

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.12.011

POM 匀胶托盘的优化设计^{*}

魏存露¹, 花国然¹, 王强²

(1. 南通大学机械工程学院, 江苏南通 226019; 2. 南通大学电子信息学院, 江苏南通 226019)

摘要:以广泛应用于旋涂功能薄膜工艺中的聚甲醛(POM)匀胶托盘为研究对象,基于数值仿真及实验研究,对现有POM托盘工作中的缺陷进行了分析,结果表明,螺旋托盘基片因发生翘曲形变而易使胶体渗入匀胶机,腔式托盘基片形变量过大。基于分析结果,对现有匀胶托盘进行了优化,提出一种腔式花洒型托盘,其通过过盈配合,在腔式托盘上装配花洒型端盖,数值模拟结果表明,腔式花洒型托盘在保持腔式托盘阻胶结构的基础上,基片最大形变量为2.7 μm ,与螺旋托盘相比降低了3.9 μm 左右,且基片边缘处的翘曲形变较小,为0.17 μm 左右;借助3D打印技术,对优化的托盘进行快速成型制造,并进行了实验分析,实验结果表明,基片形变测量值与数值模拟值变化规律吻合,相同位置的形变值误差最大为9.8%左右,说明仿真结果可靠。

关键词:功能薄膜;聚甲醛匀胶托盘;优化设计;数值模拟;快速成型

中图分类号: TQ326.51; TQ320.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)12-0058-05

Optimal Design of POM Spin Coating Pallets

Wei Cunlu¹, Hua Guoran¹, Wang Qiang²

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. School of Electronic and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Polyformaldehyde (POM) spin coating pallet was taken as research object, which widely applied in spin coating film process. For the defects of existing POM spin coating pallet, the numerical simulation and experimental studies were carried out, the results indicate that substrate warpage deformation makes photoresist penetrate into spin coater during the use of the spiral spin coating pallet, and the cavity spin coating pallet substrate deformation is too large. Based on the analysis result, the shower cavity spin coating pallet is put forward and it is constituted by cavity spin pallet and shower cavity spin coating pallet end cover through interference fit, the numerical simulation results show that shower cavity spin coating pallet could maintain cavity spin coating pallet resist photoresist effect and substrate maximum deformation is about 2.7 μm , compared with the spiral spin coating pallet, it decreases by about 3.9 μm , and the warpage deformation at the substrate edge is small, about 0.17 μm . The shower cavity spin coating pallet is manufactured based on 3D printing technology, experiments analysis were carried out, the results show that the substrate deformation is good agreement with the change rule of the simulation value, and the maximum error of the same position deformation value is about 9.8%, which indicates that the simulation results are reliable.

Keywords: function film; polyformaldehyde spin coating pallet; optimal design; numerical simulation; rapid prototyping

功能薄膜作为发展信息技术、生物技术以及国防建设重要的表面材料及器件,其制备方法有很多,如喷涂法、电沉积法以及旋涂法等^[1],其中旋涂法凭借其薄膜厚度可控、设备结构简单、易于操作以及优良的性价比而广泛应用于微电子技术、生物学以及医学等领域^[2];作为旋涂法制备功能薄膜的重要工艺设备之一的匀胶托盘,在旋涂工艺中通过真空吸力吸附住薄膜基片,使基片随主轴一起高速旋转,因此托盘的结构特点对被吸附基片的形变具有重要的影响,而基片形变将影响其表面形貌和平面度,从而影响旋涂薄膜的均匀性。

因涂敷材料以及旋涂过程中高速旋转的特点,要求制备匀胶托盘的材料需具有耐化学药品性、力学性能优良等特性。在众多的工程塑料中,聚甲醛(POM)凭借其力学强度高、耐疲劳性以及耐化学药品性等优异的材料性能,被广泛运用于汽车、机械

^{*} 江苏省科技成果转化专项资金(BA2013099),南通市重大科技创新专项项目(XA2013001),江苏省研究生培养创新工程项目(KYLX15_1315),南通大学研究生科技创新计划(KYC15004)

联系人:花国然,博士,教授,主要研究方向为特种加工、海洋重型装备

收稿日期:2016-10-11

及电子等行业^[3-4]。此外,POM 作为目前世界上五大通用工程塑料之一,因其力学性能最接近金属材料,又有“夺钢”,“超钢”之称^[5-6];目前,POM 已可部分取代铜、铸铝以及铝等金属材料^[7]。因此现有匀胶托盘广泛采用力学强度高且具有耐腐蚀性的 POM 材料。

