

文章编号: 1673-3851 (2014) 02-0127-06

# STF-柔性复合材料的防弹性能研究

孙西超<sup>a</sup>, 李艳清<sup>a,b</sup>, 伍仲<sup>a</sup>, 祝成炎<sup>a,b\*</sup>

(浙江理工大学, a. 材料与纺织学院, b. 现代纺织加工技术国家工程技术研究中心, 杭州 310018)

**摘要:** 为了研究 STF-柔性复合材料的防弹性能和冲击耗能模式,首先使用纯 Kevlar 织物和 STF 的分散体系按照一定的工艺复合制备成 STF-柔性复合材料,然后采用万能材料试验机对其进行拉伸性能测试,并借助气控高速发射装置分别对不同 SiO<sub>2</sub> 固含量以及不同铺层角度的 STF-柔性复合材料进行防弹性能测试,以单位面积吸收的能量来表征其防弹性能。结果表明:万能材料试验机低速作用时,纯 Kevlar 织物和 STF-柔性复合材料断裂强力基本一致,说明 STF 的黏度不会剧烈增加而影响人们的活动;随着 SiO<sub>2</sub> 固含量由 0 增加到 45%,单位面积吸收能量由 78.8 J·m<sup>2</sup>/kg 增加到 87.4 J·m<sup>2</sup>/kg,说明 STF-柔性复合材料的防弹效果变佳;铺层角度对防弹性能的影响由优到劣的顺序为 45°、90°、0°。

**关键词:** 复合材料; 剪切增稠液体; 防弹性能; 耗能模式

**中图分类号:** TB334 **文献标志码:** A

## 0 引言

近年来,随着科技的进步与发展,人们对防弹材料的研究就一直没有停止过,保护从事特殊工作人员的生命安全成为当今社会的一个主题<sup>[1-2]</sup>。防弹材料由金属材料、非金属材料发展到今天的复合材料。美国合成物质研究中心和武器原料研究理事会在 20 世纪 90 年代合作研究 STF,并将其应用于个体防护装甲<sup>[3]</sup>;Wetzel E D 等<sup>[4]</sup>人将剪切增稠液体(STF)与芳纶织物复合,并且用实验证明了 STF 可以提高防弹衣的强度,同时也减轻了质量,织造出柔韧性较好的防护设备;徐素鹏等<sup>[5]</sup>研究了 STF 与超高分子量聚乙烯织物(机织物和无纺织物)复合材料的防弹防刺性能,发现此复合材料能吸收大量的冲击能量而放在最外层。相关研究表明<sup>[6-8]</sup>,STF 处于平衡状态时呈液态,当受到高速突然冲击时,STF 体系的黏度瞬间增大,阻碍子弹的入侵,即将 STF 与 Kevlar 织物复合所形成的 STF-柔性复合材料具有一定的研究价值。

本文利用 JSM-5610LV 扫描电镜观察 SiO<sub>2</sub> 的分布,从而确定了 STF 与芳纶织物的复合工艺<sup>[9-10]</sup>;对比分析了不同 SiO<sub>2</sub> 固含量对 STF-柔性复合材料的拉伸性能的影响;采用气控高速发射装置测试并分析了不同 SiO<sub>2</sub> 固含量和不同铺层角度的 STF-柔性复合材料的防弹性能。

## 1 实验部分

### 1.1 防弹性能表征方法

在侵入过程中,材料的防弹性能受到很多因素的影响,为了更好地分析材料的防弹效果和探索防弹材料的制备工艺,根据文献<sup>[11-12]</sup>可知,材料防弹性能指标的计算公式为:

$$E = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (1)$$

$$I_m = \frac{E}{\rho} \quad (2)$$

$$\rho = N\rho_D \quad (3)$$

式中: $E$ —吸收能量(J);

收稿日期: 2013-09-06

基金项目: 浙江省国际科技合作专项(合作研究)项目(2012C24013)

