

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.04.015

一种高温环氧树脂的工艺及力学性能

陈吉平¹,高龙飞¹,苏佳智¹,钱建华²,付建辉²

(1. 上海飞机制造有限公司, 上海 200436; 2. 华东理工大学华昌聚合物有限公司, 上海 201507)

摘要:对比研究了国产 MERICAN 3768 和国外 CYCOM 890 RTM 两种高温环氧树脂的工艺性和力学性能。同时选取典型航空结构,采用双轴向碳纤维织物和真空灌注工艺制备了对比零件。结果表明,国产 MERICAN 3768 树脂的浸润性、流变固化特性和力学性能均与国外 CYCOM 890 RTM 树脂相当,均具有优异的工艺性和力学性能,与纤维匹配性好,满足航空应用对树脂的要求。

关键词:高温环氧树脂;力学性能;工艺性能;真空灌注工艺;航空应用

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)04-0074-04

Processing and Mechanical Properties of High Temperature Epoxy Resin

Chen Jiping¹, Gao Longfei¹, Su Jiazhi¹, Qian Jianhua², Fu Jianhui²

(1. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China; 2. Huachang Polymers Co., Ltd. of ECUST, Shanghai 201507, China)

Abstract: Two kinds of high temperature epoxy resin systems including MERICAN 3768 and CYCOM 890 RTM were studied for aviation application by analyzing the processing and mechanical properties of the resin and the resin matrix composites. With means of VARI, the composite parts were fabricated using unidirectional and biaxial carbon fiber fabrics. The results show that the wet ability, rheological and curing behavior and mechanical properties of the two kinds of resin are similar. Both of the two kinds of resins have excellent processing and mechanical properties, and match well with the carbon fibers. Therefore, the studied resins can meet the requirements for the aviation application.

Keywords: high temperature epoxy resin; mechanical properties; processing properties; VARI; aviation application

液体成型技术一直是国内外复合材料研究发展的重要方向,其中真空辅助注射(VARI)工艺、树脂传递模塑(RTM)工艺是其中的重要代表,它们主要具备适合成型复杂结构零件、环境污染少、设备依赖及能耗程度低、可控程度高、实现零件净尺寸成型等特点。

复合材料由于其材料制造成型一体化的特点,原材料成本在零件制造过程中占有较大比例,与传统的热压罐工艺不同,液体成型工艺采用的原材料主要是干纤维织物及液体树脂。目前普遍采用的液体成型树脂主要为不饱和聚酯树脂、环氧树脂或其改性品种。一般来说,液体成型树脂需满足“一长一快,两高四低”的基本特点要求,即树脂的胶凝时间适当长,树脂的固化速度快,树脂具有高消泡性和高浸润性,树脂的黏度低、可挥发性低、固化收缩率和放热峰低^[1-3]。

在通用民品方面,国内外开发的液体成型树脂主要为中低温固化树脂,品种及工艺实用性已较成熟,如国外有如 ATARD Lab 的 SI-ZG-5A VARI 树

脂、CIBA 公司的 Resinfusion TM 8603,8604 树脂,DOW 公司的 DERAKANE 8084 树脂和壳牌公司的 EPIKOTE 及 EPON 系列树脂等,国内有北京航空材料研究院的 TDE-85 型环氧树脂等。

在航空应用领域,零件的使用性能要求较高,采用的液体成型树脂一般为高温固化树脂,如美国 Cytec 公司的 CYCOM 890 RTM 环氧树脂、EP2400 环氧树脂,及 HEXCEL 公司的 RTM-6 环氧树脂等,而国内在高温液体成型树脂的开发应用技术起步较晚,受基体树脂品种和价格等多方面的限制,品种较少,有待于进一步研发。上海华昌聚合物公司于近期研制了 MERICAN 3768 单组分高温环氧树脂,并已成功应用至国内某型号飞机的试验零件成型。笔者针对 MERICAN 3768 高温环氧树脂,在树脂的固化流变特性、浸润性、力学性能及零件成型应用方面做了一系列研究,并与 CYCOM 890 RTM 进行了对比。研究结果表明, MERICAN 3768 树脂已达到国

联系人:陈吉平,高级工程师,从事复合材料液体成型工艺研究

收稿日期:2017-01-15

外相同级别树脂的工艺性能水平^[4-14]。

1 实验部分

1.1 原材料

碳纤维无褶皱织物 (NCF): T300, $\pm 45^\circ$ 双向, 上海石化有限公司及德国 SearTex 公司;

