

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.12.009

玻璃纤维增强尼龙6 振动摩擦焊接强度的影响因素

周华龙,张永,王丰,易新,郑一泉,丁超

(上海金发科技发展有限公司,上海 201714)

摘要: 研究了玻璃纤维含量、苯胺黑色母含量、树脂相对黏度、焊接工艺(深度、振幅、压力)等因素对玻璃纤维增强尼龙6 (PA6) 焊接强度的影响。结果表明,玻璃纤维含量为30%的玻璃纤维增强PA6具有最大的焊接强度,为58.0 MPa;通过差示扫描量热分析发现,加入3%的苯胺黑色母能使玻璃纤维增强PA6的结晶温度从191.8℃降至173.7℃,但对焊接强度影响较小;随着树脂相对黏度从2.0提高到3.4,玻璃纤维增强PA6的结晶度从27.1%下降至16.2%,焊接强度略有提升;焊接工艺参数对玻璃纤维增强PA6的焊接强度影响较大的是振幅与焊接压力,振幅为0.4 mm时,焊接不充分,焊接强度仅为38.8 MPa,振幅为0.7 mm时,能充分焊接,焊接强度增至55.5 MPa,随着焊接压力从3.5 MPa提升到9.0 MPa,焊接强度从56.3 MPa下降至43.3 MPa。

关键词: 尼龙6; 焊接强度; 玻璃纤维; 苯胺黑色母; 黏度; 焊接工艺

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)12-0048-05

Influence Factors of Vibration Friction Welding Strength of Glass Fiber Reinforced PA6

Zhou Hualong, Zhang Yong, Wang Feng, Yi Xin, Zheng Yiquan, Ding Chao

(Shanghai Kingfa Science and Technology Development Co., Ltd., Shanghai 201714, China)

Abstract: The influence of glass fiber content, nigrosine content, resin relative viscosity and welding process, such as depth, amplitude, pressure, etc. on vibration friction welding strength of glass fiber reinforced nylon 6 (PA6) were studied. The results show that a maximum welding strength of 58.0 MPa when the glass fiber content is 30%. Adding 3% nigrosine reduces the crystallization temperature of glass fiber reinforced PA6 significantly, from 191.8℃ to 173.7℃, but it has little influence on the welding strength. With the increase of the viscosity of PA6 from 2.0 to 3.4, the crystallinity decreases from 27.1% to 16.2% while the weld strength increases slightly. The amplitude and welding pressure have notable impact on the welding strength. The welding strength is only 38.8 MPa while the amplitude is 0.4 mm, then welding strength increases to 55.5 MPa when the amplitude is 0.7 mm. As the welding pressure increases from 3.5 MPa to 9.0 MPa, the welding strength decreases from 56.3 MPa to 43.3 MPa.

Keywords: nylon 6; welding strength; glass fiber; nigrosine; viscosity; welding process

尼龙6 (PA6) 是一种半结晶性高分子材料,因其具有力学强度高、耐磨性好、自润滑优良、耐油性和化学稳定性好、电气性能良好、易于成型加工等优良的综合性能,被广泛应用于电子电气、汽车、机械等领域^[1]。由于加工工艺、注塑等方面的原因,很多结构相对复杂的PA6产品不能一次加工成型,常常需要通过焊接的方法把多个零部件连接到一起,形成一个完整的产品。塑料焊接是常用的永久性连接塑料零部件的方法之一^[2]。

目前使用较多的焊接方法有热板焊接、激光焊接、超声波焊接、振动摩擦焊接、旋转摩擦焊接、感应焊接和电阻植入焊接等。振动摩擦焊接是一种线性摩擦焊,该技术自20世纪70年代诞生以来,以其焊接强度高、节约成本等优良特性得到了人们的认可,

目前已成为许多领域塑料制品的首选焊接工艺,例如汽车领域的发动机进气歧管、电控装置及中控台等。振动摩擦焊接不是依赖被焊件本身传递能量达到焊接效果,而是通过高频振动使焊件相互摩擦产生热量而充分熔融,摩擦停止后进入保压状态,焊缝冷却固化,从而达到永久性连接^[3]。

