

整车关键承载部件应力集中问题分析与结构优化

肖中校

海南宇龙机械科技有限公司 海南 海口 570311

摘要：承载部件应力集中是引发汽车结构疲劳失效的主要根源。本文针对一款SUV后减震器上安装座、前下控制臂后衬套支架及后副车架纵梁连接件三处典型承载结构，基于有限元方法开展极端工况下的应力场分析，识别各部件应力集中区域并探究其形成机制。结果表明，安装座过渡圆角不足、支架刚度突变及连接件焊点布置不当分别是导致三处应力超标的主因。据此分别采用渐变式圆角结构优化、支架刚度渐进匹配及焊点布局重排三种优化策略，改进后各部件应力峰值显著降低，应力场分布更趋均匀，且未明显增加结构质量，为同类问题的工程处置提供了有效参考。

关键词：应力集中；承载部件；有限元分析；结构优化；整车结构

引言：汽车行驶过程中，路面不平度与动态载荷经由悬架系统传递至车身各部，使承载部件长期处于复杂交变应力状态。当结构存在截面突变、刚度不连续或连接缺陷时，局部应力将成倍放大，成为制约整车耐久寿命的关键因素。由于承载部件的应力集中涉及几何设计、材料选择与制造工艺的多重耦合，单纯依靠经验设计难以从根本上解决。有限元仿真能够精确刻画局部应力场的细微分布，为定位薄弱环节和验证改进效果提供了有力工具。本文以一款SUV后部承载系统为对象，选取三处典型应力敏感部件，通过仿真识别应力集中源头并制定针对性优化措施，旨在形成一套系统化的分析改进方法。

1 应力集中问题的理论认识与数值求解

1.1 弹性体中的应力扰动规律

当激励在弹性体内沿着最短路径传递时，若路径上出现几何或物性突变，力流将被迫转向并聚集，在突变处形成单位面积上力流密度远超平均水平的区域。从数学角度看，弹性力学方程组在边界曲率突变处呈现解的高梯度特性，应力分量随距突变点距离的平方根倒数或对数规律急剧变化。这种应力扰动是弹性体固有的力学响应，无法完全消除，但可通过优化几何构型将扰动幅度控制在可接受范围。承载部件设计中，铸造圆角、焊接坡口及翻边高度等细节参数对应力扰动的幅度有决定性影响。

1.2 基于局部精细化的应力求解策略

精确求解应力集中区域的峰值应力对有限元网格提出极高要求。本研究采用“整体粗分、局部细划”的分级建模方案。先在整车层面用相对稀疏的网格捕捉全局变形形态和载荷分配关系，再以子模型技术将关注区域从整车模型中独立出来，在保持真实边界条件的前提下

施行逐级加密。采用实体单元，以保证应力梯度较大的区域仍能获得足够的计算精度。对每个热点均进行至少三次不同尺度的网格划分，通过比较峰值应力的变化率确认结果收敛后采信^[1]。

1.3 应力集中区域的判定指标

建立应力集中判定指标时需区分静强度与疲劳两类失效模式。静强度层面采用峰值应力与材料屈服强度的比值作为安全储备指标；疲劳层面则关注应力幅值和平均应力的组合效应，并以应力集中系数衡量局部应力场相对于名义应力的放大程度。此外，应力梯度的高低影响疲劳裂纹萌生的速度：梯度越陡，裂纹越易在狭小区域内萌生。本文将以上三方面指标综合排序，筛选改进优先级，确保有限的优化资源优先投向最危险的区域。

2 整车模型构建与承载部件筛选

2.1 整车有限元模型概况

本文以后驱型SUV的整车结构为对象构建有限元模型。模型以白车身为主体，完整包含了前后悬架、副车架、动力总成（梁单元结构及集中质量模拟）及四轮等全部底盘组件，形成了涵盖车身结构件、底盘承载件及动力总成悬置系统的完整力学分析体系。白车身钣金件以四边形壳单元为主进行搭建，在保证计算精度的前提下，对非承载区域适当放宽单元尺寸以控制整体求解规模。关键承载区域的网格基准尺寸设定为8mm，确保该部位具有足够的应力捕捉分辨率。悬架摆臂、转向节及副车架中的铸造和锻造结构件，因其厚度方向尺寸与平面尺寸量级相当，采用四面体实体单元划分以更好地反映厚度方向的应力梯度。各部件之间的连接关系包括了电阻点焊、高强螺栓紧固及结构胶粘接等多种形式，焊点采用ACM单元精确模拟其载荷传递特性，螺栓以刚性梁单元配合定义方式处理，结构胶则通过实体单元建立