MERICAN 3768 树脂: 华东理工大学华昌聚合物有限公司;

CYCOM 890 RTM 树脂: 美国 Cytec 公司;

聚甲基丙烯酸酯亚胺 (PMI) 泡沫材料: 71HT, 浙江中科恒泰新材料科技有限公司。

1.2 仪器及设备

流变仪: Q2000 型, 美国 TA 公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪: ARG2 型, 美国 TA 公司;

接触角测试仪: SL200KB 型, 美国 Kino 公司;

万能力学试验机: 5966 型, 10 kN, 0.5 级, 美国 Instron 公司;

无损检测设备: EPOCH600 型, 日本 Olympus 公司;

深沟千分尺: APB-5D 型, 日本 Mitutoyo 公司。

1.3 试样制备

树脂浇注体制备: 将脱泡 (90°C , 0.5 h 真空脱泡) 后的树脂浇注入模具之中, 按照工艺条件进行加热固化后随炉冷至室温, 取出浇注体。

工艺零件制备: 制备零件预成型体, 并通过 VARI 工艺成型, 待树脂注射完成之后, 于烘箱中按照参考制度完成固化。零件为泡沫夹芯结构, 纤维铺层数为 10 层, 设计零件厚度为 2.7 mm, PMI 泡沫夹芯材厚度为 10 mm。

1.4 性能测试

流变特性: 采用流变仪进行黏度-温度及黏度-时间曲线测试;

固化特性: 采用 DSC 仪测试固化放热曲线;

浸润特性: 采用接触角测试仪分别对两种树脂和两种纤维进行接触角测试;

力学性能: 参照相关 ASTM 标准采用力学试验机进行树脂浇注体的干态拉伸、弯曲及剪切性能测试, 每组测试试样数量为 10 个, 取平均值;

零件内部质量: 采用无损检测设备检测, 以零件的优区底波为基准 (80% 满屏波高), 对底波低于 20% 满屏波高的区域进行标记, 标记区域即为内部缺陷;

零件外部质量: 通过目视检查零件表面的贫胶

及富脂情况, 并通过深沟千分尺对零件的边缘厚度及夹芯表面边缘厚度进行测量, 厚度测量间隔为每 50 mm 距离测量一次。

2 结果与讨论

2.1 MERICAN 3768 树脂流变特性分析

图 1 为 MERICAN 3768 树脂的升温黏度曲线, 升温速率为 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。树脂的动态黏度曲线呈 U 型, 初始阶段黏度逐渐下降, 然后在一段时间处于低黏度平台状态, 最低黏度达到 $0.02\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 符合液体成型工艺对树脂要求足够低黏度的特点。

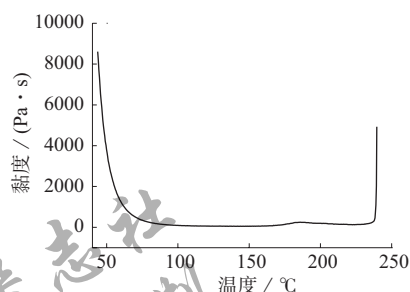


图 1 MERICAN 3768 树脂的升温黏度曲线

热固性树脂在升温过程中, 分子活性增加, 因此, 随温度上升, 初期黏度呈下降趋势, 随后保持低黏度状态, 达到反应活化能所需温度之后, 反应生成化学键, 分子量增加, 树脂最终凝胶和交联形成聚合物, 黏度上升。从图 1 可以看到, MERICAN 3768 树脂在 44 min 左右时间开始快速反应, 符合液体成型工艺对树脂要求固化时间足够短的特点。

工艺经验表明, 黏度高于 $0.5\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时树脂使用非常困难, 即使采用高注射压力将树脂注射至纤维预成型体内, 也会由于树脂浸润效果差造成干斑和孔隙, 也较难得到纤维体积含量高的制件。

图 2 是 MERICAN 3768 树脂在 80°C 的恒温黏度曲线。可见, 树脂在 80°C 条件下, 实验时间内其黏度基本没有变化, 为 $0.28\sim 0.35\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。对于液体成型复合材料制件来说, 若树脂黏度偏大, RTM 注射时需施加较大压力, 容易对纤维预成型体造成冲

