纤维增强复合材料行李箱盖热变形有限元分析与结构优化研究

赵天锋 王畅 徐双全 李婷婷

（奇瑞汽车股份有限公司，芜湖 241007）

摘要：为解决长玻纤增强聚丙烯复合材料汽车行李箱盖高温服役后与侧围面差超差的工程问题，结合实车暴晒试验、恒温烘烤试验与有限元仿真分析，开展行李箱盖高温变形规律研究与结构优化方案对比。结果表明，材料蠕变特性是行李箱盖高温长期累积变形的核心诱因；内板加强筋优化与加强板延伸优化均可有效分散局部应力、抑制蠕变变形。经工程可行性分析，采用加强板优化方案，可在不改动内板模具的前提下满足面差精度要求，兼具开发成本低、落地周期短的优势，可为同类塑料行李箱盖结构优化提供参考。

关键词：长玻纤增强复合材料 行李箱盖 蠕变 结构优化

中图分类号：U463.83 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250346

Finite Element Analysis of Thermal Deformation and Structural Optimization of Fiber Reinforced Composite Tailgate

Zhao Tianfeng, Wang Chang, Xu Shuangquan, Li Tingting

(Chery Automobile Co., Ltd., Wuhu 241007)

Abstract: To address the height flushness between the long glass fiber-reinforced composite tailgate and side panel after high-temperature exposure, this study combines real-vehicle solar exposure tests, oven aging tests, and finite element analysis. Results indicate that the material creep is the primary cause of the long-term cumulative deformation of the tailgate under high-temperature conditions. Both the optimization of inner-panel reinforcing ribs and the extension of the reinforcement plate can effectively disperse local stresses and suppress creep deformation. A feasibility analysis identifies the reinforcement plate extension as the optimal solution, as it corrects flushness without requiring mold modifications, while offering low cost and rapid implementation. These findings provide valuable insights for the design of similar polymer tailgates.

Key words: Long glass fiber reinforced composite, Tailgate, Creep, Structural optimization

1 前言

随着汽车工业向轻量化方向发展，纤维增强聚合物复合材料因具有比强度高、可集成化成型等优势，已广泛应用于车身结构增强件与外覆盖件的设计制造中[1-2]。汽车行李箱盖作为尺寸较大的关键外饰功能件，需同时满足轻量化、结构刚度、尺寸稳定性与外观匹配等要求，其材料选型与结构设计面临更高的技术挑战。长玻纤增强聚丙烯复合材料（Long Glass Fiber reinforced Polypropylene, LGF-PP）凭借密度低、比强度与比刚度高、成型加工性好、材料成本可控等综合优势，成为汽车行李箱盖轻量化设计的优选材料[3-5]。目前，LGF-PP 已在多款量产车型中实现工程应用，如宝马

作者简介：赵天锋（1980—），男，助理工程师，硕士学位，研究方向为车身结构优化。

参考文献引用格式：

赵天锋, 王畅, 徐双全, 等. 纤维增强复合材料行李箱盖热变形有限元分析与结构优化研究[J]. 汽车工艺与材料, 2026(9): 52-59.

ZHAO T F, WANG S, XU S Q, et al. Finite Element Analysis of Thermal Deformation and Structural Optimization of Fiber Reinforced Composite Tailgate[J]. Automobile Technology & Material, 2026(9): 52-59.

i3、福特 Kuga 等车型的行李箱盖内板均采用该材料直接注塑成型[6]。

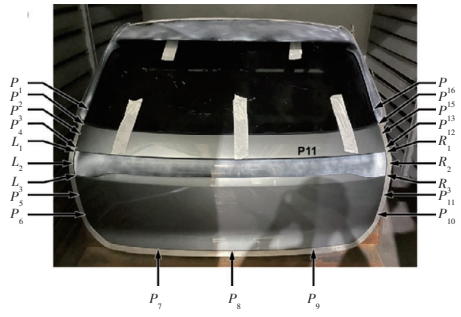
与性能稳定的钣金相比,LGF-PP 的力学性能更容易受到成形工艺条件与服役环境的影响。Junjia Cui 等[7]研究了纤维含量为 40% 的 LGF-PP 在不同应变率下的拉伸行为,发现随着应变率的增加,材料的极限拉伸强度与总伸长率均显著提高,分别提高了约 2 倍和 1 倍。此外,秦唯铭等[8]系统研究了 LGF-PP 在不同温度条件下的拉伸性能,发现随着环境温度的升高,LGF-PP 拉伸强度明显下降。因此,与传统的钣金行李箱盖相比,由 LGF-PP 制成的行李箱盖在服役过程中,其结构性能与尺寸稳定性更容易受到各种环境因素的影响。因此,即便进入批量生产阶段,仍可能出现行李箱盖整体或局部变形导致的装配间隙超差、外观面差不均等匹配质量问题。若直接通过更改行李箱盖主结构方案解决上述匹配问题,往往需要对成型模具、工装夹具乃至生产工艺进行大幅度调整,将显著提升开发成本、延长项目周期,在工程开发后期难以落地实施[9-10]。

