

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.02.009

湿法缠绕苯并噁嗪 / 碳纤维复合材料的性能

肖亚超, 陈艳, 郑志才, 孟祥武, 王明, 王尚, 王强

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要: 分析了3种环氧树脂改性苯并噁嗪(BZ)树脂固化体系的黏温特性、凝胶时间、浇铸体力学性能等,从而优选出一种适用于湿法缠绕且具有优异性能的树脂体系,其由100份BZ树脂预聚体,10份混合环氧树脂,5份芳香胺类固化剂组成。以该树脂体系为基体,利用湿法缠绕工艺制备了NOL环,探究了缠绕张力对NOL环力学性能的影响;在较优缠绕张力下,制备了内径150 mm标准压力容器,并进行了相关性能测试。结果表明,优选的树脂体系具有优异的黏温特性,适用期超过8 h,浇铸体具有较好的力学性能(如拉伸强度达到78 MPa,拉伸弹性模量达到4.56 GPa),拉伸断裂面出现些许韧窝;随着缠绕张力的增大,NOL环的拉伸及层间剪切强度先增大后减小,当缠绕张力为10 N时,拉伸强度达到2680 MPa,层间剪切强度达到66 MPa,且高温条件下(160℃),拉伸与层间剪切强度保持率均超过85%;在较优缠绕张力(10 N)下,压力容器的特征系数为41.3 km,纤维强度转化率达到89.1%,基本发挥了碳纤维的力学性能。

关键词: 湿法缠绕; 苯并噁嗪; 碳纤维; 复合材料; 力学性能

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)02-0046-06

Study on Properties of Wet Winding Benzoxazine / Carbon Fiber Composites

Xiao Yachao, Chen Yan, Zheng Zhicai, Meng Xiangwu, Wang Ming, Wang Shang, Wang Qiang

(Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China)

Abstract: The viscosity temperature characteristics, gel time, casting mechanical properties of three epoxy resin modified benzoxazine resin curing systems were analyzed, and a resin system suitable for wet winding and excellent performances was selected, which consists of 100 phr benzoxazine resin prepolymer, 10 phr mixed epoxy resin and 5 phr aromatic amine curing agent. NOL rings were prepared with the selected resin system as the matrix by wet winding process, the effects of winding tension on the mechanical properties of NOL rings were investigated. Under optimum winding tension, standard pressure vessel with 150 mm of internal diameter was prepared and its mechanical properties were tested. The results show that the selected resin system has excellent viscous-temperature properties, its application life is over 8 hours, the mechanical properties of the casting are good (such as the tensile strength is 78 MPa, the tensile modulus is 4.56 GPa), and some dimples appear on the tensile fracture surface. With the increase of winding tension, the tensile/interlaminar shear strength of NOL ring first increases and then decreases, when the winding tension is 10 N, the tensile strength reaches 2680 MPa and the interlaminar shear strength reaches 66 MPa, and the retention rates of tensile/interlaminar shear strength all exceed 85% at high temperature (160℃). Under the optimum winding tension (10 N), the characteristic coefficient of the pressure vessel is 41.3 km, and the conversion rate of fiber strength reaches 89.1%, which indicated the mechanical properties of carbon fibers are basically developed.

Keywords: wet winding; benzoxazine; carbon fiber; composite; mechanical property

苯并噁嗪(BZ)树脂是一类特殊的酚醛树脂,出现于20世纪40年代,但在90年代才开始迅速发展^[1-2]。它是一种新型的热固性树脂,不仅保留了传

统酚醛树脂的高烧蚀率,而且克服了传统酚醛树脂的缺点;这种树脂的合成工艺简单,分子设计性强,固化过程中无小分子放出,固化收缩率几乎为零,且

通讯作者: 郑志才, 硕士, 研究员级高工 E-mail: 15966606615@163.com

收稿日期: 2018-11-10

引用格式: 肖亚超, 陈艳, 郑志才, 等. 湿法缠绕苯并噁嗪 / 碳纤维复合材料的性能 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2): 46-51.