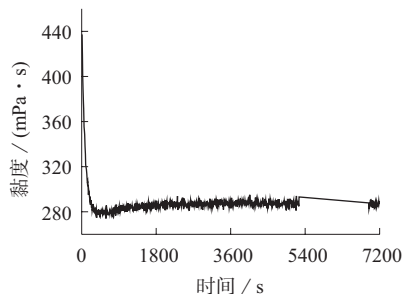


图 2 MERICAN 3768 树脂的恒温黏度曲线

刷变形, VARI 注射时则速率太慢,效率太低;若树脂黏度偏小,注射时容易造成“流道效应”过于明显,不利于树脂对纤维的浸润,树脂的流动性控制相对困难。最佳的树脂注射黏度一般控制在 $0.25 \sim 0.35 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。而 MERICAN 3768 树脂在 80°C 的黏度基本能稳定在 $0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 左右,且能持续至少 2 h 。这一时间段已足够成型任意尺寸的零件,也说明了该树脂具有液体成型树脂需具备的低黏度特性。

2.2 MERICAN 3768 树脂固化特性分析

图 3 是 MERICAN 3768 树脂和 CYCOM 890 RTM 树脂在 180°C 的恒温 DSC 曲线。两种树脂均呈现单峰曲线。可见, MERICAN 3768 树脂在 180°C 下约 20 min 后开始发生凝胶,树脂开始固化交联放热,符合液体成型树脂凝胶时间适当长的特点,固化放热峰至 180 min 后基本趋于平缓,固化反应结束。经测定, MERICAN 3768 树脂固化反应放热量为 334.9 J/g ,与 CYCOM 890 RTM 树脂的固化放热量 394.1 J/g 基本一致,说明 MERICAN 3768 树脂在固化反应过程可以保持较平稳状态,不会因单位时间内固化放热量过大而导致树脂爆聚等不稳定状态,符合液体成型树脂固化放热低的特点。同时, MERICAN 3768 树脂的 DSC 曲线上,在固化放热峰附近并未出现其余杂峰,可确定该树脂在固化过程中不会出现明显的相分离现象,具有较好的物质均匀性。根据 MERICAN 3768 树脂的固化放热峰持续时间,可判断树脂固化周期为 3 h 左右。

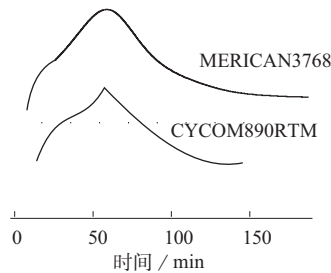


图 3 MERICAN3768 和 CYCOM890RTM 树脂恒温 DSC 曲线

表 1 为两种树脂的固化制度对比。MERICAN 3768 树脂在固化后呈棕红色,透明,固化特性与 CYCOM 890 RTM 树脂相似。

表 1 两种树脂固化制度对比

制度	MERICAN 3768 树脂	CYCOM 890 RTM 树脂
脱泡	$80^\circ\text{C}, 30 \text{ min}$	$80^\circ\text{C}, 30 \text{ min}$
注射温度 / 黏度	$80^\circ\text{C} / 0.3 \text{ mPa} \cdot \text{s}$	$90^\circ\text{C} / 0.25 \text{ mPa} \cdot \text{s}$
固化工艺	$180^\circ\text{C}, 3 \text{ h}$	$180^\circ\text{C}, 2 \text{ h}$

2.3 MERICAN 3768 树脂浸润特性分析

复合材料为多相材料,存在界面,因此在原材

料选择方面需要考虑材料界面相容性问题,以免零件固化成型后出现界面孔洞等问题^[15]。针对不同类型的纤维与树脂进行接触角测试,以评判树脂基体与碳纤维表面的浸润相容性,接触角越小,液体在固体表面接触面越大,浸润效果越好。测试结果如表 2 所示。可以看到, MERICAN3768 树脂对纤维界面的接触角略大于 CYCOM 890 RTM 树脂,据相关研究结果显示,影响浸润性的主要因素是纤维表面的上浆剂,以及在浸润过程中纤维和树脂基体界面存在的微小气泡。因此,相较于 CYCOM 890 RTM 树脂, MERICAN3768 树脂中可能含有的小分子挥发分含量要更高,并且,该树脂在注射固化过程当中存在异味较重的现象。尽管如此,该树脂与纤维间的浸润角仍然相对较小,界面浸润效果较好,这也说明了该树脂具备高浸润性的特点。

