

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.02.012

基于CAE分析和熵值法的轿车前保险杠 注塑工艺多响应优化

吴俊超¹, 邵海军¹, 陈爱霞², 张鹏飞¹

(1. 九江职业技术学院, 江西九江 332007; 2. 九江学院机械与智能制造学院, 江西九江 332005)

摘要: 利用UG和Moldflow 2023, 建立轿车前保险杠塑料模具的CAE分析模型, 优化了阀浇口的打开时间, 解决了产品上熔接线过多、过长的问题和应力痕问题。针对优化目标较多的情况, 采用熵值法建立综合优化目标, 通过正交试验分析出综合优化目标的合理取值, 以及在综合优化目标合理取值下各个注塑工艺参数的合理取值。经过工艺参数改进, 在不变更模具设计和模具制造的情况下, 产品合格率得到了有效提高, 从65.35%提高到85.87%。采用Moldflow 2023, 在阀浇口功能、DOE功能、田口方法的帮助下结合数据分析软件Minitab, 能够快速解决针对多响应、有交互作用多因子的取值问题。该方法能有效解决多优化目标且因子有交互作用的注塑工艺参数选取问题, 节约试模成本。

关键词: 多响应; CAE分析; 熵值法; 轿车前保险杠; 阀浇口; 因子

中图分类号: TQ320.66+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)02-0074-10

Multi-response Optimization of Injection Molding Process for Front Bumper of Car based on CAE Analysis and Entropy Method

Wu Junchao¹, Shao Haijun¹, Chen Aixia², Zhang Pengfei¹

(1. Jiujiang Vocational and Technical College, Jiujiang 332007, China;

2. School of Mechanical & Intelligent Manufacturing, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)

Abstract : Using UG and Moldflow 2023 software, the CAE analysis model of the plastic mould for the car front bumper was established, the opening time of the valve gate was optimized, and the problems of excess weld lines with excessive length and stress marks on the product were solved. In view of the large number of optimization objectives, the entropy method was used to establish the comprehensive optimization objectives. The reasonable values of the comprehensive optimization objectives and the reasonable values of each process parameter under the reasonable values of the comprehensive optimization objectives were analyzed through orthogonal tests. Through the improvement of process parameters, the product qualification rate is effectively improved from 65.35% to 85.87% without changing the mould design and mould manufacturing. Using Moldflow 2023, with the help of valve gate function, DOE function and Taguchi method, combined with data analysis software Minitab, the value-taking problem of multi-response and interactive multi-factors can be quickly solved. This method can effectively solve the problem of selecting injection molding process parameters with multiple optimization objectives and interactive factors, and save the cost of mould test.

Keywords : multiple response ; CAE analysis ; entropy method ; car front bumper ; valve gate ; factor

轿车前后保险杠是轿车的主要零部件之一, 直接和外界冲击力、保护车身及乘员安全的作用。早期保险杠一般选择金属材质, 采用厚度不小于

基金项目: 江西省教育厅科技课题(车载空调贯流风扇结构改进与制造工艺优化), 九江职业技术学院校级科技课题(基于结构应变紧凑型扭矩传感器测量原理及方法研究)

通信作者: 吴俊超, 硕士, 副教授, 主要研究方向注塑成型, 模具CAD/CAE/CAM

收稿日期: 2022-11-06

引用格式: 吴俊超, 邵海军, 陈爱霞, 等. 基于CAE分析和熵值法的轿车前保险杠注塑工艺多响应优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2): 74-83.

Wu Junchao, Shao Haijun, Chen Aixia, et al. Multi-response optimization of injection molding process for front bumper of car based on CAE analysis and entropy method[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2): 74-83.

3 mm的钢板,冲成U形槽,铆接或焊接在车架纵梁上,并确保保险杠与车身有一定的间隙^[1],最后在表面镀铬。然而,采用这种工艺制备的保险杠整体协调性较差,影响轿车外观,且不利于车身减重。近年来,汽车工业不断发展,特别是提倡轿车车身轻量化后工程塑料被大量使用,对于塑料材质汽车保险杠来说,在生产中更加追求其外观的和谐与统一,追求轻量化^[1],同时塑料材质汽车保险杠的安全保护功能并未改变,需要满足力学特性和吸能特性^[1],使其在受到碰撞时能够有一定的缓冲和吸能作用。

现行的轿车保险杠由横梁和外板组成。横梁采用的冷轧钢板被冲压成U形槽,厚度为1.5 mm左右,横梁和车架纵梁采用螺丝连接^[1],方便拆装;外板的材料一般采用聚酯系和聚丙烯系两种材料,附着在横梁上,工艺上多采用注射成型。例如标致405选取了聚酯系列的塑料原料,采用反应注塑成型工艺。而奥迪100, GOLF, Santana等型号轿车的保险杠^[1],选取的是聚丙烯系列的塑料原料,采用注射成型。近年来,有些企业还采用聚碳酸酯系列的塑料原料,掺入一定量的合金粉末,采用合金注射成型,这种保险杠强度好、刚性高、涂装性能好而且可焊接。

鉴于某轿车前保险杠塑料外板生产中产品合格率较低的问题,笔者采用模流分析软件Moldflow 2023进行CAE分析,借助专业的质量管理统计分析软件Minitab 2021进行响应面法试验设计和数据分析,探索在多优化目标的情况下,存在多个有交互作用的因子时如何选取合理取值的注塑工艺优化问题。

1 塑件结构与工艺分析

1.1 研究对象

笔者的研究对象轿车保险杠如图1所示,材料为质量分数20%滑石粉填充聚丙烯(PP+T20),密度

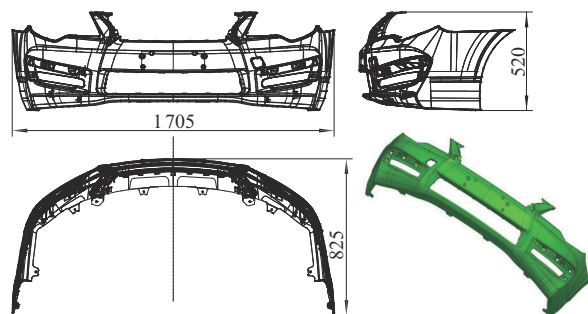


图1 研究对象

为1.12 g/cm³,质量为4.07 kg,体积为3 633.967 cm³。这种改性聚丙烯材料具有较好的耐候性和足够的韧性,工厂实际生产中没有添加玻纤。一次注塑前保险杠塑件的平均合格率仅有65.35%。主要缺陷表现在塑件外观有明显的熔接痕、气穴、应力痕和明显的缩痕,此外还有飞边,总的翘曲变形量超出装配的允许值。因此,研究目标是在不改变模具结构的情况下,通过模流分析和试验数据处理来提高轿车前保险杠外板注塑件的产品合格率。

