

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.10.016

玻璃纤维增强环氧乙烯基酯树脂基 复合材料的热老化性能^{*}

王国建,孙耀宁,蒋万乐,王晓宁
(新疆大学机械工程学院,乌鲁木齐 830047)

摘要:对玻璃纤维增强环氧乙烯基酯树脂基复合材料进行了高温老化试验,分析了随着老化时间的延长,材料的表面形貌、巴氏硬度及力学性能的演变规律,同时采用傅立叶变换红外光谱、X射线光电子能谱和扫描电子显微镜对老化前后复合材料的化学结构、表面元素含量及老化前后材料拉伸断面形貌变化进行了分析。结果表明,随着老化时间的增加,材料表面颜色不断加深,并出现龟裂和翘曲变形以及纤维凸出在表面;巴氏硬度保留率随着老化时间的延长呈现先增大后减小的趋势,在老化28 d时,巴氏硬度保留率下降4.3%;试样的拉伸强度保留率和弯曲强度保留率随着老化时间的延长,呈现先增大后缓慢降低的趋势,在老化28 d时分别下降6.14%和9.23%;试样在老化过程中没有新的物质生成,但其化学元素含量发生了变化,说明了复合材料发生了化学反应,其化学结构发生了变化;试样表面树脂脱落面积和空隙量逐渐增多;经过高温老化后的试样拉伸断裂后,整体断面形貌不规则,并且随着老化时间的增加,树脂含量逐渐减少。

关键词:环氧乙烯基酯树脂;玻璃纤维;复合材料;高温老化;力学性能;硬度

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)10-0087-05

Thermal Aging Properties of GF Reinforced Epoxy Vinyl Ester Resin Matrix Composites

Wang Guojian, Sun Yaoning, Jiang Wanle, Wang Xiaoning
(Department of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Thermal-aging tests were done with glass fiber reinforced epoxy vinyl ester resin matrix composites. Along with aging time, the evolutions of the surface morphology, pasteurian hardness and mechanical properties of the composites. The chemical construction, the content of surface element and the changes of tensile fracture surface morphology were analyzed by FTIR, XPS and SEM. Results show that with the increase of aging time, the surface color of the sample gradually deepen, cracking, warping and deformation of the surface occurs. The retention of barcol rigidity increases first and then decreases with the aging time, and decreases by 4.3% at the age of 28 d. The retention of tensile strength and bending strength of the samples tend to increase first and decrease slowly with the aging time, and decrease by 6.14% and 9.23% at the age of 28 d respectively. No specimens in the aging process, but the chemical element contents of composite have changed, and thus also illustrates the composite has changed chemically and the chemical structure changes. The abscission area of the resin and the emptiness on the sample surface increases gradually from the amount. After thermal aging, the fracture morphology of the samples is irregular, and with the increase of aging time, the content of resin gradually decreases.

Keywords: epoxy vinyl ester resin; glass fiber; composite; high-temperature aging; mechanical property; hardness

玻璃纤维(GF)增强复合材料具有高强度、耐高温以及优异的耐环境稳定性等综合性能^[1],常被用于机械工程、土木工程、风机叶片等领域^[2-8]。GF增强环氧树脂(EP)基复合材料常被用于制作风机叶片,但EP的分子结构中含有活泼的环氧基团,在外界环境的作用下,容易发生化学反应,导致其力学性能下降。风机叶片的工作环境大多是非常恶劣的,不可避免地会受到环境因素(如温度、紫外线、空气

等)的影响,久而久之,其力学性能将会受到破坏,缩短叶片的使用寿命。GF增强EP基复合材料作

^{*} 国家自然科学基金项目(51465055),国家重点实验室开放课题(SKlms2014005),新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2014211A010)

联系人:王国建,硕士研究生,主要研究方向为风机叶片复合材料性能

收稿日期:2017-07-24

为风机叶片的一种,研究其高温老化后的性能对其在工程中应用具有重要意义。

隋晓东等^[9]研究了高温后碳纤维增强双马来酰亚胺树脂基复合材料力学性能的变化。研究表明,在高温 1000 h 后其力学性能逐渐降低,但下降趋势比较缓慢;界面脱粘现象不明显,说明界面粘结性好。A. Lowe^[10]分析了碳纤维增强双马来酰亚胺树脂基复合材料在 200℃和 250℃温度下,纤维与树脂界面的老化结果。结果显示,材料的玻璃化转变温度发生改变;在不同的温度下,界面情况和树脂降解存在差异;随着老化时间的延长,基体分子链发生了断裂,部分振动峰吸收发生了变化。高禹等^[11]研究了高温老化后,碳纤维增强双马来酰亚胺复合材料和树脂性能变化规律。研究表明,经过老化后,树脂和复合材料都发生了热氧老化,但造成热氧老化的原因,复合材料更为复杂;随着高温老化时间的增加,复合材料的力学性能下降变得比较平缓。

