

doi : 10.3969 / j.issn.1001-3539.2017.08.029

汽车内饰注塑工艺优化、数值模拟及缺陷分析^{*}

李坤全,文睿

(河南工程学院,郑州 451191)

摘要: 主要介绍了聚丙烯、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料以及其它高分子材料的汽车内饰件的生产工艺对制件质量的影响,通过工艺优化、数值模拟和缺陷分析,设计出合理的浇注系统和冷却系统,得到最佳的加工工艺,从而提高制件的美观度、降低制件的尺寸收缩、翘曲变形、熔接痕等缺陷的产生,还对数值模拟在汽车内饰件生产工艺优化方面的发展进行了展望。

关键词: 汽车内饰件; 工艺优化; 数值模拟; 缺陷分析; 高分子材料

中图分类号: TQ32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)08-0139-04

Injection Molding Process Optimization, Numerical Simulation and Defect Analysis of Automotive Interior

Li Kunquan, Wen Rui

(Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract : The influences of the processing parameters on the quality of polypropylene, acrylonitrile-butadiene-styrene resins and other polymer-based automotive interior were introduced. Through process optimization, numerical simulation and defect analysis, gating system and cooling system were designed properly, the best processing parameters were obtained, and the appearance of the product was improved and the size of shrinkage, warp deformation as well as weld defects were reduced. The development of numerical simulation on the production process optimization of automotive interior was also prospected.

Keywords : automotive interior parts ; process optimization ; numerical simulation ; defect analysis ; polymer material

汽车内饰是汽车的一个重要的结构组成,其具有多功能性、多零部件及复杂的结构,并且为了美观以及易于操作,需要汽车内饰有较高的外观表面质量以及方便拆卸和安装的特点^[1-5]。通用塑料和工程塑料均在汽车制造领域有着广泛的应用,尤其是在汽车内饰件的生产中,塑料制品不仅能够降低生产成本、简化生产工艺、满足车内的舒适性以及汽车的安全性,且还可实现汽车的轻量化,减少车辆燃油消耗,提高汽车的环境友好性能^[6-10]。用于生产汽车内饰件的塑料多为热塑性塑料,如聚丙烯(PP)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、聚苯醚(PPE)等。这些高分子材料的力学性能、耐热性、阻燃性、耐候性和耐老化性能优异,并且毒性低、质轻、易于成型加工,应用于汽车内饰件的生产,不仅可以优化车内环境,还可以减轻车身质量,甚至还能通过一次成型法制备出结构复杂的内饰件,完全满足了汽车内饰件对材料的性能要求^[11-15]。笔者主要介绍了高分子材料汽车内饰件在生产加工过程中加工工艺以及数值模拟在制品生产中对缺陷和质量进行控制的作用和近年来的发展进程。

1 PP材料的汽车内饰件

PP是一种生产成本较低的通用塑料,其耐热性、耐化学药品性和力学性能优异,并且PP具有优异的流动性能,易于

成型加工,以及PP与其它有机、无机材料具有良好的相容性,易于复配改性,是一种理想的汽车内饰生产材料。近年来,车用PP材料发展迅速,应用广泛,单车PP材料应用高达40 kg以上,约占整车高分子材料用量的1/3^[16-18]。为了制备出性能和质量符合要求的汽车内饰件,通常需要进行生产加工工艺的优化和数值模拟,并利用所得数据对制件进行缺陷分析,从而得到最佳加工工艺和质量符合要求的塑料汽车内饰件制品。

车用PP材料的力学性能是一个重要的性能参数,而加工工艺对制件的综合力学性能的影响较为显著。张静等^[19]利用汽车废弃PP顶棚内饰板为原料,加入新的PP、玻璃纤维和偶联剂,通过混合、预热、加热、压制等工序重新制备了PP复合板,经研究发现当预热时间、预热温度、加热温度、成型压力和保温时间分别为20 min,110℃,185℃,2.33 MPa和50 min时,所制备PP复合板的力学性能最佳,拉伸强度为35.65 MPa、断裂伸长率为1.3%、弯曲强度为61.05 MPa、

