

文章编号:1005-0523(2022)02-0094-08



# 轨道车辆车体用 Q460ME 钢板疲劳性能研究

何永强<sup>1,2</sup>, 金希红<sup>1,2</sup>, 朱卫<sup>1,2</sup>, 肖乾<sup>3,4,5</sup>, 陈道云<sup>3,4,5</sup>

(1. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001; 3. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013; 4. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 5. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

**摘要:**为了研究轨道车辆车体用 Q460ME 钢板疲劳性能, 采用 MTS Landmark 电液伺服疲劳试验机对 Q460ME 2 个厚度规格的钢板进行应力比为-0.1, 加载频率为 60 Hz 的疲劳试验, 试验基于升降法展开, 通过应力集中系数修正计算得到了不同存活率下的条件疲劳极限, 将测试结果与 DVS1612 标准进行对比, 结果表明: 本次试验试样的应力集中系数为 1.25; Q460ME 钢板 2 个厚度规格的试样升降图均能闭合, 由升降图计算得到的疲劳极限值整体呈现随厚度增加而降低的现象, 其中: 5 mm 和 8 mm 厚度的 Q460ME 疲劳强度值明显大于 DVS1612 标准中的 S355 钢材疲劳强度值; Q460ME 钢板 2 个厚度规格试样的断口截面可见明显的裂纹源、裂纹扩展区及瞬断区, 疲劳裂纹源发生于矩形截面表面拐角处且为单裂纹源, 裂纹扩展区有明显的“海滩状”疲劳辉纹, 整体呈扇形分布, 与裂纹局部扩展方向垂直, 瞬断区为韧性断裂, 反映了试样良好的韧性特征。

**关键词:**轨道车辆; Q460ME 钢板; 疲劳极限; 断口分析

**中图分类号:** U270.12

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 何永强, 金希红, 朱卫, 等. 轨道车辆车体用 Q460ME 钢板疲劳性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(2): 94-101.

## Study on Fatigue Performance of Q460ME Steel Plate for Rail Vehicle Body

He Yongqiang<sup>1,2</sup>, Jin Xihong<sup>1,2</sup>, Zhu Wei<sup>1,2</sup>, Xiao Qian<sup>3,4,5</sup>, Chen Daoyun<sup>3,4,5</sup>

(1. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China; 2. State Key Laboratory of Heavy-Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration, Zhuzhou 412001, China; 3. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 5. Key Laboratory of Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to study the fatigue performance of Q460ME steel plate for rail vehicle body, MTS landmark electro-hydraulic servo fatigue testing machine was used to carry out fatigue tests on Q460ME steel plates with two types of thickness specifications. The stress ratio was -0.1 and the loading frequency was 60 Hz. The tests were carried out based on lifting method. The conditional fatigue limit parameters under different survival rates were calculated by means of stress concentration factor correction. The test results were compared with DVS1612 standard. It can be shown that the stress concentration factor of the test sample is 1.25, the lifting diagrams of Q460ME steel plate with two types of thickness specifications can be closed, and the fatigue limit values calculated by the lifting diagram decrease with the increase of thickness, in which the fatigue strength values of

收稿日期: 2021-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975210); 江西省自然科学基金资助项目(20202BABL214028); 江西省教育厅科技项目(GJJ190346)

Q460ME with 5 mm and 8 mm thickness are significantly higher than that of S355 steel in DVS1612 standard. Obvious crack source, crack propagation zone and instantaneous fracture zone can be seen in the fracture section of three thickness specimens of Q460ME steel plate. The fatigue crack source occurs at the corner of the rectangular section surface and is a single crack source. There are obvious "beach" fatigue striations in the crack propagation zone, which are fan-shaped and perpendicular to the local crack propagation direction. The instantaneous fracture zone is ductile fracture, which reflects the good toughness of the sample.

**Key words:** rail vehicle; Q460ME steel plate; fatigue limit; fracture analysis

**Citation format:** HE Y Q, JIN X H, ZHU W, et al. Study on fatigue performance of Q460ME steel plate for rail vehicle body[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(2): 94–101.

