

空气弹簧气室压力对地铁车辆转向架焊接构架疲劳强度的影响^{*}

程亚军^{1,2} 胡忠安² 张晓艳²

(1. 中南大学交通运输工程学院, 410075, 长沙;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春//第一作者, 教授级高级工程师)

摘 要 针对焊接构架侧梁内腔作为空气弹簧附加气室的地铁转向架, 运用国际铁路联盟给出的 Goodman-Smith 疲劳极限法, 以转向架焊接构架上盖板单边角焊缝、下盖板和内部加强筋板双边角焊缝为研究对象, 在 EN 13749 标准的主要运营工况下, 分析考虑空气弹簧气室压力交变作用对焊接构架侧梁角焊缝焊趾疲劳强度的影响。结果表明: 考虑空气弹簧气室压力的交变作用时, 上盖板单边角焊缝疲劳特性相比于不考虑空气弹簧气室压力的交变作用会明显恶化, 而下盖板和内部加强筋板双边角焊缝疲劳特性变化不明显。因此, 针对焊接构架侧梁角焊缝进行疲劳强度评估时, 需要考虑空气弹簧气室压力的影响更为合理。

关键词 地铁; 车辆转向架; 焊接构架; 空气弹簧气室压力; 疲劳强度

中图分类号 U270.331^{+.8}

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.03.019

Influence of Air Spring Chamber Pressure on the Welded Frame Fatigue Strength for Metro Vehicle Bogie

CHENG Yajun, HU Zhongan, ZHANG Xiaoyan

Abstract Taking the metro vehicle bogie with the side beam inner cavity of the welded frame as an air spring added gas chamber, the Goodman-Smith fatigue limit method made by IUR (International Union of Railways) is applied to the single side fillet weld, the lower cover plate bilateral fillet weld and the internal reinforcement plate bilateral fillet weld on the welded bogie frame, to analyze the influence of the pressure alternation of air spring chamber on the fatigue strength of the weld toe for the side beam of the welded frame under the main operating conditions of EN13749. The results show that given the alternating effects of air spring chamber pressure, the fatigue properties of the single side fillet weld on the upper cover will obviously deteriorate compared with the condition

without the alternating effects, while the fatigue properties changes of the lower cover plate and the inner stiffener plate with double side fillet weld are not obvious. Therefore, in fatigue strength evaluation, it is more reasonable to consider the influence of air spring chamber pressure on the side girder of welded frames.

Key words metro; vehicle bogie; welded frame; air spring chamber pressure; fatigue strength

First-author's address Central South University School of Traffic & Transportation Engineering, 410075, Changsha, China

转向架焊接构架作为轨道车辆至关重要的承载部件, 受力形式复杂, 容易发生疲劳破坏。因此, 针对其疲劳强度的设计一直是转向架强度设计的关键环节^[1]。对于二系悬挂采用空气弹簧的转向架, 构架侧梁内部作为空气弹簧的附加气室通过节流孔与空气弹簧橡胶气室连通, 当车体发生浮沉和侧滚运动时, 空气弹簧产生变形, 空气弹簧主气室与侧梁附加气室形成的压力差促使空气通过节流孔在两气室之间流动, 存在的阻尼吸收能量而起到减振的作用^[2-4]。

焊接构架侧梁箱型结构由于其焊接成型流程的影响, 上盖板与腹板之间通过单边角焊缝焊接, 下盖板与腹板之间以及内部加强筋板则采用双边角焊缝焊接^[5]。传统的构架强度, 大多依据构架试验标准进行分析, 标准中只考虑车辆运动产生的机械载荷。然而在车辆实际运用中, 为保证地板高度不变, 空气弹簧的压力会随着车辆载客和车体竖向载荷的变化而变化, 此时空气弹簧的交变压力同样会对构架侧梁附加气室产生疲劳损伤。因此, 考虑空气弹簧气室压力的交变作用, 对焊接构架侧梁角

* 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB1200404-02)

焊缝合理的疲劳强度评估就变得更为必要。

本文以某型号的地铁车辆转向架焊接构架侧梁为研究对象,基于国际铁路联盟(UIC)给出的 Goodman-Smith 图法,根据 BS EN13749:2011 中的主要运营工况,在添加气室压力和不添加气室压力的情况下对焊接构架侧梁单边角焊缝和双边角焊缝焊趾分别进行疲劳强度评估,以期得出空气弹簧气室压力对构架侧梁焊缝疲劳强度的影响。

