

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.12.008

# 水溶性砂芯模材料在成型复合材料壳体中的应用

孟祥武,郑志才,孙士祥,陈艳,王强,王尚,常燕,安运成,王存铎

(中国兵器工业集团第五三研究所,济南 250031)

**摘要:**以聚乙烯醇(PVAL)水溶液与聚乙烯吡咯烷酮(PVP)水溶液的混合溶液作为基体材料,以石英砂为增强材料,经过高温烘干工艺制作了一种水溶性砂芯模材料,分析了影响其水溶性的因素并对各因素设置不同的水平,通过正交试验发现,PVP水溶液的质量浓度为38%且占混合溶液的质量分数为60%、胶砂质量比为0.08时,制作的砂芯模水溶性最好,在室温条件下经过水的冲刷可快速溃散。为解决金属模具成型小开口、大长径比复合材料壳体造成的脱模困难、模具设计复杂的缺点,将研制的水溶性砂芯模材料应用于某复合材料壳体的成型,成型后的壳体其爆破强度、环向应变、容器特性指数与金属模具成型的复合材料壳体相差不大,符合使用要求。

**关键词:**聚乙烯醇水溶液;聚乙烯吡咯烷酮水溶液;水溶性砂芯模材料;壳体成型;应用

**中图分类号:**TQ050.4+3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2016)12-0043-05

## Application of Water Soluble Core Material in Molding a Composite Case

Meng Xiangwu, Zheng Zhicai, Sun Shixiang, Chen Yan, Wang Qiang, Wang Shang, Chang Yan, An Yuncheng, Wang Cunduo  
(Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China)

**Abstract :** Using mixture aqueous solution of polyvinyl alcohol (PVAL) and polyvinylpyrrolidone (PVP) as matrix material , quartz sand as the reinforced material, a kind of water soluble core material that was used to mold a composite case through drying process at high temperature was produced, the influencing factors of water soluble property were analysed, and different levels were also set according to the influencing factors. Through orthogonal experiment, when the mass concentration of PVP aqueous solution is 38%, it's mass fraction of mixed solution is 60%, the ratio between matrix material and reinforced material is 0.08, the core material's water soluble property is best, it could be collapsed quickly through water washing at room temperature. In order to solve the problem of demoulding and complex designing as to metal mold, this water soluble core material was applied to molding a composite case which had small opening and large length-diameter ratio, the properties of burst strength, circumferential strain, vessel characteristic index are similar to the composite case which is molded by metal mold, so it satisfied the requirement of use.

**Keywords :** polyvinyl alcohol water solution ; polyvinylpyrrolidone water solution ; water soluble core material ; case molding ; application

在制造树脂基复合材料制品过程中,通常选用金属材料作为模具材料,因为金属材料具有高的热导率和良好的刚度,而且金属材料可以加工出良好的表面粗糙度,制造出的复合材料制品也具有较好的表面粗糙度<sup>[1]</sup>。然而对于结构复杂的异型复合材料制品,采用金属模具就具有一定的局限性,例如,复杂封闭型腔、出口小、内腔大或者不允许有拔模斜度的制件,如果采用传统的金属模具,就需要将模具多块组合或者将复合材料制品分割成多块分别制造后粘接在一起,这样不仅使制造过程复杂化、制造周期延长、成本大幅提高,而且复合材料制品脱模也异常困难<sup>[2-3]</sup>。对于以纤维缠绕为重要应用方式成型的复合材料壳体类制品<sup>[4-8]</sup>,因其一般具有大长径比、小开口的特点,利用金属模具成型也面临着同样

的问题。

针对以上问题,人们开发了水溶性芯模材料,它具有良好的耐温性,在复合材料制造领域正逐步得到应用<sup>[9-11]</sup>,魏正方等<sup>[12-13]</sup>总结了目前制作水溶性芯模用基体材料,主要有天然类水溶性基体材料、合成类水溶性基体材料两大类,并采用磷酸酯淀粉作为基体材料,采用玻璃微珠和青砂作为填料制备出了压缩强度约为10 MPa的水溶性芯模材料,当在80℃水中溃散时,水溶速率为0.1 g/min,并研究了填料种类、固相体积分数对坯体压缩强度和水溶性的影响规律。该体系的缺点是室温下坯体水溶

