DOI: 10.3901/JME.2020.10.163

高速列车转向架构架载荷特征及疲劳损伤评估*

张亚禹¹ 孙守光¹ 杨广雪¹ 李广全²

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044;

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 青岛 266111)

摘要: 利用载荷标定方法制作轴箱弹簧力传感器和一系减振器力传感器, 线路测试得到动车转向架构架的垂向载荷时间历程。结合车载 GPS 信号和陀螺仪信号, 分析列车起动加速、高低速直线运行、线路曲线通过、电机扭矩波动、制动停车等典型工况下构架载荷的变化特征。采用有限元仿真分析的方法确定构架端部的疲劳危险区域及载荷与应力的传递关系, 进而编制构架在轴箱弹簧载荷、一系减振器载荷和耦合载荷作用时的应力幅值谱, 最后依据疲劳损伤线性累计准则计算得到构架的疲劳损伤分布。研究表明, 与构架非动力侧相比, 构架动力侧轴箱弹簧载荷受电机输出扭矩的影响较大, 尤其在列车起动、制动、电机扭矩波动等工况载荷变化明显。在轴箱弹簧载荷和一系减振器载荷单独作用时, 构架端部的应力较大位置分布基本一致, 最大载荷-应力传递系数为 6.56 MPa/kN。在耦合载荷作用下, 构架端部各测点处的疲劳损伤值均高于轴箱弹簧载荷、一系减振器载荷的单独作用。列车由速度 200 km/h 增大至 350 km/h 时, 构架一位侧疲劳危险点的累计损伤值由 0.078 增大至 0.435, 增大了约 4.6 倍。在同一速度级下, 一系减振器载荷产生的疲劳损伤影响参数大于轴箱弹簧载荷。研究结果可为焊接构架的优化设计及仿真分析提供一定理论参考。

关键词: 转向架构架; 轴箱弹簧; 一系减振器; 载荷特征; 疲劳损伤

中图分类号: U260

Load Characteristics and Fatigue Damage Assessment of High Speed Train Bogie Frame

ZHANG Yayu¹ SUN Shouguang¹ YANG Guangxue¹ LI Guangquan²

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. CRRC QINGDAO SIFANG Co., Ltd., Qingdao 266111)

Abstract: The axle box spring force sensor and primary shock absorber force sensor are made by using load calibration method. The vertical load time history of the motor vehicle frame is obtained by line test. Combined with vehicle-borne GPS signal and gyroscope signal, the changing characteristics of frame load under typical working conditions such as train starting acceleration, high and low speed linear running, line curve passing, motor torque fluctuation, braking and parking are analyzed. The fatigue hazard zone at the end of the frame and the relationship between load and stress are determined by finite element simulation analysis. Then the stress amplitude spectrum of the frame under axle box spring load, primary shock absorber load and coupling load is compiled. Finally, the fatigue damage distribution of the frame is calculated according to the linear cumulative criterion of fatigue damage. The results show that compared with the non-powered side of the frame, the axle box spring load of the powered side of the frame is greatly affected by the output torque of the motor, especially in the conditions of train starting, braking and motor torque fluctuation. Under the single action of axle box spring load and primary shock absorber load, the stress distribution at the end of the frame is basically the same, and the maximum load-stress transfer coefficient is 6.56 MPa/kN. Under the coupling load, the fatigue damage value at each measuring point of the frame is higher than that under the single action of axle box spring load and primary shock absorber load. When the train speed increases from 200 km/h to 350 km/h, the cumulative damage value at first side of the frame increases from 0.078 to 0.435, which increases about 4.6 times. At the same speed level, the fatigue damage parameters of the primary shock absorber load are larger than that of the axle box spring load. The research results can provide some theoretical reference for the optimization design and simulation analysis of welded frame.