Xiao Yachao, Chen Yan, Zheng Zhicai, et al. Study on properties of wet winding benzoxazine / carbon fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2): 46-51.

无需加入固化剂,是一种加热开环自固化树脂^[3-6]。BZ树脂与玻璃纤维以及碳纤维(CF)具有良好的结合性,加工性能优良,工艺性类似环氧树脂。近年来,由于BZ树脂基复合材料的高耐热性,已经在航空航天领域有了广泛应用^[7-8]。

目前,BZ树脂主要用于树脂传递模塑成型工艺,而用于湿法缠绕工艺的报道几乎没有。一方面,大多BZ树脂前驱体在室温下黏度大,不满足湿法缠绕工艺要求;另一方面,BZ树脂反应温度高,固化时间长,树脂韧性差。目前,环氧树脂体系是湿法缠绕工艺中较为成熟的树脂体系,且具有良好的力学性能。为了降低BZ树脂在室温下的黏度且提高固化物的交联程度,笔者通过对BZ树脂前驱体与环氧树脂以及固化剂的复合,开发了适合于湿法缠绕工艺的3种树脂固化体系配方,探究了这3种体系的黏度特性以及相关力学性能;通过湿法缠绕工艺,制备了BZ/CF复合材料,对缠绕成型的复合材料试样的力学性能进行了测试,为BZ树脂应用于湿法缠绕成型工艺提供一定的依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

烯丙基BZ树脂:济南宝思泰化工科技有限公司;

环氧树脂:TDE-85,深圳市汇特化工有限公司;

酚醛环氧树脂:F-44,无锡长干化工有限公司;

环氧稀释剂:669,蓝星新材料无锡树脂厂;

液体芳香胺类固化剂:自制;

CF:T800,12K,国产。

1.2 主要设备及仪器

数控缠绕机:FWA I/5/1型,德国BSD公司;

真空烘箱:DZF-6021型,上海恒科有限公司;

旋转黏度计:SNB-3型,上海尼润智能科技有限公司;

万能试验机:Instron-1185型,美国英斯特朗公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-4800型,日本Hitachi公司。

1.3 试样制备

采用的烯丙基BZ树脂在室温下具有较低黏度,开环固化时,树脂的双键打开,可使固化物具有更大的交联密度和更高的耐热性,其结构如图1所示。设计的3种环氧树脂改性BZ树脂固化体系配方见表1。

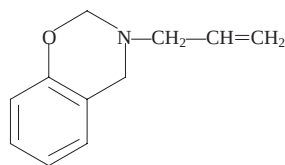


图1 烯丙基BZ树脂的结构

表1 3种树脂固化体系中各组分用量 份

编 号	BZ 树脂	混合环氧树脂	固化剂
BZ-01	100	5	2
BZ-02	100	10	4
BZ-03	100	15	6

注:1)混合环氧树脂由TDE-85、F-44和环氧稀释剂混合而成,三者质量比为3:1:1;2)固化剂用量根据环氧值计算。

树脂浇铸体的制备:按表1配方混合好树脂胶液,将其倒入自制带有脱模剂的钢制模具中,于120℃下真空脱泡,按160℃/2 h+180℃/2 h+200℃/2 h程序升温固化,自然冷却,脱模,裁切,得到标准试样。

纤维增强塑料环形试样(NOL环)的制备:将树脂胶液倒入浸胶槽中,浸渍连续CF;设定缠绕参数,通过数控缠绕机将浸渍纤维按照环向缠绕方式缠绕到直径为150 mm的圆筒芯模上,按照一定的固化制度加热固化;将固化好的试样进行后期处理,依据GB/T 1458-2008中的圆筒切环法制备NOL环。