笔者针对现有 POM 匀胶托盘在旋涂工艺中存在的问题,借助数值计算与快速成型技术,完成对 POM 匀胶托盘结构的优化创新设计,并通过旋涂实验及基片形变验证实验,保证了新产品结构设计的合理性。通过三维建模→数值分析→快速成型→试样验证,实现产品优化设计的过程,缩短了产品研发周期,为工程塑料产品快速经济地创新优化设计提供了一定的参考价值。

1 匀胶托盘的需求分析

旋涂法的工作原理为:基片在 POM 匀胶托盘真空吸力作用下随匀胶机主轴一起高速旋转,使得滴在其表面的胶体在离心力和表面张力的共同作用下实现胶体的薄膜化和均匀化。目前,典型的旋涂工艺包括四个步骤:滴胶、加速旋转、匀速旋转以及溶剂挥发^[8]。近年来,随着旋涂工艺理论不断完善,使得功能薄膜技术飞速发展,微米级均匀胶体的旋涂对旋涂工艺提出了更高的要求^[9];同时这也对匀胶托盘提出了吸力大,基片形变量小的性能要求。

2 现有 POM 匀胶托盘存在的问题

2.1 螺旋式 POM 匀胶托盘

为满足基片高速旋转时离心力要求,现有 POM 匀胶托盘大多采用螺旋结构,如图 1 所示,其通过与吸片口相通的螺旋状沟槽结构,增大与基片的接触面积,从而增大了基片所受真空吸附力。

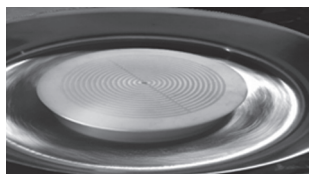
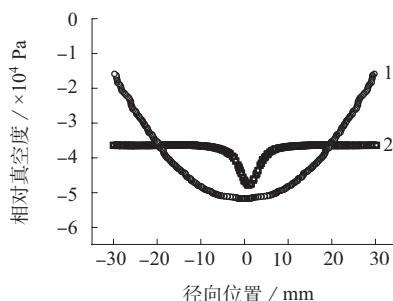


图 1 螺旋式 POM 匀胶托盘结构

采用 ANSYS Workbench 的流固耦合模块,在实际工况下,对匀胶托盘旋涂工艺过程进行数值计算分析。设定旋涂的工作环境为标准大气压、恒温和恒湿;压力进口条件为环境气压,出口条件满足现有匀胶机真空抽气泵的工作能力^[10],分析结果如图 2 所示。从图 2 可知,螺旋式托盘在吸片口周围处取得的相对真空度为 -5.1×10^4 Pa,在径向距离最远处取得相对真空度为 -1.5×10^4 Pa,该真空度分

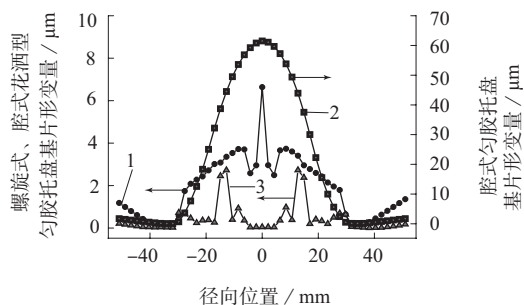
布使螺旋式匀胶托盘在径向方向形成 3.6×10^4 Pa 的真空度梯度差,螺旋式匀胶托盘的真空度分布特点易使基片所受耦合力分布不均匀。



1—螺旋式 POM 匀胶托盘;2—腔式 POM 匀胶托盘

图 2 不同真空度分布下螺旋式、腔式 POM 匀胶托盘真空度分布曲线

设定基片材料为 0.5 mm 厚的硅片,其弹性模量为 130 GPa,泊松比为 0.28,密度为 2.32 g/cm^3 ,基片形变情况如图 3 所示。从图 3 可看出,螺旋式匀胶托盘上的基片形变最大值在中心处,为 $6.6 \mu\text{m}$ 左右,且因基片所受耦合力不均匀,而在边缘处发生翘曲形变,翘曲量为 $1.2 \mu\text{m}$ 左右。基片的翘曲形变使得其与托盘之间的接触间隙增大,在旋涂工艺过程中,胶体会扩散至基片背部,在真空吸力的作用下,沿相通螺旋沟槽易被吸入匀胶机中,如图 4 所示。胶体的渗入不仅会造成匀胶机真空吸力不足,形成旋涂过程中的“飞片”现象;而且会有部分胶体渗入主轴,影响旋转主轴精度和重复性,从而降低匀胶机的有效使用寿命。