关于PA的振动摩擦焊接,已有较多文献研究了焊接工艺对焊接强度的影响^[4],而关于材料配方对焊接强度的影响研究较少。M. R. Kamal等^[5]研究了不同工艺对纯PA6与30%玻璃纤维增强PA6焊接强度的影响,发现玻璃纤维30%玻璃纤维增强

联系人:周华龙,硕士,初级工程师,主要从事尼龙复合材料的功能化研究与应用

收稿日期:2016-09-26

PA6 的焊接强度不如纯 PA6, A. Weglowska^[6] 认为, 焊接压力和振幅提高时, PA66 的焊接区域由无定形结构向晶态结构转变, 另外, 发现纯 PA66 与 30% 玻璃纤维增强 PA66 焊接接头形成原理不同^[7]。

笔者从材料配方的角度, 采用振动摩擦焊接的方法, 研究了玻璃纤维含量、黑色母含量、树脂黏度等因素对 PA6 焊接强度的影响, 并同时探讨了不同的焊接工艺, 如深度、振幅、压力等对焊接强度与焊接时间的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA6 : M2000, 相对黏度为 2.0, 广东新会美达锦纶股份有限公司;

PA6 : 牌号分别为 VOLGAMID25, VOLGAMID27, VOLGAMID F34, 相对黏度分别为 2.5, 2.7, 3.4, 上海古比雪夫氮贸易有限公司;

玻璃纤维: ECS11-4.5-560A, 中国巨石股份有限公司;

苯胺黑色母: 1[#], 高莱塑料(苏州)有限公司;

抗氧剂 A、抗氧剂 B、润滑剂 A : 上海金发科技发展有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机: NE27E/40-1500 型, 四川中装科技有限公司;

万能材料试验机: Z010 型, 德国 Zwick/Roell 集团;

二次元影像测量仪: YVM-3020CSPC 型, 上海界限实业有限公司;

振动摩擦机: VW6GV 型, 必能信超声(上海)有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: 200F3 型, 德国耐驰仪器制造有限公司。

1.3 试样制备

PA6 在使用前于 120℃ 烘干 5 h 以上, 保证充分干燥。将 PA6、玻璃纤维、苯胺黑色母与助剂按一定的配比在双螺杆挤出机上共混、挤出造粒, 得到塑胶粒子。机筒温度设定为 180, 240, 250, 240, 240, 230, 220, 230℃, 机头温度为 230℃, 螺杆转速为 350 r/min。

塑胶粒子经过注塑机注塑成 ISO 标准拉伸样条, 摩擦焊接样条注塑成如图 1 所示的形状, 上方为焊接前的样条, 下方为焊接后的样条, 焊接面尺寸为 15 mm × 6 mm。注塑温度为 260, 255, 250℃, 冷却

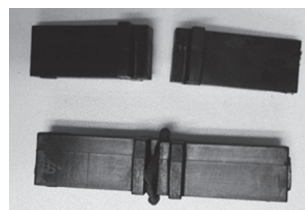


图 1 振动摩擦焊接样条

时间为 8 s。

1.4 振动摩擦焊接

将两个待焊的焊接样条件分别装在振动焊接设备的上、下工作台上, 调整频率为 240 Hz, 设定好焊接深度(0~3 mm)、振幅(0~1.8 mm)、压力(3~9 MPa)等参数后, 开始进行焊接, 上工作台的焊接样条随着振动头设置的参数相对于下工作台的焊接样条做往返移动。由于两焊接样条在其接触面上相对移动产生了摩擦热, 样条表面开始熔化, 当焊接达到了设定的深度值后, 振动摩擦自动停止。两焊接样条接合面在焊接设备作用下自动对齐, 保压一定时间后形成牢固的焊接接头。

1.5 性能测试

拉伸强度按 ISO 527-2-2012 进行测试, 拉伸速率为 10 mm/min。

焊接强度测试: 用测试拉伸强度的方法对图 1 所示的焊接样条进行测试, 拉伸速率为 10 mm/min。

DSC 测试: 在氮气气氛中, 将 5 mg 左右的样品以 10℃/min 的升温速率从 30℃ 升至 250℃, 恒温 2 min 消除热历史后, 以 10℃/min 的降温速率降至 30℃, 再以 10℃/min 升温至 250℃, 氮气流量为 20 mL/min。