1.2 CAE模型的创建

该轿车保险杠的尺寸精度需要按照汽车行业标准QCn 29017-1991生产和验收,因为该塑件既是外观件也是受力结构件,所以除了要满足装配要求外还要满足表面外观光洁、无飞边、无缩孔或疏松等要求,应力痕、缩痕和熔接痕也要尽量少。因为保险杠塑件出现的缺陷较多,所以需要先创建CAE模型,这个模型应和实际生产所用的模具实物完全相同;然后按照当前生产中采用的注塑工艺参数在模流分析软件中进行设定,通过模流分析观察模拟结果和生产实际是否吻合。如果不吻合需要查找是CAE模型存在问题还是成型工艺参数存在问题。模拟结果和实际生产不吻合或符合程度较差时需要进行调整,直到调整一致,这样所建立的CAE分析模型才能作为后续研究的基础,后续调整的工艺参数也才有意义。

首先在UG软件NX2212中打开之前设计好的三维模具数模。该数模的外形尺寸为1 705 mm×825 mm×520 mm,平均厚度为2.66 mm,最大壁厚为5.28 mm。然后检查、修复轿车保险杠三维数模并以*.stp格式导入Moldflow^[2],采用双层面网格,网格边长2.2 mm。经过网格诊断、网格缺陷处理和网格修复^[3],最终生成的合格网格数量有23.36万,纵横比小于15(对于大型塑件来说,纵横比小于15即可得到可靠结果),网格统计匹配百分比超过85%(Moldflow 2023要求翘曲分析时,匹配率需要大于80%),此外该双层面网格没有其它诸如壁厚过小、零面积单元等错误,用该网格进行分析可以得到可信度较高的模流分析结果。

模具采用热流道模具,细水口转大水口浇注系统,一模一腔,在NX2212中将流道中心线导出为*.igs文档,在Moldflow中用主页下“添加”功能将流道中心线添加到划分好网格的分析文件中,更改流

道中心线属性为“热流道”,设定流道和浇口的尺寸和模具实物一致并在保证合理长径比的情况下划分网格。对于距离保险杠产品很近的形状不规则的大水口浇口,需要将这部分在三维软件中画出,然后用添加*.stp 的方式添加到 Moldflow 2023 中,划分成双层面网格,设定属性为“冷浇口”,随即利用 Moldflow 的图层功能将异形冷浇口和产品共面的三角形网格和节点删除,然后将冷浇口边沿的节点和产品节点进行合并,将热流道结束的节点和冷浇口节点合并。最终创建了 7 个热浇口,这 7 个热浇口都是可以独立控制的阀浇口,第 2 个和第 3 个浇口形状大小结构一致,第 4 个和第 5 个浇口形状大小结构一致,第 6 个和第 7 个浇口形状大小结构一致,浇口的结构如图 2 所示。用同样的方法将冷却系统导进分析模型并划分好网格,该模具的冷却水路很复杂,存在较多的隔水板水路,共有 21 进 21 出的 21 组循环水路。在水路 CAE 模型设计中需要注意出水口和入水口的数量必须相等,否则 CAE 分析会报错。

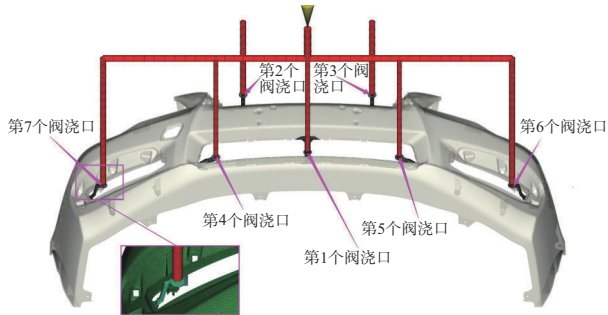


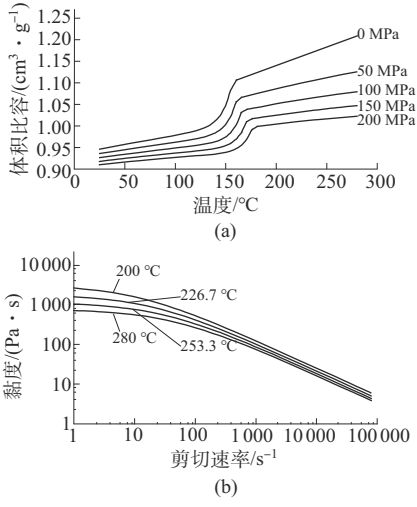
图2 浇口结构与编号

轿车保险杠外板的塑料原料选择工厂实际生产中采用的原料为 PP+T20,其为 Ferro 生产的 POLYPROPYLENES (PP)系列,牌号为 TPP20AC17 BK,该材料的推荐工艺见表 1,材料特性如图 3 所示。PP+T20 流动方向与横向之间的泊松比(ν_{12})为 0.38,两个横向之间的泊松比(ν_{23})为 0.43,第 1 主方

表 1 PP+T20 的推荐工艺

工艺参数		数值
推荐模具表面温度/℃		50
推荐熔体温度/℃		230
模具温度(推荐)/℃	最大值	80
	最小值	20
熔体温度(推荐)/℃	最大值	280
	最小值	200
绝对最大熔体温度/℃		320
顶出温度/℃		93
最大剪切应力/MPa		0.26
最大剪切速率/s ⁻¹		24 000