随着铁路运营里程的逐年增加,轨道车辆结构运行的安全性得到越来越多的关注<sup>[1-4]</sup>,如何从材料的角度根本性掌握其疲劳可靠性成为各大车辆主机厂面临的现实问题。与其它破坏形式不同,疲劳破坏具有较强的隐蔽性和突发性,因而获取具有足够可靠度的材料疲劳性能数据将对最终的车辆结构定型生产制造起到决定性的作用<sup>[5-15]</sup>。郭宏超等<sup>[16]</sup>对 Q690D 高强钢的疲劳性能进行试验研究,拟合了母材的 S-N 设计曲线并与现行规范进行比较,结果表明:Q690D 母材与普通钢材相比表现出较高的疲劳抗力,利用扫描电镜分析了不同阶段断口的微观形貌特征,基于零塑性累积应变率假设得到疲劳损伤公式,断口形貌反映了试件的疲劳损伤发展过程,损伤曲线又很好地解释了断口的形成机理。李浩哲等<sup>[17]</sup>采用成组法和升降法,对板厚 0.8 mm 的 SUS301L-DLT 与板厚 2 mm 的 EN1.4318+2G 轨道车辆用不锈钢激光搭接焊接头分别在室温空气环境、低温空气环境和腐蚀环境中进行疲劳试验,结果表明:在循环寿命为  $1 \times 10^7$  次条件下,低温环境的疲劳强度比室温空气环境提高 57.8%,而在盐溶液腐蚀环境中接头疲劳强度降低 25.5%。康澜等<sup>[18]</sup>开展了 Q690D 高强钢的高周疲劳试验,拟合出 Q690D 高强钢的疲劳曲线,结果表明:Q690D 高强钢的疲劳性能远高于普通钢,且比美国钢结构规范(ANSI/AISC 360-10)和欧洲钢结构规范(BSEN 1993-1-9)的计算值要大,说明规范计算值偏保守,钢材的疲劳曲线与其屈服强度高度相关且离散性很强。田长亮等<sup>[19]</sup>采用 INSTRON 材料疲劳试验机对车钩 E 级铸钢进行了低周疲劳试验,得到了 E 级铸钢材料的疲劳过渡寿命,在应变幅控制下材料随着循环次数增加出现了循环软化现象。经数据拟合,得到了 Manson-Coffin 方程、应变-循环周次关系、循环

应力-应变曲线、塑性应变-寿命双对数曲线。

当前,诸多型号钢种的疲劳数据都是通过查阅诸如 DVS1612-2014 等国外标准得到的,然而即使对于同一屈服强度标号的钢材而言,国外和国内生产的钢材在疲劳性能的表现上仍有不小差异。当前我国生产的轨道车辆结构钢材已实现了国产化,因而有必要对各规格的轨道车辆用国产钢材进行系统性的疲劳试验,获取材料疲劳性能的“第一手”数据,用于指导轨道车辆结构的抗疲劳设计。

为此,本文对轨道车辆车体结构常用的 Q460ME 高强钢进行了不同板厚的疲劳性能测试,获取关键疲劳性能参数,对疲劳试样的断口进行宏观和微观层面的断口分析,所得结果可为今后轨道车辆车体结构强度设计提供重要的参考。

## 1 试验材料与设备

本次试验以某型轨道车辆车体结构的 Q460ME 钢板为试验材料,选取 2 种常用板厚(5, 8 mm)的钢板加工成疲劳试样,试样的尺寸依据 ISO 1099-2017 标准设计,如图 1 所示。试验设备为 MTS Landmark 电液伺服疲劳试验机,最大加载载荷为 100 kN,最高加载频率 100 Hz,本次试验采用轴向加载的方式,应力比为-0.1,频率为 60 Hz。

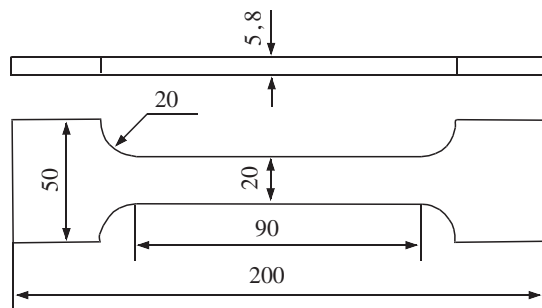


图 1 疲劳试样尺寸图(单位:mm)

Fig.1 Diagram of fatigue specimen dimensions (Unit:mm)

