

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.06.027

塑料类汽车零部件仿真模拟技术研究进展

高健峰

(上海亚大汽车塑料制品有限公司,上海 201708)

摘要:从选材与结构优化、成型工艺优化和性能测试仿真方面,综述了近几年国内在塑料类汽车零部件仿真模拟技术方面的研究进展情况。其中,在成型工艺优化方面,重点总结了BP神经网络、灰色关联等算法在注射成型工艺优化方面的应用情况,同时也介绍了多种算法联合仿真的研究进展情况。最后对应用于塑料类汽车零部件的仿真模拟技术发展方向进行了展望。

关键词:汽车零部件;塑料;模拟仿真;成型工艺优化

中图分类号: TQ320.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)06-0182-05

Research progress in simulation technology of plastic automotive parts

GAO Jianfeng

(Shanghai Chinaust Automotive Plastics Co., Ltd., Shanghai 201708, China)

Abstract : From the aspects of material selection and structural optimization, molding process optimization, and performance testing simulation, the domestic research progress in simulation technology of plastic automotive parts in recent years was reviewed. Among them, in terms of molding process optimization, the application of algorithms such as BP neural network, grey correlation and so on in injection molding process optimization was mainly summarized, and the research progress in joint simulation of multiple algorithms was also introduced. Finally, the prospect on the development direction of simulation technology for plastic automotive parts was expounded.

Keywords : automotive part ; plastic ; simulation ; molding process optimization

随着汽车工业的不断发展,越来越多的塑料材料被用于制作汽车零部件,塑料类汽车零部件具有质轻、耐腐蚀、不生锈、比强度和比刚度高的特点,且容易加工,易于制成各种形状的制品,不仅在汽车内外饰件中得到广泛的应用,而且也越来越多地应用于汽车各类结构件中。塑料类汽车零部件的设计与制造流程涉及选材、结构设计、成型和性能检测等多个环节。传统的实验方法不仅耗时费力,而且成本高昂,会使新产品的研发流程变长、研发成本高涨,不利于新产品在市场上的推广。而现代仿真模拟技术的引入,能够极大地改善这一状况。通过该技术,研发人员能够在更短的时间内完成产品研发,节省大量资金,并显著提升研发效率。近年来,国内对塑料类汽车零部件仿真模拟技术的研究不断深入,国内学者和研究人员均取得了显著的成果。笔者根据近几年的国内文献,从选材与结构优化、成型工艺优化和性能测试方面,综述了国内近几年塑料类汽车零部件仿真模拟技术的研究进展情况,并对该类技术的未来发展方向进行了

展望。

1 选材与结构优化

采用塑料材料代替金属材料制造汽车零部件时,为了保证塑料类汽车零部件在具有较好减重效果的同时还能保持良好的应用性能,需要进行相应的结构设计。通过仿真模拟技术,可以减少实际结构的修正次数、降低材料的耗费、提升结构设计的效率。

对于纤维增强塑料(FRP)类汽车零部件,部分是通过缠绕或铺层的方式进行制备,而缠绕和铺层的结构参数对零部件的减重效果和性能有重要的影响。郭巍等^[1]运用Abaqus软件对FRP汽车储气罐进行仿真分析,选择了碳纤维的缠绕层数、缠绕角度,以及玻璃纤维的缠绕层数、缠绕单层厚度4个对FRP储气罐体质量、应力和位移影响较为显著的结构参数,利用拉丁超立方抽样方法获得32组抽样数据,建立了一种Kriging代理模型,用于将结构参数和评价指标进行关联,最后利用遗传粒子群优化算法(GAPSO)求得最优解。最终

通信作者: 高健峰,主要研究方向为汽车&新能源材料及工艺开发

收稿日期: 2024-05-30

引用格式: 高健峰. 塑料类汽车零部件仿真模拟技术研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6): 182-186.

GAO Jianfeng. Research progress in simulation technology of plastic automotive parts[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6): 182-186.

