

汽车内饰件胶接过程中产品质量的提升

李 义, 刘 轶, 姚卫国

(吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130022)

摘 要: 采用有限元分析方法研究了汽车内饰件胶接过程中不同时刻的温度及位移分布, 探究了边界约束对模型温度、热应力、位移及胶层损伤情况的影响。模拟分析结果显示: 随着时间的延长, 模型的温度升高、位移增大, 且在曲率大的位置更加明显; 胶接过程中同时对内饰件的侧面和底面进行约束, 能够有效减少胶层损伤, 提高结构的整体刚度。通过对比不同边界约束下的温度、应力和位移云图, 确定同时约束侧面和底面的优化设计对提高汽车内饰件胶接质量的重要性。本文不仅优化了汽车内饰件胶接工艺, 而且为提升胶接过程中产品质量提供了指导。

关键词: 汽车内饰件; 有限元分析; 热应力分析; 胶层损伤; 温度分布

中图分类号: TG356 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)09-2926-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240119

Product quality improvement in bonding process of automotive interior components

LI Yi, LIU Yi, YAO Wei-guo

(College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Finite element analysis was used to study the temperature and displacement distribution of automotive interior components at different moments during the bonding process, and the effects of boundary constraints on the model temperature, thermal stress, displacement and damage to the adhesive layer was investigated. The simulation analysis results show that with the increase of time, the temperature of the model increases, the displacement becomes larger and more obvious in the position of large curvature; the simultaneous constraints on the side and bottom surfaces of the interior components during the bonding process effectively reduce the damage of the adhesive layer and improve the overall stiffness of the structure. Comparing the temperature, stress and displacement cloud maps under different boundary constraints, it is determined that the optimal design of constraining the side and bottom surfaces at the same time is important for improving the quality of bonding of automotive interior components. This study optimises the bonding process for automotive interior components and provides guidance for improving product quality during the bonding process.

Key words: automotive interior components; finite element analysis; thermal stress analysis; adhesive layer damage; temperature distribution

收稿日期: 2024-01-29.

基金项目: 吉林省科技厅重点项目 (20220201119GX).

作者简介: 李义 (1974-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 高分子现代成型技术. E-mail: henrylee@jlu.edu.cn

通信作者: 姚卫国 (1972-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 高分子成型技术与装备. E-mail: wgyao@jlu.edu.cn

0 引 言

汽车内饰件主要材质包括皮革、钢材、复合纤维、木制品,这些部件通过螺丝、铆钉等方式连接,以满足乘客对于舒适性的需求。然而螺丝、铆钉结构会在接触面产生应力集中,且对车内温湿度的变化较为敏感,长此以往,内饰件的使用寿命会大幅下降^[1]。同时,铆钉和螺丝结构会破坏汽车内饰件的整体性和美观性。因此,为了延长内饰件的使用寿命,提高其美观度,所用连接手段通常为胶接。

目前,许多研究者针对胶接接头的力学性能做了较为深入的研究。沃西源等^[2]通过研究胶接接头的形成和分析其内应力发现,接头的强度不仅与胶黏剂和被黏物的黏结能力有关,还取决于胶黏剂本身的力学性能;同时还发现,结构胶黏剂产生的应力集中与其内部的缺陷有关。兰凤崇等^[3]通过有限元分析和实验,探究了铝镁单搭接接头中胶黏剂类型、胶层厚度、胶接搭接长度对胶接结构连接强度的影响。曹蕾蕾等^[4]对胶接单搭接接头承受热载荷的温度场和热应力分布进行了数值模拟,发现峰值热应力出现在搭接区边缘,得出胶接接头由热载荷作用产生的热应力不可忽视的结论,且研究中还提及胶层厚度和搭接长度对接头热应力的影响。Ji等^[5]表示黏结结构的界面断裂是现代工业广泛存在的一个关键问题,并利用黏结区模型(Cohesive zone model,CZM),采用整体和局部实验研究了黏合剂厚度对界面能量释放率、界面强度和界面牵引分离规律的影响。Wang等^[6]基于物理力学定律,建立了3层黏结结构在温度场下的热应力分析模型,还研究了由硅芯片、聚酰亚胺薄膜和复合材料组成的黏结结构在温度梯度下的热应力分布。Ichikawa等^[7]采用三维有限元计算,分析了承受静态拉伸载荷的阶梯搭接胶接接头中的应力分布,研究了胶层弹性模量、胶层厚度和层数对界面应力分布的影响,并建立了接头的优化设计方法。Grant等^[8]广泛研

