

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.01.012

聚乙二醇 / 氯化锌条件下回收 CFRP 方法研究

强勇勇,赵岩,王立珂

(北方自动控制技术研究所,太原 030006)

摘要:以真空辅助成型工艺 (VARI) 制作的碳纤维增强复合材料 (CFRP) 平板件为降解试件,使用乙酸对其进行分层预处理,然后以聚乙二醇为溶剂,氯化锌为催化剂,采用控制变量法在不同的反应温度、反应时间,氯化锌浓度等工艺参数下对 CFRP 进行降解回收。利用扫描电子显微镜、X 射线光电子能谱仪、动态接触角测量仪、纤维强度仪对回收碳纤维的表面形貌和元素、浸润性以及力学性能进行表征分析。结果表明,CFRP 降解的理想工艺条件为:用乙酸于 120℃ 下分层预处理 30 min,然后在 190℃ 下,使用浓度为 0.6 mol/L 氯化锌 / 聚乙二醇环境反应 60 min。使用该方法回收的 CFRP,树脂降解率能达到 98% 以上,碳纤维表面干净光滑无树脂残留,表面元素与原丝相比变化较小,碳纤维和水与乙二醇的浸润性相比原丝得到改善,碳纤维的弹性模量达到原丝的 98% 以上,拉伸强度达到原丝的 97% 以上。

关键词:碳纤维增强复合材料;化学回收;温和条件;工艺设计

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)01-0063-05

Study on Recovery of Cfrp From Polyethylene Glycol / Zinc Chloride

Qiang Yongyong, Zhao Yan, Wang Like

(North Institute of Automatic Control Technology, Taiyuan 030006, China)

Abstract : Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) plates made by vacuum assistant resin infusion process (VARI) were used as degradation specimens, which were stratified pretreated with acetic acid, and then treated with polyethylene glycol as solvent and zinc chloride as catalyst. CFRP degradation and recovery were carried out under different reaction temperature, reaction time, zinc chloride concentration and other technological parameters by control variable method. By using scanning electron microscope, X-ray photoelectron spectrometer, the dynamic contact angle measuring instrument, fiber strength tester for recycled carbon fiber surface morphology and element, invasive and the analysis of the mechanical properties were characterized. The results show that the ideal process conditions for degradation of CFRP are as follows : stratified pretreatment at 120℃ for 30 min, followed by environmental reaction at 190℃ with concentration of 0.6 mol / L zinc chloride / polyethylene glycol for 60 min. Using the method of recycling of CFRP, resin degradation rate can reach more than 98%, the carbon fiber surface clean, smooth resin residue, surface elements are small change compared with the original wire, carbon fiber and water and glycol invasive compared with the original wire improves, the elastic modulus carbon fiber reaches more than 98% of the original silk, the tensile strength reached more than 97% of the original silk.

Keywords : carbon fiber reinforced plastic ; chemical recovery ; mild condition ; process design

碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP) 具有比强度、比模量高,抗疲劳性能好,耐腐蚀能力强,可设计性好等优良特性,在航空航天等多个领域得到了广泛应用。CFRP 多以环氧树脂等热固性聚合物作为基体相,其固化成型后形成不溶不熔的三维交联网状结构,无法进行二次模塑或加工^[1-4]。随着 CFRP

的应用越来越广泛,产生的废弃物也越来越多,这些废弃的 CFRP 中含有大量昂贵的碳纤维,直接填埋会造成资源浪费,直接焚烧则会释放出大量有毒有害物质,污染环境^[5-9]。因此,对 CFRP 废弃物进行回收已经成为一个亟待解决的研究课题。

笔者提出了一种温和条件下对 CFRP 进行降解

通讯作者: 强勇勇,硕士,主要从事复合材料回收相关研究工作 E-mail : 1203239296@qq.com

收稿日期: 2019-11-10

引用格式: 强勇勇,赵岩,王立珂. 聚乙二醇 / 氯化锌条件下回收 CFRP 方法研究 [J]. 工程塑料应用,2020,48(1):63-67,85.