向弹性模量(塑料流动方向的拉伸弹性模量)为 2 518 MPa,第 2 主方向弹性模量(垂直于流动方向即横向拉伸弹性模量)为 2 494 MPa。



a—不同压力下材料体积比容与温度的关系曲线;
b—不同温度下材料黏度与剪切速率的关系曲线

图3 PP+T20 材料特性

1.3 CAE 模型的验证

CAE 模型建立后,按照实际生产中采用的注塑工艺参数(见表 2)进行设置,打开时间见表 3。前期的实际生产中,第 1 个阀浇口、第 2 个阀浇口和第 3 个阀浇口初始均为打开状态,第 4 个阀浇口和第 5 个阀浇口在开始注射 1.1 s 后打开,第 6 个阀浇口和第 7 个阀浇口分别在开始注射 2.2 s 后和 2.5 s 后打开。所有浇口 46 s 后关闭。

表 2 优化前实际生产中采用的部分工艺参数

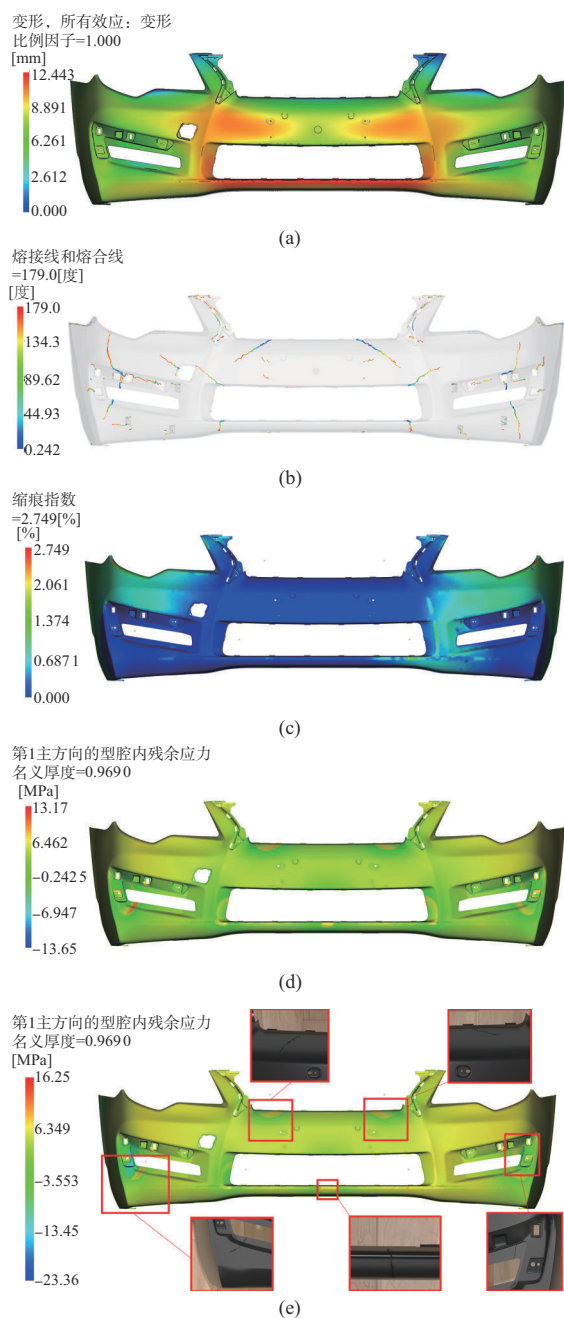
工艺参数	数值
注射时间/s	6
保压压力 ¹⁾ /%	85
保压时间/s	40
熔体温度/℃	275
冷却介质入口温度/℃	20
模具表面温度/℃	40
顶出温度/℃	70
开模时间/s	8

注:1)保压压力为充填压力的百分比,下表同。

表 3 阀浇口打开时间

阀浇口编号	类型	初始状态	触发器	打开时间/s	关闭时间/s	打开延迟/s
第 1 个阀浇口	实时	打开	时间	0	46	0
第 2 个阀浇口	实时	打开	时间	0	46	0
第 3 个阀浇口	实时	打开	时间	0	46	0
第 4 个阀浇口	实时	已关闭	时间	1.1	46	0
第 5 个阀浇口	实时	已关闭	时间	1.1	46	0
第 6 个阀浇口	实时	已关闭	时间	2.2	46	0
第 7 个阀浇口	实时	已关闭	时间	2.5	46	0

按照实际参数设置后,CAE模拟结果和实际生产情况基本一致,但仍存在以下几个主要问题,结合图4分述如下。



a—优化前的翘曲变形量; b—优化前的熔接线和熔合线;
c—优化前的缩痕指数; d—第1主方向的型腔内残余应力;
e—第1主方向的模拟结果与实际生产中产品缺陷对应关系

图4 CAE模拟结果以及模拟结果与实际生产中产品缺陷对应关系

(1)翘曲变形较大,最大翘曲变形量达12.44 mm(如图4a所示),不能满足验收要求。实际生产中部分产品因翘曲变形过大无法进行装配。

(2)从图4b的熔接线模拟结果可以看出,产品上的熔接线和熔合线过多,而且比较杂乱,保险杠塑

件正面有10条长度超过20 mm的熔接线,最长的4条长度超过100 mm,熔接线过长、过大会严重影响保险杠的外观质量,过长的熔接线还会导致保险杠的力学性能下降。

(3)从图4c缩痕指数上看,产品收缩不均匀。这会导致塑件密度不同,翘曲变形量增加,同时塑件的力学性能下降。

(4)第1主方向(横穿塑件横截面方向,可以简单理解为塑件厚度方向,正值对应塑件中的张力,而负值对应压缩力)和第2主方向(垂直于第1主方向的方向)的残余应力都过大,而且应力变化不均匀。应力突变的地方会形成应力痕,残余应力过大会导致塑件在使用中过早失效和翘曲变形量增大。图4d、图4e是模拟的第一主方向上残余应力情况和实际生产中产品上对应出现的缺陷,可以看出,模拟结果和实际生产中出现的缺陷非常吻合。

2 熔接线的改善方法

针对过多、过长且杂乱的熔接线和熔合线,采用调整阀浇口的打开时间,以减少熔接痕和熔合线,将不可避免的熔接痕和熔合线尽量调整到产品的非外观面,尽量减少熔接痕和熔合线对产品力学性能的影响。