风机叶片的工作环境复杂多变,温度对材料的影响不容忽视。笔者以 GF 增强 EP 基复合材料为研究对象,研究其在 120℃高温环境下的表面形貌、结构及力学等性能的变化规律,对其高温老化机理进行了初步探索。

1 实验部分

1.1 主要原材料

GF 预浸带:预浸带由 E 型 GF 2D 编织而成,南京玻璃钢设计院;

环氧乙烯基酯树脂:5500,亚什兰特种化学品有限公司;

过氧化甲乙酮:MEKP-925,亚什兰特种化学品有限公司;

环烷酸钴溶液:环烷酸钴质量分数为 6%,亚什兰特种化学品有限公司;

二甲基苯氨:纯度为 100%,重庆赛普那基科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电子万能试验机:MT5205 型,上海捷沪仪表有限公司;

巴氏硬度计:GYZJ934-1 型,上海京工实业有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):SU-8010 型,日本日立公司;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet 380 型,美国热电尼高力仪器公司;

高温老化试验箱:XMA-600 型,余姚市亚泰仪表有限公司;

X 射线光电子能谱(XPS)仪:ESCALAB 250Xi 型,美国赛默飞世尔科技公司。

1.3 复合材料的制备

采用真空袋压成型工艺,纤维体积分数为 60%。复合材料制备工艺步骤为:(1)检查模具的密封性;(2)依次铺放预浸纤维布、脱模纸、真空袋膜,通入树脂导流管,密封抽真空;(3)按照促进剂环烷酸钴溶液:二甲基苯氨=40:1 配比(质量比),确保搅拌均匀,配置并静置 20 min;称取需要的环氧乙烯基酯树脂,然后以质量分数 2%的比例添加上述配比溶液并搅拌均匀;再加入质量分数为 2.5%的固化剂过氧化甲乙酮,搅拌 5 min,然后静置 20 min;(4)注树脂溶液时,使负压压力达到 -0.08 MPa 并保持稳定,常温固化 48 h;(5)后固化阶段,60℃固化 12 h。采用铺层参数为 $[(0,90)/(\pm 45)]_3$,铺层厚度为 5 mm。

1.4 性能测试与表征

热老化测试:按照 ASTM D3045-1992,将试样放置于高温老化试验箱内,在 120℃高温环境下分别老化 0,7,14,21,28 d 后取出,自然冷却至室温后用塑料薄膜缠绕以避免空气对其造成影响,以便进行表面形貌观察以及元素成分分析。

巴氏硬度按照 GB/T 3854-2005 测试。

拉伸强度按照 GB/T 1040.5-2008 测试,拉伸速率均为 2 mm/min。

弯曲强度按照 GB/T 1449-2005 测试,弯曲速率均为 2 mm/min。

XPS 测试:X 射线源为单色器 Al K_{α} (光子能量 1486.6 eV)。

FTIR 测试:扫描范围为 500~4000 cm^{-1} ,采用 KBr 压片法,将相应的复合材料磨成粉与 KBr 按 1:100 质量比混匀,压片后测试。

SEM 分析:采用 SEM 观察老化前后复合材料的拉伸断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌分析

试样在 120℃高温环境下分别老化 0,7,14,21,28 d 后,其表面的颜色变化如图 1 所示。

从图 1 可看出,经过 120℃高温老化前后,试样表面颜色发生了比较明显的变化。随着老化时间的增加,颜色不断加深,试样表面出现龟裂和翘曲变形

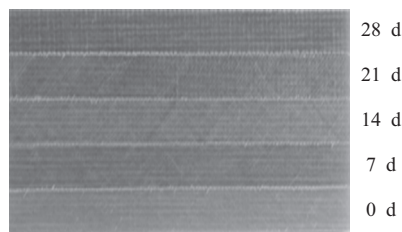


图1 在120℃高温老化不同时间后试样表面的颜色变化

以及GF凸出在表面。这是由于树脂与空气中的氧气发生了热氧老化^[12-15],产生了新的发色基团,造成试样表面颜色逐渐变黄,并随着老化时间的增加,颜色逐渐加深。由于GF性能稳定,基本不受实验温度的影响,GF和树脂的热膨胀系数不同,所以主要是树脂在热氧的作用下产生收缩、降解,造成GF与基体发生脱粘,出现细微龟裂,对试样表面形态影响较为严重。

