

Application of vehicle structure deformation characteristics in mechanical identification of traffic accident

Zhijian Lin

Guangdong Heng'an Judicial Appraisal Institute, Yunfu, Guangdong, 527300, China

Abstract

Automobiles are subjected to instantaneous high-energy impacts during traffic accidents, and their structural deformation characteristics record the force transmission paths and energy dissipation trajectories during collisions, serving as crucial physical evidence in accident mechanics identification. By systematically analyzing the plastic deformation, fracture morphology, and residual strain patterns of metal components in different vehicle sections, key parameters such as collision direction, velocity, and contact location can be inferred to provide scientific support for accident reconstruction and liability determination. Structural deformation characteristics not only reflect the magnitude and distribution of collision forces but also reveal the temporal sequence of loading and energy dissipation mechanisms. With the widespread application of high-strength steel and multi-material body structures, vehicle mechanical responses have become increasingly complex, making the accurate interpretation of deformation traces critical to the objectivity of identification conclusions. Interpreting automotive deformation characteristics based on mechanical principles can enhance the scientific rigor and standardization of accident identification.

Keywords

vehicle structure; deformation characteristics; traffic accident; mechanical identification; collision reconstruction

汽车结构变形特征在交通事故力学鉴定中的应用

林志坚

广东恒安司法鉴定所, 中国·广东 云浮 527300

摘要

汽车在交通事故中承受瞬时高能冲击, 其结构变形特征记录了碰撞过程中的受力轨迹与能量传递路径, 是交通事故力学鉴定中重要的物证依据。通过对车辆各部位金属构件的塑性变形、断裂形貌及残余应变模式进行系统分析, 可反推出碰撞方向、速度与接触位置等关键参数, 为事故再现与责任划分提供科学支撑。结构变形特征不仅反映了碰撞力的大小与分布, 还揭示了受力时间序列及能量耗散规律。随着高强度钢与多材料车身的普及, 车辆结构力学响应愈加复杂, 变形痕迹的精准识读对鉴定结论的客观性具有决定性作用。基于力学原理解读汽车变形特征, 能够提升事故鉴定的科学化与规范化水平。

关键词

汽车结构; 变形特征; 交通事故; 力学鉴定; 碰撞重构

1 引言

交通事故的力学鉴定是事故调查和责任认定的核心环节, 其科学性直接影响到鉴定结果的公正性与权威性。汽车在碰撞过程中会经历瞬间的能量冲击, 结构构件在高应变速率下发生复杂的塑性变形和断裂损伤, 这些残余变形特征为还原事故过程提供了关键物理证据。长期以来, 事故鉴定往往依赖目测经验与痕迹比对, 存在主观性强、定量性不足的问题。随着车辆结构材料的多样化与轻量化发展, 传统经验方法难以准确解析变形机理, 需要引入力学分析框架, 系统评估车身变形与碰撞载荷的对应关系, 以实现碰撞过程的可

计算重构。围绕汽车结构变形特征的力学解读展开研究, 将为事故鉴定提供客观、量化的判断依据。

2 汽车结构变形特征的力学基础

2.1 车身结构材料的力学性能与变形模式

车身结构由高强度钢、铝合金、复合材料等多类材料构成, 具有不同的屈服强度、延展性与断裂韧性, 其力学性能直接决定碰撞中的变形行为。高强度钢的屈服强度普遍在 500MPa 以上, 在受冲击载荷时能够保持较高刚度并延缓整体屈服, 形成集中塑性变形区, 而铝合金的屈服强度约为 250MPa, 延展性较高, 更易产生均匀塑性流动, 能通过大面积吸能降低冲击峰值。复合材料在冲击中呈脆性断裂特征, 可通过分层剥离吸收能量, 但破坏不可恢复。车身的变形模式取决于构件截面几何与材料性能的耦合作用, 纵梁等