1 Goodman-Smith 图法

1.1 Goodman-Smith 图的绘制

Goodman-Smith 图法对疲劳强度评估的基本思想是将疲劳应力幅值、均值和材料机械性能限制综合考虑在内^[6],做一条封闭的疲劳曲线,将被评价焊接结构的应力结果在图中描点;若应力点位于封闭曲线内便认为疲劳强度合格,反之则认为结构会发生疲劳破坏。Goodman-Smith 图的绘制原理如图 1 所示。图 1 中封闭六边形转折点坐标如表 1 所示。

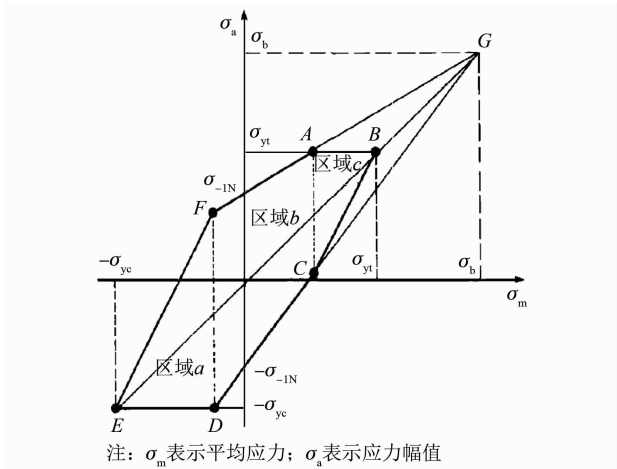


图 1 Goodman-Smith 图绘制原理

表 1 UIC 标准中 Goodman-Smith 图封闭六边形转折点坐标表

转折点	σ_m	σ_a
A	$\frac{\sigma_{yt} - \sigma_{-1N}}{\sigma_b - \sigma_{-1N}} \sigma_b$	σ_{yt}
B	σ_{yt}	σ_{yt}
C	$\frac{\sigma_{yt} - \sigma_{-1N}}{\sigma_b - \sigma_{-1N}} \sigma_b$	$\frac{(\sigma_b + \sigma_{-1N})\sigma_{yt} - 2\sigma_b\sigma_{-1N}}{\sigma_b - \sigma_{-1N}}$
D	$\frac{\sigma_{-1N} - \sigma_{yc}}{\sigma_b + \sigma_{-1N}} \sigma_b$	$-\sigma_{yc}$
E	$-\sigma_{yc}$	$-\sigma_{yc}$
F	$\frac{\sigma_{-1N} - \sigma_{yc}}{\sigma_b + \sigma_{-1N}} \sigma_b$	$\frac{2\sigma_b\sigma_{-1N} + (\sigma_{-1N} - \sigma_b)\sigma_{yc}}{\sigma_b + \sigma_{-1N}}$

注: σ_{-1N} 表示对称循环疲劳强度; σ_b 表示拉伸极限强度; σ_{yt} 表示拉伸屈服极限; σ_{yc} 表示压缩屈服极限

1.2 疲劳安全系数

ERRI B 12/RP 60 将焊缝分为高、低缺口效应焊缝,不同应力等级焊缝的疲劳极限是不同的。针对焊接构架侧梁的角焊缝,采用高缺口效应焊缝标准评价,提取角焊缝焊趾处局部应力通过 Goodman-Smith 图法进行疲劳评估,同时根据式(1)对应力值进行 Goodman 平均应力修正,再根据式(2)计算疲劳安全系数^[7]。

$$\sigma_{-1e} = \frac{\sigma_a}{1 - (\sigma_m / \sigma_b)} \tag{1}$$

$$f = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1e}} \tag{2}$$

式中:

σ_{-1e} ——Goodman 平均应力修正后的应力幅值。

2 分析算例

2.1 转向架焊接构架结构说明

本文以中车长春轨道客车股份有限公司某 B 型地铁车辆转向架构架为例,该构架采用 H 型焊接结构型式,包含横梁、侧梁、纵向辅助梁等结构^[8],如图 2 所示。其中,侧梁结构是采用 S355J2W 板材焊接而成的箱型结构,弹性模量为 2.6×10^5 MPa,密度为 $7\,850$ kg/m³,泊松比为 0.29。在有限元软件中对焊接构架进行建模,其中主体结构采用六面体实体单元离散,轮对采用梁单元模拟,一系、二系悬挂采用弹簧单元模拟,并按照 EN 13749 标准中的主要运营工况施加相应的约束。