联系人:孟祥武,工程师,硕士,主要从事复合材料壳体成型工艺研究

收稿日期:2016-09-23

溃散性缓慢,需要在加热条件下才能进行。张胜利等<sup>[14]</sup>利用水溶性石膏芯模成型了大长径比复合材料壳体,但其缺点是石膏脆性较大,在成型过程中表面石膏层由于缠绕惯性力容易出现破裂。因此,天然类水溶性基体材料由于其水溶性较差,制作的芯模稳定性差,大量使用其成本也不菲,使之在生产应用中受到了一定的限制<sup>[15]</sup>。

笔者以工业化大量生产且水溶性较好的合成类基体材料为出发点,将两种合成类水溶性基体材料聚乙烯醇(PVAL)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)混合使用,充分利用PVAL制作的砂芯模具有良好的韧性及PVP制作的砂芯模具有良好的水溶性的特点<sup>[16]</sup>,并通过正交试验,找到了影响水溶性各因素的最佳水平组合,研制了一种水溶性较好的芯模材料,并将其成功应用于某复合材料壳体的成型。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PVAL: 17-88型,山西三维集团股份有限公司;

PVP: K30型,江阴嘉丰化工有限公司;

石英砂: 粒径分别为2.00, 0.84, 0.59, 0.42 mm, 潍坊市宜晓石英砂有限公司;

环氧树脂(EP): TDE-85: 天津晶东化学复合材料有限公司;

海因树脂: MHR-070: 无锡美华化工有限公司;

改性液体芳香胺: 自制;

碳纤维: T700, 日本东丽公司。

### 1.2 主要仪器和设备

钢制三联模具: 40 mm × 40 mm × 160 mm, 河北北方建筑仪器制造有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱: DHG-9140A型, 巩义市予华仪器有限公司;

增力电动搅拌机: JD-50D型, 上海标本模型厂;

普通电子天平: 最小分度值0.1 g, 福州科迪电子科技有限公司;

调温电热套: KDM型, 加热容量3 L, 山东甄诚光明仪器有限公司;

数控龙门纤维缠绕机: SKLCR50/500型, 哈尔滨工业大学;

旋转干燥固化烘箱: JDXGH型, 淄博鑫火工贸有限公司。

### 1.3 试样制备

水溶性砂芯模试样制备工艺流程如图1所示。

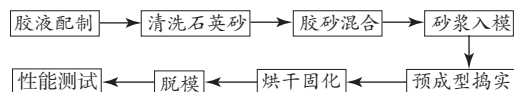


图1 水溶性砂芯模试样制备工艺流程

#### (1) 胶液配制。

首先将称量好的PVAL放入烧杯中,加入按比例称量好的水,充分溶胀10 h后,在电热套加热作用下用电动搅拌机搅拌使其溶解,然后在另一烧杯中称取PVP,加入按比例称量好的水,用玻璃棒搅拌使其溶解,最后按相应配比将以上两种基体材料混合。

#### (2) 清洗石英砂。

按照规定的清洗次数清洗石英砂,然后放入100℃电热恒温鼓风干燥箱中,将其中水分烘除,待用。

#### (3) 胶砂混合。

称量以上清洗且干燥后的石英砂于烧杯中,按一定的胶砂配比称量基体材料,然后将两者充分混合均匀。

#### (4) 砂浆入模。

首先清除模具中的杂质,然后在盛放砂浆的内模腔涂抹脱模剂,最后将混合均匀的砂浆用铲子轻轻放入图2示出的钢制三联模具中。

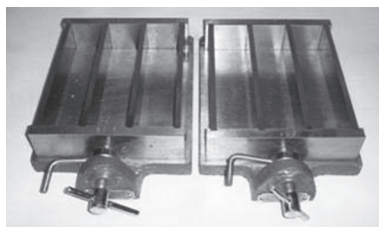


图2 砂芯模试样模具

#### (5) 预成型捣实。

将放入模具中的砂浆用工具捣实,为使芯模材料内部各处力学性能均匀一致,采用两次装填捣实的方法,第一次填装时将砂浆均匀倒至模具3/4处,随着捣实的进行,捣实后的砂浆高度通常会降至模腔的2/3处,最后一次填装时,装填砂浆至高度高于模具上表面1 cm处,用工具继续捣实后,用刮板将模具上表面的砂浆刮去抹平。