表 2 树脂纤维间浸润性

纤维厂家	MERICAN3768 树脂	CYCOM 890 RTM 树脂
上海石化	17.5°	7.9°
德国 SearTex	18.2°	10.2°

2.4 MERICAN 3768 树脂力学性能分析

表 3 示出 MERICAN 3768 树脂与 CYCOM 890 RTM 树脂力学性能对比。由表 3 可看到, MERICAN 3768 树脂的力学性能已经接近 CYCOM 890 RTM 树脂,伸强度和弯曲强度分别达到 75.5 MPa 和 155.3 MPa ,均高于 CYCOM 890 RTM 树脂,说明 MERICAN 3768 树脂固化度较高,分子量较大;并且,具备较好的脱泡特性,在完成固化后树脂的内部孔隙较少。但拉伸断裂伸长率较 CYCOM 890 RTM 树脂略低,这说明 MERICAN 3768 树脂的韧性稍差。两种树脂的拉伸、弯曲及层间剪切模量基本一致。总体来看,国产环氧树脂达到国外对照样品同等条件下的实测结果。

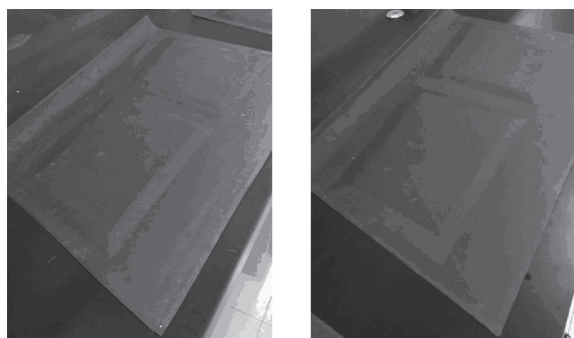
表 3 树脂力学性能对比

项目	树脂体系	
	MERICAN3768	CYCOM890RTM
拉伸强度 / MPa	75.5	64.4
拉伸弹性模量 / GPa	3.6	3.6
断裂伸长率 / %	4.46	5.27
弯曲强度 / MPa	155.3	135
弯曲弹性模量 / GPa	3.4	3.6
层间剪切模量 / GPa	1.30	1.32

2.5 MERICAN3768 树脂的 VARI 工艺应用

分别将 MERICAN3768 和 CYCOM 890 RTM 两种树脂采用 VARI 工艺成型进行某结构零件。该零件为前缘翘曲,后缘平直,呈开放式泡沫夹芯结

构,尺寸约为 $1\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 。采用后缘注射,前缘抽气的注射方案进行注射。在树脂浸润过程中发现,两种树脂的流动前锋均匀稳定,浸润时间约为 5 min ,成型零件如图4所示。零件表面无任何干斑,成型效果良好,无损检测表明层板区及夹芯区域无宏观缺陷存在,厚度测试结果显示后缘区域厚度公差 $\pm 8\%$,前缘区域厚度公差 $\pm 5\%$,夹芯区域厚度公差 $\pm 8\%$ 。



(a) (b)
a—CYCOM890RTM ; b—MERICAN 3768

图4 CYCOM890RTM 和 MERICAN3768 成型的零件

3 结论

MERICAN3768 环氧树脂体系具有理想的低黏度平台,较稳定的固化特性,并且和碳纤维表面具有较好的浸润性能,很符合液体成型树脂所需的“一长一快,两高四低”的工艺性能特点,并且,主要力学性能已达到国外同等树脂的水平,同时通过实际零件的 VARI 工艺制造验证,该树脂体系可用于复合材料结构件的液体成型制造。