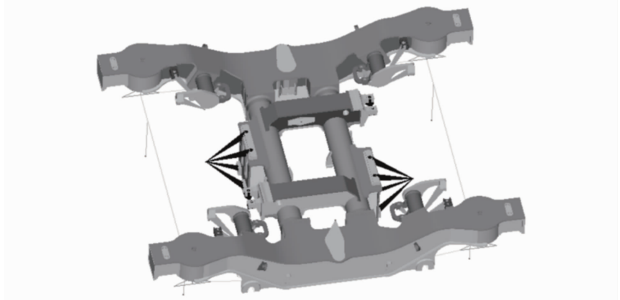


图 2 转向架焊接构架有限元模型

2.2 载荷工况

EN 13749 标准给出了竖向载荷、横向载荷、纵向载荷以及轨道扭曲的计算规则,同时规定了不同载荷组合成主要运营工况的原则。运营工况载荷主要用于转向架焊接构架疲劳强度的计算分析^[9],其主要运营工况载荷条件如表 2 所示。

其中,二系空簧竖向载荷由静态部分、准静态部分和动态部分组成,计算方法见式(3):

$$F_z = (1 \pm \alpha \pm \beta) F_{z,s} \tag{3}$$

式中:

表2 主要运营工况载荷条件

载荷方向	载荷项目
竖向	二系空簧竖向载荷
横向	二系空簧横向载荷
横向	横向止挡载荷
纵向	牵引拉杆座载荷
横向	二系横向减振器载荷
竖向	一系竖向减振器载荷
竖向	抗侧滚扭杆座竖向载荷
扭转	轨道扭曲位移

F_z ——二系空簧含动态的竖向载荷;
 $F_{z,s}$ ——二系空簧静态竖向载荷;
 α, β ——分别表示车体侧滚和浮沉竖向力的动

态变化系数,分别取 0.15 和 0.25。

空气弹簧气室压力的施加原则是:由于空气弹簧气室内压力会随着外界载荷变化而相应变化,气压与负载间存在对应关系^[10],故本文只将车体浮沉动态变化考虑为影响气室压力的因素,计算当车体发生浮沉运动时以及未发生浮沉运动时二系空簧竖向载荷,可根据文献[10]中的气压-负载关系曲线得到相应需要施加的气室压力载荷。车体浮沉竖向力动态变化系数 β 取正值时,模拟车体发生下沉运动,根据气压-负载关系曲线,在侧梁箱型结构内部施加 0.95 MPa 的压力值;当 β 取负值时,模拟车体发生上浮运动,根据气压-负载关系曲线在侧梁箱型结构内部施加 0.35 MPa 的压力值;当 β 取零值时,模拟车体不发生浮沉运动,在侧梁箱型结构内施加初始压力载荷 0.45 MPa。具体组合工况如表 3 所示。