究了用于汽车结构制造的黏结搭接接头和T形接头,明确了使用结构黏合剂代替点焊的效果,并利用有限元分析验证了失效准则的有效性。

通过对上述胶接技术国内外研究现状的分析发现,有关胶接过程中仪表板不同部位的温度分布及由温度变化产生的热应力和胶层损伤的研究很少。但在工业生产中,温度是一个重要影响因素,温度变化会引起材料的膨胀和收缩,而膨胀量和收缩量取决于温度的变化量和材料的热膨胀系数。目前,对于仪表板温度模拟的研究,大多处于理想的平面状态下,未考虑仪表板复杂的结构,由于仪表板不同部位的形状尺寸区别很大,对温度的敏感程度也不一致。因此,本文建立的仪表板局部模型包含平面和曲面,这样可以更加精确地模拟生产过程中温度对不同部位的影响,不仅仅局限于平面部位。

1 材料模型及参数

本文以局部仪表板模型为研究主体,建立了3层曲面包覆结构(见图1),上层材料为PU(聚氨酯)表皮,中间胶黏剂采用水性聚氨酯,下层为3D-mesh网格布,这3层材料除厚度外形状和大小均相同。其中,胶黏剂为水性聚氨酯胶黏剂,由富乐(中国)粘合剂有限公司制造生产。3层材料的传热学参数和力学参数分别见表1、表2。

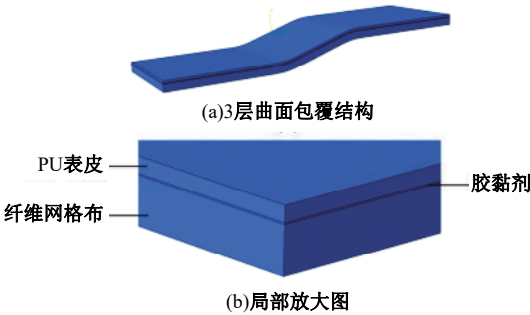


图1 3层曲面包覆结构及局部放大图
Fig. 1 Three-layer surface cladding structure and partial enlargement

表1 上下层材料参数

Table 1 Upper and lower layer material parameters

材料	密度/ (t·mm ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	热导率/ (mW·mm ⁻¹ ·K ⁻¹)	热膨胀系数/ K ⁻¹	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
PU	5.58×10 ⁻¹⁰	3 057	0.45	0.034	1.80×10 ⁻⁸	1.38×10 ⁶
3D-mesh	9×10 ⁻¹¹	4 000	0.30	0.040	5.94×10 ⁻⁵	1.10×10 ⁹

将表1、表2中的参数输入有限元模拟软件ABAQUS中,通过ABAQUS软件对仪表板局部

温度胶接损伤进行模拟,并对三维有限元模型赋予不同的材料属性。本文着重采取局部位置

表 2 胶层材料参数
Table 2 Material parameters of adhesive layer

性能	密度/ ($\text{t}\cdot\text{mm}^{-3}$)	杨氏模量/ MPa	断裂能/($\text{mJ}\cdot\text{mm}^{-2}$)	热导率/[$\text{mW}\cdot(\text{mm}\cdot\text{K})^{-1}$]	热膨胀系数/ K^{-1}	比热容/ [$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	剪切模量/ MPa
数值	1.45×10^{-9}	1 850	430	0.04	8.5×10^{-5}	5.5×108	560

以便于更加精确地分析胶层损伤情况。图 2 展示了模型 XY 视图的三维有限元网格,PU 层厚度为 1 mm、3D-mesh 层厚度为 3 mm、胶层厚度为 0.1 mm。由于上、下层采用内聚力模型施加,胶黏剂厚度被简化为 0,这种简化在不影响模型计算准确性的前提下可简化模型的计算过程。对模型进行网格划分时,上下层均采用八结点热耦

合六面体单元(C3D8RT),表皮和网格布之间通过相互作用模块中的表面与表面接触设置连接,这种接触将胶黏剂层的厚度简化为 0,但胶黏剂的属性依旧存在。模型中 3D-mesh 层完全固定,固定的边界条件为 $U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$ 。通过边界条件将 PU 层上表面和 3D-mesh 层下表面的温度设置为 70 ℃,环境温度通过编辑预定义场施加为 25 ℃,以压强的形式施加 0.1 MPa 载荷。图 3(a)为压强从 0 到 0.1 MPa 的施加过程,图 3(b)为温度从 25 ℃到 70 ℃的趋势图,可以看出,在相同的时间内,与压强相比,温度变化的幅值较大。