Qiang Yongyong, Zhao Yan, Wang Like. Study on recovery of CFRP from polyethylene glycol / zinc chloride[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):63-67, 85.

回收的方法。笔者采用真空辅助成型工艺 (VARI) 制作 CFRP 平板件,为了增大反应面积以提高反应效率,对平板件进行了切割,并对切割后的降解试件进行了分层预处理;然后在温和条件 (常压、低反应温度) 下,以聚乙二醇为溶剂,氯化锌为催化剂,采用控制变量的方法在不同的工艺参数 (反应的温度、时间,试剂的浓度等) 下对 CFRP 进行降解回收。通过对实验数据进行对比分析后,初步得出了 CFRP 降解的各项工艺参数。为了对结果进行验证,使用扫描电子显微镜 (SEM) 对回收得到的碳纤维表面缺陷以及树脂残留进行分析,使用 X 射线光电能谱 (XPS) 仪对回收得到的碳纤维表面元素变化情况进行表征,使用接触角测量 (DCAA) 仪对回收碳纤维的表面浸润性进行表征,最后通过单丝拉伸试验对回收碳纤维的拉伸强度和弹性模量进行分析。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维: T700, 宜兴恒亚碳纤维科技有限公司;

环氧树脂: EPOLAM5015, 葛科颂化工产品有限公司;

冰乙酸、氯化锌、聚乙二醇、丙酮: 分析纯, 陕西海联化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

分析天平: FA2004N 型, 天津精拓仪器科技有限公司;

干燥箱: WG-6 型, 陕西海联化工有限公司;

磁力搅拌电热套: 98-II-B 型, 天津市泰斯特仪器有限公司;

纤维强度仪: M312837 型, 北京中西远大科技有限公司;

SEM: JCM-6000 型, 日本 JOEL 公司;

DCAA 仪: JYW-200C 型, 天津精拓仪器科技有限公司;

XPS 仪: PHI5700 型, 美国 Perkin Elmer 公司。

1.3 样品制备

降解试件为单向布平板, 根据铺层要求, 对碳纤维进行裁剪, 并将其按照 $0^\circ, 90^\circ$ 的方向铺放在模具中; 在预成型体与模具表面铺设导流网以及脱模布, 在模具表面铺设真空袋, 并用密封胶带进行密封处理; 利用真空泵和导管对模具内部抽真空; 铺放完成后, 对树脂进行脱泡处理, 利用真空泵将树脂吸入模腔内开始浸润过程, 充模完成后把平板件放

入温度为 80°C 烘箱中保温 6 h 完成固化过程。待模具自然冷却后, 进行脱模处理, 取出成品制件^[10]。

1.4 性能测试

动态接触角测量: 实验中分别测试了碳纤维试样与水 and 乙二醇的动态接触角, 每组碳纤维试样至少做 10 次测试, 剔除掉离散性较大的数据后取平均值作为最终的结果。通过 Wu (公式 1 和公式 2) 理论^[11-13] 可以得到表面能的各个分量。

$$\gamma_l(1 + \cos \theta) = \frac{4\gamma_l^d \cdot \gamma_s^d}{\gamma_l^d + \gamma_s^d} + \frac{4\gamma_l^p \cdot \gamma_s^p}{\gamma_l^p + \gamma_s^p} \quad (1)$$

$$\gamma_{\text{total}} = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (2)$$

式中, θ 为碳纤维和液体试剂间动态接触角, $^\circ$; γ_l 为溶剂液体的表面张力, mJ/m^2 ; γ_l^d 为溶剂液体表面张力的非极性分量; γ_s^d 为纤维表面自由能的非极性分量; γ_l^p 为溶剂液体表面张力的极性分量; γ_s^p 为纤维表面自由能的极性分量; γ_{total} 为纤维表面的总自由能。

