

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.18

汽车座椅激光焊精细化建模仿真研究

张国杰, 黄政平

广汽零部件有限公司技术中心, 广东 广州 511447

摘要: 针对汽车座椅激光焊接接头在碰撞冲击下的拉伸撕裂失效风险, 提出了一种精细化有限元建模方法, 以提升失效预测精度并指导工艺优化。基于高强度钢(DP980/QSTE420TM)的工程应用需求, 对比传统刚性连接(Rigids)与绑定接触(Tied)建模方式的局限性, 采用节点合并连接方法, 通过映射网格划分与公差控制, 实现焊接区域节点的一一映射与融合。并根据最大主应变失效准则, 以最大Mises拉伸应变作为评价指标, 通过对比材料延伸率建立失效判断标准。同时研究合理接触刚度关键建模参数, 建议在3~5的范围区间内。最终选择低风险的激光焊接接头形状方案, 并通过高风险的后向冲击试验工况验证激光焊无撕裂失效, 有效实现激光焊接失效的风险预判。研究表明, 该模型可有效预测激光焊动态失效行为, 为汽车座椅轻量化设计与异种材料焊接仿真提供参考。

关键词: 激光焊; 精细化建模方式; 失效标准; 接触刚度; 有限元仿真

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0129-06

Simulation Research of Laser Welding Refined Modeling for Vehicle Seat

ZHANG Guojie, HUANG Zhengping

Technology Center, GAC Component Co., Ltd., Guangzhou 511447, China

Abstract: Addressing the risk of tensile tearing failure of laser-welded joints in car seats under collision impact, a refined finite element modeling method is proposed to enhance the accuracy of failure prediction and guide process optimization. Based on the engineering application needs of high-strength steel (DP980/QSTE420TM), the limitations of traditional rigid connection (Rigids) and tied contact (Tied) modeling methods are compared. The node merging connection method is adopted, and through mapping mesh division and tolerance control, a one-to-one mapping and fusion of nodes in the welding area is achieved. According to the maximum principal strain failure criterion, the maximum Mises tensile strain is used as an evaluation index. By comparing the material elongation rate, failure judgment standards are established. At the same time, the key modeling parameter of reasonable contact stiffness is studied, suggesting a range between 3~5. Finally, a low-risk laser-welded joint shape scheme is selected. On this basis, the absence of tearing failure in laser welds is verified through high-risk rear impact test conditions, effectively achieving risk prediction of laser welding failure. The research indicates that this model can effectively predict the dynamic failure behavior of laser welding, providing methodological support for the lightweight design of car seats and the simulation of dissimilar material welding.

Keywords: laser welding; refined modeling method; failure criteria; contact stiffness; FEM

引用格式: 张国杰, 黄政平. 汽车座椅激光焊精细化建模仿真研究[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 129-134.

Citation: ZHANG Guojie, HUANG Zhengping. Simulation Research of Laser Welding Refined Modeling for Vehicle Seat[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 129-134.

0 引言

作为具有巨大应用潜力和广阔发展前景的焊

接方式之一, 激光焊是一种以聚焦的激光束作为能源, 对焊件进行热量轰击, 实现焊接的方式。与传统的焊接方法相比, 由于其热输入低、能量密度高、

收稿日期: 2024-07-08 修回日期: 2024-12-03

作者简介: 张国杰(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事CAE仿真分析工作与研究。E-mail: zhangguojie@gacc.com.cn。

焊接变形小、焊接速度快、不受磁场影响等高效高精度和低变形的工艺特点^[1-2],使其在轨道交通、航空航天、船舶制造、微电子行业、生物医学、汽车工业等领域得到了广泛的应用^[3],并且具有激光复合焊接技术、激光多焦点焊接技术、激光填丝焊接、三维可控激光头的发展趋势^[4]。