^{*} 河南省教育厅科学技术重点研究项目(14B460012),河南省郑州市科技发展计划科技攻关项目(20140599)

联系人:文睿,硕士,讲师,主要研究机械设计

收稿日期:2017-05-19

冲击韧性为 13.21 kJ/m^2 。优化加工工艺除了可以在一定程度上提高 PP 内饰板的力学性能外,还能有效地降低制件的翘曲变形、挠度和尺寸收缩等缺陷。

刘朝福等^[20]利用牌号为 PL203HC 的 PP 生产了一款轿车车门的内饰板,其尺寸为 $705 \text{ mm} \times 606 \text{ mm} \times 98 \text{ mm}$,壁厚为 $2.1 \sim 3.2 \text{ mm}$,制件的总质量为 2.1 kg 。该内饰板壁厚均匀,形状规整,无特别明显的尖角或薄壁部分,相对易于成型加工。作者利用正交试验法分析了熔体温度、注射时间、模具温度、保压压力和保压时间 5 个平行因素对制件翘曲变形的影响,通过 Moldflow 软件对制件的加工过程进行数值模拟并结合实际生产的工艺优化实验发现,当熔体温度为 220°C 、注射时间为 7 s 、模具温度为 35°C 、保压压力为 60 MPa 以及保压时间为 18 s 时,车门内饰板的翘曲变形量最小,其中数值模拟所得制件的翘曲变形量为 8.33 mm ,实际生产中所制备的 PP 轿车车门内饰板的翘曲变形量为 8.85 mm 。

卢钢^[21]利用 PP/ 苧麻复合材料制备了一种汽车 B 柱内饰板。作者不仅利用 Unigraphics NX 软件构建了制件的三维模型,利用 Moldflow 软件设计了科学合理的模具浇注系统和冷却系统,并同时结合正交试验法和极差分析法研究了注射时间、熔体温度、模具温度、保压压力和保压时间 5 个参数对制件质量的影响,发现保压压力对制件翘曲变形的影响最大,其次为注射时间、模具温度和熔体温度,保压时间对其影响最小。最终得到优化后的加工工艺为:注射时间为 2 s 、熔体温度为 210°C 、模具温度为 55°C 、保压压力为注塑压力的 90% 、保压时间为 15 s ,在该工艺下所制备的内饰板制件的翘曲变形量为 3.776 mm ;另外作者还分析了苧麻纤维含量、取向对制件质量的影响,研究发现随着纤维含量的增加,纤维的取向度和制件的模量也相应增大。由于纤维取向度增大会导致制件翘曲变形量增大,而制件的模量增大可以减小制件的翘曲变形,所以制件的翘曲变形量呈现先增大后减小的趋势,当苧麻纤维质量分数为 10% 时,翘曲变形量最小。

孙显俊^[22]研究了牌号为 PP_Pro_fax6523 的纯 PP 以及牌号为 Hostacom_DYS707N 和 ADX5017 的 PP 弹性体在制备尺寸为 $95.0 \text{ mm} \times 65.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 的汽车内饰板时的翘曲变形现象。首先,作者利用 Moldflow 对制件进行数值模拟,将模具的热流道设计为 $3.0 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的窄浇口,冷却系统设计为平行的两个回路。然后结合正交试验对熔体温度、注塑压力、注射速率、模具温度、保压压力、保压时间和冷却时间等参数进行优化,得到最佳的熔体温度为 204°C 、注塑压力为 50.5 MPa 、注射速度为 30 mm/s 、模具温度为 25°C 、保压压力为 41 MPa 、保压时间为 8 s 、冷却时