表3 主要运营载荷组合工况

工况序号	主要运营工况载荷组合								侧梁气室载荷/MPa
1	$F_{Z,L}$	$F_{Z,R}$							0.45
2	$(1 + \alpha - \beta) F_{z,s}$	$(1 - \alpha - \beta) F_{z,s}$			$F_{X,t}$	$-F_{P,Z,S}$	$F_{C,Y}$		0.35
3	$(1 + \alpha - \beta) F_{z,s}$	$(1 - \alpha - \beta) F_{z,s}$	$-F_{y,s}$	$-F_{y,b}$	$F_{X,t} - F_{S,Y,S}$	$-F_{P,Z,S}$	$F_{C,Y}$		0.35
4	$(1 + \alpha + \beta) F_{z,s}$	$(1 - \alpha + \beta) F_{z,s}$			$F_{X,t}$	$F_{P,Z,S}$	$F_{C,Y}$		0.95
5	$(1 + \alpha + \beta) F_{z,s}$	$(1 - \alpha + \beta) F_{z,s}$	$-F_{y,s}$	$-F_{y,b}$	$F_{X,t} - F_{S,Y,S}$	$F_{P,Z,S}$	$F_{C,Y}$		0.95
6	$(1 - \alpha - \beta) F_{z,s}$	$(1 + \alpha - \beta) F_{z,s}$			$-F_{X,t}$	$-F_{P,Z,S}$	$-F_{C,Y}$		0.35
7	$(1 - \alpha - \beta) F_{z,s}$	$(1 + \alpha - \beta) F_{z,s}$	$F_{y,s}$	$F_{y,b}$	$-F_{X,t}$	$F_{S,Y,S} - F_{P,Z,S}$	$-F_{C,Y}$		0.35
8	$(1 - \alpha + \beta) F_{z,s}$	$(1 + \alpha + \beta) F_{z,s}$			$-F_{X,t}$	$F_{P,Z,S}$	$-F_{C,Y}$		0.95
9	$(1 - \alpha + \beta) F_{z,s}$	$(1 + \alpha + \beta) F_{z,s}$	$F_{y,s}$	$F_{y,b}$	$-F_{X,t}$	$F_{S,Y,S} - F_{P,Z,S}$	$-F_{C,Y}$		0.95
10	$(1 + \alpha - \beta) F_{z,s}$	$(1 - \alpha - \beta) F_{z,s}$	$-F_{y,s}$	$-F_{y,b}$	$F_{X,t} - F_{S,Y,S}$	$-F_{P,Z,S}$	$F_{C,Y}$	S	0.35
11	$(1 + \alpha + \beta) F_{z,s}$	$(1 - \alpha + \beta) F_{z,s}$	$-F_{y,s}$	$-F_{y,b}$	$F_{X,t} - F_{S,Y,S}$	$F_{P,Z,S}$	$F_{C,Y}$	S	0.95
12	$(1 - \alpha - \beta) F_{z,s}$	$(1 + \alpha - \beta) F_{z,s}$	$F_{y,s}$	$F_{y,b}$	$-F_{X,t}$	$F_{S,Y,S} - F_{P,Z,S}$	$-F_{C,Y}$	S	0.35
13	$(1 - \alpha + \beta) F_{z,s}$	$(1 + \alpha + \beta) F_{z,s}$	$F_{y,s}$	$F_{y,b}$	$-F_{X,t}$	$F_{S,Y,S} - F_{P,Z,S}$	$-F_{C,Y}$	S	0.95
14	$(1 + \alpha - \beta) F_{z,s}$	$(1 - \alpha - \beta) F_{z,s}$	$-F_{y,s}$	$-F_{y,b}$	$F_{X,t} - F_{S,Y,S}$	$-F_{P,Z,S}$	$F_{C,Y}$	-S	0.35
15	$(1 + \alpha + \beta) F_{z,s}$	$(1 - \alpha + \beta) F_{z,s}$	$-F_{y,s}$	$-F_{y,b}$	$F_{X,t} - F_{S,Y,S}$	$F_{P,Z,S}$	$F_{C,Y}$	-S	0.95
16	$(1 - \alpha - \beta) F_{z,s}$	$(1 + \alpha - \beta) F_{z,s}$	$F_{y,s}$	$F_{y,b}$	$-F_{X,t}$	$F_{S,Y,S} - F_{P,Z,S}$	$-F_{C,Y}$	-S	0.35
17	$(1 - \alpha + \beta) F_{z,s}$	$(1 + \alpha + \beta) F_{z,s}$	$F_{y,s}$	$F_{y,b}$	$-F_{X,t}$	$F_{S,Y,S} - F_{P,Z,S}$	$-F_{C,Y}$	-S	0.95

注: $F_{Z,L}, F_{Z,R}$ 表示左右侧竖向载荷; $F_{y,s}$ 表示二系空簧横向载荷; $F_{y,b}$ 表示横向止挡载荷; $F_{X,t}$ 表示牵引拉杆座纵向载荷; $F_{S,Y,S}$ 表示二系横向减振器载荷; $F_{P,Z,S}$ 表示一系竖向减振器载荷; $F_{C,Y}$ 表示抗侧滚扭杆座竖向载荷; S 表示轨道扭曲位移。在不考虑空气弹簧气室压力的情况下,采用主要运营工况载荷组合进行加载计算;在考虑空气弹簧气室压力的情况下,采用主要运营工况载荷组合叠加侧梁气室载荷进行加载计算