2 结果与讨论

2.1 玻璃纤维含量对焊接强度的影响

为了考察玻璃纤维含量对玻璃纤维增强 PA6 焊接强度的影响, 设计了如表 1 所示的配方。焊接工艺设置为: 焊接深度 1.2 mm, 振幅 0.85 mm, 焊接压力 3.5 MPa。玻璃纤维增强 PA6 的拉伸强度与焊接强度结果见表 1。

由表 1 可以看出, 随着玻璃纤维含量由 0% 提高到 50%, 玻璃纤维增强 PA6 的拉伸强度从 70.9 MPa 增大到 235 MPa, 焊接强度先增大后减小, 由 24.7 MPa 增长到最大值 58.0 MPa, 再降至 49.1 MPa, 当玻璃纤维含量为 30% 时, 焊接强度具有最大值, 为 58.0 MPa。玻璃纤维在 PA6 基体中具有增强作用, 同样能够起到增加焊接强度的作用,

表1 不同玻璃纤维含量增强 PA6 的配方与性能

项目	编号					
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
PA6 (VOLGAMID25) 含量 / %	97.8	87.8	77.8	67.8	57.8	47.8
玻璃纤维含量 / %	0	10	20	30	40	50
苯胺黑色母含量 / %	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
抗氧剂 A 含量 / %	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
抗氧剂 B 含量 / %	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
润滑剂 A 含量 / %	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
拉伸强度 / MPa	70.9	108	160	202	218	235
焊接强度 / MPa	24.7	34.6	46.7	58.0	57.2	49.1

与 M. R. Kamal 等^[5]的研究结果不同,可能是由于两者的焊接样条注塑方式不同,导致玻璃纤维的取向不同,从而对焊接强度造成不同的影响。

玻璃纤维增强 PA6 的焊接样条拉伸后的断面二次元影像图如图 2 所示,放大倍数为 152 倍。

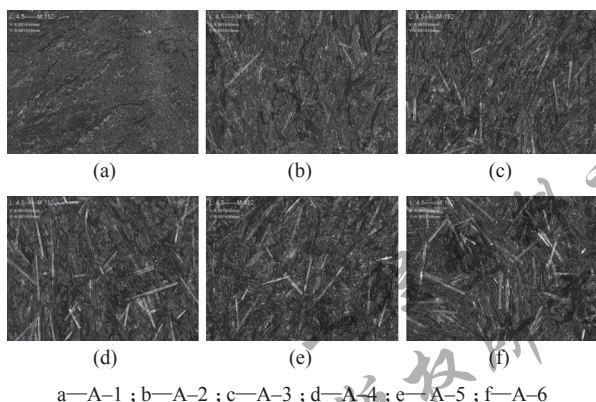


图2 不同玻璃纤维含量增强 PA6 焊接样条断面二次元影像图

由图 2 可以观察到,随着玻璃纤维含量的提高,玻璃纤维增强 PA6 焊接样条拉伸后的断面玻璃纤维的数量越来越多,树脂越来越少。K. T. Lockwood 等^[8]研究发现,玻璃纤维取向垂直于焊合面时,能有效地提高 PA6 的焊接强度,所以玻璃纤维含量较高时,垂直于焊合面取向的玻璃纤维越多,材料的焊接强度越高。但是,玻璃纤维含量的提高会减少焊接过程中 PA6 树脂熔化的量,同时也会减少振动摩擦后重新凝固树脂的含量,从而影响材料的焊接质量,导致其焊接强度下降^[9]。所以随着玻璃纤维含量的提高,焊接强度呈现先增大后减小的趋势,当玻璃纤维含量为 30% 时,焊接强度具有最大值,为 58.0 MPa。