内径150 mm标准压力容器的制备及试验流程:芯模的制作→芯模处理→涂刷脱模剂→铺覆内衬层→缠绕复合材料结构层→旋转固化→脱模处理→水压爆破试验。

1.4 测试与表征

黏温特性表征:以一定升温速率,用黏度计分别测定表1中所列的3种树脂体系的黏度随温度变化(室温至150℃)的曲线。

凝胶时间测定:用平板小刀法,分别测定3种树脂体系在不同温度下的凝胶时间(将树脂体系从加热到拉丝状态定义为凝胶时间)。

浇铸体力学性能测试:按照GB/T 2567-2008对标准浇铸体试样分别进行拉伸、弯曲和压缩性能测试。测定拉伸和弯曲性能时,加载速率为2 mm/min;测定压缩强度时,加载速率为5 mm/min。

SEM分析:将拉伸试验得到的试样断面进行喷金处理,然后采用SEM进行形貌分析。

NOL环性能测试:按照GB/T 1458-2008,利用万能试验机测定相关力学性能,拉伸强度测试时的加载速度为2~3 mm/min,层间剪切强度测试时的加载速度为1~2 mm/min。

内径150 mm标准压力容器的性能按照GB/T 6058-2005测试。

2 结果与讨论

2.1 树脂固化体系黏度分析

3种树脂体系的黏度-温度曲线如图2所示。由图2看出,不同体系的曲线变化趋势类似,随着温度升高,黏度迅速下降,且在60℃左右就已经下降到很低;当温度继续升高时,黏度变化趋于平缓。这是由于当树脂温度较低时,随着温度的升高,树脂中分子的运动活性增大,分子间作用力减弱,使剪切变形产生的切应力减小,树脂黏度急剧下降;当树脂温度达到一定温度后,分子自由运动活性达到最大,体系开始发生相应的化学反应,黏度虽也会升高,但与其因温度升高分子间作用力减弱引起的黏度下降互相平衡,树脂黏度的变化变得较为平缓^[9-10]。

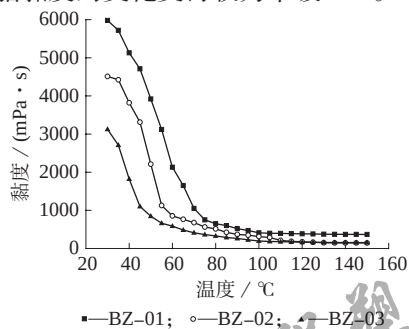


图2 3种树脂体系的黏度-温度曲线

从图2还可以看出,温度较低时,在同一温度下,3种树脂体系的黏度差别很大,体系的黏度随着混合环氧树脂和固化剂用量的增加而降低。这是因为,BZ预聚体黏度很大,而环氧树脂及其液体固化剂黏度均很低,两者用量的增加会使3种树脂体系的黏度-温度曲线在较低温度时有了很大的差别。但随着温度的升高,三种体系的黏度均逐渐减小,BZ-02与BZ-03的黏度十分接近。

选取90,160,180,200℃,测定3种树脂体系在上述温度下的凝胶时间,结果见表2。

表2 3种树脂体系不同温度下的凝胶时间

编 号	温度 / °C			
	90	160	180	200
BZ-01	-	1200	180	70
BZ-02	-	951	125	45
BZ-03	-	650	55	32

注:-代表凝胶时间超过了1 h。

由表2可知,3种树脂体系在中低温条件下凝胶时间很长,随着温度的升高,树脂发生初步交联,开始凝胶化,温度越高,凝胶时间越短。3种树脂体系在相同温度下的凝胶时间有明显差异:BZ-03凝胶时间最短,BZ-01凝胶时间最长。因为在树脂体系交联固化的过程中,环氧树脂在固化剂的作用下

首先开环,发生固化交联,体系黏度升高;随着体系温度的升高,BZ树脂发生开环反应,生成的酚羟基会进一步参与环氧树脂的开环反应,最终形成复杂的三维交联网络结构^[11]。因此,相同的温度条件下,随着混合环氧树脂以及固化剂用量的增加,树脂体系的凝胶时间逐渐缩短。