## 2 试验方法

### 2.1 条件疲劳极限测试

对于钢材母材而言,条件疲劳极限对应的循环次数通常选  $1 \times 10^7$  次<sup>[20]</sup>,采用“升降法”<sup>[21]</sup>进行测试,第一根试样选用较高的应力水平,随后试样的应力水平取决于前一根试样的试验结果,凡前一根试样未达到指定寿命发生破坏,则随后的一次试验在低一级的应力水平下进行;凡前一根试样越出,则随后的一次试验在高一级的应力水平下进行,直至升降图“闭合”,闭合的条件是:根据有效数据点的终点为越出或破坏,可设想依次试验的某一应力水平还应存在一待定数据点,若该点与有效数据的起点位于同一应力水平上,则表示闭合,相邻两个应力级间的应力增量通常选为预计疲劳极限的 5% 以内,经计算,本次升降法试验的应力增量取 10 MPa。

中值疲劳强度可由子样平均值来估计,中值疲劳强度估计量为

$$\hat{S}_{50} = \frac{1}{n^*} \sum_{i=1}^n n_i^* S_i^* \quad (1)$$

式中: $i$  为试样序号; $n_i^*$  为对应应力  $S_i^*$  的对子个数; $n^*$  为对子总数; $n$  为试样数。

子样标准差的计算式为

$$s^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n^*} [(S_i^* - \hat{S}_{50})^2 n_i^*]}{n^* - 1}} \quad (2)$$

对应一定存活率的安全疲劳极限为

$$\hat{S}_p = \hat{S}_{50} + u_p \beta s^* \quad (3)$$

式中: $p$  为存活率; $u_p$  为与存活率相关的标准正态偏量,可通过查表获得; $\beta$  为标准差修正因数,可通过查表获得。

### 2.2 应力集中修正

本文研究所用的钢板试样具有明显的过渡圆弧,由于截面变化不均匀,在过渡圆弧的根部存在应力集中现象,导致疲劳试样的断裂位置均位于存在应力集中的过渡圆弧根部,实际试验时断裂位置处的应力比数据记录的应力值要大,这就需要用应力集中系数进行修正,以确保最终测试得到的  $P-S-N$  曲线能够真实反映材料的疲劳性能。对于常见的缺口型结构,通过查阅《应力集中系数手册》便可得到相对应的应力集中系数,而对于本文研究的带台肩圆角的板形零件而言,《应力集中系数手册》

并未直接给出相应的应力集中系数,因而需要通过仿真手段加以确定。

为了验证仿真的准确性,现以《应力集中系数手册》中标准的两侧各有一半圆缺口试件为例进行有限元仿真(如图 2 所示),半圆弧半径为 20 mm,夹持端宽度为 60 mm,板材厚度为 5 mm,试件一端约束,另一端施加轴向拉伸静载荷 10 kN,理论计算可得试件中间处的名义应力为 100 MPa,而仿真后该位置处的最大应力为 131.8 MPa,因而仿真得到的应力集中系数为 1.318,而通过查询《应力集中系数手册》可得该试件的应力集中系数为 1.30,与仿真结果基本一致,从疲劳强度的角度而言,《应力集中系数手册》中的应力集中系数值偏保守。

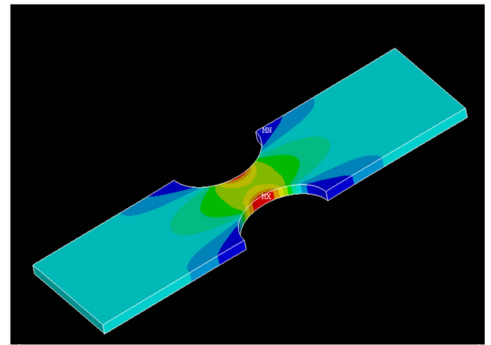
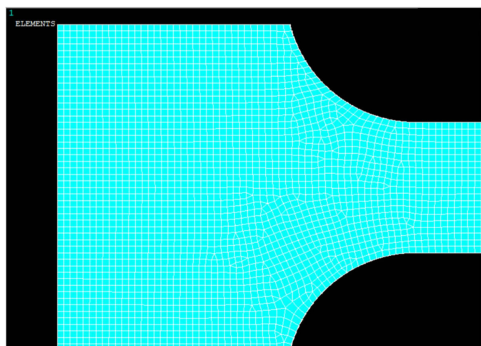