参考文献

- [1] Gutowski T G. Advanced composites manufacturing[M]. New York:John Wiley & Sons Inc, 1997.
- [2] 王晓洁,梁国正,张炜,等. 高性能碳纤维表面分析及其力学性能研究[J]. 航空材料学报,2006,26(4):119-122.
Wang Xiaojie, Liang Guozheng, Zhang Wei, et al. Surface analysis of high property carbon fibers and study on mechanical properties[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(4):119-122.
- [3] 梁志勇,段跃新,林云,等. RTM 专用混合型树脂体系研究——反应特性与工艺特性研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料,2000(5):14-17.
Liang Zhiyong, Duan Yuexin, Lin Yun, et al. Study of mixed resin systems for resin transfer molding chemical reactive characterization and processing properties[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2000(5):14-17.
- [4] 张连旺,包建文,钟翔峙. VARI 工艺用海因环氧树脂性能研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料,2014(3):23-26.
Zhang Lianwang, Bao Jianwen, Zhong Xiangyu. Investigation on hydantoin epoxy resin system moulding by VARI[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2014(3):23-26.
- [5] 柴红梅,丁勇钢,胡学昌. VARI 用环氧树脂体系制备及性能研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料,2014(3):45-47.
Cai Hongmei, Ding Yonggang, Hu Xuechang. Preparation and properties of epoxy resin system for VARI[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2014(3):45-47.
- [6] 孙超明,张翠妙,谈娟娟,等. 国产 RTM 用碳纤维及环氧树脂基本性能研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料,2013(8):35-39.
Sun Chaoming, Zhang Cuimiao, Tan Juanjuan, et al. Study on domestic carbon fiber and epoxy resin for resin transfer molding[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2013(8):35-39.
- [7] 张书会. 风电叶片用环氧树脂力学行为研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料,2012(4):115-117.
Zhang Shuhui. Study on the mechanical behaviors in of epoxy resin for wind turbine blade[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2012(4):115-117.
- [8] 李艳菲,李敏,顾铁卓,等. 风电叶片用真空灌注型环氧树脂及其复合材料性能研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料,2012(4):109-114.
Li Yanfei, Li Min, Gu Yizhuo, et al. Study on the properties of epoxy resin and composites with vacuum assisted resin infusion molding for wind turbine blade[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2012(4):109-114.
- [9] 郑澎,张彦飞,赵贵哲,等. 风电叶片用环氧树脂固化动力学特性及力学性能的研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料,2011(3):8-11.
Zheng Peng, Zhang Yanfei, Zhao Guizhe, et al. The study of curing kinetic and mechanical properties of epoxy resin used for wind turbine blade[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2011(3):8-11.
- [10] 李小兵,孙占红,曹正华. 真空辅助树脂配套灌注配套基体树脂的制备及性能[J]. 热固性树脂,2006(1):4-7.
Li Xiaobing, Sun Zhanhong, Cao Zhenghua. Preparation and performance of matrix resin suited for VARI molding technology[J]. Thermosetting Resin, 2006(1):4-7.
- [11] 蒙秀青,张静,陈伟明,等. RTM 成型用高性能环氧树脂基体的研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料,2011(1):33-35.
Meng Xiuqing, Zhang Jing, Chen Weiming, et al. Study on high performance epoxy resin for resin transfer molding[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2011(1):33-35.
- [12] 邓杰,艾涛,成敏苏. 中温固化、高温使用树脂体系研究[J]. 粘接,2007,28(5):4-7.
Deng Jie, Ai Tao, Cheng Minsu. Study on resin system cured at moderate temperature and applied at high temperature[J]. Adhesion in China, 2007, 28(5):4-7.
- [13] 邓杰,刘建超. 一种适合于树脂传递模塑工艺的树脂基体及其碳纤维复合材料性能[J]. 高科技纤维与应用,2005,30(5):9-11.
Deng Jie, Liu Jianchao. Study on properties of matrix resins and carbon fiber composites for resin transfer molding[J]. Hi-tech Fiber & Application, 2005, 30(5):9-11.

由于斜齿轮塑件在脱模过程中迫使斜齿轮型腔镶块Ⅰ和斜齿轮型腔镶块Ⅱ“逆向”旋转,再加上旋转时的运动惯性,会导致两斜齿轮型腔镶块中的斜齿齿槽在合模对拼时产生错位。在斜齿轮型腔镶块Ⅰ的外侧安装有两个定位镶块,分型面Ⅳ合模时,定位镶块上的弧面13-1(见图6c)先与斜齿轮型腔镶块Ⅱ外侧对应开设的定位槽斜面22-1(见图6b)接触,借助向心推力轴承Ⅰ和Ⅱ的作用,斜齿轮型腔镶块Ⅰ和斜齿轮型腔镶块Ⅱ一边旋转一边合拢,直至定位镶块上的斜面13-2(见图6c)与斜齿轮型腔镶块Ⅱ外侧对应开设的定位槽斜面22-1接触,迫使两段斜齿轮型腔镶块(件22、件39)的斜齿齿槽对拼时对准位置,确保斜齿轮塑件的成型精度。