2.2 巴氏硬度

GF增强环氧乙烯基酯树脂基复合材料试样在120℃高温老化不同时间后巴氏硬度保留率的变化曲线如图2所示。

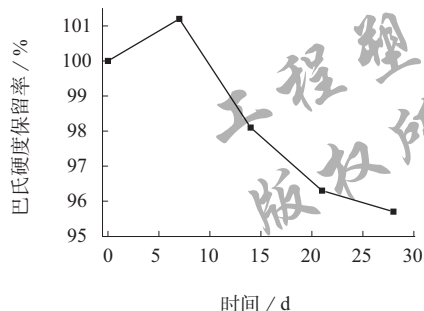


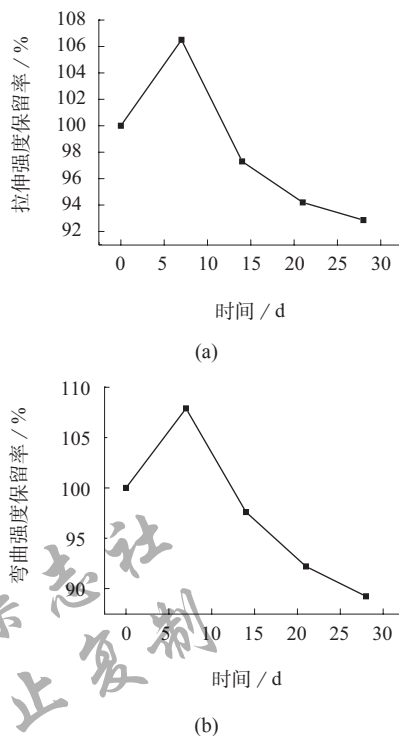
图2 120℃高温老化不同时间后试样的巴氏硬度保留率变化曲线

由图2可看出,在老化初期,当老化时间为7 d时,GF增强环氧乙烯基酯树脂基复合材料试样的巴氏硬度保留率上升1.14%(未老化时复合材料的巴氏硬度为54.33,老化7 d时的巴氏硬度为54.95);随着老化时间的增加,巴氏硬度保留率逐渐下降,老化28 d时,巴氏硬度为52.00,下降了4.3%。出现这种现象的主要原因是由于在老化初期,树脂基体中未完全固化的不饱和双键与空气中的氧气发生后固化反应,使树脂的交联程度增加,引起硬度稍微增大;随着老化时间的延长,试件表面树脂分子发生氧化反应,树脂发生老化降解,同时高温也会造成树脂发生物理软化,导致巴氏硬度的下降。