本文针对某车型全塑行李箱盖与侧围的外观面差匹配问题开展研究,结合有限元仿真分析与高温环境试验,揭示全塑行李箱盖的高温变形规律;对比分析行李箱盖内板主体结构与局部加强件优化对行李箱盖高温塑性变形的调控效果;综合开发成本、项目周期与验证效果等因素,以期获得兼具经济性与有效性的优化方案,为同类全塑行李箱盖的工程开发提供参考。

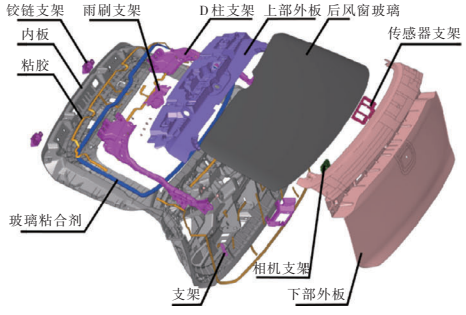
2　行李箱盖形变试验分析

车辆在实际服役过程中需经受夏季高温暴晒等极端环境工况,高温引发的材料蠕变与塑性变形会直接影响行李箱盖的尺寸稳定性,进而改变行李箱盖与侧围的匹配状态。因此,除常温工况下的匹配性检测外,需重点考核高温服役后行李箱盖与侧围的匹配精度,保障全工况下的外观质量与装配功能。该车型的量产质量管控标准规定,车辆经高温暴晒后,行李箱盖与侧围的间隙变化量与面差变化量均需控制在-2~2 mm 范围内,以满足外观匹配与装配功能要求。

为验证行李箱盖高温匹配性能的合格性,开展实车暴晒试验:将试验车辆置于环境温度约 40 ℃的户外工况下暴晒 4 h,待车辆自然冷却至环境温度后,按预设点位测量行李箱盖与侧围的间隙与面差。本次试验的测量点位分布如图 1a 所示,按上述试验流程重复开展 3 次平行试验,统计结果如图 2 所示。试验结果表明:行李箱盖与侧围各测量点位的间隙变化量均处于合格阈值范围内;而 R_1、R_2、R_3 及 P_{12} 点位的面差变化量易出现超差,上述超差点位分别对应行李箱盖气撑杆支撑区域与后组合灯安装区域,说明局部受力与安装结构区域对高温变形更为敏感。



(a)实物图



(b)分析模型爆炸图

图 1　验证用行李箱盖结构

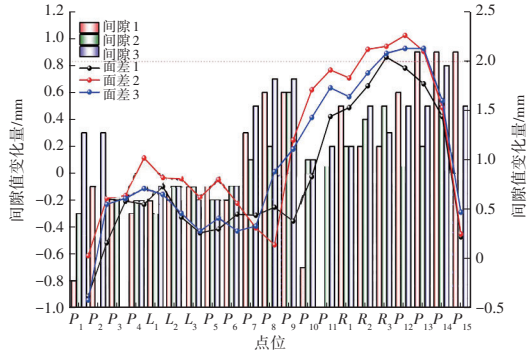


图 2　高温后行李箱盖与侧围的面差值和间隙值的变化量

为明确实车暴晒后面差超差的内在成因,精准量化高温载荷对行李箱盖变形行为的影响规律,采用恒温烘烤试验对高温服役工况进行实验

室复现。夏季极端暴晒工况下，汽车外饰塑料件的表面最高温度可达80 ℃，因此将烘烤试验的目标温度设定为80 ℃。试验过程如下：将行李箱盖总成固定于专用试验工装上，以5 ℃/min的升温速率将环境箱温度升至80 ℃，保温4 h后随箱冷却至室温；待行李箱盖温度完全降至室温后，测量并记录图2a中所有测量点位的间隙变化量与面差变化量。按上述试验步骤重复开展3次平行试验，取测试结果的平均值进行统计分析，试验评价标准与实车暴晒工况一致，即高温试验前、后行李箱盖与侧围的间隙、面差变化量需控制在-2~2 mm范围内。