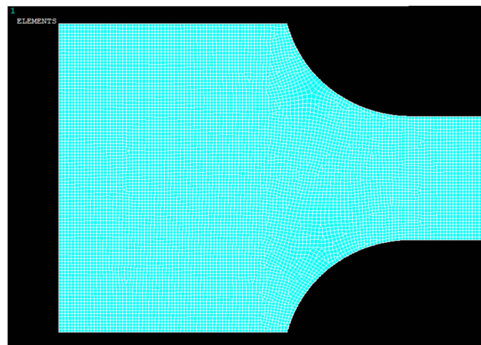
图 2 两侧各有一半圆缺口试件的静拉伸应力响应  
Fig.2 Static tensile stress response of specimens with a semicircular notch on both sides

进一步以本文的 5 mm 板状试样为例,进行静态拉伸仿真分析。由有限元仿真基本理论可知,网格密度大小将对仿真结果产生一定影响,通常来说,网格密度越大,仿真结果越准确,但由此导致的仿真计算时间也将变长。选取 1 mm 和 0.5 mm 网格尺寸对试样模型进行网格划分,划分后的局部细节如图 3 所示。

施加轴向载荷 10 kN,计算得到 1 mm 和 2 mm 网格尺寸模型过渡圆弧根部的最大应力分别为 126.7 MPa 和 129.4 MPa,如图 4 所示。不考虑应力集中时的该位置名义应力为 100 MPa,因而仿真计算得到的试样应力集中系数分别为 1.267 和 1.294,由此可见,网格大小在 1 mm 以下时的应力集中系数仿真结果相差不大。按照偏保守的设计思想,结合上一根试件的仿真和手册数据等比例换算,本文试件的应力集中系数确定为 1.25。除特殊说明,本文后续图表中的应力值均为应力集中修正后的应力值。



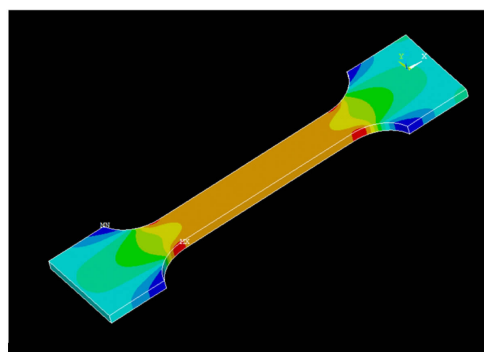
(a) Mesh size 1 mm



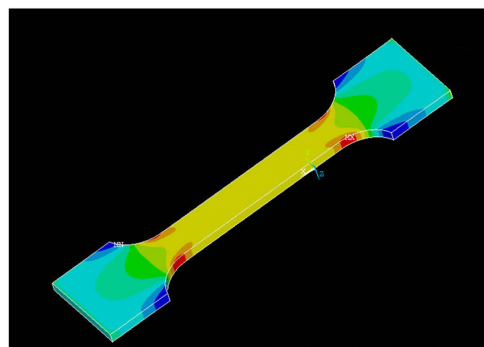
(b) Mesh size 0.5 mm

图 3 2 种网格尺寸的试样有限元模型

Fig.3 Finite element models of specimens with two mesh sizes



(a) Mesh size 1 mm



(b) Mesh size 0.5 mm

图 4 试验用试件的静拉伸应力响应

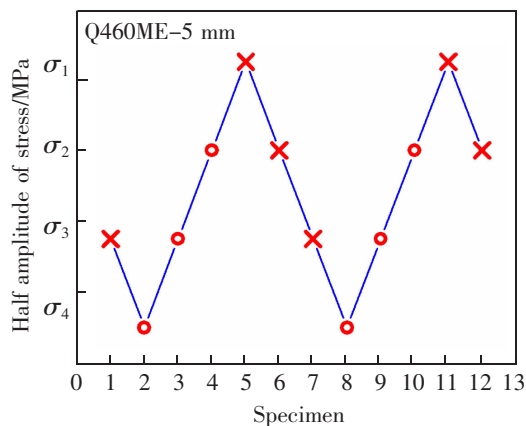
Fig.4 Static tensile stress response of test specimen