作者简介: 孙西超(1988—),男,安徽亳州人,硕士研究生。主要研究方向为现代纺织技术及新产品研究。

通信作者: 祝成炎, E-mail: cyzhu@zstu.edu.cn

- $m$ —子弹的质量(kg);  
 $v_1$ —子弹的剩余速度(m/s);  
 $v_2$ —子弹的入射速度(m/s);  
 $I_m$ —单位面积吸收能量( $J \cdot m^2/kg$ );  
 $\rho$ —多层材料的面密度( $kg/m^2$ );  
 $\rho_D$ —单层材料的面密度( $kg/m^2$ );  
 $N$ —材料的层数。

在实验测试条件相同的情况下,当材料被穿透时,材料的  $I_m$  的数值越大,表明材料的防弹性能越好;当材料部分被穿透时,未被穿透的材料防弹性能比被穿透的材料防弹性能好。

### 1.2 STF-柔性复合材料的制备工艺

a) 实验所用 Kevlar 织物裁剪成  $170 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$  的正方形,其织物规格为经纬密  $94 \times 94$  (根/10 cm)、面密度  $207 \text{ g/m}^2$ ,然后将之放置于 LC-213 型鼓风干燥箱中 2 h,其温度设为  $50^\circ\text{C}$ 。

b) 用粒径为 20 nm 的  $\text{SiO}_2$  和分子量为 200 的 PEG 制备 STF,其中 STF 分散体系中  $\text{SiO}_2$  的固含量分别为 35% 和 45%。将上述处理后的 Kevlar 织物浸泡在 STF 和无水乙醇的质量比为 1:1.5 的稀

释液中 5 min,在浸渍的同时,在温度设定为  $25^\circ\text{C}$  的 KQ-250DE 型超声波震荡仪作用 30 min,其功率为 100 W,使得 STF 均匀分散在织物中。

c) 将带有无水乙醇的 STF-柔性复合材料放置于 LC-213 型鼓风干燥箱中作用 13 min,除去无水乙醇。

### 1.3 测试方法

采用 Instron 3367 万能材料试验机,参照国标 GB/T 7689.5—2001 测试 STF-柔性复合材料的拉伸性能;利用气控高速发射装置测试 STF-柔性复合材料的防弹性能;借助 JSM-5610LV 扫描电镜分析 STF-柔性复合材料的破坏模式。

## 2 结果与讨论

### 2.1 STF-柔性复合材料的制备工艺分析

图 1 为纯 Kevlar 织物和 STF 与织物复合后试样的 SEM 图。从图 1 中可以看出,Kevlar 纤维表面上  $\text{SiO}_2$  颗粒呈均匀分布,即 STF 能够均匀地浸渍在织物中,表明 STF-柔性复合材料的制备工艺参数设置合理。

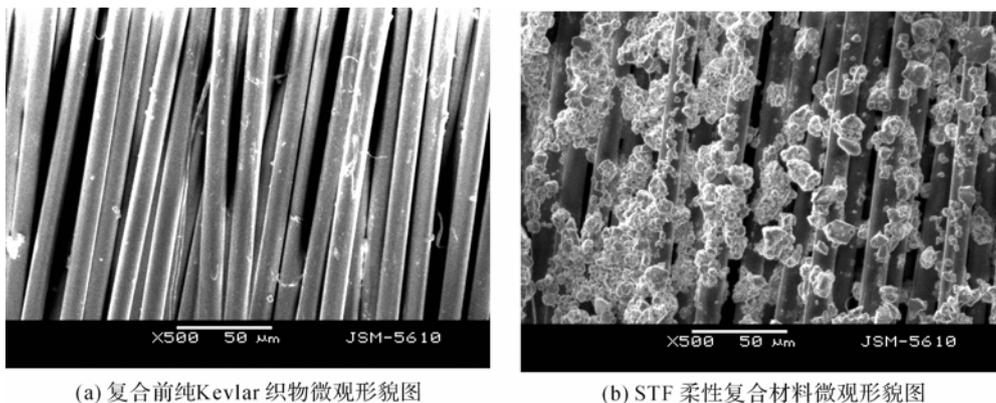


图 1 纯 Kevlar 织物和 STF-柔性复合材料的 SEM 图

### 2.2 STF-柔性复合材料的拉伸性能分析

图 2 为纯 Kevlar 织物、STF-柔性复合材料的经向和纬向的拉伸曲线。从图 2 中可知,纯 Kevlar 织物和 STF-柔性复合材料在拉伸断裂前发生了一定的形变,但并没有屈服点,而其在拉伸断裂时所发生的形变主要是 Kevlar 纤维的弹性形变。主要是因为纱线在被拉伸时纱线中的纤维发生了断裂和相互滑移,而纱线中的纤维由内层到外层的伸长变形依次减小。随着 STF 的浓度增大,层间粘结度逐渐提高,进而改变了 Kevlar 纤维的脆性。