高温烘烤试验后，行李箱盖与侧围间隙、面差变化量的平均值统计结果如图3所示。由测试结果可知：所有测量点位的间隙变化量均在±1 mm范围内，满足合格要求；R_2、R_3、P_{12}及P_{13}点位的面差变化量超出合格阈值，最大面差变化量达2.5 mm。与实车暴晒试验结果相比，恒温烘烤试验的温度条件更稳定、热载荷作用更充分，因此面差超差现象更为显著，且超差点位与实车工况具有高度一致性。由此可判断，行李箱盖在高温环境下产生的塑性累积变形是引发行李箱盖与侧围面差匹配超差的核心原因。

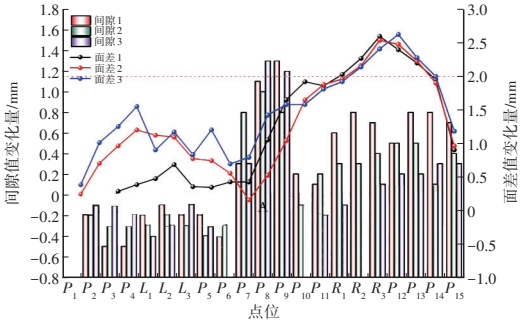


图3 烘烤后行李箱盖与侧围的面差值和间隙值的变化量

3 行李箱盖变形量有限元分析

3.1 有限元计算模型搭建

有限元法是汽车车身结构性能分析的核心数值方法，可精准模拟行李箱盖结构在复杂载荷下的应力与变形响应，为结构优化提供量化依据。本文研究的全塑行李箱盖总成主要由行李箱盖内板、行李箱盖外板与金属加强板组成，对应整车的长度宽度高度分别为4 955 mm、1 975 mm、1 698 mm，行李箱盖总成三维模型爆炸图见图2b。

行李箱盖内板与上部外板采用玻纤质量分数为40%的长玻纤增强聚丙烯（即PP-LGF40，属于LGF-PP类材料），下部外板采用增韧改性聚丙烯（Polypropylene-Ethylene Propylene Diene Monomer-Talc 30，PP+EPDM-T30），即聚丙烯-三元乙丙橡胶共混物填充30份滑石粉；内板与外板通过结构胶粘接工艺连接，金属加强板采用拉铆螺栓紧固于行李箱盖内板内侧。各关键材料的性能参数如表1所示。

表1 复合材料行李箱盖关键材料性能参数

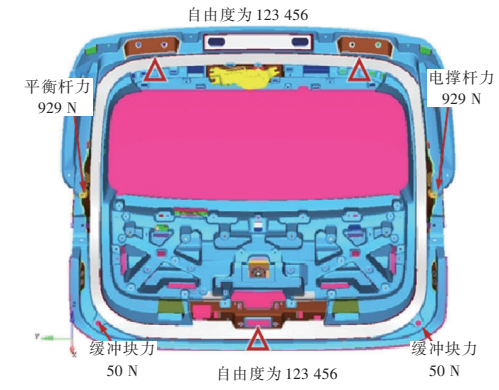
部件名称	材料牌号	温度/℃	密度/kg·m^{-3}	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa
内板	PP-LGF40	23	1 220	5 250	27.7
上部外板	PP-LGF40	80	1 220	2 742	13.7
下部外板	PP+EPDM-T30	23	1 160	2 311	9.6
		80	1 160	725	3.6
加强板	HC340/590DP双相钢	23	7 800	200 000	340

由于下部外板所用改性聚丙烯材料柔韧度较高，对行李箱盖整体刚性贡献有限，因此行李箱盖的高温变形行为由内板结构主导。由表1可知，相同温度条件下，PP-LGF40的弹性模量远高于PP+EPDM-T30，且上部外板对应区域未覆盖面差超差点位，由此可初步推断：行李箱盖内板的结构变形是行李箱盖与侧围面差超差的核心诱因。