在充填过程中两股或多股塑料熔体相遇汇合而成的瑕疵就是熔接线和熔合线,多数为可见缺陷。熔合线附近塑件的强度和外观都要好于产生熔接线的区域。平行的流体会形成熔合线,塑料原料的不同、填充物的不同以及保压压力和保压温度的不同都会影响熔合线区域的产品质量。有角度的两股或多股塑料熔体相遇融合会形成熔接线,熔接线会导致产品外观和力学性能不合格。实际生产中要尽量避免熔接线,尽可能少产生熔合线。当塑料熔体流经孔后合流,或存在多个浇口且打开时间不合理,或多个浇口同时打开时,熔接线和熔合线的产生很难避免。若两股塑料熔体相遇时还有较高的流前温度,则后期如果采用合适的保压压力和保压时间,就可能避免较多熔接线和熔合线出现在实际产品上。

更改充填速度和流向,使两股塑料熔体或多股塑料熔体在合适的位置相遇,这是将熔接线移动到非外观面的有效方法。更改填充模式常采用的方法有:①用阀浇口技术使浇口在不同的时间打开;②改变浇口的位置;③更改塑料产品的结构,譬如

厚度等。当熔接线和熔合线无法避免时,只能尽量降低熔接线带来的危害,常用的方法有:①提高塑料原料的注塑温度、提高注射速度或增大保压压力,这能让塑料更好地彼此熔合;②增大浇口或流道的尺寸,以使保压压力更好地传递到塑件上;③把浇口设置在熔接线附近,这样熔接线产生的区域就会有更高的熔体温度和保压压力;④移动注射位置,尽量将熔接线转化成熔合线;⑤在熔接线的区域增加排气结构或改善排气措施,以消除气穴、减少或缩短熔接线;⑥优化流道系统设计,用摩擦剪切热来提高塑料的流前温度。

结合本例的实际情况,模具已经投入生产,如果能够不修改模具结构或者尽量少修改模具结构的情况下解决问题,将能够减少开发成本,有利于绿色生产。基于这个考虑,先将阀浇口的打开时间尽量调整到合理时间。在模流分析软件 Mold-

flow 2023 中,设置阀浇口的触发器为“流动前沿”,见表 4。根据浇注系统结构特点,塑料熔体最先到达第 1 个阀浇口,当塑料流到第 1 个阀浇口附近(柱体单元 B843,见表 4)时,第 1 个阀浇口打开,此时其它阀浇口均未打开,塑料熔体流经第 1 个阀浇口在型腔中继续向前流动,当塑料熔体的流动前沿流到下一个阀浇口(本例会先流到第 3 个阀浇口)附近(节点 N906273,见表 4)时,下一个阀浇口(第 3 个阀浇口)打开,塑料熔体会从第 3 个阀浇口流出,与从第 1 个阀浇口流出的塑料熔体汇合,继续向前流动到下一个阀浇口,依次直到充满模具型腔。经过多次调整阀浇口的打开时间和反复模拟,熔接线的问题得到了有效解决。总体来看熔接线的数量明显减少,比较长的熔接线基本上都在产品的背面,外观表面没有明显的熔接线,如图 5 所示。优化后的阀浇口打开时间见表 4,阀浇口编号如图 2 所示。

表 4 优化后的阀浇口打开时间

阀浇口编号	类型	初始状态	触发器	触发器位置	打开时间/s	关闭时间/s	打开延时/s
第 1 个阀浇口	实时	已关闭	流动前沿	B843	0.105	46	0
第 2 个阀浇口	实时	已关闭	流动前沿	N867784	0.746	46	0
第 3 个阀浇口	实时	已关闭	流动前沿	N906273	0.752	46	0
第 4 个阀浇口	实时	已关闭	流动前沿	N860269	1.094	46	0
第 5 个阀浇口	实时	已关闭	流动前沿	N1159315	1.085	46	0
第 6 个阀浇口	实时	已关闭	流动前沿	N677200	2.267	46	0
第 7 个阀浇口	实时	已关闭	流动前沿	N705641	2.445	46	0

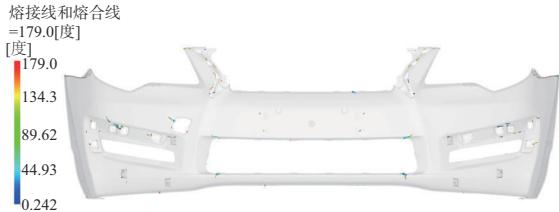


图 5 优化后的熔接线

3 其它缺陷的改善方法

根据上述的模拟,保险杠的缺陷除了熔接线外,还存在翘曲变形较大、产品收缩不均匀、第 1 主方向和第 2 主方向的残余应力均过大、应力变化不均匀等问题,这些问题都是待优化的目标(响应),优化目标多,各个影响目标(响应)的因子(各个工艺参数)又相互影响,这给优化分析带有很大的难题。笔者拟采用熵值法将多个优化目标简化为一个综合优化目标。通过 Moldflow CAE 分析,借助 Minitab 软件求出综合优化目标的最优值及综合优化目标取最优值时各个因子(工艺参数)的合理取值。

3.1 熵值法

熵值法是指根据各项指标观测值所提供的信

息的大小来确定指标权重的一种方法^[4]。熵是对不确定性信息的一种度量。信息量越大,不确定性越小,熵越小^[4]。在多响应的试验中通常会选择熵这个工具计算出各指标的权重,该方法得出的权重较为客观。

熵值法是解决多个响应的有效方法。利用熵值法首先需要根据试验数据构建数据矩阵,求出第 i 个响应在试验运行序号为 j 时对应响应值的比重^[5],即 p_{ij} ,然后求出各个响应的熵值,通过熵值计算各响应的权重 w_j 。有了各响应相对客观的权重,就可以计算所有响应的综合评分^[6]。最终可以通过所有响应综合评分的高低来确定各个因子的取值^[7],综合评分越大越好。综合评分常用的公式见式(1),其中 S_i 为综合评分。

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot p_{ij} \tag{1}$$

3.2 构建综合优化目标

由于存在多个需要改善的响应,而且每个因子以及响应间有复杂的交互作用,如果要进行全面试验,需要的试验次数非常多,耗时太长^[8](有些需要多

台工作站运行几年甚至更长时间),虽然理论上有可能,但在实际生产中进行全面试验的模拟分析费时费力。结合熵值法的优点,在实际生产中通过进行部分有代表性的试验,根据试验中因子的取值和响应的模拟结果,构建一个综合的响应。然后再借助田口方法在Minitab或其它软件的帮助下,求出综合优化目标的最优值,以及取得最优值时对应因子的合理取值。最后再将因子的合理取值设定在软件中模拟验证,如果验证没有问题就可以通过实际生产进行产品试制。