1—螺旋式 POM 匀胶托盘;2—腔式 POM 匀胶托盘;

3—腔式花洒型 POM 匀胶托盘

图 3 不同径向位置下三种匀胶托盘基片的形变曲线



图 4 胶体渗入匀胶机

2.2 腔式 POM 匀胶托盘

为减小胶体的渗入量,提高匀胶机的有效使用

寿命,专利^[11]提出带有储胶槽的腔式匀胶托盘,如图5所示。腔式匀胶托盘工作原理为:当扩散至基片背部的胶体进入真空腔时,胶体在重力的作用下沉积在储胶槽内,从而阻止胶体渗入真空抽气室。由于腔式托盘的真空吸片口低于承片台一定距离,这使得托盘整个腔内均可成为真空负压腔。由图2可看出,相同工况下,腔式匀胶托盘相对真空度分布在 $-3.6 \times 10^4 \sim -4.7 \times 10^4$ Pa之间,相对于螺旋匀胶托盘在径向方向形成的真空度梯度差,其腔内真空度分布相对均匀,该真空度分布使基片在耦合区受力相对均匀。

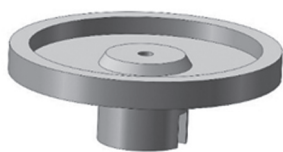


图5 腔式 POM 匀胶托盘

结合图3可看出,相同工况下,腔式匀胶托盘上的0.5 mm厚硅基片在耦合区的形变量最大值为61.5 μm ,远远大于螺旋托盘的6.6 μm 左右的形变量。这是由于腔式匀胶托盘的结构特点使得基片在耦合区没有支撑而完全处于悬空状态,从而在真空负压的作用下,基片发生下凹形变,过大的下凹形变将影响旋涂工艺性能指标,使基片形成旋涂的薄膜中间厚两边薄的产品缺陷,造成废品率增加。

3 腔式 POM 匀胶托盘的优化设计

3.1 优化设计与结构分析

基于以上分析结果,对现有腔式匀胶托盘进行结构优化,优化目的为:保持腔式托盘阻胶特点的同时,减小基片的形变量。因此提出一种腔式花洒型匀胶托盘,其采用过盈配合的方式,通过花洒型托盘端盖与腔式匀胶托盘装配而成,如图6所示。

由图2可知,腔式 POM 匀胶托盘腔内真空度分布特点为:除真空吸口处外,各处真空度分布均匀;在旋涂过程中基片所受真空吸附力为真空度与有效吸附面积的乘积。因此在托盘的优化过程中,为避免基片在吸气口周围因真空度过大而产生形变突变,在托盘端盖面设置中心圆面(见图6),中心圆面不仅可避免基片中心因吸力过大而产生的下凹形变,同时可有效地阻止不慎滴落的胶体直接渗入真空吸气口,从而增强腔式托盘的阻胶性能;为使基片受力均匀,减小基片形变,端盖面采用花洒结构,其不同圆周面上设有圆弧槽,圆弧槽交错放置,即