2.3 力学性能

GF增强环氧乙烯基酯树脂基复合材料试样在

120℃高温老化不同时间后拉伸强度保留率、弯曲强度保留率的变化曲线如图3所示。



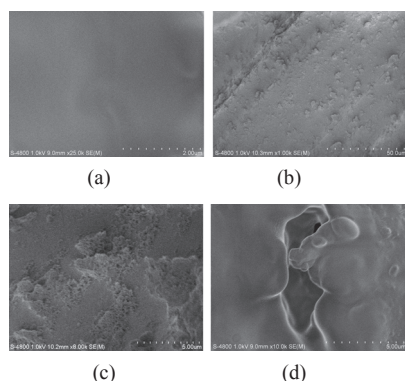
a—拉伸强度保留率;b—弯曲强度保留率

图3 120℃高温老化不同时间后试样的拉伸强度保留率、弯曲强度保留率变化曲线。

由图3可以看出,GF增强环氧乙烯基酯树脂基复合材料试样的拉伸强度保留率、弯曲强度保留率随着老化时间的延长呈现出先增大后缓慢降低的趋势。老化时间越长,拉伸强度保留率、弯曲强度保留率下降得越大,但下降逐渐趋于缓慢。在老化7 d时,复合材料试样的拉伸强度保留率、弯曲强度保留率分别提高了6.58%和7.90%(未老化时复合材料试样的拉伸强度、弯曲强度分别为664.3 MPa和342.4 MPa;老化7 d后分别为708.0 MPa和369.4 MPa);当老化时间为28 d时,复合材料试样的拉伸强度保留率、弯曲强度保留率分别下降了6.14%和9.23%(老化时间为28 d时复合材料试样的拉伸强度、弯曲强度分别为623.5 MPa和310.8 MPa)。在高温老化初期,复合材料中的树脂产生后固化效应,树脂中大分子链延长,固化度增加,强度增加;随着老化时间增加,树脂发生热氧反应起主导作用,使复合材料内部缺陷累计增加,纤维与基体之间的粘结性下降,导致基体传递强度的能力下降,纤维承载能力也随之下降,最终导致其拉伸强度和弯曲强度下降。

2.4 SEM 分析

在 120℃ 高温老化不同时间后试样表面的 SEM 照片如图 4 所示。



老化时间: a—0 h; b—7 h; c—14 h; d—28 h

图 4 在 120℃ 高温老化不同时间后试样表面的 SEM 照片

从图 4 可看出,未老化的复合材料试样表面光滑平坦;在老化初期,试样表面树脂开始降解,出现很多的凹坑(见图 4b),且随着时间的增加,树脂降解面积越来越大,凹坑深度逐渐增加,且出现了细小孔洞(见图 4c)。这是由于试样发生了热氧老化导致树脂降解,从而形成凹坑和细小空洞。当老化时间达到 28 d 时,试样表面呈现出片状的海菊花样,波峰和波谷相差较大,且出现了较多较深的空隙(见图 4d)。由此可以看出,随着老化时间的增加,试样表面树脂降解越来越严重,空隙越来越多,空隙的增加可使更多的氧气进入,进一步加剧了热氧化,从而形成一个恶性循环。

2.5 FTIR 分析

GF 增强环氧乙烯基酯树脂基复合材料试样在 120℃ 高温下老化不同时间后的 FTIR 谱图如图 5 所示。

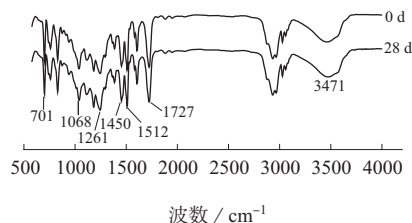


图 5 在 120℃ 高温老化不同时间后试样的 FTIR 谱图

从图 5 可以看出,在高温老化的过程中没有新的吸收峰出现,也没有旧的吸收峰消失。但是从整体上看,吸收峰的面积发生了变化。与未老化试样相比,老化 28 d 的试样在 3471 cm^{-1} 处的羟基 O—H 的吸收峰、1727 cm^{-1} 处的羧基 C=O 的吸收峰、1512 cm^{-1} 处的 $-\text{CH}_2-$ 上连接的苯环上的 C=C

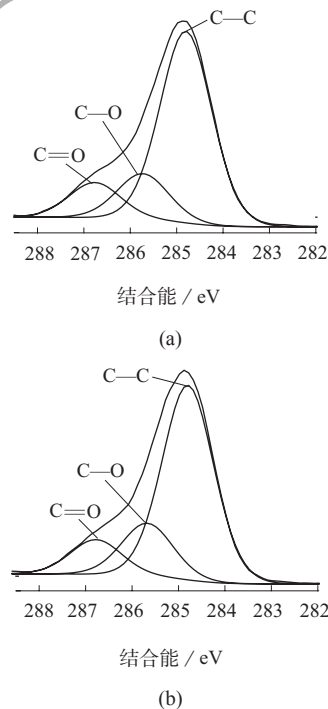
吸收峰、1450 cm^{-1} 处的 C—H 键的弯曲振动峰、1261 cm^{-1} 处的 O—H 的弯曲振动峰、1068 cm^{-1} 处的 C—O 伸缩振动峰、701 cm^{-1} 处的顺式烯烃的 C—H 键的面外弯曲振动吸收峰都增大,特别是在 1727, 1512, 1540 cm^{-1} 和 701 cm^{-1} 吸收峰增强更明显,说明高温老化 28 d 后,生成了更多的其它基团,发生了热氧化反应,同时也说明了树脂中存在化学键断裂的现象,紫外线照射使试样的化学结构发生了改变。