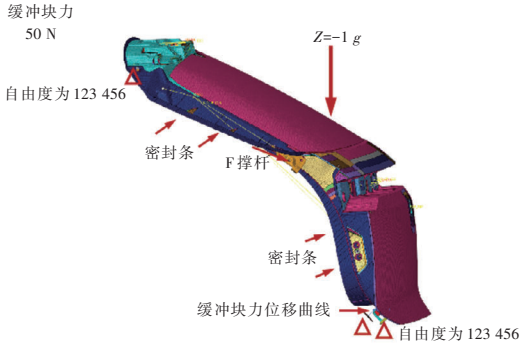
将行李箱盖总成三维几何模型导入HyperMesh前处理软件中进行有限元网格划分，板壳结构优先采用四边形壳单元，实体结构采用六面体实体单元，网格基本尺寸设置为5 mm；对结构圆角、安装孔等应力集中区域进行局部网格加密，在控制计算规模的同时保障计算精度。

3.2 载荷边界条件设置

结合行李箱盖实际服役的接触关系与受力特征，在保证计算精度的前提下对模型进行合理简化：将各部件间的固定连接关系等效为刚性约束，忽略连接界面的接触滑移与局部变形，以减少模型节点数量与计算量。本次分析选取行李箱盖关闭状态为计算工况，边界条件设置如图4所示。



(a)主视图



(b)侧视图

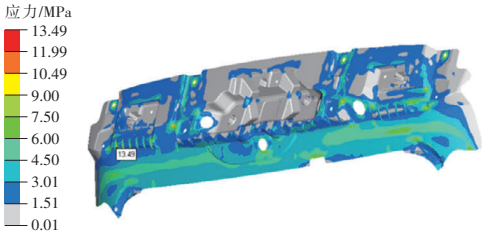
图4　CAE分析边界条件设置

首先约束行李箱盖与车身连接的铰链安装点、车身侧缓冲块对应安装点、门锁锁扣安装点的全部6个自由度,模拟行李箱盖关闭状态下的固定边界。同时考虑缓冲块与密封条的支撑反力,对行李箱盖整体施加Z轴负方向的1g加速度边界条件;在此基础上,施加缓冲块集中载荷50 N,设置密封条等效刚度为0.23 N/mm,左侧与右侧气撑杆分别施加929 N的轴向向外支撑力。

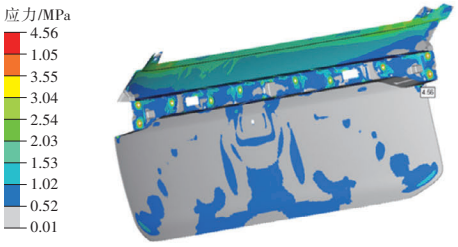
在上述载荷持续作用下,开展行李箱盖的长期变形仿真分析,分别计算常温(25 ℃)与80 ℃环境温度下,行李箱盖承载500 h后的蠕变变形量。

3.3　有限元仿真结果分析

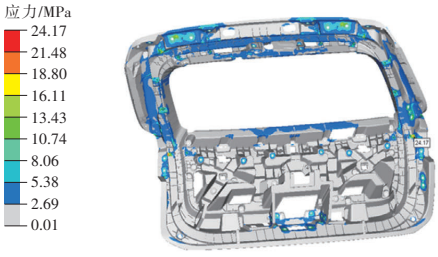
图5所示为常温载荷工况下,行李箱盖外板、内板与加强板的应力分布云图。由计算结果可知,常温加载条件下,行李箱盖各部件的应力均低于材料许用应力,满足强度设计要求。其中,上部外板与下部外板的最大应力分别为13.49 MPa、4.56 MPa,均低于对应材料的许用值(24.93 MPa、8.64 MPa),如图5a与图5b所示;本次分析中材料许用应力取屈服强度的90%,用于保障结构的短期服役安全裕度。行李箱盖内板与金属加强板的最大应力分别为24.17 MPa、315.2 MPa,同样满足强度要求,如图5c与图5d所示。从应力分布规律来看,内板与加强板的最大应力集中区域位于气撑杆支撑部位与后组合灯安装位置附近,与实车试验中的面差超差点位高度对应。