Key words: bogie frame; axle box spring; primary shock absorber; load characteristics; fatigue damage

* 国家重点研发计划课题资助项目(2018YFB1201704-04)。20190516 收到初稿, 20191021 收到修改稿

0 前言

近年来,随着高速铁路的快速发展,动车组运行速度不断提高,其运行安全性、可靠性、舒适性问题的得到了广泛关注^[1-2]。转向架构架作为动车组的主体结构,不仅承受着来自线路轨道不平顺产生的动态激励,还承担着车体振动产生的动态载荷。对于转向架构架载荷的获取,目前只能通过线路试验的方法来得到,依据载荷与应变的对应关系得到传递函数^[3]。在轮轨激励的主振频率不接近构架的固有频率时可认为构架系统处于准静态,载荷与应变呈现线性关系,通过载荷标定来获取构架的载荷信号^[4-5]。

结构疲劳损伤评估是以数据统计及数据处理为基础,载荷的变化特点及影响规律掌握越具体,结构疲劳寿命预测就越精确^[6-8]。对数据进行合理的分析,可以有效地得到载荷的真实特征^[9]。本文以某高速列车转向架构架为研究对象,线路实测得到了构架垂向载荷时间历程曲线,在此基础上研究了列车起动加速、高低速直线运行、线路曲线通过、电机扭矩波动、制动停车等工况下构架垂向载荷的变化特征。采用有限元仿真分析法确定了焊接构架疲劳薄弱区及载荷与应力的传递关系,进而编制了构架在轴箱弹簧载荷、一系减振器载荷及耦合载荷作用时的应力谱,依据疲劳损伤线性累计准则获得了构架不同位置处的疲劳损伤分布,最后定义了疲劳损伤影响参数来反映不同载荷对构架疲劳损伤的影响程度。该研究结果可为焊接构架的疲劳可靠性评估提供的一定的参考。

1 试验方案

1.1 载荷测试方法

为了有效地获得列车运行过程中构架垂向载荷的变化特点,根据构架的受力特点将垂向载荷分解为轴箱弹簧载荷和轴端一系减振器载荷,其中轴箱弹簧载荷与弹簧垂向刚度、垂向位移有关,一系减振器载荷主要与车轴和构架之间的振动速度有关,且两种载荷在时域上存在一定的相位差。通过专业的力传感器制作工序如应变片组桥、绝缘、温控、封装、信号放大以及加载试验等,将轴箱弹簧、一系减振器做成力传感器元件。由于这种“力传感器”能够连续记录任意时刻构架的载荷变化情况,因此该方法可实现对构架垂向载荷信号的连续测试,这对高速列车转向架构架载荷谱研究及其疲劳损伤评

估具有重要工程意义。

在制作力传感器时,利用载荷标定的方法获得载荷与应变的对应关系,标定过程中采用预载荷 1 kN、3 kN 进行调零处理,可有效地消除力传感器元件与工装之间游隙的影响。最后通过载荷标定得到轴箱弹簧载荷和一系减振器载荷的标定系数分别为 $123 \mu\epsilon/\text{kN}$ 、 $49 \mu\epsilon/\text{kN}$ 。

1.2 试验布置

为全面把握构架垂向载荷的变化规律,将标定完毕的轴箱弹簧力传感器和一系减振器力传感器安装于高速列车动车测试转向架上,测试转向架轴箱位置编号如图 1 所示,其中二位、三位装有齿轮箱装置,为构架动力侧,一位、四位构架非动力侧。在整个测试过程中,各种干扰信号不可避免地进入数据采集系统对测试信号产生干扰,因此采用专用数据处理软件,对实测信号进行去除零漂、小波处理,提高信噪比并将电信号转换为应变值,以获得有效的测试结果^[10]。

图 1 测试转向架示意图

2 载荷特征分析

实际线路测试为多个完整的运营往返历程,测试历程长、工况齐备、数据量大,分析几种典型工况可较为全面地反映高速列车转向架构架垂向载荷的分布特性,主要包括起动牵引、高低速直线运行、曲线通过、扭矩波动、制动停车等。

2.1 起动加速

由高速列车牵引特性可知,在起动牵引阶段,电机输出扭矩最大,随着列车运行速度的增加,电机由恒扭矩输出进而转为恒功率牵引。图 2 给出了高速列车在起动加速阶段轴箱弹簧和一系垂向减振器载荷时间历程曲线。由图 2a 可知,转向架轴箱一位、二位弹簧载荷变化趋势相同,当高速列车由静止进入起动加速时,轴箱一位、二位弹簧载荷由 0 值分别增大至 2.52 kN、9.47 kN,二位弹簧载荷受