通过仔细分析实际生产中的产品缺陷,结合CAE分析结果,确定总的翘曲变形量、第1方向(塑件厚度方向)的残余应力、第2方向(垂直于第1方向)的残余应力、缩痕指数、顶出时的体积收缩率这5个分析结果作为响应。

在不改变模具结构的情况下,对以上响应影响较大的工艺条件(即变量)有熔体温度(推荐温度230~270℃,低于230℃,流动性不好,高于270℃材料分解)、充填时间(根据之前的分析结果推荐

2.4~6.6 s,少于2.4 s充填不满)、保压时间(18~30秒)、保压压力(充填压力的64%~96%)、冷却介质入口温度(20~30℃)、模具表面温度(40~70℃)。最终建立的因子水平见表5。

表5 因子水平表

因子	水平		
	-1	0	1
熔体温度(A)/℃	230	250	270
充填时间(B)/s	2.4	4.5	6.6
保压时间(C)/s	18	24	30
保压压力(D)/%	64	80	96
冷却介质入口温度(E)/℃	20	25	30
模具表面温度(F)/℃	40	60	80

根据建立的因子水平表,采用6因子3水平创建田口方法,进行27组CAE模拟分析试验,得到的分析结果见表6。

利用熵值法确定权重,首先应该对响应的试验数据进行规范化处理。响应分为效益型和成本型两种,效益型就是数据越大对结果越有利,而成本型则相反。规范化处理数据采用极差变换法,效益

表6 试验因子取值与评价结果的分析结果

运行序号	因 子						响 应					Y
	A/℃	B/s	C/s	D/%	E/℃	F/℃	Y ₁ /mm	Y ₂ /MPa	Y ₃ /MPa	Y ₄ /%	Y ₅ /%	
1	230	2.4	18	64	20	40	9.21	16.47	21.34	1.874	6.51	11.623
2	230	2.4	18	64	25	60	10.21	18.66	27.25	2.301	8.15	13.939
3	230	2.4	18	64	30	80	12.45	19.35	44.23	4.320	8.62	18.506
4	230	4.5	24	80	20	40	11.45	21.50	36.02	2.897	8.30	16.722
5	230	4.5	24	80	25	60	10.32	18.91	27.98	2.352	7.64	14.058
6	230	4.5	24	80	30	80	7.47	12.84	13.12	1.232	5.10	8.386
7	230	6.6	30	96	20	40	7.02	9.90	8.55	1.500	6.32	7.062
8	230	6.6	30	96	25	60	6.23	10.39	8.70	0.856	4.05	6.403
9	230	6.6	30	96	30	80	7.83	13.57	14.61	1.353	5.10	8.941
10	250	2.4	24	96	20	60	7.22	12.34	12.15	1.151	4.50	7.881
11	250	2.4	24	96	25	80	6.87	11.64	11.21	1.120	4.12	7.373
12	250	2.4	24	96	30	40	6.35	10.63	9.09	0.890	3.50	6.444
13	250	4.5	30	64	20	60	6.12	10.12	7.34	0.828	3.32	5.876
14	250	4.5	30	64	25	80	6.10	10.16	8.32	0.822	3.40	6.098
15	250	4.5	30	64	30	40	6.08	10.12	8.26	0.817	3.51	6.098
16	250	6.6	18	80	20	60	7.47	12.84	13.12	1.232	4.60	8.275
17	250	6.6	18	80	25	80	8.91	15.82	19.72	1.752	6.20	11.001
18	250	6.6	18	80	30	40	8.22	14.37	16.34	1.491	6.30	9.835
19	270	2.4	30	80	20	80	7.76	13.43	14.31	1.329	5.03	8.815
20	270	2.4	30	80	25	40	8.72	15.41	18.73	1.677	6.10	10.637
21	270	2.4	30	80	30	60	10.10	18.43	26.59	2.254	7.42	13.562
22	270	4.5	18	96	20	80	9.34	16.74	22.04	1.925	6.12	11.771
23	270	4.5	18	96	25	40	8.53	15.03	17.84	1.608	5.82	10.263
24	270	4.5	18	96	30	60	10.58	19.50	29.72	2.473	8.05	14.704
25	270	6.6	24	64	20	80	12.44	23.84	44.14	3.417	9.80	19.502
26	270	6.6	24	64	25	40	9.96	18.11	25.69	2.190	8.10	13.420
27	270	6.6	24	64	30	60	9.10	16.24	20.75	1.830	6.40	11.399

注:A,B,C,D,E,F同表5;Y₁,Y₂,Y₃,Y₄,Y₅分别为翘曲变形量、第1方向的残余应力、第2方向的残余应力、缩痕指数、顶出时的体积收缩率;Y为综合优化目标。

型采用式(2),成本型采用式(3),数据规范化实际上是将响应的绝对值转化为相对值^[9],数据处理后,每个响应的最优值为1,最差值为0。

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

$$x^* = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, x^* 是规范化处理后得到的值, x 是当前值, $x_{\max}$ 是该响应所有试验结果中的最大值, $x_{\min}$ 是该响应所有试验结果中的最小值。

表6中的5个响应:翘曲变形量、第1方向的残余应力、第2方向的残余应力、缩痕指数、顶出时的体积收缩率都属于成本型,数据越小对生产越有利。规范化处理数据时采用式(3)。处理后数据见表7。