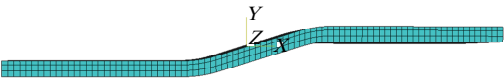


图 2 XY 视图
Fig. 2 XY View

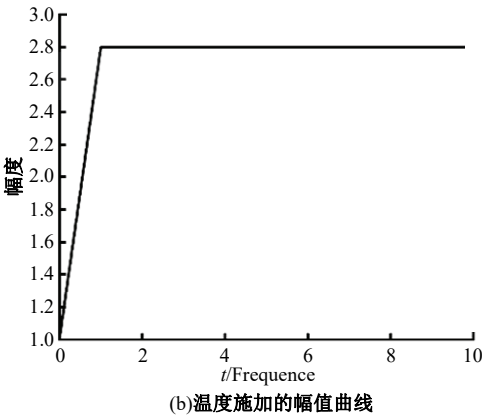
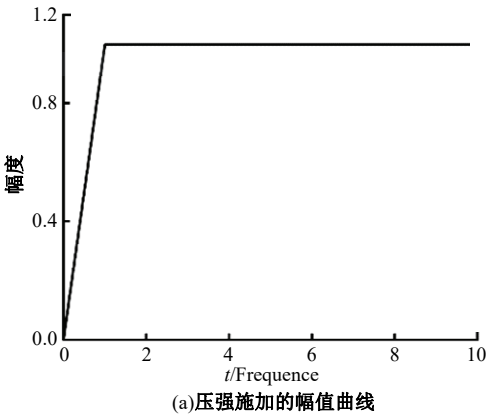


图 3 幅值曲线

Fig. 3 Amplitude curve

2 数值模拟理论基础

2.1 内聚力模型

内聚力模型用于研究裂纹尖端的塑性变形、静力和疲劳载荷条件下的蠕变开裂,以及金属、岩土材料、混凝土、复合材料、纳米晶材料的裂纹萌生与裂纹扩展。复合材料的结构破坏是一个渐进损伤的过程,开始为线性弹性行为,随后为损伤的产生和演化。上下两层本体单元输入应力-应变曲线,中间的内聚力单元输入内应力-相对位移曲线,内聚力模型将复杂的破坏过程以中间内聚力单元的内应力与偏移位移关系表达。内聚力模型有多种表达形式来判断损伤情况,包括双线型、指数型和梯型等。本文采用双线型内聚力模型(见

图 4),该模型最初由 Mi 等^[9]提出。通过图 4 可以看出在起始阶段,随着位移的不断增加,内应力呈线性增长;当达到损伤起始点(即初始损伤)后,内应力达到最大值,材料开始出现损伤,内应力随位移的增加逐渐下降至零点,该阶段是材料的损伤演化阶段,之后界面出现开裂现象,裂纹开始扩展。

胶接的损伤演化判断准则可根据位移或能量 2 种方式确定;失效位移定义为零内应力时的位移量;断裂能定义为内应力-位移曲线围成的面积。损伤模型用于模拟富集单元的退化和最终失效,其失效机理由损伤起始准则和损伤演化规律 2 部分组成。目前,损伤起始准则主要包含最大

本文采用第 1 种边界条件,即在边界上给定温度值。

2.2.2 有限元热应力理论

在复合材料受热情况下的有限元理论分析中,通常将材料假设为弹性体,弹性应变 ϵ_e 的表达式为^[15]:

$$\epsilon_e = D_e^{-1} \sigma \quad (7)$$

式中: D_e 为材料的弹性模量; σ 为应力。

当温度发生改变时,应力、应变随温度变化的关系式为:

$$d\sigma = D_e (d\epsilon_e - \frac{dD_e^{-1}}{dT} \sigma dT) \quad (8)$$

由于温度升高,应变也发生变化:

$$d\epsilon = d\epsilon_e + d\epsilon_T \quad (9)$$

由 $d\epsilon_T = \alpha dT$, 可得:

$$d\epsilon_e = d\epsilon - \alpha dT \quad (10)$$

进一步得到:

$$d\sigma = D_e \left[d\epsilon - \left(\alpha + \frac{dD_e^{-1}}{dT} \sigma \right) dT \right] \quad (11)$$