载荷在一定范围内不断增加,脆化的纤维开始大面积的断裂,最终导致 STF-柔性复合材料完全断裂。随着  $\text{SiO}_2$  的质量分数的增加,纯 Kevlar 织物和由  $\text{SiO}_2$  配制不同质量分数的 STF-柔性复合材料的经向和纬向的最大拉伸应力和拉伸应变基本不变。这一结果表明 STF-柔性复合材料在  $50 \text{ mm/min}$  的速度拉伸时,STF 没有剪切增效应,即不能改善织物的拉伸断裂强力和拉伸应变等基本性能,人们自由活动,不会使得 STF 体系的黏度增加。

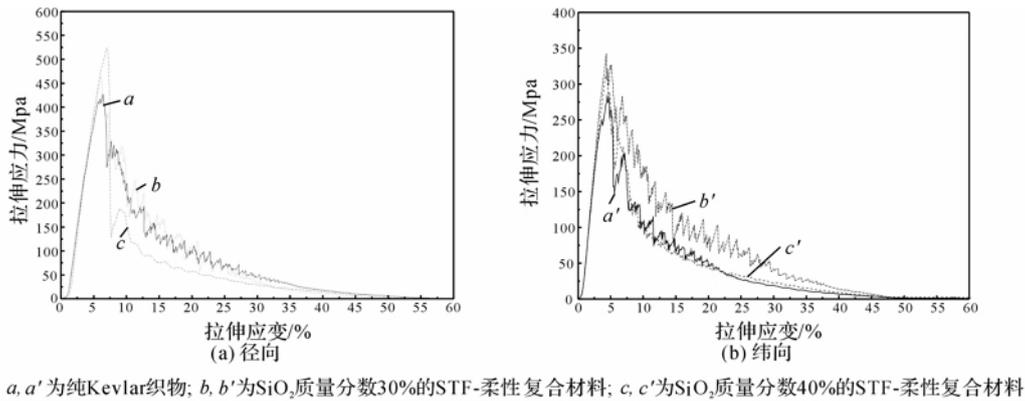


图 2 织物的经向、纬向拉伸性能曲线

2.3 STF-柔性复合材料的防弹性能分析

为了研究铺层角度和 SiO<sub>2</sub> 固含量对 STF-柔性复合材料防弹性能的影响,设计了 3 组实验,每组为 3 个不同 SiO<sub>2</sub> 固含量的试样,STF 是由 20nmSiO<sub>2</sub> 和 PEG200 制备而成。

a) 按照工艺将乙醇完全挥发的单层 STF-柔性复合材料将其经向和纬向有序铺层,即相邻两层材料经向与经向或者纬向与纬向之间铺层成一定的交叉角,设计的铺层角度分别为 0°、45°和 90°,其示意图如图 3 所示。

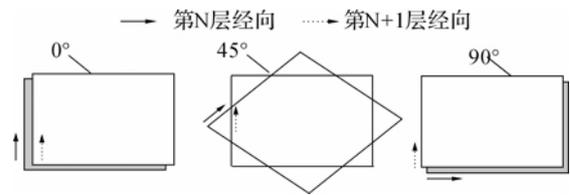


图 3 铺层角度示意

b) 试样层数为 5 层,设置 XLB25-D 平板硫化机压力为 1.25 MPa,工作时间 30 min,温度为 105℃,使 TPU(热塑性氨纶弹性体)树脂融化,其中 TPU 的型号为 WINSMILE,规格为 16 cm×1 cm,置于四周,连接各层。气控高速发射装置的实验测试数据如表 1 所示。