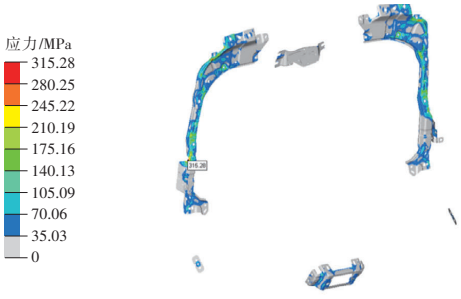
(a)上部外板



(b)下部外板



(c)内板

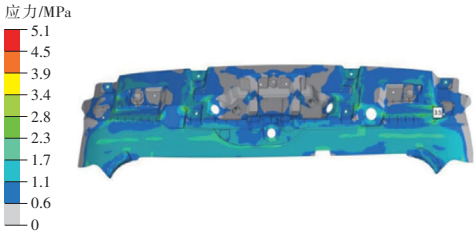


(d)加强板

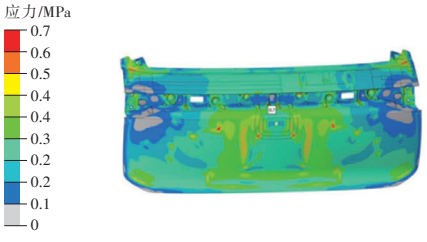
图5　常温下行李箱盖负载时各部件的应力分布云图

上述结果表明,短期载荷作用下行李箱盖各部件的结构强度与刚度均满足设计要求。需要说明的是,刚度表征结构抵抗弹性变形的能力,仅能反映短期载荷下的变形行为;对于聚合物基复合材料部件,高温与长期载荷共同作用下会产生显著的蠕变变形,因此必须通过长期蠕变仿真进一步评估极端环境下的尺寸稳定性。

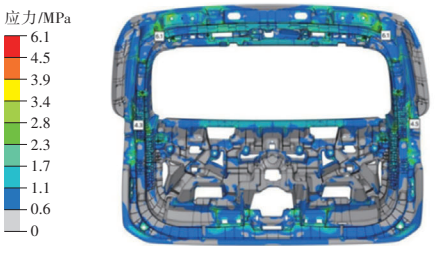
图 6所示为80 ℃高温工况下,行李箱盖各部件的负载应力分布云图。由计算结果可知,80 ℃条件下,行李箱盖上部外板、下部外板、内板与加强板的最大应力分别为3.5 MPa、0.7 MPa、6.1 MPa与251 MPa;内板上气撑杆支撑区域与后组合灯安装位置仍为应力集中区域,应力分布规律与常温工况一致。与常温工况相比,高温下行李箱盖各部件的应力水平均不同程度下降,其原因在于:随着环境温度升高,聚合物基体软化导致材料弹性模量显著降低,在相同位移约束与载荷条件下,塑料部件内部产生的应力响应随之降低。



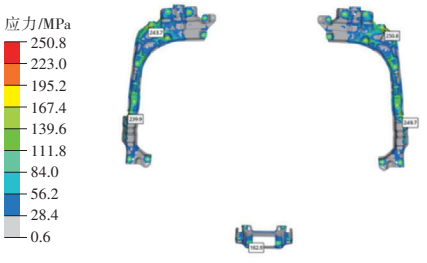
(a)上部外板



(b)下部外板



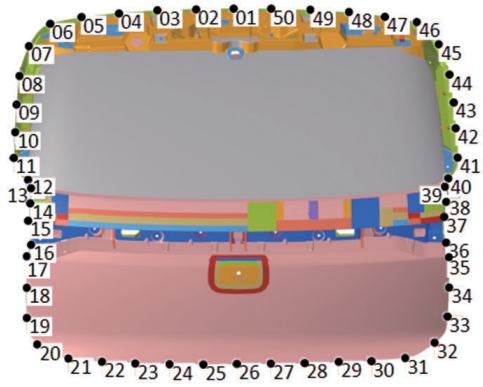
(c)内板



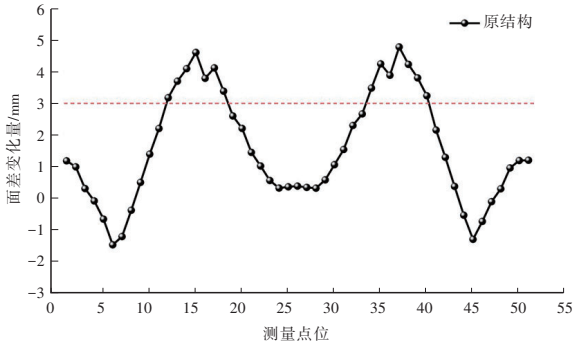
(d)加强板

图6　80 ℃时行李箱盖负载情况下各部件的应力分布云图

图 7 所示为 80 ℃环境下行李箱盖持续承载500 h后的位移分布结果。由仿真结果可知,测点11~测点 19 与测点 34~测点 40 区域的位移量均超过 2 mm,最大位移量达 4.79 mm,且最大位移区域整体呈左右对称分布。对比仿真与结果可知,仿真预测的最大位移量显著大于实测试验值,且位移分布规律存在一定差异,该差异主要源于实际服役工况中载荷边界的复杂性。