电机输出扭矩的影响更为明显,这与齿轮箱安装为转向架二位侧有关。为方便分析,将由电机输出扭矩等引起的轴箱弹簧载荷趋势项定义为趋势载荷^[11-12]。图 2b 为列车起动时一系减振器载荷变化情况,构架一位、二位减振器载荷变化范围均在 $-0.6 \sim 0.6$ kN,在时间区间 $40 \sim 110$ s,一系减振器载荷出现相对稳定的周期波动,这可能与列车通过轨缝有关。

图 2 起动加速工况

2.2 高低速直线运行

图 3 为列车以速度 350 km/h(高速)、 200 km/h(低速)运行时构架一位垂向载荷的时间历程曲线。由图 3a 可以看出,轴箱弹簧承受的垂向动态载荷幅值水平高于一系垂向减振器载荷,其载荷幅值最大值分别为 3.42 kN、 2.43 kN。对比列车高速、低速运行,列车高速运行阶段弹簧载荷、一系减振器载荷幅值明显高于低速阶段。为了探索运行速度对载荷幅值水平的影响,对载荷时间历程曲线的方均根值进行统计,列车由速度 200 km/h 增大至速度 350 km/h 时,轴箱弹簧载荷的方均根值由 0.55 kN 增大至 0.85 kN,增大了 55% ;一系垂向减振器载荷的方均根值由 0.11 增大至 0.39 ,增大约 2.5 倍。由此可知,随着列车运行速度的增大,构架轴箱弹簧载荷、一系

垂向减振器载荷均呈现增大的趋势,一系垂向减振器受列车运行速度的影响更为明显。

图 3 载荷时间历程

2.3 曲线通过

图 4 为列车高速、低速通过相同曲线时陀螺仪信号变化曲线,该信号代表了列车转弯时角速度的变化情况,其中陀螺仪信号数值为正值时表示列车进入右曲线,即列车向右侧转弯。相反,陀螺仪信号数值为负值时,列车进入左曲线。由图 4 可知,列车由直线段进入曲线前需要经过缓和曲线,随着时间的推移,陀螺仪信号数值不断增大,缓和曲线的半径逐渐减小,直到列车进入曲线段,这与列车出曲线时的变化规律相反。

图 4 陀螺仪信号

根据车载陀螺仪信号选取了列车通过曲线时构架垂向载荷的变化曲线,如图5所示。由图5可知,列车通过曲线时轴箱弹簧载荷会发生趋势变化,一系减振器载荷无载荷趋势变化。列车由直线区段进入曲线1、2时,运行速度等级对轴箱弹簧载荷趋势变化具有一定的影响。当列车高速进入曲线时,轴箱弹簧趋势载荷分别为 -1.0 kN 、 -1.5 kN ,列车低速进入曲线时,其值分别为 3.0 kN 、 2.5 kN ,这应与列车横向偏移有关。

图5 列车曲线通过

为进一步研究线路曲线对转向架构架载荷的影响,对列车通过曲线时的受力状态进行理论分析。当列车高速通过线路曲线时,整个车辆要受到自身重力分量和离心力的作用,在相同速度级下,随着缓和和曲线半径的减小,列车重力分量和离心力也不断增大。

为平衡高速列车通过曲线时产生的离心力,在铺设线路曲线段时,需要调整线路两侧钢轨的相对高度,使外侧钢轨相对于内侧钢轨抬升一个高度差 h ,即为超高。轨道超高会使内外轨道曲线平面形成一定的倾角 θ ,根据力的分解可知,列车通过曲线时自身重力在与离心力相反的方向产生一定的分量,从而有效地缓解离心力对车辆系统的影响。

图6给出了曲线通过时列车的受力状态,当列

车以时速 v 通过半径为 R 的曲线时,构架横向载荷为

$$F_d = m \frac{v^2}{R} - mg \sin \theta \quad (1)$$

图6 车辆通过曲线示意图

由于倾角较小,满足 $\theta \approx \tan \theta = h/s$,则式(1)可改为

$$F_d = m \frac{v^2}{R} - mg \frac{h}{s} \quad (2)$$

将上式两端除以 mg 可得

$$\frac{sF_d}{mg} = \frac{sv^2}{Rg} - h \quad (3)$$

设 $h_d = sF_d/mg$,则式(4)可表示为

$$h_d = \frac{sv^2}{Rg} - h \quad (4)$$

当列车以设定速度 v 通过曲线时, $h_d > 0$ 表示形成线路欠超高, $h_d = 0$ 表示此时列车运行速度为平衡速度, $h_d < 0$ 表示线路过超高。当列车以不同速度通过曲线时会出现线路欠超高或过超高的现象,此时转向架构架轴箱弹簧载荷出现趋势项,当列车以平衡速度通过曲线时,轴箱弹簧载荷的趋势项消失。