间为 25 s ,在此工艺下生产的内饰板的翘曲变形量可以忽略不计。作者还利用 ADX5017 型丙烯弹性体进行了汽车手套箱内板的生产,并对生产工艺进行了数值模拟,研究结果表明,当模具温度为 21.1°C 、熔体温度为 210°C 、注塑压力为 250 MPa 、保压压力为 208 MPa 、保压时间为 11 s 、冷却时间为 24 s 时,所制备的汽车手套箱内板的挠度仅为 0.53 mm ,满足制件质量的要求。另外,作者还利用长玻璃纤维增强 PP 材料进行了汽车仪表盘的制备,并利用 Moldflow 软件对制件的翘曲变形、尺寸收缩和挠度进行了数值模拟,研究结果表明利用优化后的注塑工艺所制备的仪表盘的翘曲变形量最大为 0.9694 mm ,浇口处尺寸收缩最为严重,约为 17% ,制件边缘挠度最大,约为 7.037 mm 。为了提高汽车内饰件的耐磨性、耐刮擦性和耐老化性等,通常会在 PP 材料中添加抗氧剂、耐刮擦助剂和光稳定剂等助剂,而随着时间的延长,这些助剂则容易从 PP 表面析出,导致 PP 制品表面发粘的现象。上海大众汽车有限公司的郑樑^[23]通过对不同汽车内饰板材料进行老化试验研究及加工工艺优化发现,选用合适的助剂用量和助剂类型可以有效解决上述问题。例如,避免使用芥酸酰胺爽滑剂,可有效避免耐刮擦助剂的析出。

除了汽车内饰件制品的缺陷以外,制件的低挥发性有机物 (VOC) 含量也是衡量其能否应用于其内饰件生产的一个重要因素,而通过对制件生产工艺的优化也可以有效降低制件的 VOC 含量。李俊贤等^[24]改变 PP 的注塑温度,分别在 $190, 210, 230^\circ\text{C}$ 和 250°C 下进行注塑,通过对所制备的汽车立柱护板的 VOC 含量进行测试发现,随着注塑温度的升高,制件中苯、甲苯、乙苯、二甲苯的含量逐渐升高,甲醛和苯乙烯含量无明显变化,而当温度为 250°C 时,乙醛的含量高达 $14.3 \mu\text{g/g}$,约为其它温度下的 $5 \sim 20$ 倍。作者认为将温度控制在 230°C 以下,能够有效降低 PP 的分解而产生小分子,进而有效控制制件的 VOC 含量。

李锋等^[25]通过选用不同脱挥方法、螺杆转速和注塑设备对所制备的 PP 汽车内饰件的 VOC 含量进行了控制,研究发现自然脱挥法可以将制件中的 VOC 含量由脱挥前的 $485 \mu\text{g/g}$ 降低至 $164 \mu\text{g/g}$,但依然处于较高水平;而在 0.09 MPa 下对 PP 制件进行真空脱挥,可以将制件中 VOC 含量降低至 $20 \mu\text{g/g}$ 以下。另外,作者发现,随着注塑过程中螺杆转速的增大,PP 制件中的 VOC 含量呈先减小后增大的趋势。随着螺杆转速增大,更有利于 PP 熔体中气泡的形成、增长和破裂,同时降低了螺槽中 PP 熔体的填充率,提高了传质速率和增强了表面物料更新作用,从而有利于注塑过程中 VOC 的脱除;但是当螺杆转速过大时,注射速率增大,PP 熔体的停留时间变短,反而不利于 VOC 的脱除。当转速

为 500 r/min 时,制件中 VOC 含量最低,约为 $65 \mu\text{g/g}$ 。作者还选用了不同的加工设备对 PP 制件进行了加工,发现当选用 BUSS 捏合机时,PP 制件中的 VOC 含量可以进一步降低至 $21 \sim 26 \mu\text{g/g}$ 。

崔文兵等^[26]考察了微发泡技术对 PP 汽车内饰件 VOC 含量的影响,作者研究发现在相同注塑温度下,微发泡技术制备的 PP 内饰件的 VOC 含量要略高于普通注塑技术所制备的 PP 内饰件。不过,利用微发泡技术可以将 PP 的注塑温度成功降低至 185°C ,在较低的注塑温度下可成功实现 VOC 含量的降低。若在微发泡注塑过程中提高背压,会引起温度升高,从而导致 PP 制件中 VOC 含量的急剧上升。背压为 $0.8 \sim 1.5 \text{ MPa}$ 时,制件中总 VOC 含量高达 $1124.9 \sim 1192.2 \mu\text{g/g}$ 。而若在 5%、10% 和 15% 三种减重配比(与原重相比,减重的百分比)下,利用微发泡技术对 PP 内饰件加工,制件的 VOC 含量可由无减重的 $102 \mu\text{g/g}$ 降低至 $43 \sim 96 \mu\text{g/g}$ 。