结果表明,经优化后,FRP 储气罐的质量减轻了 14.7%,获得了显著的减重效果,同时还能保持良好的力学性能。

秦晓宇等^[2]论证了碳纤维复合材料(CFRP)属油底壳的可行性,利用 Fibersim 软件探讨了油底壳结构 4 种铺层方案(0°, 90°, 45°和-45°)的铺覆可行性,发现在这 4 种方案下,采用完整纤维铺层铺覆的方式,均会造成不同的铺覆缺陷,因此需要进行裁剪处理(剪口和分块)。根据不合格率和完整度两项指标,发现剪口处理方案为最佳方案。

贾慧芳等^[3]利用仿真技术对车门内饰板的静动态属性(包括模态属性、刚度属性和强度属性)进行了分析,基于多属性多目标集成手段,利用第二代非劣排序遗传算法协同优化设计了车门内饰板零部件的厚度,得到了最优的结构参数,不仅使内饰板的静动态属性满足了标准的要求,而且使内饰板的总质量有效减轻了 12.5%,实现了轻量化,最终使车门内饰板通过了实际生产和路试验证。另外,该作者还利用仿真技术对汽车前保险杠随机振动性能进行了分析^[4],通过集成平台,采用多岛遗传算法对前保险杠厚度进行了优化迭代,将保险杠的质量减轻了 9.38%,使保险杠的减重效果与疲劳性能得到了最优匹配,从而通过了整车路试验证。

赖春辉^[5]通过拓扑优化、尺寸优化和形貌优化确定了复合材料汽车尾门的拓扑结构、尾门各部件的厚度和尾门加强筋肋的布置与尺寸。优化结果表明,与传统钣金尾门相比,复合材料汽车尾门质量减轻了 3.15 kg (不包括玻璃、焊点和胶黏剂),零件数目减少了 71%。

朱佳文等^[6]针对某新能源车型前地板后本体件的性能、成型工艺和装配要求,使用短切玻纤热塑性复合材料替代原铝合金材料,对后本体件进行了轻量化结构设计。使用 UG 软件建模,然后导入 HyperWorks 中分析了后本体的典型工况。研究发现,复合材料前地板后本体件的结构设计能够满足性能和工艺方面的要求,与原铝合金地板相比,复合材料地板的应力安全系数较高,同时达到了减重 10.37% 的效果。

马尚标等^[7]采用短切玻纤增强热塑性塑料代替原钢质材料用于制造蓄电池托盘,对托盘的结构进行了优化。通过 SolidWorks 软件建模,然后导入 Hyper Works 中,分析了托盘的典型工况。发现采用短切玻纤增强热塑性塑料制造的蓄电池托盘在刚度和强度方面满足性能要求,应力安全系数高于钢质托盘,同时相对于钢质材料托盘,达到了减重 40.74% 的效果。

王国旺^[8]针对电动汽车电池包箱体结构进行了轻量化设计。首先对原金属电池包进行有限元建模,提取了 5 种静力学工况和约束模态工况下金属电池包性能参数值,以此作为复合材料电池包优化设计的约束;然后将片材模塑料(SMC)复合材料应用到电池包箱体上盖板,将 CFRP 应用到下箱体,采用 Altair OptiStruct & HyperStudy 软件集对复合材料上盖板和下箱体进行了多步结构优化;最后,对优化后的复合材料电池包进行了多工况性能分析(包含随机振动、机械冲击、挤压、底部球击和跌落等),从而验证了复合材料电

池包结构优化方法的可靠性。

牟云涵等^[9]利用有限元软件 Abaqus 研究了椰壳纤维增强聚丙烯(PP)复合材料应用于汽车内饰的可行性。结果表明,椰壳纤维增强 PP 复合材料具有良好的力学性能,可用于制造汽车安全气囊盖板。

2 成型工艺优化

在塑料类汽车零部件众多成型工艺中,注射成型是最主要的成型工艺,注射成型的工艺参数较多,不同的工艺参数设置对汽车零部件的最终形态、尺寸精度、性能等有不同的影响,因此需要针对每个汽车零部件的结构特点进行工艺调试和优化。传统的上机调试耗时长、成本高,而采用仿真模拟技术可以大幅缩短工艺调试的时间,避免材料和能源的浪费。其中,模流分析是最常用的注射成型工艺参数优化模拟技术,其一般与正交试验相结合,通过极差或方差分析得出不同工艺对最终成型零部件质量(翘曲量、体积收缩率等)的影响程度,并获得最优的工艺参数。这类技术可用于多种塑料汽车零部件,如汽车前端框架^[10]、汽车内饰面板^[11]、汽车前大灯配光镜^[12]、汽车座椅调角器^[13]、汽车电控单元保护壳^[14]等。常用的模流分析软件为 Moldflow 或 Moldex3D 软件。除极差或方差分析外,BP 神经网络、灰色关联、粒子群算法、响应面等也常结合模流分析用于注射成型工艺优化中,且优化结果优于极差或方差分析。