表 1 试样的防高速冲击性能

试样编号	SiO <sub>2</sub> 在 STF 中的固含量/%	铺层角度/(°)	入射速度 v <sub>2</sub> /(m/s)	剩余速度 v <sub>1</sub> /(m/s)	单位面积吸收能量 I <sub>m</sub> /(J·m <sup>2</sup> /kg)
1#	0	0	170.0	10.5	77.9
			190.0	81.0	79.9
		45	191.0	16.5	98.0
			185.0	7.5	92.4
		90	176.0	7.6	83.6
			175.0	2.7	82.8
2#	35	0	152.0	0	—
			181.0	42.1	83.8
		45	189.0	0	—
			195.0	0	—
		45	194.0	10.7	101.5
			198.0	20.4	104.9
		90	180.0	10.5	87.4
			178.0	0	—
		0	181.0	16.6	87.9
			187.0	53.8	86.8
3#	45	45	190.0	0	—
			166.0	0	—
		45	201.0	31.8	106.6
			196.0	0	—
		90	191.0	42.5	93.8
			172.0	0	—

将表1中三组中对应的铺层角度 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 的 $I_m$ 各自取平均值,分析铺层角度对STF-柔性复合材料的防弹性能的影响。

图4中a、b和c分别代表5层铺层角度为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 的防弹材料单位面积的吸收能量直方图。可以看出,在三组试样中,当铺层角度为 $45^\circ$ 时,单位面积吸收能量最多,铺层角度为 $90^\circ$ 比铺层角度为 $0^\circ$ 的材料单位面积吸收的能量多,即材料的防弹性能由强到弱的铺层角度依次是 $45^\circ > 90^\circ > 0^\circ$ ,且在铺层角度相同时,随着STF中 $\text{SiO}_2$ 的固含量的增加,材料在单位面积的吸收能量越多。这是因为子弹与防弹材料作用时,裂纹<sup>[13]</sup>沿厚度方向扩展,剪切和破坏Kevlar纤维使之拉伸变形和断裂,当铺层角度发生变化时,裂纹扩展到与上一层铺层角度不同的层间界面时,使之向薄弱的界面扩展,有效地阻碍了裂纹在厚度方向上的扩展,材料吸收更多的能量;铺层角度为 $45^\circ$ 与铺层角度为 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 相比,更多的Kevlar纤维处于拉伸模式,而复合材料拉伸耗能高于剪切变形耗能,所以当铺层角度为 $45^\circ$ 时,单位面积吸收能量最多;铺层角度为 $90^\circ$ 比铺层角度为 $0^\circ$ 的径向纱线更多的参与吸能。STF-柔性复合材料的主要组成部分是STF和Kevlar织物,其中Kevlar纤维具有拉伸性能优和热稳定性良好的特性,即Kevlar织物在受到子弹的冲击时可以保持其较好的力学稳定性和剪切应力下的高断裂伸长率,大量Kevlar纤维参与吸收能量,使得人体免于伤害。



STF在高速冲击时,STF的黏度增加,即提高了Kevlar纤维之间的摩擦力<sup>[14]</sup>,同时Kevlar纤维从TPU树脂的拔出吸收能量,TPU树脂裂开以及层间分裂吸收能量,有效阻止子弹冲击。