罗忠富等^[27]将一种多孔材料添加到 PP 母料中,利用改性的聚丙烯材料进行汽车内饰件的注塑加工,研究发现多孔材料可以有效吸附 PP 加工过程中分解产生的长链烷烃,并且不会发生解吸附,从而有效降低制件中的总 VOC 含量。

2 ABS 材料的汽车内饰件

ABS 材料具有优异的力学性能,并且其耐化学药品、耐油性良好,大量用于汽车内饰的生产。ABS 材料的尺寸稳定性好、吸水率低,更进一步保障了汽车内饰件的质量,目前约占车用塑料市场的 8% 左右。但 ABS 的耐热性和耐候性较差,通常在汽车内饰生产中需要将 ABS 与聚碳酸酯(PC)、聚酰胺(PA)、聚氯乙烯(PVC)等材料制备成 ABS 合金来改善其应用性能,进而用于汽车内饰件的应用^[28]。

与 PP 制品一样,ABS 汽车内饰件的翘曲变形在很大程度上决定着所生产的制件能否应用汽车组装。赵佳峰等^[29]利用 ABS 材料制备了一种尺寸为 $300 \text{ mm} \times 85 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$,中间壁厚为 2.5 mm ,两端壁厚为 5 mm 的汽车扶手盖板。通过利用 Moldflow 对制件进行数值模拟,设计了合理的浇注系统和冷却系统,并且结合正交试验法对熔体温度、注射时间、模具温度、保压压力、保压时间和冷却时间进行了优化,通过每个参数取 3 个水平发现,当熔体温度、注射时间、模具温度、保压时间和冷却时间分别为 265°C , 2.8 s , 80°C , 10 s 和 20 s ,保压压力为注塑压力的 95% 时,所制备的 ABS 制件的翘曲变形最低,为 2.376 mm 。汽车车门内饰板结构复杂,孔位和凸台较多。林建兵^[30]对基本尺寸为 $1180 \text{ mm} \times 880 \text{ mm} \times 185 \text{ mm}$,基础壁厚为 3 mm ,注塑材料为 ABS 合金的汽车车门内饰板进行工艺优化、数值模拟和缺陷分析,研究结果表明该制件的最佳的注射时间、注塑压力、冷却时间、最大锁模力、ABS 填充量分别为 3.327 s ,

73.79 MPa , 78.80 s , $2.802 \times 10^7 \text{ N}$, 1889 cm^3 ,该工艺所制备的制件的尺寸收缩约为 5.51%。另外,作者发现当熔体温度为 $250 \sim 252^\circ\text{C}$ 之间时,采用顺序阀热流道对制件进行注塑,可以有效避免熔接痕的产生;另外,通过合理设计冷却系统和调节注塑压力,可以有效降低制件的翘曲变形量,在上述最佳注射工艺下,所制备的 ABS 合金汽车车门内饰板的最大翘曲变形量仅为 3.695 mm 。

孙蒙蒙等^[31]利用 Moldflow 对尺寸为 $855 \text{ mm} \times 785 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$,厚度为 3 mm 的 ABS 汽车内饰件进行了有限元分析,并利用田口法对熔体温度、模具温度、注射时间、保压时间和保压压力等生产工艺进行了优化。通过对制件的尺寸收缩率和翘曲变形量的考察发现,熔体温度对制件的尺寸收缩率影响最为严重,而保压时间对制件的翘曲变形量影响最为严重。当熔体温度、模具温度、注射时间、保压时间分别为 225°C , 48°C , 5.4 s 和 17 s ,保压压力为注塑压力的 95% 时,制件的体积收缩率最小,约为 2.557%;当熔体温度、模具温度、注射时间、保压时间分别为 240°C , 48°C , 5.1 s 和 14 s ,保压压力为注塑压力的 95% 时,制件的翘曲变形量最小,约为 1.766 mm 。