【作者简介】林志坚(1970-), 男, 中国广东高要人, 本科, 工程师, 从事痕迹鉴定(交通事故痕迹物证鉴定)研究。

承载构件多呈轴向压溃折叠模式，门槛梁和防撞梁等横向构件多产生弯曲塌陷模式，外覆盖件则表现为薄板鼓包与撕裂特征，不同部位的变形响应共同构成能量耗散路径，影响整车的碰撞防护性能与力学鉴定依据。

2.2 碰撞载荷作用下的结构受力传递路径

汽车在碰撞瞬间产生的冲击力会沿结构构件的连接路径传递，形成应力波在车身中的扩散网络，受力传递路径的特征决定变形区域分布及能量吸收效率。车辆前纵梁与副车架构成初级吸能路径，其截面惯性矩大，在冲击载荷达到50kN时开始产生局部屈曲折叠，吸收碰撞能量并延缓传递至乘员舱。中段地板梁、门槛梁及B柱形成次级载荷传递通道，在100kN载荷下保持结构完整性以保护乘员舱空间。顶部横梁、A柱和车顶框架承担抗弯抗扭作用，可抵抗侧向撞击产生的60kN横向载荷。受力传递过程呈现出由外向内、由局部至整体的逐级衰减特征，能量在各级构件的塑性变形中逐步耗散，使乘员舱保持相对稳定的几何形态，为碰撞后结构形变痕迹与受力顺序的判断提供物理依据。

2.3 塑性铰区与局部屈曲在变形过程中的作用

车身构件在碰撞冲击中会在应力集中位置形成塑性铰区，使局部区域产生大角度塑性转动并消耗动能，这是控制结构可控变形的关键机制。纵梁端部、地板横梁节点及副车架连接处常设计为厚度较薄的诱导区，当受到70kN以上轴向冲击载荷时先行屈服，形成折叠褶皱并产生塑性铰，从而避免高载荷直接传入乘员舱区域。局部屈曲通常出现在板壳结构如车门外板、翼子板等区域，当应力达到材料屈服强度的1.2倍时会迅速鼓包塌陷，产生波纹状凹痕形态，既释放能量又作为碰撞方向和受力顺序的判据。塑性铰区与局部屈曲的分布反映了载荷流动路径，其变形形态稳定且可复现，是力学鉴定中判断碰撞能量分布与构件失效模式的重要依据。

3 汽车结构变形特征的识别与测量技术

3.1 残余变形几何特征的形态学分析

残余变形的几何特征为碰撞能量分布提供定量信息，可通过形态学参数进行系统分析。纵梁的轴向压缩量常在250~400mm范围，褶皱波长约为80mm，说明其承担了超过30kJ的能量吸收；A柱的侧向弯曲位移约为60mm，残余转角5°，代表其在侧向碰撞中抵抗了约40kN的横向载荷。外覆盖件如发动机盖在冲击后呈抛物线鼓包形态，最大凹陷深度常达90mm，边缘撕裂长度约为150mm，可反推撞击位置与力集中区域。形态学分析中常用轮廓提取与截面重构技术，将测得的凹陷深度、褶皱间距、残余转角等参数输入有限元模型校核碰撞力，能以几何特征匹配法确定受力路径，为力学鉴定提供定量支撑。

3.2 车身断裂、折叠与压溃痕迹的判读方法

车身在碰撞后会遗留断裂、折叠与压溃痕迹，通过对

这些宏观与微观特征的判读可重建碰撞事件的动力学过程。断裂面通常呈现45°剪切特征，金属晶粒拉伸纹理清晰，当冲击速度超过12m/s时多发生在门槛梁、纵梁等承载部件，表明瞬时载荷已超过150kN。折叠区可见周期性褶皱，褶皱波峰间距约为70mm，对应构件在塑性区形成多次屈曲，能量吸收率可达70%。压溃区域体积密度增加30%，常见于发动机舱前端的溃缩盒，内腔完全塌陷形成蜂窝状结构，代表构件承受了高轴向压缩力并耗散动能。判读过程中结合断裂金相分析、折叠几何匹配与压溃厚度测量，可重建受力顺序与载荷大小，为事故鉴定提供物理依据。