在轨道交通行业,激光焊接工艺主要应用在轨道车辆车体的焊接中,如王素环^[1,5]等采用电弧焊和激光焊两种方法对不锈钢轨道车体材料进行焊接对比。在航空航天行业,激光焊接工艺主要应用在军工和飞行器结构制造中^[6]。在船舶制造行业,则主要应用于船体骨架和船舱甲板等船体结构以及船体异种材料的焊接^[7],如Guo等^[8]研究针对高强钢的超窄间隙激光焊接工艺,宋秋平等^[9]研究船用结构钢Q235B的激光-MAG复合焊接工艺。在微电子行业,激光焊接工艺应用在集成电路、真空器件研制和半导体器件壳体的封装中^[3]。在生物医学行业,激光焊接工艺主要集中在激光波长、剂量及其功能恢复和激光焊料的选择等方面的研究^[3]。在汽车制造行业,激光焊接工艺主要应用在车身拼焊、框架结构和零部件的焊件,尤其在汽车零部件领域,为了满足日益增长的轻量化发展要求,将高强度钢和激光焊接工艺相结合的重要手段得到迅速发展^[10]。

汽车座椅作为汽车的关键零部件之一,激光焊接工艺在汽车座椅上的应用逐渐推广普及^[11],然而,汽车座椅在碰撞冲击中承受复杂的动态载荷,导致激光焊接接头易发生拉伸撕裂失效。针对此问题,本研究以上滑轨前端和上托架的激光焊接为例(见图1),从工程实用角度出发,基于有限元法的仿真技术,从建模方式、建模参数和激光焊方案选择三个方面开展激光焊精细化建模研究,构建激光焊失效标准,在产品的设计阶段进行有效的风险预判。

1 仿真建模方式

在激光焊有限元分析中,两个零件间的连接方法决定了有限元模型的构建方式和失效标准判定。激光焊接作为一种通过激光束热量熔合连接件的高效精密焊接方式,无需使用额外焊料,这使得其



图1 汽车座椅激光焊接撕裂失效问题

Fig. 1 Laser welding failure of vehicle seat

在建模和分析上与传统焊接方法有所不同。采用HyperMesh和PRIMER前处理软件、LS-DYNA求解器、HyperView后处理软件三种建模方式,构建激光焊的精细化方式。

1.1 Rigids 刚性连接方式

作为最常见的连接方式之一,通过在两个或以上零件单元的节点之间建立Rigids连接单元,并约束所有自由度,相当于将主从节点进行刚性连接而不会产生相对位移,在一定程度上可以起到点焊或弧焊等焊接作用。

如图2所示,对右上滑轨的三维数模抽取中面并进行二维壳单元网格划分,对右上托架的三维模

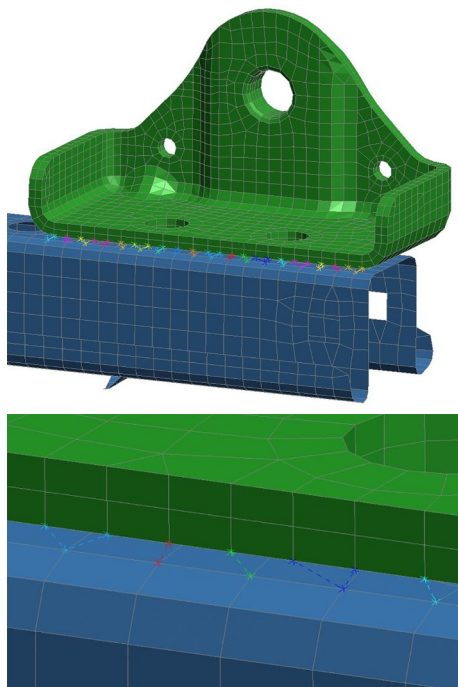


图2 Rigids 刚性连接方式整体示意和局部放大

Fig. 2 Rigids connection method sketch and partial enlarged drawing

型进行以六面体单元为主并通过三棱柱单元过渡的映射网格划分,在两零件的激光焊接区域利用 RIGIDS 连接单元将两者的相邻节点进行刚性连接。

虽然 RIGIDS 刚性连接的建模方式通用简单高效,在一定程度上实现焊接的整体效果,但建模相对粗糙简单,通常情况下用于失效风险的初步预判,因此针对激光焊接的撕裂失效问题,还需要进一步精细化建模,加强失效风险的有效识别。