式中: α 为受热膨胀系数。

由于 $d\epsilon_0 = \left(\alpha + \frac{dD_e^{-1}}{dT} \sigma \right) dT$, 那么:

$$d\sigma = D_e (d\epsilon - d\epsilon_0) \quad (12)$$

式(12)可写成:

$$\Delta\sigma = D_e (\Delta\epsilon - \Delta\epsilon_0) \quad (13)$$

在复合材料的受热过程中还要考虑塑性变形,全应变增量为:

$$d\epsilon = d\epsilon_e + d\epsilon_p + d\epsilon_T \quad (14)$$

式中: ϵ_p 为塑性应变。

则 $d\epsilon_e = d\epsilon - d\epsilon_p - d\epsilon_T$, 代入应力、应变随温度变化的关系式中,得:

$$d\sigma = D_e (d\epsilon - d\epsilon_p - d\epsilon_T - \frac{dD_e^{-1}}{dT} \sigma dT) \quad (15)$$

根据普朗方程 $d\sigma = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}} d\bar{\epsilon}_p$, 式(15)可写为:

$$d\sigma = D_e (d\epsilon - \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} d\bar{\epsilon}_p - d\epsilon_0) \quad (16)$$

通过推导可得:

$$d\sigma = D_{ep} (d\epsilon - d\epsilon_0) + d\sigma_0 \quad (17)$$

由 $D_{ep} = D_e - D_p$, 可得:

$$\Delta\sigma = D_{ep} (\Delta\epsilon - \Delta\epsilon_0) + \Delta\sigma_0 \quad (18)$$

式中: D_{ep} 为常数矩阵。

经过类似的推导,可以得到:

$$K_{ep} \Delta d = \Delta F + \Delta R_{\sigma}^0 + \Delta R_{\epsilon T} + \Delta R_{\sigma T} \quad (19)$$

式中: K_{ep} 为刚度矩阵; $\Delta R_{\sigma T}$ 为初始热应力载荷; $\Delta R_{\epsilon T}$ 为初始热应变载荷。

式(9)为热弹性塑性的有限元基本方程^[16]。

3 模拟结果分析

3.1 热载荷下的温度、位移云图

图 6 为三维模型的网格划分及不同边界条件的约束。在有限元分析中,温度云图是评估材料热响应的重要工具。通过观察不同时间点的温度云图,可追踪材料在热载荷作用下的行为及其随时间的演变。

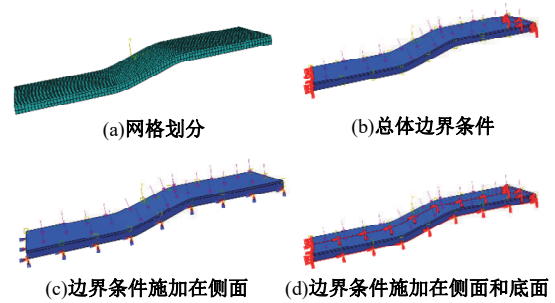


图 6 网格划分与边界条件

Fig. 6 Grid division and boundary conditions

图 7(a) 为 0.3 s 时模型的温度云图,可见模型曲率较大的位置出现了温度集中的情况,该区域可能由于受热而产生较大的热应力,从而导致层间开裂。温度分布的不均匀性是由于材料的非均质性或者局部热源的集中作用,进而导致内饰件材料层间开裂。图 7(b) 为 4.3 s 时的温度云图。与 0.3 s 时相比,温度云图显示热量已经在模型内部进一步传播,但高温区域仍集中在模型中间曲率较大的区域。这可能是热量在材料内部传递时存在滞后效应,以及材料热物理性能不同所致。图 7(c) 为 8.3 s 时的温度云图,此时温度云图显示热量在整个模型中率进一步分散。然而,温度的峰值依然集中在中间曲面较大的区域,这表明该区域的热容量较大或者散热条件较差。图 7(d) 为 10 s 时的温度云图,此时温度的最高值相较于 8 s 时略有下降,表明热量可能在结构中达到一个更平衡的状态。尽管如此,中间曲率较大的区域仍显示出较高的温度,这可能与材料的热性能或结构的特定几何形状有关。

由图 7 可知,结构在热载荷作用下存在明显的热集中区域,特别是结构中部的曲率较大区域。热应力可能导致层间开裂,尤其在温度变化迅速或者温度梯度较大的情况下。此外,随着时间的