除此之外,湿法缠绕是一个时间持续比较长的过程,因此所选树脂在满足黏度要求的条件下,必须具备较长的适用期。在满足湿法缠绕黏度要求(200~800 mPa·s)的情况下,湿法缠绕时胶槽的加热温度越低越好,可以延长适用期且节省能源。从图2可以看出,60℃时,BZ-01与BZ-02的黏度均满足湿法缠绕工艺要求,其中BZ-01体系的黏度最低,约为500 mPa·s。故在60℃的条件下,测定这两种树脂体系的适用期,发现这两种体系的适用期均超过8 h,满足碳纤维湿法缠绕工艺制备大型部件的需求。

2.2 树脂浇铸体力学性能分析

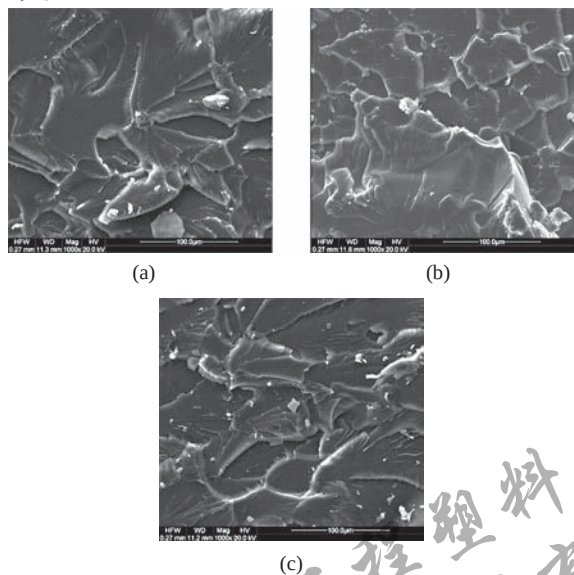
表3为3种树脂浇铸体的力学性能。从表3可知,BZ-02浇铸体的力学性能明显较其它两种体系优异,其拉伸强度和拉伸弹性模量分别为78 MPa,4.56 GPa,弯曲强度和弯曲弹性模量分别为108 MPa,4.81 GPa,压缩强度和压缩弹性模量分别为124 MPa,3.89 GPa。BZ预聚体发生开环聚合时,分子中会形成大量氢键,降低树脂体系的聚合度,而加入环氧树脂以及固化剂会破坏一部分氢键的形成,在一定程度上提高交联密度,提高树脂浇铸体的力学性能。但当环氧树脂用量过高时,会降低BZ树脂自身的刚性,交联密度过大,脆性增大。

可以发现,这3种树脂浇铸体的断裂伸长率均较低,表明树脂体系的脆性较大,会限制其在实际生产中的应用。这是由于BZ在固化过程中噁嗪开环后,形成大量的酚羟基以及仲胺,促进环氧树脂的开环,形成复杂的三维交联网络,同时分子链内部会形成大量的氢键,导致树脂浇铸体在承受载荷的过程中,分子链无法运动,发生脆性断裂。

表3 3种树脂浇铸体的力学性能

项 目	BZ-01	BZ-02	BZ-03
拉伸强度 / MPa	65	78	72
拉伸弹性模量 / GPa	4.13	4.56	3.89
断裂伸长率 / %	2.1	2.7	2.3
弯曲强度 / MPa	106	108	110
弯曲弹性模量 / GPa	4.56	4.81	4.65
压缩强度 / MPa	115	124	118
压缩弹性模量 / GPa	3.72	3.89	3.74

图3为3种树脂浇铸体的拉伸断面SEM照片。从图3可以看出,3种树脂浇铸体的拉伸断裂面均相对平滑,仅出现了少量的韧窝以及层状结构,属于典型的脆性断裂。可以看出,BZ-02树脂浇铸体具有较多的“鱼鳞”片层结构,存在一定数量的应力纹及应力发白区域,在一定程度上表现出韧性断裂的趋势,这与表3中,其具有相对较优的断裂伸长率相一致。



a—BZ-01; b—BZ-02; c—BZ-03

图3 3种树脂浇铸体拉伸断面SEM照片

通过比较3种树脂固化体系的工艺性、适用期以及浇铸体力学性能,可知BZ-02体系较其它两种体系更加优异,所以选用BZ-02体系作为湿法缠绕工艺用基体树脂进行深入研究,通过制备复合材料,研究该树脂体系与国产T800 CF的匹配性。