2.2 苯胺黑色母含量对焊接强度的影响

从表 1 实验结果可知,40% 玻璃纤维增强 PA6 的焊接强度仅比 30% 玻璃纤维增强 PA6 的焊接强度低 1.4%,而拉伸强度却高 7.9%,为了兼顾优异的力学性能且结合实际应用,笔者后续实验均采用

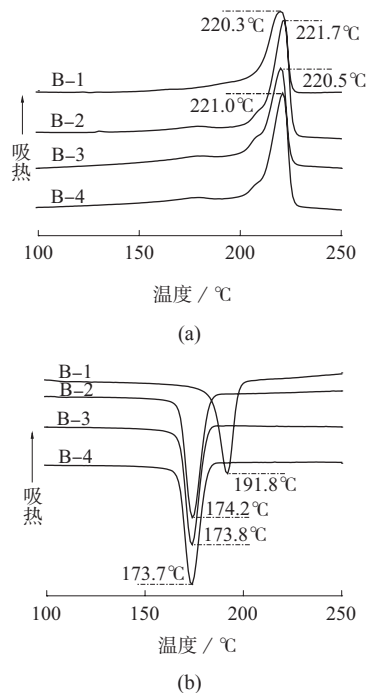
40% 玻璃纤维增强 PA6 作为研究对象。PA6 是一种半结晶性材料,其熔融与结晶行为常常对其力学性能和加工性能有重要影响。苯胺黑色母是一种有机颜料,能显著影响 PA6 的结晶行为,为了研究苯胺黑色母对玻璃纤维增强 PA6 焊接强度的影响,设计了表 2 所示的配方。焊接工艺设置为:深度 1.2 mm,振幅 0.85 mm,压力 3.5 MPa。

表2 不同黑色母含量增强 PA6 配方与性能

项目	编号			
	B-1	B-2	B-3	B-4
PA6 (VOLGAMID25) 含量 / %	59.3	58.3	57.3	56.3
玻璃纤维含量 / %	40	40	40	40
苯胺黑色母含量 / %	0	1	2	3
抗氧剂 A 含量 / %	0.2	0.2	0.2	0.2
抗氧剂 B 含量 / %	0.2	0.2	0.2	0.2
润滑剂 A 含量 / %	0.3	0.3	0.3	0.3
拉伸强度 / MPa	214	215	217	219
焊接强度 / MPa	57.3	57.0	57.4	55.6

由表 2 可以看出,随着苯胺黑色母含量由 0% 提高到 3%,玻璃纤维增强 PA6 的拉伸强度均在 215 MPa 左右,变化较小,焊接强度也均稳定在 57 MPa 左右,变化不大,说明苯胺黑色母含量对增强 PA6 焊接强度的影响很小。

图 3 为 B-1, B-2, B-3, B-4 的 DSC 曲线。



a—第二次升温曲线; b—第一次降温曲线

图3 不同黑色母含量增强 PA6 的 DSC 曲线

由图 3 可以看出,随着苯胺黑色母含量的增加,体系的熔融峰温度在 220 ~ 222 °C 之间,变化很小,但结晶峰温度变化明显,添加 1% 苯胺黑色母,

体系的结晶峰温度即从 191.8℃降至 174.2℃,继续提高苯胺黑色母含量到 3% 时,结晶峰温度降至 173.7℃,变化不明显。K. Sukata 等^[10]认为,苯胺黑色母与 PA66 之间存在很强的相互作用,苯胺黑色母的存在阻碍了 PA 链段的运动,提高了玻璃化转变温度,导致结晶温度与速率下降。而 PA6 的熔点高达 220℃,在此温度下苯胺黑色母与 PA6 之间的相互作用减弱,苯胺黑色母不能阻碍或促进 PA 分子链的运动,所以 PA6 的熔点没有发生变化。PA6 在进行摩擦焊接时,需要先熔化才能焊接,熔点越低,对焊接越有利^[4],但苯胺黑色母并不改变 PA6 的熔点,所以对焊接强度的影响不大。

2.3 树脂相对黏度对焊接强度的影响

不同黏度 PA6 对玻璃纤维增强 PA6 拉伸强度与焊接强度的影响见表 3,表 3 同时列出了不同相对黏度 PA6 的玻璃纤维增强 PA6 的熔融峰温度、结晶峰温度、熔融焓与结晶度,结晶度根据式 (1) 进行计算^[11-12]:

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0 \times \omega} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_c ——PA6 的结晶度, %;

ΔH_m ——PA6 的熔融焓, J/g;

ΔH_m^0 ——PA6 结晶度达到 100% 时的熔融焓, 本实验取值为 190 J/g^[12];

ω ——纯 PA6 的质量分数。

表 3 PA6 黏度对玻璃纤维增强 PA6 性能与结晶熔融行为的影响

项目	编号			
	C-1	C-2	C-3	C-4
PA6 (M2000) 含量 / %	57.8			
PA6 (VOLGAMID25) 含量 / %		57.8		
PA6 (VOLGAMID27) 含量 / %			57.8	
PA6 (VOLGAMID F34 含量 / %				57.8
玻璃纤维含量 / %	40	40	40	40
苯胺黑色母含量 / %	1.5	1.5	1.5	1.5
抗氧剂 A 含量 / %	0.2	0.2	0.2	0.2
抗氧剂 B 含量 / %	0.2	0.2	0.2	0.2
润滑剂 A 含量 / %	0.3	0.3	0.3	0.3
拉伸强度 / MPa	225	216	213	196
焊接强度 / MPa	55.2	54.6	59.4	58.6
PA6 树脂相对黏度	2.0	2.5	2.7	3.4
熔融峰温度 / °C	221.7	221.8	221.6	220.0
结晶峰温度 / °C	188.9	188.2	188.2	186.7
熔融焓 / (J·g ⁻¹)	29.8	27.2	26.9	17.8
结晶度 / %	27.1	24.8	24.5	16.2

由表 3 可以看出, PA6 的相对黏度越高, 其拉伸强度越低; 而树脂相对黏度对焊接强度的影响规律不明显。随着 PA6 相对黏度由 2.0 提高到 3.4, 玻璃纤维增强 PA6 的熔融峰温度与结晶峰温度有下

降的趋势, 但不明显, 而结晶度显著下降, 从 27.1% 降至 16.2%, 牌号为 VOLGAMID F34 的高黏度 PA6 的结晶度最低, 说明分子量小时 PA6 分子链堆砌困难, 从而结晶度变小, 最终导致材料的拉伸强度从 225 MPa 降至 196 MPa, 下降 12.9%。材料的焊接强度与树脂相对黏度没有很强的相关性, 但高相对黏度树脂的焊接强度略高于低相对黏度树脂, 可能是由于高相对黏度树脂在焊接界面分子链的缠结密度更高。

2.4 焊接工艺对焊接强度的影响

以 A-5 配方为基础, 研究不同焊接工艺对 40% 玻璃纤维增强 PA6 焊接强度的影响。仪器可调整的工艺有焊接深度 (h)、振幅 (A)、压力 (P)。样条在摩擦焊接时做相对往复移动, 如图 4 所示。

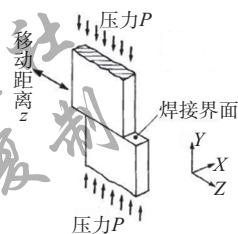


图 4 摩擦焊接示意图

样条移动距离 z 按式 (2) 计算^[13]:

$$z = A \sin(2\pi nt) \quad (2)$$

式中: n ——振动频率, 本实验取值为 240 Hz;

t ——焊接时间, s。

样条移动距离 z 主要与振幅 A 、振动频率 n 有关, 与压力 P 无关, 移动距离 z 随焊接时间 t 做符合正弦曲线的往复运动。当焊接达到所设定的深度 h 时, 焊接停止, 一般焊接时间短, 有利于缩短生产周期, 且减少噪音。

焊接工艺对玻璃纤维增强 PA6 焊接强度与焊接时间的影响见表 4、表 5 与表 6。

表 4 不同焊接深度下玻璃纤维增强 PA6 的焊接强度与焊接时间

焊接深度 / mm	焊接强度 / MPa	焊接时间 / s
0.5	55.4	3.76
0.9	56.3	3.99
1.5	55.3	4.48
2.5	55.5	8.28