1.2 Tied 绑定连接方式

基于约束法的 Tied 接触,通过定义从节点和主面,将从节点到主面的正交投影来定位每个从节点的最近主段,并对这些从节点施加约束条件,以保持从节点接触并约束到主面上一起运动,相当于从节点和主面进行固定连接而起到两者的焊接效果。

如图3所示,对右上滑轨和右上托架的三维模型分别抽取中面并进行相应的二维壳单元网格划分。同时,在两零件之间的激光焊接区域构建激光焊接接头形状的六面体单元,通过激光焊实体建模,其上表面与右上托架的激光焊区域、其下表面与右上滑轨的激光焊接区域分别建立 Tied 绑定接触,进而有效把右上托架和右上滑轨的激光焊接区域固连在一起。

虽然 Tied 绑定连接的建模方式在一定程度上

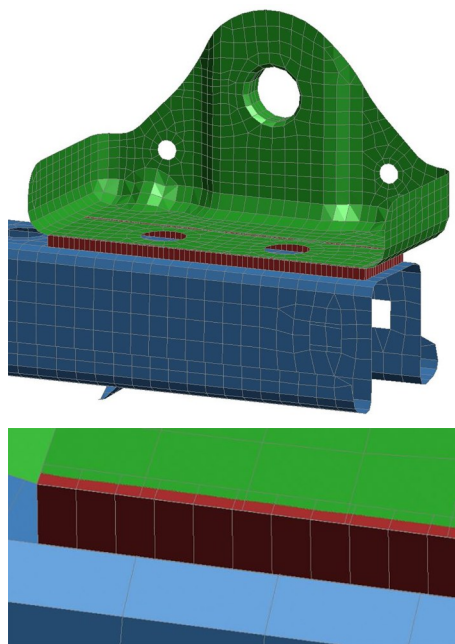


图3 Tied 绑定连接方式整体示意图和局部放大图

Fig. 3 Tied connection method sketch and partial enlarged drawing

实现模拟激光焊接的精细化,并且可以通过独立的激光焊实体单元的受力应变情况作为失效标准,进而判断激光焊的撕裂风险,但由于额外增加了激光焊实体单元进行连接,相当于多了焊料的加入,与真实的激光焊接工艺不符,因此不适用于激光焊接的精细化建模,而适用于弧焊等使用额外焊料的精细化建模。

1.3 节点合并连接方式

节点合并连接方式,首先在网格划分阶段,需要保证两零件的单元节点在焊接区域是一一对应并尽量重合,进而通过软件中的合并功能,设置一定公差范围则可将两零件在激光焊接区域重合对应的两节点均合并成一个节点,由此将两零件通过节点合并的方式在焊接区域连接在一起。

如图4a所示,对右上滑轨和右上托架的三维模型进行以六面体单元为主并通过三棱柱单元过渡的映射网格划分,根据设计的激光焊接接头形状方案,起码保证在激光焊接区域两零件的单元节点一一对应并尽量重合。同时考虑到实际情况,该区域单元尺寸应不大于真实激光焊接接头宽度。通过选择两零件激光焊接区域的节点,根据节点合并连

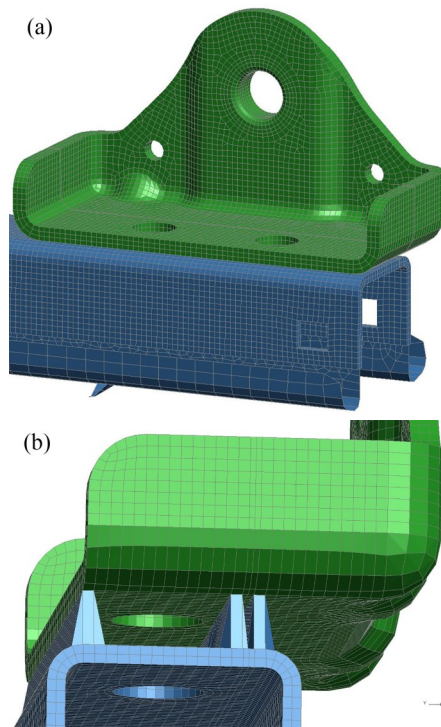


图4 节点合并连接方式整体示意和效果展示

Fig. 4 Node merging connection method sketch and result of exhibition

接方式则可以实现右上滑轨和右上托架在激光焊接区域的连接。如图4b所示,为了进一步展示连接效果,将右上托架向上平移一段距离,可见右上滑轨和右上托架之间只有激光焊接区域才有效连接,非激光焊接区域的单元节点相互独立。