朱兴建等^[32]对汽车遮阳板上的化妆镜盖的加工工艺进行了数值模拟和优化,该制件为 ABS/PC 合金,尺寸为 $127 \text{ mm} \times 33 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$,壁厚为 4.5 mm 。作者通过对模具浇口的改变以及对注塑压力的优化成功将制件的翘曲变形量降低到了 0.5 mm 以下,满足制件生产要求。

3 其它材料的汽车内饰件

除了 PP 和 ABS 材料之外,还有大量的高分子材料已应用到汽车内饰件的生产中,例如 PPE、聚酰胺、聚碳酸酯、聚氯乙烯及这些材料的高分子合金等^[33-35]。这些材料均具有优异的力学性能、耐划伤性、耐磨性、耐腐蚀性、耐候性、阻燃性以及 VOC 含量等特性,可充分提高汽车内饰件的美观性、实用性和安全性。

4 展望

利用数值模拟和工艺优化法,可以科学合理地汽车内饰件注塑加工过程中模具的浇注系统、冷却系统以及对注塑加工工艺进行优化。通过对 PP 的浇注系统、冷却系统和注塑工艺的优化,不仅可以成功降低制件的尺寸收缩率和翘曲变形量,还可以有效降低制件的缺陷和 VOC 含量;另外通过对加工工艺的优化、浇口形状和位置的选择、冷却系统的设计,也能够有效降低 ABS 和 ABS 合金制件的缺陷,提高汽车内饰件的质量。在未来的汽车内饰件生产过程中,数值分析在工艺优化和缺陷分析方面将起到十分重要的作用,大大降低制件的生产成本、缩短生产周期,并且可以生产除 PP 和 ABS 以外的其它材料汽车内饰件。