2.3 计算结果

对于焊接构架侧梁高切口效应焊缝,在考虑气室载荷作用的主要运营工况下,上盖板单边角焊缝、下盖板双边角焊缝,以及内部加强筋板双边角焊缝受力状态是不同的。Goodman-Smith 图法评价的是焊缝焊趾处的疲劳强度,现选取上盖板单边角焊缝、下盖板双边角焊缝、内部加强筋板双边角焊缝焊趾处节点(节点组选取位置见图 3~4),在不加气室压力的主要运营工况和加气室压力的主要运营工况下

分别运用 Goodman-Smith 图法评价单边角焊缝和双边角焊缝的疲劳强度。结果如图 5~8 所示。

由图 5~8 可知,针对此转向架构架,在不考虑空气弹簧气室压力和考虑空气弹簧气室压力的主要运营工况下,构架侧梁疲劳强度均满足要求。对比分析两种情况下的 Goodman-Smith 图发现,空气弹簧气室压力对上盖板单边角焊缝影响明显,对下盖板双边角焊缝以及内部加强筋板双边角焊缝影响不明显。

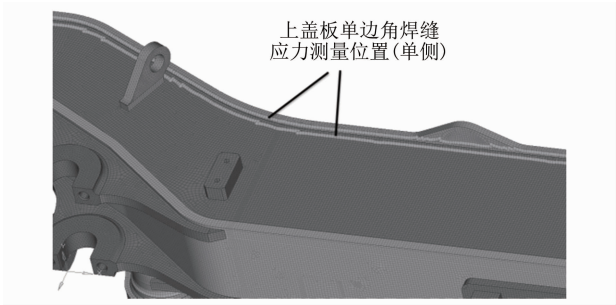


图 3 单边角焊缝应力测量位置

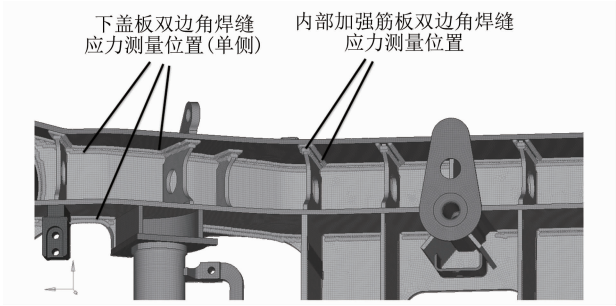


图 4 双边角焊缝应力测量位置

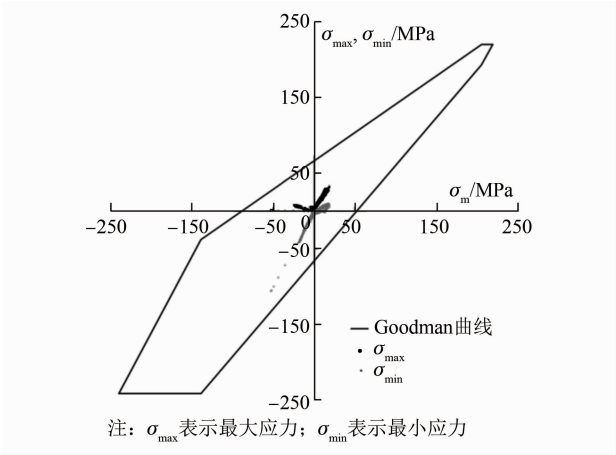


图 5 不加气室压力条件下单边角焊缝 Goodman-Smith 图

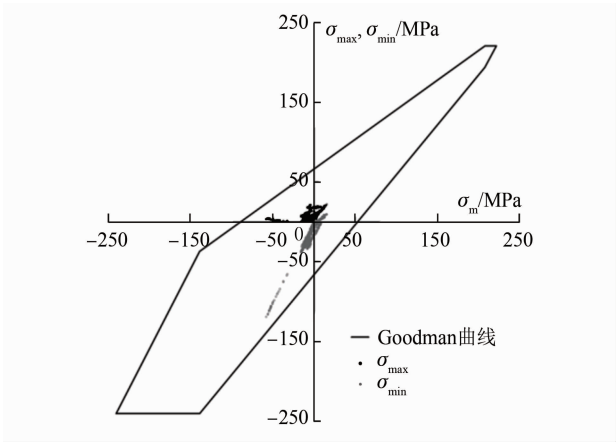


图 6 加气室压力条件下单边角焊缝 Goodman-Smith 图

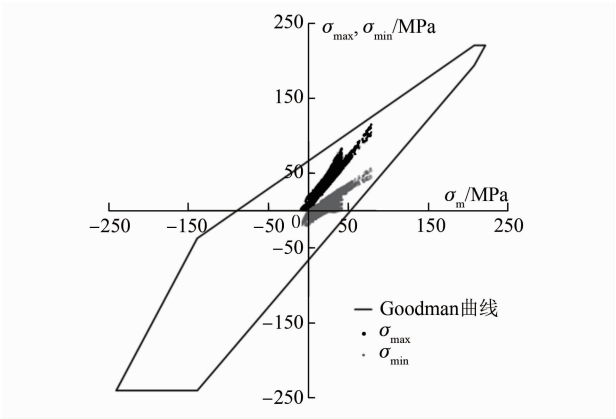


图 7 不加气室压力条件下双边角焊缝 Goodman-Smith 图

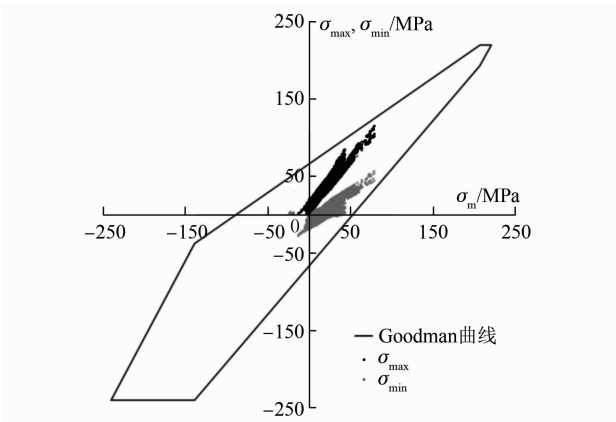


图 8 加气室压力条件下双边角焊缝 Goodman-Smith 图