2.1 BP 神经网络

为了解决汽车斗框塑件注射成型时产生的翘曲变形量大和收缩率大的问题,方群霞等^[15]通过 BP 神经网络预测优化了塑件的多个注射成型工艺参数。使用粒子群算法(PSO)改进了所采用的 BP 神经网络,由此构建了一种可以将注塑工艺参数与翘曲变形量和体积收缩率关联起来的预测模型。结果表明,通过预测模型,能将塑件的翘曲变形量和体积收缩率分别降低至 0.95 mm 以下和 4% 以下。

马旭东等^[16]针对车用饰件的注塑工艺参数优化,将正交试验与 BP 神经网络进行联合,并结合翘曲、收缩和残余应力 3 个指标的权重进行了综合分析,获得了综合评分的最小值,为 0.063。随后在正交试验样本的基础上,建立了 6-10-3 的 BP 神经网络,然后利用遗传算法进行寻优,将综合评分的最小值为寻优目标,优化得到了最佳的注塑工艺参数,通过 CAE 的验证。获得的综合评分值为 0.031,相比正交试验优化值,提升了 50.8%。

陶诗豪等^[17]以某汽车仪表板大型注塑件产品为研究对象,将翘曲变形量和体积收缩率作为优化指标,对注塑工艺参数进行了优化。在 Moldflow 软件模拟仿真的基础上,利用 Box-Behnken 试验设计方法采集数据,通过 BP 神经网络模型和非支配排序遗传算法获得了最佳的工艺参数组合。在最佳工艺参数组合下,体积收缩率与翘曲变形量分别降低了 8.58% 和 8.83%,从而汽车仪表板的成型质量得到有效提高。

陈毅超等^[18]通过有限元仿真对某品牌汽车 B 柱外饰板

进行了轻量化设计,为了验证轻量化设计的合理性,以翘曲变形量为指标,运用Moldflow软件和正交试验法优化了外饰板的注塑工艺参数,然后利用Matlab平台建立BP神经网络模型,通过遗传算法进行全局寻优,在最优工艺参数组合下得到轻量化设计前后两模型的最大翘曲变形量和制件质量,发现采用的轻量化设计可使制件减重达9.71%、翘曲变形量减小8.37%,较好地实现了轻量化设计的目标。

2.2 灰色关联

覃岭等^[19]以大型薄壁塑件汽车后保险杠为研究对象,通过Moldflow分析和田口实验法对保险杠注塑工艺参数进行了优化,利用灰色关联分析法将多目标的优化转为单目标优化,从而得到了最佳工艺参数组合。

张建鹏等^[20]以线束连接器上盖的体积收缩率、翘曲变形量和导轨偏移量为指标,运用灰色关联分析将这3个指标的多目标优化问题转换为关联度均值的单目标优化。通过响应面法构建了工艺参数和关联度均值间的优化模型,研究各成型工艺参数的不同水平对关联度均值的影响,进而最大限度优化了工艺参数,并以此优化模型为基础实行了逆向变形补偿,进一步降低了塑件的变形。

陈拓等^[21]以汽车双色开关面板为优化对象,以体积收缩率作为面板外壳的单目标、体积收缩率和整体翘曲变形量作为面板内壳的多目标,进行了工艺优化。然后结合主成分分析、灰色关联度和优劣解距离法确定了灰色相对贴程度,进而得出最优工艺参数组合和各因素的影响程度,达到了优化目的。