可以看到,基于连接件的实体单元建模,通过连接件自身的节点合并连接方式直接模拟激光焊接的真实熔合区域,同时通过控制单元尺寸可考虑真实激光焊接接头宽度,由此创建与真实激光焊接相符的激光焊精细化建模方式。

1.4 激光焊精细化建模方式失效标准

综上所述,一方面,基于连接件自身节点合并连接的激光焊精细化建模方式,没有额外的激光焊单元介入,与真实的激光焊接工艺更为相符;另一方面,激光焊接拉伸撕裂的工程失效问题^[12]常见,因此更为关注激光焊接区域的受拉情况。从工程实用角度和风险判断出发,根据最大主应变失效准则,建立失效判断标准:提取仿真结果中连接件在激光焊接区域的最大 Mises 应变,并以其中的最大 Mises 拉伸应变作为评价指标,通过对比连接件相应的材料延伸率进行风险判断。如果最大 Mises 拉伸应变不超过相应连接件的材料延伸率,则该件激光焊接区域拉伸失效风险相对较小,便于激光焊接在工程问题中的失效判断。

本文对于右上滑轨和右上托架,根据拉伸性能试验,其材料和相应延伸率如表1所示,其中右上滑轨属于高强度钢,延伸率相对较小,只有10%。

表1 连接件材料及其延伸率

Table 1 Materials and elongation of connections		
零件	材料	延伸率/%
右上滑轨	DP980	10
右上托架	QSTE420TM	21

2 仿真建模参数

对于构建的激光焊精细化建模方式,由于右上滑轨和右上托架之间的接触效果是影响仿真分析结果的重要因素,因此接触刚度的合理设置是接触算法中的关键建模参数。此外,针对右上滑轨和右上托架激光焊接区域产生拉伸撕裂失效风险最大

的后向冲击工况,构建整椅和假人的后向冲击模型,通过选择不同的接触刚度,对不同配置不同激光焊接头形状进行结果对比分析。由于现实中接触双方不会产生相互穿透,因此在仿真分析中,原则上接触穿透量应越小越好。表2所示为不同接触刚度时,右上滑轨和右上托架接触对在激光焊接区域最大穿透量对比,可见当接触刚度越小时,接触对的穿透量越大,易造成结果不准确。

表2 不同接触刚度激光焊接区域穿透量对比

Table 2 Comparison of penetrations in laser welding area by using different contact stiffnesses

接触刚度	配置1	配置2	配置3
	穿透量/mm	穿透量/mm	穿透量/mm
0	0.03	0.05	0.11
2	0.02	0.03	0.07
4	0	0.01	0
6	0	0.01	0
8	0	0	0

同时,以右上滑轨的激光焊接区域为例,表3所示为不同接触刚度时相对应的最大 Mises 应变和最大有效塑性应变结果,可见接触刚度越大,接触对会产生很大作用力避免穿透现象,易造成结果不稳定性,局部异常变形和单元畸变现象。

由此可见,为了有效避免接触穿透和局部异常变形现象,作为激光焊精细化建模方式的关键建模参数,本文接触刚度的推荐值为4,尽量在3~5的范围区间内。

此外,本文对厚度1.6 mm的汽车右上滑轨和厚度2.5 mm的右上托架进行激光焊接模拟,激光功率3 800 W,焊接速度60 mm/s,为了更符合实际激光焊接过程的特点,可选取圆锥热源模型,模型参数建议为: $z_c=4$ mm, $z_i=0$ mm, $r_c=2$ mm, $r_i=0.65$ mm^[13]。