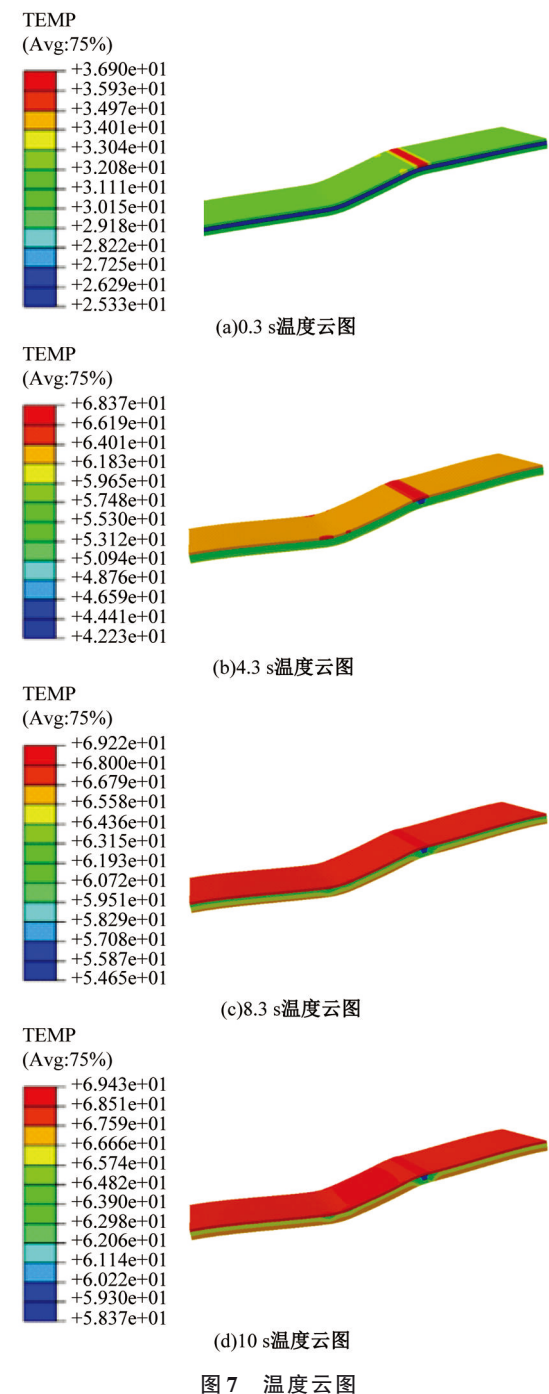


图 7 温度云图

Fig. 7 Temperature cloud maps

推移,模型内部的温度分布趋于均匀。这表明在结构的热量传播和散失过程中,时间是一个重要的影响因素。在实际应用中,需要考虑热载荷的持续时间及结构的响应时间,从而确保在整个使用期间,结构的热稳定性和功能性不受影响。

综上所述,温度云图展现了多层内饰件材料结构在受热后的动态变化。通过对这些数据的深入分析,可以优化结构的耐热性能,增强其在复杂热环境中的可靠性和耐久性。

图 8 展示了结构在受热条件下随时间的变形情况。图 8(a)显示了初始时刻结构的位移分布,可以看出位移相对较小,这表明结构刚开始受热作用时变形还不明显。位移的分布从一端到另一端逐渐增加,可能是由于热膨胀或初始应力造成的不均匀变形。从图 8(b)可以看出,随着时间的推移,结构的位移显著增加。这说明随着热量在结构内部的积累和传播,材料热膨胀效应增强,造成更大的变形。由图 8(c)可知,随着时间延长,结构位移继续增大,尤其是在中间区域,此变化可