表7 规范化处理指标的分析结果

运行序号	NMMS_翘曲变形量	NMMS_第1方向上的残余应力	NMMS_第2方向上的残余应力	NMMS_缩痕指数	NMMS_顶出时的体积收缩率
1	0.508 634	0.528 694 40	0.620 493 359	0.698 259	0.507 716
2	0.351 648	0.371 592 54	0.460 287 341	0.576 363	0.254 630
3	0	0.322 094 69	0	0	0.182 099
4	0.156 986	0.167 862 27	0.222 553 538	0.406 223	0.231 481
5	0.334 380	0.353 658 54	0.440 498 780	0.561 804	0.333 333
6	0.781 790	0.789 096 13	0.843 317 972	0.881 530	0.725 309
7	0.852 433	1	0.967 199 783	0.805 024	0.537 037
8	0.976 452	0.964 849 35	0.963 133 641	0.988 867	0.887 346
9	0.725 275	0.736 728 84	0.802 927 623	0.846 988	0.725 309
10	0.821 036	0.824 964 13	0.869 612 361	0.904 653	0.817 901
11	0.875 981	0.875 179 34	0.895 093 521	0.913 503	0.876 543
12	0.957 614	0.947 632 71	0.952 561 670	0.979 161	0.972 222
13	0.993 721	0.984 218 08	1	0.996 860	1
14	0.996 860	0.981 348 64	0.973 434 535	0.998 573	0.987 654
15	1	0.984 218 08	0.975 060 992	1	0.970 679
16	0.781 790	0.789 096 13	0.843 317 972	0.881 530	0.802 469
17	0.555 730	0.575 322 81	0.664 407 699	0.733 086	0.555 556
18	0.664 050	0.679 340 03	0.756 031 445	0.807 593	0.540 123
19	0.736 264	0.746 771 88	0.811 059 908	0.853 840	0.736 111
20	0.585 557	0.604 734 58	0.691 244 240	0.754 496	0.570 988
21	0.368 917	0.388 091 82	0.478 178 368	0.589 780	0.367 284
22	0.488 226	0.509 325 68	0.601 518 027	0.683 700	0.567 901
23	0.615 385	0.631 994 26	0.715 370 019	0.774 194	0.614 198
24	0.293 564	0.311 334 29	0.393 331 526	0.527 262	0.270 062
25	0.001 570	0	0.002 439 686	0.257 779	0
26	0.390 895	0.411 047 35	0.502 575 224	0.608 050	0.262 346
27	0.525 903	0.545 193 69	0.636 486 853	0.710 819	0.524 691

将规范化处理过的响应数据按照熵值法的原理代入公式中进行必要的计算可以得到各个响应的权重^[10]。具体的步骤有:①响应当前值在该指标中的比重,用式(4)计算[式(4)中 x_{ij}^* 为第*i*个响应在

第*j*个运行序号的试验中对应的规范化处理值];②用式(5)求出各响应的熵值 e_j ;③通过式(6)和式(7)计算各响应的权重。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n x_{ij}^*} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

经过计算,得出翘曲变形量、第1方向的残余应力、第2方向的残余应力、缩痕指数、顶出时的体积收缩率的权重依次为25.668%,19.268%,20.667%,12.191%,22.206%。计算过程相对繁琐,可借助Excel进行计算,也可以通过SPSS软件进行计算,还可以通过<https://spssau.com/>在线计算熵值和每个响应的权重。

根据各响应的权重,建立综合优化目标 Y ,其计算公式如式(8)所示。

$$Y = 25.668\% \cdot Y_1 + 19.268\% \cdot Y_2 + 20.667\% \cdot Y_3 + 12.191\% \cdot Y_4 + 22.206\% \cdot Y_5 \quad (8)$$

式(8)中, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 分别为翘曲变形量、第1方向的残余应力、第2方向的残余应力、缩痕指数、顶出时的体积收缩率。

3.3 求解工艺参数

将处理前的分析结果直接代入式(8),经过计算可以得出综合优化目标 Y 的数值,结果见表6中最后一列。

针对表6的试验结果利用Minitab2021进行数据分析。进行数据分析可以采用两种方法,一种是田口方法,一种是响应面法^[11]。

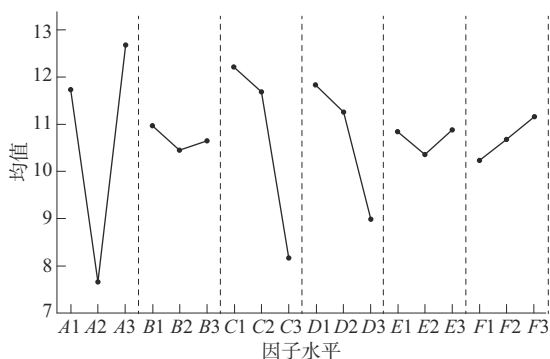
采用田口方法可以快速找到响应望小时这6个因子该取3水平中的哪个水平,之所以快速是因为可以采用表6中已经做好的27组试验的试验数据,不必重新做试验。但是由于该案例中的因子取值是连续的,不是仅有的3个水平,所以采用田口方法,响应望小,但不是最小,只是比较接近最小,如果这6个因子均只能取这3个水平中的1个水平,那响应的最小值即为最优解。

采用响应面法,可以解决田口试验在上述问题中的不足,在数据分析软件Minitab的帮助下通过试验数据可以建立综合优化目标与各因子之间的回

归方程^[12],通过回归方程可以求出综合响应的最优值,以及取最优值时各个因子的取值。但是响应面法需要重新安排试验,试验次数较多。

响应面法又可分为中心复合法和BOX-Behnken等,对于6因子,如果采用中心复合法需要重新安排90组试验^[13],采用BOX-Behnken试验法也需要重新做54组试验。本例中为了达到分析要求,需要的双层面网格数据较多(产品网格约23.36万),每次试验的运行时间都比较长(每组试验约72 h)。如果采用响应面法虽然能够求出综合优化目标的最优值,但是需要的时间长^[14](72 h/组试验×54组试验,最短需要连续工作约162 d),耗费的成本会比较大。因此先采用田口方法找到综合响应最小时各因子的取值。然后将各因子(工艺参数)取值在Moldflow 2023中设定并进行模拟分析,以初步确定能否满足生产要求,如果能满足要求将分析结果应用于实际生产中进行验证。

在minitab2021中创建田口设计,设计类型选用6因子3水平,响应选择“望小”^[15]。经过分析计算,得到均值主效应图,如图6所示。从图6中可以看到当熔体温度选择250℃、充填时间选择4.5 s、保压时间选择30 s、保压压力选择为充填压力的96%、冷却介质入口温度选择25℃、模具表面温度选择40℃时综合响应值最小。



A,B,C,D,E,F分别为熔体温度、充填时间、保压时间、保压压力、冷却介质入口温度和模具表面温度;1,2,3分别为这6个因子的水平-1,0,1,水平对应取值见表5