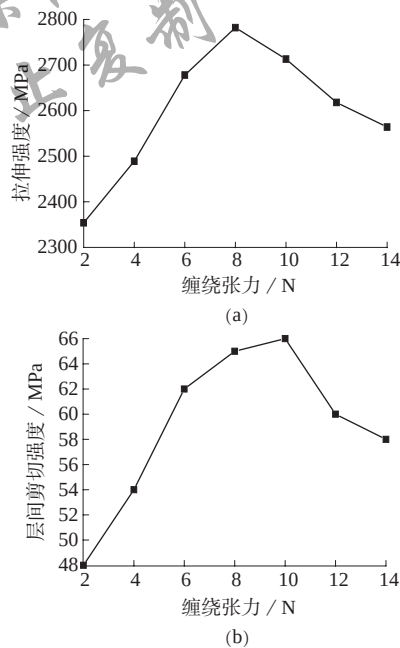
2.3 NOL环的力学性能分析

影响缠绕CF复合材料制品性能的主要工艺参数包括CF的烘干和热处理、CF浸胶情况、缠绕速度、缠绕张力、胶液温度等。这些因素之间存在有机联系,但其中最为主要的影响因素是缠绕张力。因此,主要探究了缠绕张力对NOL环的性能影响。根据黏温曲线分析,制备复合材料时,胶槽温度设定为60℃。

NOL环是一种环向缠绕而成的单向复合材料,其宏观性能的优劣可以衡量树脂与纤维表面的粘结性、浸润性、树脂与纤维的匹配性,同时可以表征树脂传递载荷的能力,对于材料的选择以及缠绕成型压力容器具有重要指导意义^[12]。

图4是不同缠绕张力下NOL环的拉伸强度以

及层间剪切强度。由图4可知,NOL环的拉伸强度以及层间剪切强度变化趋势相同,均随着缠绕张力的增大先增大后减小。一方面,缠绕张力过小,导致缠绕过程中产生的气泡等缺陷不易排除;同时在缠绕张力的作用下,将产生垂直于芯模表面的法相力(即接触成型压力),若缠绕张力过小,则会导致接触成型压力过小,制品致密性降低,空隙率增大,力学性能较低。另一方面,随着缠绕张力增大,芯模上已缠绕的复合材料受到缠绕层纤维的张力作用,会产生应力变形,使已缠绕的纤维预应力被部分释放,树脂的黏性作用又使被释放的预应力无法传递给正在缠绕的纤维,从而导致纤维缠绕层内松外紧,胶液从内向外迁移,导致内层缺胶;同时缠绕张力增大,会增加纤维的磨损,进而影响复合材料的力学性能。以上结果表明缠绕张力对复合材料的拉伸强度以及层间剪切强度有很大影响,缠绕张力为6~10 N时,复合材料具有较好的力学性能。



a—拉伸强度; b—层间剪切强度

图4 不同缠绕张力下NOL环的力学性能

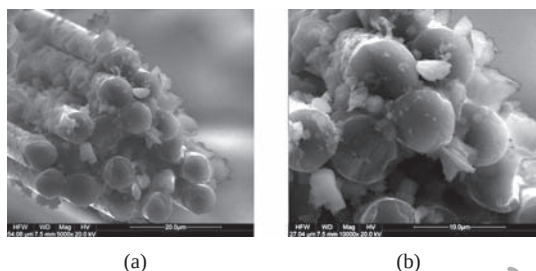
表4为纤维缠绕张力为10 N时NOL环在室温以及高温下的力学性能。由于T800 CF股数较大,纤维浸润困难,缠绕过程中会存在起毛现象,对纤维表面造成磨损,造成NOL环性能降低,NOL环层间剪切强度一般维持在55 MPa左右。从表4可知,室温条件下,NOL环的拉伸强度为2680 MPa,层间剪切强度为66 MPa,表明树脂基体对纤维的浸润性较好,界面的粘结性较好;在160℃(保温