2.4 电机扭矩波动

由文献[11]可知,高速列车通过坡道时因自身重力分量的影响,会使列车在进入坡道时出现加速或减速现象,为维持列车的平稳匀速运行,系统会对电机输出转矩进行调整,从而导致电机输出转矩出现周期性波动变化。图7给出列车高低速通过相同线路区间时构架2位轴箱弹簧载荷的变化特点。在两种速度等级下,轴箱弹簧载荷趋势项均出现了周期性变化;列车高、低速运行时构架轴箱弹簧趋势载荷变化值分别为 2.5 kN 、 1.1 kN ,由此可知,列车运行速度对构架轴箱弹簧的载荷趋势变化具有较大的影响。轴箱弹簧趋势载荷的出现在一定程度上增加了焊接构架的疲劳损伤,因此对电机输出转矩进行合理调节和控制可有效改善构架的受力状态。

图 7 电机转矩波动工况

2.5 制动停车

当高速列车进站停车时, 需要采取制动减速措施, 目前高速动车组的制动系统主要采用电控空气制动和牵引电机的再生制动, 在紧急情况下一般采用联合制动。图 8 给出列车进站停车时构架轴箱弹簧弹簧和一系减振器载荷时间历程。列车在制动过程中, 首先采用牵引电机再生制动, 列车运行速度不断降低, 当达到一定的速度等级时, 列车进入空气制动阶段; 列车进站时, 由正线进入侧线过道岔, 此时构架轴箱弹簧载荷和一系减振器载荷均出现载荷幅值波动变化, 两种载荷的波动范围分别为 4.9 kN、1.5 kN。

图 8 制动停车载荷曲线

3 疲劳损伤评估

3.1 构架疲劳薄弱区的确定

为分析垂向载荷对焊接构架疲劳性能的影响, 采用局部子模型方法进行有限元仿真计算。在仿真过程中, 构架有限元模型的轴箱弹簧载荷和一系减振器载荷均设置为 1 kN, 方向相同, 计算得到构架轴箱弹簧套筒局部结构的应力响应云图如图 9 所示。根据构架应力分布云图确定焊接构架弹簧套筒局部结构的疲劳危险薄弱点(测点布置见图 9), 并统计不同应力测点在不同载荷作用下的应力响应, 即对应的载荷-应力传递系数, 结果如图 10 所示。结合图 9 可知, 在两种垂向载荷作用下, 构架轴箱弹簧套筒局部结构应力较大位置分布基本一致, 其中一系减振器载荷对构架应力响应的影响更为敏感, 最大载荷-应力传递系数为 6.56 MPa/kN。

(a) 轴箱弹簧载荷作用

(b) 一系减振器载荷作用

图 9 构架端部结构应力云图

3.2 构架应力谱编制

根据有限元仿真分析结果及焊接构架实测轴箱弹簧载荷和一系减振器载荷时间历程曲线来获取构架疲劳薄弱点的应力响应, 进而编制焊接构架一维应力谱。应力谱不仅可有效地反映结构动应力幅值

图 10 载荷-应力传递系数分布

大小，而且能够反映出动应力的作用频次，从而更为全面和准确地反映结构疲劳损伤的本质^[13-14]。在编制一维应力谱时，先对应力时间历程曲线进行扫描，找出动应力幅值的最大值和最小值，再按照式(5)进行分组处理

$$d = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{N} \quad (5)$$

式中， d 为组间距； $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 分别为载荷幅值最大值和最小值； N 为载荷幅值组级数，一般取 16 级。