(a)尾部测量部位



(b)各部位的位移量

图7　80 ℃下负载 500 h后行李箱盖各部位的位移量

试验过程中,尽管环境温度与载荷作用时间可精准控制,但行李箱盖实际受力状态受周边关联部件的工作状态影响较大。行李箱盖两侧气撑杆的标称输出力均为929 N,但高温长期负载工况下,左侧气撑杆的实际输出力范围为37~1 004 N,右侧电动撑杆的实际输出力范围为578~887 N,整体呈现右侧实际负载低于左侧的分布特征。这一载荷非对称性可解释实车试验中仅右侧后组合灯安装点与撑杆支撑区域出现面差超差、左侧仍满足合格要求的现象。本次仿真中设置两侧撑杆载荷为理想对称状态,因此预测的位移场也呈现左右对称特征,而实际工况中载荷的非对称性导致左右侧变形量出现差异。

此外,由高温应力计算结果(图 6)可知,80 ℃工况下行李箱盖各部件的应力均未超过材料的屈

服强度,说明短期高温载荷下材料仍可有效抵抗塑性变形。由此可推断,行李箱盖在高温长期服役后产生的尺寸变形主要源于聚合物材料的蠕变特性,是塑性变形长期累积的结果。

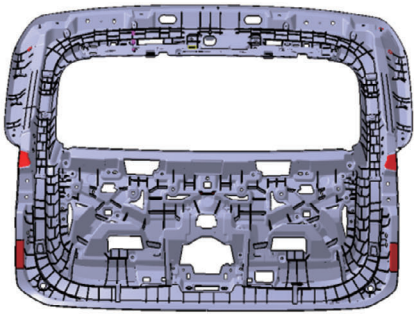
3.4　结构优化的CAE分析结果

蠕变是聚合物材料在恒定温度与恒定载荷长期作用下,应变随时间持续累积的典型力学行为,其蠕变速率对应力水平具有高度敏感性:在相同温度条件下,材料内部应力水平越低,蠕变速率越慢,达到同等变形量所需的服役时间将大幅延长。因此,通过结构优化降低关键区域的应力集中水平,是抑制行李箱盖高温长期蠕变变形的核心技术路径。

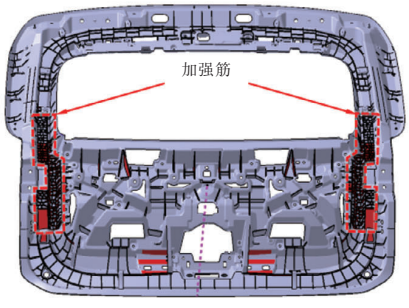
由于行李箱盖外板的弹性模量较低、结构承载占比小,其对行李箱盖整体蠕变变形的贡献度显著低于内板与金属加强板。结合前文应力分布规律,气撑杆支撑区域与尾灯安装区域为应力集中与变形控制的核心薄弱部位,因此,本文重点针对行李箱盖内板与加强板开展结构优化,通过改善局部应力分布来抑制蠕变变形。考虑到有限元仿真与实车工况存在一定的边界条件偏差,为保障实车服役时稳定满足-2~2 mm的面差合格要求,将仿真分析的面差最大变化量安全阈值设定为3 mm,预留合理的工程裕量。

图8所示为行李箱盖内板的结构优化方案对比,其中图8a为原始内板结构,图8b为优化后的内板结构。针对气撑杆支撑与尾灯安装区域的应力集中问题,优化方案在对应区域增加加强筋数量并调整筋条排布方向,通过拓展传力路径实现应力的分散与传递,有效降低局部峰值应力。图8c与图8d分别为结构优化前后尾灯区域内板的位移云图与点位位移统计结果,位移测量点位与图7a保持一致。仿真结果表明:内板结构优化后,行李箱盖最大变形量由4.79 mm降至2.96 mm,满足小于3 mm的设计阈值要求,证明局部加强筋优化可有效降低应力集中,进而抑制行李箱盖的高温蠕变变形。