所用到的溶剂是去离子水和乙二醇, 去离子水的表面张力的极性和非极性分量分别是 $53.6 \text{ mJ}/\text{m}^2$ 和 $18.7 \text{ mJ}/\text{m}^2$, 乙二醇的表面张力的极性和非极性分量分别是 $19 \text{ mJ}/\text{m}^2$ 和 $29.3 \text{ mJ}/\text{m}^2$ 。

单丝拉伸试验: 测试是依据 ASTM D3379-1989 标准中对单丝拉伸力学测试实验的规定严格进行的, 单丝的拉伸强度按公式 (3) 计算^[14-16]:

$$\sigma_l = \frac{4F_b}{\pi d^2} \quad (3)$$

式中, σ_l 为单丝的拉伸强度; F_b 为破坏载荷; d 为单丝的直径, 所用碳纤维单丝的直径为 $7.15 \mu\text{m}$ 。

2 结果与讨论

2.1 保温温度对环氧树脂基体降解率的影响

采用 100 mL 浓度为 $0.6 \text{ mol}/\text{L}$ 的氯化锌 / 聚乙二醇溶液作为反应溶剂, 在不同的保温温度下保温 60 min 以降解 CFRP 复合材料, 研究了保温温度分别为 $150, 160, 170, 180, 190, 200, 210^\circ\text{C}$ 时对环氧树脂基体降解率的影响。如图 1 所示, CFRP 复合材料中环氧树脂基体在聚乙二醇中的降解率随温度的升高逐渐增加, 当温度大于 190°C 时, 环氧树脂降解率大于 96%。这是因为温度越高, 分子的运动越剧烈, 聚乙二醇分子在环氧树脂基体内和降解产物分子在聚乙二醇中的传质加快, 且聚乙二醇和环氧树脂基体大分子链的碰撞几率增加。

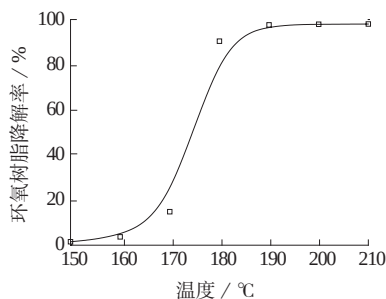


图1 保温温度对环氧树脂基体降解率的影响

2.2 保温时间对环氧树脂基体降解率的影响

采用 100 mL 浓度为 0.6 mol/L 的氯化锌 / 聚乙二醇溶液作为反应溶剂,在保温温度分为 150, 170, 190, 210℃ 条件下对 CFRP 复合材料进行降解,取时间梯度为 5 min, 范围为 0 ~ 70 min, 在不同的保温温度条件下进行降解回收实验, 研究不同的保温时间对树脂基体的降解率的影响。如图 2 所示, 通过增加反应时间可以进一步加深反应深度, 反应时间在 0 ~ 20 min 时环氧树脂的降解率基本不发生变化, 这是由于溶剂和催化剂分子进入 CFRP 三维网状结构需一定时间, 当反应时间在 20 min 之后时, 190℃ 和 210℃ 条件下的环氧树脂开始迅速降解, 然而 150℃ 和 170℃ 条件下的环氧树脂则反应速率缓慢, 主要原因可能是由于温度太低, 活化分子数较少, 因此反应进行缓慢, 当温度上升时, 活化分子数增加, 有效碰撞频率也随之增加, 反应速率上升; 另外, 温度较低时, 环氧树脂链段没有足够流动性, 因此催化剂溶液不能有效地渗透到交联网络中, 当反应温度升高时, 链段充分的流动性使得催化剂溶液有效地渗透到基体中, 导致降解程度的急剧增加。