载荷幅值组的上限值 σ_{iup} 和下限值 σ_{idown} 可以分别按式(6)和(7)计算

$$\sigma_{iup} = \sigma_{\min} + id \quad (6)$$

$$\sigma_{idown} = \sigma_{\min} + (i-1)d \quad (7)$$

式中， i 为载荷谱级数，其最大值为 N 。

图 11 给出了高速列车以速度 350 km/h 运行时焊接构架一位、二位测点 4 位置在不同载荷作用下的应力谱。由图 11 可知，随着应力作用频次的增大，应力幅值呈现减小的趋势，表明在列车服役过程中焊接构架的应力主要以小应力幅值为主。对比轴箱弹簧载荷和一系列减振器载荷单独作用时构架的应力谱可以看出，在相同动应力作用频次下，一系列减振器载荷作用时构架产生的动应力幅值明显高于轴箱弹簧载荷，两种载荷耦合作用下构架的应力幅值均高于轴箱弹簧载荷、一系列减振器载荷的单独作用。对比构架一位、二位的应力谱可知，在耦合载荷作用下，构架一位高应力幅值的循环次数低于构架二位，这应该与构架二位受电机输出扭矩影响较大有关。

3.3 构架疲劳损伤评估

根据 Miner 线性累计损伤理论计算得到测试里程内的构架疲劳损伤值，参考焊接构架的设计寿命里程 L 为 1 500 万 km，可获得整个寿命里程内焊接构架的疲劳损伤 D ，其计算式为

$$D = \frac{L \sum_{i=1}^n \sigma_i^m N_i}{L'C} \quad (8)$$

(a) 构架一位

(b) 构架二位

图 11 构架应力谱

式中， L' 为试验测试里程； σ_i 、 N_i 分别为应力谱中第 i 级的应力幅值和循环次数； m 、 C 为材料参数。

根据式(8)计算得到在列车高速、低速运行时焊接构架一位、二位的疲劳损伤分布，计算结果如图 12 所示。由图 12a 可知，在轴箱弹簧载荷单独作用下，列车高速运行时构架产生的疲劳损伤值明显高于列车低速运行阶段。对比构架一位、二位可以看出，构架一位各测点处的疲劳损伤值均高于构架二位，分析其可能原因为列车在运行过程中电机输出扭矩对轴箱弹簧动态载荷具有一定抑制作用。图 12b 为一系列减振器载荷单独作用时构架各测点处的疲劳损伤分布情况，在相同速度等级下，构架一位、二位的疲劳损伤值差异较小；当列车由速度 200 km/h 增大至 350 km/h 时，构架各测点均出现不同程度的增大，其中构架一位最大疲劳危险点测点 4 的疲劳损伤值由 0.044 增大到 0.188，增大了约 22 倍。图 12c 为耦合垂向载荷作用时焊接构架各测点的疲劳损伤值，在耦合载荷作用下构架各测点处的疲劳损伤值均高于轴箱弹簧载荷和一系列减振器载荷单独作用时产生的疲劳损伤，其中构架一位各测点的疲劳损伤值高于构架二位；列车由速度 200 km/h 增大至 350 km/h 时，构架

一位测点 4 的疲劳损伤值由 0.078 增大到 0.435，增大了约 4.6 倍。

(a) 轴箱弹簧载荷单独作用

(b) 一系减振器载荷单独作用

(c) 耦合载荷作用

图 12 疲劳损伤计算结果

为反映不同载荷对焊接构架疲劳损伤的影响程度，定义疲劳损伤影响参数 α ，其表达式为

$$\alpha = \frac{D_j}{D_c} \quad (9)$$

式中， D_j 为轴箱弹簧载荷和一系减振器载荷单独作用时产生的疲劳损伤值； D_c 为耦合载荷作用时产生的疲劳损伤值。根据式(9)计算得到不同载荷单独作用对构架疲劳损伤的影响程度，计算结果如图 13 所示。由图 13a 可知，轴箱弹簧载荷对构

架一位侧的疲劳损伤影响参数略大于构架二位侧；列车低速运行时的疲劳损伤影响参数明显高于列车高速运行阶段，这可能与列车低速过曲线导致轴箱弹簧趋势载荷变化范围增大有关。图 13b 给出了一系减振器载荷对构架疲劳损伤的影响参数，构架一位侧的疲劳损伤影响参数小于构架二位侧；随着列车运行速度的增大，疲劳损伤影响参数呈现减小的趋势，其中构架测点 5 处的疲劳影响参数最大，最大值为 0.9。结合构架载荷-应力传递系数可推断，构架测点 5 位置处的疲劳损伤主要由一系减振器载荷引起，受轴箱弹簧载荷的影响较小。