粘接层的力学模型。上述连接处理方式确保了模型中载荷传递路径的完整性与准确性,为后续应力集中分析奠定可靠的力学基础。

2.2 重点分析部件的选取与细化

根据整车装配关系和载荷流动方向,从后部承载系统中筛选出三处应力集中风险最高的部件作为重点研究对象。第一处为后减震器上安装座,该件位于轮罩内板与后纵梁的交汇位置,是悬架垂向载荷向车身传递的首要通道。该部件承受来自减震器的大幅值周期性拉压载荷,其内凹的几何构型使得底部弯折区域成为天然的应力放大位置,加之该处空间受限,设计上难以布置充裕的过渡结构。第二处为前下控制臂后衬套支架,该件作为控制臂与副车架的中间连接件,载荷输入路径呈明显的偏心状态——衬套轴线与支架安装面存在空间偏距,致使该支架长期处于弯扭组合受力模式下。支架主体与安装耳片之间存在显著的截面和刚度落差,这种落差在力流传递过程中形成了天然的瓶颈^[2]。第三处为后副车架纵梁连接件,该件承担着将副车架纵梁与车身底板刚性联结的功能,其四周沿搭接缝均匀分布有多处焊点,焊点周边因局部刚度突增而成为应力集中的高发区。为精确捕捉上述三处部件的应力集中特征,在整车模型中分别对它们的几何外形和连接区域实施了多级局部细化网格处理,最小网格尺寸缩减至2mm。

2.3 载荷工况与约束处理

为全面暴露各部件的应力集中状况,选取三种各具考核针对性的极限工况进行加载计算。上跳冲击工况模拟车辆以较高速度通过路面凸起物时悬架压缩至行程极限的状态,此时减震器活塞杆承受最大压缩力并传递至安装座,该工况对后减震器上安装座底部弯折区域的强度提出最严苛考验,应力集中若存在于该部位将在此工况下充分显现。侧倾稳定工况模拟车辆持续转弯时车身侧倾导致悬架抗侧倾力矩显著增加的状态,该工况下左右两侧悬架载荷重新分配,外侧下控制臂后衬套支架承受显著增大的偏载作用,主要用以凸显支架主体与耳片连接区域的受力薄弱环节。制动俯仰工况模拟紧急制动时整车重心前移、后轴载荷大幅降低的同时伴随纵向剪切力传递至后副车架的现象,该工况对后副车架纵梁连接件及其焊点区域形成剪切与弯曲的组合加载效应。各工况均按实际悬架运动学关系在相应铰接点施加自由度约束,同时将动力总成、车身及乘员等非结构质量以集中质量点形式配置于各自质心,使承载部件的边界受力状态逼近真实道路使用条件。

3 多工况应力场分析与集中区识别

3.1 上跳工况下安装座的应力特征

上跳冲击工况的计算结果显示,后减震器上安装座的应力集中于其底部内凹弯折处,形成一条窄带状的等效应力峰值区。该处的应力值明显高于安装座其余部位,呈现从弯折线向两侧迅速衰减的分布形态,表明弯折半径不足是应力集中的直接原因。沿安装座厚度方向观察,受拉侧表面应力高于受压侧,弯曲应力占主导地位。进一步检查设计参数发现,该处弯折内圆角半径偏小且未设置卸载槽,这是导致局部刚度突变和力流剧烈转折的结构根源^[3]。

3.2 侧倾工况下衬套支架的应力分布

侧倾稳定工况中,前下控制臂后衬套支架的应力场出现明显偏离。该支架的主体与安装耳片之间的连接区域应力显著高于其他部位,高应力带沿耳片根部弧线呈月牙状分布。产生这一现象的原因在于耳片根部截面宽度急剧收窄,加之耳片刚度远高于支架底板刚度,载荷难以从耳片平顺地扩散到底板中。支架底面与副车架连接螺栓周边的应力分布也不均匀,靠近载荷输入侧的螺栓孔处应力较高,表明支架的载荷传递路径并非对称分布。

3.3 制动工况下连接件焊点区域的应力水平

制动俯仰工况使后副车架纵梁连接件承受纵向剪切和垂向弯曲的组合作用。连接件周边焊点的应力分布呈现显著的不均匀性,位于连接件后侧边缘的焊点应力远超前侧焊点。这些高应力焊点沿连接件与底板的搭接缝分布,在焊点与母材的结合部位应力梯度极为陡峭。将焊点去除后进行补充分析发现,搭接区域最大应力位置由焊点附近转移至连接件弯折处,且峰值应力明显降低,这证实焊点布局的不当导致连接刚度在局部过于集中,抑制了焊点间母材的协同承载能力。

3.4 应力集中成因的归纳分类

对三处应力集中的成因进行归纳,可抽象为三种典型失效模式。后减震器上安装座属于几何缺陷型:过渡圆角过小,力流在弯折处被迫急剧转向,局部流线密度跃升。前下控制臂后衬套支架属于刚度失配型:安装耳片与支架主体的截面和刚度相差悬殊,两者交界处成为载荷传递的瓶颈。后副车架纵梁连接件属于连接集中型:焊点布置过于稀疏且偏向一侧,导致焊点承受的份额远超设计预估值。三种模式在力学本质上都指向同一个方向,即力流的顺畅程度不足。