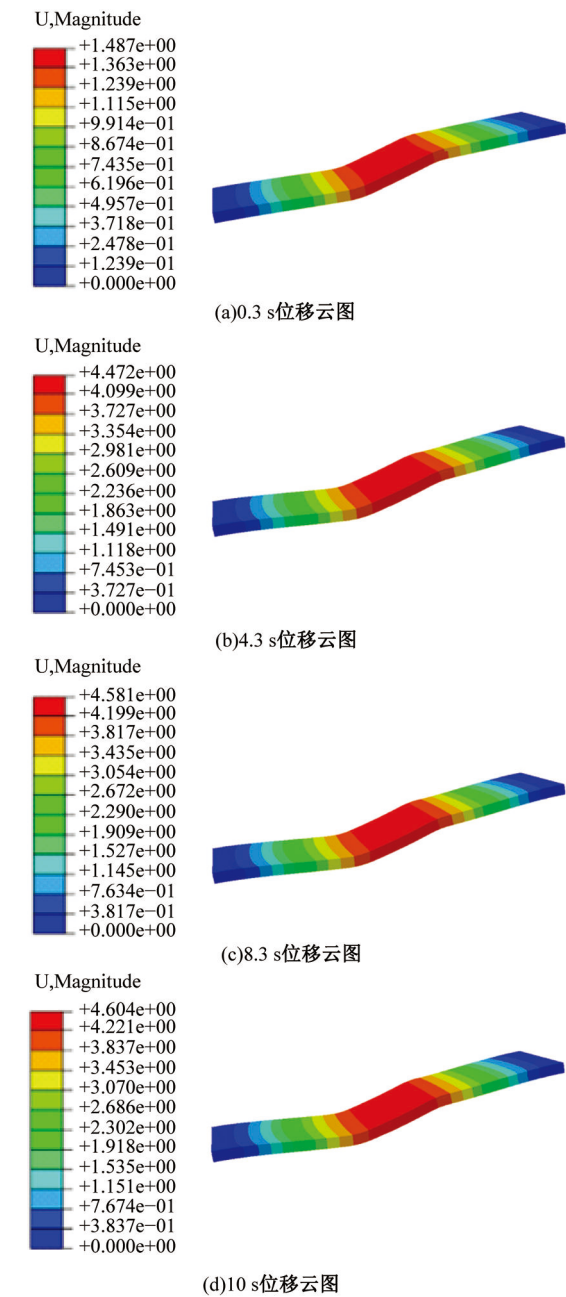


图 8 位移云图

Fig. 8 Displacement cloud maps

能与热载荷的持续作用和热梯度的增加有关,中间区域可能是热应力和热膨胀作用最为显著的地方。图 8(d)揭示,在更长时间后,结构位移达到了更大的幅度。此时,结构的整体变形更明显,特别是在结构的中心部分,这可能是因为该区域在热载荷作用下积累的热能最多,从而导致最大的热膨胀。

通过图 8 可以看出结构在热载荷作用下的动态响应。随着时间的推移,结构的位移持续增加,尤其在内饰件温度集中的大曲率区域。这种位移变化对评估结构的热稳定性和疲劳寿命至关重要。在实际应用中,需要考虑如何通过优化设计来控制热变形,以保证结构的完整性和功能性。

3.2 边界条件优化

图 9 展示了在模型的侧面和底面时施加边界条件,车用内饰件模型的应力、位移和温度分布情况。通过分析这些结果,可以更深入地了解材料

在加工过程中的行为特点。图 9(a)(b)分别为最大主应力和米塞斯应力的分布,可见应力集中主要出现在模型的两端和边缘,而非中间区域。最大主应力和米塞斯应力的分布表明,侧面和底面的约束条件有效地分散了中间区域的应力,从而降低了层间开裂的可能性。这是因为固定侧面和底面可以防止材料在这些区域过度位移,从而减少了由不均匀变形引起的内部应力。图 9(c)为模型的位移分布,显示了模型在约束条件下的整体变形情况。相比仅约束侧面的情况,同时约束侧面和底面后位移分布更均匀,表明增加底面约束可更好地控制模型变形。图 9(d)为模型的温度分布,可见温度沿模型长度方向分布较均匀,且无明显的高温区域。这意味着热量在模型中的分布比较均匀,减少了温度梯度大引起的热应力和变形。图 9(e)为热应力分量 NT11 的分布。NT11 的分布情况同样表明应力在模型长度方向上相对均匀,无明显的高应力集中区域,有助于避免应力集中导致的层间开裂。

综合以上分析,可以得出,在车用内饰件的加工中,对材料的侧面和底面进行适当的约束至关重要,可以有效减少材料的层间开裂现象。这种约束方法通过限制材料的自由变形,降低了热载荷和机械载荷引起的不均匀应力分布。此外,这些约束还有助于实现热量在材料中的均匀分布,从而减少热应力的积累。在实际生产中,通过优化模型的边界条件,可以显著提高内饰件的质量和耐久性,确保其在使用过程中的性能稳定性和安全性。这些分析结果不仅对当前的加工工艺具有指导意义,而且为未来材料和结构的优化设计提供了宝贵的参考依据。