参考文献

- [1] 王强,等. 城市建设理论研究: 电子版,2016(13): 1-5.
Wang Qiang, et al. Urban Construction Theory Research: Electronic Edition, 2016(13): 1-5.
- [2] 隋世剑,等. 塑料工业, 2005, 33(5): 103-105.
Sui Shijian, et al. China Plastics Industry, 2005, 33(5): 103-105.
- [3] 孙在军,等. 工程塑料应用, 2005, 33(7): 30-32.
Sun Zaijun, et al. Engineering Plastics Application, 2005, 33(7): 30-32.
- [4] 赵申,等. 工业 C, 2016(6): 56.
Zhao Shen, et al. Industry C, 2016(6): 56.
- [5] 张迪. 山东工业技术, 2016(24): 250.
Zhang Di. Shandong Industrial Technology, 2016(24): 250.
- [6] 刘爽爽,等. 塑料, 2010(3): 118-120.
Liu Shuangshuang, et al. Plastics, 2010(3): 118-120.
- [7] 张泽峰,等. 塑料工业, 2017, 45(1): 68-75.
Zhang Zefeng, et al. China Plastics Industry, 2017, 45(1): 68-75.
- [8] 张江萍. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2009, 31(4): 606-609.
Zhang Jiangping. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering Edition, 2009, 31(4): 606-609.
- [9] 杜兆芳,等. 纺织学报, 2011, 32(6): 45-49.
Du Zhaofang, et al. Journal of Textile Research, 2011, 32(6): 45-49.
- [10] 向阳. 产业用纺织品, 2006, 24(1): 1-5.
Xiang Yang. Technical Textiles, 2006, 24(1): 1-5.
- [11] 晋加伟. 汽车零部件, 2015(5): 79-80.
Jin Jiawei. Automobile Parts, 2015(5): 79-80.
- [12] 康进起. 工业 B, 2015(25): 283.
Kang Jinqi. Industry B, 2015(25): 283.
- [13] 田永,等. 汽车工艺与材料, 2011(8): 14-17.
Tian Yong, et al. Automobile Technology & Material, 2011(8): 14-17.
- [14] 魏晓娟. 现代塑料加工应用, 2014(4): 12.
Wei Xiaojuan. Modern Plastics Processing and Applications, 2014(4): 12.
- [15] 刘道春. 柴油机设计与制造, 2011, 17(1): 6-12.
Liu Daochun. Design & Manufacture of Diesel Engine, 2011, 17(1): 6-12.
- [16] 李建军,等. 塑料工业, 2012, 40(1): 20-22.
Li Jianjun, et al. China Plastics Industry, 2012, 40(1): 20-22.
- [17] 刘仿军,等. 塑料科技, 2013, 41(6): 49-52.
Liu Fangjun, et al. Plastics Science and Technology, 2013, 41(6): 49-52.
- [18] 王鉴,等. 炼油与化工, 2011, 22(6): 5-9.
Wang Jian, et al. Refining and Chemical Industry, 2011, 22(6): 5-9.
- [19] 张静,等. 汽车工艺与材料, 2005(6): 36-38.
Zhang Jing, et al. Automobile Technology & Material, 2005(6): 36-38.
- [20] 刘朝福,等. 合成树脂及塑料, 2015(1): 50-53.
Liu Chaofu, et al. China Synthetic Resin and Plastics, 2015(1): 50-53.
- [21] 卢钢. 基于苧麻 / PP 材料的汽车内饰件注塑成型工艺仿真研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
Lu Gang. Study on injection molding process simulation of automotive interior part based on ramie fiber reinforced polypropylene material[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [22] 孙显俊. 聚丙烯及其复合材料注塑件翘曲变形数值模拟与实验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
Sun Xianjun. Warpage of injection molded parts manufactured with polypropylene and its composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015.
- [23] 郑樑. 汽车工艺与材料, 2015(12): 44-47.
Jia Liang. Automobile Technology & Material, 2015(12): 44-47.
- [24] 李俊贤,等. 汽车工艺与材料, 2015(2): 50-52.
Li Junxian, et al. Automobile Technology & Material, 2015(2): 50-52.
- [25] 李峰,等. 合成树脂及塑料, 2013(3): 55-57.
Li Feng, et al. China Synthetic Resin and Plastics, 2013(3): 55-57.
- [26] 崔文兵,等. 现代塑料加工应用, 2015(5): 33-35.
Cui Wenbing, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2015(5): 33-35.
- [27] 罗忠富,等. 环境技术, 2010, 31(6): 47-51.
Luo Zhongfu, et al. Environmental Technology, 2010, 31(6): 47-51.
- [28] 梁小波. 汽车工艺与材料, 2011(6): 6-9.
Liang Xiaobo. Automobile Technology & Material, 2011(6): 6-9.
- [29] 赵佳峰,等. 工程塑料应用, 2011, 39(10): 55-57.
Zhao Jiafeng, et al. Engineering Plastics Application, 2011, 39(10): 55-57.
- [30] 林建兵. 制造业自动化, 2015(13): 106-108.
Lin Jianbing. Manufacturing Automation, 2015(13): 106-108.
- [31] 孙蒙蒙,等. 工程塑料应用, 2012, 40(10): 43-46.
Sun Mengmeng, et al. Engineering Plastics Application, 2012, 40(10): 43-46.
- [32] 朱兴建,等. 塑料, 2014, 43(5): 102-105.
Zhu Xingjian, et al. Plastics, 2014, 43(5): 102-105.
- [33] 史荣波. 汽车工艺与材料, 2016(1): 62-64.
Shi Rongbo. Automobile Technology & Material, 2016(1): 62-64.
- [34] 韩磊. 全文版: 工程技术, 2016(9): 172.
Han Lei. Full Text Edition: Engineering Technology, 2016(9): 172.
- [35] 佚名. 工程塑料应用, 2014(5): 67.
Anony. Engineering Plastics Application, 2014(5): 67.