周纪委等^[22-23]针对塑件在成型过程中出现的翘曲变形和体积收缩问题,利用Moldex3D软件进行模流分析,并通过灰色关联度分析将翘曲变形量和体积收缩率转化为灰色关联度值,从而将多目标优化转化为单一目标(灰色关联度值)优化,进而使翘曲变形量和体积收缩率都获得了较好的优化效果。

方明月等^[24]针对汽车仪表内饰件,采用正交试验设计和灰色关联分析进行优化,以解决注塑过程中出现的翘曲和体积收缩问题。通过灰色关联分析,可将内饰件的多目标优化问题转换为单目标优化问题,最终得到了最优的工艺参数组合,可使翘曲量和体积收缩率同时最小。相对于极差分析,采用灰色关联分析方案可以获得更优的优化效果,翘曲量和体积收缩率相比默认工艺参数分别降低了46.44%和23.71%。

代元祥等^[25]以灰色系统理论为基础,对玻璃纤维增强PA66气门室盖注塑工艺正交优化试验数据进行灰色关联度分析,发现纤维含量和熔体温度是影响翘曲变形量最大的两个因子。使用Design-expert软件,以纤维含量和熔体温度作为输入,翘曲变形量作为输出,进行响应面法寻优,最终显著提升了气门室盖的注塑质量。

2.3 联合仿真

将多种仿真模拟技术进行联合,可以充分发挥各技术的

优点,以获得更为精确的优化效果。为了改善进气歧管的翘曲变形,提高歧管的进气性能,欧阳宇等^[26]利用Box-Behnken设计响应曲面法,通过构建随机森林回归模型,对PA6/GF30进气歧管注射成型工艺参数进行优化,并利用Moldflow和Ansys联合仿真技术对歧管的进气性能进行分析。结果表明,歧管翘曲变形量下降了27%,进气流量偏差率由原来的-3.944 153 2%~3.554 111%下降至-2.545 082 2%~1.697 694 7%,进气不均匀度由原来的7.498 3%下降至4.242 8%,大大提高了歧管的进气性能。

于保君等^[27]以汽车保险杠面罩为分析对象,通过DOE试验设计,对模流仿真工艺参数进行优化,并用于指导试模,将实际试模结果与模流仿真结果进行对比,实现模流-结构联合仿真。结果表明,模流-结构联合仿真结果与实际试验结果高度吻合,联合仿真精度可以达到86%以上。

为提高注塑产品质量,彭培铭等^[28]以汽车制动插件为例,利用响应面法-中心复合试验设计(CCD),并结合注塑CAE技术分析模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间等工艺参数对制品翘曲变形量的影响,采用标准粒子群算法和CAE技术对上述4个注塑工艺参数进一步优化,并对优化的参数组合进行生产验证。结果表明,采用响应面法并结合标准粒子群算法优化的工艺参数可有效降低插件翘曲变形量,提高注塑产品质量,缩短生产周期。

郑守银等^[29]基于保险杠在注射成型过程中存在的体积收缩问题,将正交试验法、Stacking算法和PSO优化算法相结合,通过构建RSK-ELM集成模型,对注射成型过程中温度、压力、时间等工艺参数进行优化。利用Moldflow软件对优化后的工艺参数组合进行仿真分析,表明集成模型具有更高的预测精度。在优化的工艺参数组合下,保险杠顶出时的体积收缩率平均值与正交试验结果的最小值相比,降低了3.94%,改善了注塑件的收缩变形,提高了产品质量。

马镜涵等^[30]针对ABS汽车车门内饰柱在注塑过程中的翘曲变形问题,在响应面模型基础上结合人工鱼群算法,对4个影响翘曲变形量最大的工艺参数——熔体温度、模具温度、保压压力、保压时间进行分析,获得最优工艺参数组合,并利用Moldflow软件验证了优化后的工艺参数组合。结果表明,在最优的工艺参数组合下,内饰柱翘曲变形量降低了14.2%,并且人工鱼群算法得到的优化结果与Moldflow仿真结果基本一致,表明在汽车内饰柱注塑工艺优化过程中,人工鱼群算法具有较好的效果。

