mechanism of cellulase action in textile processes[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1998, 37(3), 273–277.
- [5] Shah, A. K., & Sharma, A. Enzymes in laundry detergents: A review of recent developments[J]. *International Journal of Chemical Studies*, 2020, 8(3), 2712–2718.
- [6] Danso, D., Chow, J., & Streit, W. R. Plastics: Environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2019, 85(19), e01095–19.
- [7] Wei, R., Tiso, T., Bertling, J. et al. Possibilities and limitations of biotechnological plastic degradation and recycling[J]. *Nature Catalysis*, 2020, 3, 867–871.
- [8] Austin, H. P., Allen, M. D., Donohoe, B. S. et al. Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2018, 115(19), E4350–E4357.
- [9] Furukawa, M., Kawakami, N., Oda, K., & Miyamoto, K. Recent advances in the enzymatic degradation of polyethylene terephthalate[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103, 4253–4268.
- [10] Silva, C., Silva, C. J. S. M., et al. Cutinase – a new tool for textile industry[J]. *Biocatalysis and Biotransformation*, 2005, 23(5), 361–367.
- [11] Quartinello, F., Kremser, K., Vecchiato, S. et al. Enzymatic surface modification of PET: Relevance for functionalization and fiber finishing[J]. *Biotechnology Journal*, 2017, 12(1), 1600186.
- [12] Lu, H., Diaz, D. J., Czarnecki, N. J. et al. Machine learning-aided engineering of hydrolases for PET depolymerization[J]. *Nature*, 2022, 604, 662–667.
- [13] Sonnendecker, C., Zhu, L., Straub, L. et al. Low carbon footprint recycling of post-consumer PET plastic with a metagenomic polyester hydrolase[J]. *ChemSusChem*, 2022, 15(7), e202101062.
- [14] Barth, M., Honak, A., Oeser, T. et al. A dual enzyme system composed of a cutinase and an esterase for PET hydrolysis[J]. *Biotechnology Journal*, 2016, 11(8), 1082–1087.
- [15] Cui, Y., Chen, Y., Liu, X. et al. Structural and mechanistic insights into PETase catalysis[J]. *Nature Communications*, 2021, 12, 1716.
- [16] Procter & Gamble. Detergent compositions comprising PETase for improved cleaning and anti-pilling of polyester fabrics: WO2020034567A1[P], 2020.
- [17] Unilever. Use of cutinase in laundry detergent for polyester surface renewal: US20190345678A1[P], 2019.
- [18] Wei, R., & Zimmermann, W. Enzymatic degradation of polyesters: Advances and applications[J]. *Biotechnology Advances*, 2024, 64, 108123.
- [19] Zimmermann, W., & Wei, R. Standardization of enzymatic PET hydrolysis assays and future prospects[J]. *Nature Communications*, 2025, 16, 344.

Study on the Application of PETase in Detergent Formulations

Tan Ya-ting, Sun Fei-ye, Duan Xi-ying, Huang Jia-wei, Wang Jun*
(Guangdong VTR Bio-Tech Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong, 519000)

Abstract : Polyester fibers often suffer from inadequate soil removal, pilling, and graying during household laundering, highlighting the need for targeted enzymatic solutions. In this study, the enzymatic properties of PETase (PET-L 001) under varying pH and temperature conditions were systematically evaluated. The enzyme showed high activity within pH 9.0–11.0 and 30–60 °C, demonstrating compatibility with typical detergent environments. After 28 days of storage at 50 °C, 95% of the initial activity was retained, and 88–100% activity remained after 28 days in several commercial detergent formulations at 37 °C. Application tests further confirmed that PETase supplementation significantly improved stain removal on polyester fabrics and reduced soil redeposition. These findings indicate that PETase holds strong potential for enhancing detergent performance, providing an experimental basis for the development of next-generation functional detergent enzymes.

Keywords : PETase; detergent; enzyme activity; stability; fabric appearance