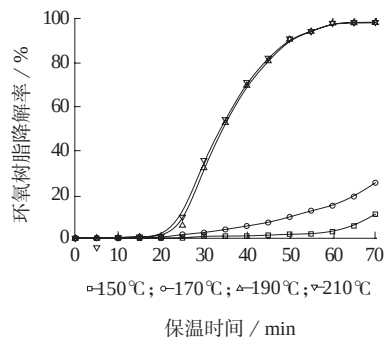


图2 保温时间对环氧树脂基体降解率的影响

2.3 氯化锌浓度对环氧树脂基体降解率的影响

在保温温度为 190℃、保温时间 60 min 条件下, 采用 100 mL 氯化锌的聚乙二醇溶液对 CFRP 进行降解反应, 氯化锌的聚乙二醇溶液的浓度分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1,

1.2 mol/L, 研究了氯化锌的聚乙二醇溶液的浓度对环氧树脂基体降解率的影响, 如图 3 所示。

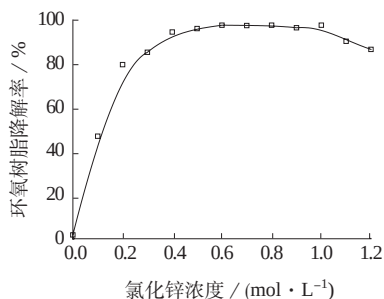
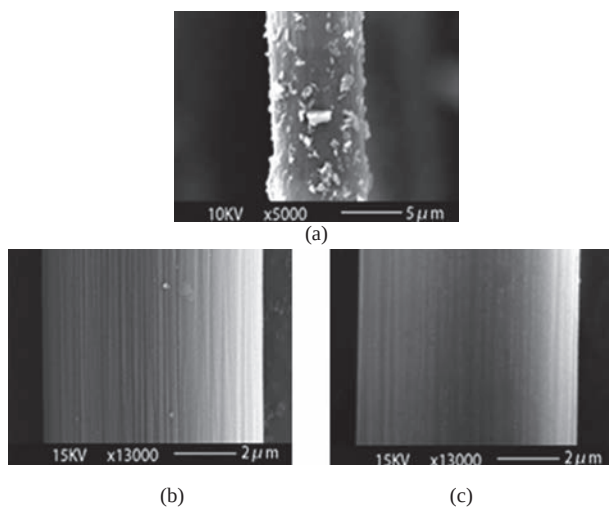


图3 氯化锌浓度对环氧树脂基体降解率的影响

由图 3 可知, 通过增加催化剂浓度可进一步改善降解程度, 增加催化剂浓度可以加速化学键的裂解。当催化剂浓度达到 0.6 mol/L 之后, 降解程度随时间的变化不再明显。而浓度大于 1.0 mol/L 时, 反应的环氧树脂降解率会出现小幅下降, 这是因为氯化锌在聚乙二醇中的溶解度有限, 虽然溶液的名义浓度在增加, 但是实际的浓度变化并不大, 而没有溶解的氯化锌会粘在碳纤维表面, 阻碍反应的进行。考虑到经济性和生产效率, 氯化锌浓度为 0.6 mol/L 时, 190℃ 下反应 60 min 是满足 CFRP 环氧树脂基体完全降解要求的限制条件。