4 结构优化方案与改进效果验证

4.1 几何缺陷型部件的圆角重构

针对后减震器上安装座的弯折处应力集中,优化方案不采用单一的圆角放大,而是引入渐变式圆角设

计——弯折起始端采用较小半径,沿弧长方向平滑过渡至较大半径,最终以缓和曲线与直线段衔接。这种处理在有限安装空间内实现了最充分的应力舒缓,同时避免了单一大圆角可能引发的干涉问题。此外在弯折受压侧增设长度约15mm的应力卸载槽,进一步释放该区域的约束刚度。改进后的应力场显示,带状高应力区明显拓宽且应力峰值下降,应力沿弯折线的分布趋于平缓,原先急剧的应力跳跃被渐进式变化所取代。

4.2 刚度失配型部件的渐进式过渡

前下控制臂后衬套支架的优化着眼于缩小耳片与底板之间的刚度差距。具体措施包括:将耳片根部的截面宽度沿高度方向渐变收窄而非急骤突变,使刚度沿力流方向逐步递减;在耳片与底板交汇处的外侧增设三角加强肋,该加强肋的高度自耳片根部向外递减,形成刚度渐变的物理实现;适当增加底板与副车架接触面的厚度,提升底板对耳片载荷的承接能力^[4]。优化后耳片根部月牙状高应力带基本消退,应力分布形态由原先的单峰变为更平坦的多峰分布,表明载荷分担更为均匀。

4.3 连接集中型部件的焊点布局重排

后副车架纵梁连接件的优化方案围绕焊点分布的合理性展开。在保持焊点总数不变的前提下,将原先偏置焊点向连接件周边均匀扩散,使搭接区域母材承担更多载荷。在连接件前后两端各增加两处短焊缝,以线连接方式补充点连接的载荷传递缺口。同时在连接件弯折部位增设直径约6mm的应力释放孔,打断高应力带的连续性。优化后焊点周边应力水平趋于一致,原先应力严重超限的焊点降至安全范围,焊点间母材的应变分布显示出更好的协同性。

4.4 优化效果的综合评价

将三项改进方案集成后重新进行全工况校核,并与原始方案逐项对比。后减震器上安装座的峰值应力降幅最为显著,应力沿弯折线的分布均匀性得到根本改善。前下控制臂后衬套支架的月牙状高应力带已不可辨,应力最集中的耳片根部区域应力水平明显回落。后副车架纵梁连接件的焊点群应力离散度大幅下降,峰值焊点应力与平均焊点应力的比值趋于合理。三项优化合计增加

的质量较小,单位质量投入所换取的应力削减效益良好,证明了精准干预策略的经济性^[5]。

上述三项优化分别针对不同类型的应力集中成因采取了差异化的技术路线,却共同遵循“引导力流平顺过渡”的核心思想。几何缺陷型问题以变半径倒角疏通受阻的力流,刚度失配型问题以渐进截面匹配消除力流跳跃,连接集中型问题以焊点重排分散力流集中。三者在方法上各具特色,在效果上均实现了应力水平下降和分布均匀化,在代价上均将质量增量控制在极低水平。这些结果表明,应力集中问题的解决未必依赖大规模增重,通过设计细节的精准调整即可获得可观的改进收益。

结束语

本文以一款SUV后部承载系统中的后减震器上安装座、前下控制臂后衬套支架及后副车架纵梁连接件为对象,基于有限元方法开展多工况应力场分析与结构优化。通过上跳冲击、侧倾稳定及制动俯仰三种工况计算,精确识别各部件应力集中的主导因素,归纳出几何突变、刚度失衡与连接集中三种致险模式,并分别以渐变圆角重构、刚度渐进匹配及焊点布局重排予以应对。改进后各部件峰值应力均降至许用范围,应力分布趋于平缓。研究表明,应力集中化解不依赖材料堆叠,而在于力流路径疏导与局部刚度调配。后续将结合道路载荷谱开展疲劳寿命验证。

参考文献

- [1]孙华克.汽车底盘传动系统机械结构优化设计分析[J].专用汽车,2026(7):12-14.
- [2]庄海石.智能化汽车底盘结构件耐久性分析与改进措施探讨[J].时代汽车,2025(14):136-138.
- [3]曾维和,苟黎刚,王磊,等.基于结构应力的车身点焊动态疲劳分析与试验[J].机械设计与研究,2026,42(2):111-121.
- [4]陈思,张勇乐.汽车轮毂结构优化与有限元分析研究[J].汽车与驾驶维修,2025(4):64-66.
- [5]张峰,张朋举,姚再起,等.基于全参数化模型的上车身结构优化设计[J].机械设计与制造,2026,422(4):35-40.