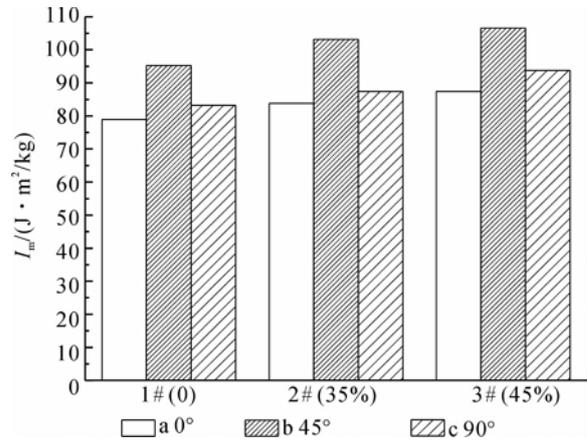
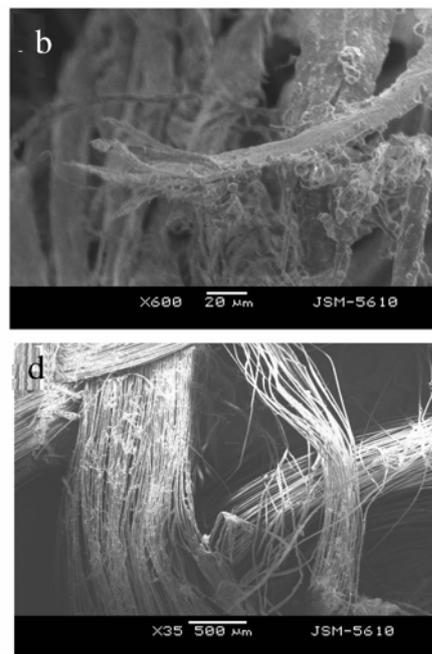


图4 不同铺层角度的单位面积吸收能量

#### 2.4 STF-柔性复合材料的主要耗能模式

图5中,a图和b图为织物的弹孔正面图,c图和d图为织物的弹孔反面图。STF-柔性复合材料吸收子弹的动能的主要方式有:图a中的Kevlar纤维主要发生了断裂和部分变形,而Kevlar纤维在b图中则表现为受到子弹的剪切力作用而断裂,c图和d图主要是Kevlar纤维的变形、抽出和部分断裂,也就是说,STF-柔性复合材料在受到子弹冲击时,前面的Kevlar纤维主要发生了剪切断裂,后面的Kevlar纤维主要发生了变形和抽出。



a、b. 正面图; c、d. 反面图

图5 弹孔处纤维的微观图

### 3 结 论

a) 从 STF-柔性复合材料的合理的制备工艺为: 纯芳纶织物置于温度设为 50℃ 鼓风干燥箱中, 并处理 2 h, 然后将干燥后的纯芳纶织物在无水乙醇与 STF 的质量比为 1.5 : 1 的混合体系中浸泡 5 h, 最后采用鼓风干燥箱将复合材料中的无水乙醇除去。

b) 从 STF-柔性复合材料和纯芳纶织物的拉伸性能曲线图中可以看出, 其拉伸断裂强力基本没有变化, 表明在速度较小的外力牵引下即人们穿着 STF-柔性复合材料时, STF 的黏度不会剧烈增加而影响人们的活动。

c) 随着铺层角度的变化, STF-柔性复合材料的防弹性能由强到弱的铺层角度依次是  $45^\circ > 90^\circ > 0^\circ$ , 且在铺层角度相同时, 随着 STF 中  $\text{SiO}_2$  的固含量的增加, STF-柔性复合材料的防弹性能越好。

d) STF-柔性复合材料消耗冲击动能主要是 STF 体系的黏度增加, 提高 Kevlar 纤维之间的摩擦力, 其耗能形式为 Kevlar 纤维断裂、变形和抽出。

#### 参考文献:

- [1] 陈 薇. 纤维复合材料及其组合靶板的抗破片机理及弹道特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [2] Rudiger H. Ballistic protective fabrics-past and future [C]//Proceedings of the 34th International SAMPE Technical Conference. Baltimore, 2002: 499-505.
- [3] 庞 娟. 纳米药水制造超级防弹衣[J]. 现代物理知识, 2008, 20(1): 51.
- [4] Wetzted E D, Wanger N J. Advanced body armor utilizing shear thickening fluids [C]// 23rd Army Science