2.6 XPS 分析

GF 增强环氧乙烯基酯树脂基复合材料试样表面在老化前后经 XPS 分析得到的 C, O, N 三种元素的含量列于表 1。试样在 120℃ 高温老化前及老化 28 d 后其表面的通过 C_{1s} 分峰拟合得到的谱图如图 6 所示。

表 1 120℃ 高温下老化不同时间的复合材料试样的 XPS 测试结果

老化时间 / d	原子含量 / %			C/O
	C_{1s}	O_{1s}	N_{1s}	
0	82.9	15.54	1.56	5.33
28	79.47	19.32	1.21	4.11



老化时间: a—0 h; b—28 h

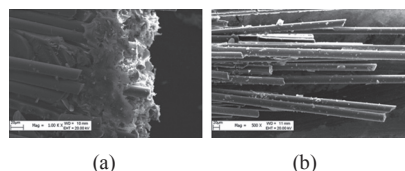
图 6 在 120℃ 高温老化不同时间后试样的 C_{1s} 谱图

由表 1 可知,经过 28 d 的高温老化后,试样表面的 C_{1s} 和 N_{1s} 含量减小,而 O_{1s} 的含量增加,由此可以说明试样表面发生了氧化反应,而 N_{1s} 元素含量的变化可能与复合材料中的添加剂等在高温老化下发生的复杂变化有关。

从图 6 可看出,在 284.78 eV 处的峰为 C—C 基团,在 285.78 eV 处的峰为 C—O 基团,在 286.78 eV 处的峰为 C=O 基团。实验发现,在试样高温老化后, C—O 和 C=O 的峰值有所提高,这与 O_{1s} 元素总含量增加吻合。这是由于高温使复合材料试样表面树脂中的 C—C 键被氧化,从而导致 C—O 和 C=O 键增多,由此也说明复合材料表面发生了热氧化作用和交联反应。

2.7 SEM 分析

GF 增强环氧乙烯基酯树脂基复合材料试样拉伸断口形貌如图 7 所示。



a—未老化拉伸断面形貌; b—120℃高温老化 28 d 时拉伸断面形貌

图 7 高温老化前后试样拉伸断面形貌的 SEM 照片

由图 7 可知,高温老化 28 d 后,树脂基体严重开裂,纤维和树脂界面发生脱粘;未老化试样断面富集着大量的树脂,且断面较为平齐,老化 28 d 后,树脂基体明显减少,且断面参差不齐。产生这种现象主要原因是试样在高温作用下,发生热氧老化,热氧老化会使树脂发生降解,产生微裂纹,随着老化时间增加,裂纹会逐渐向试样内部扩展,当裂纹扩展到纤维与树脂界面处,会造成基体与纤维发生脱粘。此外,由于纤维与基体的热膨胀系数不同,复合材料内部产生热应力和热应变,从而导致树脂和纤维脱粘越来越严重。

3 结论

(1) 复合材料试样在 120℃ 下老化不同时间后,试样表面颜色随着老化时间的增加不断加深,表面出现龟裂和翘曲变形,树脂收缩导致 GF 逐渐显露在试样表面;随着老化时间的增加,复合材料发生复杂的热氧反应,导致其树脂降解面积和空隙量逐渐增加。

(2) 在 120℃ 下经过 28 d 的高温老化后,试样的巴氏硬度最终下降 4.3%;而在高温老化 7 d 时试样的巴氏硬度反而增加 1.14%,之后试样的巴氏硬度逐渐下降。

(3) 试样的拉伸强度保留率和弯曲强度保留率随着老化时间的增加先增大后减小;在 120℃ 下老化 7 d 时,试样的拉伸强度保留率和弯曲强度保留率分别增加 6.58% 和 7.90%;在 120℃ 下老化 28 d

时,试样的拉伸强度保留率和弯曲强度保留率分别下降了 6.14% 和 9.23%。

(4) 复合材料高温老化后,树脂吸收峰位不变,峰的强度发生了变化,说明树脂中存在化学键断裂的现象,高温老化使试样的化学结构发生了改变;在 120℃ 下经过 28 d 的老化,复合材料表面发生了氧化反应,表面粗糙度变大,表明高温时复合材料表面性能发生了一些变化,这可能影响到材料的使用性能;由拉伸断口形貌照片可知,热氧老化促进了树脂的降解,而对 GF 的结构没有影响。