最后所有零部件回到原始成型位置,准备下一个注射成型循环。

3 结语

对称反向斜齿轮的注射成型是一个较为复杂的技术,其中成型工艺条件、成型收缩的修正与补偿、成型零件的加工工艺、模具结构及功能等是控制和保证斜齿轮成型质量的关键,笔者提出的模具设计方案经过实践检验,具有如下积极的效果:

(1) 分别采用两部分斜齿轮型腔成型两段旋向相反的斜齿轮,通过顺序定距分型脱模,有效解决了两部分斜齿轮型腔旋转方向相反而导致的干扰问题。向心推力轴承的使用,有助于通过斜齿轮型腔的逆向旋转实现斜齿轮塑件在脱模时沿着轴线方向与对应成型的斜齿轮型腔分离而脱出。

(2) 两部分斜齿轮型腔镶块通过定位镶块进行复位定位,确保旋向相反的两段斜齿齿槽合模对拼时对准位置。前后两部分斜齿轮型腔间的锥面配合保证了两段斜齿轮的同轴度。

(3) 模具功能完善,动作可靠,多分型面顺序定距分型实现了浇注系统凝料和斜齿轮塑件的自动脱模,提高了塑件的成型效率和模具的使用寿命,从而拓展了对称反向斜齿塑料传动轮(即人字齿轮)的应用。

参考文献

- [1] 郝瑞贤,李元宗. 对我国塑料齿轮发展的一些思考[J]. 工程塑料应用,2007,35(3):71-73.
Hao Ruixian, Li Yuanzong. Some considerations on development of plastic gear in china[J]. Engineering Plastics Application, 2007, 35(3):71-73.
- [2] 江昌勇,姜伯军,李丹虹,等. 精密小模数塑料斜齿轮成型模具开发技术展望[J]. 塑料科技,2016,44(7):82-85.
Jiang Changyong, Jiang Bojun, Li Danhong, et al. Technology outlook in mould development of precision small module plastic helical gear[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(7):82-85.
- [3] Smith Z, Sheridan D. Gear molding:Where it's headed[J]. Plastics Technology, 2006(3):66-69.
- [4] 王清辉,李治平. 人字齿轮及其加工方法[J]. 机械工程师, 2015(7):234-235.
Wang Qinghui, Li Zhiping. Herringbone gear and its manufacturing method[J]. Mechanical Engineer, 2015(7):234-235.
- [5] 屈华昌. 斜齿轮塑件注射模的脱模机构设计[J]. 模具技术, 2002(5):29-30.
Qu Huachang. Design of injection mould demoulding mechanism for helical gear plastic parts[J]. Die and Mould Technology, 2002(5):29-30.
- [6] 梅永亮. 斜齿轮注塑模脱模机构设计[J]. 制造技术与机床, 2013(5):32-35.
Tao Yongliang. The helical gear demoulding mechanism design[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2013(5):32-35.
- [7] 王逸群. 人字齿轮注射模设计[J]. 模具工业, 1997(3):47-48.
Wang Yiqun. Design of injection mould for herringbone gear[J]. Die & Mould Industry, 1997(3):47-48.
- [8] 乔女. 人字齿注塑模设计[J]. 轻工机械, 2013, 31(4):76-78.
Qiao Nyu. Injection mold design for double helical gear[J]. Light Industry Machinery, 2013, 31(4):76-78.
- [9] 江昌勇,沈洪雷. 塑料成型模具设计[M]. 北京:北京大学出版社, 2012.
Jiang Changyong, Shen Honglei. Design of plastic molding mold[M]. Beijing:Peking University Press, 2012.
- [10] 赵世友. 塑料斜齿轮注塑模具设计与分析[J]. 塑料科技, 2010, 38(5):77-79.
Zhao Shiyu. Design and analysis of injection mould for plastic helical gear[J]. Plastics Science and Technology, 2010, 38(5):77-79.
- [15] 李帅. 液体成型用环氧树脂体系制备及与碳纤维匹配性研究[D]. 北京:北京化工大学 2014:11-14.
Li Shuai. Preparation of epoxy resin system used in liquid composite molding and research for the matching performance with carbon fibers[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology 2014:11-14.

(上接第77页)

- [14] 王向茹. 适用于 VARTM 工艺的树脂性能研究[D]. 天津:天津工业大学, 2012:10-11.
Wang Xiangru. Research on the properties of resin used for VARTM technology[D]. Tianjin:Tianjin Polytechnic University, 2012:10-11.