2.4 回收碳纤维的表面形貌分析

采用 SEM 对回收碳纤维进行了表征, 并与原丝及分层预处理碳纤维进行了对比, 如图 4 所示。



a—分层预处理后碳纤维; b—回收碳纤维; c—碳纤维原丝

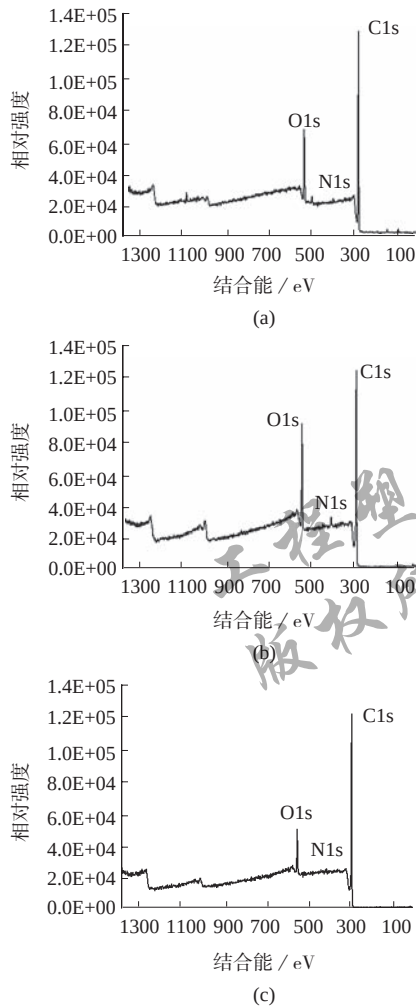
图4 不同阶段的碳纤维表面形貌图

由图 4 可看出, 相比于碳纤维原丝干净光滑的表面, 分层预处理后得到的碳纤维表面存在着大量的树脂残留, 这些残留的树脂能够对碳纤维起到一定的保护作用, 防止其被乙酸腐蚀。而回收所得到的碳纤维则与原丝基本无二, 表面干净光滑, 无树脂

残留,也没有任何损伤的痕迹,直径也和原丝相当。

2.5 回收碳纤维的表面元素组成分析

为了研究分层预处理和降解过程对碳纤维表面化学结构的影响,采用 XPS 对原始碳纤维、分层预处理以及回收后的碳纤维进行了分析测试,来研究化学元素的变化情况。原始碳纤维、分层预处理以及回收后的碳纤维的表面 XPS 全谱扫描图如图 5 所示。



a—碳纤维原丝; b—分层预处理后的碳纤维; c—回收的碳纤维

图5 碳纤维 XPS 全谱扫描图

由图 5 可知,碳纤维表面的元素为 O1s, N1s 和 C1s。通过对全谱图进行分析和计算得到碳纤维表面不同元素的含量,结果见表 1。

表1 不同处理后碳纤维表面的元素含量

碳纤维处理阶段	元素相对含量 / %			元素含量比	
	C	O	N	O/C	N/C
碳纤维原丝	82.36	12.11	2.08	0.147	0.025
分层预处理后碳纤维	78.73	17.92	3.35	0.228	0.043
回收得到的碳纤维	86.3	9.93	3.77	0.115	0.044

通过表 1 可以发现,在分层预处理及回收前后,碳纤维表面的主要元素及其含量没有发生大的变化,元素种类主要包括 C, N, O。碳纤维原丝所含各元素的相对含量分别为 C : 82.36%, O : 12.11%, N : 2.08%; 而元素的相对含量分别是 O/C : 0.147, N / C : 0.025。经过分层预处理,碳纤维表面的 C 元素相对含量下降为 78.73%, O 元素相对含量则上升到 17.92%, N 元素相对含量微弱上升至 3.35%, O/C 含量比则上升至 0.228, N/C 含量比上升为 0.043。再经过氯化锌 / 聚乙二醇环境下回收后,碳纤维表面的 C 元素相对含量上升为 86.3%, O 元素相对含量则下降到 9.93%, N 元素相对含量微弱上升至 3.77%, O/C 含量比则下降至 0.115, N/C 含量比上升为 0.044。回收碳纤维表面的 O 元素含量相比碳纤维原丝有所下降,下降的主要原因是分层及回收过程中其表面的上浆剂被清洗掉,但是上浆剂的破坏并不会影响到碳纤维本身的性能。

综上所述,分层预处理及回收过程中碳纤维表面的元素种类并未发生变化,元素含量发生了轻微变化,但是这些变化是微小的,对碳纤维表面的结构影响是比较小的,由此证明本回收方案对于碳纤维复合材料的回收是比较合理的。

2.6 回收碳纤维的表面浸润性分析

通过测试,碳纤维经过不同处理后的接触角及表面能如表 2 所示。

表2 碳纤维经过不同处理后的接触角和表面能

碳纤维	$\theta_{\text{水}} / (^{\circ})$	$\theta_{\text{乙二醇}} / (^{\circ})$	$\gamma^d / (\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2})$	$\gamma^p / (\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2})$	$\gamma / (\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2})$
I	64.81(1.7)	42.61(2.0)	15.18	25.40	40.58
II	61.25(1.5)	41.77(1.6)	14.29	28.37	42.66
III	53.63(1.1)	38.57(0.9)	13.36	34.35	47.71