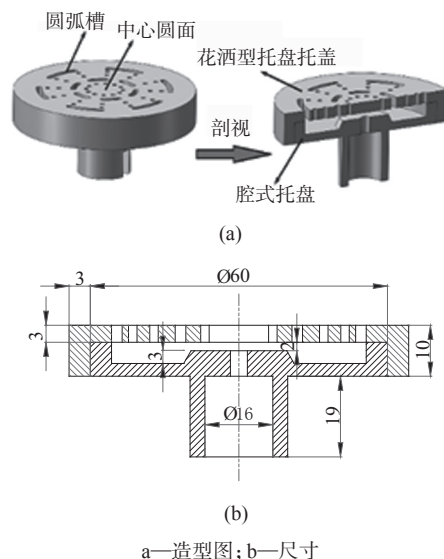


图6 腔式花洒型 POM 匀胶托盘

可增大与基片有效吸附面积,又可有效阻止从各方向渗入的胶体进入真空吸口区。

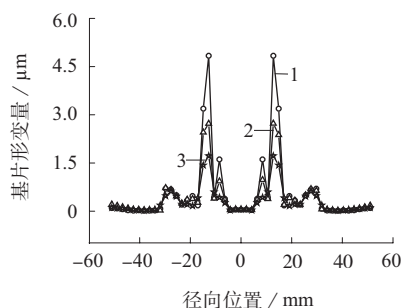
3.2 腔式花洒型 POM 匀胶托盘数值分析

(1) 腔式花洒型 POM 匀胶托盘对基片形变的影响。

相同工况下,0.5 mm厚硅基片的形变情况如图3所示。从图3可看出,与现有托盘相比,腔式花洒型托盘基片形变量最小,其最大形变值为2.7 μm 左右,相对于螺旋式托盘,基片最大形变量降低了3.9 μm 左右,且在基片边缘无支撑处,即当径向位置大于35 mm时,由于基片受力均匀,翘曲形变很小,仅为0.17 μm 左右。螺旋式托盘基片在真空吸气口处发生明显的形变突变,最大形变量为6.6 μm ,这是由于托盘真空吸片口处的真空度较低,基片所受耦合压力较大所致;而腔式花洒型匀胶托盘由于在吸气口处设有中心圆面,因此其基片在中心处的形变值较小,为0.1 μm 左右,从而减少了因中心处聚集过量胶体而产生的产品废品率。

(2) 腔式花洒型 POM 匀胶托盘对不同厚度基片形变的影响。

图7为相同工况下,厚度分别为0.3,0.5,1 mm的硅基片形变情况。从图7可知,基片的形变量与厚度有关,厚度越小形变量越大,基片均在径向尺寸15 mm左右处,即圆弧槽处取得最大形变值;同时可看出,在基片边缘处,不同厚度基片翘曲形变量均很小,均小于0.2 μm 。从数值试验结果可看出,对于腔式花洒型匀胶托盘,三种厚度基片的形变量最大值均小于5 μm ,因此可满足不同厚度基片的旋



基片厚度: 1—0.3 mm; 2—0.5 mm; 3—1.0 mm

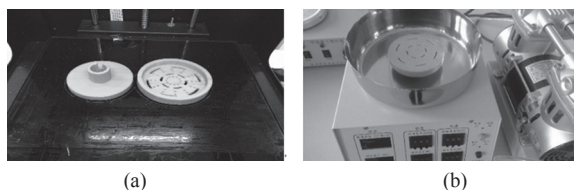
图7 不同径向位置下三种基片厚度的腔式花洒型匀胶托盘基片的形变曲线

涂要求。

4 腔式花洒型 POM 匀胶托盘的快速成型制造与实验研究

快速成型技术通过对产品三维 CAD 模型进行分层离散,按离散后的平面几何信息逐层加工堆积原材料,直到生成实体模型^[12];通过快速制造的原型可用于进行产品快速展示、设计验证、功能测试、设计修改等,有利于提高新产品开发的一次成功率,缩短研发周期,降低研发成本^[13]。

采用北京太尔时代科技有限公司的 Up Plus 2 型 3D 打印机对腔式花洒型托盘进行快速成型制造。将 Solid Works 中完成的 CAD 模型以 stl 的格式导入快速成型机中,进行快速成型制造^[14];将打印好的腔式花洒型托盘在中科院研制的 KW-4A 匀胶机上进行旋涂实验,如图 8 所示,实验结果表明,腔式花洒型 POM 匀胶托盘可以很好地满足旋涂性能要求。

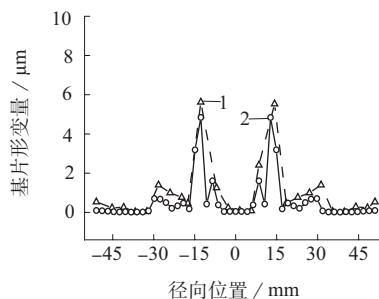


a—快速成型制造实体模型; b—KW-4A 匀胶机上实验验证

图8 快速成型制造与实验验证

采用西安爱德华测量设备有限公司生产的 MQ8106 型高精度三坐标测量机 (CMM),对实际工作下基片形变量进行测量^[15]。测量时,首先对无吸力作用下的基片坐标进行取点测量,作为相对坐标点,并开启三坐标测量机自学习模式;为使测量结果准确可靠,从基片边缘沿不同径向方向进行等距取点测量,多次测量取平均值;然后采用三坐标自学习功能对吸片下基片形变进行踩点测量。图 9 示出 0.3 mm 厚硅基片形变测量结果。从图 9 可知,