(a) 轴箱弹簧载荷的影响

(b) 一系减振器载荷的影响

图 13 疲劳损伤影响参数分布

4 结论

本文以高速动车组构架垂向载荷为研究对象，利用轴箱弹簧力传感器和一系减振器力传感器获取不同垂向载荷的时间历程曲线，在此基础上分析构架垂向载荷的变化特征，最后依据线性疲劳损伤累计算则计算得到不同载荷作用下的疲劳损伤分布。该研究结果可以焊接构架的优化设计及疲劳损伤评估方法研究提供一定的理论参考。

(1) 结合车载 GPS、陀螺仪信号, 分析列车启动加速、高低速直线运行、线路曲线通过、电机转矩波动、制动停车等典型工况下的构架垂向载荷的变化特征; 对比分析了构架一位、二位侧的垂向载荷, 结果表明, 构架二位侧垂向载荷受电机输出扭矩的影响较为敏感。

(2) 采用有限元仿真分析的方法获取构架端部不同测点位置在轴箱弹簧载荷和一系减振器载荷单独作用时的载荷-应力传递系数, 结果表明, 在两种垂向载荷作用下, 构架端部结构应力较大位置分布基本一致, 其中一系减振器载荷对构架端部应力分布的影响更为敏感, 最大载荷-应力传递系数为 5.56 MPa/kN。

(3) 根据 Miner 线性累计损伤理论计算得到整个寿命里程内的构架疲劳损伤值, 结果表明, 在耦合载荷作用下构架各测点处的疲劳损伤值均高于轴箱弹簧载荷和一系减振器载荷单独作用时产生的疲劳损伤; 列车由速度 200 km/h 增大至 350 km/h 时, 构架一位测点 4 的疲劳损伤值由 0.078 增大到 0.435, 增大了约 4.6 倍。

(4) 定义了疲劳损伤影响参数来反映不同载荷对构架损伤的影响程度, 得到轴箱弹簧载荷对构架一位侧的疲劳损伤影响参数大于构架二位侧; 随着列车运行速度的增大, 两种载荷作用下的疲劳损伤影响参数均呈现减小的趋势, 这与耦合载荷作用下的疲劳累计损伤变化有关。

参 考 文 献

- [1] 王文静, 惠晓龙, 马纪军. 高速列车设备舱支架疲劳裂纹机理研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(6): 142-147. WANG Wenjing, HUI Xiaolong, MA Jijun. Fatigue crack mechanism research on high speed train equipment cabin frame[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(6): 142-147.
- [2] 李广全, 刘志明, 王文静, 等. 高速动车组齿轮箱疲劳裂纹机理分析研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 99-105. LI Guangquan, LIU Zhiming, WANG Wenjing, et al. Fatigue crack mechanism study on high-speed EMU gearbox[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 99-105.
- [3] 高云霄, 王曦, 邹骅, 等. 基于动应力的转向架构架载荷识别[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 58-63. GAO Yunxiao, WANG Xi, ZOU Hua, et al. Load identification of bogie frame based on dynamic stress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 58-63.
- [4] 刘德刚, 侯卫星, 王凤洲, 等. 基于有限元技术的构件疲劳寿命计算[J]. 铁道学报, 2004, 26(2): 47-52. LIU Degang, HOU Weixing, WANG Fengzhou, et al. Fatigue life analysis of a component based on the finite elements technology[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(2): 47-52.
- [5] 王萌, 李强, 孙守光. 地铁转向架制动载荷识别与分布特征研究[J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(4): 75-78. WANG Meng, LI Qiang, SUN Shouguang. Study on braking force identification and distribution characteristics for metro bogie[J]. Railway Locomotive & Car, 2014, 34(4): 75-78.
- [6] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986. GAO Zhentong. The statistics of fatigue application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1986.
- [7] 李强, 刘志明, 张桂青, 等. 提速客车转向架构架应力分布拟合的研究[J]. 铁道学报, 2001, 23(4): 105-108. LI Qiang, LIU Zhiming, ZHANG Guiqing, et al. Research on distribution of dynamic stress for speed increased passenger car bogies[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(4): 105-108.
- [8] 袁金荣. CRH2-300 型动车组转向架构架动载荷识别研究[M]. 北京: 北京交通大学, 2008. YUAN Jinrong. Study on dynamic load identification of the CRH2-300 EMU bogie frame[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [9] 邹骅, 李强, 孙守光. 基于载荷标定的城际列车转向架构架及应力分布特征研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(10): 27-33. ZOU Hua, LI Qiang, SUN Shouguang. Study on intercity train load spectrum distribution estimation and calibration methods based load demarcation[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(10): 27-33.
- [10] 王文静, 王燕, 孙守光, 等. 高速列车转向架载荷谱长期跟踪试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 84-89. WANG Wenjing, WANG Yan, SUN Shouguang, et al. Long-term load spectrum test of high-speed train bogie[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 84-89.
- [11] 李广全, 王文静, 杨广雪. 高速列车齿轮箱载荷特性分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 270-277. LI Guangquan, WANG Wenjing, YANG Guangxue. Analysis on load characteristics of high-speed train gearbox[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 270-277.
- [12] 杨广雪, 张亚禹, 李广全. 高速列车轴箱弹簧载荷特性与疲劳损伤[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(4): 81-93. YANG Guangxue, ZHANG Yayu, LI Guangquan. Axle