注: I 为碳纤维原丝, II 为分层预处理后的碳纤维, III 为回收得到的碳纤维。

分析表中数据可知,碳纤维原丝在水和乙二醇中的接触角分别为 64.81° 和 42.61° ,碳纤维原丝的表面能为 $40.58 \text{ mJ} / \text{m}^2$,其中色散分量和极性分量分别是 $15.18 \text{ mJ} / \text{m}^2$ 和 $25.40 \text{ mJ} / \text{m}^2$ 。经过分层预处理后,碳纤维单丝在水和乙二醇中的接触角有所下降,为 61.25° 和 41.77° 。由表可知,总表面能出现轻微增加,达到 $42.66 \text{ mJ} / \text{m}^2$,其中色散分量轻微下降而极性分量增加,与碳纤维原丝相比表面能大约增加了 5.13%。在氯化锌 / 聚乙二醇环境中降解回收的碳纤维的接触角与原丝相比较也有所减小,在水和乙二醇中分别为 53.63° 和 38.57° 。而相

应的碳纤维表面能出现增加,为 47.71 mJ/m^2 ,相比原丝增加了 17.57%,其中色散分量和极性分量分别为 13.36 mJ/m^2 和 34.35 mJ/m^2 。

通过分析发现,分层预处理和降解回收过程使得碳纤维在水和乙二醇中的接触角减小而表面能增加,这使得碳纤维的表面浸润性得到了改善,从而可以增加回收碳纤维和树脂的结合力,提高回收碳纤维制件的力学性能。这也证明了 CFRP 在氯化锌/聚乙二醇环境中具有理想的回收效果。

2.7 回收碳纤维的力学性能表征

所用试样的标距为 25 mm,拉伸速率为 1 mm/min,每组实验选取 25 个试样进行单丝拉伸测试,最终的结果取 25 次的平均值。通过测试,回收得到的碳纤维力学性能如图 6 所示。

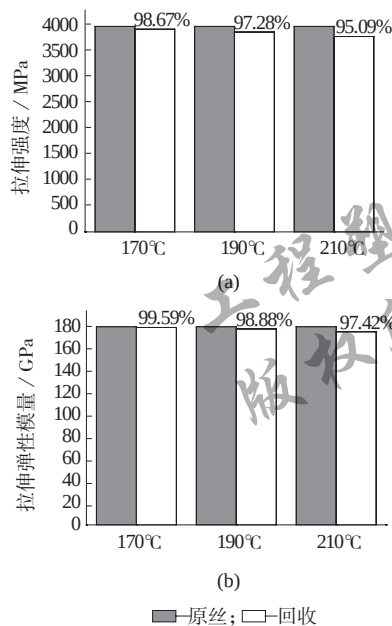


图 6 不同温度下回收碳纤维的力学性能
a—拉伸强度; b—拉伸弹性模量

从图 6 可以看出,170,190,210 °C 下,回收碳纤维的拉伸强度分别为原丝的 98.67%,97.28%,95.09%,回收碳纤维的弹性模量分别为原丝的 99.59%,98.88% 和 97.42%。可以发现,随着反应温度的升高,回收碳纤维的拉伸强度和弹性模量都发生小幅下降,原因主要有两方面:一是在高温条件下,碳纤维表面会不可避免的发生一些氧化反应,导致碳纤维的表面结构受到损伤和破坏;二是在高温环境下碳纤维和环氧树脂都会发生膨胀,但由于两者的膨胀系数不一致,导致出现了垂直于纤维的剪切应力,并且温度越高,这种应力就越大。由此可以