3.3 胶层损伤

图 10 对比了仅对模型侧面进行约束与同时对模型侧面和底面进行约束时胶黏剂的损伤情况。通过分析损伤云图,可以了解不同约束条件对模型结构完整性的影响。图 10(a)为仅侧面受到约束时胶黏剂的损伤分布,损伤值较高的区域集中在模型的两端和中间,这表明在这些区域胶黏剂承受了较大的应力,有较高的损伤风险。这种情况往往是因为模型在受载时发生自由变形,侧面约束不足以防止整个模型的变形,从而在胶层产生了较高的剪切应力。图 10(b)展示了当侧面和底面同时受到约束时胶

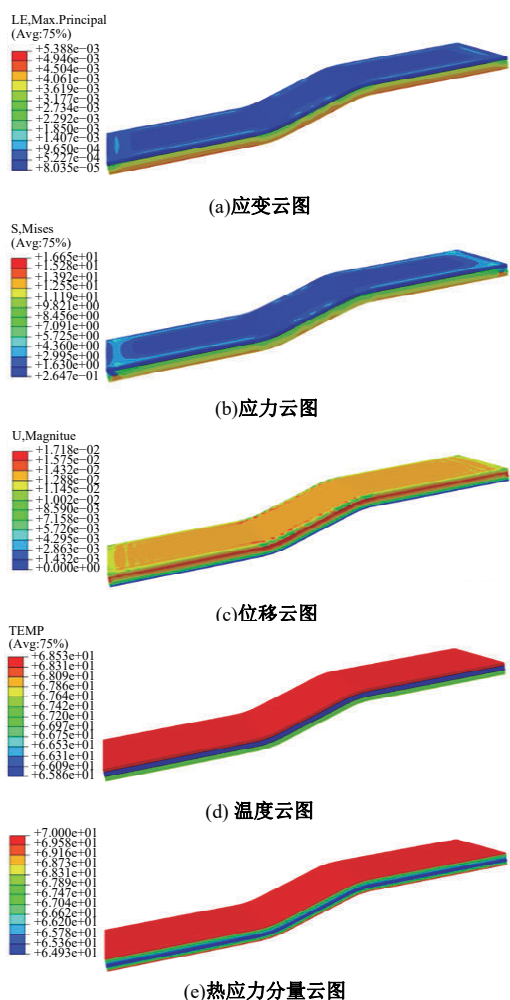
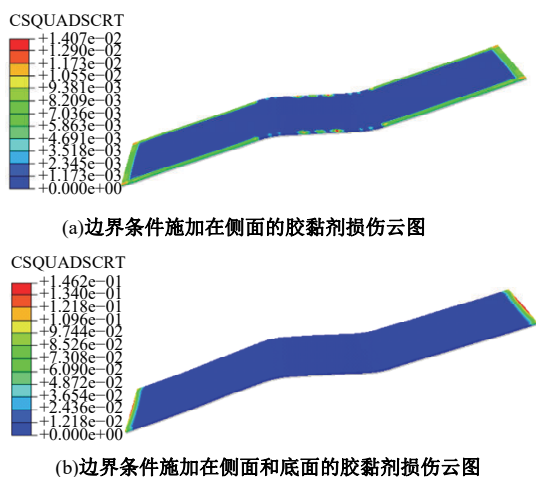


图 9 应力、位移和温度分布

Fig. 9 Stress, displacement and temperature distribution

黏剂的损伤分布,可见损伤值整体较低,且分布较为均匀。这意味着同时对侧面和底面进行约束可以显著减少胶黏剂的损伤风险。底面约束的添加提供了额外的支撑,有助于限制热膨胀或其他载荷引起的模型变形。这种约束方式提高了结构的整体刚度,减少了剂层的应力集中,从而降低了损伤风险。



(b)边界条件施加在侧面和底面的胶黏剂损伤云图

图 10 胶黏剂损伤云图

Fig. 10 Cloud map of adhesive damage

4 结束语

本文采用ABAQUS有限元分析方法,对汽车内饰件胶接过程中的温度分布、热应力、位移变化及胶层损伤情况进行深入研究,并讨论了边界约束条件对有限元分析模型产生的影响。研究结果表明,随着时间的延长,温度逐渐升高,热膨胀产生的位移也逐渐变大,在曲率大的位置表现尤为明显。此外,适当在侧面和底面约束对于保持材料的结构完整性和防止层间开裂至关重要。通过优化边界条件,不仅能够减少胶层损伤,而且有助于实现热量在材料中的均匀分布,减少热应力的积累。本文的研究结果为汽车内饰件胶接的质量控制和优化设计提供了新的见解,有利于提高产品的质量和耐久性,确保其在使用过程中的性能稳定性和安全性。这些分析结果不仅对当前的加工工艺有指导意义,而且为未来材料和结构优化的设计提供了参考。

参考文献:

[1] 蒋志军, 张志刚, 吕崇建, 等. 汽车内饰包覆零件设计与工艺研究[J]. 汽车实用技术, 2018(7):131-134.
Jiang Zhi-jun, Zhang Zhi-gang, Lv Chong-jian, et

al. Research on the design and process of automotive interior cladding parts[J]. Automotive Practical Technology, 2018(7): 131-134.