针对本文焊接构架材料,取高切口效应焊缝的对称循环疲劳强度 $\sigma_{-1N} = 66 \text{ MPa}$,提取单边角焊缝和双边角焊缝焊趾处节点局部应力,依据式(1)进行 Goodman 平均应力修正得到修正后应力幅值,根据式(2)计算安全系数,结果如表 4~5 所示。

表 4 单边角焊缝疲劳评估结果

工况类型	σ_{-1c}/MPa	σ_{-1N}/MPa	f
不考虑气室压力	44.4	66	1.49
考虑气室压力	49.8	66	1.33

表 5 双边角焊缝疲劳评估结果

工况类型	σ_{-1c}/MPa	σ_{-1N}/MPa	f
不考虑气室压力	50.2	66	1.31
考虑气室压力	50.9	66	1.30

由表 4~5 可知,焊接构架侧梁内腔作为空气弹簧附加气室时,在考虑气室压力的主要运营工况下,上盖板单边角焊缝焊趾处应力幅值会有显著增大的现象,而气室压力对下盖板双边角焊缝以及内部加强筋板双边角焊缝焊趾处应力幅值影响不明显。

(下转第 84 页)

交通工具,减少客车、私家车等的交通流量,实现真正意义上的公交优先。

2) 借鉴国外的公共交通发展经验,并结合乌鲁木齐的实际情况,发展智能化交通,对居住在郊外的市民给予更多通勤补贴等措施,改变市民的出行方式,发挥以城市轨道交通为骨干的公共交通最大作用。

4 结语

本文根据乌鲁木齐地铁 1 号线开通以来的运营情况,综合考虑乌鲁木齐城市发展的远期规划和趋势,对乌鲁木齐地铁 1 号线二道桥站周边 500 m、650 m 半径范围内的交通进行了比较详细的调查研究。针对目前二道桥地铁站存在的地铁与其它交通方式接驳不畅的问题,并依据交通一体化设计的目标,提出了通过建设立体停车库、打造立体步行系统、改善公共交通衔接等方式来完善地铁站周边基础设施建设,改善二道桥地铁站周边交通状况。此外,在推动公交优先政策方面也提出了相应的改善建议和方案。期待本文研究成果可为我国城市轨道交通建设与发展提供参考。

参考文献

[1] 王雷.天津地铁 6 号线与其他交通方式的接驳研究[J].现代

城市轨道交通,2016(6): 70.