5 min) 条件下,拉伸强度以及层间剪切强度保持率高达 85% 以上,说明由 BZ-02 体系制备的 CF 复合材料具有良好的耐热性。

表 4 室温及高温下 NOL 环力学性能 MPa

温 度	拉伸强度	层间剪切强度
室温	2 680	66
160℃	2 330	57

图 5 为 NOL 环试样拉伸断面 SEM 照片。从图 5 可以清楚地看到,复合材料破坏后纤维表面附有大量的基体树脂,基体树脂紧密包覆在碳纤维上,断面形貌平整,碳纤维断裂较为整齐,仅有少量界面裂纹存在,显示基体树脂与 CF 具有较好的界面粘结性。



(a) (b)
放大倍数: a—5 000; b—10 000

图 5 NOL 环拉伸断面 SEM 照片

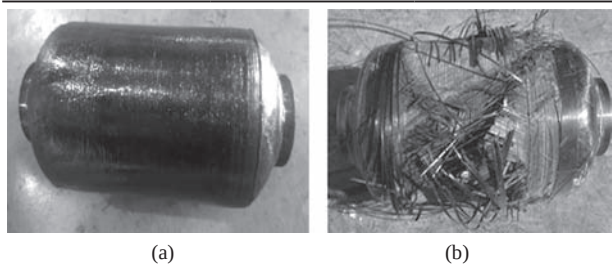
2.4 标准压力容器性能测试

先进固体发动机为了能够承受高内压以及轴向和横向过载,对容器的强度和刚度要求很高^[13-14]。因此,为了将 BZ-02 体系应用于湿法缠绕大尺寸发动机壳体,实验预先缠绕内径 150 mm 的标准压力容器。缠绕张力设定为 10 N,其它缠绕工艺参照 NOL 环。

表 5 为内径 150 mm 标准压力容器爆破试验结果,图 6 为爆破试验前后对比照片。

表 5 内径 150 mm 标准压力容器爆破试验结果

项 目	均 值	离散系数
爆破压力设计值 / MPa	27.6	
爆破压力实际值 / MPa	30	5.8
特征系数 / km	41.3	6.7
纤维强度转化率 / %	89.1	7.1
爆破位置	中部	



(a) (b)
a—爆破前; b—爆破后

图 6 标准压力容器爆破前后照片

由表 5 可知,由 BZ-02 体系湿法缠绕的内径 150 mm 容器试验结果离散性小,性能稳定,爆破强度高,纤维强度转化率达到 89.1%。压力容器破坏位置均发生在压力容器中部,纤维环向和纵向同时断裂,纤维强度得到较好的发挥。从测试结果可以分析出树脂对纤维的浸润性较好,纤维和树脂基体的界面结合较好。

3 结论

(1) 通过对 3 种环氧树脂改性 BZ 树脂固化体系的黏温特性、工艺特性、力学性能研究,优选出一种性能优异的树脂体系 (100 份 BZ, 10 份混合环氧树脂, 4 份固化剂), 并采用湿法缠绕工艺成功制备了以 BZ 树脂为主体的 CF 复合材料。

(2) 60℃时,优选的树脂体系黏度为 500 mPa·s 左右,适用期超过 8 h,满足湿法缠绕工艺的需求;且相应浇铸体具有较高的强度和模量,断裂伸长率达到了 2.7%。

(3) NOL 环性能测试结果表明,优选的树脂体系与国产 T800 CF 具有较高的粘结性能,当纤维缠绕张力为 10 N 时,层间剪切强度达到 66 MPa,且在高温条件下 (160℃) 强度保持率达 85% 以上,可以用于湿法缠绕成型耐中高温的复合材料部件。