为减少汽车内饰件注塑时产生的成型质量缺陷,张庆等^[31]以塑件Z向翘曲变形量、体积收缩率、缩痕指数为优化目标,将拉丁超立方试验设计与模流分析相结合,建立灰色关联度与保压压力、熔体温度等工艺参数之间的Kriging代理模型,通过自适应粒子群算法(APSO),在Kriging代理模型内优化各个工艺参数。结果表明,Kriging代理模型的预测值与实际结果基本一致,在优化的最佳工艺参数组合下,Z向翘曲变形量、体积收缩率、缩痕指数分别降低了1.21%,

30.11%和68.53%,显著提高了塑件的成型质量。

针对汽车碳罐盖板注塑时易产生严重翘曲变形的问题,黄佳佳等^[32]采用预变形优化设计方法,即在对碳罐盖板零件实物进行扫描测量的基础上,结合Moldflow及Hypermesh仿真分析,综合考虑碳罐盖板实际预变形量与仿真分析变形量之间的差异、产品预变形设计对盖板结构刚度的影响等因素,成功构建了准确的预变形模型,解决了碳罐盖板注塑时产生的翘曲变形问题。

2.4 其他算法

为了解决汽车进气歧管的翘曲变形问题,提高进气歧管的进气性能,欧阳宇等^[33]提出了一种随机森林智能优化算法,用于优化进气歧管注塑工艺。该方法将歧管的翘曲变形量作为优化目标,以正交试验和噪音试验的样本作为随机森林回归模型的原始数据,利用Bootstrap采样和回归决策树进行训练,并将训练结果与实际结果进行对比。训练结果表明,与实际参考值相比,预测的翘曲变形量降低了13.6%,说明利用随机森林优化算法对进气歧管注塑工艺进行优化的精度较高,效果显著。

为解决汽车轮眉的装配精度问题,赵焕平等^[34]利用模流技术对轮眉翘曲变形的原因进行分析,根据分析结果,采用响应面法建立翘曲变形量二阶回归模型,对模具温度、熔料温度、充填时间和保压压力等参数进行优化分析,以确定最优工艺参数组合。模拟结果显示,与优化前相比,优化后的最大翘曲变形量降低了18.75%,并且证明对翘曲变形量影响最大的是充填时间,熔料温度和模具温度次之,保压压力对翘曲变形量的影响最小。由此可见,响应面模型作为优化方法对汽车轮眉翘曲变形量的预测准确度高,能显著提高轮眉的成型质量。

钟厉等^[35]以碳纤维复合材料汽车保险杠为研究对象,选择模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间和碳纤维含量为变量参数,利用Taguchi实验法得到初步优化结果,再结合响应面模型、NSGA-II遗传算法、Moldflow仿真软件对试验结果进一步优化,得到最优参数组合。结果表明,优化后的翘曲变形量、缩量分别减少了4.477 mm和0.011 mm,顶出时的体积收缩率降低了0.7%,优化效果显著,制品质量得到极大改善。该试验结果对注射成型工艺参数与纤维含量的综合选择及优化具有重要意义。

为了提高轿车前保险杠塑料外板的合格率,吴俊超等^[36]利用模流分析软件Moldflow2023,采用熵值法建立综合优化目标,借助阀浇口功能、DOE功能、田口方法,并结合数据分析软件Minitab进行响应面法试验设计和数据分析,对熔体温度、充填时间、保压时间、保压压力、冷却介质入口温度、模具表面温度等有交互作用的注塑工艺参数进行优化,在不改变模具结构的情况下,使产品合格率由65.35%提高到85.87%。

2.5 CRTM工艺优化

除了注射成型工艺外,树脂传递模塑成型(RTM)工艺和

压缩树脂传递模塑成型(CRTM)工艺也可用于塑料汽车零部件的成型,使用的塑料材料大多为纤维增强塑料材料,一般采用PAM-RTM软件进行优化。高猛等^[37]以复合材料电池箱上盖板为研究对象,利用RTM工艺和CRTM工艺进行成型,采用PAM-RTM软件分别对这两种工艺进行了仿真模拟,对比了RTM与CRTM工艺在恒压注胶和恒流量注胶条件下充模时间的变化及压力分布特点,研究了利用这两种工艺成型不同纤维含量的制品时对应填充时间的变化规律。结果表明,当采用恒压注胶时,选取不同的注胶压力,发现CRTM工艺的充模时间与注胶压力成正比关系,压力越低,时间越短;采用恒流量注胶时,两种工艺下的充模时间相近,而CRTM工艺的充模压力相比RTM工艺明显降低。利用CRTM工艺成型不同纤维含量的制品时,对应的充模时间变化很小,而利用RTM工艺成型时,纤维含量增加,充模时间也随之显著增加。