#### (6) 烘干固化。

将装填好砂浆的模具放入恒温鼓风干燥烘箱中烘干固化,固化温度参考复合材料壳体固化时的最高温度(160℃),时间以模具的质量不发生变化(4 h)为宜。

#### (7) 脱模。

将烘干固化后的模具冷却至室温,轻轻从模具中取出试样,将试样不平整处轻轻用锉刀挫平整,最后对测试试样进行力学性能测试和水溶性能测试,试样如图3所示。



图3 砂芯模试样

#### 1.4 性能测试

##### (1) 力学性能。

水溶性砂芯模的压缩性能按照 GB/T 17671-1999 进行测试。

##### (2) 水溶性能。

水溶性能测试方法为:将砂芯模试样放入盛有自来水的烧杯中,把开始放入至其完全溃散所需的时间作为表征砂芯模试样溃散难易程度的指标。

#### 2 实验设计

首先设计正交试验,根据 PVAL 的溶解特性并结合砂芯模制作的工艺,把 PVAL 溶液的质量浓度设定为 18%。考虑到砂芯模制作完毕后需要随产品在高温下进行固化,故其烘干温度设定为产品固化时的最高温度(160℃)。本正交试验主要考察 PVP 溶液的质量浓度、PVP 溶液占混合液总质量的百分比、胶砂质量比、石英砂清洗次数、石英砂粒径对砂芯模试样水溶性的影响,因此,设计的正交试验因素及水平列于表1。砂芯模试样水溶性正交试验结果列于表2。

表1 正交试验因素与水平表

| 水平 | PVP 溶液的质量浓度(A)/% | PVP 溶液质量占混合液总质量百分比(B)/% | 胶砂质量比(C) | 石英砂清洗次数(D) | 石英砂粒径(E)/mm |
|----|------------------|-------------------------|----------|------------|-------------|
| 1  | 14               | 30                      | 0.09     | 0          | 0.59        |
| 2  | 22               | 40                      | 0.11     | 1          | 2.00        |
| 3  | 30               | 50                      | 0.10     | 2          | 0.84        |
| 4  | 38               | 60                      | 0.08     | 3          | 0.42        |

由表2正交试验结果可以看出,按照试验序号为16的因素水平组合( $A_4B_4C_4D_4E_3$ )制作的砂芯模试样水溶性溃散时间最短(3 min),与按表2推算出的最优组合  $A_4B_4C_4D_2E_2$  不一致,为了找到最优组合,按照推算的最优组合  $A_4B_4C_4D_2E_2$  重新制作试样,对其水溶溃散时间进行测试,并与按试验序号为16的因素水平组合  $A_4B_4C_4D_4E_3$  制作的试样进行对比,试验结果见表3。

表2  $L_{16}(4^5)$  砂芯模试样水溶性正交试验结果

| 试验序号  | A   | B   | C   | D   | E   | 试样完全溃散时间/min |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|
| 1     | 1   | 2   | 3   | 2   | 3   | 55           |
| 2     | 3   | 4   | 1   | 2   | 2   | 6            |
| 3     | 2   | 4   | 3   | 3   | 4   | 77           |
| 4     | 4   | 2   | 1   | 3   | 1   | 10           |
| 5     | 1   | 3   | 1   | 4   | 4   | 65           |
| 6     | 3   | 1   | 3   | 4   | 1   | 110          |
| 7     | 2   | 1   | 1   | 1   | 3   | 95           |
| 8     | 4   | 3   | 3   | 1   | 2   | 15           |
| 9     | 1   | 1   | 4   | 3   | 2   | 72           |
| 10    | 3   | 3   | 2   | 3   | 3   | 45           |
| 11    | 2   | 3   | 4   | 2   | 1   | 40           |
| 12    | 4   | 1   | 2   | 2   | 4   | 80           |
| 13    | 1   | 4   | 2   | 1   | 1   | 60           |
| 14    | 3   | 2   | 4   | 1   | 4   | 20           |
| 15    | 2   | 2   | 2   | 4   | 2   | 69           |
| 16    | 4   | 4   | 4   | 4   | 3   | 3            |
| $K_1$ | 252 | 357 | 176 | 190 | 220 |              |
| $K_2$ | 281 | 154 | 254 | 181 | 162 |              |
| $K_3$ | 181 | 165 | 257 | 204 | 198 |              |
| $K_4$ | 108 | 146 | 135 | 247 | 242 |              |
| 极差 R  | 173 | 211 | 122 | 66  | 80  |              |