(4) 内径 150 mm 标准压力容器爆破试验结果表明,优选的树脂体系工艺性能优良,压力容器特征系数为 41.3 km,纤维强度转化率达到 89.1%,基本发挥了国产 T800 CF 的力学性能。

参考文献

- [1] 王军亮,鲁哲宏,李豪,等. 苯并噁嗪单体的分子设计及其合成研究进展 [J]. 化学研究, 2018, 29(2): 213-220.
Wang Junliang, Lu Zhehong, Li Hao, et al. Research progress of polybenzoxazines: Design and synthesis [J]. Chemical Research, 2018, 29(2): 213-220.
- [2] 冯子健,曾鸣,刘程,等. 苯并噁嗪功能材料的研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(1): 184-190.
Feng Zijian, Zeng Ming, Liu Cheng, et al. Preparation and applications of functionalized benzoxazine-based materials [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(1): 184-190.
- [3] 袁伟,史铁军,李明,等. 甲基环戊二胺型苯并噁嗪合成及其与环氧树脂固化体系热稳定性的比较 [J]. 功能材料, 2016, 47(10): 10 213-10 217.
Yuan Wei, Shi Tiejun, Li Ming, et al. Preparation of benzoxazine based on methylcyclopentyl diamine and comparison of thermal stability of its curing system with epoxy [J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(10): 10 213-10 217.
- [4] 孙会岭,焦玉春,徐丽,等. 双环苯并噁嗪的制备及其与环氧树脂