测量值最大形变量为 $5.62 \mu\text{m}$,基片形变测量值与数值计算值变化规律基本吻合,相同位置点上的测量值与数值计算形变值误差最大为 9.8% 左右,说明仿真结果可靠。



1—CMM 测量值; 2—数值计算值

图9 0.3 mm 厚硅基片形变的 CMM 测量值与数值计算值对比分析

5 结论

(1) 通过 ANSYS Workbench 对现有 POM 匀胶托盘 0.5 mm 厚硅基片进行了数值计算分析,螺旋式 POM 匀胶托盘易使基片因受力不均匀发生翘曲形变,翘曲量为 $1.2 \mu\text{m}$ 左右,基片的翘曲形变使胶体易渗入匀胶机中,降低其有效使用寿命;腔式 POM 匀胶托盘上的基片在耦合区由于处于悬空状态而使基片最大形变量达 $61.5 \mu\text{m}$,这使基片的旋涂性能指标变差。

(2) 腔式花洒型 POM 匀胶托盘可适用于不同厚度的基片,在保证腔式托盘阻胶结构特点的同时,降低了基片形变量,0.5 mm 厚硅基片最大形变量仅为 $2.7 \mu\text{m}$,且在基片边缘处的翘曲形变量小于 $0.2 \mu\text{m}$ 。

(3) 借助 3D 打印技术,对优化设计的腔式花洒型 POM 匀胶托盘进行快速成型制造,相应的旋涂实验与 CMM 测量结果表明,腔式花洒型托盘可以满足匀胶机高速旋涂要求,基片形变测量值与仿真值变化规律吻合,相同位置形变值最大误差为 9.8% 左右,说明数值分析结果可靠。

参考文献

- [1] Norrman K, Ghanbari-Siahkali A, Larsen N B. Studies of spin-coated polymer films[J]. Annu Rep Prog Chem Sect C:Phys Chem, 2005, 101:174-201.
- [2] 王东,刘红缨,贺军辉,等. 旋涂法制备功能薄膜的研究进展 [J]. 影像科学与光化学, 2012, 30(2):91-101.
Wang Dong, Liu Hongying, He Junhui, et al. The progress of research on functional thin films manufactured by spin coating method[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2012, 30(2):91-101.
- [3] 朱金础,黄雨. 中国聚甲醛产业发展的深思和展望 [J]. 塑料工业,