表3 两种不同因素水平组合制作的试样水溶性溃散时间比较

| 因素水平组合类型          | 试样水溶性溃散时间/min |
|-------------------|---------------|
| $A_4B_4C_4D_4E_3$ | 3             |
| $A_4B_4C_4D_2E_2$ | 6             |

由表3可以看出,按照推算的最佳因素水平组合  $A_4B_4C_4D_2E_2$  制作的砂芯模试样水溶性溃散时间(6 min),比按因素水平组合  $A_4B_4C_4D_4E_3$  制作的砂芯模试样的水溶溃散时间(3 min)长,因此,确定制作砂芯模最佳因素水平组合为  $A_4B_4C_4D_4E_3$ 。

为了考察砂芯模试样的压缩强度,按最佳因素水平组合  $A_4B_4C_4D_4E_3$  制作砂芯模试样,与分别单独用 18% PVAL 溶液、38% PVP 溶液作为基体材料制作的砂芯模试样(胶砂质量比、石英砂清洗次数、石英砂粒径的水平位级与表2试验序号为16的水平位级相同)进行压缩强度对比,试验结果如表4所示。

表4 不同基体材料制作的砂芯模试样压缩性能比较

| 序号 | 所用基体材料组成    | 压缩强度/MPa |
|----|-------------|----------|
| 1  | 18% PVAL 胶液 | 6.72     |
| 2  | 混合胶液        | 8.00     |
| 3  | 38% PVP 胶液  | 8.21     |

注:以上试验固化温度和时间相同,均为 160℃/4 h。

#### 3 结果与讨论

##### 3.1 混合溶液组成对砂芯模水溶性的影响

从表2可以看出, PVPL 溶液质量浓度及 PVP 溶液质量占混合液的质量比这两项因素的极差值分别为 173,211,是影响砂芯模水溶性的主要因素。

PVP 溶液质量浓度增加至 38%,所占混合液的质量比为 60% 时,砂芯模的水溶性最好,原因可能是混合溶液中含有大部分水溶性极佳的 PVP 所致。从表 3 可看出,当基体材料全部为 38% PVP 溶液时,制作的砂芯模压缩强度为 8.21 MPa,体现了其良好的刚度,但在实际加工过程中容易掉砂,韧性不好。当基体材料全部为 18% PVAL 溶液时,虽然制作的试样压缩强度为 6.72 MPa,但制作的砂芯模韧性好,易于加工。当基体材料 PVAL 溶液与 PVP 溶液混合使用时,制作的试样压缩强度相对质量浓度为 38% 的 PVP 溶液为基体材料制作的试样降低了 0.21 MPa,但降低不多,达到了既保持砂芯模良好水溶性和可加工性的同时也不会致使压缩强度下降过大的目的,满足砂芯模在缠绕成型产品时所需的刚度。

### 3.2 胶砂质量比对砂芯模水溶性的影响

由表 2 可以看出,胶砂质量比这一因素的极差值为 122,是影响砂芯模水溶性的二等重要因素。由表 2 可以看出,胶砂质量比由 0.08 升高至 0.11 时,制作的砂芯模水溶性总体呈减弱趋势,原因可能是混合溶液中含有 PVAL,胶砂比例大时,PVAL 的含量增多,随产品在高温条件(一般大于 150℃)下固化时 PVAL 会发生部分交联醚化反应,造成芯模水溶性差。因此,在保证砂芯模加工时不掉砂的前提下,应尽量减小胶砂质量比以增加砂芯模的水溶性。

### 3.3 石英砂清洗次数对砂芯模水溶性的影响

由表 2 可以看出,石英砂清洗次数这一因素的极差值仅为 66,是影响砂芯模水溶性的次要因素。把表 2 试验序号为 16 的因素水平组合中的石英砂清洗次数改为 0 时(其它水平位级不变),制作的试样完全溃散时间为 4 min,砂芯模的水溶性几乎没有发生变化,因此石英砂使用前可不必清洗。然而,笔者先期单独用 18% PVAL 溶液作为基体材料制作砂芯模试样时,石英砂使用前必须清洗干净后才能使用,否则制成的砂芯模水溶性很差(完全溃散时间大于 24 h)。因此,使用混合溶液作为基体材料制作砂芯模无须对石英砂清洗这一优点可节约砂芯模制作工时。