推断,反应温度的升高对于碳纤维的回收属于不利因素,同时也不利于节能减排。

3 结论

乙酸 120 °C 下分层预处理 30 min,然后在 190 °C 下,使用浓度为 0.6 mol/L 氯化锌/聚乙二醇环境反应 60 min。此时的树脂降解率达到 98% 以上,碳纤维表面干净光滑无树脂残留,表面元素与原丝相比变化较小,碳纤维和水与乙二醇的浸润性相比原丝得到改善,碳纤维的弹性模量达到原丝的 98% 以上,拉伸强度达到原丝的 97% 以上。

参考文献

- [1] 张灵静,陈桦,蒋建军,等.碳纤维增强热固性复合材料回收再利用技术研究进展[J].工程塑料应用,2019(7):134-140.
Zhang Lingjing, Chen Hua, Jiang Jianjun, et al. Research progress on recycling and reuse technology of carbon fiber reinforced thermosetting composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019(7):134-140.
- [2] Pimenta S, Pinho S T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook[J]. Waste Management, 2011, 31(2):378-392.
- [3] 马全胜,王宝铭.碳纤维复合材料回收及利用现状[J].纤维复合材料,2016(4):28-30,27.
Ma Quansheng, Wang Baoming. Recycling and reuse of carbon fibre composites[J]. Fiber Composites, 2016(4):28-30, 27.
- [4] Pickering S J. Recycling technologies for thermoset composite materials-current status[J]. Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(8):1206-1215.
- [5] 张建川.碳纤维复合材料废弃物的处理分析[J].玻璃钢,2010(4):12-23.
Zhang Jianchuan. The analysis about some kinds of treatment methods for carbon fiber reinforced composite wastes[J]. Fiber Reinforced Plastics, 2010(4):12-23.
- [6] 段志军,段望春,张瑞庆.国内外复合材料回收再利用现状[J].塑料工业,2011,39(1):14-18.
Duan Zhijun, Duan Wangchun, Zhang Ruiqing. State of composite materials recycling in domestic and abroad countries[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(1):14-18.
- [7] 张东致,万怡灶,罗红林,等.碳纤维复合材料的回收与再利用现状[J].中国塑料,2013(2):1-6.
Zhang Dongzhi, Wan Yizao, Luo Honglin, et al. Current status of recycling and reuse of carbon fiber composites[J]. China Plastics, 2013(2):1-6.
- [8] McConnell V P. Launching the carbon fibre recycling percritical water[J]. Reinforced Plastics, 2010, 54(2):33-37.
- [9] Heil J P. Study and analysis of carbon fiber recycling[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2011.

田口信噪比下利用 Moldex3D 模流分析进行塑件的注塑模拟,通过波前流动、冷却分析和翘曲分析,找出塑件注塑的最佳组合参数,及时改善模具结构方面的缺陷。本次模具设计中采用“热流道+冷流道”的流道系统设计,定位圈和浇口套一体式,浇口采用潜伏式浇口,型腔采用整体式结构,塑件的材料选用 PP,模具采用一模一穴结构,分流道截面形状为圆形,型芯采用组合式结构。该设计方法对汽车内饰板类注塑件的模具设计有一定的借鉴作用。