- 2014,42(10):5-8.
- Zhu Jinchu, Huang Yu. Ponder and prospects of chinese POM industry[J]. China Plastics Industry, 2014,42(10):5-8.
- [4] 狄清林,席学军,白杨. 聚甲醛的应用改性[J]. 广州化工,2015,48(13):23-24.
- Di Qinglin, Xi Xuejun, Bai Yang. Application of modified polyoxymethylene[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 48(13):23-24.
- [5] 程晔华,李云勇,刘莹,等. 国内外聚甲醛产品的开发及应用[J]. 工程塑料应用,2009,37(9):59-64.
- Cheng Yehua, Li Yunyong, Liu Ying, et al. Development and application of POM product at domestic and overseas [J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(9):59-64.
- [6] 邵永涛,徐泽夕,曹志奎,等. 我国聚甲醛产业的现状[J]. 广州化工,2012,40(12):65-68.
- Shao Yongtao, Xu Zexi, Cao Zhikui, et al. The industry status of polyoxymethylene in china[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2012,40(12):65-68.
- [7] 姚亚峰,徐泽夕,邱生见,等. 浅谈聚甲醛的应用[J]. 塑料工业, 2012,40(5):13-16.
- Yao Yafeng, Xu Zexi, Qu Shengjian, et al. Discussion on the application of POM [J]. China Plastics Industry, 2012,40(5):13-16.
- [8] 刘学平,郑钢. 光刻旋涂中的膜厚分析与数值模拟[J]. 中国机械工程,2015,26(6):733-736.
- Liu Xueping, Zheng Gang. Analysis and numerical simulation of film thickness of photoresist spin coating[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(6):733-736.
- [9] 向东,何磊明,瞿德刚,等. 半导体制造中涂胶工艺的研究进展[J]. 中国机械工程,2012,23(3):354-361.
- Xiang Dong, He Leiming, Qu Degang, et al. Development of coating of photoresist in semiconductor manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(3):354-361.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis principle and application of CFD software[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2004.
- [11] 南通大学. 防止胶吸入的匀胶机托盘:中国,0685767.8[P].2013-12-16.
- Nantong university. Prevent the photoresist suction spin coating pallet:CN,0685767.8[P].2013-12-16.
- [12] Ezair B, Massarwi F, Elber G. Orientation analysis of 3D objects toward minimal support volume in 3D-printing[J]. Computers & Graphics, 2015, 51:117-124.
- [13] 周志民,李晓艳. 快速制造技术在模具制造中的应用[J]. 工程塑料应用,2004,32(9):58-61.
- Zhou Zhimin, Li Xiaoyan. Applications of rapid manufacturing technologies in mould making[J]. Engineering Plastics Application, 2004, 32(9):58-61.
- [14] Gittard S D, Roger N, Jason L. Rapid prototyping of scaphoid and lunate bones[J]. Biotechnology Journal, 2009, 4(1):129-134.
- [15] 汪兴兴,倪红军,朱昱,等. 单件小批量 PCB 塑料盒参数化设计及快速原型制造[J]. 工程塑料应用,2016,44(4):61-64.
- Wang Xingxing, Ni Hongjun, Zhu Yu, et al. Parametric design and rapid prototyping of plastic box for small batch PCB[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(4):61-64.
- (上接第 47 页)
- [9] 吴金章,宣银华. PEG 可溶芯在熔模精铸中的应用[J]. 宇航材料工艺,1997,27(1):60-61.
- Wu Jinzhang, Xuan Yinhua. The application of the soluble core using PEG in revestment precision casting[J]. Aerospace Materials & Technology, 1997, 27(1):60-61.
- [10] 杜志龙,邱桂斌,闵小俊. 新型水溶芯的研制[J]. 塑料工业, 2004,32(11):55-56.
- Du Zhilong, Qiu Guibin, Min Xiaojun. Investigation of neo-water-soluble core formulation for investment Casting[J]. China Plastics Industry, 2004, 32(11):55-56.
- [11] 马洪芳,刘志宝. 金属注射成型用水溶性胶粘剂的研究. 化学与粘合[J],2003,39(5):228,248.
- Ma Hongfang, Liu Zhibao. Research on water-soluble binders used in metal injection molding[J]. Chemistry and Adhesion, 2003, 39(5):228, 248.
- [12] 魏正方,曾黎明. 水溶性芯模胶粘剂的研究进展[J]. 粘接,2007,28(1):58-60.
- Wei Zhangfang, Zeng Liming. Research progress of water borne adhesives for core-mould[J]. Adhesion, 2007, 28(1):58-60.
- [13] 魏正方,曾黎明,王晶. 新型水溶性芯模材料的研制[J]. 粘接, 2007,28(2):13-15.
- Wei Zhengfang, Zeng Liming, Wang Jing. Development of a new water-soluble core-mould material[J]. Adhesion, 2007, 28(2):13-15.
- [14] 张胜利,韩建平,程勇,等. 大长径比壳体芯模防裂技术[J],玻璃钢/复合材料,2013(3):84-88.
- Zhang Shengli, Han Jianping, Cheng Yong, et al. Crack preventing technology of the large L/D ratio case mandrel[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(3):84-88.
- [15] 高芳亮. RTM 工艺用水溶性芯模材料的制备与性能[D]. 长沙:国防科学技术大学,2008.
- Gao Fangliang. Preparation and properties of water-soluble core materials applied for RTM[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2008.
- [16] 赵学平,陈孝鹏,郭志兴,等. 一种纤维缠绕壳体成型用水溶性芯模材料及制备方法:中国,201210312711.3[P].2015-01-14.
- Zhao Xueping, Chen Xiaopeng, Guo Zhixing, et al. Water-soluble core mould material that was used to form fiber winding shell and it's preparation method:CN,201210312711.3[P].2015-01-14.