参考文献

- [1] 王耀先. 复合材料力学与结构设计 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2012: 167-170.
Wang Yaoxian. Mechanics and structural design of composite materials [M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2012: 167-170.
- [2] 咸贵军, 李惠. FRP 复合材料土木工程应用与耐久性 [J]. 材料工程, 2010(S1): 121-127.
Xian Guijun, Li Hui. Applications and durability of FRP composites in civil engineering [J]. Journal of Materials Engineering, 2010(S1): 121-127.
- [3] 张琦, 黄故. 紫外线对不饱和聚酯树脂 / 玻璃纤维层合板性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2007, 35(4): 58-61.
Zhang Qi, Huang Gu. UV effect on the proportions of glass fiber reinforced up lam inated composites [J]. Engineering Plastics Application, 2007, 35(4): 58-61.
- [4] 沈军, 谢怀勤. 先进复合材料在航空航天领域的研发与应用 [J]. 材料科学与工艺, 2008(5): 737-740.
Shen Jun, Xie Huaiqin. Development and application of advanced composite materials in the aerospace [J]. Materials Science and Technology, 2008(5): 737-740.
- [5] Sereira Z, Adda-Bedia E A, Tounsi A. Effect of temperature on the hygrothermal behaviour of unidirectional laminated plates with asymmetrical environmental conditions [J]. Compos Struct, 2006, 72: 383-392.
- [6] 周吓星, 陈礼辉, 林巧佳. 滑石粉增韧聚丙烯 / 竹粉发泡复合材料的研究 [J]. 塑料工业, 2013(1): 33-36.
Zhou Xiaxing, Chen Lihui, Lin Qiaojia. Study on toughening of PP / bamboo flour foamed composite with tale [J]. China Plastics Industry, 2013(1): 33-36.
- [7] Kaewtatip K, Thongmee J. Studies on the structure and properties of thermoplastic starch / luffa fiber composites [J]. Materials & Design, 2012, 40: 314-318.
- [8] Wu Dongliang, Chang P R, Ma Xiaofei. Preparation and properties of layered double hydroxide-carboxymethyl cellulose sodium / glyc