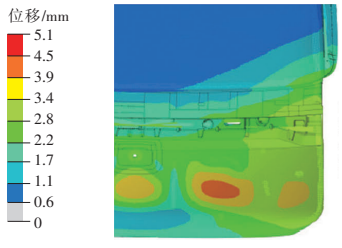
行李箱盖内板为大型注塑成型件,其结构改动涉及注塑模具的大规模修模甚至重新开模,同时需配套完整的材料性能验证、成型工艺调试与尺寸精度标定,将大幅提升开发成本、延长项目周期,对整车量产交付进度造成较大影响。因此,该方案虽在技术层面有效,但从工程可行性与成本控制角度考虑,难以在项目开发后期快速落地。



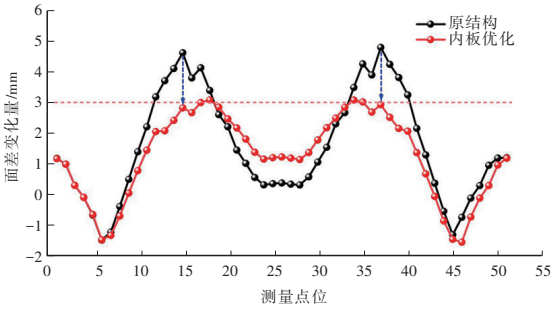
(a)内板原始结构



(b)优化后的内板结构



(c)位移云图

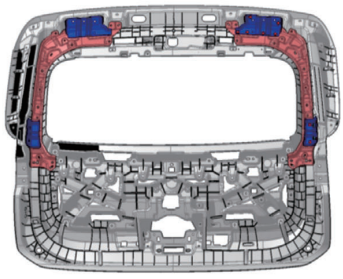


(d)位移统计结果

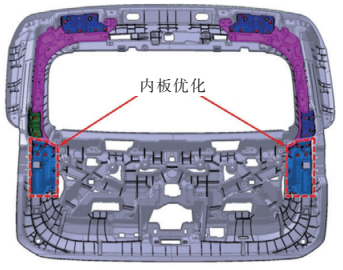
图8　行李箱盖内板结构优化示意及优化各部位位移量

基于上述工程约束,进一步提出通过优化金属加强板结构来约束内板位移的技术方案,在不改变内板模具的前提下实现变形控制,优化方案如图9所示。结合行李箱盖应力分布特征,优化方案适当延伸加强板的覆盖范围,将尾灯安装区域

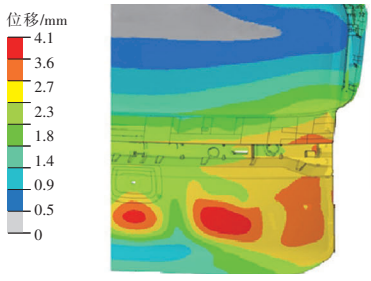
纳入加强板的支撑范围，有效分散了尾灯安装部位的局部应力集中。仿真计算结果表明：加强板结构优化后，行李箱盖最大变形量可控制在3.06 mm，变形抑制效果与内板结构优化方案基本相当。考虑到进一步增大加强板尺寸会导致材料成本与总成质量显著上升，综合评估工程可行性、制造成本与变形改善效果后，最终确定采用该加强板优化方案。



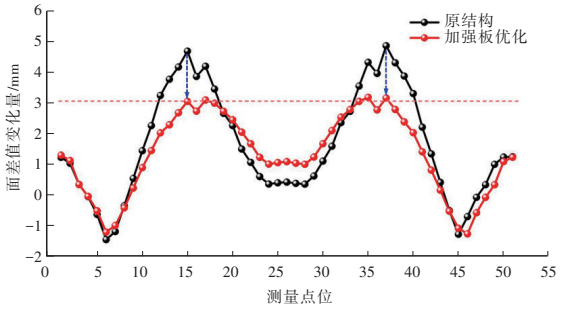
(a)加强板原始结构



(b)优化后的加强板结构



(c)位移云图



(d)位移统计结果

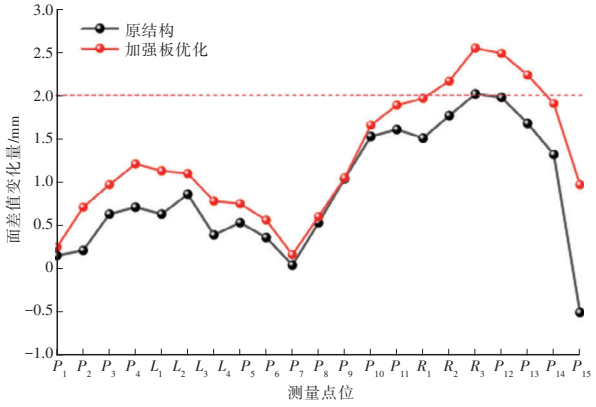
图9 行李箱盖加强板结构优化示意及优化各部位位移量

3.5 行李箱盖加强结构验证

为验证加强板优化方案的实际控制效果与仿真模型的可靠性，按照优化后的加强板方案制备试验样件，并开展台架高温烘烤试验进行验证。图10所示为优化后的加强板实物状态及对应高温试验的测试结果，测量点位与图2a保持一致。