3.3 基于三维重建的变形量化测量技术

三维重建技术可实现车身变形的高精度量化测量，为力学鉴定提供客观数据支撑。通过激光扫描获取点云数据，可在1mm精度内重现碰撞后车体外形，将变形区域体积差与原始设计模型比对计算体积压缩率，如纵梁前段压缩体积为0.015m³，吸能量约为28kJ。采用结构光扫描可快速获取复杂弯曲区域的凹陷深度，精度达0.5mm，可测得A柱最大位移为62mm，残余转角为6°。摄影测量技术通过多视角重构模型提取变形边界轮廓，结合有限元反演算法求解载荷分布，能计算出局部应变集中区域的等效应力值达380MPa。三维重建不仅提高了测量精度，还可实现变形过程的时序回溯，为碰撞载荷路径推演和力学参数反算提供了可量化的技术途径。

4 交通事故力学鉴定中变形特征的判定价值

4.1 变形深度与碰撞能量吸收关系的推断

车身结构在碰撞中承受的动能会转化为材料的塑性变形功，变形深度与能量吸收量存在稳定的对应关系，可作为事故载荷强度的重要判据。纵梁等轴向受压构件在碰撞过程中发生褶皱折叠，其压缩深度与单位长度吸能呈正比，压缩200mm可吸收约18kJ动能，而达到400mm时吸能可超过35kJ。A柱和B柱等弯曲构件在横向撞击中产生侧向位移，其残余弯曲量反映横向动量输入，位移达到60mm通常意味着作用力超过40kN。外覆盖件的鼓包深度也能表征碰撞能量集中区域，局部凹陷超过90mm说明该点局部受力极大。通过建立构件变形深度与能量吸收的经验函数，可将事故现场的残余形变量化为碰撞动能，为力学鉴定提供客观参数支撑。

4.2 结构变形分布与碰撞方向的对应分析

碰撞载荷在车身结构中沿特定路径传递，不同方向冲击会在构件上形成差异化的变形分布特征，通过分析这些特征可判定碰撞方向。正面碰撞时，变形集中于纵梁和溃缩盒，呈现轴向压溃褶皱形态，地板梁出现均匀鼓包；侧向碰撞则造成A柱、B柱和门槛梁的大角度弯曲，变形区域偏向车体一侧，伴随地板横梁横向移位；后部撞击常导致后纵梁屈曲与后备箱地板上拱，后桥固定点周围出现放射裂纹。变形

分布的不对称性还能揭示碰撞角度,若左前纵梁压溃长度为350mm而右侧仅为120mm,则推断冲击角度约为 30° 。通过构建变形分布特征图谱,将各部位变形程度、范围与碰撞角度和方向匹配,可为鉴定中重建事故动力学过程提供判据。

4.3 局部变形痕迹与接触位置重构的关联性

局部变形痕迹记录了撞击点的瞬时受力状态,是重构接触位置的重要依据,可通过几何参数与载荷模型推算接触区域范围。车门外板出现椭圆形鼓包,最大凹陷深度为92mm,长轴方向指向来车运动方向,可确定接触点位于车门中段偏前;保险杠表面压痕宽度为380mm,中心压入量为75mm,结合模态分析可反推出接触位置位于纵梁前端偏左150mm处;前翼子板撕裂口长度为160mm,金属晶粒拉伸率达到18%,说明冲击集中点位于翼子板弧顶,接触速度约为11m/s。通过高精度摄影测量和点云重建提取这些痕迹的空间坐标,结合有限元反演算法求解载荷施加位置,可实现接触位置的精确重构,为事故力学鉴定提供定量空间参照。