栗彬琦等^[38]以汽车发动机罩外板为研究对象,利用PAM-RTM软件对外板的CRTM工艺成型进行了仿真分析,对比了CRTM工艺与传统RTM工艺的成型效果。研究发现,当树脂注射压力较低时,与RTM工艺相比,CRTM工艺的充模时间缩短了69%~84%,生产效率得到显著提高。

3 性能测试仿真

除了结构和成型工艺外,塑料类汽车零部件在不同应用环境下的性能状态也非常重要,通过仿真模拟技术,可以快速对零部件的性能进行测试,判断零部件的失效状态,预测材料的加工特性。

赵丰等^[39]以碳纤维增强树脂基复合材料汽车储气罐低速冲击过程为研究对象,建立了有限元仿真分析模型,分别从宏观层面和微观层面分析了储气罐受冲击后的损伤机制、作用机理以及影响因素。结果表明,在冲击点附近,当复合材料的损伤集中于该点时,受冲击一侧的损伤面积比背离冲击一侧的损伤小,且损伤形貌分布不规则;当碳纤维以 $[90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ]$ 的方式进行环向缠绕时或当碳纤维含量为55%时,储气罐具有较好的抗冲击性能;随着复合材料中界面的厚度增加,树脂对纤维的保护作用得到增强,复合材料的承载能力得到提高。

为了研究碳纤维复合材料层合板的失效机理,王晗^[40]采用有限元软件Abaqus对3种不同铺层方式的层合板(单向试样、各向同性试样、有取向试样)进行了建模仿真,以Hashin失效准则作为损伤判定依据,模拟试样在拉伸和压缩载荷下的失效破坏模式。结果表明,试样的拉伸和压缩模拟应力-应变曲线与实际试验结果高度一致,可以准确地预测试样的断裂位置。该方法为分析车辆用复合材料零部件受到不同载荷时的失效方式提供了一种有效手段。

刘国平等^[41]利用ANSYS有限元软件对汽车用碳纤维复合材料的磨削温度特性进行了仿真分析,并对冷却液、网格形式、热源分布模型等影响磨削温度场的因素进行了讨论,同时用热电偶方法测量磨削温度,并将测量结果与仿真结果

进行对比。结果表明,热电偶测量结果与仿真结果基本一致,说明用有限元仿真技术来模拟碳纤维复合材料的磨削过程,可以达到预测效果,减少实验次数。

4 结语

当前,在塑料类汽车零部件的仿真模拟技术中,许多研究的焦点集中在零部件的注射成型工艺上。在这些研究中,Moldflow等模流分析软件占据了主导地位,它们与正交试验、极差分析或方差分析等方法相结合,用于注射成型工艺优化。除成型工艺外,汽车零部件的材料选择和结构设计同样具有举足轻重的地位。因此,研究者们应积极探索更多的仿真模拟技术,在材料的选取和结构设计的优化上加以应用,从而为塑料类汽车零部件的研发提供更为全面和有利的支持。而对于成型工艺的优化,可以进一步开发多种算法,并根据这些算法的特性进行联合应用,以期达到更为精确和卓越的优化效果。此外,仿真模拟技术可以在其他成型工艺(如挤出成型、吹塑成型等)上发挥更多的作用,从而为更多种类的成型工艺提供高效、快速的优化途径。展望未来,随着仿真模拟技术的不断发展和完善,其在塑料类汽车零部件的设计、制造和应用领域将发挥更加重要的作用,而这些技术的进步将推动整个汽车行业向着更高效、更环保、更可持续发展的方向发展。