### 3 条件疲劳极限试验结果

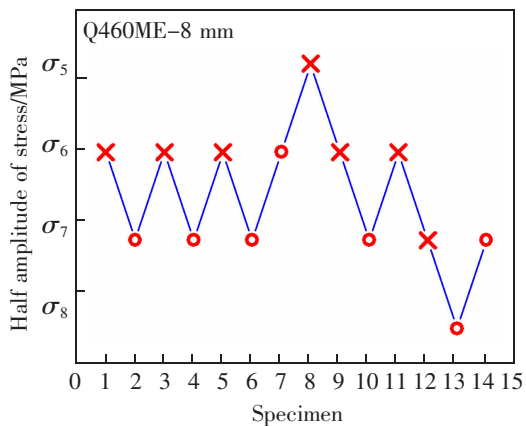
因数据保密要求,文中部分应力结果以符号形式给出,数据处理所用的方法可供读者参考借鉴。

对 2 种规格试样的升降法测试数据绘制升降图,如图 5 所示(“X”表示“断裂”,“O”表示“未断裂”)。由图 5 可见,2 张升降图均闭合且子样对的数量均为 7,结合式(1)~式(3)可计算得到不同存活率及置信度下的条件疲劳极限。DVS1612 标准中的疲劳极限值给出的是循环应力中的最大值,而本文研究过程中的应力值选取的是应力半幅值,为了将试验结果与 DVS1612 标准进行比较,需要将循环应力的应力半幅值转化为应力最大值,转换关系按照循环应力比公式及应力半幅值计算公式推导而来,如下

$$\sigma_{max} = \frac{2\sigma_a}{1-R_\sigma} \quad (4)$$



(a) 5 mm thickness



(b) 8 mm thickness

图 5 条件疲劳极限升降图

Fig.5 Lifting diagram of conditional fatigue limit

式中： $\sigma_{\max}$  为应力最大值； $\sigma_a$  为应力幅值； $R_\sigma$  为循环应力比。DVS1612 标准中的疲劳极限值是以 MKJ 图的形式给出的，MKJ 图的横坐标为循环应力比，纵坐标为循环应力最大值，各曲线计算如下

$$\sigma_{\max}=150 \cdot 1.04^{-x} \frac{2(1-0.3R_\sigma)}{1.3(1-R_\sigma)} \quad (5)$$

式中： $x$  为 MKJ 曲线的指数值。

不同规格试样的 MKJ 曲线指数值是不同的，可以通过试验结果反推得到。例如，本文试验的循环应力比为 -0.1，将指定存活率及置信度的疲劳极限值及循环应力比代入式(5)，可反求出 MKJ 曲线的指数值，如表 1 所示。

表 1 DVS1612 标准中 MKJ 曲线的指数值  $x$

Tab.1 Index value  $x$  of MKJ curve in DVS1612 standard

| Thickness/mm | Reliability/% | $x$   |
|--------------|---------------|-------|
| 5            | 95.0          | -9.85 |
|              | 99.0          | -8.69 |
|              | 99.5          | -8.26 |
| 8            | 95.0          | -7.05 |
|              | 99.0          | -6.20 |
|              | 99.5          | -5.91 |

选取全范围内的应力比(-1~1)并代入式(5)，可求得 MKJ 曲线上的各点纵坐标值，进而可绘制出整条 MKJ 曲线。DVS1612 标准中只给出了 2 种材料的 MKJ 曲线(存活率为 99.5%)，即 S355 钢及 S235 钢，本文选取 S355 钢的母材 MKJ 曲线作为参照，将 5, 8 mm 厚度钢板在不同存活率及不同置信度下的 MKJ 曲线绘制在一张图中，如图 6 所示。