参考文献

- [1] 翟豪瑞,王小松,熊新,等.用 Moldex3D 对副仪表盘热流道浇口时序的优化[J].现代塑料加工应用,2017,29(6):54-56.
Zhai Haorui, Wang Xiaosong, Xiong Xin, et al. Optimization of hot runner gate time sequence of auxiliary instrument panel by Moldex3D[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2017, 29(6):54-56.
- [2] 郑尧刚,翟豪瑞,熊新,等.基于 Moldex3D 和灰色关联理论在空气滤清器上壳的工艺优化[J].工程塑料应用,2018,46(10):72-75+85.
Zheng Yaogang, Zhai Haorui, Xiong Xin, et al. Process optimization of air filter upper shell based on Moldex3D analysis and grey relational theory[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):72-75+85.
- [3] 王海峰,沈鑫华.信噪比灰色关联分析在注塑工艺参数优化中的应用[J].塑料工业,2019,47(4):69-72.
Wang Haifeng, Shen Xinhua. Application of grey correlation analysis of SNR in injection molding process parameter optimization[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(4):69-72.
- [4] 王晓花,张彩婷,王国斌,等.基于响应面方法的注塑件翘曲变形优化[J].现代塑料加工应用,2018,30(4):45-47.
Wang Xiaohua, Zhang Caiting, Wang Guobin, et al. Design optimization on warpage controls of injection molded part based on response surface method[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2018, 30(4):45-47.
- [5] 韩沈尧,白蓉.基于 CAE 的 PP 塑料件注射成型工艺参数的影响及优化[J].塑料工业,2019,47(10):78-80,85.
Han Shenyao, Bai Rong. Effect and optimization of injection molding process parameters of PP plastic parts based on CAE[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(10):78-80, 85.
- [6] 翟豪瑞,葛晓宏,陈长秀,等.基于 Moldex3D 碳罐本体优化分析及模具设计[J].模具工业,2018,44(1):40-45+52.
Zhai Haorui, Ge Xiaohong, Chen Changxiu, et al. Optimization analysis of carbon canister based on Moldex3D and the mould design[J]. Die & Mould Industry, 2018, 44(1):40-45+52.
- [7] 张维合,成永涛,许淑娟,等.汽车后背门护板热流道大型注塑模设计[J].中国塑料,2019,33(5):102-107.
Zhang Weihe, Cheng Yongtao, Xu Shujuan, et al. Design of large and hot runner injection mold for car rear door[J]. China Plastics, 2019, 33(5):102-107.
- [8] 叶久新,王群.塑料成型工艺及模具设计[M].北京:机械工业出版社,2013.
Ye Jiuxin, Wang Qun. Plastic forming technology and mould design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013.
- [9] 黄继战,范玉,仇文宁,等.基于 UG NX 的汽车音响面板注塑模设计[J].工程塑料应用,2017,45(9):80-83.
Huang Jizhan, Fan Yu, Qiu Wenning, et al. Design of injection mould for car audio panel based on UG NX[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9):80-83.
- [10] 赵晨辉,张广成,张悦周.真空辅助树脂注射成型(VARI)研究进展[J].玻璃钢/复合材料,2009(1):80-84.
Zhao Chenhui, Zhang Guangcheng, Zhang Yuezhou. The development of vacuum assisted resin infusion(VARI)[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2009(1):80-84.
- [11] 吴欲兵,庄燕,柳潇潇,等.基于力分析法测试碳纤维接触角研究[J].纺织报告,2014(9):47-48,57.
Wu Yubing, Zhuang Yan, Liu Xiaoxiao, et al. Study carbon fiber contact angle based on force measurements[J]. Jiangsu Textile, 2014(9):47-48, 57.
- [12] Jiang G, Pickering S J, Walker G S, et al. Surface characterisation of carbon fibre recycled using fluidised bed [J]. Applied Surface Science, 2008, 254(9):2 588-2 593.
- [13] Pickering S J, Kelly R M, Kennerley J R, et al. A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap themoset composites[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(4):509-523.
- [14] Yip H L H, Pickerillg S J, Rudd C D. Characterisation of carbon fibres recycled from scmp composites using fluidised bed pmcess[J]. Plastics Rubber and Composites, 2002, 31(6):278-282.
- [15] Piflero Hemanz R, Dodds C, Hyde J, et al. Chemical recycling of carbon fibre reinforced composites in nearcritical and supercritical water[J]. Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(3):454-461.
- [16] 刘赋瑶,董余兵,傅雅琴.碳纤维水性杂化上浆剂的制备及其上浆后力学性能[J].复合材料学报,2017,34(10):2 156-2 163.
Liu Fuyao, Dong Yubing, Fu Yaqin. Preparation and sizing performance of carbon fiber aqueous hybrid sizing agent[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(10):2 156-2 163.

(上接第 67 页)