- 共混体系性能研究[J]. 河南化工, 2016, 33(3):19-22.
- Sun Huiling, Jiao Yuchun, Xu Li, et al. Preparation of bicyclic benzoxazine and properties research of its blends with epoxy resin[J]. Henan Chemical Industry, 2016, 33(3):19-22.
- [5] 吴唯, 姜晨晨, 朱送伟, 等. 苯并噁嗪对环氧树脂体系热稳定性的影响及其作用机理[J]. 固体火箭技术, 2016, 39(2):242-246.
- Wu Wei, Jiang Chenchen, Zhu Songwei, et al. Effect of benzoxazine on the epoxy resin systems' thermal stability and its mechanism[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(2):242-246.
- [6] 古武, 杨坡, 孟凡盛, 等. MA 型苯并噁嗪/酚醛型氰酸酯共混体系的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(3):18-22.
- Gu Wu, Yang Po, Meng Fansheng, et al. Study on the MA-benzoxazine/phenolic-cyanate resin blends[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(3):18-22.
- [7] 张凤翻. 苯并噁嗪树脂及其在宇航复合材料中的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2016, 41(1):10-23.
- Zhang Fengfan. Benzoxazine resins and its application in the aerospace composites[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2016, 41(1):10-23.
- [8] 牟海艳, 谢广超, 周克来, 等. 新型苯并噁嗪/环氧树脂/酚醛树脂模塑料及其耐热性研究[J]. 功能材料, 2017, 48(3):3154-3158.
- Mou Haiyan, Xie Guangchao, Zhou Kelai, et al. Novel benzoxazine/epoxy/phenolic molding compound and its thermal stability[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(3):3154-3158.
- [9] 徐淑权, 蔡建, 胡秉飞, 等. 湿法缠绕用树脂体系黏度及固化动力学研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(3):199-201.
- Xu Shuquan, Cai Jian, Hu Bingfei, et al. Study on viscosity and curing kinetics of resin system for wet winding[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(3):199-201.
- [10] 包睿, 仇振安, 徐淑权. 发射箱湿法缠绕用树脂体系黏度及固化动力学研究[J]. 包装工程, 2015, 36(17):139-143.
- Bao Rui, Qiu Zhenan, Xu Shuquan. Viscosity and curing kinetics of resin system for wet winding of launch box[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(17):139-143.
- [11] 吕钧伟, 王斌, 李辉. 基于环氧树脂/双酚 A 型苯并噁嗪树脂 IPN 体系的力学性能及固化动力学研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(11):31-36.
- Lyu Junwei, Wang Bin, Li Hui. Study of mechanical properties and curing kinetics of IPN system based on epoxy resin/bisphenol a-based benzoxazine resin[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(11):31-36.
- [12] 兰总金, 祖磊, 惠鹏, 等. 基于 NOL 环的高性能纤维与环氧树脂的匹配性研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(3):45-51.
- Lan Zongjin, Zu Lei, Hui Peng, et al. Study on interface compatibility of high-performance fiber and epoxy resin based on test of NOL rings[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(3):45-51.
- [13] 陈小平, 王喜占. T800 碳纤维在复合材料压力容器上的应用研究[J]. 高科技纤维与应用, 2017, 42(3):45-49.
- Chen Xiaoping, Wang Xizhan. T800 carbon fiber in the application of composite pressure vessel research[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2017, 42(3):45-49.
- [14] 魏虹, 刘义华, 张志斌, 等. 耐 160℃ 环氧树脂及其在缠绕壳体上的应用技术研究[J]. 航天制造技术, 2014(5):22-25.
- Wei Hong, Liu Yihua, Zhang Zhibin, et al. Resistant 160℃ epoxy resin and its application on filament winding shell[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(5):22-25.
- [13] 杨旭生, 汪艳, 陈亚武. 选择性激光烧结对尼龙 6 粉末的性能研究[J]. 塑料工业, 2018, 46(3):135-138.
- Yang Xusheng, Wang Yan, Chen Yawu. Study on properties of nylon 6 powder for selective laser sintering[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(3):135-138.
- [14] 陈震, 汪艳. 抗氧化剂对选择性激光烧结对 PA6 粉末热氧稳定性影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(6):126-130.
- Chen Zhen, Wang Yan. Effect of antioxidants on thermal oxygen stability of pa6 powder for selective laser sintering[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(6):126-130.
- [15] Drummer D, Drexler M, Wudy K. Impact of heating rate during exposure of laser molten parts on the processing window of PA12 powder[J]. Physics Procedia, 2014, 56:184-192.
- [16] 蔡琤, 易国斌, 陈旭东. 尼龙老化机理研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2013, 42(4):42-47.
- Cai Zheng, Yi Guobin, Chen Xudong. The development of study on nylon ageing mechanism[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2013, 42(4):42-47.
- [17] Wudy K, Drummer D. Aging effects of polyamide 12 in selective laser sintering: Molecular weight distribution and thermal properties[J]. Additive Manufacturing, 2019, 25:1-9.
- (上接第 24 页)
- [9] 郑立. 选择性激光烧结尼龙 12 复合粉末的制备及中试化[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2016.
- Zheng Li. Synthesis of nylon 12 composite powder for selective laser sintering and pilot scale production[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016.
- [10] 彭梦飞, 汪艳. 尼龙 12/OMMT 纳米复合粉末的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(3):50-53.
- Peng Mengfei, Wang Yan. Preparation and performance of PA12/OMMT nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(3):50-53.
- [11] 袁绍彦, 刘奇祥, 叶南飙, 等. 耐高温聚酰胺的性能及应用[J]. 中国塑料, 2009, 23(10):6-9.
- Yuan Shaoyan, Liu Qixiang, Ye Nanbiao, et al. Properties and application of high-temperature resistant polyamides[J]. China Plastics, 2009, 23(10):6-9.
- [12] 汤教佳, 葛舒婷, 张佩瑶, 等. 深冷粉碎制备尼龙粉末流动性的改善及选择性激光烧结对性能[J]. 塑料工业, 2018, 46(7):26-31.
- Tang Jiaojia, Xi Shuting, Zhang Peiyao, et al. Improvement of fluidity and selective laser sintering of nylon powder prepared by cryogenic crushing[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(7):26-31.