- box spring load characteristics and fatigue damage of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(4): 81-93.
- [13] 张曙光. 高速列车转向架载荷谱测试与建立方法的研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2008, 51(11): 1805-1814. ZHANG Shuguang. Study on testing and establishment method for the load spectrum of bogie frame for high-speed trains[J]. Science China Technology Sciences, 2008, 51(11): 1805-1814.
- [14] 薛海, 李强, 胡伟钢. 1 万 t 重载货车车钩载荷分布特性研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 48-52. XUE Hai, LI Qiang, HU Weigang. Research on coupler load distribution characteristics of 10 000 t heavy haul train[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(9): 48-52.
-
- 作者简介: 张亚禹(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为结构可靠性。
E-mail: 14116343@bjtu.edu.cn

第 9 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

航空发动机叶片激光冲击复合工艺及其强化机理研究

作者: 罗思海

毕业学校: 空军工程大学

指导教师: 李应红

航空发动机是飞机的“心脏”，叶片疲劳断裂是我国飞机“心脏病”问题的主要表现之一。因此，提高叶片疲劳强度、预防疲劳断裂是提高部队飞行安全和战斗力面临的重大课题。一般情况下，部件在服役过程中最大工作应力和裂纹起源都位于材料表面。因此，利用表面强化技术改变材料表面完整性，提高部件疲劳性能是行之有效的方法手段，这也符合“中国制造 2025”中关于抗疲劳制造技术相关要求。

激光冲击强化(Laser shock peening, LSP)是一种新型表面强化技术，其原理是通过高能激光诱导产生高压(GPa 量级)等离子体冲击波，利用冲击波的“力”效应，实现零部件疲劳性能提升。航空发动机叶片现有的振动光饰、气相渗铝等表面强化技术，与激光冲击强化原理类似，其共性基础都是在材料表层形成微观组织与残余应力的梯度结构。

论文在科技部 973 课题、国家自然科学基金等项目支持下，创新研究思路，将激光冲击强化与航空发动机叶片中现有的表面强化技术交叉，开展激光冲击复合工艺基础理论与应用技术研究，这也是当前机械制造加工领域的国际前沿热点。其核心关键科学问题是复合加工加工作用下材料表层梯度结构演化、稳定性及强化机理，论文取得的主要创新点如下。

(1) 在准确表征冲击波作用下钛合金和镍基合金表面微观组织基础上，发现并揭示了激光冲击钛合金表面非晶化机制；进一步揭示了中等层错能材料位错运动和孪晶变形的竞争细化机理；在此基础上，采用原位 TEM 加热的方法揭示了强化表层梯度结构热稳定性机理，研究成果完善和发展了激光冲击表面纳米化理论。

(2) 揭示了力/热/渗等因素耦合作用下材料表层结构的演化规律，研究确定了激光冲击与振动光饰组合工艺顺序和方法，提高钛合金疲劳强度 24.2%；提出了激光冲击表面纳米化增强渗铝方法，可兼顾渗层致密性和疲劳性能，显著提高叶片疲劳强度 48.23%；针对损伤叶片修复成形不成性的问题，提出了激光冲击组合修复工艺方法，实现损伤修复叶片疲劳强度提高 23.6%。

研究成果深化了抗疲劳制造理论，发展了激光冲击与叶片现有加工技术的复合加工耦合工艺方法，可为航空发动机叶片抗疲劳加工制造提供理论指导和数据支撑，进一步拓展激光冲击强化研究和应用范围。