注: 振幅为 0.85 mm, 压力为 3.5 MPa。

表 5 不同振幅下玻璃纤维增强 PA6 的焊接强度与焊接时间

振幅 / mm	焊接强度 / MPa	焊接时间 / s
0.4	38.8	30.0
0.7	55.5	4.33
1.2	55.2	2.08
1.7	54.9	1.57

注: 深度为 1.5 mm, 压力为 3.5 MPa。

表6 不同压力下玻璃纤维增强 PA6 的焊接强度与焊接时间

焊接压力 /MPa	焊接强度 /MPa	焊接时间 /s
3.5	56.3	1.86
6.0	53.2	1.36
8.0	48.5	1.11
9.0	43.3	1.01

注:振幅为 1.7 mm,深度为 0.9 mm。

由表 4 可知,在设定振幅为 0.85 mm、压力为 3.5 MPa 下,随着焊接深度从 0.9 mm 提高到 2.5 mm,焊接强度变化不大,焊接时间从 3.76 s 延长至 8.28 s。因为对于两个尺寸与面积相同的平面,焊接深度增加时,焊接界面间的材料熔融向外溢出更严重,并没有导致界面层厚度的增加,所以焊接强度变化不大。

由表 5 可知,振幅对玻璃纤维增强 PA6 焊接强度影响较大。在设定深度为 1.5 mm、压力为 3.5 MPa 下,当振幅为 0.4 mm 时,焊接时间达到 30 s,这是因为振幅太小,在 30 s 内材料未充分熔融,焊接深度无法达到设定的 1.5 mm,焊接自动停止,导致焊接强度偏低(未充分焊接),仅为 38.8 MPa;当振幅达到 0.7 mm 时,样条能充分焊接,焊接强度显著提高,达到 55.5 MPa,焊接时间立刻缩短至 4.33 s,然后随着振幅的提高,焊接强度变化不明显,焊接时间逐渐减少。从式(2)可知,振幅提高,焊接时往复移动的距离增大,摩擦更剧烈。当充分焊接之后,焊接强度不再随振幅的升高而变化。

由表 6 可知,焊接压力对玻璃纤维增强 PA6 焊接强度影响较大。在设定振幅为 1.7 mm、深度为 0.9 mm 下,随着压力由 3.5 MPa 提高到 9.0 MPa,焊接强度从 56.3 MPa 降至 43.3 MPa,焊接时间从 1.86 s 降至 1.01 s,有可能是由于压力较高时,焊接时间太短,界面间的树脂没有充分熔融与结晶,导致焊接强度变小^[14-15]。

3 结论

研究了玻璃纤维含量、苯胺黑色母含量、树脂相对黏度与焊接工艺对玻璃纤维增强 PA6 焊接强度的影响,得出如下结论:

(1) 随着玻璃纤维含量的提高,玻璃纤维增强 PA6 的拉伸强度逐渐增大,而焊接强度先增大后减小,当玻璃纤维含量为 30% 时,焊接强度有最大值,为 58.0 MPa。

(2) 加入 3% 苯胺黑色母使玻璃纤维增强 PA6 的结晶温度从未加入时的 191.8℃ 降至 173.7℃,但不能降低材料的熔点,所以其对增强 PA6 的拉伸强

度与焊接强度影响不大。

(3) 当树脂的相对黏度从 2.0 提高到 3.4 时,玻璃纤维增强 PA6 的结晶度从 27.1% 降至 16.2%,导致拉伸强度从 225 MPa 降至 196 MPa,高相对黏度树脂的焊接强度略高于低相对黏度树脂的焊接强度。

(4) 焊接深度对玻璃纤维增强 PA6 的焊接强度影响不大,均在 55 MPa 左右,焊接时间随焊接深度的增加而延长。振幅对玻璃纤维增强 PA6 焊接强度影响较大,振幅为 0.4 mm 时,焊接不充分,焊接强度低,仅为 38.8 MPa;振幅为 0.7 mm 时,可充分焊接,焊接强度达 55.5 MPa,之后焊接强度随着振幅的提高变化不大,振幅越高,焊接时间越短。焊接压力对玻璃纤维增强 PA6 焊接强度影响较大,随着焊接压力从 3.5 MPa 提高到 9.0 MPa,焊接强度从 56.3 MPa 下降至 43.3 MPa,焊接时间缩短。