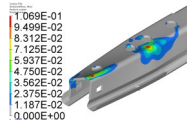
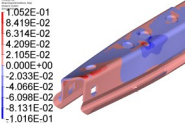
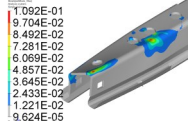
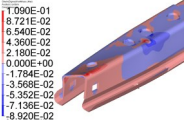
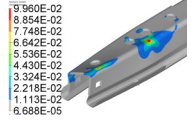
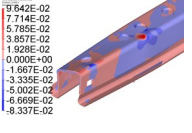
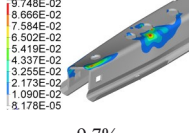
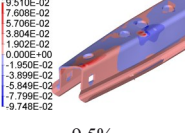
3 仿真激光焊方案选择

通过激光焊精细化建模方式,本文设置右上滑轨和右上托架接触对的接触刚度为4,提取仿真结果中连接件在激光焊接区域的最大 Mises 应变,并以其中的最大 Mises 拉伸应变作为评价指标,通过对比相应的材料延伸率作为失效标准进行风险判断。基于后向冲击的高风险工况,如表4所示,以右

表 3 不同接触刚度上滑轨激光焊接区域应变对比

接触刚度	配置 1		配置 2		配置 3	
	最大 Mises 应变	有效塑性应变	最大 Mises 应变	有效塑性应变	最大 Mises 应变	有效塑性应变
0	9.7%	9.4%	11.4%	10.9%	9.9%	9.5%
2	9.2%	9.0%	10.9%	10.4%	9.9%	9.5%
4	9.1%	8.9%	10.8%	10.4%	10.0%	9.9%
6	22.6%	76.2%	22.5%	26.1%	27.2%	35.0%
8	46.1%	87.4%	68.0%	75.4%	56.7%	93.7%

表 4 不同激光焊接头形状方案最大 Mises 应变和最大 Mises 拉伸应变对比

激光焊方案	最大 Mises 应变	最大 Mises 拉伸应变	结论
1	 10.7%	 10.5%	NG
2	 10.9%	 10.9%	NG
3	 10.0%	 9.6%	PASS
4	 9.7%	 9.5%	PASS

上滑轨激光焊接区域为例,对不同激光焊接头形状方案进行对比分析。

由于右上滑轨材料为高强度钢 DP980,最大拉伸应变需小于其材料延伸率 10%,以此失效标准为主导,同时还要综合考虑激光焊工艺(包括成本、效率和复杂程度等),最终选择方案 4 作为低风险的激光焊优化方案。

4 后向冲击试验验证

采用激光设备为 IPG YLS-4000 光纤激光器,

额定输出功率 4 000 W,焊接功率在 400~4 000 W 连续可调,激光波长 1.07 μm。

利用最终选择的方案 4 形状对厚度 1.6 mm 的右上滑轨和厚度 2.5 mm 的右上托架进行激光焊接,焊接时利用固定工装通过定位销和压紧面的方式将两零件进行定位夹紧,相关主要焊接参数为:激光功率 3 800 W,离焦量 0 mm,焊接速度 60 mm/s,光斑直径 0.8 mm,并制造座椅样件,通过真实的后向冲击试验,结果试验顺利通过,如图 5 所示,该处激光焊接接头没有出现撕裂失效。表明本文对激光焊精细化的建模研究在一定程度上能有效实现激光焊接撕裂失效风险的预判和识别。



图 5 试验后右上滑轨和右上托架示意

Fig. 5 Upper slide and upper bracket sketches after experiment

5 结论

本文从工程实用角度出发,对汽车座椅激光焊精细化建模进行研究,构建了一种激光焊精细化建模方式,建立失效判断标准,研究合理的接触刚度建模参数,选择低风险的激光焊接接头形状方案。最终通过高风险试验工况验证激光焊接区域无撕裂失效,有效实现激光焊接失效的风险预判。具体结论如下:

(1)为了更为真实反映激光焊接工艺,以节点合并连接作为激光焊精细化建模方式,通过实体单元建模,将连接件在激光焊接区域的自身节点合并连接模拟激光焊接的真实熔合区域,同时通过控制单元尺寸可考虑真实激光焊接接头宽度。