- [2] CHEW C H. Integrated bus/rail station[J]. Applied Acoustics, 1999(56): 57.
- [3] WEI Z, ZHANG L, JI X R. Study on the Transfer and Connection System Design of Urban Rail Transit[C]//Proceedings of the 2018 International Conference on Energy Development and Environmental Protection. France: Atlantis Press, 2018: 37.
- [4] 骆华荣.浅析城市轨道交通与其他交通方式的有效衔接[J].交通与运输,2011,27(3): 24.
- [5] 陈烨.上海铁路西站南广场综合交通枢纽规划与设计[J].城市轨道交通研究,2008(10): 37.
- [6] 钟志新,潘雷,周略略.广州市地铁站点衔接公交站配置模式研究[J].交通与港航,2019,6(3): 62.
- [7] 杨秋菊,刘小勇,袁家祥,等.乌鲁木齐市轨道交通 1 号线与快速公交的衔接研究[J].交通科技与经济,2015,17(6): 86.
- [8] 何相聚.轨道交通站与慢行交通接驳系统优化设计——以厦门地铁集美学村站为例[J].中外建筑,2018(8): 185.
- [9] 阿布力克木·托合提,朱文瀚,张冠增.大客流背景下乌鲁木齐地铁 1 号线二道桥站的现状分析与改进建议[J].城市轨道交通研究,2018(6): 27.
- [10] 周扬,钱才云.城市发展中集约型公共空间与城市交通的整合策略探究[J].建筑与文化,2014(5): 102.
- [11] 谭惠云.立体式停车场建筑方案设计分析[J].建材与装饰,2019(1): 112.
- [12] 刘波.纽约、伦敦和东京的城市公交补贴机制及对我国的启示[J].城市轨道交通研究,2013(12): 5.

(收稿日期:2019-08-25)

(上接第 78 页)

3 结语

在 EN 13749 标准的主要运营工况下,对比考虑空气弹簧气室压力与不考虑空气弹簧气室压力对转向架焊接构架侧梁上盖板单边角焊缝、下盖板和内部加强筋板双边角焊缝的影响,分析结果表明,考虑空气弹簧气室压力时,上盖板单边角焊缝疲劳性能会明显恶化,而下盖板和内部加强筋板双边角焊缝疲劳性能变化不明显。因此,在对转向架构架的疲劳强度设计中,应当考虑空气弹簧气室压力的交变作用,尤其需要针对上盖板单边角焊缝进行疲劳安全性评估。

参考文献

[1] 刘德刚,刘宏友,李庆升.转向架构架强度试验标准对比[J].铁道车辆,2011(9): 12.

- [2] 董恒.CW-200K 型转向架检修[D].北京:北京交通大学,2007.
- [3] 张利国,张嘉钟,贾力萍,等.空气弹簧的现状及其发展[J].振动与冲击,2007(2): 146.
- [4] 李芾,付茂海,黄运华,等.车辆空气弹簧动力学参数特性研究[J].中国铁道科学,2003(5): 92.
- [5] 耿新宇.基于 ANSYS 的铁道车辆焊接结构分级疲劳强度分析[D].成都:西南交通大学,2013.
- [6] 赵永翔,杨冰,彭佳纯,等.铁道车辆疲劳可靠性设计 Goodman-Smith 图的绘制与应用[J].中国铁道科学,2005(6): 8.
- [7] 王悦东,张佳宇.基于改进的 Goodman 曲线的车轮疲劳强度评估方法研究[J].铁道科学与工程学报,2017(4): 827.
- [8] 安琪,李芾,黄运华,等.基于 JIS 标准的转向架焊接构架疲劳强度评估[J].机车电传动,2009(4): 26.
- [9] 肖守讷,杨冰,曲天威,等.EN13749 标准在机车轴箱体强度分析中的推演应用[J].机车电传动,2013(2): 38.
- [10] 王晓东,吴冬华,唐进元,等.地铁车辆空气弹簧气压负载特性的分析与实验[J].铁道科学与工程学报,2013(5): 99.

(收稿日期:2018-07-03)