[2] 沃西源, 涂彬, 夏英伟, 等. 复合材料胶接工艺和胶接头内应力分析[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(1): 63-68.

Wo Xi-yuan, Tu Bin, Xia Ying-wei, et al. Analysis of the gluing process and internal stresses in bonding joints of composite materials[J]. Space Return and Remote Sensing, 2008, 29(1):63-68.

[3] 兰凤崇, 李忠超, 周云郊, 等. 铝镁合金单搭接胶接头应力分布及强度预测[J]. 吉林大学学报:工学版, 2015, 45(3): 726-732.

Lan Feng-chong, Li Zhong-chao, Zhou Yun-jiao, et al. Stress distribution and strength prediction of aluminium-magnesium alloy single lap bonded joints[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(3):726-732.

[4] 曹蕾蕾, 赵宁, 郭辉, 等. 单搭接接头温度场与热应力分布的研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(5): 307-310.

Cao Lei-lei, Zhao Ning, Guo Hui, et al. Study on temperature field and thermal stress distribution of single lap joint[J]. Computer Simulation, 2009, 26(5): 307-310.

[5] Ji G, Ouyang Z, Li G, et al. Effects of adhesive thickness on global and local mixed mode I/II interfacial fracture of bonded steel joints[C]//ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference, Baltimore, Maryland, USA, 2011: 21-29.

[6] Wang X Y, Zheng S. Analytical model of thermal stress distribution of bonded structure under temperature field[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011, 31(6): 398-401.

[7] Ichikawa K, Shin Y, Sawa T. A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008, 28(8):464-470.

[8] Grant L D R, Adams R D, da Silva L F M. Effect of the temperature on the strength of adhesively bonded single lap and T joints for the automotive industry[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29(5):535-542.

[9] Mi Y, Crisfield M A, Davies G A O, et al. Progressive delamination using interface elements[J]. Journal of Composite Mataterials, 1998, 32(14):1246-1272.

[10] Benzeggagh M L, Kenane M. Measurement of

- mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus[J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(4): 439-449.
- [11] 寇剑锋, 徐绯, 郭家平, 等. 黏聚力模型破坏准则及其参数选取[J]. *机械强度*, 2011, 33(5): 714-718.
Kou Jian-feng, Xu Fei, Guo Jia-ping, et al. Damage criterion of cohesion model and its parameter selection [J]. *Mechanical Strength*, 2011, 33(5): 714-718.
- [12] Davies P, Pomies F, Carlsson L A. Influence of water absorption on transverse tensile properties and shear fracture toughness of glass/polypropylene[J]. *Journal of Composite Materials*, 1996, 30(9): 1004-1019.
- [13] 刘子文, 朴春德, 谢亮, 等. 一维热传导条件下测点温度与加热时间的相关性研究[J]. *地球科学前沿*, 2016, 6(2): 72-78.
Liu Zi-wen, Piao Chun-de, Xie Liang, et al. Correlation study of measurement point temperature and heating time under one-dimensional heat conduction conditions[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 6(2): 72-78.
- [14] 弗兰克 P. 英克鲁佩勒, 大卫 P. 德维特, 狄奥多尔 L. 伯格曼, 等. 传热和传质基本原理[M]. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [15] 欧阳林辉. 温度环境对复合材料力学性能影响研究[D]. 西安: 西北工业大学力学与土木建筑学院, 2015.
Ouyang Lin-hui. Research on the effect of temperature environment on mechanical properties of composite materials[D]. Xi'an: School of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [16] 田宇. SiCp/AlSi₃ 复合材料热残余应力有限元分析[D]. 长春: 吉林大学材料科学与工程学院, 2009.
Tian Yu. Finite element analysis of thermal residual stresses in SiCp/AlSi₃ composites[D]. Changchun: College of Materials Science and Engineering, Jilin University, 2009.