### 3.4 石英砂粒径对砂芯模水溶性的影响

由表 2 可以看出,石英砂粒度这一因素的极差值为 80,是影响砂芯模水溶性的次要因素。石英砂粒径由 0.42 mm 增大至 2.00 mm 时,制作的砂芯模水溶性依次增强(对应水平位级的四次溃散时间

之和由 242 min 减少至 162 min),原因可能是,石英砂粒径越小,同等质量下其表面积越大,所需的基体材料的质量也越大,砂粒之间的粘接力越强,因此造成砂芯模水溶性有所降低,但其不是影响砂芯模水溶性的决定因素,可根据产品内部粗糙度的要求灵活选择石英砂的粒径。

## 4 应用研究

笔者利用混合溶液作为基体材料制作的砂芯模成型了某小开口、大长径比复合材料壳体,取得了理想的效果,其具体工艺如图 4 所示。

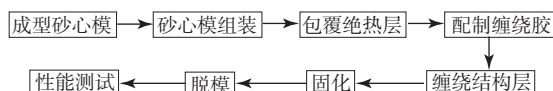
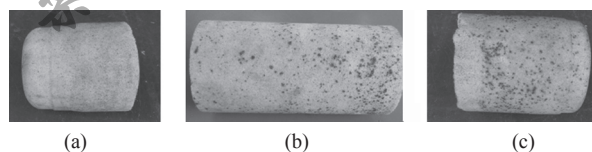


图 4 某复合材料壳体成型工艺图

具体成型工艺为:

#### (1) 成型砂芯模。

按照表 2 中试验序号为 16 的因素水平组合,利用模具分别制作 1 件前封头砂芯模段、3 件筒段砂芯模段、1 件后封头砂芯模段,固化工艺为 160℃ / 4 h,制作的各模段如图 5 所示。



a—前封头砂芯模段; b—筒段砂芯模段; c—后封头砂芯模段

图 5 砂芯模

#### (2) 砂芯模组装。

先将制作好的 1 件前封头砂芯模段、3 件筒段砂芯模段、1 件后封头砂芯模段,分别组装在钢制芯轴上,然后组装前、后连接件,最后两端用螺帽备紧到位,组装后的砂芯模如图 6 所示。

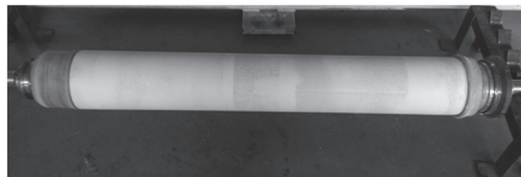


图 6 组装后的砂芯模

#### (3) 包覆绝热层。

将三元乙丙橡胶绝热层裁剪成合适的尺寸,包覆在砂芯模外表面。

#### (4) 配制缠绕胶。

将环氧树脂、海因树脂、改性液体芳香胺按比例依次放入 3 L 烧杯中,充分搅拌 5 min。

#### (5) 缠绕结构层。

按表 5 的缠绕参数缠绕某复合材料壳体。

表 5 某复合材料壳体缠绕参数

| 环、纵向<br>循环数 | 缠绕角 /<br>(°) | 切点数 | 缠绕张<br>力 / N | 纱片宽 /<br>mm |
|-------------|--------------|-----|--------------|-------------|
| 1 环→4 纵→2 环 | 40           | 3   | 70 ~ 80      | 7           |

(6) 固化。

将缠绕好的产品随同芯模一起放入旋转固化烘箱中固化,固化工艺为 80℃ / 2 h → 115℃ / 1.5 h → 160℃ / 2 h。

(7) 脱模。

首先打开模具两端的螺母,用自来水水管对准壳体内部的砂芯冲刷,砂芯很快溃散,然后抽出中间的钢制芯轴,得到产品,整个脱模过程只需 20 min,所得产品如图 7 所示。

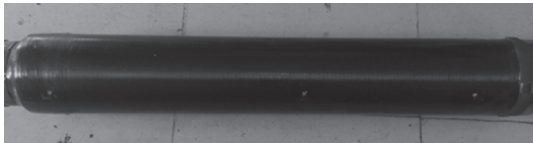


图 7 某复合材料壳体

(8) 性能比较。

对成型后的壳体参照 GB/T 6058-2005 进行性能测试,先在壳体表面贴覆应变片,升水压至 10 MPa,测试环向应变,测试完成后继续进行水压爆破试验,并计算容器特性指数,同时对用金属芯模制作的复合材料壳体进行相应性能测试,并同考核指标进行对比,结果见表 5。由表 5 可以看出,两种芯模制作的壳体性能测试结果差别不大,均达到了设计指标,符合使用要求。