参考文献

- [1] 刘歌,曹新鑫,罗四海,等.尼龙 6 共混改性研究进展[J].塑料包装,2013,23(4):15-20.
Liu Ge, Cao Xinxin, Luo Sihai, et al. Research progress of the blending modification of nylon 6[J]. Plastics Packaging, 2013, 23(4): 15-20.
- [2] 陶永亮.塑料焊接加工几种方法[J].塑料制造,2011(12):75-79.
Tao Yongliang. Plastic welding process several ways[J]. Plastics Manufacture, 2011(12): 75-79.
- [3] 张胜玉.塑料振动焊[J].汽车工艺与材料,2001(3):4-6.
Zhang Shengyu. Vibration welding of plastics[J]. Automobile Technology & Material, 2001(3): 4-6.
- [4] Stokes V K. Joining methods for plastics and plastic composites:an overview[J]. Polymer Engineering and Science, 1989, 29(19):1 310-1 324.
- [5] Kamal M R, Chuang Y M, Gomez R. Three-dimensional fiber orientation in vibration welded joints of glass fiber reinforced polyamide-6[J]. Polymer Composite, 2008, 29(9):954-963.
- [6] Weglowska A. Effect of vibration welding parameters on the quality of joints made of polyamide 66[J]. Polimery, 2014, 59(3):239-245.
- [7] Weglowska A, Pietras A. Influence of the welding parameters on the structure and mechanical properties of vibration welded joints of dissimilar grades of nylons[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2012, 12(2):198-204.
- [8] Lockwood K T, Zhang Y, Bates P J, et al. Effect of temperature on fatigue strength of vibration welded and unwelded glass reinforced nylon 6[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 66(6):111-117.
- [9] Ageorges C, Ya L, Hou M. Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites:a review[J]. Composites

(下转第 71 页)