5 汽车结构变形特征在事故责任认定中的应用

5.1 多车碰撞中车辆受力先后顺序的推演

在多车连环碰撞事故中,车辆间的相互作用呈现出复杂的力学耦合关系,受力先后顺序的判定直接影响责任划分的准确性。通过分析不同车辆的结构变形痕迹,可以推演碰撞力传递的时间序列。前车若后纵梁发生连续褶皱压溃,压溃深度达到320mm,后地板出现上拱而前部几乎无形变,说明其在初次受力时承受了后车的主要冲击力。后车若前纵梁呈不对称折叠且褶皱间距明显大于正常压溃形态,发动机舱地板无二次波纹叠加,代表其只在初撞时释放动能而未遭受后续冲击。中间车辆的变形形态更能体现受力顺序,其后纵梁折痕若位于前纵梁褶皱之下,表明先承受后车冲击而后遭前车反弹,若两处褶皱相互交叠并呈交错层级,则说明受力为双向同时作用。

5.2 变形痕迹与行驶速度估算的力学推理

车辆行驶速度是交通事故责任划分的重要参数,结构变形痕迹可作为推算速度的物理依据。车辆在碰撞过程中,动能转化为结构的塑性变形功,变形程度与初始速度存在稳定的力学对应关系。纵梁作为主要吸能构件,其压溃深度与吸收能量近似呈线性关系,当纵梁压溃量达到300mm时吸能约为28kJ,对应碰撞速度约为32km/h,当压溃量为500mm时吸能超过50kJ,对应速度可达48km/h。车门外板的鼓包深度可反映局部能量输入,当凹陷深度为85mm时局部应变约为16%,对应碰撞速度约25km/h,若达到120mm

则应变提升至23%,速度可达35km/h。通过将现场提取的几何形变数据输入有限元反演模型进行动能匹配分析,可得到碰撞初速度的区间值,并与制动痕迹、车载记录仪数据交叉校核,有助于构建多源验证的速度推理链条,为事故鉴定提供客观支撑。

5.3 变形对安全约束系统失效判断的参考价值

安全约束系统的有效性直接关系到乘员伤害程度,其触发与功能发挥高度依赖车身结构在碰撞中的变形响应,分析结构变形参数能够辅助判断约束系统是否存在失效。车辆前纵梁在压溃量达到450mm时前端加速度峰值可达32g,若安全气囊未触发说明碰撞传感器线路可能因结构断裂而失效,属于结构变形导致的系统未动作。乘员舱地板纵向上拱45mm会使安全带下锚点上移15mm,安全带力臂缩短将导致约束力下降20%,乘员胸部加速度峰值可能由25g上升至30g。B柱在侧向碰撞中横向位移达到70mm会使侧气囊展开通道受阻,充气压力不足仅为设计值的60%,导致展开延迟超过20ms。通过比对结构变形量与安全系统设计的触发阈值和动作时序,可以判定约束系统是否因结构过度变形、传感器延迟或布线路径受损而未能正常工作,从而区分事故责任是由驾驶行为、产品缺陷或维护不当引起,为事故处理中的责任界定提供科学支撑。

6 结语

汽车结构在交通事故中所呈现的变形特征,蕴含着完整的力学信息链条,是重构碰撞过程和判定受力状态的重要物证。通过对车身材料性能、受力传递路径、塑性铰区和局部屈曲等机理的系统解析,能够揭示结构在冲击载荷作用下的响应规律,并为变形痕迹的识别与量化提供理论基础。将残余几何特征、断裂折叠形貌与三维重建数据纳入力学鉴定模型,可实现对碰撞能量、方向、接触位置的精准推演,为速度估算、受力时序判定及安全约束系统效能评估提供客观依据。以变形特征为核心的力学鉴定方法,提升了事故分析的科学性和定量化水平,为司法鉴定与责任认定建立起技术支撑框架,对完善交通事故处理机制具有重要意义。

参考文献

- [1] 马晓臣.自动驾驶汽车交通事故侵权责任分配的困境及其缓和——以三层保险结构的架构为例[J].交通节能与环保,2019,15(06):66-72.
- [2] 李长杰.汽车交通事故中牙齿损伤及修复的仿真研究[D].导师:阮世捷.天津科技大学,2019.
- [3] 李炳涛.汽车结构材料对道路交通事故救援影响探析[J].消防技术与产品信息,2017,(06):47-49.
- [4] 王笑.大客车前部结构碰撞仿真试验及结构安全性评价[D].导师:简晓春.重庆交通大学,2012.