参考文献

- [1] 郭巍,等.塑料,2021,50(3):115-120.
GUO Wei, et al. *Plastics*, 2021, 50(3):115-120.
- [2] 秦晓宇,等.工程塑料应用,2022,50(2):61-68.
QIN Xiaoyu, et al. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(2):61-68.
- [3] 贾慧芳,等.工程塑料应用,2023,51(8):78-83,99.
JIA Hui Fang, et al. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(8):78-83,99.
- [4] 贾慧芳,等.工程塑料应用,2023,51(9):63-68.
JIA Hui Fang, et al. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(9):63-68.
- [5] 赖春辉.复合材料汽车尾门的设计与开发[D].长沙:湖南大学,2020.
LAI Chunhui. *The vehicle composite tailgate design and development*[D]. Changsha:Hunan University,2020.
- [6] 朱佳文,等.机械设计与制造,2023(2):200-205.
ZHU Jiawen, et al. *Machinery Design & Manufacture*, 2023(2):200-205.
- [7] 马尚标,等.机械设计与制造,2021(11):191-196.
MA Shangbiao, et al. *Machinery Design & Manufacture*, 2021(11):191-196.
- [8] 王国旺.复合材料电动汽车电池包轻量化设计研究[D].长春:吉林大学,2020.
WANG Guowang. *Research on lightweight design of composite battery pack for electric vehicle*[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [9] 牟云涵,等.塑料科技,2020,48(6):94-97.
MOU Yunhan, et al. *Plastics Science and Technology*, 2020, 48(6):94-97.
- [10] 冯顺利.塑料科技,2023,51(11):94-98.
FENG Shunli. *Plastics Science and Technology*, 2023, 51(11):94-98.
- [11] 刘海波,等.塑料科技,2023,51(11):89-93.
LIU Haibo, et al. *Plastics Science and Technology*, 2023, 51(11):89-93.
- [12] 谭安平,等.塑料,2022,51(05):13-17.
TAN Anping, et al. *Plastics*, 2022, 51(05):13-17.
- [13] 郭巍,等.工程塑料应用,2022,50(9):64-69.
GUO Wei, et al. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(9):64-69.
- [14] 孙宝林,等.工程塑料应用,2023,51(10):69-75,84.
SUN Baolin, et al. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(10):69-75,84.
- [15] 方群霞,等.塑料,2020,49(5):129-134.
FANG Qunxia, et al. *Plastics*, 2020, 49(5):129-134.
- [16] 马旭东,等.塑料,2021,50(2):87-92,98.
MA Xudong, et al. *Plastics*, 2021, 50(2):87-92,98.
- [17] 陶诗豪,等.工程塑料应用,2022,50(5):89-93,100.
TAO Shihao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(5):89-93,100.
- [18] 陈毅超,等.工程塑料应用,2023,51(10):85-91.
CHEN Yichao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(10):85-91.
- [19] 覃岭,等.塑料,2022,51(06):72-78.
QIN Ling, et al. *Plastics*, 2022, 51(06):72-78.
- [20] 张建鹏,等.塑料工业,2023,51(2):84-89.
ZHANG Jianpeng, et al. *China Plastics Industry*, 2023, 51(2):84-89.
- [21] 陈拓,等.塑料工业,2022,50(11):88-94.
CHEN Tuo, et al. *China Plastics Industry*, 2022, 50(11):88-94.
- [22] 周纪委,等.塑料,2023,52(6):122-129.
ZHOU Jiwei, et al. *Plastics*, 2023, 52(6):122-129.
- [23] 周纪委,等.工程塑料应用,2022,50(12):61-66.
ZHOU Jiwei, et al. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(12):61-66.
- [24] 方明月,等.工程塑料应用,2023,51(9):83-89.
FANG Mingyue, et al. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(9):83-89.
- [25] 代元祥,等.塑料工业,2022,50(5):119-124.
DAI Yuanxiang, et al. *China Plastics Industry*, 2022, 50(5):119-124.
- [26] 欧阳宇,等.中国塑料,2023,37(3):71-76.
OUYANG Yu, et al. *China Plastics*, 2023, 37(3):71-76.
- [27] 于保君,等.塑料工业,2022,50(S1):86-90.
YU Baojun, et al. *China Plastics Industry*, 2022, 50(S1):86-90.
- [28] 彭培铭,等.塑料,2022,51(1):48-55.
PENG Peiming, et al. *Plastics*, 2022, 51(1):48-55.