图6 均值主效应图

实际生产中各因子对响应的影响是相互交错的,改变因子的水平值,分析结果又不相同^[16]。所以上述的分析结果可以作为参考。将因子的水平值重新设定好后,重新分析计算。图7和图8是重新设置后缩痕指数、翘曲变形量的计算结果。

根据模拟结果,无论是缩痕指数还是翘曲变形

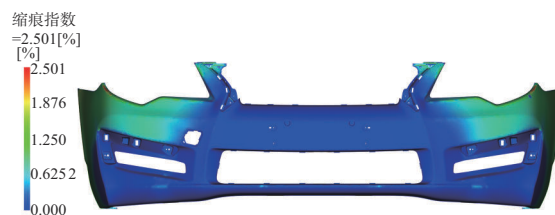


图7 重新设置后缩痕指数的计算结果

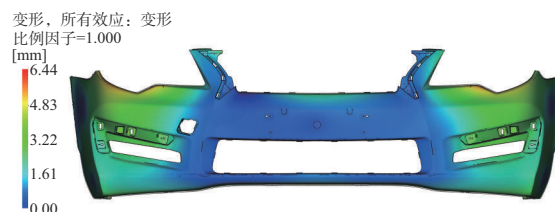
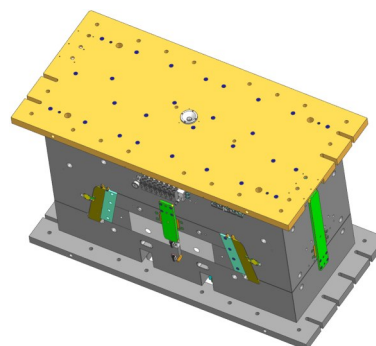
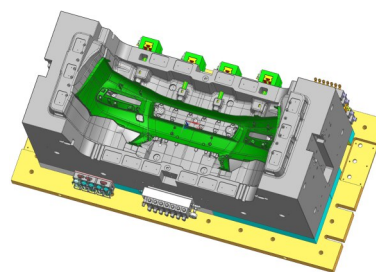


图8 重新设置后翘曲变形量的计算结果

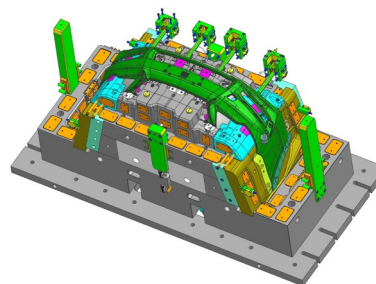
量都达到了企业生产标准。在实际生产中检验合格率从65.35%提高到85.87%,明显提高了产品的合格率。图9是轿车前保险杠模具的三维设计结



(a)



(b)



(c)

a—模具三维总体结构;b—模具上模具部分;
c—模具下模部分

图9 保险杠模具的三维设计结果

果。图10是企业生产采用的模具。图11是合格的保险杠产品。



图10 保险杠模具实物



图11 合格的保险杠产品

4 结论

(1)优化了阀浇口的打开时间,通过采用更合理、更准确的阀浇口打开时间有效地解决了产品上熔接线过多、过长的问题和应力痕问题。

(2)基于熵值法建立综合优化目标,通过正交试验分析出综合优化目标,以及各因子(工艺参数)的合理取值。本例工艺参数的最终合理取值为:熔体温度 250 °C、充填时间 4.5 s、保压时间 30 s、保压压力为充填压力的 96%、冷却介质入口温度 25 °C、模具表面温度 40 °C。

(3)经过工艺参数改进,在不变更模具设计、不修改模具结构的情况下,产品合格率得到了有效提高,从 65.35% 提高到 85.87%。

(4)利用模流分析软件 Moldflow 2023^[16],在阀浇口功能、DOE 功能、田口方法的帮助下结合数据分析软件 Minitab,能够快速解决针对多响应、有交互作用多因子的取值问题。该方法能有效解决多优化目标且因子有交互作用的注塑工艺参数选取问题,节约试模成本。

参考文献

- [1] 孙小忠. 汽车塑料保险杠喷涂线的工艺平面布置设计[J]. 汽车工艺与材料, 2011(2):63-68.
Sun Xiaozhong. Process layout design of spraying line for automobile plastic bumper[J]. Automobile Technology and Materials, 2011 (2):63-68.
- [2] 张利华. 基于 Moldflow 的电器面板翘曲分析[J]. 机械, 2014, 41 (7):43-46, 72.
Zhang Lihua. Electrical panel warping analysis based on Moldflow [J]. Mechanics, 2014, 41(7):43-46, 72.
- [3] 张晓彬, 刘斌. 注塑工艺参数优化的数值模拟分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(4):361-366.
Zhang Xiaobin, Liu Bin. Optimization of injection molding parameters based on numerical simulation[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2013, 34(4):361-366.
- [4] 赵建春, 刘力源. 基于 MATLAB 中值滤波算法的优化与实现[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(4):37-39.
Zhao Jianchun, Liu Liyuan. Optimization of median filtering algorithm based on MATLAB[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34 (4):37-39.
- [5] 赵凯, 李玮瑶, 吕海莲. 系统工程和运筹模型在物流企业绩效评价中的应用[J]. 物流技术, 2014, 33(3):96-98.
Zhao Kai, Li Weiyao, Lv Hailian. Application of system engineering and operations model in performance evaluation of logistics enterprises[J]. Logistics Technology, 2014, 33(3):96-98.
- [6] 赵安民. 基于 Moldflow 的录音机外壳注塑成型优化设计[J]. 塑料科技, 2021, 49(2):62-65.
Zhao Anmin. Optimization design of injection molding for plastic instrument shell based on Moldflow[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(2):62-65.
- [7] 吴俊超, 陈爱霞. 单反相机机身注塑件注塑成型工艺研究[J]. 九江职业技术学院学报, 2014(3):81-83.
Wu Junchao, Chen Aixia. Research of injection molding process based on the fuselage of SLR cameras[J]. Journal of Jiujiang Vocational & Technical College, 2014(3):81-83.
- [8] 蔡厚道. 基于数值模拟和响应面法的支架注塑工艺优化[J]. 塑料工业, 2015, 43(11):56-60.
Cai Houdao. Injection molding parameter optimization of a bracket based on numerical simulation and response surface method[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(11):56-60.
- [9] 曾文瑜. 汽车保险杠冷热流道结合注塑成型工艺 CAE 优化分析[J]. 塑料工业, 2016, 44(3):83-88.
Zeng Wenyu. Optimization analysis of cold hot runner injection molding technology with CAE for the car bumper[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(3):83-88.
- [10] 柳存昭. 对尺寸公差控制较为有利的设计方法[J]. 汽车科技, 2015(2):28-32.
Liu Cunzhao. The appropriate design methods for dimension tolerance control[J]. Auto SCI-Tech, 2015(2):28-32.
- [11] 吴俊超. 基于 Moldflow 的汽车仪表板大型塑件注塑模工艺优化[J]. 中国塑料, 2021, 35(12):121-128.
Wu Junchao. Process optimization of injection mold for large plastic parts of automobile dashboard based on Moldflow[J]. China Plastics, 2021, 35(12):121-128.
- [12] 刘峰, 沈洪雷. 工艺参数对平板类塑件翘曲变形的影响及优化[J]. 常州工学院学报, 2018, 31(2):23-26.
Liu Feng, Shen Honglei. The influence and optimization of processing parameters on warpage of injection molded panel products[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2018, 31