- tics, 2014, 28(3):1-6.
- [3] 卜文娟, 阮复昌. 木质素改性酚醛树脂的研究进展 [J]. 粘接, 2011(2):76-78.
- Pu Wenjuan, Ruan Fuchang. Research progress of lignins modified phenolic resins[J]. Adhesion, 2011(2):76-78.
- [4] 袁晓晓, 陈海松, 沈国鹏, 等. 粗酚部分替代苯酚制备酚醛泡沫保温材料 [J]. 合成树脂及塑料, 2013(3):33-38.
- Yuan Xiaoxiao, Chen Haisong, Shen Guopeng, et al. Preparation of thermal insulating phenolic foams with phenol partly replaced by crude phenol[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2013(3):33-38.
- [5] 张彦昌, 曹金丽, 王冬梅, 等. 硼改性酚醛树脂溶液的合成 [J]. 河南科学, 2013, 31(3):268-271.
- Zhang Yanchang, Cao Jinli, Wang Dongmei, et al. Synthesis of boron modified phenolic resin[J]. Henan Sciences, 2013, 31(3):268-271.
- [6] 罗永丽, 迟长龙, 聂耀辉, 等. 聚碳酸酯 / 热塑性聚氨酯共混体系工艺设计及性能表征 [J]. 青岛大学学报: 自然科学版, 2015, 28(1):45-48.
- Luo Yongli, Chi Changlong, Nie Yaohui, et al. The process design and performance research of polycarbonate / thermoplastic polyurethane blends[J]. Journal of Qingdao University: Natural Science Edition, 2015, 28(1):45-48.
- [7] 李红标, 张泽广, 沈国鹏. 改性木质素部分取代苯酚制备酚醛泡沫保温材料的研究 [J]. 塑料科技, 2014, 42(9):122-125.
- Li Hongbiao, Zhang Zeguang, Shen Guopeng. Study on preparation of thermal insulating phenolic foams with phenol partly replaced by modified lignin[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(9):122-125.
- [8] 任苗苗, 吕惠生, 张敏华, 等. 木质素资源利用的研究进展 [J]. 高分子通报, 2012(8):44-49.
- Ren Miaomiao, Lyu Huisheng, Zhang Minhua, et al. Research progress on the application of lignin [J]. Polymer Bulletin, 2012(8):44-49.
- [9] 姜晓文, 刁桂芝, 王娟, 等. 高温高压酚化木质素改性酚醛泡沫性能 [J]. 新型建筑材料, 2014(9):70-75.
- Jiang Xiaowen, Diao Guizhi, Wang Juan, et al. Phenolition lignin under high temperature-pressure modified phenolic resin and phenolic foam properties[J]. New Building Materials, 2014(9):70-75.
- [10] 卢焕青, 丁海燕, 范萍, 等. 木质素增强酚醛泡沫的力学和阻燃性能研究 [J]. 科技通报, 2016, 32(2):24-27.
- Lu Huanqing, Ding Haiyan, Fan Ping, et al. The mechanical and inflaming retarding properties of lignin reinforced phenolic foam[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(2):24-27.
- [11] 王冠华, 陈洪章. 秸秆汽爆炼制木质素制备酚醛泡沫材料 [J]. 生物工程学报, 2014, 30(6):901-910.
- Wang Guanhua, Chen Hongzhang. Phenolic foam prepared by lignin from a steam-explosion derived biorefinery of corn stalk[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2014, 30(6):901-910.
- [12] 庄晓伟. 碱木质素改性以及原竹纤维增强酚醛泡沫材料制备与性能研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- Zhuang Xiaowei. Study on preparation and properties of alkali lignin-phenolic foams reinforced with natural bamboo fiber[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [13] 马玉峰, 张伟, 王春鹏, 等. 催化剂对酚醛树脂及其泡沫材料性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2012, 40(12):7-11.
- Ma Yufeng, Zhang Wei, Wang Chunpeng, et al. Effect of different catalysts on the properties of phenolic resins and foam materials[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(12):7-11.
- [14] 胡茂明, 华一鸿, 李雪, 等. 催化剂对 Resole 酚醛树脂结构与性能的影响 [J]. 热固性树脂, 2011, 26(6):20-23.
- Hu Maoming, Hua Yihong, Li Xue, et al. Effect of different catalysts on the structure and properties of resole phenolic resin[J]. Thermosetting Resin, 2011, 26(6):20-23.
- [15] 刘瑞杰, 谭卫红, 胡立红, 等. 腰果酚增韧酚醛泡沫研究 [J]. 应用化工, 2012, 41(11):1973-1975.
- Liu Ruijie, Tan Weihong, Hu Lihong, et al. Research on the phenolic foams toughened by cardanol[J]. Applied Chemical Industry, 2012, 41(11):1973-1975.

(上接第 52 页)

- Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(6):839-857.
- [10] Sukata K, Takeuchi H, Shimada M, et al. Influence of the nigrosine dye on the thermal behavior of polyamide 66[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 101:3 270-3 274.
- [11] 张永, 周华龙, 王丰, 等. 尼龙 66 与尼龙 6 及其共混物的熔融与结晶行为 [J]. 工程塑料应用, 2015, 43(6):86-89.
- Zhang Yong, Zhou Hualong, Wang Feng, et al. Melting and crystallization behaviors of nylon 66 and nylon 6 and their blends[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(6):86-89.
- [12] Kiliaris P, Papaspyrides C D, Pfaendner R. Influence of accelerated aging on clay-reinforced polyamide 6[J]. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94:389-396.
- [13] Patham B, Foss P H. Thermoplastic vibration welding: Review of process phenomenology and processing-structure-property interrelationships[J]. Polymer Engineering and Science, 2011, 51(1):1-22.
- [14] Zhang Guohong, Qiu Jianhui. Interdiffusion analysis based on novel ultrasonic welding method with inserting interposed sheet[J]. Polymer Engineering and Science, 2011, 51(1):103-108.
- [15] Potente H, Uebbing M. Friction welding of polyamides[J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(4):726-737.