- Conference. Orlando: The Assistant Secretary of the Army for Acquisition, Logistics and Technology, 2002.
- [5] 徐素鹏, 郑 伟, 张玉芳. 剪切增稠液体增强织物防刺性能的机理研究[J]. 天津工业大学学报, 2012, 31(3): 15-19.
- [6] 赵晓刚, 冀克俭, 邓卫华, 等. 高性能聚芳醚酮的发展及应用[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(3): 80-83.
- [7] Hoffman R L. Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions II: Theory and experimental tests[J]. Journal of Colloid and Interface Science 1974, 46(3): 491-506.
- [8] Lee Y S, Wagner N J. Dynamic properties of shear thickening colloidal suspensions [J]. Rheologica Acta, 2003, 42(3): 199-208.
- [9] Decker M J, Halbach C J, Nam C H, et al. Wetzeltab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics[J] Composites Science and Technology, 2007, 67: 565-578.
- [10] Hassan A T, Rangari V K, Jeelani S. Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 2892-2899.
- [11] Lee Y S, Wetzzel E D, Wagner N J. The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid [J], Journal of Materials Science, 2003, 38(13): 2825-2833.
- [12] 顾伯洪, 赵冬冬. 叠层织物弹道冲击性能研究[J]. 纺织学报, 2000, 21(4): 212-213.
- [13] 黄 英, 刘晓辉, 李郁忠. Kevlar 织物增强复合材料层合板冲击损伤特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(3): 486-491.
- [14] 蒋玲玲. 剪切增稠液体在柔性防刺材料中的应用研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2011.

## Study on Bulletproof Property of STF-flexible Composite

SUN Xi-chao<sup>a</sup>, LI Yan-qing<sup>a,b</sup>, WU Zhong<sup>a</sup>, ZHU Cheng-yan<sup>a,b\*</sup>

(a. School of Materials and Textiles; b. National Engineering Technology Research Center of Modern Textile Manufacturing Technology; c. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To study the bulletproof property and impact energy consumption mode of STF-flexible composites, pure Kevlar fabric and STF dispersion system are used to prepare the STF-flexible composites according to certain technology firstly. Then, the universal material testing machine is used to test tensile property. With the help of a pneumatic high-speed launchers, the bulletproof property of STF-flexible composites with different  $\text{SiO}_2$  solid content and different layering angles is tested. The bulletproof property is expressed with the energy absorbed pre unit area. The results show that when universal material testing machine was at a low speed, breaking strength of pure Kevlar fabric and STF-flexible composites is

basically consistent. This indicates that the viscosity of STF will not sharply increase or influence people's activities. With the increase in SiO<sub>2</sub> content from 0 to 45%, the absorbed energy per unit area increases to 87.4 J · m<sup>2</sup>/kg from 78.8 J · m<sup>2</sup>/kg. This means the bulletproof property of STF-flexible composites becomes better. The descending order of the influences of the layering angles on bulletproof property is as follows: 45°, 90° and 0°.

**Key words:** composite; shear thickening fluid; ballistic property; energy consumption mode

(责任编辑: 张祖尧)

(上接第 116 页)

## Research of Effects of UV Absorber on Improving Photostability of Amino Acids

XU Cong-gang<sup>a</sup>, WANG Zong-qian<sup>a</sup>, CUI Zhi-hua<sup>a,b</sup>, HE Kai-jun<sup>a</sup>, CHEN Wei-guo<sup>a,b</sup>

(a. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education;

b. Engineering Research Center for Eco-Dyeing & Finishing of Textiles, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The effects of benzotriazole-type UV absorber UV-FAST W on light degradation of amino acid and common dye in the wool are studied through using the mercury lamp to simulate sunlight source. The influences of different pH environments on light degradation of tyrosine and the interactions of different amino acids in the process of light degradation with compound amino acid are discussed. The results show that pH value had a great influence on the light degradation of tyrosine under the condition of the same light source without protection of UV absorber, in which both pH 4 and pH 10 could accelerate the light degradation of tyrosine, while the photo degradation ratio of tyrosine is relatively low at pH 8. Tyrosine photolysis rate can fall from 70.1% to 36.1%; tryptophan photolysis rate can fall from 100% to 88.1%; the photolysis rate of acid dyes can fall from 72.3% to 37.8% under the condition of using benzotriazole-type UV absorber UV-FAST W. Tyrosine can transfer the energy from the photon to tryptophan for promoting its light degradation. Meanwhile, tyrosine and tryptophan can transfer the energy from the photon to histidine, phenylalanine and dye for promoting their light degradation.

**Key words:** benzotriazole type; UV absorber; tyrosine; light degradation; amino acid; wool

(责任编辑: 张祖尧)