- (2):23–26.
- [13] 黄继战,陈炜,仇文宇,等.汽车音响面板热流道注射成型工艺优化研究[J].塑料工业,2019,47(10):81–85.
- Huang Jizhan, Chen Wei, Qiu Wenning, et al. Process optimization of hot runner injection molding for a automotive audio panel [J]. China Plastics Industry, 2019, 47(10):81–85.
- [14] 吴俊超,黄帅,邓锐,等.基于Moldflow的轿车后视镜镜框注塑工艺优化[J].工程塑料应用,2022,50(7):71–78,98.
- Wu Junchao, Huang Shuai, Deng Rui, et al. Optimization of injection molding process for car rearview mirror frame based on Mold-

- flow[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(7):71–78, 98.
- [15] 聂胜利.注塑成型熔体/模具界面接触热阻研究[D].长沙:中南大学,2014.
- Nie Shengzhao. Research on interface thermal contact resistance in injection molding[D]. ChangSha: Central South University, 2014.
- [16] 陆洋,李卫民,汪强.基于Moldflow的塑料拉手注射模具设计[J].机械工程师,2014(3):126–128.
- Lu Yang, Li Weimin, Wang Qiang. Application of Moldflow software in injection mould design of plastic handle[J]. Mechanical Engineer, 2014(3):126–128.

专精特新 橡塑“星势力” CHINAPLAS 聚焦专精特新



近年来,“专精特新”——指具有专业化、精细化、特色化、新颖化的中小企业,已成为国内各行各业中最热门的词汇之一。推动专精特新发展先后出现在“十四五”规划、中央政治局会议等高层文件和会议中,成为了国计民生的重要聚焦点,随之而来的发展机遇,也吸引了资本市场的目光。

作为立足中国的世界级橡塑工业展览会,CHINAPLAS 将于 2023 年 4 月 17 日于「CHINAPLAS 2023 国际橡塑展」展会现场举办「专精特新 橡塑“星势力”」系列活动,为专精特新企业提供大放异彩的舞台。

全方位聚焦专精特新 大幅度提高参展效率

CHINAPLAS 一直致力于发现橡塑行业的前沿科技,促进全供应链条之间的供需对接顺畅,为促进橡塑业的高质量发展发挥平台作用。CHINAPLAS 参展企业 70% 为中小企业,据统计,其中逾 400 家已获专精特新企业称号——市级及省级近 300 家,更有 100 余家荣获国家级“小巨人”,这些亮眼的数据仍在不断更新中。因而,携手专精特新,共谋橡塑行业高质量发展,力争让这些行业未来之星脱颖而出,便成为 CPS 当仁不让的平台使命。

CHINAPLAS 将打通线上线下全方位宣传渠道——

● 预热造势:通过展会官方网站、社交平台以及电子邮件等方式,精准触达;

● 展会同步:专精特新宣传彩页、开辟精品主题参观路线指南等,重点推介;

● 现场直播:打破线上线下壁垒,扩大品牌影响,深化传播效果,并驾齐驱;

● CPS+平台:持续展示企业产品及技术优势,促进供需对接、交易转化。

强势打造聚焦舞台,让观众和买家有机会了解到这些冉冉升起的未来之星,力保专精特新企业令人眼前一亮,大幅提高参展效率!

专精特新企业抢先看 CHINAPLAS“星”璀璨

专精特新企业大多专注于某个细分市场,在经营管理方面精细且高效,同时还具有很强的创新能力和抗风险能力。CHINAPLAS 了解到,参展的专精特新企业基于强大的研发实力和技术优势,在深耕橡塑行业的过程中不断精益求精、力争上游,或与高等学府联合创立研究中心,潜心钻研先进技术;或致力开拓规模可观的生产基地,不断推出优质产品,逐步迈向国际舞台。这些橡塑“星”势力光彩夺目,谁不想抢先一睹为快呢?

例如 PE 功能薄膜专业制造商华龙膜材,继推出广受国际市场认可的 GRS 认证再生功能膜、克服传统复合软包装不具回收价值障碍的 MDOPE 膜后,认为单一材质是体量巨大的大方向,也将持续关注食品接触级再生功能膜、升级改进药品及医疗器械包装功能薄膜性能,以满足日益增长的食品、医疗、保健等行业的需求;还有已实现包括 GAO, SAO, UVA, HALS, U-pack 在内的抗老化助剂产品的产能配套的利安隆,作为高分子材料供应商,针对汽车产业转型带来的新问题,聚焦“高耐热、高耐候、智能化、阻燃体系”四种新能源汽车材料典型需求,提出涵盖典型内外饰材料、电池周边材料、电线电缆材料、充电桩充电枪材料、毫米波雷达等电子与通讯材料的抗老化解决方案。

还有众多璀璨的橡塑“星”势力将在「“专精特新”助力橡塑行业高质量发展交流会暨授牌仪式」——这场 CHINAPLAS 为橡塑行业专精特新企业打造的专属盛会上——耀目登场,可以预见的是,专精特新定将在 CHINAPLAS 中大放异彩,同样衷心期待您的参与!

(CHINAPLAS)