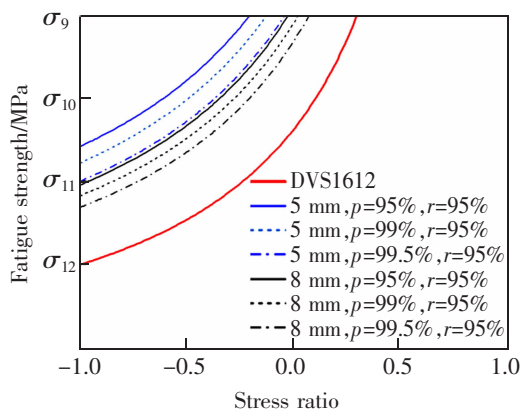


图 6 试验值与 DVS1612 标准的 MKJ 曲线对比

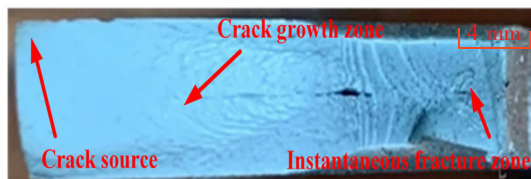
Fig.6 Comparison between test value and MKJ curve of DVS1612 standard

由图 6 可见，各规格试样在不同存活率及置信度下的疲劳强度均随着循环应力比的增加而增大，其中：在相同的存活率及置信度下，疲劳强度值随着板厚的增加而降低，这与疲劳强度的“尺寸效应”<sup>[22]</sup>相吻合；同一板厚的疲劳强度值随着存活率的增加而降低，这与疲劳可靠性的统计学原理相吻合。

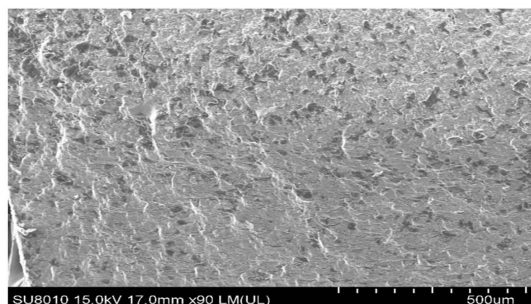
#### 4 断口分析

对 2 种板厚的疲劳试样进行断口分析，其中：宏观断口由光学相机拍摄，裂纹扩展区及韧窝瞬断区由扫描电镜拍摄，如图 7 所示。

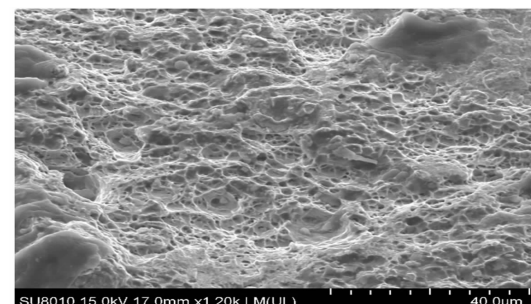
由图 7 可见，各板厚规格的疲劳试样断口均可见明显的裂纹源、裂纹扩展区、瞬断区，疲劳裂纹源发生于矩形截面表面拐角处且为单裂纹源，裂纹扩展区有明显的“海滩状”疲劳辉纹，疲劳辉纹基本上是一系列分布均匀的条纹，整体呈扇形分布，与裂纹局部扩展方向垂直，每条疲劳辉纹均代表一次载荷循环。图中的韧窝瞬断区电镜观察结果表明瞬断区为韧性断裂，反映了试样良好的韧性特征。



(a) Macro fracture of 5 mm thickness sample



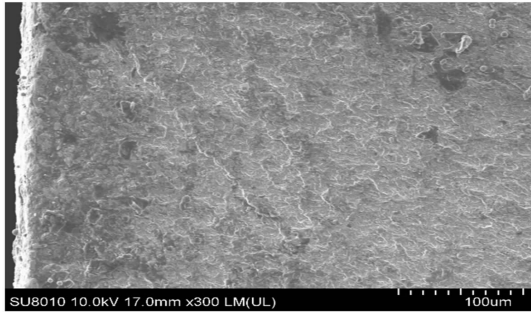
(b) Crack growth region of 5 mm thickness sample



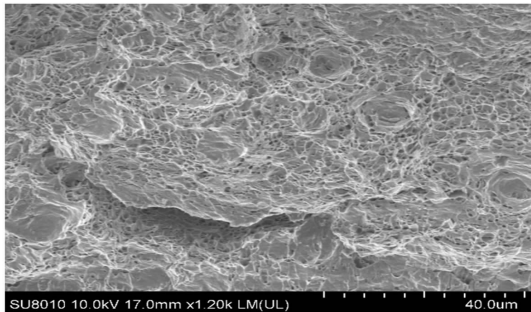
(c) Dimple instantaneous fracture zone of 5 mm thickness sample