(2)根据最大主应变失效准则,以激光焊接区域的最大 Mises 拉伸应变作为评价指标,对比相应材料延伸率建立失效判断标准。此外,作为关键建模参数,需研究合理接触刚度,本文建议在 3~5 之间,避免焊接件的接触穿透和局部变形异常。

(3)基于高风险工况进行仿真分析,以失效判断标准为主导,同时还要综合考虑激光焊工艺,最终选择低风险的激光焊优化方案。

参考文献:

- [1] 孙朝,许世涛,雷文,等. SUS301L 不锈钢激光焊研究现状[J]. 焊接技术,2020,49(1):1-7.
SUN C, XU S T, LEI W, et al. Research status of laser welding of SUS301L stainless steel[J]. Welding Technology, 2020, 49(1):1-7.
- [2] 陆斌锋,芦凤桂,唐新华,等. 激光焊接工艺的现状与进展[J]. 焊接,2008(4):53-57.
LU B F, LU F G, TANG X H, et al. Present situation and future trend of laser welding technique[J]. Welding & Joining, 2008(4):53-57.
- [3] 刘浩东,戴京涛. 激光焊接技术的应用研究进展与分析[J]. 电焊机,2022,52(01):95-102.
LIU H D, DAI J T. Research Review and Analysis of Laser Welding Application [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(01):95-102.
- [4] 冯吉才. 异种材料连接研究进展综述[J]. 航空学报, 2022, 43(02):6-42+457.
FENG J C. Research progress on dissimilar materials joining [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(02):6-42+457.
- [5] 王素环,肖雪峰,韩晓辉,等. 不锈钢激光焊与电弧焊焊接性对比研究[J]. 焊接技术,2014,43(2):18-20.
WANG S H, XIAO X F, HAN X H, et al. Comparative Study on Weldability between Stainless Steel Laser Welding and Electric Arc Welding [J]. Welding Technology, 2014, 43(2):18-20.
- [6] 李苏,张占辉,韩善果,等. 激光技术在材料加工领域的应用与发展[J]. 精密成形工程,2020,12(04):76-85.
LI S, ZHANG Z H, HAN S G, et al. Application and Development of Laser Technology in the Field of Material Processing [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(04):76-85.
- [7] 王凯,朱加雷,焦向东,等. 激光焊接技术在船舶制造中的发展及应用现状[J]. 电焊机,2017,47(2):58-64.
WANG K, ZHU J L, JIAO X D, et al. Development and application status of laser welding technology in ship-building [J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(2):58-64.
- [8] GUO W, CROWTHER D, FRANCIS J A, et al. Process-parameter interactions in ultra-narrow gap laser welding of high strength steels [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2016, 84(9):2547-2566.
- [9] 宋秋平. 船用 Q235 钢 T 型结构件的激光-电弧复合高效焊接技术研究[D]. 辽宁:大连理工大学, 2015.
SONG Q P. Study on Laser-arc Hybrid High-efficiency Welding of T-type Structures of Q235 Ship Steel [D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2015.
- [10] 许瑞麟,朱品朝,于成哉,等. 汽车车身焊接技术现状及发展趋势[J]. 电焊机,2010,40(5):1-18.
XU R L, ZHU P C, YU C Z, et al. Present situation and development trends of welding technologies for B.I.W [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(5):1-18.
- [11] 张亨,王云玉,张克梁. 调角器总成激光穿透焊工艺研究[J]. 电焊机,2021,51(3):103-106.
ZHANG H, WANG Y Y, ZHANG K L. Research on laser penetration welding technology of recliner assy [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(3):103-106.
- [12] 郭相忠,刘伟,王昌坤,等. 301L 搭接激光焊接接头拉伸过程的弹塑性演变及断裂数值分析[J]. 中国激光, 2018, 45(12):77-84.
GUO X Z, LIU W, WANG C K, et al. Numerical Analysis of Elastic-Plastic Deformation Evolution and Fracture Behavior in Tensile Process of Laser Lap Welded 301L Joints [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12):77-84.
- [13] 卢宇峰. 全熔透激光焊热源数值模型及参数研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
LU Y F. Study on Numerical Model and Parameters of Full Penetration Laser Welding Heat Source [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.