- 进展[J]. 化学研究与应用, 2010, 22(1):1-7.
- Lai Chengyue, Zheng Kuan, He Liping, et al. Progress in analysis of the biodegradability for polymer materials[J]. Chem Res Appl, 2010, 22(1):1-7.
- [3] Baleen A, Planchot V, Ball S, et al. Starch granules: structure and biosynthesis[J]. Int J Biol Macromol, 1998, 23:85-112.
- [4] Morell M K, Myers A M. Towards the rational design of cereal starches[J]. Curr Opin Plant Biol, 2005, 8(2):204-210.
- [5] Preechawong D, Peesan M, Rujiravanit R, et al. Preparation and Properties of Starch/Poly(vinyl alcohol) Composite Foams[J]. Macromol Symp, 2006, 216:217-227.
- [6] 闫冰, 曹德榕, 欧义芳. 天然纤维复合聚乙烯醇缩甲醛可降解泡沫材料制备[J]. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(4):295-299.
- Yan Bing, Cao Derong, Ou Yifang. Preparation and properties of the degradable cellular foam with natural fiber and polyvinyl formal[J]. Polym Mater Sci Eng, 2005, 21(4):295-299.
- [7] 周向阳, 贾德民, 崔跃飞, 等. PVA/接枝改性淀粉热塑性生物降解材料的制备及应用[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(6):53-56.
- Zhou Xiangyang, Jia Demin, Cui Yuefei, et al. Preparation and application of PVA/grafted starch biodegradable thermoplastic[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(6):53-56.
- [8] 苏琼, 王彦斌, 王齐乾, 等. 复合改性淀粉发泡材料的制备及阻燃性能研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(8):96-98.
- Su Qiong, Wang Yanbin, Wang Jiqian, et al. Study on preparation and fire retardant property of composite modified starch foam material[J]. New Chem Mater, 2016, 44(8):96-98.
- [9] Cha J Y, Chung D S, Seib P A, et al. Physical properties of starch-based foams as affected by extrusion temperature and moisture content[J]. Ind Crops Prods, 2001, 14(1):23-30.
- [10] Miladinov V D, Hanna M A. Temperatures and ethanol effects on the properties of extruded modified starch[J]. Ind Crops Prods, 2001, 13(1):21-28.
- [11] Ansari F, Salajková M, Qi Z, et al. Strong surface treatment effects on reinforcement efficiency in biocomposites based on cellulose nanocrystals in poly(vinyl acetate) matrix[J]. Biomacromolecules, 2015, 16(12):3 916-3 924.
- [12] Gómez C, Torres F G, Nakamatsu J, et al. Thermal and structural analysis of natural fiber reinforced starch-based biocomposites[J]. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 2006, 55(11):893-907.
- [13] Siddaramaiah, Raj B, Somashekar R. Structure property relation in polyvinyl alcohol/starch composites[J]. J Appl Polym Sci, 2004, 91(1):630-635.
- [14] 李及珠, 谢太和, 蔡奕辉. 可降解植物纤维增强淀粉塑料发泡餐具的研制[J]. 塑料工业, 2002, 30(5):45-46.
- Li Jizhu, Xie Taihe, Cai Yihui. Development of degradable cellulose reinforced starch foamed plastics dishware[J]. China Plast Ind, 2002, 30(5):45-46.
- [15] 曾广胜, 孙刚. 化学助剂对淀粉/EVA复合发泡材料力学性能的影响[J]. 材料保护, 2014, 47:102-104.
- Zeng Guangsheng, Sun Gang. The impact of chemical additives on the mechanical properties of the starch/EVA Foam composite materials[J]. Mater Protec, 2014, 47:102-104.
- [16] 曾广胜, 张礼, 黄鹤. 淀粉/PVA复合材料挤出发泡片材的制备及性能[J]. 塑料, 2016, 45(2):37-39, 43.
- Zeng Guangsheng, Zhang Li, Huang He. Preparation and properties on extrusion foamed sheet of starch/PVA composite[J]. Plastics, 2016, 45(2):37-39, 43.
- (上接第 91 页)
- erol plasticized starch nanocomposites[J]. Carbohydr Polym, 2011, 86:877-882.
- [9] 隋晓东, 梁成利, 刘文博, 等. 高温老化对碳纤维增强双马来酐亚胺树脂基复合材料力学性能的影响研究[J]. 纤维复合材料, 2011(1):21-23.
- Sui Xiaodong, Liang Chengli, Liu Wenbo, et al. Effect of thermal-aging on the mechanical properties of carbon fiber reinforced bismaleimide composite material[J]. Fiber Composites, 2011(1):21-23.
- [10] Lowe A, Fox B, Otieno-Alego V. Interfacial ageing of high temperature carbon/bismaleimide composites[J]. Composites Part A: applied science and manufacturing, 2002(33):1 289-1 292.
- [11] 高禹, 刘佳琦, 王绍权, 等. 高温老化对 T700/HT280 双马来酐亚胺复合材料疲劳性能的影响[J]. 复合材料学报, 2017(2):240-246.
- Gao Yu, Liu Jiaqi, Wang Shaoquan, et al. Effect of high temperature aging on the fatigue property of the T700/bismaleimide composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017(2):240-246.
- [12] 慈书亭, 郭建兵, 魏涛, 等. 红磷阻燃 LGFPP 复合材料的热氧老化性能研究[J]. 塑料科技, 2014, 42(10):55-59.
- Ci Shuting, Guo Jianbing, Wei Tao, et al. Study on thermo-oxidative aging properties of LGFPP/RP flame retardant system[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(10):55-59.
- [13] 赵鹏. 纤维增强树脂基复合材料湿热老化性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009:21-23.
- Zhao Peng. Research on hygrothermal aging properties of fiber reinforced resin matrix composites[J]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009:21-23.
- [14] 沈叶龙, 孟成铭, 孙凯. 无卤阻燃增强聚丙烯的制备[J]. 塑料工业, 2014, 42(6):42-45.
- Shen Yelong, Meng Chengming, Sun Kai. Preparation of halogen-free flame retardant reinforced polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(6):42-45.
- [15] Bowles K J, Jayne D, Leonhardt T A. Isothermal aging effects on PMR-15 resin[J]. Sampe Quarterly, 1993, 24(2):2-9.