(d) Macro fracture of 8 mm thickness sample



(e) Crack growth region of 8 mm thickness sample



(f) Dimple instantaneous fracture zone of 8 mm thickness sample

图7 试样断口分析

Fig.7 Sample fracture analysis

## 5 结论

采用升降法并参照 DVS1612 标准对轨道车辆车体用 Q460ME 钢板疲劳性能进行了研究,得出以下结论。

1) 基于《应力集中系数手册》及有限元仿真技术确定试样的应力集中系数,该应力集中系数用于对名义应力进行修正,更能反映试样实际受力状态的真实应力,最终确认本次试验试样的应力集中系数为 1.25。

2) Q460ME 钢板 2 个厚度规格的试样升降图均能闭合,由升降图计算得到的疲劳极限值整体呈现随厚度增加而降低的现象,其中:5 mm 和 8 mm 厚度的 Q460ME 疲劳强度值明显大于 DVS1612 标

准中的 S355 钢材疲劳强度值。

3) Q460ME 钢板 2 个厚度规格试样的断口分析表明:断裂截面可见明显的裂纹源、裂纹扩展区及瞬断区,疲劳裂纹源发生于矩形截面表面拐角处且为单裂纹源,裂纹扩展区有明显的“海滩状”疲劳辉纹,整体呈扇形分布,与裂纹局部扩展方向垂直,瞬断区为韧性断裂,反映了试样良好的韧性特征。

## 参考文献:

- [1] 肖乾,姜雄峰,刘海涛,等. 铁道车轮踏面损伤实时监测方法研究综述[J]. 华东交通大学学报,2021,38(4):99-112.  
XIAO Q,JIANG X F,LIU H T,et al. Research on real-time monitoring methods for railroad wheel tread defects;a review[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(4):99-112.
- [2] 肖守讷,江兰馨,蒋维,等. 复合材料在轨道交通车辆中的应用与展望[J]. 交通运输工程学报,2021,21(1):154-176.  
XIAO S N,JIANG L X,JIANG W,et al. Application and prospect of composite materials in rail transit vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2021,21(1):154-176.
- [3] 文永蓬,郑晓明,尚慧琳,等. 考虑不同辐板的城市轨道交通车轮热力耦合特性研究[J]. 机械强度,2018,40(1):165-170.  
WEN Y P,ZHENG X M,SHANG H L,et al. Study on the thermal-mechanical coupling for different plate urban railway vehicle wheels[J]. Journal of Mechanical Strength,2018,40(1):165-170.
- [4] 杨龙,阳光武,肖守讷,等. 轨道车辆设备箱体不同结构薄板性能对比研究[J]. 铁道机车车辆,2019,39(2):7-14.  
YANG L,YANG G W,XIAO S N,et al. Contrastive study on performance of different thin boards of rail vehicle equipment boxes[J]. Railway Locomotive & Car,2019,39(2):7-14.
- [5] SHARMA S K,SHARMA R C,LEE J. Effect of rail vehicle-track coupled dynamics on fatigue failure of coil spring in a suspension system[J]. Applied Sciences,2021,11(6):1-17.
- [6] 赵鑫,温泽峰,王衡禹,等. 中国轨道交通轮轨滚动接触疲劳研究进展[J]. 交通运输工程学报,2021,21(1):1-35.