(a)加强板实物



(b)实际测量结果

图10 优化后的加强板实物图及优化效果

由于加强板结构尺寸的调整会引起行李箱盖总成质量的变化，需进一步评估其对行李箱盖开关门动力学性能的影响。经实车测试验证，加强板优化后行李箱盖总成的质量较原状态增加0.49 kg；行李箱盖开启与关闭的动作时间与原状态相比变化量小于0.2 s，符合整车出厂性能标准。上述结果表明，尽管加强板优化使行李箱盖质量略有提升，但并未对行李箱盖的开关门使用性能产生实质性影响，满足整车性能要求。

4 结束语

本文针对全塑行李箱盖高温服役后面差超差的问题，结合实车暴晒试验、实验室高温烘烤试验与有限元仿真分析，明确了面差超差的核心成因与变形规律，对比了内板结构优化与加强板结构优化2种方案的变形控制效果，最终确定兼顾工程

可行性与成本控制的加强板优化方案,并通过台架与实车试验验证了方案的有效性。得出以下结论:

a.与金属钣金材料相比,长玻纤增强聚丙烯复合材料零部件的高温长期服役性能受蠕变特性影响显著。在产品开发过程中,除考核常温基本力学性能外,必须重点评估高温蠕变引发的长期累积变形风险,并通过极端环境试验开展充分验证,保障全工况下的尺寸稳定性与外观匹配精度。

b.有限元仿真结果表明,行李箱盖右侧面差超差的核心诱因是气撑杆的支撑作用力;仿真与实测试验的变形分布差异的主要原因为两侧气撑杆(左侧气动撑杆、右侧电动撑杆)实际输出力的公差范围不一致。

c.有限元仿真与试验结果均证实,通过优化金属加强板结构,可在不改动行李箱盖内板注塑模具的前提下,有效控制行李箱盖的高温蠕变变形,变形抑制效果与内板结构优化方案相近,且具备更低的开发成本与更短的落地周期。

参考文献:

[1] 方瑞. 长玻纤增强复合材料在汽车轻量化上的应用[J]. 模具制造, 2025, 25(1): 166-168.

[2] 赵巧莉, 侯玉亮, 刘泽仪, 等. 碳纤维平纹机织复合材料低速冲击及冲击后压缩性能多尺度分析[J]. 中国机械工程, 2021, 32(14): 1732-1742.

[3] CHEN T, MANSFIELD C D, JU L, et al. The Influence of Mechanical Recycling on the Properties of Tthermotropic Liquid Crystalline Polymer and Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 200.

[4] 周琴平, 张云青, 杨良波, 等. 长玻纤增强聚丙烯材料特性及其在汽车前端框架应用的设计方法[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(14): 78-83.

[5] DUAN S, YANG X, TAO Y, et al. Experimental and Numerical Investigation of Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composite and Application in Automobile Components[J]. Transport, 2018, 33(5): 1135-1143.

[6] 李彬, 谢静雅, 付丹. 长玻纤增强PP材料在汽车上的应用[J]. 时代汽车, 2017(24): 78-79.

[7] CUI J, WANG S, WANG S, et al. The Effects of Strain Rates on Mechanical Properties and Failure Behavior of Long Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composites [J]. Polymers, 2019, 11(12):142.

[8] 秦唯铭, 杜冰, 朱绍伟, 等. 环境温度对长玻纤增强聚丙烯单向拉伸力学性能的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(20): 241-246.

[9] 彭翔, 江浩浩, 郭玉良, 等. 机翼蒙皮铺层顺序和材料布局协同优化[J]. 中国机械工程, 2023, 34(12): 1415-1424+1435.

[10] 李勇俊, 雷飞, 刘启明, 等. 考虑结构、材料和工艺要求的复合材料B柱优化[J]. 汽车工程, 2017, 39(8): 968-976.

AT&M