表 5 两种芯模制作的壳体性能比较

| 成型<br>模具   | 爆破强度 / MPa |     | 筒体环向应变 / % |     | 容器特性指数 / km |      |
|------------|------------|-----|------------|-----|-------------|------|
|            | 测量值        | 指标值 | 测量值        | 指标值 | 测量值         | 指标值  |
| 金属<br>芯模   | 33         | 30  | 0.09       | 0.1 | 32.3        | ≥ 30 |
| 水溶性<br>砂芯模 | 32         | 30  | 0.08       | 0.1 | 33          | ≥ 30 |

## 5 结论

通过以上试验探究,利用 PVAL 和 PVP 的混合溶液作为石英砂的基体材料,成功制备了一种水溶性好的芯模材料。

(1) 通过正交试验,找到了影响其水溶性的决定因素是 PVP 溶液的质量浓度及 PVP 溶液占混合溶液的质量比。

(2) 确定了水溶性砂芯模制作的最佳工艺条件。

(a) 混合溶液的组成: PVP 溶液的质量浓度为 38%, PVP 溶液占混合溶液的质量比为 60%; (b) 胶砂质量比为 0.08; (c) 石英砂清洗次数和石英砂粒径为

次要因素,可根据具体情况灵活选择。

(3) 利用制备的水溶性砂芯模成型了一种大长径比、小开口复合材料壳体,可用自来水直接冲洗脱模 (只需 20 min),比用金属芯模更加简便,成型的复合材料壳体各项指标满足使用要求,验证了该芯模材料的实用性。

## 参考文献

- [1] 全建峰,王岭,益小苏,等. 用于复杂形状复合材料制造的水溶性芯模材料 [J]. 航空制造技术, 2009(14):94-97.  
Tong Jianfeng, Wang Ling, Yi Xiaosu, et al. Water soluble core material for manufacturing of the complex composite component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(14):94-97.
- [2] 张芳,殷永霞,谭放,等. 一种新型水溶性芯模的制备和性能 [J]. 宇航材料工艺, 2013(4):55-57.  
Zhang Fang, Yin Yongxia, Tan Fang, et al. Preparation and properties of a new water soluble core[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013(4):55-57.
- [3] 张芳,殷永霞,谭放. 水溶性芯模性能和应用研究 [J]. 航天制造技术, 2012(6):53-60.  
Zhang Fang, Yin Yongxia, Tan Fang. The study of properties and application of the water soluble core tooling[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012(6):53-60.
- [4] 肖文刚,王嵘,乔仁海. 碳纤维复合材料圆筒受外压结构分析 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2009(4):11-13.  
Xiao Wengang, Wang Rong, Qiao Renhai. Study of the CFRP cylinder under external hydrostatic pressure[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2009(4):11-13.
- [5] 贾晓龙,李刚,薛忠民,等. 碳纤维 / 环氧树脂在橡胶内衬表面的全缠绕工艺设计 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2009(2):61-64.  
Jia Xiaolong, Li Gang, Xue Zhongmin, et al. Winding process design with carbon fiber / epoxy on rubber liner[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2009(2):61-64.
- [6] 苏祖君,梁国忠,曾金芳,等. 树脂基复合材料湿法缠绕成型研究进展 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2005(1):46-49.  
Su Zujun, Liang Guozhong, Zeng Jinfang, et al. Study process in wet winding technology of resin matrix composites[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2005(1):46-49.
- [7] 孔庆宝. 纤维缠绕技术进入新的高速发展阶段 [J]. 纤维复合材料, 1998(4):49-53.  
Kong Qingbao. The technology of filament winding entered into a new rapid development stage[J]. Fiber Composites, 1998(4):49-53.
- [8] 王晓洁,张炜,刘炳禹,等. 高性能碳纤维复合材料耐压容器研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2003(4):20-23.  
Wang Xiaojie, Zhang Wei, Liu Bingyu, et al. A review for composite pressure vessels with high performance carbon fibers[J]. Aerospace Materials & Technology, 2003(4):20-23.

(下转第 62 页)

- 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.