- ZHAO X, WEN Z F, WANG H Y, et al. Research progress on wheel/rail rolling contact fatigue of rail transit in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 1-35.
- [7] 吴圣川, 任鑫焱, 康国政, 等. 铁路车辆部件抗疲劳评估的进展与挑战[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 81-114.
- WU S C, REN X Y, KANG G Z, et al. Progress and challenge on fatigue resistance assessment of railway vehicle components[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 81-114.
- [8] 刘宇轩, 吴圣川, 李存海, 等. 轴箱内置型铁路车轴疲劳性能与寿命评估[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(3): 100-108.
- LIU Y X, WU S C, LI C H, et al. Fatigue performance and life assessment of railway axle with inside axle box[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(3): 100-108.
- [9] 卢耀辉, 向鹏霖, 曾京, 等. 高速列车转向架构架动应力计算与疲劳全寿命预测[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(1): 62-70.
- LU Y H, XIANG P L, ZENG J, et al. Dynamic stress calculation and fatigue whole life prediction of bogie frame for high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(1): 62-70.
- [10] 卢耀辉, 张德文, 赵智堂, 等. 焊接残余应力对动车组铝合金车体疲劳强度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(4): 94-103.
- LU Y H, ZHANG D W, ZHAO Z T, et al. Influence of welding residual stress on fatigue strength for EMU aluminum alloy carbody[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(4): 94-103.
- [11] 杨冰, 廖贞, 吴圣川, 等. 增材制造技术发展和在先进轨道交通装备中的应用展望[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 132-153.
- YANG B, LIAO Z, WU S C, et al. Development of additive manufacturing technology and its application prospect in advanced rail transit equipment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 132-153.
- [12] HU YANAN, WU SHENGCHUAN, WITHERS P J, et al. Corrosion fatigue lifetime assessment of high-speed railway axle EA4T steel with artificial scratch[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 245: 107588.
- [13] 尹鸿祥, 吴毅, 张关震, 等. 低温对 EA4T 车轴钢疲劳性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(1): 123-129.
- YIN H X, WU Y, ZHANG G Z, et al. Effect of low temperature on fatigue properties of EA4T axle steel[J]. China Railway Science, 2021, 42(1): 123-129.
- [14] SHEN X L, LU L T, ZENG D F. Fatigue failure analysis of high strength bolts used for high-speed railway vehicle braking discs[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 115: 104661.
- [15] CHEN R, CHEN J Y, WANG P, et al. Impact of wheel profile evolution on wheel-rail dynamic interaction and surface initiated rolling contact fatigue in turnouts[J]. Wear, 2019, 438/439: 203109.
- [16] 郭宏超, 王金怀, 刘云贺, 等. Q690D 高强钢焊缝连接疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(9): 1-9.
- GUO H C, WAN J H, LIU Y H, et al. Experimental study on fatigue performance of Q690D high strength steel welded joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(9): 1-9.
- [17] 李浩哲, 韩晓辉, 杨志斌, 等. 环境条件对轨道车辆用不锈钢激光焊接接头疲劳强度的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(21): 39-42.
- LI H Z, HAN X H, YANG Z B, et al. Effect of environmental condition on fatigue strength of laser welded joint of stainless steel for rail vehicles[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(21): 39-42.
- [18] 康澜, 洪书涛. Q690D 高强钢的疲劳性能试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 35-42.
- KANG L, HONG S T. Experimental investigation on fatigue properties of Q690D high strength steel[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 35-42.
- [19] 田长亮, 宋德晶, 崔世海, 等. 车钩 E 级铸钢轴向往等幅低周疲劳性能分析[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(3): 47-52.
- TIAN C L, SONG D J, CUI S H, et al. Fatigue-performance analysis of axial constant-amplitude low cycle for grade E cast steel coupler[J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(3): 47-52.
- [20] 田洪雷, 孙维光, 杨文超, 等. 大型结构部件多损伤点疲劳试验载荷等效方法研究[J]. 机械强度, 2021, 43(2): 434-441.
- TIAN H L, SUN W G, YANG W C, et al. Load equivalence

test method for fatigue life of multisite-damage large size structure part[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(2):434-441.

- [21] 汪洁,胡绪腾,贾旭,等. 盘用材料缺口特征尺寸对缺口强度的影响[J]. 航空发动机, 2021, 47(2):68-73.

WANG J, HU X T, JIA X, et al. The influence of notch characteristic size of disc material on notch strength[J]. Aeroengine, 2021, 47(2):68-73.

- [22] 马也飞,宋竹满,张思倩,等. 小尺度 CA6NM 马氏体不锈钢样品疲劳性能评价研究[J]. 金属学报, 2018, 54(10):1359-1367.

MA Y F, SONG Z M, ZHANG S Q, et al. Evaluation of fatigue properties of CA6NM martensite stainless steel using miniature specimens[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(10):1359-1367.



第一作者:何永强(1979—),男,高级工程师,研究方向为机车服役性技术。E-mail:hyg-0815@qq.com。



通信作者:陈道云(1988—),男,讲师,博士,研究方向为结构强度与可靠性。E-mail:chendaoyun@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:刘棉玲)